

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Konetekniikan koulutusohjelma
Modernit tuotantojärjestelmät

Tutkintotyö

Antti Vuorinen

Lujuuslaskennan kehittäminen Kvaerner Power Oy:n pesuriperheen suunnittelussa

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 2005

TkL Matti Lähteenmäki
Kvaerner Power Oy, Environmental Systems

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Konetekniikka

Modernit tuotantojärjestelmät

Vuorinen, Antti Lujuuslaskentamenetelmien kehittäminen Kvaerner Power Oy:n pesuriperheen suunnittelussa

Tutkintotyö 31 sivua + 22 liitesivua

Työn ohjaaja TkL Matti Lähteenmäki

Työn teettäjä Kvaerner Power Oy, Environmental Systems

Huhtikuu 2005

Hakusanat lujuuslaskenta, hajukaasupesuri

TIIVISTELMÄ

Työn tarkoituksena oli kehittää hajukaasupesureihin liittyvää lujuuslaskentaa Kvaerner Power Oy:ssä. Kehittämistyöllä haluttiin selkeyttää lujuuslaskennan vaiheita, nopeuttaa laskentaa sekä parantaa dokumentoinnin tasoa.

Käytännöllisin tapa saavuttaa tavoitteet oli siirtää pesureiden lujuuslaskenta ATK-pohjaisille laskentalehdille. Laskentalehdet vähentävät käsin tapahtuvaa laskentaa merkittävästi nopeuttaen siten koko laskentaprosessia. Sähköiset laskentalehdet ovat myös helpompia ja siistimpiä arkistoida kuin käsintehdyt laskelmat.

Kehitystyössä käytettävän ohjelman valinta tapahtui kahden ohjelmiston väliltä. Esillä oli Microsoft Excel ja Mathcad 11 Enterprise edition. Excelin etuna oli ohjelmiston yleisyys ja helppokäyttöisyys, kun taas Mathcadin etuina olivat ohjelman ylivoimaiset matemaattiset ominaisuudet. Valintaprosessi päättyi melko nopeasti Mathcadiin juuri sen matemaattisten ominaisuuksien ja siistin ulkoasun perusteella. Ohjelmistoa oli käytetty aiemmin jonkin verran lujuuslaskennassa, joten sen käyttö oli yrityksessä jo entuudestaan tuttua.

Työn tuloksena saatiin kolme laskentalehteä, jotka keskittyvät käsittelemään pesurien lujuuslaskennan keskeisiä kohteita. Laskentalehdet sisältävät palkkilaskentaa, nurjahdustarkasteluja sekä aukon vahvistamisen sylinterirakenteessa.

TAMPERE POLYTECHNIC
Mechanical Engineering
Modern production systems

Vuorinen, Antti Improving strength analysis methods in scrubber design at Kvaerner
Power Company
Tutkintotyö 31 sivua + 22 liitesivua
Työn ohjaaja TkL Matti Lähteenmäki
Työn teettäjä Kvaerner Power Oy, Environmental Systems
Huhtikuu 2005
Hakusanat scrubber, strength analysis

ABSTRACT

The purpose of this work was to speed up the scrubber design process in Kvaerner Power Company by introducing a software-based tool for strength analysis. The work resulted three different calculation sheets which were made with Mathcad 11 Enterprise Edition. The theories behind those sheets were gathered from the standards that were already been used in calculations of the scrubbers. This report consists of the introduction of those sheets.

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	5
2 TEORIAA	6
2.1 Laskentalehti 1: Beam stress and strain	6
2.1.1 Neliömomentti	6
2.1.2 Steinerin sääntö	6
2.1.3 Taivutusvastus suorassa taivutuksessa	7
2.2 Laskentalehti 2: Buckling resistance	8
2.2.1 Nurjahdus ja lommahdus	8
2.2.2 Eulerin teoria	9
2.3 Laskentalehti 3: Opening reinforcement	10
2.3.1 Aukon vahvistaminen	10
2.3.2 Leikatun sylinterin neliömomentti	11
3 TYÖN SUORITTAMISEN KUVAUS	12
4 TULOKSET	13
4.1 Laskentalehtien rakenne	13
4.2 Laskentalehti 1: Beam stress and strain	14
4.2.1 Esittely	14
4.2.1 Lähtöarvot	14
4.2.2 Ympyräprofiilit	15
4.2.3 Oma profiili	16
4.2.4 Kanavalevyn vaikutus	18
4.2.5 Valmiiksi lasketut profiilin arvot	19
4.2.6 Tulossivu	20
4.2.7 Kuormitustapaukset	21
4.3 Laskentalehti 2: Buckling resistance	22
4.3.1 Esittely	22
4.3.2 Lähtöarvot	22
4.3.3 Nurjahdustarkastelu	24
4.3.4 Lommahdustarkastelu	25
4.4 Laskentalehti 3: Opening reinforcement	26
4.4.1 Esittely	26
4.4.2 Lähtöarvot	26
4.2.3 Jäykisteen tuloskenttä	27
4.2.4 Valitun jäykisteen tietojen syöttökenttä	28
4.4.5 Tulokset	29
5 TULOSTEN TARKASTELU	30
LÄHTEET	31
LIITTEET	
Liite 1: Ensimmäinen laskentalehti	
Liite 2: Toinen laskentalehti	
Liite 3: Kolmas laskentalehti	

1 JOHDANTO

Kansainväliseen Aker Kvaerner -konserniin kuuluva Kvaerner Power vastaa konsernin maailmanlaajuisesta kattila-, haihdutin- ja ympäristönsuojeluosaamisesta. Yhtiö tarjoaa teknologiaa ja palveluita kemialliselle sellu- ja paperiteollisuudelle sekä voimantuotantalalle. Kvaerner Powerin ympäristöpuolen osaamisesta vastaa Tampereella sijaitseva Ympäristöjärjestelmät-yksikkö. /6/

Työ aloitettiin aiheen määrittämisellä. Kvaerner Powerin Ympäristöjärjestelmät-yksikössä oli työni aloittamisen aikaan käynnistynyt uuden suunnittelutyökalun kehitysprosessi. Kehitysprosessin oli tarkoitus tuottaa ohjelmistopohjainen suunnitteluautomaatti pesureiden piirustusten automaattista tuottamista varten, joten työni oli mielekästä liittää sen ympärille. Suunnitteluautomaatin kehitystyössä oli tultu siihen tulokseen, että lujuuslaskenta olisi syytä pitää irrallaan varsinaisen automaatin rakenteesta. Automaatti ei siis suorita sisällään varsinaista lujuuslaskentaa vaan toimii erikseen määritettyjen lujuuslaskennallisten parametrien varassa. Jotta automaatin nopeudesta saataisiin maksimaalinen hyöty, pitäisi näitä parametreja kyetä tuottamaan mahdollisimman nopeasti. Tämän vuoksi työni aiheeksi valittiin juuri lujuuslaskennan virtaviivaistaminen.

Virtaviivaistaminen päätettiin toteuttaa siirtämällä pesurin rakenteisiin liittyvä lujuuslaskenta tietokonepohjaisille laskentalehdille. Tämä nopeuttaisi laskutoimitusten suorittamista sekä helpottaisi tulosten dokumentointia ja arkistointia. Ohjelmistoksi valittiin Kvaerner Power Oy:ssä jo aiemminkin käytetty Mathcad 11 sen monipuolisten matemaattisten ominaisuuksien takia.

2 TEORIAA

2.1 Laskentalehti 1: Beam stress and strain

2.1.1 Neliömomentti /2/

Ensimmäisen laskentalehden keskeinen teoria liittyy palkin poikkileikkauksen ominaisuuksiin. Palkin poikkileikkauksen geometria vaikuttaa merkittävästi syntyviin jännityksiin palkkia taivutettaessa. Laskentalehdessä lähemmän tarkastelun kohteina ovat palkin poikkileikkauksen suureista neliömomentti ja taivutusvastus.

Poikkileikkauksen neliömomentti on riippuvainen pinta-alan suuruudesta, sen geometriasta sekä siitä, minkä akselin suhteen asiaa tarkastellaan. Useat rakenteissa käytettävät taivutuksenalaiset profiilit ovat symmetrisiä ainakin yhden painopisteensä kautta kulkevan akselin suhteen. Taivutuksessa myös neutraaliakseli kulkee usein tällä samalla akselilla, joten neliömomentit määritetään symmetria-akselin suhteen. Tällöin toinen neliömomentti on suurin ja toinen pienin kaikista poikkipinnan painopisteen suhteen lasketuista neliömomenteista. Näitä neliömomenteja nimitetään pinnan pääneliömomenteiksi ja niitä merkitään laskentalehdissä symboleilla I_Z ja I_Y . Pääneliömomenttien määrittäminen ei edellytä symmetria-akselin olemassaoloa. Tällöin pääneliömomentit määritetään painopisteen kautta kulkevan, keskenään kohtisuoran akseliparin suhteen.

2.1.2 Steinerin sääntö /2/

Laskettaessa monimutkaisen profiilin neliömomenttia voi olla hyödyllistä jakaa määritettävä pinta useampiin osapintoihin. Jos kaikilla osapinnoilla on yhteinen painopisteakseli voidaan osapintojen neliömomentit laskea suoraan yhteen. Reikien osapinta-alojen neliömomentit puolestaan vähennetään summasta.

Osapinta-alojen painopisteakseliin sijaitessa erillään toisistaan on ensin määritettävä kaikkien osapinta-alojen yhteinen painopisteakseli. Tämän jälkeen voidaan soveltaa Steinerin sääntöä

$$I_z = \sum I + \sum A * a^2$$

Ensin lasketaan jokaisen osa-alueen neliömomentti I osa-alueen oman painopisteakselin suhteen. Sitten lasketaan jokaisen osa-alueen pinta-ala A ja lopuksi jokaisen osa-alueen painopisteakselin etäisyys a koko poikkipinnan painopisteakseliin.

2.1.3 Taivutusvastus suorassa taivutuksessa /2/

Poikkileikkauksessa vaikuttavista jännityksistä merkittävin on itseisarvoltaan suurin normaalijännitys. Siksi laskennassa käytetään poikkipinnan geometriasta saatavaa taivutusvastusta, joka antaa suoraan poikkipinnan suurimman normaalijännityksen itseisarvon. Taivutusvastuksesta käytetään laskentalehdissä merkintää W . Taivutusvastus saadaan kaavasta

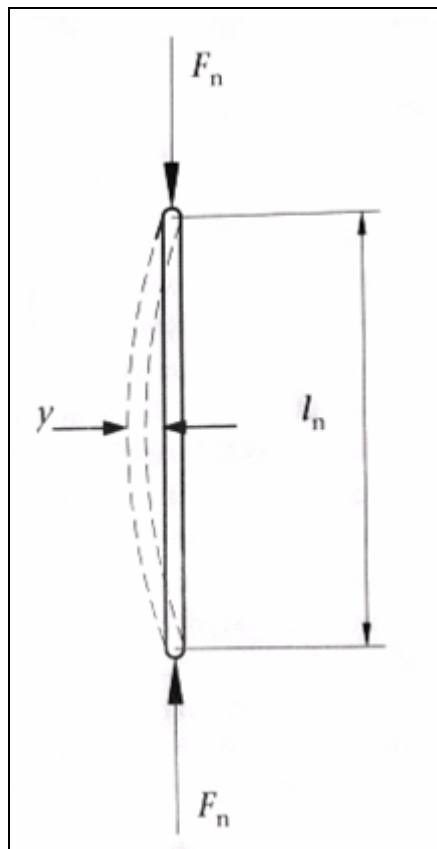
$$W = \frac{I}{e}$$

jossa I on poikkipinnan neliömomentti ja e suurin reunaetäisyys neutraaliakselille taivutusmomentin tason suunnassa.

2.2 Laskentalehti 2: Buckling resistance

2.2.1 Nurjahdus ja lommahdus /2/

Toisessa laskentalehdessä keskitytään nurjahdukseen ja lommahdukseen. Nurjahduksella tarkoitetaan ilmiötä, jossa puristuksessa oleva hoikka sauva taipuu sivulle, ennen kuin sauvan puristusmyötöraja on saavutettu. Nurjahtaminen tapahtuu ennen puristusjännityksen maksimiarvon saavuttamista ja on siten usein määräävä tekijä rakenteiden mitoituksessa. Sauvan taipumus nurjahtaa riippuu sekä sauvan mitoista että sen materiaalista ja tuennasta.



