



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Mikko-Pekka Viljanen

MODUULIRAKENTEISEN VÄLIAIKAISSILLAN SUUNNITTELU  
RASKAILLE ERIKOISKULJETUKSILLE

Diplomityö

Tarkastaja: professori Reijo Kouhia  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Automaatio-, kone ja materiaalitekniikan tiedekuntaneuvoston kokouksessa 7. maaliskuuta 2012

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

**VILJANEN, MIKKO-PEKKA:** Moduulirakenteisen väliaikaissillan suunnittelu raskaille erikoiskuljetuksille.

Diplomityö, 38 sivua, 48 liitesivua

Toukokuu 2012

Pääaine: Teknillinen mekaniikka

Tarkastaja: professori Reijo Kouhia

Avainsanat: Silta, Väliaikaissilta, Suunnittelu, Moduulirakenne, Erikoiskuljetus, Teräsrakenne

Tämän diplomityön aiheena on moduulirakenteisen väliaikaissillan suunnittelu raskaille erikoiskuljetuksille. Yleisin ongelma raskaan kuljetuksen kuljettamisessa on tieverkostolla oleva heikkorakenteinen silta. Suunniteltavan sillan avulla voidaan heikko tiesilta ylittää ilman varsinaisen sillan kuormittumista. Silta soveltuu myös kapean puron ylitykseen tai käytettäväksi vesialuksen lastausrampina.

Silta suunnitellaan moduulirakenteiseksi, jotta siitä voidaan koota eripituisia ja levyisiä kokoonpanoja. Moduulirakenteen ansiosta siltaa on myös helppo kuljettaa, koska pienen moduulikoon ansiosta silta voidaan pakata jopa rahtikontteihin. Modulaarisuus helpottaa myös sillan käyttöä, koska moduuleista voidaan koota kulloiseenkin tarpeeseen sopivan kokoinen silta.

Työssä esitellään lyhyesti erikoiskuljetustoimintaa sekä maanteillä että suljetuilla alueilla. Näiden esittelyiden jälkeen määritellään eri käyttösovellusten sillalle asettamat vaatimukset. Käytön asettamien vaatimusten lisäksi työssä selvitetään tällaisen rakenteen suunnittelua ohjaavat normit.

Suunnittelukriteerien määrittelyn jälkeen esitetään yksityiskohtaisesti mitä asioita vaativan teräsrakenteen suunnittelussa tulee ottaa huomioon. Työn liitteissä on esitetty yksityiskohtaiset laskelmat rakenteen kestävyuden ja toimivuuden osoittamiseksi.

Näiden laskelmien tuloksena on valmis rakennesuunnitelma sillan valmistamiseksi, joka oli tämän diplomityön tavoite.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanics and Design

**VILJANEN, MIKKO-PEKKA:** The design of a temporary bridge for heavy transport

Master of Science Thesis, 38 pages, 48 Appendix pages

May 2012

Major: Applied mechanics

Examiner: Professor Reijo Kouhia

Keywords: Bridge, Temporary Bridge, Design, Modular structure, Special transport, Steel structure

The topic of this Master of Science Thesis is to design a temporary bridge for heavy transport. A typical problem for heavy transport is weak bridges on the road network. With the temporary bridge it is possible to cross weak bridges without a risk of overloading. It is also possible to cross a narrow river or use the bridge as a loading ramp for a vessel.

The bridge is designed as a modular structure, so it is easy to be assembled in different combinations of length and width. Due to the modular structure the bridge is easy to transport and it can be packed even in cargo containers. The modular structure enables assembly in the size required, so it makes the bridge more multifunctional.

In the Master of Science Thesis there is a brief introduction of heavy transport on the public road network and in closed areas. After the introduction there is an outlining of the requirements set by the different ways of use. In addition to this outlining the regulations controlling building of this kind of structure are defined.

After having defined the criteria for the design, there is a detailed plan of the facts that must be considered in the designing procedure of a demanding steel structure. In the annexes there are detailed calculations to prove the strength and functionality of this construction.

The result of these calculations is a feasible structural design of the bridge, which is the goal of this Master of Science Thesis.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty vuoden 2012 alkupuoliskolla Havator Transportin Tampereen toimipisteen projektisuunnitteluosastolla. Havator toimi diplomityöni tilaajana ja rahoittajana. Kiitokset työni rahoittajalle mielenkiintoisesta ja haastavasta diplomityöaiheesta.

Diplomityöni ohjausryhmään ovat kuuluneet Tampereen Teknilliseltä Yliopistolta ohjaajana ja tarkastajana professori Reijo Kouhia ja Havatorilta ohjaajana suunnittelupäällikkö Terho Isola. Suuret kiitokset diplomityöni ohjaajille sekä koko Havator Transportin projektiosaston henkilökunnalle ohjauksesta, kommenteista ja avunannosta.

Lisäksi haluan kiittää perhettäni koko opiskelujeni aikaisesta kannustuksesta, sekä esittää suurimmat kiitokset vaimolleni Jonnalle kärsivällisyydestä ja henkisestä tuesta opiskelujeni aikana. Kiitän myös kaikkia ystäviäni rentouttavista ja virkistävästä hetkistä opiskeluni aikana.

Tampereella 15.5.2012

# SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
2	Erikoiskuljetukset.....	2
	2.1 Raskaskuljetuksissa käytettävä kalusto.....	3
	2.2 Raskaskuljetukset tieliikenteessä .....	5
	2.3 Raskaskuljetukset suljetulla alueella.....	5
3	Lähtökohdat .....	7
	3.1 Sillan käyttökohteet.....	7
	3.1.1 Käyttö vesialuksen lastaukseen .....	8
	3.2 Muut käyttömahdollisuudet .....	9
4	Siltarakenteen suunnittelu .....	10
	4.1 Sillan kuormitusten määrittely .....	10
	4.2 Sillan päämittojen määrittely .....	11
	4.2.1 Sillan rakenneleveyden määrittely.....	12
	4.2.2 Sillan jännevälien määrittely .....	12
	4.3 Sillan rakenteen suunnittelu .....	13
	4.4 Sillan moduulien liitosrakenteen suunnittelu.....	16
5	Normien mukainen rakenneratkaisu .....	19
	5.1 Normien mukainen mitoituskuormitus .....	19
	5.1.1 Kuormitustapaukset .....	20
	5.1.2 Mitoituskuormitukset.....	22
	5.2 Normien mukainen rakenteen kestävyys .....	24
	5.3 Normit täyttävä rakenneratkaisu .....	27
	5.4 Rakenneosien paikallisen kestävyuden varmistus .....	30
	5.4.1 Liitosrakenteen kestävyuden varmistus.....	30
	5.4.2 Uuman ja laippojen pistekuormakestävyuden varmistus.....	33
	5.4.3 Nostolenkkien kiinnityspisteiden kestävyuden varmistus .....	34
	5.5 Valmistustekniset vaatimukset.....	35
6	Yhteenveto .....	37
	Liite 1 .....	39
	Liite 2 .....	50
	Liite 3 .....	60
	Liite 3.1 .....	65
	Liite 3.2 .....	74
	Liite 4 .....	79
	Liite 5 .....	82
	Liite 6 .....	83
	Lähteet.....	86
	Kuvat.....	88

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Akselimassa	Ajoneuvon yhden akselin tiehen kohdistama kuormitus.
Erikoiskuljetus	Kuljetus, joka on massaltaan tai mitoiltaan normaaliliikenteessä sallittua suurempi. Leveys yli 2.6 m, ajoneuvoyhdistelmän pituus yli 16.5 m tai moduuliyhdistelmällä 25,25 m ja korkeus yli 4.2 m
Esikorotus	Pitkillä palkeilla yleisesti käytetty menetelmä, jolla pienennetään kuormituksesta johtuvan taipuman vaikutusta. Kuormittamaton palkki valmistetaan sen verran kuperaksi, että se maksimikuormituksella taipuu haluttuun asentoon, esimerkiksi suoraksi.
Kiilapala	Teräslevyosa, jonka avulla suorista moduuleista koottuun siltaan saadaan haluttu esikorotus.
Lavetti	Yleisnimitys raskaalle erikoiskuljetusperävaunulle.
LC	Tulee englannin kielen sanoista load case. Tällä etuliitteellä ja järjestysnumerolla merkitään tämän työn laskelmissa tutkittuja kuormitustapauksia.
LM	Tulee englannin kielen sanoista load model. Normissa EN 1991-2 tällä etuliitteellä ja järjestysnumerolla merkitään normin mukaisia kuormitustapauksia.
Moduuli	Yksi sillan osa, joita yhteen liittämällä saadaan siltalohko.
Moduulirakenne	Rakenne, joka koostuu toisiinsa liitettävistä paloista, joista voidaan koota erilaisia kokoonpanoja.
Siltalohko	Yhden moduulin levyinen sillan pituinen osakokoonpano, joita vierekkäin asentamalla saadaan koottua silta.
Vapaat mittarajat	Vapaat mittarajat ovat kuormatun ajoneuvon maksimimitat, joiden puitteissa voi erikoiskuljetuksia kuljettaa ilman kuljetuslupaa. Kuorma-autolle leveys 4 m, pituus 12 m ja korkeus 4,40 m. Ajoneuvoyhdistelmälle leveys 4 m, pituus 30 m ja korkeus 4,40 m.
Väliaikaissilta	Silta, joka voidaan kuljettaa paloina käyttöpaikalle ja purkaa uudelleen käyttöä varten. Silta voidaan koota olemassa olevan sillan päälle, tai se voidaan kokonaisena asentaa esimerkiksi kapean joen yli.

# 1 JOHDANTO

Tämän diplomityön tarkoitus on suunnitella moduulirakenteinen väliaikaissilta raskaille erikoiskuljetuksille. Silta, joka voidaan asentaa olemassa olevan sillan päälle, tai käyttää varsinaisena siltana. Tällaisen sillan suunnittelun tekee poikkeukselliseksi se, että sillan rakenteen tulee olla mahdollisimman siro ja kevyt. Sillalta vaaditaan kantavuutta enemmän kuin keskiverrolta maatiesillalta, mutta se pitäisi helposti pystyä purkamaan osiin ja kuljettamaan minne tahansa.

Sillan käyttötarkoitus on mahdollistaa entistä raskaampien kuljetusten suorittaminen normaalilla tieverkolla, sekä lisätä raskaiden kuljetusten käytössä olevia reittejä. Entistä suurempien kuljetusten tarve kasvaa jatkuvasti, koska teollisuus pyrkii valmistamaan aina vain suurempia kappaleita.

Työn alussa esitellään yleisesti erikoiskuljetustoimintaa, jonka jälkeen seuraa suunnitteluprojektin lähtökohtien määrittelyluku. Lähtökohdat luvussa käydään läpi perusteet sillan tarpeelle ja määritellään sillan käyttötarkoituksen asettamat vaatimukset.

Pohjatietoja käsittelevien lukujen jälkeen luvussa neljä käsitellään kokonaisvaltaisesti koko vaativan rakenteen suunnitteluprosessiin vaikuttavat tekijät, kuten kuormitukset ja mittarajoitteet. Kuormitusten ja mittarajoitteiden avulla määritellään sillan alustava rakennemalli. Tässä luvussa määritellään myös vaatimukset sillan liitosrakenteen toteuttamiseksi.

Luvussa viisi esitetään yksityiskohtaisesti kaikki rakenteen mitoitusperusteet. Alustavaa rakennemallia muokataan niin kauan, että se täyttää kaikki normien ja käytön asettamat vaatimukset. Luvussa viisi kuvatulla tavalla osoitetaan suunnittelun tuloksena syntyneen sillan täyttävän kaikki sille asetetut vaatimukset.

Työn loppuyhteenvedossa esitellään diplomityön tulokset ja kommentit suunnitteluprosessin toteuttamisesta.

## 2 ERIKOISKULJETUKSET

Erikoiskuljetuksella tarkoitetaan kuormaamattoman tai jakamattomalla esineellä kuormatun ajoneuvon taikka ajoneuvoyhdistelmän kuljetusta, jossa ylitetään ainakin yksi ajoneuvon käytöstä tiellä annetun asetuksen mukaan tiellä yleisesti sallittu mitta tai massa [1]. Erikoiskuljetusten suorittaminen on tarkoin säädeltyä toimintaa. Vaatimukset kuljetuksen suorittamiseksi ja siinä käytettävästä kalustosta on esitetty Liikenneministeriön päätöksessä erikoiskuljetuksista ja erikoiskuljetusajoneuvoista. Jotta ylimassaisia tai vapaat mittarajat ylittäviä kuljetuksia voidaan kuljettaa tieverkolla, tarvitsee kuljetukseen olla lupa. Suomessa luvan myöntää Pirkanmaan Elinkeino-, Liikenne ja Ympäristökeskus, luvan myöntäjä määrittelee reitin ja suurimmat sallitut kuljetuksen mitat ja massan. Yleisin syy lupa-anomuksen hylkäämiseen on reitillä oleva kantavuudeltaan rajoitettu silta, jota ei voida kiertää.

Suurin osa erikoiskuljetuksista on niin sanottuja pieniä erikoiskuljetuksia, joissa vain vähän ylitetään yleisesti sallitut mitta- ja massarajat. Tällaisia kuljetuksia ovat tyypillisesti erilaiset työkoneet, työmaaparakit ja rakennuselementit. Näissä kuljetuksissa on harvoin tiestöstä johtuvia ongelmia. Ongelmat, joihin tämä diplomityö etsii ratkaisuja, syntyvät erittäin raskaiden kuljetusten yhteydessä. Suomessa tieverkon kantavuus alkaa rajoittaa kuljetusmahdollisuuksia, kun yhdistelmän kokonaispaino nousee yli 120 tonnin.

Erittäin raskaita kuljetuksia on lukumääräisesti huomattavasti vähemmän kuin pieniä, mutta niiden merkitys teollisuudelle ja energiantuotannolle on suuri. Tyypillinen erittäin raskas kuljetus on muuntaja-, generaattori-, turbiini- tai moottorikuljetus. Tällaisissa kuljetuksissa kuljetuksen kokonaispaino voi olla jopa 400 tonnia. Näin raskaita kappaleita voidaan kuljettaa vain harvoilla tieosuuksilla, ja vain hyvin harvat sillat kestävät näin suuria massoja.

Tieverkon rajoitettu kantavuus pakottaa usein raskaimpien kuljetusten yhteydessä käyttämään vesi- tai kiskokuljetusta. Tämä rajoittaa huomattavasti alueita, joille erittäin raskaita kuljetuksia voidaan kuljettaa. Yksi tällainen yhteiskunnan kannalta kriittinen kuljetettava hyvin raskas kappale on sähkön kantaverkon muuntajat, joita on sijoitettu ympäri Suomea, ne ovat massaltaan noin 300 tonnia. Tällaisen suurmuuntajan tyypillinen kuljetus on esitetty kuvassa 1.





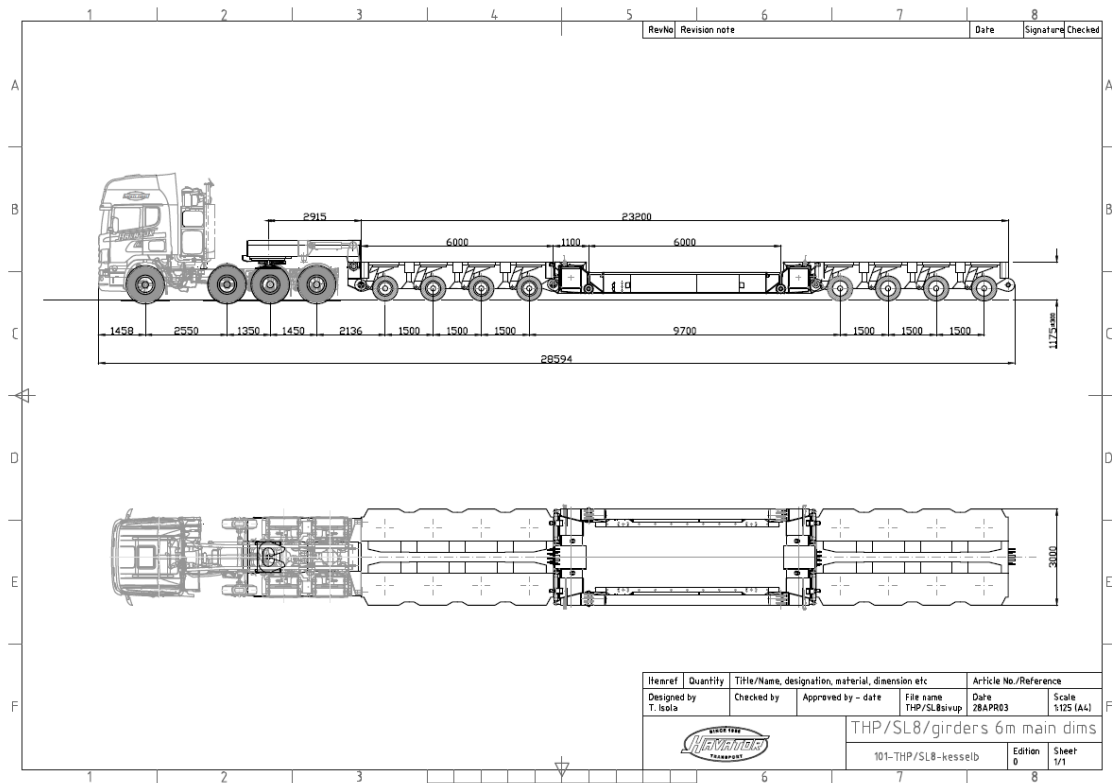
Kuva 1: Kantaverkkomuuntajan kuljetus, muuntajan paino 283 tonnia ja yhdistelmän kokonaispaino yli 400 tonnia.

## 2.1 Raskaskuljetuksissa käytettävä kalusto

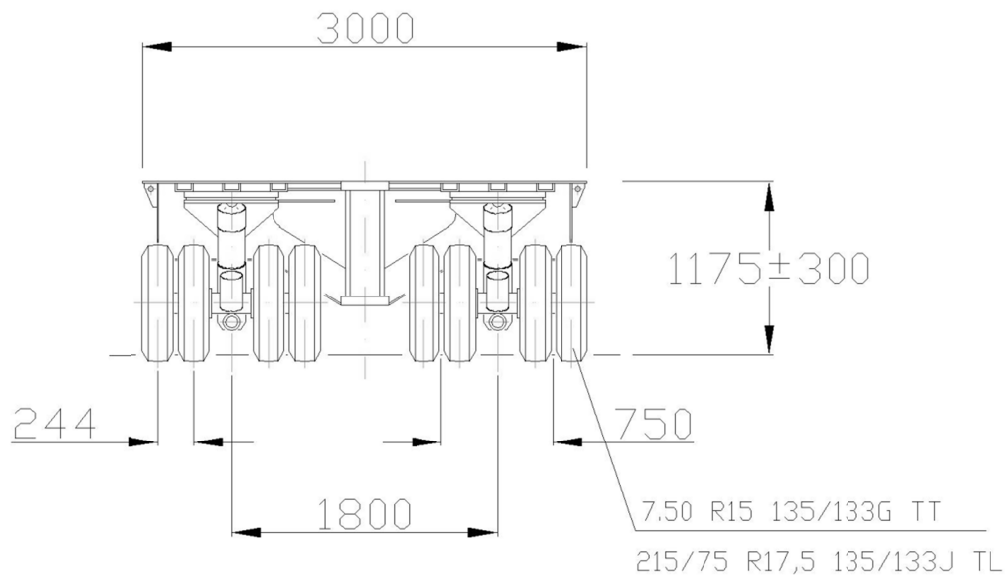
Raskaskuljetuksissa käytettävä kalusto on hyvin monipuolista. Pääsääntöisesti raskaskuljetuksissa käytettävässä kalustossa on enemmän akseleita kuin normaalissa ajoneuvoyhdistelmässä, ja akselleille on sallittu tyypillisesti myös normaaliliikenteen kuormia suuremmat kuormat. Raskaissa kuljetuksissa käytetään moniakselisia perävaunuja, joiden akselit ovat tyypillisesti pakko-ohjattuja, eli ne seuraavat automaattisesti vetoauton ajolinjaa, ja niitä voidaan ohjata myös käsin. Tämän ansiosta pitkääkin yhdistelmää pystytään ohjaamaan tarkasti pienessä tilassa.

Raskaimmat kuljetukset kuljetetaan pääsääntöisesti moduulirakenteisilla erikoiskuljetusperävaunuilla. Tällaiset perävaunut koostuvat 2-6 akselin akselistomoduleista, joita voidaan liittää peräkkäin tai rinnakkain tarvittava määrä. Moduuliakselit ovat hydraulisesti jousitettuja. Hydraulijousituksella saavutetaan tasainen painojakauma akselien kesken, ja sen avulla voidaan säätää perävaunun korkeutta. Raskaimpien akselistojen tekninen kantavuus on yli 30 tonnia akselia kohti, mutta yleisillä teillä liikuttaessa yli 15 tonnin akselimassoja voidaan käyttää vain harvinaisissa poikkeustapauksissa.

Raskaimpiin kuljetuksiin soveltuvaa kalustoa tekee vain muutama valmistaja maailmassa, ja kaluston rakenneratkaisut ovat samankaltaisia.



Kuva 2: Tyypillinen raskaskuljetusajoneuvo.



Kuva 3: Raskaskuljetusperävaunun akselistorakenne, joka koostuu kahdesta pendeliakselista.

Kuvassa 2 on tyypillinen raskaskuljetusyhdistelmä, perävaunu on varustettu sivupalkein, joiden avulla korkeita kappaleita voidaan kuljettaa mahdollisimman matalalla. Tyypillisesti raskaskuljetusperävaunut ovat 2.75 m tai 3 m leveitä, ja akselisto on toteu-

tettu n.1,5 metrin akselivälein olevilla pendeliakseleilla yksikkö- tai paripyörin. Tyypillinen akseliston rakenne on esitelty kuvassa 3.

Raskaskuljetuksia vetämässä käytetään voimakkaita erikoisvoimansiirrolla varustettuja kuorma-autoja. Vetoautoja voi olla yksi tai useampia, kuten kuvassa 1, jossa on kolme autoa. Vetoautojen määrän tulee olla sellainen, että Liikenneministeriön päätöksen erikoiskuljetuksista ja erikoiskuljetusajoneuvoista määrittelemät kokonaismassan ja vetoauton tehon sekä yhdistelmän kokonaismassan ja vetävien akselien yhteismassan suhde on riittävä.

## 2.2 Raskaskuljetukset tieliikenteessä

Normaalisti raskaat erikoiskuljetukset liikkuvat kuten normaaliliikenne. Tyypillinen raskaskuljetus ei suuresti poikkea mitoiltaan normaalista raskaasta ajoneuvoyhdistelmästä, ainoastaan yhdistelmän massa on huomattavasti suurempi. Kuljetuksen massasta johtuen raskaat kuljetukset liikkuvat hitaammalla nopeudella kuin normaali liikenne. Normaalista korkeammat akselipainot asettavat usein rajoituksia suurimmalle sallitulle nopeudelle. Akselin valmistaja saattaa määrittellä alennettuja nopeuksia akselimassan kasvaessa, ja lisäksi Liikenneministeriön päätös erikoiskuljetuksista rajoittaa erikoiskuljetusten suurimman sallitun huippunopeuden 60 kilometriin tunnissa.

Tieliikenteessä liikkuu satunnaisesti myös erittäin suuria erikoiskuljetuksia. Tällaisten kuljetusten mitat voivat olla huomattavasti normaaliliikenteen mittoja suurempia, pituus voi olla yli 50 metriä ja leveys ja korkeus yli 10 metriä. Tällaiset kuljetukset joutuvat käyttämään hyvin poikkeavia ajolinjoja, ja tarvittaessa kokonaisia tieosuuksia joudutaan sulkemaan. Tyypillistä suurten erikoiskuljetusten ajolinjoille on se, että risteysalueilla joudutaan käyttämään vastakkaisen liikenteen kaistaa riittävän tilan saavuttamiseksi. Tällaiset kuljetukset luonnollisesti aiheuttavat haittaa muille tienkäyttäjille, mutta huolellisella liikenteen ohjauksella muun liikenteen haitat pyritään minimoimaan. Liikennehaitan minimoimiseksi tällaiset kuljetukset liikkuvat vain hiljaisen liikenteen aikaan, eli usein öisin.

## 2.3 Raskaskuljetukset suljetulla alueella

Suljetun alueen raskaskuljetukset eivät teknisesti juurikaan eroa maantiellä suoritetuista kuljetuksista. Suljetuilla alueilla ei vain ole maantien asettamia koko- ja painorajoituksia. Suljetulla alueella voidaan kuljettaa hyvinkin suuria kappaleita asettamalla useita lavetteja rinnakkain tai peräkkäin. Käytettäessä kuvassa 4 esiintyviä tietokoneohjattuja Goldhofer PST-E akselistoja on usean lavetin yhtäaikaisten käyttö helppoa, koska kaikkia käytettäviä yksiköitä ohjataan yhdellä kauko-ohjaintalaitteella. Tietokoneohjatun PST-E lavetin paras ominaisuus on lavetin rajattomat ohjailuominaisuudet. Lavetin jokainen pendeliakseli kääntyy 135 astetta [3], ja niitä voidaan ohjata yksilöllisesti, joten kaikki liikesuunnat ovat mahdollisia. Tämän ansiosta lavetit voidaan sijoittaa vapaasti



Kuva 4: Kuvassa telakalla siirrettävä lohko, jonka halkaisija on n. 35 m, leveys n. 9 m ja paino n.1000 tonnia. Kuljetuskalustona on 2 x 26 akselinen hydraulisella voimansiirrolla varustettu tietokoneohjattu Goldhofer PST-E moduulilavetti.

toisiinsa nähden, esimerkiksi toinen pitkittäin ja toinen poikittain, ja edelleen voidaan liikkua kaikkiin haluttuihin suuntiin.

Voidaan sanoa, että suljetulla alueella voidaan kuljettaa niin suuria kappaleita kuin alueen tilat sallivat. Samoin kappaleen painoa suljetulla alueella rajoittaa ainoastaan maapohjan ja käytettävän kaluston kantavuus. Raskaimpien käytössä olevien lavettien akselikantavuus on yli 30 tonnia akselia kohden, joka harvoin asettaa rajoituksia kuljetuksille. Maailmalla on suoritettu suljetulla alueella yli 10 000 tonnin kappaleiden siirtoja laveteilla, ja Suomen suurin siirto on 2260 tonnia.

Tyypillinen suljetun alueen siirto on kappaleen lastaus tai purku vesikulkuneuvoon, tai kappaleen siirto tuotantopaikalta kokoonpanoon. Tällaisia kappaleita ovat voimalaitoskomponentit ja telakoilla valmistettavat laivalohkot. Kuvassa 4 on esimerkki tyypillisestä keskikokoisesta suljetun alueen siirrosta. Tämän työn aiheena olevan sillan yksi käyttötarkoitus on tulla helpottamaan erittäin suurten kappaleiden lastausta vesialuksiin.

## 3 LÄHTÖKOHDAT

### 3.1 Sillan käyttökohteet

Tarve väliaikaiselle sillalle perustuu tarpeeseen kasvattaa tieverkolla kuljetettavien kappaleiden massaa ja laajentaa raskaiden kuljetusten käytössä olevaa reitistöä. Nykyaikainen teollisuus pyrkii valmistamaan tuotteensa mahdollisimman valmiiksi tuotantolaitoksissaan, jolloin kuljettavat kappaleet voivat olla hyvinkin suuria ja raskaita.

Kantavuudeltaan rajoitetut tieosuudet asettavat rajoituksia raskaille kuljetuksille. Erityisesti kantavuudeltaan rajoitetut sillat aiheuttavat ongelmia raskaiden kuljetusten reittisuunnittelulle, koska sillan kiertäminen ei aina ole edes mahdollista. Sillan avulla kuljetuksia rajoittavia heikkoja tieosuuksia voidaan ylittää turvallisesti, silta voidaan esimerkiksi asentaa heikon sillan päälle sillan ylityksen ajaksi.

Yleisesti Suomen päätieverkosto on hyvin kantavaa, ja sillä sallitaan hyvinkin raskaita kuljetuksia, mutta tieverkon siltojen kantavuus on monesti heikompi kuin perustien kantavuus. Siltojen kantavuutta rajoittavista tekijöistä merkittävin on siltojen korkea ikä. Vuosikymmeniä sitten rakennetuissa silloissa ei osattu ennakoida tämän päivän kuljetusten tarpeita, vaikka silloiseen tarpeeseen ne olivatkin vahvarakenteisia. Tilanne siltojen kantavuuden suhteen toki parantuu jatkuvasti, kun vanhoja huonokuntoisia siltoja uusitaan tämän päivän vaatimuksia vastaaviksi. Siltahankkeiden korkeista kustannuksista johtuen siltojen uudistus on vuosikymmenien projekti, joten väliaikaisratkaisulle on selkeä tarve. Monesti jo yksikin heikkorakenteinen silta saattaa aiheuttaa jopa satojen kilometrien kierron, tai estää kuljetuksen kokonaan. Tästä syystä helposti asennettava väliaikaissilta parantaa huomattavasti mahdollisuuksia kuljettaa raskaita kuormia.

Toinen sillan käyttösovelluksista on sillan käyttäminen lastausrampina vesikuluneuvon lastaukseen. Pitkää lastausrampia käyttämällä voidaan kansilastialus lastata ja purkaa ilman merkittäviä laiturirakenteita. Tämä on suuri etu toteutettaessa yksittäisiä suuria kuljetuksia. Esimerkiksi saaristoon rakennettavan tuulipuiston komponentit voidaan kuljettaa saarelle proomulla, ja sillan avulla kappaleet purkaa saarelle ilman saaren rantaan rakennettavaa laituria.

Väliaikaissillan tärkein käyttökohde on kantavuudeltaan rajoitettujen tiesiltojen ylitys raskailla kuljetuksilla. Näitä kantavuudeltaan raskaille kuljetuksille riittämättömiä siltoja on Suomessa paljon, koska noin puolet Liikenneviraston hallinnassa olevista silloista on rakennettu ennen vuotta 1970 [2]. Vaikka iäkkäille silloille on tehty perusrannuksia, eivät niiden kantavuudet vastaa täysin tämän päivän vaatimuksia. Toisaalta

harvinaisia erittäin raskaita kuljetuksia varten on äärimmäisen epätaloudellista vahvistaa tai peruskorjata normaaliliikenteen vaatimukset täyttävää siltaa. Väliaikaissilta on oiva ratkaisu näiden siltojen satunnaiseen ylitykseen. Väliaikaissiltaa käyttämällä voidaan olemassa olevan sillan ylikuormitus estää, koska väliaikaissilta ei tukeudu olemassa olevan sillan rakenteisiin.

Väliaikaissilta voidaan tukea olemassa olevan sillan tukien kohdalta, jos sillan kantavuutta rajoittava tekijä on sillan taivutuskestävyys. Mikäli olemassa olevan sillan tuetkaan eivät kestä, väliaikaissilta voidaan tukea täysin sillan ulkopuolelta, mikäli sen jännemitta vain riittää. Liikenneviraston tilastojen mukaan Liikenneviraston hallinnassa olevien siltojen keskimääräinen jännemittojen summa on 26,5 metriä, ja keskimääräinen pituus 30,5 metriä. Näiden tilastojen perusteella voidaan todeta, että keskimääräisen sillan ylitykseen riittää melko lyhytkin väliaikaissilta.

Väliaikaissilta tulee suunnitella niin, että se voidaan nopeasti asentaa ja poistaa käyttöpaikalla, ja ettei käyttöpaikalla tarvita suuria valmistelutöitä ennen sillan käyttöä. Nopean asennusajan merkitys korostuu käytettäessä siltaa vilkasliikenteisellä tiellä, jolloin nopealla asennusajalla minimoidaan muulle liikenteelle aiheutuva haitta. Silta tulee myös suunnitella niin, että erittäin vilkkaan liikenteen teillä silta voidaan koota valmiiksi käyttöpaikan läheisyydessä, ja kuljettaa paikalle kokonaisuutena. Tällöin käyttöpaikalle valmiina tuotu silta vain nostetaan mobiilinosturilla pois kuljetusajoneuvosta ja asemoidaan paikoilleen. Kokonaisuutena käyttöpaikalle tuodun sillan asennus ja purku-aika on noin 1-2 tuntia, joten raskaan kuljetuksen sillan ylityksestä aiheutuva liikennekatko on vain muutamia tunteja.

