

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma
BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

Stracker-Reclaimerin keskipylvään mitoitus

Lappeenrannassa 29.1.2009
Marjo Penttilä

Sisällys

Symboliluettelo.....	4
Johdanto	6
1 Analyysityypit	6
1.3 Lineaarinen, elastinen kuorianalyysi (LA).....	7
1.4 Lineaarinen, elastinen ominaisarvoanalyysi (LBA)	7
1.5 Elastinen, geometrialta epälineaarinen analyysi (GNA)	7
1.6 Materiaaliltaan epälineaarinen analyysi (MNA).....	8
1.7 Geometrialta ja materiaalilta epälineaarinen analyysi (GMNA)	8
1.8 Epälineaarinen analyysi muotovirheitä sisältävälle rakenteelle (GNIA)	8
1.9 Geometrialta ja materiaalilta epälineaarinen analyysi, jossa esiintyy myös poikkeamia (GMNIA).....	9
2 Rakenteen mallintaminen analyysia varten	9
2.1 Rakenteen reunaehdot.....	10
2.2 Muotovirheet	12
2.2.1 Ympyrämäisyyspoikkeama	12
2.2.2 Keskisyysoikkeama	13
2.2.3 Paikallinen muotovirhe.....	14
3 Lommahdus	16
3.1 Kriittisten lommahdusjännitysten laskeminen	17
3.2 Lommahduksen pienennyskerroin ja sen määrittämiseen tarvittavat parametrit	21
3.3 Mitoitusjännitykset	22
3.4 Mitoitustilanteet	23
4 Lommahduksen analysointi numeerisesti materiaaliltaan epälineaarilla analyysilla ja lineaarisella ominaisarvoanalyysilla	24
4.1 Materiaaliltaan epälineaarinen analyysi	25
4.2 Lineaarinen nurjahdusanalyysi.....	25
4.3 Muunnettu hoikkuus	25
4.4 Lommahduksen pienennyskerroin	26
4.5 Karakteristinen lommahduksen lujuuskerroin	26
4.6 Suunnitteluarvon r_{Rd} laskeminen	26
5 Lommahduksen laskeminen numeerisesti geometrialta ja materiaalilta epälineaarilla, muotovirheet sisältävällä analyysilla	27
5.1 Lineaarinen ominaisarvoanalyysi	29
5.2 Kertoimen $r_{R,GMNIA}$ määrittäminen geometrisesti ja materiaaliltaan epälineaarilla analyysilla	29
5.3 Elastoplastinen nurjahduksen lujuuskerroin $r_{R,GMNA}$	31
5.4 Muotovirheellisen ja virheettömän kertoimen vertailu.....	31
5.5 Kalibrointikertoimen laskeminen.....	32
5.6 Karakteristinen lommahduksen lujuuskerroin	32
5.7 Suunnitteluarvon r_{Rd} laskeminen.....	33
6 Kokeellinen osuus	33
7 Tulokset.....	37
7.1 Laskeminen käsikaavoin.....	37

7.2 Laskeminen materiaalin ja lineaaristen ominaisarvojen menetelmällä	38
7.3 Tulokset geometrialta ja materiaaliltaan epälineaarisella, muotovirheet sisältävällä analyysillä	41
8 Johtopäätökset	42
Lähteet	44

Symboliluettelo

C	Kriittisten jännitysten määrittämiseen liittyvä parametri
d	Kuoren sisäpinnan halkaisija
E	Kimmomoduuli
e_a	Kuoren keskipintojen välinen epäkeskisyyys
e_{int}	aiottu sivupoikkeama
f_{yd}	Myötöjännityksen mitoitusarvo
f_{yk}	Myötöraja
F	Lommahduskuorma
GMNA	Geometrialta ja materiaalilta epälineaarinen analyysi
GMNIA	Geometrialta ja materiaalilta epälineaarinen analyysi, joka huomioi muotovirheet
GNA	Geometrisesti epälineaarinen analyysi
GNIA	Geometrisesti epälineaarinen, muotovirheet sisältävä analyysi
k	Kuormien yhteisvaikutuskerroin
k_{GMNIA}	Kalibrointikerroin
l	Kuoren segmentin pituus
l_g	Muotovirheen mittapituus
l_{gw}	Muotovirheen mittapituus kun rakenteessa on hitsausliitoksia
l_R	Reunaehtojen vaikutusalueen leveys
L	Kuoren korkeus
LA	Lineaarinen kuorianalyysi
LBA	Lineaarinen lommahduksen ominaisarvoanalyysi
MNA	Materiaaliltaan epälineaarinen analyysi
n_j	Tarkoituksenmukainen toleranssitaso
n	kalvojännitysresultantti
r	Kuoren keskipinnan säde, kuormakerroin
$r_{R,GMNA}$	Kuormakerroin, joka on saatu GMNA analyysillä
$r_{R,GMNIA}$	Kuormakerroin, joka on saatu GMNIA analyysillä

$r_{R,GMNIA,check}$	Lujuuskertoimen tarkastusarvo
$r_{R,test,known,check}$	Lujuuskertoimen testeihin perustuva tarkastusarvo
$r_{Rk,known,check}$	Kirjallisuudesta löytynyt lommahduksen lujuuskerroin
t	Seinämänpaksuus
t_{av}	Keskimääräinen seinämänpaksuus
u	Kehän suuntainen siirtymä
U_e	Keskisyyspoikkeamaparametri
U_{n1}	Valmistuksen laatuluokasta riippuva muotovirheiden amplitudiparametri
U_{n2}	Valmistuksen laatuluokasta riippuva muotovirheiden amplitudiparametri
U_r	Ympyrämäisyyspoikkeama
U_0	Paikallisten muotovirheiden suhteellinen syvyys
w	normaalin suuntainen siirtymä
α	Elastinen muotovirhetekijä
β	Plastinen kerroin
$\beta\Phi$	Kehän suuntainen kiertymä
γ_{M1}	Osavarmuuskerroin
Δw_0	kuoppien syvyys
$\Delta w_{0,eq}$	Geometrian maksimipoikkeama täydellisestä muodosta
η	Yhteisvaikutuksen huomioonottava eksponentti
λ	Muunnettu hoikkuus
λ_p	Plastisen rajan muunnettu hoikkuus
λ_0	Tyssäysrajaa vastaava muunnettu hoikkuus
σ	Jännityskomponentti
τ	Jännityskomponentti
χ	Lommahduksen pienennyskerroin

Alaindeksit

E_d	Suunnitteluarvo
\max	Suurin arvo

min	Pienin arvo
ov	Yhteisvaikutus
Rcr	Kriittinen arvo
Rd	Mitoitusarvo
Rk	Karakteristinen arvo
x	Kylkiviivan suunta
$x\theta$	Leikkaus
θ	Kehän suunta
τ	Leikkaus

Johdanto

Tämä kandidaatintyö on tehty Andritz Oy:lle. Työn tavoitteena on mitoittaa hakkeen käsittelyyn liittyvän Stacker-Reclaimerin sylinterinmuotoinen keskipylväs. Kriittinen vauriomuoto on rakenteen lommahdus, jonka mukaan rakenne mitoitetaan käyttäen standardia SFS-EN 1993-1-6 Teräsrakenteiden suunnittelu.

Standardi SFS-EN 1993-1-6 käsittelee mitoittamista plastisoitumisen, vaihtoplastisoitumisen, lommahduksen sekä väsymisen suhteen. Analyyttisten kaavojen lisäksi se antaa ohjeita myös FE-laskentaan. Lommahdukselle esitetään kaksi numeerista laskentavaihtoehtoa, joista nyt tarkastellaan kumpaakin menetelmää. Rakenteen mitoitus suoritetaan sekä numeerisesti että analyttisesti.

Standardi SFS-EN 1993-1-6 kuuluu Eurocodien sarjaan. Sarjaan kuuluvat standardit käsittelevät rakennusten sekä maa- ja vesirakennuskohteiden rakenteellista ja geoteknistä suunnittelua. Sarjaan kuuluvat standardit korvaavat ennen pitkään Euroopan yhteisen komission (CEC) jäsen maissa voimassa olevat säännöt. Sarja sisältää osat esimerkiksi betoni-, teräs- ja puurakenteiden suunnittelun ja antaa ohjeita suunnittelusta ja kuormituksista. (SFS-ENV 1993-1-1 1992, 19) Standardeihin voidaan antaa kansallisia liitteitä, mutta Suomen liitteessä ei ole muutoksia standardissa esitettyihin arvoihin. (Ympäristöministeriö 2008, liite 22)

Tutkittavalle rakenteelle on lähtötietoina annettu kuormitus sekä geometria. Rakenne on aikaisemmin mitoitettu käyttäen standardia DIN 18 800 (Kinnunen) ja nyt tarkastellaan samaa geometriaa, jolloin eri menetelmillä saatujen ratkaisujen vertailu on mahdollista.

1 Analyysityypit

Suunnittelu perustuu standardissa SFS-EN1993-1-6 seuraavaksi esiteltyihin analyysityyppeihin. Analyyseissa esiintyy erilaisina yhdistelminä geometrian tai materiaalin epälineaarisuutta sekä muotovirheitä (Taulukko 1). Epälineaarinen tarkastelu mahdollis-

taa rakenteen käyttäytymisen tutkimisen myös ennen stabiiliuden menetystä. Jos analyysi on geometrisesti epälineaarinen, on alkutilanteeseen syytä sisällyttää pieni poikkeama nimellisestä muodosta, jotta voidaan varmistua siitä, että laskennassa rakenteelle löydetään nurjahdusmuoto. Geometrinen epälineaarisuus tarkoittaa, että rakenteen muodonmuutokset ovat suuret sen dimensioihin verrattuna, eli venymät ovat suuria siirtymiin verrattuna. Siirtymät voivat esiintyä rakenteessa joko aksiaalsiirtyminä tai kiertyminä. Materiaalin epälineaarisuutta puolestaan kuvataan epälineaarisenä jännitys-venymäkäyränä. (Ansys 11.0)

1.3 Lineaarinen, elastinen kuorianalyysi (LA)

Linearisessa kuorianalyysissä tutkitaan ohutseinäisen, lineaariselastista materiaalilakia noudattavan kuorirakenteen käyttäytymistä pienten siirtymien teorialla. Analyysissä toteutuvat niin yhteensopivuusehto kuin tasapainotilakin. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 16)

1.4 Lineaarinen, elastinen ominaisarvoanalyysi (LBA)

Analyysillä tutkitaan ohutseinäisen kuorirakenteen lommahduksen ominaismuotoja pienten siirtymien teorialla. Geometria on keskipinnan geometria ja muotovirheet jätetään huomioimatta. Ominaisarvoanalyysillä määritetään ominaismuodot, joilla rakenne lommahtaa uuteen deformatioon. Analyysistä saadaan kriittinen lommahduskerroin r_{Rcr} . (SFS-EN 1993-1-6 2007, 9 ja 16)

1.5 Elastinen, geometrialta epälineaarinen analyysi (GNA)

Analyysi perustuu kuoren taivutusanalyysiin virheettömälle rakenteelle kun käytetään lineaarista materiaalia, mutta otetaan huomioon epälineaarisuuden aiheuttavat suuret siirtymät. Epälineaarisenä analyysinä ominaisarvotarkastelut suoritetaan jokaiselle kuormitusaskelelle erikseen. Kun puristus- tai taivutusjännitys on hallitseva jossain kuoren osassa, analyysillä saadaan lommahduskuorma muotovirheettömälle rakenteelle joka sisältää muutokset geometriassa. Tätä voi käyttää tarkistettaessa rajatilaa lommahdukselle.

Lommahduskuormaa määritettäessä on selvitettävä, että numeerinen laskenta ei jätä huomioimatta joitain ratkaisusta. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 9 ja 16)

1.6 Materiaaliltaan epälineaarinen analyysi (MNA)

Materiaaliltaan epälineaarinen analyysi perustuu kuoren taivutusanalyysiin. Käytössä ovat pienet siirtymät ja epälineaarinen materiaali. Tuloksena saadaan lommahduksen plastinen rajakuorma, joka on plastinen lujuuskerroin r_{Rp1} määritettäessä kuorman suunnitteluarvoa F_{Ed} . (SFS-EN 1993-1-6 2007, 10 ja 16)

1.7 Geometrialta ja materiaalilta epälineaarinen analyysi (GMNA)

Kuoren taivutusteoriaan perustuva analyysi, jossa tutkitaan muotovirheetöntä rakennetta. Analyysissä käytetään suurten siirtymien teoriaa ja materiaalin oletetaan olevan epälineaarinen ja elastoplastinen. Analyysi antaa plastisen rajakuorman muotovirheetömälle rakenteelle. Analyysillä voidaan määrittää lommahduskuorma virheetömälle rakenteelle kun puristus- tai taivutusjännitys on vallitseva jännitystila. Tätä analyysia käytetään apuna, kun tutkitaan muotovirheiden vaikutusta lommahdukseen. Taas on syytä huomata, ettei numeerinen ratkaisu saa jättää huomioimatta osaa ominaisarvoista. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 10 ja 17)

1.8 Epälineaarinen analyysi muotovirheitä sisältävälle rakenteelle (GNIA)

Geometrisesti epälineaariseen analyysiin verrattuna analyysi poikkeaa siten, että nyt geometria sisältää rakenteen muotovirheet, kuten esimerkiksi kuoren muodon poikkeamat ideaalisesta muodosta tai muutokset reunaehdoissa ja jäännösjännityksissä. Sillä voidaan määrittää lommahduskuorma muotovirheet sisältävälle rakenteelle samoin kuin geometrisesti ja materiaaliltaan epälineaarilla, muotovirheet sisältävällä analyysillä. Paikallinen jännitys ei saa ylittää rajaa, jonka jälkeen materiaali alkaa käyttäytyä epälineaarisesti. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 10 ja 17)

