



# **AJOSILLAN LUJUUSTARKASTELU JA KEHITYS**

**Opinnäytetyö**

**Olli-Pekka Suhonen**

**Konetekniikan koulutusohjelma**  
Kone- ja tuotesuunnittelu

**SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU TEKNIikka KUOPIO**

Koulutusohjelma

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Tekijä

Olli-Pekka Suhonen

Työn nimi

Ajosillan lujustarkastelu ja kehitys

Työn laji

Opinnäytetyö

Päiväys

29.5.2012

Sivumäärä

31

Työn valvoja

projektipäällikkö Tatu Westerholm

Yrityksen yhdyshenkilö

tekninen johtaja Ismo Itkonen

Yritys

Saimatec Engineering Oy

Tiivistelmä

Tämän työn aiheena oli ajosillan lujustarkastelu ja kehitys. Tavoitteena oli selvittää, pystyykö jo olemassa olevan sillan ylittämään turvallisesti kuorma-autolla ja tarvittaessa vahvistamaan sen rakenteita. Silta sijaitsee vanhan telakan takana kanavan päällä. Sillasta ei ollut olemassa piirustuksia eikä lujuslaskuja. Tarkoitus oli tutkia FE-analyysin avulla sillan lujuutta.

Työ alkoi sillan mallinnuksella. 3D-mallia varten jokainen osa mitattiin ja mallinnettiin erikseen, minkä jälkeen tehtiin tarkka malli Autodesk Inventor -ohjelmalla. Tämän jälkeen tehtiin yksinkertaistettu 3D -malli, jonka perusteella tehtiin kuorimalli FE-analyysiä varten.

Tulosten perusteella silta todettiin riittävän keatäväksi, eikä rakenteiden vahvistamiselle ollut tarvetta. Silta hiekkapuhallettiin ja maalattiin uudelleen säänkestävällä maalilla, sekä varustettiin uudella kansilankutuksella.

Avainsanat

3D-mallinnus, FEM

Luottamuksellisuus

julkinen

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Mechanical Engineering			
Author(s) Olli-Pekka Suhonen			
Title of Thesis Strength Analysis and Development of a Bridge			
Date	29 May, 2012	Pages	31
Supervisor(s) Mr. Tatu Westerholm, Project Manager			
Project/Partners Mr. Ismo Itkonen, Vice President, Saimatec Engineering Oy			
<p><b>Abstract</b></p> <p>The purpose of this final year project was to investigate whether the existing bridge can be safely driven on with a truck and, if necessary, to strengthen its structures. The bridge is located in the back yard of an old dock site and leads over a canal. There are neither drawings nor strength calculations of the bridge available. The aim was to study the strength properties of the bridge with the help of FE analysis. This work was commissioned by Saimatec Engineering Oy specialized in material handling and known worldwide.</p> <p>The project was started by modeling the bridge. Each part was measured and modeled separately. Then a 3D model was created. Thereafter, the 3D model was simplified and a shell model was made for the FE analysis. Multiple analyses were made and the results were carefully studied. Finally, the bridge was sand blasted and repainted, as well as the deck was renewed.</p> <p>As a result of this final year project it was proved that the bridge was strong enough to be used even for trucks and no strengthening was required.</p>			
<p><b>Keywords</b> Finite Element Method, 3D modeling</p>			

## SISÄLLYS

1. JOHDANTO .....	5
2. SAIMATEC ENGINEERING OY JA ÄSSÄTEKNIikka .....	6
3. FEM .....	8
3.1 Suunnittelijat FE-analyysin tekijöinä.....	9
3.2 Ongelmia FE maailmassa .....	10
3.3 Mallintamisen ongelmat .....	10
3.4 Todellisten voimien ja reunaehtojen selvittäminen.....	11
4. TYÖN KULKU .....	12
4.1 Mittaus ja mallinnus.....	12
4.2 Oikeaoppinen mallintaminen.....	13
4.3 Kuorimalli .....	14
4.4 ANSYS.....	17
4.5 Verkotus.....	18
4.6 Elementtityypit.....	19
4.7 Kuorielementin ominaisuudet.....	19
4.8 Tuet ja kuormat .....	20
4.9 Yksittäisen palkin laskenta .....	22
5. TULOKSET .....	25
6. KEHITYSMAHDOLLISUUDET.....	28
7. YHTEENVETO.....	30
8. LÄHTEET:.....	31

## 1. JOHDANTO

Tämä työ on tehty Saimatec Engineering Oy:lle. Työ käsittelee jo olemassa olevan ajosillan lujuustarkastelua FEM-laskennan keinoin, sekä sen lujittamista tarvittaessa. Silta sijaitsee Ässätekniikan konepajan takana kanavan päällä. Ajosilta nostetaan siltanosturilla pois kanavan päältä aina, kun hallin ja järven välillä liikutaan aluksella. Tarkasteltavasta sillasta ei ollut olemassa 3D-mallia eikä lujuuslaskuja; ainoastaan sillan massa ja maksimiakselikuorma oli ilmoitettu. Tarkoituksena oli selvittää, ovatko luvut totuudenmukaisia sekä voiko sillan ylittää turvallisesti kuorma-autolla.



KUVA 1. Ajosilta. (Valokuva Olli-Pekka Suhonen)

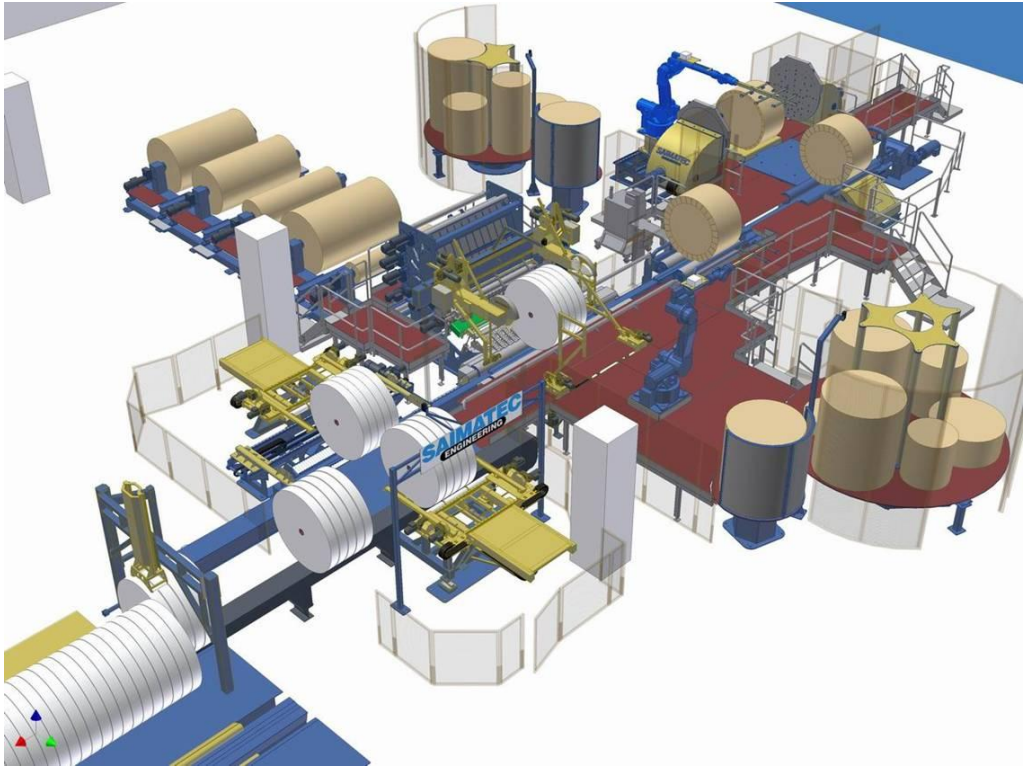
## 2. SAIMATEC ENGINEERING OY JA ÄSSÄTEKNIikka

Saimatec Engineering Oy:n on perustanut toimitusjohtaja Seppo Rasimus vuonna 1981. Yritys on ollut osakeyhtiö vuodesta 1991. Saimatec Engineering Oy kehittää ja toimittaa paperirullien pakkausjärjestelmiä, modernisointeja ja palveluita paperiteollisuusasiakkaille. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Savonlinnassa Teknolassa. Yritys työllistää noin kolmekymmentä henkilöä. Saimatec Engineering Oy:n pääalihankkija on tytäryhtiö Ässätekniikka, joka on perustettu vuonna 1989. Ässätekniikan konepaja sijaitsee myös Teknolassa. Konepajan toimitilat muodostuvat entisestä telakkahallista, joka antaa mahdollisuudet suurien kappaleiden tekoon sekä lastauksen suoraan alukseen.

Saimatec Engineeringin Oy toimittaa paperirullien pakkausjärjestelmiä, tämä sisältää koko logistisen ketjun ituusleikkurilta varastoon. Saimatecin täysin automaattisen rullanpakkausjärjestelmän (ks. kuva 2) kapasiteetti on 180 rullaa tunnissa eli noin 4000 rullaa vuorokaudessa. Rullat liikkuvat lamellikuljettimia pitkin käärintäasemalle, etiketöintiin ja edelleen varastoon. Lamellikuljettimista on olemassa monia eri variaatioita, ja ne suunnitellaan aina asiakkaan tarpeisiin ja tiloihin sopiviksi. Rullia liikutellaan kuljettimilta toiselle työntimillä, vierintätaasoilla ja vastaanottimilla. Myös olemassaolevien pakkauslinjastojen modernisointi kuuluu Saimatecin keskeisiin toimintoihin.

Saimatec engineeringillä on käytössään nykyaikaiset suunnitteluohjelmistot.

Preliminääri layoutsuunnittelu tehdään 2D-AutoCAD:llä ja lopullinen layout- sekä laitesuunnittelu toteutetaan Autodesk Inventor 3D -ohjelmalla.