Koska silta on tarkoitus suunnitella mahdollisimman moneen käyttöpaikkaan sopivaksi, on luonnollista suunnitella sillan rakenne koostumaan erikokoisista moduuleista. Näistä moduuleista voidaan koota käyttökohteeseen sopivan pituinen ja levyinen konstruktio. Moduulirakenteen ansiosta silta on helppo kuljettaa minne tahansa, koska siltamoduulit suunnitellaan kooltaan konttiin sopiviksi. Sillan moduulirakenteesta on etua, koska kaikkiin käyttöpaikkoihin ei ole mahdollista kuljettaa siltaa kokonaisuutena tai käyttää sillan kokonaisuutena nostamiseen pystyvää nosturia. Tarvittaessa silta voidaan kuljettaa käyttöpaikalle normaaleilla kontinkuljetusajoneuvoilla ja koota ylitettävän sillan päälle kuorma-autoalustaisella kuormausnosturilla. Tällaisella kalustolla kyetään toimimaan kaikissa sellaisissa olosuhteissa joissa raskaalla kuljetuksella voidaan liikua.

### **3.1.1 Käyttö vesialuksen lastaukseen**

Vesialuksen kuormauksessa siltaa käytetään lähes samaan tapaan kuin sillan ylityksessä. Silta toimii aluksen lastauksessa samoin kuin perinteinen autolautan tai roro-aluksen kiinteälatausramppi, eli rampin toinen pää kiinnitetään alukseen, ja toinen lasketaan laiturille. Siltaa ei ole tarkoitus käyttää satamalaiturin korvaajana normaalissa rahtiliikenteessä, vaan mahdollistaa poikkeuksellisten lastien kuljetus poikkeuksellisiin paikkoihin. Tällaisia kuljetuksia ovat tyypillisesti proomuilla kuljetettavat koneet ja laitteet.

Tyypillinen proomulla kuljetettava tuote on niin suuri teollisuuden laite tai laitteiston osa, että sitä ei voida maanteitse kuljettaa. Yleensä suurten kappaleiden valmistuspaikan läheisyydestä on satama, jossa kuorma voidaan lastata, muuta purkupaikan löytäminen on usein osoittautunut haasteelliseksi. Tällaisissa tilanteissa sillan avulla voidaan kuorma purkaa sopivaan paikkaan, jonne proomulla on mahdollista tulla, ja mihin on kuorman kuljettamiseen sopiva tie.

Siltaa voidaan myös hyödyntää kuorman purussa heikolle laiturille, samoin kuin heikon sillan ylityksessä. Tällöin silta asennetaan olemassa olevan laiturin päälle. Näin toimittaessa voidaan laiturille tulevat kuormitukset siirtää pois laiturin reunan usein heikolta alueelta paremmin kantavalle maaperälle.

Sillan käyttö vesialuksen lastaukseen luo ylärajan sillan kuormituksen kestävyysvaatimukselle, koska tyypillisesti vesialuksia lastataan suljetuilla alueilla, missä ei ole tieliikenteen tapaan rajoituksia akseli- ja kokonaismassojen suhteen. Tämä tarkoittaa sitä, että sillan avulla proomulle lastattava kuorma voi painaa jopa tuhansia tonneja. Tämän perusteella sillan tulisi kestää likimain yhtä paljon kuormaa kuin raskas erikoiskuljetuskalusto pystyy kuljettamaan.

### **3.2 Muut käyttömahdollisuudet**

Siltaa voidaan käyttää myös muihin käyttötarkoituksiin kuin esteiden ylityksiin. Vahvan kotelorakenteen ansiosta silta soveltuu hyvin käytettäväksi esimerkiksi työskentelyalustana paikoissa, joissa kantavia tukipisteitä on rajoitetusti. Tästä syystä sillan kannella tulisi olla mahdollisimman hyvä pistekuormakestävyys. Esimerkiksi, saattaa tulla tilanne, jossa raskas kappale joudutaan laskemaan pienikokoisten tukijalkojen varaan sillan kannelle, tai kappaletta joudutaan käsittelemään hydraulisilla tunkeilla sillan päällä. Tällaisissa tapauksissa jopa satojen kilonewtonien suuruiset pistekuormat eivät ole harvinaisia. Tästä syystä sillan rakenne suunnitellaan mahdollisimman hyvin pistekuormia kestäväksi.

## 4 SILTARAKENTEEN SUUNNITTELU

### 4.1 Sillan kuormitusten määrittely

Ensimmäinen askel siltarakenteen suunnittelussa on määrittellä vaadittava kuormankantokyky. Tälle sillalle suunnittelukuormituksen määrittelee olemassa oleva kuljetuskaluston tekninen kantavuus, ja Havatorin vuosikymmenten kokemukseen pohjautuva arvio suurimmista mahdollisista kuormista. Kuormitus tulee määrittää huolellisesti, jotta vältetään suunnittelemaista liian raskasrakenteista tai heikkoa ratkaisua.

Havatorin käytössä olevan moduulirakenteisen Goldhofer THP/SL ja PST-E erikoiskuljetuskaluston tekninen kantavuus on 36 tonnia/akseli, ja suurissa kuljetuksissa akselistoja on kytkettynä peräkkäin jopa kymmeniä. Tästä seuraa se, että kuljetuslaitteen pituus voi olla jopa sillan pituutta suurempi, esimerkiksi 20 akselinen perävaunu on 30 m pitkä, kun akseliväli on 1.5 m [3]. Toisaalta kokemuksen mukaan täyttä akselimassaa ei voida juuri koskaan hyödyntää, vaan käytännön maksimi on noin 32 tonnia/akseli. Huomioitavaa on myös se, että näin korkeita akselimassoja ei voida käyttää kuin sulje- tuilla alueilla, kuten teollisuuslaitosten ja telakoiden alueilla.

Koska sillan tärkeä käyttökohde on tieliikenteessä heikkojen siltojen ylitys, tulee kuormitusten suunnittelussa huomioida tieliikenteessä suurimmat mahdolliset akselimassat. Kokemuksen mukaan tieliikenteeseen on erittäin hankala saada kuljetuslupaa yli 140 tonnin kokonaispainolle. Ehdoton maksimi julkisilla teillä kuljetettavaksi on noin 20 tonnin akselimassa, ja 400 tonnin kokonaismassa. Nämä maksimaaliset kuormat ovat lähinnä kantaverkon suurmuuntajia, joilla on omat tarkkaan suunnitellut reittinsä.

Näiden kahden erityyppisen maksimikuormituksen perusteella valitaan suunnittelukuormitukseksi 30 tonnin akselikuorma jakautuneena 1.5 m akselivälein koko sillan mitalle. Suunniteltavan rakenteen tulee kestää tällainen kuormitus jäljempänä määritellyllä jännevälillä. Lisäksi rakenteen tulee kestää 20 tonnin akselikuormitus koko sillan matkalla, niin pitkällä jännevälillä kuin mahdollista.

Lisäksi kuormituksia valittaessa tulee tarkistaa, kuinka perävaunun ja vetoauton erilaiset akselivälit vaikuttavat siltaan kohdistuvaan kuormitukseen. Erilaisten ajoneuvojen aiheuttaman maksimikuormituksen selvittämiseksi ohjelmoitiin laskentasovellus MathCAD ohjelmaan. Sovellus muodostaa ajoneuvon mitta- ja painotietojen pohjalta pahinta mahdollista kuormitusta vastaavan taivutusmomenttikuvaajan. Toisaalta erilaisten yhdistelmien vaikutusta tutkittaessa todettiin vetoauton vaikutus melko vähäiseksi, koska raskaimmilla kuljetuksilla vetoauton massa on huomattavasti pienempi kuin kuormatun perävaunun massa. Tämän perusteella voidaan todeta, että kun kyseessä on moniakselinen perävaunu, jonka pituus on sillan pituuden luokkaa tai pidempi, ei veto-



auton vaikutusta tarvitse huomioida. Maksimimomentin määrittäminen on esitetty tarkemmin liitteessä 2 sivulla 55.

Edellä mainitut kaksi kuormitustapausta ovat luonteeltaan harvinaisia erikoiskuormia. Näiden poikkeuksellisten kuormitusten lisäksi tulee sillan kestävyys tarkistaa myös normaalia liikennekuormaa vastaavilla kuormitusyhdistelmillä. Nämä kuormitusyhdistelmät muodostuvat tuskin määrääviksi, koska siltaa ei tulla suunnittelemaan jatkuvaan käyttöön. Toisin sanoen sillan suunniteltu käyttöikä on vain kymmeniä tuhansia kuormitusyhteisiä, jolloin väsyttäviä kuormituksia ei tarvitse huomioida.

Koska suunnittelun kohde on silta, tullaan suunnittelukuormitusten muodostamisessa huomioimaan normin EN 1991-2 Siltojen liikennekuormat antamat ohjeet ja vaatimukset. Yliraskaat kuormitukset käsitellään EN 1991-2 -normin mukaisina raskaina erikoiskuormina, vaikka ne ovatkin normin vaatimuksia suurempia. Edellä mainittujen kuormitusnormien mukaisista kuormituksista luodaan mitoituskuormitukset normin EN 1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet periaatteiden ja vaatimusten mukaan. Lisäksi teräsrakenteiden mitoitus ohjaa normi EN 1993 teräsrakenteet.

## 4.2 Sillan päämittojen määrittely

Sillan päämittojen määrittely on yksi ensimmäisistä suunnittelun vaiheista, heti suunnittelukuormituksen valinnan jälkeen. Leveys on helpoiten määriteltävä suure, riittää kun silta on hieman leveämpi kuin normaali raskaskuljetuskalusto, eli leveydeltään noin 3.5 m. Leveyden tulee olla myös sellainen, että sillan reunoihin voidaan asentaa kiinnikkeet sillan varusteille, kuten kaiteille tai kulkutasoille. Pituuden määrittely onkin suurempi haaste. Sillan tulisi olla mahdollisimman pitkä, mutta kevyt ja matala. Tästä syystä pituus muodostuu suurimmaksi mahdolliseksi, joka paino ja rakennekorkeuden rajoissa pystytään toteuttamaan. Myöskään rakenteen korkeuden määrittäminen ei ole kovin yksiselitteistä, korkea rakenne on matalaa kestävämpi tai kevyempi. Painon lisäksi korkeus vaikuttaa sillan käytettävyyteen, mitä korkeampi rakennekorkeus, sitä suuremmat apuluisat silta tarvitsee.

Kaupallisissa väliaikaiskäyttöön suunnitelluissa silloissa tyypillinen rakenneratkaisu on kaideristikkotyypinen rakenne. Tällaisessa rakenteessa on korkeat ristikkokaieteet, jotka on yhdistetty toisiinsa poikkipalkein. Tällaisesta rakenteesta saadaan kevyt ja kestävä, mutta sen kokoonpano vie aikaa, leveysvaihtoehdot ovat rajoitetut, ja vierekkäisten yksiköiden välissä on korkea kaide. Tässä projektissa suunniteltavan sillan moduulien tulee olla muodoltaan ja rakenteeltaan sellaisia, että niitä voidaan liittää vierekkäin haluttu määrä, ja sillan kansi on tasainen ja yliajettava koko leveydeltään.

Silta on tarkoitus rakentaa luiskamaisista päätykappaleista ja tasavahvasta keski-osasta. Tällainen rakenneratkaisu mahdollistaa kevyemmän rakenteen kuin tasapaksu vaihtoehto. Koska silta on staattiselta toiminnaltaan vapaasti tuettu palkki, jolla on tasainen kuormitus, paras paino-kestävyysuhde saavutetaan, kun poikkileikkauksen kestävyys mukaillee suunnittelukuormituksen aiheuttamaa parabolista momenttijakaumaa. Lujuuden lisäksi luiskien mitoituksessa tulee huomioida raskaskuljetuskaluston asetta-

mat rajoitteet luiskien muodolle, jotta silta voidaan ylittää kaikilla halutuilla ajoneuvotyypeillä.

Sillan päämitoista viimeinen on yhden moduulin levyisen siltalohkon paino. Tällaisen osalohkon painon tulee olla niin alhainen, että se voidaan nostaa sillan päästä paikoilleen kohtuullisen kokoisella mobiilinosturilla. Käytännön kokemus on osoittanut, että kohtuullinen paino on noin 20 tonnia, jolloin asennus on mahdollista noin 160 tonnin nosturilla. Tällainen nosturi on vielä nopea pystyttää, eikä vaadi useita autokuormia vastapainoja.

#### 4.2.1 Sillan rakennelevyiden määrittely

Ensimmäinen askel sillan rakenteen suunnittelussa oli siltaprofiilin alustavan poikkileikkauksen määrittely, koska poikkileikkauksen koko ja muoto määrittelevät siltaprofiilin lujuusominaisuudet. Koska raskaan kuljetuskaluston leveys on 3.0 metriä, tulee sillan olla tätä leveämpi. Toisaalta mikään sillan osa ei saa olla yli 2,37 metriä leveä, 2,33 metriä korkea tai 5.89 metriä pitkä, jotta silta voidaan tarvittaessa pakata ISO 668 standardin mukaiseen 20 jalan merikonttiin. Tämä kontissa kuljetusvaatimus pakottaa suunnittelemaan sillan kahdesta pituussuuntaisesta moduulista.

Moduulileveydeksi luonnollinen valinta on 1800 mm, koska se on sama kuin kuvan 3 yleisesti käytössä olevan lavetin pendeliakseleiden väli. Tällä moduulileveydellä keskellä kahdesta moduulista koostuvaa siltaa ajava ajoneuvo aiheuttaa keskeisen kuormituksen. Toinen etu tästä moduulileveydestä on se, että kahdesta moduulista kootun sillan leveydeksi tulee tällöin 3600 mm, joka on riittävä kaistaleveys yhdelle ajoneuville. Lisäksi neljästä rinnakkaisesta moduulista kootun sillan 7.2 metrin leveys on riittävä kahdelle rinnankytketylle lavetille, joiden leveys on 6.3 m.

#### 4.2.2 Sillan jännevälien määrittely

Päämittojen jälkeen toinen pohdintaa vaativa asia on sillan moduulijaon muodostus, joka määrittelee käytössä olevat jännevälivaihtoehdot. Sopivalla moduulijaolla vältetään turhilta kuljetus- ja asennuskustannuksilta, kun käytössä on aina mahdollisimman sopivankokoinen silta. Silta tullaan jakamaan moduuleihin sekä pituus- että leveys suunnassa. Yksi tärkeä tekijä moduulijakoon liittyen on myös moduulien paino. Silta tulee voida koota ja purkaa ilman suurta nosturia, joten moduulien painon oltava mahdollisimman alhainen. Tällainen käytännön sanelema maksimi moduulipaino on noin viisi tonnia, jolloin moduuleita voidaan vielä helposti käsitellä kuormausnosturilla tai trukilla.

Sillan pisin mahdollinen jänneväli ei ole yksiselitteinen käsite, vaan riippuu vaadittavasta kantavuudesta. Sillan rakenne suunnitellaan niin, että vaaditulla 30 tonnin akselimassalla saavutetaan mahdollisimman pitkä jänneväli. Lisäksi 30 tonnin akseli-kuormavaatimuksen täyttävään ratkaisuun suunnitellaan sellaiset lisäosat, joilla jännevä-

li voidaan kasvattaa niin pitkäksi kuin se 20 tonnin akselikuormaa vastaavalla kuormitustapauksella on mahdollista.

Kun kantavuusvaatimusten perusteella on löydetty halutut maksimipituudet, voidaan nämä maksimijänteet jaotella halutun pituisiin moduuleihin. Kokemuksen mukaan lyhin käyttökelpoinen jännemitta on noin 4 metriä, ja siitä jänneväli tulisi voida kasvattaa 3-6 metrin lisäyksin niin pitkäksi kuin mahdollista. Edellisessä kohdassa mainitut konttimitta- ja painovaatimukset rajaavat moduulin maksimimitan noin 5.8 metriin. Toisaalta sillan muuttuvan poikkileikkauksen ansiosta täytyy luiskaosan moduuleita käyttää aina pareittain, ja vain vakiopoikkileikkauksellisia keskimoduuleita voidaan liittää yhteen vapaasti. Tästä syystä sillan päätyjen luiskamoduulit suunnitellaan vähintään kahdesta moduulista koostuviksi, jotta mahdollistetaan myös lyhyen konstruktion kokoaminen.

### 4.3 Sillan rakenteen suunnittelu

Sillan rakenteen tulee olla kevyt ja kestävä, ja rakennekorkeudeltaan mahdollisimman matala. Tästä syystä ainoa rakennevaihtoehto on teräksinen kotelorakenne. Kotelorakenteella saavutetaan hyvä taivutus- ja vääntöjäykkyys rakenteen ollessa silti yksinkertainen. Valmistusteknisesti teräksinen kotelopalkki on helppo ja taloudellinen valmistaa. Hitsattua kotelorakennetta suunniteltaessa on kuitenkin tärkeää huomioida, että rakenne pystytään valmistamaan, ja kaikki rakenneosat saadaan hitsattua riittävän lujuuden vaatimalla tavalla.

Suunnittelun haasteena on löytää sellainen kotelorakenne, jonka tehollinen pinta-ala on mahdollisimman suuri. Suurten kotelorakenteiden ongelmana on yleisesti puristettujen rakenneosien lommahdus, joka pienentää rakenteen tehollista pinta-alaa. Huolellisella rakenteen suunnittelulla voidaan lommahdusriski poistaa, ja näin välttyä rakenteiden tarpeettomalta ylimitoitukselta. Tavoitteena on löytää sellainen poikkileikkausprofiili, jolla koko sillan poikkileikkaus on tehollinen poikkileikkaus.

Edellisissä kohdissa mainittujen mitta- ja kuormitusvaatimusten mukaan määritellään sillalle alustava poikkileikkausprofiili, josta rakenteen mitoituksen suunnittelu aloitetaan. Kun mitoitetaan palkkia, on yksikertaisinta aloittaa rakennekonstruktion määrittäminen suurimman vaaditun kuormituksen aiheuttama taivutusmomenttijakauma. Tässä vaiheessa suunnittelua kannattaa käyttää mahdollisimman yksinkertaista rakennemallia ja varmalle puolelle yksinkertaistettua kuormitustapausta. Määrittäessä ensimmäistä kuormitustapausta ei rakenteen omaa painoa vielä tunneta, joten sen tarkka huomioiminen on mahdotonta. Kokemuksen mukaan käyttämällä kuormitukselle varmuuskerrointa 1,8, ja jättämällä rakenteen omamassa huomioimatta, saadaan helposti kohtuullinen arvio mitoituskuormitukselle. Rakenteiden suunnitteluperusteet normin EN1990 mukaiset varmuuskertoimet ovat muuttuvalle kuormalle 1,5 ja pysyvälle kuormalle 1,15. Normin mukaisiin kertoimiin verrattuna kerroin 1,8 sisältää noin 25 % kuormituksesta olevan omamassaosuuden, joka on tässä tapauksessa riittävä. Esisuunnittelukuormitusta määritettäessä on valittava myös alustava maksimijänneväli. Alusta-

vaksi jänneväliksi valitaan 16 metriä, jolloin alustava kuormitustapaus on 11 kertaa 30 tonnin akselipaino tasaisesti jakautuneena sillan matkalle. Alla on esitetty alustan poikkileikkauksen määrittelyyn tarvittavat laskelmat.

Lähtöarvot mitoitukseseen

$L = 16$  m alustava maksimijänneväli

$b = 1,6$  m alustava moduulin tehollinen leveys

$h = 0,45$  m alustava rakenne korkeus

$t_f = 40$  mm alustava laipan vahvuus

$t_w = 20$  mm alustava uuman vahvuus

$n = \frac{16\text{m}}{1,5\text{m}} \approx 11$  sillan pituudelle tulevien akselien määrä, kun akseliväli on 1,5 m

$q = 30000\text{kg} \cdot g \approx 300$  kN akselimassa

$Q = \frac{q \cdot n}{L} = \frac{300 \text{ kN} \cdot 11}{16 \text{ m}} \approx 206 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$  alustava suunnittelukuormitus

$Q_{Ed} = 1,8 \cdot Q = 371 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$  alustava mitoituskuormitus

$f_{yd} = 355$  MPa käytettävän teräksen mitoituslujuus

Alustavan poikkileikkauksen mitoitus

$M_{Ed} = \frac{Q_{Ed} \cdot L^2}{8} = \frac{371 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot (16 \text{ m})^2}{8} \approx 11,9$  MNm Vapaasti tuetun palkin

maksimi taivutusmomentti

$\sigma = \frac{M}{W} \Rightarrow W_{MIN} = \frac{M_{Ed}}{f_{ydl}} = \frac{11,9 \text{ MNm}}{355 \text{ MPa}} \approx 0,0335 \text{ m}^3$  poikkileikkaukselta vaadittava

minimi taivutusvastus

$W = \frac{1}{6}(b - h^2 - (b - 2 \cdot t_w) \cdot (h - 2 \cdot t_f))^2 \approx 0,0184 \text{ m}^3$

yhden moduulin taivutusvastus

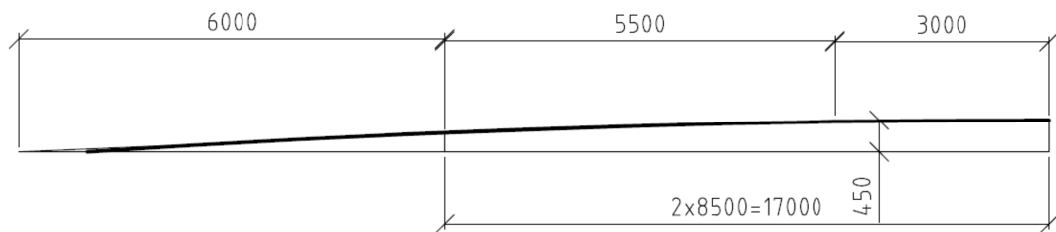
$W_{kok} = 2 \cdot W \approx 0,0368 \text{ m}^3$  kahden moduulin taivutusvastus

$W_{kok} \geq W_{MIN}$  Kuormitus kohdistuu aina kahdelle moduulille, joten alustava poikkileikkaus kestää.

Edellä esitettyjen laskelmien perusteella voidaan todeta, että 450 mm korkea 1600 mm leveä rakenne täyttää alustavat vaatimukset, ja sen perusteella voidaan määrittellä sillan perusrakenne.

Tyypillisen raskaskuljetusperävaunun akseliston liikevara on  $\pm 300$  mm, kuten kuvasta 3 voidaan havaita. Tämän liikevaran ääripäissä jousituksen hydraulisylinterit

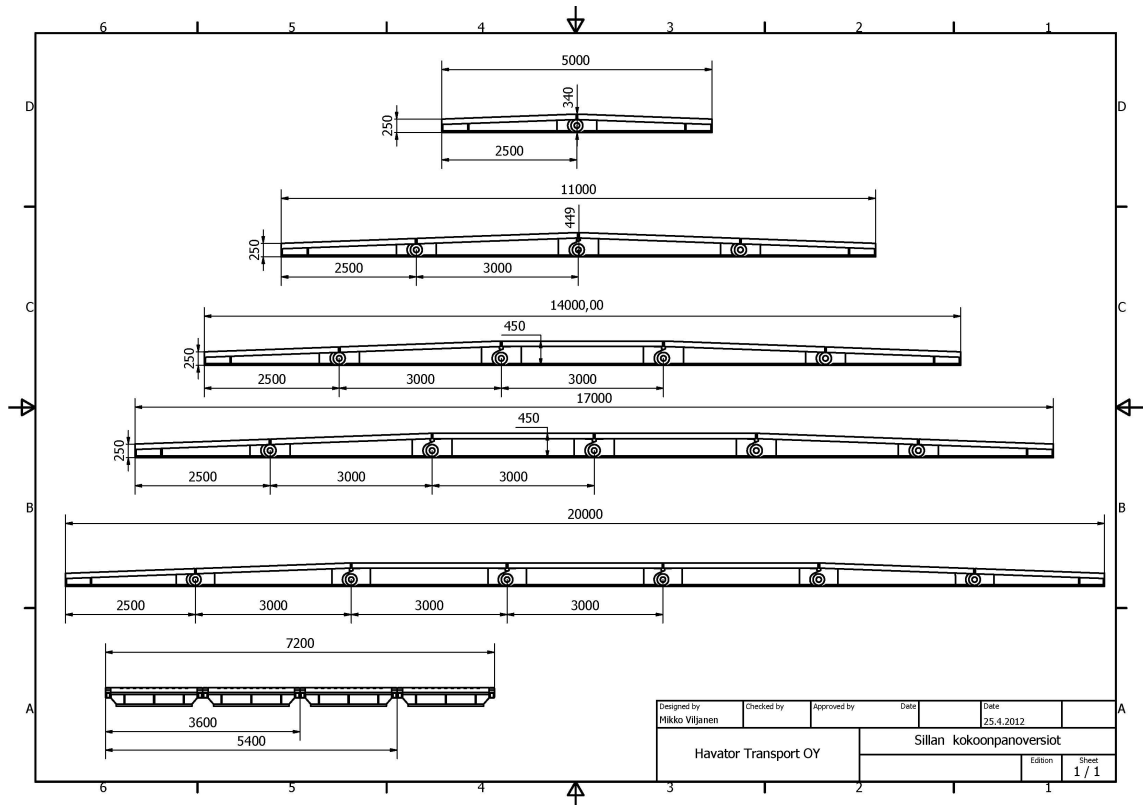
ovat ääri-asennoissa, joten perävaunu on tällöin käytännössä jousittamaton ja akseli-kuormat eivät enää jakaudu tasan. Erityisesti raskailla kuormilla jousituksen ääri-asentoon joutuminen saattaa johtaa suuriin ylikuormituksiin, jolloin kaluston rikkoutumisvaara on ilmeinen. Kokemuksen mukaan tällaiset tilanteet voidaan ehkäistä käyttämällä suunnittelussa jousituksen liikevarana  $n.\pm 250$  mm. Käyttämällä tätä supistettua liikevara, voidaan mahdolliset alustan epätasaisuudesta ja perävaunun rungon taipumasta johtuvat liikevaran menetykset jättää huomioimatta. Tästä syystä sillan rakennekorkeus voi olla enintään 500 mm, jotta silta voidaan ylittää siltaa pidemmälläkin ajoneuvolla.



Kuva 5: Kuvassa sillan korkeusprofiilin puolikas ja piirretty käyrä kuvaa 20-akselisen lavetin jousituksen suurinta liikevara.

Esimerkiksi pisin tyypillinen maantiellä käytettävä 20-akselinen 30 m pitkä lavetti vaatii siltaprofiilin, joka mukailee 204 m säteisen ympyrän muotoa, tämä mitoitus tilanne on kuvattuna kuvassa 5. Kuvassa 5 on alustavien mittojen mukaisen siltakonstruktion päähän asennettu 6 metriä pitkä lähestymisluisa. Kuten kuvasta 5 havaitaan, sillan luiskat eivät voi olla esitettyä geometriaa jyrkemmät. Kuvan 5 geometrian perusteella voidaan määrittellä luiskamaisten moduulien mitat. Luiskaosan pituus on kuvan 5 mukaisesti noin 5,5 metriä ja korkeus päässä noin 250 mm. Laskennassa on käytetty 16 metrin jänneväliä, ja kuvan silta on 17 metriä, koska sillan päihin on tarkoitus suunnitella 500 mm pitkät tukipinnat, joiden varaan silta tullaan asentamaan.

Edellä mainittu geometria toimii myös lyhyemmällä siltakonstruktiolla. Sillan kantavuuskaan ei tuota ongelmia lyhyemmällä versioilla, koska pitkä versio on suunniteltu maksimaalisilla raskaskuljetuskaluston akselikuormilla. Tästä syystä lyhyemmälle konstruktiolle ei voi tulla pitkää versiota suurempia taivuttavia tai leikkaavia kuormituksia. Kuvassa 6 esitellään edellisten lukujen vaatimusten mukainen moduulijako sillalle.

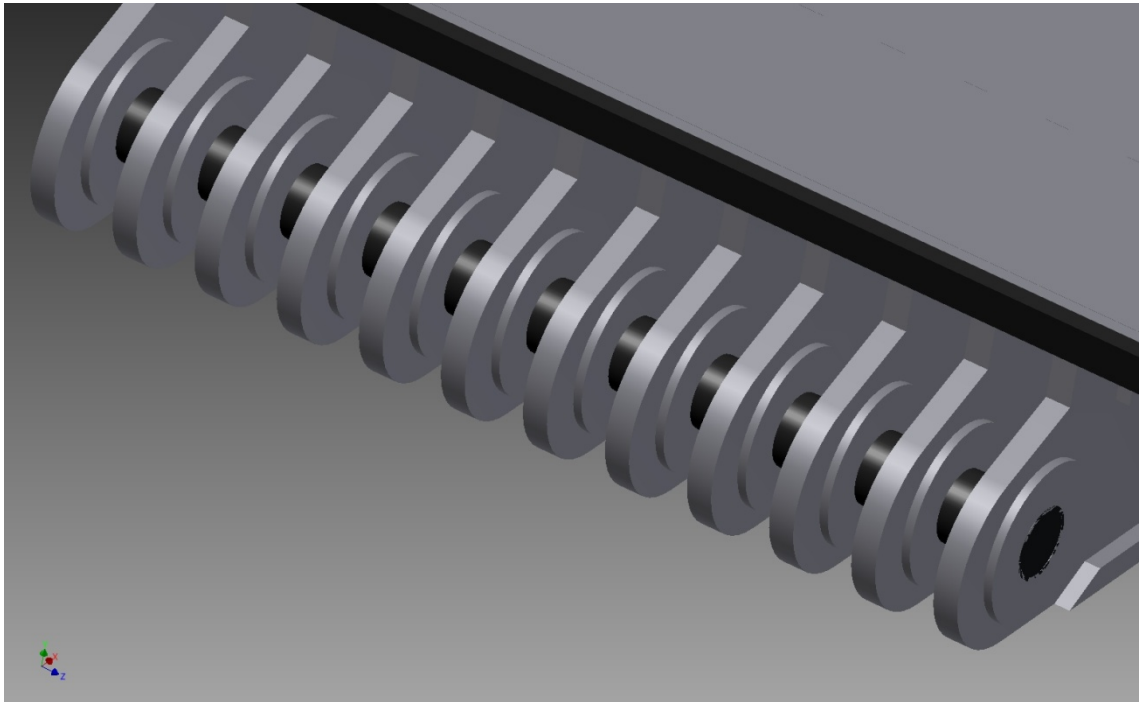


Kuva 6: Sillan moduuleista koottavat erilaiset versiot.

#### 4.4 Sillan moduulien liitosrakenteen suunnittelu

Suunnittelun yksi suuri haaste on löytää sellainen liitoskonstruktio, joka on yhtä luja perusrakenteen kanssa, eikä saa aiheuttaa siltalohkolle suuria paikallisia rasituksia. Lujjuuden kanssa yhtä tärkeää liitoksen suunnittelussa on huomioida liitoksen käytön helpous. Kokemusperäisesti tiedetään, että niveltappiliitos on toimiva ratkaisu suurilla voimilla siirtävissä yhteen suuntaan jäykissä liitoksissa. Niveltappiliitos asennettuna alalaidan yläpuolelle on aina epäkeskinen. Tämä epäkeskisyys aiheuttaa paikallisen taivutusmomentin liitettävän osan päähän. Lujuusteknisesti tämä momentti ei kuitenkaan aiheuta ongelmia, koska se on vastakkaisuuntainen siltaa kuormittavan ulkoisen kuormituksen aiheuttaman taivutusmomentin suhteen. Liitosmuodon hyvyttä kuvastaa se, että se on yleisesti käytössä raskaskuljetuskalustossa, niin akselistomodulleiden kuin kuljetuspalkkienkin liitoksissa.

