

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Tuotekehitys

Tutkintotyö

Janne Niskanen

## **KATTILAN KANAVISTOJEN RAKENNEMITOITUSTEN KEHITTÄMINEN**

Työn ohjaaja

TkL Matti Lähteenmäki

Työn teettäjä

Kvaerner Power Oy, valvojana DI Tapio Teivas

Tampere 2006

## TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka

Tuotekehitys

Niskanen, Janne Kattilan kanavistojen rakennemitoituksen kehittäminen

Tutkintotyö 49 sivua + 18 liitesivua

Työn ohjaaja TkL Matti Lähteenmäki

Työn teettävä Kvaerner Power Oy, valvojana DI Tapio Teivas

Huhtikuu 2006

Hakusanat kanava, lujuuslaskenta, FEM

## TIIVISTELMÄ

Työn tarkoituksena oli kehittää kanavistojen lujuuslaskennan mitoitussääntöä Kvaerner Power Oy:ssä. Kehittämistyöllä haluttiin saada selville mitoitussäännön paikkansa pitävyys.

Työ päätettiin tehdä hyödyntäen FEM-ohjelmaa, josta saataisiin vertailu eri mitoitusmenetelmien välille. Saadut tulokset antaisivat suunnan sille, miten sääntöä pitäisi kehittää.

Ohjelmaksi valittiin aikaisemmasta tuttu LUSAS, sillä uuden ohjelman opettelemiseen olisi kulunut liiaksi aikaa ja siksi aikataulullisesti oli helpompaa keskittyä työn tekemiseen.

Lopputuloksena saatiin yhdeksän erimuotoista ja -kokoista FEM-mallia. Mallien tuloksia verrattiin mitoitussäännön antamiin tuloksiin.

TAMPERE POLYTECHNIC

Mechanical and Production Engineering

Product development

Niskanen, Janne                      Development of the structural dimensioning of pan ducts

Engineering Thesis                49 pages, 18 enclosure pages

Thesis Supervisor                 Matti Lähteenmäki (po. Tec. Lic.)

Commissioning Company        Kvaerner Power Oy. Supervisor: Tapio Teivas (MSc)

May 2006

Keywords                            stress calculation, Finite Element Analysis, ducts

## **ABSTRACT**

The purpose of this project was to develop a code for dimensioning pan ducts. The main theme was to use Finite Element Analysis and compare the results with the existing code of dimensioning. The result of this project was nine different models. These models gave information to the comparison between the old code and FEM.

## ALKUSANAT

Kiitän Kvaerner Power Oy:tä erinomaisesta tutkintotyön aiheesta. Se antoi mahdollisuuden käyttää opiskeltuja aihepiirejä kattavasti.

Työ opetti myös ymmärtämään suunnittelussa tapahtuvia asioita paremmin, sillä omakohtainen kokemus on erittäin vähäistä suunnittelun sisällä tapahtuvasta työstä. Samalla auttoi ymmärtämään tavoitteiden sekä aikataulutuksen tärkeyden. Ilman kunnollista aikataulua on hankala rakentaa mitään.

Tampereella 5. kesäkuuta 2006

Janne Niskanen

<b>TIIVISTELMÄ</b> .....	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>ALKUSANAT</b> .....	<b>4</b>
<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>6</b>
<b>2 AKER KVAERNER – KONSERNI</b> .....	<b>7</b>
<b>3 TUOTTEET</b> .....	<b>9</b>
3.1 HYBEX® -KATTILA .....	9
3.2 CYMIC®-KATTILA.....	10
3.3 RECOX™-KATTILA .....	12
<b>4 KANAVIDOT</b> .....	<b>13</b>
4.1 ILMAKANAVAT .....	14
4.2 SAVUKAASUKANAVAT .....	15
<b>5 TYÖN KUVAAMINEN</b> .....	<b>16</b>
<b>6 TEORIAA</b> .....	<b>19</b>
6.1 ELEMENTTIMENETELMÄN TEORIA.....	19
6.1.1 ELEMENTTIMENETELMÄN PERUSAJATUKSET .....	20
6.1.2 LASKENTAMALLIT .....	25
6.3 LUSAS.....	27
6.4 MITOITUSSÄÄNNÖN TEORIA.....	31
<b>7 TULOKSET</b> .....	<b>33</b>
7.1 GEOMETRIAN MÄÄRITTÄMINEN .....	33
7.3 MALLIN RATKAISEMINEN .....	35
7.4 TULOKSET .....	37
<b>8. TULOSTEN ANALYSOINTI</b> .....	<b>43</b>
<b>LÄHTEET</b> .....	<b>48</b>
<b>LITTEET</b> .....	<b>49</b>

## 1 JOHDANTO

Kvaerner Power Oy:n päätuotteina ovat soodakattilat kemikaalien talteenottoon ja höyryntuotantoon sellutehtailla sekä erityyppiset voimakattilat energiantuotantoon.

Kattiloissa palamisilman tuonti kattilan tulipesään tapahtuu ilmanaviston kautta. Palamisen yhteydessä syntyvät savukaasut johdetaan pois kattilasta savukaasukanavistolla. Alihankintasuunnittelun osuus kanavistojen suunnittelussa on merkittävä.

Kanavistojen rakenteellinen suunnittelu ja siihen tehdyt valinnat vaikuttavat hyvin merkittävästi kanavistojen painoihin. Jos suunnittelua ei tehdä optimaalisesti, painot kasvavat ja se vaikuttaa myös muihin rakenteisiin. Kvaerner Power Oy:n suunnitteluohjeet kanavistojen mitoitukseen ovat jo varsin vanhoja ja vaativat mitoitusperusteiden uudelleen tutkimista ja uusintaa.

Työn tavoitteena on löytää mitoitusäännöt kanavistojen optimaaliseen suunnitteluun ja niiden pohjalta voidaan uusia kanavistojen suunnitteluohjeet.

## 2 AKER KVAERNER – KONSERNI

Aker Kvaerner on maailmanlaajuisesti toimiva suunnittelu- ja rakennuspalveluiden, teknologiatuotteiden ja integroitujen ratkaisujen toimittaja. Konserni toimii useilla eri teollisuuden aloilla, muun muassa öljy- ja kaasualalla, prosessiteollisuudessa, metalliteollisuudessa, selluteollisuudessa, voimateollisuudessa, ympäristöteknologia- alalla, sekä laivanrakennusalalla. Toimipisteitä konsernilla on 30 maassa. Työntekijöitä konsernissa on noin 22 000 ja liikevaihto 3,7 miljardia euroa. /3/

### Kvaerner Power

Kvaerner Power vastaa Aker Kvaernerin maailmanlaajuisesta kattila-, haihdutin-, service- ja ympäristönsuojelulaiteosaamisesta ja on yksi maailman johtavista sooda- ja voimakattilavalmistajista. Kvaerner Power on suunnitellut ja toteuttanut maailman suurimmat soodakattilat sekä biopolttoainetta polttavat leijukattilat. /3/

Kvaerner Powerin globaalien liiketoiminnan liikevaihto on 400 miljoonaa euroa ja päätoimintamaita ovat Suomi, Ruotsi, USA ja Brasilia. Henkilöstöä on eri puolilla maailmaa 1400, joista Suomessa puolet. Yhtiön pääkonttori sijaitsee Tampereella. Myynti- ja suunnittelutoimistoja yhtiöllä on eri puolilla maailmaa (kuva 1). Valmistusyksiköjä yhtiöllä on viisi, näistä Tampere on keskittynyt uusien kattiloiden valmistamiseen ja neljä muuta, Lapua, Göteborg, Sävsjö ja Williamsport USA, ovat erikoistuneet kattiloiden modernisointeihin sekä kunnossapidossa tarvittavien osien valmistukseen. /3/



**Kuva 1** Kvaerner Power Oy:n toimipisteet eri puolilla maailmaa /3/

Kvaerner Power Oy:n päätuotteet sellu- ja paperiteollisuudelle sekä voimantuottajille ovat/3/:

- Leijukattilat useille erilaisille polttoaineille höyryn, sähkön ja kaukolämmön tuottoon
- Soodakattilat mustalipeän polttoon ja kemikaalien talteenottoon sekä höyryn- ja sähköntuotantoon sellutehtaille
- Haihduksittimet jätehiemien tiivistämiseen tehokkaamman polton mahdollistamiseksi
- Ympäristösuojelulaitteet savukaasujen puhdistamiseen ja päästöjen minimoimiseen
- Service vanhojen laitosten huoltoon ja modernisointiin.



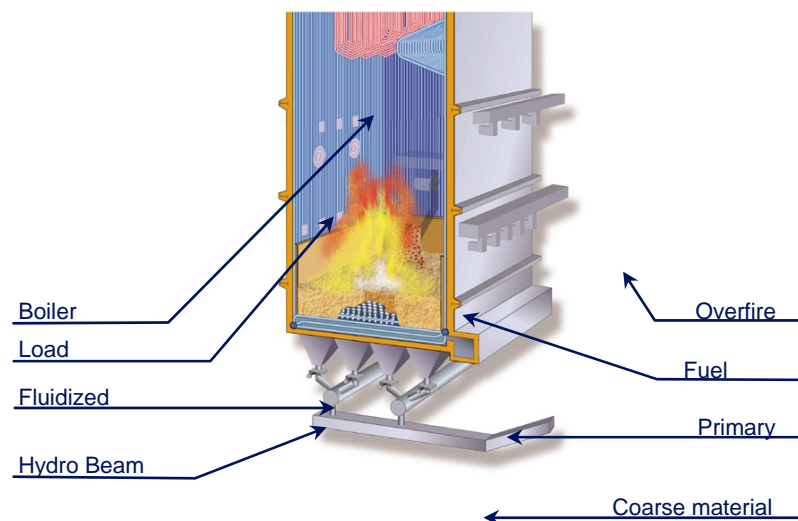
### 3 TUOTTEET

Kvaerner Power Oy:n tuotekategoriaan kuuluvat seuraavissa luvuissa esiteltävät laitteet sekä palvelut. Tuotteet esitellään tässä työssä, jotta lukijalle syntyisi niistä yleiskuva, sillä kanavistot liittyvät oleellisesti näihin laitteisiin.

#### 3.1 HYBEX® -KATTILA

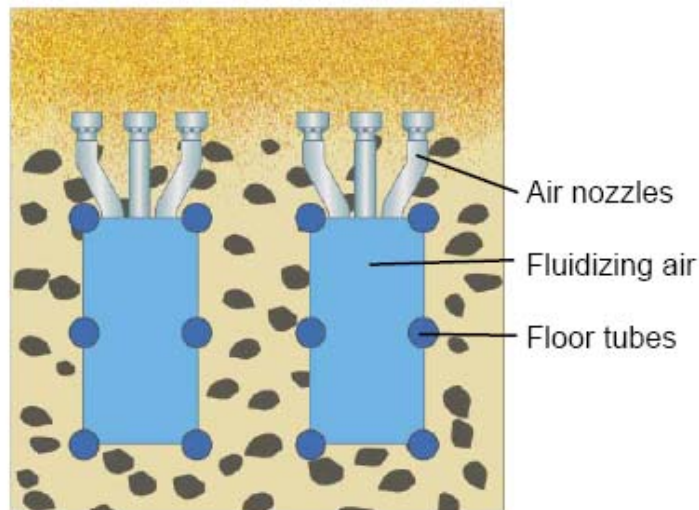
Kerrosleijukattila kuvassa 2 on lähinnä tarkoitettu matalalämpöisille ja kosteille polttoaineille. Kerrosleijutekniikalla saavutetaan seuraavia etuja/3/:

- polttoainejoustavuus
- luotettavuus
- alhainen huollon tarve
- korkea hyötysuhde
- pienet päästöt
- pieni omakäyttöteho.



**Kuva 2** Kerrosleijukattila, jossa HYBEX®-pohjaratkaisu /3/

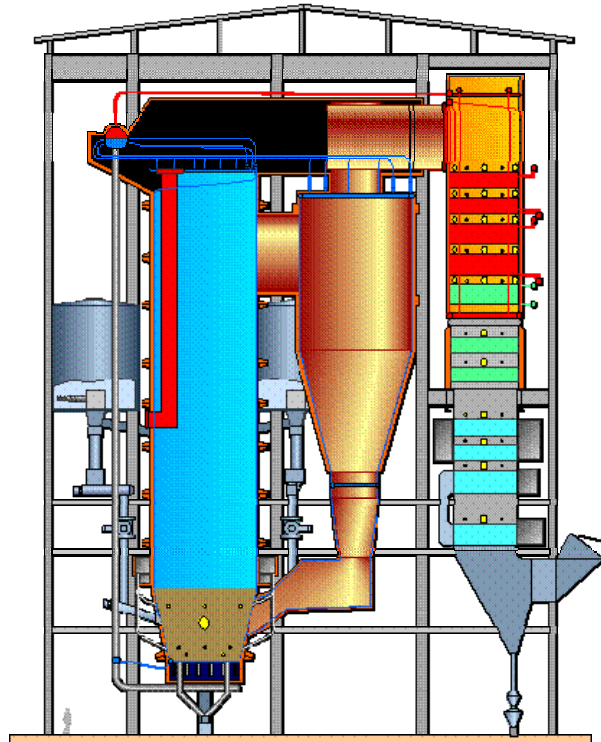
Tämän tyyppistä kerrosleijukattilaa on toimitettu noin 160 kappaletta eripuolille maailmaa. Kerrosleijukattilaan yhdistetty HYBEX® -pohjaratkaisu (kuva 3) sallii enemmän karkeita epäpuhtauksia polttoaineessa, mikä mahdollistaa edullisemmän polttoaineen käytön. Tämän pohjaratkaisun avulla saadaan poistettua paremmin karkeat epäpuhtaudet tulipesästä, sillä tulipesän pohjasta on auki 30%, kun taas perinteisissä ratkaisuisa pohja on auki vain noin 1% kokoiselta alueelta. /3/



**Kuva 3.** HYBEX® -pohjaratkaisu /3/

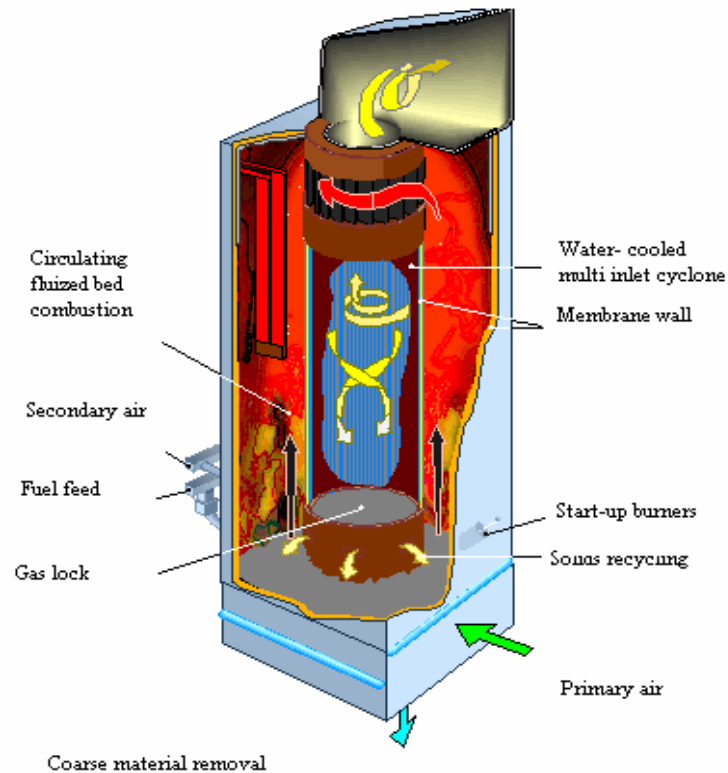
### 3.2 CYMIC®-KATTILA

Perinteinen kierto-leijukattila pystyy käyttämään polttoaineenaan korkean lämpöarvon omaavia ja tuhkapitoisia polttoaineita sekä myös erittäin kosteita polttoaineita. Kierto-leijukattilalla saavutetaan samoja etuja kuin kerrosleijukattilalla, mutta kierto-leijukattiloiden lämpöteho on noin kaksinkertainen kerrosleijukattiloihin verrattuna, ja se yltää aina 600 MWh:iin asti. /3/



**Kuva 4** CYMIC® -kiertoleijukattila /3/

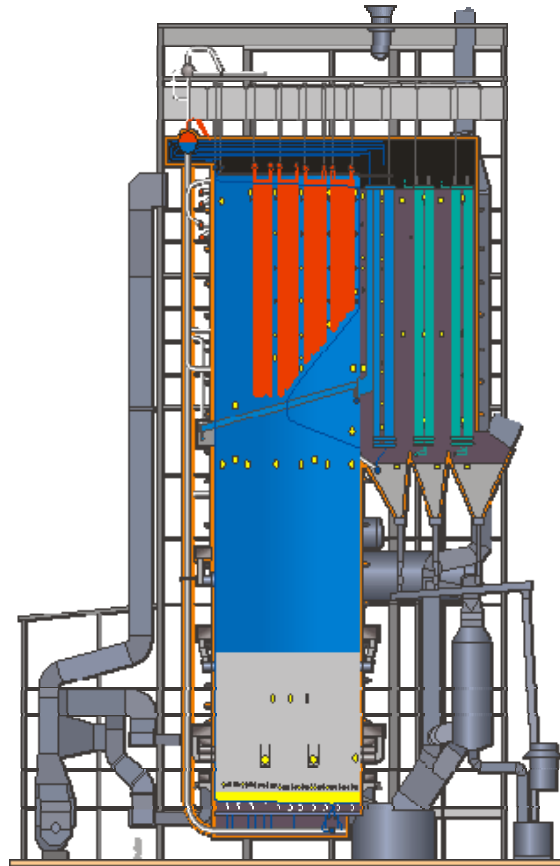
Kiertoleijukattiloiden yksi sovellutus on CYMIC®-kattila (kuva 4), joka on kehitetty erityisesti teollisuus- ja modernisointisovellutuksiin. CYMIC®-kattilassa sykloni on tulipesän sisällä (kuva 5). Tällä patentoidulla rakenteella on saavutettu pieni tilan tarve ja saatu eliminoitua lämpöliikkeitä syklonin ja tulipesän välillä. /3/



**Kuva 5** Tulipesän sisällä oleva sykloni /3/

### 3.3 RECOX<sup>TM</sup>-KATTILA

Kvaerner Power Oy:n eniten valmistettu kattila on soodakattila (kuva 6). Soodakattilassa poltetaan mustalipeää, ja sen päätehtävänä on kemikaalien talteenotto kemiallisesta reaktiosta, joka tapahtuu kattilan pohjalla. Kemiallisen reaktion tuloksena muodostuu viherlipeää sekä lämpöä. /3/



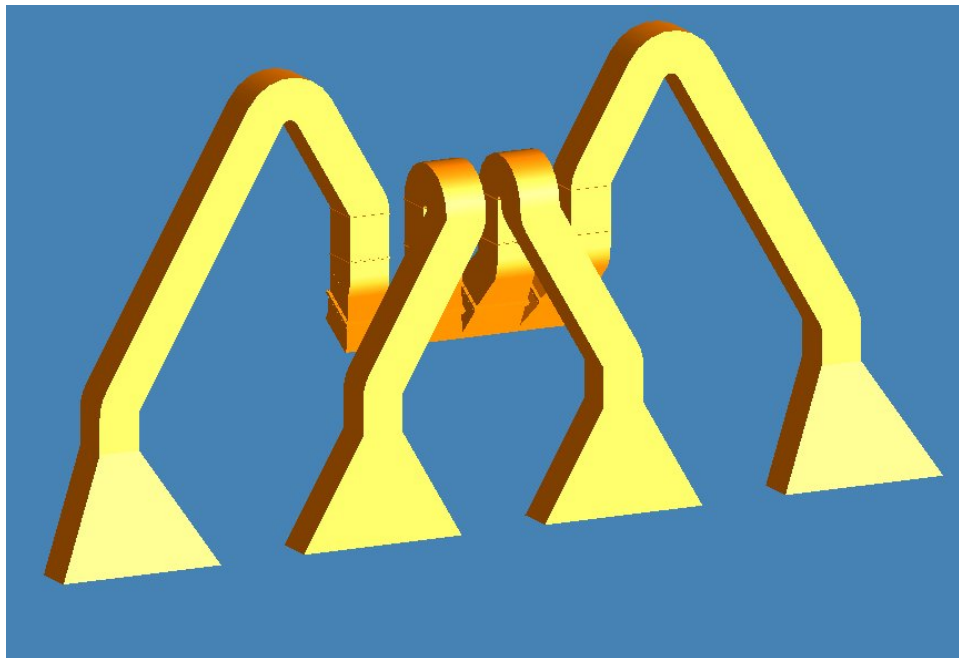
**Kuva 6** RECOX<sup>TM</sup>- Soodakattila /3/