KUVA 2. Pakkaamon 3D -malli

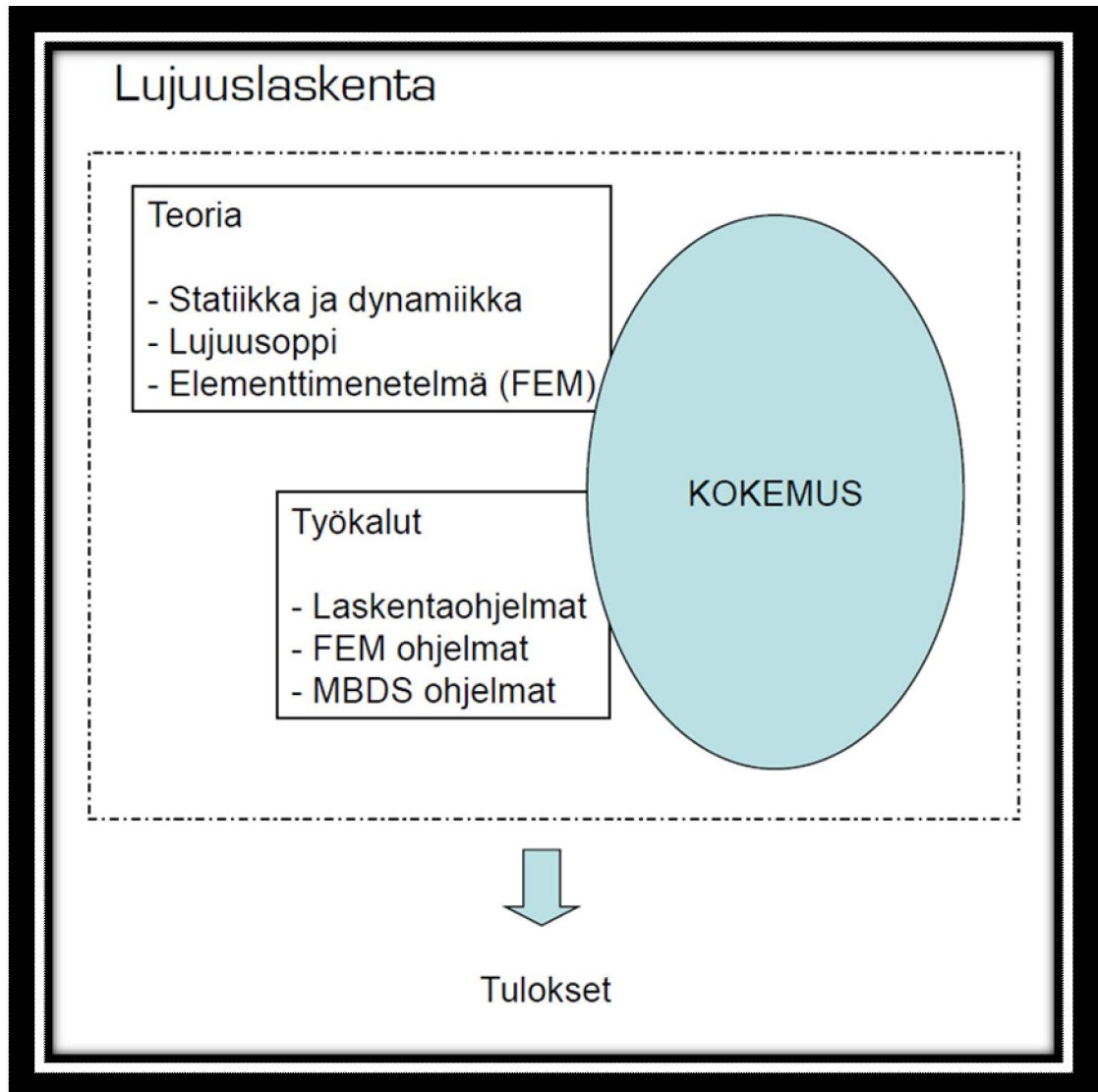
### 3. FEM

FEM tulee englannin kielen sanoista Finite Element Method, joka suomennettuna tarkoittaa äärellisten elementtien menetelmää tai elementtimenetelmää. Yleisimmin kuitenkin käytetään lyhyesti nimitystä FEM. Lentokoneeteollisuus alkoi ensimmäisenä hyödyntää elementtimenetelmää ja sen kehitys alkoi 1960-luvulla. Laskenta perustuu matriisilaskentaan. Laskentamenetelminä käytetään siirtymä-, voima- tai sekamenetelmää. Yleisimmin käytetään siirtymämenetelmää. Perusajatuksena rakenne jaetaan osiin, joita kutsutaan elementeiksi. Elementit liittyvät toisiinsa pisteissä, joita kutsutaan solmuiksi.

FEM on vartenotettava työkalu, kun tutkitaan esimerkiksi lämmönsiirtoa, virtauksia, maa- ja kalliotekniikkaa, sähkötekniikkaa, akustiikkaa ja rakenteiden mekaniikkaa. Laskennan kohteena voi esimerkiksi olla kantava rakenne, ristikko, arina, kehä, levyrakenne tai solidirakenne.

Kuormitusten takia rakenteeseen syntyy siirtymiä, muodonmuutoksia ja jännityksiä. Näitä voidaan tutkia elementtimenetelmän keinoin, esimerkiksi autoteollisuus hyödyntää FEM:ä simuloidessaan muodonmuutoksia epäsymmetrisessä törmäyksessä. Näin saadaan pienennettyä käytännön törmäystestien kustannuksia.





KUVIO 3. FEM laskennan perusteet

### 3.1 Suunnittelijat FE-analyysin tekijöinä

FEM-laskenta perustuu puhtaasti perinteiseen lujuuslaskentaan kuvion 3 havainnollistamalla tavalla. Lujuuslaskennan teoria, statiikka, dynamiikka, lujuusoppi sekä elementtimenetelmä (FEM) yhdistettynä kokemukseen, mahdollistaa todennukaisten FE-analyysien teon. Tulosten esille saamiseen käytetään työkaluja, kuten erilaisia laskentaohjelmia, FEM-ohjelmia ja MBDS-ohjelmia.

### 3.2 Ongelmia FE maailmassa

Oppilaitoksista saadaan pelkät perustiedot ja vasta kokemuksen kautta varsinainen kehittyminen tapahtuu. Yleensä suunnittelijat eivät ole päätoimisia lujuuslaskijoita, mikä saattaa aiheuttaa uskomisen FEM ohjelmien antamien tulosten olevan absoluuttisen todenmukaisia. Yleisimmät suunnittelijoiden tekemien virheiden syyt FE analyyseissa ovat: Voimien mallinnus 20 %, reunaehtojen mallinnus 30 %, mallien yksinkertaistaminen 40 % ja tietotaidon puute FEM ohjelmien käytössä 10 %. Lisäksi erot virtuaalisen- ja todellisen maailman välillä lisäävät epävarmuutta laskentaan ja tuloksiin. Virtuaalisessa maailmassa materiaalin ja geometrian oletetaan olevan ideaaleja. Muuttujat on myös rajattu sekä voimat ja reunaehdot käyttäytyvät ideaalisesti. Todellisuudessa materiaalit eivät ole koskaan täydellisiä, vaan niissä esiintyy homogeenisuutta. Muuttujia on paljon ja geometriassa on virheitä. Myös voimat ja reunaehdot muuttuvat jatkuvasti kuormitustilanteen mukaan.

### 3.3 Mallintamisen ongelmat

Geometristä mallia on aina yksinkertaistettava FE -analyysiä varten, sillä hyvin mutkikkaat geometriset muodot vaativat koneelta valtavasti laskentatehoa. Kaikki lujutta lisäämättömät muodot ja pienet ja merkityksettömät yksityiskohdat pyritään poistamaan analysoitavasta mallista. Näitä ovat esimerkiksi ruuvit, reiät, korvakkeet ja viisteet. Edellisten lisäksi täytyy malliin valita oikeanlainen elementin koko ja – tyyppi.

### 3.4 Todellisten voimien ja reunaehtojen selvittäminen

Voimat eivät ole koskaan yksiselitteisiä, vaan muuttujia on paljon, eikä joitain tapauksia tule edes ajatelleeksi. Esimerkiksi tässä työssä tarkasteltiin kuorma-auton sillanylitystä ja tarkastelussa oli niin sanotusti kuormittavin tilanne. Ylitysvaiheessa massan aiheuttama voima sijoitettiin standardista saatujen perusteiden mukaan. Tilanne voisi olla toinen, mikäli kyseessä olisi esimerkiksi traktori lastattuna reilusti ylikuormaan. Myös inhimilliset tekijät voivat vaikuttaa tilanteen kuormitukseen, sillä usein laitteilla on monta käyttäjää ja tällöin erehdyksiä ja muita vastaavia tilanteita syntyy väistämättä. Myös erilaiset käyttöympäristöt vaikuttavat kuormitustilanteisiin: esimerkiksi käytetäänkö laitetta kokoajan sisätiloissa, vai onko se välillä ulkona, jolloin korroosiotekijät on myös otettava huomioon. Ei ole myöskään ole yhdentekevää, onko laite käytössä Siperian kovissa pakkasissa, vai Etelä-Amerikan polttavassa kuumuudessa. Suomen olot ovat myös haasteelliset, sillä kesällä voi olla jopa kolmekymmentä astetta lämmintä, toisaalta talvella lämpötila voi laskea reilusti alle kahdenkymmenen pakkasasteen. Lisäksi voimat voivat tulla myös täysin yllättävästä syystä, kuten maanjäristys tai muu luonnonkatastrofi.