Niveltappiliitos muodostaa kiilapalan kanssa yhteen suuntaan erittäin kestävä rakenteen, mutta toiseen suuntaan liitos on täysin niveellinen. Tästä syystä moduulien ylälaipat kiinnitetään toisiinsa varmistuspulttein. Varmistuspulttien tehtävä on mahdollistaa sillan käsittely kokonaisuutena moduulin levyisenä lohkona. Varmistuspultit tulee mitoittaa niin, että ne kestävät pisimmän mahdollisen siltakonstruktion noston kokonaisuutena. Sillan nostamista varten tullaan jokaisen liitosrakenteen läheisyyteen suunnittelemaan kiinnityspisteet nostolenkeille, joista moduuleita ja siltalohkoa voidaan nostaa.



Kuva 7: Moduulin liitosrakenne.

Niveltappiliitoksen toiminnan kannalta on tärkeää, että valmistustoleranssit ovat riittävän tarkat ja välykset ovat riittäviä. Niveltappiliitoksen tapin ja reiän sovitteen tulee olla riittävän väljä, jotta liitos voidaan helposti avata ja liittää uudelleen. Välyssovite taas aiheuttaa tiukkaa sovitetta suuremman kontaktipaineen liitospinnoille. Valitsemalla liitoksen välys niin pieneksi kuin on käytön kannalta mahdollista, ja käyttämällä mahdollisimman suurta ja pitkää tappia, saadaan kontaktipaine asettumaan kohtuulliselle tasolle. Liitoksen pituudesta on myös hyötyä liitoksen leikkauskestävyyden kannalta. Mitä pidempi liitos on, sitä useampileikkeinen liitos voidaan siihen toteuttaa. Kuvassa 5 on esitetty liitosrakenteen periaatekuva. Liitos toimii niin, että moduulin yläosassa oleva musta kiilapala välittää ylälaipan puristusvoiman moduulilta toiselle, ja alaosassa olevien kampalevyjen läpi kulkeva musta tappi puolestaan siirtää liitoksen veto- ja leikkausvoimat moduulien välillä.

Jokaisen moduulin toisessa päässä on kuvan 7 mukainen 12-kampainen kampa-liitos, ja toisessa päässä vastaava 11-kampainen liitos, joka sopii seuraavan moduulin kampa-liitoksen kanssa lomittain. Liitos kytetään asettamalla moduulit vastakkain niin, että kampalevyt ovat lomittain, ja liitostappi työnnetään kampalevyjen reikään. Tapin tiukan sovitteen ja moduulien suuren koon ansiosta tappia on mahdoton saada asennettua käsivoimin, joten tapin liikutteluun käytetään varta vasten suunniteltua hydraulista tapinvetotyökalua. Tapinvetotyökalu kiinnitetään uloimman kamman pintaan ruuviliitoksella, ja sillä voidaan vetää ja työntää tappi reikään. Vetotyökalulta ei vaadita kovin suurta voimaa, tappi liikkuu helposti jo muutaman kymmenen kilonewtonin voimalla. Tapin asennuksen helpottamiseksi tappi valmistetaan kahdesta osasta, koska kokopitkän

tapin massa olisi lähes 100 kg. Puolikkaita tappeja käyttämällä vetotyökalukin voidaan suunnitella pienemmäksi, koska tarvittava liikevara puolittuu.

Varsinaisen liitosrakenteen suunnittelun jälkeen suunnitellaan liitosrakenteen läheisyyteen nostopisteiden kiinnityspisteet. Nämä pisteet tulee suunnitella niin, että koko maksimipituinen siltalohko voidaan nostaa neljästä pisteestä. Luonnollisesti jokaiseen moduuliin tulee mitoittaa neljä nostopistettä moduulien asentamiseksi. Moduulin nostopisteiden lisäksi tulee suunnitella pisteet, joista koko siltalohko voidaan nostaa. Koko sillan nostoon tarkoitettujen nostopisteiden sijoitus on kokemuksen mukaan parasta tehdä noin 8 metrin etäisyydelle toisistaan pituussuunnassa symmetrisesti. Nämä nostopisteiden sijoitusvaatimukset täyttyvät, kun jokaisen moduulin liitoksien läheisyyteen asennetaan koko sillan noston kestävät nostopisteet.

Sillan suurimmaksi nostopainoksi on arvioitu 30 tonnia, sisältäen mahdolliset pidennysmoduulit. Tämän perusteella valitaan nostoon soveltuvat nostolenkit. Suunniteltaessa nelipistenostoa nostopisteet ja välineet tulee suunnitella aina niin, että kolme pistettä kykenee kantamaan koko kuorman. Nostoon on tarkoitus käyttää ruuvikiinnitteisiä nostolenkkejä, joita on saatavilla valmiina. Nostolenkeiksi valitaan 11 tonnin kapasiteetin omaava malli, jolloin vaadittu kestävyysvaatimus toteutuu. Nämä nostopisteet asennetaan sillan ylälaipan läpi, ja kiinnitetään mutterilla sen alapuolelta. Käytettävyyden helpottamiseksi mutteri asennetaan kiinteästi jokaisen nostopisteen asennusreiän kohdalle.



## 5 NORMIEN MUKAINEN RAKENNERATKAISU

### 5.1 Normien mukainen mitoituskuormitus

Sillan kaltaista kantavaa rakennetta suunniteltaessa on huomioitava kyseiseen tilanteeseen soveltuvien normien määräykset mitoituskuormitusten määrittelyssä. Suunnittelu-kuormituksesta saadaan mitoituskuormitus kertomalla se normien mukaisilla osavarmuuskertoimilla. Osavarmuuskertoimet määräytyvät rakenteen käyttötarkoituks-, seuraamus- ja toteutusluokan perusteella.

Suunnittelukuormitus on se kuormitus tai ne kuormitukset, jotka on rakenteen käyttötarkoituksen mukaan määriteltä. Lisäksi normit saattavat määrätä tarkastettavaksi joitakin normien määrittelemiä kuormitustapauksia. Tässä työssä tällaisia normien määrittelemiä kuormitustapauksia ovat sillan liikennekuormat.

Osavarmuuskertoimien määrittämiseksi rakenne on luokiteltava. Rakenteen käyttötarkoitus on luonteeltaan tilapäistä käyttöä, ja suunnittelu perustuu vain staattisiin kuormiin. Tämä tarkoittaa käyttöluokkaa SC1 [4]. Rakenteeseen käytettävän materiaalin ja rakennustavan johdosta valitaan tuotantoluokaksi PC2 [5]. Rakenteeseen kohdistuvat kuormitukset ovat erittäin suuria, joten seuraamusluokaksi määritellään CC3 [6]. Rakenteen voidaan katsoa olevan vaihdettava rakenne, jolloin sovelletaan EN 1990 standardin kohtaa 2.3, josta valitaan suunnitelluksi käyttöikäluokaksi 2, joka vastaa 10-25 vuoden ohjeellista käyttöikää [7].

Edellä tehtyjen määrittelyjen perusteella valitaan rakenteelle toteutusluokka EXC4 [8]. Toteutusluokaksi määräytyi korkein luokka, joka asettaa tiukat määräykset rakenteen valmistukselle, laadunvalvonnalle sekä laadunvarmistukselle.

Näiden alkumäärittelyjen perusteella voidaan määritellä rakenteelle lopulliset mitoituskuormitukset. Edellä määriteltä seuraamusluokka määrää mitoituskuormitusten kuormakertoimen arvoksi 1,1, jolla kaikki rakenteeseen vaikuttavat kuormat on kerrottava. Rakenteen käyttö- ja tuotantoluokka puolestaan määrää materiaalin kestävyysvaikutukset vaikuttavat osavarmuuskertoimet.

Sillan suunnittelussa tutkitaan viisi erilaista kuormitustapausta. Sillan modulaarinen rakenne helpottaa kuormitustapausten tutkintaa, koska silta koostuu useasta erillisestä pitkittäissuuntaisesta lohkokosta. Koska lohkot toimivat rakenteellisesti erillisinä osina, voidaan siltaa tarkastella vain yhden kaistan levyisenä. Tämä helpottaa kriittisen kuormituksen selvittämistä, koska mitoituksessa ei tarvitse tutkia eri kaistojen yhteisvaikutusta.

### 5.1.1 Kuormitustapaukset

Yleisessä sillan suunnittelussa käytettäviä kuormitusmalleja esitetään normissa EN 1991-2 neljä kappaletta. Tässä normissa kuormitusmallista käytetään lyhennettä LM ja järjestysnumero. Kuormitustapaukset LM1 ja LM2 kuvaavat normaalin liikenteen aiheuttamia kuormituksia. Kuormitustapaus LM3 kuvaa taas ylliraskasta erikoiskuormaa, eli raskasta erikoiskuljetusta tai muuta vastaa poikkeuksellista kuormitusta. Tälle kuormitustapaukselle ei ole yksikäsitteistä määritelmää, vaan kuormitustapaukset valitaan tapauskohtaisesti normin EN 1991-2 liitteessä A esitetyistä erikoiskuormakaavioista. Lisäksi normin Suomen kansallinen liite määrittelee täysin normin erikoiskuormakaavioista poikkeavan kuormakaavion. Raskaan erikoiskuormakaavion käytöstä julkisten teiden siltojen suunnittelussa päättää asianomainen viranomainen, joka myös valitsee käytettävät kuormakaaviot. Normin määrittelemistä kuormakaavioista viimeinen, LM4, edustaa tungoskuormaa, ja sen käytöstä päätetään tapauskohtaisesti. Tätä kaaviota käytetään ainoastaan silloin, kun suurten ihmismassojen kokoontuminen sillalle on todennäköistä.

Tässä työssä tarkasteltavat kuormitustapaukset nimetään tunnuksella LC ja järjestysnumero, jotta niitä ei sekoiteta normissa käytettäviin LM kuormituskavaioihin. Tässä työssä tarkasteltavat viisi erilaista kuormitustapauksista perustuvat normin EN 1991-2 kuormakaavioihin LM1, LM2 ja LM3, sekä normin kansallisen liitteen esittämään raskaaseen erikoiskuormakaavioon. Normin mukaiset LM kaaviot edustavat muuttuvan kuorman ominaisarvoa. Laskennassa käytettävät LC kuormitustapaukset muodostetaan kertomalla muuttuvan kuorman ja omasta painosta johtuvan pysyvän kuorman ominaisarvot normin mukaisilla osavarmuusluvuilla ja kuormakertoimella.

Mitoituskuormitus määritellään yhtälöllä

$$R_{Ed} = K_{FI} \cdot \gamma_L \cdot Q + K_{FI} \cdot \gamma_G \cdot G,$$

jossa

$$K_{FI} = 1,1 \text{ kuormakerroin}$$

$$\gamma_G = 1,15 \text{ pysyvän kuorman osavarmuusluku}$$

$$\gamma_L = 1,50 \text{ muuttuvan kuorman osavarmuusluku}$$

Q = muuttuva kuorma

G = pysyvä kuorma

$$R_{Ed} = \text{mitoituskuormitus}$$

Kuormitustapaus LC1 on EN 1991-2 mukainen raskas erikoiskuormitus LM3, mutta tässä tapauksessa käytetään normin liitteen A suosittamaa 200 kN kuormitusta korkeampaa 300 kN akselikuormaa. Tällaisia akselikuormia sijoitetaan normin mukaisesti 1,5 metrin akselivälein koko sillan matkalle, jolloin tämän kuormitustapauksen kuormien sijoittelu vastaa liitteen A taulukon A.1 kaavion 2400/200 kuormitusten sijoittelua. Normi EN1991-2liitteen A määritelmien mukaan LM3 erikoiskuormituksen pyö-

räkuorman kosketuspinta on 150 mm pitkä ja 1200 mm leveä, ja ne sijaitsevat 300 mm päässä toisistaan sillan leveysuunnassa. Normin ohjeiden mukaan voidaan dynaamiset vaikutukset jättää huomioimatta, jos raskaan kuljetuksen nopeus on hidas, eli alle 5 km/h. Huomioimalla sillan käytön tilapäinen luonne voidaan 5 km/h määrittellä maksiminopeudeksi raskaille kuljetuksille sillan ylityksessä. Nopeusrajoituksen johdosta kuormitustapauksessa LC1 ei tarvitse huomioida dynaamisia vaikutuksia, joten mitoituksukuormitus on kuormituksen ominaisarvo kerrottuna normaalein varmuuskertoimin.

Toinen tutkittava kuormitustapaus LC2, joka perustuu liikennekuormitustapaukseen LM1. Kuormitustapaus LM1 koostuu kahdesta 300 kN suuruisesta akselikuormasta 1,2 metrin akselivälillä ja  $9 \text{ kN/m}^2$  suuruisesta tasaisesta kuormituksesta koko sillan pinta-alalle. Akselikuormitus muodostuu kahdesta 150 kN suuruisesta  $0,40 \text{ m} \times 0,40 \text{ m}$  kokoiselle alueelle jakautuneesta pyöräkuormasta, jotka sijaitsevat keskeisesti ajorataan nähden 2,0 metrin keskiöetäisyydellä toisistaan. Nämä kuormitukset sisältävät myös dynaamiset vaikutukset. Tässä kuormitustapauksessa tulee huomioida myös sillan liikuntasauvojen tai muiden epäjatkuvuuskohtien aiheuttama dynaaminen lisätekijä, koska tämä kuormitustapaus kuvaa normaalia liikennettä. Dynaaminen lisäkerroin on normissa määritelty riippuvaksi etäisyydestä sillan liikunta saumasta tai muusta epäjatkuvuuskohdasta, koska normaalissa sillassa saumojen väli on yleensä kymmeniä metrejä. Tässä tapauksessa saumojen aiheuttamaa dynaamista lisätermiä voidaan pitää vakiona koko sillan matkalla, joka tuottaa hieman vaadittua konservatiivisemmän tuloksen. Vakiokerroimen käyttö on perusteltua, koska saumat sijaitsevat enintään 3 metrin etäisyydellä toisistaan, ja näin ollen etäisyydestä saumaan riippuvainen kerroin ei saumavälillä merkittävästi pienene. Kerroimen tarkka määrittely löytyy EN 1991-1 kohdasta 4.6 kaava 4.7.

Kolmas tutkittava kuormitustapaus LC3 on liikennekuormitus LM2. Tämä kuormitustapaus koostuu vain yhdestä 400 kN akselikuormituksesta, jonka pyöräkuormitukset ovat jakautuneet  $0,35 \text{ m} \times 0,60 \text{ m}$  kokoisille alueille 2 metrin etäisyydelle toisistaan. Tämäkin kuormitustapaus kuvaa normaalia liikennettä, joten dynaamiset vaikutukset tulee huomioida samoin kuin edellisessä kuormitustapauksessa.

Neljäs kuormitustapaus LC4 on normin EN 1991-2 liitteen A suosittelen raskaan erikoiskuorman LM3 kaavio 3600/200, joka on raskain kuormituskaavio 3 metriä leveille ajoneuvoille. Tämä kuormitustapaus koostuu kahdeksastatoista 200 kN akselikuormituksesta, jotka sijoitetaan kaistalle kuten kuormitustapauksessa LC1. Tämä kuormitustapaus on kevyemmin kuormitettu versio tapauksesta LC1, joten perussiltaa ei tutkita tällä kuormitustapauksella. Tämä kuormitustapaus on tarkoitettu käytettäväksi jatkettun sillan mitoituksukuormitukseksi, eli tällä kuormituksella määritellään kuinka paljon siltaa voidaan jatkaa.

Viides kuormitustapaus LC5 on normin EN 1991-2 Suomen kansallisen liitteen mukainen raskas erikoiskuorma. Tämä kuormitustapaus on hyvin samankaltainen, kuin normin EN 1991-2 liitteen A kuormitustapaukset. Tämä kuormitustapaus koostuu  $45 \text{ kN/m}^2$  tasaisesta kuormituksesta, joka kohdistuu 3 metrin levyiselle 0-10 metriä pitkälle alueelle. Näitä tasaisia kuormituksia sijaitsee kuormituskaistalla aina kaksi ja niiden

välimatka on 0-15 metriä. Tässä tapauksessa valitaan edellä annetuista mittavaihtoehtoista sellaiset, että kuormitus kohdistuu koko sillan matkalle. Tämä aiheuttaa luonnollisesti pahimman kuormituksen, koska silta on yksiaukkoinen palkki. Tämä kuormitustapausta tutkitaan, jotta varmistetaan, tuottaako kansallisen liitteen mukainen kuormakaavio suuremman kuormituksen kuin varsinaisen normin mukainen kuormakaavio. Liitteen 2 sivun 57 laskelmien perusteella voidaan todeta, että kuormitustapausten LC4 ja LC5 tuottavien taivutusmomenttien ero on vain muutamia prosentteja. Laskelmien perusteella voidaan todeta, että ei ole merkittävää eroa käytetäänkö normin EN 1991-2 vai sen kansallisen liitteen mukaista raskasta erikoiskuormitusta.

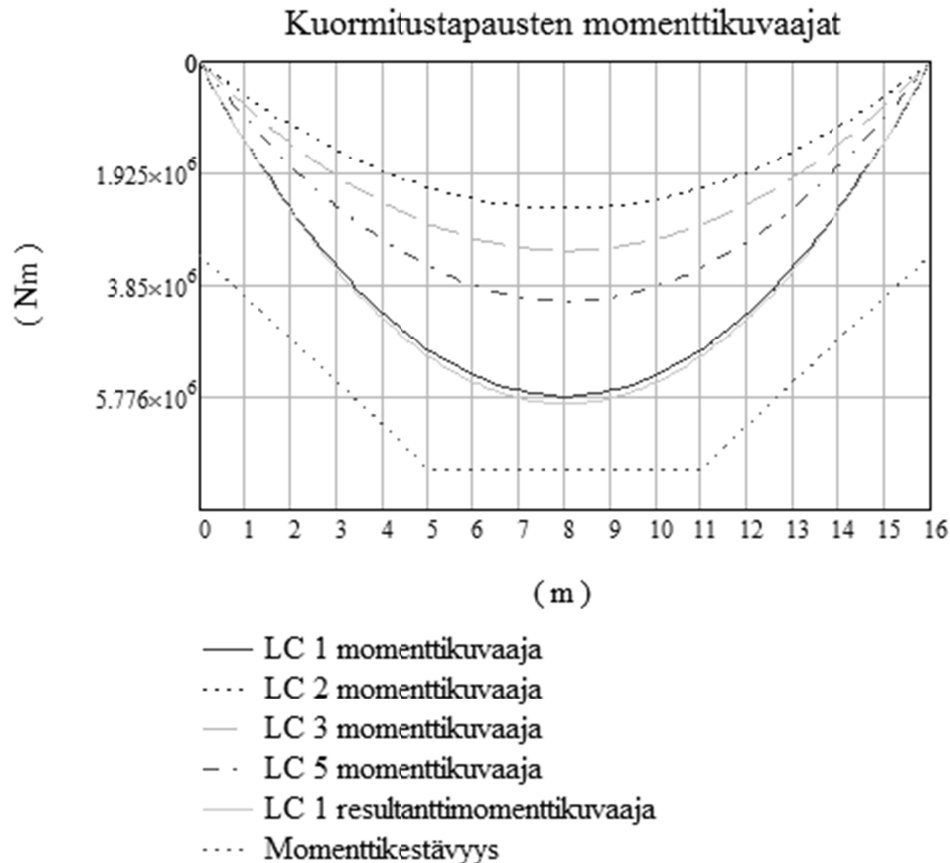
Pystykuormien lisäksi kaikilla kuormitustapauksilla tulee huomioida kiihdytys- ja jarrukuormat. Nämä kiihtyvyysskuormat määräytyvät normin EN 1991-2 kohdan 4.4.1 mukaan, ja ne ovat verrannollisia pystykuormituksen suuruuteen ja sillan pituuteen. Normi asettaa kiihtyvyysskuormille ylärajaksi 900 kN, mutta Suomen kansallinen liite pitää ylärajana 500 kN. Yleisen normin raja-arvo on peräisin sotilasajoneuvojen STANAG sopimuksesta, tässä projektissa tutkitaan sekä kuormituksen mukaan määritelty kiihtyvyysskuorma, että yleisen normin maksimaalinen kuorma.

Määrävä mitoituskuormitus määräytyy näiden edellä mainittujen kuormitustapausten perusteella. Kaikki kuormitustapaukset tutkitaan, ja määritellään kuormitusten liikkuville osille epäedullisin sijoitus, joka aiheuttaa suurimman taivutus- tai leikkauskuormituksen. Kuitenkaan kuormitustapausten maksimiarvoja ei yhdistellä, vaan esimerkiksi suurimman taivutusmomentin aiheuttava kuormitustapausta määrää taivutuskestävyyden mitoitusarvon ja niin edelleen. Näiden mitoituskuormitusten perusteella määritellään sekä perusrakenteen että rakenneosien, kuten liitososien, kestävyudet. Näiden globaalien kuormitusten lisäksi tulee tarkastella paikallisten kuormitusten vaikutuksia.

Tyypillisiä paikallisia kuormituksia ovat pyöräkuorman vaikutukset sillan kanteen, sillan tukipainekestävyys, liitososien kontaktipaineet, sekä sillan nostopisteiden kiinnityspisteiden kestävyys. Pyöräkuormat ja tukipaine voidaan johtaa suoraan normin mukaisista kuormista. Pyöräkuormitusten tutkinnassa tulee huomioida pahin mahdollinen ajoneuvon sijainti sillan kannella. Tässä tapauksessa pääasiallinen kuormitus on raskas erikoiskuorma, ja kuormittavat ajoneuvot tunnetaan tarkoin. Näin voidaan paikallisten pyöräkuormien vaikutuspisteet määritellä melko tarkasti ajoneuvojen akselistorakenteen perusteella. Paikallisten kuormitusten analysointia käsitellään tarkemmin kapaleessa 5.4.

### 5.1.2 Mitoituskuormitukset

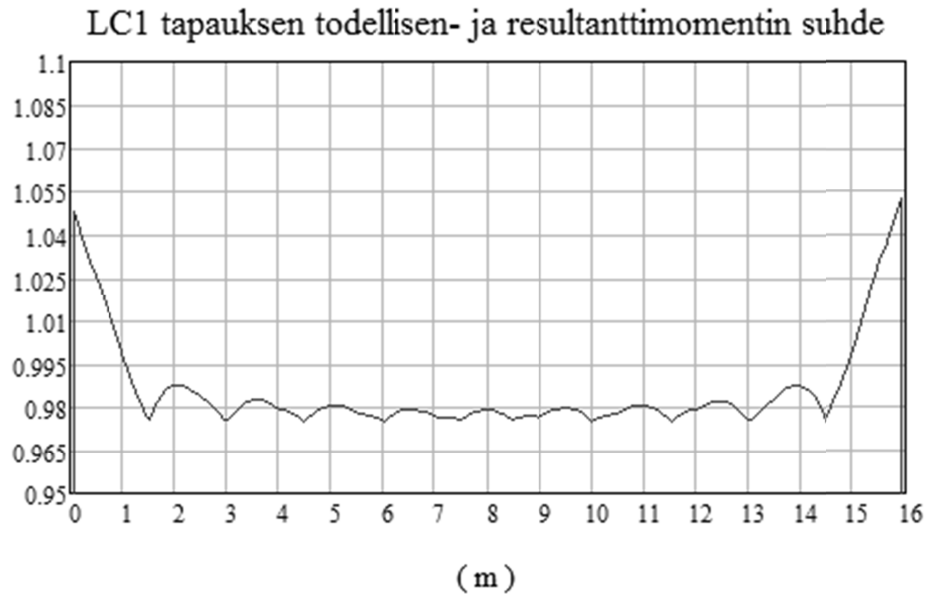
Lopulliset mitoituskuormitukset määräytyvät edellä mainittujen viiden kuormitustapausten perusteella. Kaikkien kuormitustapausten liikkuville kuormille määritellään kuormituksen kannalta kriittisin sijainti, joka määrittää momentin, leikkaus- ja tukivoiman kriittiset arvot. Pituussuuntaisen kriittisen sijainnin lisäksi kaikkien kuormitustapausten kuormakaaviolle määritellään niin epäkeskinen sijainti kuin on mahdollista, jolloin saadaan epäkeskisen kuormituksen aiheuttamat suurimmat mahdolliset vääntökuormitukset huomioitua. Kaikkien kuormitustapausten tutkimisen jälkeen voidaan



Kuva 8: Kuormitustapausten maksimimomenttikuvaajat, liite 2 s. 56.

todeta, että kuormitustapaus LC1 aiheuttaa kaikki kriittiset rasitukset. Tämä helpottaa rakenteen kestävyuden määrittämistä huomattavasti, koska kaikki kestävyystarkastelut voidaan tehdä yhtä kuormitustapausta käyttämällä. Kuvassa 8 on piirrettynä neljän kuormitustapausten maksimimomenttikuvaajat, joita käytetään 16 m sillanrakenteen mitoittamiseen. Lisäksi kuvaan 8 on piirretty sillan kimmoteorian mukainen momenttikestävyys.

Kuormitustapausten momenttikuvaajat ovat maksimimomentin verhokäyriä. Laskennassa käytetty verhokäyrä on muodostettu 200:sta yksittäisen momenttikuvaajan maksimiarvosta. Jokainen yksittäinen momenttijakauma kuvaa kuormitustapausten liikkuvan kuorman eri sijoitusta. Nämä sijainnit on määritelty niin, että liikkuva kuorma kuljetetaan 200:lla askeleella sillan yli. Yksinkertaistettu esimerkki maksimimomentin verhokäyrän muodostamisesta löytyy liitteestä 2 sivulta 54. Verhokäyrillä ei ole yksinkertaista matemaattista esitystä. Tämä hankaloittaa joidenkin kestävyystarkastelujen määrittämistä, joten määritellään kuormitustapauksista vastaava yksinkertainen resultantti kuormitus. Verhokäyrän momenttijakauma ei kuvaa mitään yksittäistä todellista kuormitusta, vaan on kuvaus sillan ylityksen aikana syntyvistä suurimmista momenttikuoormituksista. Tästä syystä verhokäyrän mukaisella jakaumalla mitoitettu profiili kestää kaikki sillan ylityksen aikana syntyvät kuormitukset.



Kuva 9. Kuormitustapauksen LC1 maksimimomenttijakauman ja momenttijakauman suhdekuvaaja, liite 2 s. 56.

Määrävä kuormitustapaus LC1 koostuu 1.5 metrin välein vaikuttavasta pistevoimasta, joten kuormitusta voidaan yksinkertaistaa käyttämällä pistevoimien summan suuruista tasan jakautunutta kuormitusta. Tämä resultanttikuormitus tuottaa oikean suuruiset tukireaktiot, ja sillan päitä lukuun ottamatta hieman suuremman taivutusmomentin arvon, joten tämä yksinkertaistettu kuvaus on hyvin käyttökelpoinen, kuten kuvassa 9 olevasta todellisen- ja resultanttikuormituksen suhteen kuvaajasta voidaan päätellä.

Kuormitustapauksen LC1 perusteella sillan mitoitusmomentiksi tulee 5,76 MNm, leikkausvoimaksi 1,47 MN ja vaakakuormitukseksi valitaan jarru- ja kiihdytyskuorman suurin arvo 900 kN. Näiden arvojen perusteella osoitetaan rakenteen kestävyys. Nämä arvot on määritelty lopullista rakennetta käyttämällä, joten ne sisältävät rakenteen todellisen massan vaikutukset.

## 5.2 Normien mukainen rakenteen kestävyys

Koska kyseessä on teräsrakenne, tulee sen kestävyuden osoittamiseksi käyttää normin EN 1993 Teräsrakenteet mukaisia menetelmiä. Tämän normin eri osista löytyy tarkat ohjeet, kuinka erilaisten rakenneosien kestävyys määritellään, ja kuinka erisuuntaisten voimakomponenttien yhteisvaikutus tulee huomioida. Tämä normi sisältää myös liitoksia koskevan osion, jonka avulla määritellään sekä niveltappiliitoksen että rakenneosien liitosten hitsausliitosten kestävyudet.

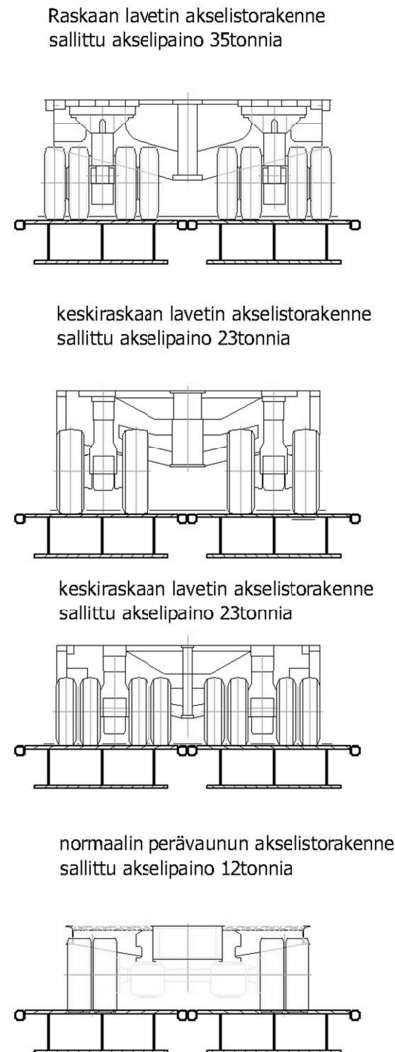
Ensimmäinen asia teräsrakennetta suunniteltaessa on määrittää poikkileikkauksen poikkileikkausluokka. Poikkileikkausluokka kuvaa rakenneosan puristuskestävyyttä. Näitä luokkia on yhdestä neljään. Poikkileikkausluokan määrää rakenneosan hoik-

kuus, eli leveyden suhde vahvuuteen. Esimerkiksi korkealla ja ohuella uumalla on suuri hoikkuusluku. Mitä suurempi tämä suhdeluku on, sitä suurempaan poikkileikkausluokkaan rakenneosia kuuluu. Poikkileikkausluokan 1 rakenteen murtotapa on plastinen murto, ja rakenteen kuormitusten voidaan olettaa jakautuvan plastisuusteorian mukaan, kun taas poikkileikkausluokan 2 mukaisessa rakenteessa kuormitusten oletetaan jakautuvan kimmoteorian mukaan. Poikkileikkausluokan 3 rakenteella ei ole plastisia ominaisuuksia, joten kuormitusten jakautuminen ja rakenteen kestävyys tulee määrittää kimmoteoriolla. Poikkileikkausluokan 4 rakenteita pyritään yleisesti välttämään rakentamisessa, koska tässä luokassa oleva rakenne menettää paikallisesti stabiiliuden lommahtamalla ennen kimmoista myötöä, jolloin kestävyuden määrittelyssä joudutaan käyttämään pienennettyä, niin sanottua tehollista poikkileikkausta. Jotta poikkileikkausluokan 4 rakenteen täysi kestävyys saadaan käyttöön, joudutaan rakenteeseen lisäämään jäykisteitä. Tarkemmat määrittelyt poikkileikkausluokan määrittelystä löytyvät normista EN 1993-1 taulukosta 5.2, jossa on ohjeet erilaisten rakenneosien poikkileikkausluokan määrittelyyn.

Tässä työssä suunniteltavan sillan rakenneratkaisu pyritään pitämään mahdollisimman yksinkertaisena, ja näin ollen helppona valmistaa. Tästä syystä sillan poikkileikkauksen tulee olla vähintään luokan 3 poikkileikkaus. Tarkasteltaessa alustavan poikkileikkauksen mittasuhteita voidaan todeta poikkileikkauksen olevan matala ja leveä. Tästä voidaan päätellä, että profiilin laipat ovat kestävyydeltään kriittisimmät osat. Rakenteen uumat taas ovat suhteellisen matalat matalan rakennekorkeuden ansiosta, mutta vahvat rakenteen leikkauskestävyyden takaamiseksi. Tästä syystä niiden poikkileikkausluokka ei tuota ongelmia.

