

Sooda- ja voimakattilan kehyspalkkirakenteen FE-analyysi

Teppo Hankilanoja

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Teppo Hankilanoja	
Työn nimi Sooda- ja voimakattilan kehyspalkkirakenteen FE -analyysi	
Päiväys 22.04.2012	Sivumäärä/Liitteet 52 + 6
Ohjaaja(t) Projektipäällikkö Tatu Westerholm	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) LEKA-Hanke / Andritz Oy	
Tiivistelmä	
<p>Työ toteutettiin Savonia-ammattikorkeakoulun hallinnoiman LEKA-hankkeen kautta Andritz Oy:lle. Työn tavoitteena oli saada aikaan toimiva ja helposti käytettävä parametrinen FE-analyyssityökalu. Työkalun tuli olla yksinkertainen ja sen avulla pystyä muuttamaan analysoitavan rakenteen mittoja. Parametreja voidaan käsitellä Microsoft Excel -taulukkolaskennalla helpomman päivittämisen ja vaikeampien kaavojen käytön vuoksi.</p> <p>Parametrinen malli rakennettiin Ansysin DesignModeler-ohjelmalla käyttäen kuorielementtejä niiden keveyden vuoksi. Kuorimallit toteutettiin Mid-surface-toiminnolla, joka helpotti huomattavasti parametointia rakenteiden paksuuksien määrittämisessä. FE-analyysi suoritettiin myös Ansysellä ja se rakennettiin mahdollisimman valmiiksi rasiusten ja tukien osalta, jotta käyttäjän ei tarvitse kuin päivittää halutut parametrit. Työssä tehtiin kustannustarkastelu eri kattilojen kehyspalkkirakenteiden painojen perusteella.</p> <p>Työssä saatiin aikaan toimiva parametrinen 3D-malli, joka annettiin Andritz Oy:lle käyttöön sekä jatkokehittäväksi. Kustannustarkastelussa pelkkien painojen avulla ei päästy täysin luotettaviin tuloksiin, mutta suuntaa antavina tuloksina nämä toimivat hyvin. Kustannustarkastelussa tulisi ottaa huomioon myös valmistuskustannukset sekä valmistukseen kuluva aika.</p>	
Avainsanat soodakattila, FEM, palkit, lujuuslaskenta	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Industrial Engineering and Management			
Author(s) Teppo Hankilanoja			
Title of Thesis FE-Analysis of the Buckstay Structure of Recovery- and Powerboiler			
Date	April 22, 2012	Pages/Appendices	52 + 6
Supervisor(s) Mr. Tatu Westerholm, Project Manager			
Client Organisation/Partners LEKA-hanke / Andritz Oy			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this final year project was to examine the buckstay structures in recovery- and power-boilers. The project was commissioned by Andritz Oy. The aim of this project was to model a fully functional parametric 3D-model of buckstay structures. The parametric model should be simple so that updating and changing the dimensions of the structures would be easier. These parameters were supposed to be determined in Microsoft Excel, so that it would be simpler to update these parameters and the user could use more complex equations to determine some of the parameters.</p> <p>The parametric model was built by using Ansys DesignModeler program. The 3D-model was built by using shell-elements in order to make the model as light as possible. The shell-elements were made by using a mid-surface function. The FE-analysis was made with Ansys, and the strains and supports were determined beforehand so that the user would only need to update the required parameters. Cost analysis was also made to determine which type of buckstay structure would be cheaper. The analysis was made only by comparing the weight of the buckstay structures.</p> <p>As a result of this project Andritz Oy was provided with a fully functional parametric 3D-model-and will probably develop the parametric model further. The cost analysis gave indicative results because the analysis did not contain any comparison with manufacture costs or the time used in manufacturing the structures.</p>			
Keywords Recoveryboiler, FEM, Beams, Structural Analysis			

Alkusanat

Haluan kiittää Savonia-ammattikorkeakoulun hallinnoiman LEKA-hankkeen projekti-insinööri Mikko Huuskoa, Andritz Oy:n Varkauden yksikön Engineer Manager Timo Lipposta sekä ljuuslaskija Markku Pääkköstä. Haluan kiittää myös opinnäytetyöni ohjaajaa, projektipäällikkö Tatu Westerholmia.

SISÄLTÖ

Termit ja Lyhenteet	8
1 JOHDANTO	10
1.1 Tavoitteet ja lähtökohdat	10
1.2 LEKA-hanke	10
1.3 Andritz Oy	11
2 SOODA- JA VOIMAKATTILAT	13
2.1 Soodakattila	13
2.2 Voimakattila	15
3 ANALYSOITAVA RAKENNE	16
3.1 Kehyspalkit	16
3.1.1 Poikkileikkausluokat	16
3.1.2 Taivutusmomentin kuormittama palkki	21
3.1.3 Kiepahdus	24
3.2 Keittoputkisto	27
3.3 Kiinnitinrakenne	27
3.4 Niveltappiliitos	27
3.5 Lämpötilan vaikutus rakenteisiin	29
4 3D-MALLINNUS	31
4.1 Ansys DesignModeler	31
4.2 Mallinnusmenetelmät	32
4.2.1 Solidimallinnus	32
4.2.2 Kuorielementit	33
4.2.3 Viivaelementit	33
4.3 Parametrit	34
4.4 Mallin rakentaminen	36
5 FEM	37
5.1 Mihin tarvitaan	37
5.2 FE-analyysin polku	37
5.2.1 Ongelman ymmärtäminen	38
5.2.2 Mallin rakentaminen	39
5.2.3 Mallin elementtiverkon rakentaminen	39
5.2.4 Menetelmien valinta	40
5.2.5 Analyysin teko	40

5.2.6	Jälkikäsitteily ja hyväksyminen	41
6	KUSTANNUSTARKASTELU	42
7	TYÖN TULOKSET	43
7.1	Parametrinen malli	43
7.2	FE-analyysi	48
7.3	Kustannustarkastelu	48
7.4	Parametrisen mallin hyödyt	48
8	TYÖSSÄ ESIINTYNEET ONGELMAT JA KEHITYSKOHTTEET	50
8.1	Ongelmakohdat	50
8.2	Kehityskohteet	50
	LÄHTEET	51

LIITTEET

Liite 1 Palkinmitoitusesimerkki

Liite 2 Niveltappiliitoksen laskuesimerkki

Termit ja Lyhenteet

Alla olevassa luettelossa on selitetty, mitä tässä opinnäytetyössä esiintyvät termit tarkoittavat.

h	I-palkin korkeus
b	I-palkin leveys
t_w	I-palkin uuman paksuus
t_f	I-palkin laipan paksuus
r	I-palkin hitsauksien säde
ε	Vertailuarvo poikkileikkausluokissa
$M_{c,Rd}$	I-palkin taivutuskestävyys
W_{pl}	Taivutusvastus plastisuusteorian mukaan
$W_{el,min}$	Taivutusvastus Kimmoteorian mukaan
$W_{eff,min}$	Taivutusvastus tehollisen poikkileikkauksen mukaan
f_y	Materiaalin myötöraja
$\gamma_{M0}, \gamma_{M1}, \gamma_{M2}$	Kestävyden osavarmuusluku
q	Palkkiin vaikuttava viivakuorma
ρ	Paine
γ_{max}	I-palkin maksimitaipuma
I_z, I_y	I-palkin profiilin neliömomentti akselin suhteen
M_{cr}	I-palkin kriittinen kiepahdusmomentti
$C1, C2, C3$	Kuormituksesta riippuvia vakioita
k, k_w	Tehollisen pituuden kerroin
I_w	I-palkin käyritysmisjäyhyys

I_t	Vääntöneliömomentti
G	Liukukerroin
λ	Muunnettu hoikkuus
W_y	Taivutusvastus
σ_0, σ_1	Myötöraja tietyssä lämpötilassa
t_1, t_2	Lämpötila
$F_{v,Ed}$	Niveltapin leikkauskestävyys
A	Niveltapin pinta-ala
f_{up}	Niveltapin vetomurtolujuus
M_{rd}	Niveltapin taivutuskestävyys
t	Liitetyn levyn ainepaksuus
d	Niveltapin halkaisija
c_0, c_1, c_2	Polynomikertoimia

1 JOHDANTO

1.1 Tavoitteet ja lähtökohdat

Työn lähtökohdaksi oli Andritz Oy:n ja LEKA-hankkeen yhteistyö, joka alkoi jo syksyllä 2011 esiselvitysprojektilla. Esiselvitysprojektissa tutkittiin useita eri aihealueita liittyen sooda- ja voimakattiloiden rakenteisiin. Näistä aiheista valikoitui aihe opinnäytetyölle.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tehdä toimiva ja helppokäyttöinen FE-malli sooda- sekä voimakattiloiden kehyspalkkirakenteista. Mallin avulla voi helposti tarkastella kattilarakennetta halutuilla mitoilla sekä rasituksilla. Mallin on tarkoitus olla parametrinen ja toimia Excel taulukkolaskentaohjelman avulla. Exceliin on tavoitteena myös tehdä kehyspalkin kestävyyslaskentaohjelma, jonka tuloksiin voi helposti verrata FE-analysistä saatuja tuloksia. Tuloksia vertaamalla saadaan selville kuinka paljon tulipesän paineen aiheuttamista rasituksista jakautuu tuliputkistolle ja kehyspalkkien kiinnitysrakenteille. Malli annetaan työn tilaajan Andritz Oy:n käyttöön.

1.2 LEKA-hanke

LEKA-hanke on Savonia-ammattikorkeakoulun hallinnoima ja se muodostaa Pohjois-Savon alueelle tutkimusyksikkö- ja teknologiasiirtoverkoston. Tässä verkostossa Savonia-ammattikorkeakoulu, teknilliset yliopistot, ammattiopistot ja kehitysyhtiöt toimivat läheisessä yhteistyössä teollisuuden kanssa. Hankkeen tarkoituksena on yhdistää monialaiset tieteelliset tutkimukset, käytäntö sekä tarjota mahdollisuutta jopa kansainvälisiin kumppaneihin. Hanke tarjoaa osaamista yritysten tutkimuskohteisiin, joiden sisältö suunnitellaan yritysten avulla siten, että niistä muodostetaan konkreettisia kokonaisuuksia. Tutkimustyöt toteutetaan osittain yritysympäristössä. (Savonia LEKA-esite, 2011.)

LEKA-hankkeen toiminta perustuu tutkimusyksiköihin, joissa työskentelee tutkijoita, yrityksen henkilökuntaa, opettajia sekä opiskelijoita. Tämä mahdollistaa tutkimuksen integroinnin yrityksen operatiiviseen toimintaan. Tutkimusyksiköiden toiminta on hajautettu koko Pohjois-Savoon. Savonia-ammattikorkeakoulun konetekniikan alan tutkimusten painopisteinä ovat tuottavuuden kehittäminen, digitaaliset työkalut ja menetelmät verkostomaisessa tuotannossa elinkaari liiketoiminta huomioiden. LEKA-hanke pyrkii toiminnallaan parantamaan Pohjois-Savon teknologiayritysten

kilpailukykyä kansallisilla ja kansainvälisillä markkinoilla. Toiminnalla pyritään myös lisäämään osaamista ja yhteistyötä eri toimijoiden välille samalla varmistuen ammattitaitoisen työvoiman saatavuuden. (Savonia LEKA-esitys, 2011.)

Yritysten näkökulmasta LEKA:n tuloksia ovat hankkeen tuottama tutkimus- sekä tuotekehitystuki, teknologiansiirto, prototyyppien tuottaminen, tuoteideoiden pilotointi, kustannustehokkuuden ja valmistettavuuden parantaminen sekä muut tuotannon kehittämistä koskevat asiat. Hanke tuottaa yrityksille selvää lisäarvoa tutkimuksista saatujen tulosten avulla ja yritykset saavat myös nopeasti käyttöönsä mittavat kehitysresurssit. LEKA-hanke siirtää tutkimuksissaan saadut tulokset myös opetukseen, josta hyötyvät opiskelijoiden lisäksi yritykset, jotka saavat jatkossa entistä osaavampaa työvoimaa. (Savonia LEKA-esitys, 2011.)

1.3 Andritz Oy

Andritz Oy on yksi maailman johtavista sellu- ja paperiteollisuuden järjestelmien, laitteiden ja palvelujen toimittajista. Sen tuotealueita ovat puunkäsittely, kuituprosessit, kemikaalien talteenotto, voimakattilat ja massankäsittely. Andritz Oy juontaa juurensa Kone Wood ja Ahlström Machinery Oy:öön. Vuonna 2002 yhtiö tuli osaksi kansainvälistä teknologiayritystä, Andritzia. (Andritz Oy in Finland.)

Yhtiön liiketoimintaan sisältyy yhä enemmän erikseen räätälöityjä ja teknologisesti kehittyneitä kulutus- ja varaosia. Palvelut, jotka parantavat asiakkaiden tuotannon tehokkuutta, muodostavat merkittävän kulmakiven yhtiön strategiassa. Andritz Oy:n pääkonttori sijaitsee Helsingissä, ja muita toimipisteitä on Hollolassa, Kotkassa, Savonlinnassa, Tampereella sekä Varkaudessa. (Andritz Oy in Finland.)

Andritz Oy:n yhtenä tuotantolaitoksena toimii Savonlinna Works Oy, joka kokoonpanee ja valmistaa kaikkea aina varaosista kokonaisiin yksiköihin. Toisena tuotantolaitoksena toimiva Varkaudessa sijaitseva Warkaus Works Oy valmistaa paineenkestäviä komponentteja sooda- ja voimakattiloihin. Andritz Oy omistaa Warkaus Works Oy:n puoliksi Foster Wheeler Energia Oy:n kanssa. (Andritz Oy in Finland.)