Yksi varma tapa selvittää todelliset kuormat, on kuormien mittaus, tämä ei kuitenkaan ole aina mahdollista. Myös siirtymien tarkastelu ja venymäliuskamittaukset ovat tehokas keino selvittää materiaalien ja rakenteiden käyttäytymistä eri tilanteissa.

## 4. TYÖN KULKU

Oli tarve selvittää Ässätekniikan konepajan takana sijaitsevan ajosillan kuormitusarvojen paikkansapitävyys. Projekti alkoi sillan suurimpien osien ja näiden paikkojen mittaamisella. Mittaamisen ohessa mallinnus oli kok oajan rinnalla ja sillan 3D- malli alkoi vähitellen hahmottua. 3D-mallin valmistuttua alettiin pohtia sillan rakenteiden lujuusopillisesti oleellisia ratkaisuja. Tässä vaiheessa alkoi jo hahmottua, että rakenteet olivat ylimitoitettuja. Seuraavaksi malli valmisteltiin Ansys:ä varten, jolla varsinainen lujuustarkastelu tehtiin. Siltaa yksinkertaistettiin eli siitä jätettiin pois sellaiset rakenteet, jotka eivät lisää lujuutta. Tämän jälkeen siitä tehtiin kuorimalli, joka siirrettiin Ansykseen. Ansyksessa mallista tehtiin yksi yhtenäinen part, joka verkotettiin. Verkotetulle partille määritettiin tuet ja kuormat, minkä jälkeen ajettiin analyysjä erilaisissa kuormitustapauksissa.

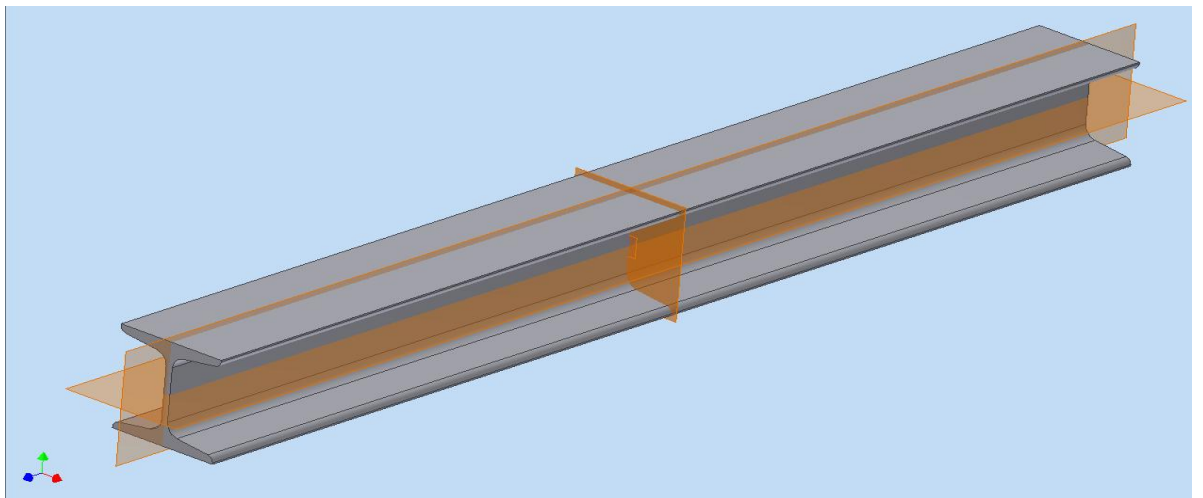
### 4.1 Mittaus ja mallinnus

Projekti alkoi sillan mittaamisella. Ensimmäinen haaste olikin sillan valtava koko, osien paljous ja mittaamisen mittatarkkuus. Mittaamisessa edettiin systemaattisesti, siten että ensin otettiin profiilin dimensiot ja pituus ja tämän jälkeen määritettiin osan paikka kokoonpanossa. Osien paikoituksessa huomattiin, että kaikkien osien paikkoja ei ollut mitoitettu tarkasti kokoonpanovaiheessa. Esimerkiksi suurimpien palkkien uumiin hitsatut pystylevyt oli paikoitettu umpimähkään, tosin nekään eivät lisää, vaan vaikuttaa siltä, että ne on alun perin hitsattu paikoilleen kokoonpanon helpottamiseksi. Pystylevyt näkyvät kuvassa 5 pääpalkin uumassa. Suurimmat osat on rakennettu hitsaamalla levystä, standardiprofiilin sijaan.

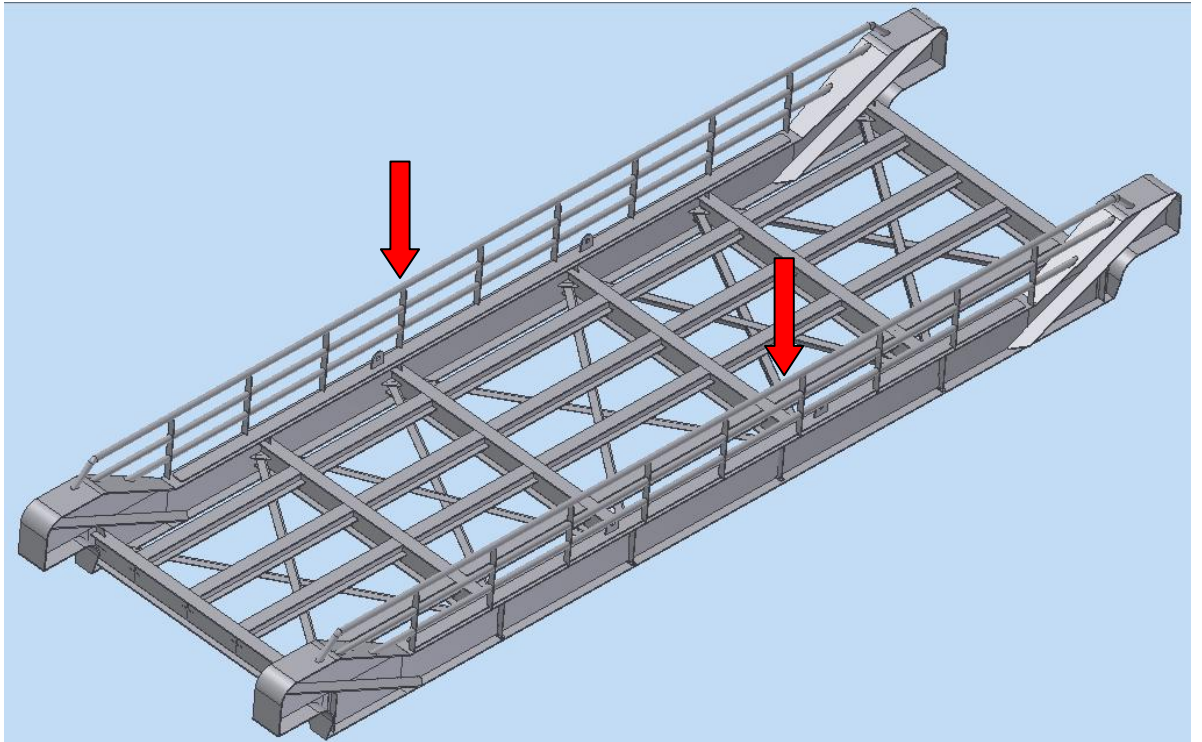
Mittaus-mallinnusprosessi eteni suurimmista osista pienimpiin. Loppuvaiheessa silta oli nostettuna maihin yhden päivän ajan, jolloin päästiin mittaamaan kannen alapuoliset jäykistelevyt sekä alapuolisten rakenteiden aineenvahvuudet. Mittauksessa käytettiin 5 m:n ja 15 m:n rullamittoja sekä työntömittaa. Mallinnus tehtiin Autodesk Inventor R2008 3D -ohjelmistolla. Valmis 3D-malli on kuvassa 5. Mittaamiseen ja mallintamiseen kului aikaa noin 9 työpäivää.

## 4.2 Oikeaoppinen mallintaminen

3D-mallinnuksessa päädytään usein hyvinkin suuriin kokoonpanoihin, joissa voi olla useita alikokoonpanoja sekä valtavasti osia. Kokemus osoittaa, että lähes poikkeuksetta jossain vaiheessa malliin tulee muutoksia ja niiden jälkeen malli ei enää välttämättä toimi oikein. Tämän ongelman syy löytyy mate-komentojen ehtojen muuttumisesta, mikäli osat on liitetty toisiinsa pinnoista. Muutoksen jälkeen osasta saattaa hävitä liitospinta tai -reuna kokonaan, myös paikka voi muuttua. Jos maten ehtona ollut kohta muuttuu, saattaa malli mennä sekaisin. Näiden ongelmien välttämiseksi tulisivat osat liittää toisiinsa nähden XY-, XZ- ja YZ tasojen suhteen. Jo sketsausvaiheessa kannattaa origo sijoittaa ehtojen avulla keskelle tai muuten järkevään kohtaan. Kun päästää sketsistä pursotukseen, kannattaa suunta valita siten, että pursotus tapahtuu XY-tasosta kahteen suuntaan. Näin saadaan XY- taso kappaleen keskelle (ks. kuva 4). Vaikka kyseessä olisi standardiosa, kannattaa mallista käydä muuttamassa pursotussuuntaa keskitasosta kahteen suuntaan, kuten kuvassa 4 on esitetty.



