

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

Simo Mäkinen

Voimalaitoksen kanavien kannakkeiden rakennesuunnittelu

Diplomityö

2013

108 sivua, 44 kuvaa, 8 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: Professori Timo Björk

DI Heikki Holopainen

Hakusanat: elementtimenetelmä, kanava, kannake, levyrakenne, stabiilitetti,

Keywords: finite element method, duct, support structure, plated structure, stability

Tässä diplomityössä esitetään voimalaitoksen kanavien kannakkeiden rakennesuunnittelussa tarvittavat laskentamenetelmät. Työssä rakenteiden suunnitteluun ja mitoitukseen käytetään pääasiassa Eurokoodi 3 teräsrakenteiden suunnittelustandardin mukaista rajatilamitoitusta. Lisäksi kehitetään mitoitus työkaluja tärkeimpien kanavakannakkeiden suunnitteluun. Toteutettujen mitoitus työkalujen toiminta verifioidaan lujuusopin elementtimenetelmällä tehtävin tarkistuslaskelmin. Laskentatyökalujen analyttisen ratkaisun verifioitiin olevan varmallalla puolella kaikissa tutkituissa ilmiöissä. Työssä verifioituja menetelmiä voidaan soveltaa myös muiden vastaavien rakenteiden mitoittamiseen. Työssä luotujen laskentatyökalujen sisältämät laskentamenetelmät mahdollistavat monenlaisten rakenteiden vaatimustenmukaisen suunnittelun.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Mechanical Engineering

Simo Mäkinen

Designing of duct support structures for power plants

Master's Thesis

2013

108 pages, 44 pictures, 8 tables and 2 appendices

Examiners: Professor Timo Björk
M. Sc. Heikki Holopainen

Keywords: finite element method, duct, support structure, plated structure, stability

Calculation methods for designing of duct support structures for power plants are presented in this Master's Thesis study. The study mainly applies Eurocode 3 steel structure limit state design. Designer calculation tools are developed for some of the most important duct support structures. The correct functioning of these tools is verified by finite element method calculations. The designer calculations tools were verified to be conservative in all limit states. Calculation methods presented in this Master's Thesis enable designing of various structures that fulfill structural conformity.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Foster Wheeler Energia Oy:lle. Tärkein tavoite työtä tehdessä on ollut voimalaitoksen kanavien kannakerakenteiden suunnittelun laadun parantaminen.

Kiitän työni ohjaajia ja tarkastajia Heikki Holopaista ja Timo Björkiä. Lisäksi haluan kiittää työkavereitani FWE:llä sekä perhettäni ja ystäviäni saamastani tuesta.

Kuopiossa 22.9.2013

Simo Mäkinen

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	15
1.1 FOSTER WHEELER ENERGIA OY - YRITYKSEN ESITTELY	17
2 MENETELMÄT.....	18
2.1 KANNAKKEILLE ASETETTAVAT VAATIMUKSET.....	18
2.1.1 Yrityksen Engineering Manual -suunnitteluohjeen asettamat vaatimukset	18
2.2 RAKENNEMATERIAALIT	19
2.3 HITSATUT LIITOKSET	21
2.3.1 Liitosten mitoitus	23
2.3.2 Hitsiluokat	24
2.4 LUJUUSOPIN TEORIAA.....	25
2.4.1 Kimmo- ja plastisuusteoria.....	25
2.4.2 Väsyminen.....	26
2.4.3 Stabiilitteetti.....	26
2.4.4 Lujuusopin elementtimenetelmä ja sen käyttö stabiilitteettitarkasteluissa.....	30
2.5 EUROKOODI 3:N MUKAINEN RAJATILAMITOITUS	31
2.5.1 Rajatilamitoituksen periaatteet.....	31
2.5.2 Vetokestävyys.....	32
2.5.3 Puristuskestävyys.....	33
2.5.4 Taivutuskestävyys	33
2.5.5 Leikkauskestävyys.....	34
2.5.6 Väjäntökestävyys.....	35
2.5.7 Kestävyys taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutukselle.....	36
2.5.8 Aksiaalinen kuormitus, leikkausvoima ja taivutusmomentti	37
2.5.9 Nurjahduskestävyys	37
2.5.10 Kiepahduskestävyys.....	40
2.5.11 Levyn lommahduskestävyys	41
2.5.12 Leikkauslommahduskestävyys.....	44
2.5.13 Leikkausvoiman, taivutusmomentin ja aksiaalisen voiman yhteisvaikutus	47
2.5.14 Laipan taipumisesta aiheutuva uuman lommahdus	47
2.5.15 Kahden akselin suhteen tapahtuvan taivutuksen ja samanaikaisten leikkausvoimien yhteisvaikutus	48
2.6 RENGASKEHÄT	49
2.6.1 Rengaskehän sisäisten voimien laskenta	49
2.6.2 Rengaskehän stabiilitteetti	57
2.7 KANNAKERAKENTEET	58
2.7.1 Nelikulmaisen pystykanavan kannake.....	59
2.7.2 Pyöreän pystykanavan kannake.....	65
3 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	71
3.1 NELIKULMAISEN PYSTYKANAVAN KANNAKE	71
3.1.1 Alustavat tarkistukset ja tulokset	71
3.1.2 Laskentatyökalun verifiointi	77
3.2 PYÖREÄN PYSTYKANAVAN KANNAKE	97
3.2.1 Alustavat tarkistukset ja tulokset	97
3.2.2 Laskentatyökalun verifiointi	98
4 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	105
LÄHTEET	106
LIITTEET	

SYMBOLIT JA LYHENTEET

Symbolit

a	Hitsin a-mitta
a_k	Puolet kannakepalkin korkeudesta
$a_{w.cb.1}$	Kanavan seinämän ja jäykistekehän välisen vaakasuuntaisen hitsin a-mitta kannakepalkin kohdalla
$a_{w.cb.2}$	Kannakepalkin ja kanavan seinämän välisen pystyhitsin a-mitta
$a_{w.cb.3}$	Kannakepalkin uumien ja laippojen välisten hitsien a-mitta
$a_{w.cs.1}$	Kannakepalkin ja kanavan seinämän välisen otsahitsin a-mitta
$a_{w.cs.2}$	Kannakepalkin ja kanavan seinämän välisen kylkihitsin a-mitta
$a_{w.ds}$	Kanavan seinämän ja jäykistekehän välisen katkopienahitsin a-mitta
A	Poikkileikkauksen bruttopinta-ala
A_c	Puristetun levyn bruttopinta-ala
$A_{c,eff}$	Puristetun levyn tehollinen pinta-ala
A_f	Laippojen poikkileikkauksen pinta-ala
A_{fc}	Puristetun laipan tehollinen pinta-ala
A_{f1}	Laipan poikkileikkauksen pinta-ala
A_{f2}	Laipan poikkileikkauksen pinta-ala
A_{eff}	Poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala
A_v	Leikkauspinta-ala
A_w	Uuman poikkileikkauksen pinta-ala
b	Levykentän leveys
b_{cb}	Kannakepalkin leveys, kannakepalkin laipan leveys
b_{cs}	Kannakepalkin leveys, kannakepalkin laipan leveys
b_{ds}	Kanavan jäykistekehän jäykisteen laipan leveys
b_f	Laipan leveys
b_k	Kannakepalkin puristetun laipan ja sitä lähimmän jäykistekehän välinen etäisyys
b_m	Hyödynnettävä kanavan seinämän leveys yhteen suuntaan jäykisteestä pois päin

$b_{of.cb}$	Kannakepalkin laipan ulokkeellisen osan leveys
b_{tot}	Hyödynnettävä kanavan seinämän leveys jäykisterenkaan ympärillä yhteensä
c	Laippojen osuuden kerroin leikkauslommahduskestävyyden laskennassa
c_0	Laskentavakio alentuneen kimmokertoimen määrittämiseen
c_1	Laskentavakio alentuneen kimmokertoimen määrittämiseen
c_2	Laskentavakio alentuneen kimmokertoimen määrittämiseen
C_1	Laskentavakio jännevälin alueelta tuetun aksiaalisesti kuormitetun palkin nurjahduksessa
C_2	Laskentavakio jännevälin alueelta tuetun aksiaalisesti kuormitetun palkin nurjahduksessa
C_3	Laskentavakio jännevälin alueelta tuetun aksiaalisesti kuormitetun palkin nurjahduksessa
e_h	Vaakasuntainen etäisyys painopisteestä liitoksen muodostaman poikkileikkauksen reunaan
e_N	Poikkileikkauksen neutraaliakselin siirtyminen
e_v	Pystysuntainen etäisyys liitoksen painopisteestä liitoksen reunaan
$e_{w.ds}$	Kanavan seinämän ja jäykistekehän välisen liitoksen hitsikatkon pituus
E	Kimmokerroin
E_d	Kuormien vaikutuksen mitoitusarvo
E_t	Kimmokerroin laskentalämpötilassa
f_u	Murtolujuus
$f_{y,t}$	Myötölujuus laskentalämpötilassa
$f_{y,t,p}$	Painelaiteteräksen myötölujuus laskentalämpötilassa
$f_{y,t,s}$	Rakenneteräksen myötölujuus laskentalämpötilassa
$f_{vw,d}$	Hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo
F	Voima
$F_{w,Ed}$	Mitoittava voima hitsin pituusyksikköä kohden
$F_{w,Rd}$	Mitoituskestävyys hitsin pituusyksikköä kohden
h_{cb}	Kannakepalkin korkeus
h_{cs}	Kannakepalkin korkeus

h_{ds}	Kanavan jäykistekehän jäykisteen korkeus
h_w	Uuman korkeus
h_{wi}	Uuman osakentän korkeus
i	Hitaussäde
I	Neliömomentti
$I_{f.cs}$	Kannakepalkin puristetun laipan neliömomentti laipan tason suunnassa
I_k	Palkkialkion neliömomentti
I_p	Kanavan seinämästä ja jäykisteprofiilista koostuvan profiilin neliömomentti
I_P	Liitoksen muodostaman poikkileikkauksen polaarinen neliömomentti painopisteen suhteen
k	Kerroyksien laipan taipumisesta aiheutuvan uuman lommahduksen laskentaan
k_k	Kimmoisen alustan alustakerroin
k_M	Rotaatiojousen jousivakio
k_σ	Lommahduskerroin
k_τ	Leikkauslommahduskerroin
$k_{\tau i}$	Leikkauslommahduskerroin uuman osakentälle
k_1	Laskentavakio rengaskehien laskentaan
k_2	Laskentavakio rengaskehien laskentaan
l	Hitsin pituus
L	Tarkasteltavan kappaleen pituus
$L_{a.cb}$	Kanavan seinämän ja kannakepalkin tukipisteen välinen etäisyys
$L_{a.cs}$	Kanavan seinämän ja kannakepalkin tukipisteen välinen etäisyys
L_{cr}	Kriittinen nurjahduspituus
$L_{w.cs}$	Kannakepalkin ja kanavan seinämän välisen kylkihitsin pituus
$L_{w.ds}$	Kanavan seinämän ja jäykistekehän välisen katkopianahitsin osapituus
LT_M	Rengaskehän taivutusmomentin laskentatekijä
M	Taivutusmomentti
M_A	Taivutusmomentti rengaskehän pisteessä A
M_B	Taivutusmomentti rengaskehän pisteessä B
M_C	Taivutusmomentti rengaskehän pisteessä C

$M_{b,Rd}$	Kiepahduskestävyyden mitoitusarvo
M_{cr}	Kimmenteorian mukainen kriittinen momentti kiepahduksessa
$M_{c,Rd}$	Taivutuskestävyyden mitoitusarvo
$M_{el,Rd}$	Poikkileikkauksen kimmenteorian mukainen taivutuskestävyys
M_{Ed}	Taivutuksen mitoitusarvo
$M_{f,Rd}$	Plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo, kun vain teholliset laipat otetaan huomioon
M_{Max+}	Rengaskehän suurin positiivinen taivutusmomentti
M_{Max-}	Rengaskehän suurin negatiivinen taivutusmomentti
$M_{pl,Rd}$	Bruttopoikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys
$M_{V.y,Rd}$	Taivutuskestävyys y-akselin suhteen
$M_{V.z,Rd}$	Taivutuskestävyys z-akselin suhteen
$M_{y,Ed}$	Taivutuksen mitoitusarvo y-akselin suhteen
$M_{z,Ed}$	Taivutuksen mitoitusarvo z-akselin suhteen
M_0	Taivutusmomentti
N	Normaalivoima
N_A	Normaalivoima rengaskehän pisteessä A
N_B	Normaalivoima rengaskehän pisteessä B
N_C	Normaalivoima rengaskehän pisteessä C
$N_{b,Rd}$	Puristetun sauvan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo
$N_{c,Rd}$	Puristuskestävyyden mitoitusarvo
N_{cr}	Kimmenteorian mukainen kriittinen nurjahdusvoima
$N_{cr,T}$	Kimmenteorian mukainen kriittinen vääntönurjahduskuorma
$N_{cr,TF}$	Kimmenteorian mukainen kriittinen taivutusvääntönurjahduskuorma
N_{Ed}	Normaalivoiman mitoitusarvo
$N_{pl,Rd}$	Bruttopoikkileikkauksen poikkipinta-alan A plastisuusteorian mukainen vetokestävyys
$N_{t,Rd}$	Vetokestävyyden mitoitusarvo
P	Suunnittelupaine
P_{cr}	Kriittinen nurjahdusvoima
P_{ys}	Paine, jolla kehäjännitys rengasjäykisteessä saavuttaa myötörajan
q	Viivakuorma

r	Levyn kaarevuussäde
R	Pyöreän kanavan seinämän keskisäde
R_d	Rakenneosan kestävyuden mitoitusarvo
$S_{f.cb}$	Kannakepalkin laipan paksuus
$S_{f.cs}$	Kannakepalkin laipan paksuus
$S_{f.ds}$	Kanavan jäykistekehän jäykisteen laipan paksuus
$S_{w.cb}$	Kannakepalkin uuman paksuus
$S_{w.cs}$	Kannakepalkin uuman paksuus
$S_{w.ds}$	Kanavan jäykistekehän jäykisteen uuman paksuus
$S_{ws.cb}$	Kannakepalkin tukipisteen uumajäykisteen paksuus
$S_{ws.cs}$	Kannakepalkin tukipisteen uumajäykisteen paksuus
$S_{ws.sb}$	Teräsrakennepalkin tukipisteen uumajäykisteen paksuus
$S_{ws.sb}$	Teräsrakennepalkin tukipisteen uumajäykisteen paksuus
S	Staattinen momentti
t	Tarkasteltavan kohdan paksuus
t_f	Laipan paksuus
t_{st}	Jäykisterenkaan paksuus
t_w	Uuman paksuus
T	Laskentalämpötila
T_{Ed}	Vääntömomentin mitoitusarvo
T_{Rd}	Vääntökestävyyden mitoitusarvo
$T_{t,Ed}$	Vapaan väännön mitoitusarvo
$T_{w,Ed}$	Estetyn väännön mitoitusarvo
v	Taipuma
v_k	Kanavan seinämän taipuma
V	Leikkausvoima
V_A	Leikkausvoima rengaskehän pisteessä A
V_B	Leikkausvoima rengaskehän pisteessä B
V_C	Leikkausvoima rengaskehän pisteessä C
$V_{b,Rd}$	Leikkauskestävyyden mitoitusarvo leikkauslommahduksen laskennassa
$V_{bw,Rd}$	Uuman osuus leikkauskestävyyden mitoitusarvosta leikkauslommahduksen laskennassa

$V_{bf,Rd}$	Laippojen osuus leikkauskestävyyden mitoitusarvosta leikkauslommahduksen laskennassa
$V_{c,Rd}$	Leikkauskestävyyden mitoitusarvo
V_{Ed}	Leikkausvoiman mitoitusarvo
$V_{pl,Rd}$	Plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyys
$V_{pl,T,Rd}$	Plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyyden pienennetty mitoitusarvo ottaen huomioon vääntömomentin vaikutus
w	Palkkialkion leveys
W	Rengaskehään vaikuttava kuorma
W_{eff}	Tehollinen taivutusvastus
$W_{eff,min}$	Tehollisen taivutusvastuksen pienin arvo
$W_{eff,y}$	Tehollisen taivutusvastuksen pienin arvo kiepahduskestävyyden laskennassa
$W_{el,min}$	Kimboteorian mukaisen taivutusvastuksen minimiarvo
$W_{el,y}$	Kimboteorian mukaisen taivutusvastuksen minimiarvo kiepahduskestävyyden laskennassa
W_{pl}	Plastisuusteorian mukainen taivutusvastus
$W_{pl,y}$	Plastisuusteorian mukainen taivutusvastus kiepahduskestävyyden laskennassa
W_y	Taivutusvastus kiepahduskestävyyden laskennassa
α	Epätarkkuustekijä
α_d	Muodonmuutoskerroin rengaskehien laskennassa
α_{LT}	Epätarkkuustekijä kiepahduksen laskennassa
α_y	Yhteisvaikutuksen laskentatekijä
β	Puoliäärettömän palkin kiertymän laskentatekijä
β_d	Muodonmuutoskerroin rengaskehien laskennassa
β_w	Perusaineen ja hitsiaineen lujuuksien suhdetta edustava kerroin
β_z	Yhteisvaikutuksen laskentatekijä
ε	Myötölujuudesta riippuva tekijä
Φ	χ :n laskentatekijä

Φ_{LT}	pienennystekijän χ_{LT} laskentatekijä
γ_F	FWEOY:n lujuuslaskennan kuorma-/varmuuskerroin
γ_M	Osavarmuusluku
γ_{M0}	Poikkileikkauskestävyyden osavarmuusluku poikkileikkausluokasta riippumatta
γ_{M1}	Sauvojen stabiiliuden suhteen sovellettava kestävyyden osavarmuusluku
γ_{M2}	Murtolujuuden suhteen sovellettava osavarmuusluku
χ	Aksiaalisesti tasaisesti puristetun sauvan muunnettua hoikkuutta vastaava pienennystekijä
χ_{LT}	Kiepahduskestävyyden pienennystekijä
χ_w	Uuman osuuden kerroin leikkauslommahduskestävyyden laskennassa
$\bar{\lambda}$	Muunnettu hoikkuus
$\bar{\lambda}_{LT}$	Muunnettu hoikkuus kiepahduksen laskennassa
$\bar{\lambda}_T$	Muunnettu hoikkuus avointen poikkileikkausten vääntönurjahduksessa ja taivutusvääntönurjahduksessa
$\bar{\lambda}_p$	Muunnettu hoikkuus lommahduksessa
$\bar{\lambda}_w$	Muunnettu hoikkuus leikkauslommahduksessa
λ_1	Muunnetun hoikkuuden määrittämisessä tarvittava hoikkuuden arvo
η	Leikkauslommahduskestävyyden laskentatekijä
η_N	Kriittisen nurjahduskuorman laskentakerroin jännevälän alueelta tuetulle palkille
η_1	Tarkastusehto lommahdukselle normaalijännityksen vaikutuksesta
η_3	Tarkastusehto leikkauslommahduskestävyydelle
$\bar{\eta}_1$	Taivutuksen ja plastisen taivutuskestävyyden suhde
$\bar{\eta}_3$	Leikkausvoiman ja uuman leikkauskestävyyden suhde
ρ	Laskentalujuuden pienennystekijä
σ_{cr}	Kimmoiteorian mukainen kriittinen lommahdusjännitys
σ_{es}	Rengasjäykisteen nimellinen kimmoraja
σ_E	Eulerjännitys
σ_i	Rengasjäykisteen kiepahdusjännitys
$\sigma_{w,Ed}$	Bi-momentin aksiaalinen jännitys

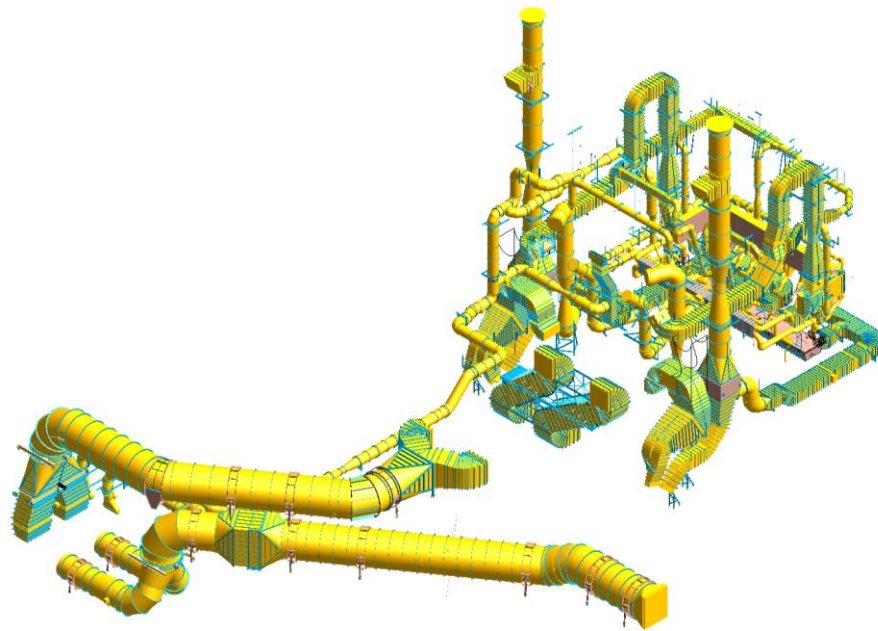
τ_{cr}	Kimmenteorian mukainen kriittinen lommahdusjännitys leikkauslommahduksessa
$\tau_{duct.1}$	Kanavan seinämän leikkauskestävyyden tarkistusehto
$\tau_{duct.2}$	Kanavan seinämän leikkauskestävyyden tarkistusehto
τ_{Ed}	Paikallisen leikkausjännityksen mitoitusarvo
$\tau_{h,Ed}$	Momentin aiheuttama vaakasuuntainen jännityskomponentti
$\tau_{t,Ed}$	Vapaasta väännöstä aiheutuva leikkausjännitys
$\tau_{v,Ed,1}$	Leikkausvoiman aiheuttama pystysuuntainen jännityskomponentti hitsissä
$\tau_{v,Ed,2}$	Momentin aiheuttama pystysuuntainen jännityskomponentti hitsissä
$\tau_{w,Ed}$	Estetystä väännöstä aiheutuva leikkausjännitys
$\tau_{w,Rd}$	Leikkausjännitykskestävyys
ν	Poissonin vakio
ψ	Jännityssuhde
$\psi(\beta x)$	Puoliäärettömän palkin kiertymän laskentatekijä

Lyhenteet

CFB	Circulating Fluidized Bed, suom. kiertoletijupeti
FE	Finite Element, suom. äärellinen elementti
FEM	Finite Element Method, suom. elementtimenetelmä
FWEOY	Foster Wheeler Energia Osakeyhtiö
GNA	Geometrically Nonlinear Analysis, suom. geometrisesti epälineaarinen analyysi
GNIA	Geometrically Nonlinear Analysis with Imperfections included, suom. geometrisesti epälineaarinen analyysi, johon sisältyy epätarkkuudet
GMNA	Geometrically and Materially Nonlinear Analysis, suom. geometrisesti ja materiaaliominaisuuksilta epälineaarinen analyysi
GMNIA	Geometrically and Materially Nonlinear Analysis with Imperfections included, suom. geometrisesti ja materiaaliominaisuuksilta epälineaarinen analyysi, johon sisältyy epätarkkuudet
LA	Linear Analysis, suom. lineaarinen kimmoteorian mukainen analyysi
LBA	Linear Buckling Analysis, suom. lineaarinen stabiiliusanalyysi
MA	Modal Analysis, suom. ominaistajuusanalyysi
MNA	Materially Nonlinear Analysis, suom. materiaaliominaisuuksilta epälineaarinen analyysi

1 JOHDANTO

Höyrykattilavoimalaitoksen toimintaan liittyy oleellisesti ilma- ja savukaasuvirtaus. Ilmakanavat tuovat polttoprosessissa tarvittavan ilman tulipesään ja savukaasukanavat siirtävät palamisessa syntyneet savukaasut ilman ja veden esilämmittimien kautta suodattimelle ja edelleen savupiipulle. Kuvassa 1 on esitetty erään voimalaitoksen ilma- ja savukaasukanavat.



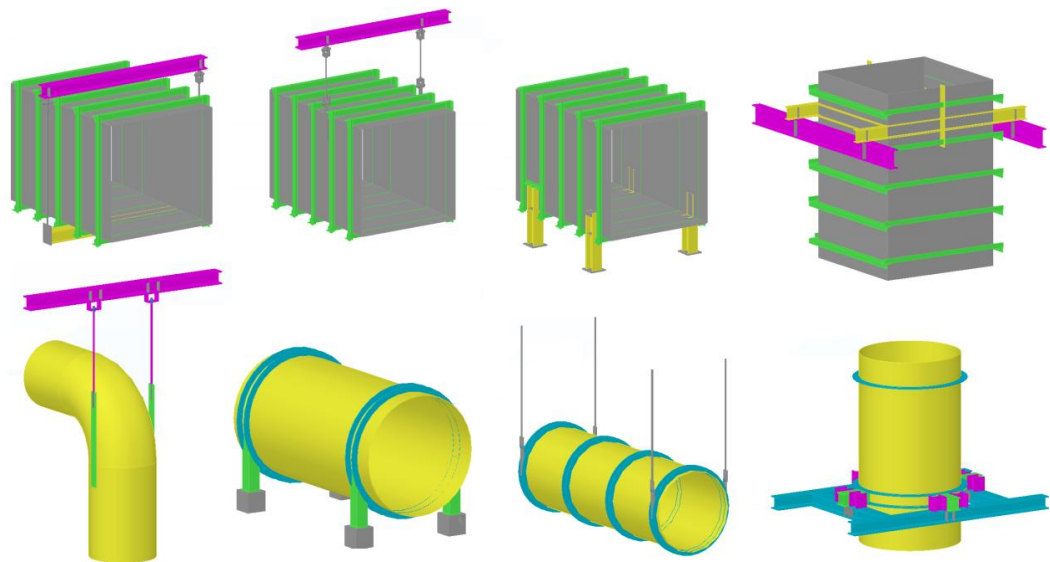
Kuva 1. Esimerkki voimalaitoksen ilma- ja savukaasukanavista

Kanavilla on monia ominaisuuksia, jotka luovat vaatimuksia kanavien kannatteluun. Kanavia on poikkileikkaukseltaan pyöreitä ja nelikulmaita ja kanavien koko vaihtelee pienistä varsin suuriin. Esimerkiksi pienten sekundääri-ilman suutinkanavien halkaisija on vain joitain kymmeniä senttimetrejä, kun taas suuret savukaasukanavat voivat olla läpimitaltaan toistakymmentä metriä. Kanavat jaotellaan lämpötilan mukaan kylmiin ja kuumiin kanaviin, korkeimmillaan lämpötila kanavissa voi nousta useaan sataan celsius-asteeseen. Edellä mainitut ominaisuudet ja ominaisuusyhdistelmät luovat haasteita kanava- ja kannakerakenteiden suunnitteluun.

Perinteisesti erilaisten kannakkeiden kirjo on ollut suuri johtuen yksittäisten suunnittelijoiden näkemyksistä. Jopa yhdessä laitoksessa saattaa esiintyä samaan

käyttötarkoitukseen useita erilaisia kannakeratkaisuja. Eri laitosprojektien välillä kannakevariaatioiden määrä on vieläkin suurempi. Moninaiset vaatimukset tekevät kannakesuunnittelusta haasteellista. Toteutuneet kannakkeet ovat usein turhan raskaita tai toisaalta joskus kriittisistä kohdista liian heikkoja. Toisinaan kannakkeissa on esiintynyt selviä lujuusteknisiä ongelmia tai jopa turvallisuusriskejä. Myös muita haasteita esiintyy, esimerkiksi kanavan eristämistä ei ole otettu riittävän hyvin huomioon tai kannatteluvälin valinta on ollut hataralla pohjalla. Kanavia on kannateltu mahdollisesti jopa liian tiheään. Kannakesuunnittelussa ei monesti ole otettu huomioon kanavan jäykistämistä kannakkeen kohdalta.

Tämän diplomityön tarkoitus on löytää toteutuneista kannaketyypeistä hyvät ja huonot ratkaisut. Kuvassa 2 on esitetty tyypillisiä hyviä kanavakannakkeita.



Kuva 2. Tyypillisiä hyviä kanavakannakkeita

Lisäksi työssä laaditaan laskentatyökalut ja suunnitteluohjeet tarpeellisimpien kannakkeiden suunnitteluun ja mitoitukseen. Tässä yhteydessä toteutuneita kannakkeita kehitetään valmistettavuuden, asennettavuuden ja lujuusteknisten ominaisuuksien näkökulmista. Hyvät kehitetyt ratkaisut tyypillisimmille kannakkeille vakioidaan ja näitä ratkaisuja pyritään käyttämään tulevissa laitosprojekteissa. Kannakkeet mitoitetaan voimassa olevien standardien menetelmien mukaisesti. Osaa mutkikkaammista rakenteista tutkitaan lujuusopin elementtimenetelmää hyödyntävällä laskentaohjelmistolla. Elementtimenetelmää käytetään myös luotujen laskentatyökalujen oikeellisuuden todentamiseen.

1.1 Foster Wheeler Energia Oy - Yrityksen esittely

Tämä diplomityö on toteutettu osana Foster Wheeler Energia Oy:n Future Boiler Engineer –päättötyöohjelmaa. Foster Wheeler Energia Oy Group (FWEOY Group) kehittää tehokkaita ja ympäristöä säästäviä energiaratkaisuja. Voimalaitos- ja teollisuuskattiloihin sekä niiden kunnossapitoon ja huoltoon erikoistunut yritys on energia-alan teknologian ja tuotekehityksen edelläkävijä koko maailmassa.

Yhtiön ydinosamista on korkean hyötysuhteen matalapäästöinen leijukerrosteknologia ja erityisesti CFB- eli kiertopetiteknologia. Foster Wheeler on noin 40 prosentin markkinaosuudellaan maailman johtava CFB-kattiloiden toimittaja. FWEOY Group ja muut Foster Wheeler AG -konserniin kuuluvat yritykset ovat toimittaneet asiakkaille lähes 500 leijukerrosteknologiaan perustuvaa kattilayksikköä. Näistä yli 300 on CFB- eli kiertopetitekattiloita.

Suomessa FWEOY Group toimii Espoossa, Kurikassa ja Varkaudessa, sekä Ruotsissa ja Saksassa tytäryhtiöissä. FWEOY Group pitää sisällään maailmanlaajuisen organisaation terävintä osaamista. Edistyksellisen teknologian ohella menestys nojaa vahvaan projektiosaamiseen ja osaavaan henkilöstöön. Yritys työllistää lähes 500 henkilöä, joista noin 450 työskentelee Suomessa.

Tärkeimmät tuotteet ja palvelut:

- Leijukerroskattilat
- Ilmanpaineiset CFB-kaasuttimet
- Metallurgian jätelämpökattilat
- Pölypolttokattilat
- Kattiloiden kunnossapito ja huolto

Foster Wheeler Energia Oy Group on osa maailmanlaajuisista Foster Wheeler AG -konsernia, joka toimittaa teknisesti edistyneitä ja ympäristöä säästäviä voimalaitoksia sekä prosessi- ja öljyteollisuuden laitteita ja laitoksia. Yhtiö työllistää yli 12 000 ammattilaista, jotka palvelevat asiakkaita kahdella päätoimialalla, Global Engineering and Construction Group ja Global Power Group.

2 MENETELMÄT

Kannakerakenteiden suunnittelu edellyttää lujuusopin teorian ja menetelmien tuntemusta. Suunnittelijalta vaaditaan perehtyneisyyttä myös materiaalioppiin ja rakenteita koskeviin standardeihin.

2.1 Kannakkeille asetettavat vaatimukset

Tässä luvussa käsitellään kanavien kannakkeille asetettuja vaatimuksia. Vaatimuksia kannakesuunnittelulle asettavat yrityksen omat sisäiset ohjeet, asiakkaan sopimuksessa asettamat vaatimukset sekä kulloisenkin kohdemaan viranomaiset standardien muodossa. Virallisten tahojen asettamat vaatimukset ja laaditut suunnitteluohjeet ovat kuitenkin usein puutteellisia. Tästä johtuen hyvän ja vastuullisen suunnittelijan tulee tuntea rakenteiden ja materiaalien käyttäytymiseen ja ominaisuuksiin liittyvää teoriaa mahdollisimman laajalti.