Andritz Oy:n osaaminen perustuu yli tuhannen korkeasti koulutetun työntekijän sitoutumiseen. Tämä takaa Andritz Oy:lle hyvän asiakastyytyvyyden sekä johtavan aseman tällä alalla. Asiakkaat saavat asiantuntevaa ja kokenutta palvelua, sillä Andritz Oy pyrkii täyttämään asiakkaan tarpeet täysin uusimmalla, energiatehokkaimmalla sekä ympäristöystävällisellä teknologialla. (Andritz Oy in Finland.)

2 SOODA- JA VOIMAKATTILAT

Yleisesti kattilarakenteet voidaan jakaa polttolaitteeseen, tulipesään ja kattilaan. Polttolaitteen tehtävänä on saada käytettävä polttoaine palamaan tehokkaasti hyvällä hyötysuhteella ja palamisen tulisi olla tasaista ja tuottaa haluttu teho. Tehoa tulisi pystyä säätämään tarpeen mukaan. Polttolaitteet ovat yleensä suunniteltu vain yhdelle polttoaineelle. (Bioenergiatieto.fi, Polttotekniikasta yleisesti.)

Tulipesä ympäröi tilaa, jossa palaminen tapahtuu. Tulipesä tulee suunnitella ja mitoittaa polttolaitteen koon mukaan, jolloin polttolaitteesta lähtevien liekkien tulisi mahtua tulipesään ja jotta lieskat eivät kuumentaisi jäädytettyjä pintoja. Palamiskaasujen on myös viivyttävä tarpeeksi kauan tulipesässä, jotta palamisreaktio pääsee loppuun. Kattila toimii ns. vedenkeittimenä ja sitä käytetään niissä laitteissa, joissa talteenotto on tärkeää. Lämmön talteenotto tapahtuu savukaasuista. (Bioenergiatieto.fi, Polttotekniikasta yleisesti)

2.1 Soodakattila

Soodakattilan tehtävät on listattu seuraavan sivun kuvassa 1. Soodakattiloiden periaatteena on mustalipeästä saatavan energian hyödyntäminen ja keittokemikaalien talteenotto. Tämä kuitenkin edellyttää, että mustalipeän sisältämä orgaaninen ja epäorgaaninen aines erotetaan toisistaan. Soodakattilat ovat kehittyneet viime vuosina yksiköiden koossa, hyötysuhteessa sekä päästöissä. Erityisesti kuiva-ainepitoisuuden nostaminen on vähentänyt päästöjä ja nostanut hyötysuhdetta. (Bioenergiatieto.fi, Soodakattila.)

Soodakattila koostuu pystysuorasta kattilasta eli tulipesästä, jonka pohjalla on pelkistävä ja ylempänä hapettava vyöhyke. Esilämmitetty mustalipeä syötetään tulipesän pelkistymisvyöhykkeeseen, jossa mustalipeä sitten hajoaa pieniksi pisaroiksi. Pisanan tulee kuitenkin olla tarpeeksi suuri, jotta se tippuu tulipesän pohjalle eikä lähde savukaasuvirran mukaan. Tulipesän pohjalla eli pelkistävällä vyöhykkeellä tapahtuu talteenotto eli regeneraatio. (Bioenergiatieto.fi, Soodakattila.)

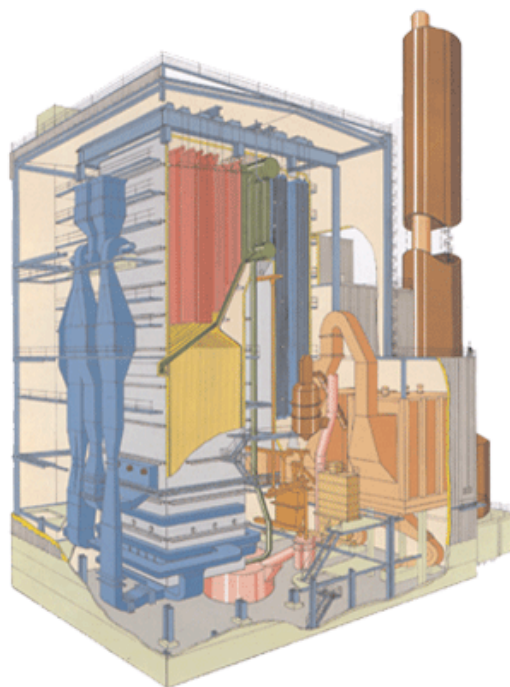
Tulipesän pohjalla olevaan kekoon syötetään primääri-ilmaa vain sen verran, että keon lämpötila pysyy haluttuna. Talteenoton tavoitteena on pelkistää natriumsulfaatti natriumsulfidiksi. Hyvällä soodakattilalla natriumsulfaatista saadaan talteen 98 - 99

prosenttia (reduktioaste). Pääasiassa natriumsulfidista ja natriumkarbonaatista koostuva sula ohjataan kattilan pohjalta liuotinsäiliöön, jossa kemiallisten prosessien avulla kemikaalit saadaan takaisin sellun valmistukseen. (Bioenergiatieto.fi, Soodakattila.)

Kattilan pohjalla hiili ei pala täydellisesti vaan kaasuuntuu osin hiilimonoksidiksi. Kattilan yläosassa sijaitsevissa sekundaari- ja tertiääri-ilmansyöttökohdissa on hapettavat olosuhteet, joiden avulla poltetaan loput orgaaniset aineet. Tulipesästä kulkeutuu savukaasujen mukana huomattavia määriä tuhkaa. Sulana tuhka muodostaa vaikeasti puhdistettavia kerrostumia lämpöpinnoille. Tästä syystä kattilan täytyy olla tarpeeksi suuri, jotta tuhka ehtii laskea riittävästi ennen tulistimia. (Bioenergiatieto.fi, Soodakattila.)

Soodakattilan tehtävät

- Keittokemikaalien talteenotto ja regenerointi
- Orgaanisen aineksen ympäristöystävällinen poltto
- Lämmön talteenotto



KUVA 1. Soodakattilan tehtävät (Knowpulp Demo)

2.2 Voimakattila

Leijupolttotekniikasta on tullut yksi tärkeimmistä keinoista polttaa kiinteitä polttoaineita ympäristöystävällisesti. Suomessa menetelmää kehiteltiin 1960-luvun lopussa kaasutukseen ja kaasunkehitykseen. Kattilatekniikkaan leijupoltoa alettiin kehittää 1970-luvulla ja kaupalliseksi se saatiin 70-luvun lopulla. Suomi on ollut yksi maailman johtavia polttomenetelmien kehittäjiä. (Bioenergiatieto.fi, Leijupoltto.)

Leijupoltossa kiinteä polttoaine joutuu tekemisiin kuumen leijutushiekan kanssa, jolloin aineen- ja lämmönsiirto on tehokasta. Leijupoltto soveltuu erinomaisesti myös huonolaatuisille polttoaineille. Leijupolton etuna voidaan pitää mahdollisuutta polttaa monia erilaisia polttoaineita. Polttoainetta ei tarvitse juurikaan esikäsitellä. (Bioenergiatieto.fi, Leijupoltto.)

Leijupoltto on mahdollista toteuttaa joko kerros- tai kiertoleijuna, joista jälkimäinen vaatii tulipesän perään syklonin, jolla hiukkaset erotellaan ja palautetaan takaisin tulipesään. Kerrosleiju soveltuu paremmin märille tai matalalämpöarvoisille polttoaineille. Lisäksi se on tekniikkansa puolesta halvempi ja mahdollistaa paremmin kattilamuutokset. (Bioenergiatieto.fi, Leijupoltto.)

Leijukerroksen lämpötila on alhainen, jotta tuhka ei pehmenisi. Jos tuhka pehmenee, se sitoo petimateriaalia ja näin ollen leijutus ei onnistuisi. Kerrosleijussa käytettävä hiekka on halkaisijaltaan 1 - 3 mm ja kiertoleijussa alle 0,5 mm. Kerrosleijussa pedin korkeus on 0,5 - 1 metriä. Korkealämpökapasiteettinen peti mahdollistaa huonolaatuisen, matalalämpöarvoisen ja kostean polttoaineen polton. Palamisessa muodostuva tuhka kulkeutuu pääosin savukaasun mukana. Tämän vuoksi leijupoltto vaatii yleensä kunnolliset tuhkanerottimet. Tuhka, joka tippuu pedin alapuolelle, poistetaan sulkusyöttimillä. Kerrosleijussa polttoaine syötetään kerroksen päälle ja kiertoleijussa polttoaine syklonin palautuskanavaan. Primääripolttoilma (leijutusilma) syötetään pedin alta. (Bioenergiatieto.fi, Leijupoltto.)

3 ANALYSOITAVA RAKENNE

Analysoitavaan rakenteeseen kuuluu sooda- ja voimakattiloiden kehyspalkit ja niiden kiinnitysrakenteet. Palkkien kiinnitysrakenne eroaa kattilatyypin mukaan. Analyysissa on tavoitteena selvittää kehyspalkkien kiinnitysrakenteen sekä keittoputkiston jäykistävä vaikutus.

3.1 Kehyspalkit

Tässä työssä lujuustarkastelun kohteena on soodakattiloissa sekä voimakattiloissa käytettävät kehyspalkit. Kehyspalkkeihin kohdistuu soodakattilan tulipesän paine, jota kuitenkin ottaa vastaan myös soodakattilan keittoputkisto sekä kehyspalkin kiinnitysrakenteet. Kehyspalkkien rasitukset lasketaan tasaisesti kuormitetun kaksitukisen palkin teorian mukaan. Seinän sekä kiinnitysrakenteen tuoma jäykistävä vaikutus lisätään laskuihin mukaan kertoimena, joka saadaan vertaamalla FE-analyysistä saatua tulosta käsinlaskettuun tulokseen.

Seuraavaksi on selvitetty järjestyksessä, mitä palkin mitoituksessa tulee ottaa huomioon, mistä nämä tiedot voi löytää sekä miten niitä käytetään. Työn liitteenä 1 on laskuesimerkki, jossa käydään IPE 400 palkkiprofiiliin avulla läpi palkin mitoitus annettujen kaavojen avulla. Laskuesimerkki on vain esimerkki, kuinka kaavoja käytetään, eikä sitä ole käytetty oikeaa työtä tehtäessä.

3.1.1 Poikkileikkausluokat

Poikkileikkausluokituksen tarkoituksena on helpottaa laskijaa tunnistamaan, missä laajuudessa poikkileikkausten paikallinen lommahdus rajoittaa poikkileikkausten kestävyyttä sekä kiertymiskykyä

Standardin SFS-EN 1993-1-1 kohdan 5.5.2 mukaan sauvat jaetaan niiden osien hoikkuuden perusteella neljään eri poikkileikkausluokkaan PL1, PL2, PL3 ja PL4.

Poikkileikkausluokka 1 (PL1)

Tämän luokan poikkileikkaukset ovat niitä, joissa plastisuusteorian mukaisen tarkastelun vaatima, riittävän kiertymiskyvyn omaava nivel voi syntyä ilman, että poikkileikkauksen kestävyyttä tarvitsee pienentää. (SFS-EN 1993-1-1, 2005, 42)

Poikkileikkausluokka 2 (PL2)

Tämän luokan poikkileikkaukset ovat niitä, joissa voi kehittyä plastisuusteorian mukainen sauvan taivutuskestävyys, mutta joilla paikallinen lommahdus rajoittaa kiertymiskykyä. (SFS-EN 1993-1-1, 2005, 42)

Poikkileikkausluokka 3 (PL3)

Tämän luokan poikkileikkaukset ovat niitä, joissa sauvan äärimmäisessä puristetussa reunassa laskettu jännitys voi saavuttaa myötörajan, mutta paikallinen lommahdus estää plastisuusteorian mukaisen momenttikestävyyden kehittymisen. (SFS-EN 1993-1-1, 2005, 42)

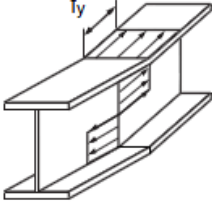
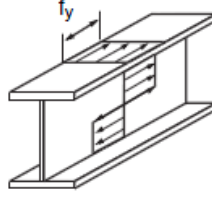
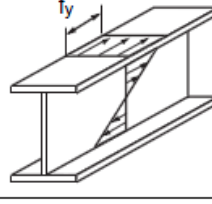
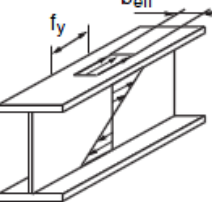
Poikkileikkausluokka 4 (PL4)

Tämän luokan poikkileikkaukset ovat niitä, joissa paikallinen lommahdus esiintyy ennen kuin myötöraja saavutetaan poikkileikkauksen jossakin pisteessä. (SFS-EN 1993-1-1, 2005, 42)

Kappaleen eri osat voivat kuulua eri poikkileikkausluokkiin. Esimerkiksi I-palkin uuma ja laippa voivat kuulua eri poikkileikkausluokkiin. Jos esimerkiksi uuman poikkileikkausluokka on 3 ja palkin laipan poikkileikkausluokka on 1, voidaan kokonaisuus luokitella poikkileikkausluokka 2:n mukaan ns. teholliseksi poikkileikkaukseksi. Tehollisen poikkileikkauksen laskemiseen löytyy ohjeet standardista EN 1993-1-5. (SFS-EN 1993-1-1, 2005, 42)

Taulukossa 1 on esitetty, miten jännitys jakauma ilmenee eri poikkileikkausluokissa ja mitä laskentatapaa käytetään kunkin poikkileikkausluokan mitoittamisessa.