1.9 Geometrialta ja materiaalilta epälineaarinen analyysi, jossa esiintyy myös poikkeamia (GMNIA)

Analyysi perustuu kuoren taivutusteorialle. Muotovirheet sisällytetään analyysiin ja siinä hyödynnetään suurten siirtymien teoriaa sekä epälineaarista materiaalia. Analyysia käytetään tapauksissa, joissa puristus- tai taivutusjännitys on hallitseva. Sen avulla voidaan määrittää lommahduskuorma todelliset muotovirheet sisältävälle rakenteelle. Tämän analyysin lisäksi on aina suoritettava myös GMNA analyysi, jolla voidaan tarkastaa, että oletettujen muotovirheiden vaikutus tuloksiin on oikea. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 10 ja 17)

Taulukko 1 Analyysityyppien vertailu (SFS-EN 1993-1-6 2007, 26)

Analyysityyppi	Kuoriteoria	Materiaali	Kuoren geometria
LA	lineaarinen taivutus ja venytys	lineaarinen	virheetön
LBA	lineaarinen taivutus ja venytys	lineaarinen	virheetön
GNA	epälineaarinen	lineaarinen	virheetön
MNA	lineaarinen	epälineaarinen	virheetön
GMNA	epälineaarinen	epälineaarinen	virheetön
GNIA	epälineaarinen	lineaarinen	muotovirheellinen
GMNIA	epälineaarinen	epälineaarinen	muotovirheellinen

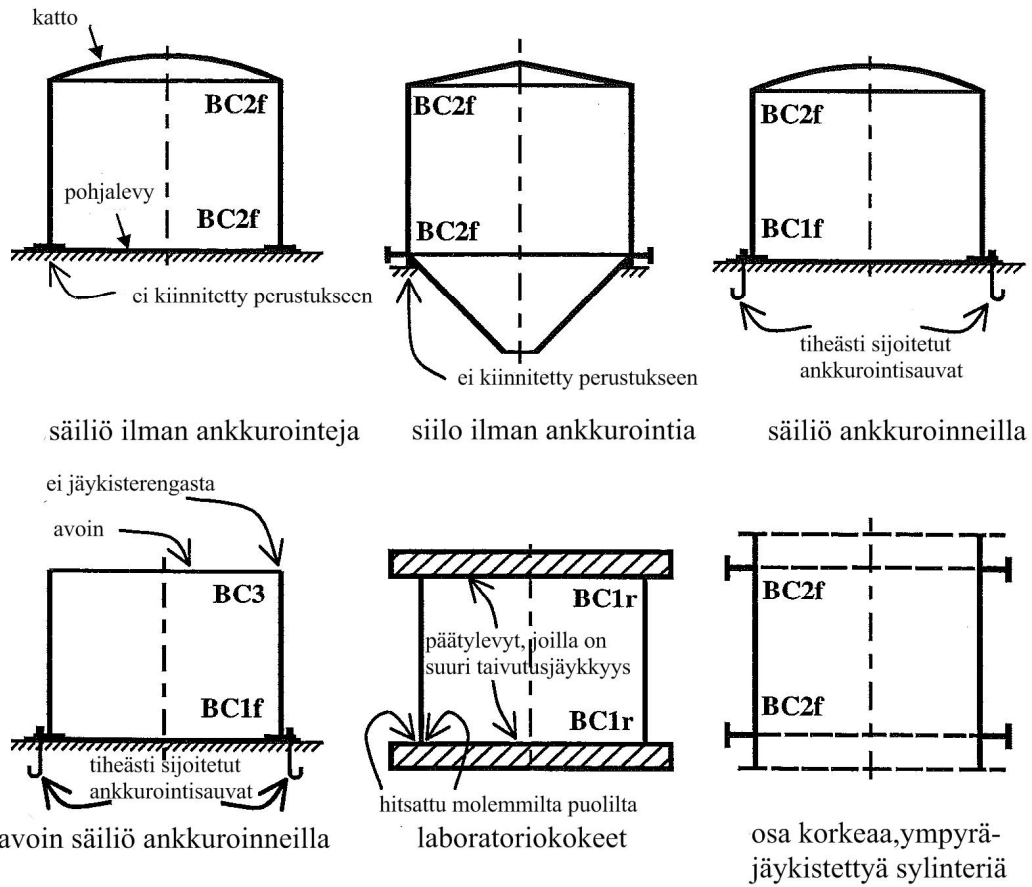
2 Rakenteen mallintaminen analyysia varten

Standardissa SFS-EN 1993-1-6 annetaan ohjeita mallin geometriasta. Mallinnuksessa käytetään kuoren keskilinjan geometriaa. Muotovirheet voidaan tässä yhteydessä jättää huomioimatta, niiden vaikutukseen palataan myöhemmin. Kaarevuuden säteenä käytetään nimellistä sädettä. Kuoren eri osien välisten liitosten kuoren keskilinjojen väliset epäkeskisyydet on otettava huomioon mallinnuksessa. Vastaavasti keskilinjan epäkeskisyydet sisällytetään malliin vain, jos kalvon jännitysresultanttien epäkeskeinen vaikutuslinja aiheuttaa merkittävää taivutusta. Osista koostuvaa rakennetta ei ole mahdollista jakaa pienemmiksi kokonaisuuksiksi ilman, että reunaehdot valitaan siten, että ne eivät muuta osarakenteiden välistä yhteistoimintaa. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 24)

Perusrengasta, joka siirtää paikalliset tukireaktiot kuoreen, ei voi erottaa kuoresta lommahduksen rajatilaa määritettäessä. Rengasjäykisteet on käsiteltävä erillisinä kuoren osina paitsi jos niiden väli on vähemmän kuin $1,5\sqrt{rt}$. Kuori, johon on lisätty pystysuuntaisia jäykisteitä, voidaan käsitellä ortotrooppisena tasapaksuna kuorena kun jäykisteiden väli on pienempi kuin $0,5\sqrt{rt}$. Vastaavasti jos kuoressa on poimuja, voidaan kuori käsitellä ortotrooppisena tasapaksuna kuorena, jos poimutuksen aallonpituus on pienempi kuin $0,5\sqrt{rt}$. Kuoren reikä, jonka suurin mitta on pienempi kuin $0,5\sqrt{rt}$, voidaan jättää mallissa huomiotta. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 24)

2.1 Rakenteen reunaehdot

Rakenteelle valittujen reunaehtojen tulisi vastata todellista tilannetta. Seuraavassa annetaan ohjeet sylinterikoordinaatistossa määritettyjen translaatioiden hallintaan. Reunaehtojen määrittämisessä tulee huomioida, etteivät yksittäiset kuoren osan reunaehdot saa vääristyä. Sopivat reunaehdot tulee valita kuvan 1 mukaan. Reunaehdot on selvitetty tarkemmin taulukossa 2. Reunaehdot eivät saa aiheuttaa kohtuuttomia voimakomponentteja, jotka ovat epäkeskisiä kuoren keskipintaan nähden. Lommahdusta analysoitaessa on kiinnitettävä erityistä huomiota reunaehtoihin, jotka aiheuttavat siirtymän kasvua nurjahdusmuodon siirtymien suuntaan (SFS-EN 1993-1-6 2007, 17 ja 24)



Kuva 1. Reunaehdot (SFS-EN 1993-1-6 2007, 32)

Taulukko 2. Kuoren reunaehdot (SFS-EN 1993-1-6 2007, 25)

Reunaehdon tunnus		Reunaehdon kuvaus	Normaalinsuuntainen siirtymä	Kehänsuuntainen siirtymä	Kehänsuuntainen kiertymä
BC1r	Jäykästi tuettu	säteen suuntaisesti estetty, pystysuuntainen liike estetty, rotaatio estetty	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_{\Phi} = 0$
BC1f		säteen suuntaisesti estetty, pystysuuntainen liike estetty, rotaatio sallittu	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_{\Phi} \neq 0$
BC2r		säteen suuntaisesti estetty, pystysuuntainen liike sallittu, rotaatio estetty	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_{\Phi} = 0$
BC2f	Saranoitu	säteen suuntaisesti estetty, pystysuuntainen liike sallittu, rotaatio sallittu	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_{\Phi} \neq 0$
BC3	Vapaa	säteen suuntaisesti sallittu, pystysuuntainen liike sallittu, rotaatio sallittu	$w \neq 0$	$u \neq 0$	$\beta_{\Phi} \neq 0$

2.2 Muotovirheet

Muotovirheet jaetaan kolmeen laatuluokkaan A, B ja C. Näistä luokka A on erittäin korkea, luokka B korkea ja luokka C normaali. Laatuluokka määrittelee suurimman sallitun arvon ympyrämäisyyspoikkeamalle, keskisyyspoikkeamalle ja paikalliselle muotovirheelle. Kaikki muotovirhetyypit käsitellään erillisinä, joten niiden yhteisvaikutusta ei tarvitse huomioida erikseen. Muotovirheiden oikeanlainen huomioonottaminen numeerisessa laskennassa on laskennan monimutkaisin osa ja siihen on syytä kiinnittää erityistä huomiota. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 33)

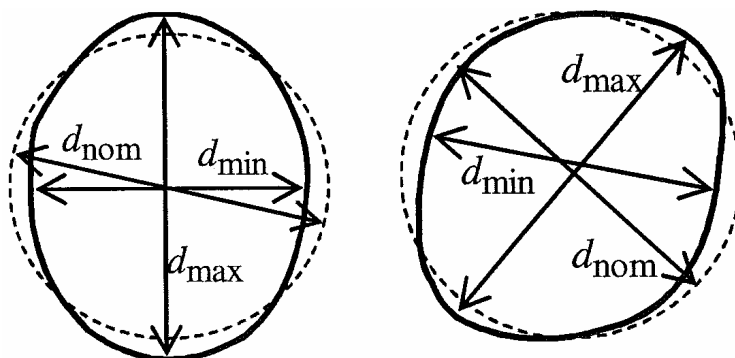
2.2.1 Ympyrämäisyyspoikkeama

Ympyrämäisyyspoikkeamassa huomioidaan rakenteen seinämien muodon poikkeaminen täydellisestä ympyrästä. Ympyrämäisyyspoikkeama U_r saadaan kaavalla

$$U_r = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{nom}}}, \quad (1)$$

missä d_{\max} on suurin mitattu sisähalkaisija
 d_{\min} on pienin mitattu sisähalkaisija
 d_{nom} on nimellinen sisähalkaisija.

Ympyrämäisyyspoikkeaman tulee olla pienempi kuin laatuluokasta riippuvan maksimiarvon. Laatuluokasta riippuvat suurimmat arvot esitetään taulukossa 3. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 33)



Kuva 2. Ympyrämäisyyspoikkeamien mitat (SFS-EN 1993-1-6 2007, 33)

Taulukko 3. Suositellut arvot ympyrämäisyyspoikkeaman toleranssille $U_{r,max}$ (SFS-EN 1993-1-6 2007, 34)

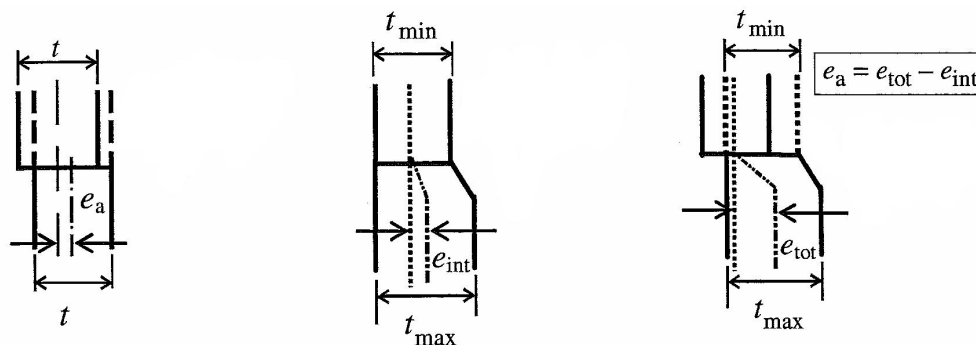
	Halkaisijan suuruus	$d [m] \leq 0,050 m$	$0,050 m < d [m] < 1,25 m$	$1,25 m \leq d [m]$
Valmistustoleranssin laatu-luokka	Kuvaus	$U_{r,max}$		
luokka A	Erinomainen	0,014	$0,007+0,0093(1,25-d)$	0,007
luokka B	Korkea	0,02	$0,010+0,0133(1,25-d)$	0,01
luokka C	Normaali	0,03	$0,015+0,0200(1,25-d)$	0,015

2.2.2 Keskiyyspoikkeama

Kuoren liitoksissa, jotka ovat kohtisuorassa puristusjännitystä vastaan, yhteen liittyvien kuoren keskipintojen epäkeskiydet e_a määritetään mitattavissa olevan kokonaisepäkeskiyden e_{tot} ja aiotun sivupoikkeaman e_{int} avulla kaavalla

$$e_a = e_{tot} - e_{int} . \quad (2)$$

Aksiaalisen epäkeskiyden tulisi olla pienempi kuin laatuluokasta riippuvan maksimiarvon $e_{a,max}$, jonka arvot saadaan taulukosta 4.



Kuva 3. Liitoksen aksiaalinen epäkeskiyys (SFS-EN 1993-1-6 2007, 35)

Keskisyyspoikkeamaa e_a voidaan arvioida myös keskisyyspoikkeamaparametrin U_e avulla kun

$$U_e = \frac{e_a}{t_{av}} = \frac{e_a}{t}, \quad (3)$$

missä t_{av} on liitoksen ohuemman levyn levynpaksuus.