Tarkasteltaessa alustavaa kaksiumaista poikkileikkausprofiilia todetaan, että profiilin ylä- eli puristettu laippa ei täytä luokan 3 vaatimuksia. Tämä tarkoittaa sitä, että rakenne vaatii jäykisteitä, jotta koko poikkileikkaus saadaan tehokkaaseen käyttöön. Toisaalta sillan käytön kannalta olisi hyvä, jos koko sillan kansi kestäisi suuria piste-kuormia. Tätä kaksiumainen rakenne ei myöskään kovin hyvin kestä. Tästä syystä muutetaan poikkileikkaus kolmiumaiseksi. Kun kolme uumaa sijoitetaan 550 mm keskiöetäisyydelle toisistaan, siirtyy poikkileikkaus puristetun laipan osalta luokkaan 1. Toinen uumien sijoitukseen vaikuttava tekijä on erilaisten ajoneuvojen akselistorakenteet, joiden pyöräkuormitukset pyritään jakamaan mahdollisimman tasan uumien kesken. Kuvassa 10 on muutamia tyypillisiä akselistoja sijoitettuna sillalle, ja kuvan perusteella voidaan todeta 550 mm uumajaon olevan sopiva useantyyppisille akselistorakenteille. Kolmiumaisella rakenteella uumalevyjen vahvuutta voidaan hieman ohentaa leikkauskestävyyden kärsimättä ja rakenteen massan suuremmin kohoamatta. Uumalevyjen paksuuden tulee kuitenkin olla sellainen, että ne täyttävät poikkileikkausluokan 3 vaatimukset, ja eivät ole alttiita leikkauslommahdukselle.

Kun profiilin poikkileikkausluokka on tiedossa, voidaan sen kestävyysarvot määrittää. Näiden kestävyysarvojen tulee kaikissa tapauksissa olla mitoittavia kuormituksia suurempia, jotta rakenne kestää. Poikkileikkausluokan perusteella valitaan,



Kuva 10: Tyypillisten ajoneuvojen renkaiden sijoittuminen sillalle.

käytetäänkö kestävyysarvojen mitoittamiseen kimmo- vai plastisuusteoriaa. Tämän valinnan jälkeen poikkileikkaukselle määritetään taivutusvastus ja leikkauspinta-ala. Taivutusvastuksen perusteella määritellään profiilin taivutuskestävyys, ja leikkauspinta-alan perusteella sen leikkauskestävyys. Poikkileikkausprofiili pyritään mitoittamaan niin, että leikkausvoiman mitoitusarvo on alle puolet profiilin leikkauskestävyydestä. Tällöin normiston EN 1993 mukaan leikkauskuormitus ei vaikuta rakenteen taivutus- tai puristuskestävyyteen. Tällainen mitoitus yksinkertaistaa laskelmia, ja mahdollistaa täyden taivutuskestävyyden hyödyntämisen.

Taivutus- ja leikkauskestävyyden lisäksi profiilille määritellään puristuskestävyys, joka on riippuvainen poikkileikkauksen geometriasta ja profiilin pituudesta. Siltaa voidaan pitää päistään niveltuettuna, jolloin puristuskestävyys määritellään käyttäen Eulerin II nurjahdustapausta. Näiden yleisten kestävyysarvojen perusteella määritellään perusrakenteen kestävyys, jonka määrittely on esitetty liitteessä 1 sivulla 45. Jotta kaik-

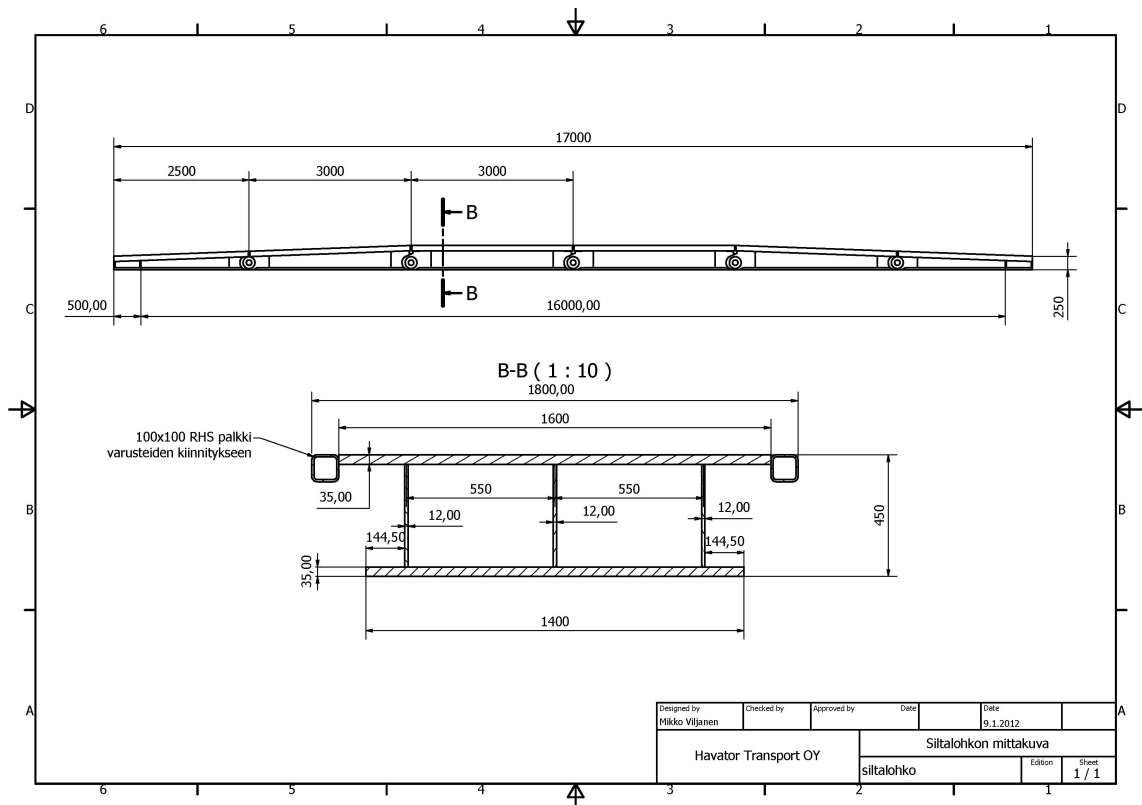


kia edellä mainittuja kestävyysarvoja voidaan hyödyntää, tulee rakenneosien hitsatut liitokset myös mitoittaa vastaamaan edellä mainittuja arvoja. Näiden lisäksi määritellään joukko paikallisia kestävyysarvoja.

### 5.3 Normit täyttävä rakenneratkaisu

Edellisissä kappaleissa tehtyjen määrittelyjen perusteella on suunniteltu rakenne, joka täyttää kaikki annetut vaatimukset. Laskelmat on esitetty liitteessä 3. Lopullinen rakenne muodostuu hitsatusta kolmiuumaisesta koteloprofiilista, jonka korkeus muuttuu pään 250 mm korkeudesta 5,5 m matkalla keskikohdan 450 mm korkeuteen. Tällä korkeusprofiililla täytetään lavettien jousitusgeometrian asettamat vaatimukset, ja taipuman arvo ei ole merkittävästi suurempi kuin tasakorkuisella rakenteella. Kuvassa 11 on esitetty mittakuva sillan sivuprofiilista, moduulijaosta sekä poikkileikkauksesta.

Rakenteen poikkileikkaus koostuu 35 mm vahvaisista laipoista. Ylälaippa on 1600 mm leveä, jonka molemmin puolin hitsataan 100 mm leveä RHS profiili sillan varusteiden kiinnitystä varten. Alalaippa on leveydeltään 1400 mm, koska tämä on minimileveys toimivan liitosrakenteen toteuttamiseksi. Laippojen väliin sijoitetaan kolme kappaletta 12 mm vahvaisia uumia. Tämä uuman vahvuus takaa riittävän leikkaus- ja pistekuormakestävyys, eikä ole altis stabiiliuden menetyksille. Uumat sijaitsevat laippojen välissä keskeisesti niin, että uumien keskiöetäisyys on 550 mm. Sillan pääty-moduulien päät suljetaan päätylevyillä, jotta varmistutaan riittävästä tukikestävydestä.

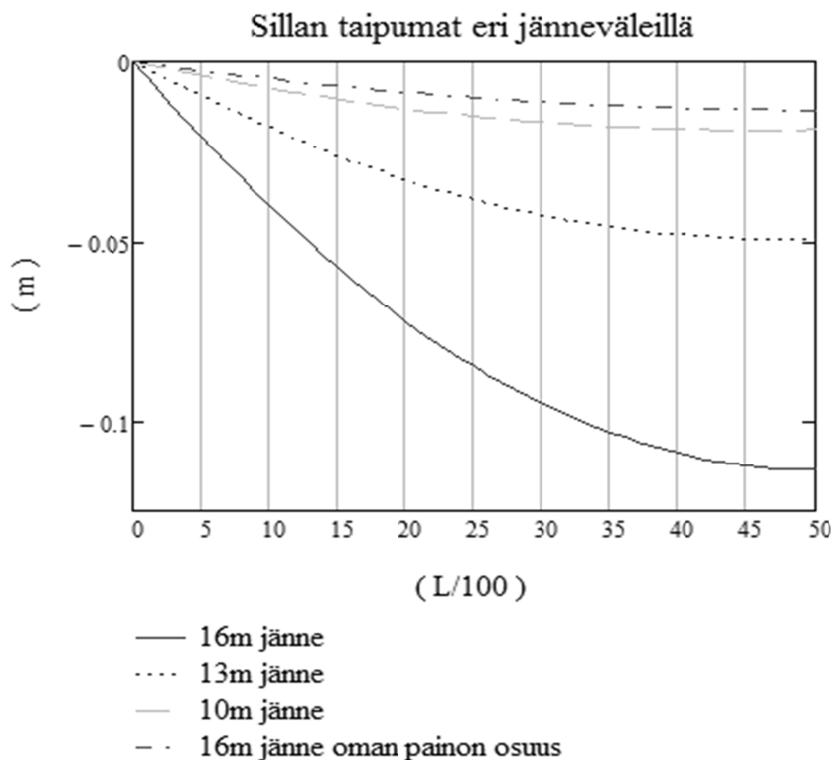


Kuva 11: Siltalohkon mittakuva.

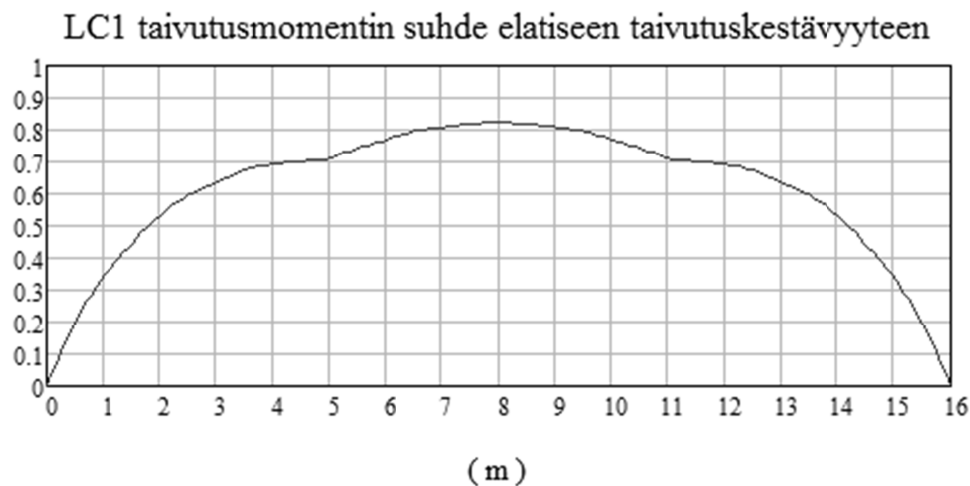
Päätylevyissä käytetään samaa mitoitusta kuin profiilin uumissa, jotta ne eivät ole alttiita stabiiliuden menetykselle.

Tällä edellä mainitulla poikkileikkauksen mitoituksella koko poikkileikkaus on luokan 1 poikkileikkaus. Tämän ansiosta poikkileikkauksen taivutus-, leikkaus ja aksiaalikuorman kestävyys voidaan määrittää plastisuusteorian mukaan, ja näin saavuttaa kimmoteorian mukaista kestävyyttä suuremmat kestävyysarvot. Taivutuskestävyyden määrittelyssä plastisuusteorian tuomasta lisäkapasiteetista ei ole tässä tapauksessa hyötyä, koska taivutuskestävyys ei ole määräävä tekijä mitoitettaessa 16 m pituista siltakonstruktiota, kuten kuvista 8 ja 13 voidaan havaita.

Tämän rakenteen tapauksessa taipumalla on mitoittava vaikutus taivutuskestävyyden sijasta, koska taipuma saavuttaa suurimman sallitun arvonsa taivutuskestävyyttä pienemmällä kuormituksella. Kuormitustapauksen LC1 käyttörajatilan kuormituksilla lasketut taipumakuvaajat on esitetty kuvassa 12. Maksimikuormalla 16 m jännevälillä sillan kokonaistaipuma on luokkaa  $L/150$ , joka on huomattavan suuri taipuma. Tätä arvoa voidaan pienentää esikorottamalla siltaa 70 mm tasolle  $L/350$ , jota voidaan pitää siedettävänä ja käyttöä haittaamattomana. Esikorotus on mahdollinen sillan liitosten kiilapalojen vahvuutta lisäämällä. Kuvassa 12 on esitetty, kuinka taipuma kasvaa suhteessa jännevälin pidentämiseen. Liitteen 2 sivun 58 laskelmissa on osoitettu, kuinka sillan jännevälin kasvattaminen yli 16 metrin vaikuttaa suurimman sallitun kuormituksen arvoon. Laskelmin on todettu, että LC4 tapauksen kuormituksella siltaa voidaan pidentää enintään 3 metriä.



Kuva 12. Sillan taipuma eripituisissa kokoonpanoissa, liite 3 s. 63.



Kuva 13. Mitoittavan taivutusmomentin ja elastisen taivutuskestävyyden suhde, liite 3 s. 60.

Taivutuskestävyyden määrittelyn jälkeen tarkistetaan profiilin leikkauskestävyys. Kuten edellä on mainittu, normin EN 1993 mukaan leikkausvoiman vaikutusta muihin kestävyysuureisiin ei tarvitse huomioida, jos mitoittava leikkausvoima on enintään puolet profiilin leikkauskestävyydestä. Tämän vaatimuksen kolmiuumainen rakenne täyttää helposti, rakenteen mitoittava leikkausvoima on 1,47 MN, ja rakenteen leikkauskestävyys on 7,5 MN, eli noin viisinkertainen kuormitukseen verrattuna. Tästä syystä leikkausvoimien vaikutusta ei tarvitse huomioida perusrakenteen taivutus- ja puristuskestävyyden määrittelyssä. Laskelmat leikkauskestävyyden määrittelystä on esitetty liitteessä 3.1 sivulla 61.

Koska siltaa kuormitetaan myös aksiaalisuunnassa, tulee sillan puristuskestävyys tarkistaa. Puristuskestävyys määritellään normin EN 1993 mukaan menetelmällä, joka pohjautuu Eulerin nurjahdusteoriaan. Siltaa mallinnetaan Euler II -tapauksen mukaisena päistään nivelellisesti tuettuna palkkina käyttämällä sillan päädyn mukaista todellista heikompa poikkileikkausta. Tätä turvalliselle puolelle yksinkertaistettua laskentamallia käytetään, koska sillalle tuleva aksiaalikuormitus on vain 900 kN suuruinen. Tällä yksinkertaistetulla laskentamallilla saadut tulokset on esitetty liitteessä 3 sivulla 65, ja niiden perusteella voidaan todeta, että aksiaalikuormitusta ei tarvitse huomioida.

Sillalle tuleva ajoneuvokuormitus ei myöskään koskaan ole täysin keskeinen, joka on huomioitu kuormakaavioiden epäkeskisellä sijoituksella. Koska siltaprofiili on suljettu kotelorakenne, on sen vääntökestävyys erittäin suuri. Vääntökestävyyden määrittelyssä on käytetty kimmoteorian mukaista menetelmää. Vääntökestävyyden määrittely on esitetty liitteessä 1 sivulla 46 ja epäkeskisen kuormituksen aiheuttamat leikkausjännitykset on esitetty liitteessä 3 sivulla 60. Laskelmien perusteella voidaan todeta vääntökuormituksen aiheuttama lisäkuormitus merkityksettömän pieneksi.

Näiden edellä esiteltyjen tulosten perusteella voidaan todeta suunnitellun sillan perusrakenteen täyttävän kaikki sille asetetut vaatimukset. Seuraavissa kappaleissa käsitellään vielä rakenneosien paikallisen kestävyuden osoitus.

## 5.4 Rakenneosien paikallisen kestävyuden varmistus

Rakenneosien paikallisten kestävyyksien määrittämiseen käytetään samoja kestävyuden osoitusperiaatteita kuin koko rakenteelle, elleivät normit erikseen määrää käyttämään jotain muuta menettelyä. Tarvittavia paikallisia kestävyuden arvoja ovat liitosrakenteen lisäksi muun muassa kuormitetun laipan pistekuormakestävyys, uuman puristuskestävyys sekä moduulien liitoksen kestävyys. Tämä on tärkeä asia tutkia, koska normaali-käytöstä poiketen sillalle saattaa olla tarvetta kohdistaa hyvinkin suuria pistekuormia.

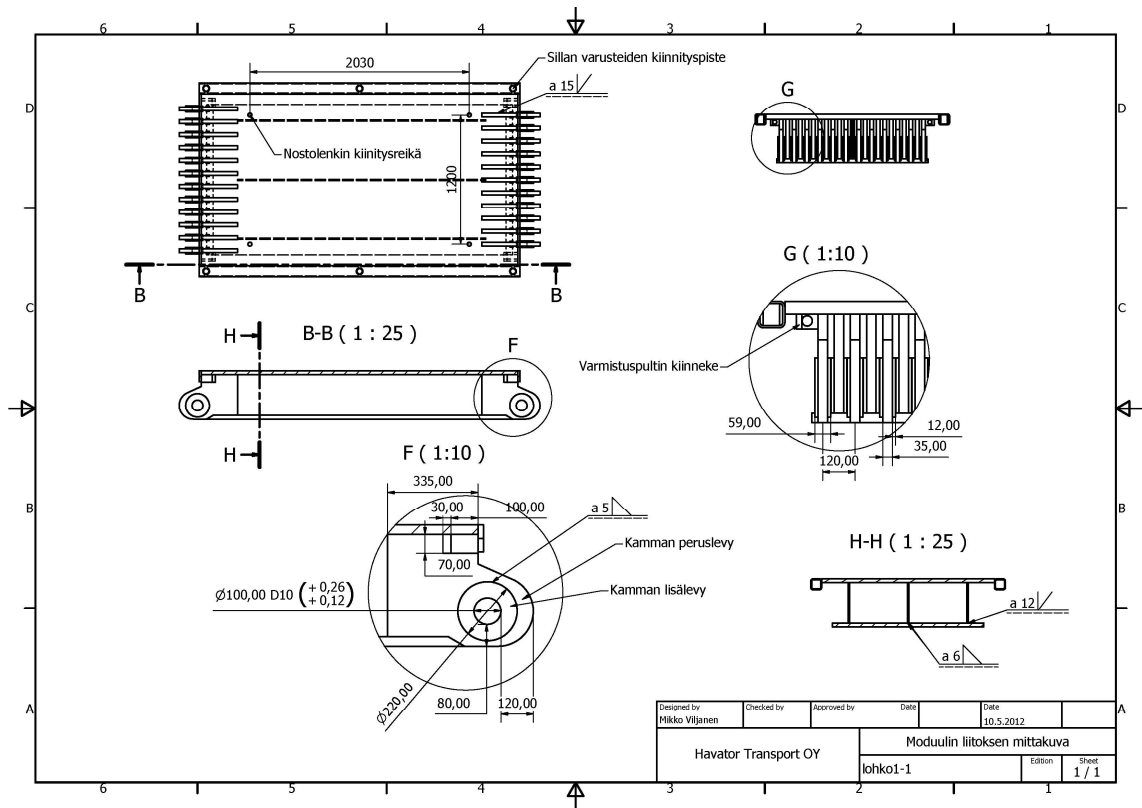
### 5.4.1 Liitosrakenteen kestävyuden varmistus

Tämän diplomityön suurin haaste oli löytää ratkaisu moduulien liitosrakenteen toteuttamiseksi. Parhaaksi liitosvaihtoehdoksi todettiin edellä kuvattu niveltappiliitos. Niveltappiliitoksen suunnitteluun annetaan ohjeita normissa EN 1993-8 liitosten mitoitus. Liitoskamman geometria määriteltiin edellä mainitun normin ohjeiden mukaan, näin liitos täyttää normin vaatimukset. Niveltappiliitoksen mitoitus on esitelty kuvassa 14 ja mitoituslaskelmat liitteessä 3.2. Normin määrittelemälle geometrialle määriteltiin Hertzin kontaktipaineet, ja todettiin niiden olevan hyväksyttävällä tasolla. Käyttörajan kontaktipaine on 312 MPa, eli kimmoisella alueella ja mitoituskuormituksella kontaktipaine on 395 MPa, eli lievää liitospinnan paikallista plastisoitumista tapahtuu, joka ei kuitenkaan merkittävästi heikennä rakenteen murtolujuutta. Lisäksi sillan profiilin taiputuskestävyyttä vastaavalla kuormituksella määritetty kontaktipaine on 430 MPa. Laskelmat tappivoimien suuruudesta ja niiden aiheuttamista kontaktipaineista löytyvät liitteestä 3. Mitoituksessa käytetyt tappivoimat on esitetty kuvassa 15. Kuvan 15 perusteella voidaan havaita, että sillan keskimäinen liitos on mitoituksen kannalta kriittisin piste. Toisin sanoen liitoskonstruktio, joka kestää sillan keskiliitoksessa, soveltuu sellaisenaan kaikkiin muihin liitoksiin.

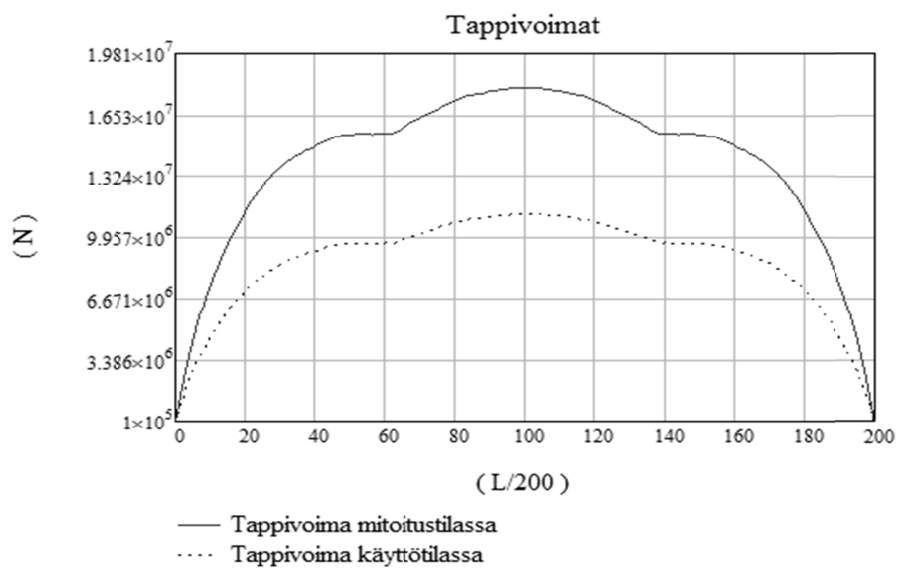
Edellisten laskelmien lisäksi liitoskamman kestävyyttä tutkittiin FEM-analyysillä mallintamalla kuormitusta Hertzin teorian mukaiselle reiän kontaktipinta-alalle kohdistuvalla resultanttipaineukuormituksella ja profiilin ylälaippaan kohdistuvalla samansuuruisella puristavalla voimalla. Resultanttikuormitus määriteltiin jakamalla liitostappiin kohdistuva kuormitus tasaiseksi painekuormitukseksi Hertzin teorian mukaiselle kontaktipinta-alalle. Tarkempi kuormituksen määrittely on esitetty liitteessä 5 sivulla 82.

Kuvissa 16, 17 ja 18 on esitelty keskimäisen liitoksen FEM-analyysin tulokset. Analyysissä käytettyjä resultanttikuormituksia vastaavat tappivoimat ovat perusrakenteen myötökuormituksella 21,9 MN, mitoituskuormituksella 18,0 MN, ja käyttötilassa 11,2 MN. Tuloksista voidaan todeta, että liitosrakenne myötää paikallisesti vastaavalla kuormituksella kuin perusrakennekin. Näiden tulosten perusteella voidaan todeta, että

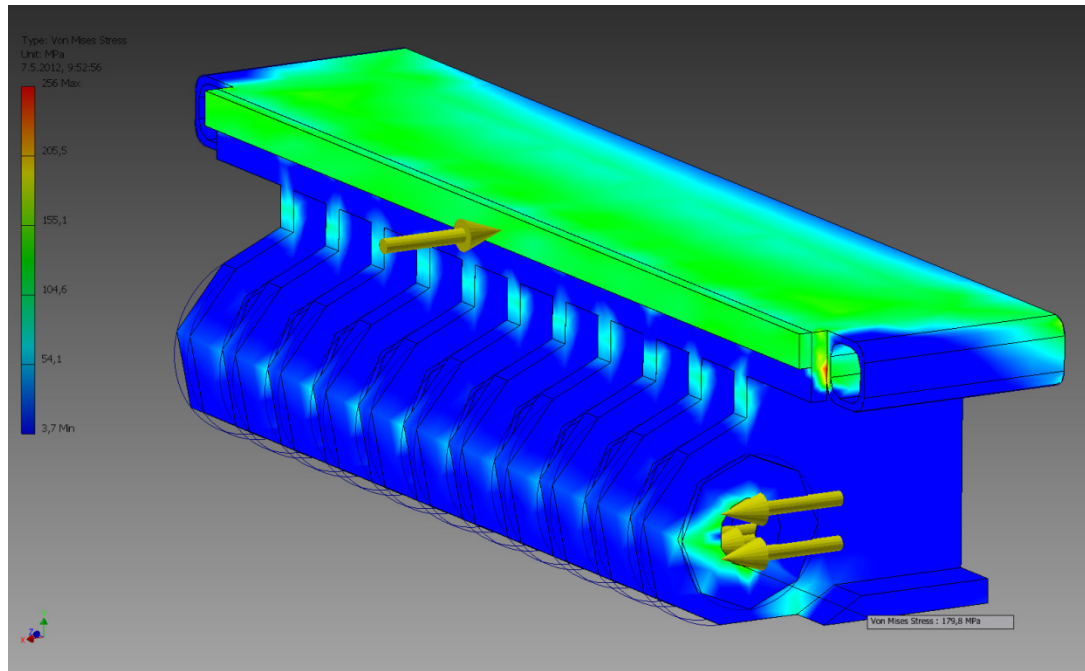
suunnittelussa on onnistuttu luomaan perusrakenteen kanssa yhtä kestävä liitosrakenne. Tuloksista voidaan myös todeta, että normin EN 1993-8 mukainen liitosgeometria tuottaa turvallisen ratkaisun.



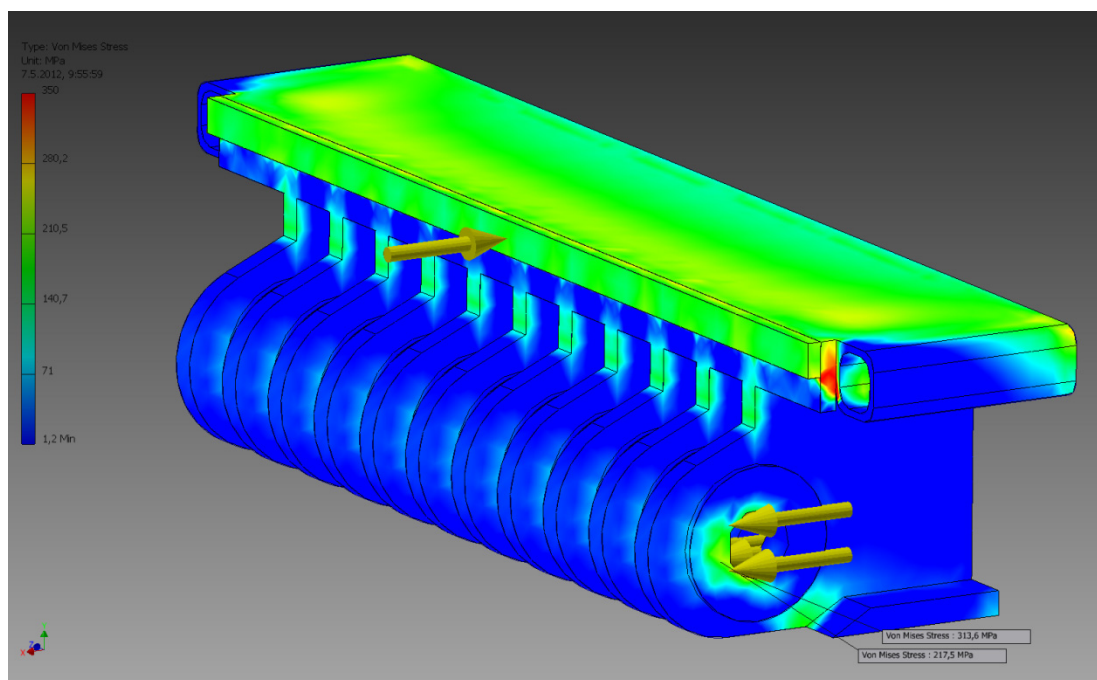
Kuva 14: Liitoksen mittakuva.



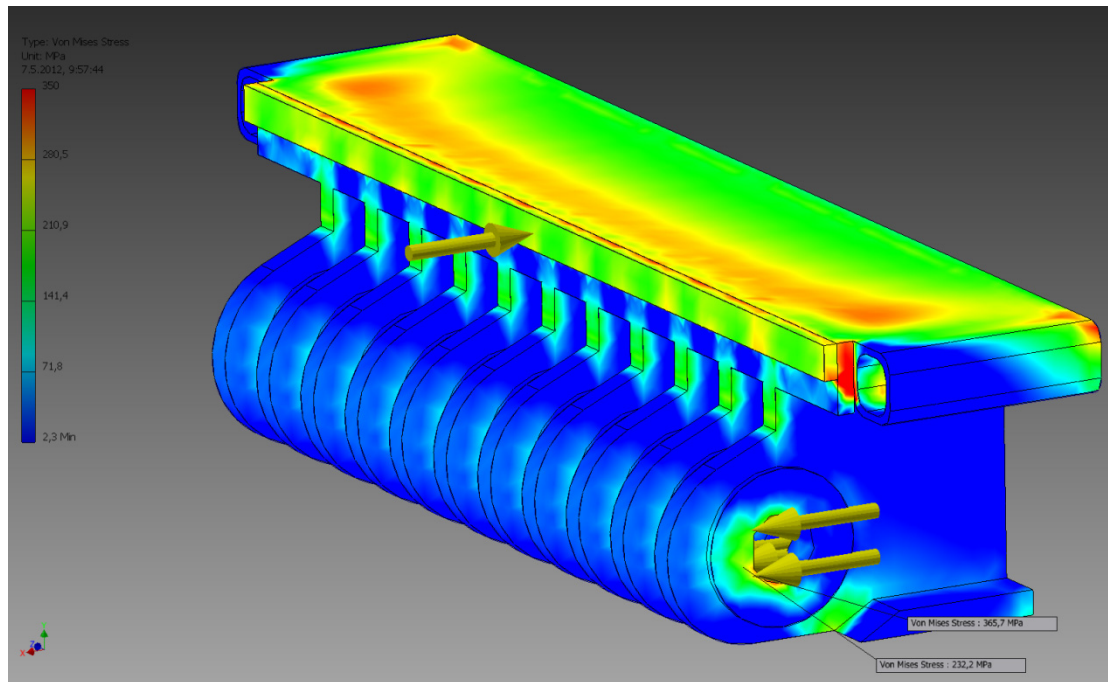
Kuva 15: Liitostappiin kohdistuvat voimat sillan eri pisteissä, liite 2 s. 59.