Kuva 1. Hoikan sauvan nurjahdus /2/

Nurjahdus on tyypillistä pitkille ja hoikille sauvoille. Jos sauva on pituuteensa nähden paksu, ei nurjahdusta esiinny, vaan sauva tyssäättyy. Tyssäätynyt sauva, sivulle taipumisen sijaan, painuu pituusakselinsa suunnassa kasaan. Sauvan profiilin koostuessa hitsatuista levyistä, syntyy tietyillä levynpaksuuden suhteilla mahdollisuus paikalliseen lommahdukseen. /1/ Lommahduksessa levyn pinta rutistuu puristuksen vaikutuksesta ja rakenne lakkaa käyttäytymästä aiotulla tavalla.

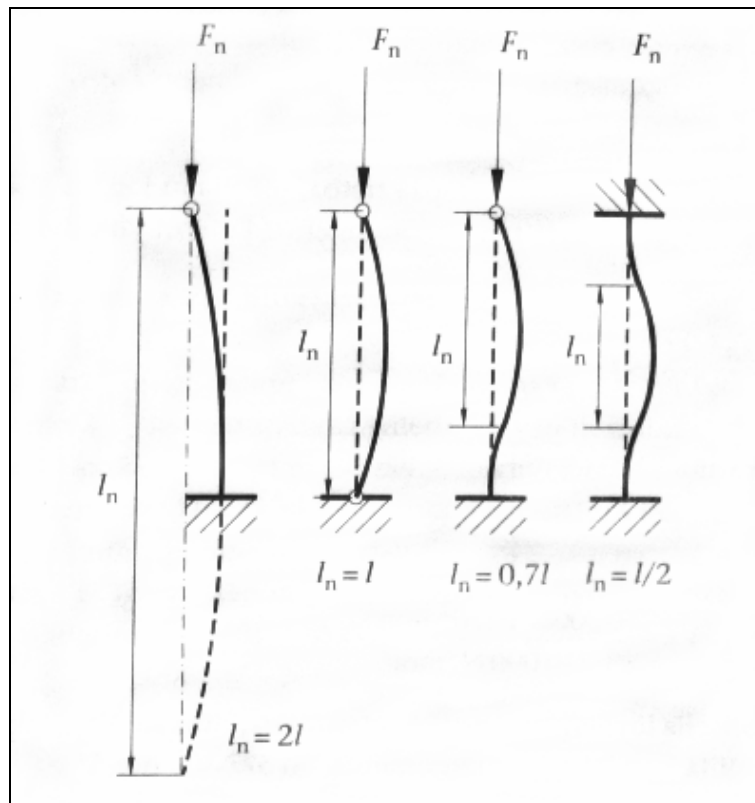
2.2.2 Eulerin teoria /2/

Sauvaa kuormitettaessa aksiaalisesti se alkaa taipua sivulle kuin nurjahtakseen. Kuormittavan voiman F ollessa riittävän pieni palautuu sauva alkuperäiseen muotoonsa kuormituksen poistuessa. Pienikin voiman lisäys saattaa kuitenkin aiheuttaa huomattavan taipuman lisäyksen ja sauvan rikkoutumisen. Tällöin voidaan määrittellä kriittinen voima F_n , jonka sauva vielä kestää nurjahtamatta.

Eulerin mukaan sauvan nurjahdusvoima noudattaa kaavaa

$$F_n = \frac{\pi^2 * E * I}{l_n^2}$$

missä E on materiaalin kimmokerroin, I sauvan neliomomentti ja l_n sauvan nurjahduspituus. Sauvan nurjahduspituus on riippuvainen tuennasta kuvan 2 mukaisesti.



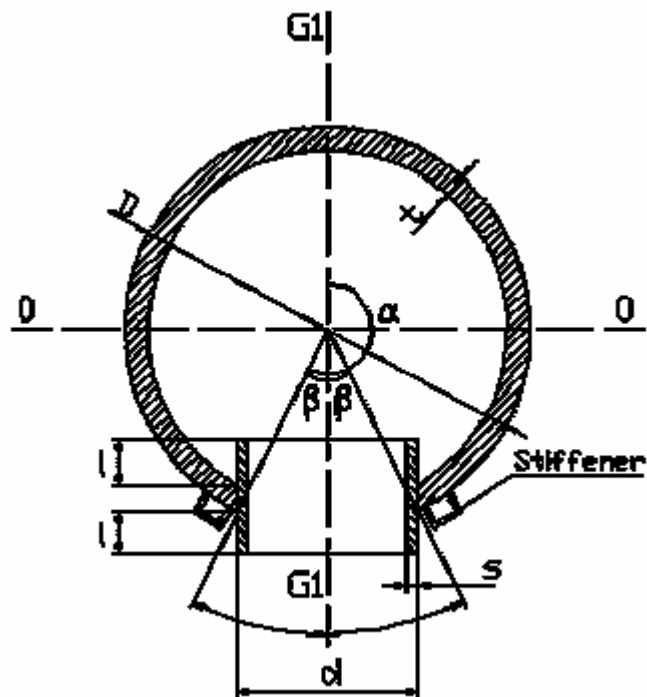
Kuva 2. Erilaisten tuentatapojen nurjahduspituudet /2/

2.3 Laskentalehti 3: Opening reinforcement

2.3.1 Aukon vahvistaminen /3/

Kolmannen laskentalehden tarkoitus on määrittää sylinteriin leikatun aukon riittävä tuenta. Sylinterirakenne heikkenee sitä enemmän mitä suurempi aukko siihen tehdään. Tuennalla pyritään kompensoimaan aukon aiheuttama heikentävä vaikutus rakenteelle.

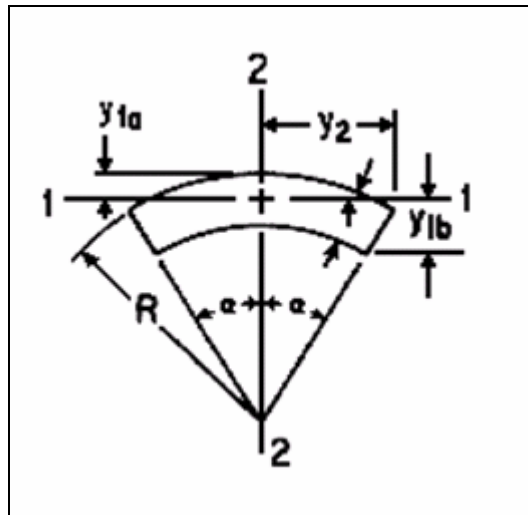
Tapausta tarkastellaan sylinterin poikkileikkauksen suureiden avulla. Sylinterin poikkileikkauksen neliömomentti pienenee, kun siitä leikataan osa pois. Perusajatuksena on kompensoida sylinterin pienentynyt neliömomentti alkuperäiselle tasolle asettamalla tukia aukon ympärille.



Kuva 3. Sylinterin poikkileikkaus

2.3.2 Leikatun sylinterin neliömomentti /4/

Teoksen *Roark's formulas for stress and strain* mukaan ympyrärenkaan sektorin pääneliömomentit ovat:



Kuva 4. Leikatun sylinterin pääneliömomentit /4/

$$I_1 = R^3 t \left[\left(1 - \frac{3t}{2R} + \frac{t^2}{R^2} - \frac{t^3}{4R^3} \right) * \left(\alpha + \sin \alpha \cos \alpha - \frac{2 \sin^2 \alpha}{\alpha} \right) + \frac{t^2 \sin^2 \alpha}{3R^2 \alpha \left(2 - \frac{t}{R} \right)} \left(1 - \frac{t}{R} + \frac{t^2}{6R^2} \right) \right]$$

$$I_2 = R^3 t \left(1 - \frac{3t}{2R} + \frac{t^2}{R^2} - \frac{t^3}{4R^3} \right) * (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha)$$

3 TYÖN SUORITTAMISEN KUVAUS

Työtä tehtiin Kvaerner Power Oy:n Ympäristöjärjestelmät-yksikön tiloissa Tampereella lokakuusta 2004 maaliskuuhun vaihteeseen 2005. Opinnäytetyö tuli suoraan jatkeeksi kesätoilleni samassa yrityksessä ja yritys tarjosi mahdollisuuden tehdä työtä samassa työpisteessä kuin olin kesänkin viettänyt.

Työ alkoi palaverilla lokakuussa 2004. Palaverissa rajattiin työn aihe ja valittiin työn tekoon sopiva ohjelmisto. Kuten aiemminkin on jo kerrottu, valinta kohdistui Mathcad 11 -ohjelmistoon. Yrityksen puolelta apua ja ohjausta työn kuluessa tarjosi Heikki Airikkala.

Varsinaisen työnteon aloitin tutustumalla käytettävään ohjelmistoon. Mathcad oli minulle ennestään täysin tuntematon ohjelmisto, mutta muutaman viikon opiskelun jälkeen ohjelman toiminta ja sen mahdollisuudet alkoivat avautua. Huomattava osa työhön käytetystä ajasta kului siitä huolimatta hukkaan monien ohjelmarakenteen toteutusmallien päättyessä tavalla tai toisella umpikujaan.

Laskentalehtien koostaminen tapahtui samassa järjestyksessä, kuin ne tässä raportissa esitellään. Lähdemateriaali valittiin Heikki Airikkalan asiantuntemusta hyväksikäyttäen ja lehtien rakennetta hiottiin, kunnes ohjelma oli saavuttanut molempia osapuolia tyydyttävän muodon.

4 TULOKSET

Laskentalehdet kokonaisuudessaan ovat raportin liitteinä. Liitteitä selattaessa tulee ottaa huomioon, että liite on ainoastaan kuva valmiin ohjelman tulosteesta. Se ei siten sisällä kaikkea ohjelmaan kirjoitettua dataa esim. aliohjelmia. Tässä luvussa jokaisesta laskentalehdestä esitellään vain toiminnan ja käytön kannalta keskeisiä kohtia. Sitä ennen käydään kuitenkin läpi kaikille laskentalehdille yhteisiä piirteitä.

4.1 Laskentalehtien rakenne

Laskentalehdet on pyritty tekemään ulkoasultaan mahdollisimman yhteneväisiksi. Tämä siistii dokumenttien ulkoasua sekä helpottaa uuden laskentalehden käytön ja toiminnan ymmärtämistä.

Jokainen laskentalehti alkaa nimikentällä, joka kertoo lehdellä suoritettavan lujoustarkastelun kohteen. Kentästä käy ilmi muitakin tärkeitä tietoja esim. lujuuslaskelman tekijän ja tarkastajan nimi sekä laskentalehden tekoon käytetyt lähteet.

<u>OPENING REINFORCEMENT:</u>	
Project:	-
Equipment:	-
Revision:	-
Design:	-
Date:	-
Approved:	-
Date:	-
List of references:	CICIND Model Code: Commentary No. 5 - Openings, Roark's formulas for stress and strain

Kuva 5. Laskentalehtien nimikenttä

Laskentalehtien rakenne jakautuu pääasiallisesti kolmeen erityyppisen kenttään. Syöttökenttiin, joihin syötetään laskennan arvoja, tuloksenttiin, joihin ohjelma tulostaa laskennan tulokset sekä tietokenttiin, joissa on huomautuksia liittyen laskentaan. Käytettävyyden helpottamiseksi syöttökentät on pyritty sijoittamaan laskentalehtien alkuun, silloin kun se on ollut ohjelman rakenteen kannalta mahdollista.

4.2 Laskentalehti 1: Beam stress and strain

4.2.1 Esittely

Nimensä mukaisesti ensimmäinen laskentalehti tutkii palkin jännityksiä ja taipumia. Laskentalehden alussa määritetään palkin poikkileikkauksen dimensiot ja loppuosa koostuu erilaisten tuentatapojen kuormitustapauksista.

4.2.1 Lähtöarvot

Ensimmäinen laskentalehti alkaa, kuten muutkin laskentalehdet, aiemmin esitellyllä nimikentällä. Heti nimikentän alapuolelta löytyvät syöttökentät.