Keskisyysparametrin tulee olla pienempi kuin laatuluokan määrittelemän maksimiarvon $U_{e,max}$, joka saadaan taulukosta 4. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 34)

Taulukko 4. Laatuluokasta riippuvat arvot suurimmalle sallitulle epäkeskisyydelle ja keskisyysparametrin maksimiarvolle (SFS-EN 1993-1-6 2007, 34 ja 35)

Valmistustoleranssin laatuluokka		Suosittelut arvo suurimmalle sallitulle epäkeskisyydelle $e_{a,max}$	Suosittelut arvo $U_{e,max}$
luokka A	Erittäin korkea	2 mm	0,14
luokka B	Korkea	3 mm	0,2
luokka C	Normaali	4 mm	0,3

2.2.3 Paikallinen muotovirhe

Muotovirheet tulee mitata mielivaltaisessa kohdassa kylkiviivan tai kehän suunnassa. Paikallisen muotovirheen syvyys Δw_0 määritetään mittapituuden l_g avulla. Mittapituus voidaan määrittää seuraavasti:

a) Kun rakenteessa esiintyy kylkiviivan suuntaisia puristavia jännityksiä, määritetään mittapituus sekä kylkiviivan että kehän suunnassa kaavalla

$$l_{gx} = 4\sqrt{rt} \quad (4)$$

kun t on seinämän paksuus

r on kuoren keskipinnan säde

b) Kun rakenteessa esiintyy kehän suuntaista puristus- tai leikkausjännitystä, kehän suuntainen mittapituus määritetään käyttäen kaavaa

$$l_{g\theta} = 2,3(l^2 rt)^{0,25} \quad (5)$$

kuitenkin siten, että

$$l_{g\theta} \leq r \quad (6)$$

kun l on kuoren segmentin kylkiviivan suuntainen pituus

c) Kun rakenne sisältää poikittaishitsejä pituussuunnassa ja kehän suunnassa, mittapituiden arvo saadaan kaavasta

$$l_{gw} = 25t = 25t_{\min} , \quad (7)$$

missä

$$l_{gw} \leq 500 \text{ mm} \quad (8)$$

kun t_{\min} on kuoren ohuin seinämänpaksuus.

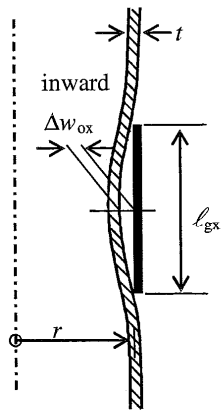
Paikallisten muotovirheiden suhteellista syvyyttä kuvataan termillä

$$U_0 = \frac{\Delta w_0}{l_g} , \quad (9)$$

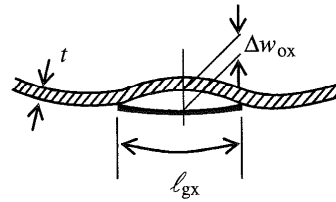
missä suureen U_0 tulee olla pienempi kuin laatuluokan määrittämän, taulukosta saatavan maksimiarvon $U_{0,\max}$. Δw_0 on nyt paikallisen muotovirheen syvyys. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 36)

Taulukko 5. Suositeltu maksimiarvo paikallisen muotovirheen suhteelliselle syvyydelle (SFS-EN 1993-1-6 2007, 36)

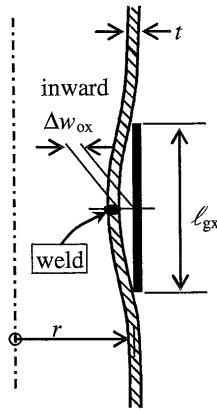
Valmistuksen laatu- luokka	Kuvaus	Vaatus $U_{0,\max}$
Luokka A	Erittäin korkea	0,006
Luokka B	Korkea	0,010
Luokka C	Normaali	0,016



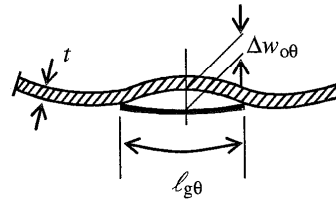
Pituussuuntaiset mitat (kohta a)



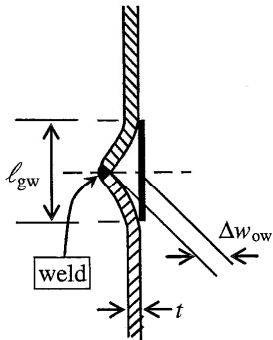
Kehän suuntainen mitta ympyrällä (kohta a)



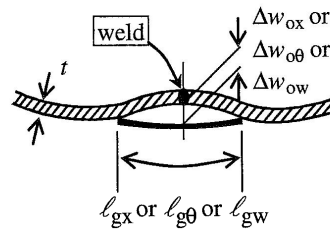
Pituussuuntainen mitta hitsin poikki (kohta a)



Kehän suuntainen mitta ympyrällä (kohta b)



Mitta hitsin poikki (kohta c)

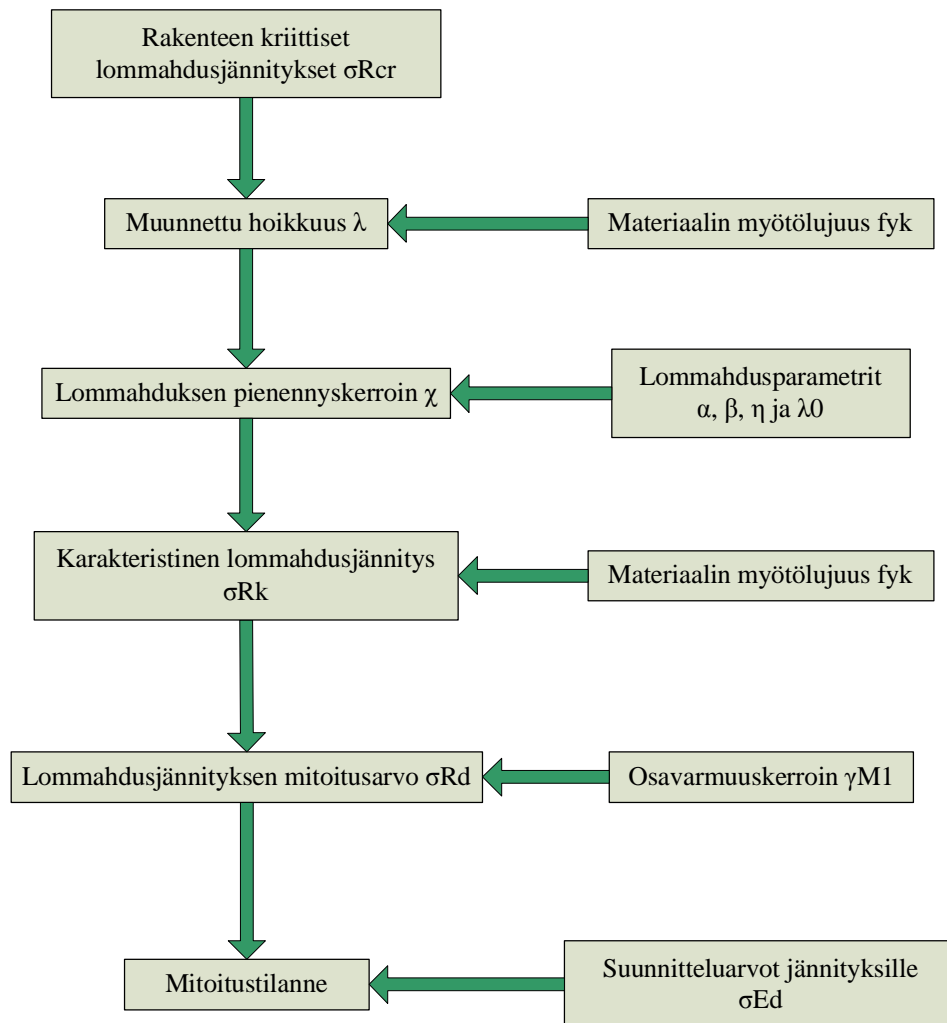


Kehän suuntainen mitta hitsin poikki (kohta c)

Kuva 4. Mitat paikallisen muotovirheen syvyydelle (SFS-EN 1993-1-6 2007, 37)

3 Lommahdus

Lommahdus analysoidaan yksi kuormitustyyppi kerrallaan ja kuormitusten yhteisvaikutus otetaan huomioon vasta lopuksi. Laskennan eteneminen on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Lommahduslaskun eteneminen

3.1 Kriittisten lommahdusjännitysten laskeminen

Kriittisten lommahdusjännitysten $\sigma_{x,Rcr}$, $\sigma_{\theta,Rcr}$ ja $\tau_{x\theta,Rcr}$ arvot riippuvat rakenteen mittasuhteista sekä reunaehdoista. Nyt esitetään mitoitus aksiaalista puristusta ja taivutusta vastaan, mutta standardin SFS-EN 1993-1-6 liitteessä D on esitetty mitoitus myös ulkoiselle paineelle sekä aksiaalisen puristuksen ja sisäisen paineen yhteisvaikutukselle. Jännityskomponenttien laskemista varten on määritettävä laaduton pituusparametri (SFS-EN 1993-1-6 2007, 73)

$$\omega = \frac{l}{\sqrt{r \cdot t}}, \quad (10)$$

missä l on rakenteen korkeus
 r on rakenteen ulkosäde
 t on seinämäpaksuus.

Aksiaalisen puristuksen aiheuttama kriittinen lommahdusjännitys on (SFS-EN 1993-1-6 2007, 74)

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 \cdot E \cdot C_x \cdot \frac{t}{r}, \quad (11)$$

missä E on kimmomoduuli
 C_x on parametri, jonka suuruus riippuu reunaehdoista ja rakenteen mittasuhteista taulukoiden 6 ja 7 mukaan.
 t on seinämän paksuus
 r on rakenteen ulkopinnan säde.

Aksiaalinen puristus voidaan kuitenkin jättää huomioimatta, jos

$$\frac{r}{t} \leq 0,03 \cdot \frac{E}{f_{yk}} \quad (12)$$

missä r on rakenteen ulkosäde
 t on seinämän paksuus
 E on kimmomoduuli
 f_{yk} on myötölujuuus.

Taulukko 6. Parametrin C_x arvot aksiaaliselle puristukselle (SFS-EN 1993-1-6 2007, 74)

Rajoite	Kerroin C_x
$\omega < 1,7$	$C_x = 1,36 - \frac{1,83}{\omega} + \frac{2,07}{\omega^2}$
$1,7 \leq \omega \leq 0,5 \cdot \frac{r}{t}$	$C_x = 1,0$
$\omega > 0,5 \cdot \frac{r}{t}$	$C_x = 1 + \frac{0,2}{C_{xb}} \cdot (1 - 2 \cdot \omega \cdot \frac{t}{r})$ kuitenkin $C_x \geq 0,60$

Taulukko 7. Parametrin C_{xb} riippuvuus rakenteen reunaehdoista (SFS-EN 1993-1-6 2007, 74)

	Reunaehdot	C_{xb}
1	BC 1 BC 1	6
2	BC 1 BC 2	3
3	BC 2 BC 2	1

Rakenteen reunaehdoilla ei ole merkitystä kriittiseen leikkausjännitykseen $\tau_{x\theta, Rcr}$. Leikkausjännitykselle määritetään taulukosta 8 parametri C_τ samaan tapaan kuin puristuksellekin (SFS-EN 1993-1-6 2007, 79)

$$\tau_{x\theta, Rcr} = 0,75 \cdot E \cdot C_\tau \cdot \sqrt{\frac{1}{\omega}} \cdot \frac{t}{r}. \quad (13)$$

Leikkausjännityksen merkitys laskentaan on hyvin vähäinen ja se voidaan jättää huomioidimatta, jos (SFS-EN 1993-1-6 2007, 79)

$$\frac{r}{t} \leq 0,16 \cdot \left(\frac{E}{f_{yk}}\right)^{0,67}. \quad (14)$$

Taulukko 8. Parametrin C_τ arvot leikkaukselle (SFS-EN 1993-1-6 2007, 79)

Rajoite	Kerroin C_x
$\omega < 10$	$C_\tau = \sqrt{1 + \frac{42}{\omega^3}}$
$10 \leq \omega \leq 8,7 \cdot \frac{r}{t}$	$C_\tau = 1,0$
$\omega > 8,7 \cdot \frac{r}{t}$	$C_\tau = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{\omega \cdot \frac{t}{r}}$

Jännitykset voi myös määrittää numeerisesti lineaarisella ominaisarvoanalyysillä, kun laskennassa huomioidaan kaikki kuormitusyhdistelmät, jotka aiheuttavat puristavia tai leikkaavia kalvojännityksiä kuoren seinämiin. Tällöin jännitysten on sijaittava rakenteen reunaehto- ja vaikutusalueen ulkopuolella. Jos suurin jännityksen arvo sijaitsee rakenteen reunassa, voidaan sen sijaan valita pienempi arvo reunaehto- ja vaikutusalueen ulkopuolelta. Vaikutusalueeseen kuuluvat kaikki kuoren osat, jotka sijaitsevat korkeintaan etäisyydellä l_R sylinterin päistä. Pituus l_R on pienempi arvoista (SFS-EN 1993-1-6 2007, 39 ja 82)

$$l_R = 0,1L \quad (15)$$

tai

$$l_R \leq 0,16r \sqrt{\frac{r}{t}} \quad (16)$$

kun L on rakenteen korkeus
r on kuoren keskipinnan säde
t on kuoren säde.