## 4 KANAVISTOT

Ilma- ja savukaasukanavat liittyvät oleellisesti kattilatekniikkaa sekä voimalan rakennetekniikkaan. Näillä kanavilla johdetaan ilmaa sisään ja kaasuja kierrätetään sekä johdetaan pois kattilasta. Kanavien koot ovat mitoitukseltaan noin metristä jopa useampiin metreihin halkaisijoiltaan. Ilma- ja savukaasukanavat ovat yleensä suorakaiteen muotoisia poikkileikkaukseltaan, myös ympyrän muotoisia käytetään, mutta tämän malliset kanavat ovat harvinaisempia. /6/

## 4.1 ILMAKANAVAT

Ilmakanavien tehtävänä on johtaa polttoprosessissa tarvittava ilma kattilaan. Kanavat ovat rakenteeltaan samanlaisia kuin savukaasukanavat. Kokonaisuutena ne ovat hyvin monimuotoisia rakenteita, mutta geometrialtaan erittäin yksinkertaisia. Kanavan muoto on suorakaide, jolla saadaan ahtaimmissa tiloissa isompi poikkileikkauspinta-ala, kuvassa 7 on esimerkki ilmakanavasta. /6/

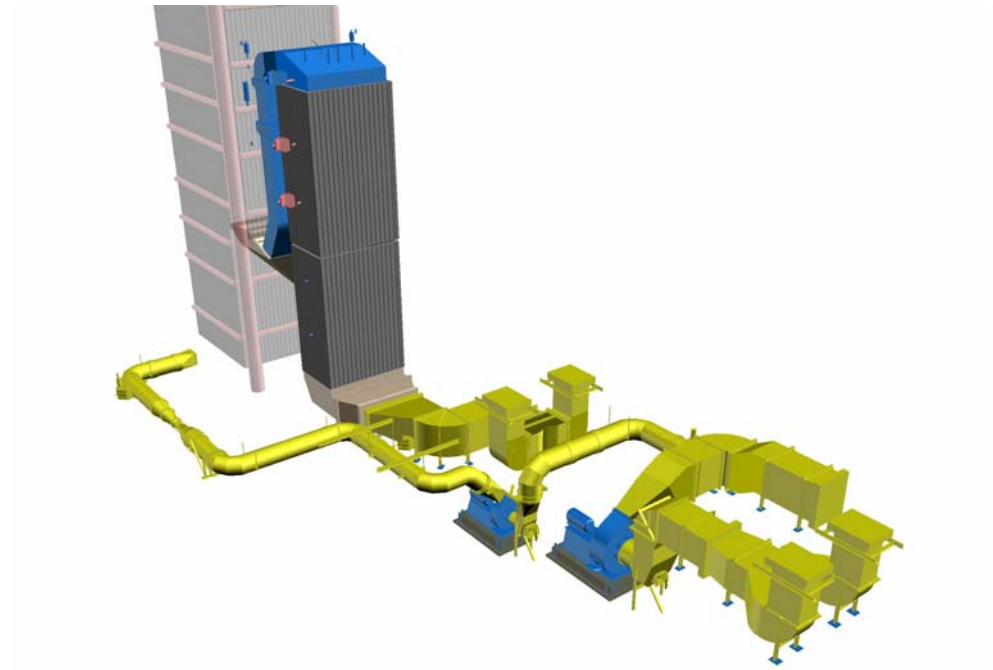


**Kuva 7.** Ilmakanava kattilaan /3/

Ilmakanavissa paineet vaihtelevat alipaineesta ylipaineisiin. Lämpötilat näissä kanavissa pysyvät alhaisina. Mitoitussääntöön vaikuttava yksityiskohta on kanavan levyn paksuus ja tämä minimiarvo määritellään sopimuksessa. /6/

## 4.2 SAVUKAASUKANAVAT

Savukaasukanavien tehtävänä polttoprosessissa on johtaa palokaasut pois tai kierrättää ne takaisin kattilaan. Ilmakanavien tapaan rakenne näissä on suorakaiteen muotoinen. Suurin ero ilmakanavaan verrattaessa on se, että savukaasussa olevat partikkelit aiheuttavat korroosiota ja siksi asettavat materiaaleille aivan toisenlaisia vaatimuksia. Kuvassa 8 on esitelty kattilan savukaasukanavistoa. /6/



**Kuva 8.** Savukaasukanava HYBEX- kattilassa /3/

Savukaasukanavassa olosuhteet ovat erilaiset kuin ilmakanavissa. Lämpötilat sekä paineet ovat korkeampia. Mitoitussääntöön vaikuttava yksityiskohta levyn paksuuden minimiarvo määritellään myös savukaasukanavissa kauppasopimuksessa. /6/

## 5 TYÖN KUVAAMINEN

Koska nykypäivänä kiristynyt kilpailutilanne vaatii jokaiselta osa-alueelta loppuun hiottua panosta kokonaisuutta luotaessa, on myös tilanne kattilalaitosten kanavien osalta sama. Työ ei pelkästään tuonut esiin lujuusmitoituksellisia ongelmia, vaikkakin tässä työssä siihen pelkästään paneudutaan. Ongelmallisia lisäaspekteja toivat virtaustekniikka ja valmistusteknilliset ratkaisut, sillä kaikki nämä kolme kulkevat käsi kädessä vaikuttaen toisiinsa.

Kattiloissa palamisilman tuonti kattilan tulipesään tapahtuu ilmakehän kautta. Palamisen yhteydessä syntyvät savukaasut johdetaan pois kattilasta savukaasukanavistolla. Alihankintasuunnittelun osuus on merkittävä kanavistojen suunnittelussa, joka korostaa mitoitusäännön toimivuutta.

Kanavistojen rakenteellinen suunnittelu ja siihen tehdyt valinnat vaikuttavat hyvin merkittävästi kanavistojen massoihin. Jos suunnittelua ei tehdä optimaalisesti, massat kasvavat ja se vaikuttaa muihin rakenteisiin. Kvaerner Power Oy:n suunnitteluohjeet kanavistojen mitoitukseen ovat jo varsin vanhoja ja vaativat mitoitusperusteiden uudelleen arviointia.

Ensimmäisessä palaverissa 24.3. tämän työn osalta vedettiin päälinjauksia, mitä työltä odotettiin ja rakennettiin aikataulua.



## PEREHTYMINEN

Kattilan kanavistojen rakennemitoitusten kehittäminen alkoi erilaisiin kattila tyyppeihin tutustumalla ja sitä kautta yrityksen valmistamiin tuotteisiin, jotka on esitelty luvussa 3. Mitoitussääntöä kehitettäessä on ymmärrettävä koko prosessi pääpiirteittäin. Kanavat ovat linkkejä tuotteiden välissä ja niiden toimivuus on ratkaisevassa asemassa koko prosessin onnistumiselle.

Perehtymisen jälkeen alkoi vanhojen projektien läpikäyminen käytössä olevan kanavistojen mitoitusohjeen mukaan. Vanhoista projekteista valittiin kymmenen kappaletta. Näistä kymmenestä projektista päädyttiin kolmeen, jotka edustivat kukin osaltaan kanavien suuruuksia ajatellen eri kokoluokkia. Nämä kokoluokat voidaan jakaa halkaisijoiltaan iso-, keski- ja pienikokoisiin kanaviin.

## SÄÄNTÖJEN TUTKIMINEN JA KEHITTÄMINEN

Mitoitussäännön tutkiminen alkoi valittujen projektien kanavien laskemisella, jolla todettiin laskennan toimivuus. Valituista projekteista piirrosten avulla taulukkolaskentaa hyödyntäen työn tekeminen edistyi nopeasti. Samalla kuvia selattaessa sekä laskettaessa pystyttiin hahmottamaan muutamia useasti esiintyviä muotoja kanavissa. Näitä kanavan muotoja olisi helppo mallintaa FEM-ohjelmassa.

Kun käsilaskuvaihe oli noin puolessa välissä, haluttiin jo saada vertailua aikaiseksi toiminnassa olevaan mitoitussääntöön. Tulokset olivat mielenkiintoisia, niistä kerrotaan enemmän luvussa 7. Tulosten analysointi. Seuraavissa palavereissa 19.4. käytiin lävitse saadut tulokset sekä koulun että työnteettäjän valvojien kanssa.

Käsilaskuvaiheen edetessä valittiin muutamia kuvia, joista mallinnettiin LUSAS-ohjelmalla tarkkoja kuvia. Ohjelman avulla pystyi helposti päättämään, oliko nykyinen suunnittelusääntö käytännöllinen. Käytössä oleva sääntö perustui jäykästi tuetun laatan teoriaan ja FEM-ohjelma hyödyntää ohuen kuoren teoriaa. Ainoana haittana elementtimenetelmän käytölle on se, että sen teoriaa käyttäen on hankalaa rakentaa yksinkertaista kaavaa, jota pystyisi soveltamaan suunnittelusääntöä rakennettaessa.

Käsilaskuvaiheen jälkeen alkoi tiettyjen muotojen mallintaminen FEM-ohjelmalla. Nämä muodot pystytään jakamaan kolmeen isompaan ryhmään, jotka jakaantuvat vielä koon sekä paineen mukaisiin lohkoihin.

Laskemisen ja FEM-ohjelman käytön jälkeen alkoi tulosten vertailu. Myös FEM-ohjelmaa käytettäessä kokeiltiin eri jäykistemahdollisuuksia. Eräillä jäykistemalleilla voitaisiin mahdollisesti automatisoida lisää hitsaustyötä. Tämä analysointi on jätetty vähemmälle ja sen johtopäätökset eivät liity tämän työn etenemiseen.

## 6 TEORIAA

Työssä käytettiin kanavien optimoinnissa FEM-laskentaohjelmaa LUSAS. FEM tulee englanninkielisistä sanoista Finite Element Method ja tarkoittaa elementtimenetelmällä suoritettavaa laskentaa. Seuraavissa luvuissa on tarkoitus syventyä elementtimenetelmän teoriaan ja siihen kuinka sitä hyödynnetään FEM-ohjelmissa.

### 6.1 ELEMENTTIMENETELMÄN TEORIA

Lujuuslaskennassa tavoitteena on ratkaista kuormituksista syntyviä rakenteellisia siirtymiä, muodonmuutoksia ja jännityksiä. Staattisessa tapauksessa tuet ovat jäykästi, ettei kappaleen liike ole mahdollista. Näiden tapauksien ratkaisemiseen tarvittavat yhtälöt tunnetaan lujuusopin teoriassa. Kuitenkin analyyttinen ratkaiseminen käytännössä onnistuu vain geometrialtaan yksinkertaisille kappaleille. Monimutkaisemmissa tapauksissa ratkaisua ei löydetä matemaattisten funktioiden avulla, vaan joudutaan tyytymään likimääräisiin ratkaisuihin. /1/

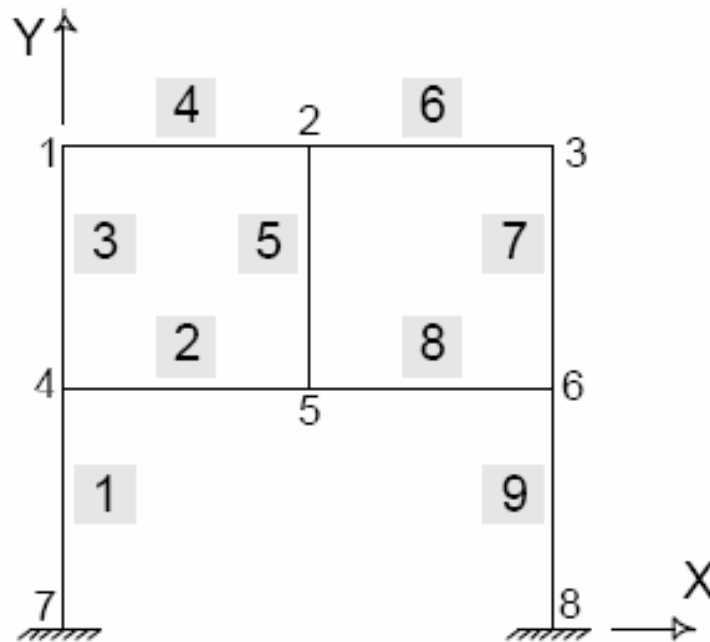
Elementtimenetelmän perusyhtälöt voidaan johtaa kaikille rakennetyypeille, liikkeelle lähdetään lujuusopin perussuureita hallitsevista osittaisdifferentiaaliyhtälöistä tai vaihtoehtoisesti näiden kanssa ekvivalenteista työ- ja energiaperiaatteista. Perusyhtälöt muodostetaan elementtien alueissa toteutettavan interpoloinnin avulla ja niistä saadaan tarkasteltavalle tehtävälle likimääräinen ratkaisu. Kolmiulotteisille solidirakenteille ja kaksiulotteisille pintarakenteille (levyt, laatat ja kuoret) interpolointiin perustuva elementtimenetelmä on ainoa mahdollinen.

Ristikko- ja kehärakenteille on mahdollista käyttää myös yksinkertaisempaa elementtimenetelmää, jolloin elementtimenetelmän perusyhtälöt muodostuvat suoraan lujuusopin sauva- ja palkkiteorioista. Koska interpolointia ei käytetä suorassa elementtimenetelmässä, saadaan lujuusopillisen teorian mukaan tarkka ratkaisu. /1/

### 6.1.1 ELEMENTTIMENETELMÄN PERUSAJATUKSET

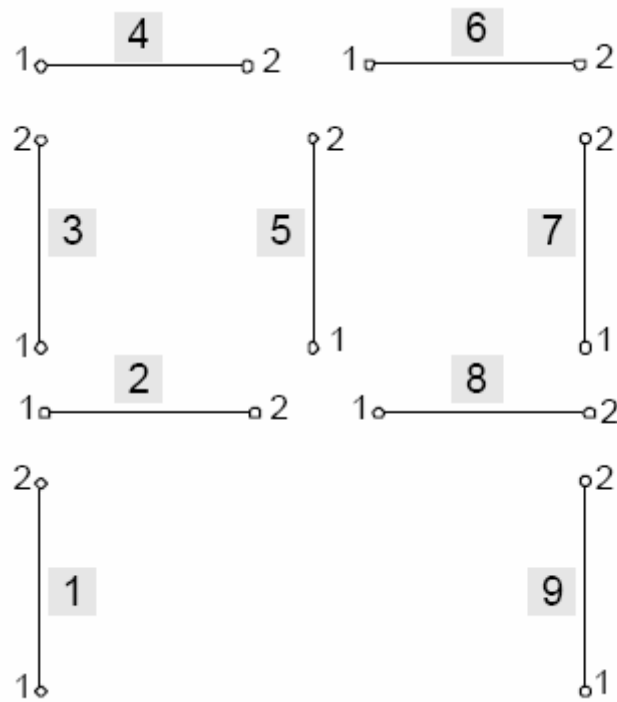
#### ELEMENTTIVERKKO

Elementtimenetelmässä geometrisesti mutkikas kappale tulee jakaa äärellisiin yksinkertaisiin osiin. Näitä jako-osia sanotaan elementeiksi. Kolmiulotteisen kappaleen elementteinä käytetään neli-, viisi- ja kuusitahokkaita, joiden reunapinnat ovat joko tasoja tai yksinkertaisia kaarevia pintoja. Tällaisia elementtejä kutsutaan tetraedri-, kiila- ja tiilikivielementeiksi. Pintarakenteiden yhteydessä käytetään neli- ja kolmisivuisia tasoelementtejä, näiden reunaviivat ovat suoria tai yksinkertaisia käyriä viivoja. Tasoelementtejä sanotaan yleensä nelikulmio- ja kolmioelementeiksi. Viivarakenteissa (kuva 9) käytetään janaelementtejä sekä yksinkertaisia kaarielementtejä. Tyypillisimmät elementit ovat sauva - ja palkkielementtejä./1/ Käytössä on lisäksi joukko harvinaisempia elementtejä tiettyihin erityistarkoituksiin. Jako-osina käytettävien elementtien koko vaihtelee paljon tarkasteltavan ongelman luonteen. /1/



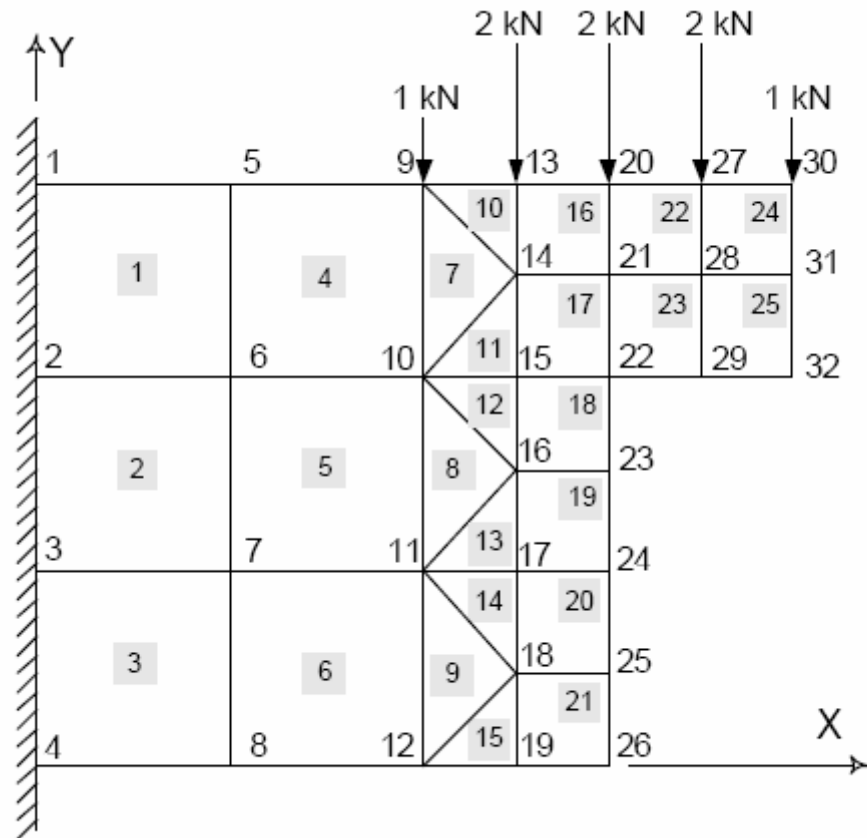
**Kuva 9** Esimerkki elementtiverkon /1/

Kappaleen elementtijaossa voidaan käyttää samanaikaisesti erityyppisiä ja erimuotoisia sekä erilaiset geometriset ja materiaaliominaisuudet sisältäviä elementtejä, mikä tekee elementtimenetelmästä erittäin joustavan yhdistettyjen rakenteiden käsittelyssä. Kappale siis kuvataan tietyllä elementtijoukolla, jota sanotaan elementtiverkoksi tai laskentamalliksi. Elementtiverkko kuvaa usein todellista kappaletta vain likimääräisesti varsinkin pinta- ja solidirakenteilla, mikä aiheuttaa saataviin tuloksiin virhettä. Tämä ns. mallinnusvirhe ei lujuuslaskennassa ole kovin merkittävä, mikäli käytetään kaarevareunaisia ja riittävän pienikokoisia elementtejä. Vierekkäiset elementit liittyvät toisiinsa vain tietyissä pisteissä, joita sanotaan elementtiverkon ja elementtien solmuksi. Elementtiverkko koostuu siis joukosta elementtejä (kuva 10), jotka liittyvät toisiinsa solmuissa. /1/



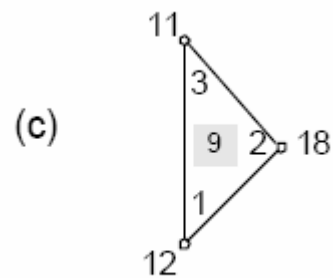
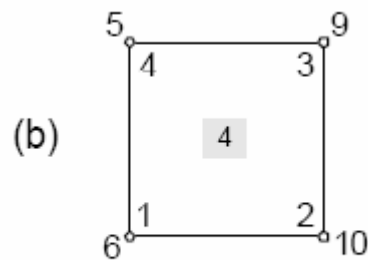
**Kuva 10** Elementtiverkon elementit /1/

Kuvassa 11 on esimerkki levyrakenteen elementtiverkosta, jossa levy on jaettu kolmio- ja nelikulmioelementteihin. Verkossa on 9 kolmioelementtiä ja 16 nelikulmioelementtiä, jotka ovat kaikki ns. lineaarisia elementtejä, jolloin niiden sivut ovat suorat ja solmut sijaitsevat vain elementin kärkipisteissä /1/