Kuva 16: Liitoksen FEM analyysin tulokset käyttötilan kuormituksella suurin paikallisen jännityksen arvo noin 180 MPa.



Kuva 17: Liitoksen FEM analyysin tulokset mitoituskuormituksella. Suurin paikallisen jännityksen arvo noin 314 MPa.



Kuva 18: Liitoksen FEM analyysin tulokset perusrakenteen myötökuormituksella. Suurin paikallisen jännityksen arvo noin 368 MPa.

#### 5.4.2 Uuman ja laippojen pistekuormakestävyuden varmistus

Sillan käytön kannalta on tärkeää varmistua, että profiilin uumien ja laippojen pistekuormakestävyys on riittävä. Laippojen kestävyys tarkistetaan normin EN 1993-1-1 mukaisella kriittisen pisteen jännityksiin perustuvalla menetelmällä. Uumien pistekuorman kestävyys puolestaan tarkistetaan normin EN 1993-1-5 mukaisella menettelyllä, joka perustuu uuman kriittisen lommahduskuormituksen määrittelyyn.

Laippojen osalta tutkittiin keskellä uumien väliä vaikuttavan viivakuorman sekä tasaisen painekuormituksen aiheuttamat vaikutukset. Laskelmissa huomioitiin taivutuksen aiheuttama ylälaipan puristusjännitys, sekä kuormitetun ulokkeen taivutus- ja leikkausjännitykset. Laippaa mallinnettiin laskelmissa yhden pituusyksikön levyisenä päistään nivelellisesti tuettuna palkkina. Laskelmissa viivakuormituksen ominaisarvona käytetään 300 kN/m suuruista kuormitusta, sekä painekuormituksen ominaisarvona 1 MN/m<sup>2</sup>. Näiden kuormitusten katsotaan kattavan kaikki normaalit sillan kannelle tulevat kuormitukset. Laskelmat kestävyuden osoittamiseksi on esitetty liitteessä 3.1 sivulla 72. Laskelmien perusteella voidaan todeta laipan kestävä tarkastellut kuormitukset, ja kuormitusten aiheuttamat taipumat ovat merkityksettömän pieniä.

Laipan keskikohdan tutkimisen lisäksi tarkastettiin, kestäväkö ylälaipan ulokkeellinen reuna ajoneuvon pyöräkuormista aiheutuvan 50 kN/m viivakuormituksen. Ylälaipan ulokereunan kestävyuden osoittamiseen käytetään samaa kriittisen pisteen jännityksiin perustuvaa menetelmää kuin laipan keskiosan tarkastelussa on käytetty. Liitteen 3.1

sivun 70 laskelmien perusteella todetaan laipan ulokkeellisen reunan kestävä vaadittu viivakuormitus, ja kuormituksesta johtuva laipan reunan taipuma pieneksi.

Laippojen kestävyys lisäksi tutkitaan uumien pistekuorman kestävyys. Uumien tarkastelussa käytetään normin EN 1993-1-5 mukaista tukemattoman uuman laskentamallia. Uuman pistekuorman kestävyys tulisi olla noin 1 MN luokkaa, joka vastaa voimakkaan hydraulitunkin tai tukijaloille lasketun raskaan kuorman aiheuttamaa kuormitusta. Liitteessä 3.1 sivulla 65 esitettyjen laskelmien mukaan uuma kestää 1 MN kuormituksen, mikäli pistekuorman kanssa yhtä aikaa vaikuttava taivuttava kuormitus on korkeintaan LC5 tapauksen mukainen 4,11 MNm. Tämä on erittäin hyvä tulos, koska suuri pistekuorma ei käytännössä koskaan vaikuta yhtä aikaa suuren taivutuskuormituksen kanssa. Pistekuorman kestävyys lisäksi tarkastettiin, että uumalla ei ole lommahdusvaaraa kuormitetun laipan taipumisen johdosta. Tämä tarkastus tehtiin käyttämällä normin EN 1993-1-5 mukaista menetelmää, jonka avulla todettiin, että uumalla ei ole lommahdusvaaraa.

Sillan päätymoduulien tukipainekestävyys määriteltiin samalla menettelyllä kuin uumien pistekuorman kestävyys, mutta laskentamallina käytettiin palkin päädyn läheisyydessä sijaitsevan kuormituksen mallia. Sillan päätyjä tutkittaessa ei tarvitse huomioida taivutusmomentin vaikutuksia, koska sillan rakenteen staattinen toimintatapa on vapaasti tuettu palkki. Sillan päätyjen 500 mm pituisten tukipintojen ja alustan tukipinnan välissä tullaan käyttämään kuormituksia tasaavaa kumilevy-laakeria, jonka avulla tukipaine saadaan jaettua koko tukipinnalle. Kolmiuumaisen rakenteen ansiosta päätymoduulien tukipainekestävyys on huomattavasti suurempi kuin suurimman mitoituskuormituksen aiheuttama 1,47 MN tukivoima. Tukipintojen kestävyys ansiosta voidaan tarvittaessa käyttää suunniteltua pienempää tukipintaa ilman vaaraa rakenteen vaurioitumisesta.

Lisäksi tarkastettiin tukipintojen päätylevyjen puristuskestävyys. Päätylevyjen puristuskestävyys mallinnettiin samalla laskentamenetelmällä kuin tukipinnan puristuskestävyys. Liitteessä 3.1 sivulla 67 esitettyjen laskelmien perusteella voidaan todeta moduulin päätylevyjen puristuskestävyyden olevan suurempi kuin suurin mahdollinen tukivoiman arvo, joten silta voidaan tarvittaessa tukea suoraan päädystä. Tämä on hyödyllinen ominaisuus, joka mahdollistaa esimerkiksi kuormanjakopalkin käytön sillan pään alla. Tällaisen palkin käyttö voi olla tarpeellista käytettäessä siltaa esimerkiksi vesialuksen lastaukseen heikolta laiturilta.

### 5.4.3 Nostolenkkien kiinnityspisteiden kestävyysvarmistus

Sillan nostolenkkien kiinnityskohtien paikallinen kestävyys tulee myös osoittaa. Analysoitaessa rakennetta havaittiin, että paras paikka nostopisteen kiinnitysreiälle on profiilin ulommaisten uumien ulkopuolella. Nostolenkkien kiinnitysreikien sijoitus on esitelty kuvassa 14. Sijoittamalla reikä mahdollisimman lähelle uumaa saadaan kuormituksen aiheuttama profiilin ylälaippaa taivuttava momentti minimoitua, ja mitoittavaksi ehdoksi muodostuu nostolenkin kiinnitysmutterin lävistyskestävyys. Käyttämällä kiinni-



tysmutterin ja laipan välissä aluslevyä voidaan lisätä lävistyskestävyyttä. Laipan vahvan rakenteen ansiosta ei lävistyskestävyys kuitenkaan muodostu merkittäväksi tekijäksi, joka on liitteen 6 sivun 85 laskelmin osoitettu.

Viimeinen paikallinen kestävyystarkastelu tehdään liitoksen varmistuspulttien kiinnikkeille, jotka mahdollistavat kokonaisten siltamoduulien noston. Varmistuspulteille tuleva kuormitus määräytyy siltamoduulin kokonaisena noston aiheuttaman negatiivisen taivutusmomentin perusteella. Tämän momentin määrittelyssä käytetään jatkettua siltakonstruktion arvioitua 30 tonnin omaa painoa ja laskelmissa määriteltyä 20 metrin rakennepituuutta. Laskelmien perusteella varmistuspulteiksi valitaan kaksi kappaletta 8.8 lujuusluokan M36 pultteja, jotka kestävät vaaditun kuormituksen. Varmistuspultin kiinnike muodostuu kahdesta lattateräksestä, joiden pituus määräytyy M36 pultin vetokeskävyyden kestävän hitsausseamun pituuden mukaan. Kuvassa 14 on esitetty varmistuspulttien kiinnikkeen muoto ja mitoitus. Mitoituslaskelmat löytyvät liitteestä 6.

## 5.5 Valmistustekniset vaatimukset

Valmistustekniset vaatimukset pyrittiin ottamaan huomioon jo rakennesuunnittelun alkuvaiheessa, jotta rakenneratkaisusta muodostuisi toteutuskelpoinen. Rakenneratkaisuksi valittu kolmiuumainen rakenne on vastaavaa kaksiumaista rakennetta haastavampi ja kalliimpi valmistaa, mutta kolmiuumaisen rakenteen parempi pistekuorman kestävyys on tässä projektissa tärkeämpi kuin valmistuksen helppous.

Toinen liitossuunnittelun kannalta tärkeä rakenneosia on liitoskampojen liitosmoduulin päihin. Nämä liitokset ovat sillan kaikista liitoksista kovimmalla rasituksella ja vaikeasti toteutettavissa. Liitosratkaisuksi valittiin tapa, jossa kampalevyt tuodaan läpi profiilin ylä- ja alalaipasta, ja hitsataan kiinni laippojen ulkopinnoista. Tällä ratkaisulla varmistetaan hitsausliitoksen hyvä laatu. Moduulin rakenneosien liitoshitsien sijainti on esitetty kuvassa 14 ja hitsien mitoituslaskelmat liitteessä 4.

Sillan rakenteesta johtuen suurin osa valmistusvaatimuksista koskee hitsausliitoksia. Luvussa 5.1 on määritelty rakenteelle toteutusluokka EXC4. Tämä tarkoittaa tiukkoja laatukriteereitä valmistukselle ja valmistuksen laadunvalvonnalle. Vaatimukset edellä mainitun rakenteen toteuttamiselle on määritelty normissa EN 1090-2, teräs- ja alumiinirakenteiden toteuttaminen. Normi määrittelee tarkasti vaatimukset käytettäville materiaaleille, liitosmenetelmille, liitosten tarkistukselle ja valmistushenkilöstön pätevyyksille. Esimerkiksi, normin mukaan kaikki hitsit hitsataan korkeimpaan B-luokkaan ja tarkastetaan ainetta rikkomattomilla menetelmillä (NDT). Nämä normin esittämät vaatimukset esitetään tapauskohtaisesti laaditussa hitsausohjeessa, jonka laatija on pätevydet omaava suunnittelija.

Rakenteen suunnitteleva rakennesuunnittelija ei voi ilman erilliskoulusta laatia rakenteen toteuttamiseen vaadittavia hitsausohjeita. Hitsattujen rakenteiden osalta rakennesuunnittelijan tehtävä on vain mitoittaa rakenne ja määrittellä mittatoleranssit, hit-

sien a-mitta, käytettävät materiaalilaadut sekä toteutusluokka, näiden tietojen pohjalta pätevydet omaava hitsaussuunnittelija laatii hitsaussuunnitelman. Hitsaussuunnitelmasta ilmenevät käytettävät hitsausmenetelmät, vaadittavat tarkistukset, tuotantohenkilöstön pätevyysvaatimukset sekä muut tarvittavat tiedot.

Perusrakenteen mittatoleranssien osalta silta ei ole kovin kriittinen rakenne, normaali muutaman millimerin tarkkuus on käytön kannalta aivan riittävä. Ainoa tarkkuutta vaativa osio sillassa on moduulien liitosrakenteet. Kampalevyjen ja kiilapalojen vastinpintojen tulee olla asennettu kaikissa moduuleissa normin EN 1090-2 luokan 2 toleranssien mukaan, jotta liitokset toimivat moitteettomasti. Tämä tarkkuus on mahdollista saavuttaa käyttämällä kampalevyjen hitsauksessa sopivia hitsaustukia. Liitosrakenteen vaativin osa on liitostapin ja -reiän koneistus, reikä ja tappi tulee koneistaa tarkasti vaadittuun mittatoleranssiin kampalevyjen hitsauksen jälkeen.

## 6 YHTEENVETO

Tämän diplomityön tarkoituksena oli suunnitella moduulirakenteinen silta. Suunnittelu-prosessi aloitettiin lähtötietojen määrittelyllä, joka oli yksi tärkeimpiä työvaiheita projektin onnistumisen takaamiseksi. Lähtötietojen määrittelyä varten tutustuttiin aluksi yleisesti erikoiskuljetusten kuljettamiseen käytettävään kalustoon ja sen erityispiirteisiin. Perusteellinen tutustuminen erikoiskuljetusten vaatimuksiin ja kalustoon oli välttämätöntä työssä tarvittavan ymmärryksen saavuttamiseksi.

Erikoiskuljetusten peruseriaatteiden selvityksen jälkeen aloitettiin sillan mahdollisten käyttömahdollisuuksien kartoitus. Tämän vaiheen tarkoituksena oli selvittää, millaisia vaatimuksia sillan eri käyttömahdollisuudet asettavat sen suunnittelulle. Käyttömahdollisuuksien selvittelyssä oli Havator Transportin henkilökunnan pitkäaikainen kokemus erikoiskuljetusalasta korvaamaton apu.

Lähtötietojen perusteella sillan tulee soveltua sekä olemassa olevan sillan päällä käytettäväksi että käytettäväksi sellaisenaan, esimerkiksi vesialuksen lastaukseen. Lisäksi siltaa tulee voida käyttää työtasona korkeita pistekuormia vaativissa töissä. Näiden tietojen perusteella aloitettiin perusrakenteen suunnittelu ja tarvittavien normien tutkiminen. Suunnittelun aluksi luotiin sillasta yksinkertainen esisuunnittelumalli, joka täytti ulkoiset sillan geometrialle asetetut vaatimukset. Tätä mallia lähdettiin analysoimaan yksinkertaisilla lujuusopin menetelmillä ja vaadituilla kuormituksilla. Näiden ensimmäisten analyysien perusteella saavutettiin alustava rakenneratkaisu, josta lopullista rakennetta lähdettiin kehittämään.

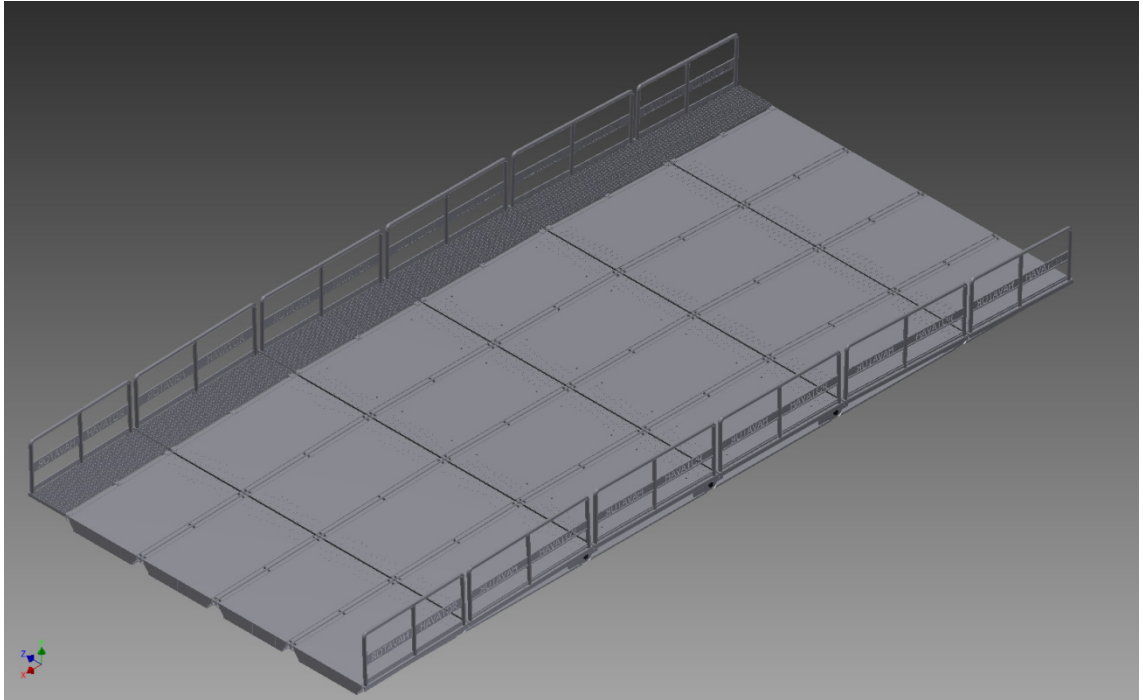
Kun alustava rakennemalli oli muodostettu, tutkittiin sitä vaatimusten mukaisilla kuormituksilla normistojen vaatimalla tavalla. Rakennetta muokattiin niin kauan, että se täytti kaikki normien ja käyttötarkoituksen asettamat vaatimukset. Tämä oli yksi suunnitteluprosessin työläimmistä vaiheista, koska pienikin muutos rakenteeseen aiheuttaa muutoksia useaan eri asiaan.

Lopullisen rakenneratkaisun ja moduulijaon selvittyä laadittiin lopulliset rakennelaskelmat, joilla sillan kestävyys voidaan osoittaa. Lopullisia normien vaatimia laskelmia tehtäessä rakenteen moni yksityiskohta vielä muuttui, mutta lopulta saavutettiin sekä normien että käytön asettamien vaatimukset täyttävä rakenne. Näiden vaatimusten mukaisuuden osoittamiseksi suoritettiin laskelmia sekä käsin laskemalla että FEM-analyysiä käyttämällä. Lopullisten laskelmien tulosten perusteella sillasta luodaan valmistuspiirustukset, joiden avulla silta voidaan valmistaa.

Suunnittelun tuloksena syntyi kuvan 19 mukainen silta. Kuvassa oleva siltakoonpano on tarkoitettu kahdelle rinnakkain kytketylle lavetille, jolloin suurin sallittu kuorma sillalle on 660 tonnia. Sillan suunnittelukriteereinä olleet vaatimukset saatiin

täytettyä kohtuullisen pienillä muutoksilla, ja kaikki käytön vaatimat ominaisuudet pystyttiin toteuttamaan. Sillan kantavuusvaatimukset saatiin toteutettua raskaimman kuormituksen vaatimuksen osalta 16 metrin jännevälillä ja tästä lyhempinä versioina, jotka ovat 4, 10 ja 13 metriä. Lisäksi lisämoduulilla toteutettava 19 metrin jänneväli täyttää vaaditut LC4 kuormitustapauksen vaatimukset.

Diplomityön tuloksena syntyneen moduulirakenteisen sillan suunnitelmaa voidaan pitää onnistuneena. Työn tuloksena saatiin monipuoliseen käyttöön soveltuva helppokäyttöinen ja ainutlaatuinen silta, joka on valmis toteutettavaksi.



Kuva 19: Valmis silta täydessä 16 m pitkässä 7,2 m leveässä kokoonpanossa kaitein ja kulkutasolla varustettuna.

## LIITE 1

### Rakenneosien mitat ja kestävyiden mitoitusarvot.

#### Sillan rakenteiden mitat ( m ):

$L := 16$	sillan pituus
$h_{ua} := 0.45$	korkeus keskimoduulissa
$h_{um} := 0.25$	korkeus päässä
$b_u := 1.6$	ylälaipan tehollinen leveys
$b_d := 1.4$	alalaipan tehollinen leveys
$t_{f1} := 0.035$	ylälaipan paksuus moduulissa 1
$t_{f2} := 0.035$	ylälaipan paksuus moduulissa 2
$t_{f3} := 0.035$	ylälaipan paksuus keskimoduulissa
$t_{f4} := 0.035$	ylälaipan paksuus jatkomoduulissa
$t_{f11} := 0.035$	alalaipan paksuus moduulissa 1
$t_{f21} := 0.035$	alalaipan paksuus moduulissa 2
$t_{f31} := 0.035$	alalaipan paksuus keskimoduulissa
$t_{f41} := 0.035$	alalaipan paksuus jatkomoduulissa
$t_{w1} := 0.0120$	uuman paksuus moduulissa 1
$t_{w2} := 0.0120$	uuman paksuus moduulissa 2
$t_{w3} := 0.0120$	uuman paksuus keskimoduulissa
$t_{w4} := 0.0120$	uuman paksuus jatkomoduulissa
$b_w := 1.1$	uloimpien uumien keskiöetäisyys
$n_u := 3$	uumien lukumäärä

#### Moduulien pituudet:

$l_1 := 2$	moduulissa 1 pituus
$l_2 := 3$	moduulissa 2 pituus
$l_3 := 3$	moduulissa 3 pituus
$l_4 := L - 2 \cdot (l_1 + l_2 + l_3) = 0$	moduulissa 4 pituus

**Materiaalitiedot: Rakenne teräs S355**

$E := 207 \cdot 10^9$	kimmomoduuli ( Pa )
$\nu := 0.3$	Poissonin luku
$f_y := 355 \cdot 10^6$	myötöraja ( Pa )
$\rho := 7850$	tiheys ( kg/m <sup>3</sup> )

Suunnittelussa käytettävät materiaalin osavarmuusluvut: EN 1993 mukaan.

$\gamma_{M0} := 1.0$
$\gamma_{M1} := 1.1$
$\gamma_{M2} := 1.25$
$\gamma_{M3} := 1.25$
$\gamma_{M3.ser} := 1.10$
$\gamma_{M4} := 1.1$
$\gamma_{M5} := 1.1$
$\gamma_{M6.ser} := 1.0$
$\gamma_{M7} := 1.1$

Kuormakerroin seuraamusluokan CC3 mukaan.

Tällä kertoimella kerrotaan kaikki kuormitukset.

$$K_{F1} := 1.1$$

Kuormitusten osavarmuusluvut murtorajatilassa EN 1990-A1.3

$\chi_L := 1.5 \cdot K_{F1} = 1.65$	varmuuskerroin muuttuvalle kuormalle
$\chi_G := 1.15 \cdot K_{F1} = 1.265$	varmuuskerroin omalle massalle

$$c_1 := \frac{b_w - t_w \cdot \frac{n_u}{2}}{n_u - 1} = 0.541 \quad \text{laipan leveys uumien välissä}$$

$$c_2 := \frac{b_u - [c_1 \cdot (n_u - 1)] - n_u \cdot t_w}{2} = 0.241 \quad \text{laipan ulokkeen leveys}$$

### Rakennesien korkeus ja ainevahvuudet pituuden funktiona

$h_x(x)$	profiilin korkeus
$t_{fu}(x)$	ylälaipan vahvuus
$t_{fd}(x)$	alalaipan vahvuus
$t_w(x)$	uuman vahvuus
$d_x(x) := h_x(x) - t_{fu}(x) - t_{fd}(x)$	uuman korkeus

### pintakeskiöpaikka profiilin alapinnasta mitattuna

$$pk(x) := \frac{b_u \cdot t_{fu}(x) \cdot \left( h_x(x) - \frac{t_{fu}(x)}{2} \right) + b_d \cdot t_{fd}(x) \cdot \left( \frac{t_{fd}(x)}{2} \right) + n_u \cdot t_w(x) \cdot d_x(x) \cdot \left( \frac{d_x(x)}{2} + t_{fd}(x) \right)}{b_u \cdot t_{fu}(x) + b_d \cdot t_{fd}(x) + n_u \cdot t_w(x) \cdot (d_x(x))}$$

### Laippojen staattiset momentit [9]

ylälaipan alapinnassa ja alalaipan yläpinnassa

$$S_{z,u}(x) := b_u \cdot t_{fu}(x) \cdot \left( h_x(x) - \frac{t_{fu}(x)}{2} - pk(x) \right)$$

$$S_{z,d}(x) := b_d \cdot t_{fd}(x) \cdot \left( -\frac{t_{fd}(x)}{2} + pk(x) \right)$$

### Poikkileikkauksen neliömomentti pituuden funktiona

$$I_x(x) := \frac{b_u \cdot t_{fu}(x)^3}{12} + b_u \cdot t_{fu}(x) \cdot \left( h_x(x) - pk(x) - \frac{t_{fu}(x)}{2} \right)^2 \dots$$

$$+ \frac{n_u \cdot t_w(x) \cdot (d_x(x))^3}{12} + n_u \cdot t_w(x) \cdot d_x(x) \cdot \left[ pk(x) - \left( \frac{d_x(x)}{2} + t_{fd}(x) \right) \right]^2 \dots$$

$$+ \frac{b_d \cdot t_{fd}(x)^3}{12} + b_d \cdot t_{fd}(x) \cdot \left( pk(x) - \frac{t_{fd}(x)}{2} \right)^2$$

### Poikkileikkauksen pinta-ala pituuden funktiona

$$A_x(x) := b_u \cdot t_{fu}(x) + n_u \cdot t_w(x) \cdot d_x(x) + b_d \cdot t_{fd}(x)$$

### Poikkileikkauksen massa pituuden funktiona

$$G_x(x) := [h_x(x) \cdot b_u - [h_x(x) - (t_{fu}(x) + t_{fd}(x))] \cdot (b_u - n_u \cdot t_w(x))] \cdot \rho \cdot 9.81$$

$$G_{\text{kok}} := 1.42 \cdot \frac{\int_0^L G_x(x) dx}{L} = 1.35 \times 10^4$$

$$G_{\text{tot}}(x) := \frac{1}{2} \cdot G_{\text{kok}} \cdot L^2 \cdot \left[ \frac{x}{L} - \left( \frac{x}{L} \right)^2 \right]$$

$$G_{\text{kok}} \cdot L = 21.59610^4$$

Poikkileikkauksen massa jaettuna tasaiseksi kuormitukseksi koko sillan mitalle. Teoreettinen massa korjattu sovituskertoimella 1,42, joka kompensoi laskennallisen poikkileikkauksen ja sillan todellisen poikkileikkauksen massojen erotusta. ( N/m )

Omamassan aiheuttaman taivutusmomentin kuvaaja.

todellinen kokonaismassa ( N )



## Poikkileikkausluokka

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235}{355}} \quad \text{Materiaalin myötöraajasta riippuva sovituserroin}$$

Ylälaipat, keskiosa

$$c_1 = 0.541$$

$$\frac{c_1}{t_{f1}} = 15.457$$

EN 1993-1-1 Taulukko 5.2

$$\frac{c_1}{t_{f2}} = 15.457$$

<

PL1  $33 \cdot \varepsilon = 26.849$

PL2  $38 \cdot \varepsilon = 30.917$

$$\frac{c_1}{t_{f3}} = 15.457$$

Ylälaipat, ulokereunat

$$c_2 = 0.241$$

$$\frac{c_2}{t_{f1}} = 6.886$$

PL1  $9 \cdot \varepsilon = 7.323$

<

PL2  $10 \cdot \varepsilon = 8.136$

$$\frac{c_2}{t_{f2}} = 6.886$$

PL3  $13.96 \varepsilon = 11.358$

$$\frac{c_2}{t_{f3}} = 6.886$$

**Kaikki laipat PL1**

Uumat

$$ct(x) := \frac{h_x(x) - t_{fu}(x) - t_{fd}(x)}{t_w(x)}$$

$$\alpha_x(x) := \frac{d_x(x) - (pk(x) - t_{fd}(x))}{d_x(x)}$$

$\alpha < 0.5$  aina

$$ct(8) = 31.667$$

PL1  $\frac{36 \cdot \varepsilon}{\alpha_x(8)} = 62.614$

PL2  $\frac{41.5 \cdot \varepsilon}{\alpha_x(8)} = 72.18$

**Kaikki uumat PL1**

### Poikkileikkauksen taivutuskestävyys

$$I_{\max 1} := I_x(8) = 4.678 \times 10^{-3} \quad \text{sillan moduulin 1 poikkileikkauksen neliömomentti}$$

$$W_{\max 1} := \frac{I_x(8)}{\max(pk(8), d_x(8) - pk(8))} = 0.0197 \quad \text{sillan moduulin 1 poikkileikkauksen taivutusvastus}$$

$$M_{Rd, \max 1} := W_{\max 1} f_y = 7.000772 \times 10^6 \quad \text{sillan moduulin 1 poikkileikkauksen taivutuskestävyys}$$

$$M_{Rd} := M_{Rd, \max 1}$$

$$I_{\max 2} := I_x(l_1) = 2.339 \times 10^{-3} \quad \text{sillan moduulin 3 poikkileikkauksen neliömomentti}$$

$$W_{\max 2} := \frac{I_x(l_1)}{pk(l_1)} = 0.01344 \quad \text{sillan moduulin 3 poikkileikkauksen taivutusvastus}$$

$$M_{Rd, \max 2} := W_{\max 2} f_y = 4.770359 \times 10^6 \quad \text{sillan moduulin 3 poikkileikkauksen taivutuskestävyys}$$

$$W_{Rd}(x) := \frac{I_x(x)}{\max(pk(x), d_x(x) - pk(x))}$$

$$M_{Rd, el}(x) := W_{Rd}(x) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

### Plastinen taivutuskestävyys

$$W_{pl}(x) := b_u \cdot t_{fu}(x) \cdot \left( h_x(x) - pk(x) - \frac{t_{fu}(x)}{2} \right) + n_u \cdot t_w(x) \cdot t_{fu}(x) \cdot (d_x(x) - pk(x)) \cdot \frac{(d_x(x) - pk(x))}{2} \dots$$

$$+ b_d \cdot t_{fd}(x) \cdot \left( pk(x) - \frac{t_{fd}(x)}{2} \right) + n_u \cdot t_w(x) \cdot t_{fu}(x) \cdot (pk(x) - t_{fd}(x)) \cdot \frac{pk(x) - t_{fd}(x)}{2}$$

$$M_{Rd, pl} := W_{pl}(8) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 7.718 \times 10^6$$

## Leikkauskestävyys

$$\eta := 1.2 \quad \text{EN 1993-1-5-5.1(2)}$$

$$\frac{d_x(8)}{t_{w3}} = 31.667 \qquad \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon = 48.817$$

$$\frac{d_x(0)}{t_{w1}} = 15 \qquad \text{uudessa ei leikkauslommahdusvaaraa}$$

moduulien leikkauspinta-alat

$$A_{v1} := \eta \cdot d_x(0) \cdot n_u \cdot t_{w1}$$

$$A_{v2} := \eta \cdot d_x(l_1) \cdot n_u \cdot t_{w2}$$

EN 1993-1-5-6.2.6

$$A_{v3} := \eta \cdot d_x\left(\frac{L}{2}\right) \cdot n_u \cdot t_{w3}$$

moduulien uumien leikkauskestävyydet

$$V_{Rd1} := A_{v1} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 2.51 \times 10^3 \cdot 10^3$$

$$V_{Rd2} := A_{v3} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 5.298 \times 10^3 \cdot 10^3$$

$$V_{Rd3} := A_{v2} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 3.625 \times 10^3 \cdot 10^3$$

$$V_{Rd} := n_u \cdot V_{Rd1} = 7.529 \times 10^6$$

Sillan leikkauskestävyys ( N ). Käytetään moduulin 1 arvoja, koska sillä on heikoin leikkauskestävyys.

## Uuman hengitys

$$b / t \leq 30 + 4,0L \qquad \text{EN 1993-2-7.4(7.5)}$$

$$\frac{d_x(8)}{t_{w3}} = 31.667 \leq 30 + 4 \cdot L = 94 \qquad \text{Ei tarvitse huomioida}$$

$$\frac{d_x(0)}{t_{w1}} = 15$$

### Poikkileikkauksen vääntökestävyys

käsitellään kappaletta uumien välin levyisenä kotelona, eli uumien ulkopuolisia laippojen ulokkeita ei huomioida

$$A_{1v} := \left( d_x(0) + \frac{t_{f1}}{2} + \frac{t_{f11}}{2} \right) \cdot b_w = 0.237 \quad [10]$$

$$I_{1v} := \frac{4 \cdot A_{1v}^2}{\frac{b_w}{t_{f1}} + \frac{b_w}{t_{f11}} + \frac{n_u t_{w1}}{d_x(0)}} = 3.548 \times 10^{-3} \quad [11]$$

$$W_{1v} := 2 \cdot A_{1v} \cdot \min(t_{f1}, t_{f11}, t_{w1}) = 5.676 \times 10^{-3}$$

$$W_v(x) := 2 \cdot \left[ \left( d_x(x) + \frac{t_{f1}}{2} + \frac{t_{f11}}{2} \right) \cdot b_w \right]$$

$$\tau(x, T) := \frac{T}{W_v(x)}$$

Epäkeskisen kuormituksen aiheuttama vakiovääntömomentin aiheuttama leikkausjännitys pituuden funktiona.