<u>STARTING VALUES:</u>	
<u>Force applied to the beam:</u>	<u>Certainty factor:</u>
F := 10000N	n := 1.5
<u>Rp0,2 -limit:</u>	
$R_{p02} := 220 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	
<u>PROPERTIES OF THE BEAM:</u>	
<u>Length:</u>	<u>Modulus of elasticity:</u>
L := 4000mm	$E := 200000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
<u>Density:</u>	
$\text{Density} := 8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	

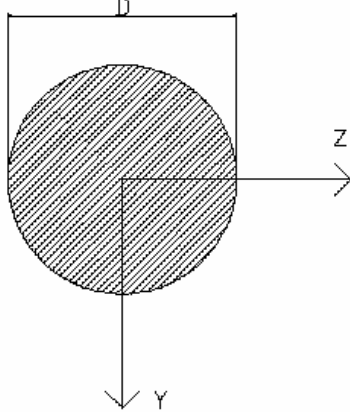
Kuva 6. Syöttökentät lähtötiedoille

Syöttökenttiin määritellään palkkia kuormittava voima, laskennan varmuuskerroin, materiaalin myötöraja, kimmokerroin ja tiheys sekä palkin pituus. Kuvan 6 tapauksessa materiaalin myötörajaa ei ole tunnettu ja se on korvattu materiaalin 0,2-rajan vähimmäisarvolla.

4.2.2 Ympyräprofiilit

Laskentalehden sivuilla 2 ja 3 siirrytään täyttämään laskennassa käytettävän profiilin dimensioita. Palkin profiilin valinta tapahtuu kolmen vaihtoehdon väliltä. Ympyräprofiili (kohta A), putkiprofiili (kohta B) sekä oma profiili (kohta C). Profiilien lisäksi voidaan valita kohta D, johon voidaan syöttää suoraan palkin poikkileikkauksen suuret. Tätä kohtaa käytetään haluttaessa suorittaa tarkastelu esim. valmistajan antamien laskennallisten arvojen pohjalta. Heti alussa on syytä ottaa huomioon, että ainoastaan laskettavan profiilin dimensioita on tarpeellista käsitellä. Muiden profiilien dimensiot voidaan jättää rauhaan, vaikka niissä olisi tarpeettomia lukuarvoja. Laskettavan profiilin valinta tapahtuu vasta laskentalehden sivulla 7.

A.) Round profile



Diameter
 $D := 10000\text{mm}$

Cross-section area
 $A_A := \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \pi \Rightarrow A_A = 7.85 \times 10^7 \text{mm}^2$

Moment of inertia
 $I_{zA} := \frac{\pi}{64} D^4$
 $I_{yA} := \frac{\pi}{64} D^4$

Bending resistance
 $W_{zA} := \frac{\pi}{32} D^3$
 $W_{yA} := \frac{\pi}{32} D^3$

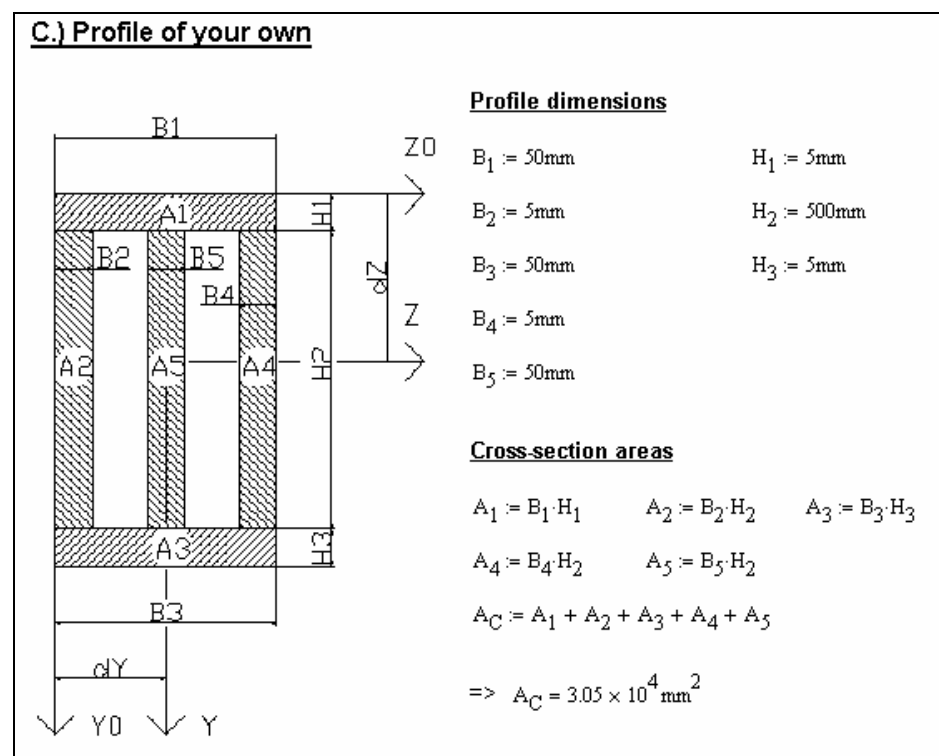
Radius of inertia
 $i_{zA} := \sqrt{\frac{I_{zA}}{A_A}}$ $i_{yA} := \sqrt{\frac{I_{yA}}{A_A}}$

Kuva 7. Profiilin dimensioiden syöttökenttä

Laskentalehden sivulla 2 olevat profiilit A ja B ovat rakenteeltaan samankaltaisia ja toiminnaltaan yksinkertaisia. Niiden käyttö edellyttää pelkkää dimensioiden syöttämistä.

4.2.3 Oma profiili

Kohta C on rakenteeltaan hieman monimutkaisempi kuin kohdat A ja B. Kohdassa C voidaan luoda oma profiili käyttäen dimensioita suhteellisen vapaasti. Muodoltaan täysin vapaan profiilin määrittäminen on kuitenkin suhteellisen monimutkainen prosessi, joten laskentalehden suunnittelussa tyydyttiin sisällyttämään laskentaan vain käytetyimmät profiilimuodot. Näitä ovat suorakulmainen eli lattaprofiili sekä L-, C-, T-, I- sekä putkipalkkiprofiili.



Kuva 8. Oman profiilin dimensioiden syöttökenttä

Profiilista muokataan halutun kaltainen antamalla eri pinta-ala-alkioille dimensiot. Esimerkiksi pinta-ala A_1 koostuu dimensioista B_1 ja H_1 . C-profiili saadaan siis muodostettua antamalla dimensiot pinta-aloille A_1 , A_2 ja A_3 . Huomion arvoista on, että pinta-ala-alkioilla A_2 , A_4 ja A_5 yhteinen korkeustekijä, H_2 . Pinta-alat, joita ei haluta mukaan profiiliin, voidaan jättää pois asettamalla niiden dimensiot nolleksiksi.

Ohjelman oikean toiminnan kannalta on varmintä käyttää profiilien luomiseen kuvan 9 mukaisia pinta-ala-alkioita. Epäsymmetristen profiilien kohdalla on syytä suosia syöttötapaa, joka asettaa profiilin leveämmän laipan pinta-ala-alkioon A1.

PROFIILI	KÄYTETTÄVÄT ALKIOT
Latta	A1
L-profiili	A1, A2
C-profiili	A1, A2, A3
I-profiili	A1, A3, A5
T-profiili	A1, A5
Putkipalkkiprofiili	A1, A2, A3, A4

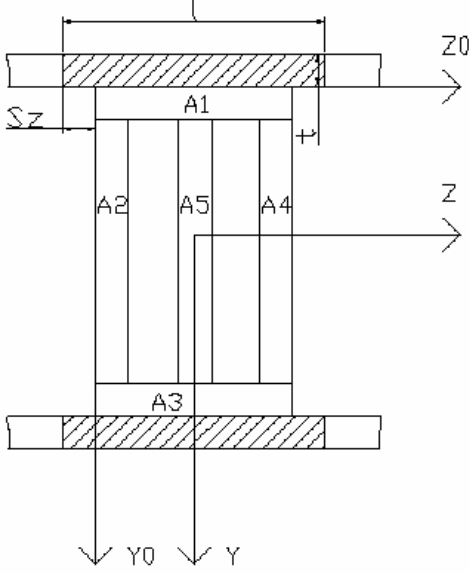
Kuva 9. Eri profiileissa käytettävät pinta-ala-alkiot

Dimensioiden syötön jälkeen ohjelma laskee profiilin painopisteet koordinaatiston molempien akselien suhteen. Seuraavaksi se määrittää neliömomentit molempien akselien suhteen. Lisäksi lasketaan mm. neliösäteet, reunaetäisyydet sekä taivutusvastukset molempien akseleiden suunnassa. Näiden laskutoimitusten tulokset esitetään vasta myöhemmin omalla tulossivullaan selkeyden vuoksi.

4.2.4 Kanavalevyn vaikutus

Seuraava kohta, joka tarvitsee käyttäjän puuttumista, on kanavalevyn vaikutuksen määrittäminen. Useat määritettävät profiilit liittyvät joko metallisen kanavan seinämään tai vastaavaan rakenteeseen. Siksi laskennassa haluttiin ottaa huomioon myös mahdollisen liittyvän rakenteen jäykistävä vaikutus.

Duct sheet properties



Question A:
Will the duct sheet be included to calculation?
Answer_A := NO (Type YES or NO)

Duct sheet properties
t := 10mm
l := 100mm
Sz := 0mm

Question B:
The duct sheet is attached to profile's...
Answer_B := TOP (Type TOP or BOTTOM)

Kuva 10. Kanavalevyn dimensioiden syöttökentät

Se otetaanko kanavalevyn vaikutus laskennassa huomioon, valitaan vastaamalla kysymykseen A joko myöntävästi tai kieltävästi. Mikäli kysymykseen vastattiin myöntävästi, täytetään seuraavaksi kanavalevyn dimensiot sekä etäisyys S_z . S_z tarkoittaa laskennassa huomioon otettavan kanavalevyn alueen reunan sijaintia verrattuna profiilin vasempaan reunaan. S_z saa positiivisia arvoja profiilin vasemman reunan oikealla puolella ja vastaavasti negatiivisia arvoja reunan vasemmalla puolella. Viimeisenä valitaan poikkileikkauksen puoli, johon kanavalevy kiinnittyy. Valittavana on joko profiilin ylä- tai alapinta.

4.2.5 Valmiiksi lasketut profiilin arvot

Mikäli laskennassa päädytään käyttämään valmistajan tai muun vastaavan tahon valmiiksi laskemia arvoja, ne voidaan syöttää suoraan kohtaan D.

D.) Manufacturer's values			
Moment of inertia	Bending resistance	Radius of inertia	Metric weight
$I_{zD} := 5000\text{mm}^4$	$W_{zD\text{max}} := 15\text{mm}^3$	$i_{zD} := 1500\text{mm}^2$	Metripaino _D := 25kg
$I_{yD} := 5000\text{mm}^4$	$W_{zD\text{min}} := 15\text{mm}^3$	$i_{yD} := 1500\text{mm}^2$	
	$W_{yD\text{max}} := 15\text{mm}^3$		
	$W_{yD\text{min}} := 15\text{mm}^3$		

Kuva 11. Syöttökenttä profiilin valmistajan arvoille

Kenttään siis syötetään pääneliömomentit, taivutusvastukset ja neliösäteet molempien akselien suunnassa sekä profiilin massa metriä kohti.

4.2.6 Tulossivu

Kun profiilin arvot on saatu määritettyä jollakin edellä mainituista tavoista, voidaan edetä laskentalehden sivulle 7. Tälle sivulle tulostuvat halutun profiilin suureet. Ensinnäkin kuitenkin valitaan käytettävä profiili seuraavan kuvan mukaisesti.

PROFILE INFORMATION PAGE

CHOOSE THE PROFILE USED IN CALCULATION:

Profile := C (Type A,B,C or D)

- SHAPE = "ERROR"

Kuva 12. Profiilin valinta

Kenttä on tehty helpottamaan ohjelman käyttöä. Kentän ansiosta kaikissa profiileissa voi olla yhtä aikaa dimensiot syötettynä, mutta ohjelma käyttää niistä vain halutun profiilin tietoja. Tällöin muita syöttökenttiä ei tarvitse tyhjentää silloinkaan, kun niitä ei tarvita. Kenttä tarkastaa myös oman profiilin tyyppin ja ilmoittaa, jos sen syöttämisessä on tapahtunut virhe, kuten kuvassa 12. Tämä pienentää mahdollisten virhelyöntien aiheuttamien laskentavirheiden riskiä. Valintakentän alla on tulokenttä, johon profiilista laskettu informaatio tulostetaan.