TAULUKKO 1. Poikkileikkausluokkien laskentaperiaatteet. (Ongelin, Valkonen, 2010, 79)

Poikkileikkausluokka	Kestävyyden laskentatapa	Voimasuureiden laskentatapa	Jännitysjakautuma, kun kestävyys on saavutettu
1	plastisuusteoria	plastisuusteoria	
2	plastisuusteoria	kimmoteoria	
3	kimmoteoria	kimmoteoria	
4	tehollinen poikkileikkaus	kimmoteoria	

Poikkileikkausluokkien selvittämiseen erilaisten profiilien perusteella on esitetty SFS EN-1993-1-1 -standardissa ohjeet. Taulukoista nähdään, millä perusteella esimerkiksi tässä työssä käytetty I-palkki luokitellaan. Taulukossa 2 on esitetty palkin luokitus uuman mittojen perusteella ja taulukossa 3 on esitetty luokitus palkin laipan mittojen perusteella. Luokitus kannattaa tehdä vertaamalla aina saatua tulosta ylhäältä alaspäin eli tarkastaa ensin, täyttyykö poikkileikkausluokka 1 vaatimukset ja sitten mennä aina yksi luokka kerrallaan alaspäin. Jos saadut tulokset eivät täytä edes poikkileikkausluokka 3:n vaatimuksia, käytetään silloin poikkileikkausluokkaa 4. (SFS-EN 1993-1-1, 2005, 42)

TAULUKKO 2. Kahdelta reunalta tuettujen taso-osien poikkileikkausluokat. (SFS-EN 1993-1-1, 2005, 45)

Kahdelta reunalta tuetut puristetut taso-osat						
				Taivutus ko. akselin suhteen		
				Taivutus ko. akselin suhteen		
Poikkileikkausluokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat			
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	$kun \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $kun \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	$kun \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $kun \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 124\varepsilon$ ¹⁾	$c/t \leq 42\varepsilon$ ²⁾	$kun \psi > -1: c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ ³⁾ $kun \psi \leq -1^3): c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

TAULUKKO 3. Laippojen poikkileikkausluokat (SFS-EN 1993-1-1, 2005, 46)

Ulokkeelliset laipat						
Valssatut profiilit			Hitsatut profiilit			
Poikkileikkausluokka	Puristetut taso-osat		Puristetut ja taivutetut taso-osat			
			Vapaa reuna on puristettu		Vapaa reuna on vedetty	
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$		$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
2	$c/t \leq 10\epsilon$		$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$ ⁴⁾		$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_{\sigma}}$ ⁵⁾ k_{σ} ks. EN 1993-1-5			
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Esimerkkinä voidaan käyttää IPE 450 palkkia, jolle määritetään poikkileikkausluokka.

IPE 450 palkin mitat ovat seuraavat:

$H = 450$ mm, $B = 19,0$ mm, $t_w = 9,4$ mm, $t_f = 14,6$ mm ja $r = 21$ mm.

Lasketaan ensin uumalle poikkileikkausluokka seuraavasti:

$$\frac{c}{t} = \frac{H-2(tf+r)}{t_w} = 40,29. \quad (2.1)$$

Saatu tulosta verrataan sitten taulukossa 2 annettuun ϵ :n arvoon, joka valitaan materiaalin myötörajan mukaan, ja poikkileikkausluokan kertoimen tulokseen. Tässä esimerkissä käytetään materiaalin myötörajana 355, jolloin ϵ on 0.81. Näin ollen verrattava luku poikkileikkausluokka 1:ssä on

$$72 * \epsilon = 58,32. \quad (2.2)$$

Tuloksesta nähdään, että c/t -arvo on vertailulukua pienempi, joten tämän palkin uuma kuuluu poikkileikkausluokkaan 1.

Samalla tavalla lasketaan laipan poikkileikkausluokka, mutta laipalle käytetään taulukon 3 tietoja. Taulukossa 3 vertailuarvoksi on merkitty 9ε. Taulukosta saadaan seuraavanlainen tulos:

$$\frac{c}{t} = \frac{\frac{B}{2} - \left(\frac{tw}{2} + r\right)}{tf} = 4,75. \quad (2.3)$$

Koska tulos on vertailuarvoa pienempi, on myös laipan poikkileikkausluokka 1. Näin ollen kyseinen palkki kuuluu molemmilta osin ensimmäiseen poikkileikkausluokkaan.

3.1.2 Taivutusmomentin kuormittama palkki

Palkin taivutusmomentti sekä poikkileikkauksen leikkausvoima voidaan laskea, jos tunnetaan palkkiin kohdistuvat voimat sekä tukireaktiot. Standardin EN 1993-1-1 kohdasta 6.2.5 löytyy kaavat palkin taivutuskestävyydelle poikkileikkausluokan mukaan. Kaavoille on seuraavanlaiset muodot:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{poikkileikkausluokat 1 ja 2} \quad (2.4)$$

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el} \min f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{poikkileikkausluokka 3} \quad (2.5)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff} \min f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{poikkileikkausluokka 4} \quad (2.6)$$

(SFS-EN 1993-1-1, 2005, 53)

Kaavoissa esiintyvät γ_{M0} arvot on otettu suoraan standardista EN 1993-1-1 kohdasta 6.1 huomautus 2B, jossa suositellaan rakennuksille seuraavia arvoja:

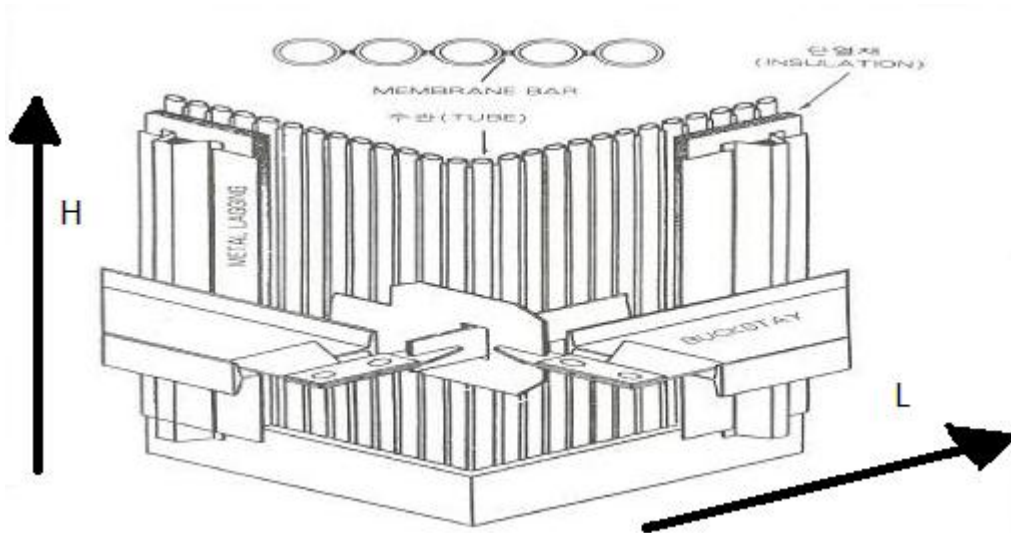
$$\gamma_{M0} = 1,00$$

$$\gamma_{M1} = 1,00$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

(SFS-EN 1993-1-1, 2005, 48; 53)

Kaavoilla 2.4, 2.5 ja 2.6 lasketaan poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo yhden pääjäyhysakselin suhteen tapahtuvassa taivutuksessa. Palkkiin vaikuttava momentti saadaan ratkaistua palkkiin kohdistuvan voiman avulla. Kuvassa 2 on esitetty eräänlainen kehyspalkkirakenne. Nuolet H ja L kuvastavat pituuden suuntaa.



KUVA 2. Kehyspalkit kiinnitettynä keittoputkistoon (Blog.Daum)

Työn tapauksessa palkkiin kohdistuu viivakuorma q_0 , joka on nuolen H suuntainen kuvassa 2. Viivakuorma q_0 saadaan laskettua kaavalla

$$q = p * H \quad (2.7)$$

jossa p on tulipesän paine ja H on leveys, jolle paine kohdistuu. Tässä tapauksessa leveydellä tarkoitetaan kehyspalkkien väliä. Viivakuorma on siis kahden palkin välille kohdistuva kuorma yhtä mittayksikköä kohti. Kun viivakuorma on saatu laskettua paineen avulla, voidaan yhteen palkkiin vaikuttava taivutusmomentti laskea soveltamalla Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus -kirjan taulukkoa 3.11.

Taulukossa on esitetty erilaisia kuormitustapauksien maksimimomentin kaavoja, joista tähän työhön parhaiten sopii tasaisen kuorman kaava

$$M_{cr} = \frac{FL}{8} \quad (2.8)$$

(Kaitila, ym. 2010, 65.)

Mutta koska laskussa käytetään voimana viivakuormaa ja täytyy tietää, miten pitkälle matkalle tämä viivakuorma vaikuttaa, saadaan voima F kaavasta

$$F = q * L \quad (2.9)$$

jossa L on palkin pituus. Jotta saadaan laskettua koko palkin pituudelle vaikuttava voima, täytyy kaava 2.9 yhdistää kaavaan 2.8 voiman F paikalle. Kun nämä kaavat yhdistetään, saadaan maksimimomentin kaava muotoon

$$M_{cr} = \frac{q * L^2}{8} \quad (2.10)$$

Maksimimomentin laskemiseen lisätään vielä haluttu osavarmuuskerroin, jolla lopullinen tulos kerrotaan. Osavarmuuskerroin ottaa huomioon mm. epäedullisen kuormapoikkeaman ja mallintamisen epätarkkuuden. Kun tiedossa on sekä maksimimomentti että taivutuskestävyys, voidaan palkille laskea käyttöaste. Käyttöaste kertoo, kuinka paljon palkin kapasiteetista käytetään hyödyksi.

Momentin aiheuttama taipuma saadaan Lujuusopin Perusteet -kirjan sivulla 443 olevan taulukko 1:n kuormitustapaus 11:n mukaan. Taulukossa on annettu maksimitaipumalle kaava

$$y_{max} = \frac{5q * L^4}{384 * E * I} \quad (2.11)$$

jossa I on palkin profiilin neliömomentti taipuman suuntaan ja E on käytetyn aineen kimmokerroin laskentalämpötilassa. Lämpötilan vaikutus kimmokertoimeen on selvitetty kohdassa 3.5. (Outinen, Salmi, Vulli 2007, 443.)

Taipumaa verrataan ennalta määrättyyn sallittuun taipumaan. Jos laskettu taipuma on pienempi kuin sallittu taipuma, voidaan tulos hyväksyä. Mutta jos taipuma on sallittua taipumaa suurempi, täytyy tehdä muutoksia laskelmiin ja rakenteisiin, jotta tavoitteisiin päästään.

3.1.3 Kiepahdus

Palkin kiepahduskestävyyden tarkastelu aloitetaan standardin 1993-1-1 mukaan selvittämällä kyseiselle palkkiprofiilille kiepahduskäyrän avulla epätarkkuustekijä α_{LT} . Kiepahduskäyrä saadaan taulukosta 4 valitsemalla ensin oikeanlainen profiili ja sen jälkeen laskemalla palkin korkeuden suhde leveyteen.

TAULUKKO 4. Kiepahduskäyrä (SFS-EN 1993-1-1, 2005, 66)

Poikkileikkaus	Rajat	Kiepahduskäyrä
Valssatut I-profiilit	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Hitsatut I-profiilit	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Muut profiilit	-	d

Epätarkkuustekijä valitaan taulukosta 5 kiepahduskäyrän perusteella. Esimerkiksi jos kiepahduskäyräksi on saatu kiepahduskäyrä a, valitaan taulukosta 5 a:n mukainen arvo, eli tässä tapauksessa 0,21.

TAULUKKO 5. Epätarkkuustekijä (SFS-EN 1993-1-1, 2005, 66)

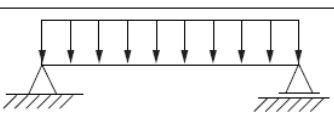
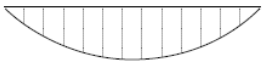
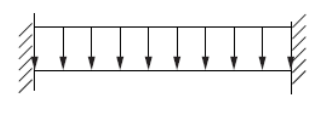

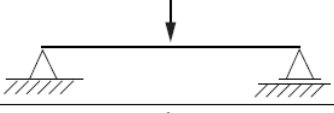

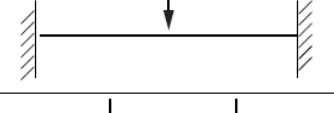
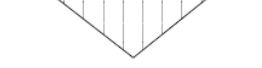
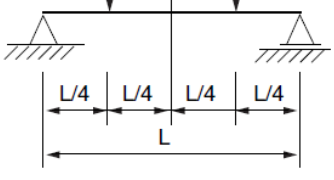

Kiepahduskäyrä	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Kirjan Teräsrakenteiden Suunnittelu ja Mitoitus sähköisen liitteen L3.6:n mukaan saadaan kaksoissymmetriselle I-palkille kohdan 2.12 mukainen kaava kriittiselle kiepahdusmomentille. Kaavassa olevaa kerrointa C_3 ei kuitenkaan käytetä, sillä sitä ei tarvita kaksoissymmetrisissä poikkileikkauksissa. Kaksoissymmetrisillä profiileilla myös z_j on merkityksetön, sillä sen arvo standardin mukaan on nolla.

$$M_{Cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{L_{Cr}^2} \left\{ \sqrt{\frac{k I_w}{k_w I_z} + \frac{L_{Cr}^2 G I_T}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right\} \quad (2.12)$$

Yllä olevassa kaavassa 2.12 C_1 , C_2 , C_3 sekä k ovat kertoimia, jotka saadaan taulukosta 6. k -arvo saadaan vertaamalla rasiustapausta *EULERin* nurjahdustapauksiin, joiden avulla saadaan kerroin palkin pituudelle. *EULERin* nurjahdustapauksista huomataan, että esimerkiksi yhdestä päästä tiukasti kiinni oleva sauva saa kertoimeksi 2 ja molemmista päistä jäykästi tuettu sauva saa kertoimekseen 0.5. k :n arvon perusteella saadaan kaikki C :n kertoimet taulukosta 6.