### Sillan moduulien nurjahduskestävyys

Approksimoidaan sillan nurjahduskestävyyttä käyttämällä heikoimman osan poikkileikkausominaisuuksia. Tämä approksimaatio on reilusti varmallalla puolella. Tätä approksimoitua arvoa käytetään ainoastaan jarrukuormien vaikutusten huomioimiseksi, ja tälläkin approksimaatiolla voidaan todeta ne merkityksettömiksi.

$$\alpha := 0.49 \quad f_y = 3.55 \times 10^8 \quad E = 2.07 \times 10^{11}$$

$L_{n1} := L = 16$	sillan nurjahdus pituus ( m )
$L_{n2} := 19 = 19$	jatketun sillan nurjahdus pituus ( m )
$L_{nm1} := l_1 = 2$	moduulin 1 nurjahdus pituus ( m )
$L_{nm2} := l_3 = 3$	moduulin 3 nurjahdus pituus ( m )
$A_1 := A_x(0) = 0.111$	moduulin 1 poikkileikkaus ala ( m <sup>2</sup> )
$A_3 := A_x(8) = 0.119$	moduulin 3 poikkileikkaus ala ( m <sup>2</sup> )
$I_1 := I_x(0) = 1.237 \times 10^{-3}$	moduulin 1 neliömomentti ( m <sup>4</sup> )

### Plastinen puristuskestävyys

$$N_{c1.Rd} := \frac{A_1 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 3.958 \times 10^7$$

### Kriittinen puristusvoima

Koko sillalle

$$N_{cr1} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_1}{L_{n1}^2} = 9.868 \times 10^6 \quad N_{cr2} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_1}{L_{n2}^2} = 6.998 \times 10^6$$

Moduuleille 1 ja 3

$$N_{cr1m} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_1}{L_{nm1}^2} = 6.316 \times 10^8 \quad N_{cr2m} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_1}{L_{nm2}^2} = 2.807 \times 10^8$$

## Puristuskestävyyden määrittäskertoimet

$$\lambda_1 := \sqrt{\frac{A_1 \cdot f_y}{N_{cr1}}} = 2.003 \quad 16 \text{ m silta}$$

$$\lambda_2 := \sqrt{\frac{A_1 \cdot f_y}{N_{cr2}}} = 2.378 \quad 19 \text{ m silta}$$

$$\lambda_{1m} := \sqrt{\frac{A_1 \cdot f_y}{N_{cr1m}}} = 0.25 \quad \text{moduuli 1}$$

$$\lambda_{2m} := \sqrt{\frac{A_3 \cdot f_y}{N_{cr2m}}} = 0.387 \quad \text{moduuli 3}$$

$$\Phi_1 := 0.5 \left[ 1 + \alpha \cdot (\lambda_1 - 0.2) + \lambda_1^2 \right] = 2.947$$

$$\Phi_2 := 0.5 \left[ 1 + \alpha \cdot (\lambda_2 - 0.2) + \lambda_2^2 \right] = 3.861$$

$$\Phi_{1m} := 0.5 \left[ 1 + \alpha \cdot (\lambda_{1m} - 0.2) + \lambda_{1m}^2 \right] = 0.544$$

$$\Phi_{2m} := 0.5 \left[ 1 + \alpha \cdot (\lambda_{2m} - 0.2) + \lambda_{2m}^2 \right] = 0.621$$

## Puristuskestävyyden pienennystekijät

$$\chi_1 := \min \left( \frac{1}{\Phi_1 + \sqrt{\Phi_1^2 - \lambda_1^2}}, 1 \right) = 0.196$$

$$\chi_2 := \min \left( \frac{1}{\Phi_2 + \sqrt{\Phi_2^2 - \lambda_2^2}}, 1 \right) = 0.145$$

$$\chi_{1m} := \min \left( \frac{1}{\Phi_{1m} + \sqrt{\Phi_{1m}^2 - \lambda_{1m}^2}}, 1 \right) = 0.974$$

$$\chi_{2m} := \min \left( \frac{1}{\Phi_{2m} + \sqrt{\Phi_{2m}^2 - \lambda_{2m}^2}}, 1 \right) = 0.904$$

**Puristuskestävyyden mitoitusarvot koko sillalle** EN 1993-1-6.3.1.1-6.47

$$N_{u.Rd.kok} := \chi_1 \cdot A_1 \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 7.747 \times 10^6$$

sillan puristuskestävyyden mitoitusarvo

$$N_{u2.Rd.kok} := \chi_2 \cdot A_1 \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 5.733 \times 10^6$$

jatketun sillan puristuskestävyyden  
mitoitusarvo

**Puristuskestävyyden mitoitusarvot moduuleille** EN 1993-1-6.3.1.1-6.47

$$N_{u.Rd} := \chi_{1m} \cdot A_1 \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 3.856 \times 10^7$$

moduulin 1 puristuskestävyyden  
mitoitusarvo

$$N_{u2.Rd} := \chi_{2m} \cdot A_3 \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 3.808 \times 10^7$$

moduulin 3 puristuskestävyyden  
mitoitusarvo

## LIITE 2

### Kuormitustapausten määrittely

Jarru- ja kiihdytyskuormitus määritellään Liikenneviraston ohjeita 23/2012 Eurokoodin sovellusohje Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet NCCI 1 mukaan

$$Q_{Ik}(Q_k, q_k) := 0.6 \cdot 2 \cdot Q_k + 0.1 \cdot q_k \cdot b_u \cdot L \quad \text{B.1}$$

$Q_{Ik,max}$	$:= 500000$	Suomen kansallisen asetuksen mukainen suurin jarrukuorman arvo ( N )
$Q_{Ik,EN,max}$	$:= 900000$	EN1991-2 mukainen maksimiarvo ( N )
$N_{Ik,Ed}$	$:= Q_{Ik,EN,ma}$	Jarrukuormaa ei tarvitse huomioida, koska se on huomattavasti pienempi kuin sillan puristuskestävyys. Tämä on osoitettu myöhemmin laskelmissa.

Seuraavissa listoissa syötetään kuormitustapaukset taulukkoon, jonne syötetään akselimassa kiloina, akselien lukumäärä, akselivälit ja akselistoryhmien välit metreinä, sekä koko sillalle kohdistuva tasainen kuormitus  $N/m^2$ . Näin muodostetulla ajoneuvomallilla tutkitaan sillan taivutuskuormitus.

Kuormitustapaus 1, perustuu EN 1991-2 kuormitustapaukseen LM3 raskas erikoiskuljetus.

Kuormitus perustuu 12-akselisen perävaunun aiheuttamaan kuormitukseen.

Perävaunun akselisto on normin akselistomittojen mukainen.

$n_{31}$	$:= 12$	akselimäärä
$G_{31}$	$:= 30000$	akselimassa ( kg )
$d_{31}$	$:= 1.5$	akseliväli ( m )
$q_{UDL1}$	$:= 0$	tasaa jakautunut kuorma koko sillalle ( $N/m^2$ )
$Q_{b1}$	$:= Q_{Ik}(G_{31} \cdot 9.81, q_{UDL1}) = 3.532 \times 10^5$	jarru- ja kiihdytyskuorma ( N )
$e_1$	$:= b_u - 1.5 = 0.1$	ajolinjan epäkeskisyys ( m )

$\Delta\varphi_{fat1}$	$:= 1.0$	Dynaaminen suurennuskerroin liikuntasauaman kohdalla 1.3, koska sillassa saumojä 3 metrin välein käytetään kaikille akselille tätä pahinta mahdollista kerrointa. EN 1991-2-4.6.1-4.7 Kuormitustapauksessa 1 ei tarvitse huomioida, koska kuljetuksen maksiminopeus alle 5km/h
------------------------	----------	--



Kuormitustapaus 2, perustuu EN 1991-2 kuormitustapaukseen LM1. Kuormitus syötetty laskentaohjelmaan kahtena akseli-kuormana.

$Q_{k1} := 300000$	akselikuorma ( N )
$n_{12} := 2$	akseleiden määrä
$G_{12} := \frac{Q_{k1}}{9.81} = 3.058 \times 10^4$	akselimassa ( kg )
$d_{12} := 1.2$	akseliväli ( m )
$q_{UDL2} := 9000$	tasan jakautunut kuorma koko sillalle ( N/m <sup>2</sup> )
$Q_{b2} := Q_{Ik}(Q_{k1}, q_{UDL2}) = 3.83 \times 10^5$	jarru- ja kiihdytyskuorma ( N )
$e_2 := b_u - 1.0 = 0.6$	ajolinjan epäkeskisyyys ( m )
$\Delta\varphi_{fat2} := 1.3$	dynaaminen suurennuskerroin

Kuormitustapaus 3, perustuu EN 1991-2 kuormitustapaukseen LM2

$Q_{k2} := 400000$	akselikuorma ( N )
$n_{13} := 1$	akseleiden määrä
$G_{13} := \frac{Q_{k2}}{9.81} = 4.077 \times 10^4$	akselimassa ( kg )
$q_{UDL3} := 9000$	tasan jakautunut kuorma koko sillalle ( N/m <sup>2</sup> )
$Q_{b3} := Q_{Ik}(Q_{k2}, q_{UDL3}) = 5.03 \times 10^5$	jarru- ja kiihdytyskuorma ( N )
$e_3 := b_u - 1.0 = 0.6$	ajolinjan epäkeskisyyys ( m )
$\Delta\varphi_{fat3} := 1.3$	dynaaminen suurennuskerroin

Kuormitustapaus 4, perustuu EN 1991-2 kuormitustapaukseen LM3 raskas erikoiskuljetus.

Kuormitus perustuu 18 akselisen perävaunun kuormitukseen. Perävaunun akselisto on normin akselistomittojen mukainen.

$Q_{k4} := 200000$	akselikuorma ( N )
$n_{34} := 18$	akselimäärä
$G_{34} := \frac{Q_{k4}}{9.81} = 20.38710^3$	akselimassa ( kg )
$d_{34} := 1.5$	akseliväli ( m )
$q_{UDL4} := 0 = 0$	tasan jakautunut kuorma koko sillalle ( N/m <sup>2</sup> )
$Q_{b4} := Q_{Ik}(Q_{k4}, q_{UDL4}) = 240 \cdot 10^3$	jarru- ja kiihdytyskuorma ( N )
$e_4 := 0.1 = 0.1$	ajolinjan epäkeskisyys ( m )
$\Delta\varphi_{fat4} := 1.0$	dynaaminen suurennuskerroin. Kuormitustapauksessa 5 ei tarvitse huomioida, koska kuljetuksen maksiminopeus alle 5km/h

Kuormitustapaus 5, perustuu EN 1991-2 Suomen kansallisen liitteen määrittelemään raskaaseen erikoiskuormaan, jossa sillalle vaikuttaa tasainen 45kN/m<sup>2</sup> kuormitus. Kuormitus vaikuttaa kahtena 0-10m pitkänä kaistana, joiden väli on 0-15m

$q_{UDL5} := 45000 \frac{1.5}{b_u} = 4.219 \times 10^4$	tasan jakautunut kuorma koko sillalle ( N/m <sup>2</sup> )
$Q_{b5} := Q_{Ik}(Q_{k3}, q_{UDL5}) = 1.08 \times 10^5$	jarru- ja kiihdytyskuorma ( N )
$e_5 := b_u - 1.5 = 0.1$	ajolinjan epäkeskisyys ( m )
$\Delta\varphi_{fat5} := 1.0$	dynaaminen suurennuskerroin. Kuormitustapauksessa 5 ei tarvitse huomioida, koska kuljetuksen maksiminopeus alle 5km/h

Funktio D muodostaa edellä olevan tietolistan perusteella matriisin, jonne on koottu yhden moduulin levyiselle siltalohkolle tulevat kuormitukset ja muut kuormitustapauskohtaiset parametrit.

Funktio Q.max kokoaa D funktion matriisin tiedoista suurimman mahdollisen sillalle tulevan pystykuormituksen, joko murto- tai käyttötilassa.

$$Q_{\max.\text{Ed.LC1}} := Q_{\max.\text{Ed}}(D_{\text{LC1}}) = 2.944 \times 10^6$$

sillalle tuleva pystysuora  
mitoituskuormitus ( N )

$$Q_{\max.\text{Ed.LC5}} := Q_{\max.\text{Ed}}(D_{\text{LC5}}) = 2.055 \times 10^6$$

tapauksen LC5 pystysuora  
mitoituskuormitus ( N )

$$Q_{\max.\text{Sd.LC1}} := Q_{\max.\text{Sd}}(D_{\text{LC1}}) = 1.835 \times 10^6$$

sillalle tuleva pystysuora  
käyttötilan kuormitus ( N )

$$P_{\text{app.Ed.LC1}} := \frac{Q_{\max.\text{Ed.LC1}}}{L} = 1.84 \times 10^5$$

sillan mitoituskuormitus  
jaettuna tasan jakautuneeksi  
koko sillan matkalle ( N/m )

$$P_{\text{app.Sd.LC1}} := \frac{(Q_{\max.\text{Sd.LC1}})}{L} = 1.147 \times 10^5$$

sillan käyttötilan kuormitus  
jaettuna tasan jakautuneeksi  
koko sillan matkalle ( N/m )

$$M_{\text{piste}}(x, F, a) := F \cdot \left[ (L - a) \cdot \frac{x}{L} - \max(0, x - a) \right]$$

pistekuorman aiheuttama  
taivutusmomentti kohdassa x

$$M_{\text{q}}(x, q_{\text{UDL}}) := \frac{1}{2} \cdot q_{\text{UDL}} \cdot L^2 \cdot \left[ \frac{x}{L} - \left( \frac{x}{L} \right)^2 \right]$$

tasaisen kuormituksen aiheuttama  
taivutusmomentti kohdassa x

$$M_{\text{vert}}(x, Q_{\text{app}}) := \frac{1}{2} \cdot (Q_{\text{app}}) \cdot L^2 \cdot \left[ \frac{x}{L} - \left( \frac{x}{L} \right)^2 \right]$$

resultanttituloksen laskennassa  
käytettävä tasaisen kuormituk-  
sen taivutusmomentin lauseke

Funktio Maksimimomentti muodostaa matriisin D tietojen pohjalta maksimimomenttijakauman. Maksimimomenttipinta muodostetaan kuljettamalla kuormitustapauksen liikkuva kuormitus 200:lla askeleella yli sillan, ja näistä 200:sta kuormitustapauksesta määritellään maksimiarvo 200:ssa tasavälein olevassa sillan pisteessä.

$$M_{LC}(D, L, k_{\max}) := \text{Maksimi\_momentti}(D, L, k_{\max})$$

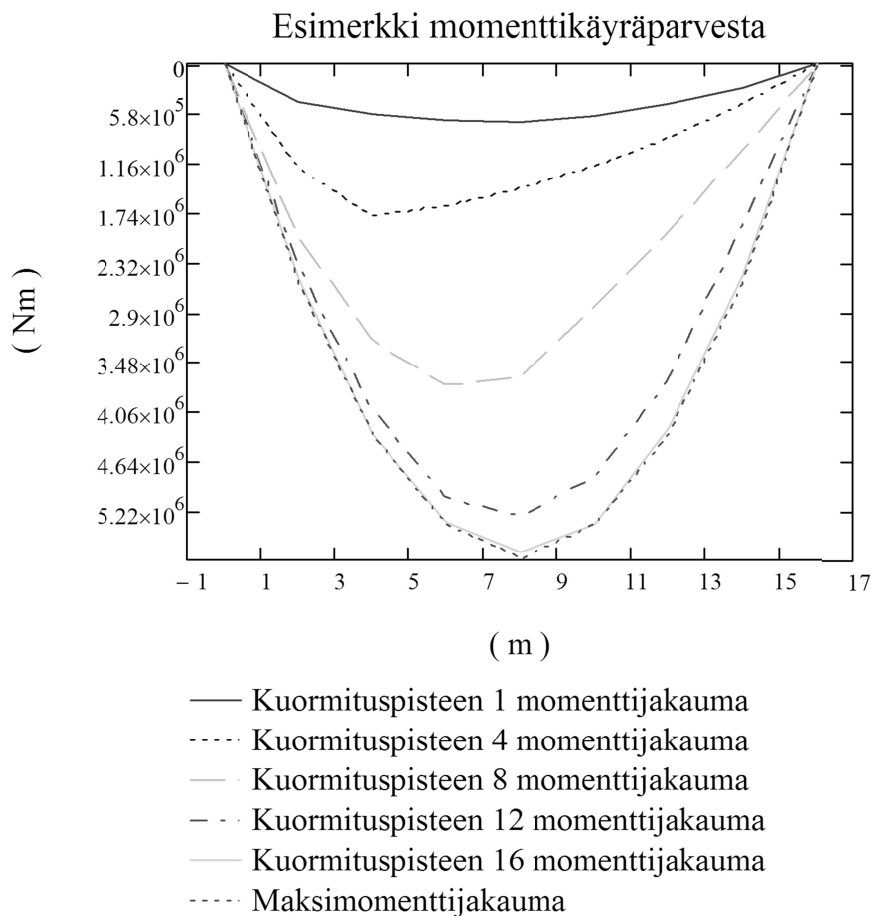
Kuormitustapauksen mitoitusmomentti vektori

$$D_{\text{esim}} := M_{\text{sys}}(D_{LC1}, L, 16)$$

$$M_{\text{esim}} := \text{submatrix}(D_{\text{esim}}, 1, \text{rows}(D_{\text{esim}}) - 1, 1, \text{cols}(D_{\text{esim}}) - 1)$$

$$M_{\text{max.esim}} := M_{LC}(D_{LC1}, L, 16)$$

Esimerkkitapauksessa on tutkittu LC1 kuormitustapauksen kuormitus 16 laskentapisteessä, kuljettamalla liikkuva kuormitus 16 askeleella yli sillan.



## Kuormitustapausten momenttikuvaajat

$$M_{LC1} := M_{LC}(D_{LC1}, L, K)$$

$$M_{LC2} := M_{LC}(D_{LC2}, L, K)$$

$$M_{LC3} := M_{LC}(D_{LC3}, L, K)$$

$$M_{LC4} := M_{LC}(D_{LC4}, L, K)$$

$$M_{LC5} := M_{LC}(D_{LC5}, L, K)$$

$$M_{Ed} := \max(M_{LC1}^{(1)}) = 5.764 \times 10^6$$

todellinen mitoituskuormitus

$$M_{vert.m} := \max(M_{LC1}^{(2)}) = 5.888 \times 10^6$$

todellisen mitoituskuormituksen  
resultanttikuormitus

$$M_{Ed.LC1} := \max(M_{LC1}^{(1)}) = 5.764 \times 10^6$$

$$M_{Ed.LC2} := \max(M_{LC2}^{(1)}) = 3.918 \times 10^6$$

kuormitustapausten  
maksimitaivutusmomentit

$$M_{Ed.LC3} := \max(M_{LC3}^{(1)}) = 3.251 \times 10^6$$

$$M_{Ed.LC4} := \max(M_{LC4}^{(1)}) = 4.094 \times 10^6$$

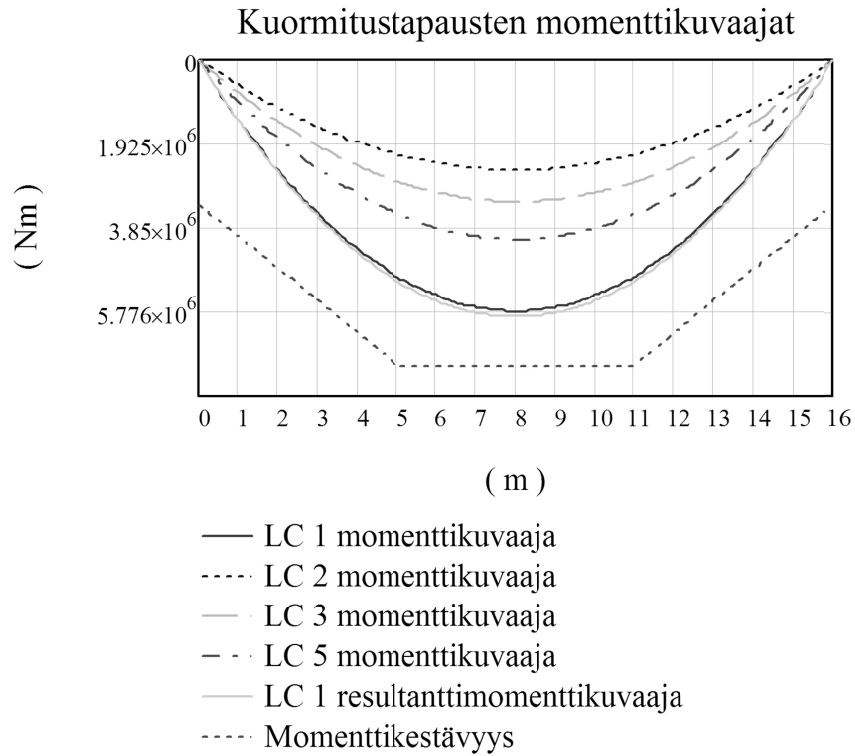
$$M_{Ed.LC5} := \max(M_{LC5}^{(1)}) = 4.11 \times 10^6$$

$$M_{Rd.El} := \max(M_{LC1}^{(3)}) = 7.001 \times 10^6$$

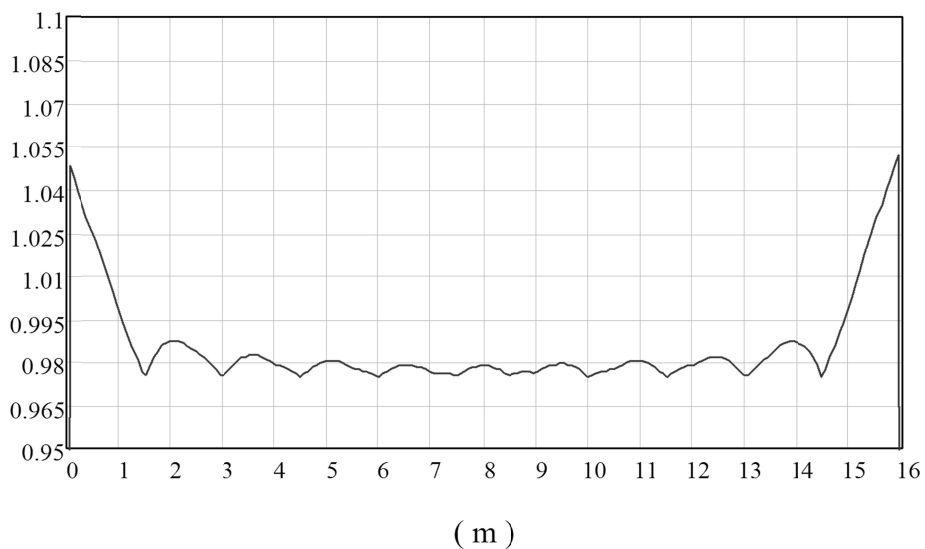
profiilin elastinen taivutuskestävyys

$$M_{Rd.pl} = 7.718 \times 10^6$$

profiilin plastinen taivutuskestävyys



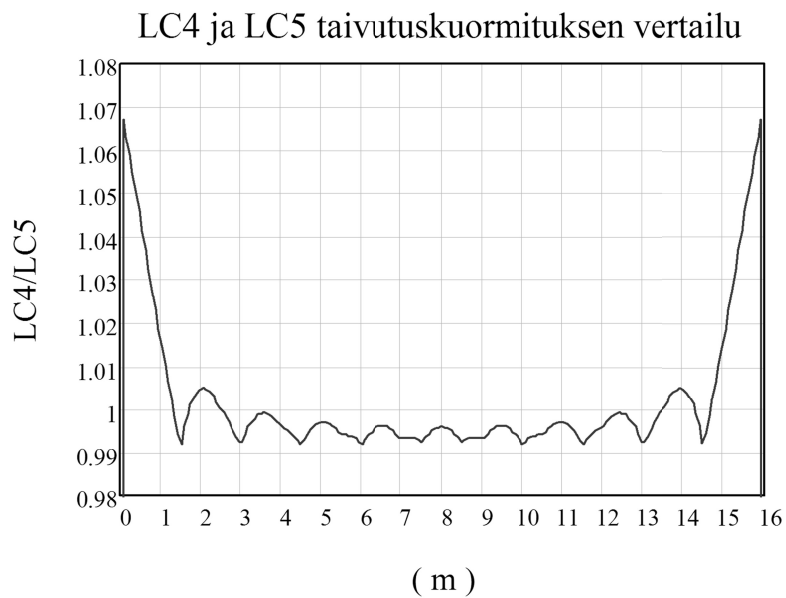
**LC1 tapauksen todellisen- ja resultanttimomentin suhde**



Resultanttimomentin ja todellisen momentin suhdekuvaajasta voidaan päätellä, että vertailumomentti antaa hyvän approksimaation kuormitustilanteesta. Resultanttikuoormitusta käytetään taipuman laskennassa, koska sen matemaattinen esitys on huomattavasti todellista kuormitusta yksinkertaisempi.

### Normin EN 1991-2 ja sen kansallisen liitteen raskaan erikoiskuormituksen vertailu

Koska normin EN1991-2 ja sen kansallisen liitteen mukaiset kuormakaaviot eroavat raskaan erikoiskuormituksen osalta merkittävästi toisistaan, tutkitaan, kuinka niiden aiheuttamat kuormitukset eroavat toisistaan. Normin mukainen erikoiskuormitus on tyypiltään joukko pistevoimia, ja normin kansallinen liite määrää käytettäväksi tasan jakautunutta kuormitusta. Näiden kuormituskaavioiden resultanttikuormitukset ovat käytännössä yhtenevät ja taivutuskuormituksissakaan ei ole merkittävää eroa.

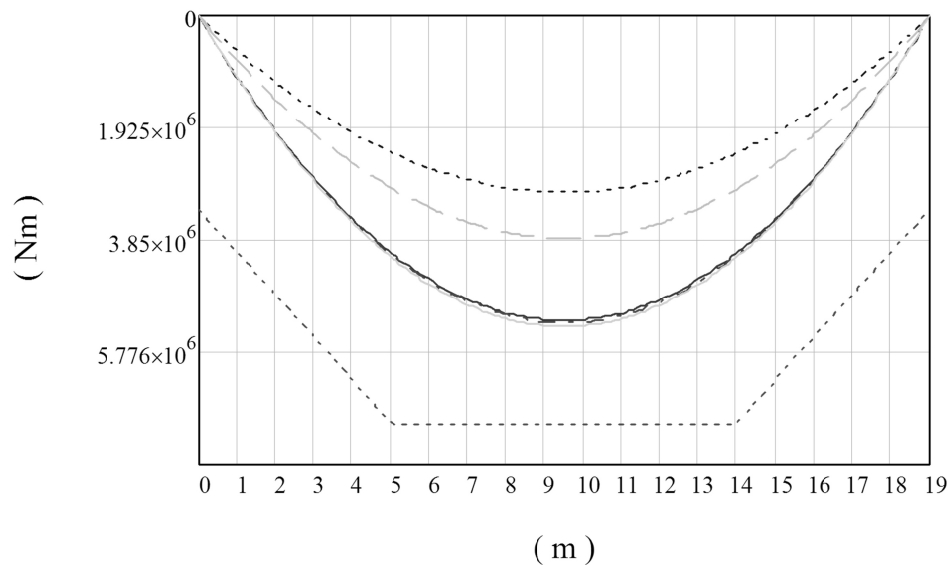


## Kuormitukset jatketulle sillalle, jänneväli 19 m

### Kriittinen kuormitustapaus LC4

$Q_{\max.Ed.LC4} = 2.246 \times 10^6$	pystykuorman mitoitusarvo ( N )
$Q_{\max.Sd.LC4} = 1.557 \times 10^6$	pystykuorman käyttötilan arvo ( N )
$P_{app.Ed.LC4} = 1.182 \times 10^5$	pystykuorman tasaiseksi reduoitu mitoituskuorma ( N/m )
$P_{app.Sd.LC4} = 8.196 \times 10^4$	pystykuorman tasaiseksi reduoitu käyttötilan kuorma ( N/m )
$M_{LC4} := M_{LC}(D_{LC4}, L, K)$	
$M_{Ed} := \max(M_{LC4}^{(1)}) = 5.239 \times 10^6$	LC4 tapauksen mitoituskuormitus ( Nm )
$M_{vert.m} := \max(M_{LC4}^{(2)}) = 5.334 \times 10^6$	LC4 tapauksen resultanttimitoitus- kuormitus ( Nm )

Kuormitustapausten momenttikuvaajat



- LC 4 momenttikuvaaja
- LC 2 momenttikuvaaja
- · - LC 3 momenttikuvaaja
- · · LC 5 momenttikuvaaja
- LC 4 resultanttimomenttikuvaaja
- Momentikestävyys

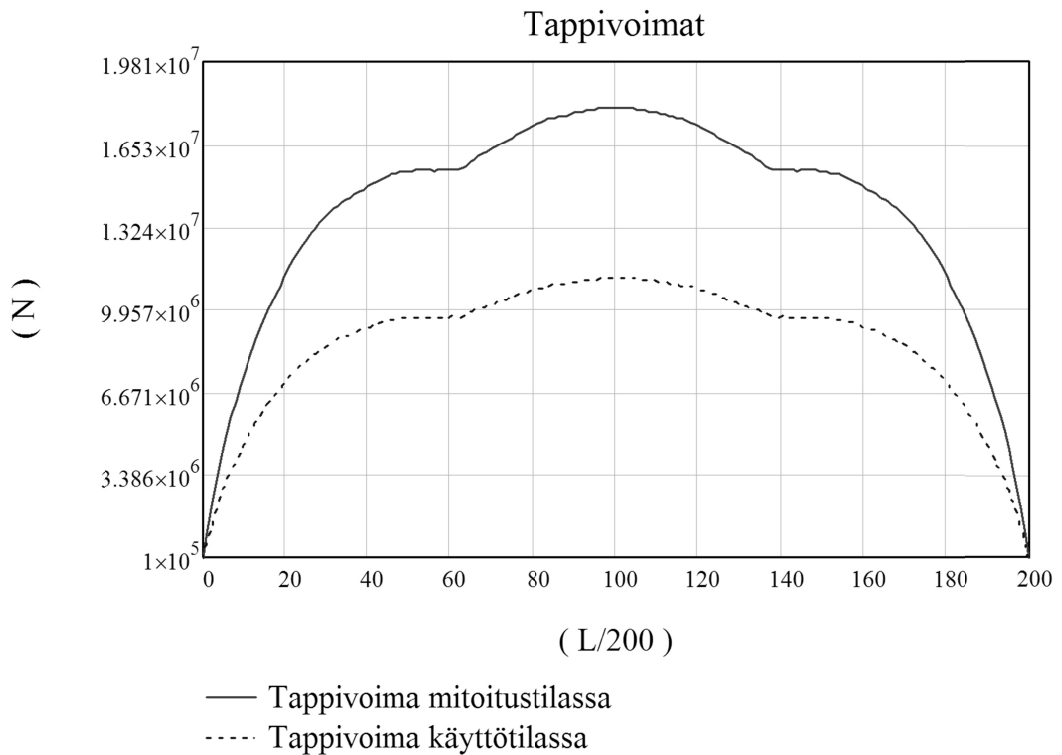
Laskelmien tuloksista voidaan todeta, että LC4 tapauksen taivutus ja pystykuorma ovat hieman LC1 tapauksen kuormituksia pienempiä. Näin voidaan todeta, että jatkamalla siltaa keskiosan vakiopoikkileikkauksella silta kestää LC4 tapauksen kuormituksen.