INFORMATION OF THE CHOSEN PROFILE:

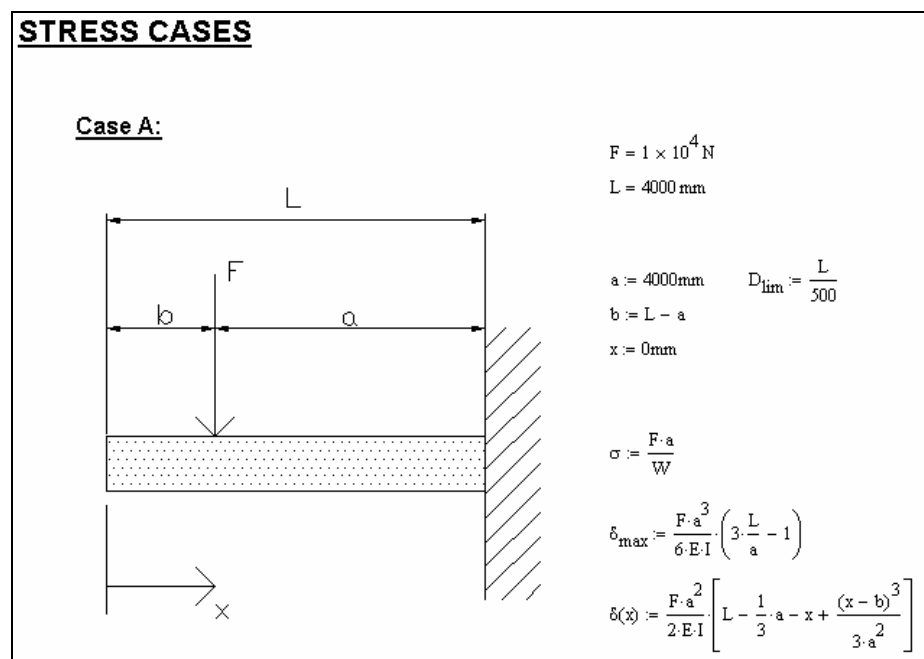
$I_Z = 6.57 \times 10^8 \text{ mm}^4$	$I_Y = 7.85 \times 10^6 \text{ mm}^4$	$i_Z = 146.75 \text{ mm}$
$W_{Z\max} = 2.58 \times 10^6 \text{ mm}^3$	$W_{Z\min} = 2.58 \times 10^6 \text{ mm}^3$	$i_Y = 16.05 \text{ mm}$
$W_{Y\max} = 3.14 \times 10^5 \text{ mm}^3$	$W_{Y\min} = 3.14 \times 10^5 \text{ mm}^3$	Metripaino = 244 kg

Kuva 13. Profiilin ominaisuuksien tulokenttä

Saman sivun alalaidasta löytyy vielä kohta, jolla valitaan akseli, jonka suunnassa kuormitus vaikuttaa. Valinta tapahtuu kirjoittamalla kohtaan joko Y tai Z.

4.2.7 Kuormitustapaukset

Laskentalehden alkuosaa profiilin tulossivuun saakka voidaan käyttää irrallisena sovelluksena haluttaessa määrittää profiilien poikkileikkauksen suureita. Se voi siis toimia esimerkiksi apuna muita laskentalehtiä varten tarvittavan materiaalin tuottamisessa. Se on kuitenkin myös suorassa yhteydessä laskentalehtien loppuosan kuormitustapauksiin. Laskentalehden loppuosaa esittää valitun profiilin omaavan palkin jännitys- ja taipumatarkasteluja erilaisten kuormitusten ja tuentojen alaisena.



Kuva 14. Esimerkki kuormitustapauksen tarkastelusta

Kuormitustapauksia on kaikkiaan kuusi. Kuvassa 14 niistä esitellään vain ensimmäinen, sillä niiden toiminta on keskenään huomattavan samankaltaista. Voiman F sijaintia voidaan vaihtaa muuttamalla etäisyyden a arvoa. Ohjelma tulostaa sivulle suurimman taiputuksen aiheuttaman jännityksen arvon sekä palkin suurimman taipuman arvon. Lisäksi taipumaa voidaan tarkastella mielivaltaisessa kohdassa palkkia etäisyyden x avulla.

Haluttaessa tarkastella kohdan 4.2.3 oman profiilin kuormitustapauksia tulee ottaa huomioon, että tapaukset pätevät vain suoralle taiputukselle. Poikkileikkausta kuormittavan voiman tulee siis vaikuttaa poikkileikkauksen pääakselin suunnassa. Kuormitustapauksia ei siten voida soveltaa sellaisille profiileille, joissa Y ja Z eivät ole pääakselit, esim. L -profiili.

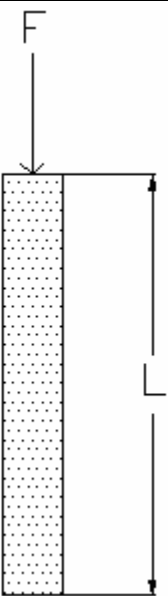
4.3 Laskentalehti 2: Buckling resistance

4.3.1 Esittely

Toinen laskentalehti käsittelee sauvan nurjahdusta ja tyssäntymistä. Ohjelmaa on tarkoitus käyttää mm. pesurin jalkoja mitoitettaessa. Laskentalehti määrittää halutulle sauvalle suurimman jännityksen sekä nurjahdusta että lommahdusta vastaan SFS 3200 –standardin mukaisesti.

4.3.2 Lähtöarvot

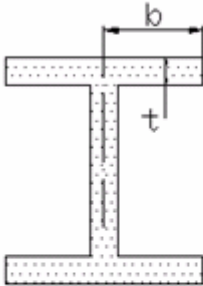
Laskentalehti alkaa tarkasteltavan palkin tietojen syöttämisellä. Kenttiin syötetään alla olevan kuvan mukaisesti sauvan pituus, materiaalin kimmokerroin, tuennasta riippuva nurjahduspituus sekä sauvaan kohdistuvan voiman suuruus.

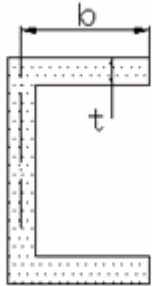
<u>BEAM PROPERTIES:</u>	
<u>Beam type</u> C-BAR 100x50x1	<u>Beam length</u> L := 2000mm
<u>Effective beam length</u> $L_n := L$	<u>Modulus of elasticity</u> E := 210000MPa (MPa := 10^6 Pa)
<u>Force applied to beam</u> F := 10000N	

Kuva 15. Sauvan ominaisuuksien syöttökenttä

Seuraavaksi täytetään sauvan poikkileikkauksen suureiden syöttökenttä. Syöttökenttä on kuvan 16 mukainen.

CROSS-SECTIONAL PROPERTIES:





Cross-sectional dimensions

$b := 49.5\text{mm}$ $t := 1\text{mm}$

NOTICE!

b/t -values should not exceed the value

$0.66 \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{sa}}}$, if possible.

CHECK = "Safe value exceeded"

Cross-section area

$A := 198\text{mm}^2$

Moment of inertia

$I := 5.06 \cdot 10^4 \cdot \text{mm}^4$

Tension in beam

$\sigma_{\text{beam}} := \frac{F}{A}$

Kuva 16. Sauvan poikkileikkauksen suureiden syöttökenttä

Kenttiin täytetään profiilin dimensiot b ja t . Poikkileikkauksen pinta-alan A ja neliömomentin I arvo voidaan laskea käyttäen apuna ensimmäistä laskentalehteä. Neliömomentin arvona on syytä käyttää arvoltaan pienempää pääneliömomenttia, sillä mikäli tuenta on samanlainen molemmissa pääsuunnissa, nurjahtaminen tapahtuu sauvan heikomman akselin suuntaisesti. Ohjelma tarkastaa jo tässä vaiheessa, että palkin mittasuhteet ovat nurjahdustarkastelujen kannalta tunnetulla alueella.

4.3.3 Nurjahdustarkastelu

Kun laskentalehden syöttösivut on saatu täytettyä, voidaan siirtyä tarkastelemaan tulossivuja. Ensimmäisenä tulossivuna on nurjahdustarkastelu laskentalehden sivulla 3.

Maximum tension allowed

$$\sigma_{sa} := 210 \text{ MPa} \qquad \alpha_k := \sqrt{\frac{\sigma_{sa}}{\sigma_{el}}} \Rightarrow \alpha_k = 1.259$$

$$\sigma_{nsall} := \begin{cases} \left(\frac{1}{1.5} \cdot \sigma_{sa}\right) & \text{if } 0 \leq \alpha_k \leq 0.2 \\ (0.741 - 0.372 \cdot \alpha_k) \cdot \sigma_{sa} & \text{if } 0.2 < \alpha_k < 1.33 \\ \left(\frac{1}{2.3 \cdot \alpha_k^2} \cdot \sigma_{sa}\right) & \text{if } 1.33 \leq \alpha_k \end{cases}$$

$\Rightarrow \sigma_{nsall} = 57.232 \text{ MPa}$

$\sigma_{beam} = 50.505 \text{ MPa} < \sigma_{nsall} = 57.232 \text{ MPa} \qquad \text{CHECK} = \text{"OK"}$

Kuva 17. Nurjahdustarkastelun lopputulos

Nurjahdustarkastelun aluksi ohjelma laskee Eulerin nurjahdusjännityksen, jota käytetään vertailun pohjana. SFS 3200 –standardin mukaan sauvan kriittinen puristusjännitys on pienempi kuin tämä Eulerin ihannesauvalle asettama nurjahdusjännitys. Tämä johtuu todellisen sauvan mahdollisesta esikaarevuudesta sekä todellisen puristuksen pienestä epäkeskeisyydestä. Kun sauvalle on valittu sopiva myötölujuus, ohjelma laskee mitoituksessa sallitun nurjahdusjännityksen SFS 3200 –standardin taulukon 3.431a mukaisesti. /5/

4.3.4 Lomahdustarkastelu

Sauvan tarkastelu lomahdusta vastaan tapahtuu samalla tavoin aiemmin käsiteltyyn nurjahdukseen verrattuna. Lomahdustarkastelu käyttää laskennan pohjana SFS 3200 –standardiin määritettyä taulukkoa 3.4712. /5/

Inspection against buckling: B

Maximum tension: Euler

$$\sigma_{e1} := 0.9 \cdot \left(0.43 + \frac{b^2}{L^2} \right) \cdot E \cdot \frac{t^2}{b^2} \quad \Rightarrow \quad \sigma_{e1} = 33.215 \text{ MPa}$$

$$\alpha_1 := 1.6 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{sa}}{E}} \quad \Rightarrow \quad \alpha_1 = 2.505$$

$\sigma_{csall} := \begin{cases} \frac{1}{1.5} \cdot \sigma_{sa} & \text{if } 0 < \alpha_1 \leq 0.7 \\ (1.02 - 0.50 \cdot \alpha_1) \cdot \sigma_{sa} & \text{if } 0.7 < \alpha_1 < 1.36 \\ \frac{1}{1.6} \cdot \sigma_{e1} & \text{if } 1.36 \leq \alpha_1 \end{cases}$
--

$$\sigma_{csall} = 20.76 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{beam} = 50.505 \text{ MPa} < \sigma_{csall} = 20.76 \text{ MPa} \quad \text{CHECK} = \text{"NOT OK"}$$

Kuva 18. Lomahdustarkastelu

Sivu ei edellytä käyttäjältä arvojen syöttämistä, vaan kaikki laskenta tapahtuu aikaisemmin syötettyjen arvojen varassa. Sekä nurjahdus- että lomahdustarkastelun päätteeksi ohjelma suorittaa saatujen sallittujen jännitysten vertailun sauvassa vaikuttavaan puristusjännitykseen. Kuvassa 18 näkyy ohjelman virheilmoitus sallitun jännityksen ylittyessä.