Muunnettu hoikkuus voidaan määrittää kriittisten lommahdusjännitysten $\sigma_{x,Rcr}$, $\sigma_{\theta,Rcr}$ ja $\tau_{x\theta,Rcr}$ sekä myötörajan f_{yk} avulla

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x,Rcr}}}, \quad (17)$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\theta,Rcr}}} \text{ ja} \quad (18)$$

$$\bar{\lambda}_\tau = \sqrt{\frac{f_{yk}/\sqrt{3}}{\tau_{x\theta,Rcr}}}. \quad (19)$$

3.2 Lommauksen pienennyskerroin ja sen määrittämiseen tarvittavat parametrit

Lommauksen pienennyskerroimen määrittämiseen tarvitaan kuormitustapauksesta sekä valmistusluokasta riippuvia lommausparametreja. Parametreja ovat elastinen muotovirhetekijä α , plastinen kerroin β , yhteisvaikutuksen huomioonottava eksponentti η sekä tyssäysrajaa vastaava muunnettu hoikkuus λ_0 (Taulukot 9 ja 10). Näiden avulla voidaan määrittää myös plastisen rajan muunnettu hoikkuus (SFS-EN 1993-1-6 2007, 39)

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}}. \quad (20)$$

Lommauksen pienennyskerroin χ voidaan tämän jälkeen määrittää muunnetun hoikkuuden sekä lommausparametrien avulla (SFS-EN 1993-1-6 2007, 38):

$$\chi = 1 \quad \text{kun} \quad \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \quad (21)$$

$$\chi = 1 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta \quad \text{kun} \quad \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda} < \bar{\lambda}_p \quad (22)$$

$$\chi = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}^2} \quad \text{kun} \quad \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}. \quad (23)$$

Taulukko 9. Elastinen muotovirhetekijä (SFS-EN 1993-1-6 2007, 75 - 80)

Kuorman tyyppi		Kylkiviivan suuntainen puristus	Kehän suuntainen puristus	Taivutus
Valmistustoleranssin laatuluokka		α_x	α_θ	α_τ
Luokka A	Erittäin korkea	$\frac{0,62}{1 + 1,91 \left(\frac{1}{40} \sqrt{\frac{r}{t}} \right)^{1,44}}$	0,75	0,75
Luokka B	Korkea	$\frac{0,62}{1 + 1,91 \left(\frac{1}{25} \sqrt{\frac{r}{t}} \right)^{1,44}}$	0,65	0,65
Luokka C	Normaali	$\frac{0,62}{1 + 1,91 \left(\frac{1}{16} \sqrt{\frac{r}{t}} \right)^{1,44}}$	0,50	0,50

Taulukko 10. Tyssäysrajaa vastaava muunnettu hoikkuus, plastinen kerroin ja yhteisvai-
kutuksen huomioonottava eksponentti (SFS-EN 1993-1-6 2007, 75 - 80)

Kuorman tyyppi	Kylkiviivan suuntainen puristus	Kehän suuntainen puristus	Taivutus
λ_0	$\lambda_{x0} = 0,20$	$\lambda_{\theta 0} = 0,40$	$\lambda_{\tau 0} = 0,40$
β	0,60	0,60	0,60
η	1,0	1,0	1,0

3.3 Mitoitusjännitykset

Karakteristiset lommahdusjännitykset voidaan selvittää kaavoilla

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x f_{yk}, \quad (24)$$

$$\sigma_{\theta,Rk} = \chi_\theta f_{yk} \quad (25)$$

ja

$$\tau_{x\theta,Rk} = \chi_\tau f_{yk} / \sqrt{3}, \quad (26)$$

missä χ_x , χ_θ ja χ_τ ovat lommahduksen pienennyskertoimia
 f_{yk} on myötöjännityksen suunnitteluarvo.

Karakteristisista arvoista saadaan lommahduskestävyyden mitoitusarvot $\sigma_{x,Rd}$, $\sigma_{\theta,Rd}$ ja $\tau_{x\theta,Rd}$ kun ne jaetaan osavarmuuskertoimella γ_{M1} , jonka suuruus on 1,1. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 38)

3.4 Mitoitustilanteet

Kuoren kestävyys on riittävä, kun voidaan osoittaa, että lommahduskestävyys on suurempi kuin vastaava kuormitustapauksesta syntyvä jännityksen suunnitteluarvo. Suunnitteluarvot jännityskomponenteille $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$ ja $\tau_{x\theta,Ed}$ saadaan lineaarisella kuorianaalyysillä. Kestävyys voidaan osoittaa suorittamalla kuormitus- ja jännitystapauksesta riippuen yksi tai useampi seuraavista tarkastuksista yksittäisille kalvojännityksille

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd} \quad \sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd} \quad \tau_{x\theta,Ed} \leq \tau_{x\theta,Rd} . \quad (27)$$

Jos kuormitustapaus aiheuttaa useamman kuin yhden lommahdustarkastelussa oleellisen jännityskomponentin, täytyy kalvojännitysten yhteisvaikutus tarkistaa kaavalla

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right)^{k_\theta} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}} \right)^{k_\tau} \leq 1, \quad (28)$$

missä $\sigma_{x,Rd}$, $\sigma_{\theta,Rd}$ ja $\tau_{x\theta,Rd}$ ovat yhteisvaikutuksen kannalta oleelliset kuormitusyhdistelmän aiheuttamat kalvotilan puristus- ja leikkausjännityksen mitoitusarvot. Yhteisvaikutuskertoimet k_x , k_θ , k_τ ja k_i vaihtelevat riippuen kuormitustapauksesta, mutta nyt voidaan käyttää arvoja (SFS-EN 1993-1-6 2007, 39 ja 82)

$$k_x = 1,25 + 0,75 \chi_x, \quad (29)$$

$$k_\theta = 1,25 + 0,75 \chi_\theta, \quad (30)$$

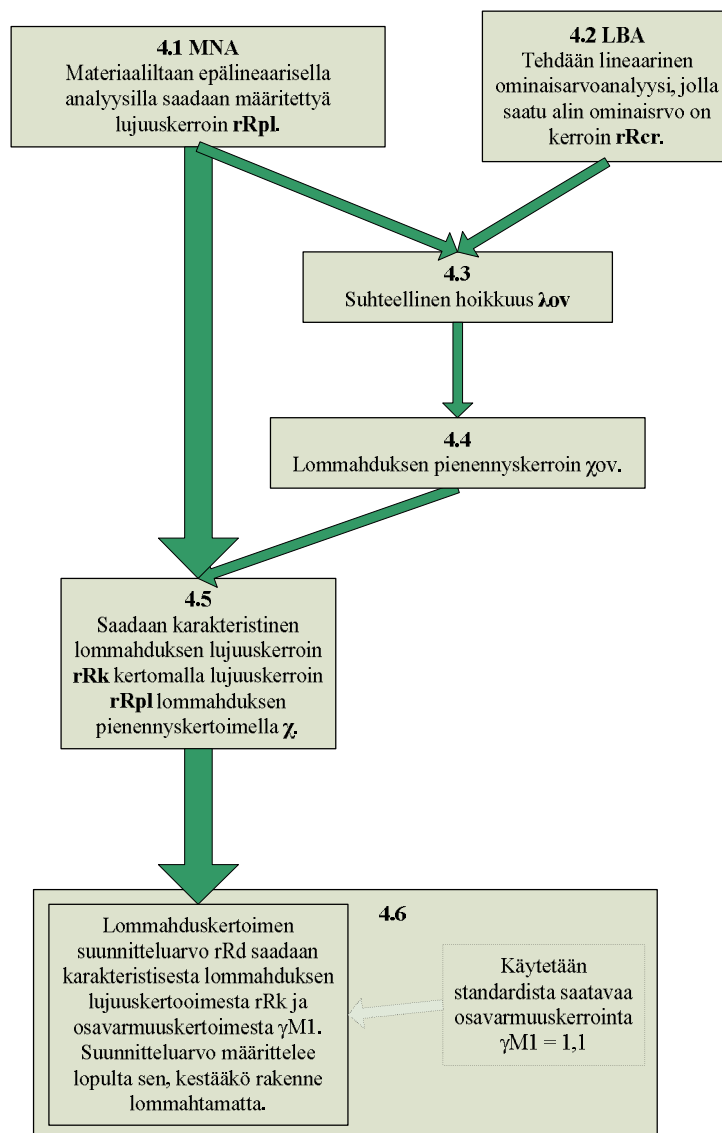
$$k_\tau = 1,75 + 0,25 \chi_\tau, \quad (31)$$

$$k_i = (\chi_x \chi_\theta)^2, \quad (32)$$

missä χ_x , χ_θ ja χ_τ ovat lommahduksen pienennyskertoimia.

4 Lommauksen analysointi numeerisesti materiaaliltaan epälineaarilla analyysillä ja lineaarisella ominisarvoanalyysillä

Lommauksen laskeminen käyttäen materiaaliltaan epälineaarista analyysia ja lineaarisesta lommauksen ominisarvoanalyysia on yksinkertaisempi standardin esittämistä numeerisista laskentatavoista. Muotovirheiden vaikutus otetaan laskennassa huomioon pienennuskertoimilla. Pienennyskerrointen määrittäminen saattaa olla hankalaa, jos kuormitustapauksessa yhdistyy esimerkiksi puristusta ja taivutusta. (Gettel 2007, 1474)



Kuva 6. Ratkaisun eteneminen materiaaliltaan epälineaarilla analyysillä ja lineaarisella ominisarvoanalyysillä

4.1 Materiaaliltaan epälineaarinen analyysi

Plastinen vertailulujuuskerroin r_{Rpl} määritetään materiaaliltaan epälineaarisella analyysillä. Tämä kuormakerroin on analyysillä saatu suurin arvo kun muokkauslujittumista ei huomioida. Jos materiaaliltaan epälineaarista analyysia ei voi tehdä, kerroin r_{Rpl} voidaan määrittää myös lineaarisella analyysillä, jossa kuormituksena on käytetty kuorman suunnitteluarvoja. Tällöin missä tahansa kuoren pisteissä arvioituja kalvojännitysresultanteja $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$ ja $n_{x\theta,Ed}$ käytetään määrittämään kerrointa r_{Rpl} . Kertoimen arvoksi valitaan pienin lasketuista arvoista (SFS-EN 1993-1-6 2007, 41)

$$r_{Rpl} = \frac{t \cdot f_{yk}}{\sqrt{n_{x,Ed}^2 - n_{x,Ed} \cdot n_{\theta,Ed} + n_{\theta,Ed}^2 + n_{x\theta,Ed}^2}} \quad (33)$$

kun t on seinämän paksuus

ja f_{yk} on myötöraja.

4.2 Lineaarinen nurjahdusanalyysi

Elastinen kriittinen nurjahduskerroin r_{Rcr} määritetään lineaarisella ominaisarvoanalyysillä. Kertoimen arvoksi valitaan alin ominaisarvo. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 41)

4.3 Muunnettu hoikkuus

Rakenteen muunnettu hoikkuus λ_{ov} voidaan määrittää materiaaliltaan epälineaarisella analyysillä saadun kertoimen r_{Rpl} ja lineaarisella lommahduksen ominaisarvoanalyysillä saadun kertoimen r_{Rcr} avulla, eli (SFS-EN 1993-1-6 2007, 41)

$$\bar{\lambda}_{ov} = \sqrt{\frac{F_{Rpl}}{F_{Rcr}}} = \sqrt{\frac{r_{Rpl}}{r_{Rcr}}} \quad (34)$$

4.4 Lommauksen pienennyskerroin

Lommauksen pienennyskerroin χ_{ov} määritetään kappaleessa 3.2 esitetyllä tavalla suureiden λ_{ov} , $\lambda_{ov,0}$, α_{ov} , β_{ov} ja η_{ov} avulla. Kerrointen määrittelyssä tulee huomioida herkkyyks muotovirheille, geometrinen epälineaarisuus ja muut nurjahdustapaukseen vaikuttavat seikat. Yleispätevänä kuormitustapauksena voidaan pitää kylkiviivan suuntaista puristusta. Pienennyskerroimeen tarvittavat suureet voi määrittää myös testaamalla. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 41 - 42) Pienennyskerroin voidaan määrittää myös siten, että huomioidaan vain kuormitustyyppi, josta johtuu suurin muotovirheherkkyyks. Tällöin ei kuitenkaan voida saavuttaa kaikkein parasta mahdollista tulosta. (Gettel 2007, 1474)

4.5 Karakteristinen lommauksen lujuuskerroin

Karakteristisen lommauksen lujuuskertoimen r_{Rk} määrittämiseen käytetään plastista vertailulujuuskerointa r_{Rpl} ja lommauksen pienennyskerrointa χ_{ov} (SFS-EN 1993-1-6 2007, 41):