TAULUKKO 6. Tehollisen pituuden kertoimet (Ongelin ja Valkonen 2010, 145)

Kuormitus ja tukiehdot	Taivutusmomenttipinnan muoto	k	Tekijöiden arvot		
			C_1	C_2	C_3
		1,0 0,5	1,132 0,972	0,459 0,304	0,525 0,980
		1,0 0,5	1,285 0,712	1,562 0,652	0,753 1,070
		1,0 0,5	1,365 1,070	0,553 0,432	1,730 3,050
		1,0 0,5	1,565 0,938	1,267 0,715	2,640 4,800
		1,0 0,5	1,046 1,010	0,430 0,410	1,120 1,890

Kaavaan 2.12 saadaan arvo k_w :lle seuraavan sivun taulukosta 7. Arvo valitaan palkin tuentatapauksen mukaan. Tässä tapauksessa kiertymää ei ole estetty palkin kummastakaan päästä vaan se on vapaa. Tässä tuentatapauksessa vasemmasta sarakkeesta valitaan keskimäinen tapaus. Koska poikkipinnan käyristyminen on estetty palkin molemmista päistä, valitaan yläsarakeesta vasemmanpuoleisin sarake. Näin ollen k_w arvoksi saadaan 0.5.

TAULUKKO 7. Tehollisen pituuden kertoimia eri tuentatapauksille (Ongelin ja Valkonen 2010, 145)

Tuentatapaukset sauvan päissä pysty akselin ympäri tapahtuvan kiertymän suhteen	Poikkipinnan käyristyminen estetty sauvan molemmissa päissä	Poikkipinta voi käyristyä sauvan molemmissa päissä	Poikkipinnan käyristyminen estetty sauvan toisessa päässä, toinen pää voi käyristyä
Kiertymä estetty sauvan molemmissa päissä	$k = 0,5$ $k_{\omega} = 0,5$	$k = 0,5$ $k_{\omega} = 1,0$	$k = 0,5$ $k_{\omega} = 0,7$
Kiertymä vapaa sauvan molemmissa päissä	$k = 1,0$ $k_{\omega} = 0,5$	$k = 1,0$ $k_{\omega} = 1,0$	$k = 1,0$ $k_{\omega} = 0,7$
Kiertymä estetty sauvan toisessa päässä, toinen pää voi kiertyä vapaasti	$k = 0,7$ $k_{\omega} = 0,5$	$k = 0,7$ $k_{\omega} = 1,0$	$k = 0,7$ $k_{\omega} = 0,7$

Taivutettujen sauvojen muunnetun hoikkuuden ollessa alle 0.4 voidaan kiepahdus jättää huomioimatta ja tarkastella kestävyyttä ainoastaan taivutuksen kannalta. Muunnetulle hoikkuudelle standardin EN 1993-1-1 kohdassa 6.3.2.2 on esitetty seuraavanlainen kaava

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (2.13)$$

jossa W_y on plastinen taivutusvastus, joka saadaan valmistajan tarjoamista taulukoista. Taivutusvastus voidaan myös laskea itse sen mukaan mitä teoriaa noudatetaan, kimmoteoriaa vai plastisuusteoriaa. Molemmilla teorioilla on oma laskukaavansa. Laskentalujuus f_y saadaan standardissa EN 10028-2 olevasta taulukosta 4, jossa on esitetty venymisrajan $R_{p0,2}$ vähimmäisarvot korkeissa lämpötiloissa. Taulukon arvojen väliarvot voidaan laskea kaavalla

$$f_y = \sigma_0 - \frac{\Delta\sigma}{\Delta t} * (tx - t_0) \quad (2.14)$$

Kaavassa 2.14 σ_0 tarkoittaa selvitetävän lämpötilan lähimmän alemman lämpötilan t_0 mukaista myötörajaa. Δt on niiden kahden lämpötilan erotus, joiden väliin selvitetävä lämpötila lasketaan. $\Delta\sigma$ on kahden lämpötilan myötörajojen erotus. tx on lämpötila, jolle halutaan selvittää myötöraja. Esimerkiksi jos selvitetävä lämpötila on 333 C°, käytetään standardin EN 10028-2 taulukosta lämpötilojen 300 C° ja 350 C° arvoja. (Teräsinfo, Teräsrakenneosat.)

3.2 Keittoputkisto

Yksinkertaisesti sanottuna kattilan seinä, joka ympäröi tulipesää, on keittoputkistoa. Keittoputkisto muodostaa nykyaikaisissa kattiloissa tulipesän ympärille kaasutiiviin putkiseinämän. Putkiseinä on nk. membraaniseinämää, joka valmistetaan hitsaamalla höyrystinputkien väliin teräslevyä. Tarjolla on kuitenkin mahdollisuus käyttää höyrystinputkina nk. eväputkia. Eväputket vaativat vähemmän hitsausta, mutta ovat huomattavasti kalliimpia. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen ja Pakkanen 1994, 173.)

3.3 Kiinnitinrakenne

Kehyspalkin kiinnitinrakenne on erilainen sooda- ja voimakattiloissa. Molemmissa kattiloissa kiinnitinrakenne hitsataan suoraan kiinni keittoputkistoon, jolloin kiinnitinrakenne ottaa vastaan keittoputkiston rasitukset ja välittää ne kehyspalkeille. Kiinnitinrakenne pitää kehyspalkkia irti keittoputkistosta, jolloin ne ovat viileämmässä ja näin ollen myös jäykempiä. Kiinnitinrakenteiden jakoväli riippuu kattilan tulipesän paineesta.

3.4 Nivel tappiliitos

Ohjeet niveltapin mitoittamiseen standardin 1993-1-8 mukaan on esitetty taulukossa 8. Niveltappeja mitoittaessa oletetaan, että niveltapin ja levyjen välisistä tukireaktioista aiheutuvat voimat jakaantuvat tasan jakaantuneeksi kuormaksi kontaktipinnalla sivulla 29 olevan kuvan 3 mukaan.

TAULUKKO 8. Niveltappiliitoksen mitoitus (EN 1993-1-8, 2005, 40)

Murtumismuoto	Mitoitusvaatimukset
Niveltapin leikkauskestävyys	$F_{v,Rd} = 0,6 A f_{up} l / \gamma_{M2} \geq F_{v,Ed}$
Levyn ja niveltapin reunapuristus	$F_{b,Rd} = 1,5 t d f_y l / \gamma_{M0} \geq F_{b,Ed}$
Tämän vaatimukset tulee myös olla voimassa, kun niveltapin tulee olla vaihdettavissa.	$F_{b,Rd,ser} = 0,6 t d f_y l / \gamma_{M6,ser} \geq F_{b,Ed,ser}$
Niveltapin taivutuskestävyys	$M_{Rd} = 1,5 W_{et} f_{yp} l / \gamma_{M0} \geq M_{Ed}$
Tämän vaatimukset tulee myös olla voimassa, kun niveltapin tulee olla vaihdettavissa.	$M_{Rd,ser} = 0,8 W_{et} f_{yp} l / \gamma_{M6,ser} \geq M_{Ed,ser}$
Niveltapin yhdistetty leikkaus- ja taivutuskestävyys	$\left[\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right]^2 + \left[\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right]^2 \leq 1$
<p>d on niveltapin halkaisija;</p> <p>f_y on pienempi arvoista: niveltapin myötöraja ja liitetyn levyn myötöraja;</p> <p>f_{up} on niveltapin vetomurtolujuus;</p> <p>f_{yp} on niveltapin myötöraja;</p> <p>t on liitetyn levyn aineenpaksuus;</p> <p>A on niveltapin pinta-ala.</p>	

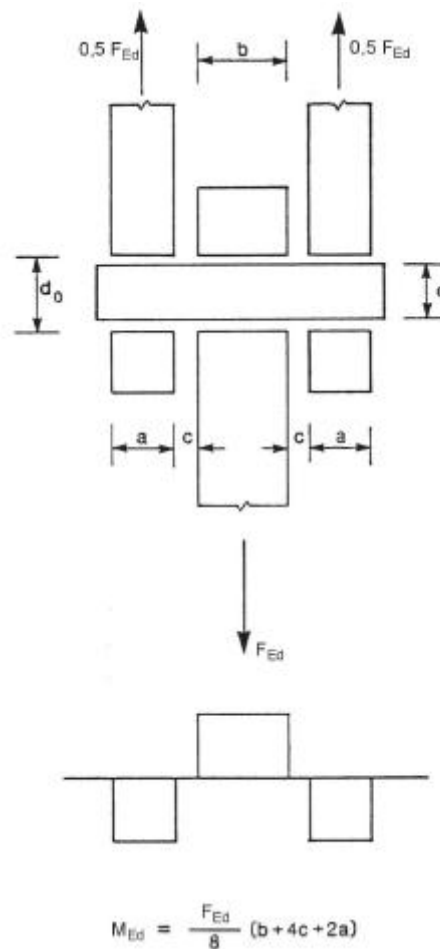
Tärkeimpinä asioina niveltapin mitoittamisessa on laskea tapin poikkileikkauksen leikkauskestävyys sekä tapin taivutuskestävyys. Niveltapin leikkauskestävyys lasketaan kaavalla

$$F_{v,Ed} = \frac{0,6A*f_{up}}{\gamma_{M2}} \quad (2.15)$$

Niveltapin taivutuskestävyys taas lasketaan seuraavasti:

$$M_{Rd} = \frac{1,5*t*d*f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.16)$$

Liitteenä 2 on yksinkertaisen niveltappiliitoksen laskuesimerkki.



KUVA 3. Niveltappiliitoksen kuormien jakaantuminen
(SFS-EN 1993-1-8, 2005 ,40)

3.5 Lämpötilan vaikutus rakenteisiin

Kattiloiden eri rakenteissa olevat lämpötilat vaikuttavat oleellisesti laskuista saataviin tuloksiin. Lämpötila vaikuttaa materiaalin fysikaalisiin ominaisuuksiin, kimmokertoimeen E , lämpölaajenemiseen β , lämmönjohtavuuteen λ sekä ominaislämpökapasiteettiin C . Uusien arvojen laskeminen polynomikertoimien ja lämpötilan perusteella on esitetty standardin EN-13480-3 + A1liitteessä G. Liitteestä G löytyvä polynomitaulukko kimmokertoimen laskemiseen on esitetty taulukossa 9.

TAULUKKO 9. Polynomikertoimet kimmomoduulille E (SFS-EN 13480-3 + A1 Liite G, Taulukko G.3-2)

Teräsryhmä	Polynomikertoimet		
	c_0	c_1	c_2
1 - 4, 5.1 ja 5.2	213,16	-6.91 E-2	-1,824 E-5
5.3, 5.4, 6 ja 7	215,44	-4.28 E-2	-6,185 E-5
8.1 ja 8.2	201,66	-8.48 E-2	0

Kimmokerroin voidaan laskea myös reduktiokertoimen avulla. Reduktiokertoimet löytyvät Teräsrakenneyhdistys Ry:n tekemästä Palotekninen mitoitus -oppaasta. Oppaassa on esitetty taulukossa reduktiokertoimet eri lämpötiloille, aina 1200 asteeseen saakka. Oppaassa olevan taulukon arvojen väliarvot saadaan interpoloimalla. Tässä työssä päädyttiin käyttämään polynomikertoimilla saatavaa kimmokerrointa. (Palotekninen Mitoitus OSA 7, Teräsrakenneyhdistys R.Y, 18) (SFS-EN 13480-3 + A1, 2002, 476)

Lämpötila vaikuttaa myös rakenteissa käytettyihin materiaalien myötörajaan. Myötörajaa tarvitaan selvitetäessä rakenteen kestoa. Myötörajat eri lämpötiloilla voidaan määrittää mm. käyttämällä standardissa EN-10028-2 olevia taulukoita. Standardissa on esitetty yleisimpien eurooppalaisten materiaalien myötörajat tietyissä lämpötiloissa. Taulukoiden avulla voi laskea taulukoiden väliarvojen myötörajat työn kaavalla 2.14.

(SFS-EN-10028-2, 2003)

4 3D-MALLINNUS

4.1 Ansys DesignModeler

Ansys DesignModeler on yhteensopiva kaikkien käytetyimpien CAD-ohjelmistojen kanssa mahdollistaen saumattoman tiedostojen sekä parametrien siirron ohjelmien välillä. Tiedostojen siirron jälkeen parametreja voidaan helposti muokata ja näin päivittää olemassa olevaa mallia. Myös erinäiset rakenteelliset muutokset on helppo tehdä DesignModelerilla. (Ansys DesignModeler.)

CAD-mallit suunnitellaan yleensä valmistusta silmällä pitäen eikä rakenneanalyyseja varten. Valmistukseen suunnatut CAD-mallit ovat monimutkaisia geometrialtaan, sillä ne sisältävät mm. mallinnettuja logoja sekä muita pieniä yksityiskohtia. Tällaisen rakenteen simulointi on huomattavasti raskaampaa ja näin ollen kasvattaa analyysin läpäisyäikää. Siksi voi olla nopeampaa kuluttaa hetki turhien ja pienten yksityiskohtien poistamiseen mallista, jolloin analyysin läpäisyäika voi vähentyä tunneilla tai jopa päivillä. (Ansys DesignModeler.)

Ansys DesignModeler tarjoaa tehokkaat työkalut myös erilaisten geometrioiden mallintamiseen alusta asti. Monimutkaiset mallit voidaan tehdä käyttäen tuttuja solidimallinnusmenetelmiä. DesignModeler on rakennettu vakaaksi käytettäväksi sekä nykyaikaiset teollisuuden standardit täyttäväksi. Kaksiulotteiset sketsit voidaan pursottaa kolmiulotteisiksi solidimalleiksi ja sen jälkeen niitä voidaan muokata erilaisilla Boolean menetelmillä. Mallin rakentamisen vaiheet tallentuvat piirrepuuhun, joka mahdollistaa välivaiheiden muokkaamisen ja näin lopullisen mallin päivittämisen. (Ansys DesignModeler.)

4.2 Mallinnusmenetelmät

Tässä osiossa käydään hieman tarkemmin läpi, minkälaisia mallinnusmahdollisuuksia ja menetelmiä DesignModeler tarjoaa ja mitä eri menetelmät tarkoittavat.