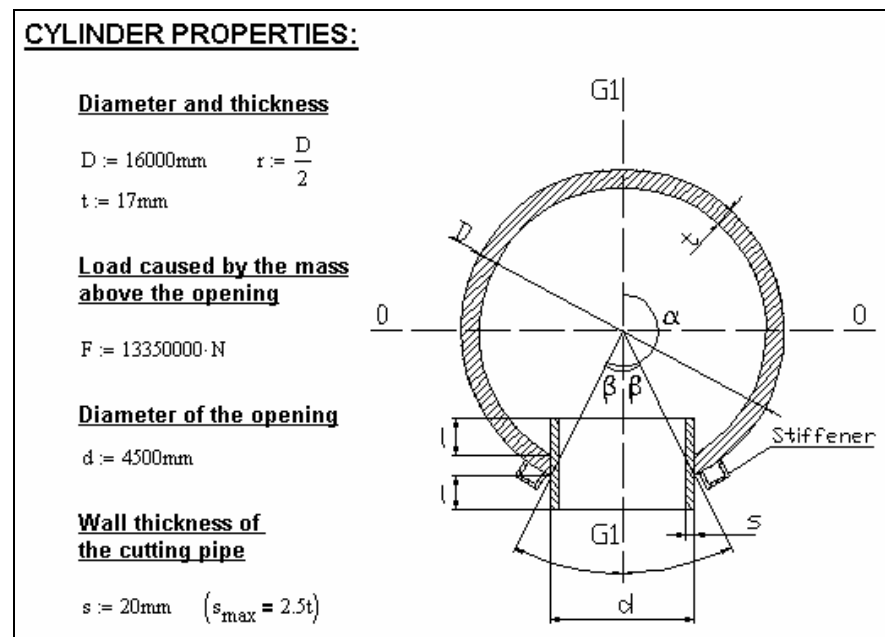
4.4 Laskentalehti 3: Opening reinforcement

4.4.1 Esittely

Viimeinen laskentalehti käsittelee aukon vahvistamista sylinterirakenteessa. Sen pääasiallinen käyttökohde on pesurin rakenteeseen hajukaasujen tuloyhdettä varten leikattavan aukon vahvistaminen.

4.4.2 Lähtöarvot

Ohjelma alkaa pesurin ja tuloyhteen dimensioiden syöttämisellä. Syöttökentän vieressä on kuva pesurin poikkileikkauksesta. Kuvassa on merkitty kirjaimin kaikki syöttökenttiin täydennettävät dimensiot.



Kuva 19. Pesurin ja tuloyhteen dimensioiden syöttökenttä

Heti kuvan alapuolella ohjelma laskee aukon synnyttämän kulman sekä muutamia aukon poikkileikkauksen suureita tulevaa laskentaa varten. Kentät eivät edellytä tietojen syöttämistä.

4.2.3 Jäykisteen tuloksenttä

Laskentalehden sivu kaksi poikkeaa ohjelmien yleisestä rakenteesta. Se on nimittäin syöttökenttien väliin sijoitettu tuloksenttä. Yleensä syöttökentät sijaitsevat kokonaisuudessaan ennen tuloksenttiä, mutta tähän on jouduttu tekemään poikkeus ohjelman luonteesta johtuen. Tuloksentän arvot ovat aukon jäykisteiden poikkileikkauksen minimipinta-aloja ja niitä tarvitaan, ennen kuin tietojen syöttämisessä voidaan siirtyä eteenpäin. Tästä johtuu niiden poikkeuksellinen sijaintia syöttökenttien keskellä.

Ohjelma määrittää yksittäiseltä jäykisteeltä vaadittavan minimipinta-alan kahdella eri menetelmällä. Menetelmien tulokset löytyvät laskentalehdestä otsikoiden *Method A* ja *Method B* alta. *A*-menetelmä määrittää vaadittavan pinta-alan yksinkertaisen kaavan avulla, jota esittää ratkaisuksi *Cicind Model Code: Commentary No. 5 /3/*. Kaavaa pidettiin jopa liian yksinkertaisena tapana, joten rinnalle rakennettiin toinen, *B*-kohdassa kuvattu menetelmä.

B-menetelmä määrittää leikatun sylinterin pääneliömomentit ja kompensoi leikkauksen aiheuttaman neliömomentin muutoksen jäykisteiden neliömomentilla. Käytettäväksi jäykisteen pinta-alaksi valitaan saaduista arvoista suurempi, sillä muutoin neliömomentti jää toisella akselilla alkuperäistä arvoaan pienemmäksi.

CROSS-SECTION AREA NEEDED FOR EACH STIFFENER:

Method A

$$A_{\min A} := 1.25 \cdot r \cdot t \cdot \sin(\beta)^{0.5} \Rightarrow A_{\min A} = 9.016 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

Method B

Moment of inertia on axle G-G = 0-0

$$Y_{1a} := r \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot \sin(\alpha)}{3 \cdot \alpha} \cdot \left(1 - \frac{t}{r} + \frac{1}{2 - \frac{t}{r}} \right) \right] \quad e := r - Y_{1a} \Rightarrow e = 786.842 \text{ mm}$$

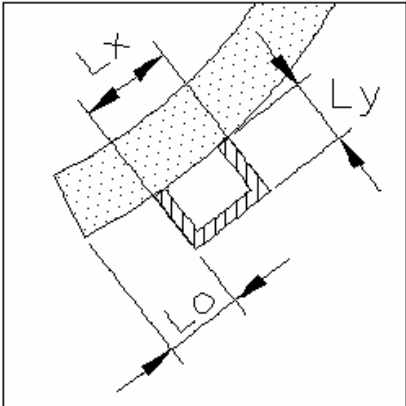
$$I_{\alpha GG} := r^3 \cdot t \cdot \left[\left(1 - \frac{3 \cdot t}{2 \cdot r} + \frac{t^2}{r^2} - \frac{t^3}{4 \cdot r^3} \right) \cdot \left(\alpha + \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) - \frac{2 \sin(\alpha)^2}{\alpha} \right) \dots \right. \\ \left. + \frac{t^2 \cdot \sin(\alpha)^2}{3 \cdot r^2 \cdot \alpha} \cdot \left(2 - \frac{t}{r} \right) \cdot \left(1 - \frac{t}{r} + \frac{t^2}{6r^2} \right) \right]$$

Kuva 20. Jäykisteen pinta-alojen kaksi laskentamenetelmää

4.2.4 Valitun jäykisteen tietojen syöttökenttä

Laskentalehden toiselta sivulta saadaan yksittäisen jäykisteen poikkileikkauksen suositeltava minimipinta-ala. Seuraavalla sivulla päästään tarkastelua jatkamaan valitsemalla käyttöön sopiva minimipinta-alaehdon täyttävä jäykisteprofiili.

STIFFENER PROPERTIES:		
Chosen profile		
- Square bar 250x250 mm		
Effective beam length		
$L_n := 2 \cdot d$		
Stiffeners measures and positioning		
$L_x := 250\text{mm}$	$L_y := 250\text{mm}$	
$L_o := 200\text{mm}$		
Moment of inertia	Cross-section area	Modulus of elasticity
$I := 3.26 \cdot 10^8 \cdot \text{mm}^4$	$A := 62500\text{mm}^2$	$E := 210000\text{MPa}$



The diagram shows a square stiffener profile with dimensions L_x , L_y , and L_o . The profile is a square bar with a side length of 250 mm. The dimensions L_x and L_y are the effective beam lengths in the x and y directions, both 250 mm. The dimension L_o is the stiffener spacing, 200 mm.

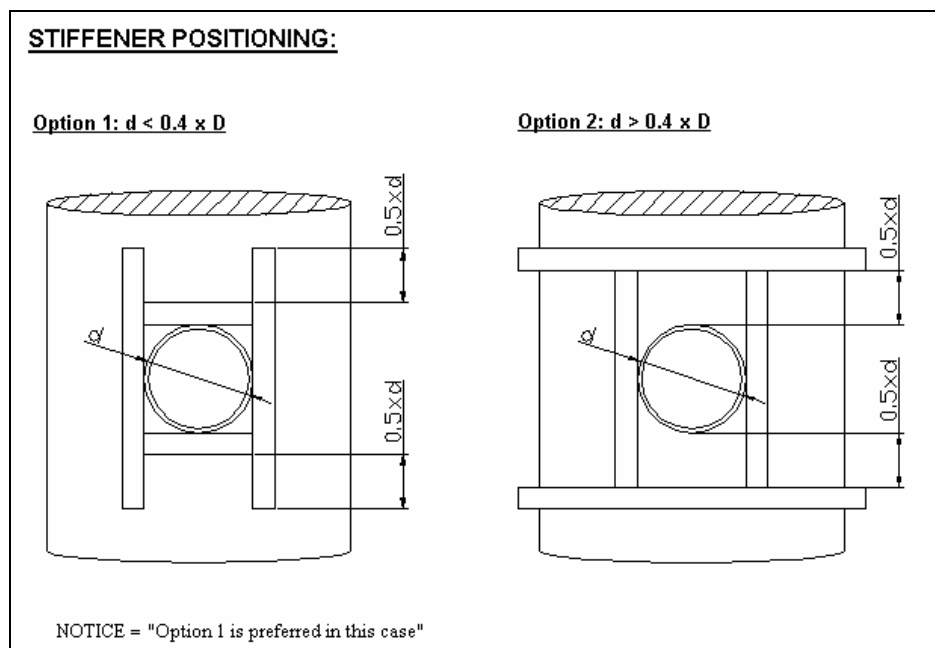
Kuva 21. Jäykisteprofiilin tietojen syöttökenttä

Syöttökenttään syötetään profiilin dimensiot sekä muut tarvittavat tiedot kuvan 21 mukaisesti. Profiilin neliömomenti voidaan laskea käyttäen apuna ensimmäistä laskentalehteä tai tilanteen salliessa valmistajan valmiiksi laskemia arvoja.

4.4.5 Tulokset

Jäykisteprofiilin tietojen syöttämisen jälkeen ohjelma suorittaa erilaisia tarkasteluja valitulla profiililla. Ensin ohjelma tarkastaa, että sallitut jännitykset eivät ylitä valitussa jäykisteprofiilissa. Seuraavaksi verrataan uuden vahvistetun sylinterin neliömomentin arvoa eri akseleilla alkuperäiseen, vielä leikkaamattomaan sylinteriin. Sen jälkeen on jäljellä vastaava vertailu taivutusvastuksen kohdalla. Vertaamalla arvoja alkuperäiseen, leikkaamattomaan sylinteriin, käyttäjän on mahdollista löytää kuhunkin tapaukseen soveltuva riittävän tukeva jäykisteprofiili.

Viimeisellä sivullaan laskentalehti esittelee suositeltavan tavan toteuttaa itse jäykiste. Ohjelma suorittaa käyttäjän puolesta valinnan kahdesta eri tuentatavasta, joiden käyttö riippuu sylinterin ja siihen leikattavan aukon keskinäisistä mittasuhteista.



Kuva 22. Jäykisteen rakenne eri tapauksissa

5 TULOSTEN TARKASTELO

Työn tuloksena syntyi kolme erillistä laskentalehteä. Laskentalehdet ovat ulkoasultaan yhtenevät ja siistit, kuten tavoitteeksi oli asetettukin. Laskentalehtien oikean toiminnan varmistamiseksi Heikki Airikkala on tarkastanut laskennan teoriaa työn edetessä. Jokaisen laskentalehden tuloksia on verrattu käsin laskettuihin arvoihin ajatusvirheiden ja muiden vastaavien ongelmien löytämiseksi.

Laskentalehtien sisältö on kirjoitussuojaamaton. Tämä mahdollistaa laskentalehden sisällön korjaamisen, mikäli laskentaan liittyvä teoria uudistuu tai muuttuu. Siten myös mahdollisen laskennassa olevan virheen korjaaminen onnistuu yhtä helposti kuin ohjelman muokin käyttö. Raporttia kirjoitettaessa laskentalehdistä ei ole vielä ehditty saamaan varsinaista käyttöön liittyvää palautetta.