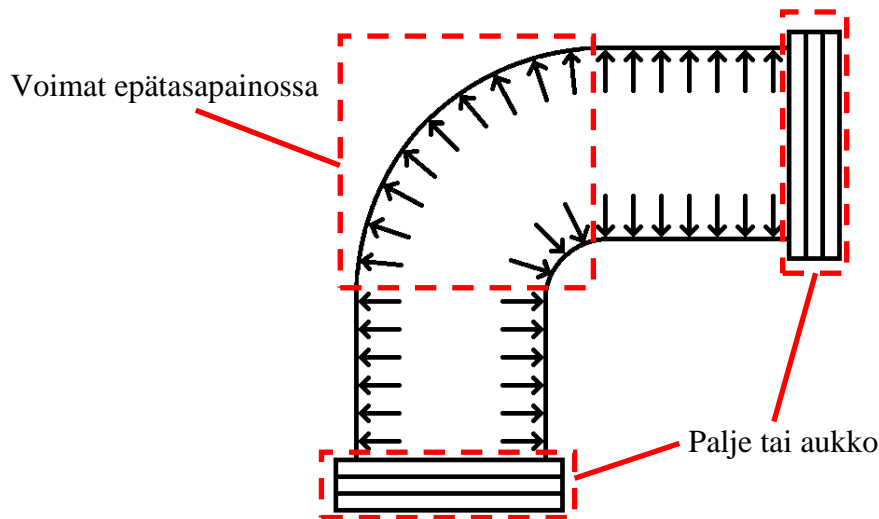
2.1.1 Yrityksen Engineering Manual -suunnitteluohjeen asettamat vaatimukset

Foster Wheeler Energia Oy:n Engineering Manual –suunnitteluohjeen insinöörintyötä koskevassa osuudessa asetetaan seuraavia vaatimuksia kanaville ja niiden kannakkeille:

- Kanavarakenteiden tulee olla itsenäisesti kannateltuja aina kun mahdollista
- Kuormia ei saa johtaa apulaitteisiin
- Palkeiden paikat ja rakenteiden lämpöliike täytyy ottaa huomioon kannakkeita suunniteltaessa

Lisäksi suunnitteluohjeessa mainitaan, että kannakkeiden suunnittelussa on otettava huomioon kannakkeeseen liittyvien tukirakenteiden kestävyys ja soveltuvuus kyseessä olevan kuormituksen kannatteluun. Kannateltavan kanavan paikallinen kestävyys kannakkeen läheisyydessä on tarkistettava. Lämpöliikkeiden takia

kanavien kannattelussa tulisi suosia roikkukannakkeita alhaalta kannattelun sijaan. Jos rakenne kuitenkin kannatellaan altpäin, täytyy kitkan vaikutus ottaa huomioon. Ohjureita tulee käyttää tarvittaessa, kuten kanavien sisäisestä paineesta johtuvien epätasapainoisten palje- ja muiden aukkovoimien sekä tuulikuorman hallitsemiseen. Kuvassa 3 on esitetty kanavassa vaikuttavasta ylipaineesta aiheutuva voimien epätasapaino. Kuvan 3 tapaus on esimerkki tilanteesta, jossa ohjureiden käyttö on tarpeen.



Kuva 3. Epätasapainoinen palje- tai aukkovoima

2.2 Rakennemateriaalit

Rakennemateriaalin valintaan vaikuttavat materiaalin kestävyys, paino ja hinta. Kestävyyden määrääviä tekijöitä ovat materiaalin lujuus, jäykkyys, korroosionkesto ja lämmönkesto. Kanavien kannakkeiden rakennemateriaalina käytetään yleisimmin rakenneteräksiä tai painelaiteteräksiä, joten kimmokerroin materiaalien välillä on sama. Kimmokerroin ei kuitenkaan ole vakio, vaan sen arvo pienenee eli materiaalin jäykkyys laskee lämpötilan kasvaessa. Käytetyn teräksen lujuusluokka valitaan ottaen huomioon edellä mainitut kolme näkökohtaa (Niemi 2003). Erityisesti kuumien kanavien, kuten savukaasukanavien kannakkeissa, merkittävänä valintaperusteena on materiaalin kuumaalujuus.

Lämpötilan noustessa teräksen ominaisuudet kuten myötölujuus ja kimmokerroin alenevat. Seostamattomalla teräksellä jo noin 100°C lämpötilassa myötölujuuden arvo on hieman alempi kuin huoneenlämmössä. 700°C:ssa myötölujuudesta on jäljellä vain noin 15 %. (Huhdankoski 2000)

Teräksen koostumuksella ja mikrorakenteella voidaan vaikuttaa myötölujuuden lämpötilariippuvuuteen. Teräksen seosaineista molybdeeni, mangaani ja etenkin kromi parantavat kuumamyötölujuutta. Sälemartensiittinen mikrorakenne on kuumalujuuden kannalta edullisin. Kuumissa kohteissa käytetään edellä mainittuja seosaineita sisältäviä teräksiä. (Niemi & Kemppi 1993)

Välittömän kimmoisen muodonmuutoksen lisäksi jännityksen alaisessa teräksessä tapahtuu jatkuvasti kasvavaa ja pysyvää muodonmuutosta, jota kutsutaan virumiseksi. Viruminen johtaa lopulta murtumaan. Teräksen käyttöä korkeissa lämpötiloissa rajoittaa alentuneen myötölujuuden ja virumisen lisäksi hilseilyn eli pinnan hapettumisen lisääntyminen (Niemi & Kemppi 1993).

Kanavien kannakkeissa ei yleensä esiinny niin suuria lämpötiloja, että virumisesta aiheutuisi ongelmia, mutta kuumalujuus sen sijaan toimii mitoituslujuuden nimellisarvona monessa kohtaa. Kuumalujuudet on ilmoitettu eurooppalaisissa standardeissa yleensä vain painelaiteteräksille. Tästä johtuen käyttäessä rakenneteräksiä korkeissa lämpötiloissa, kuumamyötölujuus lasketaan FWEQ:n käytännön mukaisesti vastaavan lujuusluokan painelaiteteräksen myötölujuutta redusoimalla kaavasta:

$$f_{y,T,s} = \left(1 - \frac{T}{300^{\circ}\text{C}} \cdot 0.15\right) \cdot f_{y,T,p} \quad (1)$$

missä $f_{y,T,s}$ on rakenneteräksen kuumamyötölujuus, T on laskentalämpötila ja $f_{y,T,p}$ on vastaavan lujuusluokan painelaiteteräksen myötölujuus laskentalämpötilassa. Kaava 1 antaa riittävällä tarkkuudella konservatiivisen arvion rakenneteräksen kuumamyötölujuudesta. Kaavaa 1 voidaan soveltaa lämpötila-alueella 50-400 °C. Alle 50°C lämpötilassa voidaan käyttää huoneenlämpötila-arvoja.

Korkeassa lämpötilassa alentunut kimmokerroin lasketaan kaavasta (SFS-EN 12952-3 2011, kaava D.4-1, s.159):

$$E_T = (c_0 + c_1 \cdot T + c_2 \cdot T^2) \cdot 1000 \quad (2)$$

Kaavassa käytetyt vakiot c_0 , c_1 , c_2 saadaan taulukosta 1.

Taulukko 1. Alennetun kimmokertoimen laskentavakiot teräsryhmittäin

Kimmokerroin E_T [kN/mm ²]	Alennetun kimmokertoimen laskentavakiot		
Teräsryhmä (CEN ISO/TR 15608)	c_0	c_1	c_2
1 ... 5.2	213.16	-6.91 E-2	-1.824 E-5
6	215.44	-4.28 E-2	-6.185 E-5
8.2	201.66	-8.48 E-2	0

2.3 Hitsatut liitokset

Hitsattujen liitosten käyttöä koneenrakennuksessa ja eri tyyppisten liitosten jaottelua käsittelevät Airila et al. (2001) ja Niemi & Kemppe (1993). Edellä mainitut jaottelevat liitokset seuraaviin tyyppisiin:

- Voimaliitos
- Kiinnitysliitos
- Sideliitos
- Varusteluhitsi

Voimaliitos välittää voimasuureita kuten aksiaalivoimaa, leikkausvoimaa tai momenttia liittyvien osien välillä. Voimaliitokset mitoitetaan usein tasalujiksi perusaineen kanssa. Tasalujat hitsit toteutetaan yleensä suunnittelemalla liitokset läpihitsattaviksi. Tyypillisiä voimaliitoksia ovat palkkien laippojen ja uumien jatkohitsit ja palkin ja pilarin liitokset. Muita tyypillisiä voimaliitoksia ovat erilaisten nostokorvakkeiden liitokset sekä paineastioiden vaipan saumat.

Kiinnitysliitokset liittävät rinnakkaisia levyosia toisiinsa muodostaen poikkileikkausprofiileja, kuten erilaisia palkkeja tai jäykistettyjä levykenttiä. Kiinnityshitsien ei yleisesti tarvitse olla tasalujia perusaineen kanssa ja ne toteutetaankin yleensä suhteellisen pienillä pienahitseillä. Tyypillisiä kiinnitysliitoksia ovat palkin laipan ja uuman väliset hitsit ja jäykisteitä perusrakenteeseen liittävät hitsit tai katkohitsit.

Sideliitokset eivät ole varsinaista kuormaa kantavia liitoksia. Sideliitosten mitoittava rasitus syntyy sidottavan rakenneosan tahallisesta tai tahattomasta alkukäyryydestä tai muusta epätäydellisyydestä. Tyypillisiä sideliitoksia ovat esimerkiksi kahdesta U-tangosta kootun puristussauvan sidelevyjen hitsit ja kotelopalkin sisäpuolisten väliseinien hitsit.

Varusteluhitseillä liitetään kantaviin rakenneosiin kiinnikkeitä erilaisiin tarpeisiin, kuten putkistoja tai kaapeleita varten. Varusteluhitsien lujuudelle ei ole erityisiä vaatimuksia, mutta niiden mitoitus on syytä ottaa huomioon erityisesti väsyttävästi kuormitettuja rakenteita suunniteltaessa. (Niemi 2003, Niemi & Kemppi 1993)

Voimalaitoksen putkistot ovat usein raskaita ja putkistokannakkeisiin kohdistuvat kuormat ovat huomattavan suuria. Tästä johtuen voimalaitoksissa myös putkistokannakkeiden liitokset on syytä mitoittaa voimaliitoksina.

Standardissa EN 1993-1-8 käsitellään pienahitsien, kolopienahitsien, päittäishitsien, tulppahitsien ja pyöröterästen kylkihitsien mitoitusta. Tässä työssä tärkeimpiä liitoksia ovat pienahitsit ja päittäishitsit. Standardi asettaa pienahitsien käytölle rajoituksen: liitospintojen muodostama kulma tulee olla 60°-120°. Alle 60°:een kulmaan hitsattava piena tulee käsitellä osittain läpihitsattuna päittäishitsinä. Yli 120°:een kulmassa pienahitsin kestävyys tulee määrittää kokeellisesti.

2.3.1 Liitosten mitoitus

Tässä työssä käytetään pääasiassa pienahitsien mitoitamiseen useissa lähteissä (Niemi 2003, EN 1993-1-8 2005) esitettyä yksinkertaistettua mitoitustapaa. Kyseisessä mitoitustavassa hitsiin syntyvä nimellinen jännitys oletetaan aina leikkausjännityksen luonteiseksi. Menettely johtaa lievään ylimitoitukseen, mutta mitoituksen yksinkertaisuuden tuottamat edut nähdään työn tavoitteen kannalta tärkeimpinä. Työssä luodut laskentatyökalut tulevat pääasiassa suunnittelijoiden käyttöön, joilla ei ole laajaa lujuusteknistä osaamista.

Yksinkertaistetun mitoitustavan mitoitusehtona käytetään:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad (3)$$

missä $F_{w,Ed}$ on mitoitettava voima hitsin pituusyksikköä kohden ja $F_{w,Rd}$ on mitoituskestävyys pituusyksikköä kohden. $F_{w,Rd}$ saadaan yhtälöstä 4 seuraavasti:

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a \quad (4)$$

missä a on hitsin a -mitta. EN 1993-1-8 mukaan hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvona käytetään:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (5)$$

Eurooppalaisista standardeista ei kuitenkaan yleensä löydy kuumamurtolujuuksia, joten hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvona käytetään tässä työssä:

$$f_{vw,d} = \frac{f_{y,T}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

missä $f_{y,T}$ on rakennemateriaalin myötölujuus laskentalämpötilassa. Materiaalin virumislujutta ei oteta huomioon, koska tässä työssä tutkittavien rakenteiden lämpötilat ovat niin matalia ettei viruminen tule määrääväksi. Kertoimia β_w ja γ_{M2} ei nyt tarvita, koska käytetään murtolujuuden sijaan myötölujuutta. Mikäli kyseessä on

rakenneteräs, $f_{y,T}$ lasketaan vastaavan lujuusluokan painelaiteteräksen myötölujuutta redusoimalla kaavan 1 mukaisesti.

Edellisten kaavojen mukaan mitoitettavalle hitsille on syytä asettaa a-mitalle rajoitukset:

$$3 \text{ mm} \leq a \leq 15 \text{ mm} \quad (7)$$

Rajaa kannattaa käyttää, koska pienet hitsit jäähtyvät liian nopeasti, jolloin niiden mikrorakenne saattaa tulla liian kovaksi ja sitkeys riittämättömäksi. Liian suurissa hitseissä juuren puolen venymät kasvavat suuriksi lovivaikutuksen takia ja liitoksen muodonmuutoskyky heikkenee. Jos tarvitaan a-mitaltaan yli 15 mm olevaa hitsiä, niin kannattaa viistää hitsausrailo ja muuttaa hitsi esimerkiksi puoli-V hitsiksi.

2.3.2 Hitsiluokat

Hitsit jakautuvat sisältämiensä geometrinen virheiden mukaan kolmeen hitsiluokkaan, joita ovat B, C ja D (SFS-EN ISO 5817 2006). Luokkaan B kuuluvat erityisen hyvälaatuiset, keskimääräistä konepajalaatua korkeampilaatuiset hitsit. Luokan B hitsit ovat toisinaan tarpeen paineastioiden valmistuksessa ja väsyttävästi kuormitetuissa rakenteissa, kun luokka C ei anna riittävää väsymiskestävyyttä. Normaalia hyvää konepajalaatua edustaa luokka C. Staattisesti kuormitettujen rakenteiden liitoksilta vaaditaan hitsiluokka C. D-luokan hitsit ovat tyydyttävän laatuista ja niitä käytetään ainoastaan lujuusteknisesti toisarvoisissa kohteissa. (Niemi 2003)

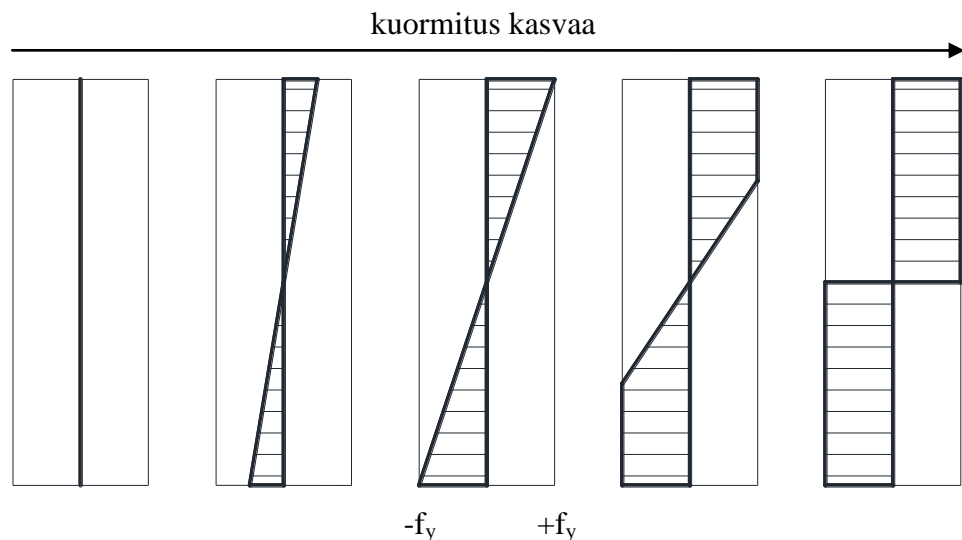
Standardi SFS-EN ISO 5817 määrittää edellä luetelluille luokille sallittujen geometrinen virheiden arvot. Käytännön teräsrakenteissa riittää yleensä hitsiluokka C, poikkeuksellisen vaativissa kohteissa valitaan luokka B. (Niemi 2003)

2.4 Lujuusopin teoriaa

2.4.1 Kimmo- ja plastisuusteoria

Rakenteiden tai liitosten kestävyys ja jännitykset voidaan laskea kahdella eri periaatteella, kimmoteorialla ja plastisuusteorialla. Kimmoteoriassa jännitysten ja siirtymien välillä oletetaan olevan Hookeen lain mukainen lineaarinen riippuvuus. Rakenteen tai sen osan kestävyys rajoittuu suurimman jännityksen noustessa myötörajalle. Plastisuusteoriaa käyttäessä oletetaan, että jännitykset jakautuvat rakenteessa uudelleen siten, että koko poikkileikkauksessa tapahtuu myötäämistä. Plastisuusteoriaa käyttäessä rakenteen plastinen lisäkestävyys tulee hyödynnettyä ja rakenteen kestävyydelle saadaan suurempi kestävyys kuin kimmoteorialla. (Niemi & Kemppe 1993)

Kimmo- ja plastisuusteorian antamien kestävyyseroa havainnollistaa kuva 4, jossa on esitetty suorakaiteen muotoisen poikkileikkauksen normaalijännitysjaakauma taivutuskuormituksen alaisena. Kuvassa vasemmalla on kuormittamattoman rakenteen jännitysjaakauma, keskellä kimmoteorian mukaisen kestävyuden rajatilan mukainen jännitysjaakauma ja oikealla täysin plastisoituneen rakenteen jännitysjaakauma. Kuvassa oikealla esitetty plastisuusteorian mukainen jännitystila kuvaa rasiitusta, jonka poikkileikkaus voi plastisuusteorian rajoissa enimmillään kestää.



Kuva 4. Kimmoteorian ja plastisuusteorian mukainen kestävyys

2.4.2 Väsyminen

Valtaosa teräsrakenteiden murtumiseen johtaneista vaurioista johtuu metallimateriaalin, hitsin tai perusaineen väsymisestä. Erityisen alttiita väsymiselle ovat hitsatut rakenteet, joiden suunnittelussa ei ole otettu huomioon väsymistä. Tässä työssä käsitellään ainoastaan staattisesti kuormitettuja rakenteita, joten rakenteiden väsymisanalyysihin ja väsymiseen ilmiönä ei paneuduta syvemmin. Hyvin suunnitelluissa kanavissa ei yleensä esiinny väsymistä käyttöiän aikana. Väsymistarkasteluihin on annettu ohjeita muun muassa standardin EN 1993 osassa 1-9. Standardissa esitetyjä väsymistarkastelumenetelmiä ovat:

- Nimellinen jännitysvaihtelu (EN 1993-1-9 2005, taulukot 8.1...8.10)
- Muunnettu nimellinen jännitysvaihtelu
- Geometrinen (hot-spot) jännitysvaihtelu (EN 1993-1-9 2005, liite B)

Hitsattujen liitosten väsymiskestoja voidaan tutkia myös mm. käytännön väsytykskokeilla ja murtumismekaniikkaan pohjautuvilla tietokonesimulaatioilla.

2.4.3 Stabiiliteetti

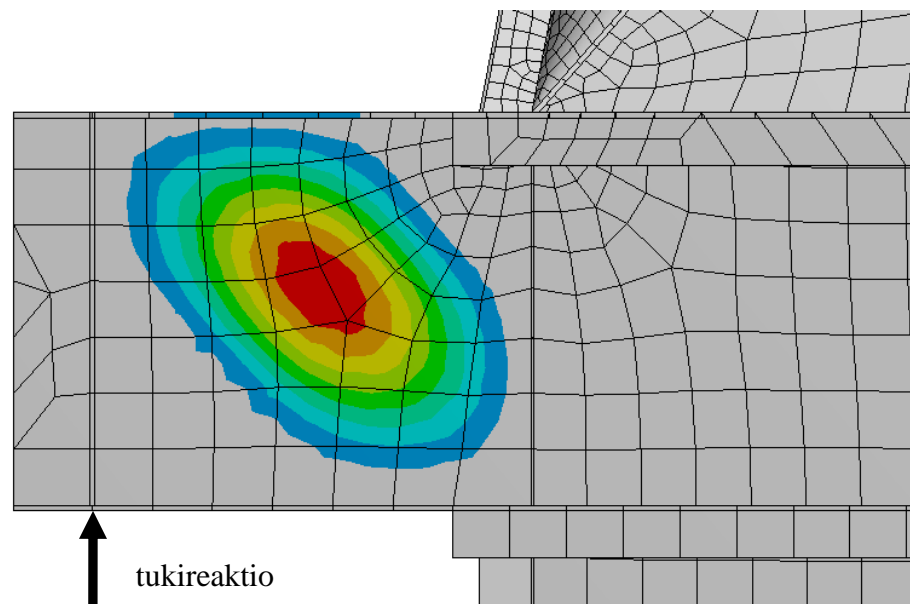
Puristusjännityksen alaiset rakenteet ovat alttiita menettämään stabiiliutensa lommahtamalla, nurjahtamalla, kiepahtamalla tai edellä mainittujen eri ilmiöiden yhteisvaikutuksesta. Nurjahdukselle alttiita rakenneosia ovat puristetut sauvat ja pilarit. Puristetut levyosat voivat menettää stabiiliutensa lommahtamalla ja taivutetut palkit kiepahtamalla. (Niemi 2003)

Englanninkielisessä kirjallisuudessa kaikkia edellämainittuja ilmiöitä käsitellään erityyppisinä ”buckling” –ilmiöinä. Teräsrakenteiden stabiiliteettivaatimukset on esitetty Eurokoodi 3 –suunnittelustandardissa, jonka mukaista mitoitustapausta tässäkin työssä pääasiassa noudatetaan.

Monet kanavakannakkeet ovat levyistä hitsaamalla koottuja rakenteita, joita suunniteltaessa täytyy ottaa huomioon puristettujen levykenttien mahdollinen lommahdus. Tyypillisiä lommahdusalttiita levykenttiä ovat palkin puristuslaippa ja uumalevyn puristettu osa sekä tukivoimia ja pistekuormia kantavat jäykistysrivit.

Puristusjäännityksen lisäksi myös leikkauskuormitus voi aiheuttaa levykentän lommahduksen. Leikkausjäännitys koostuu kahdesta erisuuntaisesta pääjäännityksestä. Erisuuntaiset pääjäännitykset aiheuttavat levykenttään sekä puristusta että vetoa. Tällöin levykenttä pyrkii lommahtamaan puristavan pääjäännityksen vaikutuksesta. (Niemi 2003)

Leikkausjäännityksen aiheuttama antimetrisen lommahduskuvio leikkausjäännityksen rasittamassa kanavaa kannattelevan kannakepalkin uumassa on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Leikkausjäännityksen aiheuttama antimetrisen lommahduskuvio

Lommahdusalttiutta voidaan pienentää jäykistämällä levykenttiä etenkin pitkittäissuunnassa. Pitkittäisjäykisteet jakavat levykentän kapeisiin osakenttiin, jotka eivät lommahda helposti. Pitkittäisjäykisteiden kanssa yhdessä käytettynä myös poikittaiset jäykisteet ovat hyödyllisiä, koska ne lyhentävät pitkittäisten jäykisteiden nurjahduspituuksia. (Niemi 2003)

Todellisen rakenteen levykentät eivät ole ideaalisia. Todelliset rakenteet ovat täynnä virheitä, kuten hitsauksesta johtuvia jännityksiä ja muodonmuutoksia. Myöskään todellisen rakenteen materiaali ei vastaa täydellistä ideaalikimmoista materiaalia. (Niemi 2003)

Lommahdustarkastelut voidaan välttää levyrakenteita suunniteltaessa ja mitoittaessa, jos levykenttien leveyden ja levyn paksuuden suhteet valitaan riittävän mataliksi. Teräsrakenteiden suunnitteluohjeissa rakenneosat jaetaan poikkileikkausluokkiin, jotka kuvaavat sitä, missä määrin poikkileikkausten paikallinen lommahdus rajoittaa kestävyyttä ja kiertymiskykyä. Poikkileikkausluokkia on neljä ja ne jaotellaan rakenneosien puristettujen osien suhteellisten hoikkuuksien mukaan. (Niemi 2003)

Poikkileikkausluokkien leveys-paksuussuhteiden raja-arvot on esitetty standardin EN 1993, Eurokoodi 3 Teräsrakenteiden suunnittelu – osassa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Raja-arvot on taulukoitu erikseen puristetuille, taivutetuille ja näiden yhteisvaikutuksen alaisille levyille. Lisäksi standardissa on eroteltu kahdelta reunalta tuetut (EN 1993-1-1 2005, Taulukko 5.2 (Osa 1)) ja ulokkeelliset taso-osat (EN 1993-1-1 2005, Taulukko 5.2 (Osa 2)). Edellä mainittujen tekijöiden lisäksi poikkileikkausluokkien raja-arvoon vaikuttaa levyosan materiaalin myötölujuus kertoimen ε kautta. Standardin mukaan ε lasketaan seuraavasti:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_{y,T}}} \quad (8)$$

Standardissa esitetty pikakaava kertoimen ε laskentaan ei kuitenkaan ota huomioon kimmomoduulin vaikutusta. Tässä työssä ε lasketaan tarkemmalla kaavalla seuraavasti (Holopainen 2004):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_{y,T}} \cdot \frac{E_T}{210\,000 \text{ MPa}} \cdot \frac{1-0.3^2}{1-\nu^2}} \quad (9)$$

missä E_T on materiaalin kimmomoduuli laskentalämpötilassa ja ν on kuroumakerroin eli Poissonin vakio. Yleisellä tasolla poikkileikkausluokkia voidaan

kuvata seuraavasti. Poikkileikkausluokkaan 1 kuuluvat ne palkkimaiset rakenneosat, joilla on plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys ja joihin voi syntyä plastinen nivel, joka omaa riittävän kiertymiskyvyn. Poikkileikkausluokkaan 2 kuuluvat ne palkkimaiset rakenneosat, joilla on plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys, mutta joihin voi syntyä vain plastinen nivel, joka ei omaa riittävää kiertymiskykyä. Poikkileikkausluokkaan 3 kuuluvat poikkileikkaukset, joissa puristusjännitys voi saavuttaa aineen mitoituslujuuden, mutta levyn lommahtaminen rajoittaa taivutuskestävyyden kimmoteorian mukaiseen arvoon. Poikkileikkausluokkaan 4 kuuluvat ne hoikat poikkileikkaukset, joissa puristetun osan lommahtaminen määrää rakenteen kestävyuden ennen kuin suurin jännitys on saavuttanut myötörajan. (Niemi 2003)

Alla on esitetty poikkileikkauksen aksiaalisen puristuskestävyyden käyttöasteen laskentaproseduuri (Niemi 2003):

1. Määritetään puristuslaipan tehollinen pinta-ala bruttopoikkileikkauksen jännitys jakauman mukaan.
2. Määritetään jännitys jakauma ja painopiste akselin paikka, kun laipoilla on pienennetty tehollinen pinta-ala ja uumilla bruttopinta-ala.
3. Lasketaan uumien teholliset pinta-alat kohdassa 2. määritetyn jännitys jakauman perusteella.
4. Määritetään lopullisen painopiste akselin paikka käyttäen sekä uumille että laipoille tehollista pinta-alaa.
5. Lasketaan tehollisen poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala ja tehollinen taivutusvastus.
6. Lasketaan tehollisen poikkileikkauksen suurin jännitys ja käyttöaste.

Käyttöasteeksi tulee suurin aksiaalijännitys jaettuna mitoituslujuudella. Periaatteessa käyttöaste saisi vetopuolella nousta yli 100 %, koska vetopuolella voidaan sallia 5 % plastista venymistä, mutta tämän laskeminen on analyttisesti hankalaa joten käyttöaste kannattaa yleensä rajoittaa 100 %. Epälineaaristen materiaaliominaisuuksien käyttäminen elementtimenetelmällä laskiessa mahdollistaa 5 % plastisten venymien sallimisen ja plastisen lisäkapasiteetin hyödyntämisen.

2.4.4 Lujuusopin elementtimenetelmä ja sen käyttö stabiiliteettitarkasteluissa

Elementtimenetelmän käyttö on tarpeen stabiiliusanalyysissä erityisesti, kun tutkittavan levykentän muoto poikkeaa suorakaiteen muodosta, tai jos tutkittavan tapauksen reunaehdot tai kuormitustapa ovat poikkeukselliset. Poikkeavat ominaisuudet estävät analyttisen menetelmän käytön, koska analyttisen menetelmän oletukset eivät ole voimassa. Ohjeita levyrakenteiden ja kuorirakenteiden FE-analyysia varten on esitetty teräsrakenteiden suunnittelustandardin EN 1993 osissa 1-5 ja 1-6. (Niemi 2003)

Niemi (2003) esittää stabiiliusongelmien ratkaisemiseksi elementtimenetelmällä kaksi menetelmää (Niemi 2003):

1. Ratkaistaan kriittinen lommahdusjännitys ominaisarvottehtävänä ja määritetään sen avulla rakenteen suhteellinen hoikkuus ja standardin mukainen mitoituskestävyys.
2. Luodaan elementtimalli, johon on kuvattu rakenteen geometriset ja materiaaliset epätäydellisyydet. Ratkaistaan tätä mallia käyttäen maksimikuormitus geometrisesti ja materiaalisesti epälineaarista analyysistä.

Rakennesuunnittelussa elementtimenetelmän analyysityyppejä ovat:

GNA	geometrisesti epälineaarinen analyysi
GNIA	geometrisesti epälineaarinen analyysi, johon sisältyy epätarkkuudet
GMNA	geometrisesti ja materiaaliominaisuuksilta epälineaarinen analyysi
GMNIA	geometrisesti ja materiaaliominaisuuksilta epälineaarinen analyysi, johon sisältyy epätarkkuudet
LA	lineaarinen kimmoteorian mukainen analyysi
LBA	lineaarinen stabiiliusanalyysi
MA	ominaistaajuusanalyysi
MNA	materiaaliominaisuuksilta epälineaarinen analyysi

2.5 Eurokoodi 3:n mukainen rajatilamitoitus

Eurokoodi-standardit on luotu perinteisen rakennusteollisuuden tarpeisiin, eivätkä ne tästä johtuen sovellu kaikilta osin koneenrakennukseen tai höyrykattilavoimalaitosten rakenteiden suunnitteluun. Kattilavoimalaitoksen rakenteissa esiintyvät korkeat lämpötilat ja epäsäännölliset geometriat aiheuttavat ongelmia eurokoodi-standardeja soveltaessa. Tässä työssä keskitytään kanavien kannakkeisiin, jotka ovat useimmiten I-, H-, T-, L- ja koteloprofiileista sekä suorista levyosista hitsaamalla koottuja rakenteita. Kyseiset profiilit ja rakenneosat ovat rakennusteollisuudessa yleisesti käytettyjä ja tästä johtuen eurokoodi-standardit soveltuvat kannakerakenteiden suunnitteluun melko hyvin. Tässä työssä rakenteiden suunnitteluun ja mitoitukseen käytetäänkin pääasiassa Eurokoodi 3 teräsrakenteiden suunnittelustandardin mukaista rajatilamitoitusta. Kannakerakenteita suunnitellessa käytetään erityisen paljon standardin osassa 1-1: ”Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt” ja osassa 1-5: ”Levyrakenteet” esitettyä teoriaa. Lisäksi tarvittaessa käytetään standardin osissa 1-6: ”Kuorirakenteiden lujuus ja stabiilius”, 1-7: ”Levyrakenteet, joihin kohdistuva kuormitus ei ole tason suuntainen”, 1-8: ”Liitosten mitoitus” ja 1-9: ”Väsyminen” – esitettyä teoriaa.

2.5.1 Rajatilamitoituksen periaatteet

Rajatilat voidaan jaotella käyttörajatiloihin ja murtorajatiloihin. Käyttörajatilalla tarkoitetaan tilaa, jonka ylittyessä rakenteelle asetetut käyttökelpoisuusvaatimukset eivät enää täyty. Käyttörajatila voidaan jakaa edelleen palautumattomaan ja palautuvaan käyttörajatilaan. Palautumattomassa käyttörajatilassa rakenteen kaikki käyttökelpoisuusvaatimukset eivät palaudu kun kuormat poistetaan. Palautuvassa käyttörajatilassa käyttökelpoisuusvaatimukset palautuvat kuormien poistamisen jälkeen. Käyttörajatilan ilmiöitä ovat rakenteessa tapahtuvat siirtymät ja värähtelyt, jotka vaikuttavat ulkonäköön, ergonomiaan tai rakenteen toimivuuteen. Murtorajatilalla tarkoitetaan sortumiseen tai muuhun lopulliseen rakenteen vaurioitumiseen liittyvää tilaa. Murtorajatilan ilmiöitä ovat rakenteen tai sen osan stabiiliteetin menetys, vaurioituminen liian suurista siirtymistä, ei-toivottu

mekanismina käyttäytyminen ja murtuminen. Myös erilaiset väsymisilmiöt, kuten väsyminen, jännityskorroosio ja viruminen liittyvät murtorajatilaan.

Kanavarakenteet ja kannakkeet voidaan yleensä mitoittaa murtorajatilan mukaan kaavassa 10 esitetyn ehdon mukaisesti:

$$E_d \leq R_d \quad (10)$$

missä E_d on kuormien vaikutuksen mitoitusarvo (esim. leikkausvoima tai taivutusmomentti) ja R_d on vastaava rakenneosan kestävyden mitoitusarvo.