**Kuva 11** Esimerkki levyelementeistä /1/

Levyelementit ovatkin yleensä kolmi- tai nelisivuisia tasapaksuja levyn paloja. Tämän esimerkin verkossa on pääosin käytetty 4-solmuisia nelikulmioelementtejä, mutta tiheimmän elementtiverkon saamiseksi kuormitetulle alueelle on tarvittu vyöhyke 3-solmuisia kolmioelementtejä. Kuvassa 12 on tyypillinen nelikulmioelementti sekä sen lokaali- ja globaalinumerointi. Vastaavasti kuvassa 13 on esitetty tyypillinen kolmioelementti numerointineen. /1/



**Kuva 12** Nelikulmioelementti /1/

**Kuva 13** Kolmioelementti /1/

## SOLMUSUUREET

Elementtiverkon jokaiseen solmuun liittyvät tietyt, lujuuslaskennan kannalta kiinnostavat suureet, jotka vielä jakaantuvat siirtymä- ja voimasuureisiin. Siirtymäsuureita ovat translaatiosiertymät ja rotaatiosiertymät eli kiertymät. Vastaavasti voimasuureisiin kuuluvat jännityskomponentit, kannattimen poikkileikkauksen rasitukset ja pintarakenteen leikkauksen rasitustiheydet. Kulloinkin käytettävät solmusuureet riippuvat siksi suuresti siitä, minkä tyyppisiä elementtejä solmussa liittyy toisiinsa. /1/



## RATKAISU ELEMENTIN ALUEESSA

Kun solmusuuret ratkaistaan, on ratkaisu saatava ulotetuksi myös solmujen ulkopuolelle elementtien alueeseen. Tämä onnistuu viivarakenteilla tarkasti lujuusopin perusteoriaa käyttäen. Pinta- ja solidirakenteilla tarkkaa ratkaisua elementin alueessa ei ole mahdollista löytää solmusuureisiin nojautuen, vaan on tyydyttävä likimääräiseen ratkaisuun. Käytännössä tämä likiratkaisu perustuu yleensä siirtymien ennalta valittavaan interpolointiin niiden solmuarvoista lähtien. /1/

## 6.1.2 LASKENTAMALLIT

### ELEMENTTITYYPIT

FEM-ohjelmistoissa on käytävissä laaja valikoima erilaisia elementtityyppejä, jotka kukin perustuvat vastaavaan lujuusopin teoriaan. Tavallisesti FEM-ohjelmiston elementtikirjasto sisältää useita kymmeniä elementtityyppejä eivätkä yli sadan elementtityypin kirjastotkaan ole harvinaisia. Toisaalta voidaan todeta, että suurin osa FEM-laskennasta tapahtuu vakiintuneita peruselementtityyppejä käyttäen, joita lujuuslaskennassa on noin parikymmentä. Muut elementit on suunniteltu erityistilanteisiin, joita esiintyy vain tietyn sovellusalueen puitteissa. Samassa laskentamallissa voidaan käyttää yleensä lähes rajoituksetta erityyppisiä elementtejä, mikä mahdollistaa mutkikkaidenkin yhdistettyjen rakenteiden analysoinnin ja tekee näin elementtimenetelmästä erittäin joustavan laskentatyökalun. /1/

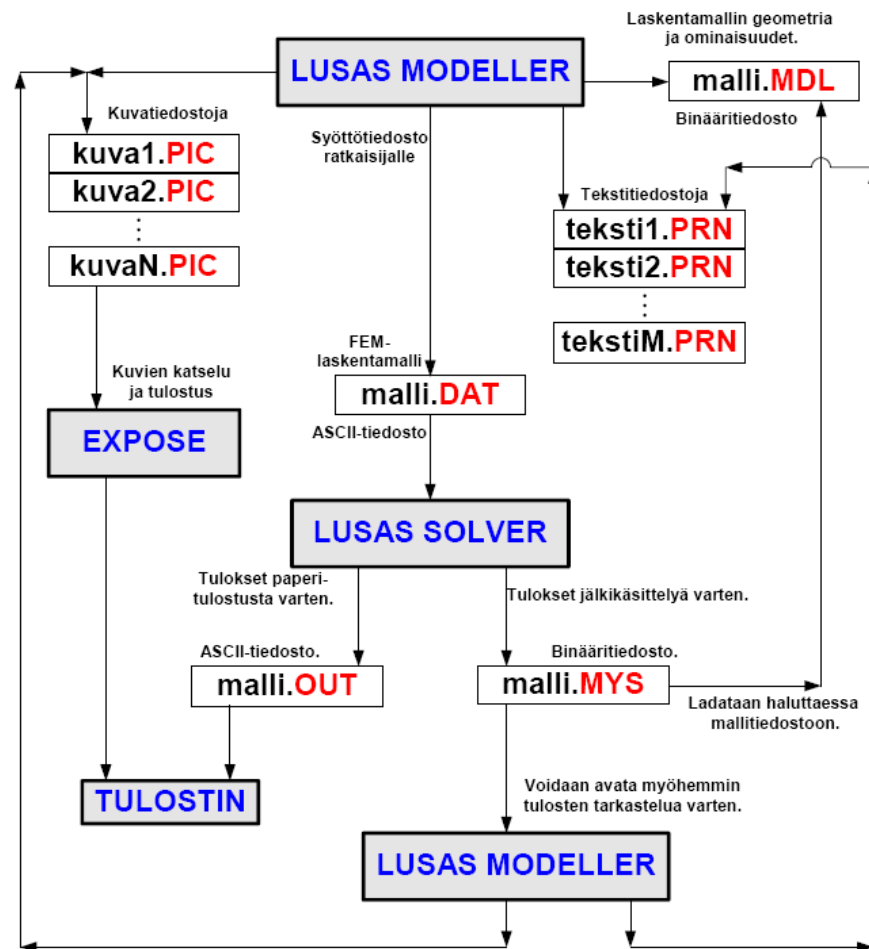
Koska lujuusopin teorian eräs jaottelu tapahtuu rakennetyypeittäin, on luonnollista ryhmitellä elementtityypit samalla tavoin, jolloin tiettyyn ryhmään kuuluvat elementtityypit soveltuvat vastaavan rakennetyypin analysointiin. Tällä perusteella saadaan seuraava elementtityyppien ryhmittely /1/:

1. Sauvaelementit soveltuvat ristikkorakenteiden analysointiin. Tavallisimmat elementit ovat tasoristikon ja avaruusristikon sauvaelementti
2. Palkkielementit soveltuvat suorien ja käyrien palkkien sekä kehärakenteiden tarkasteluun. Tavallisimmat elementit ovat tasokehän ja avaruuskehän palkkielementti..
3. 2D-solidielementit on tarkoitettu tasojännitystilän ja tasomuodonmuutostilan sekä myös pyörähdyssymmetrisen solidirakenteen käsittelyyn. Yleisimmät elementit ovat kolmisivuinen ja nelisivuinen tasoelementti ja vastaavat rengaselementit pyörähdyssymmetriselle solidille.
4. Laattaelementit ovat taivutuksen ja leikkauksen alaisten tasopintarakenteiden käsittelyyn suunniteltuja elementtejä. Ne ovat kolmi- ja nelisivuisia laatan keskitason elementtejä.
5. Kuorielementit soveltuvat kaarevien pintarakenteiden tarkasteluun. Tavallisimmin käytetään kolmi- ja nelisivuisia tasapaksuja kuoren keskipinnan elementtejä, jotka voivat olla tasomaisia tai kaksoiskaarevia pintoja. Pyörähdyssymmetrisen kuoren mallinnukseen on lisäksi käytettävissä rengaselementtejä, joissa renkaan poikkileikkaus on viiva. Tavallisimmat viivan muodot ovat suora ja paraabelin kaari.

6. 3D-solidielementtejä käytetään kolmiulotteisten kappaleiden mallinnukseen. Ne ovat neli-, viisi- ja kuusitahokkaita, joita sanotaan tetraedri-, kiila- ja tiilikivielementeiksi vastaavasti.
  
7. Erityiselementit ryhmään kuuluu suuri joukko tiettyihin erityissovelluksiin suunniteltuja elementtejä. Usein mukana olevia elementtejä ovat esimerkiksi kosketuselementit, särön kärjen elementit, liitoselementit ja puoliäärettömät solidielementit.

### 6.3 LUSAS

LUSASia käytettäessä esiintyy useita erityyppisiä tiedostoja, joista osan käyttäjä luo ja nimeää itse ja osa syntyy ohjelmiston toimesta. Esiintyvien tiedostotyyppien (kuva 14) tunteminen on perusedellytys LUSASin sujuvalle käytölle. Seuraavassa kuvassa 14 on esitetty tärkeimmät tiedostotyyppit ja niiden syntyminen. /4/



**Kuva 14** LUSASissa esiintyvät tiedostotyypit /4/

Kaikilla LUSASin yhteydessä esiintyvillä tiedostoilla on oletustarkennin, jonka LUSAS automaattisesti ottaa käyttöön, mikäli käyttäjä ei anna tarkenninta. Muitakin tarkentimia on mahdollista käyttää, mutta se ei ole tiedostojen sekaantumisen vaaran takia suositeltavaa. /4/

## Mallitiedosto

Käyttäjä luo LUSAS Modeller -ohjelmalla mallitiedostoja, joiden oletustarkennin on **MDL**. Mallitiedosto eli MDL-tiedosto sisältää kaiken laskentamallista annetun informaation. Se sisältää siis esimerkiksi mallin geometrian (pisteet, viivat, pinnat ja tilavuudet) ja ominaisuudet (materiaalit, poikkipinta ja paksuustiedot, kuormitukset, tuennat sekä elementti- ja solmutiedot). /4/

## Ratkaisijan syöttötiedosto

Laskentaan valmiista mallitiedostosta luodaan LUSAS Modeller -ohjelmassa syöttötiedosto LUSAS Solver -ratkaisijaohjelmalle, joka suorittaa tehtävän FEM-ratkaisun. Ratkaisijan syöttötiedoston oletustarkennin on **DAT** ja se on ASCII-tekstitiedosto, jota voidaan tarkastella ja muuttaa tekstieditorilla. DAT-syöttötiedoston voi myös kirjoittaa kokonaan tekstieditorilla, jolloin on tunnettava sen syntaksi. /4/

## Ratkaisijan tulostiedostot

LUSAS Solver -ratkaisijaohjelma tuottaa automaattisesti kaksi tiedostoa laskennan tulosten jälkikäsitteilyä varten. Toinen näistä on tarkentimella **MYS**-varustettu binääritiedosto, jota voidaan tarkastella vain LUSAS Modeller-ohjelmassa. Ratkaisun päätyttyä MYS-tiedostossa olevat tulokset ladataan tarvittaessa (on oletuksena) vastaavaan MDL-tiedostoon tulosten välitöntä jälkikäsitteilyä varten. /4/

## Kuvatiedostot

Kuvatiedostoja käytetään tallentamaan grafiikkaa neutraalissa muodossa. Niitä voidaan avata, tulostaa ja hieman muokatakin LUSASin mukana tulevalla EXPOSE-ohjelmalla. /4/

## Tekstitiedostot

Kun LUSAS Modellerissa tulostetaan tekstitietoja, oletuksena on, että tulostus tulee teksti-ikkunaan. Tulosteita saa tehtyä helpoimmin tulostusvelhon avulla. /4/

## Komentotiedostot

Komentotiedostot sisältävät LUSAS Modellerin käskysarjoja ja niitä voidaan suorittaa Modellerissa, jolloin saadaan aikaan käskyjä vastaavat mallinnustoiminnot. /4/

## Istuntotiedosto

Aina kun LUSAS Modeller käynnistetään, avataan ja alustetaan mahdollisesti työhakemistossa jo oleva LUSASM.SES-niminen istuntotiedosto, johon tallennetaan kaikki Modellerissa annetut ja onnistuneesti suoritettut käskyt. /4/

## Interface-tiedostot

LUSAS Modelleriin voidaan tuoda muista ohjelmista tietyissä tallennusmuodoissa olevia grafiikkatiedostoja, joka voi toisinaan jouduttaa esimerkiksi mallin geometrian luomista huomattavasti. Samoin on mahdollista viedä joihinkin muihin ohjelmiin grafiikkatiedostoja. /4/

Mahdollisia tuotavan tiedoston tallennusmuotoja ovat mm. DXF, DEF (Patran) ja IGS (Iges) ja vietävän tiedoston tallennusmuotoja mm. DXF, DEF (Patran) ja UNV (Ideas). /4/

## 6.4 Mitoitussäännön teoria

Edellä esiteltiin FEM-ohjelman sisällä oleva teoria. Nykyinen mitoitussääntö tukeutuu jäykästi tuettuun laatan ja palkin teorioihin. Näistä teorioista seuraavat suurimpien jännitysten lausekkeet löytyvät suoraan monista taulukkokirjoista.

Laatan ja palkin jännityksistä lasketaan vielä vertailujännitys, jota verrataan FEMillä saatuihin tuloksiin.

### Jäykästi tuettu levy

Jännityksen  $\sigma$  laskemiseksi suorakaiteen muotoisen laatan keskelle saadaan kaava

$$\sigma = \frac{-C_1 p b^2}{t^2} \quad (1)$$

jossa  $-C_1$  on laatan geometriasta riippuva kerroin,  $p$  on laatalle tasan jakaantunut kuorma,  $b$  on laatan leveys ja  $t$  on levyn vahvuus.

## Jäykästi tuettu palkki

Jäykästi tuetun palkin päihin tulevat huippuarvot jännitykselle lasketaan kaavasta

$$\sigma = \frac{-ql^2}{12W} \quad (2)$$

lauseke koostuu kahdesta erillisestä lujuusopin peruskaavasta, jotka ovat

$$\sigma = \frac{M_t}{W} \quad (3)$$

$$M_t = \frac{-ql^2}{12} \quad (4)$$

Edellä olevissa kaavoissa  $M_t$  on taivutusmomentti palkin päässä,  $q$  tasaisesti jakaantunut kuorma,  $l$  palkin pituus ja  $W$  palkin taivutusvastus.

## Vertailujännitys

Edellä esitellyistä kaavoista lasketaan vertailujännitys  $\sigma_{vert}$  seuraavasti

$$\sigma_{vert} = \sqrt{\sigma_j^2 + \sigma_l^2 + \sigma_j \cdot \sigma_l} \quad (5)$$

jossa  $\sigma_j$  on palkin jännitys ja  $\sigma_l$  levyn jännitys.



## 7 TULOKSET

Laskeminen LUSASilla voidaan jakaa kolmeen osaan. Nämä osat ovat geometrian määrittäminen, vaikuttavien voimien määrittäminen ja viimeisenä on mallin ratkaiseminen.

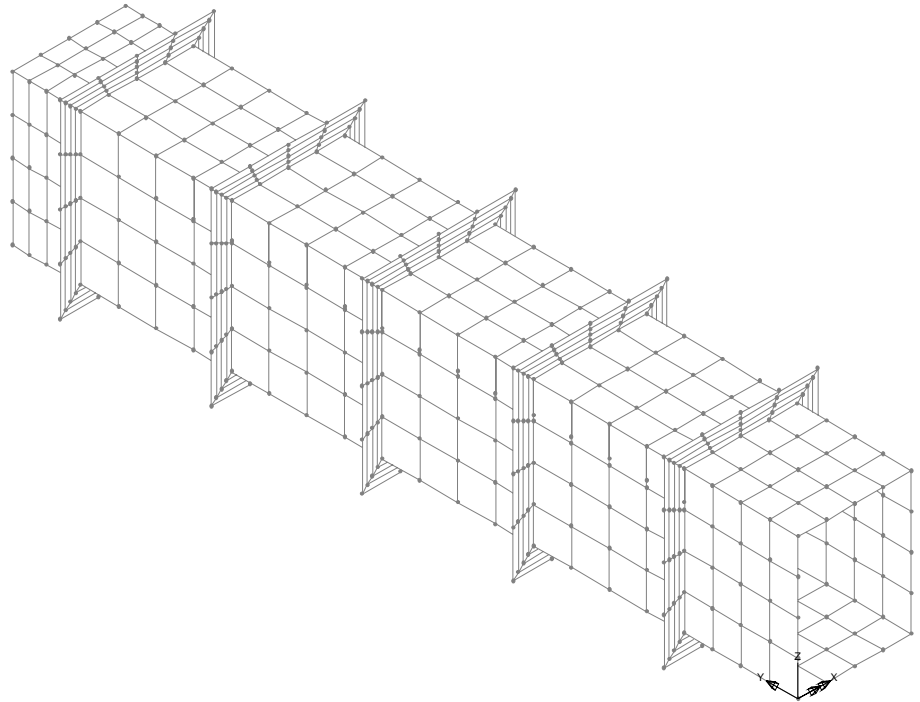
### 7.1 GEOMETRIAN MÄÄRITTÄMINEN

Kuvassa 15 on esitetty LUSASella mallinnettu kanavan osa elementtiverkkona. Ennen elementtiverkon sijoittamista malliin, on geometria pitänyt rakentaa koordinaatistoon, jonka jälkeen mallissa näkyviin pintoihin on määritelty laskennassa käytettävä elementti.

Koska mallinnetut kanavat ovat keskipintamalleja, on geometrian rakentamisen jälkeen määritelty kappaleille paksuudet. Kuvassa 15 ei näy sitä, että itse kanava sekä jäykisterakenteet ovat eri paksuisia.

Se ettei kanavaa ole kokonaan mallinnettu, johtuu yksinkertaisista syistä. Kanavan monimuotoisuus kokonaisuudessaan, ja kokonaisuus kuitenkin rakentuu yksinkertaisemmista geometrisistä osista.

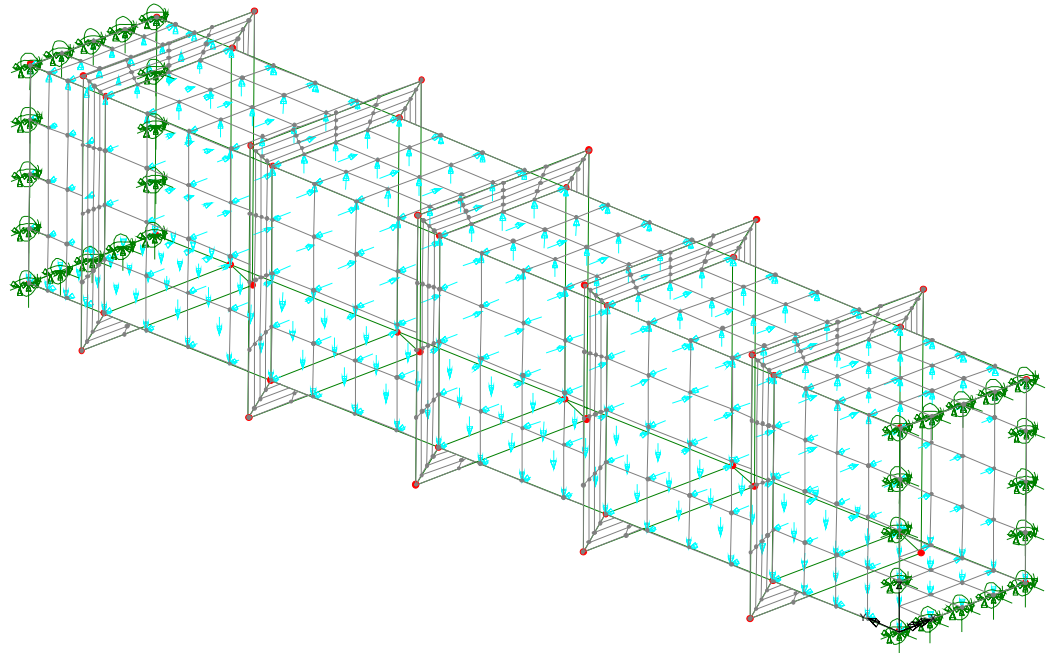
Reunaehtoina kaikilla mallinnetuilla kappaleilla on, että ne ovat päistään jäykästi tuetut ja materiaalina on LUSASin materiaalivalikosta valittu teräs.



**Kuva 15** LUSASilla mallinnettu elementtiverkko

## 7.2 VOIMIEN MÄÄRITTÄMINEN

Seuraava vaihe tulosten kannalta näkyy kuvassa 16, jossa malliin on määritelty tuet ja kuormitukset. Yksiköiden määrittäminen alussa oli ratkaisevaa kuormitusten kannalta, sillä paine oli annettava yksikköä MPa käyttäen. Laskennassa käytettiin kolmea eri painetta kanavien sisällä, ja ne ovat -3 kPa, 5 kPa ja 14 kPa.