LÄHDELUETTELO

Painetut lähteet

- 1 Outinen, Hannu – Koski, Juhani – Salmi, Tapio, Lujuusopin perusteet. Pressus Oy. s. 105–113, 208 ja 293-295
- 2 Hietikko, Esa, Lujuuslaskennan perusteet. Otava 2004. s. 78–79 ja 111–119
- 3 Cicind Model Code: Commentary No. 5 – Openings. s. 24-25
- 4 Roark's Formulas for Stress and Strain. s. 68
- 5 SFS 3200. Teräsrakenteiden suunnitteluohjeet. s. 52-57 ja 71-73

Sähköiset lähteet

- 6 Messulehti. [sähköinen dokumentti.] Tampereen yrityspäivät 2005. Saatavissa: www.yrityspaivat.com/messulehti_yp2005_light.pdf

BEAM STRESS CALCULATION:

Project: -
Equipment: -
Revision: -
Design: -
Date: -
Approved: -
Date: -
List of references: -

FORMULAS AND DEFINITIONS:

N := 1·newton

kN := 1000·N

$$q := \frac{F}{L}$$

MPa := $10^6 \cdot \text{Pa}$ **STARTING VALUES:****Force applied to the beam:**

F := 10000N

Certainty factor:

n := 1.5

Rp0.2 -limit:

$$R_{p0.2} := 220 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

PROPERTIES OF THE BEAM:**Length:**

L := 4000mm

Modulus of elasticity:

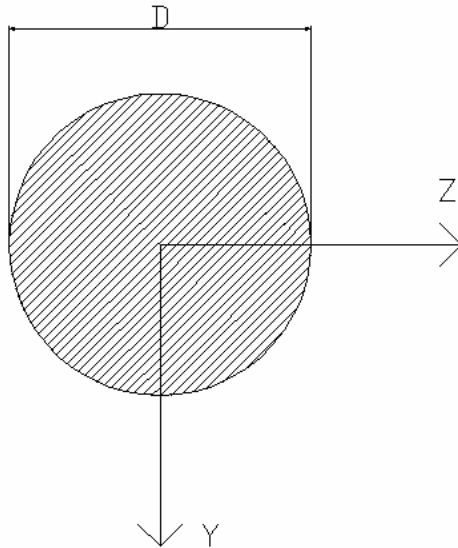
$$E := 200000 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Density:

$$\text{Density} := 8000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

SHAPE AND DIMENSIONS OF THE PROFILE

A.) Round profile



Diameter

$$D := 1000\text{mm}$$

Cross-section area

$$A_A := \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \pi \Rightarrow A_A = 7.85 \times 10^7 \text{mm}^2$$

Moment of inertia

$$I_{zA} := \frac{\pi}{64} D^4$$

$$I_{yA} := \frac{\pi}{64} D^4$$

Bending resistance

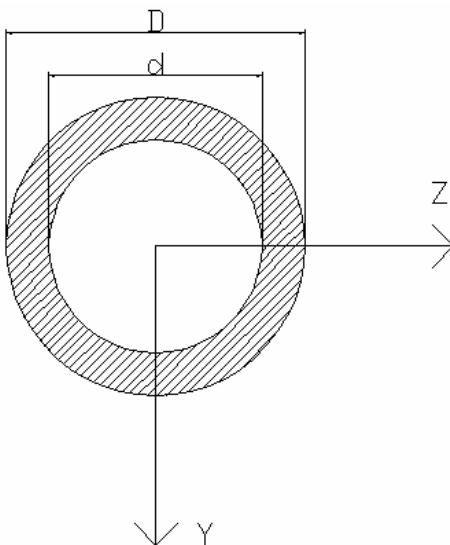
$$W_{zA} := \frac{\pi}{32} \cdot D^3$$

$$W_{yA} := \frac{\pi}{32} \cdot D^3$$

Radius of inertia

$$i_{zA} := \sqrt{\frac{I_{zA}}{A_A}} \quad i_{yA} := \sqrt{\frac{I_{yA}}{A_A}}$$

B.) Round tube profile



Diameter

$$D := 1000\text{mm}$$

$$d := 800\text{mm}$$

Cross-section area

$$A_B := \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \pi - \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi$$

$$\Rightarrow A_B = 2.83 \times 10^7 \text{mm}^2$$

Moment of inertia

$$I_{zB} := \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4)$$

$$I_{yB} := \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4)$$

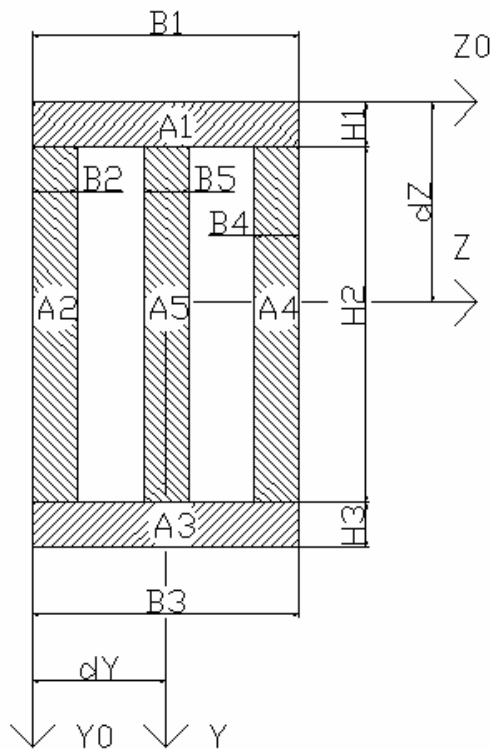
Bending resistance

$$W_{zB} := \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(D^4 - d^4)}{D}$$

$$W_{yB} := \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(D^4 - d^4)}{D}$$

Radius of inertia

$$i_{zB} := \sqrt{\frac{I_{zB}}{A_B}} \quad i_{yB} := \sqrt{\frac{I_{yB}}{A_B}}$$

C.) Profile of your own

Profile dimensions

$$B_1 := 50\text{mm}$$

$$H_1 := 5\text{mm}$$

$$B_2 := 5\text{mm}$$

$$H_2 := 500\text{mm}$$

$$B_3 := 50\text{mm}$$

$$H_3 := 5\text{mm}$$

$$B_4 := 5\text{mm}$$

$$B_5 := 50\text{mm}$$

Cross-section areas

$$A_1 := B_1 \cdot H_1$$

$$A_2 := B_2 \cdot H_2$$

$$A_3 := B_3 \cdot H_3$$

$$A_4 := B_4 \cdot H_2$$

$$A_5 := B_5 \cdot H_2$$

$$A_C := A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5$$

$$\Rightarrow A_C = 3.05 \times 10^4 \text{mm}^2$$

Centre of gravity on axle Z-Z

$$PK_{zA1} := \frac{B_1}{2}$$

$$PK_{zA2} := \frac{B_2}{2}$$

$$PK_{zA3} := \frac{B_3}{2}$$

$$PK_{zA4} := B_1 - \frac{B_4}{2}$$

$$PK_{zA5} := \frac{B_1}{2}$$

Centre of gravity on axle Y-Y

$$PK_{yA1} := \frac{H_1}{2}$$

$$PK_{yA2} := H_1 + \frac{H_2}{2}$$

$$PK_{yA3} := \left(H_1 + H_2 + \frac{H_3}{2} \right)$$

$$PK_{yA4} := H_1 + \frac{H_2}{2}$$

$$PK_{yA5} := H_1 + \frac{H_2}{2}$$

Distance from Z0 to centre of gravity on axle Z-Z

$$S_{z0} := A_1 \cdot PK_{yA1} + A_2 \cdot PK_{yA2} + A_3 \cdot PK_{yA3} \dots \\ + A_4 \cdot PK_{yA4} + A_5 \cdot PK_{yA5}$$

$$d_Z := \frac{S_{z0}}{A_C} \quad \Rightarrow \quad d_Z = 255\text{mm}$$

Distance from Y0 to centre of gravity on axle Y-Y

$$S_{y0} := A_1 \cdot PK_{zA1} + A_2 \cdot PK_{zA2} + A_3 \cdot PK_{zA3} \dots \\ + A_4 \cdot PK_{zA4} + A_5 \cdot PK_{zA5}$$

$$d_Y := \frac{S_{y0}}{A_C} \quad \Rightarrow \quad d_Y = 25\text{mm}$$

Moment of inertia on axle Z-Z

$$I_{zCA} := \frac{B_1 \cdot H_1^3}{12} + A_1 \cdot (PK_{yA1} - d_Z)^2 + \frac{B_2 \cdot H_2^3}{12} + A_2 \cdot (PK_{yA2} - d_Z)^2 + \frac{B_3 \cdot H_3^3}{12} + A_3 \cdot (PK_{yA3} - d_Z)^2 \dots$$

$$+ \frac{B_4 \cdot H_2^3}{12} + A_4 \cdot (PK_{yA4} - d_Z)^2 + \frac{B_5 \cdot H_2^3}{12} + A_5 \cdot (PK_{yA5} - d_Z)^2$$

Moment of inertia on axle Y-Y

$$I_{yCA} := \frac{B_1^3 \cdot H_1}{12} + A_1 \cdot (PK_{zA1} - d_Y)^2 + \frac{B_2^3 \cdot H_2}{12} + A_2 \cdot (PK_{zA2} - d_Y)^2 + \frac{B_3^3 \cdot H_3}{12} + A_3 \cdot (PK_{zA3} - d_Y)^2 \dots$$

$$+ \frac{B_4^3 \cdot H_2}{12} + A_4 \cdot (PK_{zA4} - d_Y)^2 + \frac{B_5^3 \cdot H_2}{12} + A_5 \cdot (PK_{zA5} - d_Y)^2$$

Distances to edges on axle Z-Z

$$e_{z1} := d_Z$$

$$e_{z2} := H_1 + H_2 + H_3 - e_{z1}$$

$$e_{Zmax} = 255 \text{ mm}$$

$$e_{Zmin} = 255 \text{ mm}$$

Distances to edges on axle Y-Y

$$e_{y1} := d_Y$$

$$e_{y2} := B_1 - d_Y$$

$$e_{Ymax} = 25 \text{ mm}$$

$$e_{Ymin} = 25 \text{ mm}$$

Definitions of bending resistances

$$W_{zCAmax} := \frac{I_{zCA}}{(e_{Zmax})} \quad W_{yCAmax} := \frac{I_{yCA}}{(e_{Ymax})}$$

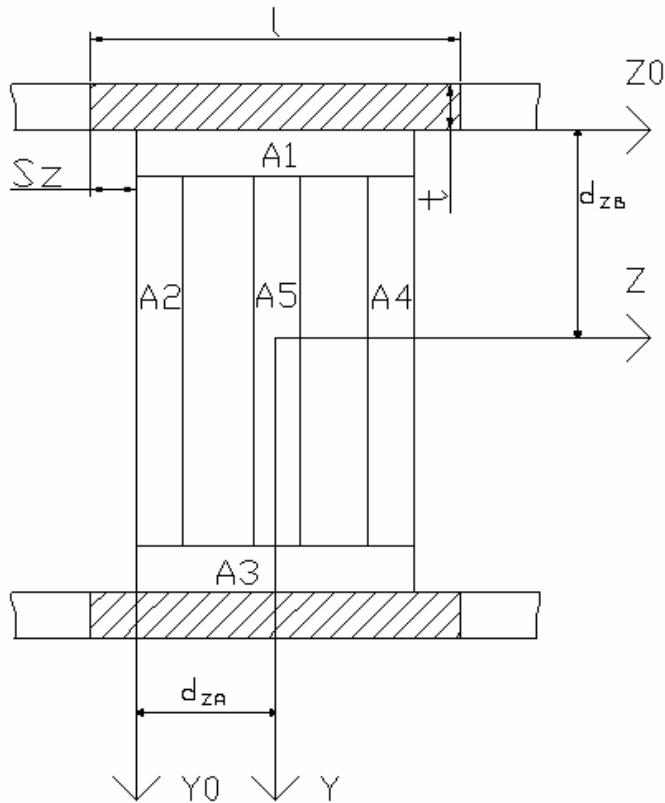
$$W_{zCAmin} := \frac{I_{zCA}}{(e_{Zmin})} \quad W_{yCAmin} := \frac{I_{yCA}}{(e_{Ymin})}$$

Radius of inertia on axle Z-Z

$$i_{zCA} := \sqrt{\frac{I_{zCA}}{A_C}}$$

Radius of inertia on axle Y-Y

$$i_{yCA} := \sqrt{\frac{I_{yCA}}{A_C}}$$

Duct sheet properties

Question A:

Will the duct sheet be included to calculation?

Answer_A := NO (Type YES or NO)

Duct sheet properties

$$t := 10\text{mm}$$

$$l := 100\text{mm}$$

$$S_z := 0\text{mm}$$

Question B:

The duct sheet is attached to profile's...