EN 1993:ssa esitetään murtorajatiloihin liittyviä kestävyden osavarmuuslukuja γ_M . Poikkileikkausten kestävydelle suositellaan yleensä käytettäväksi $\gamma_{M0} = 1.00$, sauvojen stabiiliudenmenetykselle $\gamma_{M1} = 1.00$ ja poikkileikkausten vetomurtumiskestävydelle suositellaan $\gamma_{M2} = 1.25$. Tässä työssä varmuuskerrointa käytetään ainoastaan kuorman puolella. Kuormille käytetään FWEQ:n lujuuslaskennan kuorma-/varmuuskerrointa $\gamma_F = 1.5$ ellei toisin mainita.

2.5.2 Vetokestävyys

Vetävän voiman mitoitusarvon N_{Ed} ja vetokestävyden mitoitusarvon $N_{t,Rd}$ tulee täyttää kaavaa 10 mukaileva ehto:

$$N_{Ed} \leq N_{t,Rd} \quad (11)$$

eli

$$N_{Ed}/N_{t,Rd} \leq 1.0 \quad (12)$$

Vetokestävyden mitoitusarvo $N_{t,Rd}$ tutkittavalle poikkileikkaukselle saadaan yhtälöstä 13:

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = A \cdot f_{y,T} / \gamma_{M0} \quad (13)$$

missä $N_{pl,Rd}$ on bruttopoikkileikkauksen poikkipinta-alan A plastisuusteorian mukainen mitoitusarvo.

2.5.3 Puristuskestävyys

Puristuskestävyyden tulee täyttää ehto:

$$N_{Ed} / N_{c,Rd} \leq 1.0 \quad (14)$$

Puristuskestävyyden mitoitusarvo $N_{c,Rd}$ on tasaiselle puristukselle:

Poikkileikkausluokat 1, 2 ja 3:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_{y,T} / \gamma_{M0} \quad (15)$$

Poikkileikkausluokka 4:

$$N_{c,Rd} = A_{eff} \cdot f_{y,T} / \gamma_{M0} \quad (16)$$

missä A on poikkileikkauksen bruttopinta-ala ja A_{eff} on poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala.

2.5.4 Taivutuskestävyys

Taivutuskestävyyden tulee täyttää ehto:

$$M_{Ed} / M_{c,Rd} \leq 1.0 \quad (17)$$

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo $M_{c,Rd}$ yhden pääjäyhyysakselin suhteen tapahtuvassa taivutuksessa saadaan poikkileikkausluokan mukaan yhtälöistä 18, 19 tai 20:

Poikkileikkausluokat 1 ja 2:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = W_{pl} \cdot f_{y,T} / \gamma_{M0} \quad (18)$$

Poikkileikkausluokka 3:

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = W_{el,min} \cdot f_{y,T} / \gamma_{M0} \quad (19)$$

Poikkileikkausluokka 4:

$$M_{c,Rd} = W_{eff,min} \cdot f_{y,T} / \gamma_{M0} \quad (20)$$

missä W_{pl} on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutusvastus, $W_{el,min}$ on kimmoteorian mukaisen taivutusvastuksen minimiarvo ja $W_{eff,min}$ on tehollisen taivutusvastuksen pienin arvo. $W_{el,min}$ ja $W_{eff,min}$ lasketaan poikkileikkauksen ulkoreunassa vaikuttavan kimmoteorian mukaisen suurimman jännityksen perusteella.

2.5.5 Leikkauskestävyys

Leikkauskestävyyden tulee täyttää ehto:

$$V_{Ed} / V_{c,Rd} \leq 1.0 \quad (21)$$

I- ja H-profiilien uuman leikkausjännitys voidaan laskea kaavasta 23, kun profiilin laipan ja uuman pinta-alojen suhde A_f / A_w on vähintään 0.6:

mikäli

$$A_f/A_w \geq 0.6 \quad (22)$$

niin

$$\tau_{Ed} = V_{Ed}/A_w \quad (23)$$

missä A_f on yhden laipan pinta-ala, A_w on uuman pinta-ala ja V_{Ed} on leikkausvoiman mitoitusarvo. Leikkauskestävyyden kimmoteorian mukainen kestävyyden mitoitusarvo määritellään niin, että seuraava ehto täyttyy:

$$\tau_{Ed}/[f_{y,T}/(\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})] \leq 1.0 \quad (24)$$

Mikäli kaavan 22 ehto ei täyty, leikkausjännitys lasketaan kaavasta:

$$\tau_{Ed} = (V_{Ed} \cdot S)/(I \cdot t) \quad (25)$$

missä S on tarkasteltavan kohdan ulkopuolelle jäävän poikkileikkauksen osan staattinen momentti koko poikkileikkauksen painopisteakselin suhteen. I on poikkileikkauksen neliömomentti ja t on tarkasteltavan kohdan paksuus.

2.5.6 Vääntökestävyys

Vääntökestävyyden mitoitusarvon tulee täyttää ehto:

$$T_{Ed}/T_{Rd} \leq 1.0 \quad (26)$$

Kokonaisvääntömomentti T_{Ed} lasketaan kahdessa osassa kaavan 27 mukaisesti:

$$T_{Ed} = T_{t,Ed} + T_{w,Ed} \quad (27)$$

missä $T_{t,Ed}$ on vapaan väännön mitoitusarvo ja $T_{w,Ed}$ on estetyn väännön mitoitusarvo. Huomioon otettavia väännöstä aiheutuvia jännityksiä ovat vapaasta väännöstä aiheutuvat leikkausjännitykset $\tau_{t,Ed}$, bi-momentin aksiaaliset jännitykset $\sigma_{w,Ed}$ ja estetystä väännöstä aiheutuvat leikkausjännitykset $\tau_{w,Ed}$. Suljettujen poikkileikkauksien tapauksessa voidaan estetyn väännön vaikutukset jättää ottamatta huomioon. Vastaavasti avointen poikkileikkausten tapauksessa voidaan jättää ottamatta huomioon vapaan väännön vaikutukset.

2.5.7 Kestävyys taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutukselle

Yleisesti ottaen leikkausvoiman vaikutus taivutusmomenttikestävyyteen tulee ottaa huomioon. Jos leikkausvoima on kuitenkin alle puolet plastisuusteorian mukaisesta leikkauskestävyydestä, voidaan sen vaikutus taivutusmomenttikestävyyteen jättää huomioon ottamatta, lukuunottamatta tilannetta, jossa leikkauslommahdus pienentää poikkileikkauksen kestävyttä. Yleisesti taivutusmomenttikestävyyttä pienennetään käyttämällä leikkauspinta-alalle redusoitua myötölujuutta:

$$(1 - \rho)f_{y,T} \tag{28}$$

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \tag{29}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v(f_{y,T}/\sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \tag{30}$$

missä A_v on leikkauspinta-ala. Väännön vaikuttaessa pienennystekijä ρ lasketaan kaavasta 31:

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} - 1 \right)^2 \tag{31}$$

missä $V_{pl,T,Rd}$ lasketaan standardin EN-1993-1-1 s. 57 kaavoilla 6.26, 6.27 tai 6.28 määräytyen tutkittavan poikkileikkauksen profiilista. Jos kuitenkin $V_{Ed} \leq V_{pl,T,Rd}$, niin valitaan $\rho = 0$.

2.5.8 Aksiaalinen kuormitus, leikkausvoima ja taivutusmomentti

Aksiaalisen kuormituksen vaikutus plastisuusteorian mukaiseen taivutusmomenttikestävyyteen otetaan huomioon tarvittaessa standardin EN 1993-1-1 kohdan 6.2.9 mukaisesti. Vastaavasti leikkausvoiman ja aksiaalisen voiman vaikutus taivutusmomenttikestävyyteen otetaan huomioon tarvittaessa standardin EN 1993-1-1 kohdan 6.2.10 mukaisesti.

2.5.9 Nurjahduskestävyys

Puristuskestävyyden tulee täyttää ehto:

$$N_{Ed}/N_{b,Rd} \leq 1.0 \quad (32)$$

Puristetun sauvan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo $N_{b,Rd}$ on tasaiselle puristukselle:

Poikkileikkausluokat 1, 2 ja 3:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{y,T} / \gamma_{M1} \quad (33)$$

Poikkileikkausluokka 4:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A_{eff} \cdot f_{y,T} / \gamma_{M0} \quad (34)$$

missä χ on aksiaalisesti tasaisesti puristetun sauvan muunnettua hoikkuutta $\bar{\lambda}$ vastaava pienennystekijä. χ ja $\bar{\lambda}$ lasketaan yhtälöistä 35-38:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \text{ kuitenkin niin, että } \chi \leq 1 \quad (35)$$

$$\Phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \quad (36)$$

Poikkileikkausluokat 1, 2 ja 3:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_{y,T}}{N_{cr}}} \quad (37)$$

Poikkileikkausluokka 4:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_{y,T}}{N_{cr}}} \quad (38)$$

missä α on taulukon 2 mukaan valittu epätarkkuustekijä ja N_{cr} on kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahdusvoima kaavan 39 mukaisesti:

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot E \cdot I / L_{cr}^2 \quad (39)$$

missä L_{cr} on kriittinen nurjahduspituus.

Taulukko 2. Epätarkkuustekijä α nurjahduskäyrän mukaan

Nurjahduskäyrä (EN 1993-1-1 2005, kuva 6.4)	a ₀	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α	0.13	0.21	0.34	0.49	0.76

Epätarkkuustekijään α vaikuttava nurjahduskäyrä valitaan standardin EN 1993-1-1 taulukon 6.2 mukaan. Yleisesti, mikäli muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda} \leq 0.2$ tai $N_{Ed}/N_{cr} \leq 0.04$, nurjahdusta ei tarvitse tarkistaa.

Taivutusnurjahduksessa muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}$ lasketaan kaavoista 40 ja 41:

Poikkileikkausluokat 1, 2 ja 3:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_{y,T}}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (40)$$

Poikkileikkausluokka 4:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_{y,T}}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}} \quad (41)$$

missä L_{cr} on kriittinen nurjahduspituus tarkasteltavana olevassa tasossa ja i on hitaussäde kyseisen akselin suhteen bruttopoikkileikkauksen mukaisesti. λ_1 lasketaan kaavasta 42:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E_T}{f_{y,T}}} = 93.9 \cdot \varepsilon \quad (42)$$

Avointen poikkileikkausten vääntönurjahduksessa ja taivutusvääntönurjahduksessa muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_T$ lasketaan kaavoista 43 ja 44:

Poikkileikkausluokat 1, 2 ja 3:

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A \cdot f_{y,T}}{N_{cr}}} \quad (43)$$

Poikkileikkausluokka 4:

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_{y,T}}{N_{cr}}} \quad (44)$$

Nyt $N_{cr} = N_{cr,TF}$ kuitenkin niin, että $N_{cr} < N_{cr,T}$, kun $N_{cr,TF}$ on kimmoteorian mukainen kriittinen taivutusvääntönurjahduskuorma ja $N_{cr,T}$ on kimmoteorian mukainen kriittinen vääntönurjahduskuorma.

2.5.10 Kiepahduskestävyys

Sivusuunnassa tukemattoman sauvan kiepahduskestävyyden mitoitusarvon $M_{b,Rd}$ tulee täyttää ehto:

$$M_{Ed}/M_{b,Rd} \leq 1.0 \quad (45)$$

missä M_{Ed} on taivutusmomentin mitoitusarvo ja kiepahduskestävyyden mitoitusarvo $M_{b,Rd}$ lasketaan kaavasta 46:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_{y,T}/\gamma_{M1} \quad (46)$$

missä χ_{LT} on kiepahduskestävyyden pienennystekijä ja W_y on kaavojen 47, 48 tai 49 mukaan laskettu taivutusvastus.

Poikkileikkausluokat 1 ja 2:

$$W_y = W_{pl,y} \quad (47)$$

Poikkileikkausluokka 3:

$$W_y = W_{el,y} \quad (48)$$

Poikkileikkausluokka 4:

$$W_y = W_{eff,y} \quad (49)$$

missä $W_{pl,y}$ on poikkileikkauksen taivutusvastus, $W_{el,y}$ on kimmoteorian mukaisen taivutusvastuksen minimiarvo ja $W_{eff,y}$ on tehollisen taivutusvastuksen pienin arvo.

Kiepahduskestävyyden pienennystekijä χ_{LT} lasketaan yleisessä tapauksessa kaavasta 51:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + (\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2)}, \text{ kuitenkin } \chi_{LT} \leq 1.0 \quad (50)$$

$$\Phi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (51)$$

Muunnettu hoikkuus:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_{y,T}}{M_{cr}}} \quad (52)$$

missä M_{cr} on kimmoteorian mukainen kriittinen momentti kiepahduksessa. Epätarkkuustekijä α_{LT} valitaan kiepahduskäyrän perusteella taulukosta 3.

Taulukko 3. Epätarkkuustekijä α_{LT} kiepahduskäyrän mukaan

Kiepahduskäyrä (EN 1993-1-1 2005, kuva 6.4)	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α_{LT}	0.21	0.34	0.49	0.76

Kiepahduskäyrä valitaan standardin EN 1993-1-1 taulukon 6.4 suosituksen mukaisesti. Yleisesti, mikäli muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0.2$ tai $M_{Ed}/M_{cr} \leq 0.04$, kiepahdusta ei tarvitse tarkistaa.

2.5.11 Levyn lommahduskestävyys

Levyn lommahdus voi tulla kriittiseksi ainoastaan poikkileikkausluokkaan 4 kuuluvilla taso-osilla. Poikkileikkausluokkiin 1-3 kuuluvilla taso-osilla lommahdusta ei tarvitse tarkastella. Poikkileikkausluokassa 4 lommahdus otetaan huomioon mitoittamalla rakenne siten, että tarkasteltavan levyn bruttopinta-alaa pienennetään kertoimella ρ . Näin lasketussa tehollisessa poikkileikkauksessa jännitys saa nousta mitoituslujuuden suuruiseksi. Jos tarkasteltavaa levykenttää on jäykistetty puristetulta alueelta 1-2:lla pitkittäisjäykisteellä, niin jäykisteitä tarkastellaan kimmoisella alustalla tuettuina puristussauvoina. Mikäli pitkittäisjäykisteitä on 3 tai enemmän, niin levyä tarkastellaan ortotrooppisena levynä, jossa jäykisteiden jäykkyys ajatellaan tasatuksi levyn pitkittäisjäykkyydeksi. Pituussuunnassa

jäykistetyin levyn lommahdus tarkastellaan standardin EN 1993-1-5 kohdan 4.5 mukaan.

Muita lommahdustarkasteluissa huomioon otettavia asioita ovat lyhyiden levykenttien mahdollinen nurjahduksen ja lommahduksen yhteisvaikutus sekä leikkausviiveen (shear-lag) vaikutus tarkastellessa leveitä laippoja. Jos tutkittavan levyn sivusuhte on alle yksi, täytyy levy tarkastaa pilarimaisen käyttäytymisen (nurjahtamisen) varalta. Tarkastelu tehdään EN 1993-1-5 kohtien 4.5.3 ja 4.5.4 mukaan. Kuorirakenteiden lommahduskestävyys tarkastellaan EN 1993-1-6 mukaan.

Lommahdustarkastelun perusoletuksena on, että levymäistä taso-osaa voidaan käsitellä sileänä levynä, kun levyn kaarevuussäde r täyttää kaavan 53 mukaisen ehdon:

$$r \geq \frac{b^2}{t} \quad (53)$$

missä b on levykentän leveys ja t on levyn paksuus. Lisäksi standardissa EN 1993-1-5 esitettyjä lommahdustarkasteluja voidaan tehdä pääasiallisesti vain vakiopoikkileikkauksisille suorakaiteenmuotoisille levyille. Tarkasteluja voidaan soveltaa standardin kohdassa 2.3 esitetuille poikkeuksille.

Lommahdus normaaliijännityksen vaikutuksesta

Ehto poikkileikkausluokkaan 4 kuuluvan taso-osan lommahduskestävyydelle puristuksen ja yhden akselin suhteen tapahtuvan taivutuksen vaikutuksesta:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{\frac{f_{y,T} \cdot A_{eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{Ed} + N_{Ed} \cdot e_N}{\frac{f_{y,T} \cdot W_{eff}}{\gamma_{M0}}} \leq 1.0 \quad (54)$$

missä e_N on poikkileikkauksen neutraaliakselin siirtymien. Pituussuunnassa jäykistämättömän puristetun taso-osan tehollinen pinta-ala:

$$A_{c,eff} = \rho \cdot A_c \quad (55)$$

missä ρ on lommahduksen huomioon ottava pienennystekijä ja A_c on puristetun levyn bruttopinta-ala. Pienennystekijä ρ määritellään kahdelta reunalta tuetuille taso-osille:

$$\rho = 1.0, \text{ kun } \bar{\lambda}_p \leq 0.673 \quad (56)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1.0, \text{ kun } \bar{\lambda}_p > 0.673 \quad (57)$$

Yhdeltä reunalta tuetuille taso-osille:

$$\rho = 1.0, \text{ kun } \bar{\lambda}_p \leq 0.748 \quad (58)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1.0, \text{ kun } \bar{\lambda}_p > 0.748 \quad (59)$$

missä $\bar{\lambda}_p$ on muunnettu hoikkuus ja ψ on jännityssuhde. Muunnettu hoikkuus lasketaan kaavasta 60:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{y,T}}{\sigma_{cr}}} \quad (60)$$

missä σ_{cr} on kimmenteorian mukainen kriittinen lommahdusjännitys:

$$\sigma_{cr} = k_\sigma \cdot \sigma_E \quad (61)$$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12(1-\nu^2)b^2} = 190000 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 [\text{MPa}] \quad (62)$$

k_σ on jännityssuhdetta ψ ja tarkasteltavan levyn reunaehtoja vastaava lommahduskerroin standardin EN 1993-1-5 taulukosta 4.1 (kahdelta reunalta tuetut taso-osat) tai taulukosta 4.2 (yhdeltä reunalta tuetut taso-osat). Samoissa taulukoissa määritellään myös jännityssuhteesta riippuva tehollisen alueen jakautuminen tutkittavassa poikkileikkauksessa.

2.5.12 Leikkauslommahduskestävyys

Leikkauslommahduskestävyys tulee tarkistaa poikkileikkausluokasta riippumatta uumasta jäykistämättömille levyille, joille uuman korkeus-paksuussuhde:

$$\frac{h_w}{t} > \frac{72}{\eta} \varepsilon \quad (63)$$

ja uumasta jäykistetyille levyille, kun:

$$\frac{h_w}{t} > \frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau} \quad (64)$$

missä $\eta = 1.20$, kun laskentalämpötila on korkeintaan 400 °C. Jos laskentalämpötila on korkeampi tai käytetään S460 lujempia teräslajeja, niin $\eta = 1.00$. Tekijälle η voi olla vaihtelevia suosituksia EN 1993-1-5 kansallisessa liitteessä.

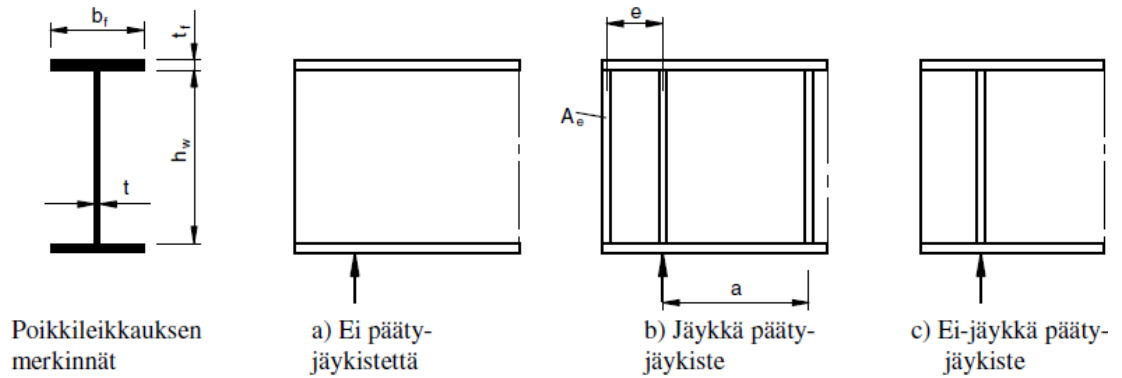
Leikkauskestävyyden mitoitusarvo $V_{b,Rd}$ leikkauslommahdukselle lasketaan kaavasta 65:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta \cdot f_{y,T} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \quad (65)$$

missä uuman osuus $V_{bw,Rd}$:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{y,T} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \quad (66)$$

missä kerroin χ_w valitaan kuvan 6 ja taulukon 4 perusteella:



Kuva 6. Päätyjäykisteet (EN 1993-1-5 2006, kuva 5.1)

Taulukko 4. Uuman osuus leikkauskestävyydestä, kerroin χ_w

	Jäykkä päätyjäykiste	Ei-jäykkä päätyjäykiste
$\bar{\lambda}_w < 0.83/\eta$	η	η
$0.83/\eta \leq \bar{\lambda}_w < 1.08$	$0.83/\bar{\lambda}_w$	$0.83/\bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1.08$	$1.37/(0.7 + \bar{\lambda}_w)$	$0.83/\bar{\lambda}_w$

Muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_w$ lasketaan kaavasta 67:

$$\bar{\lambda}_w = 0.76 \sqrt{\frac{f_{y,T}}{\tau_{cr}}} \quad (67)$$

missä τ_{cr} on kimmoteorian mukainen kriittinen lommahdusjännitys:

$$\tau_{cr} = k_\tau \cdot \sigma_E \quad (68)$$

Kertoimien k_τ ja σ_E arvot voidaan määrittää EN 1993-1-5 liitteen A mukaisesti.

Jos vain tuilla on poikittaisjäykisteet, muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_w$ voidaan laskea myös:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86.4 \cdot t \cdot \varepsilon} \quad (69)$$

Jos tuilla on poikittaisjäykisteet ja poikittaiset välijäykisteet tai pitkittäiset jäykisteet tai molemmat, muunnettu hoikkuus voidaan laskea kaavasta 70:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37.4 \cdot t \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}} \quad (70)$$

missä kerroin k_τ on leikkauslommahduskertoimen (EN 1993-1-5 2006, liite A) pienin arvo. Pituussuunnassa jäykistetyille uumille muunnetun hoikkuuden $\bar{\lambda}_w$ arvoksi valitaan vähintään:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_{wi}}{37.4 \cdot t \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{ti}}} \quad (71)$$

missä h_{wi} ja k_{ti} valitaan sen uuman osakentän mukaan, jolla on suurin muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_w$.

Kaavan 65 laippojen osuus $V_{bf,Rd}$ lasketaan kaavasta 72:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{y,T}}{c \cdot \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right) \quad (72)$$

Kaava 72 on voimassa, mikäli laipan kestävyyttä ei täysin hyödynnettä taivutuskestävyyttä (kaavat 18-21) laskiessa eli $M_{Ed} < M_{f,Rd} \cdot b_f$ ja t_f valitaan heikoimman laipan mukaan, kuitenkin niin, että b_f on korkeintaan $15 \cdot \varepsilon \cdot t_f$ uuman molemmin puolin. Laippojen taivutuskestävyys $M_{f,Rd}$ on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo, kun vain teholliset laipat otetaan huomioon. Kerroin c lasketaan kaavasta:

$$c = b \left(0.25 + \frac{1.6 \cdot b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{y,T}}{t \cdot h_w^2 \cdot f_{y,T}} \right) \quad (73)$$

missä b on pystyjäykisteiden välinen etäisyys. Jos uumaan vaikuttaa myös aksiaalinen voima N_{Ed} , niin taivutuskestävyyden mitoitusarvoa $M_{f,Rd}$ pienennetään kertomalla se kaavan 74 arvolla:

$$\left(1 - \frac{N_{Ed}}{\frac{(A_{f1} + A_{f2})f_{y,T}}{\gamma_{M0}}} \right) \quad (74)$$

missä A_{f1} ja A_{f2} ovat laippojen pinta-aloja.

Leikkauslommahduskestävyyden riittävyys todennetaan ehdosta:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1.0 \quad (75)$$

2.5.13 Leikkausvoiman, taivutusmomentin ja aksiaalisen voiman yhteisvaikutus

Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus I- tai kotelopoikkileikkauksen uumassa tarkistetaan ehdosta:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right) (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1.0, \text{ kun } \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \quad (76)$$

Kaavan 76 mukaista yhteisvaikutusta ei tarvitse tarkistaa, jos $\bar{\eta}_3 \leq 0.5$. $\bar{\eta}_1$ ja $\bar{\eta}_3$ lasketaan kaavoista 77 ja 78:

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \quad (77)$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \quad (78)$$

2.5.14 Laipan taipumisesta aiheutuva uuman lommahdus

Laipan taipumisesta aiheutuva uuman lommahdus vältetään mitoittamalla uuman hoikkuus h_w/t_w siten, että kaavan 79 ehto toteutuu.

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \cdot \frac{E_t}{f_{y,T}} \cdot \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \quad (79)$$

A_w on uuman pinta-ala ja A_{fc} on puristetun laipan tehollinen pinta-ala. Kertoimen k arvo valitaan seuraavasti:

- $k = 0.3$, plastista kiertymistä hyödynnetään
- $k = 0.4$, plastisuusteorian mukaista momenttikestävyyttä hyödynnetään
- $k = 0.55$, kimmoteorian mukaista taivutuskestävyyttä hyödynnetään

2.5.15 Kahden akselin suhteen tapahtuvan taivutuksen ja samanaikaisten leikkausvoimien yhteisvaikutus

Eurokoodin osassa EN 1993-1-1 ei esitetä valmista yhteisvaikutusehtoa kahden akselin suhteen tapahtuvalle taivutukselle ja samanaikaisille leikkausvoimille. Standardissa on esitetty ainoastaan yleisen tason periaatteellinen ohjeistus, jonka perusteella Ongelin & Valkonen (2012) esittävät seuraavat yhteisvaikutusehdot:

Poikkileikkausluokat 1 ja 2:

$$\left[\frac{M_{y.Ed}}{M_{V.y.Rd}} \right]^{\alpha_y} + \left[\frac{M_{z.Ed}}{M_{V.z.Rd}} \right]^{\beta_z} \leq 1.0 \quad (80)$$

Poikkileikkausluokat 3 ja 4:

$$\left[\frac{M_{y.Ed}}{M_{V.y.Rd}} \right] + \left[\frac{M_{z.Ed}}{M_{V.z.Rd}} \right] \leq 1.0 \quad (81)$$

Missä taivutusmomenttikestävyydet M_{Rd} määritetään kaavojen 17-20 ja 28-30 mukaan eri taivutusakseleille. Tekijöiden α_y ja β_z arvoina voidaan käyttää varmalla puolella olevaa $\alpha_y = \beta_z = 1$ kaikille poikkileikkauksille (Lehtinen 2005, Ongelin & Valkonen 2010).

2.6 Rengaskehät

Pyöreiden kanavien ja niitä kannattelevien rakenteiden suunnittelussa yksi tärkeimmistä rakenneosista on kanavan ympäri kiertävä rengaskehä. Rengaskehää käytetään kanavan jäykisteenä sisäisten kuormitusten, kuten paineen ja tuhakuorman sekä ulkoisten kuormien, kuten tuulen ja kannatteluvoimien hallintaan. Pyöreä kanava on kantikasta kanavaa huomattavasti edullisempi ratkaisu jäykisteiden määrän ollessa kriteerinä ja voi toimia jopa jäykistämättömänä. Toisaalta kantikkaat kanavat voivat olla kanavan reitin muodosta ja mahdollisista haarakohdista määräytyen helpompia valmistaa ja vievät vähemmän tilaa suhteessa poikkipinta-alaan. Tässä työssä rajoitetaan kannattelu- ja ohjausvoimien kuormittamien rengaskehien ja niitä läheisesti ympäröivän kanava- ja kannakerakenteen tutkimiseen. Kanvasuunnittelijan tulee tietysti lisäksi varmistaa, että kanava on riittävän jäykkä ja kestävä myös kannattelukohtaan (eli tässä työssä tutkittavan alueen) ulkopuolella.

Jäykistekehien laskennassa sovelletaan Eurokoodi 3:n osissa EN 1993-1-1, 1-5 ja 1-6 esitettyä teoriaa sekä Youngin ja Budynasin (2002) esittämiä rengaskehien laskentakaavoja.

2.6.1 Rengaskehän sisäisten voimien laskenta

Suljettua pyöreää rengasta voidaan pitää staattisesti määräämättömänä palkkina, joka noudattaa Castiglianon toista teoreemaa. Tällaisen jäykisterengaskehän laskenta perustuu seuraaville oletuksille. Jäykisterenkaalla on vakio poikkileikkaus ja rengas on symmetrinen kaarevuustasonsa suhteen. Kaikki kuormat vaikuttavat radiaalisuuntaisesti jäykisterenkaan poikkileikkauksen massakeskipisteeseen. Mikäli kuormituspiste poikkeaa todellisuudessa edellä mainitusta oletuksesta, laskennassa käytetään todellista kuormitusta vastaavaa staattisesti ekvivalenttia voimaa ja voimaparia (pistemomenttia) jäykisterenkaan poikkileikkauksen massakeskipisteessä. Rakenteen jännitykset eivät ylitä kimmoteorian mukaista kestävyuden rajatilaa. Rengasjäykisteen muotoa voidaan pitää täydellisen

ympyrämäisenä. Renkaassa mahdollisesti vaikuttavan aksiaalisen kuormituksen huomioon ottamiseksi käytetään aksiaalisen jännityksen muodonmuutoskerrointa α_d ja poikittaisen leikkauskuormituksen muodonmuutoskerrointa β_d . Muodonmuutuskertoimien perusteella määritetään laskentavakiot k_1 ja k_2 . (Young & Budynas 2002)

$$k_1 = 1 - \alpha_d + \beta_d \quad (82)$$

$$k_2 = 1 - \alpha_d \quad (83)$$

Pyöreitä kanavia ympäröivien rengaskehien tapauksessa oletetaan radiaalisuunnassa hoikka rengas ja kuormien vaikutuspisteeksi oletetaan rengasjäykisteen poikkileikkausprofiilin massakeskipiste. Näin ollen saadaan muodonmuutuskertoimiksi $\alpha_d = \beta_d = 0$ ja edelleen laskentavakioiksi $k_1 = k_2 = 1$.

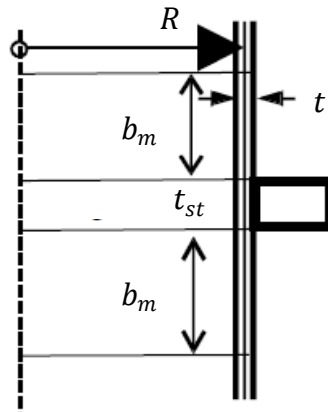
Rengasjäykisteen poikkileikkauksen kestävyuden laskennassa voidaan hyödyntää kanavan seinämää. Jäykisteen profiilin voidaan ajatella olevan T-profiili, jonka laipan muodostaa kanavan seinämän tehollinen osa. Youngin ja Budynasin (2002) mukaan kanavan seinämää voidaan hyödyntää yhteensä:

$$b_{tot} = 1.56\sqrt{Rt} \quad (84)$$

verran jäykisterenkaan ympäriltä. Kaavassa R on kanavan seinämän keskipisteen (levynpaksuuden yli) etäisyys kanavan keskipisteestä eli kanavan keskimääräinen säde ja t on kanavalevyn seinämänpaksuus. Standardin EN 1993-1-6 liitteen C: ”Lineaarisen kimmoteorian mukaisia kalvotilan ja taivutustilan kaavoja” kohdassa C.5 ”Lieriökuoren rengasjäykiste” esitetään hyödynnettävälle kanavan seinämän leveydelle kaava:

$$b_m = 0.778\sqrt{Rt} \quad (85)$$

missä b_m on kuvan 7 mukaisesti jäykisterenkaasta ulospäin hyödynnettävä kanavan seinämän leveys yhdellä puolella jäykistettä.