$$r_{Rk} = \chi_{ov} r_{Rpl} . \quad (35)$$

4.6 Suunnitteluarvon r_{Rd} laskeminen

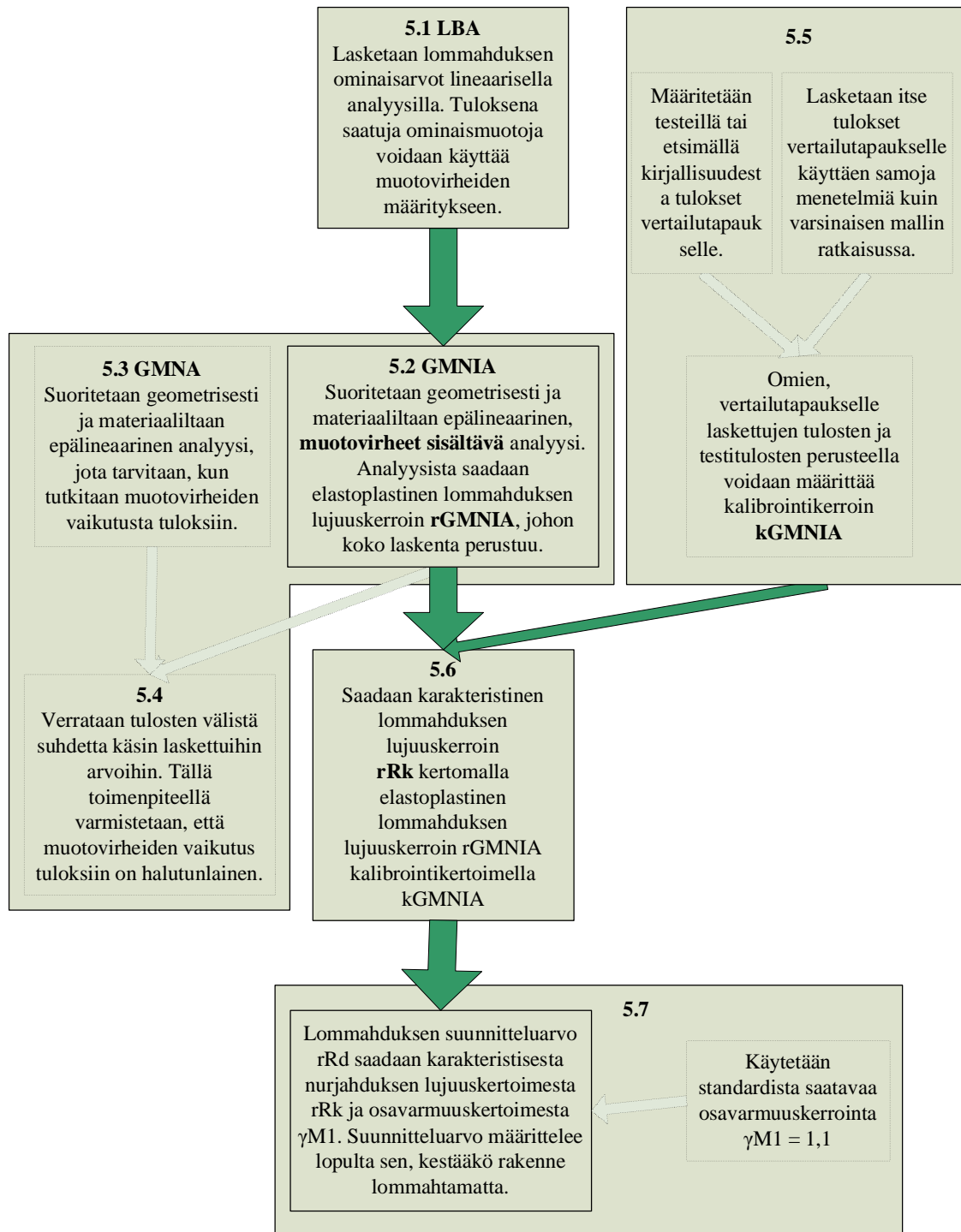
Lopulta saadaan mitoituksessa käytettävä nurjahduskertoimen suunnitteluarvo jakamalla karakteristinen lujuuskerroin standardista saatavalla osavarmuuskertoimella, eli

$$r_{Rd} = \frac{r_{Rk}}{\gamma_{M1}} . \quad (36)$$

Rakenne tulee kestäväksi sille määritetyn kuormituksen jos nurjahduskertoimen suunnitteluarvo on pienempi kuin yksi. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 42)

5 Lommauksen laskeminen numeerisesti geometrialta ja materiaalilta epälineaarilla, muotovirheet sisältävällä analyysillä

Rakenteen analysointi geometrisesti ja materiaaliltaan epälineaarilla analyysillä sisältää useita eri ratkaisuvaiheita ja se onkin työläin ja aikaa vievin tapa ratkaista lommausongelma. Laskennassa vaaditaan useampi eri analyysi. Muotovirheiden huomioiminen vaatii erityistä harkintaa ja mahdollisesti useampia tarkastuslaskelmia. Lisäksi laskennassa on muodostettava erillinen malli tiedossa oleviin tuloksiin perustuvan vertailukertoimen laskemista varten (Gettel 2007, 1467). Ratkaisun kulku vaihe vaiheelta on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Ratkaisun kulku geometrisesti ja materiaaliltaan epälineaaraisella, muotovirheet sisältävällä analyysillä

5.1 Lineaarinen ominisarvoanalyysi

Laskennan ensimmäinen vaihe on suorittaa lineaarinen lommahduksen ominisarvoanalyysi, jolla määritetään rakenteen ominaismuodot. Ominaismuotoja voidaan käyttää, kun huomioidaan muotovirheiden vaikutus rakenteeseen. Tällöin kuitenkin siirtymien suuruutta on skaalattava oikeiden tulosten saamiseksi. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 43)

5.2 Kertoimen $r_{R,GMNIA}$ määrittäminen geometrisesti ja materiaaaliltaan epälineaarisen analyysillä

Ratkaisun keskeisin vaihe on ratkaista geometrialta ja materiaalilta epälineaarinen analyysi, johon sisällytetään muotovirheet. Tällä analyysillä määritetään muotovirheet sisältävä nurjahduslujuuskerroin $r_{R,GMNIA}$. Kerroin voidaan määrittää valitsemalla alin kolmesta eri vaihtoehdosta. Se voi olla kuormitus–muodonmuutos -käyrän suurin kuormituskerroin (rajakuorma) tai bifurkaatiokuormituskerroin, kun tämä on pienempi kuin rajakuorma. Kolmas vaihtoehto on, että suurin sallittu muodonmuutos saavutetaan ennen kuin kuormitus saavuttaa rajakuorman tai bifurkaatiokuorman, jolloin kuormakerroin saadaan muodonmuutoksen kuormituksesta. Tämä suurin sallittu muodonmuutos määritetään rakennekohtaisesti. Voidaan olettaa, että suurin muodonmuutos saavutetaan, kun suurin paikallinen rotaatio kuoren pinnalla (kuoren kaltevuus alkuperäiseen geometriaan verrattuna) saa arvon 0,1 radiaania. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 43)

Muotovirheet aiheutuvat poikkeamista rakenteen geometriassa tai materiaalissa. Geometrisia virheitä ovat poikkeamat nimellisen geometrian muodosta, hitsien aiheuttamat muodonmuutokset, poikkeamat nimellisestä paksuudesta ja mahdollinen rakenteen tuennan epätasaisuus. Materiaalissa olevia poikkeamia puolestaan ovat jäännösjännitykset, jotka aiheutuvat esimerkiksi hitsauksesta tai rakenteessa olevista painaumista sekä materiaalin epähomogeenisuus ja anti-isotrooppisuus. Virheiden tarkka mallintaminen ei ole mahdollista, mutta niiden mahdollisimman tarkka huomioiminen on oleellinen osa luotettavia tuloksia. (SFS-EN 1993-1-6, 44)

Muotovirheet voidaan sisällyttää malliin poikkeuttamalla kuorta kohtisuorasti kuoren pintaan nähden. Muotovirheiden tulee tällöin suuntautua pois päin rakenteen kaarevuuden keskipisteestä. Jos muotovirheen muotoa ei muulla tavoin saada määritettyä, voidaan muotovirheeksi valita lineaarisella lommahdusanalyysillä saatu alin ominaismuoto. Muotovirheitä valitessa tulee huomata, että niillä tulisi olla mahdollisimman epäsuotuisa vaikutus kertoimeen $r_{R,GMNIA}$. Tästä vertailusta kerrotaan tarkemmin kappaleessa [7.4](#). Yleensä muotovirheen valinta ei ole yksikäsitteistä, ja tällöin on syytä tutkia rakennetta usealla eri muotovirhemuodolla ja valita jatkoon huonoin tapaus, jolla kerroin $r_{R,GMNIA}$ on pienin. (SFS-EN 1993-1-6, 45)

Vaikutuksiltaan kaikkein haitallisimman ominaismuodolla määritetyn muotovirheen löytäminen on vaikeaa. Lommahduksen ominaismuoto antaa kelvollisen tuloksen muotovirheelle, kun geometrian epälineaarisuudella on rakenteen käyttäytymiseen suurempi vaikutus kuin materiaalin epälineaarisuudella. Ominaismuodot kuitenkin vastaavat yleensä huonosti todellisia muotovirheitä. Lommahduskuormat eroavat usein toisistaan vain vähän, jolloin lähes samalla kuormituksella saadaan monta eri vauriomuotoa. Tällöin rakenteen käyttäytymistä tulisi tarkastella kaikilla saaduilla muodoilla. Jos tehdään analyysi, jossa ominaismuodot määrittävät muotovirheet, oletetaan, että rakenteen käyttäytyminen on lähes lineaarista lommahduskuormaa lähestyttäessä. Näin ei kuitenkaan ole epälineaarisessa analyysissä, vaan rakenteen muoto ja epälineaarinen materiaali muodostavat lukuisia erilaisia yhdistelmiä, joita olisi syytä pyrkiä tarkastelemaan analyysissä. Myös elementtiverkolla saattaa olla vaikutusta löydettyihin ratkaisuihin (Schneider 2005, 1206).

Geometrian maksimipoikkeama täydellisestä muodosta $\Delta w_{0,eq}$ riippuu valmistustoleranssin laatuluokasta U_n (taulukko 11). Suuruudeksi valitaan suurempi arvoista $\Delta w_{0,eq,1}$ ja $\Delta w_{0,eq,2}$ kun (SFS-EN 1993-1-6 2007,45):

$$\Delta w_{0,eq,1} = l_g U_n \quad (37)$$

$$\Delta w_{0,eq,2} = n_i t U_n \quad (38)$$

missä n_i on kerroin 25, jolla saavutetaan tarkoituksenmukainen toleranssitaso
 l_g on mittapituus
 t on seinämänpaksuus.

Taulukko 11. Valmistustoleranssin riippuvuus laatuluokasta (SFS-EN 1993-1-6 2007, 45)

Laatuluokan valmistustoleranssi	Kuvaus	U_n
Luokka A	Erittäin korkea	0,010
Luokka B	Korkea	0,016
Luokka C	Normaali	0,025

5.3 Elastoplastinen nurjahduksen lujuuskerroin $r_{R,GMNA}$

Geometrialta ja materiaalilta epälineaarilla analyysillä määritetään virheetön elastoplastinen lommahduksen lujuuskerroin $r_{R,GMNA}$. Tätä kerrointa tarvitaan, jotta voidaan tutkia valittujen geometristen muotovirheiden vaikutusta tuloksiin. Muotovirheiden tulee pienentää materiaalin lujuutta. Kertoimen laskenta poikkeaa kertoimesta $r_{R,GMNIA}$ ainoastaan siinä, että nyt muotovirheitä ei huomioida. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 43)

5.4 Muotovirheellisen ja virheettömän kertoimen vertailu

Kaikille kertoimen $r_{R,GMNIA}$ arvoille pitää määrittää muotovirheellisen ja muotovirheettömän kertoimen suhde ($r_{R,GMNIA}/r_{R,GMNA}$) ja verrata sitä lommahduksen pienennyskertoimiin χ . Näiden tulosten pitäisi vastata toisiaan. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 46)

5.5 Kalibrointikertoimen laskeminen

Kerrointa $r_{R,GMNIA}$ on korjattava kalibrointikertoimella k_{GMNIA} . Kalibrointikerrointa varten tarvitaan toinen, mahdollisuuksien mukaan yksinkertaistettu rakenne, jonka analysointi on helpompaa kuin varsinaisesti tutkimuksen kohteena olevan tapauksen. Tämän tarkastustapauksen tulisi sisältää samantyyppisiä muotovirheitä ja lommahdusominaisuuksien, kuten kuoren suhteellisen hoikkuuden, käyttäytymisen ennen lommahtamista, muotovirheherkkyyden, geometrisen epälineaarisuuden ja materiaalin käyttäytymisen tulisi olla samanlaisia kuin tutkittavassa tapauksessa. (SFS-EN 1993-1-6, 2007, 46)

Tarkastustapaukselle on tiedettävä lujuuskertoimen suuruus. Kerroin voidaan saada tekemällä testejä ($r_{R,test,known,check}$) tai vaihtoehtoisesti se voidaan löytää kirjallisuudesta ($r_{Rk,known,check}$). Lisäksi tarkastusrakenteesta tehdään laskentamalli, ja kertoimelle $r_{R,GMNIA,check}$ lasketaan arvo samalla tavoin kuin tutkittavalle tapauksellekin. Tämän jälkeen muodostetaan tiedossa olevan arvon ja lasketun arvon suhde, joka on kalibrointikerroin, eli (SFS-EN 1993-1-6, 2007, 46)

$$k_{GMNIA} = \frac{r_{Rk,known,check}}{r_{R,GMNIA,check}} \quad \text{kun} \quad 0,8 < k_{GMNIA} < 1,2 \quad (39)$$

tai

$$k_{GMNIA} = \frac{r_{R,test,known,check}}{r_{R,GMNIA,check}} \quad \text{kun} \quad k_{GMNIA} \leq 1. \quad (40)$$

5.6 Karakteristinen lommahduksen lujuuskerroin

Karakteristinen lommahduksen lujuuskerroin määritetään kalibrointikertoimen k_{GMNIA} ja elastoplastisen lommahduksen lujuuskertoimen $r_{R,GMNIA}$ avulla, kun (SFS-EN 1993-1-6 2007, 47)

$$r_{Rk} = k_{GMNIA} r_{R,GMNIA} . \quad (41)$$

5.7 Suunnitteluarvon r_{Rd} laskeminen

Lopulta saadaan mitoituksessa käytettävä nurjahduskertoimen suunnitteluarvo jakamalla karakteristinen lujuuskerroin standardista saatavalla osavarmuuskertoimella $\gamma_{M1} = 1,1$, eli

$$r_{Rd} = \frac{r_{Rk}}{\gamma_{M1}}. \quad (42)$$

Rakenteen mitoitus on onnistunut, jos mitoituskerroimen suunnitteluarvo saa korkeintaan arvon yksi. (SFS-EN 1993-1-6 2007, 47)