KUVA 4. Tasot oikeaoppisesti standardiprofiilissa ISO 657/16- 1980

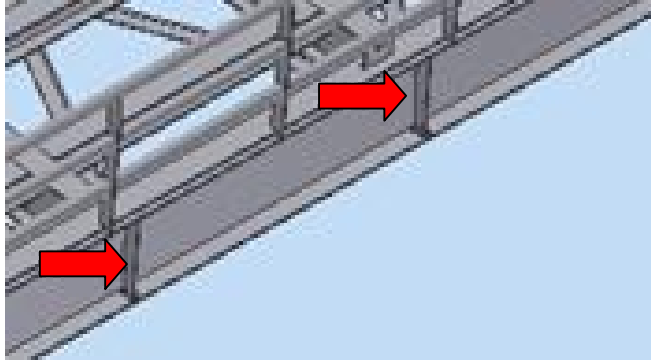


KUVA 5. Valmis 3D-malli

### 4.3 Kuorimalli

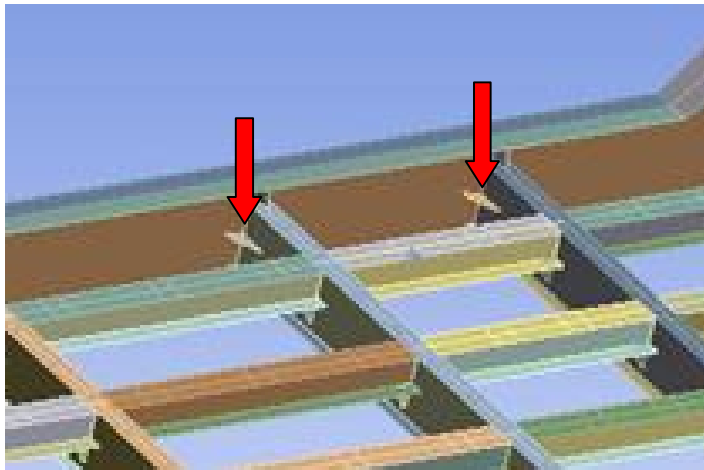
Kun Inventorilla tehty malli oli saatu valmiiksi, siirryttiin Savonia-ammattikorkeakoulun tekniikan Kuopion yksikön tiloihin tutkimaan mallia tarkemmin lujuusopillisesta näkökulmasta. Jo projektin alkuvaiheessa oli päätetty, että lujuustarkastelu tehdään Ansys Work Benchillä. Ansysä varten mallista täytyi tehdä kuorimalli. Kuorimallia alettiin työstää Solid Works 3D -ohjelmalla. Ansys on yhteensopiva myös Inventorin kanssa ja kuorimallin olisi voinut tehdä myös sillä, mutta yksinkertaisesti tietotaito ei ollut riittävä Inventor-kuorimallin tekemiseen. Ei ollut tietoa käyttäytymisestä Ansysksessa.

Kuorimallin tekeminen aloitettiin alusta, mutta mallintamista helpotti Inventorissa rinnalla auki ollut alkuperäinen 3D-malli. Tässä vaiheessa alkoi jo hahmottua, mitkä osat jätetään mallintamatta kuorimalliin. Kuorimallista jätettiin pois kaikki sellaiset osat, jotka eivät merkittävästi lisää lujuutta, kuten kuvassa 5 näkyvät kaiteet, ulommaisina olevat pystyrivat, kuten kuvassa 6 sekä pitkittäin olevien palkkien alla olevat L-profiilit kuvassa 8.

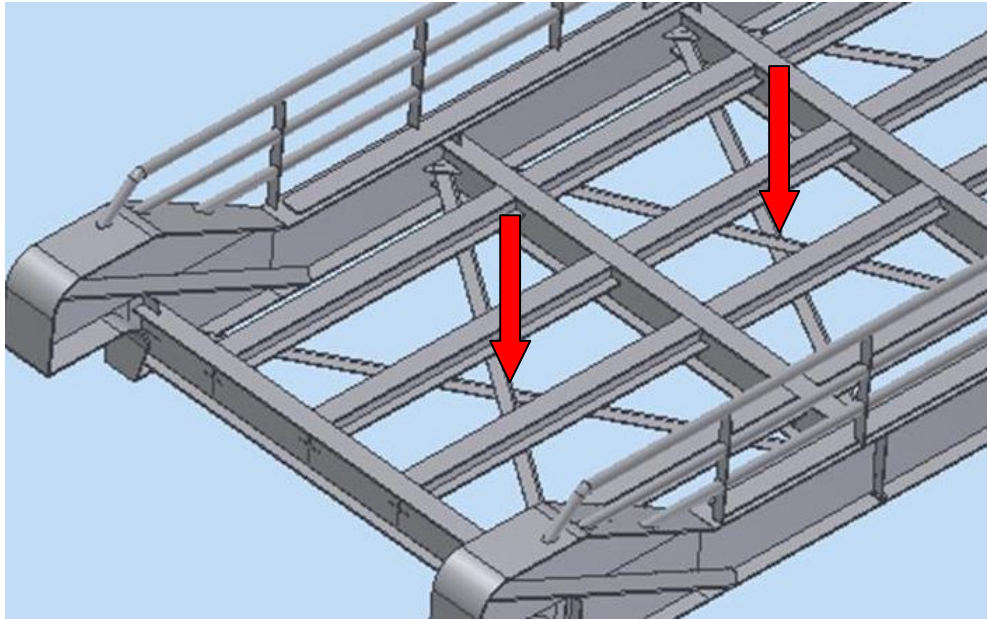


KUVA 6. Pystyrivat

Ristikkäin menevät L-profiilit on laitettu helpottamaan pitkittäin olevien palkkien hitsausta. Palkit on asetettu rautojen päälle ja ne on saatu asemoitua halutuille paikoille. Vaakatasossa olevat kolmion muotoiset raudat on taas asetettu L-profiilien paikoittamista helpottamaan. Kolmiotuet, jotka näkyvät kuvassa 7 mallinnettiin kuorimalliin, jotta nähtiin, aiheuttavatko ne ylimääräisiä jännityksiä rakenteeseen.

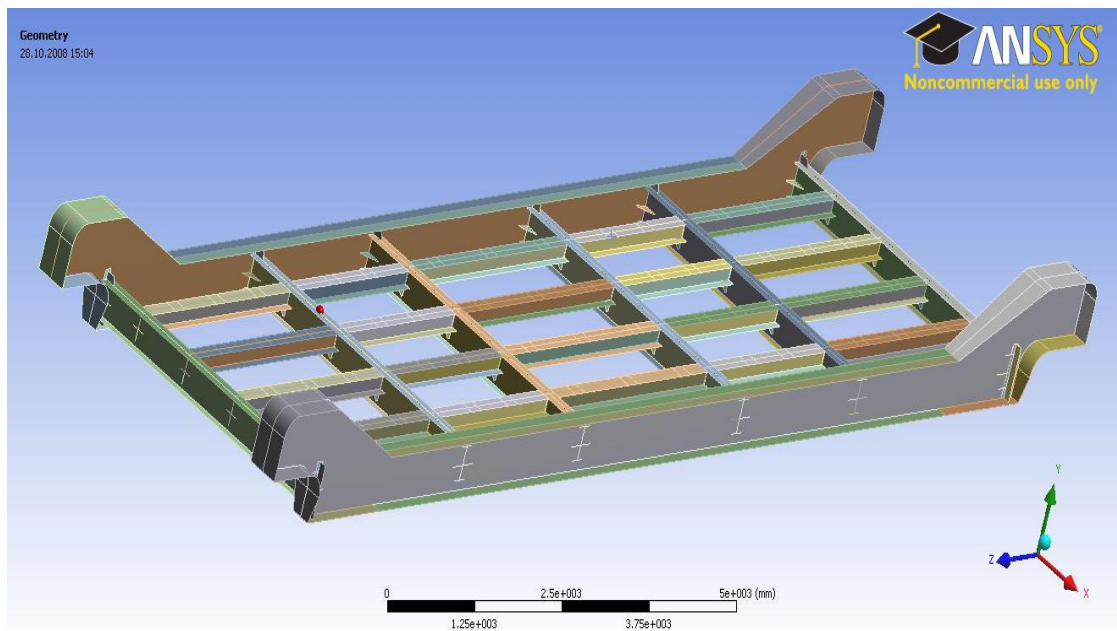


KUVA 7. Kolmiotuet



KUVA 8. L-profiilit

Kuorimalli mallinnettiin ns. pintoina, eli jokaisen osan aineenvahvuus on kuorimallissa nolla. Materiaalin paksuudet syötettiin Ansyskessa käsin joka osalle ja pinnalle. Samalla täytyi tietyissä liitoskohdissa jatkaa osia ja liittää ne surface-knit - ja surface-extend-komennoilla. Osien liittämisen jälkeen mallista tehtiin yksi yhtenäinen part, minkä jälkeen kuorimalli oli valmis FE-analyysiä varten.



KUVA 9. Kuorimalli. Ansys Work Bench



#### 4.4 ANSYS

Ansyes-laskentaohjelma; sen perusversiot soveltuvat lineaarisesta laskennasta kaikkia epälineaarisuuden muotoja sisältäviin vaativiin analyysiin. Ansys sisältää ominaisuudet kaikkiin rakenne-, lämpö- ja dynaamisiin analysointitarpeisiin. Ansyksesta on olemassa monia erilaisia ohjelmistoversioita, jotka on räätälöity tiettyä tarkoitusta varten.

ANSYS Professional NLS (Non Linear Static) with Geometry Interface for soveltuu perus-epälineaariseen laskentaan, kun tarvitaan kitkallista kontaktia tai tutkitaan, jääkö rakenteeseen pysyviä muodonmuutoksia plastisuuden johdosta. Epälineaarina kontaktielementteinä on rakoelementti, kitkaton ja kohtisuoraan irtoava kontakti kahden pinnan välillä sekä kitkallinen kontakti. Elementtiverkkojen ei tarvitse täsmätä kontaktissa. Erikoiselementtinä soveltuvat mm. ruuviliitoksen kiristävä elementti. Dynaaminen analyysi voi sisältää ominaisvärähtelyjen ja harmonisen vasteen analyysityypit. Lämpöanalyyseissä toimii vain steady-state analyysityyppi lämmön johtumiselle (conduction) ja lämmön siirtymiselle (convection).