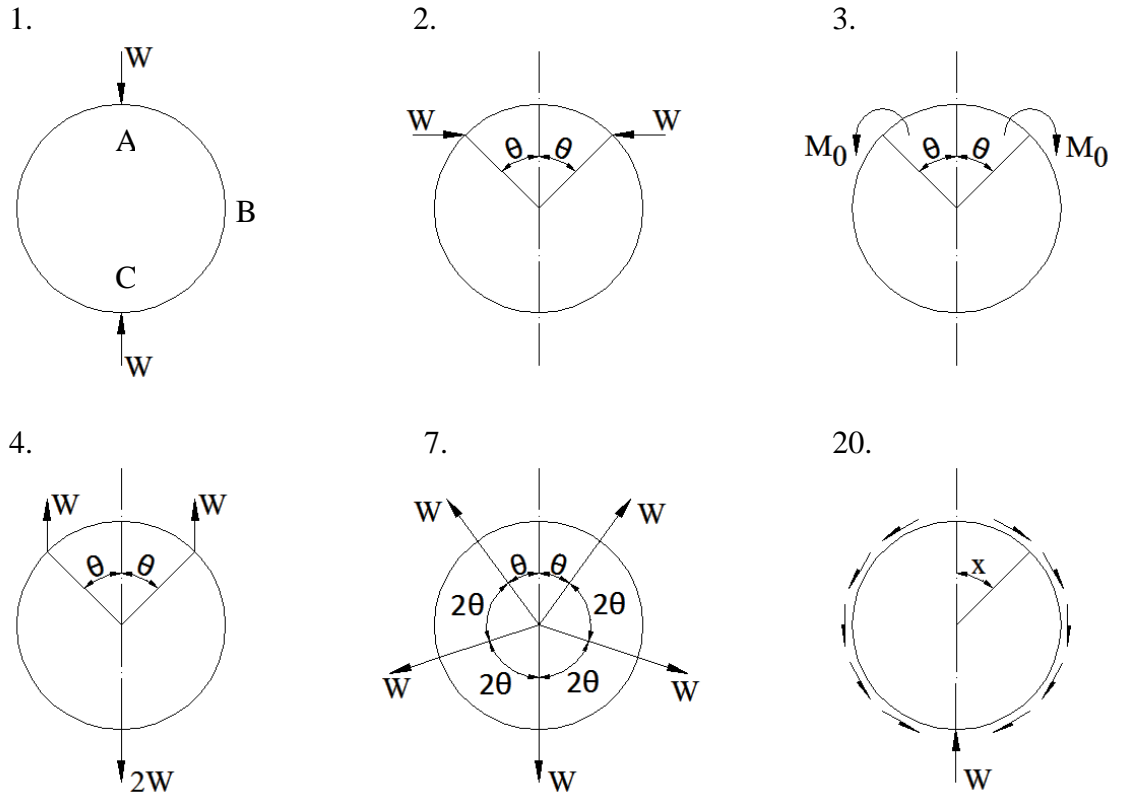
Kuva 7. Lieriökuoren rengasjäykisteen mitat (EN 1993-1-6 2007)

Yhteensä kanavan seinämää EN 1993-1-6 mukaan voidaan siis hyödyntää:

$$b_{tot} = 2 \cdot 0.778\sqrt{Rt} + t_{st} \approx 1.56\sqrt{Rt} + t_{st} \quad (86)$$

missä t_{st} on jäykisterenkaan paksuus. Kaavoista 84 ja 86 voidaan huomata, että EN 1993-1-6 antaa hyödyntää kanavan seinämää noin rengasjäykisteen paksuuden verran enemmän kuin Youngin ja Budynasin kaava. Tässä työssä rengaskehän poikkileikkausprofiilissa hyödynnetään kanavan seinämää standardin EN 1993-1-6 kaavan (kaava 86) mukaisesti. Kahden lähellä toisiaan olevan jäykisterenkaan tapauksessa tulee lisäksi varmistua, että samaa aluetta kanavan seinämästä ei hyödynnetä kahteen kertaan. Tällöin renkaiden välisellä osuudella kanavan seinämää voidaan hyödyntää korkeintaan puolet jäykisterenkaiden välisestä etäisyydestä rengasta kohden.

Young ja Budynas (2002) esittävät 21 rengaskehän kuormitustapausta, joita superpositioperiaatteen mukaisesti yhdistelemällä voidaan laskea kuormitukseltaan ja tuennaltaan lähes millainen rengaskehä tahansa (aiemmin esitettyjen oletusten rajoissa). Pyöreiden kanavien kannakerakenteiden mitoituksessa tärkeimpiä ovat kuvassa 8 esitetyt tapaukset 1-4, 7 ja 20. Kuvan 8 tapaukseen 1 merkityt tarkastelupisteet A, B ja C sijaitsevat samalla kohtaa kaikissa tarkasteltavissa tapauksissa, vaikka niitä ei ole erikseen merkitty.



Kuva 8. Kanavakannakkeiden rengaskehien laskennassa käytetyt kuormitustapaukset

Tapaus 1

Kuvan 8 tapauksen 1 mukaisessa kuormitustapauksessa rengaskehän pisteessä A vaikuttaa taivutusmomentti:

$$M_A = \frac{WRk_2}{\pi} \quad (87)$$

joka on myös rengaskehän suurin positiivinen taivutusmomentti. Suurin negatiivinen momentti vaikuttaa pisteessä B ja on suuruudeltaan:

$$M_B = -(0.5 - 0.3183k_2)WR \quad (88)$$

Tapauksen 1 mukaisesti kuormitetussa rengaskehässä aksiaalivoima ja leikkausvoima ovat nolliä kehän pisteissä A ja C.

Tapaus 2

Tapauksen 2 rengaskehän suurin positiivinen taivutusmomentti vaikuttaa pisteessä $x = \theta$ eli kuorman kohdalla ja on suuruudeltaan:

$$M_{Max+} = \frac{WR \sin \theta (k_2 - \cos \theta^2)}{\pi} \quad (89)$$

Suurin negatiivinen taivutusmomentti määräytyy seuraavasti:

$$M_{Max-} = \begin{cases} M_A & \text{kun } \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ M_C & \text{kun } \theta \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (90)$$

Taivutusmomentti pisteessä A lasketaan kaavasta:

$$M_A = \frac{-WR}{\pi} [(\pi - \theta)(1 - \cos \theta) - \sin \theta (k_2 - \cos \theta)] \quad (91)$$

ja pisteessä C kaavasta:

$$M_B = \frac{-WR}{\pi} [\theta(1 + \cos \theta) - \sin \theta (k_2 + \cos \theta)] \quad (92)$$

Pisteessä A vaikuttaa lisäksi normaalivoima, joka saa arvon:

$$N_A = \frac{-W}{\pi} [\pi - \theta + \sin \theta \cos \theta] \quad (93)$$

Tapauksessa 2 leikkausvoima saa arvon nolla kehän pisteessä A.

Tapaus 3

Tapauksen 3 mukaisessa kuormituksessa rengaskehän suurin positiivinen taivutusmomentti esiintyy kohdassa, missä ehto $x > \theta$ juuri ja juuri pitää paikkansa.

Suurin positiivinen taivutusmomentti lasketaan kaavasta:

$$M_{Max+} = \frac{M_0}{\pi} \left(\theta + \frac{2 \sin \theta \cos \theta k_2}{k_1} \right) \quad (94)$$

Suurin negatiivinen taivutusmomentti vaikuttaa puolestaan kohdassa, missä ehto $x < \theta$ on juuri ja juuri voimassa ja lasketaan kaavasta:

$$M_{Max-} = \frac{-M_0}{\pi} \left(\pi - \theta - \frac{2 \sin \theta \cos \theta k_2}{k_1} \right) \quad (95)$$

Taivutusmomentin arvo pisteissä A ja C saadaan seuraavasti:

$$M_A = \frac{-M_0}{\pi} \left(\pi - \theta - \frac{2 \sin \theta k_2}{k_1} \right) \quad (96)$$

$$M_C = \frac{M_0}{\pi} \left(\theta - \frac{2 \sin \theta k_2}{k_1} \right) \quad (97)$$

Lisäksi pisteessä A vaikuttaa normaalivoima:

$$N_A = \frac{M_0}{R\pi} \left(\frac{2 \sin \theta k_2}{k_1} \right) \quad (98)$$

Tapauksen 3 mukaisessa kuormituksessa leikkausvoima kehällä on nolla.

Tapaus 4

Kuvan 8 tapauksen 4 mukaisessa kuormituksessa rengaskehän suurin positiivinen taivutusmomentti vaikuttaa kohdassa $x = \tan^{-1} \frac{-\pi}{\sin \theta^2}$, kun $\theta < 106.3^\circ$ ja muutoin kuorman kohdalla. Taivutusmomentti näissä kohdissa lasketaan rengaskehän taivutusmomentin yleiskaavasta:

$$M = M_A - N_A R (1 - \cos x) + V_A R z + L T_M \quad (99)$$

missä $V_A = 0$ ja muut tekijät lasketaan kaavoista 100, 101 ja 102 seuraavasti:

$$M_A = \frac{-WR}{\pi} [\sin \theta (\sin \theta - \pi + \theta) + k_2(1 + \cos \theta)] \quad (100)$$

$$N_A = \frac{-W}{\pi} \sin \theta^2 \quad (101)$$

$$LT_M = WR(\sin x - \sin \theta)\langle x - \theta \rangle^0 \quad (102)$$

missä kulmasuluissa oleva tekijä $\langle x - \theta \rangle^0$ on määritelty seuraavasti:

$$x < \theta \rightarrow \langle x - \theta \rangle^0 = 0 \quad (103)$$

$$x > \theta \rightarrow \langle x - \theta \rangle^0 = 1 \quad (104)$$

$$x = \theta \rightarrow \langle x - \theta \rangle^0 \text{ ei määritelty} \quad (105)$$

Taivutusmomentti kohdassa C saadaan kaavasta:

$$M_C = \frac{-WR}{\pi} [\theta \sin \theta - (\sin \theta)^2 + k_2(1 + \cos \theta)] \quad (106)$$

Tapaus 7

Kuvan 8 tapauksen 7 laskentakaavat ovat voimassa mille tahansa määrälle yhtäsuuria tasaisesti kehälle jakautuneita voimia. Tapauksen 7 mukaisen kuormituksen rasittamassa rengaskehässä suurin positiivinen taivutusmomentti vaikuttaa kuormien välillä eli kuvan 7 tapauksessa esimerkiksi pisteessä A. Tämä taivutusmomentti voidaan laskea kaavasta:

$$M_{Max+} = M_A = \frac{WR(1/\sin \theta - k_2/\theta)}{2} \quad (107)$$

Suurin negatiivinen taivutusmomentti vaikuttaa jokaisen kuorman kohdalla ja on suuruudeltaan:

$$M_{Max-} = \frac{-WR}{2} \left(\frac{k_2}{\theta} - \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \right) \quad (108)$$

Normaali- ja leikkausvoima missä tahansa kehän pisteessä voidaan laskea kaavoista:

$$N = \frac{W \cos x}{2 \sin \theta} \quad (109)$$

$$V = \frac{-W \sin x}{2 \sin \theta} \quad (110)$$

Tapaus 20

Kuvan 8 tapaus 20 kuvaa tilannetta, jossa kanava (tai putki tms.) on alta keskeltä kannateltu ja kannattelee tangentialisen leikkauksen välittämän kokonaiskuormituksen W . Rengaskehän suurin positiivinen taivutusmomentti esiintyy nyt pisteessä C (kannattelupisteessä) ja lasketaan kaavasta:

$$M_{Max+} = M_C = \frac{WR}{2\pi} (k_2 + 0.5) \quad (111)$$

Suurin negatiivinen taivutusmomentti vaikuttaa kohdassa $x = 105.2^\circ$ ja sen arvo saadaan kaavasta:

$$M_{Max-} = \frac{-WR}{4\pi} (3.2815 - 2k_2) \quad (112)$$

Taivutusmomentti, normaalivoima ja leikkausvoima kohdassa A saadaan kaavoista 113, 114 ja 115:

$$M_A = \frac{WR}{2\pi} (k_2 - 0.5) \quad (113)$$

$$N_A = \frac{0.75W}{\pi} \quad (114)$$

$$V_A = 0 \quad (115)$$

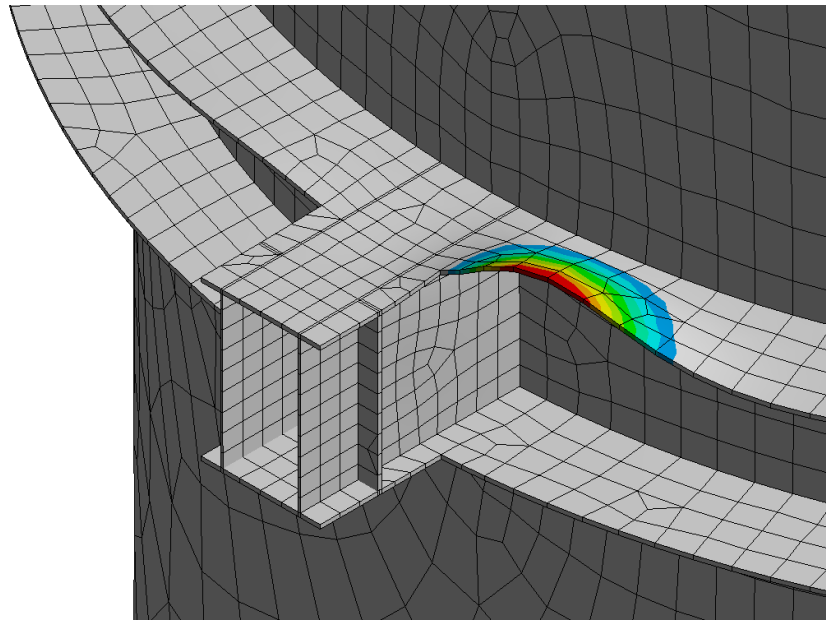
2.6.2 Rengaskehän stabiliteetti

Rengaskehän poikkileikkauksen kestävyuden lisäksi on tarpeen tarkistaa rengaskehän stabiliteetti. Rengaskehien stabiliteetilaskennasta löytyy vain vähän tietoa kirjallisuudesta. Siilostandardi EN 1993-4-1 ja teräsrakennestandardin kuorirakenteita käsittelevä osa EN 1993-1-6 käsittelevät vain kuoren kestävyyttä jäykisterenkaan läheisyydessä. Itse jäykisterenkaan kestävyyttä ja stabiiliutta käsitellään painelaitestandardin suunnittelua käsittelevässä osassa EN 13445-3. Panielaitestandardin mukaan levyrengasjäykisteen kiepahdus lasketaan kaavasta:

$$\frac{\sigma_i}{4} > \frac{P \cdot \sigma_{es}}{P_{ys}} \quad (116)$$

missä P_{ys} on paine, jolla kehäjännitys jäykisteessä saavuttaa myötörajan, P on suunnittelupaine, σ_{es} on jäykisteen nimellinen kimmoraja ja σ_i on jäykisteen kiepahdusjännitys. Kaavassa oletetaan kimmoteorian mukainen suoran taivutetun palkin jännitys jakauma eikä kehäjännitykselle käytetä korjauskertoimia jäykisterenkaan kaarevaan (pyöreään) muotoon liittyen. Tältä osin painelaitestandardin esittämä laskentatapa on linjassa aiemmin esitetyn oletuksen $\alpha_d = \beta_d = 0$ kanssa.

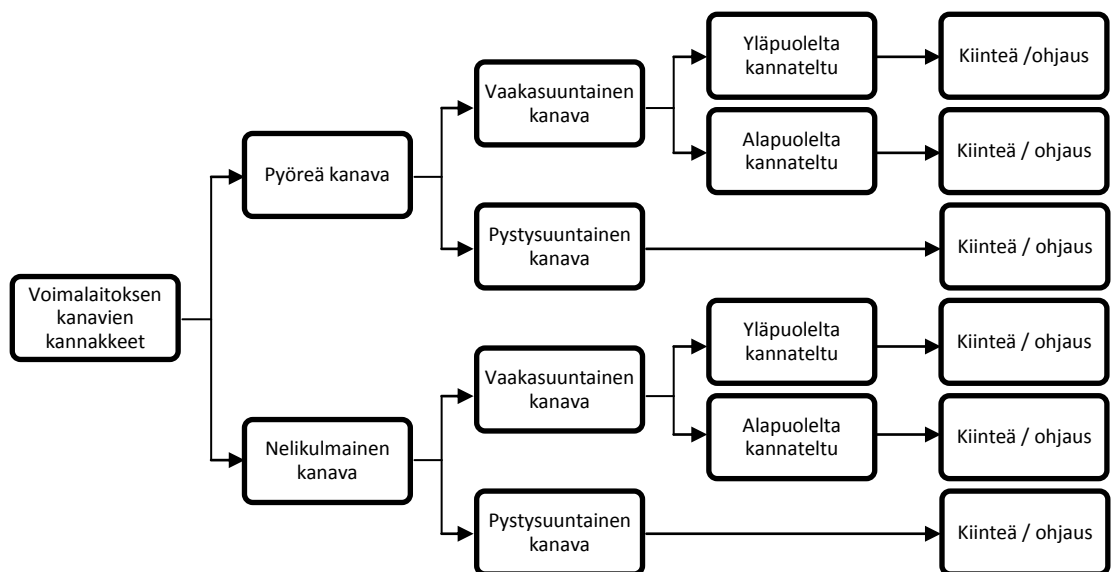
Jäykisterenkaan stabiliteetti voidaan laskea myös Eurokoodi 3:ssa esitetyn teorian mukaan, vaikkei standardissa olekaan esitetty seikkaperäisiä ohjeita menettelyyn. Renkaan stabiliteetin menetys lasketaan kuten yhdeltä reunalta tuetun taso-osan lommahdus, mutta käyttäen nurjahduskäyrää kestävyuden pienennystekijän laskennassa, koska kuvan 9 mukainen renkaan lommahtaminen johtaa kannakerakenteen globaaliin vaurioitumiseen.



Kuva 9. Rengaskehän vapaan reunan lommahdus kannakkeen läheisyydessä

2.7 Kannakerakenteet

Kattilavoimalaitoksen kanavien kannakkeet voidaan jaotella kuvassa 10 esitetyllä tavalla kannateltavan kanavan muodon, suunnan ja kannattelutavan mukaan.



Kuva 10. Kattilavoimalaitoksen kannakerakenteiden variaatiot

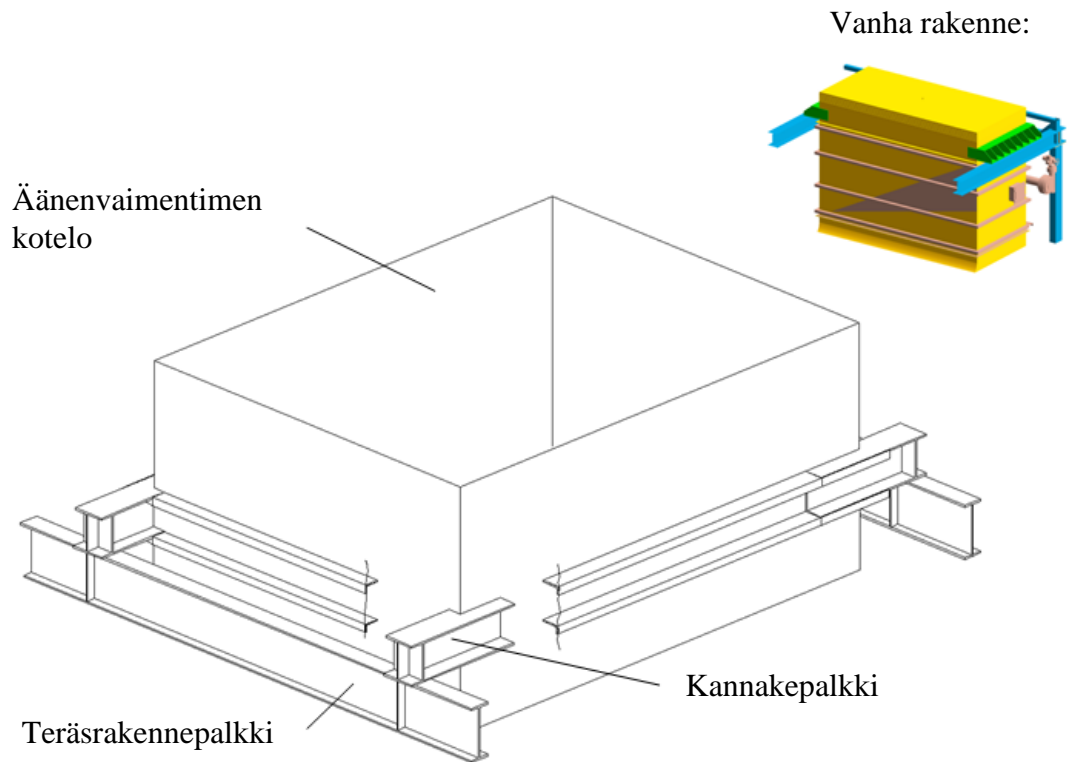
Periaatteessa kannakevariaatioita olisi kuvan 10 jaottelun mukaan 12, mutta koska osassa tapauksista voidaan käyttää samanlaista rakenneratkaisua sekä kiinteään että ohjaavaan kannakkeeseen, tapaukset suppenevat kahdeksaan. Käytetyllä jaottelulla saadaan yleisessä tapauksessa vähennettyä mahdollisten kannakevariaatioiden määrä seuraaviin perustapauksiin:

1. Nelikulmaisen pystykanavan kannake (kiinteä ja ohjaus)
2. Nelikulmaisen vaakakanavan alapuolinen kannake (kiinteä ja ohjaus)
3. Nelikulmaisen vaakakanavan yläpuolinen ohjaava kannake
4. Nelikulmaisen vaakakanavan yläpuolinen kiinteä kannake
5. Pyöreän pystykanavan kannake (kiinteä ja ohjaus)
6. Pyöreän vaakakanavan alapuolinen kannake (kiinteä ja ohjaus)
7. Pyöreän vaakakanavan yläpuolinen ohjaava kannake
8. Pyöreän vaakakanavan yläpuolinen kiinteä kannake

Tässä työssä tarkastellaan tarkemmin vain tapauksia 1 ja 5, koska pystykanavien kannakkeille tulee usein merkittävän suuria kuormia ja ne ovat rakennesuunnittelun osalta lujusteknisesti haastavampia kuin vaakakanavien kannakkeet.

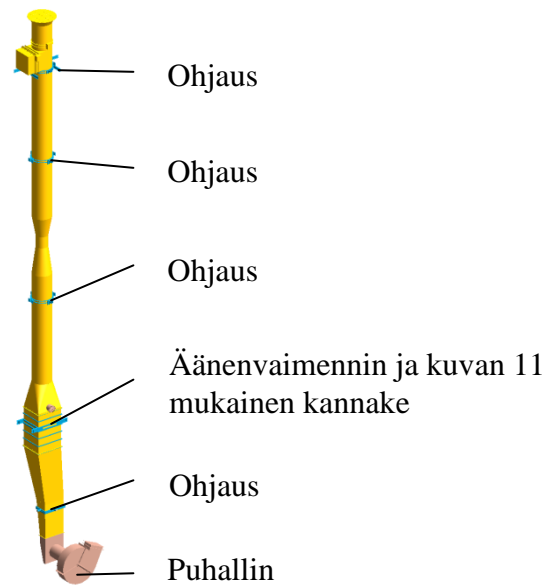
2.7.1 Nelikulmaisen pystykanavan kannake

Imuilmakanavan äänenvaimentimen kannake on edellä esitetyn jaottelun perustapauksen 1 mukainen kannake. Imuilmakanava on tyypillisesti pystysuora kanava, joka ottaa voimalaitoksen polttoprosessiin tarvitseman ilman joko laitosrakennuksen sisältä tai ulkoilmasta. Imuilmakanavassa on puhaltimen ja ilmanottoaukon välillä äänenvaimennin, jonka tehtävä on vaimentaa puhaltimen aiheuttama melu. Imuilmakanavan ja siihen liittyvän äänenvaimentimen aiheuttama pystysuuntainen kuorma kannatellaan äänenvaimentimen kotelosta kuvan 11 mukaisella kannakkeella. Kuvan 11 oikeassa yläkulmassa on esitetty vanha ratkaisu nelikulmaisen pystykanavan kannatteluun. Vanhassa rakenneratkaisussa on virheellisesti oletettu kuorman jakautuvan tasaisesti kanavan seinille. Todellisuudessa kanavan seinämän keskialue ei kanna kuormaa. Virheellinen kuormitusoletus johtaa helposti reunimmaisten, kuormaa kantavien, tukilevyjen alimitoitukseen.



Kuva 11. Pystysuoran nelikulmaisen kanavan kulmakannake

Kuvan 11 kannake on hyvä kannatteluratkaisu myös muihin pystysuoriin nelikulmaisiin kanaviin. Rakenne kantaa siihen kohdistuvat pystysuuntaiset kuormat pääasiassa kalvojäännityksillä. Vaakasuuntaiset kuormat hoidetaan yleensä ohjaavilla kannakkeilla pitkin kanavaa, kuten kuvasta 12 voidaan nähdä tyypillisen kylmän kanavan tapauksessa. Kuvan 11 kannaketta voidaan käyttää myös jäykkänä vaakasuuntaisia kuormia kantavana kannattelupisteenä. Tällöin kannattelupalkki ja teräsrakennepalkki liitetään toisiinsa kiinteästi ja liitos mitoitetaan voimaliitoksena.



Kuva 12. Esimerkki imuilmakanavan kannatteluratkaisusta

Kuvan 11 mukaista kulmakannaketta mitoittaessa täytyy ottaa huomioon seuraavat ilmiöt:

1. Kannakepalkin taivutuskestävyys (kaavat 18-21, 29-31)
2. Kannekepalkin leikkauskestävyys (kaavat 22-26)
3. Kannakepalkin uuman leikkauslommahdus (kaavat 64-76)
4. Kannakepalkin pään kestävyys poikittaiselle kuormitukselle (pistekuorma) eli uumajäykisteen nurjahdus (kaavat 33-39)
5. Leikkauksen ja taivutuksen yhteisvaikutus kannakepalkin uumassa (kaavat 77-79)
6. Laipan taipumisesta aiheutuva kannakepalkin uuman lommahdus (kaava 80)
7. Kannakepalkin stabiliteetin menetys eli palkin puristetun alueen nurjahdus heikomman pääjäyhyysakselin suhteen (33-39)
8. Kuormaa kantavien hitsien kestävyys (kaavoja 3-8 soveltaen)
9. Jäykistekehien mitoitus sisäisen paineen mukaan (ei käsitellä tässä työssä)
10. Rakennemateriaalin kimmokertoimen ja myötölujuuden mahdollinen alentuminen lämpötilan vaikutuksesta (kaavat 1 ja 2)

Edellä mainittuihin ilmiöihin vaikuttavat kannakerakenteen dimensiot ja hitsien mitat on nimetty seuraavasti (ks. kuva liitteessä 1):

$a_{w.cs.1}$	Kannakepalkin ja kanavan seinämän välisen otsahitsin a-mitta
$a_{w.cs.2}$	Kannakepalkin ja kanavan seinämän välisen kylkihitsin a-mitta
b_{cs}	Kannakepalkin leveys, kannakepalkin laipan leveys
h_{cs}	Kannakepalkin korkeus
$L_{a.cs}$	Kanavan seinämän ja kannakepalkin tukipisteen välinen etäisyys
$L_{w.cs}$	Kannakepalkin ja kanavan seinämän välisen kylkihitsin pituus
$S_{f.cs}$	Kannakepalkin laipan paksuus
$S_{w.cs}$	Kannakepalkin uuman paksuus
$S_{ws.cs}$	Kannakepalkin tukipisteen uumajäykisteen paksuus
$S_{ws.sb}$	Teräsrakennepalkin tukipisteen uumajäykisteen paksuus
b_{ds}	Kanavan jäykistekehän jäykisteen laipan leveys
h_{ds}	Kanavan jäykistekehän jäykisteen korkeus
$S_{w.ds}$	Kanavan jäykistekehän jäykisteen uuman paksuus
$S_{f.ds}$	Kanavan jäykistekehän jäykisteen laipan paksuus
$a_{w.ds}$	Kanavan seinämän ja jäykistekehän välisen katkopienahitsin a-mitta
$L_{w.ds}$	Kanavan seinämän ja jäykistekehän välisen katkopienahitsin osapituus
$e_{w.ds}$	Kanavan seinämän ja jäykistekehän välisen liitoksen hitsikatkon pituus

Kuvassa 11 (tarkemmin liitteessä 1) esitetyn kannakerakenteen mitoittamiseen ja suunnitteluun luodaan laskentatyökalu edellä lueteltuihin parametreihin, ilmiöihin ja niitä vastaaviin laskentakaavoihin perustuen. Laskentatyökalun toiminta verifioidaan tutkimalla rinnakkain laskentatyökalun analyttisiä ratkaisuja ja lujuusopin elementtimenetelmään pohjautuvalla laskentamallilla saatuja ratkaisuja. Elementtimenetelmän käytöstä on kerrottu aiemmin luvussa 2.4.4. Tutkittavaksi esimerkkirakenteeksi valitaan taulukon 5 mukainen imuilmakanava.

Taulukko 5. Tutkittava esimerkkirakenne

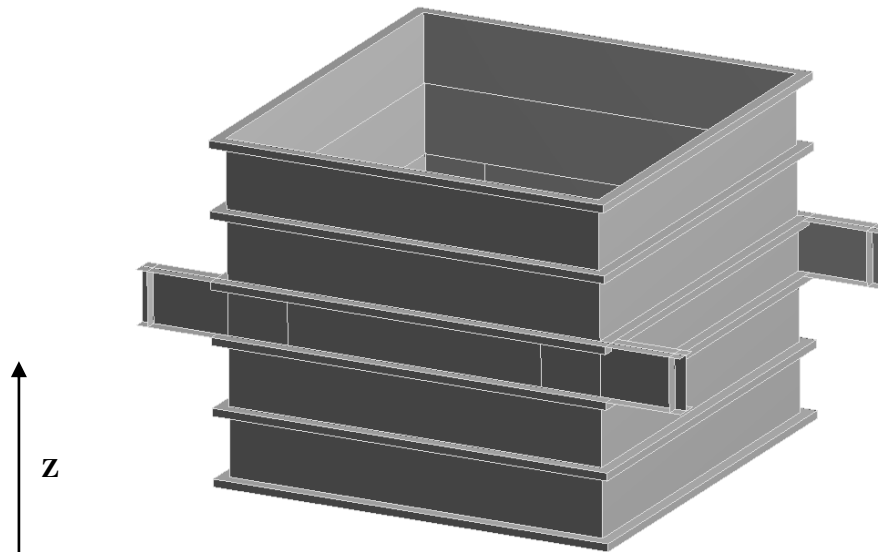
Rakennemateriaali	S235JR (EN 10025-2)
Kanavan ulkomitat (kannakkeen kohdalla)	5000 mm × 5000 mm
Kanavan seinämänpaksuus	5 mm
Tukipisteen ja kanavan seinämän välinen etäisyys $L_{a.cs}$	1000 mm
Kannakkeen kannattelema kokonaismassa	100 000 kg
Laskentapaine (epänormaali alipaine imukanavassa)	3000 Pa
Laskentalämpötila	75 °C

Kanavan seinämän ja sitä kiertävän jäykistekehän jäykisteprofiilin dimensiot ja hitsit mitoitetaan kanavassa vaikuttavan sisäisen paineen perusteella. Kannakkeen kohdalla voidaan joutua käyttämään vahvempaa profiilia kuin muualla kanavassa. Tässä työssä kannakkeen kohdalla olevien jäykistekehien riittävyttä ei tarkasteta sisäisen paineen kuormittamina, vaan yhdeksi suunnittelukriteeriksi otetaan, että jäykistekehän profiilin ja hitsien tulee kannakkeen kohdalla olla vähintään yhtä vahvoja kuin muualla kanavassa. Kannatteluvoimien ja paineen yhteisvaikutus kannakerakenteeseen tulee tarkistettua elementtimenetelmällä. Sisäisen paineen perusteella riittävä jäykisteprofiili on L-profiili 150x100x8 [mm], materiaali on sama S235JR kuin muualla kanavassa. Käytetään samaa profiilia lähtökohtana myös kannakkeen suunnittelussa. Liitteen 1 mukaisten parametrien minimivaatimukset jäykistekehälle on esitetty alla:

Kanavan jäykistekehän jäykisteen laipan leveys:	$b_{ds} = 100 \text{ mm}$
Kanavan jäykistekehän jäykisteen korkeus:	$h_{ds} = 150 \text{ mm}$
Kanavan jäykistekehän jäykisteen uuman paksuus:	$s_{w.ds} = 8 \text{ mm}$
Kanavan jäykistekehän jäykisteen laipan paksuus:	$s_{f.ds} = 8 \text{ mm}$
Seinämän ja jäykisteen välisen katkopian a-mitta:	$a_{w.ds} = 3 \text{ mm}$
Katkopianahitsin osahitsin pituus:	$L_{w.ds} = 50 \text{ mm}$
Hitsikatkon pituus yhdellä puolella:	$e_{w.ds} = 150 \text{ mm}$

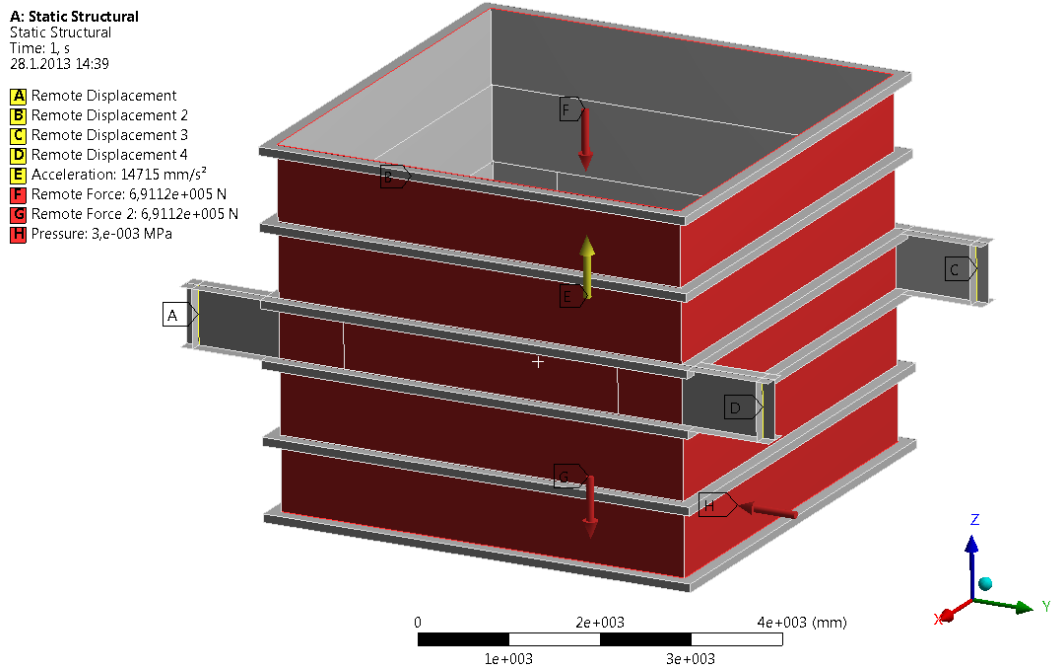
Lisäksi jäykistekehien välisen etäisyyden maksimiarvo eli jäykistejaon enimmäisarvo asettaa rajan kannakepalkin korkeudelle h_{cs} . Jäykistejaon enimmäisarvoksi saadaan levykentälle sallitun alimman ominaistaajuuden 16 Hz ja kanavan mittojen perusteella 750 mm.