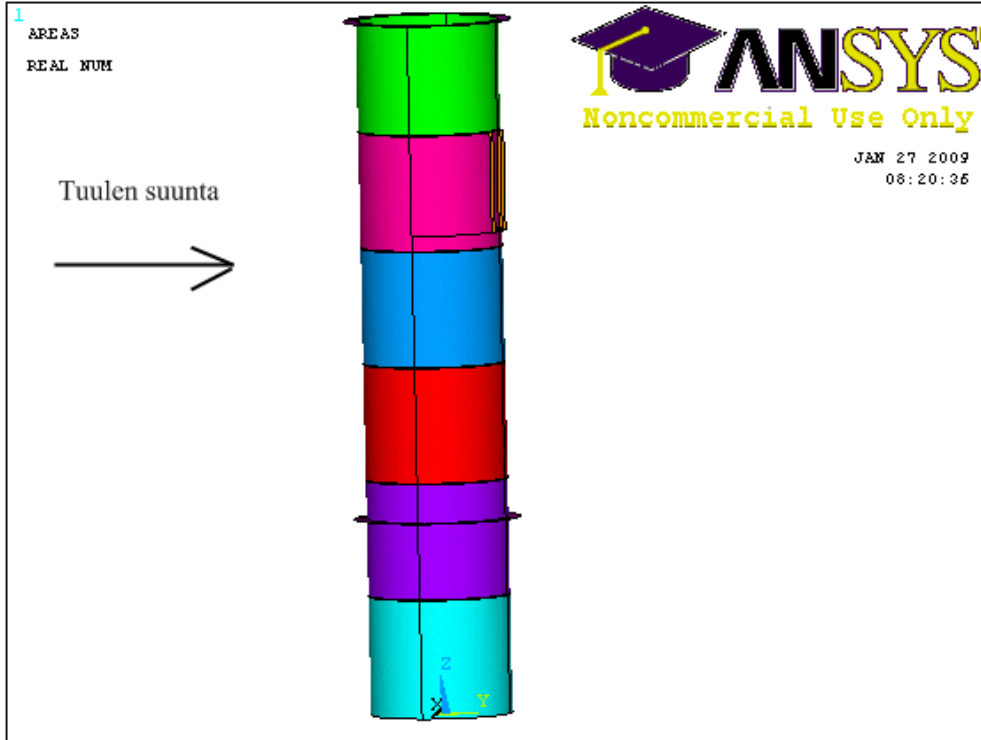
6 Kokeellinen osuus

Standardin SFS-EN 1993-1-6 pohjalta suoritetaan mitoitus käsin laskien sekä käyttäen FE-analyysia. Lähtökohtana laskuille ovat standardin DIN 18800 (Kinnunen) mukaiset arvot seinämänpaksuuksille. Rakenne on jaettu kuuteen tasakorkeaan lohkokon, joista ylimmän lohkon paksuus on 10 mm, seuraavan kolmen paksuus on 12 mm ja kahden alimman lohkon paksuus 16 mm.

Rakenteen laatuluokaksi oletetaan huonoin standardin SFS-EN 1993-1-6 antamasta kolmesta vaihtoehdosta, eli luokka C. Mitoituksessa käytettäviä vakioita ovat materiaalin kimmokerroin 210000 MPa, Poissonin vakio 0,3, sekä epälineaarista materiaalia varten tarvittavat materiaalin myötöraja 355 MPa ja tangenttimoduuli 1000.

FE-laskenta suoritetaan käyttäen Ansys-ohjelmistoa. Rakenteesta tehdään makro, jolloin muutosten tekeminen geometriaan on helppoa. Rakenteesta mallinnetaan kuoren keskipinta (Kuva 8). Liitokset sylinterin eri paksuuksisten lohkojen välillä mallinnetaan siten, että näihin kohtiin tehdään kapea vino vyöhyke (Kuva 9). Elementtinä käytetään 8-solmuista kuorielementtiä (SHELL 281) ja elementtikokona on 125 mm, jolloin koko rakenteessa on elementtejä yhteensä 29839. Rakenteen elementtiverkko on esitetty kuvassa 10. Rakenteen alareuna on jäykästi tuettu, eli kaikki translaatiot ja rotaatiot on estetty.

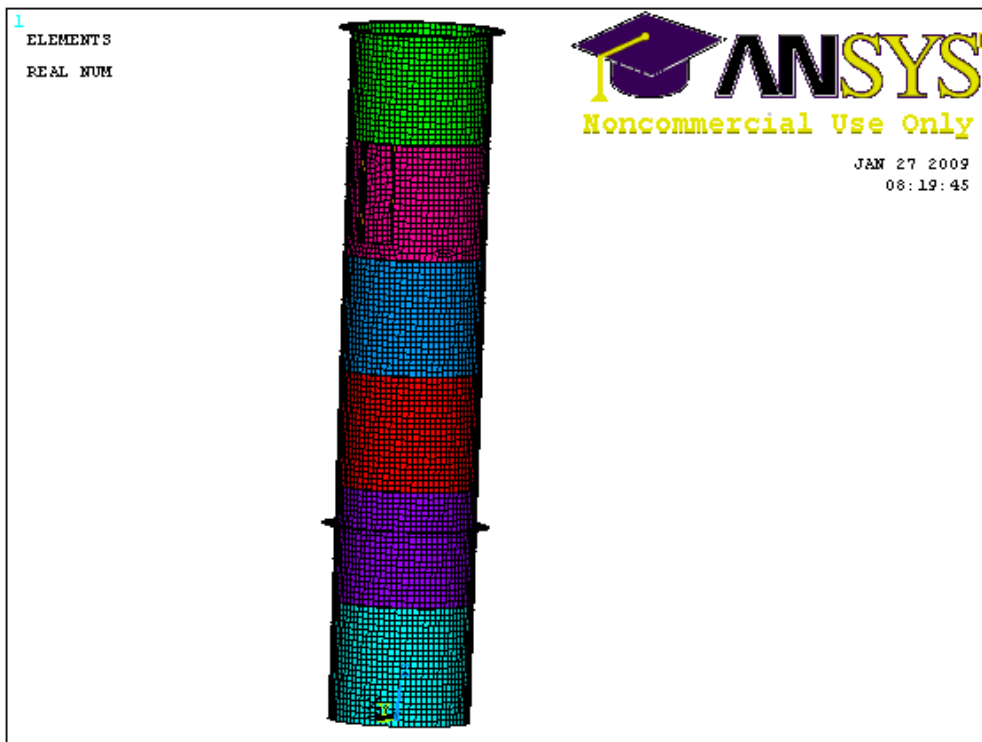
Vastaavasti kuoren yläreuna on oletettu vapaaksi, eli siellä ei ole kiinnitetty mitään vapausasteita.



Kuva 8. Mallin geometria.

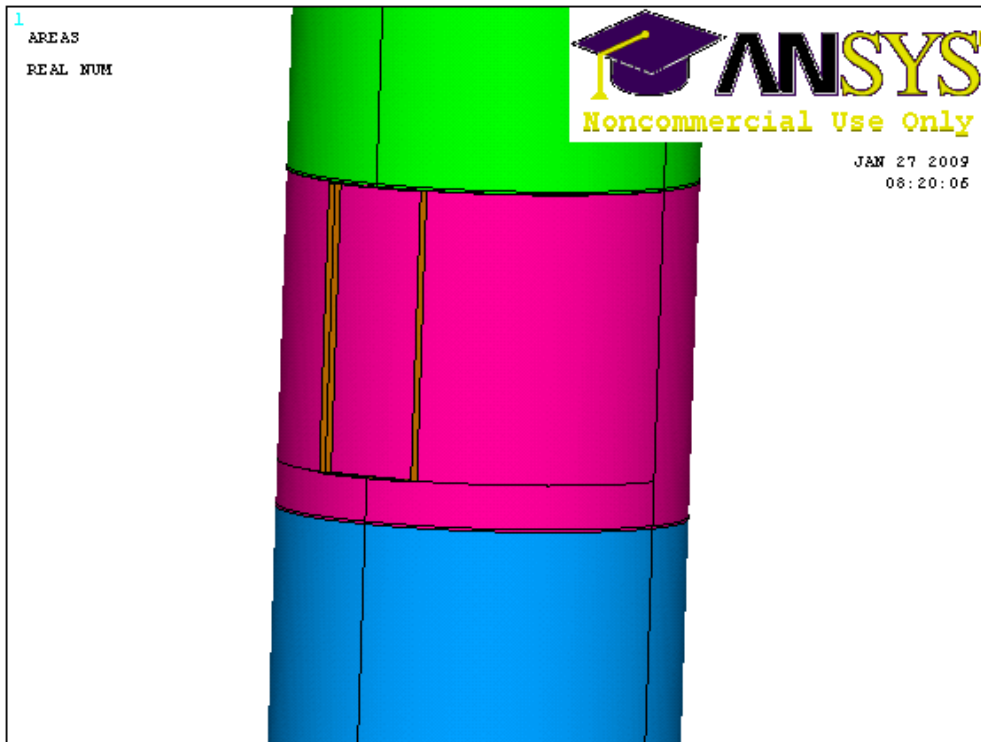


Kuva 9. Yksityiskohta keskipintojen vaihtelun mallintamisesta



Kuva 10. Elementtiverkko

Laskettaessa tuloksia käsikaavoilla ei ole mahdollista huomioida rakenteen kyljessä olevaa aukkoa, eikä sille ole etukäteen määritetty muuta kuin koko ja etäisyys maasta. Sijainti kehän suunnassa sekä vahvikkeiden koko on siis vapaasti valittavissa. Vahvistusrakenteiden mitoituksessa noudatetaan periaatetta, jonka mukaan aukon kohdalta poistunut materiaali on korvattava. (Teräsrakenneyhdistys 2002, 77) Tätä ohjetta noudattaen lasketaan aukon kohdalta poistunut materiaali (liite 1), ja määritetään vahvikkeiden paksuudeksi 25 mm ja leveydeksi 150 mm.



Kuva 11. Yksityiskohta aukosta.

7 Tulokset

7.1 Laskeminen käsikaavoin

Rakenteen kuormitukseksi oletetaan aksiaalisen puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutus. Taulukossa 12 esitetään pienennyskertoimet ja taulukossa 13 jännityskomponenttien mitoitusarvon suhde suunnitteluarvoon. Rakenteen kestävyys on riittävä, kun tämä suhde on pienempi kuin yksi. Tarkemmat yksityiskohdat käsin laskuista on esitetty liitteessä 2.

Taulukko 12. Pienennyskerrointen χ suuruus

Lohkon numero ylhäältä alaspäin	Aksiaalinen puristus	Leikkaus
1	0,568	0,746
2	0,640	0,679
3	0,640	0,609
4	0,640	0,555
5	0,732	0,620
6	0,732	0,587

Taulukko 13. Todellisten jännityskomponenttien suhde laskennalliseen jännitykseen

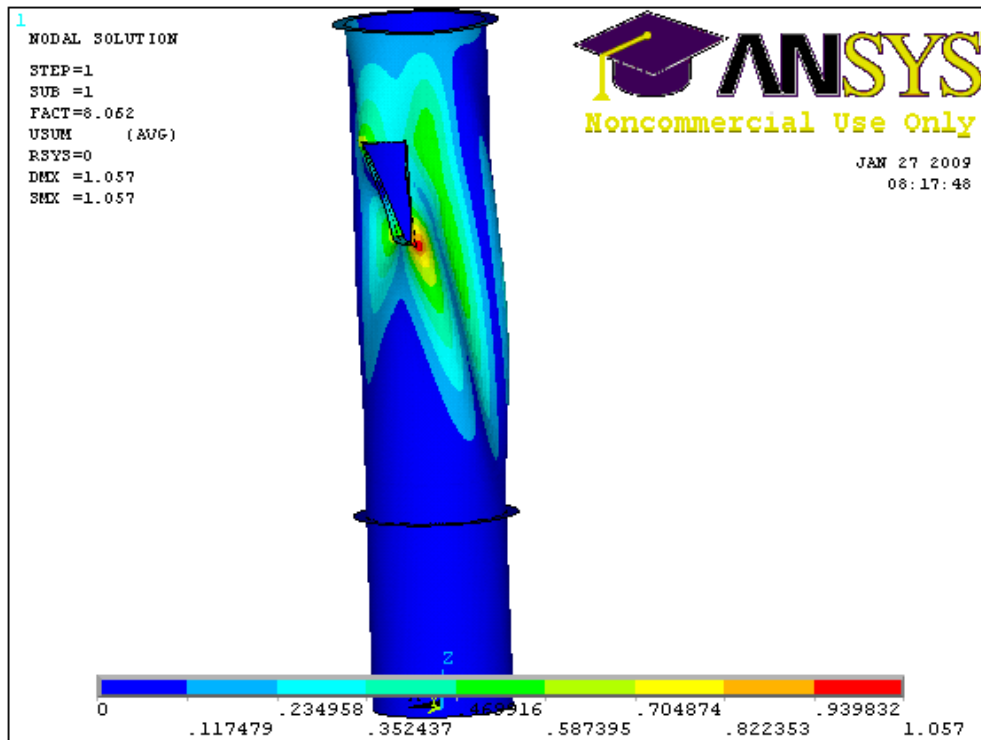
Lohkon numero ylhäältä alaspäin	Kuormitusten yhteisvaikutus	Aksiaalinen puristus	Leikkaus
1	0,367	0,417	0,369
2	0,332	0,463	0,375
3	0,468	0,584	0,433
4	0,628	0,710	0,492
5	0,360	0,633	0,417
6	0,455	0,733	0,457

7.2 Laskeminen materiaalin ja lineaaristen ominaisarvojen menetelmällä

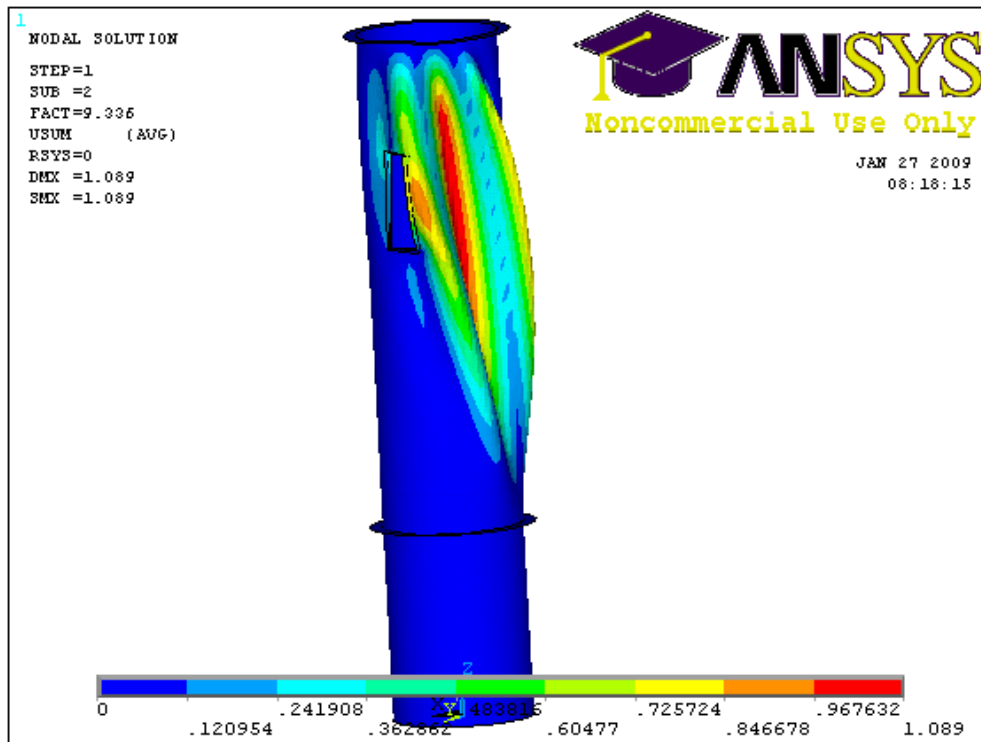
Yksityiskohtaisemmat laskut on esitetty liitteessä 3. Ensimmäiseksi rakenteelle lasketaan lineaarisella nurjahdusanalyysillä ominaisarvot. Alin ominaisarvo on kerroin r_{RCR} . Neljä alinta ominaisarvoa on esitetty taulukossa 14 ja kaksi alinta ominaismuotoa kuvissa 12 ja 13.