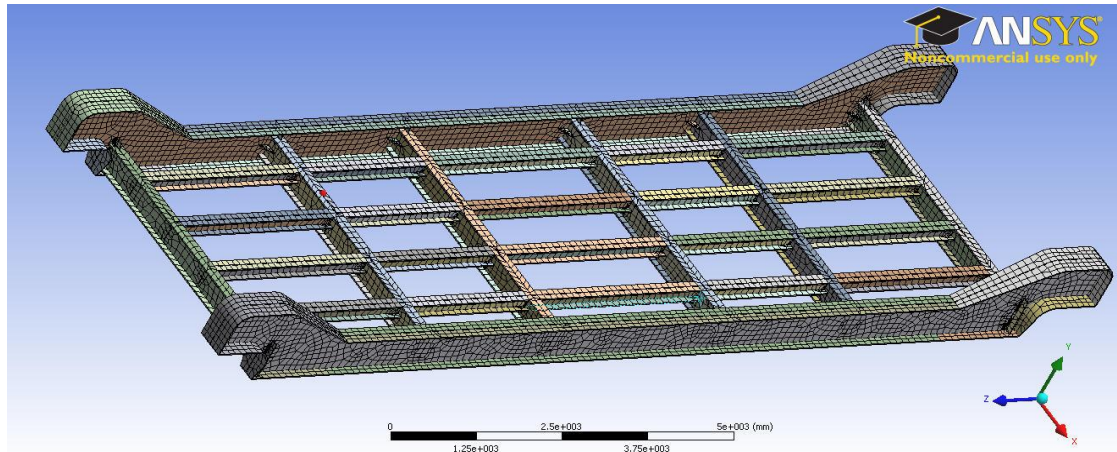
ANSYS Professional NLT (Non Linear Thermal) with Geometry Interface for soveltuu erinomaisesti erilaisten lämpörasitusten analysointiin, sisältää myös aikahistoriallisen lämpöanalyysin. Epälineaarina kontaktielementteinä voi olla rakoelementti, kitkaton ja kohtisuoraan irtoava kontakti kahden pinnan välillä. Kontaktille voidaan määrittää lämmönsiirtokerroin. Elementtiverkkojen ei tarvitse täsmätä kontaktissa. Erikoiselementtinä on esimerkiksi ruuviliitoksen kiristävä elementti. Dynaaminen analyysi voi sisältää ominaisvärähtelyjen ja harmonisen vasteen analyysityypit. Lämpöanalyyseissä sovelletaan steady-state ja transient -analyysityypit lämmön johtumiselle (conduction) ja lämmön siirtymiselle (convection).

ANSYS Structural sisältää täydet epälineaariset ominaisuudet rakenneanalyysiin, mm. plastiset materiaalmallit (kumi, muovi, lasi, betoni) mutta se ei sisällä lämpöanalyysiä. Kontakteina voi olla myös kitkalliset pintakontaktit. Se sisältää useita eri komposiittielementtityyppejä ja soveltuu siten erinomaisesti erilaisten lasikuiturakenteiden analysointiin. Erittäin suurien mallien laskenta on mahdollista superelementtitekniikan ansiosta.

ANSYS Mechanical on laaja-alainen FEM-paketti vaativiin analyysiin. Se mahdollistaa kytketyt rakenne-, lämpö- ja akustiikka-analyysit. Yhdistettynä ANSYS CFX: n kanssa soveltuu myös kytkettyihin rakennevirtausanalyysiin (FSI)ANSYS Mechanical sisältää structural-ominaisuudet ANSYS Multiphysics – paketissa.

#### 4.5 Verkotus

Verkotus on geometrian mallintamista elementeillä. Tarkoituksena optimoida mahdollisimman kevyt elementtiverkko laskentaa varten, sillä laskenta vaatii tietokoneelta todella paljon tehoa. Verkotusta luotaessa on otettava monta tekijää huomioon. Ensinnäkin on valittava kulloisellekin tapaukselle oikea elementtityyppi. Jos tapauksessa on useamaa elementtityyppiä samanaikaisesti, on elementit kyettävä yhdistämään. Myös elementtien suuruus eli verkotuksen tiheys on otettava huomioon laskettavissa rakenteissa. Kriittisimpiin paikkoihin laitetaan tiheämpi verkotus, sillä mitä tiheämpi verkotus on, sitä tarkemmat tulokset saadaan. Näitä paikkoja ovat esimerkiksi liitoskohdat. On järkevää yksinkertaistaa sellaisten paikkojen geometriaa, joilla ei ole lujutta lisäävää vaikutusta tai ovat vähemmän tärkeitä. Myös rakenteiden ja kappaleiden symmetriaa kannattaa käyttää hyväksi.



KUVA10. Verkotus. Ansys Work Bench

#### 4.6 Elementtityypit

Elementtityyppiä on olemassa viisi: Sauvaelementti, soveltuu hyvin ristikkorakenteiden laskentaan. Palkkielementtiä, käytetään usein putki- ja profiilirunkojen laskennassa. Tasoelementtiä käytetään nimensä mukaisesti taselementtien laskennassa, esimerkiksi korvakeprofiilien laskennassa. Levymäisten rakenteiden analysoinnissa käytetään kuorielementtiä, jonka sovelluksia ovat muun muassa lentokoneen tai laivan runko. Kuorielementti sallii kuormia ja muodonmuutoksia myös tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Viides elementtityyppi on solidielementti, joita käytetään, kun kyseessä on monimutkaisia geometrioita. Silta on levymäinen rakenne, joten tässä tapauksessa sovelletaan kuorielementtiä.

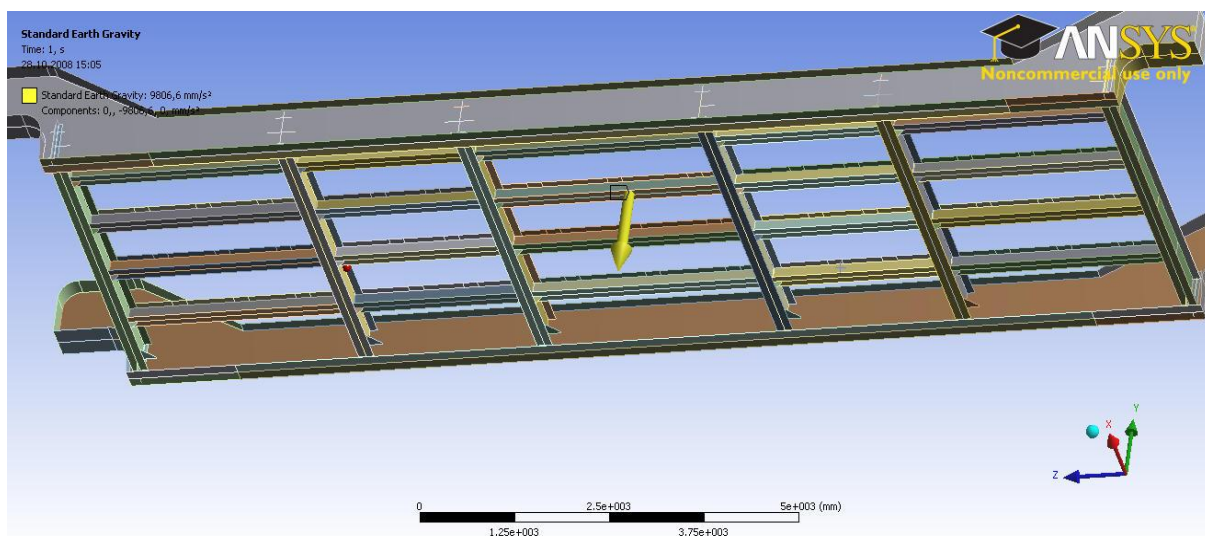
#### 4.7 Kuorielementin ominaisuudet

Kuorirakenne kantaa kuormaa jokaisesta suunnasta ja sen vuoksi ottaa vastaan taivutusta, vääntöä ja tasomuodonmuutoksia. Yleisiä sovelluksia ovat kupolimaiset rakenteet ja kevyet runkorakenteet, kuten lentokoneen runko. Yksinkertainen, mutta yleisesti käytetty tapa muodostaa kuorimaisia malleja ja kuorielementtejä, on yhdistää tasoelementtejä toisiinsa. Kuorimaiset rakenteet ovat usein kaarevia ja kaarevuus muuttaa elementin suuntaa, joten sellaisissa paikoissa käytetään pienempiä elementtejä ja pienempää elementtiverkkoa. Voiman kohdistuessa yksittäiseen tasoelementtiin ei siihen synny taivutuksessa muodonmuutoksia eikä siirtymiä. Kuorirakenteessa sen sijaan elementit ajatellaan liitettyneen toisiinsa globaalisti, mikä tarkoittaa, että siirtymät syntyvät suhteessa toisiin elementteihin.

## 4.8 Tuet ja kuormat

Tukien määrittämissä ei ollut ongelmia, sillä tuet määritettiin todellisen tilanteen mukaan silla päihin. Tässä tapauksessa silta on neljän tukipisteen varassa. Kuormien ja voimien määrittämisessä lähdettiin hakemaan pahinta mahdollista tilannetta, jossa siltaan kohdistuva rasitus on mahdollisimman suuri.