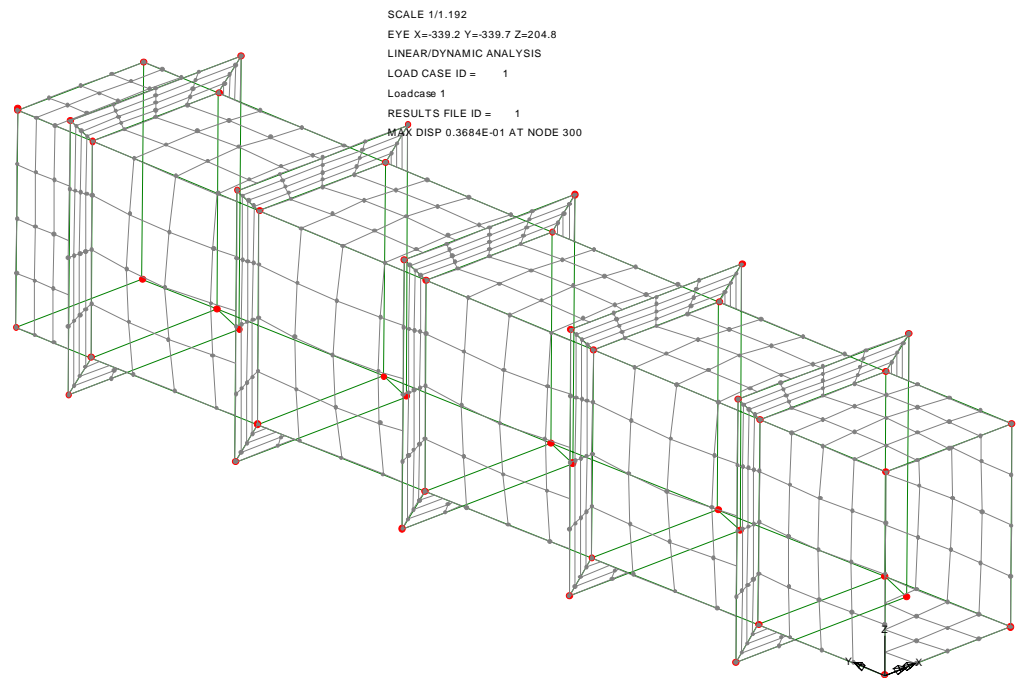


**Kuva 16** Kuormitukset liitetty malliin

### 7.3 MALLIN RATKAISEMINEN

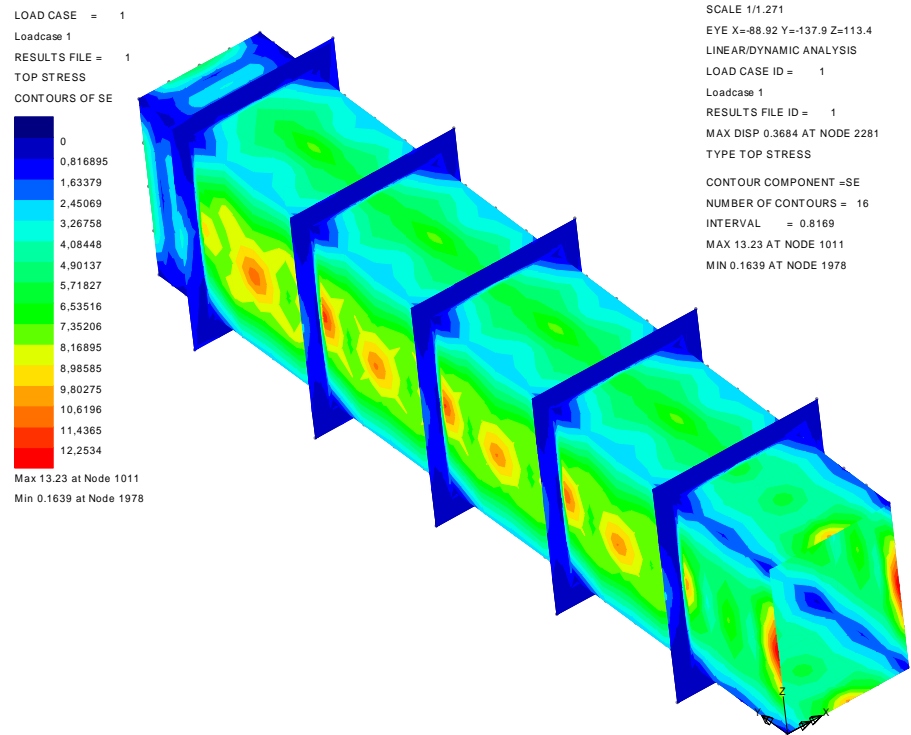
Malli on tämän jälkeen valmis laskettavaksi. Kuvassa 17 näkyy valmiiksi laskettu kappale, jonka siirtymät on kertoimella 100 liioiteltu, jotta muodonmuutokset näkyisivät kuvassa.

Lisäksi kuvassa on tietue, joka kertoo suurimman siirtymän annetuissa yksiköissä ja sen esiintymiskohtan. Suurimman siirtymän esiintymiskohta on ilmaistu solmunumeron avulla.



**Kuva 17** Ratkaistu malli LUSASissa.

Kuvassa 18 on esitetty mallista pintajännitys kuva. Jännitykset kuvassa on esitetty eri värein, jotta mallin tutkiminen helpottuisi.

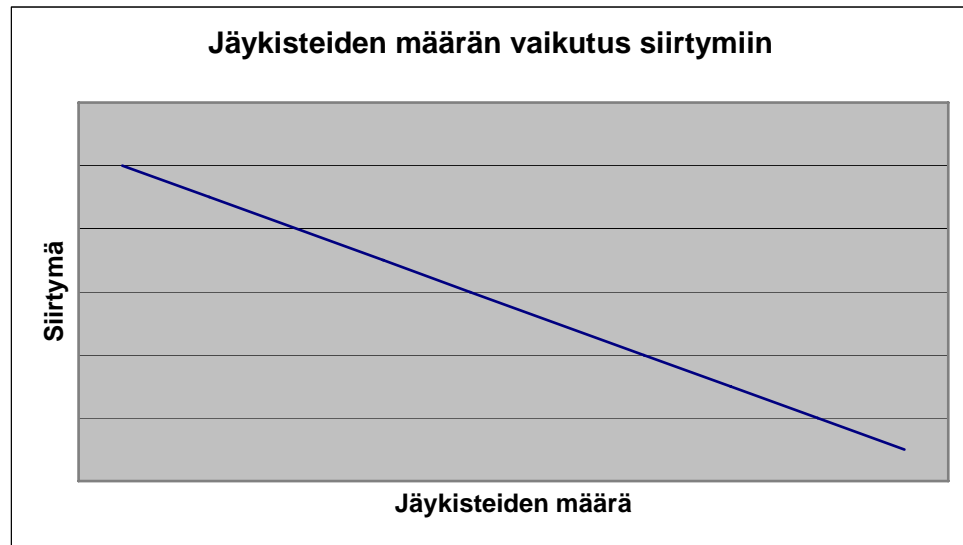


**Kuva 18** Laskentamallin pintajännitys kuva.

## 7.4 TULOKSET

Jo työn alkuvaiheessa huomattiin laskemisen olevan hankalaa kanavien monimutkaisesta rakenteesta johtuen. Mitoitusohjetta oli erityisen hankalaa käyttää kulmapaloissa ja poikkileikkaukseltaan muuttuvissa kanavissa.

Huomiota herättänyt seikka ensimmäisessä välipalaverissa oli jäykisteiden määrä suhteessa siirtymiin. FEM-ohjelmalla mallinnettujen kanavien jäykistemäärää vähennettiin ilmakehässä ja karkeasti voitiin todeta tapahtuneen kuvasta 19 huomattava yhteys jäykisteiden lukumäärän ja siirtymien välillä.



**Kuva 19** Jäykisteiden suhde siirtymään

Imu- ja ilmakehässä siirtymät olivat niin pieniä, ettei niiden tuoman lisätilavuuden katsottu haittaavan. Näissä kanavissa käytettävät laskennalliset paineet ovat pieniä.

Lasketut tulokset taulukoitiin (taulukko 1 ja 2) tulosten vertailun helpottamiseksi. Taulukoista löytyvät tiedot kertovat kanavan koon, käytetyn paineen sekä levyn vahvuuden. Mitoitussääntö taulukoihin on myös eritelty saadut jännitykset levykentälle, jäykisteelle sekä näiden vertailujännitys. Mitoitussääntö taulukoissa käytetty teoria sekä kaavat on esitelty luvussa 6.4. Loput taulukot on esitetty liitteissä.

Taulukko 1 FEMillä saadut tulokset

**Muuttuva poikkileikkauksinen kanava**

FEM

		<b>Pieni koko</b>		560 x 450		<b>Jäkiste</b> 80 x 8
		1000 x 600	3 mm	4 mm	5 mm	
-3 kPa	Jännitys/MPa	20,18	12,43	7,941	5,516	
	Siirtymä/mm	0,98	0,423	0,22	0,13	
5 kPa	Jännitys/MPa	36,97	20,72	13,23	9,194	
	Siirtymä/mm	1,638	0,706	0,368	0,217	
14 kPa	Jännitys/MPa	103,5	58,01	37,06	25,74	
	Siirtymä/mm	4,587	1,976	1,031	0,6079	

		<b>Keskikoko</b>		2000 x 1500		80 x 8
		2000 x 750	3 mm	4 mm	5 mm	
-3 kPa	Jännitys/MPa	72,18	42	28,04	20,6	
	Siirtymä/mm	4,244	1,937	1,091	0,7069	
5 kPa	Jännitys/MPa	120,3	70	46,75	30,34	
	Siirtymä/mm	7,073	3,229	1,819	1,178	
14 kPa	Jännitys/MPa	336,8	196	117,9	96,15	
	Siirtymä/mm	19,81	9,041	5,092	3,299	

		<b>Suuri koko</b>		2000 x 4000		120 x 8
		2000 x 3000	3 mm	4 mm	5 mm	
-3 kPa	Jännitys/MPa	51,2	32,1	25,49	25,18	
	Siirtymä/mm	4,82	3,035	2,325	1,955	
5 kPa	Jännitys/MPa	85,33	53,49	42,48	41,96	
	Siirtymä/mm	8,034	5,058	3,875	3,258	
14 kPa	Jännitys/MPa	238,9	149,8	119	117,5	
	Siirtymä/mm	22,49	14,8	10,85	9,121	

Jäkisteväli  
kaikissa  
sama 600mm

Taulukko 2 Mitoitussäännöllä saadut tulokset

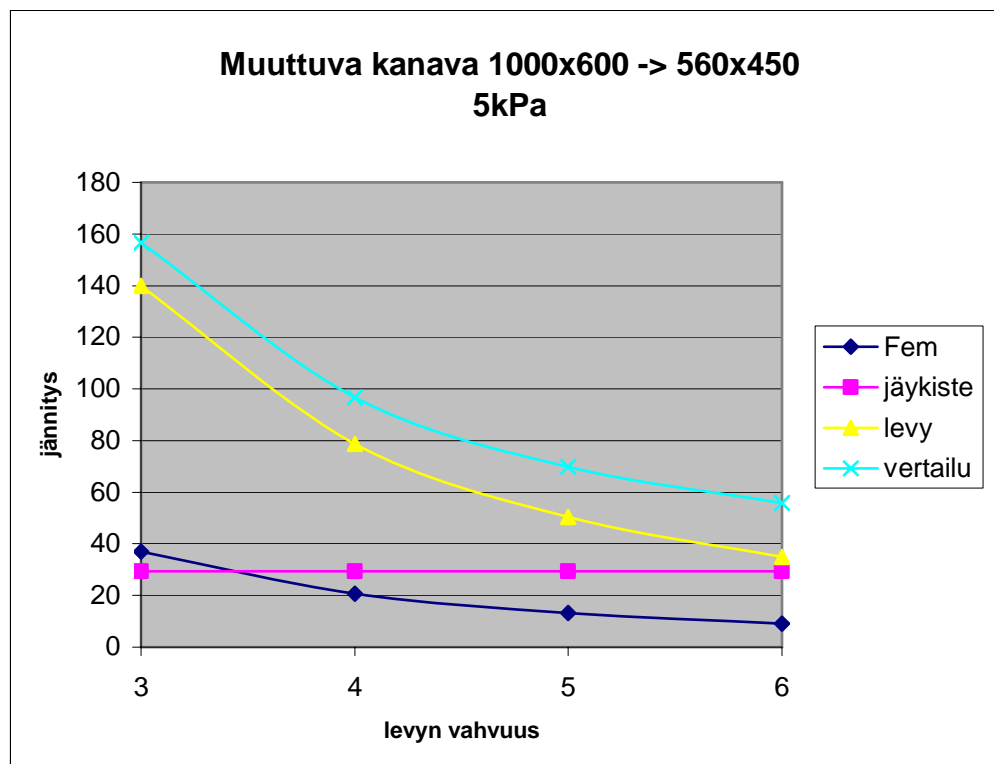
		Mitoitussäännön mukainen				80 x 8
		Pieni koko		1000 x 600	560 x 450	
			3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
-3 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	-17,58	-17,58	-17,58	-17,58
		levy.	-84,00	-47,25	-30,24	-21,00
		vert.	94,03	58,07	41,89	33,45
5 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	29,30	29,30	29,30	29,30
		levy.	140,00	78,75	50,40	35,00
		vert.	156,72	96,78	69,82	55,76
14 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	82,03	82,03	82,03	82,03
		levy.	392,00	220,50	141,12	98,00
		vert.	438,81	271,00	195,50	156,12

		Mitoitussäännön mukainen				80 x 8
		Keskikoko		2000 x 750	2000 x 1500	
			3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
-3 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	-70,32	-70,32	-70,32	-70,32
		levy.	-84,00	-47,25	-30,24	-21,00
		vert.	133,82	102,47	89,36	82,84
5 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	117,19	117,19	117,19	117,19
		levy.	140,00	78,75	50,40	35,00
		vert.	223,03	170,78	148,93	138,06
14 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	328,14	328,14	328,14	328,14
		levy.	392,00	220,50	141,12	98,00
		vert.	624,47	478,17	417,01	386,57

		Mitoitussäännön mukainen				120 x 8
		Suuri koko		2000 x 3000	2000 x 4000	
			3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
-3 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	-125,00	-125,00	125,00	-125,00
		levy.	-84,00	-47,25	-30,24	-21,00
		vert.	182,16	154,16	142,55	136,72
5 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	208,33	208,33	208,33	208,33
		levy.	140,00	78,75	50,40	35,00
		vert.	303,59	256,93	237,58	227,86
14 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	583,33	583,33	583,33	583,33
		levy.	392,00	220,50	141,12	98,00
		vert.	850,06	719,39	665,22	638,00



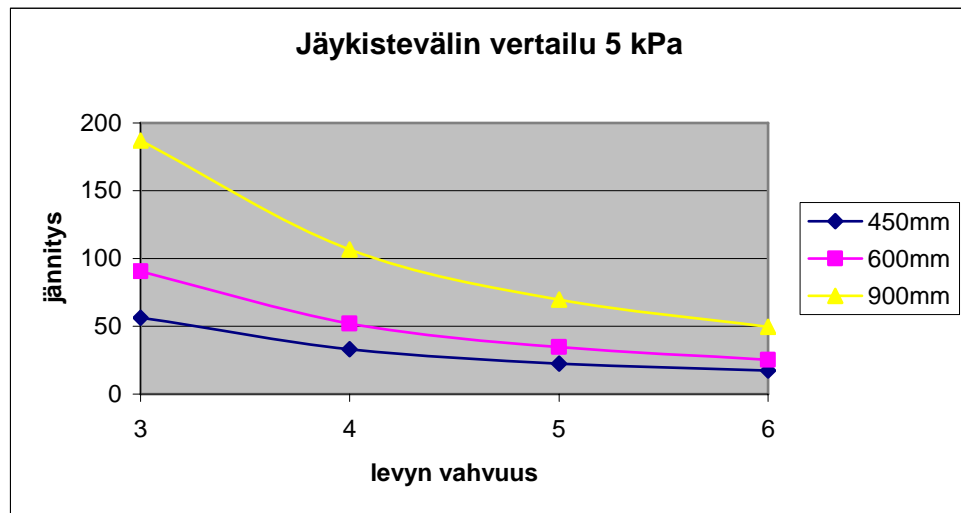
Edellä esitetystä taulukoista 1 ja 2 rakennettiin kuvaajia, joista pystytään helpommin havaitsemaan suuria eroja mitoitusäännön sekä FEM-laskennan välillä. Kuvassa 20 on vertailtu keskenään FEMillä saatuja tuloksia mitoitusäännön kanssa. Kuten kuvasta 20 huomataan, mitoitusääntö lähenee levyn paksuntuessa FEMillä saatuja tuloksia.



**Kuva 20** Saatujen tulosten vertailukuvaaja.

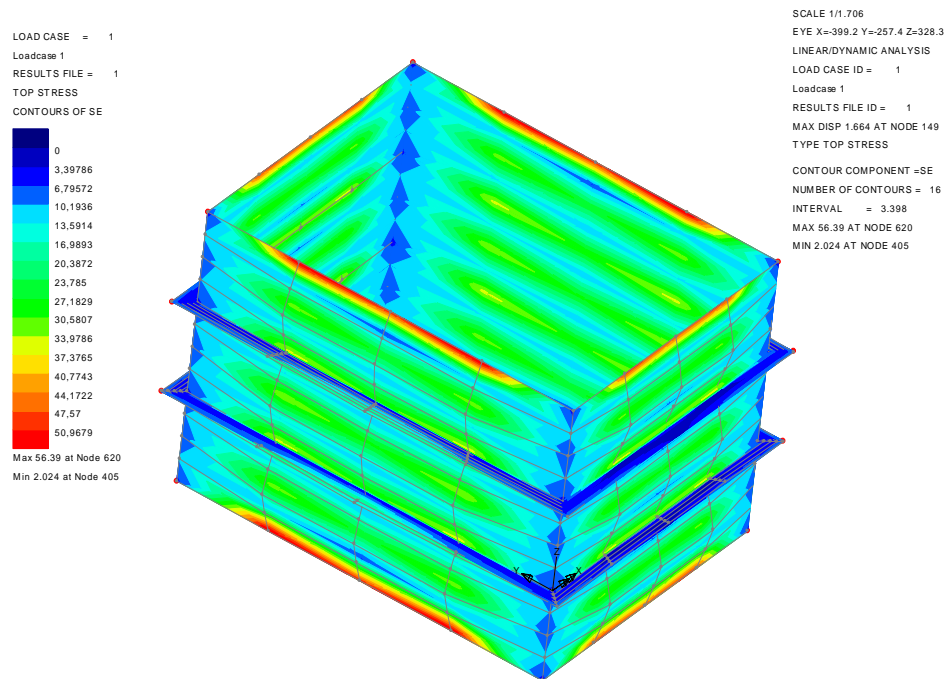
Loput kuvaajat sekä taulukot ovat liitteinä 1-3 työn lopussa. Näitä liitteitä tutkittaessa huomataan saman trendin jatkuvan. Kuvaajista havaittava trendi on jäykisteen vaikutus. FEM-mallissa käytettiin samaa jäykistettä, ja siltikään jännitykset eivät nousseet niin korkeiksi kuin mitoitusääntöä käytettäessä.

Tarkasteltaessa levyn vahvuuden suhdetta jäykisteväliin huomataan kuvasta 20, että jo 450 millimetrin jäykistevälillä pystyttäisiin käyttämään ohuinta levyä. Mikä näistä vaihtoehdoista on järkevintä, määräytyy suurimalta osaltaan kustannuskysymyksistä sekä asiakkaan mieltymyksistä.