4.2.1 Solidimallinnus

Solidimallinnuksessa sketsataan halutun muotoinen sketsi, eli piirre, joka voidaan pursottaa solidimalliksi. Pursotus tapahtuu määrittämällä suunta sekä pursotuksen vahvuus sketsille. Pursotuksen jälkeen tuloksena saadaan solidimalli.

Solidimalli on ns. täydellinen malli, jolla on tilavuus, paino sekä materiaaliominaisuudet. Solidimalli on juuri sen sisältämien tietojen vuoksi myös raskain mallinnusmenetelmä. Solidimalli voidaan tehdä käyttäen esimerkiksi joko Extrude, Revolve, Sweep tai Loft menetelmiä. Eri menetelmät on selvitetty hieman tarkemmin alapuolella.

Extrude

Tämä menetelmä on perusmenetelmä ja se lisää materiaalia sketsatun piirteen muotoon halutun vahvuuden verran haluttuun suuntaan. Tätä menetelmää voidaan myös käyttää materiaalin poistamiseen, jolloin lisäämisen sijasta materiaalia poistetaan halutun piirteen mukaan.

Revolve

Menetelmässä määritetään akseli, jonka ympäri sketsi pyöräytetään. Tällöin tapahtuu solidimallin pursotus. Revolvella voidaan mallintaa esimerkiksi pallo sketsaamalla ainoastaan puoliympyrä, joka sitten pyöräytetään keskiakselinsa ympäri.

Sweep

Menetelmässä piirretään halutulle profiilille ns. polku, jota pitkin sketsattu profiili vedetään ja materiaali pursotetaan. Tällä menetelmällä voidaan tehdä helpommin esimerkiksi monimutkaisia putkia tai tankoja.

Loft

Menetelmällä valitaan useita sketsattuja piirteitä, jotka sijaitsevat eri tasoilla. Loft yhdistää nämä profiilit ja luo niiden välille solidimallin. Loft-menetelmän edellytyksenä

on, että jokaisessa profiilissa täytyy olla yhtä monta reunaa, jotta profiilien välille voidaan muodostaa solidimalli. Loft -menetelmään voidaan myös lisätä ns. apuviivoja, joiden mukaan eri tasoilla sijaitsevat sketsit yhdistetään.

4.2.2 Kuorielementit

Kuorielementit ovat 3D-elementtejä, joille ei ole kuitenkaan määritetty paksuutta. Kuorielementit ovat kaarevia pintaelementtejä, jotka sisältävät taivutus- ja venymisominaisuudet. Kuorielementtejä voi käyttää 3D-mallinnukseen. Tyypillisiä mallinnuskohteita ovat ohutseinäiset paineastiat sekä ohutlevyrakenteet. Kuorielementit voivat muuttua muotoaan x-, y- ja z-akselin suuntaisesti. Elementille joudutaan määrittämään erikseen paksuus. Kuorimalli voidaan mallintaa joko suoraan tai tehdä solidimallista mid-surface-toiminnolla. Mid-surface on toiminto, jonka avulla voidaan valita solidimallista pintaparit, joiden välille haluttu kuorimalli muodostetaan. (Mac Donald 2011, 81.)

Kuorielementeillä rakennetut mallit ovat nykyisin erittäin yleisiä. Moderni teollisuus käyttää kuorimalleja mm. autojen korien, lentokoneiden ja avaruussukkuloiden rakenteiden analysointiin ja suunnitteluun.

(Mac Donald 2011, 142.)

4.2.3 Viivaelementit

Viivaelementtejä on monenlaisia, vaikka kaikki näyttävätkin muodostuvan kahden pisteen mukaan. Kuitenkin se, miten nämä pisteet linkitetään toisiinsa, tekee viivaelementeistä erilaisia. Viivaelementtien selvitykset on otettu Mac Donaldin vuonna 2011 kirjoittamasta kirjasta sivulta 80.

Sauvaelementit

Nämä elementit voivat muuttua aksiaalisuunnassa mutta eivät pysty taipumaan tai muuttamaan elementin poikkileikkausta.

Jousielementit

Jousielementit ovat lähes samankaltaisia kuin sauvaelementit, sillä ne pystyvät puristumaan kasaan sekä venymään mutta eivät pysty taipumaan.

Palkkielementit

Palkkielementtiä voidaan käyttää silloin kun jännitys, taivutus sekä puristus ovat kaikki sallittuja. Palkkielementeillä voidaan myös määrittää yksityiskohtaisesti palkin poikkileikkaus ja tämän avulla tarkemmin palkin käyttäytyminen taivutuksessa. 3D-palkkielementteihin pystytään mallintamaan myös palkkiin kohdistuvat kiertymät.

Putkielementit

Putkielementit ovat yleensä poikkileikkaukseltaan pyöreitä palkkielementtejä ja niitä käytetään putkistojen mallintamiseen. Muuten putkielementti toimii samoin kuin palkkielementti, mutta putkielementtiin voidaan määrittää myös hydrodynaamisia ominaisuuksia.

4.3 Parametrit

DesignModelerissa voidaan määrittää halutut mitat parametreiksi, jolloin valittuja mittoja voidaan helpommin muuttaa jälkikäteen. Parametrien tarkoituksena on tuoda tärkeimmät mitat paremmin esille sekä helpottaa niiden päivittämistä.

Parametrit voidaan myös määrittää siten, että arvo tulee suoraan joidenkin muiden arvojen kautta, jos kyseinen arvo on riippuvainen jostain toisesta arvosta. Tällöin käytetään DesignModelerin Parameter/Dimension Assignments -työkalua, jonka avulla voidaan kirjoittaa yhtälöt halutuille arvoille.

Parametrien määrittämisessä voidaan käyttää apuna myös Microsoft Excel -taulukko-laskentaohjelmaa. Exceliin voidaan määrittää parametrit, jotka se hakee suoraan Ansysin puolelta, sekä parametrit, jotka Excel vie Ansykseen. Excelin käytön perusteena on mm. helpompi parametrien päivitys sekä vaikeampien yhtälöiden tekeminen ja niiden selkeämpi hallinta.

Teoksessa, Solidworks tietokoneavusteinen suunnittelu Hietikko E. kertoo parametrisesta mallintamisesta seuraavasti:

"Parametrisuus tarkoittaa käytännössä sitä, että kohteeseen kytkettyjä mittoja voidaan muuttaa missä vaiheessa mallinnusta tahansa siten, että kohteen geometria muuttuu vastaavasti. Tämä helpottaa mallinnusta siinäkin mielessä, että suunnittelun alkuvaiheessa ei useinkaan tiedetä kaikkia suunniteltavan kohteen mittoja tarkasti

vaan ne tarkentuvat vasta suunnittelun edetessä. Tällöin voidaan epämääräiset mitat jättää epämääräisiksi siihen saakka kunnes niiden suuruus tarkentuu.

Parametrisuus helpottaa myös muutosten tekemistä. Jos kappaleen jotakin mittaa halutaan muuttaa, ei geometriaan tarvitse kajota. Riittää että muutetaan kyseistä mittalukua, jolloin siihen kytketty geometria muuttuu sekä itse kohteessa että kaikissa siihen kytkeytyvissä muissa kohteissa kuten esimerkiksi kokoonpanoissa ja piirustuksissa.

Parametrisessa mallinnuksessa voidaan mallin mittojen välille muodostaa myös relaatioita esimerkiksi siten, että kaksi mitta on aina yhtä suuria: jos toista muutetaan, muuttuu toinen myös. Mittojen välille voidaan rakentaa matemaattisia yhteyksiä, jolloin jokin mitta voi olla esimerkiksi aina puolet toisesta. Lisäksi malliin voidaan määritellä erilaisia ehtoja kuten symmetria-, samankeskyisyys- tai yhdensuuntaisuusehtoja.

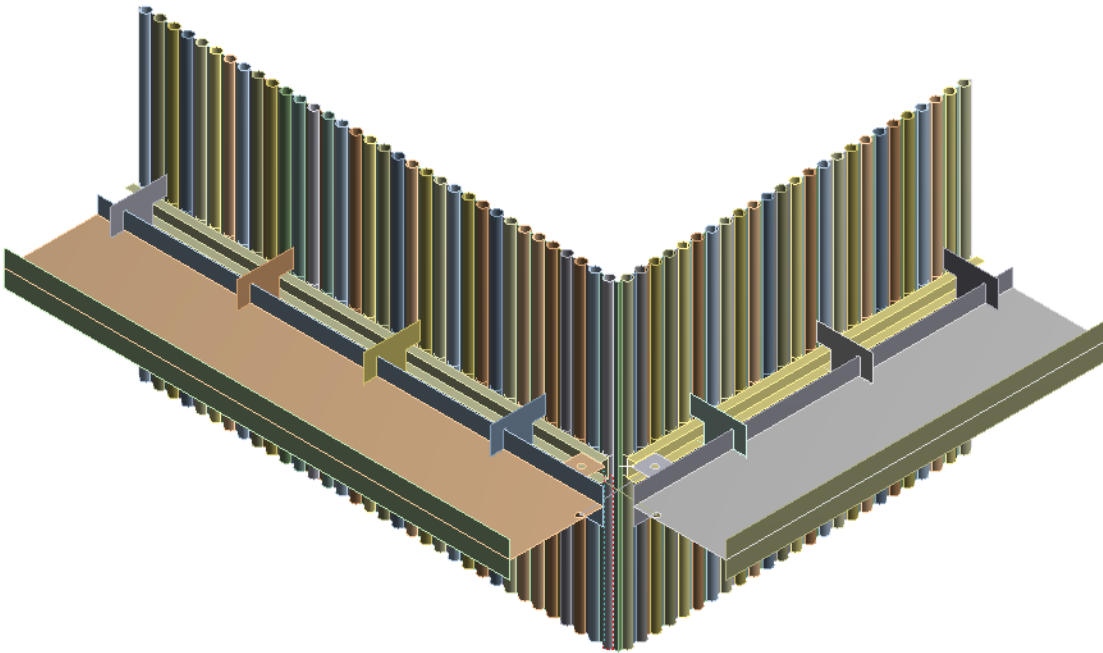
Tänä päivänä suurin osa (jopa yli 90%) kaikesta mekaniikkasuunnittelusta tehdään parametrisella piirremallinnuksella. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että nykyaikainen tuotesuunnitteluprosessi sisältää paljon muutoksia, joiden huomioiminen on paljon helpompaa, jos käytössä on parametrinen mallinnus.

Tulevaisuudessa tapahtuviin muutoksiin on varauduttava jo mallin rakentamisen aikana. Kaikki piirteet on laadittava niin, että vaikka niitä muutetaan, alkuperäinen suunnittelun tarkoitus ei muutu ja malli käyttäytyy hallitusti. Esimerkiksi, jos kappaleeseen on suunniteltu keskelle reikä, sen tulee pysyä aina kappaleen keskellä vaikka kappaleen mitat myöhemmin muuttuisivat.”

Parametrisuuden myötä myös integraatio on siirtynyt aivan uudelle tasolle. Kun esimerkiksi FEM-laskennassa tarvittavat elementtiverkot on kytketty piirteiden mittoihin, voidaan osien geometriassa tapahtuvat muutokset ottaa näissä käytännössä automaattisesti huomioon. Tällöin ylimääräisen työn osuus jää huomattavasti aikaisempaa vähäisemmäksi. Jos FEM- analyysin lähtötiedot on kytketty malliin, riittää uudelleenlaskentaan, että elementtiverkko generoidaan uudelleen. Ilman piirremallinnusjärjestelmää olisi elementtimalli pitänyt muodostaa uudelleen, johon olisi kulunut todennäköisesti enemmän aikaa. (Hietikko 2007, 21 – 24.)

4.4 Mallin rakentaminen

Mallin rakentamisessa tulee ottaa huomioon, millaisia menetelmiä kannattaa käyttää ja miten eri menetelmät voidaan liittää yhteen, jotta malli on toimiva. Mallinnuksessa kannattaa myös miettiä, miten rakennekokonaisuuden eri osat käyttäytyvät, ja siltä pohjalta pyrkiä valitsemaan ne elementit, joita käyttää. Kuvassa 4 on esitetty malli, joka on pääsääntöisesti tehty kuorielementeillä.



KUVA 4. Kuorielementein rakennettu parametrisen malli.