Answer_B := TOP (Type TOP or BOTTOM)

$$PK_{Zyläkanava} := \frac{l}{2} + S_z$$

$$PK_{Zalakanava} := PK_{Zyläkanava}$$

$$A_k := l \cdot t$$

$$PK_{Yyläkanava} := \frac{0 - t}{2}$$

$$PK_{Yalakanava} := H_1 + H_2 + H_3 + \frac{t}{2}$$

$$d_{YB} := \frac{S_{y0} + A_k \cdot PK_{Zkanava}}{A_C + A_k}$$

$$d_{ZB} := \frac{S_{z0} + A_k \cdot PK_{Ykanava}}{A_C + A_k}$$

$$I_{zCB} := \frac{B_1 \cdot H_1^3}{12} + A_1 \cdot (PK_{yA1} - d_{ZB})^2 + \frac{B_2 \cdot H_2^3}{12} + A_2 \cdot (PK_{yA2} - d_{ZB})^2 + \frac{B_3 \cdot H_3^3}{12} + A_3 \cdot (PK_{yA3} - d_{ZB})^2 \dots$$

$$+ \frac{B_4 \cdot H_2^3}{12} + A_4 \cdot (PK_{yA4} - d_{ZB})^2 + \frac{B_5 \cdot H_2^3}{12} + A_5 \cdot (PK_{yA5} - d_{ZB})^2 + \frac{l \cdot t^3}{12} + A_k \cdot (PK_{Ykanava} - d_{ZB})^2$$

$$I_{yCB} := \frac{B_1 \cdot H_1^3}{12} + A_1 \cdot (PK_{zA1} - d_{YB})^2 + \frac{B_2 \cdot H_2^3}{12} + A_2 \cdot (PK_{zA2} - d_{YB})^2 + \frac{B_3 \cdot H_3^3}{12} + A_3 \cdot (PK_{zA3} - d_{YB})^2 \dots$$

$$+ \frac{B_4 \cdot H_2^3}{12} + A_4 \cdot (PK_{zA4} - d_{YB})^2 + \frac{B_5 \cdot H_2^3}{12} + A_5 \cdot (PK_{zA5} - d_{YB})^2 + \frac{l^3 \cdot t}{12} + A_k \cdot (PK_{Zkanava} - d_{YB})^2$$

$$e_{y1BW1} := \begin{cases} (d_{YB} - S_z) & \text{if } S_z < 0 \\ d_{YB} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$e_{y2BW1} := \begin{cases} (1 + S_z - d_{YB}) & \text{if } 1 + S_z - d_{YB} > B_1 - d_{YB} \\ B_1 - d_{YB} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$e_{z1BW1} := t + d_{ZB}$$

$$e_{z2BW1} := H_1 + H_2 + H_3 - d_{ZB}$$

$$e_{y1BW2} := \begin{cases} (d_{YB} - S_z) & \text{if } S_z < 0 \\ d_{YB} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$e_{y2BW2} := \begin{cases} (1 + S_z - d_{YB}) & \text{if } 1 + S_z - d_{YB} > B_1 - d_{YB} \\ B_1 - d_{YB} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$e_{z1BW2} := d_{ZB}$$

$$e_{z2BW2} := H_1 + H_2 + H_3 + t - d_{ZB}$$

$$e_{zBmax} := \begin{cases} e_{z1B} & \text{if } e_{z1B} > e_{z2B} \\ e_{z2B} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$e_{yBmax} := \begin{cases} e_{y1B} & \text{if } e_{y1B} > e_{y2B} \\ e_{y2B} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$e_{zBmin} := \begin{cases} e_{z1B} & \text{if } e_{z1B} < e_{z2B} \\ e_{z2B} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$e_{yBmin} := \begin{cases} e_{y1B} & \text{if } e_{y1B} < e_{y2B} \\ e_{y2B} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$W_{zCBmax} := \frac{I_{zCB}}{(e_{zBmax})^3}$$

$$W_{yCBmax} := \frac{I_{yCB}}{(e_{yBmax})^3}$$

$$i_{zCB} := \sqrt{\frac{I_{zCB}}{(A_C + A_k)}}$$

$$W_{zCBmin} := \frac{I_{zCB}}{(e_{zBmin})^3}$$

$$W_{yCBmin} := \frac{I_{yCB}}{(e_{yBmin})^3}$$

$$i_{yCB} := \sqrt{\frac{I_{yCB}}{(A_C + A_k)}}$$

D.) Manufacturer's values

Moment of inertia

$$I_{zD} := 5000\text{mm}^4$$

$$I_{yD} := 5000\text{mm}^4$$

Bending resistance

$$W_{zDmax} := 15\text{mm}^3$$

$$W_{yDmax} := 15\text{mm}^3$$

Radius of inertia

$$i_{zD} := 1500\text{mm}^2$$

$$i_{yD} := 1500\text{mm}^2$$

Metric weight

$$\text{Metripaino}_D := 25\text{kg}$$

PROFILE INFORMATION PAGE

CHOOSE THE PROFILE USED IN CALCULATION:

Profile := C (Type A,B,C or D)

- SHAPE = "ERROR"

INFORMATION OF THE CHOSEN PROFILE:

$$I_Z = 6.57 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$I_Y = 7.85 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$i_Z = 146.75 \text{ mm}$$

$$W_{Z_{\max}} = 2.58 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$W_{Z_{\min}} = 2.58 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$i_Y = 16.05 \text{ mm}$$

$$W_{Y_{\max}} = 3.14 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

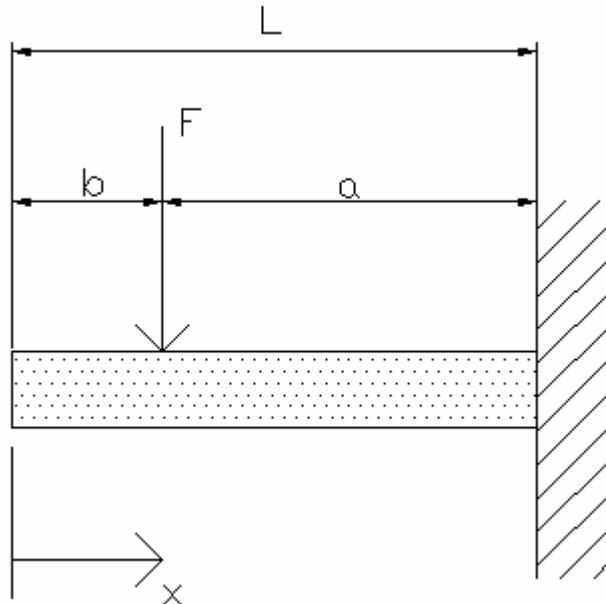
$$W_{Y_{\min}} = 3.14 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$\text{Metripaino} = 244 \text{ kg}$$

CHOOSE THE VALUES TO BE USED IN CALCULATION:

CHOOSE THE COORDINATE AXLE FOR INERTIA MOMENT AND BENDING RESISTANCE:

Axle := Y (Type Z or Y)

STRESS CASES**Case A:**

$$F = 1 \times 10^4 \text{ N}$$

$$L = 4000 \text{ mm}$$

$$a := 4000 \text{ mm} \quad D_{\text{lim}} := \frac{L}{500}$$

$$b := L - a$$

$$x := 0 \text{ mm}$$

$$\sigma := \frac{F \cdot a}{W}$$

$$\delta_{\text{max}} := \frac{F \cdot a^3}{6 \cdot E \cdot I} \cdot \left(3 \cdot \frac{L}{a} - 1 \right)$$

$$\delta(x) := \frac{F \cdot a^2}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \left[L - \frac{1}{3} \cdot a - x + \frac{\{x - b\}^3}{3 \cdot a^2} \right]$$

$$\sigma = 127.321 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{R_{p02}}{n} = 146.67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

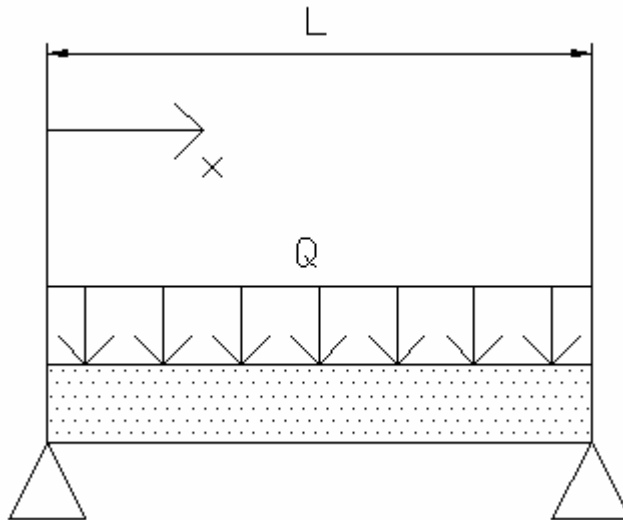
CHECK _{σ} = "TRUE"

$$\delta_{\text{max}} = 135.809 \text{ mm} < D_{\text{lim}} = 8 \text{ mm}$$

CHECK _{δ} = "UNTRUE"

$$\delta(x) = 135.809 \text{ mm}$$

$$\frac{L}{\delta_{\text{max}}} = 29.45$$

Case B:

$$F = 1 \times 10^4 \text{ N}$$

$$L = 4000 \text{ mm}$$

$$Q := \frac{F}{L}$$

$$D_{\text{lim}} := \frac{L}{250}$$

$$x := 2000 \text{ mm}$$

$$\sigma := \frac{F \cdot L}{8W}$$

$$\delta_{\text{max}} := \frac{5F \cdot L^3}{384 E \cdot I}$$

$$\delta(x) := \frac{Q \cdot L^4}{24 \cdot E \cdot I} \left[\frac{x}{L} - 2 \cdot \left(\frac{x}{L} \right)^3 + \left(\frac{x}{L} \right)^4 \right]$$

$$\sigma = 15.92 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{R_{p02}}{n} = 146.67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{CHECK}_{\sigma} = \text{"TRUE"}$$

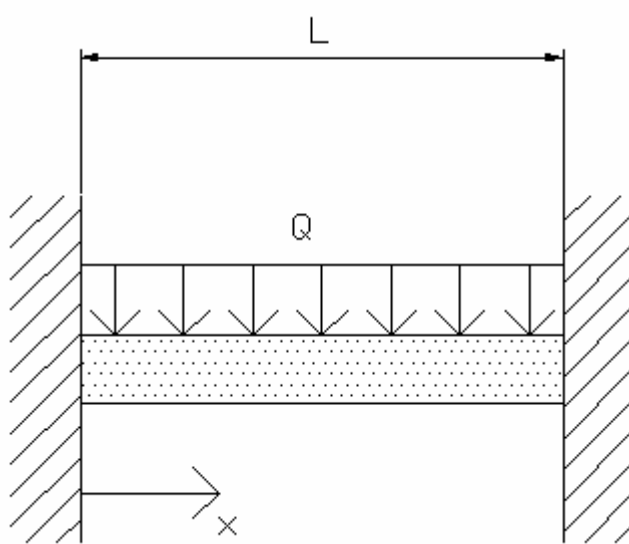
$$\delta_{\text{max}} = 5.305 \text{ mm} < D_{\text{lim}} = 16 \text{ mm}$$

$$\text{CHECK}_{\delta} = \text{"TRUE"}$$

$$\delta(x) = 5.305 \text{ mm}$$

$$\frac{L}{\delta_{\text{max}}} = 754$$

Case C:



$$F = 1 \times 10^4 \text{ N}$$

$$L = 4000 \text{ mm}$$

$$x := 2000 \text{ mm} \quad D_{\text{lim}} := \frac{L}{250}$$

$$\sigma := \frac{F \cdot L}{12W}$$

$$\delta_{\text{max}} := \frac{Q \cdot L^4}{384 E \cdot I}$$

$$\delta(x) := \frac{Q \cdot L^4}{24 E I} \cdot \left[\left(\frac{x}{L} \right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{x}{L} \right)^3 + \left(\frac{x}{L} \right)^4 \right]$$

$$\sigma = 10.61 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{R_{p02}}{n} = 146.67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

CHECK _{σ} = "TRUE"