Kun tuet oli määritetty, lisättiin Ansysissä ensimmäiseksi parametriksi gravitaatio, (kuvas 13). Gravitaation merkitys tässä tapauksessa on huomattava, koska sillan suuri oma massa aiheuttaa jo merkittävän rasituksen rakenteeseen. Ansysissä on myös mahdollista simuloida tuulikuormia ja tasaista kuormaa. Tuulikuorman lisääminen jätettiin pois, sillä silta on suojaisassa paikassa eikä tuuli käytännössä aiheuta rasitusta tämänkokoiseen ja muotoiseen rakenteeseen. Myös tasainen kuorma lisättiin kannen koko pinta-alalle simuloimaan lumikuormaa, joka on näissä olosuhteissa myös mahdollinen. Lumikuorman aiheuttama rasitus oli kuitenkin niin vähäinen, että se päätettiin jättää pois varsinaisesta analyysistä.

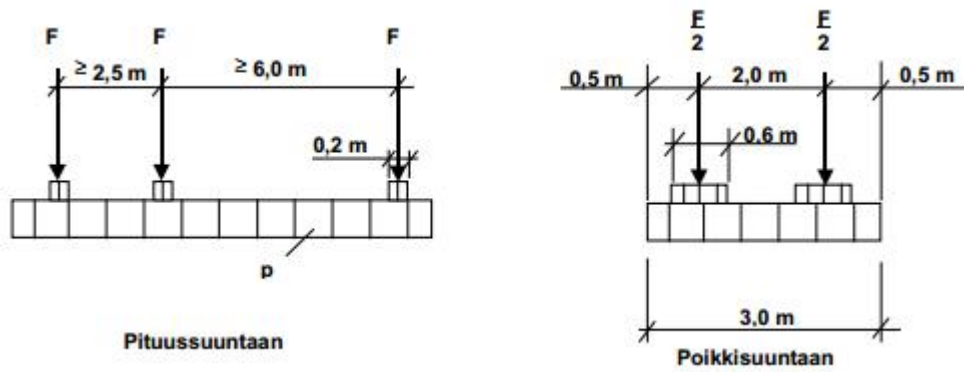


KUVA 11. Gravitaatio. Ansys Work Bench

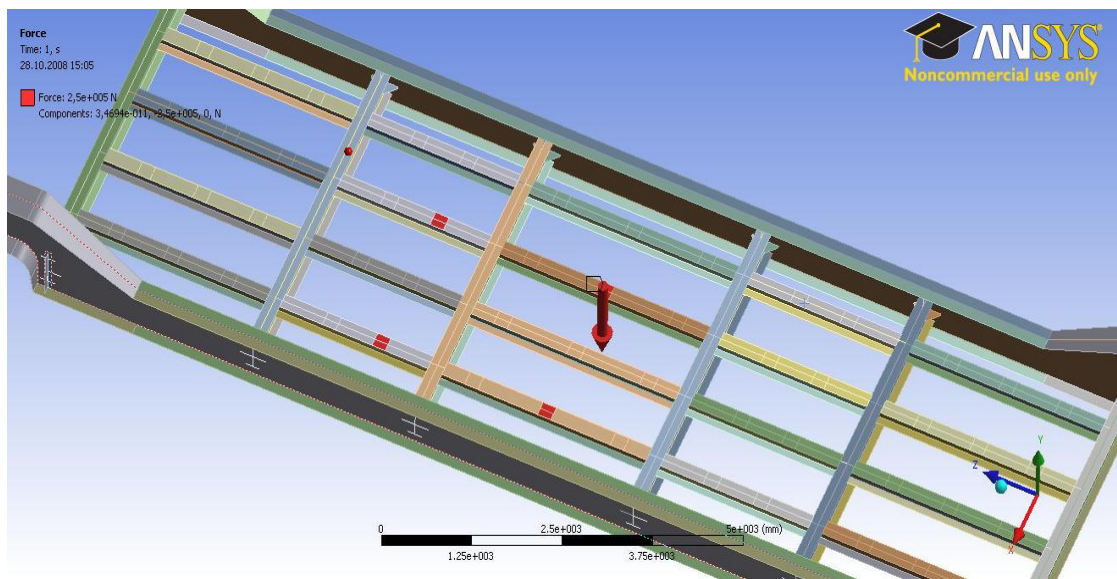
Tämän työn tarkoitus oli selvittää, että voiko sillan ylittää turvallisesti kuorma-autolla. Voimien määrittämisessä lähdettiin hakemaan eniten rasittavaa tilannetta. Perusmekaniikan mukaan voidaan olettaa, että pahin tilanne syntyy silloin kun voima kohdistuu rakenteen keskelle. Tässä tapauksessa tämä tarkoittaa hetkeä, jossa kuorma-auton teli on sillan keskellä ylitettäessä siltaa. Perusteet voimien mallintamiseen, paikoittamiseen, sekä tukien asettamiseen saatiin Tiehallinnon julkaisusta Siltojen

Kuormat (TIEL 2102072-99). Julkaisussa esitetään tiesiltojen suunnittelussa käytettävät kuormat ja niiden käyttöä koskevat varmuusperusteet. Ohjeeseen sisältyvät kuormat, ajoneuvoliikenteen ja kevyen liikenteen siltojen liikennekuormat, siltoihin kohdistuvat luonnonkuormat sekä kuormien yhdistelyä koskevat säännökset. Tiehallinnon julkaista / TIEL 2102072-99s. 13, kaavio 1/ saatiin painepinnan ala, pinta-ala jolle kuorma-auton massan aiheuttama voima kohdistuu. Käytännössä tämä tarkoittaa telin renkaan alla olevaa aluetta. Näitä aloja on telissä neljä, kuten kuvassa 13 on esitetty.

Normaalista ajoneuvoliikenteestä siltaan aiheutuvia erilaisia kuormituksia mallinnetaan ohjeessa kolmella liikennekuormakaaviolla 1, 2 ja 3. Tässä työssä sovellettiin liikennekuormakaavion 1 mukaista tilannetta, joka on esitetty kuviossa 12. Koska kyseessä on yksikaistainen silta, sekä siltaa ei ylitetä erityisen raskaalla ajoneuvolla. Erityisen raskaiden ajoneuvojen vaikutuksia kuvataan ohjeessa raskaalla erikoiskuormakaaviolla. Liikennekuormakaavioiden ja raskaan erikoiskuormakaavion oletetaan yhdessä kattavan kaikki ne liikennekuormitustilanteet, joihin silta voi normaalikäytössä joutua suunnitellun käyttöikänsä aikana. Tiehallinnon ohjeen mukaan kuormakaavioiden soveltamista varten sillan hyödyllinen leveys on jaettava kolmen metrin leveisiin kuormituskaistoihin ja mahdolliseen niiden ulkopuoliseen osaan, joka jätetään aina kuormittamatta. Kaistat sijoitetaan sillan poikkisuunnassa määrääviin kohtiin mitoitusilanteen mukaan. Kuormakaavio sisältää kolme akselikuormaa ja nauhakuorman. Akselikuormilla voidaan kuormittaa enintään kaksi kuormakaistaa samalla ajoradalla. Akselikuormien ominaisarvo  $F=210$  kN kuormaluokassa I ja akselit kulkevat kuormakaistan keskilinjaa pitkin. Akselikuormien pyörien välinen keskiöetäisyys on 2 metriä, ja yhden pyörän kosketuspinta-ala on suorakaide  $0,2 \times 0,6$  m<sup>2</sup>. Akselikuormat sijoitetaan sillan pituussuunnassa määrääviin asemiin huomioon ottaen akselikuormien minimietäisyydet.



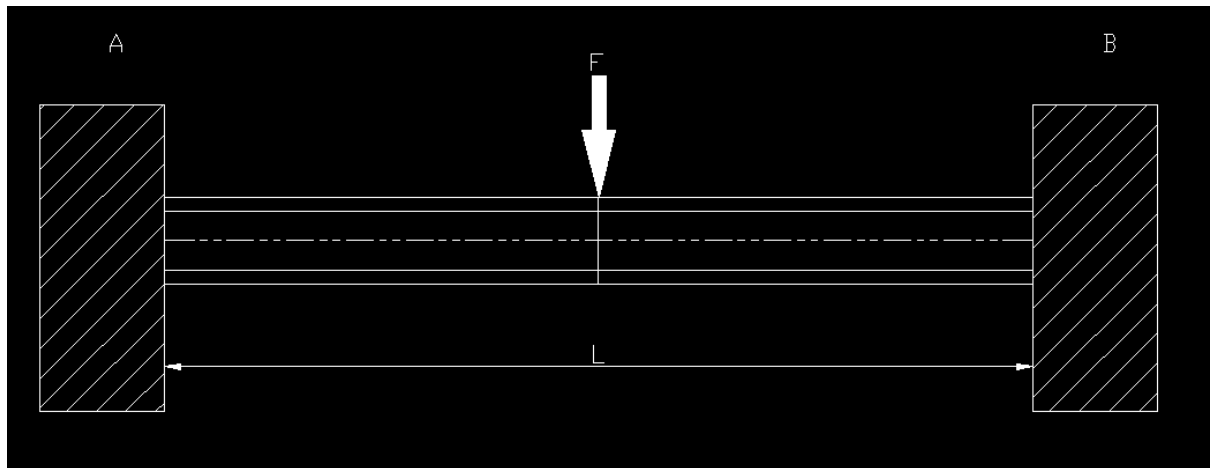
KUVIO 12. Kuormakaavio



Kuva 13. Voimat mallinnettuina. Ansys Work Bench

#### 4.9 Yksittäisen palkin laskenta

Tietokoneella tehtyjen laskujen lisäksi tarkasteltiin yksittäistä pituussuunnassa olevaa palkkia. Sovelletaan kuvion 14 mukaista tilannetta, jossa palkki on tuettu kiinteästi molemmista päistä.



KUVIO 14. Voiman vaikutus yksittäiseen palkkiin

Lähtöarvot:

$$L=3000 \text{ mm}$$

$F= 250 \text{ kN}/4=62,5 \text{ kN}$ , koska tarkastellaan yhden renkaan vaikutusta yhteen palkkiin.