Taulukko 14. Lineaarisen lommahduksen ominaisarvot

Ominaisarvon numero	Lineaariset lommahduksen ominaisarvot
1	8,06
2	9,34
3	9,74
4	10,08

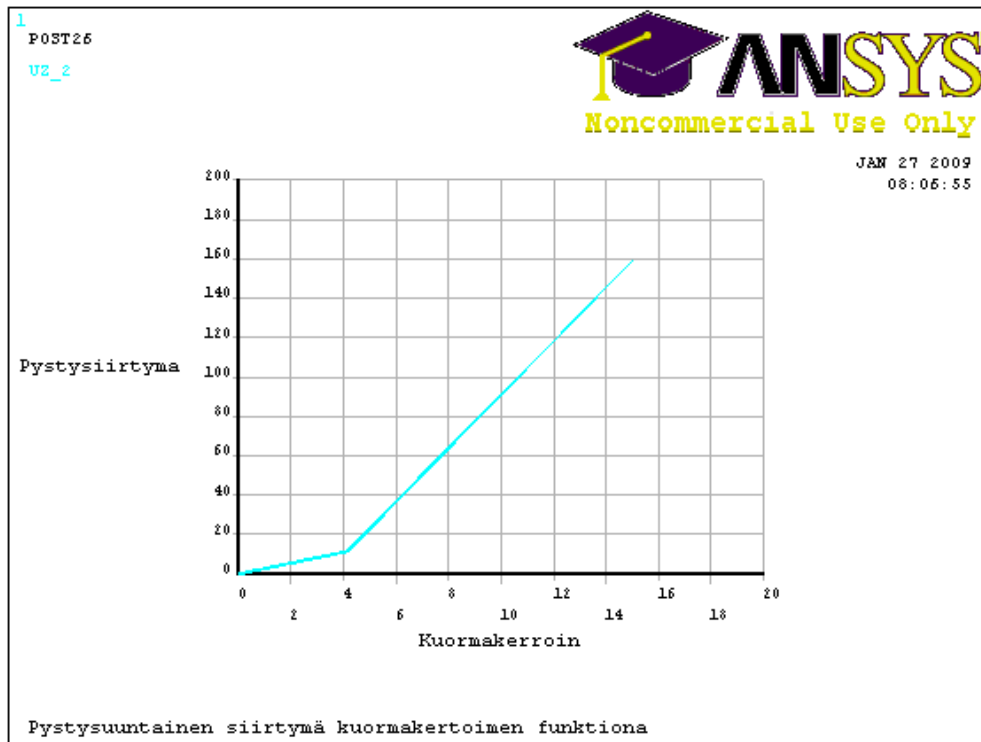


Kuva 12. Ensimmäinen lommahduksen ominaismuoto

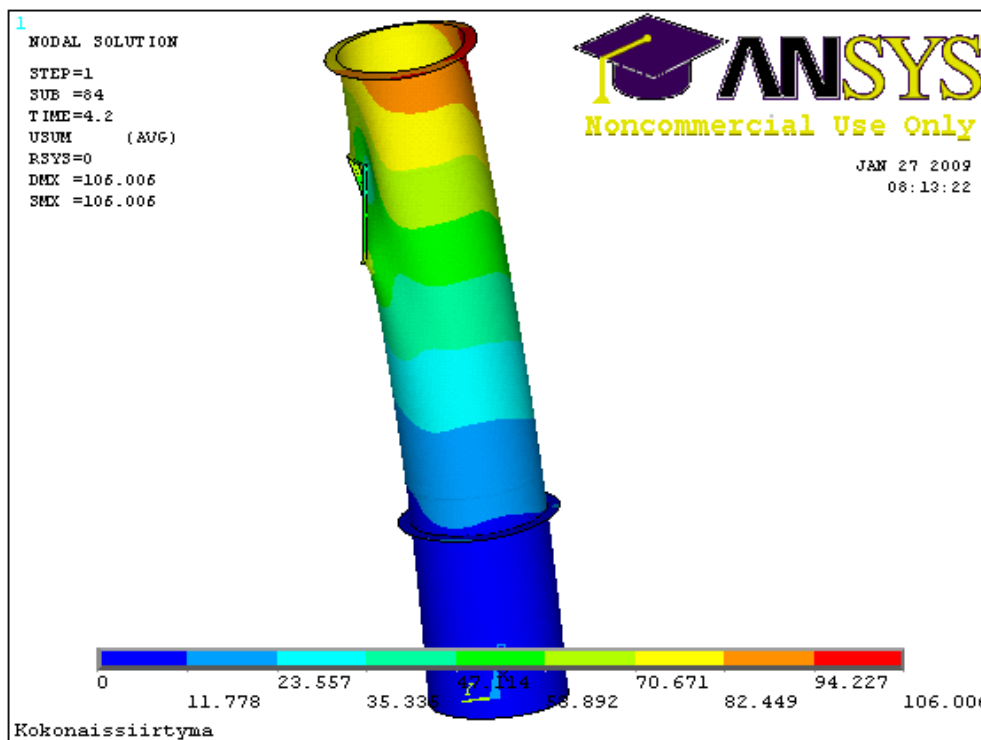


Kuva 13. Toinen lommahduksen ominaismuoto

Seuraavaksi määritetään materiaaliltaan epälineaarilla analyysillä kerroin r_{RpI} . Laskemista varten kuormitus skaalataan 15-kertaiseksi alkuperäiseen kuormitukseen verrattuna. Saman kertoimen perusteella määritetään myös ajaksi 15, jolloin kuormakerroin on mahdollista nähdä suoraan aika-akselilta. Kuvasta 14 nähdään, että kertoimen r_{RpI} arvoksi saadaan 4,2. Rakenteen kokonaissiirtymät juuri ennen plastisoitumista on esitetty kuvassa 15.



Kuva 14. Pystysiirtymä luettuna yhdestä rakenteen yläosassa sijaitsevasta solmusta



Kuva 15. Materiaaliltaan epälineaarisen analyysin kokonaissiirtymä ennen plastisoitumista

Pienennyskertoimeen χ liittyvät suureet voidaan laskea aksiaalisesti puristetun, jäykistämättömän rakenteen lukuarvoilla. Tulokset on esitetty taulukossa 15. Nurjahduskertoimen suunnitteluarvoksi r_{RD} saadaan 2,0, kun vaatimus oli, että rakenne kestää, jos arvo on suurempi kuin yksi.

Taulukko 15. Pienennyskertoimeen liittyvät suureet

Elastinen muotovirhetekijä	α	0,270
Plastinen kerroin	β	0,60
Yhteisvaikutuksen huomioitava eksponentti	η	1,0
Tyssäysrajaa vastaava muunnettu hoikkuus	λ_0	0,2
Plastisen rajan muunnettu hoikkuus	λ_p	0,821
Pienennyskerroin	χ	0,49

7.3 Tulokset geometrialta ja materiaaliltaan epälineaarilla, muotovirheet sisältävällä analyysillä

Laskentaa kokeillaan myös geometrisesti ja materiaaliltaan epälineaarilla, muotovirheet sisältävällä analyysillä. Koska käytössä ei ole testituloksia, laskentaa on nyt kokeiltu erilaisilla parametreilla. Muotovirheeksi skaalataan ensimmäinen ominaismuoto (Kuva 12). Muotovirheen suuruudeksi valitaan taulukon 16 mukaisia arvoja. Geometrisen epälineaarisuuden aiheuttajana käytetään kolmatta ominaismuotoa, jonka suurimmaksi siirtymäksi oletetaan 10 mm.

Taulukko 16. Kuormakertoimet ja kalibrointikertoimet muotovirheen amplitudin muuttuessa

geometri- nen muoto- virhe Δw	kuorma- kerroin r_{RGMNI} A	suhde r_{RGMNIA}/r_{RGM} NA	r_{Rd} , kun k_{GMNIA} on 0,8	r_{Rd} , kun k_{GMNIA} on 1,0	r_{Rd} , kun k_{GMNIA} on 1,2
13	4,46	0,99	3,24	4,05	4,86
30	4,03	0,89	2,93	3,66	4,39
80	2,91	0,64	2,11	2,64	3,17

8 Johtopäätökset

Analyttisesti laskemalla saadut arvot suunnitelujännityksen ja mitoitusjännityksen suhteelle ovat hiukan pienempiä kuin standardilla DIN 18 800 lasketut arvot. Aksiaalinen puristus heikentää rakenteen kestoa lommahtamista vastaan eniten.

Materiaaliltaan epälineaarilla ja lommahduksen ominaisarvoanalyysillä lasketut numeeriset tulokset vastaavat hyvin käsin laskettuja tuloksia. Sitä vastoin pelkät lineaariset lommahduksen ominaisarvot antavat liian positiivisen kuvan rakenteen kestävydestä. Näyttäisi siis siltä, että käsin laskettujen tulosten varmentamiseen voi käyttää materiaaliltaan epälineaarisen sekä lineaarisen ominaisarvoanalyysin menetelmää.

Luotettavaa ratkaisua geometrisesti ja materiaaliltaan epälineaarilla analyysillä ei ole mahdollista tehdä. Kalibrointikertoimen k_{GMNIA} määrittämiseen tarvittavia testejä ei ollut mahdollista suorittaa ja toisaalta kirjallisuudesta ei löytynyt käytettäväksi soveltuvia arvoja. Ylipäätänsä käytettäväksi soveltuvien tulosten löytyminen rakenteelle on epätoennäköistä. Toinen ongelma on muotovirheiden huomioiminen laskennassa. Lineaarisen lommahduksen ominaismuodot eivät kuvasta muotovirheitä riittävällä tarkkuudella, ja myös muotovirheiden oikeanlainen huomioiminen vaatii tuekseen testausta. Tämä menetelmä soveltuu siis lähinnä tilanteisiin, joissa tehdään sarja erikokoisia, ominaisuuksiltaan samanlaisia rakenteita. Tällöin riittää yhden koon testaus ja muut vaihtoehdot on mahdollista analysoida numeerisesti.

Tulosten perusteella levyn paksuudet eivät ole vielä aivan optimaalisia, vaan kaikkien lohkojen ohentaminen on mahdollista. Toisaalta jos halutaan saavuttaa kaikkein optimaalisin ratkaisu, on syytä pohtia, mikä on paras lohkojen lukumäärä ja leveys.

Lähteet

Ansys 11.0 Element Reference. On-Line Help. SAS IP, Inc. 2007

Gettler, Marco & Schneider, Werner. 2007. Buckling strength verification of cantilevered cylindrical shells subjected to transverse load using Eurocode 3. *Journal of Constructional Steel Research*, 63, s. 1467 - 1478

Kinnunen, Marko. Cylindrical shell buckling calculation according to DIN 18 800 part 4 (Mathcad-dokumentti)

SFS-EN 1993 – 6. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1 – 6: Kuorirakenteiden lujuutta ja stabiiliutta koskevat lisäsäännöt. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 16.4.2007. 94 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

SFS-ENV 1993-1-1. Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1 – 1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 8.11.1993. 324 s.