## Niveltappiliitokseen kohdistuva kuormitus

$$\text{Tappi\_voima}_{Rd}(D, L, k_{\max}) := \begin{cases} M \leftarrow \text{Maksimi\_momentti}_{Sd}(D, L, k_{\max}) \\ \text{for } i \in 0.. \text{rows}(M) - 1 \\ \quad r_{i,0} \leftarrow \frac{M_{i,3}}{h_x(M_{i,0}) - 0.13} \\ \text{return } r \end{cases}$$

Liitostappiin kohdistuva leikkaava kuormitus määritellään liitostapin sijainnin ja sillassa vaikuttavan taivutusmomentin perusteella



$$N_{\max.\text{tappi}} := \max(\text{Tappi\_voima}_{Ed}(D_{LC1}, L, K)) = 1.801 \times 10^7$$

liitostapin  
mitoituskuormitus ( N )

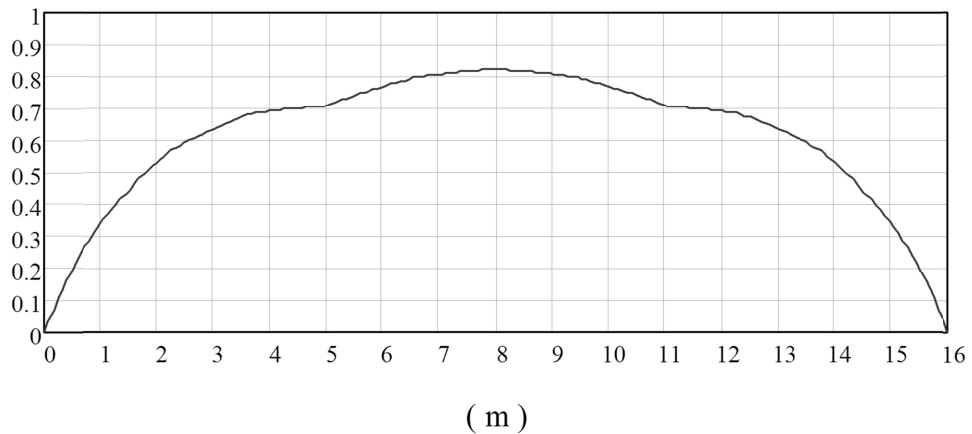
$$\max(\text{Tappi\_voima}_{Sd}(D_{LC1}, L, K)) = 1.123 \times 10^7$$

liitostapin käyttötilan  
kuormitus ( N )

### LIITE 3

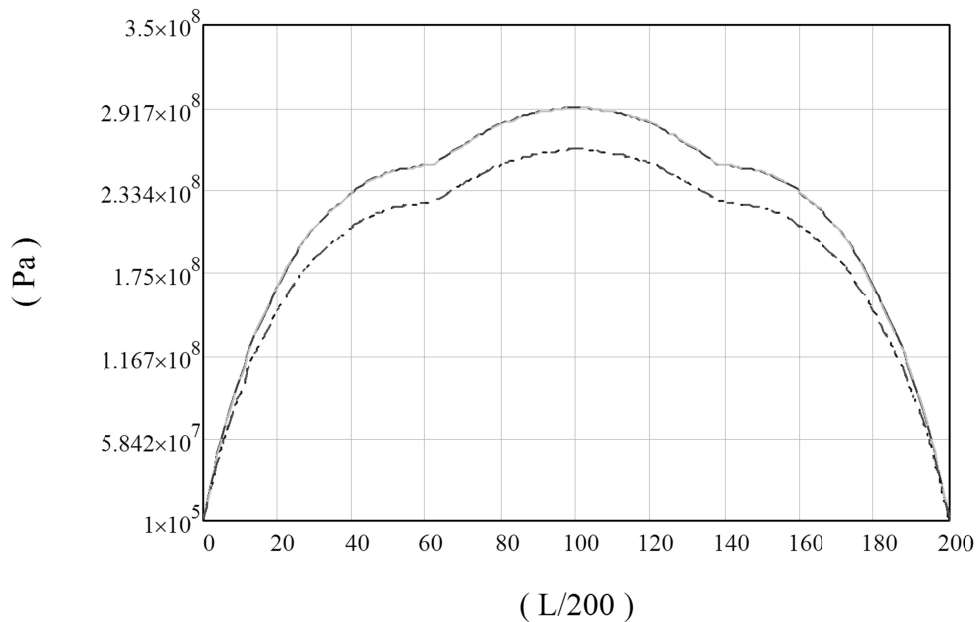
## Rakenneosien normien mukainen kestävyys osoitus

LC1 taivutusmomentin suhde elatiseen taivutuskestävyyteen



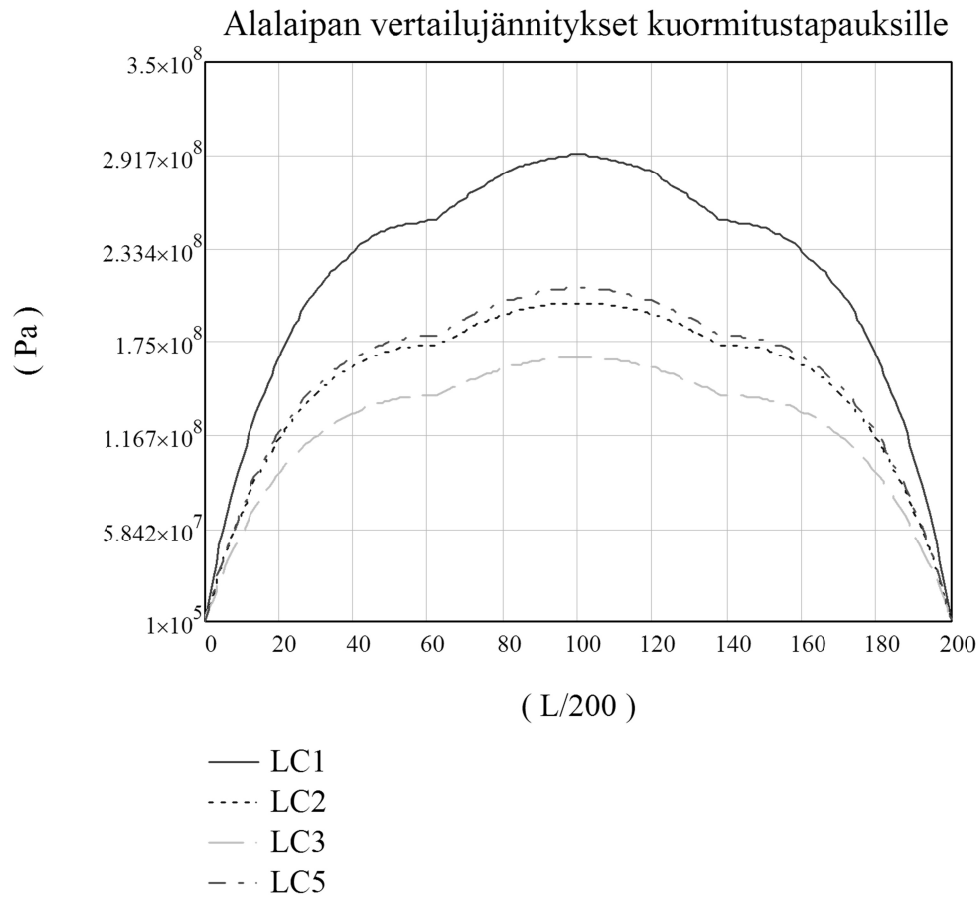
Alla olevassa kuvaajassa on esitetty profiilin ylä- ja alalaipan jännitys. Jännitys on määritelty jakamalla laskentapisteessä vaikuttava momentti kyseisen pisteen elastisella taivutusvastuksella. Vertailujännitys kuvaa taivutuskuormituksen ja epäkeskisen kuormituksen aiheuttaman vääntökuormituksen yhteisvaikutusta.

LC1



- alalaippa
- - - ylälaippa
- · alalaippa von mises
- · - ylälaippa von mises

Koska alalaippa on ylälaippaa kapeampi,  
on se poikkileikkauksen kannalta kriittisempi osa.



### Sillan leikkauskestävyys

$$V_{Ed} := \frac{Q_{\max,Ed,LC1}}{2} = 1.472 \times 10^6$$

sillalle tuleva maksimileikkausvoima

$$V_{Rd} = 7.529 \times 10^6$$

sillan leikkauskestävyys

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = 0.196 < 0.5 \text{ ok}$$

sillan leikkauskestävyyden käyttöaste on alle 0.5, joten leikkausvoiman vaikutusta ei tarvitse huomioida.  
EN 1993-1-1-6.2.8-(2)

## Taipuman laskenta

Taipumaa tutkitaan lineaarisella elementtimenetelmällä käyttämällä edellä muodostettua tasan jakautunutta resultanttikuormitusta. Muuttuvan poikkileikkausprofiilin vaikutukset on otettu huomioon käyttämällä hyvin lyhyitä elementtejä, elementin pituus  $L/100$ . Elementtimenetelmässä käytetään Euler-Bernoulin jäykkyysmatriisia.

$$k_{\text{lask}} := 100$$

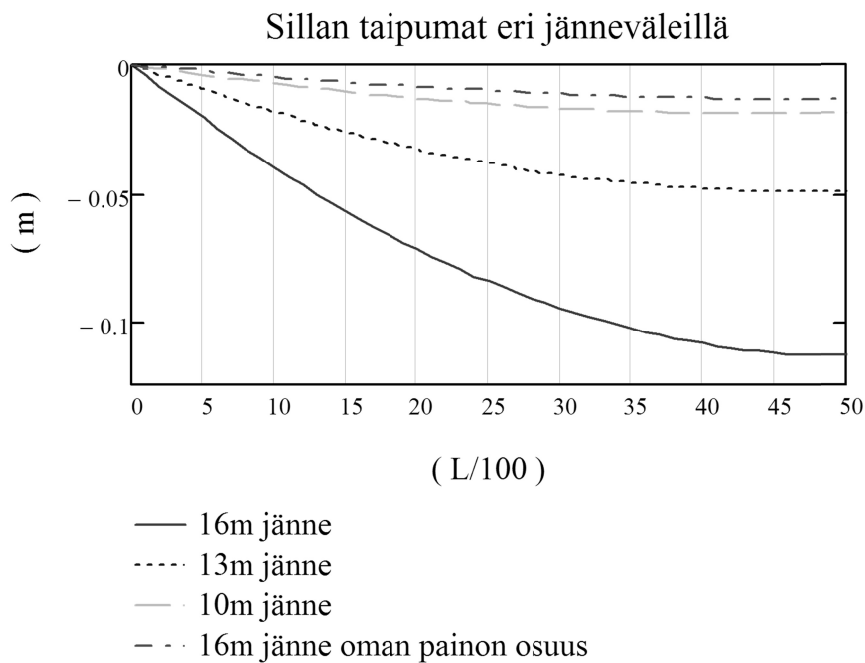
Euler - Bernouli palkkielementin jäykkyysmatriisi

$$k_e(L_e, I_e) := \frac{E \cdot I_e}{L_e^3} \begin{pmatrix} 12 & 6 \cdot L_e & -12 & 6 \cdot L_e \\ 6 \cdot L_e & 4 \cdot L_e^2 & -6 \cdot L_e & 2 \cdot L_e^2 \\ -12 & -6 \cdot L_e & 12 & -6 \cdot L_e \\ 6 \cdot L_e & 2 \cdot L_e^2 & -6 \cdot L_e & 4 \cdot L_e^2 \end{pmatrix}$$

$$F_e(Q, L_e) := \begin{pmatrix} \frac{-Q \cdot L_e}{2} \\ \frac{-Q \cdot L_e^2}{12} \\ \frac{-Q \cdot L_e}{2} \\ \frac{Q \cdot L_e^2}{12} \end{pmatrix}$$

tasaisen kuormituksen  
aiheuttama voimavektori

Sillan taipumat on määritelty käyttämällä edellä esitellystä jäykkyysmatriisista sijoittelusummaamalla koottua kokonaisjäykkyysmatriisia. Kuormitukset on mallinnettu laskentaan käyttämällä jokaisella elementillä edellä esitetyn mukaista tasaista kuormitusta vastaavaa solmuvoimavektoria.



$$D_{\max} := -\min(D_{\text{plot.16}}) = 0.1134$$

Sillan suurin taipuma mitoituskuormituksella, kun jänneväli 16 m ( m )

$$D_G := -\min(D_{\text{plot.16.G}}) = 0.013$$

Sillan omasta painosta aiheutuva taipuma 16 m jännevälillä ( m )

$$\frac{5P_{\text{app.Sd.LC1}} \cdot L^4}{384E \cdot I_x(8)} = 0.101$$

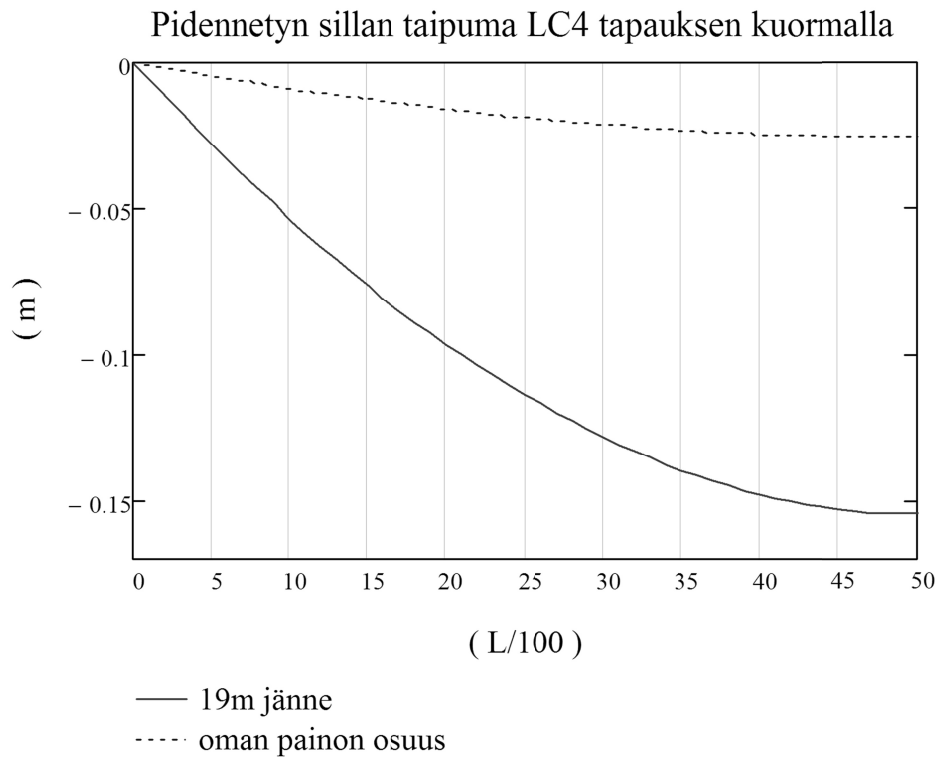
Taipuman vertailutulos, jos silta olisi koko matkalta vahvimman poikkileikkauksen mukaista rakennetta ( m )

$$\frac{5P_{\text{app.Sd.LC1}} \cdot L^4}{384E \cdot I_x(0)} = 0.382$$

Taipuman vertailutulos, jos silta olisi koko matkalta heikoimman poikkileikkauksen mukaista rakennetta ( m )

$$\frac{L}{D_{\max} - 0.07} = 368.992$$

Taipuman suuruusluokka, kun siltaa on esikorotettu 70 mm. Tällöin taipuma  $< L/300$  jota voidaan pitää hyväksyttävä.



$$D_{\max} := -\min(D_{\text{plot.16}}) = 0.1546$$

Sillan suurin taipuma ( m ) mitoituskuormituksella,  
kun jänneväli 16m

$$D_G := -\min(D_{\text{plot.16.G}}) = 0.026$$

Sillan omasta painosta aiheutuva taipuma ( m )  
16m jännevälillä

$$\frac{5P_{\text{app.Sd.LC4}}L^4}{384E \cdot I_x(8)} = 0.144$$

Taipuman vertailutulos ( m ), jos silta olisi  
koko matkalta vahvimman poikkileikkauksen  
mukaista rakennetta

$$\frac{5P_{\text{app.Sd.LC4}}L^4}{384E \cdot I_x(0)} = 0.543$$

Taipuman vertailutulos ( m ), jos silta olisi  
koko matkalta heikoimman poikkileikkauksen  
mukaista rakennetta

$$\frac{L}{D_{\max} - 0.10} = 348.123$$

Taipuman suuruusluokka, kun siltaa  
esikorotettu 100 mm. Tällöin taipuma  
<L/300 jota voidaan pitää hyväksyttävä.

## LIITE 3.1

### Rakenneseosien paikallisten kestävyyksien osoitus

#### Sillan aksiaalisten voimien kestävyys

Aksiaalisen voiman vaikutuksia ei tarvitse huomioida jos alla olevat ehdot toteutuvat.  
EN 1993-1-1-6.2.9

$$N_{Ik.Ed} = 9 \times 10^5 < 0.25 \cdot N_{u.Rd.kok} = 1.937 \times 10^6$$

$$N_{Ik.Ed} = 9 \times 10^5 < 0.25 \cdot N_{u2.Rd.kok} = 1.433 \times 10^6$$

$$N_{Ik.Ed} = 9 \times 10^5 < \frac{0.5 \cdot d_x(0) \cdot n_u \cdot t_w(0) \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 1.15 \times 10^6$$

Aksiaali kuormia ei tarvitse huomioida, vaikka silta olisi jatkettu 22 pituuteen.

#### Uuman pistekuorman kestävyys

Uuman pistekuorman kestävyys, kun profiilissa vaikuttaa taivutus-,  
leikkaus- ja aksiaalinen voima

$s_s := 0.2$		kosketuspinnan pituus ( m )
$a := l_3$		poikittaisten tukien väli ( m )
$f_{yw} := f_y = 3.55 \times 10^8$		uuman myötöraja ( Pa )
$F_{b.Ed} := \chi_L \cdot 1000000 = 1.65 \times 10^6$		uuman pistekuorma suunnittelu-arvo 1, MN, mitoitusarvo 1,65 MN
$k_F := 6 + 2 \cdot \left( \frac{d_x(8)}{a} \right)^2 = 6.032$		EN 1993-1-5-6.1
$b_f := b_u - b_w + \frac{b_w}{4} = 0.775$	$\leq$	$2 \cdot 15 \cdot \varepsilon \cdot t_{f1} = 0.854$
		EN 1993-1-5-6.5 laipan tehollinen leveys ( m )
$m_1 := \frac{f_y \cdot b_f}{f_y \cdot t_{w3}} = 64.583$		EN 1993-1-5-6.5(6.8)
$m_2 := 0.02 \cdot \left( \frac{d_x(8)}{t_{f3}} \right)^2 = 2.358$	jos $\lambda_{_F} > 0.5$	EN 1993-1-5-6.5(6.9)

$$l_y := s_s + 2 \cdot t_{F3} \cdot (1 + \sqrt{m_1 + m_2}) = 0.843 \quad \text{EN 1993-1-5-6.5(6.10)}$$

mutta pienempi kuin poikittaisjäykisteiden väli, joka on 3 m

$$F_{cr} := 0.9 \cdot k_F \cdot E \cdot \frac{t_{w3}^3}{d_x(8)} = 5.11 \cdot 10^6 \quad \text{EN 1993-1-5-6.5(6.5)}$$

$$\lambda_F := \sqrt{\frac{l_y \cdot t_{w3} \cdot f_y}{F_{cr}}} = 0.838 \quad \text{EN 1993-1-5-6.5(6.4)}$$

$$\chi_F := \frac{0.5}{\lambda_F} = 0.597 \quad \text{EN 1993-1-5-6.5(6.3)}$$

$$L_{eff} := \chi_F \cdot l_y = 0.503 \quad \text{EN 1993-1-5-6.5(6.2)}$$

$$F_{bu.Rd} := \frac{f_y \cdot L_{eff} \cdot t_{w3}}{\gamma_{M1}} = 1.947 \times 10^6 \quad \text{EN 1993-1-5-6.5(6.1)}$$

$$\eta_1 := \frac{N_{Ik.Ed}}{N_{u.Rd}} + \frac{M_{Ed.LC5}}{M_{Rd.pl}} = 0.556 \quad < 1 \text{ ok, EN 1993-1-5-4.6}$$

$$\eta_2 := \frac{F_{b.Ed}}{F_{bu.Rd}} = 0.847 \quad < 1 \text{ ok, EN 1993-1-5-6.6}$$

$$\eta_2 + 0.8 \cdot \eta_1 = 1.292 \quad < 1.4 \text{ ok, EN 1993-1-5-7.2}$$

Uuma kestää 1.0 MN pistekuorman, kun taivuttava kuormitus korkeintaan LC5 tapauksen mukainen.

$$M_{Ed.LC5} = 4.11 \times 10^6$$



**Sillan päätymoduulien tukipainekestävyys,**

Koska rakenne on toiminnaltaan vapaasti tuettu palkki, palkin päädyissä vaikuttaa vain leikkausvoima.

Uuman puristuskestävyys moduulin päässä

$$s_{s2} := 0.5$$

tukipinnan pituus ( m )

$$c_{s2} := 0$$

tukipinnan etäisyys moduulin jäykistetyistä päistä ( m )

$$F_{b2.Ed} := \chi_L \cdot \frac{Q_{max.Ed.LC1}}{2} = 2.429 \times 10^6$$

tukivoiman mitoitusarvo ( N )

$$k_{F2} := \min \left[ 2 + 6 \cdot \left( \frac{s_{s2} + c_{s2}}{d_x(0)} \right), 6 \right] = 6$$

$$b_{f2} := b_d - b_w + \frac{b_w}{4} = 0.575 \leq 2 \cdot 15 \cdot \varepsilon \cdot t_{f1} = 0.854$$

EN 1993-1-5-6.5

$$m_{12} := \frac{f_y \cdot b_{f2}}{f_y \cdot t_{w1}} = 47.917$$

EN 1993-1-5-6.5(6.8)

$$m_{22} := 0.02 \cdot \left( \frac{d_x(0)}{t_{f1}} \right)^2 = 0.529$$

jos  $\lambda_{_F} > 0.5$

EN 1993-1-5-6.5(6.9)

$$l_{y2} := s_{s2} + 2 \cdot t_{f1} \cdot \left( 1 + \sqrt{m_{12} + m_{22}} \right) = 1.057$$

EN 1993-1-5-6.5(6.10)

mutta pienempi kuin poikittaisjäykisteiden väli, joka on 2,5 m

$$F_{cr2} := 0.9 \cdot k_{F2} \cdot E \cdot \frac{t_{w2}^3}{d_x(0)} = 10.731 \cdot 10^6$$

EN 1993-1-5-6.5(6.5)

$$\lambda_{F2} := \sqrt{\frac{l_{y2} \cdot t_{w1} \cdot f_y}{F_{cr2}}} = 0.648$$

EN 1993-1-5-6.5(6.4)

$$\chi_{F2} := \frac{0.5}{\lambda_{F2}} = 0.772$$

EN 1993-1-5-6.5(6.3)

$$L_{\text{eff}2} := \chi_{F2} \cdot l_{y2} = 0.816 \quad \text{EN 1993-1-5-6.5(6.2)}$$

$$F_{\text{bu}2.\text{Rd}} := \frac{f_y \cdot L_{\text{eff}2} \cdot t_{w1}}{\gamma_{M1}} = 3.16 \times 10^6 \quad \text{EN 1993-1-5-6.5(6.1)}$$

$$\frac{F_{\text{b}2.\text{Ed}}}{3F_{\text{bu}2.\text{Rd}}} = 0.256 \quad < 1 \text{ ok tukipinta kestää vaaditun kuormituksen}$$

Kestävyys kerrottuna kolmella, koska uumia on kolme.

### Uumien välissä olevan päätylevyn puristuskestävyys.

Moduulin pääty koostuu kahdesta uumien välissä

olevasta päätylevyistä

$$s_{s3} := 0.55$$

kosketuspinnan pituus ( m )

$$a_3 := s_{s3}$$

poikittaisten tukien väli ( m )

$$f_{yw} = 3.55 \times 10^8$$

uuman myötöraja ( Pa )

$$k_{F3} := 6 + 2 \cdot \left( \frac{d_x(0)}{a_3} \right)^2 = 6.214$$

EN 1993-1-5-6.1

$$b_{f3} := 15 \cdot \varepsilon \cdot t_{f1} = 0.427 \leq 15 \cdot \varepsilon \cdot t_{f1} = 0.427$$

EN 1993-1-5-6.5

laipan tehollinen leveys ( m ), laippaa vain päätylevyn toisella puolella.

$$m_{13} := \frac{f_y \cdot b_{f3}}{f_y \cdot t_{w1}} = 35.596$$

EN 1993-1-5-6.5(6.8)

$$m_{23} := 0.02 \cdot \left( \frac{d_x(0)}{t_{f1}} \right)^2 = 0.529 \quad \text{jos } \lambda_{_F} > 0.5$$

EN 1993-1-5-6.5(6.9)

$$l_{y3} := \min \left[ s_{s3} + 2 \cdot t_{f1} \cdot \left( 1 + \sqrt{m_{13} + m_{23}} \right), a_3 \right] = 0.55 \quad \text{EN 1993-1-5-6.5(6.10)}$$

mutta pienempi kuin poikittaisjäykisteiden väli, joka on 0.55m

$$F_{cr3} := 0.9 \cdot k_{F3} \cdot E \cdot \frac{t_{w1}^3}{d_x(0)} = 11.114 \cdot 10^6 \quad \text{EN 1993-1-5-6.5(6.5)}$$

$$\lambda_{F3} := \sqrt{\frac{l_{y3} \cdot t_{w1} \cdot f_y}{F_{cr3}}} = 0.459 \quad \text{EN 1993-1-5-6.5(6.4)}$$

$$\chi_{F3} := \frac{0.5}{\lambda_{F3}} = 1.089 \quad \text{EN 1993-1-5-6.5(6.3)}$$

$$L_{eff3} := \chi_{F3} \cdot l_{y3} = 0.599 \quad \text{EN 1993-1-5-6.5(6.2)}$$

$$F_{bu3.Rd} := \frac{f_y \cdot L_{eff3} \cdot t_{w1}}{\gamma_{M1}} = 2.32 \times 10^6 \quad \text{EN 1993-1-5-6.5(6.1)}$$

$$\frac{F_{b2.Ed}}{2F_{bu.Rd}} = 0.624 < 1 \text{ ok, EN 1993-1-5-6.6}$$

Päätylevy kestää lommahtamatta koko tukivoiman.

### Laipan taipumisesta aiheutuva uuman lommahdus

$$\frac{d_x(8)}{t_{w3}} = 31.667 < \text{kimmoteorian mukainen analyysi}$$

$$\frac{d_x(0)}{t_{w1}} = 15 < 0.55 \cdot \frac{E}{f_y} \cdot \sqrt{\frac{2 d_x(8) \cdot t_{w3}}{b_u \cdot t_{F3}}} = 129.422 \quad \text{EN 1993-1-5-8(8.1)}$$

uumalla ei laipan taipumisesta johtuvaa lommahdusvaara

**Ylälaipan reunan taipuma.**

Tarkastellaan ylälaipan reunaa differentiaalinen  $dx$  pituisena kaistana, jonka leveys on  $l_u$  ja ulkoreunalla vaikuttaa viivakuormitus  $F$ .

Tällöin tarkasteltavassa kaistassa vaikuttaa taivutusmomentti  $F \cdot dx \cdot l_u$ .

$$l_u := \frac{b_u - b_w}{2} = 0.25$$

$$t_{fl} = 0.035$$

$$I = \frac{dx \cdot t_{fl}^3}{12}$$

$$W = \frac{dx \cdot t_{fl}^2}{6}$$

$$M_{fb} = F \cdot dx \cdot l_u$$

$$M_{f.Rd} = \frac{dx \cdot t_{fl}^2}{6} \cdot f_y$$

$$F_f := 50000$$

$$F_{f.Ed} := \chi_L \cdot F_f = 8.25 \times 10^4$$

$$\sigma_{x.Ed} := \max(\text{jännitys\_yp}_{LC1}) = 262.132 \cdot 10^6$$

$$\sigma_{y.Ed} = \frac{M_{Ed}}{W} = \frac{\chi_L \cdot F \cdot dx \cdot l_u}{\frac{dx \cdot t_{fl}^2}{6}} = \frac{6 \cdot \chi_L \cdot F \cdot l_u}{t_{fl}^2}$$

$$\sigma_{y.Ed} := \frac{6 \cdot F_{f.Ed} \cdot l_u}{t_{fl}^2} = 1.01 \times 10^8$$

etäisyys uuman keskeltä  
ylälaipan ulkoreunaan ( m )  
uuman vahvuus ( m )

tarkasteltavan kaistan  
neliömomentti

tarkasteltavan kaistan  
taivutusvastus

tarkasteltavan kaistan tyvessä  
vaikuttava taivutusmomentti

tarkasteltavan kaistan  
taivutuskestävyys

Laipan ulokkeelliselle reunalle  
tulevan viivakuormituksen suu-  
rimpana arvona voidaan pitää 50  
kN/m, joka vastaa yhden pyörän  
aiheuttamaa kuormitusta.

viivakuormituksen  
mitoitussarvo ( N/m )

profiilin ylälaipassa vaikuttava  
pituussuuntainen  
puristusjännitys ( Pa )

profiilin ylälaipassa vaikuttavan  
viivakuorman aiheuttama  
poikittaissuuntainen jännitys ( Pa )

$$\tau_{Ed} = \frac{\chi_L \cdot F \cdot dx}{dx \cdot t_{f1}} = \frac{\chi_L \cdot F}{t_{f1}}$$

$$\tau_{Ed} := \frac{F_{f,Ed}}{t_{f1}} = 2.357 \times 10^6$$

profiilin ylälaipassa vaikuttavan  
viivakuorman aiheuttama  
leikkausjännitys ( Pa )

yleinen kestävyyslauseke  
poikkileikkauksen kriittisessä  
pisteessä. EN 1993-1-1-6.2-(6.1)

$$\left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{y,Ed}}{f_y} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right) \cdot \left( \frac{\sigma_{y,Ed}}{f_y} \right) + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 \leq 1$$

$$\left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right)^2 + \left( \frac{\frac{6 \cdot F_{f,Ed} \cdot l_u}{t_{f1}^2}}{f_y} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right) \cdot \left( \frac{\frac{6 \cdot F_{f,Ed} \cdot l_u}{t_{f1}^2}}{f_y} \right) + 3 \cdot \left( \frac{\frac{F_{f,Ed}}{t_{f1}}}{f_y} \right)^2 = 0.416$$

Edellä esitettyjen laskelmien perusteella voidaan todeta, että laipan reuna  
kestää vaaditun kuormituksen.

$$v_{\max} := \frac{F_f \cdot l_u^3}{3 \cdot E \cdot \frac{1 \cdot t_{f1}^3}{12}} = 3.521 \times 10^{-4}$$

ylälaipan ulokereunan taipuma ( m )  
Tarkastellaan ylälaipan ulokkeellisen  
reunan taipumaa metrin pituisena  
palana, jolle vaikuttaa  
maksimiviivakuormitus.