Kuvassa 13 on esitetty tässä työssä tutkittava esimerkkirakenne jäykisteineen.



Kuva 13. Esimerkkirakenne jäykisteineen

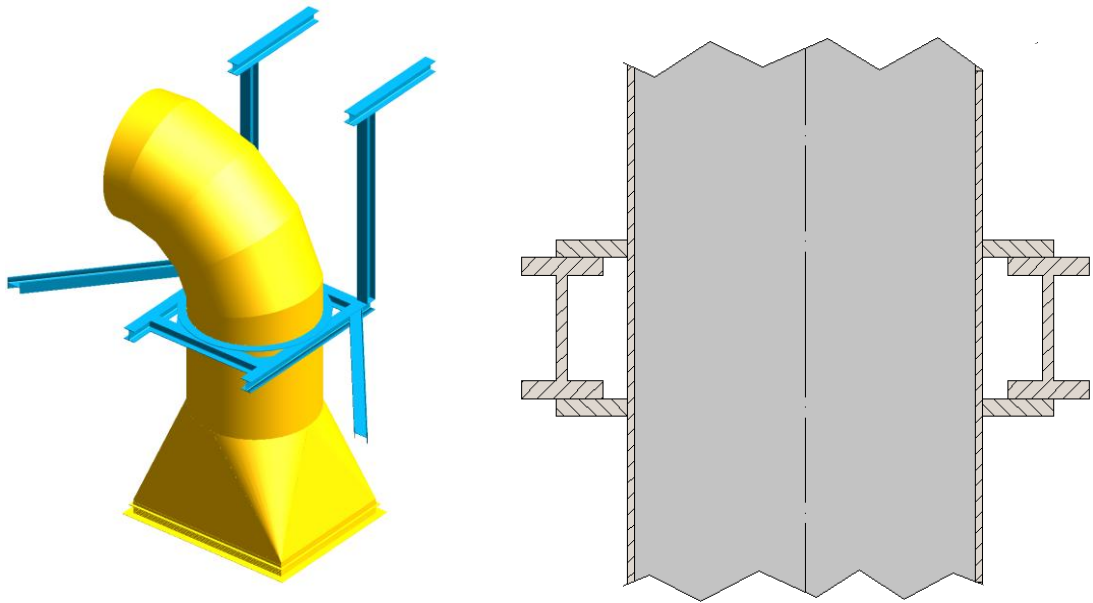
Kuva 13 esittää samalla elementtimenetelmällä tutkittavan mallin laajuutta. Laskentamalliin on mallinnettu ainoastaan kestävyyden kannalta kriittiset osat. Yläpuolinen ja alapuolinen kanava sekä rakennetta kannattelevat teräsrakennepalkit kuvataan kuormina ja reunaehtoina. Kuvassa 13 esitetyn kanavaosuuden massa on 6066 kg. Mallin yläreunaan asetetaan vaikuttamaan 46 967 kg massaa varmuuskertoimella 1.5 vastaava negatiivisen Z-akselin suuntainen 691 kN suuruinen voima. Samansuuruinen ja -suuntainen voima on asetettu vaikuttamaan myös mallin alareunaan. Nyt yläpuolisen ja alapuolisen kanavan massat asetetaan yhtä suuriksi. Rakenteen kannattelemaksi kokonaismassaksi saadaan aiemmin taulukossa 5 mainittu $2 \times 46\,967\text{ kg} + 6066\text{ kg} = 100\,000\text{ kg}$. Todellista rakennetta suunniteltaessa rakenteen eri osien massat lasketaan tarkemmin ja mahdollisen eristyksen ja toimilaitteiden massat otetaan myös huomioon. Kuvassa 14 on esitetty elementtimenetelmään perustuva laskentamalli reunaehtoineen ja kuormituksineen. Laskentamallissa ei ole hyödynnetty symmetriaa, koska samalla mallilla halutaan tarvittaessa pystyä tutkimaan myös epäsymmetristä kuormitusta. Epäsymmetrisellä kuormituksella tarkoitetaan nyt esimerkiksi epäkeskeistä kanavakuormaa, eripituisia kannakepalkkeja rakenteen eri puolilla tai vaikka maanjäristystilannetta.



Kuva 14. Laskentamalli, reunaehdot ja kuormat

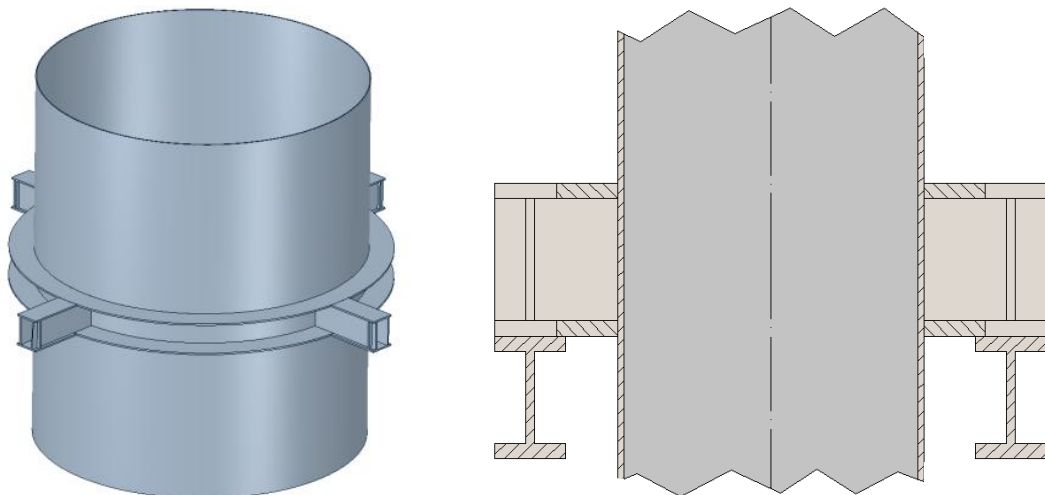
2.7.2 Pyöreän pystykanavan kannake

Pyöreiden kanavien kannattelussa keskeisessä roolissa ovat kanavaa kiertävät rengaskehät. Hyvällä suunnittelulla ja rengaskehiä käyttämällä pyöreiden kanavien kannatteluvoimat saadaan hallittua kalvojännityksillä. Kuvissa 15 ja 16 on esitetty pyöreän pystykanavan kannatteluratkaisuja. Kuvassa 15 on esitetty vanha rakenneratkaisu pyöreän pystykanavan kannatteluun sekä hieman ympäröivää rakennetta. Vanhassa rakenteessa kannakepalkit kulkevat rengaskehien välistä, jolloin kanava tukeutuu ainoastaan toiseen rengaskehiin, ylempään tai alempaan määrättyen kanavaosuuteen kohdistuvien palje- eli aukkovoimien suunnista ja suuruuksista. Ongelmana on myös, että vanhan ratkaisun mukaisessa kannakkeessa tukipiste ja kuormituksen jakautuminen ovat epämääräisiä ja käytännössä tukivoimat välittyvät kanavaan ulokkeena toimivan laipan taivutuksen kautta, jolloin kanavan seinämä joutuu kantamaan kuormituksen kuoren taivutuksella. Varsinaista leikkausta välittävää rakenneosaa (uumaa) kuvan 15 rakenteessa ei ole, joten myös leikkausvoiman välittyminen rakenteessa on varsin huonosti suunniteltu. Edellä mainitut ongelmat johtavat hankalaan mitoitustehtävään ja ylipäätään huonoon rakenteeseen.



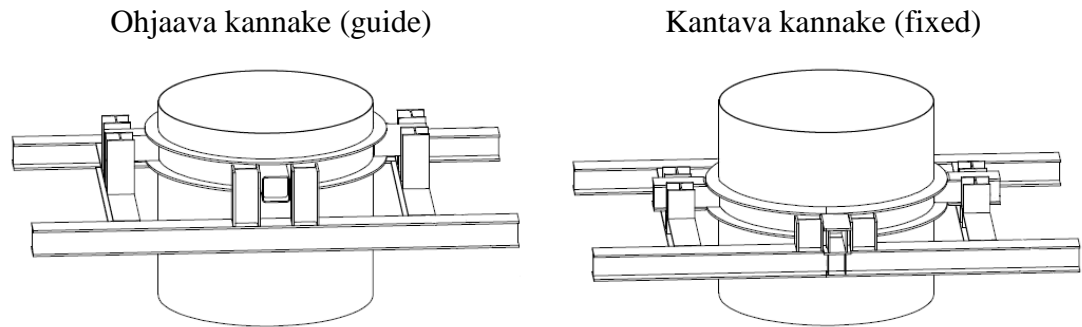
Kuva 15. Vanha rakenneratkaisu pyöreän pystykanavan kannatteluun

Kuvassa 16 on esitetty paranneltu ratkaisu pyöreän pystykanavan kannatteluun. Uudessa ratkaisussa kanava kannatellaan kahta rengaskehää hyödyntäen neljästä pisteestä kumpaakin rengaskehää. Uusi rakenne pystyy välittämään sekä kannattelusta aiheutuvan leikkausvoiman että kannattelun epäkeskisyydestä aiheutuvan taivutusmomentin kalvojäännityksin. Molempia rengaskehä kuormitetaan nyt ainoastaan radiaalitasossa, jolloin niiden mitoittaminen onnistuu helposti luvun 2.6 menetelmin. Leikkaus siirtyy kanavan seinämään rakenteen uumia pitkin. Kuvan 16 rakenne mahdollistaa myös horisontaalisten ohjausvoimien hallinnan samalla kannakerakenteella, tässä tapauksessa rengaskehä kuormittaa radiaalivoimien lisäksi pistemomentit.



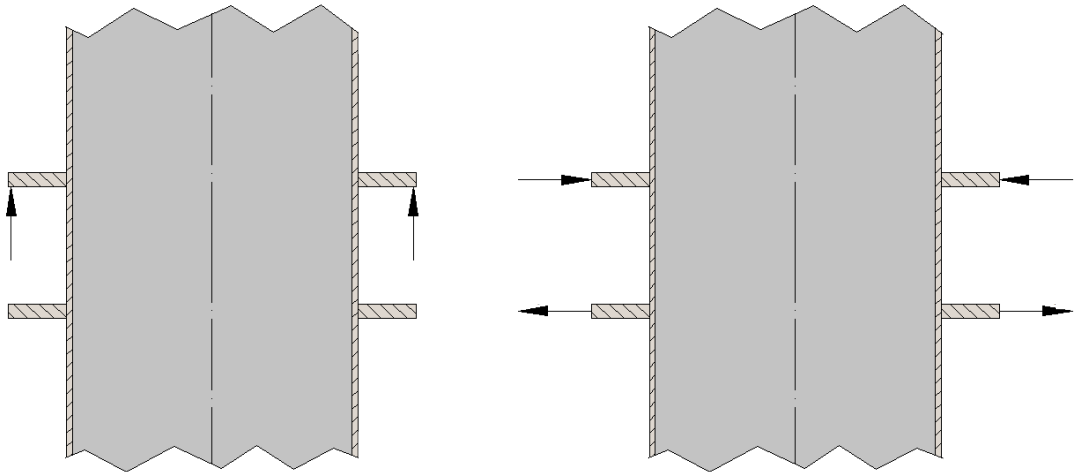
Kuva 16. Paranneltu rakenneratkaisu pyöreän pystykanavan kannatteluun

Kuvan 16 rakennetta voidaan käyttää joko ohjaavana (guide) tai kantavana (fixed) kannakeena. Kuvassa 17 on esitetty rakenteen käyttö eri tarkoituksiin, ohjaukseen käyttettäessä kannakepalkin ja teräsrakennepalkin väliin jätetään välystä.



Kuva 17. Pyöreän pystykanavan kannakkeen käyttö ohjaavana (guide) ja kantavana (fixed) kannakkeena

Kuva 18 havainnollistaa kuvissa 15 ja 16 esitettyjen rakenteiden eroa rengaskehien kuormituksen kannalta.



Kuva 18. Vanhan (kuvassa vasemmalla) ja parannetun (kuvassa oikealla) rakenteen ero rengaskehien kuormituksen kannalta

Kuvassa 18 on esitetty ainoastaan rengaskehiin kohdistuvat kuormat. Vasemmanpuoleisessa rakenteessa kaikki kuorma kanavan ja sitä kannattelevan teräsrakenteen välillä siirtyy yksittäisen rengaskehän välityksellä. Oikeanpuoleisessa rakenteessa rengaskehiin kohdistuu vain taivutuksesta aiheutuva radiaalikuorma. Leikkausvoima siirtyy rakenteen uumien kautta. Leikkausvoimaa ei ole esitetty

kuvassa 18, koska kuvan tarkoitus on havainnollistaa rakenteiden eroa ainoastaan rengaskehien kuormituksen kannalta.

Kuvan 16 mukaista pyöreän pystykanavan kannaketta mitoittaessa täytyy ottaa huomioon seuraavat ilmiöt:

1. Kannakepalkin kestävyys vertikaaliselle taivutukselle (kaavat 18-21, 29-31)
2. Kannakepalkin kestävyys horisontaaliselle taivutukselle (kaavat 18-21, 29-31)
3. Kannakepalkin kestävyys vertikaaliselle leikkaukselle (kaavat 22-26)
4. Kannakepalkin kestävyys horisontaaliselle leikkaukselle (kaavat 22-26)
5. Kannakepalkin kestävyys kahden akselin suhteen tapahtuvan taivutuksen ja samanaikaisten leikkausvoimien yhteisvaikutukselle (kaavat 81-82)
6. Kannakepalkin uuman leikkauslommahdus (kaavat 64-76)
7. Kannakepalkin laipan keskiosan leikkauslommahdus (kaavat 64-76)
8. Kannakepalkin tukipisteen kestävyys vertikaaliselle poikittaiselle kuormalle (pistekuorma) eli uumajäykisteen nurjahdus (kaavat 33-39)
9. Kannakepalkin tukipisteen kestävyys horisontaaliselle poikittaiselle kuormalle (pistekuorma) eli palkin laipan paikallinen nurjahdus (pilarimainen) (kaavat 33-39)
10. Laipan taipumisesta aiheutuva kannakepalkin uuman lommahdus (kaava 80)
11. Kuormaa kantavien hitsien kestävyys (kaavoja 3-8 soveltaen)
12. Jäykistekehien mitoitus sisäisen paineen mukaan (ei käsitellä tässä työssä)
13. Jäykistekehien taivutuskestävyys (kaavat 18-21, 29-31, 99-103, 112-115)
14. Jäykistekehien normaalivoimankestävyys (kaavat 12-17, 99-103, 112-115)
15. Jäykistekehien leikkauskestävyys (kaavat 22-26, 99-103, 112-115)
16. Jäykistekehien stabiiliteetti (kaavat 99-103, 112-115)
17. Rakennemateriaalin kimmokertoimen ja myötölujuuden mahdollinen alentuminen lämpötilan vaikutuksesta (kaavat 1 ja 2)

Edellä mainittuihin ilmiöihin vaikuttavat kannakerakenteen dimensiot ja hitsien mitat on nimetty seuraavasti (ks. kuva liittäessä 2):

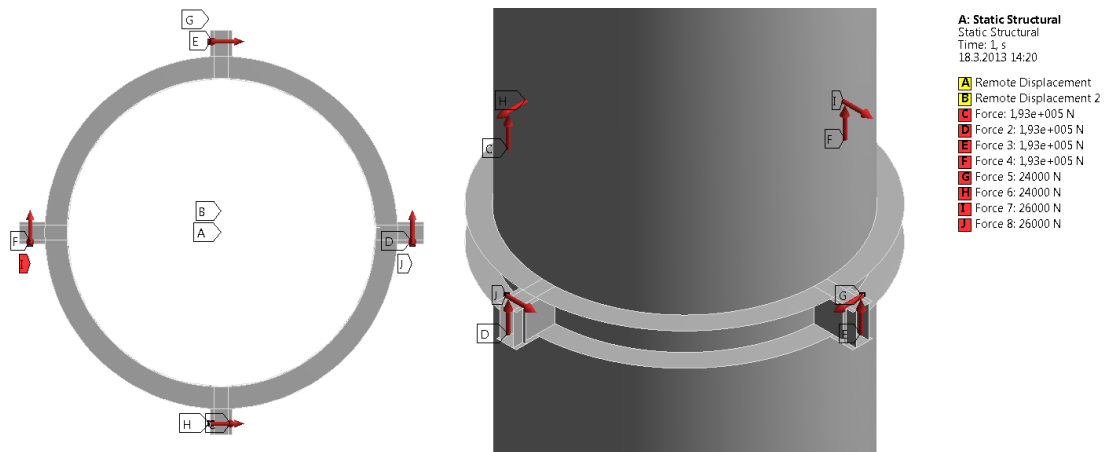
$a_{w.cb.1}$	Kanavan seinämän ja jäykistekehän välisen vaakasuuntaisen hitsin a-mitta kannakepalkin kohdalla
$a_{w.cb.2}$	Kannakepalkin ja kanavan seinämän välisen pystyhitsin a-mitta
$a_{w.cb.3}$	Kannakepalkin uumien ja laippojen välisten hitsien a-mitta
b_{cb}	Kannakepalkin leveys, kannakepalkin laipan leveys
$b_{of.cb}$	Kannakepalkin laipan ulokkeellisen osan leveys
h_{cb}	Kannakepalkin korkeus
$L_{a.cb}$	Kanavan seinämän ja kannakepalkin tukipisteen välinen etäisyys
$S_{f.cb}$	Kannakepalkin laipan paksuus
$S_{w.cb}$	Kannakepalkin uuman paksuus
$S_{ws.cb}$	Kannakepalkin tukipisteen uumajäykisteen paksuus
$S_{ws.sb}$	Teräsrakennepalkin tukipisteen uumajäykisteen paksuus
h_{ds}	Kanavan jäykistekehän jäykisteen korkeus
$S_{w.ds}$	Kanavan jäykistekehän jäykisteen uuman paksuus
$a_{w.ds}$	Kanavan seinämän ja jäykistekehän välisen katkopienahitsin a-mitta
$L_{w.ds}$	Kanavan seinämän ja jäykistekehän välisen katkopienahitsin osapituus
$e_{w.ds}$	Kanavan seinämän ja jäykistekehän välisen liitoksen hitsikatkon pituus

Kuvassa 16 (tarkemmin liitteessä 2) esitetyn kannakerakenteen mitoittamiseen ja suunnitteluun luodaan laskentatyökalu edellä lueteltuihin parametreihin, ilmiöihin ja niitä vastaaviin laskentakaavoihin perustuen. Laskentatyökalun toiminta verifioidaan tutkimalla rinnakkain laskentatyökalun analyyttisiä ratkaisuja ja lujuusopin elementtimenetelmään pohjautuvalla laskentamallilla saatuja ratkaisuja. Tutkittavaksi esimerkkirakenteeksi valitaan taulukon 6 mukainen kanava.

Taulukko 6. Tutkittava esimerkkirakenne

Rakennemateriaali	S235JR (EN 10025-2)
Kanavan ulkomitat (kannakkeen kohdalla)	D = 4200 mm
Kanavan seinämänpaksuus	6 mm
Yksittäisen kannakepalkin (1/4) tukivoimat kuormakertoimella 1.5	Z: 193 000 N X: 26 000 N Y: 24 000 N
Laskentalämpötila	75 °C

Kanavan seinämänpaksuus ja kanavaa kiertävien jäykisterenkaiden dimensiot ja hitsit mitoitetaan kanavassa vaikuttavan sisäisen paineen perusteella. Kannakkeen kohdalla jäykisterenkaissa voidaan joutua käyttämään vahvempaa profiilia kuin muualla kanavassa. Tässä työssä kannakkeen kohdalla olevien jäykistekehien riittävyttä ei tarkasteta sisäisen paineen kuormittamana, vaan yhdeksi suunnittelukriteeriksi otetaan, että jäykistekehän profiilin ja hitsien tulee kannakkeen kohdalla olla vähintään yhtä vahvoja kuin muualla kanavassa. Rengaskehien kestävyttä tarkastellaan ainoastaan kannatteluvoimista aiheutuvilla kuormituksilla. Kuvassa 19 on esitetty tässä työssä tutkittavan esimerkkirakenteen laskentamalli.



Kuva 19. Esimerkkirakenteen laskentamalli, reunaehdot ja kuormat

Kanavan translaatiot on estetty laskentamallin ylä- ja alareunassa. Näiden reunaehtojen jäykkyyden todellisuudenmukaisuudella ei ole merkitystä, koska nyt tutkitaan kannakerakenteen paikallista kestävyyttä perustuen tunnettuihin tukireaktioihin. Tunnettuihin taulukossa 6 esitettyihin reaktiovoimiin perustuvat kuormat tuodaan suoraan kannakepalkkeihin.

3 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

Tässä luvussa verifioidaan kannakerakenteiden suunnitteluun kehitettyjen laskentatyökalujen toiminta vertailemalla laskentatyökalujen analyttisiä ratkaisuja elementtimenetelmällä saatuihin ratkaisuihin.

3.1 Nelikulmaisen pystykanavan kannake

3.1.1 Alustavat tarkistukset ja tulokset

Luvussa 2.7.1 annettujen lähtötietojen ja luvussa 2.5 esitettyjen kaavojen sekä kaavojen 1-10 avulla valitaan liitteen 1 mukaisen rakenteen parametrit alustavasti seuraavasti:

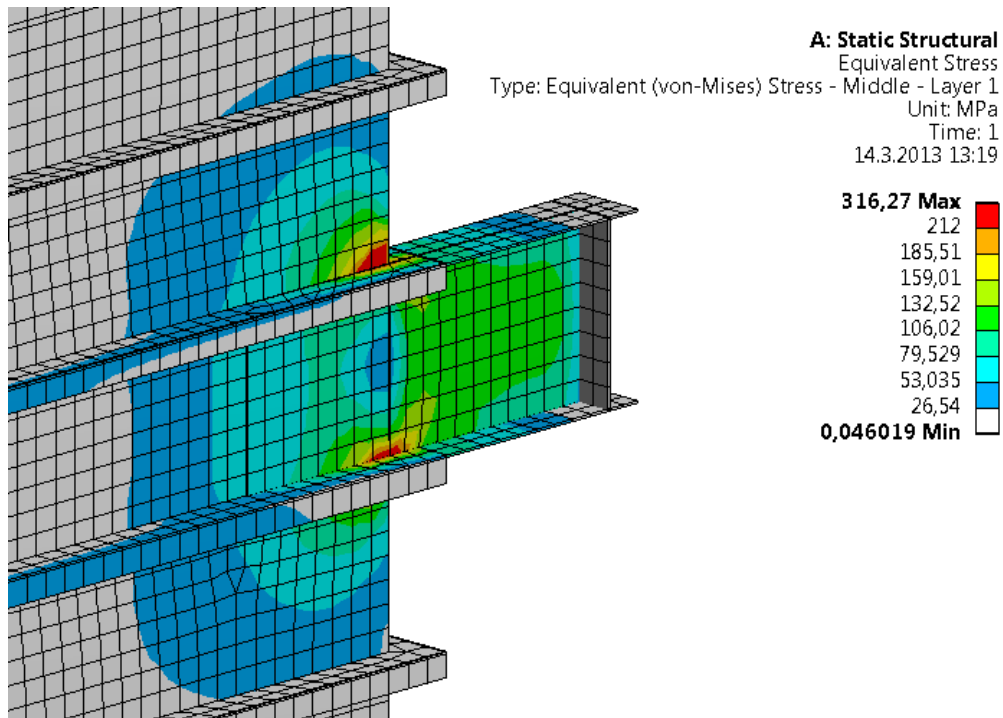
Kannakepalkin ja kanavan seinämän välisen otsahitsin a-mitta:	$a_{w.cs.1} = 5 \text{ mm}$
Kannakepalkin ja kanavan seinämän välisen kylkihitsin a-mitta:	$a_{w.cs.2} = 5 \text{ mm}$
Kannakepalkin leveys, kannakepalkin laipan leveys:	$b_{cs} = 300 \text{ mm}$
Kannakepalkin korkeus:	$h_{cs} = 750 \text{ mm}$
Kanavan seinämän ja kannakepalkin tukipisteen välinen etäisyys:	$L_{a.cs} = 1000 \text{ mm}$
Kannakepalkin ja kanavan seinämän välisen kylkihitsin pituus:	$L_{w.cs} = 750 \text{ mm}$
Kannakepalkin laipan paksuus:	$s_{f.cs} = 10 \text{ mm}$
Kannakepalkin uuman paksuus:	$s_{w.cs} = 8 \text{ mm}$
Kannakepalkin tukipisteen uumajäykisteen paksuus:	$s_{ws.cs} = 10 \text{ mm}$
Teräsrakennepalkin tukipisteen uumajäykisteen paksuus:	$s_{ws.sb} = 10 \text{ mm}$
Kanavan jäykistekehän jäykisteen laipan leveys:	$b_{ds} = 100 \text{ mm}$
Kanavan jäykistekehän jäykisteen korkeus:	$h_{ds} = 150 \text{ mm}$
Kanavan jäykistekehän jäykisteen uuman paksuus:	$s_{w.ds} = 10 \text{ mm}$
Kanavan jäykistekehän jäykisteen laipan paksuus:	$s_{f.ds} = 10 \text{ mm}$
Kanavan seinämän ja jäykisteen välisen katkopienahitsin a-mitta:	$a_{w.ds} = 3 \text{ mm}$
Kanavan seinämän ja jäykisteen välisen katkopienahitsin osapituus:	$L_{w.ds} = 50 \text{ mm}$
Kanavan seinämän ja jäykisteen välisen hitsin hitsikatkon pituus:	$e_{w.ds} = 150 \text{ mm}$

Valituilla parametrien arvoilla rakenne täyttää kaikki sille asetetut kriteerit analyttisessä ratkaisussa taulukon 7 mukaisesti. Kriittisimmiksi ilmiöiksi tulee kannakepalkin taivutuskestävyys ja kannakepalkin puristetun laipan nurjahdus. Menetelmien verifioimiseksi analyttiselle ratkaisulle ja vastaavilla parametreilla ratkaistulle elementtimallille tehdään ristiintarkistus.

Taulukko 7. Analyttinen ratkaisu, kaikki kriteerit hyväksyttäviä

Kuvaus:	Arvo / Käyttöaste:	Viite:
Kimmokerroin E_{tc}	208 GPa	Kaava 2
Myötölujuus $f_{y,tc}$	212 MPa	Kaava 1
Taivutuskestävyys	97 %	Kaava 18
Leikkauskestävyys	57 %	Kaava 22/25
Leikkauslommahduksenkestävyys	64 %	Kaava 76
Uumajäykisteen nurjahdus	35 %	Kaava 33
Leikkauksen ja taivutuksen yhteisvaikutus uumassa	56 %	Kaava 77
Laipan taipumisesta aiheutuva uuman lommahdus	12 %	Kaava 80
Puristetun laipan nurjahdus	97 %	Kaava 33
Kuormaa kantavien hitsien kestävyys	97 %	Kaava 3

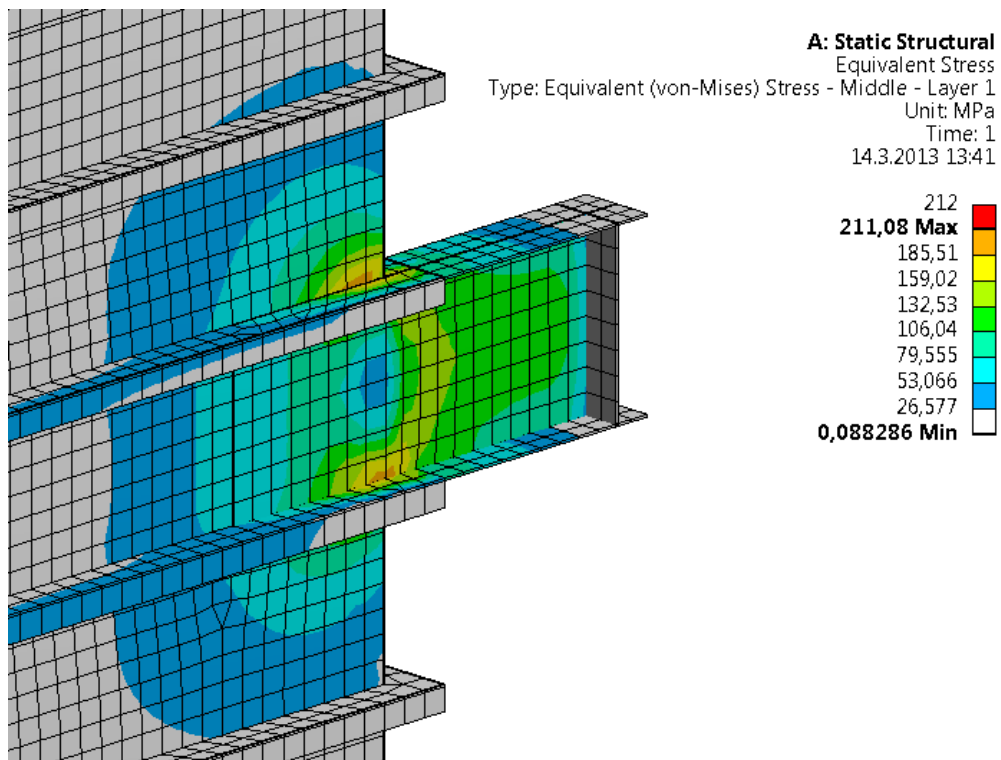
Kuvassa 20 on esitetty kannakepalkin ja sitä ympäröivän rakenteen kalvojäännitys jakauma elementtimenetelmällä ratkaistuna. Kuvasta voidaan todeta, että jäännitys nousee paikallisesti yli myötörajan eli paikallista myötäämistä tapahtuu. Kuvassa myötörajan ylittävä alue on merkitty punaisella.



Kuva 20. Rakenteen kalvojännitykset (LA lineaarinen analyysi)

Jännitys kannakepalkin uumassa on noin 130 MPa, joka on noin 61 % materiaalin myötölujuudesta.

Ratkaisemalla sama tehtävä epälineaarilla materiaalimallilla huomataan, että jännitys jakaantuu rakenteessa tasaisemmin ja materiaalin myötääminen on erittäin paikallista. Kannakepalkin ja sitä ympäröivän rakenteen kalvojännitysjauma epälineaarista materiaalimallia käyttäessä on esitetty kuvassa 21.