Profiili: IPE120, S355 N/mm<sup>2</sup>

$$\text{Neliömomentti } I= 3,18 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\text{Taivutusvastus, } W= 53,0 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$\text{Kimmokerroin } E= 189000 \text{ N/mm}^2$$

Tukireaktiot ovat symmetrian vuoksi

$$A=B=F/2 \tag{1}$$

Sijoittamalla arvot kaavaan 1 saadaan tukireaktioille arvo 31,25 kN

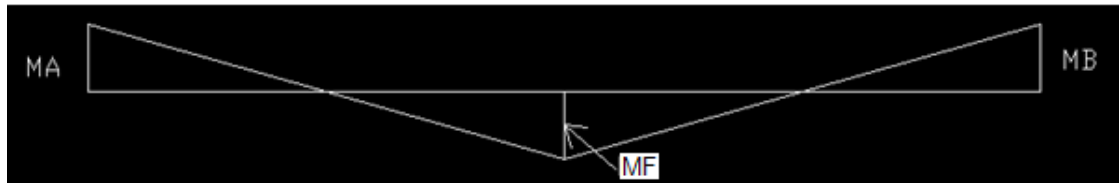
Palkin päätyihin kohdistuva momentti saadaan kaavasta 2. Sijoituksen jälkeen tulokset saadaan -93,75 kNm.

$$M_A=M_B= -FL/8 \tag{2}$$

Vastaavasti palkin keskelle kohdistuva taivutusmomentti 93,75 kNm saadaan kaavasta 3.

$$M_F=FL/8 \tag{3}$$

Laskettujen momenttien avulla pystytään piirtämään kuvion 15 mukainen taivutusmomenttikuvio.



KUVIO 15. Taivutusmomenttikuvio

Tiehallinnon standardin mukaan suurin sallittu taipuma ajoneuvoasetuksen mukaiselle liikennekuormalle terässilloissa on määritetty kaavan 4 mukaisesti.

$$a=L/500 \quad (4)$$

Suurempien taipumien salliminen edellyttää, että ne eivät haittaa sillan toimintaa eivätkä käyttäjien turvallisuutta. Erikoiskuljetuksille ei vaadita taipumatarkastelua. Kaavan 4 mukaan suurin sallittu taipuma on tässä tapauksessa 6 mm.

Lasketaan palkin taipuma keskellä palkkia. Merkitään  $a=v$  ja lasketaan taipuma  $v(x)$ , kun  $x=L/2$

$$v(x)=\frac{FL^3}{48EI}\left[3\left(\frac{X}{L}\right)^2-4\left(\frac{X}{L}\right)^3\right] \quad (5)$$

Kaavaan 5 sijoittamalla saadaan taipuman arvoksi 5,71 mm, mikä on siis piempi kuin suurin sallittu arvo.

Tarkastetaan vielä taivutusjännitys  $\sigma$ /(N/mm<sup>2</sup>). Kuumavalssatun IPE120-profiilin suurin sallittu arvo on 244 N/mm<sup>2</sup>.

$$\sigma=\frac{M(x)}{W} \quad (6)$$

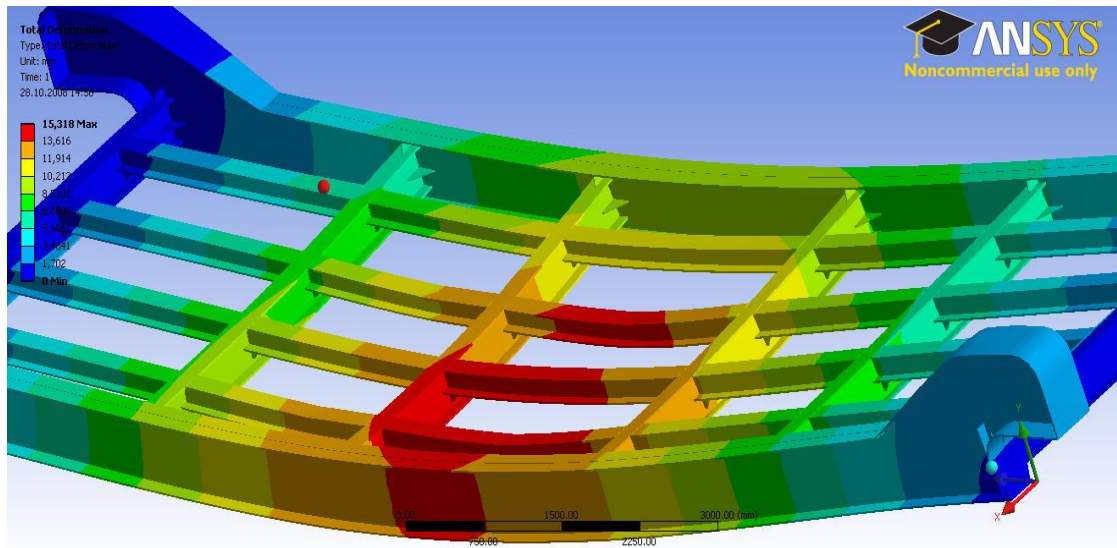
Sijoittamalla arvot kaavaan 6 saadaan taivutusmomentin aiheuttama jännitys, joka on 177 N/mm<sup>2</sup>.



## 5. TULOKSET

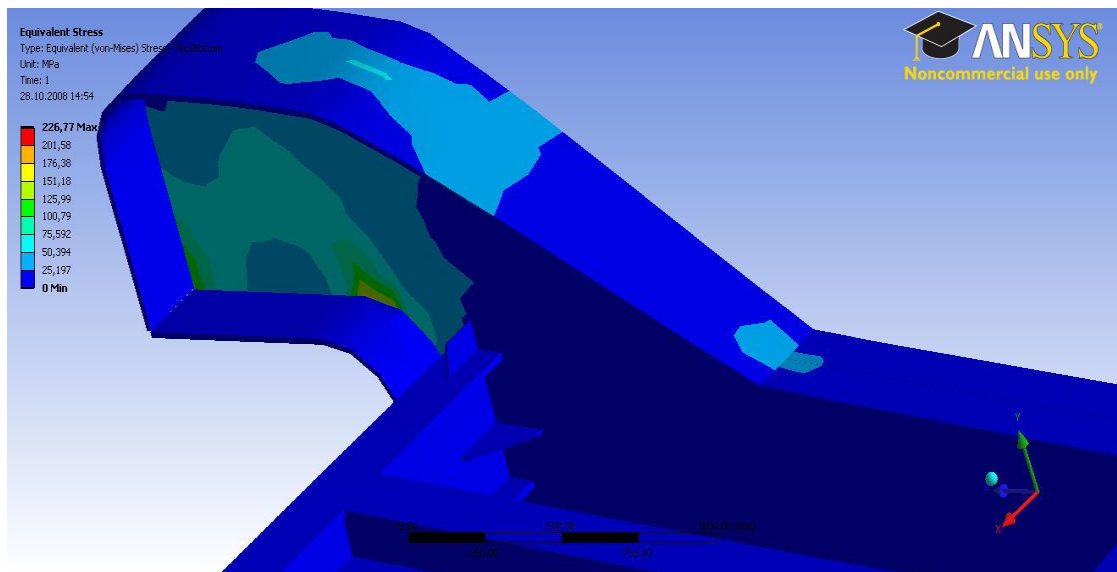
Lujuuslaslennassa käsitellään aina idealisoitua mekaniikan mallia, joka pyritään esittämään mahdollisimman hyvin todellisuutta vastaavasti. Yleensä joudutaan tekemään huomattava määrä yksinkertaistuksia koskien tutkittavan rakenteen geometriaa, materiaalin ominaisuuksia sekä kuormitustilanteita. Näiden lisäksi on olemassa epävarmuustekijöitä joiden huomioon ottaminen on käytännössä mahdotonta. Yksi tällainen tekijä on materiaalin ominaisuuksien vaihtelut. Ilmoitetut lujuusarvot ovat vain keskimääräisesti paikkaansa pitäviä ja hajontaa voi esiintyä eri valmistuserien tai osien välillä. Myös kuormituksiin liittyviä epävarmuuksia on vaikea arvioida kaikissa käytännön tilanteissa. Korroosio omalta osaltaan heikentää rakenteita, sekä syövyttävillä aineilla on myös vaikutusta lujuuteen ja rakenteiden elinkaareen. Osien ja rakenteiden kuluminen ja siten sen vaikutus toimintaan ja kuormitukseen. Myös valmistuksessa tapahtuvat virheet voivat vaikuttaa lujuusominaisuuksiin, esimerkiksi hitsauksen laadun vaihtelu. (Outinen 2004, sivu 14)

FEM-laskennassa tulosten tulkintaan on suhtauduttava kriittisesti, koska ohjelmistoilla voidaan saada mitä tahansa tuloksia. Mikäli tukia ja kuormia ei ole asetettu todenmukaisesti, voi tulokset olla kaukana totuudesta. Toisaalta tulokset ovat hyvin havainnollisia, kuten esimerkiksi kuvasta 15 nähdään. Tuloksina saatavista kuvista nähdään maksimi- ja minimiarvot, jotka on havainnollistettu värikoodein, yleensä skaala on sinisestä punaiseen. Puvainen viittaa kriittisimpään arvoon ja sininen pieneen kuormitukseen. Lisäksi saatuja tuloksia voidaan korostaa, kuten kuvassa 13. 15 mm:n taipuma näyttää todellisuutta suuremmalta. Tämä auttaa havainnoimaan kriittisimmät alueet tilanteissa, joissa tulokset ovat pieniä tai muuten vaikea havaita kuvasta, missä kriittisin alue on.