### Palkin laipan keskiosa kestävyys

Määritellään laipan uumien välisen osuuden kestävyys vastaavalla tavalla, kuin edellä esitetty laipan ulokereunan kestävyys. Laippaa mallinnetaan päistään vapaasti tuettuna palkkina.

$$I_u := \frac{t_{f3}^3 \cdot l}{12} = 3.573 \times 10^{-6} \quad \text{laipan neliömomentti}$$

$$W_u := \frac{t_{f3}^2 \cdot l}{6} \quad \text{laipan taivutusvastus}$$

$$M_{u.Rd} := W_u \cdot f_y = 7.248 \times 10^4 \quad \text{laipan taivutuskestävyys}$$

pituusyksikköä kohti ( m<sup>4</sup> / m )  
pituusyksikköä kohti ( m<sup>3</sup> / m )  
pituusyksikköä kohti ( Nm / m )

### Palkin laipan keskikohdan kestävyys, kun laipan keskellä vaikuttaa pituussuuntainen viivakuormitus

$$P_{app.l} := 30 \cdot 10^4 = 3 \times 10^5 \quad \text{viivakuorman arvo ( N/m )}$$

$$P_{app.l.Ed} := \chi_L \cdot P_{app.l} = 4.95 \times 10^5 \quad \text{viivakuorman mitoitusarvo ( N/m )}$$

$$M_{u.l.Ed} := \frac{P_{app.l.Ed} \cdot c_1}{4} = 6.695 \times 10^4 \quad \text{taivutusmomentin}$$

$$w_{pl} := \frac{P_{app.l} \cdot c_1^3}{48E \cdot I_u} = 1.338 \times 10^{-3} \quad \text{viivakuorman aiheuttama}$$

$$\sigma_{u.l.y} := \frac{M_{u.l.Ed}}{W_u} = 327.912 \cdot 10^6 \quad \text{mitoituskuormituksen}$$

$$\tau_{u.l.Ed} := \frac{P_{app.l.Ed}}{t_{f3}} = 14.143 \cdot 10^6 \quad \text{mitoituskuormituksen}$$

mitoitusarvo ( Nm )  
taipuma ( m )  
aiheuttama jännitys ( Pa )  
aiheuttama leikkausjännitys ( Pa )

$$\left( \frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{u.l.y}}{f_y} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y} \right) \cdot \left( \frac{\sigma_{u.l.y}}{f_y} \right) + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{u.l.Ed}}{f_y} \right)^2 = 0.721$$

Laippa kestää 400 kN/m viivakuormituksen pituussuunnassa.

**Palkin laipan keskikohdan kestävyys, kun laipan keskellä vaikuttaa painekuormitus.**

$$P_{\text{app}} := 100 \cdot 10^4 = 1 \times 10^6 \quad \text{paineuorman arvo ( Pa )}$$

$$P_{\text{app.Ed}} := \chi_L \cdot P_{\text{app}} = 1.65 \times 10^6 \quad \text{paineuorman mitoitusarvo ( N/m )}$$

$$M_{\text{u.Ed}} := \frac{P_{\text{app.Ed}} \cdot c_1^2}{8} = 6.037 \times 10^4 \quad \begin{array}{l} \text{taivutusmomentin} \\ \text{mitoitusarvo ( Nm )} \end{array}$$

$$w_{\text{dl}} := \frac{5P_{\text{app}} \cdot c_1^4}{384E \cdot I_u} = 1.508 \times 10^{-3} \quad \begin{array}{l} \text{paineuorman aiheuttama} \\ \text{taipuma ( m )} \end{array}$$

$$\sigma_{\text{u.y}} := \frac{M_{\text{u.Ed}}}{W_u} = 295.668 \cdot 10^6 \quad \begin{array}{l} \text{mitoituskuormituksen} \\ \text{aiheuttama jännitys ( Pa )} \end{array}$$

$$\tau_{\text{u.Ed}} := \frac{P_{\text{app.Ed}} \cdot c_1}{t_{f3}} = 25.504 \cdot 10^6 \quad \begin{array}{l} \text{mitoituskuormituksen} \\ \text{aiheuttama leikkausjännitys ( Pa )} \end{array}$$

$$\left( \frac{\sigma_{\text{x.Ed}}}{f_y} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{\text{u.y}}}{f_y} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_{\text{x.Ed}}}{f_y} \right) \cdot \left( \frac{\sigma_{\text{u.y}}}{f_y} \right) + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{\text{u.Ed}}}{f_y} \right)^2 = 0.639$$

Laippa kestää 1 MN/m<sup>2</sup> painekuormituksen.

**Sillan pituuden muutos taipumasta johtuen**

$$v(x) := \frac{P_{\text{app.Sd.LC1}} \cdot L^4}{24 \cdot E \cdot I_x(4)} \cdot \left[ \frac{x}{L} - 2 \cdot \left( \frac{x}{L} \right)^3 + \left( \frac{x}{L} \right)^4 \right]$$

$$dv(x) := \frac{d}{dx} v(x)$$

$$\int_0^{15.9975} \sqrt{1 + dv(x)^2} dx = 15.9999$$

sillan pituuden muutos taipumasta johtuen n.1,5 mm maksimikuormituksella, joten sillä ei ole merkitystä

## LIITE 3.2

### Tappiliitoksen lujuuslaskenta

Liitoksen tulee olla yhtä kestävä kuin muu silta.

$$f_{yp} := 500 \cdot 10^6 \quad \text{niveltapin myötölujuus ( Pa )}$$

$$f_{up} := 700 \cdot 10^6 \quad \text{niveltapin vetomurtolujuus ( Pa )}$$

Liitoksen mittatiedot:

$$d := 0.1 \quad \text{tapin halkaisija ( m )}$$

$$t_p := 0.035 \quad \text{kamman peruslevyn paksuus ( m )}$$

$$t_{II} := 0.012 \quad \text{kamman lisälevyn paksuus ( m )}$$

$$t := t_p + 2 \cdot t_{II} = 0.059 \quad \text{levyn kokonaispaksuus ( m )}$$

$$l_p := 0.12 \quad \text{kampojen keskiöetäisyys ( m )}$$

$$A := \pi \cdot \frac{d^2}{4} = 7.854 \times 10^{-3} \quad \text{liitostapin pinta-ala ( m^2 )}$$

$$I_w := \frac{\pi}{4} \cdot d^4 \quad \text{liitostapin neliömomentti ( m^4 )}$$

$$W_{el} := \frac{I_w}{\frac{d}{2}} = 1.571 \times 10^{-3} \quad \text{liitostapin elastinen taivutusvastus ( m^3 )}$$

Tapin kestävyys EN1993-8 taulukko 3.10

$$F_{v,Rd} := \frac{0.6 \cdot A \cdot f_{up}}{\gamma_{M2}} = 2.639 \times 10^6 \quad \text{leikkauskestävyys murtotilassa ( N )}$$

$$F_{b,Rd} := 1.5 \cdot \frac{t}{2} \cdot d \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1.571 \times 10^6 \quad \text{Reunapuristuskestävyys ( N ) murtotilassa. Levyn paksuus puolitetty, koska yksi levy toimii kahdessa liitoksessa}$$

$$F_{b,Rd,ser} := 0.6 \cdot \frac{t}{2} \cdot d \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M6,ser}} = 6.284 \times 10^5 \quad \text{Reunapuristuskestävyys ( N ) käyttötilassa. Levyn paksuus puolitetty, koska yksi levy toimii kahdessa liitoksessa}$$

$$M_{Rd,c} := \frac{1.5 \cdot W_{el} \cdot f_{yp}}{\gamma_{M0}} = 1.178 \times 10^6 \quad \text{tapin taivutuskestävyys murtotilassa ( Nm )}$$

$$M_{Rd,ser} := \frac{0.8 \cdot W_{el} \cdot f_{yp}}{\gamma_{M6,ser}} = 6.283 \times 10^5 \quad \text{tapin taivutuskestävyys käyttötilassa ( Nm )}$$



## Niveltapin kuormitukset

$$Q_{\text{kok}} := P_{\text{app.Ed.LC1}} = 1.84 \times 10^5$$

$$Q_{\text{kok.ser}} := P_{\text{app.Sd.LC1}} = 1.147 \times 10^5$$

$$M_{\text{Ed.c}} := \frac{1}{8} \cdot Q_{\text{kok}} \cdot L^2 = 5.888 \times 10^6$$

$$M_{\text{Ed.c2}} := M_{\text{vert}}(l_1, Q_{\text{kok}}) = 2.576 \times 10^6$$

$$M_{\text{max.ser}} := \frac{1}{8} \cdot Q_{\text{kok.ser}} \cdot L^2 = 3.669 \times 10^6$$

$$M_{\text{uls}} := M_{\text{Rd.El}} = 7.001 \times 10^6$$

$$F_{\text{t.Rd}} := \frac{M_{\text{uls}}}{h_{\text{ua}} - 0.13} = 2.187741 \times 10^7$$

$$F_{\text{t.Ed2}} := \frac{M_{\text{Ed.c2}}}{h_x(l_1) - 0.13} = 1.288 \times 10^7$$

$$F_{\text{t.Ed}} := \frac{M_{\text{Ed.c}}}{h_{\text{ua}} - 0.13} = 1.84 \times 10^7$$

$$F_{\text{t.ser}} := \frac{M_{\text{max.ser}}}{h_{\text{ua}} - 0.13} = 1.147 \times 10^7$$

$$F_{\text{v}} := \frac{Q_{\text{kok}} \cdot L}{2} = 1.472 \times 10^6$$

$$F_{\text{v.ser}} := \frac{Q_{\text{kok.ser}} \cdot L}{2} = 9.173 \times 10^5$$

$$F_{\text{Rd}} := \frac{\sqrt{F_{\text{t.Rd}}^2 + F_{\text{v}}^2}}{11} = 1.993 \times 10^6$$

$$F_{\text{Ed}} := \frac{\sqrt{F_{\text{t.Ed}}^2 + F_{\text{v}}^2}}{11} = 1.678 \times 10^6$$

$$F_{\text{Ed2}} := \frac{\sqrt{F_{\text{t.Ed2}}^2 + F_{\text{v}}^2}}{11} = 1.179 \times 10^6$$

$$F_{\text{Ed.ser}} := \frac{\sqrt{F_{\text{t.ser}}^2 + F_{\text{v.ser}}^2}}{11}$$

mitoituskuormitus ( N )

käyttörajan kuormitus ( N )

mitoitusmomentti keskialojen liitokselle ( Nm )

mitoitusmomentti pätyalojen liitokselle ( Nm )

käyttörajan momentti ( Nm )

Rakenteen murtotilan momentti ( Nm ) keskiliitoksen kohdalla.

Murtotilan taivutusmomentin aiheuttama leikkausvoima ( N ) keskiosien liitoksissa.

Mitotuskuormituksen taivutusmomentin aiheuttama leikkausvoima ( N ) pätyosien liitoksissa.

Mitotuskuormituksen taivutusmomentin aiheuttama leikkausvoima ( N ) keskiliitoksessa.

Käyttötalan taivutusmomentin aiheuttama leikkausvoima ( N ) keskiliitoksessa.

yhteen liitokseen kohdistuva leikkaava mitotuskuormitus ( N )

yhteen liitokseen kohdistuva leikkaava käyttötalan kuormitus ( N )

murtotilan taivutusmomentin ja siltaa kuormittavan leikkausvoiman yhteisvaikutus ( N )

mitotuskuormituksen taivutusmomentin ja siltaa kuormittavan leikkausvoiman yhteisvaikutus ( N ) keskimmäisten moduulien liitoksessa

mitotuskuormituksen taivutusmomentin ja siltaa kuormittavan leikkausvoiman yhteisvaikutus ( N ) pätymoduulien liitoksessa

käyttötalan taivutusmomentin ja siltaa kuormittavan leikkausvoiman yhteisvaikutus keskimmäisten moduulien liitoksessa

Approksimoidaan liitostappiin kohdistuvaa taivutusmomenttia kuvaamalla tappia kampavälin pituisena päistään jäykästi kiinnitettynä palkkina jolla pistekuorma vaikuttaa keskellä

EN 1993-1-8-kuva 3.11

$$M_{p,Rd} := \frac{F_{Rd} \cdot l_p}{8} = 2.99 \times 10^4$$

$$M_{p,Ed} := \frac{F_{Ed} \cdot l_p}{8} = 2.517 \times 10^4$$

$$M_{p,Ed2} := \frac{F_{Ed2} \cdot l_p}{8} = 1.768 \times 10^4$$

Levyn ja niveltapin reunapuristuskestävyydet kolmessa edellä mainitussa tilanteessa.

EN1993-1-8-Taulukko3.10

$$\frac{F_{Rd}}{2F_{b,Rd}} = 0.634$$

$$\frac{F_{Ed2}}{2F_{b,Rd}} = 0.375$$

$$\frac{F_{Ed,ser}}{2F_{b,Rd,ser}} = 0.832$$

### Liitostapin yhdistetty leikkaus- ja taivutuskestävyys

EN 1993-1-8-Taulukko 3.10

$$\left( \frac{M_{p,Rd}}{M_{Rd,c}} \right)^2 + \left( \frac{F_{Rd}}{F_{v,Rd}} \right)^2 = 0.571$$

$$\left( \frac{M_{p,Ed}}{M_{Rd,c}} \right)^2 + \left( \frac{F_{Ed}}{F_{v,Rd}} \right)^2 = 0.405$$

$$\left( \frac{M_{p,Ed2}}{M_{Rd,c}} \right)^2 + \left( \frac{F_{Ed2}}{F_{v,Rd}} \right)^2 = 0.2$$

EN 1993-1-8 Taulukko 3.9, Tyyppi A

ohjeet niveltappirakenteen geometrialle.

$$a_1 := \frac{F_{Rd} \cdot \gamma M_0}{2 \cdot t \cdot f_y} + \frac{2 \cdot d}{3} = 0.114$$

Mitta a on mitta levyn reunasta niveltapin reiän reunaan vedon suunnassa ( m ).

$$c_1 := \frac{F_{Rd} \cdot \gamma M_0}{2 \cdot t \cdot f_y} + \frac{d}{3} = 0.081$$

Mitta c on mitta levyn reunasta niveltapin reiän reunaan kohtisuoraan vedon suunnassa ( m ).

## TAPPI KONTAKTI

Kosketusjännitykset on määritelty Hertzin lineaarisen kontaktiteorian mukaan, kahden sisäkkäisen lieriön kontaktina.

Materiaali- ja mittatiedot yksiköt ( m ) ja ( Pa )

kampa	tappi	
$v_1 := 0.3$	$v_2 := 0.3$	
$E_1 := 210 \cdot 10^9$	$E_2 := 210 \cdot 10^9$	
$D_1 := 0.0996$	$D_2 := 0.100$	SFS 2872 D10 / h9 sovite

$$L_{\text{tappi}} := 0.059 = 0.059$$

Laskentavakiot

$$\gamma := \frac{(1 - v_1)^2}{E_1} + \frac{(1 - v_2)^2}{E_2}$$

$$K_c := \frac{D_1 \cdot D_2}{D_2 - D_1} = 24.9$$

Tapin kuormitukset muunnettuna viivakuormitukseksi tapin matkalle.

$$q_{c.Rd} := \frac{F_{Rd}}{L_{\text{tappi}}} = 3.379 \times 10^7$$

$$q_{c.Ed} := \frac{F_{Ed}}{L_{\text{tappi}}} = 2.844 \times 10^7$$

$$q_{c2} := \frac{F_{Ed2}}{L_{\text{tappi}}} = 1.997 \times 10^7$$

$$q_{c.ser} := \frac{F_{Ed.ser}}{L_{\text{tappi}}} = 1.772 \times 10^7$$

Niveltappiliitoksen kontaktipinnan pituus

$$b_{c.ser} := 0.798 \left( q_{c.ser} \cdot K_c \cdot \gamma \right)^{\frac{1}{2}} = 0.036$$

$$b_{c.Ed} := 0.798 \left( q_{c.Ed} \cdot K_c \cdot \gamma \right)^{\frac{1}{2}} = 0.046$$

$$b_{c.Rd} := 0.798 \left( q_{c.Rd} \cdot K_c \cdot \gamma \right)^{\frac{1}{2}} = 0.05$$

Niveltappiliitoksen kontaktipinta-ala

$$A_{c.ser} := 2 \cdot b_{c.ser} \cdot L_{tappi} = 4.273 \times 10^{-3}$$

$$A_{c.Ed} := 2 \cdot b_{c.Ed} \cdot L_{tappi} = 5.413 \times 10^{-3}$$

$$A_{c.Rd} := 2 \cdot b_{c.Rd} \cdot L_{tappi} = 5.9 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_{c.Rd} := 0.798 \cdot \left( \frac{q_{c.Rd}}{K_c \cdot \gamma} \right)^{\frac{1}{2}} = 430.295 \cdot 10^6$$

$$\sigma_{c.Ed} := 0.798 \cdot \left( \frac{q_{c.Ed}}{K_c \cdot \gamma} \right)^{\frac{1}{2}} = 394.799 \cdot 10^6$$

$$\sigma_{c2} := 0.798 \cdot \left( \frac{q_{c2}}{K_c \cdot \gamma} \right)^{\frac{1}{2}} = 330.858 \cdot 10^6$$

$$\sigma_{c.ser} := 0.798 \cdot \left( \frac{q_{c.ser}}{K_c \cdot \gamma} \right)^{\frac{1}{2}} = 311.66 \cdot 10^6$$

Mitoituskuormituksella havaitaan lievää liitospinnan plastisoitumista, ja murtokuormituksellakaan ei ylitetä materiaalin murtorajaa.

## LIITE 4

### Hitsausliitosten lujuuslaskenta

Kaikki hitsit mitoitetaan normin EN1993-1-8-4.5.3

$$l_c := 0.03 + 0.6 \quad \text{lohkon kiinnikkeiden pituus ( m )}$$

$$l_{w1} := l_1 - \frac{l_c}{2} + 0.5 = 2.185 \quad \text{uuman pituus lohkossa 2 ( m )}$$

$$l_{w2} := l_2 - l_c = 2.37 \quad \text{uuman pituus lohkossa 2 ( m )}$$

$$l_{w3} := l_3 - l_c = 2.37 \quad \text{uuman pituus lohkossa 3 ( m )}$$

$$l_{w.tot} := 2 \cdot (l_{w1} + l_{w2} + l_{w3}) = 13.85$$

$$F_{v.w} := \frac{\max(\Gamma_{appi\_voima} E_d(D_{LC1}, L, K))}{11} = 1.638 \times 10^6 \quad \text{yhdelle kammalle tuleva vetovoima ( N )}$$

$$V_{Ed} = 1.472 \times 10^6 \quad \text{profiilille tuleva maksimileikkausvoima ( N )}$$

### Uuman ja laipan liitoshitsit

Valitaan laipan ja uuman välisen hitsin a-mitta niin, että hitsien a-mitta on yhtä suuri kuin uuman vahvuus. Tällöin hitsit kestävät yhtä paljain kuin uuma. EN 1993-1-8-4.7.3

$$a_{w1} := 0.006 \quad \text{keskimmäisen uuman kaksipuoleinen pianahitsi}$$

$$a_{w2} := 0.012 \quad \text{reunimmaisten uumien yksipuoleiset pianahitsi}$$

$$a_{tot} := 2 \cdot a_{w1} + (n_u - 1) \cdot a_{w2} = 0.036$$

$$\tau_{Ed,u} := \frac{S_{z,u}(0)}{I_x(0)} \cdot \frac{V_{Ed}}{n_u \cdot t_{w3}} = 186.562 \cdot 10^6 \quad \text{maksimileikkausjännitys ( Pa ) uuman ja ylälaipan saumassa}$$

$$\tau_{Ed,d} := \frac{S_{z,d}(0)}{I_x(0)} \cdot \frac{V_{Ed}}{n_u \cdot t_{w3}} = 185.116 \cdot 10^6 \quad \text{maksimileikkausjännitys ( Pa ) uuman ja alalaipan saumassa}$$

$$\sigma_{n.Ed} := \frac{Q_{max.Ed.LC1}}{n_u \cdot t_{w1} \cdot L} = 5.111 \times 10^6 \quad \text{uumalle tuleva puristusjännitys ( Pa )}$$

Hitsin parametrit

$$\beta_w := 0.9 \quad f_u := 510 \cdot 10^6 \quad \text{teräs S355}$$

$$\gamma_{M2} = 1.25$$

$$f_{ud} := \frac{f_u}{(\beta_w \cdot \gamma_{M2})}$$

$$\tau_{Rd} := \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = 261.732 \cdot 10^6$$

$$\frac{\tau_{Ed.u}}{\tau_{Rd}} = 0.713 \quad \frac{\tau_{Ed.d}}{\tau_{Rd}} = 0.707 < 1 \text{ ok}$$

uuman hitsien vertailujännitykset

ylälaipan liitoshitsi

$$\sqrt{\sigma_{n.Ed}^2 + 3 \cdot \tau_{Ed.u}^2} = 323.175 \cdot 10^6$$

alalaipan liitoshitsi

$$\sqrt{\sigma_{n.Ed}^2 + 3 \cdot \tau_{Ed.d}^2} = 320.67 \cdot 10^6$$

$$< \quad f_{ud} = 453.333 \cdot 10^6 \quad \text{ok}$$

**Kamman liitoshitsit**

$$a_k := 0.015 \quad \text{kamman liitoshitsi}$$

$$L_k := 0.285 \quad \text{hitsin pituus}$$

$$V_{Ed.k} := F_{Rd} = 1.993 \times 10^6$$

$$\sigma_N := \frac{V_{Ed.k}}{2a_k \cdot L_k \cdot \sqrt{2}} = 164.855 \cdot 10^6 \quad < \quad \frac{0.9 f_u}{\gamma_{M2}} = 367.2 \cdot 10^6$$

$$\tau_N := \frac{F_{v.w}}{2a_k \cdot L_k} = 191.523 \cdot 10^6$$

$$\sigma_{vert} := \sqrt{\sigma_N^2 + 3 \cdot \tau_N^2} = 370.433 \cdot 10^6 \quad < \quad \sigma_{Rd} := \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = 453.333 \cdot 10^6$$

hitsit kestävät

**Kampalevyn lisälevyn liitoshitsin mitoitus**

$$d_{II} := 0.22 \quad \text{lisälevyn halkaisija (m)}$$

$$V_{Ed,II} := \frac{F_{Rd}}{L_{tappi}} \cdot t_{II} = 4.054 \times 10^5 \quad \text{lisälevylle tuleva kuormitus (N)}$$

$$l_{w,II} := d_{II} \cdot \pi = 0.691 \quad \text{hitsin pituus, kun levy hitsataan ympäri (m)}$$

**Hitsin parametrit**

$$\beta_w = 0.9 \quad f_u = 5.1 \times 10^8 \quad \text{teräs S355}$$

$$\gamma_{M2} = 1.25$$

$$a_{min,II} := \frac{V_{Ed,II} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot \sqrt{3}}{l_{w,II} \cdot f_u} = 2.241 \cdot 10^{-3} \quad \text{valitaan a-mitaksi 5mm}$$

## LIITE 5

### Lähtötiedot niveltappikontaktin FEM- analyysiin

#### FEM tarkastelua varten määritetään kontaktialueen koko

Hertzin teorian mukaisen kontaktialueen koon mukaan määritelty sektori, jolle kontakti kohdistuu

$$\alpha_1 := \frac{2b_{c.ser}}{\left(\frac{D_2 \cdot 2 \cdot \pi}{360}\right)} = 41.499 \quad \text{käyttötilan kuormitus ( deg )}$$

$$\alpha_2 := \frac{2b_{c.Ed}}{\left(\frac{D_2 \cdot 2 \cdot \pi}{360}\right)} = 52.57 \quad \text{mitoituskuormitus ( deg )}$$

$$\alpha_3 := \frac{2b_{c.Rd}}{\left(\frac{D_2 \cdot 2 \cdot \pi}{360}\right)} = 57.296 \quad \text{murtokuormitus ( deg )}$$

Kontaktialueen ja tappivoiman perusteella määritelty keskimääräinen kontaktipaine, jota käytetään liitoksen paikalliseen FEM-analyysiin. FEM-analysissä tapin reiästä rajataan edellä määritelty sektori, jolle alla laskettu keskimääräinen painekuorma kohdistetaan.

$$p_{ekv.ser} := \frac{F_{Ed.ser}}{A_{c.ser}} = 244.707 \cdot 10^6 \quad \text{käyttötilan kuormitus ( Pa )}$$

$$p_{ekv.Ed} := \frac{F_{Ed}}{A_{c.Ed}} = 309.985 \cdot 10^6 \quad \text{mitoituskuormitus ( Pa )}$$

$$p_{ekv.Rd} := \frac{F_{Rd}}{A_{c.Rd}} = 337.855 \cdot 10^6 \quad \text{murtokuormitus ( Pa )}$$



## LIITE 6

### Nostolenkkien kiinnikkeiden mitoitus

Nostokiinnikkeiden mitoitus

$L_n := 20$  Sillan maksimipituus nostotilanteessa ( m )

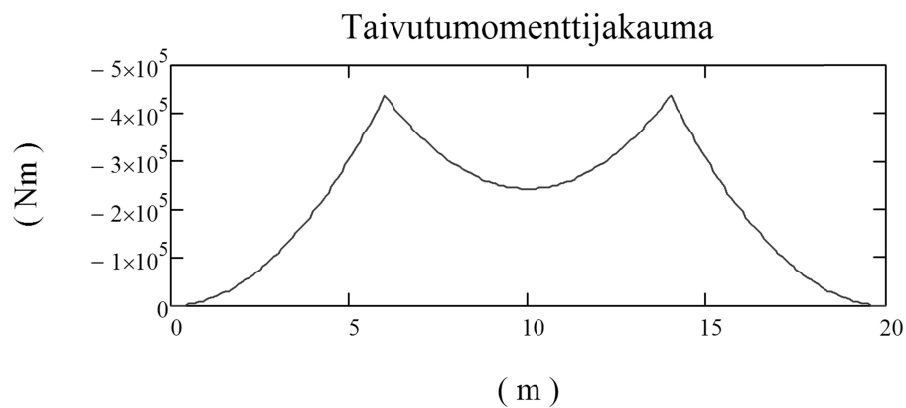
$s := 8 = 8$  nostopisteiden väli ( m )

Maksimi nostopituus 20m

$$G_n := \chi_L \cdot \frac{300009.81}{L_n} = 2.428 \times 10^4$$

$$F_N := \frac{-G_n \cdot L_n}{2} = -2.428 \times 10^5 \quad \text{nostopisteparille tuleva mitoituskuormitus ( N )}$$

Nostotilanteessa sillassa vaikuttava taivutusmomenttijakauma



noston aiheuttama vetovoima varmistuspultteihin ( N )

$$F_{t.nosto} := \max\left(\frac{-M_{nosto}(l_1)}{0.25}, \frac{-M_{nosto}(l_1 + l_2)}{0.35}, \frac{M_{nosto}(l_1 + l_2 + l_3)}{0.35}\right) = 8.671 \times 10^5$$

Liitetään ylälaipat toisiinsa kahdella M36 ruuvilla

$a_s := 0.007$	kiinnikkeen hitsin a-mitta ( m )
$e_s := \frac{0.07}{2} = 0.035$	liitospultin etäisyys kiinnikkeen reunasta ( m )
$b_s := 0.1$	kiinnikkeen pituus ( m )
$b_{s2} := 0.07$	kiinnikkeen leveys ( m )
$t_s := 0.02$	pitkittäisen osan ainevahvuus ( m )
$t_{s2} := 0.03$	poikittaisen osan ainevahvuus ( m )
<b>M36 8.8 ruuvien tiedot</b>	
$R_m := 800 \cdot 10^6$	ruuvien murtoraja ( Pa )
$R_e := R_m \cdot 0.8 = 6.4 \times 10^8$	ruuvien myötöraja ( Pa )
$A_s := 817 \cdot 0.001^2 = 8.17 \times 10^{-4}$	ruuvien poikkileikkauksen pinta-ala ( m <sup>2</sup> )
$F_{t.Rd.b} := \frac{0.9 A_s \cdot R_m}{\gamma_{M2}} = 4.706 \times 10^5$	ruuvien vetokestävyys ( N )
$\frac{F_{t.nosto}}{F_{t.Rd.b}} = 1.843$	ruuvien minimimäärä, kaksi kappaletta ruuveja riittää

### Liitosten varmistuspulttien kiinnikkeiden mitoitus

$V_{Ed.s} := \frac{F_{t.nosto}}{2} = 43.357 \cdot 10^4$	yhteen kiinnikkeeseen kohdistuva leikkausvoima ( N )
$M_{Ed.s} := V_{Ed.s} \cdot e_s = 1.517 \times 10^4$	epäkeskisestä kuormituksesta johtuva momentti ( Nm )
$N_{Ed.s} := \frac{M_{Ed.s}}{b_s + t_{s2}} = 11.673 \cdot 10^4$	momentin aiheuttama vetovoima kiinnikkeen päätykappaleeseen ( N )

Ajatellaan kiinnikkeen pitkittäisten osien hitsien ottavan vastaan leikkausvoimat ja päätykappaleen poikittaisten hitsien normaalivoimat.

EN1993-1-8-4.5.3

$$V_{w.Rd.1} := \frac{b_{s2} \cdot a_s \cdot f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot \sqrt{3}} = 12.825 \cdot 10^4$$

Kiinnikkeen päädyn hitsin leikkauskestävyys ( N ), hitsi vain toisella puolella.

$$V_{w.Rd.2} := \frac{2b_s \cdot a_s \cdot f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot \sqrt{3}} = 36.642 \cdot 10^4$$

Kiinnikkeen sivukappaleen hitsin leikkauskestävyys ( N ).

$$N_{w.Rd} := \frac{(b_{s2} - 2 \cdot t_s + 2 \cdot t_{s2}) \cdot a_s \cdot f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = 28.56 \cdot 10^4$$

$$\frac{F_{t.Rd.b}}{V_{w.Rd.1} + V_{w.Rd.2}} = 0.951$$

todetaan, että valittu a-mitta on riittävä

$$\frac{N_{Ed.s}}{N_{w.Rd}} = 0.409$$

### Nostopisteiden kiinnitys pisteiden läpileikkauskestävyys

EN1993-1-8 taulukon 3.4 mukaan

$$d_m := \frac{0.055 + 0.055 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}}{2} = 0.059 \quad \text{avainvälin ja mutterin halkaisijan keskiarvo}$$

$$t_r := 0.02 \quad \text{perus aineen paksuus}$$

$$B_{p.Rd} := 0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_r \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 136.711 \cdot 10^4 \quad \frac{F_{t.Rd.b}}{B_{p.Rd}} = 0.344$$

todetaan, että mutterin läpileikkautuminen ei aiheuta ongelmia.

## LÄHTEET

1. Liikenneministeriön päätös erikoiskuljetuksista ja erikoiskuljetusajoneuvoista, 2 luku, 2§
  2. Liikenneviraston tilastot silloista.
  3. Goldhofer modular transporter type PST/SL-E technical data
  4. EN1090-2, Teräs- ja alumiinirakenteiden toteuttaminen, osa 2 teräsrakenteita koskevat vaatimukset, liite B.2.2.2 taulukko B.1, 2008.
  5. EN1090-2, Teräs- ja alumiinirakenteiden toteuttaminen, osa 2 teräsrakenteita koskevat vaatimukset, liite B.2.2.3 taulukko B.3, 2008.
  6. Ympäristöministeriön asetus Eurocode–standardien soveltamisesta talonrakennuksessa , liite B taulukko B1, 2007.
  7. EN1090-2, Teräs- ja alumiinirakenteiden toteuttaminen, osa 2 teräsrakenteita koskevat vaatimukset, Teräs ja alumiinirakenteiden toteuttaminen, osa 2 teräsrakenteita koskevat vaatimukset, liite B.2.2.2 taulukko B.1, 2008.
  8. EN1090-2, Teräs ja alumiinirakenteiden toteuttaminen, osa 2 teräsrakenteita koskevat vaatimukset, liite B.3 taulukko B.3, 2008.
  9. Lujuusoppi T.Salmi, S.Pajunen s.409(4), Pressus 2010
  10. Lujuusoppi T.Salmi, S.Pajunen s.267(6), Pressus 2010
  11. Lujuusoppi T.Salmi, S.Pajunen s.267(2), Pressus 2010
- EN1090-2 Teräs ja alumiinirakenteiden toteuttaminen, 2008.
- EN 1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet, 2003.
- EN1991-2 Rakenteiden kuormat, Siltojen liikennekuormat, 2003.
- EN1993-1-1 Teräsrakenteiden suunnittelu, Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, 2005.
- EN1993-1-5 Teräsrakenteiden suunnittelu, Levyrakenteet, 2005.

EN1993-1-8 Teräsrakenteiden suunnittelu, Liitosten mitoitus, 2005.

ISO 668 Rahtikontit, 1988.

**KUVAT**

Kuva 1: Havator Transport Oy arkisto.

Kuva 2: Havator Transport Oy arkisto.

Kuva 3: Goldhofermodular transporter type PST/SL-E technical data.

Kuva 4: Havator Transport Oy arkisto.