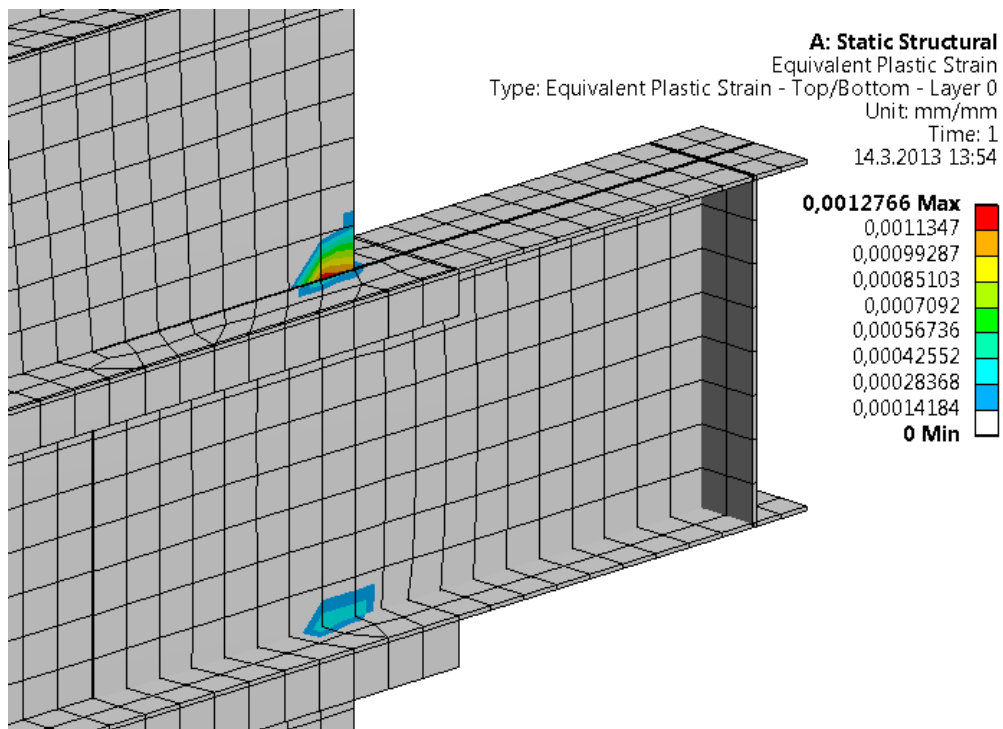


Kuva 21. Rakenteen kalvojännitykset (MNA Epälineaariset materiaaliominaisuudet)

Palkin laipoissa kriittisellä alueella lähellä kanavan kulmaa kalvojännityksen arvo on lähellä materiaalin myötölujuutta. Laipat kantavat suurimman osan taivutuskuormituksesta, joten arvoa voidaan verrata analyyttisen ratkaisun taivutuskestävyyden käyttöasteeseen. Taulukosta 7 voidaan huomata, että myös tämän taivutuskestävyydelle analyyttinen ratkaisu ja elementtimenelmällä saatu ratkaisu ovat lähellä toisiaan.

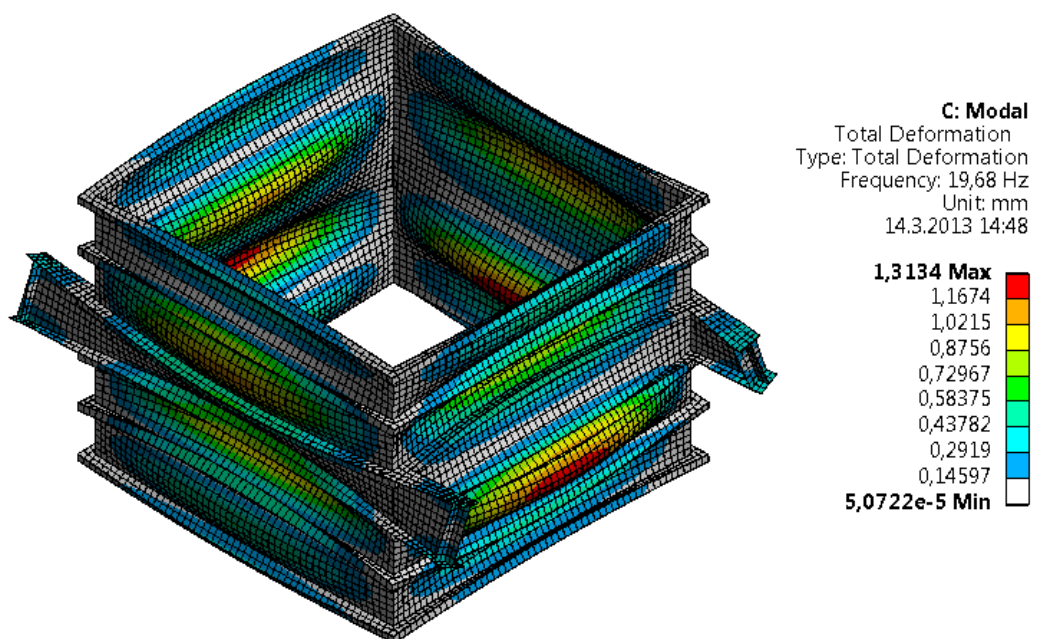
Ratkaisuissa esiintyvä pieni eroavaisuus johtuu siitä, että todellinen rakenne ja sitä vastaava elementtimallin geometria eivät ole reunaehdoiltaan ja geometrialtaan täysin vastaavia analyyttisessä ratkaisussa kuvitellun ideaalisen palkin kanssa. Jäljempänä tehtävissä rajatilatarkasteluissa selvitetään, kuvaako analyyttinen ratkaisu todellista tilannetta riittävän hyvin eli onko luotu laskentatyökalu riittävän tarkka.

Paikallinen myötääminen tarkistetaan kuvassa 22 esitetyistä rakenteen plastisista venymistä. Kuvasta 22 voidaan todeta, että myötääminen on erittäin paikallista ja että plastiset venymät ovat vain noin promillen suuruusluokkaa eli reilusti alle sallitun 5 % arvon. Rakenteessa ei siis tapahdu laajamittaista materiaalin myötäämistä.



Kuva 22. Rakenteen plastiset venymät (MNA)

Matalin rakenteelle sallittava ominaistaajuus on 16 Hz. Kuvassa 23 on esitetty moodianalyysin ratkaisuna saatu rakenteen matalin ominaistaajuus ja sitä vastaava ominaisvärähtelymuoto. Laskentamallista saatu rakenteen matalin ominaistaajuus noin 20 Hz on korkeampi kuin matalin sallittu 16 Hz.

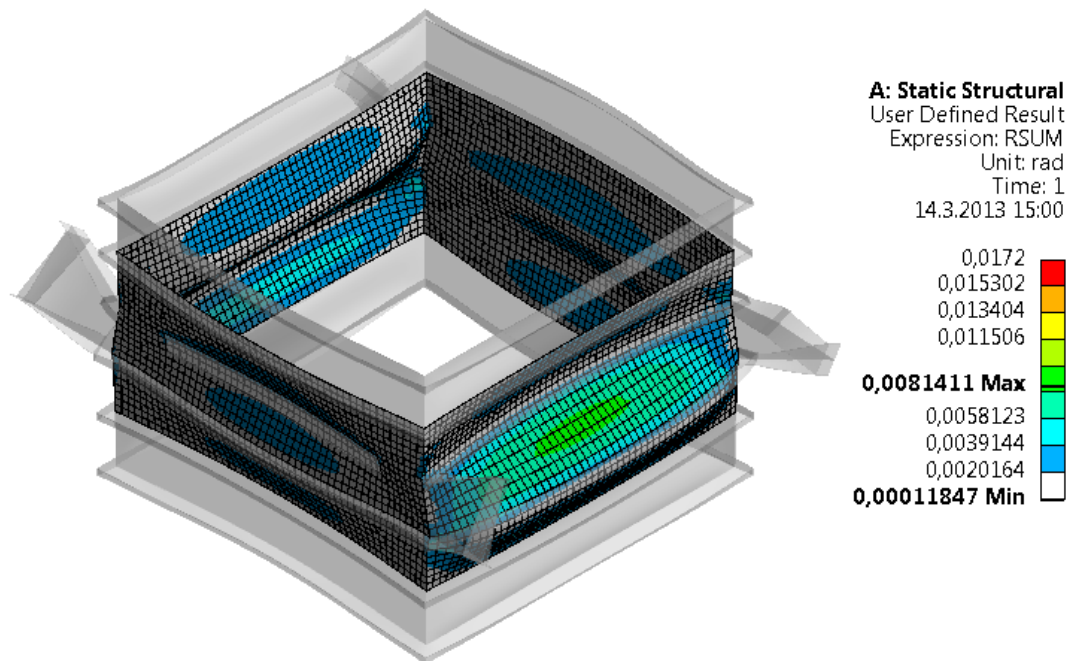


Kuva 23. Rakenteen matalin ominaistaajuus ja ominaisvärähtelymuoto (MA)

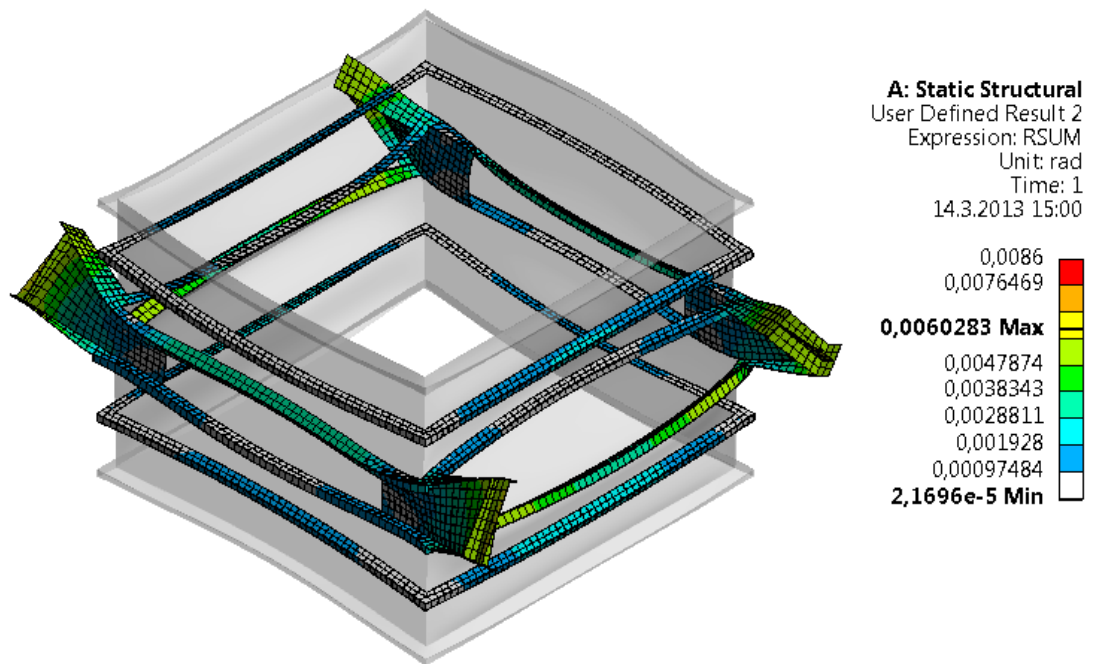
Ilmakanavien seinämälevyille sallitaan FWEOPY:n käytännön mukaan korkeintaan L/180 taipuma ja jäykisteille korkeintaan L/360 taipuma. Kannakerakenteelle käytetään samaa L/360 taipumakriteeriä kuin kanavan jäykisteille. Holopaisen (2004, s.14-16) esittämällä taipumakriteerin määrittelymenettelyllä saadaan taipumakriteereitä vastaavaksi kiertymiksi radiaaneissa:

- Kanavan seinämille $\frac{3.1}{180} \approx 0.0172$ rad
- Jäykisteille ja kannakerakenteille $\frac{3.1}{360} \approx 0.0086$ rad

Kuvissa 24 ja 25 esitetyt kanavan seinämien sekä jäykisteiden ja kannakerakenteiden muodonmuutokset ovat pienempiä kuin edellä esitetyt suurimmat sallitut taipuman arvot. Kuvissa muodonmuutokset on esitetty skaalattuina 160-kertaisiksi taipumamuodon havainnollistamiseksi.



Kuva 24. Ympäröivän rakenteen (kanavan seinämien) liioitellut muodonmuutokset (LA)



Kuva 25. Jäykisteiden ja kannakerakenteen liioitellut muodonmuutokset (LA)

3.1.2 Laskentatyökalun verifiointi

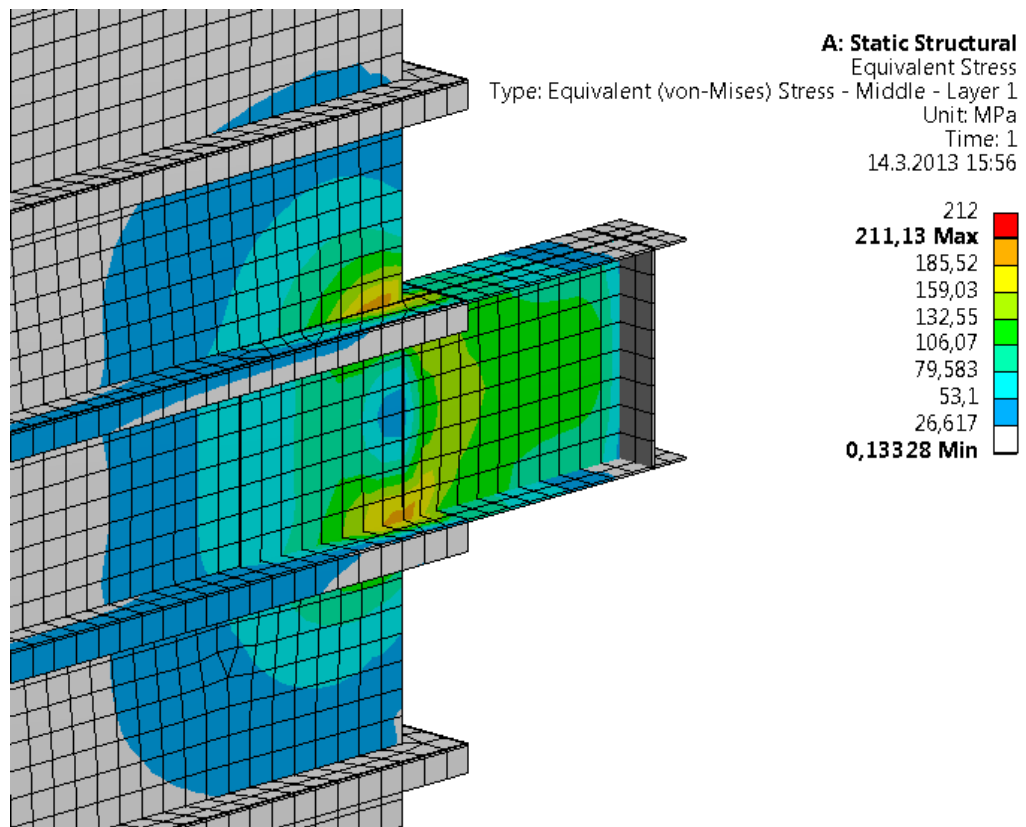
Edellä havaittiin, että laskentatyökalun analyttiset ratkaisut ja elementtimenetelmään perustuvasta laskentamallista saadut ratkaisut ovat samaa suuruusluokkaa. Varsinainen laskentatyökalun verifiointi tapahtuu kuitenkin tutkimalla eri ilmiöiden rajatiloja. Seuraavaksi mitoitetaan kannakerakenne laskentatyökalua käyttäen yksi ilmiö kerrallaan siten, että käyttöaste tutkittavan ilmiölle on juuri ja juuri yli 100 %. Kokonaisrakenteen optimoinnin sijaan tutkitaan yksittäisiä rajatiloja. Elementtimenetelmää käyttäen varmistetaan rakenteen kestävydestä kulloinkin tutkittavassa rajatilassa. Tutkittavia ovat seuraavien kahdeksan ilmiön aiheuttamat rajatilat:

- a) Kannakepalkin taivutuskestävyys
- b) Kannakepalkin leikkauskestävyys
- c) Kannakepalkin uuman leikkauslommahdus
- d) Kannakepalkin pään kestävyys poikittaiselle kuormalle (pistekuorma) eli uumajäykisteen nurjahdus

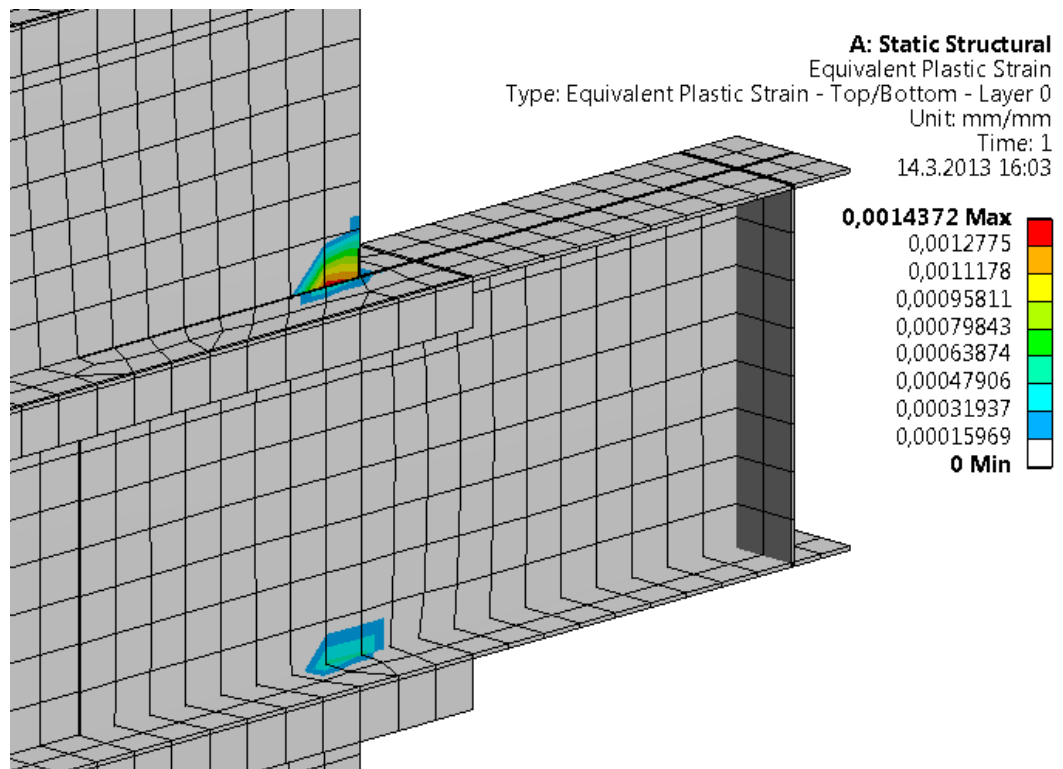
- e) Leikkauksen ja taivutuksen yhteisvaikutus kannakepalkin uumassa
- f) Laipan taipumisesta aiheutuva kannakepalkin uuman lommahdus
- g) Kannakepalkin stabiliteetin menetys eli palkin puristetun alueen nurjahdus heikomman pääjähyyksakselin suhteen
- h) Kuormaa kantavien hitsien kestävyys

a) Kannakepalkin taivutuskestävyys

Kannakepalkin taivutuskestävyys tarkistetaan mitoittamalla rakenne siten, että käyttöaste taivutuskestävyydelle on yli 100 %. Valitsemalla kannakepalkin laippojen paksuudeksi $s_{f.cs} = 9$ mm ja pitämällä muut parametrit kohdan 3.1.1 mukaisina saadaan analyttisen ratkaisun käyttöasteeksi taivutuskestävyydelle 106 %. Kohdan 3.1.1 alustavissa tarkistuksissa huomattiin, että jo alle 100 % käyttöasteella tapahtuu paikallista myötäämistä, koska laskentamallin geometria ei ole täysin analyttisen ratkaisun ideaalista palkkia vastaava. Tästä johtuen tehdään nyt elementtimenetelmällä tehtävä tarkistusanalyysi suoraan käyttäen epälineaarista materiaalimallia. Kuvasta 26 voidaan nähdä, että kalvojäännitys palkin puristuslaipassa on paikallisesti lähellä materiaalin myötölujuutta. Kuvassa 27 esitetyistä rakenteen plastisista venymistä voidaan kuitenkin huomata, että rakenteella riittää vielä kapasiteettia.



Kuva 26. Rakenteen kalvojännitykset (MNA)



Kuva 27. Rakenteen plastiset venymät (MNA)

Kuvasta 27 nähdään että plastiset venymät ovat edelleen vain noin 1.4 promillea ja siis selvästi alle sallitun 5 %:n rajan. Edellä mainittuihin havaintoihin perustuen voidaan todeta, että laskentatyökalun antama analyttinen ratkaisu kannakepalkin taivutuskestävyydelle on riittävän konservatiivinen.

b) Kannakepalkin leikkauskestävyys

Käytännössä kannakepalkin kestävyys rajoittuu taivutuksen, leikkauslommahduksen tai leikkauksen ja taivutuksen yhteisvaikutuksen aiheuttaman rajatilän mukaan. Tästä johtuen pelkästä leikkauksesta aiheutuvaa kestävyiden rajatilaa ei nähdä tarpeelliseksi tutkia.

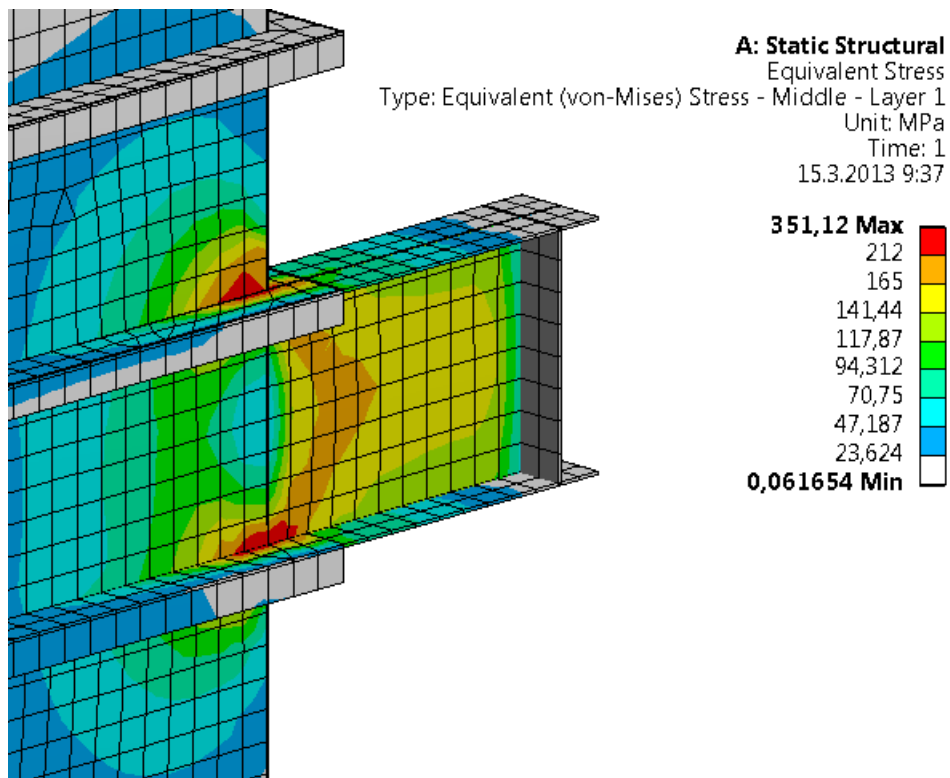
c) Kannakepalkin uuman leikkauslommahdus

Muuttamalla luvun 3.1.1 alussa valittuja parametrien arvoja siten, että kannakepalkin uuman paksuudeksi valitaan:

$$s_{w.cs} = 6 \text{ mm}$$

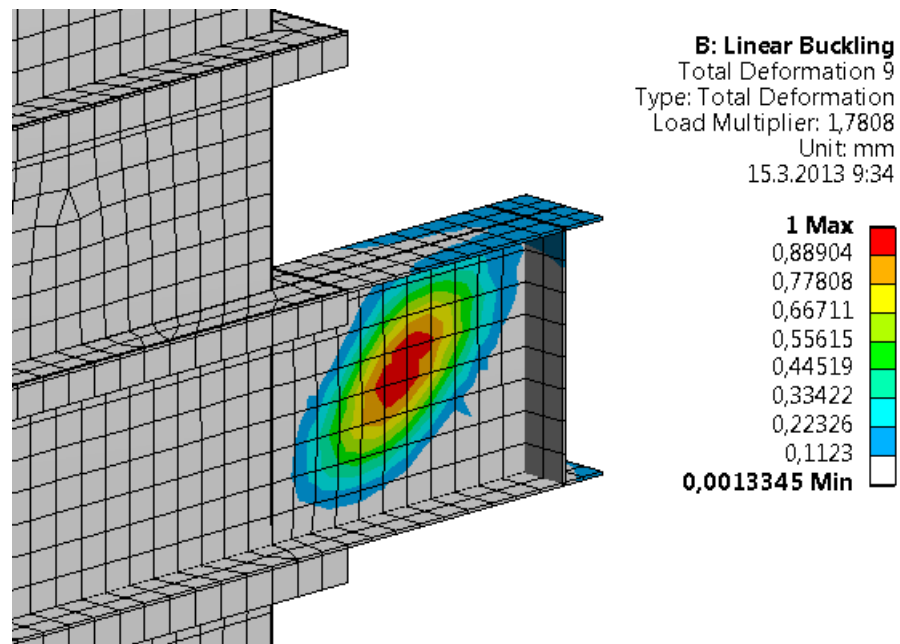
ja pitämällä muiden parametrien arvot ennallaan saadaan rakenteen käyttöasteeksi leikkauslommahdukselle 113 %.

Analyttisen laskennan rajatilän c mukainen kestävyys tarkistetaan elementtimenetelmällä ratkaisemalla ensin lineaarisella analyysillä rakenteessa vaikuttavat kalvojännitykset ja ratkaisemalla tämän jälkeen laskentamalli ominaisarvotehtävänä (linear buckling) ensin ratkaistuja jännityksiä käyttäen. Kuvassa 28 on esitetty ensin ratkaistava kannakepalkin kalvojännitystila.



Kuva 28. Kannakepalkin kalvojännitystila (LA)

Kannakepalkin uuman von Mises kalvojännitys on luokkaa 170 MPa. EN 1993-1-5 mukainen alin sallittu ominaisarvo tai kuormakerroin tällä jännityksellä on 1.34. Ominaisarvottehtävän ratkaisuksi saadaan leikkauslommahdusmuoto kuormakertoimella 1.7808. Kuvassa 29 on esitetty kyseinen leikkauksen aiheuttama lommahdusmuoto.



Kuva 29. Leikkauksen aiheuttama lommahdusmuoto kannakepalkin uumassa (LBA)

Ominaisarvottehtävän ratkaisuna saatu kuormakerroin 1.7808 on korkeampi kuin standardin EN 1993-1-5 tässä tapauksessa alin sallima kuormakerroin 1.34, vaikka analyyttisen ratkaisun käyttöaste leikkauslommahdukselle valituilla dimensioilla on 113 %. Tästä havainnosta voidaan todeta, että analyyttinen ratkaisu on konservatiivinen myös leikkauslommahdukselle.

d) Kannakepalkin pään kestävyys poikittaiselle kuormalle (pistekuorma) eli uumajäykisteen nurjahdus

Muuttamalla luvun 3.1.1 alussa valittuja parametrien arvoja siten, että tuen kohdalla olevan uumajäykisteen paksuudeksi valitaan:

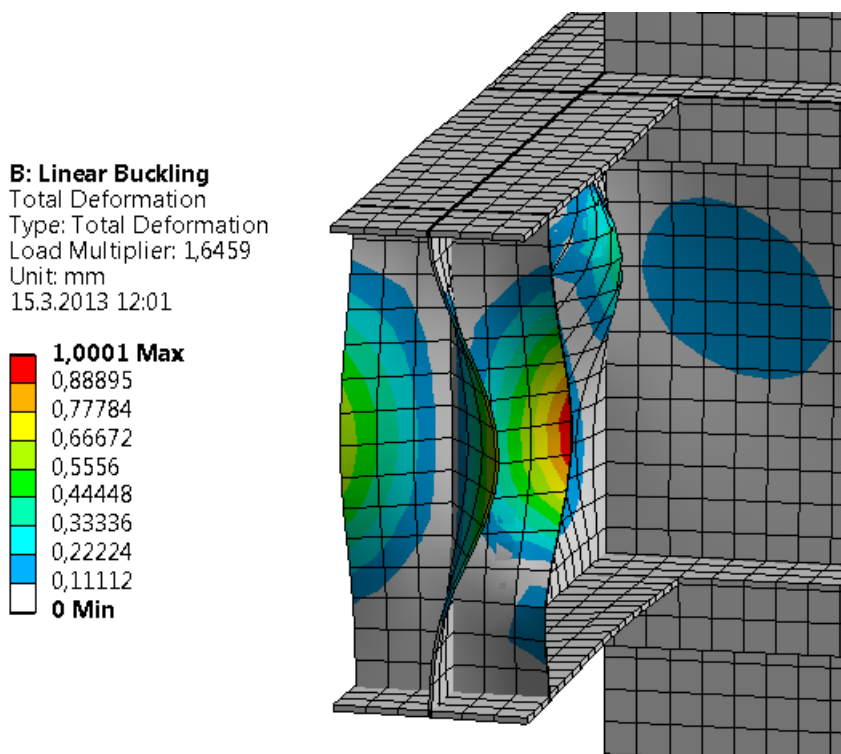
$$s_{ws.cs} = 5 \text{ mm}$$

ja myös kannakepalkin uuman paksuudeksi:

$$s_{w.cs} = 5 \text{ mm}$$

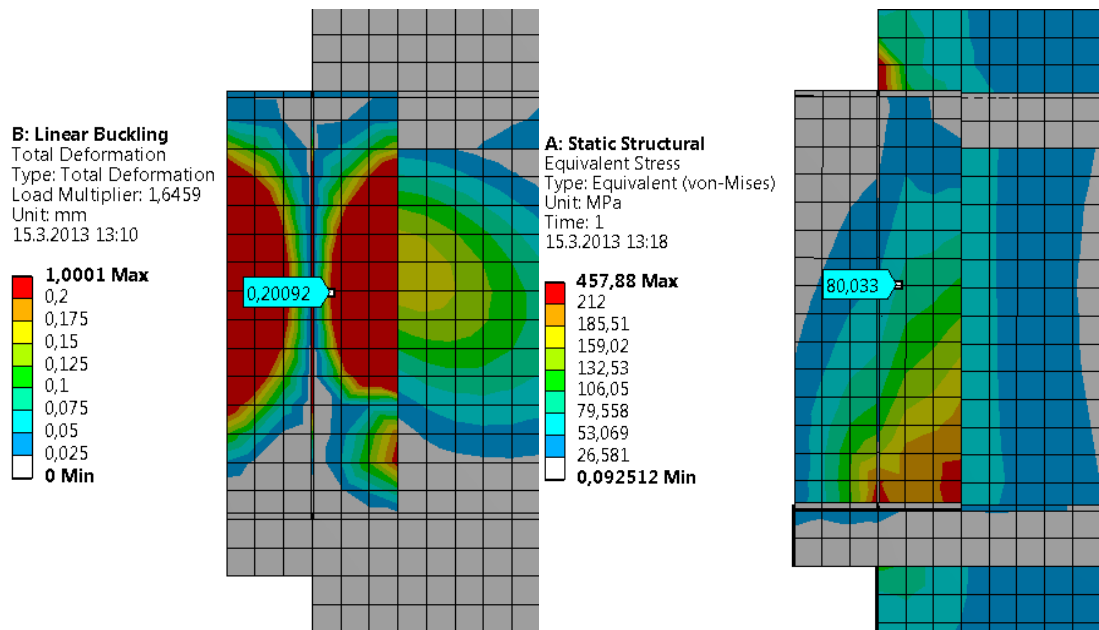
ja pitämällä muiden parametrien arvot ennallaan saadaan analyttisestä ratkaisusta käyttöasteeksi uumajäkisteeseen nurjahdukselle 106 %.

Analyttisen laskennan rajatilan d mukainen kestävyys tarkistetaan elementtimenetelmällä ratkaisemalla laskentamalli ominaisarvotehtävänä (linear buckling). Ominaisarvotehtävän ratkaisuksi saadaan uumajäkisteeseen nurjahdusmuoto kuormakertoimella 1.6459. EN 1993-1-1 mukainen alin sallittu ominaisarvo eli kuormakerroin on nyt 1.503 (jännitys uumajäkisteessä 80 MPa). Ominaisarvoanalyysistä saatu kuormakerroin on korkeampi kuin alin sallittu kuormakerroin eli analyttinen ratkaisu on myös uumajäkisteeseen nurjahdukselle varmallalla puolella. Kuvassa 30 on esitetty uumajäkisteeseen nurjahdusmuoto.



Kuva 30. Uumajäkisteeseen nurjahdusmuoto (LBA)

Kuvassa 31 vasemmalla on esitetty sama muoto siten, että stabiliteetin menettänyttä aluetta, raja-arvona 20 % suhteellinen muodonmuutos, on merkitty punaisella. Tätä 20 % rajaa voidaan käyttää jännityksenmittauspisteinä laskiessa stabiliteettia FE-menetelmällä. Kuvassa oikealla on esitetty kalvojännityksen arvo tarkastelupisteessä.