5 FEM

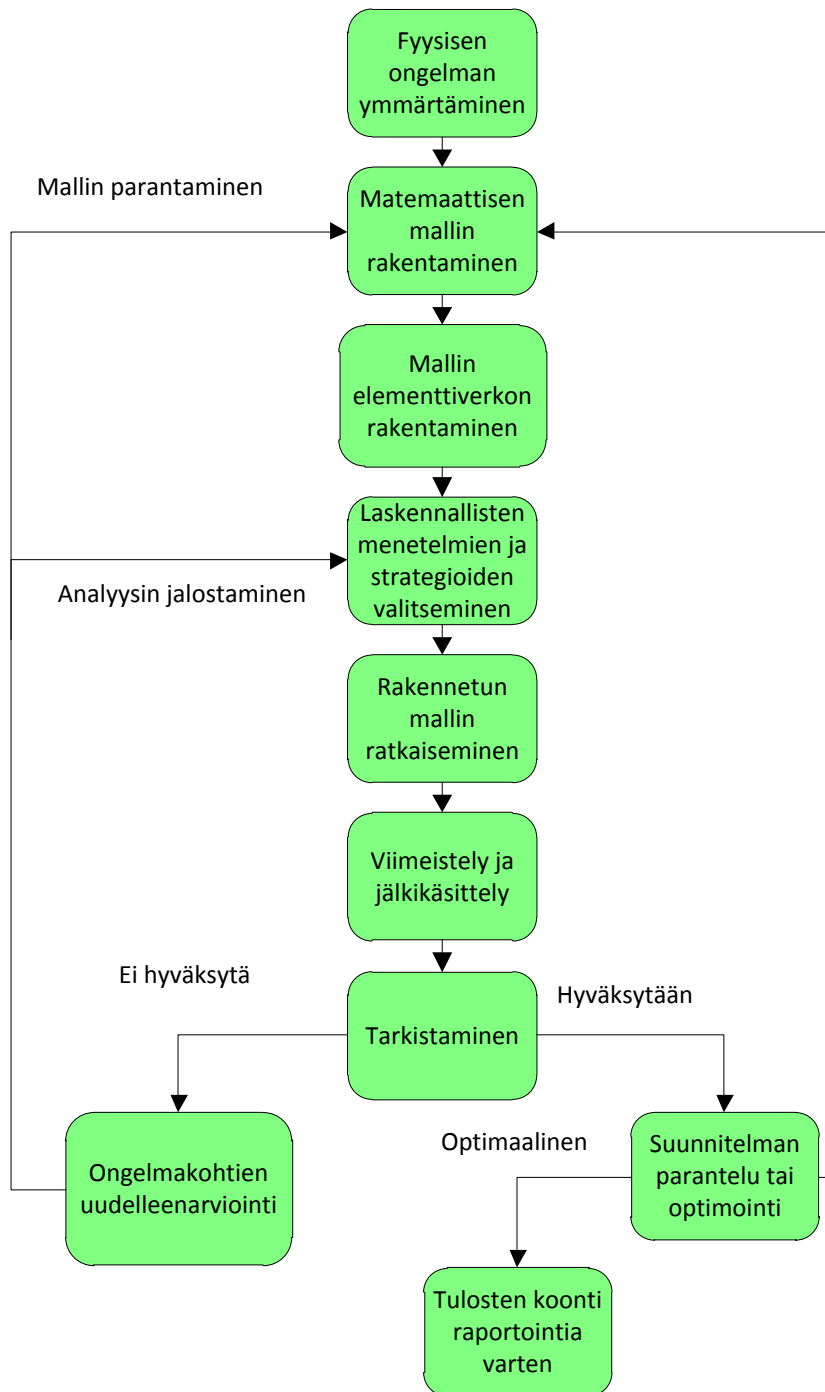
5.1 Mihin tarvitaan

FEM (Finite Element Method) analyyseja käytetään vaikeiden geometrioiden laskennassa sekä suurissa malleissa, joita ei käsin voida laskea. Yksinkertaisesti selitettynä menetelmä jakaa geometrian pienempiin, helpommin laskettaviin osiin ja yhdistää niistä syntyvät tulokset suureksi kokonaisuudeksi ja antaa arvioidun tuloksen. (Mac Donald 2011, 4.)

Useimmat ongelmat esitetään matemaattisesti käyttäen differentiaali- sekä integraalilaskentaa, mutta kuitenkin useimpien kuormitustilanteiden laskukaavat muodostuu liian vaikeiksi laskettaviksi käsin. FEM on siis erittäin tarpeellinen apuväline näiden vaikeiden yhtälöiden ratkaisemiseksi. (Mac Donald 2011, 4.)

5.2 FE-analyysin polku

FE-analyysia tehdessä on syytä kulkea tiettyä polkua, jotta vältetään suurilta virheiltilta ja varmistetaan analyysin onnistumisesta. Kuviossa 1 on esitetty Bryan J. Mac Donaldin rakentama polku.



KUVIO 1. FE -analyysin polku (Mac Donald 2011, 48)

5.2.1 Ongelman ymmärtäminen

Polku lähtee liikkeelle kyseessä olevan fyysisen ongelman ymmärtämisestä. Tämä vaihe on kaikkein vaikein uusille FE-analyysien tekijöille, sillä he yleensä menevät suoraan mallin rakentamiseen ilman suurempaa mietintää. Kokeneet insinöörit taas aloittavat usein käsinlaskennalla ja näin jättävät mallinnusohjelmat vähemmälle käytölle. Tässä vaiheessa tulisi tutustua ja etsiä kaikki rakenteen ongelmat sekä

pääperiaatteet. Rakenteen rasitukset sekä ympäristön vaikutukset tulisi selventää ja ottaa huomioon. Tämän tarkoituksena on selventää analyysin tekijälle se perimmäinen ongelma. Tässä polun vaiheessa kannattaa käyttää paljon paperia ja kynää ongelman selvittämiseen ja ymmärtämiseen. (Mac Donald 2011, 49)

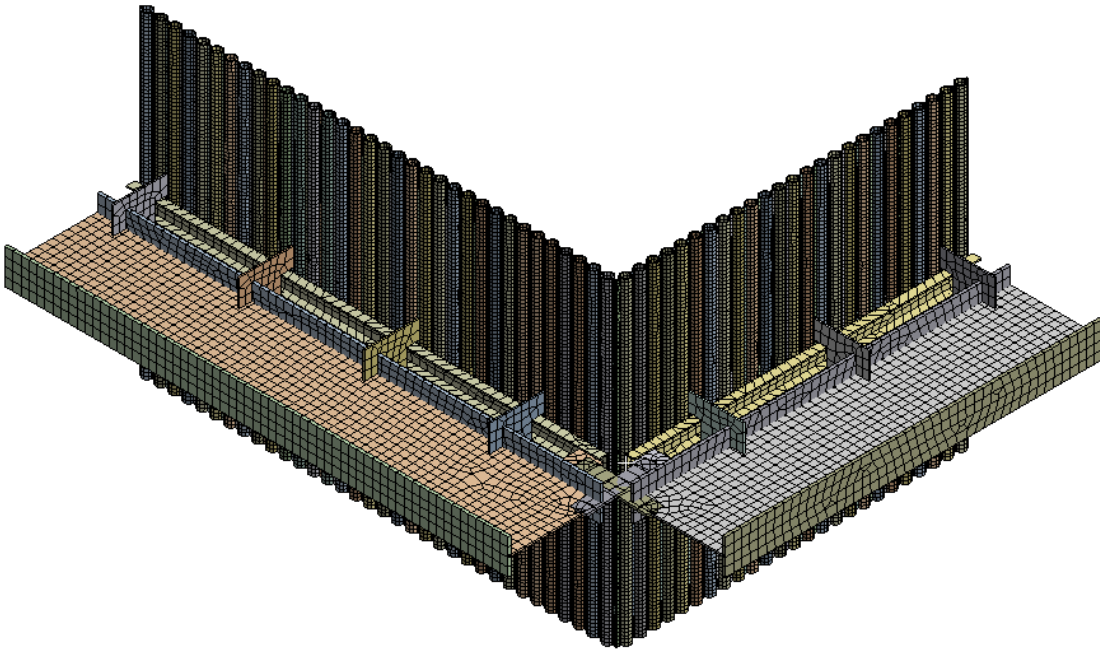
5.2.2 Mallin rakentaminen

Kun tärkeimmät rakenteen ominaisuudet sekä ongelmat on huomioitu, täytyy ne muuntaa matemaattiseksi ongelmaksi. Tähän kuuluu matemaattisten kaavojen valinta, joilla ongelmat voidaan ratkaista. Esimerkiksi jos rakenteen laskemisessa voidaan hyödyntää symmetriaa, voidaan mallin koko pienentää jopa $\frac{1}{4}$ alkuperäisestä. Nämä valinnat tulisi tehdä ennen mallin verkottamista ja mieluummin ennen edes FE-ohjelman aukaisemista. Yleinen virhe on rakentaa mallia ja miettiä matemaattisia ratkaisuja yhtä aikaa. (Mac Donald 2011, 49)

5.2.3 Mallin elementtiverkon rakentaminen

Kun edellisen vaiheen valinnat on suoritettu ja mietitty loppuun, seuraavana vaiheena on mallin oikea muokkaus halutunlaiseksi elementtiverkolla. Nykyään useimmat FE-analyysiohjelmat osaavat automaattisesti rakentaa elementtiverkon geometrian mukaan, mutta ne eivät pysty ennakoimaan, minne mahdollisesti syntyy suurimmat kuormat, eikä näin ollen osaa laittaa tarvittaessa tarkempaa verkotusta näille alueille. Käyttäjän tulee siis varmistua siitä, että elementtiverkosta tulee ensimmäisessä vaiheessa suunnitellun mukainen. (Mac Donald 2011, 49)

Kuvassa 5 on esitetty valmis elementtiverkko. Elementtiverkosta nähdään, että verkon koko ei ole joka puolella sama, vaan vaihtelee tarpeen mukaan.



KUVA 5. Valmis verkotus

5.2.4 Menetelmien valinta

Useimmat FE-analyysiohjelmat tarjoavat useita eri ratkaisutapoja ongelmiin, ja näiden eri tapojen käyttö vaihtelee analyysin tekijän kokemuksen perusteella. Tietynlaiseen ongelmaan käyttäjän tulee valita juuri sopivanlainen menetelmä sekä määrittää analyysin kuormitusaika. (Mac Donald 2011, 50)

5.2.5 Analyysin teko

Tähän vaiheeseen mennessä kaikkien valintojen pitäisi olla jo tehtynä ja kaikkien menetelmien määritettynä. Tässä vaiheessa kone tekee FE-analyysin käyttäjän antamilla ohjeilla. (Mac Donald 2011, 50)

Jos analyysin aikana tapahtuu virhe, eikä ohjelma voi viedä analyysia loppuun, täytyy käyttäjän selvittää mistä tämä virhe johtuu ja korjata asia. Ja vaikka analyysi onnistuisikin, ei käyttäjä voi olla täysin varma siitä, että tulos on todenmukainen. Usein analyysit ovat väärin rakennettuja, jolloin täytyy tehdä muutoksia analyysiin tai rakennettuun malliin. (Mac Donald 2011, 50)

5.2.6 Jälkikäsittely ja hyväksyminen

Mallin jälkikäsittely auttaa käyttäjää saamaan tarpeellisesti tietoa, jotta päätös hyväksytystä analyysistä voidaan tehdä. Jälkikäsittely tapahtuu yleensä graafisen käyttöliittymän avulla, joka helpottaa analyysin muutoksien tekemistä ja tulosten manipulointia halutulla tavalla. Vaikein asia on kuitenkin tulosten tulkitseminen.

(Mac Donald, 2011, 50)

6 KUSTANNUSTARKASTELU

Työssä oli myös tarkasteltava kehyspalkkirakenteiden kustannuksia sooda- ja voimakattiloissa. Tarkastelussa käytettiin Andritz Oy:ltä saatuja laskelmia kehyspalkkikiinnitysrakenteiden painoista sekä saatua painoa 3D-mallista. Kiinnitysrakenteiden painojen tarkastelu tehtiin IPE 300 -kokoluokan palkille, joka on pienin mahdollinen palkkikoko.

Käsinlaskenta oli tehty laskemalla käytettävien osien tilavuudet ja käyttämällä raudan tiheyttä kertoimena, jolloin saadaan kokonaispaino. Painotarkastelut 3D-mallista tehtiin Autodesk Inventor -mallinnusohjelmalla. Inventorissa pyrittiin mallintamaan samanlainen rakenne kuin käsinlaskennassa oli käytetty, mutta joidenkin mittojen puutteen vuoksi malli ei ollut aivan täydellinen.

Andritzin omat laskut osoittivat jo, että voimakattilan kehyspalkkien kiinnitysrakenne olisi painavampi yhtä metriä kohden verrattuna soodakattiloissa käytettävään kiinnitysrakenteeseen. Käsinlaskennalla saadut tulokset erosivat hiukan 3D-mallista saaduista tuloksista juuri mallin eri mittojen vuoksi. 3D-mallin mukaan painavampi oli voimakattilan rakenne, mutta ei enää niin suurella erolla. Eroa kuitenkin kasvattaa voimakattilassa käytettävä tiheämpi kiinnitinväli. Eli pelkkää painoa tarkastelemalla soodakattilan kehyspalkkirakenne tulisi kustannuksissa halvemmaksi.

Jotta kustannustarkastelusta saisi paremman tuloksen, tulisi tarkasteluun ottaa mukaan myös valmistusajat sekä valmistusmenetelmät ja niiden kustannukset. Menetelmät ovat kuitenkin lähes samat molemmissa kiinnitysrakenteissa, joten pääpaino olisi tällöin ajassa, joka valmistamiseen kuluu. Myös käytettävä materiaali vaikuttaa kustannuksiin, mutta koska materiaalit ovat pääsääntöisesti samat molemmissa kattilarakenteissa, on materiaalin vaikutus olematon.

7 TYÖN TULOKSET

Seuraavaksi pohditaan, minkälaisia tuloksia työstä on saatu ja miten työn tulokset edesauttavat lujuuslaskijan työtä uusissa kattilaprojekteissa.

7.1 Parametrinen malli

Opinnäytetyössä rakennettu 3D-malli toteutettiin kokonaisuudessaan käyttäen Ansysksen Designmodeler -ohjelmaa. Parhaaksi menetelmäksi osoittautui tehdä ensin mallista solidimalli, joka sitten muutettiin kuorielementeiksi mid-surface -toiminnolla. Malli rakennettiin kuorielementeistä, jotta siitä tulisi mahdollisimman kevyt käyttää.

Mid-surface-toiminnolla pystyi helposti asettamaan kaikki mallin komponentit oikeille paikoilleen. Mid-surfacen käytöstä hyödyttiin myös parametrien varmemmalla toiminnalla, sillä kun jonkin kappaleen ainepaksuutta muutettiin, osasi tämä osa siirtää toiset komponentit mukanaan oikeaan kohtaan. Myös ainevahvuuksien parametointi toimi paremmin tällä tavoin, sillä ainepaksuus annettiin solidimallille, jonka perusteella pintamalli vasta tehtiin. Näin pintamalli pysyi aina oikeassa kohdassa.

Jos kappaleet olisi mallinnettu suoraan kuorielementeiksi, olisi näiden pintojen paksuus täytynyt määrittää erikseen. Tämä olisi vaikeuttanut kokoonpanon eri komponenttien liittämistä toisiinsa, sillä malli täytyi saada toimimaan millä tahansa mitoilla. Jos ainepaksuudet asetetaan myöhemmin, ongelmana on, että osat saattavat mennä päällekkäin ja näin ollen mallin rakenne ei ole enää haluttu.