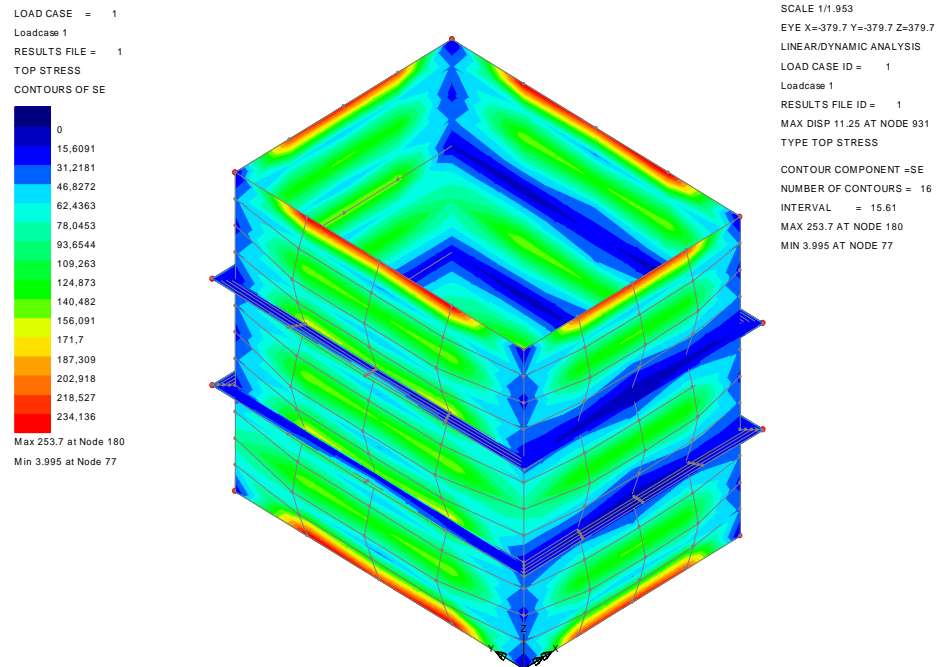
**Kuva 21** Levyn vahvuuden suhde jäykisteväliin

Kuvassa 21 käytetyt arvot ovat liitteenä 1 olevassa taulukossa. Samassa liitteessä on myös isommalla paineella tehty kuvaaja. Jäykistevälivertailu tehtiin kuvassa 22 esitetyn mallin avulla.



**Kuva 22** Jäykistevälivertailun malli, jonka jäykisteväli 450 mm.

Kuvassa 22 esitetty jäykisteväli on 450 mm ja kanavan poikkileikkauksen mittojen pysyessä samana varioitiin siitä seuraava kanava (kuva 20).



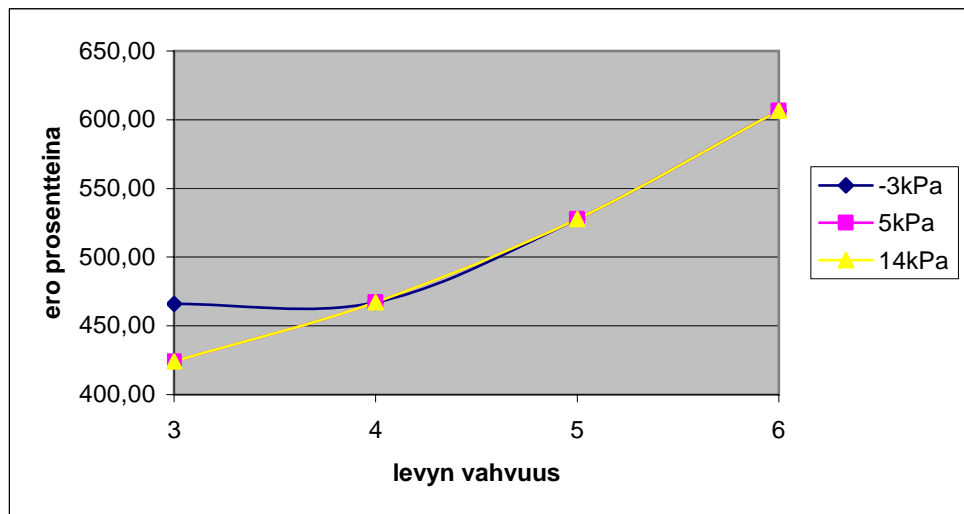
**Kuva 23** Kanava, jonka jäykisteväli on 600 mm

Kuvista 22 ja 23 pyrittiin poistamaan reunaehtojen aiheuttamia virheitä määrittämällä manuaalisesti kohta, josta jännitykset on otettu vertailu taulukoihin.

## 8. TULOSTEN ANALYSOINTI

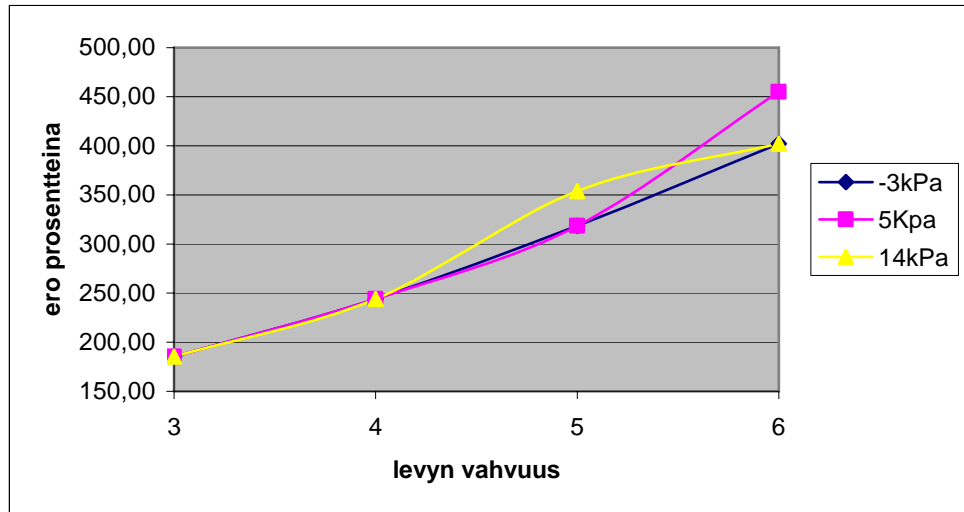
Saatuja tuloksia analysoitaessa huomataan, että käytössä oleva suunnittelusääntö antaa paljon suurempia jännityksiä kuin FEM. Suurimmat jännitykset ovat monta kertaa isompia mitoitussäännöllä laskettaessa.

Tutkittaessa kanavista tehtyjä vertailukaavioita (liitteet 2 ja 3) huomaa, että kanavan poikkileikkauksen ollessa suuri ja seinämän vahvuuden ollessa 5 mm tai 6 mm ovat kanavien jännityserot erittäin pieniä. Kuvaajista selviää vielä, että laskennalliset jännitykset FEMilla ja mitoitusäännöllä lähenevät kanavan seinämän paksuuden kasvaessa. Prosentuaalinen ero taas kasvaa, jonka voi huomata kuvasta 24. Kuvaajassa jännitys erot ovat prosentteina.



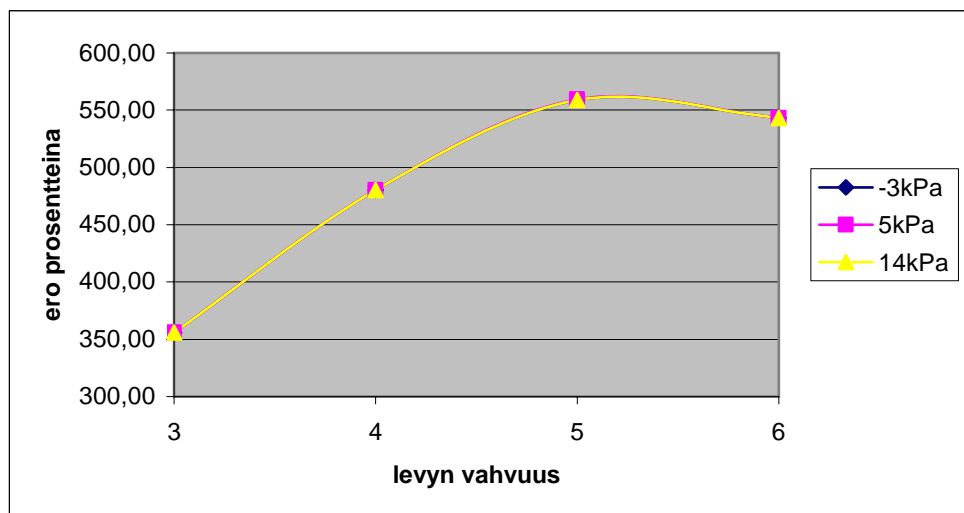
**Kuva 24** Jännityserot prosentteina FEMin ja mitoitusäännön välillä

Edellä oleva kuvaaja on pienikokoisesta kanavasta. Seuraava kuva 25 on keskikokoisesta kanavasta. Sama trendi jatkuu myös siinä.



**Kuva 25** Keskikokoisen kanavan prosentuaalinen ero FEMin ja mitoitussäännön välillä

Kanavakoon kasvaessa huomataan jännityseron alkavan pienentyä kanavalevyn paksuntuessa (kuva 26).



**Kuva 26** Isokokoisien kanavien prosentuaalinen ero FEMin ja mitoitussäännön välillä

Näistä kuvaajista voidaan päätellä, että käytössä oleva mitoitussääntö toimii keskikokoisilla kanavilla parhaiten. Tämä havainto tuo ajatuksen jakaa mitoitussääntö kanavakokojen mukaan. On myös muistettava, ettei tässä työssä ole otettu huomioon virtausteknillistä puolta lainkaan ja kanavien massat on myös jätetty huomioon ottamatta. Isoissa kanavissa massan huomioon ottaminen on elintärkeää kanavan koossa pysymiseksi. Isojen kanavien suunnittelussa tulevat myös ongelmaksi kuljetukset. Kuvaajista käy ilmi pienissä kanavissa jo pienillä seinämän paksuuksilla huomattava ero FEM-laskennan ja käytössä olevan mitoitussäännön välillä. Tämä tukee edellä esitettyä ajatusta jakaa sääntö erikokoisille kanaville.

Mitoituksen kehittämiseen vaikuttavat myös ympäristön asettamat vaatimukset. Ympäri maailmaa toimitettavat laitokset tuovat paikalliset ongelmat mukanaan. Näitä ongelmia ovat maanjäristykset, lämpötilan muutokset, tuuli- ja lumikuormat, joita ei voi jättää huomioon ottamatta. Lisää vaatimuksia tuottavat isoissa kanavissa esiin tulevat värähtelyt sekä melu.

Käytössä ollut LUSAS on erinomainen työkalu optimoitaessa kanavan rakennetta, mutta erittäin työlääksi tulee mallinnus. Ohjelma on opetus-tarkoitukseen hankittu, joten siinä ei ole aivan kaikkia mahdollisia mallinnukseen tarvittavia työkaluja. Kattavammalla ohjelmalla voisi rakentaa malleja, joille vain annettaisiin parametrit. Tämän jälkeen ohjelma laskisi optimaalisen rakenneratkaisun. Tällöin kuitenkin mitoitushjeen käytön ajankohtaa on mietittävä, sillä kannatuksista ja muista tukea rakenteelle antavista yksityiskohdista tulisi olla jo selkeä kuva.

Molempien teorioiden mukaan jännityshuiput sijaitsivat levykenttien keskellä. Tämän pystyy havaitsemaan liitteistä 1-3, varsinkin FEM-malleista. Mitoitussäännöllä jäykisteen koko jouduttaisiin valitsemaan turhan suureksi ja tämä nostaa vertailujännitystä. Vertailtaessa FEMin ja mitoitussäännön antamia tuloksia jäykisteelle on niiden välillä huomattava ero. Eron pystyy havaitsemaan liitteissä 1-3 olevista taulukoita sekä mallinnetuista kuvista. Huomion arvoinen seikka on myös se, että säännöllä pitäisi laskea erilaiset kulmapalat. Mietittäessä kanaviston kanssa samankaltaista rakennetta on vaikea löytää vertailuvastakohtaa, josta voisi hakea ideaa säännön kehittämiseksi.

Edellä mainittu jako kanavan koon mukaan antaa mahdollisuuden rakentaa taulukko valmiiksi lasketuista malleista, joista olisi helppo valita suunnitteluvaiheessa sopivin ratkaisu. Tämä ehkä vähentäisi suunnittelijan työtä. Työläs laskemisvaihe jäisi pois ja näin säästettäisiin aikaa, mikä toisi säästöjä projektien aikataulujen kautta. Taulukon rakentaminen voisi lähteä työni mukaisesta jaosta, jossa kanavat on jaettu kolmeen kokoluokkaan ja nämä kokoluokat jaettu paineiden mukaan. Lisäksi voisi tuoda eri jäykisteväli-ratkaisuja. Taulukon rakentaminen on työläs, mutta uskon sen kuitenkin olevan yksi parhaimmista ratkaisuista.

Nämä havainnot antavat aihetta seuraavalle työlle, jossa pyritään hiomaan suunnittelusääntöä tarkemmaksi. Elementtimenetelmästä ei pysty rakentamaan selvää ja yksinkertaista sääntöä.

## LÄHTEET

- 1 Lähteenmäki, Matti, Elementtimenetelmän perusteet. Luentomateriaali. Tampereen ammattikorkeakoulu. Tuotekehitys. Tampere 2001
- 2 Suunnittelijan opas, Rautaruukki 2000.
- 3 Kvaerner Power Oy. [www-sivut]. Kvaerner Powerin intranet.  
<http://intraet.kvaerner.fi/>
- 4 Lähteenmäki, Matti, Lusas tiedosto-opas, Luentomateriaali. Luentomateriaali. Tampereen ammattikorkeakoulu. Tuotekehitys. Tampere 2001
- 5 Valtanen, Esko. Koneenrakentajan taulukkokirja. Gummerus kirjapaino Oy. Jyväskylä 2005.
- 6 Teivas, Tapio, Diplomi-insinööri. Keskustelut 2006. Kvaerner Power Oy. Tampere



## **LIITTEET**

1. Tulostaulukko saaduista jännityksistä FEM:llä sekä mitoitussäännöllä
2. Vertailukaavioita
3. Tulostaulukko sekä vertailukaavio
4. FEM-mallit

## Muuttuva poikkileikkauksinen kanava

FEM

Pieni koko		1000x600	560x450	Jäykiste	
		3mm	4mm	5mm	6mm
-3 kPa	Jännitys/MPa	20,18	12,43	7,941	5,516
	Siirtymä/mm	0,98	0,423	0,22	0,13
5 kPa	Jännitys/MPa	36,97	20,72	13,23	9,194
	Siirtymä/mm	1,638	0,706	0,368	0,217
14 kPa	Jännitys/MPa	103,5	58,01	37,06	25,74
	Siirtymä/mm	4,587	1,976	1,031	0,6079

Keskikoko		2000x750	2000x1500	80x8	
		3mm	4mm	5mm	6mm
-3 kPa	Jännitys/MPa	72,18	42	28,04	20,6
	Siirtymä/mm	4,244	1,937	1,091	0,7069
5 kPa	Jännitys/MPa	120,3	70	46,75	30,34
	Siirtymä/mm	7,073	3,229	1,819	1,178
14 kPa	Jännitys/MPa	336,8	196	117,9	96,15
	Siirtymä/mm	19,81	9,041	5,092	3,299

Suuri koko		2000x3000	2000x4000	120x8	
		3mm	4mm	5mm	6mm
-3 kPa	Jännitys/MPa	51,2	32,1	25,49	25,18
	Siirtymä/mm	4,82	3,035	2,325	1,955
5 kPa	Jännitys/MPa	85,33	53,49	42,48	41,96
	Siirtymä/mm	8,034	5,058	3,875	3,258
14 kPa	Jännitys/MPa	238,9	149,8	119	117,5
	Siirtymä/mm	22,49	14,8	10,85	9,121

Jäykisteväli kaikissa sama 600mm

## Mitoitussäännön mukainen

Pieni koko			1000x600	560x450	80x8	
			3mm	4mm		
-3 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	-17,58	-17,58	-17,58	-17,58
		levy.	-84,00	-47,25	-30,24	-21,00
		vert.	94,03	58,07	41,89	33,45
5 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	29,30	29,30	29,30	29,30
		levy.	140,00	78,75	50,40	35,00
		vert.	156,72	96,78	69,82	55,76
14 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	82,03	82,03	82,03	82,03
		levy.	392,00	220,50	141,12	98,00
		vert.	438,81	271,00	195,50	156,12

Keskikoko			2000x750	2000x1500	80x8	
			3mm	4mm		
-3 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	-70,32	-70,32	-70,32	-70,32
		levy.	-84,00	-47,25	-30,24	-21,00
		vert.	133,82	102,47	89,36	82,84
5 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	117,19	117,19	117,19	117,19
		levy.	140,00	78,75	50,40	35,00
		vert.	223,03	170,78	148,93	138,06
14 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	328,14	328,14	328,14	328,14
		levy.	392,00	220,50	141,12	98,00
		vert.	624,47	478,17	417,01	386,57

Suuri koko			2000x3000	2000x4000	120x8	
			3mm	4mm		
-3 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	-125,00	-125,00	-125,00	-125,00
		levy.	-84,00	-47,25	-30,24	-21,00
		vert.	182,16	154,16	142,55	136,72
5 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	208,33	208,33	208,33	208,33
		levy.	140,00	78,75	50,40	35,00
		vert.	303,59	256,93	237,58	227,86
14 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	583,33	583,33	583,33	583,33
		levy.	392,00	220,50	141,12	98,00
		vert.	850,06	719,39	665,22	638,00

**Suorakanava**

FEM

1000x700

<b>Pieni koko</b>		1000x700			
		3mm	4mm	5mm	6mm
-3 kPa	Jännitys/MPa	32,04	18,22	11,74	8,19
	Siirtymä/mm	1,915	0,85	0,46	0,28
5 kPa	Jännitys/MPa	53,4	30,36	19,57	13,65
	Siirtymä/mm	3,19	1,43	0,77	0,47
14 kPa	Jännitys/MPa	149,5	85,01	54,8	38,22
	Siirtymä/mm	8,94	3,99	2,16	1,32

**Jäykiste**

80x8

**Keskikoko**

2000x1500

<b>Keskikoko</b>		2000x1500			
		3mm	4mm	5mm	6mm
-3 kPa	Jännitys/MPa	37,33	21,31	15,29	14,88
	Siirtymä/mm	2,831	1,45	0,91	0,66
5 kPa	Jännitys/MPa	62,22	35,52	25,48	24,79
	Siirtymä/mm	4,72	2,42	1,53	1,1
14 kPa	Jännitys/MPa	174,2	99,46	71,34	69,42
	Siirtymä/mm	13,21	6,78	4,28	3,06

80x8

**Suuri  
koko**

3000x4000

<b>Suuri koko</b>		3000x4000			
		3mm	4mm	5mm	6mm
-3 kPa	Jännitys/MPa	39,57	23,59	21,9	17,15
	Siirtymä/mm	2,923	1,434	0,8897	0,6371
5 kPa	Jännitys/MPa	65,95	39,31	36,5	31,92
	Siirtymä/mm	4,872	2,391	1,483	1,062
14 kPa	Jännitys/MPa	184,7	110,1	102,3	89,37
	Siirtymä/mm	13,64	6,694	4,152	2,973