Kuva 31. Uumajäkisteeseen nurjahdus ja sitä vastaava jännitys (LBA/LA)

Käytännössä on syytä valita uumajäkisteeseen dimensiot aina siten, että se kuuluu vähintään poikkileikkausluokkaan 3 ja paksuudeksi kannattaa valita aina vähintään kannakepalkin uuman paksuus. Tällä menettelyllä vältetään tarkasteluilta uumajäkisteeseen stabiiliteetin ja mahdollisen taipumakriteerin suhteen. Tehdyn tarkastelun perusteella voidaan kuitenkin todeta laskentatyökalun antavan riittävän konservatiivisia tuloksia uumajäkisteeseen nurjahduskestävyydelle.

e) Leikkauksen ja taivutuksen yhteisvaikutus kannakepalkin uumassa

Muuttamalla luvun 3.1.1 alussa valittuja parametrien arvoja siten, että kannakepalkin uuman paksuudeksi valitaan:

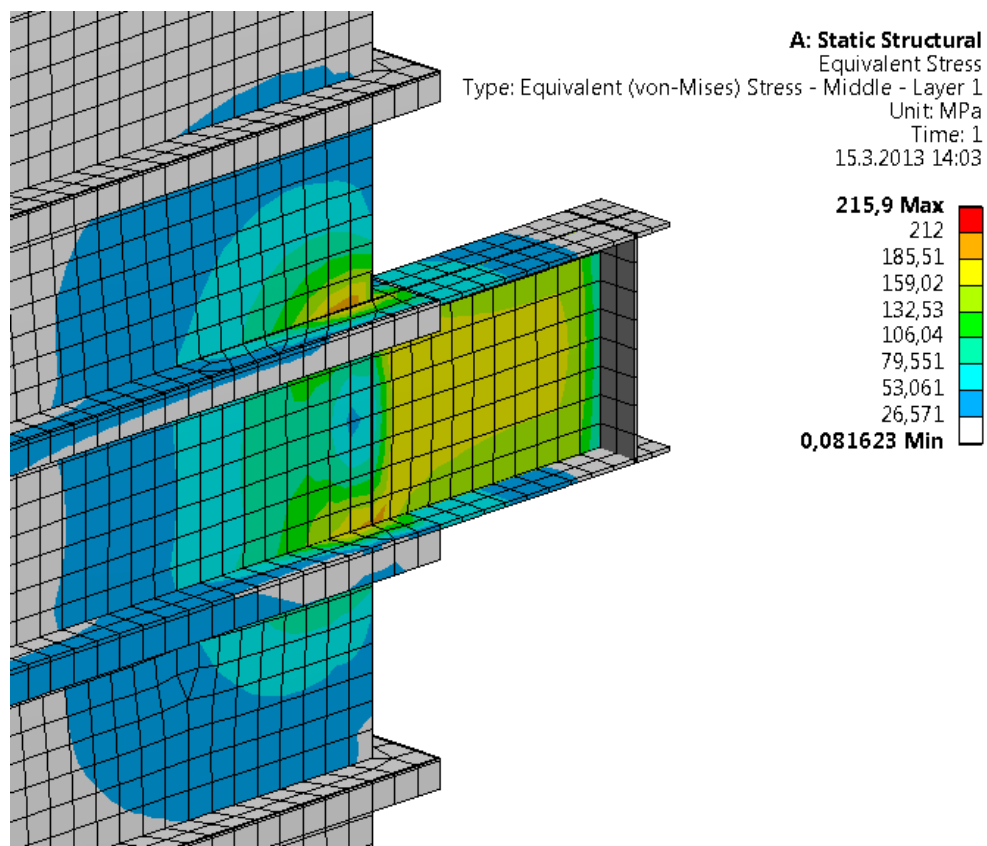
$$s_{w.cs} = 5.5 \text{ mm}$$

ja laippojen paksuudeksi:

$$s_{f.cs} = 15 \text{ mm}$$

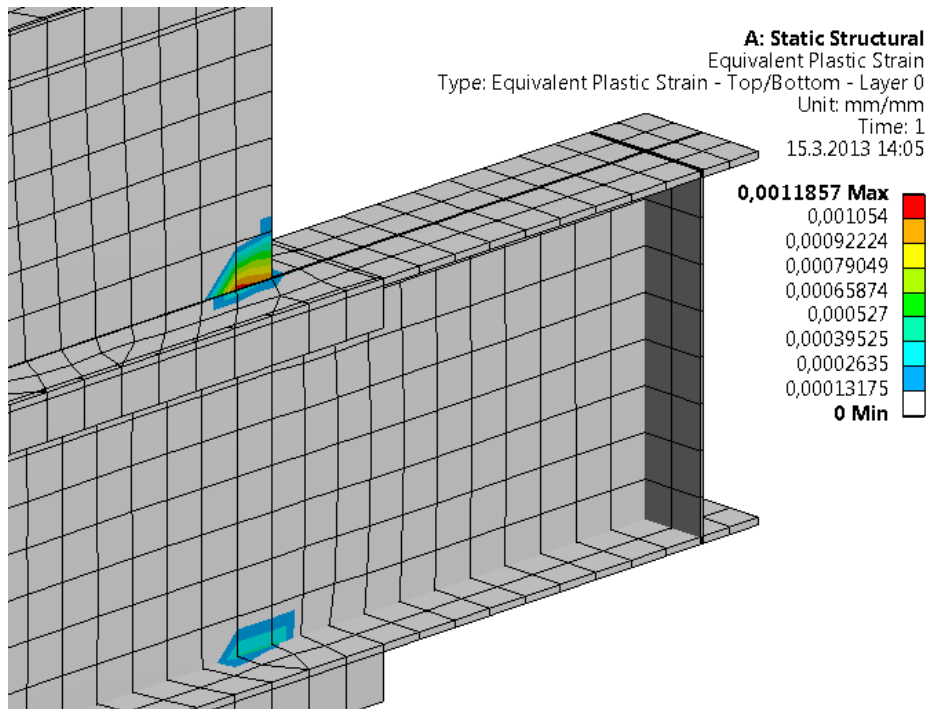
ja pitämällä muiden parametrien arvot ennallaan kohdan 3.1.1 mukaisesti, saadaan laskentatyökalun analyttisestä ratkaisusta käyttöasteeksi leikkauksen ja taivutuksen yhteisvaikutukselle 102 %. Kestävyyden varmistamiseksi ratkaistaan FE-laskentamalli käyttäen epälineaarisia materiaaliominaisuuksia.

Kuvassa 32 on esitetty rakenteen kalvojännitykset. Jännitys kannakepalkin uumassa on noin 180 MPa eli 85 % myötölujuudesta. Uuman kestävyys on selvästi riittävä.



Kuva 32. Rakenteen kalvojännitysjaakauma (MNA)

Tarkistetaan vielä kuvassa 33 esitetyt rakenteen plastiset venymät. Kuvasta voidaan huomata myötääminen on paikallista ja plastiset venymät ovat pieniä ja sallituissa rajoissa. Laskentatyökalun antama rajatilan e mukainen kestävyys on siis varmalla puolella.



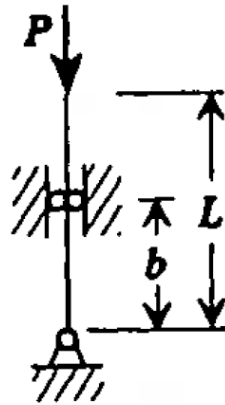
Kuva 33. Rakenteen plastiset venymät (MNA)

f) Laipan taipumisesta aiheutuva kannakepalkin uuman lommahdus

Tutkittavassa rakenteessa rajatilojen c ja e mukainen kestävyys rajoittaa rakenteen kestävyuden aina rajatilan f mukaista kestävyyttä alemmalle tasolle, joten rajatilan f mukaista kestävyyttä ei nähdä tarpeelliseksi tarkistaa elementtimenetelmällä.

g) Kannakepalkin stabiliteetin menetys eli palkin puristetun alueen nurjahdus heikomman pääjäyhyysakselin suhteen

Kannakepalkin puristetun laipan nurjahdus heikomman pääjäyhyysakselin suhteen lasketaan kaavojen 33-40 mukaan. Kriittistä nurjahdusvoimaa kaavan 40 mukaan laskiessa kriittiselle nurjahduspituudelle L_{cr} ei ole olemassa Eulerin nurjahdustapausten mukaista arvoa, joten kokeillaan käyttää kaavan 40 tilalla Pilkeyn (2005) esittämää kaavaa kuvassa 34 esitetyn kaltaisen jännevälän alueelta niveltuetun aksiaalisesti kuormitetun palkin nurjahduskuormalle. Pilkeyn esittämä tapaus ei hyödynnä kanavan seinämän antamaa tukea. Pilkeyn kaava ei myöskään huomioi puristetun laipan profiilin muutosta kanavan kulman kohdalla.



Kuva 34. Jännevälän alueelta niveltuettu aksiaalisesti kuormitettu palkki (Pilkey 2005)

Kuvan 34 mukaisessa Pilkeyn tapauksessa kriittinen nurjahduskuorma saadaan kaavasta:

$$N_{cr} = \eta_N \frac{EI}{L^2} \quad (117)$$

missä L on tässä tapauksessa kannakepalkin tukipisteen ja kanavan seinämän välisen etäisyyden ($L_{a.cs}$) ja yhdensuuntaisen kanavan seinämän leveyden summa. Kerroin η_N lasketaan kaavasta:

$$\eta_N = C_1 + C_2 \frac{b}{L} + C_3 \left(\frac{b}{L}\right)^2 \quad (118)$$

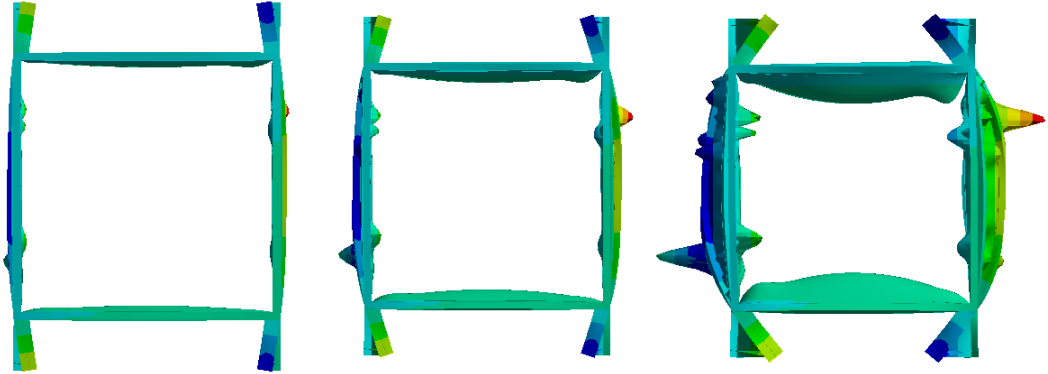
missä b on kannakepalkin kanssa yhdensuuntaisen kanavan seinämän leveys. Vakiot C_1 , C_2 ja C_3 määräytyvät mittojen b ja L suhteesta seuraavasti:

$$0 \leq \frac{b}{L} \leq 0.5 \rightarrow C_1 = 2.4825, C_2 = 2.6372, C_3 = 6.4821 \quad (119)$$

$$0.5 < \frac{b}{L} \leq 1 \rightarrow C_1 = -4.7167, C_2 = 25.432, C_3 = -10.7286 \quad (120)$$

Luvussa 3.1.1 määritetyillä parametrien arvoilla kaavasta 32 saadaan Pilkeyn esittämää tapausta soveltamalla käyttöasteeksi nurjahdukselle 86 %. Elementtimenetelmällä saatu vastaava nurjahdusmuoto on esitetty kuvassa 35, jossa

rakennetta on kuvattu yläpuolelta muodon havaitsemisen helpottamiseksi. Nurjahdusmuoto on esitetty skaalaten muodonmuutosta yhä suuremmaksi vasemmalta oikealle.



Kuva 35. Kannakepalkin puristetun laipan nurjahdus

Paikallisista samalla kuormituskertoimella toteutuvista lommahdusmuodoista ei ole nyt syytä välittää, koska tarkastellaan puristetun laipan stabiiliteettia, joka on kriittinen rakenteen kokonaisstabiiliteetin kannalta.

Kuten edellä todettiin, kuvan 34 mukainen Pilkeyn esittämä tapaus on varsin karkea yksinkertaistus, koska kanavan seinämän antamaa tukea ei hyödynnetä lainkaan ja profiilin muutos jää ottamatta huomioon. Kokeillaan etsiä tarkempi analyttinen ratkaisu nurjahduksen differentiaaliyhtälön:

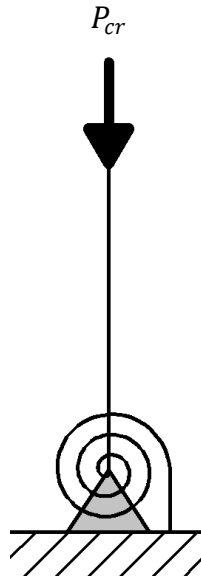
$$\frac{d^4 v}{dx^4} + \lambda^2 \frac{d^2 v}{dx^2} = 0 \quad (121)$$

avulla. Yhtälöä 126 sanotaan Eulerin yhtälöksi ja sen yleinen ratkaisu on:

$$v(x) = C_1 \sin \lambda x + C_2 \cos \lambda x + C_3 x + C_4 \quad (122)$$

Kannakepalkin ulokkeellisen osan puristettua laippaa voidaan pitää kuvan 36 mukaisena nivelellisenä ja rotaatiojousella tuettuna palkkina. Rotaatiojoustusta käytetään kuvaamaan kanavan kulman antamaa tukea, jota ei voida nähdä

nivelellisenä, koska tällöin ulokepalkki toimisi mekanismina. Reunaehto ei voida pitää myöskään täysin jäykkänä, koska sitäkään se ei todellisuudessa ole.



Kuva 36. Tutkittava nurjahdustapaus, nivelellinen rotaatiojousella tuettu palkki

Seuraavaksi selvitetään rotaatiojousen jousivakio. Ulokepalkin jatkona olevaa kanavan seinämästä ja jäykisteprofiilista koostuvaa profiilia voidaan pitää kimmoisalla alustalla olevana palkkina. Tämän kimmoisan alustan alustakerroin k_k saadaan kanavan seinämän taipuman yhtälöstä seuraavasti:

$$v_k = \frac{F \cdot a_k^2 \cdot b_k^2}{3 \cdot E \cdot I_k \cdot L_k} \quad (123)$$

missä v_k on kanavan seinämän taipuma, F on kanavan seinämää taivuttava ekvivalentti voima, a_k on puolet kannakepalkin korkeudesta, b_k on kannakepalkin puristetun laipan ja sitä lähimmän jäykistekehän välinen etäisyys, E on kimmomoduuli, I_k on kanavan seinämästä muodostuvan 1 mm leveän palkkialkion neliömomentti ja $L_k = a_k + b_k$. Määritellään vielä kanavan seinämää taivuttava ekvivalentti voima F seuraavasti:

$$F = q \cdot w = k_k \cdot v_k \cdot w \quad (124)$$

missä q on ekvivalentti viivakuorma, w on palkkialkion leveys eli 1 mm, k_k on kanavan seinämän muodostaman kimmoisan alustan alustakerroin ja v_k on kanavan seinämän taipuma kuten edellä. Määritellään vielä kanavan seinämästä muodostuvan 1 mm leveän palkkialkion neliömomentti seuraavasti:

$$I_k = \frac{w \cdot t^3}{12} \quad (125)$$

missä t on kanavan seinämän paksuus. Sijoittamalla yhtälöt 124 ja 125 yhtälöön 123 saadaan kimmoisan alustan alustakertoimeksi:

$$k_k = \frac{t^3 \cdot E \cdot L_k}{4 \cdot a_k^2 \cdot b_k^2} \quad (126)$$

Kanavan kulmaa kuvaavan rotaatiojousen jousivakion selvittämiseksi kanavan seinämää ajatellaan momentin kuormittamana nivelöitynä puoliäärettömänä palkkina, jonka kiertymä lasketaan Ylisen (1969) mukaan seuraavasti:

$$\frac{dv}{dx} = \frac{2 \cdot \beta^3 \cdot M_0}{k_k} \cdot \psi(\beta x) \quad (127)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_k}{4 \cdot E \cdot I_p}} \quad (128)$$

missä I_p on kanavan seinämästä ja jäykisteprofiilista koostuvan profiilin neliömomentti. Ylisen (1969, s. 310) esittämästä taulukosta nähdään, että $\psi(\beta x)$ saa arvon 1 kohdassa $x = 0$ eli tässä tapauksessa kanavan kulman kohdalla. Lisäksi tiedetään, että rotaatiojousen momentti voidaan laskea seuraavasti:

$$M_0 = k_M \cdot \frac{dv}{dx} \quad (129)$$

Rotaatiojousen jousivakio saadaan siis yhtälöstä:

$$k_M = \frac{M_0}{\frac{dv}{dx}} = \frac{M_0}{\frac{2 \cdot \beta^3 \cdot M_0}{k_k}} = \frac{k_k}{2 \cdot \beta^3} \quad (130)$$

Palataan nyt tutkittavaan nurjahdustapaukseen eli kuvan 36 mukaiseen nivelelliseen rotaatiojousella tuettuun palkkiin ja nurjahduksen differentiaaliyhtälön yleiseen ratkaisuun eli yhtälöön 122. Kuvasta 36 nähdään että palkin toinen pää on vapaa, tästä seuraa yhtälölle 122 seuraavat reunaehdot:

$$v''(L) = 0 \quad (131)$$

$$v'''(L) + \lambda^2 v'(L) = 0 \quad (132)$$

eli taivutusmomentti ja leikkausvoima palkin vapaassa päässä on 0. Nyt L on tarkasteltavan osan pituus eli kannakepalkin tukipisteen ja kanavan seinämän välinen etäisyys. Rotaatiojousen ja niveltuennan yhdistelmä muodostaa seuraavat reunaehdot:

$$v(0) = 0 \quad (133)$$

$$v''(0) = k_M \cdot v'(0) \quad (134)$$

Sijoittamalla reunaehdot yhtälöön 122 saadaan:

$$v(0) = C_2 + C_4 = 0 \quad (135)$$

$$v''(0) = C_1 \frac{-k_M \cdot \lambda}{E \cdot I_p} - C_2 \cdot \lambda^2 + C_1 \frac{-k_M}{E \cdot I_p} = 0 \quad (136)$$

$$v''(L) = -C_1 \cdot \lambda^2 \cdot \sin L\lambda - C_2 \cdot \lambda^2 \cdot \cos L\lambda = 0 \quad (137)$$

$$v'''(L) + \lambda^2 v'(L) = C_3 \cdot \lambda^2 = 0 \quad (138)$$

sama esitettynä matriisimuodossa:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ \frac{-k_M \cdot \lambda}{E \cdot I_p} & -\lambda^2 & \frac{-k_M}{E \cdot I_p} & 0 \\ -\lambda^2 \cdot \sin L\lambda & -\lambda^2 \cdot \cos L\lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{pmatrix} = 0 \quad (139)$$

Ratkaisemalla kerroinmatriisin determinanti saadaan yhtälö:

$$\frac{-\lambda^5 \cdot k_M \cdot \cos L\lambda + E \cdot I_p \cdot \lambda^6 \cdot \sin L\lambda}{E \cdot I_p} = 0 \quad (140)$$

joka suppenee muotoon

$$-k_M \cdot \cos L\lambda + E \cdot I_p \cdot \lambda \cdot \sin L\lambda = 0 \quad (141)$$

Merkitimällä yhtälöä $r(\alpha)$:lla ja $\alpha = L\lambda$ ja hyödyntämällä trigonometristen funktioiden välisiä yhteyksiä saadaan yhtälö muotoon:

$$r(\alpha) = \alpha \cdot \tan \alpha - \frac{k_M \cdot L}{E \cdot I_p} = 0 \quad (142)$$

Seuraavaksi ratkaistaan yhtälön $r(\alpha)$ pienin positiivinen nollakohta esimerkiksi Newtonin menetelmällä. Kun pienimmän positiivisen nollakohdan tuottava α nyt tunnetaan, voidaan kuvan 36 nurjahdustapauksen kriittinen nurjahdusvoima P_{cr} laskea seuraavasti:

$$\lambda = \frac{\alpha}{L} \quad (143)$$

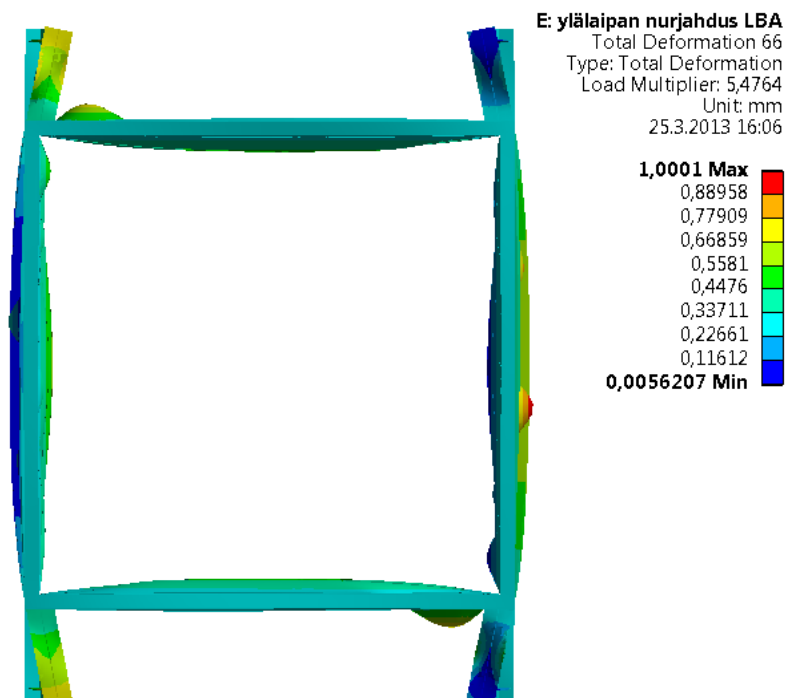
$$\lambda^2 = \frac{P_{cr}}{E \cdot I_f} \quad (144)$$

$$P_{cr} = \lambda^2 \cdot E \cdot I_{f.cs} \quad (145)$$

missä $I_{f,cs}$ on kannakepalkin puristetun laipan neliömomentti tarkasteltavassa nurjahdussuunnassa eli laipan muodostaman tason suunnassa.

Käyttämällä kaavan 145 mukaista kriittisen nurjahduskuorman arvoa saadaan luvussa 3.1.1 määritetyillä parametrien arvoilla kaavasta 32 käyttöasteeksi nurjahduskestävyydelle 97 %.

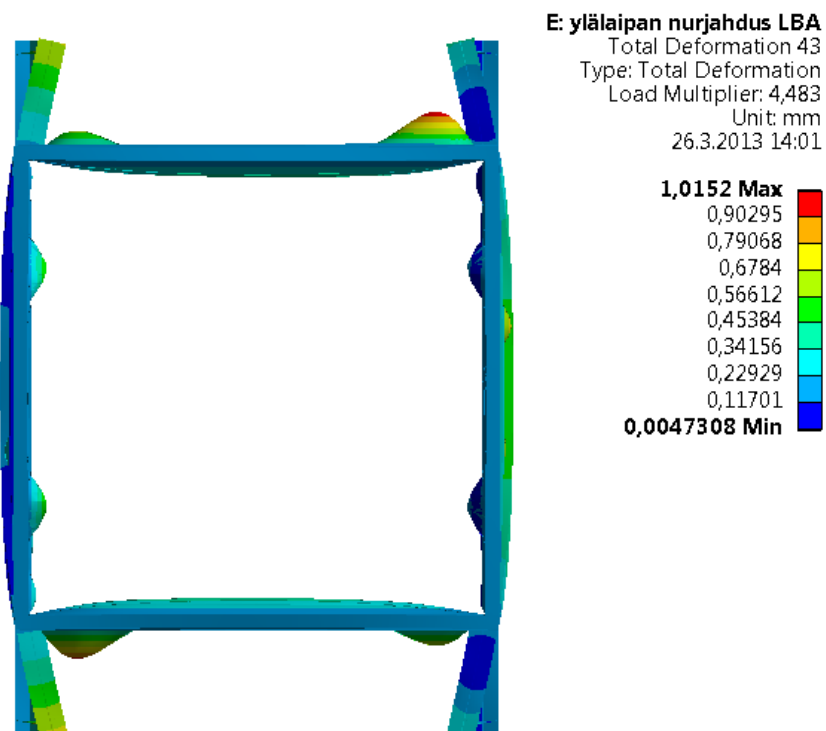
Määritetään jäykistejaoksi kannakkeen ympärillä 1000 mm. Laskemalla kriittinen nurjahdusvoima Pilkeyn kaavalla saadaan edelleen 86 % käyttöaste, koska Pilkeyn kaava ei hyödynnä kanavan seinämän antamaa tukea. Jäykistejaon kasvaessa kaavojen 121-145 mukaan laskemalla käyttöaste nousee 101 %:in. Elementtimenetelmällä saadaan ominaisarvotehtävän ratkaisuna vastaava nurjahdusmuoto kuormakertoimella 5.4764. Nurjahdusmuoto on esitetty kuvassa 37.



Kuva 37. Puristetun laipan nurjahdus (LBA)

Standardin EN 1993-1-1 mukaan laskettuna alin sallittu kuormituskerroin on nyt 3.333. Elementtimenetelmällä tehty tarkistus osoittaa, että kaavojen 121-145 mukainen laskentamenetelmä kriittisen nurjahdusvoiman laskemiseksi kuvien 34-36 nurjahdustapaukselle on konservatiivinen. Kokeillaan vielä kasvattaa puristetun laipan ulokkeellista pituutta $L_{a,cs}$ arvoon 1150 mm, jolloin Pilkeyn kaavan mukainen

käyttöaste puristetun laipan nurjahduskestävyydelle on 101 %. Tällöin kuvan 37 nurjahdusmuotoa vastaava muoto saadaan FE-laskentamallista kuormituskertoimella 4.483 ja alin sallittu kerroin on nyt 6.398. Näin ollen voidaan todeta, että Pilkeyn tapauksen mukainen karkeasti yksinkertaistettu laskenta ei ole tässä tapauksessa riittävän tarkka eikä edes turvallinen tapa mitoittaa tutkittua rakennetta. Pidemmällä ulokepituudella saatu nurjahdusmuoto on esitetty kuvassa 38.



Kuva 38. Puristetun laipan nurjahdus (LBA)

Lasketaan vielä tapaus, jossa nurjahtavan puristetun laipan ulokkeellista pituutta kasvatetaan arvoon $L_{a.cs} = 1500$ mm ja kannakepalkin profiilin korkeus $h_{cs} = 1200$ mm ja uuman paksuus $s_{w.cs} = 10$ mm. Kaavojen 121-145 mukaan käyttöaste nurjahduskestävyydelle on nyt 107 %. FE-menetelmällä tehdystä ominaisarvoanalyysistä saadaan ylälaipan nurjahdusmuoto kuormituskertoimella 3.5777. Alin sallittu kuormituskerroin EN 1993-1-1 mukaan on nyt 2.789. Kaavojen 121-145 mukainen ratkaisu on siis edelleen varmallalla puolella.

h) Kuormaa kantavien hitsien kestävyys

Kuormaa kantavat hitsit on mitoitettu luvussa 2.3.1 esitettyä standardin EN 1993-1-8 mukaista yksinkertaistettua menetelmää soveltaen. Kaikki liitokseen vaikuttavat jännitykset oletetaan leikkausjännityksen luonteiseksi ja hitsien kestävyys varmistetaan kaavan 4 mukaisella mitoitusehdolla. Parametria $a_{w.cs.1}$ vastaavat pystyhitsit ja parametria $a_{w.cs.2}$ vastaavat vaakahitsit ovat standardin mukaan luvallista mitoitaa siten, että oletetaan pystyhitsien kantavan liitokseen kohdistuvan leikkauskuormituksen ja vaakahitsien kantavan vastaavan momenttikuormituksen. Tällainen idealisointi on luvallista, kun hitsin pituuden l ja a -mitan a suhde täyttää seuraavan ehdon (Niemi 2003):

$$6 \leq \frac{l}{a} \leq 150 \quad (146)$$

Edellä kuvattu menetelmä antaa turvallisella puolella olevia tuloksia ja on käytännöllinen ja nopea tapa mitoitaa päällekkäisliitosten osahitsejä. Kuormitusten ollessa suuria menetelmä johtaa kuitenkin tutkittavan rakenteen tapauksessa kannakepalkin korkeuden h_{cs} liialliseen ylimitoitukseen, joten on syytä käyttää hieman tarkempaa mitoitusmenettelyä. Sovelletaan Niemen (2003, s. 73) esittämää menetelmää, joka käyttää kimmoteoriaa olettaen, että leikkausvoima vaikuttaa liitoksen painopisteessä ja momentti vaikuttaa saman painopisteen suhteen. Menetelmässä oletetaan, että hitsillä on sama jäykkyys kaikkiin suuntiin ja jännitysten oletetaan jakaantuvan tasan yli hitsin paksuuden. Leikkausvoiman aiheuttama pystysuuntainen jännityskomponentti hitsissä saadaan kaavasta:

$$\tau_{v,Ed,1} = \frac{V_{Ed}}{\Sigma a \cdot l} \quad (147)$$

Momentin aiheuttama pystysuuntainen jännityskomponentti saadaan kaavasta:

$$\tau_{v,Ed,2} = \frac{M_{Ed}}{I_p} \cdot e_h \quad (148)$$

missä I_p on liitoksen muodostaman poikkileikkauksen polaarinen neliömomentti painopisteen suhteen ja e_h on vaakasuuntainen etäisyys painopisteestä liitoksen muodostaman poikkileikkauksen reunaan. Momentin aiheuttama vaakasuuntainen jännityskomponentti saadaan kaavasta:

$$\tau_{h,Ed} = \frac{M_{Ed}}{I_p} \cdot e_v \quad (149)$$

missä e_v on pystysuuntainen etäisyys liitoksen painopisteestä liitoksen reunaan. Jännityskomponenttien resultantiksi saadaan:

$$\tau_{w,Ed} = \sqrt{\tau_{h,Ed}^2 + (\tau_{v,Ed,1} + \tau_{v,Ed,2})^2} \quad (150)$$

Liitoksen kestävyys tarkistetaan kaavaa 3 mukailevasta mitoitus ehdosta:

$$\tau_{w,Ed} \leq \tau_{w,Rd} \quad (151)$$

missä hitsin leikkausjännityskestävyys on:

$$\tau_{w,Rd} = f_{vw,d} = \frac{f_{y,T}}{\sqrt{3}} \quad (152)$$

Vaikka Niemi ei menetelmää esittäessään asiaa mainitse, myös tätä menetelmää käyttäessä on syytä tarkistaa, että liitoksen hitsit täyttävät kaavan 146 mukaisen ehdon. Ehdolla varmistetaan, että hitsit ovat tehollisia koko pituudeltaan. Lisäksi on syytä tarkistaa kanavan seinämän leikkauskestävyys liitospinnassa. Kanavan seinämän kestävyys varmistetaan skaalaamalla liitoksen kestävyden käyttöastetta (kaava 151) tarkasteltavan hitsin a-mitan ja kanavan seinämän levynpaksuuden suhteella:

$$\tau_{duct.1} = \frac{a_{w.cs.1}}{t} \cdot \frac{\tau_{w,Ed}}{\tau_{w,Rd}} \leq 1 \quad (153)$$

$$\tau_{duct.2} = \frac{a_{w.cs.2}}{t} \cdot \frac{\tau_{w.Ed}}{\tau_{w.Rd}} \leq 1 \quad (154)$$

missä t on kanavan seinämänpaksuus. Kaavoja 153 ja 154 käyttäessä otaksutaan liitoksella ja kanavan seinämällä olevan sama lujuus.

3.2 Pyöreän pystykanavan kannake

3.2.1 Alustavat tarkistukset ja tulokset

Luvussa 2.7.2 annettujen lähtötietojen ja luvuissa 2.5 ja 2.6 esitettyjen kaavojen sekä kaavojen 1-9 avulla valitaan liitteen 2 mukaisen rakenteen parametrit alustavasti seuraavasti:

Vaakasuuntaisen hitsin a-mitta kannakepalkin kohdalla	$a_{w.cb.1} = 4 \text{ mm}$
Kannakepalkin ja kanavan seinämän välisen pystyhitsin a-mitta	$a_{w.cb.2} = 4 \text{ mm}$
Kannakepalkin uumien ja laippojen välisten hitsien a-mitta	$a_{w.cb.3} = 4 \text{ mm}$
Kannakepalkin leveys, kannakepalkin laipan leveys	$b_{cb} = 300 \text{ mm}$
Kannakepalkin laipan ulokkeellisen osan leveys	$b_{of.cb} = 50 \text{ mm}$
Kannakepalkin korkeus	$h_{cb} = 500 \text{ mm}$
Kanavan seinämän ja kannakepalkin tukipisteen välinen etäisyys	$L_{a.cb} = 500 \text{ mm}$
Kannakepalkin laipan paksuus	$s_{f.cb} = 4 \text{ mm}$
Kannakepalkin uuman paksuus	$s_{w.cb} = 4 \text{ mm}$
Kannakepalkin tukipisteen uumajäykisteen paksuus	$s_{ws.cb} = 8 \text{ mm}$
Teräsrakennepalkin tukipisteen uumajäykisteen paksuus	$s_{ws.sb} = 10 \text{ mm}$
Kanavan jäykistekehän jäykisteen korkeus	$h_{ds} = 300 \text{ mm}$
Kanavan jäykistekehän jäykisteen uuman paksuus	$s_{w.ds} = 14 \text{ mm}$
Kanavan seinämän ja jäykistekehän välisen katkopianahitsin a-mitta	$a_{w.ds} = 3 \text{ mm}$
Kanavan seinämän ja jäykistekehän välisen katkopianahitsin osapituus	$L_{w.ds} = 50 \text{ mm}$
Kanavan seinämän ja jäykistekehän välisen liitoksen hitsikatkon pituus	$e_{w.ds} = 150 \text{ mm}$

Valituilla parametrien arvoilla rakenne täyttää kaikki sille asetetut kriteerit laskentatyökalun analyttisessä ratkaisussa taulukon 8 mukaisesti.