Mallin rakentamisessa käytettiin hyödyksi symmetriaa, jonka tuloksena ei tarvinnut rakentaa niin suurta mallia. Symmetrisyyden avulla malli voitiin rajata vain yhteen kehyspalkkiin, jolloin symmetrisyys osaa lisätä loput palkit FE-analyysiä tehtäessä. Vaikka näitä muita palkkeja ei näy lopullisessa mallissa, käyttäytyy malli niin kuin kehyspalkkeja olisi useampi. Mallin rakenteiden kiinnitykset toisiinsa hoidettiin Ansysksen analyysipuolella, jossa määritettiin, kuinka rakenteet kiinnittyvät toisiinsa. Kiinnityksissä huomioitiin myös, minkälainen kiinnitys on kyseessä eli onko kiinnitys jäykkä vai voiko kiinnitys liikkua jonkin akselin suuntaisesti.

Parametrisuus tehtiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Exceliin listattiin kaikki mitat, joita halutaan muuttaa jälkikäteen. Kun mittoja muuttaa Excelissä, päivittää se mitat 3D-malliin ja rakentaa mallin uusilla mitoilla automaattisesti. Exceliin asetetuissa parametreissa on se etu, että ne ovat selkeämmin esitetty ja voidaan rakentaa monimutkaisempia riippuvuussuhteita laskukaavoilla. Jos Exceliin haluaa lisätä jälkikäteen uusia parametreja, onnistuu lisääminen helposti vain määrittämällä ensin Ansysksen puolella halutut mitat parametrisiksi ja sitten viittaamalla Excelin taulukkoon, jossa parametrille annetaan arvo.

Kuvassa 6 on esitetty käsinlaskennan alkutietojen määrittämistaulukko. Taulukon keltaisille alueille asetetaan lämpötila, jossa palkki ottaa vastaan tulipesän paineen, kehyspalkkien väli sekä seinämien pituudet eli palkin pituudet. Myös varmuuskerroin on asetettu lähtöarvoksi, jotta se on helppo muuttaa. Vetolistoista valitaan palkkiprofiili sekä käytettävä materiaali. Excel laskee näiden lähtötietojen perusteella taipumat kuvassa oleville sinisille alueille.

Tarkasteltava lämpötila		<input type="text" value="IPE 450"/>
Tulipesän Paine	p	<input type="text" value="P355"/>
Palkki 1 pituus	L	<input type="text" value="mm"/>
Palkki 2 pituus		<input type="text" value="mm"/>
Kehyspalkkiväli	H	<input type="text" value="mm"/>
Varmuuskerroin		<input type="text" value=""/>
Palkin 1 taipuma		<input type="text" value="mm"/>
Palkin 2 Taipuma		<input type="text" value="mm"/>
Ansys Taipuma 1		<input type="text" value="mm"/>
Ansys taipuma 2		<input type="text" value="mm"/>
Palkin 1 kerroin		<input type="text" value=""/>
Palkin 2 kerroin		<input type="text" value=""/>

KUVA 6. Käsinlaskennan lähtötiedot

Laskentataulukot tahdottiin pitää mahdollisimman yksinkertaisina ja helppokäyttöisinä. Juuri tästä syystä taulukoissa ei ole minkäänlaisia yhtälöitä. Yhtälöt ovat sijoitettuna Excel-taulukossa erillisille sheetille, jotta niitä ei vahingossa muuta ja näin saisi vääriä tuloksia. Laskentakaavat on pyritty tekemään selkeiksi, jotta käyttäjän on helppo tarkastella sekä tarkistaa ne.

Kuvasta 7 nähdään käsinlaskennan tulostaulukot, joihin Excel laskee lähtötietojen perusteella palkin käyttöasteen, kiepahduksen kriittisyyden sekä kiepahduksen käyttöasteen. Excel palauttaa tuloksina sekä numeerisen että sanallisen lopputuloksen. Jos palkki ei kestä asetettuja vaatimuksia, palauttaa Excel punaisella tulokset, jolloin käyttäjä huomaa, ettei valittu palkki kestä vaadittuja olosuhteita. Numeerinen tulos näkyy, jotta käyttäjä näkee tarkemmin, miten lähellä palkin hajoamista ollaan kyseisillä lähtötiedoilla. Sanallinen tulos kertoo teoriassa, miten palkki kestää, joten käyttäjälle jää vielä valinnanvaraa miettiä, kannattaisiko palkin kokoa nostaa, jotta palkki varmasti kestää vaaditut olosuhteet.

Palkin 1 kesto		Palkin 2 kesto	
Momentin käyttöaste		Momentin käyttöaste	
0,806	Käyttöaste OK	3,574	Ei kestä
Kiepahduksen kriittisyys		Kiepahduksen kriittisyys	
0,326	Ei kriittinen	0,543	Kriittinen
Kiepahduksen käyttöaste		Kiepahduksen käyttöaste	
0,784	OK	3,790	Ei kestä

KUVA 7. Käsinlaskennan tulokset

Kuvassa 8 on esitetty niveltappiliitoksen kestävyden laskentataulukko. Laskentataulukko toimii samoin periaattein kuin palkin kestävyden laskentataulukko.

Niveltappiliitoksen Määrittely	
Tapin halkaisija	P295
Tappiliitoksen vivun paksuus	
Lämpötila	
Kohdistuva Voima	
Kestävyys	Ok

KUVA 8. Niveltappiliitoksen laskentataulukko

Kuvassa 9 on esitetty Excelissä käytettävät parametrit. Parametrit on jaettu osiin niiden helpompaa hahmottamista varten. Keltaisella merkittyihin parametreihin määritetään ne parametrit, jotka vaikuttavat kumpaankin kattilarakenteeseen. Kattilarakenteiden omat rakenteet on jaettu myös erikseen ja merkitty selvästi, mistä kattilarakenteesta on kyse. Sinisellä merkittyihin parametreihin arvot tulevat automaattisesti muiden parametrien perusteella. Sinisellä merkittyihin parametreihin käyttäjän ei tarvitse koskea, vaan Excel laskee nämä parametrit automaattisesti. Myös parametreissa on vetolistoja, joista voi valita halutun profiilin palkille sekä U-profiilille.

RECOVERY BOILER			POWER BOILER		
WB_KulmakiinnikePaksuus		mm	U_Profiili	UPN 120	
WB_SatulaKorkeus		mm			
WB_SatulalevyKorkeus		mm			
WB_SatulaPaksuus		mm			
WB_SatulalevyPaksuus		mm			
WB_SatulaJako		mm	WB_Kiinnitinväli		mm
WB_Putkivä_Pituus		mm	WB_PBevä_Pituus		mm
WB_Putkivä_Paksuus		mm	WB_PBevä_Paksuus		mm
			WB_Tukilatta_h		mm
			WB_Tukilatta_b		mm
			WB_Kynsikiinnike_b		mm
YHTEISET					
Käsin asetettavat			Lämpötilat		
WB_Seinä_Leveys		mm (Max 50000)	Palkki		C
WB_Seinä_Leveys2		mm (Max 50000)	Seinä		C
WB_Putki_Seinämäpaksuus		mm	Kiinnitin		C
WB_Putki_Ulkohalkaisija		mm			
WB_Palkkiväli		mm			
WB_Putki_Paine		MPa	Palkkiprofiili	IPE 450	
WB_Tulipesä_Paine		MPa			
AUTOMAATTISESTI TÄYTTÄVÄT					
Seinä + Palkki			Materiaalitiedot		
WB_PBSeinä1_Katkaisu		mm	WB_Palkki_Tiheys		kg/m ³
WB_PBSeinä2_Katkaisu		mm	WB_Palkki_Kimmokerroin		MPa
WB_RBSeinä_Katkaisu		mm			
WB_RBSeinä_Katkaisu2		mm	WB_Seinä_Tiheys		kg/m ³
WB_Palkki_h		mm	WB_Seinä_Kimmokerroin		MPa
WB_Palkki_b		mm			
WB_Palkki_tw		mm	WB_Kiinnitin_Tiheys		kg/m ³
WB_Palkki_tf		mm	WB_Kiinnitin_Kimmokerroin		MPa
WB_Kiinnitinväli		mm			
WB_U_Profiili_tf		mm			
WB_U_Profiili_tw		mm			
WB_U_Profiili_b		mm			
WB_U_Profiili_h		mm			

KUVA 95. Ansyksen parametritaulukko

Aikaansaatu parametrinen malli toimi halutulla tavalla, mutta kehitettävääkin löytyi. Käsittelen kehityskohteita luvussa 8. Parametrisen mallin testaukseen meni paljon aikaa, ja jos virheitä mallin rakenteiden käyttäytymisessä huomattiin, korjattiin ne heti. Malli annettiin Andritzille käyttöön ja jatkokehitettäväksi.

7.2 FE-analyysi

FE-analyysistä saatiin selkeät tulokset, joita voitiin verrata käsinlaskettuun tulokseen Exceliin tehdyllä kehyspalkkilaskurilla. Vertailu toteutettiin palkin taipuman avulla. FE-analyysistä saatu palkin taipuma merkittiin Excel-taulukkoon, jolloin se laski, miten suuri ero käsinlasketulla ja analyysistä saadulla taipumalla on. Tässä täytyi olla tosin tarkkana, jotta käsinlaskennan sekä FE-analyysin lähtötiedot olivat samat. Tätä pyrittiin helpottamaan yhdistämällä parametrisuus käsinlaskennan lähtötietoihin, jolloin osa analyysissä käytettävistä parametreista tulee suoraan käsinlaskennan lähtötiedoista.

FE-analyysistä nähtiin myös, kuinka voimat jakautuivat kehyspalkkirakenteisiin eri kattilatyypeillä, ja missä sijaitsevat kriittisimmät kohdat. Myös FE-analyysi rakennettiin mahdollisimman valmiiksi, jotta käyttäjän ei tarvitsisi määrittää mallin kiinnityksiä tai rasiuksia aina uudelleen. Käyttäjän tarvitsee ainoastaan määrittää halutut parametrit Excelissä, josta parametrit päivittyvät suoraan myös FE-analyysin tietoihin.

7.3 Kustannustarkastelu

Kustannustarkastelusta saatiin suuntaa-antava tulos. Tulokseen ei voi täysin luottaa, sillä tarkastelusta on jätetty kokonaan pois valmistuskustannukset sekä valmistukseen käytettävä aika. Kustannustarkasteluun tulisi perehtyä syvemmin, jotta voisi saada parempia tuloksia. Pelkän painon avulla on vaikea saada kunnan tuloksia. Tulos, joka saatiin tarkastelussa, osoittaisi kuitenkin soodakattilan kiinnitysrakenteiden olevan kevyempiä kuin voimakattiloissa käytettävän kiinnitysrakenteen. Tästä voidaan päätellä helposti, että ainakin materiaalikustannuksissa soodakattilan kiinnitysrakenne on edullisempi.

7.4 Parametrisen mallin hyödyt

Malli helpottaa tulevaisuudessa uuden kattilan lujuuslaskemista ja nopeuttaa huomattavasti myös FE -analyysien tekoa. Valmiin mallin vuoksi ei tarvitse tehdä uutta mallia jokaista uutta kattilaprojektia varten, vaan parametrisen mallin avulla voi helposti päivittää tai muuttaa haluttuja parametreja. Pelkkien parametrien muuttaminen myös poistaa rakenteen kiinnityksien sekä voimien määrittämisen kokonaan, jolloin analyysin lähtötietojen määrittämiseen ei tarvitse kuluttaa aikaa.

Käsinlaskentaa uusissa kattilaprojekteissa helpottaa Excel-työkalu, johon laitetaan kattilan mitat sekä paineet, jolloin Excel osaa automaattisesti kertoa, kestäkö rakenne. Exceliin asetetaan myös parametrinen mallin parametrit, jolloin ne päivittyvät Ansykseen. Näin ollen Ansyksessä lujuslaskijan tarvitsee vain aloittaa analyysi. Pelkkien parametrien asettaminen säästää lujuslaskijan aikaa eikä lujuslaskijan tarvitse käyttää tunteja uudenlaisen mallin rakentamiseen. Analyysistä saadut tulokset voi kirjoittaa takaisin Exceliin, jolloin se vertaa saatua tulosta käsinlaskettuun tulokseen ja näin antaa keittoputkiston ja kiinnitysrakenteen vahvistavan vaikutuksen.

FE-analyysin hyötynä on myös se, että tiedetään, kuinka paljon pelkkä keittoputkisto ja palkin kiinnitysrakenteet ottavat vastaan tulipesän painetta. Tätä asiaa ei ole aikaisemmin kunnolla tutkittu, vaan on mitoitettu kehyspalkit pelkän palkin kestävyuden mukaan. FE-analyysistä on hyötyä mm. kehyspalkkien kokoa laskettaessa. Parhaassa tapauksessa FE-analyysi osoittaa sen, että kehyspalkin kokoa voidaan pienentää, jos varmuutta on tarpeeksi pienemmillä palkkikooilla.

Parametrista 3D-mallia käytettäessä suurin aika menee siihen, että tietokone laskee lopputuloksen annettujen lähtötietojen perusteella. FE-analyysiin kuluva aika ei ole kovin suuri, sillä parametrinen malli on rakennettu mahdollisimman kevyeksi käyttäen hyväksi mm. symmetrisyyttä.

8 TYÖSSÄ ESIINTYNEET ONGELMAT JA KEHITYSKOHTTEET

Työn edetessä eteen tuli monenlaisia ongelmia. Kehitettävää löytyi työn loppuvaiheessa, mutta ajanpuutteen vuoksi ne jätettiin tulevaisuuteen.