125x8

Jäykisteväli kaikissa sama 600mm

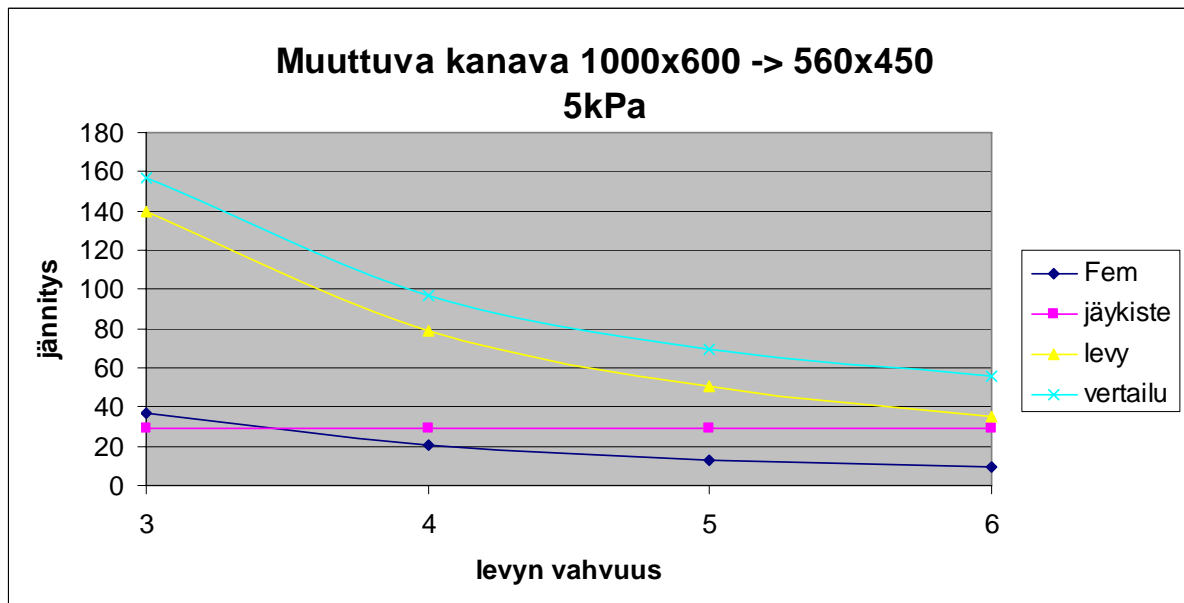
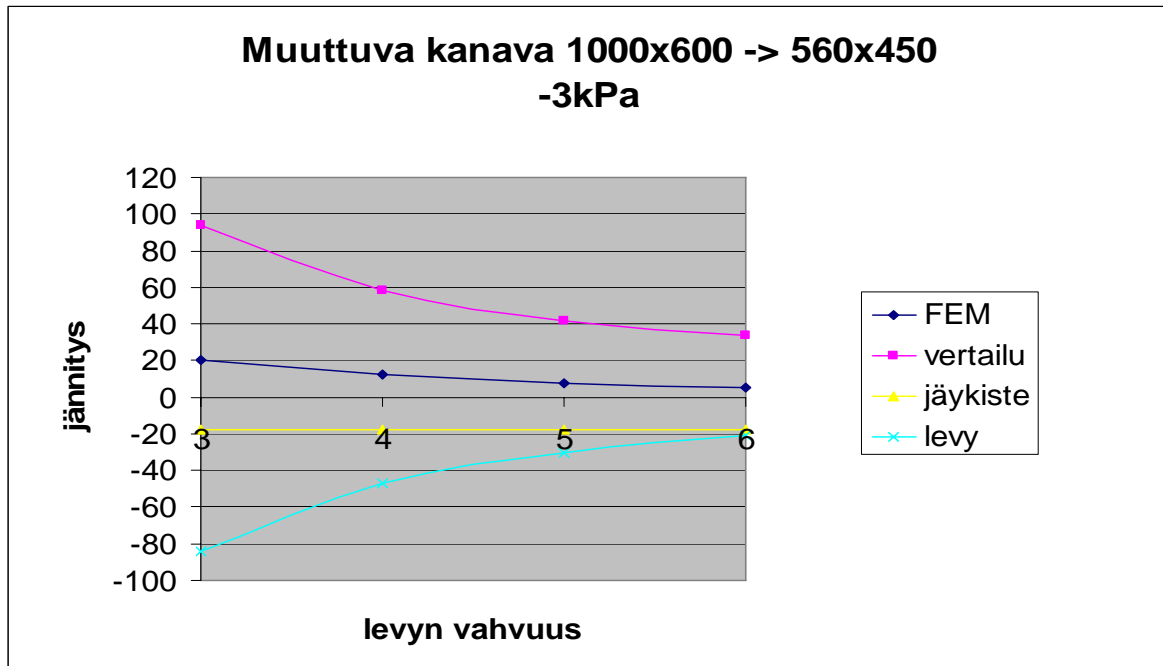
## Mitoitussäännön mukainen

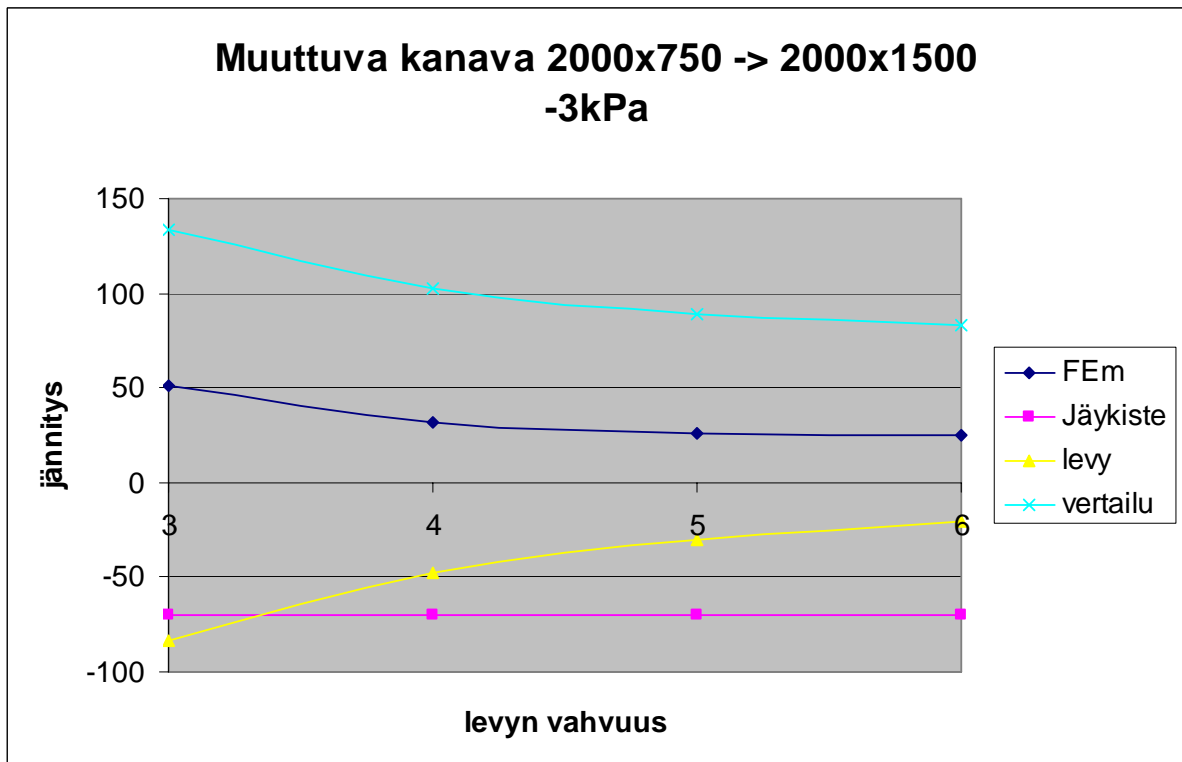
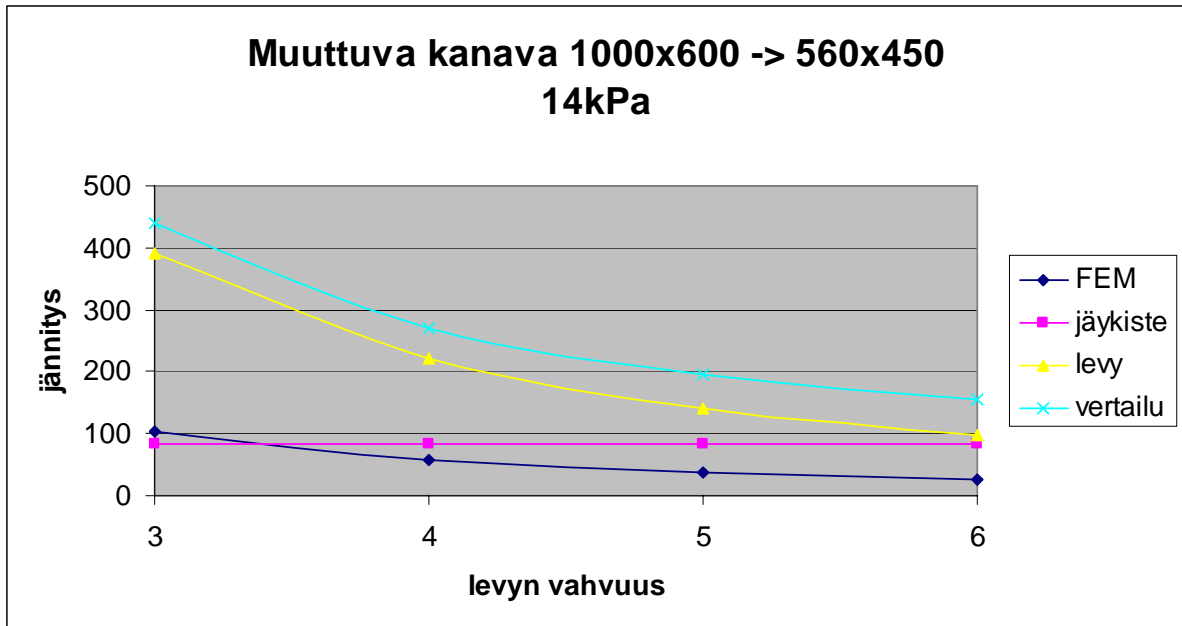
Pieni koko			1000x700				80x8
			3mm	4mm	5mm	6mm	
-3 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	-17,58	-17,58	-17,58	-17,58	
		levy.	-73,01	-41,07	-26,28	-18,25	
		vert.	83,20	52,13	38,23	31,03	
5 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	29,30	29,30	29,30	29,30	
		levy.	121,68	68,45	43,80	30,42	
		vert.	138,67	86,88	63,72	51,72	
14 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	82,03	82,03	82,03	82,03	
		levy.	340,70	191,65	122,65	85,18	
		vert.	388,28	243,27	178,42	144,82	

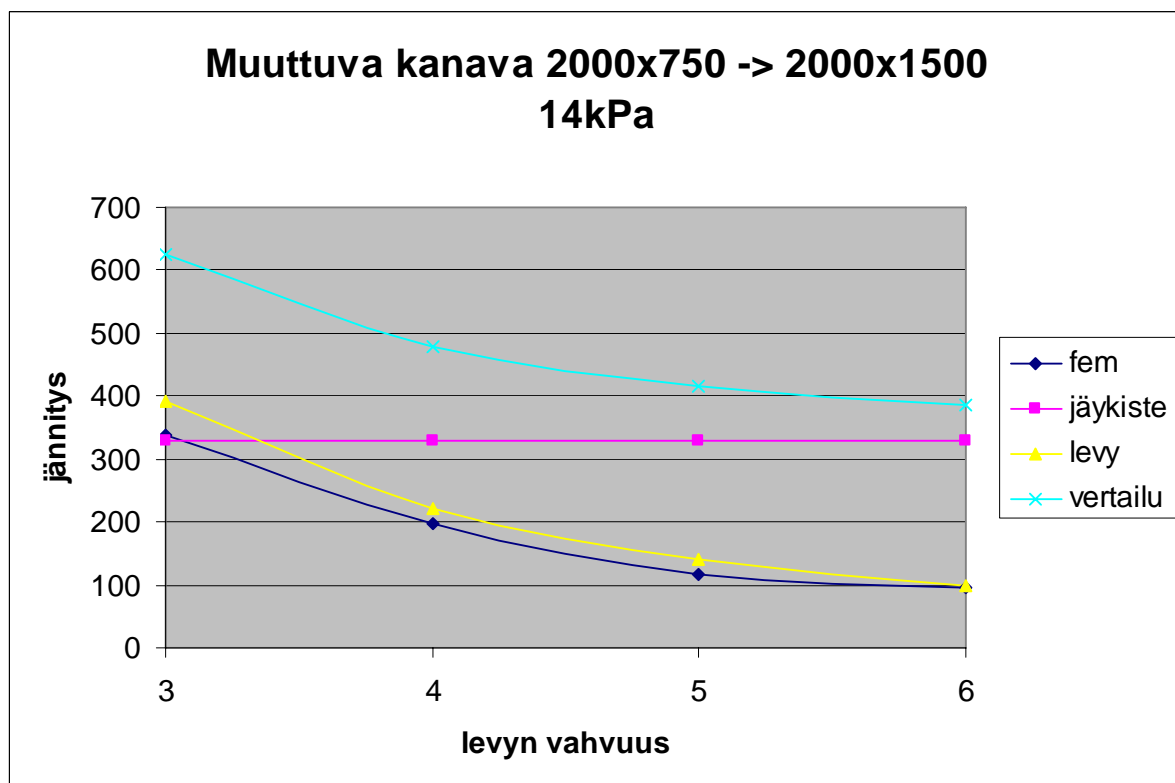
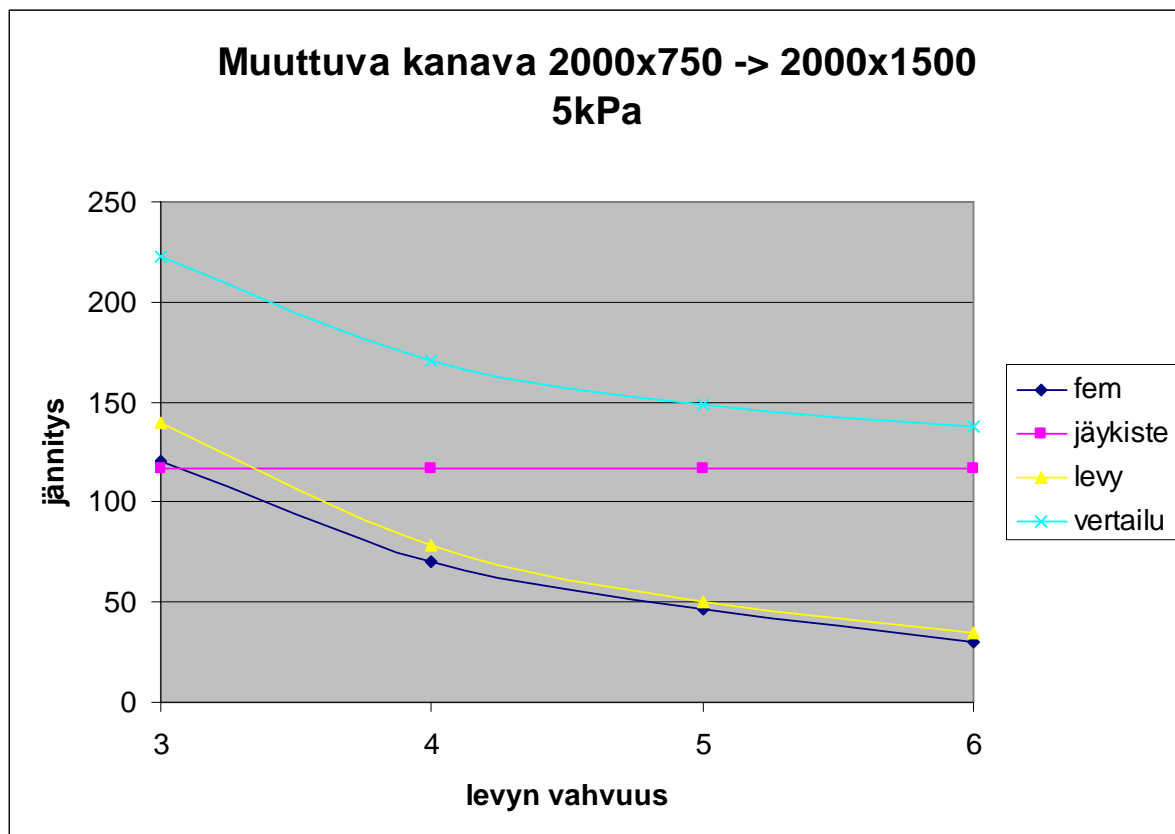
Keskikoko			2000x1500				80x8
			3mm	4mm	5mm	6mm	
-3 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	-70,32	-70,32	-70,32	-70,32	
		levy.	-84,00	-47,25	-30,24	-21,00	
		vert.	133,82	102,47	89,36	82,84	
5 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	117,19	117,19	117,19	117,19	
		levy.	140,00	78,75	50,40	35,00	
		vert.	223,03	170,78	148,93	138,06	
14 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	328,14	328,14	328,14	328,14	
		levy.	392,00	220,50	141,12	98,00	
		vert.	624,47	478,17	417,01	386,57	

Suuri koko			3000x4000				125x8
			3mm	4mm	5mm	6mm	
-3 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	-125,00	-125,00	-125,00	-125,00	
		levy.	-84,00	-47,25	-30,24	-21,00	
		vert.	182,16	154,16	142,55	136,72	
5 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	208,33	208,33	208,33	208,33	
		levy.	140,00	78,75	50,40	35,00	
		vert.	303,59	256,93	237,58	227,86	
14 kPa	Jännitys/MPa	jäyk.	583,33	583,33	583,33	583,33	
		levy.	392,00	220,50	141,12	98,00	
		vert.	850,06	719,39	665,22	638,00	

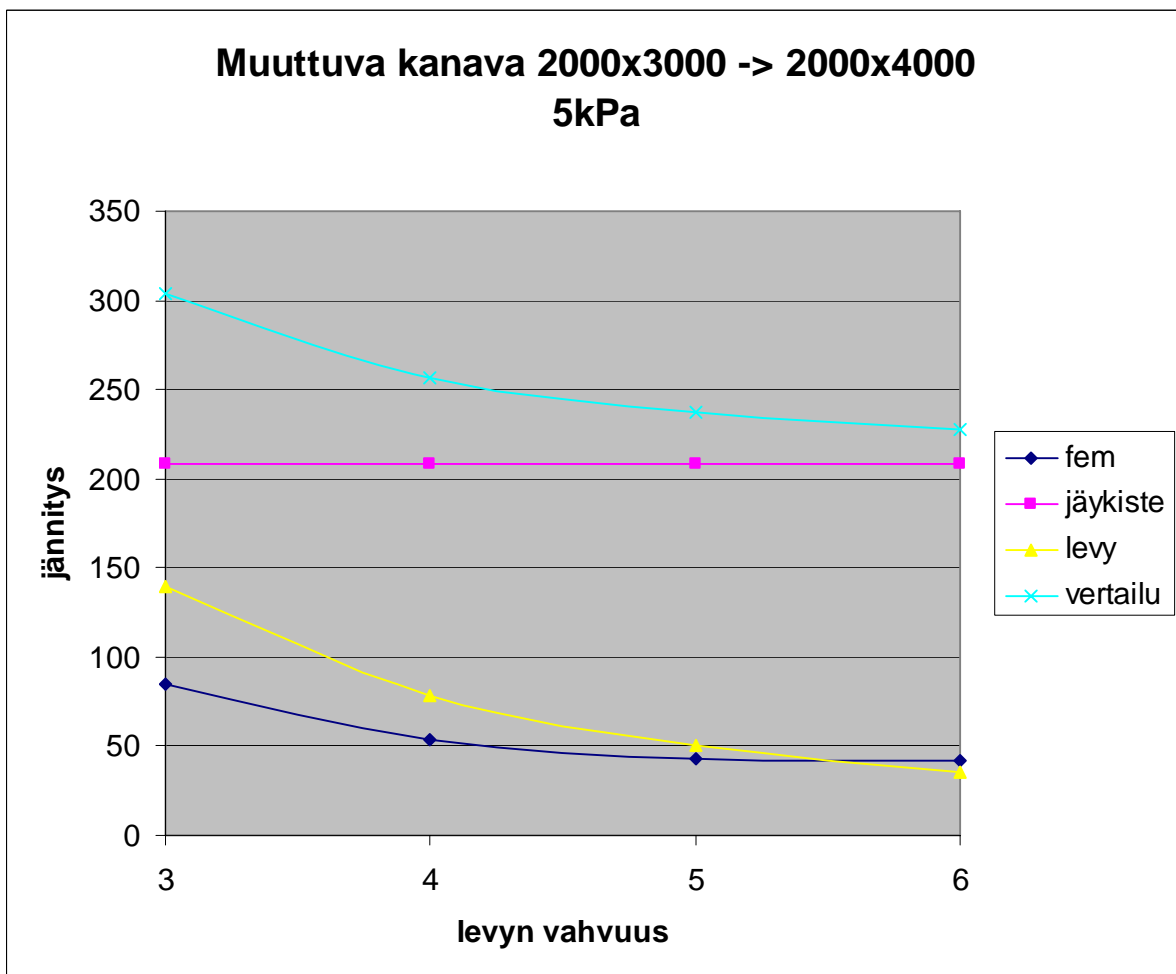
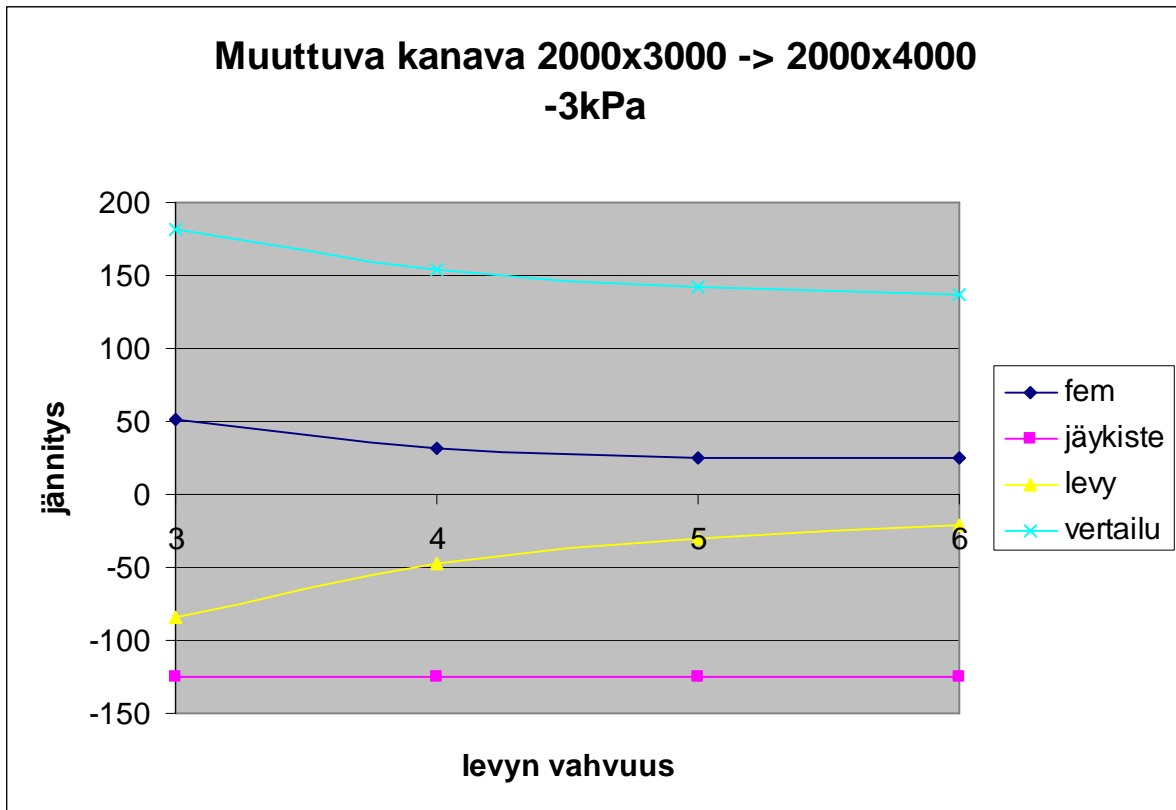
Jäykisteväli kaikissa sama 600mm