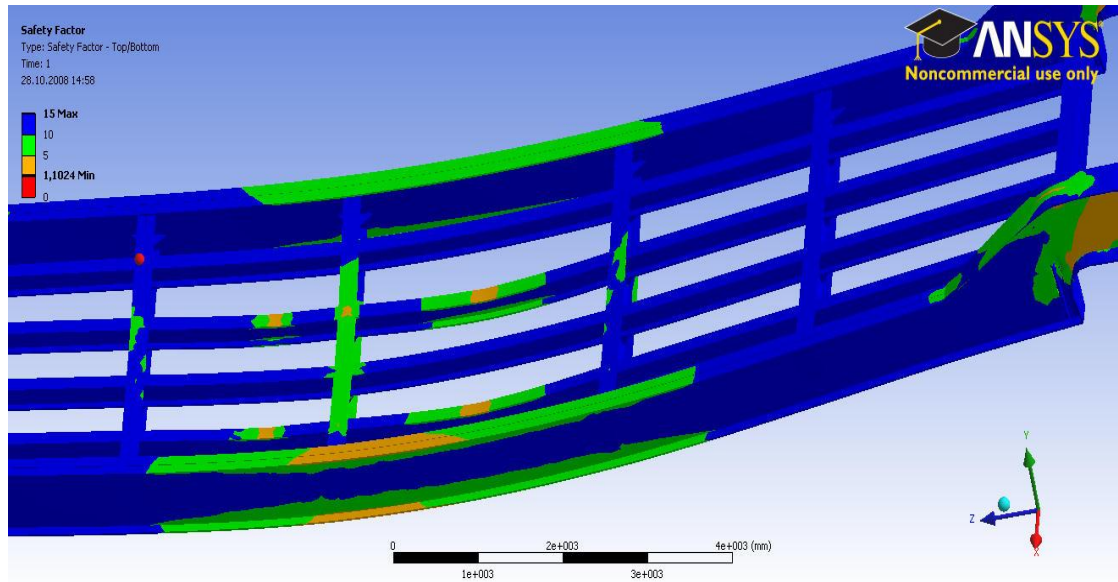
KUVA 16. Muodonmuutokset

Suurin sallittu jännitys S355-teräkselle on  $244 \text{ Nm/mm}^2$  (SFS 3200). Tässä tapauksessa tulokseksi saatiin  $226,77 \text{ Nm/mm}^2$  ja sekin esiintyi paikallisena jännityksenä rakenteen kulmassa lähellä tukipisteitä.



KUVA 17. Von Mises- jännitys

Laskentaa liittyvien likimääräisyyksien ja epävarmuustekijöiden huomioon ottamiseen on otettu käyttöön varmuusluku, joka määriteään tavallisesti kriittisen ja sallitun suureen osamääränä. Varmuusluku voidaan myös määrittää FEM:n avulla. Tässä sillassa varmuusluku myötöön nähden oli vähintään 5, se tavallisesti määritetään luokkaan 1,3 tai harvinaisessa tapauksessa 1,6.



KUVA 18. Varmuusluku

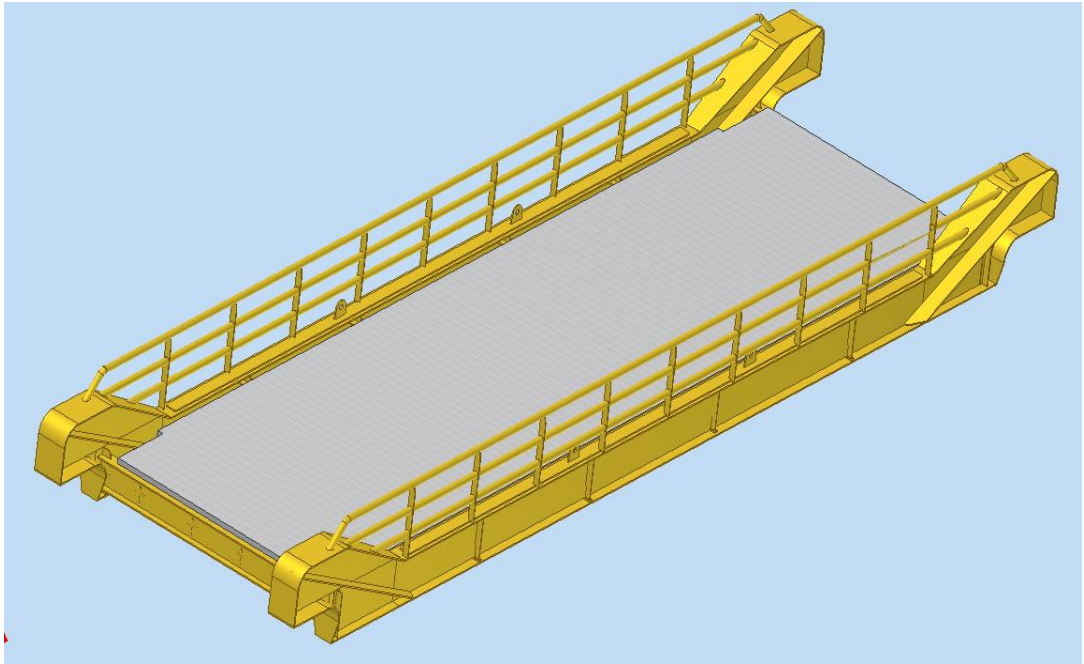
Kaikissa edellä mainituissa tuloksissa on otettava huomioon, että mallia oli yksinkertaistettu ja kevennetty analyysijä varten. Erityisesti sillan päällä oleva lankutus ja sen päällä oleva trukkipelti jakaa kuormaa todellisuudessa tasaisemmalle alueelle, kuin kuorimalliin mallinnetut voimat. Voidaankin siis todeta, että silta on reilusti ylimitoitettu, kuten jo työn alkuvaiheessa arvioitiin.

## 6. KEHITYSMAHDOLLISUUDET

Silta on todettu kestäväksi ja siinä on todella paljon materiaalia eikä sillan rakenteiden vahvistaminen ole tarpeen. Ei ole myöskään järkevää poistaa ylimääräistä materiaalia. Jatkotoimet kannattaa keskittää sillan elinkaaren pidentämiseen.

Ihan ensimmäiseksi kannattaisi poistaa vanha lankutus sillan kannelta, sillä osa puista on jo lahonnut ja katkeillut. Lankkujen tilalle olisi mahdollista vaihtaa ajotasoritilä. Ritilässä etuna olisi helppohoitoisuus, sillä vesi ja lumi valuvat siitä läpi. Ritiälä on valmistettu kuumasinkitystä, ruostumattomasta tai haponkestävästä teräksestä, joten ritiälä olisi todella pitkäaikainen ratkaisu. Ritiälä on vaihtoehtona kuitenkin todella kallis, sillä kesällä 2008 Finnritiälältä pyydetyn tarjouksen perusteella ajotasoritilälle olisi kertynyt hintaa yli 24 000 euroa. Ritiälä olisi toimitettu sopivan kokoisina paloina reunateräksien kanssa. Hinta kohosi niin korkeaksi, koska ritiälän profiili olisi ollut liian korkea ja ajotasoritilä olisi luokiteltu erikoisritiäläksi. Ritiälä ei tule siis kysymykseen jo pelkästään korkean hintansa vuoksi. Jos olisi kuitenkin päädytty ritiäläratkaisuun, olisi sillan rakenteiden väliin täytynyt hitsata vielä lisää palkkeja, sillä palkkien jännevälit olisivat jääneet huomattavasti liian pitkiksi. Vaadittu jänneväli olisi täytynyt muokata noin yhden metrin mittaiseksi.

Yksinkertaisin ja varmasti edullisin vaihtoehto ritiälälle olisi vaihtaa aikansaelänyt lankutus uuteen. Esimerkiksi painekyllästetty puu olisi suhteellisen pitkäikäinen ja huomattavasti ajotasoritilää edullisempi vaihtoehto. Ennen uuden lankutuksen vaihtoa kannattaa sillassa olevat ruosteen alut puhdistaa ja itse asiassa koko silta kannattaisi hiekkapuhaltaa kauttaaltaan ja maalata ulkoilmaan sopivalla maalilla. Näin saataisiin ruostuminen pysäytettyä ja silta olisi käyttökelpoinen vielä vuosiksi eteenpäin.



KUVA 19. Silta maalattuna ja ritilällä varustettuna

## 7. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää, että voiko sen ylittää turvallisesti kuorma-autolla. FEM-laskenta on haastavaa ja vaatii paljon perehtymistä, mutta tulokset ovat hyvin havainnollisia. Tavallisesti suunnittelu aloitetaan mallintamisella ja lujuustarkastelulla, jonka jälkeen piirustusten perusteella valmistetaan tuote. Tässä työssä edettiin päinvastaisessa järjestyksessä, mikä lisäsi työn haastavuutta. Kokonaisuudessaan työ onnistui hyvin ja tulokset vahvistivat epäilyt sillan rakenteiden vahvuudesta. Tulosten valmistuttua oli mukavaa huomata, kun ehdotetut jatkotoimenpiteet toteutettiin ja pääsi itse viemään projektin loppuun. Opinnäytetyön valmistuttua on hyvät edellytykset oppia ja kehittyä FEM-laskennassa.

## 8. LÄHTEET:

Medeso Oy, <http://www.medeso.fi/software/ansys.html>

Pennala, Erkki: *Lujuusopin perusteet*. Moniste 407, Otatieto 1992, Espoo.

Hannu Outinen; *Lujuusopin perusteet*. Pressus Oy 2004, Tampere.

Matti Kuusivaara, Reino Hevonoja, Markku Nousiainen ja Hannu Utti, Edita Oy, Helsinki 1999, Siltojen Kuormat (TIEL 2102072-99) Tielaisäädäntö.