8.1 Ongelmakohdat

Ensimmäiseen ongelmaan törmäsin parametrissa mallia tehdessäni. Alun perin oli suunniteltu, että malli rakennetaan suoraan kuorielementtejä käyttäen. Malli olisi pystytty rakentamaan näin, mutta silloin kaikkien rakenteiden paksuudet olisi täytynyt asettaa Ansysksen omalla järjestelmällä eikä näin ollen Exceliin rakennettu parametrisuus olisi toiminut. Tämä olisi vaatinut käyttäjältä lisää aikaa, jolloin parametrisuudesta ei olisi ollut niin paljon hyötyä. Juuri tämän takia päätettiin mallintaa rakenteet ensin solidielementteinä, minkä jälkeen rakenteet vasta muunnettiin kuorielementeiksi. Tämän menetelmän käyttö myös helpotti rakenteiden relaatioita toisiinsa nähden, sillä rakenteet pysyivät varmemmin omilla niille määrätyillä paikoilla.

Suurimmaksi ongelmaksi ilmeni materiaaliominaisuuksien parametrisuus. Ansys kyllä tarjoaa tällaisen ominaisuuden, mutta sitä ei koskaan jostain syystä saatu toimimaan Excelin kautta. Kun materiaaliominaisuuksien parametrisuus määritettiin käytettäväksi Excelin kautta, jostain syystä Ansys ei enää osannut avata tehtyä mallia ollenkaan.

8.2 Kehityskohteet

Viimeisimmässä palaverissa tuli ilmi, että palkkirakenne voi muuttua kattilan eri seinillä. Toiveena oli, että parametrisuus olisi toteutettu siten, että kattilarakenteen molemmille seinille olisi voitu määrittää omat rakenteensa. Tämä tarkoittaa sitä, että jokainen parametri olisi täytynyt tehdä kahteen kertaan ja parametrinen malli olisi pitänyt rakentaa uudelleen. Nykyinen malli rakennettiin siten, että parametrit ohjaavat molempia mallin seiniä, jolloin ne ovat identtiset pituutta lukuun ottamatta. Työnä tällaisen mallin rakentaminen ei ole kovin suuri, mutta ajanpuutteen vuoksi se jätettiin toteuttamatta.

LÄHTEET

Andritz Oy in Finland. Yrityksen www-sivu. [viitattu 29.3.2012]. Saatavissa:

<http://www.andritz.com/pp-andritz-oy>

Ansys Designmodeler. Ansyksen www-sivu. [viitattu 30.3.2012]. Saatavissa:

<http://www.ansys.com/Products/Workflow+Technology/ANSYS+Workbench+Platform/ANSYS+DesignModeler>

Bioenergiatieto.fi. Energiatuotannon tekniikka. Bioenergia www-sivu [viitattu 30.3.2012]. Saatavissa:

http://www.bioenergia.fi/default/www/etusivu/tietoa_bioenergiasta/energiatuotannon_tekniikka/

Blog Daum. Blog Daum www-sivu. [viitattu 14.04.2012] Saatavissa:

<http://blog.daum.net/kc445/12056551>

Hietikko, E., 2007. *Solidworks Tietokoneavusteinen suunnittelu*. Tampere: Yliopistopaino Oy - Juvenes Print.

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P., Pakkanen, H. 1999, *Höyrykattilatekniikka*. Helsinki, Oy Edita Ab.

Kaitila, O., Martikainen, L., Saarinen, E., Leskelä, M., Kumar, R., Inha, T., Kemppi, M., Yrjölä, P., Jyrkäs, T., Pekkinen, T., Ilveskoski, O. 2010, *Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus*. Eurocode 3 -oppikirja. Espoo: Oy Z-Trading Ltd.

Kinnunen, J., Saarinen, E., Tiira, S., Ulvinen, S., Väänänen, E., *Palotekninen Mitoitus OSA 7*, Teräsrakenneyhdistys R.Y

Knowpulp-Demo. Soodakattilan tehtävät. Knowpulp www-sivu. [viitattu 30.3.2012] Saatavilla:

http://www.knowpulp.com/suomi/demo/suomi/pulping/recovery_boiler/1_general/frame.htm

Mac Donald, B., 2011. *Practical Stress Analysis with Finite Elements second edition*. Dublin: Glasnevin Publishing.

Ongelin, P, Valkonen, I, 2010, *Hitsatut profiilit EN 1993 -käsikirja*. Keuruu, Otavan kirjapaino Oy.

Outinen, H, Salmi, T, Vulli, P, 2007, *Lujuusopin perusteet*. Tampere, Pressus Oy.

Savonia LEKA-esite. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.3.2012]. Saatavissa:

http://leka.savonia.fi/images/esitteet/SAVONIA_leka-esite_2011_2.pdf

SFS-EN-10028-2. Painelaiteteräkset. Levytuotteet. Osa 2 : Kuumalujat seostamattomat ja seostetut teräkset. Suomen standardisoimisliitto 2003.

SFS-EN 13480-3 + A1. Metalliset teollisuusputkistot. Osa 3: Suunnittelu ja laskenta. Suomen standardisoimisliitto 2006.

SFS-EN 1993-1-1. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen standardisoimisliitto 2005.

SFS-EN 1993-1-8. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. Suomen standardisoimisliitto 2005.

Teräsinfo: Teräsrakenneosat. Luento 7.8.2: Sivusuunnassa tuetut palkit II. [Teräsinfo www-sivu]. [viitattu 7.3.2012]. Saatavissa:

<http://www.terasinfo.fi/Esdep/I7/HTML/WG7L82.htm>

I-palkin mitoitus-esimerkki

IPE 400

Palkin materiaali on P355

Lämpötila 300

Seuraavat arvot saadaan suoraan valmistajan tarjoamista taulukosta kyseisen palkin tiedoista

$$h := 400\text{mm} \quad t_f := 13.5\text{mm}$$

$$b := 180\text{mm} \quad r := 20\text{mm}$$

$$t_w := 8.6\text{mm} \quad W_{ply} := 1307 \cdot 10^3 \text{mm}^3$$

f_y arvo lasketaan opinnäytetyön kaavalla 2.14, jos lämpötila ei suoraan löydy taulukosta tarvittavat arvot löytää standardista 10028-2

$$f_y := 232\text{MPa}$$

Ensin selvitetään mihin poikkileikkausluokkaan kyseinen palkki kuuluu

Tähän käytetään opinnäytetyössä olevia taulukoita 2 ja 3, joista selviää uuman ja laipan poikkileikkausluokat

UUMAN POIKKILEIKKAUSLUOKKA

Käytetään opinnäytetyön kaavaa 2.1 Vertailuluku P355

$$c_{t.uuma} := \frac{[h - 2(t_f + r)]}{(t_w)} \quad 720.81 = 58.32$$

$$c_{t.uuma} = 38.721$$

Koska $c/t.uuma$ on pienempi kuin kuvasta selviävä vertailuluku valitaan poikkileikkausluokaksi 1

LAIPAN POIKKILEIKKAUSLUOKKA

Käytetään opinnäytetyön kaavaa 2.3 Vertailuluku P355

$$c_{t.laippa} := \frac{\left[\left(\frac{b}{2} \right) - \left(r + \frac{t_w}{2} \right) \right]}{t_f} \quad 9.0.81 = 7.29$$

$$c_{t.laippa} = 4.867$$

Koska $c/t.laippa$ vertailulukua pienempi, on myös laipan poikkileikkausluokka 1

Seuraavaksi tarkastellaan taivutusmomenttia poikkileikkausluokka 1 mukaan

Käytetään opinnäytetyön kaavaa 2.4

Rakennuksille

$$M_{pl,Rd} := \frac{(W_{ply} \cdot f_y)}{Y_{M0}} = 3.032 \times 10^8 \cdot N \cdot mm$$

$$Y_{M0} := 1$$

$$Y_{M1} := 1$$

$$Y_{M2} := 1.25$$

Seuraavaksi tarkastellaan palkin suurin taipuma

Palkin kimmokerroin (Ratkaistu interpoloimalla)

$$E := 168000 MPa$$

Palkin profiilin neliömomentti

$$I := 2313010^4 mm^4$$

Tulipesän paine

$$p := 0.01 \frac{N}{mm^2}$$

Palkin pituus

$$L_p := 5000 mm$$

Palkkiväli

$$H_p := 1000 mm$$

Palkkiin kohdistuva viivakuorma

$$q := p \cdot H_p$$

$$q = 10 \frac{N}{mm}$$

Maksimimomentti (osavarmuuskerroin 1.5)

Käytetään työn kaavaa 2.10

$$M_{sd} := \frac{q \cdot L_p^2}{8} \cdot 1.5$$

Maksimitaipuman laskemiseen käytetään työn kaavaa 2.11

$$y_{max} := \frac{5q \cdot L_p^4}{384 E \cdot I} = 2.094 mm$$

$$M_{sd} = 4.688 \times 10^7 \cdot N \cdot mm$$

Käyttöaste

$$\frac{M_{sd}}{M_{pl,Rd}} = 0.155$$

KIEPAHDUKSEN TARKASTELU

$$\frac{h}{b} = 2.222$$

Koska suhdeluku on suurempi kuin 2

valitaan kiepahduskäyräksi b, sillä kyseessä on valssattu profiili

Valitaan epätarkkuustekijä kiepahduskäyrän b mukaan

$$a_{1t} := 0.34$$

C:n kertoimet valitaan palkin kuormitusehtojen mukaan

ja k:n kerroin saadaan vertaamalla kuormitustilannetta Eulerin tilanteisiin

$$k := 1 \quad k_w := 0.5 \quad z_a := \frac{h}{2} \quad z_0 := 0$$

$$C_1 := 1.132 \quad C_2 := 0.459 \quad z_g := z_a - z_0 \quad z_0 \text{ on } 0 \text{ koska kaksois-symmetrinen profiili}$$

C₃ arvoa ei tarvita sillä kyseessä on kaksoissymmetrinen I-palkki

$$I_w := 490 \cdot 10^9 \text{ mm}^6$$

$$\nu := 0.3$$

$$I_z := 1318 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$G := \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

G:n arvo saadaan sähköisestä liitteestä L3.6

$$I_t := 51.1 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$G = 6.462 \times 10^4 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Kriittinen kiepahdusmomentti (Kaava 2.12)

$$M_{cr} := C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_p^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{L_p^2}{\pi^2} \cdot \frac{G I_t}{E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - (C_2 \cdot z_g) \right]$$

$$M_{cr} = 6.073 \times 10^9 \cdot N \cdot \text{mm}$$

$$\lambda_{LT} := \sqrt{\frac{W_{ply} \cdot f_y}{M_{cr}}} = 0.223 \quad \text{Kaava 2.13}$$

Kiepsahdus ei ole kriittinen jos muunnetun hoikkuuden arvo jää alle 0.4 valssatuilla profiileilla.

Kiepahduksen pienennystekijän tarkastelu

Standardin EN 1993-1-1 mukaan saadaan arvot:

$\lambda_{LT0} := 0.4$ λ_{LT0} arvo on valssatuille profiileille 0.4
ja hitsatuille profiileille 0.2

$\beta := 0.4$ β arvot valssatuille profiileille on 0.4
ja hitsatuille profiileille 1.0

Seuraavaksi lasketaan arvo Φ_{LT} :lle valssattujen profiilien mukaisesti

$$\Phi_{LT} := 0.5 \left[1 + a_{lf} (\lambda_{LT} - \lambda_{LT0}) + \beta \lambda_{LT}^2 \right]$$

$$\Phi_{LT} = 0.48$$

$$\chi_{LT} := \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = 1.065$$

Vertailuarvot

$$v1 := 1$$

$$v2 := \frac{1}{\lambda_{LT}^2} = 20.027$$

Palkin kiepahduskestävyys

$$M_{b,Rd} := \chi_{LT} W_{ply} \frac{f_y}{Y_{M1}} = 3.23 \times 10^8 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}$$

Käyttöaste

$$\frac{M_{sd}}{M_{b,Rd}} = 0.145$$

NIVELTAPIN LASKUESIMERKKI

Materiaali P295

Vaikuttava voima

Lämpötila 150 C

 $F := 25000\text{N}$

Lähtötiedot

 $f := 295\text{MPa}$ $f_{yp} := 244\text{MPa}$ $y_{M0} := 1.0$ $d := 50\text{mm}$ $f_y := 244\text{MPa}$ $y_{M2} := 1.25$ $t := 25\text{mm}$ $R_m := 460\text{MPa}$ $y_{M6} := 1.5$ $k := 1.4$ $c_v := 2.5\text{mm}$ $t_{sl} := 20\text{mm}$

yM arvot löytyvät standardista 1993-1-1

$$A := \frac{2 \cdot \pi \cdot d^2}{4} = 3.927 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

Lasketaan kimmoteorian mukaan

Kaavat löytyvät opinnäytetyön taulukosta 8

$$W_{el} := \frac{(\pi d)^3}{32} = 1.211 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3$$

$$f_{up} := \frac{f_{yp}}{f} \cdot R_m = 380.475\text{MPa}$$

$$F_{vRd} := \frac{0.6 A \cdot f_{up}}{y_{M2}} = 7.172 \times 10^5 \cdot \text{N}$$

$$M_{Rd} := \frac{1.5 W_{el} \cdot f_{yp}}{y_{M0}} = 4.433 \times 10^7 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}$$

$$F_{vEd} := k \cdot (9.81 F) = 3.679 \times 10^5 \text{N}$$

$$M_{ed} := F_{vEd} \cdot \frac{(t + 4 \cdot cv + 2 \cdot tsl)}{8} = 3.449 \times 10^6 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}$$

$$M_{Rdser} := 0.8 W_{el} \cdot \frac{f_{yp}}{\gamma_{M6}} = 1.576 \times 10^7 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}$$

Varmuus

$$n := \frac{M_{Rdser}}{M_{ed}} = 1.4$$

Tapin yhdistetty leikkaus- ja taivutuskestävyys

$$\left(\frac{M_{ed}}{M_{Rd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{vEd}}{F_{vRd}} \right)^2 = 0.269$$