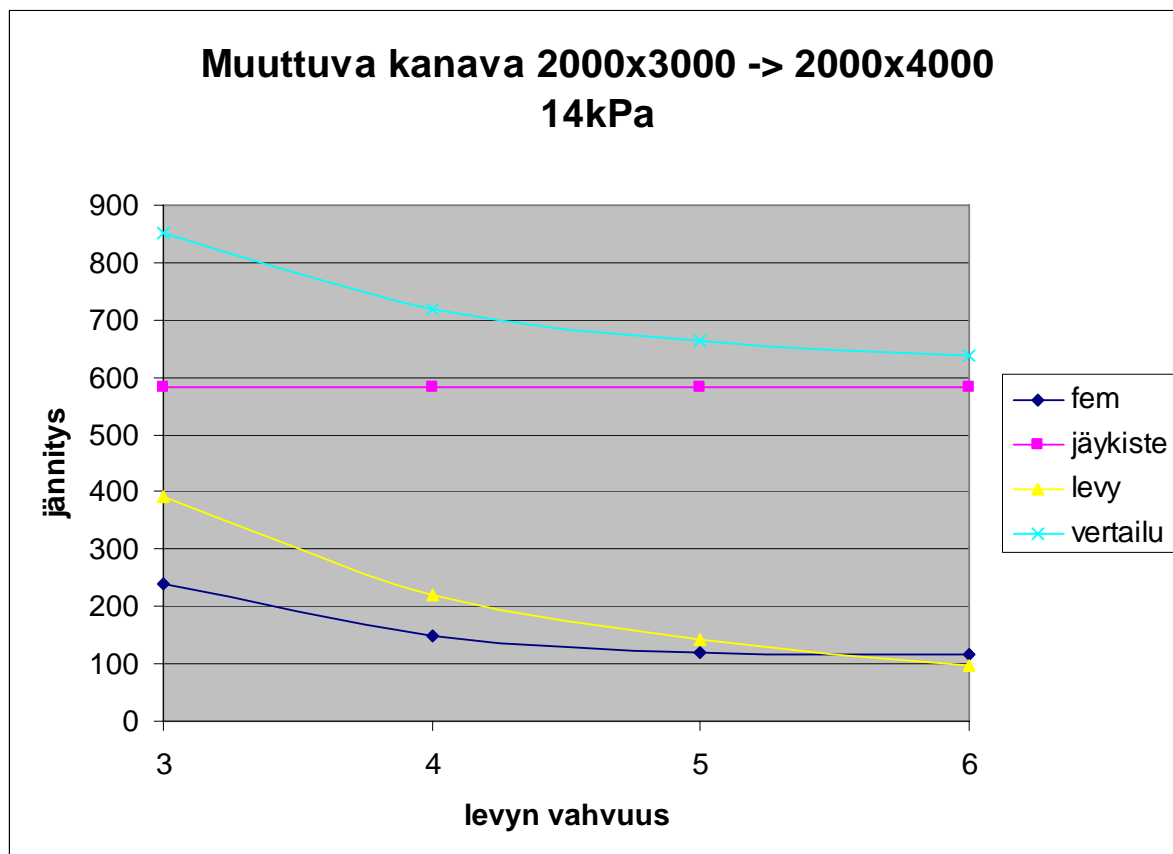


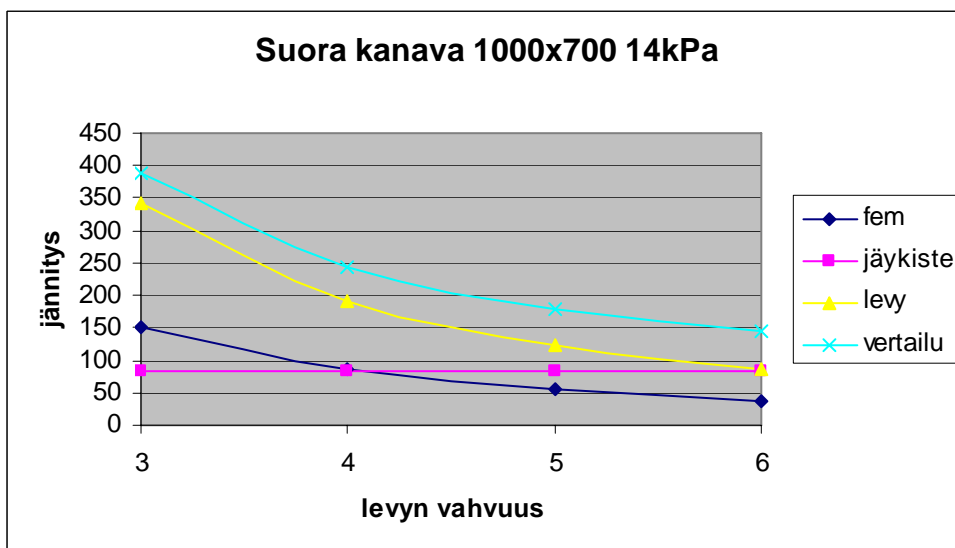
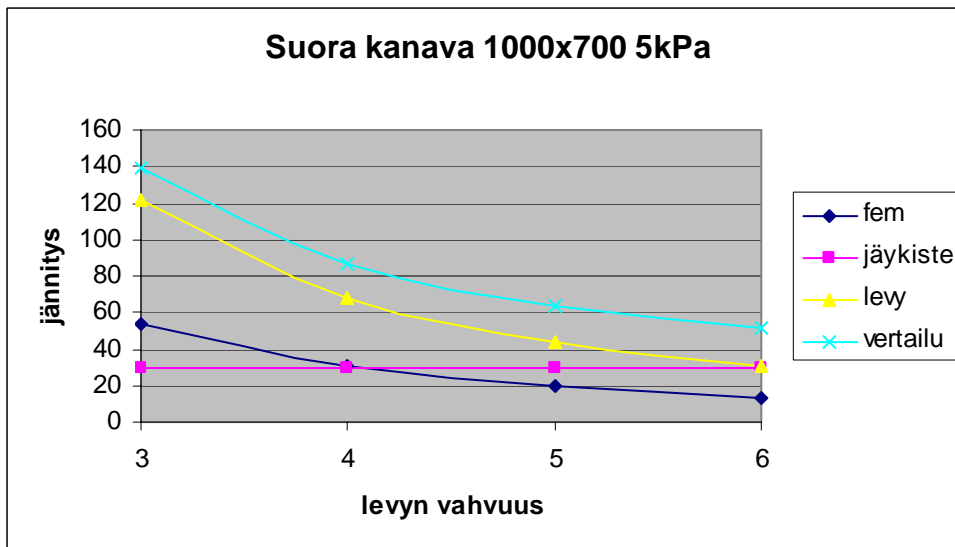
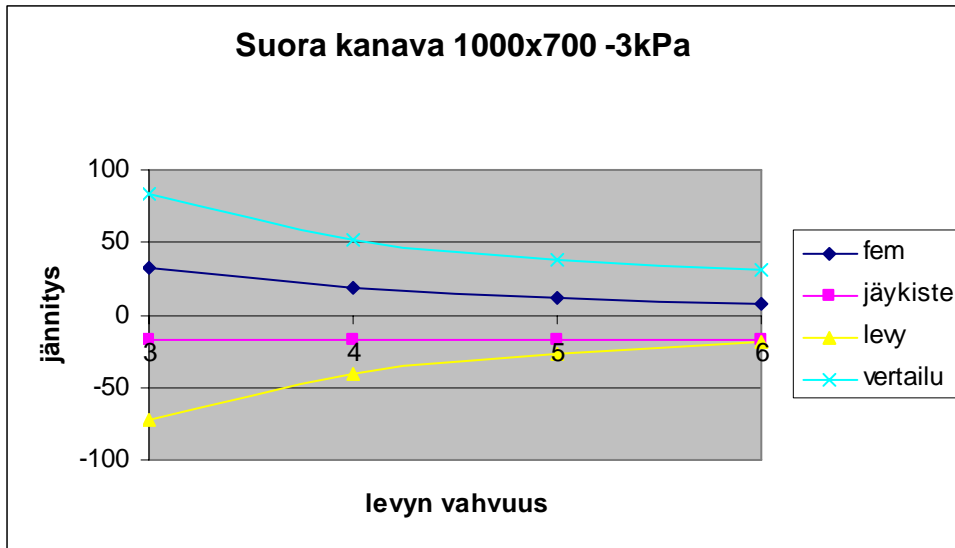


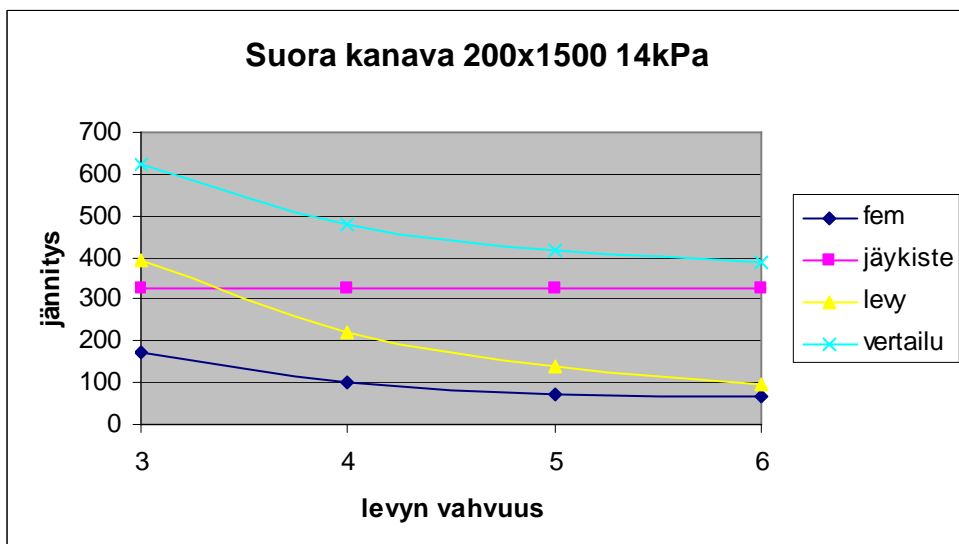
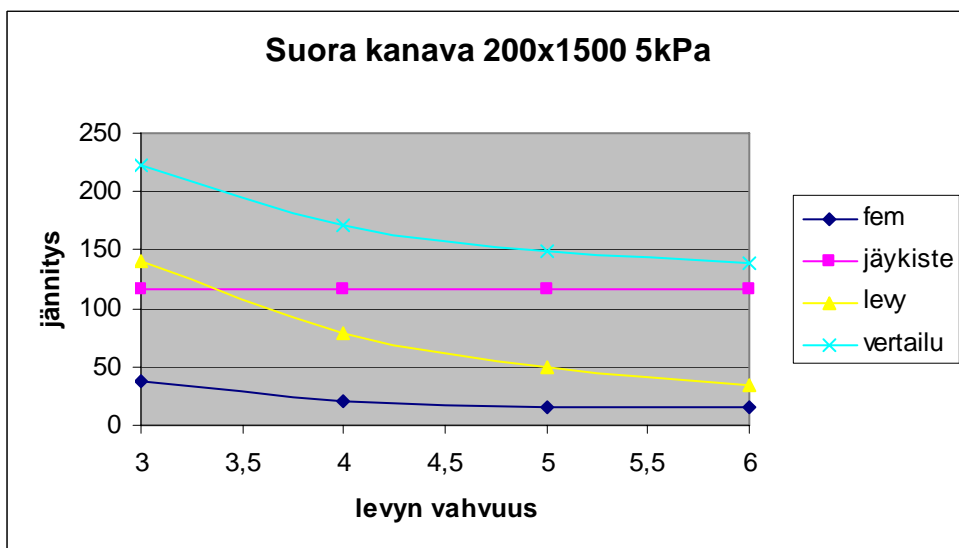
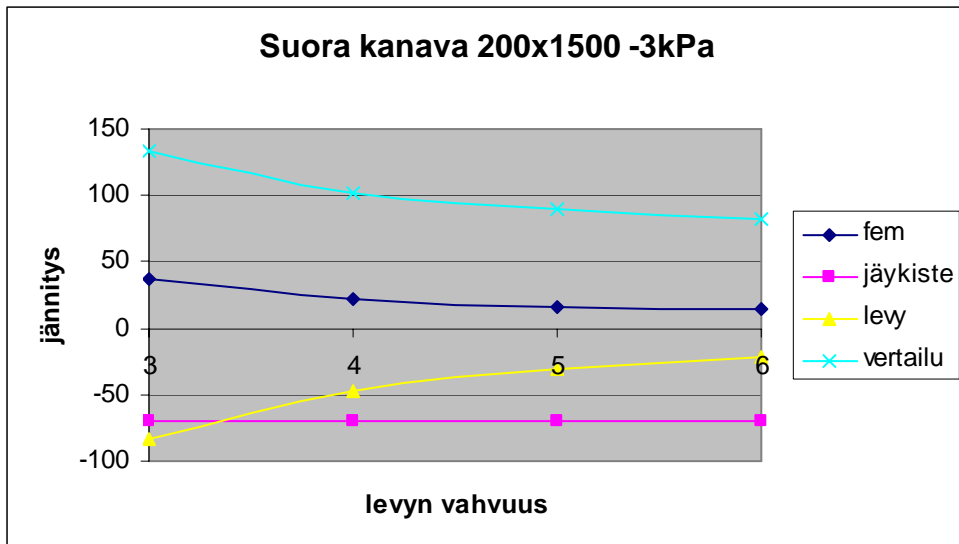


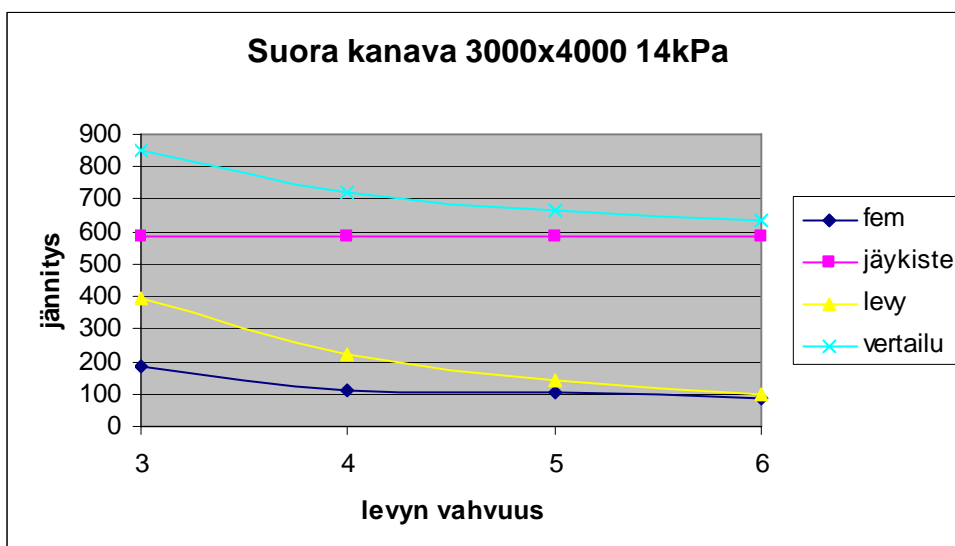
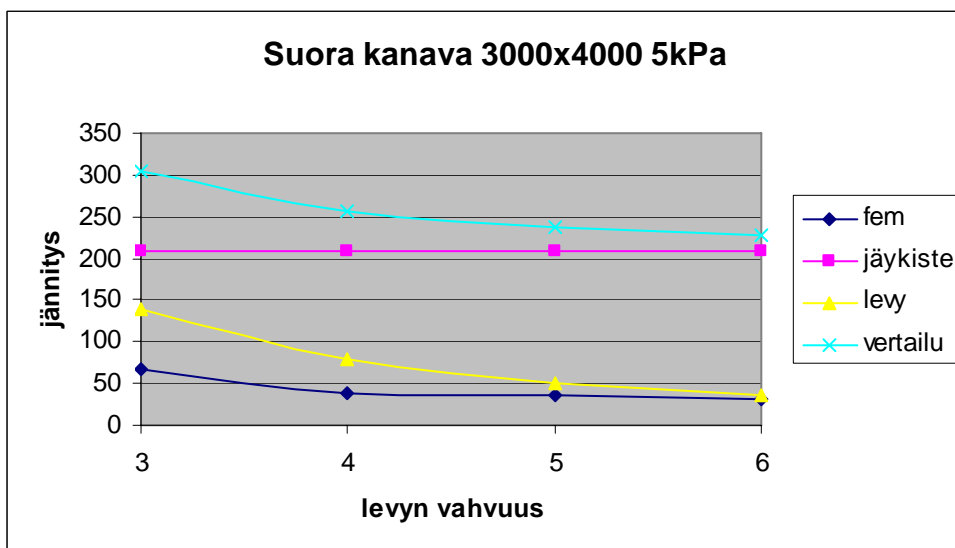
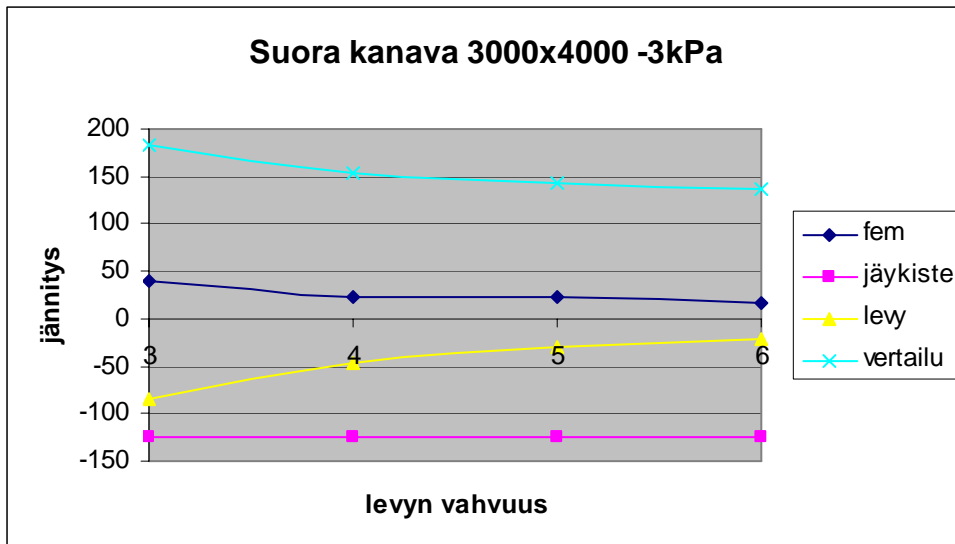