Schneider, Werner, Timmel, Ingo, Höhn, Karsten. 2007. The conception of quasi-collapse-affine imperfections: A new approach to unfavourable imperfection of thin-walled structures. *Thin-walled Structures*, 43, s. 1202 - 1224

Teräsrakenneyhdistys ry. 2002. Paineettomien terässäiliöiden suunnittelu ja toteutus. Helsinki: MP-keskus, 2002. 94 s. ISBN 952-9683-26-X

Ympäristöministeriö. 2008. Ympäristöministeriön asetus Eurocode-standardien soveltamisesta talonrakentamisessa annetun asetuksen muuttamisesta. Liite 22 Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1996-1-6 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu Osa 1-6: Kuorirakenteen kestävyys ja stabiilius [verkkodokumentti]. Helsinki. 3.7.2008. [viitattu 11.12.2008]. Saatavissa:
[http://www.eurocodes.fi/Eurokoodien%20tilanne%20nyt/Eurokoodien%20kansalliset%20Oliitteet%2019-26%203-7-2008%20\(2\).pdf](http://www.eurocodes.fi/Eurokoodien%20tilanne%20nyt/Eurokoodien%20kansalliset%20Oliitteet%2019-26%203-7-2008%20(2).pdf)

LIITE 1 Aukon vahvikkeiden määrittäminen

Aukon korkeus	$h_a := 2100$	Vahvikkeen paksuus	$t_7 := 25$
Aukon leveys	$b_a := 800$	Vahvikkeen leveys	$l_v := 150$
Aukon paksuus	$t_1 := 12$		
	$t_2 := 10$		

Poistettavan materiaalin tilavuus $p_m := h_a \cdot b_a \cdot t_1$ $p_m = 2.016 \times 10^7$

Tilalle tarvittavan materiaalin tilavuus $u_m := [(2100 + 2 \cdot t_7) \cdot (800 + 2 \cdot t_7) - 2100 \cdot 800] \cdot l_v$
 $u_m := (2100 \cdot 800 + 4200 \cdot t_7 + 1600 \cdot t_7^2 - 2100 \cdot 800) \cdot l_v$
 $u_m := p_m$
 $u_m := (5800 \cdot t_7 + 4 \cdot t_7^2) \cdot l_v$
 $u_m = 2.212 \times 10^7$

LIITE 2 Lomahduksen laskeminen käsin

$$E := 210000 \text{MPa}$$

Korkeus

$$l := 14.7 \text{m}$$

Kimmomoduuli

$$f_{yk} := 355 \text{MPa}$$

Kuoren osien lukumäärä

$$n := 6$$

$$i := 0, 1..n - 1$$

Yhden kuoren osan korkeus:

$$w := \frac{l}{n} \quad w = 2.45 \text{m}$$

Osien paksuudet ylhäältä alaspäin:

$$t_0 := 10 \text{mm} \quad t_1 := 12 \text{mm}$$

$$t_2 := 12 \text{mm} \quad t_3 := 12 \text{mm}$$

$$t_4 := 16 \text{mm} \quad t_5 := 16 \text{mm}$$

Korkeudet ylhäältä alaspäin

$$l_i := l - (n - i - 1) \cdot w$$

Sylinterin lohkojen halkaisija

$$D := \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} \text{m} \quad r_i := \frac{D_i}{2}$$

Lohkon yläreunan korkeus maasta

$$l = \begin{pmatrix} 2.45 \\ 4.9 \\ 7.35 \\ 9.8 \\ 12.25 \\ 14.7 \end{pmatrix} \text{m}$$

Lommahdusjännitys, aksiaalinen puristus

Analyyssia ei tarvitse tehdä jos

$$\frac{r_1}{t_1} = \quad < \quad \frac{E \cdot 0.03}{f_{yk}} = 17.746$$

150
125
125
125
93.75
93.75

Kuoren reunaehdoista riippuva kerroin. RB1= tuettu, RB2=säteen suunnassa tuettu, aksiaalisuunnassa vapaa, RB3=vapaa

RB1+RB1==>6, RB1+RB2==>3, RB2+RB2==>1

Käytetään arvoa 3

$$C_{xb} := 3$$

$$\omega := \frac{1}{\sqrt{r \cdot t}}$$

$$C_{x_1} := \begin{cases} 1.36 - \frac{1.83}{\omega_1} + \frac{2.07}{(\omega_1)^2} & \text{if } \omega_1 \leq 1.7 \\ 1.0 & \text{if } 1.7 < \omega_1 < 0.5 \cdot \frac{r_1}{t_1} \\ 1 + \frac{0.2}{C_{xb}} \cdot \left(1 - 2 \cdot \omega \cdot \frac{t_1}{r_1} \right) & \text{if } 0.5 \cdot \frac{r_1}{t_1} \leq \omega_1 \end{cases}$$

$$C_x = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Kriittinen lommahdusjännitys

$$\sigma_{xRcr_i} := 0.605 C_{x_i} \cdot E \cdot \frac{t_i}{r_i}$$

$$\sigma_{xRcr} = \begin{pmatrix} 847 \\ 1.016 \times 10^3 \\ 1.016 \times 10^3 \\ 1.016 \times 10^3 \\ 1.355 \times 10^3 \\ 1.355 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{MPa}$$

Lommahdusparametrit, kun laatuluokka on C, eli normaali

$$\alpha_{x_i} := \frac{0.62}{1 + 1.91 \cdot \left(\frac{1}{16} \cdot \sqrt{\frac{r_i}{t_i}} \right)^{1.44}}$$

$$\lambda_{0x} := 0.20$$

$$\beta_x := 0.60$$

$$\eta_x := 1.0$$

$$\lambda_{xp} := \sqrt{\frac{\alpha_x}{1 - \beta_x}}$$

Lommahdusjännitys, taivutus

Lommahdusta ei tarvitse analysoida jos

$$\frac{r_i}{t_i} = < 0.16 \left(\frac{E}{f_{yk}} \right)^{0.67} = 11.517$$

150
125
125
125
93.75
93.75

$$C_{\tau_i} := \begin{cases} \sqrt{1 + \frac{42}{(\omega_i)^3}} & \text{if } \omega_i \leq 10 \\ 1.0 & \text{if } 10 < \omega_i < 8.7 \cdot \frac{r_i}{t_i} \\ \frac{1}{3} \cdot \sqrt{\omega_i \cdot \frac{t_i}{r_i}} & \text{if } 8.7 \cdot \frac{r_i}{t_i} \leq \omega_i \end{cases} \quad C_{\tau} = \begin{pmatrix} 1.056 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Ideaalinen lommahdusjännitys

$$\tau_{x\theta Rcr_i} := 0.75 C_{\tau_i} \cdot E \cdot \sqrt{\frac{1}{\omega_i} \cdot \frac{t_i}{r_i}}$$

$$\tau_{x\theta Rcr} = \begin{pmatrix} 414.145 \\ 332.904 \\ 271.815 \\ 235.399 \\ 280.729 \\ 256.27 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Lommahdusparametrit

$$\alpha_{\tau} := 0.50$$

$$\lambda_{0\tau} := 0.40$$

$$\lambda_{\tau p} := \sqrt{\frac{\alpha_{\tau}}{1 - \beta_{\tau}}}$$

$$\beta_{\tau} := 0.60$$

$$\lambda_{\tau p} = 1.118$$

$$\eta_{\tau} := 1.0$$

Karakteristiset lommahdusjännitykset

Suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_x := \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{xRcr}}} \quad \lambda_x = \begin{pmatrix} 0.647 \\ 0.591 \\ 0.591 \\ 0.591 \\ 0.512 \\ 0.512 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{\tau_i} := \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \tau_{x\theta Rk_i}}} \quad \lambda_{\tau} = \begin{pmatrix} 0.703 \\ 0.785 \\ 0.868 \\ 0.933 \\ 0.854 \\ 0.894 \end{pmatrix}$$

Pienennyskertoimet

$$\chi_{x_i} := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{x_i} \leq \lambda_{0x} \\ 1 - \beta_x \cdot \left(\frac{\lambda_{x_i} - \lambda_{0x}}{\lambda_{xp_i} - \lambda_{0x}} \right)^{\eta_x} & \text{if } \lambda_{0x} < \lambda_{x_i} < \lambda_{xp_i} \\ \frac{\alpha_x}{(\lambda_{x_i})^2} & \text{if } \lambda_{xp_i} \leq \lambda_{x_i} \end{cases} \quad \chi_x = \begin{pmatrix} 0.568 \\ 0.64 \\ 0.64 \\ 0.64 \\ 0.732 \\ 0.732 \end{pmatrix}$$

$$\chi_{\tau_i} := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{\tau_i} \leq \lambda_{0\tau} \\ 1 - \beta_{\tau} \cdot \left(\frac{\lambda_{\tau_i} - \lambda_{0\tau}}{\lambda_{\tau p} - \lambda_{0\tau}} \right)^{\eta_{\tau}} & \text{if } \lambda_{0\tau} < \lambda_{\tau_i} < \lambda_{\tau p} \\ \frac{\alpha_{\tau}}{(\lambda_{\tau_i})^2} & \text{if } \lambda_{\tau p} \leq \lambda_{\tau_i} \end{cases} \quad \chi_{\tau} = \begin{pmatrix} 0.746 \\ 0.679 \\ 0.609 \\ 0.555 \\ 0.62 \\ 0.587 \end{pmatrix}$$

Jännitykset

$$\sigma_{xRk_i} := \chi_{x_i} \cdot f_{yk} \quad \sigma_{xRk} = \begin{pmatrix} 201.532 \\ 227.086 \\ 227.086 \\ 227.086 \\ 259.703 \\ 259.703 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\tau_{x\theta Rk_i} := \chi_{\tau_i} \cdot \frac{f_{yk}}{\sqrt{3}} \quad \tau_{x\theta Rk} = \begin{pmatrix} 152.982 \\ 139.082 \\ 124.746 \\ 113.655 \\ 127.126 \\ 120.301 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Jännitysten mitoitusarvot

Osavarmuuskerroin

$$\gamma_{M1} := 1.1$$

$$\sigma_{xRd_i} := \frac{\sigma_{xRk_i}}{\gamma_{M1}}$$

$$\tau_{x\theta Rd_i} := \frac{\tau_{x\theta Rk_i}}{\gamma_{M1}}$$

$$\sigma_{xRd} = \begin{pmatrix} 183.211 \\ 206.442 \\ 206.442 \\ 206.442 \\ 236.093 \\ 236.093 \end{pmatrix} \text{MPa}$$

$$\tau_{x\theta Rd} = \begin{pmatrix} 139.074 \\ 126.438 \\ 113.405 \\ 103.323 \\ 115.569 \\ 109.365 \end{pmatrix} \text{MPa}$$

$$\sigma_{xEd} := \begin{pmatrix} 76.369 \\ 84.796 \\ 107.043 \\ 130.078 \\ 115.886 \\ 134.335 \end{pmatrix} \text{MPa}$$

$$\tau_{x\theta Ed} := \begin{pmatrix} 49.608 \\ 41.396 \\ 41.396 \\ 41.396 \\ 31.132 \\ 31.132 \end{pmatrix} \text{MPa}$$

Käytetään suunnitteluarvoina samoja tuloksia, kuin vertailutapauksessa (Kinnunen)

$$\frac{\sigma_{xEd_i}}{\sigma_{xRd_i}} =$$

0.417
0.411
0.519
0.63
0.491
0.569

$$\frac{\tau_{x\theta Ed_i}}{\tau_{x\theta Rd_i}} =$$

0.357
0.327
0.365
0.401
0.269
0.285

Täytyy olla < 1

LIITE 3 Lommuksen laskeminen materiaaaliltaan epälineaarisen ja ominaisarvoanalyysin avulla

Materiaaliltaan epälineaarinen analyysi $r_{Rpl} := 4.2$

Lineaarinen ominaisarvoanalyysi $r_{Rcr} := 8.0617$

Suhteellinen hoikkuus $\lambda_{ov} := \sqrt{\frac{r_{Rpl}}{r_{Rcr}}}$

$$\lambda_{ov} = 0.722$$

Voidaan määrittää lommuksenparametrit kytkiviivan suuntaisen puristuksen mukaan.

$\beta := 0.60$ ei riipu kuormitustyyppistä

$\eta := 1.0$ ei riipu kuormitustyyppistä

$r := 1500$

$t := 10$

$$\alpha := \frac{0.62}{1 + 1.91 \left(\frac{1}{16} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} \right)^{1.44}} \quad \alpha = 0.26959$$

Käytetään määrittämisessä huomointia laatuluokkaa, eli luokkaa C

$\lambda_0 := 0.20$

$$\lambda_p := \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} \quad \lambda_p = 0.82095$$

Pienennyskerroimen arvo riippuu suhteellisesta hoikkuudesta.

Koska $\lambda_0 < \lambda_{ov} < \lambda_p$

$$\chi := 1 - \beta \cdot \left(\frac{\lambda_{ov} - \lambda_0}{\lambda_p - \lambda_0} \right)^\eta$$

$\chi = 0.49582$

Nyt voidaan laskea karakteristinen lommahduksen lujuuskerroin r_{Rk}

$$r_{Rk} := r_{RpI} \cdot \chi$$

Standardin antama osavarmuuskerroin

$$\gamma_{M1} := 1.1$$

Lommahduskertoimen suunnittelu-arvo

$$r_{Rd} := \frac{r_{Rk}}{\gamma_{M1}}$$

$$r_{Rd} = 1.893$$

LIITE 4 Lommuksen geometrisesti ja materiaaliltaan epälineaarilla, muotoviir- heet sisältävällä analyysillä

GMNIA analyysillä saatu kuormakerroin

$$r_{\text{RGMNIA}} := 4.460\%$$

$$r_{\text{RGMNA}} := 4.501\%$$

$$\text{suhde} := \frac{r_{\text{RGMNIA}}}{r_{\text{RGMNA}}}$$

$$\text{suhde} = 0.991$$

Tätä voi verrata pienennyskerroin-
meen

Kerrointa k_{GMNIA} ei voida määrittää, koska käytössä ei ole testejä eikä kirjallisuudesta löytynyt käyttö-
kelpoisia tuloksia. Jonkinlaiset minimi- ja maksimiarvot voidaan kuitenkin laskea kuormakertoimelle. Käy-
tetään tässä standardin antamia rajoja kirjallisuudesta löytyneille tuloksille.

$$k_{\text{GMNIA}} := 0.8$$

Karakteristinen nurjahduksen lujuuskerroin

$$r_{\text{Rk}} := r_{\text{RGMNIA}} \cdot k_{\text{GMNIA}}$$

$$r_{\text{Rkmin}} := r_{\text{RGMNIA}} \cdot k_{\text{GMNIA}}$$

$$r_{\text{Rk}} = 3.568$$

Standardin antama osavarmuuskerroin

$$\gamma_{\text{M1}} := 1.1$$

Nurjahduskertoimen suunnitteluvarvo

$$r_{\text{Rd}} := \frac{r_{\text{Rk}}}{\gamma_{\text{M1}}}$$

$$r_{\text{Rd}} = 3.244$$