Taulukko 8. Analyytinen ratkaisu, kaikki kriteerit hyväksyttäviä

Kuvaus:	Arvo / Käyttöaste:	Viite:
Kimmokerroin E_t	208 GPa	Kaava 2
Myötölujuus $f_{y,t}$	212 MPa	Kaava 1
Kestävyys vertikaaliselle taivutukselle	50 %	Kaava 18
Kestävyys horisontaaliselle taivutukselle	11 %	Kaava 18
Kestävyys vertikaaliselle leikkaukselle	94 %	Kaava 22/25
Kestävyys horisontaaliselle leikkaukselle	27 %	Kaava 22/25
Kestävyys kahden akselin suhteen tapahtuvan taivutuksen ja samanaikaisten leikkausvoimien yhteisvaikutukselle	61 %	Kaava 81/82
Uuman leikkauslommahduskestävyys	66 %	Kaava 76
Laipan leikkauslommahduskestävyys	12 %	Kaava 76
Uumajäykisteen nurjahdus	99 %	Kaava 33
Laipan pistevoimakestävyys	14 %	Kaava 33
Laipan taipumisesta aiheutuva uuman lommahdus	18 %	Kaava 80
Jäykistekkehien taivutuskestävyys	94 %	Kaava 18
Jäykistekkehien normaalivoimankestävyys	10 %	Kaava 12
Jäykistekkehien leikkauskestävyys	36 %	Kaava 22/25
Jäykistekkehien stabiliteetti	78 %	Kaava 55
Kuormaa kantavien hitsien kestävyys	53 %	Kaava 3

3.2.2 Laskentatyökalun verifiointi

Pyöreän pystykanavan kannakkeen mitoitukseen tehty laskentatyökalu käyttää osittain samoja kaavoja kuin kohdan 3.1 nelikulmaisen pystykanavan kannakkeen laskentatyökalu. Laskentamenetelmien verifiointia ei toisteta tässä työssä. Pyöreän kanavan tapauksessa on kuitenkin myös muutama aiemmin verifioimaton laskentamenetelmä ja niitä vastaava ilmiö. Näitä ovat:

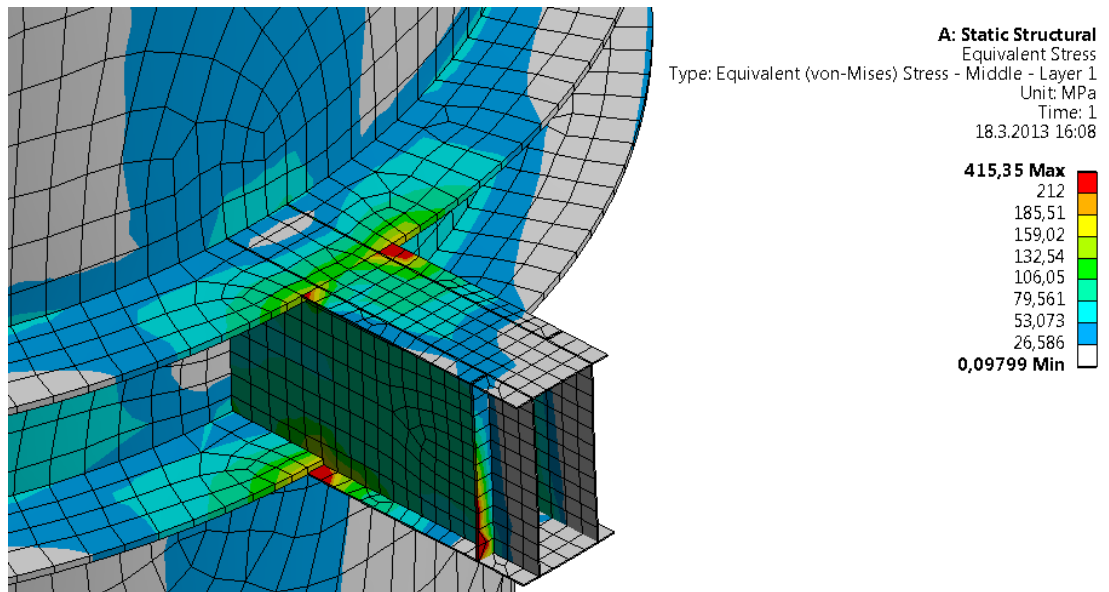
- a) Kannakepalkin kestävyys kahden akselin suhteen tapahtuvan taivutuksen ja samanaikaisten leikkausvoimien yhteisvaikutukselle
- b) Jäykistekkehien taivutuskestävyys
- c) Jäykistekkehien normaalivoimankestävyys
- d) Jäykistekkehien leikkauskestävyys
- e) Jäykistekkehien stabiliteetti
- f) Kuormaa kantavien hitsien kestävyys

a) Kannakepalkin kestävyys kahden akselin suhteen tapahtuvan taivutuksen ja samanaikaisten leikkausvoimien yhteisvaikutukselle

Muuttamalla kohdassa 3.2.1 esitettyjä parametreja siten, että kanavan seinämän ja kannakepalkin tukipisteen välinen etäisyys:

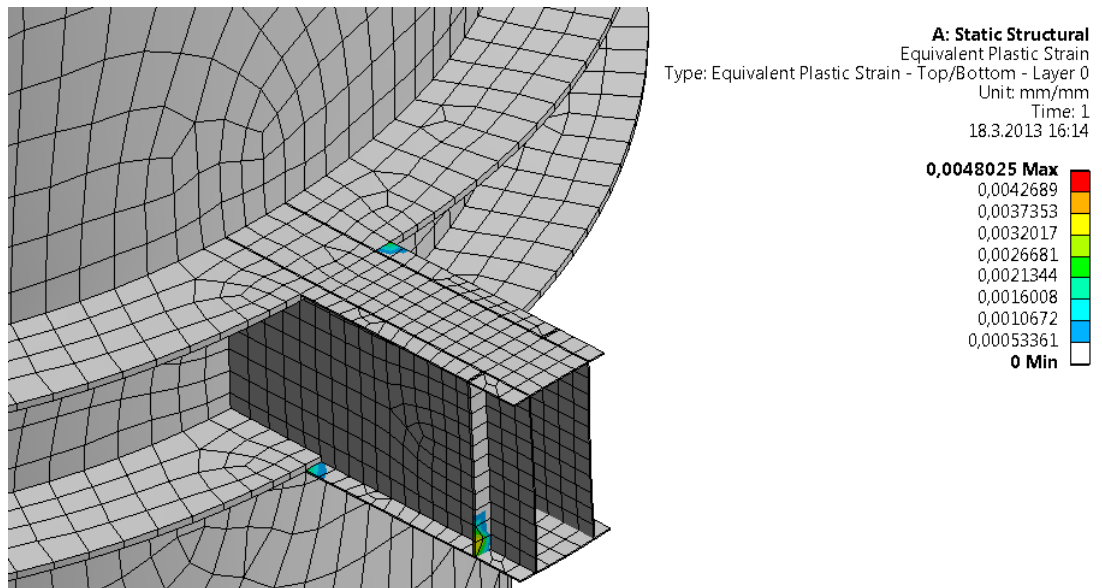
$$L_{a.cb} = 850 \text{ mm}$$

saadaan käyttöasteeksi kahden akselin suhteen tapahtuvan taivutuksen ja samanaikaisten leikkausvoimien yhteisvaikutukselle 104 %. Valitulla geometrialla elementtimallilla ratkaistut kalvojännitykset kannakkeen alueella on esitetty kuvassa 39.



Kuva 39. Rakenteen kalvojännitykset (LA)

Kuvasta 39 nähdään, että jännitykset ovat varsin maltillisia, mutta paikallisesti yli materiaalin myötölujuuden. Lasketaan rakenne vielä epälineaarista materiaaliominaisuuksia käyttäen ja tarkistetaan plastiset venymät. Rakenteen plastiset venymät on esitetty kuvassa 40.



Kuva 40. Rakenteen plastiset venymät (MNA)

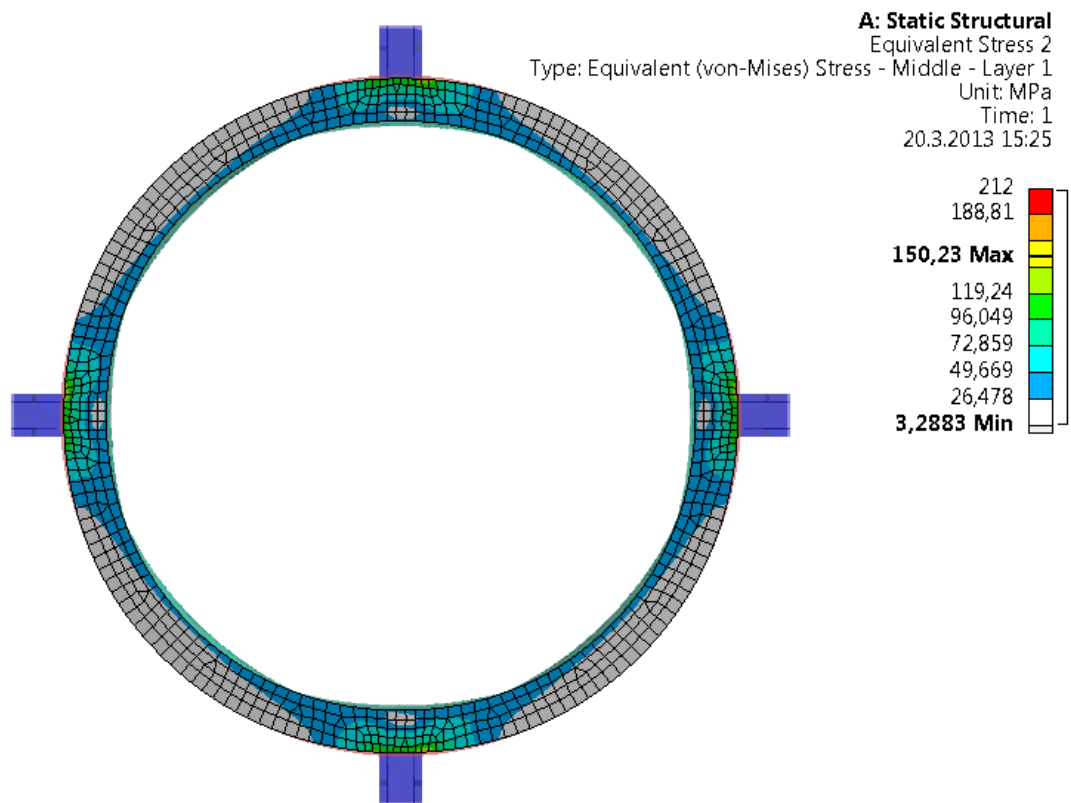
Kuvasta 40 nähdään, että plastisoituminen on varsin paikallista ja plastiset venymät ovat vain 0.5 % eli selvästi alle sallitun 5 % rajan. Laskentatyökalun analyytin ratkaisu kestävyydelle kahden akselin suhteen tapahtuvan taivutuksen ja samanaikaisten leikkausvoimien yhteisvaikutukselle on riittävän konservatiivinen.

b) Jäykistekehien taivutuskestävyys

Valitsemalla kanavan jäykistekehän jäykisteen uuman paksuudeksi

$$s_{w.ds} = 13 \text{ mm}$$

ja pitämällä muut parametrit kohdan 3.2.1 mukaisina saadaan käyttöasteeksi jäykistekehien taivutuksenkestävyydelle 105 %. Elementtimenetelmällä saadaan lineaarisesta analyysistä kuvan 41 mukainen jännitysjaakauma.



Kuva 41. Rakenteen kalvojännitykset (LA)

Rengaskehien jännitykset ovat varsin maltillisella tasolla, vain noin 70 % materiaalin myötölujuudesta. Laskentatyökalun antama kestävyys rengaskehän taivutuksenkestolle on varsin konservatiivinen.

c) Jäykistekehien normaalivoimankestävyys

Tutkittavassa rakenteessa jäykistekehien normaalivoimankestävyys ei tule määrääväksi, vaan rengaskehän kestävyden määrää aina joko taivutuskestävyys tai rengaskehän stabiliteetti. Tästä johtuen normaalivoiman kestävyden laskentaa ei nähdä tarpeelliseksi erikseen verifioida.

d) Jäykistekehien leikkauskestävyys

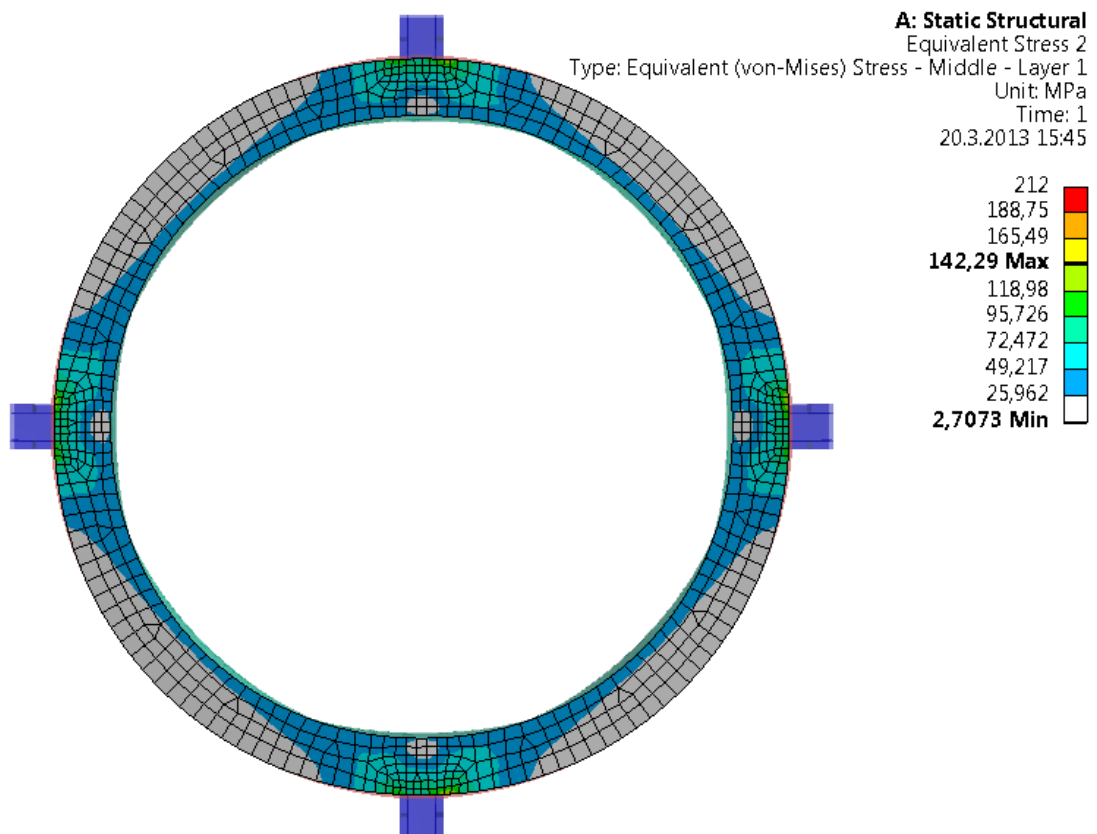
Käytännöllisesti katsoen järkevillä dimensioilla myöskään rengaskehien leikkausvoimankestävyys ei yleensä tule määrääväksi. Kuitenkin on mahdollista mitoittaa rakenne siten, että rengaskehän leikkausvoimankestävyys on analyttisessä

ratkaisussa taivutuksenkestoa ja stabiliteettia kriittisempi. Tällainen tilanne saadaan aikaiseksi valitsemalla kannateltavan kanavan seinämänpaksuudeksi 10 mm ja valitsemalla rengaskehän lattaprofiilin korkeus ja paksuus seuraavasti:

$$h_{ds} = 380 \text{ mm}$$

$$s_{w.ds} = 10 \text{ mm}$$

Valitsemalla rengaskehän parametrit kuten edellä ja pitämällä muut parametrit kohdan 3.2.1 mukaisina saadaan rengaskehän käyttöasteeksi leikkauskestävyydelle 106 %. Rengaskehän jännitykset on esitetty kuvassa 42.



Kuva 42. Rengaskehän jännitykset leikkausvoiman määrätessä kestävyden (LA)

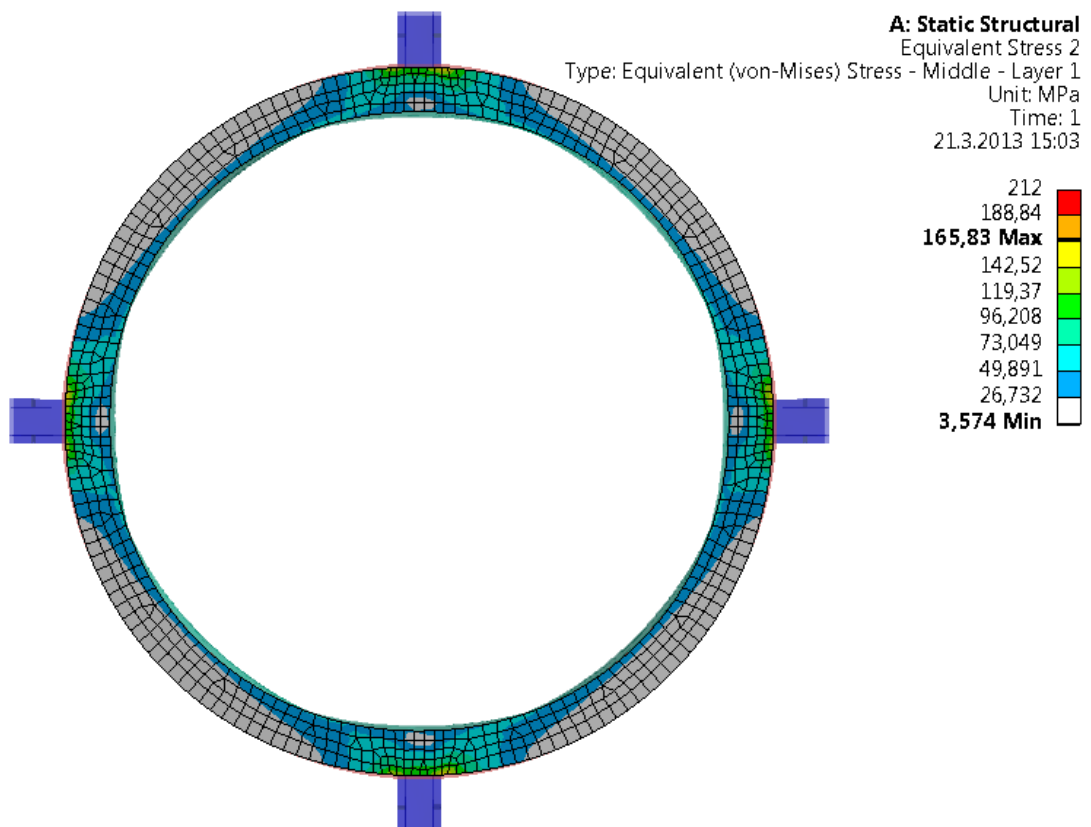
Elementtimenetelmällä tehty analyysi osoittaa analyttisen ratkaisun olevan varsin konservatiivinen myös leikkausvoimankestävyydelle.

e) Jäykistekehien stabiliteetti

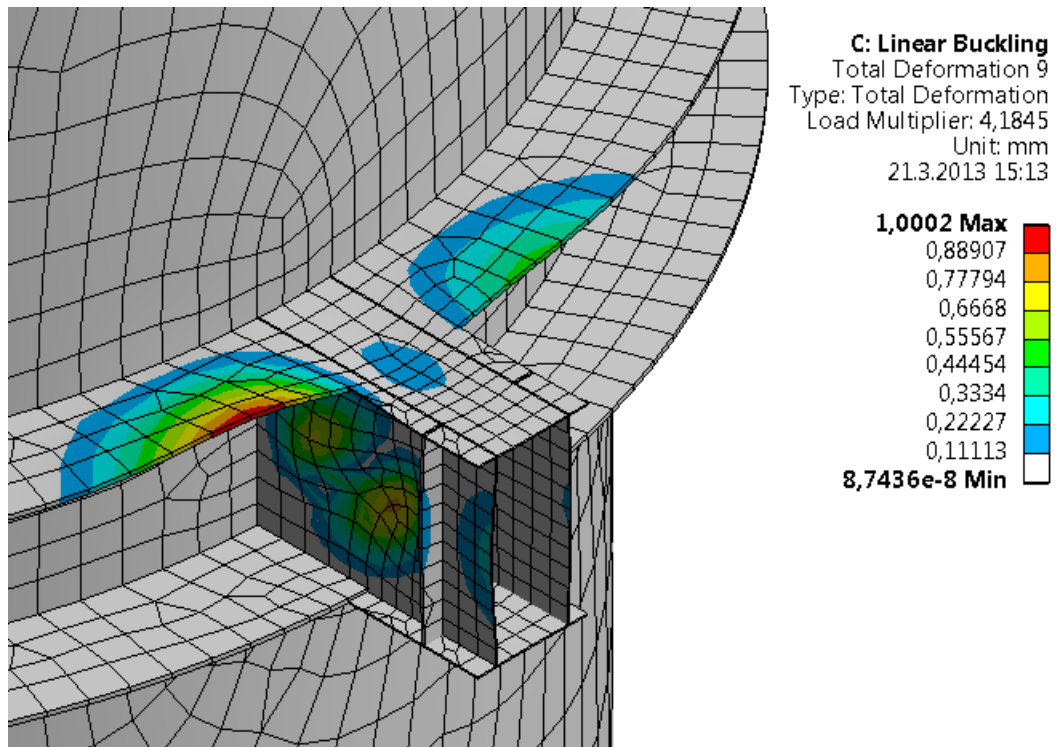
Rengaskehien stabiliteetinmenetys tulee määräväksi ilmiöksi, kun kohdan 3.2.1 parametrien arvoja muutetaan siten, että rengaskehän profiilin paksuus valitaan seuraavasti:

$$s_{w.ds} = 11.5 \text{ mm}$$

Rengaskehän käyttöasteeksi stabiliteetin menetykselle saadaan tällöin 102 %. Elementtimenetelmällä tehdään kuvan 43 mukaiseen lineaarisen analyysin jännitys jakaumaan perustuva ominaisarvoanalyysi, josta saadaan ratkaisuksi kuvan 44 mukainen rengaskehän stabiliteetinmenetysmuoto kuormakertoimella 4.1845.



Kuva 43. Rengaskehän kalvojännitys jakauma (LA)



Kuva 44. Rengaskehän stabiliteetin menetys (LBA)

Alin sallittu kuormituskerroin on nyt EN 1993-1-1 ja kuvan 43 jännitystilän mukaan laskiessa 3.501. Kuvan 44 mukainen muoto esiintyy alinta sallittua kuormituskerrointa korkeammalla arvolla, joten analyttinen laskenta on riittävän konservatiivinen myös rengaskehien stabiliteetin menetykselle. Kuvan 44 muoto on vapaan reunan lommahdusta, joka laskettaisiin periaatteessa EN 1993-1-5 mukaan. Muodon toteutuminen johtaisi kuitenkin tutkittavassa rakenteessa globaaliin vaurioon. Tästä johtuen alin sallittu kuormituskerroin lasketaan ankaramman EN 1993-1-1 mukaan kuten jo aiemmin kohdassa 2.6.2 perusteltiin.

f) Kuormaa kantavien hitsien kestävyys

Kuormaa kantavat hitsit on mitoitettu luvussa 2.3.1 esitettyä standardin EN 1993-1-8 mukaista yksinkertaistettua menetelmää soveltaen. Kaikki liitokseen vaikuttavat jännitykset oletetaan leikkausjännityksen luonteiseksi ja hitsien kestävyys varmistetaan kaavan 4 mukaisella mitoitusehdolla.

4 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Luvuissa 3.1 ja 3.2 todistettiin nelikulmaisen ja pyöreän pystykanavan kannakkeen mitoittamiseen luotujen laskentatyökalujen analyttisten ratkaisujen olevan riittävän konservatiivisia. Laskentatyökalun analyttisen ratkaisun verifioitiin olevan varmalla puolella kaikissa tutkituissa ilmiöissä.

Elementtimenetelmällä suoritettu tarkastuslaskenta osoitti rakenteilla olevan analyttista ratkaisua suurempi kapasiteetti. Tätä tietoa voidaan hyödyntää poikkeustapauksissa kuten olemassa olevia rakenteita analysoidessa. Virheellisesti valmistetun tai analyttisen ratkaisun mukaan alimitaiseksi suunnitellun rakenteen kestävyys voidaan tarkistaa elementtimenetelmällä. Elementtimenetelmällä laskiessa voidaan tarvittaessa hyödyntää rakenteen analyttisen ratkaisun mukaista kestävyyttä suurempaa plastista kapasiteettia.

Uusia kannakerakenteita mitoittaessa on kuitenkin syytä pitäytyä laskentatyökalun sallimissa kestävyysrajoissa jotta vältetään työläisiä FE-laskelmia, saadaan täysi hyöty kehitetyistä laskentatyökaluista ja voidaan olla varmoja rakenteiden kestävydestä ja turvallisuudesta. Luvussa 3 verifioituja menetelmiä voidaan soveltaa myös muiden vastaavien rakenteiden mitoittamiseen. Työssä luotujen laskentatyökalujen sisältämät laskentamenetelmät mahdollistavat monenlaisten rakenteiden vaatimustenmukaisen suunnittelun.

Luonteva jatko tässä työssä tehdyille kehitystyölle on kehittää laskentatyökalut kaikkien yleisimpien kannakkeiden mitoittamiseen. Työssä esitellyt ja verifioidut laskentamenetelmät antavat hyvän pohjan näiden uusien laskentatyökalujen kehittämiseen.

LÄHTEET

Airila, M. et al. 2001. Koneenosien suunnittelu. 3. uudistettu painos. Helsinki. WSOY.

Holopainen, Heikki. 2004. Paperikoneiden työskentelytasojen vaatimusten mukainen suunnittelu. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Konetekniikan osasto. 251 s.

Holopainen, Heikki. 2012. Levy- ja kuorirakenteiden stabiliteetin FEM-laskenta, teräsrakennestandardien soveltaminen ja tulkinnat. Varkaus. Foster Wheeler. 116 s. Esitetty AEL-seminaarissa 22.5.2012

Huhdankoski, Erkki. 2000. Rautaruukin teräkset ääriolosuhteissa. Keuruu. Rautaruukki steel. 128 s. ISBN 952-5010-29-5

Lehtinen, Ilkka. 2005. Hitsatut profiilit. Keuruu. Teräsrakenneyhdistys ry. 288 s. ISBN 952-9683-31-6.

Niemi, Erkki. 2003. Levyrakenteiden suunnittelu. Helsinki. Teknologiateollisuus ry. 136 s. ISBN 951-817-813-5.

Niemi E., Kemppi J. 1993. Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet. Helsinki. Painatuskeskus Oy. 337 s. ISBN 951-37-1115-3.

Ongelin P., Valkonen I. 2010. Hitsatut profiilit EN 1993 –käsikirja 2010. Keuruu Rautaruukki Oyj. 608 s. ISBN 978-952-5010-02-2.

Ongelin P., Valkonen I. 2012. Rakenneputket EN 1993 –käsikirja 2012. Keuruu. Rautaruukki Oyj. 688 s. ISBN 978-952-5010-51-0.

Pennala, Erkki. 2002. Lujuusopin perusteet. Helsinki. Oy Yliopistokustannus/Otatieto. 400 s. ISBN 951-672-297-0.

Pilkey, Walter D. 2005. Formulas for stress, strain, and structural matrices. 2 ed. New Jersey. John Wiley & Sons, Inc. 1511 s. ISBN 0-471-03221-2.

SFS-EN 13445-3. 2009. Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 3: Suunnittelu. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 759 s.

SFS-EN 1993-1-1. 2005. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 99 s.

SFS-EN 1993-1-5. 2006. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Levyrakenteet. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 58 s.

SFS-EN 1993-1-6. 2007. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-6: Kuorirakenteiden lujuus ja stabiilius. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 92 s.

SFS-EN 1993-1-8. 2005. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 148 s.

SFS-EN 1993-1-9. 2005. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-9: Väsyminen. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 41 s.

SFS-EN 1993-4-1. 2007. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 4-1: Siilot. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 103 s.

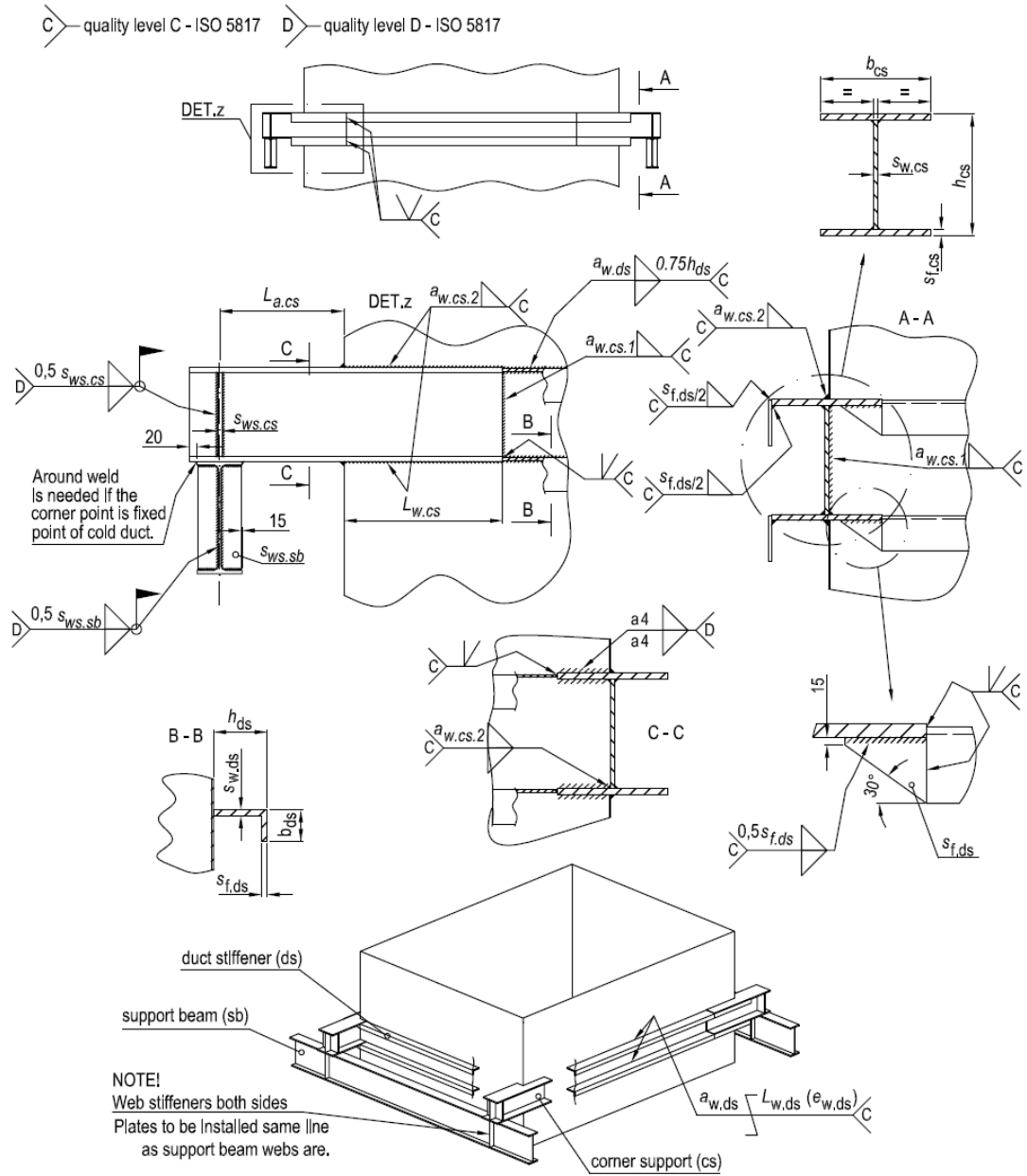
SFS-EN 12952-3. 2008. Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 3: Paineenalaisten osien suunnittelu ja laskenta. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 252 s.

SFS-EN ISO 5817. 2006. Hitsaus. Teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seosten sulahitsaus (paitsi sädehitsaus). Hitsiluokat. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 63 s.

Ylinen, Arvo. Kimmo- ja lujuusoppi 1. 1969. Porvoo. WSOY.

Young, Warren C. & Budynas Richard G. 2002. Roark's Formulas for Stress and Strain. 7 ed. Yhdysvallat. McGraw-Hill. 851 s. ISBN 0-07-072542-X.

Liite 1: Nelikulmaisen pystykanavan kannake



Liite 2: Pyöreän pystykanavan kannake

C quality level C-ISO 5817 D quality level D-ISO 5817

[Cont]: Welds at the ends of parts should be returned continuously around the corners.