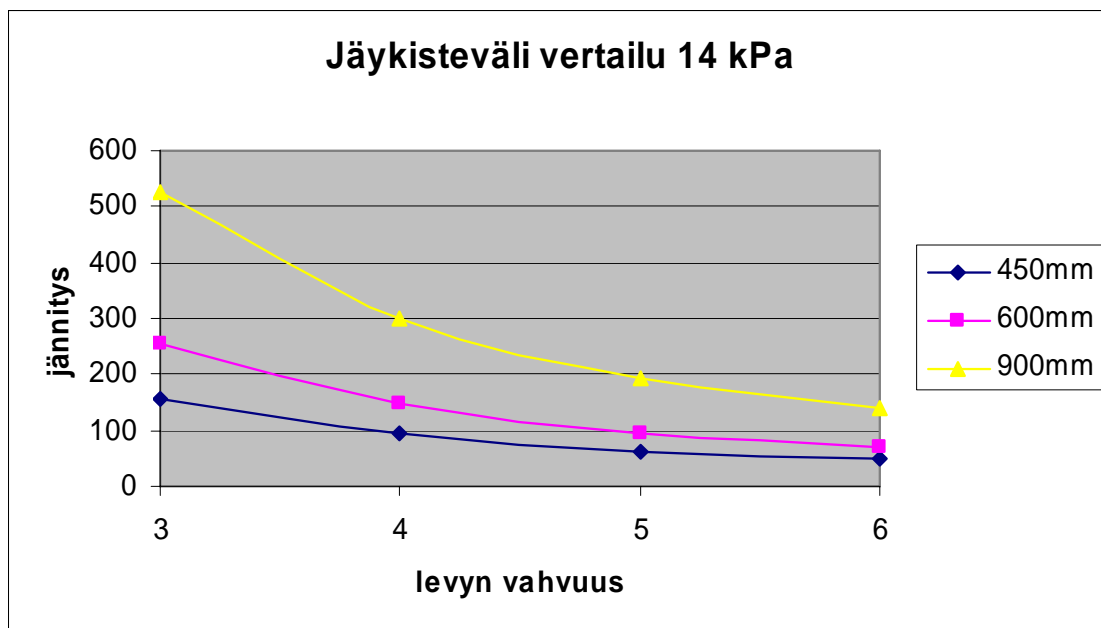






## Käytetty jäykiste profiilia 80x8 latta

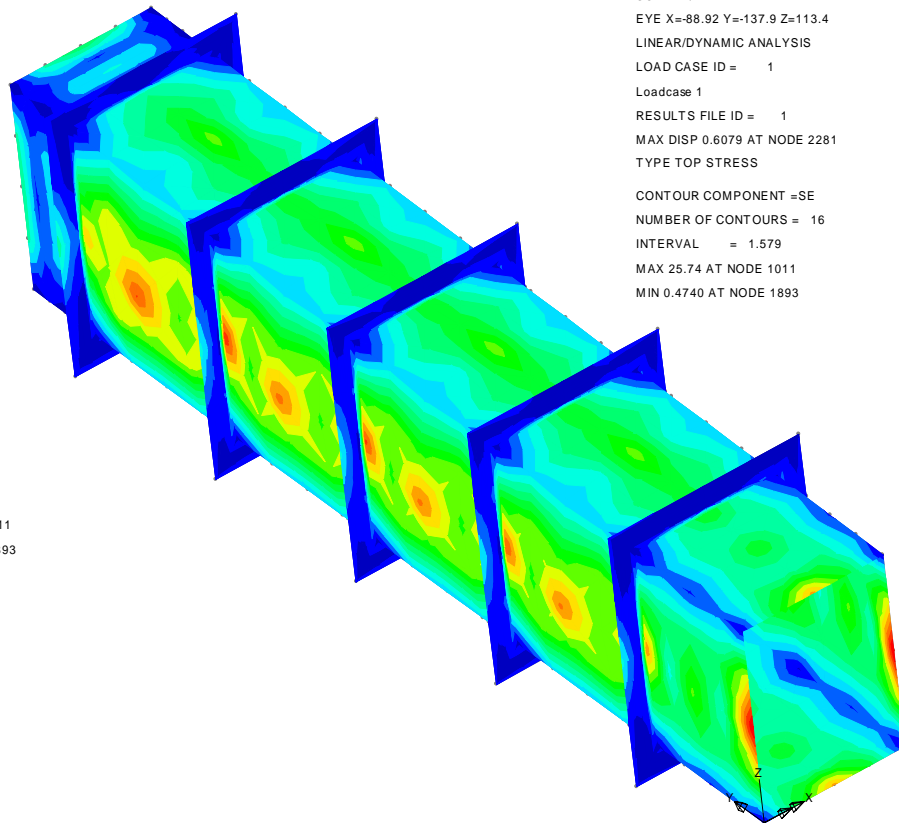
jäykisteväli	paine/kPa	levynpaksuus/mm				
		3	4	5	6	
450	5 jännitys siirtymä	56,39	33,16	22,59	17,29	
		1,66	1,02	0,76	0,63	
	14 jännitys siirtymä	157,9	92,86	63,26	48,41	
		4,66	2,84	2,14	1,77	
	600	5 jännitys siirtymä	90,62	52,1	34,46	25,01
			4,02	2,1	1,4	1,07
14 jännitys siirtymä		253,7	145,9	963,48	70,01	
		11,25	5,89	3,93	3	
900		5 jännitys siirtymä	187,1	106,7	69,58	49,56
			17,17	7,814	4,46	2,96
	14 jännitys siirtymä	524	298,7	194,8	138,8	
		13,63	21,88	12,49	8,28	



LOAD CASE = 1  
 Loadcase 1  
 RESULTS FILE = 1  
 TOP STRESS  
 CONTOURS OF SE



Max 25.74 at Node 1011  
 Min 0.4740 at Node 1893



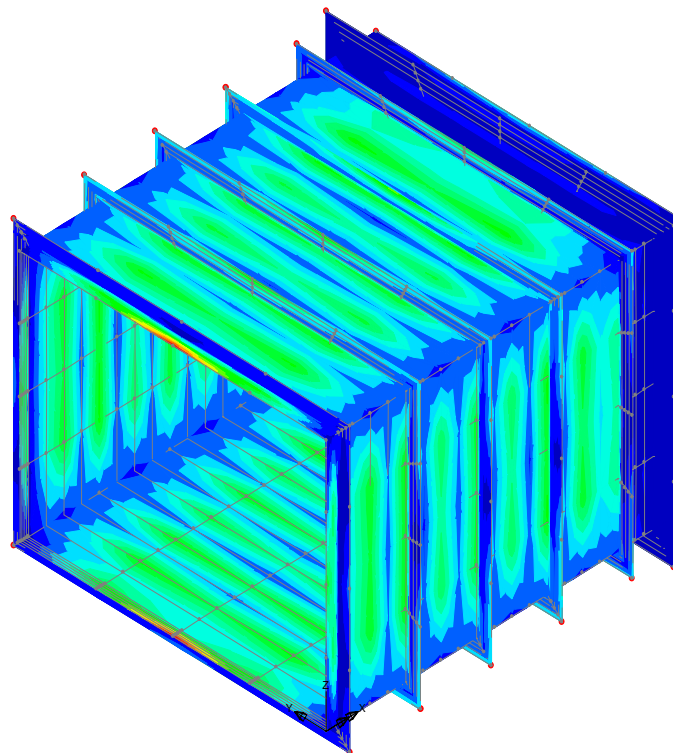
SCALE 1/1.271  
 EYE X=-88.92 Y=-137.9 Z=113.4  
 LINEAR/DYNAMIC ANALYSIS  
 LOAD CASE ID = 1  
 Loadcase 1  
 RESULTS FILE ID = 1  
 MAX DISP 0.6079 AT NODE 2281  
 TYPE TOP STRESS

CONTOUR COMPONENT =SE  
 NUMBER OF CONTOURS = 16  
 INTERVAL = 1.579  
 MAX 25.74 AT NODE 1011  
 MIN 0.4740 AT NODE 1893

LOAD CASE = 1  
 Loadcase 1  
 RESULTS FILE = 1  
 TOP STRESS  
 CONTOURS OF SE



Max 19.15 at Node 83  
 Min 0.2224E-01 at Node 1111



SCALE 1/2.716  
 EYE X=-1023. Y=-1023. Z=1023.  
 LINEAR/DYNAMIC ANALYSIS  
 LOAD CASE ID = 1  
 Loadcase 1  
 RESULTS FILE ID = 1  
 MAX DISP 0.6371 AT NODE 3046  
 TYPE TOP STRESS

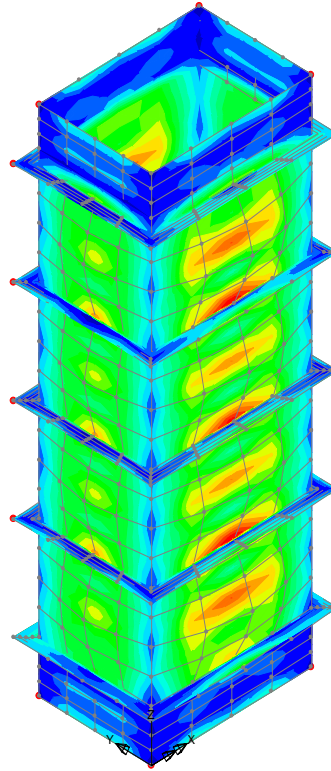
CONTOUR COMPONENT =SE  
 NUMBER OF CONTOURS = 16  
 INTERVAL = 1.196  
 MAX 19.15 AT NODE 83  
 MIN 0.2224E-01 AT NODE 1111



LOAD CASE = 1  
 Loadcase 1  
 RESULTS FILE = 1  
 TOP STRESS  
 CONTOURS OF SE

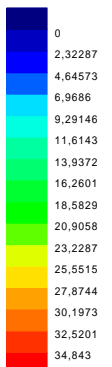


Max 38.22 at Node 235  
 Min 0.7817 at Node 1213

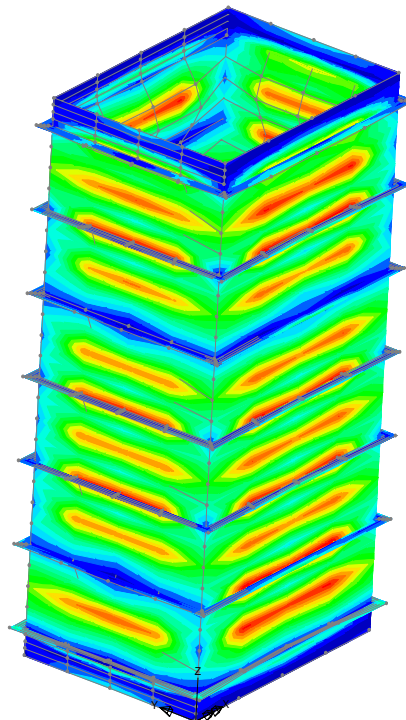


SCALE 1/2.228  
 EYE X=-0.2432E-49 Y=-0.2432E-49 Z=0.2432E-49  
 LINEAR/DYNAMIC ANALYSIS  
 LOAD CASE ID = 1  
 Loadcase 1  
 RESULTS FILE ID = 1  
 MAX DISP 1.323 AT NODE 252  
 TYPE TOP STRESS  
 CONTOUR COMPONENT =SE  
 NUMBER OF CONTOURS = 16  
 INTERVAL = 2.340  
 MAX 38.22 AT NODE 235  
 MIN 0.7817 AT NODE 1213

LOAD CASE = 1  
 Loadcase 1  
 RESULTS FILE = 1  
 TOP STRESS  
 CONTOURS OF SE



Max 37.33 at Node 1305  
 Min 0.1689 at Node 1983

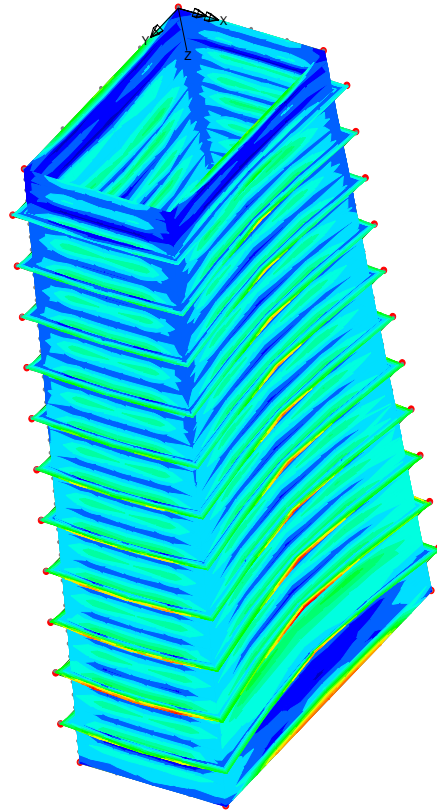


SCALE 1/3.113  
 EYE X=-2402. Y=-1748. Z=1327.  
 LINEAR/DYNAMIC ANALYSIS  
 LOAD CASE ID = 1  
 Loadcase 1  
 RESULTS FILE ID = 1  
 MAX DISP 2.831 AT NODE 1314  
 TYPE TOP STRESS  
 CONTOUR COMPONENT =SE  
 NUMBER OF CONTOURS = 16  
 INTERVAL = 2.323  
 MAX 37.33 AT NODE 1305  
 MIN 0.1689 AT NODE 1983

LOAD CASE = 1  
 Loadcase 1  
 RESULTS FILE = 1  
 TOP STRESS  
 CONTOURS OF SE

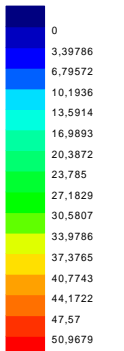


Max 25.18 at Node 2642  
 Min 0.5234 at Node 1233

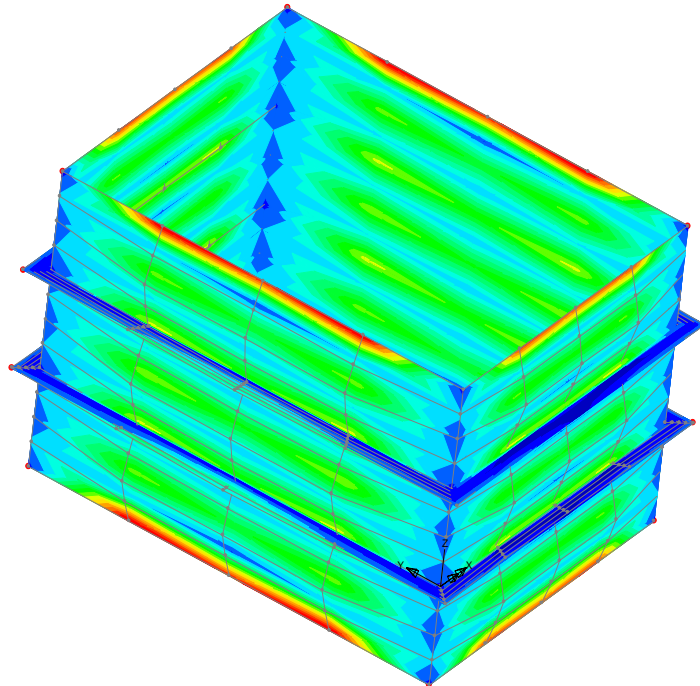


SCALE 1/5.509  
 EYE X=1247, Y=1377, Z=-1315.  
 LINEAR/DYNAMIC ANALYSIS  
 LOAD CASE ID = 1  
 Loadcase 1  
 RESULTS FILE ID = 1  
 MAX DISP 1.955 AT NODE 1828  
 TYPE TOP STRESS  
 CONTOUR COMPONENT =SE  
 NUMBER OF CONTOURS = 16  
 INTERVAL = 1.541  
 MAX 25.18 AT NODE 2642  
 MIN 0.5234 AT NODE 1233

LOAD CASE = 1  
 Loadcase 1  
 RESULTS FILE = 1  
 TOP STRESS  
 CONTOURS OF SE

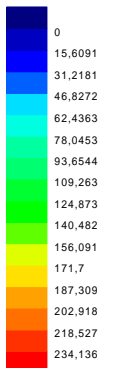


Max 56.39 at Node 620  
 Min 2.024 at Node 405

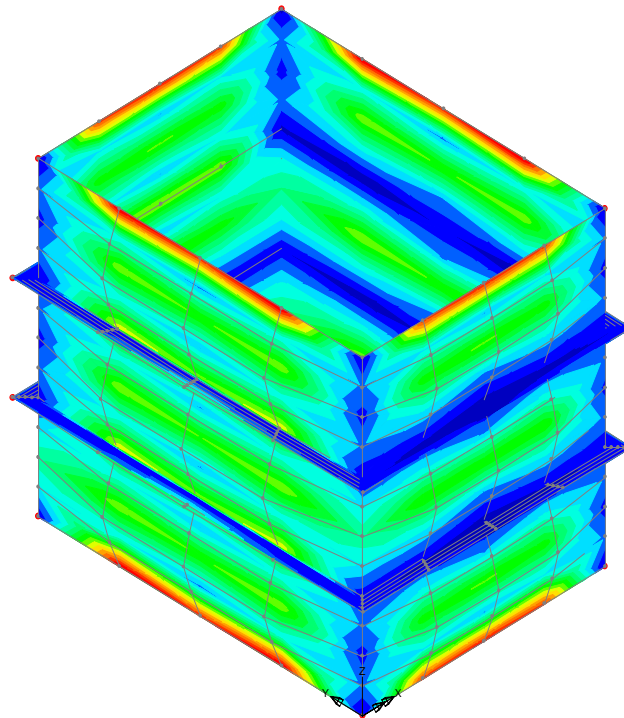


SCALE 1/1.706  
 EYE X=-399.2 Y=257.4 Z=328.3  
 LINEAR/DYNAMIC ANALYSIS  
 LOAD CASE ID = 1  
 Loadcase 1  
 RESULTS FILE ID = 1  
 MAX DISP 1.664 AT NODE 149  
 TYPE TOP STRESS  
 CONTOUR COMPONENT =SE  
 NUMBER OF CONTOURS = 16  
 INTERVAL = 3.398  
 MAX 56.39 AT NODE 620  
 MIN 2.024 AT NODE 405

LOAD CASE = 1  
 Loadcase 1  
 RESULTS FILE = 1  
 TOP STRESS  
 CONTOURS OF SE



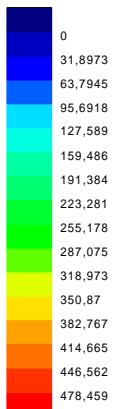
Max 253.7 at Node 180  
 Min 3.995 at Node 77



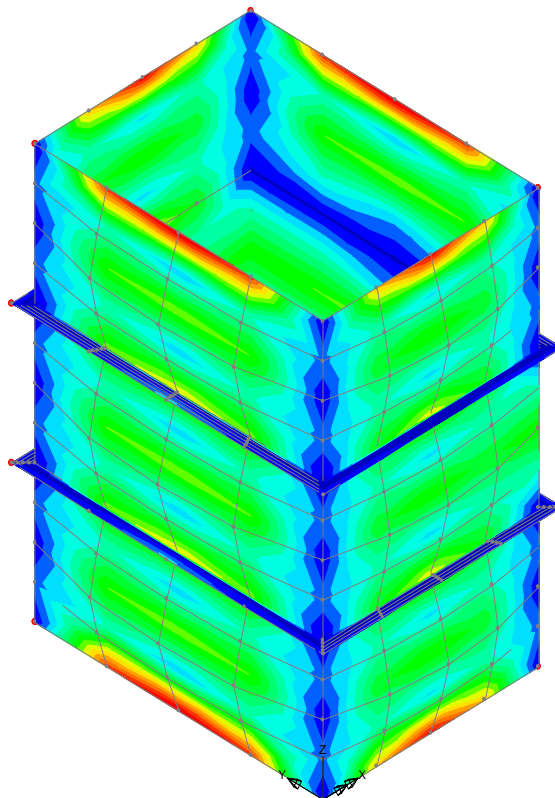
SCALE 1/1.953  
 EYE X=-379.7 Y=-379.7 Z=379.7  
 LINEAR/DYNAMIC ANALYSIS  
 LOAD CASE ID = 1  
 Loadcase 1  
 RESULTS FILE ID = 1  
 MAX DISP 11.25 AT NODE 931  
 TYPE TOP STRESS

CONTOUR COMPONENT =SE  
 NUMBER OF CONTOURS = 16  
 INTERVAL = 15.61  
 MAX 253.7 AT NODE 180  
 MIN 3.995 AT NODE 77

LOAD CASE = 1  
 Loadcase 1  
 RESULTS FILE = 1  
 TOP STRESS  
 CONTOURS OF SE



Max 524.0 at Node 12  
 Min 13.63 at Node 634



SCALE 1/2.448  
 EYE X=-5812. Y=-5812. Z=5812.  
 LINEAR/DYNAMIC ANALYSIS  
 LOAD CASE ID = 1  
 Loadcase 1  
 RESULTS FILE ID = 1  
 MAX DISP 48.08 AT NODE 149  
 TYPE TOP STRESS

CONTOUR COMPONENT =SE  
 NUMBER OF CONTOURS = 16  
 INTERVAL = 31.90  
 MAX 524.0 AT NODE 12  
 MIN 13.63 AT NODE 634