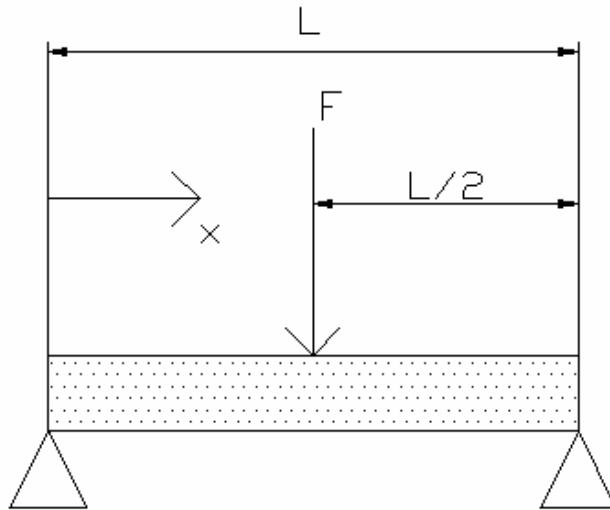
$$\delta_{\text{max}} = 1.061 \text{ mm} < D_{\text{lim}} = 16 \text{ mm}$$

CHECK _{δ} = "TRUE"

$$\delta(x) = 1.061 \text{ mm}$$

$$\frac{L}{\delta_{\text{max}}} = 3.77 \times 10^3$$

Case D:



$$F = 1 \times 10^4 \text{ N}$$

$$L = 4000 \text{ mm}$$

$$x := 2000 \text{ mm} \quad D_{\text{lim}} := \frac{L}{250}$$

$$\sigma := \frac{F \cdot L}{4W}$$

$$\delta_{\text{max}} := \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

$$\delta(x) = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \left[3 \cdot \frac{x}{L} - 4 \cdot \left(\frac{x}{L} \right)^3 + \frac{8}{L^3} \cdot \left\{ x - \frac{L}{2} \right\}^3 \right]$$

$$\sigma = 31.83 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{R_{p02}}{n} = 146.67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

CHECK_σ = "TRUE"

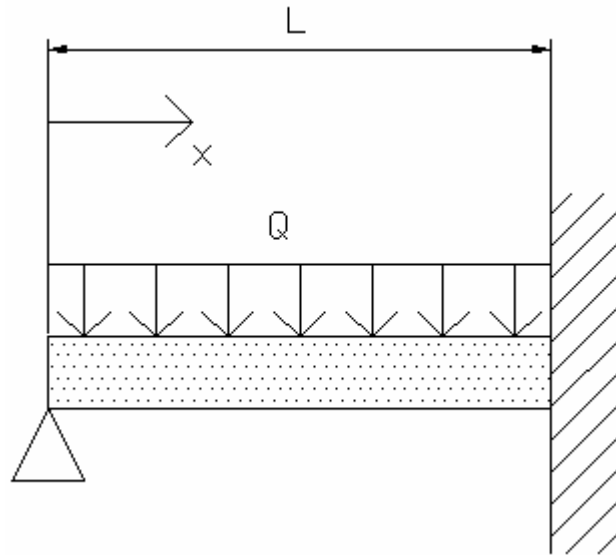
$$\delta_{\text{max}} = 8.5 \text{ mm} < D_{\text{lim}} = 16 \text{ mm}$$

CHECK_δ = "TRUE"

$$\delta(x) = 8.49 \text{ mm}$$

$$\frac{L}{\delta_{\text{max}}} = 471.25$$

Case E:



$$F = 1 \times 10^4 \text{ N}$$

$$L = 4000 \text{ mm}$$

$$x := 2000 \text{ mm} \quad D_{\text{lim}} := \frac{L}{250}$$

$$\sigma := \frac{F \cdot L}{8W}$$

$$\delta_{\text{max}} := \frac{F \cdot L^3}{185 \cdot E \cdot I}$$

$$\delta(x) := \frac{Q \cdot L^4}{48 \cdot E \cdot I} \left[\frac{x}{L} - 3 \cdot \left(\frac{x}{L} \right)^3 + 2 \cdot \left(\frac{x}{L} \right)^4 \right]$$

$$\sigma = 15.92 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{R_{p02}}{n} = 146.67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

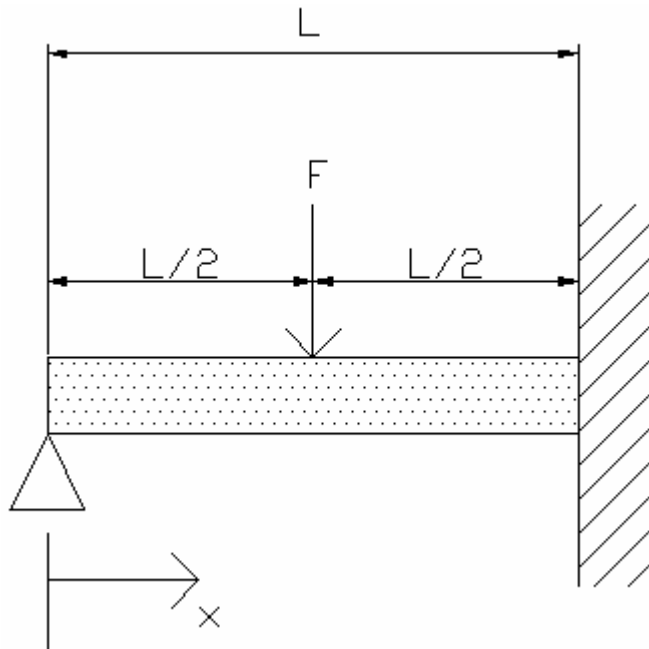
CHECK $_{\sigma}$ = "TRUE"

$$\delta_{\text{max}} = 2.202 \text{ mm} < D_{\text{lim}} = 16 \text{ mm}$$

CHECK $_{\delta}$ = "TRUE"

$$\delta(x) = 1.592 \text{ mm}$$

$$\frac{L}{\delta_{\text{max}}} = 1.82 \times 10^3$$

Case F:


$$F = 1 \times 10^4 \text{ N}$$

$$L = 4000 \text{ mm}$$

$$x := 2000 \text{ mm}$$

$$D_{\text{lim}} := \frac{L}{250}$$

$$\sigma := \frac{3F \cdot L}{16W}$$

$$\delta_{\text{max}} := \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot \sqrt{5} \cdot E \cdot I}$$

$$\delta(x) := \frac{F \cdot L^3}{96 \cdot E \cdot I} \left[3 \cdot \frac{x}{L} - 5 \cdot \left(\frac{x}{L} \right)^3 + \frac{16}{L^3} \left\{ x - \frac{L}{2} \right\}^3 \right]$$

$$\sigma = 23.87 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{R_{p02}}{n} = 146.67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

 CHECK_σ = "TRUE"

$$\delta_{\text{max}} = 3.8 \text{ mm} < D_{\text{lim}} = 16 \text{ mm}$$

 CHECK_δ = "TRUE"

$$\delta(x) = 3.7 \text{ mm}$$

$$\frac{L}{\delta_{\text{max}}} = 1.05 \times 10^3$$

BUCKLING RESISTANCE

Project: -
Equipment: -
Revision: -
Design: -
Date: -
Approved: -
Date: -
List of references: SFS 3200: Teräsrakenteiden suunnitteluohjeet

BEAM PROPERTIES:

Beam type

C-BAR 100x50x1

Beam length

$L := 2000\text{mm}$

Effective beam length

$L_n := L$

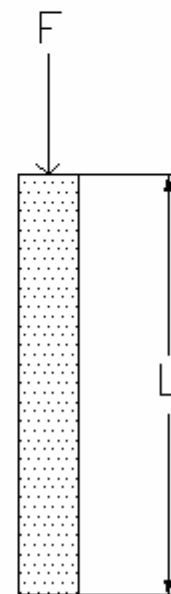
Modulus of elasticity

$E := 210000\text{MPa}$

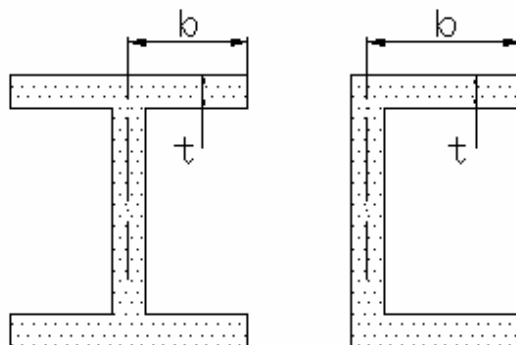
($\text{MPa} := 10^6\text{Pa}$)

Force applied to beam

$F := 10000\text{N}$



CROSS-SECTIONAL PROPERTIES:



Cross-section area

$A := 198\text{mm}^2$

Tension in beam

$\sigma_{\text{beam}} := \frac{F}{A}$

Moment of inertia

$I := 5.06 \cdot 10^4 \cdot \text{mm}^4$

Cross-sectional dimensions

$b := 49.5\text{mm}$ $t := 1\text{mm}$

NOTICE!

b/t -values should not exceed the value

$0.66 \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{sa}}}$, if possible.

CHECK = "Safe value exceeded"

Inspection against buckling: A

Maximum force and tension: Euler

$$F_n := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_n^2} \Rightarrow F_n = 2.622 \times 10^4 \text{ N} \quad ; \quad \sigma_{el} := \frac{F_n}{A} \Rightarrow \sigma_{el} = 132.417 \text{ MPa}$$

Maximum tension allowed

$$\sigma_{sa} = 210 \text{ MPa} \quad \alpha_k := \sqrt{\frac{\sigma_{sa}}{\sigma_{el}}} \Rightarrow \alpha_k = 1.259$$

$$\sigma_{nsall} := \begin{cases} \left(\frac{1}{1.5} \cdot \sigma_{sa} \right) & \text{if } 0 \leq \alpha_k \leq 0.2 \\ (0.741 - 0.372 \cdot \alpha_k) \cdot \sigma_{sa} & \text{if } 0.2 < \alpha_k < 1.33 \\ \left(\frac{1}{2.3 \cdot \alpha_k^2} \cdot \sigma_{sa} \right) & \text{if } 1.33 \leq \alpha_k \end{cases}$$

$$\Rightarrow \sigma_{nsall} = 57.232 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{beam} = 50.505 \text{ MPa} < \sigma_{nsall} = 57.232 \text{ MPa} \quad \text{CHECK} = \text{"OK"}$$

Inspection against buckling: B**Maximum tension: Euler**

$$\sigma_{e1} := 0.9 \cdot \left(0.43 + \frac{b^2}{L^2} \right) \cdot E \cdot \frac{t^2}{b^2} \quad \Rightarrow \quad \sigma_{e1} = 33.215 \text{ MPa}$$

$$\alpha_1 := 1.6 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{sa}}{E}} \quad \Rightarrow \quad \alpha_1 = 2.505$$

$\sigma_{csall} := \begin{cases} \frac{1}{1.5} \cdot \sigma_{sa} & \text{if } 0 < \alpha_1 \leq 0.7 \\ (1.02 - 0.50 \cdot \alpha_1) \cdot \sigma_{sa} & \text{if } 0.7 < \alpha_1 < 1.36 \\ \frac{1}{1.6} \cdot \sigma_{e1} & \text{if } 1.36 \leq \alpha_1 \end{cases}$
--

$$\sigma_{csall} = 20.76 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{beam} = 50.505 \text{ MPa} \quad < \quad \sigma_{csall} = 20.76 \text{ MPa} \quad \text{CHECK} = \text{"NOT OK"}$$

OPENING REINFORCEMENT:

Project:	-
Equipment:	-
Revision:	-
Design:	-
Date:	-
Approved:	-
Date:	-
List of references:	CICIND Model Code: Commentary No. 5 - Openings, Roark's formulas for stress and strain

CYLINDER PROPERTIES:**Diameter and thickness**

$$D := 16000\text{mm} \quad r := \frac{D}{2}$$

$$t := 17\text{mm}$$

Load caused by the mass above the opening

$$F := 13350000 \cdot N$$

Diameter of the opening

$$d := 4500\text{mm}$$

Wall thickness of the cutting pipe

$$s := 20\text{mm} \quad (s_{\max} = 2.5t)$$

$$l := \sqrt{d \cdot s} \quad \Rightarrow \quad l = 300\text{mm}$$

Opening angle

$$\beta := \arcsin\left(\frac{d}{D}\right) \quad \Rightarrow \quad \beta = 0.285\text{rad} \quad \Rightarrow \quad \beta = 16.335\text{deg}$$

$$\alpha := \pi - \beta$$

Cross-section areas

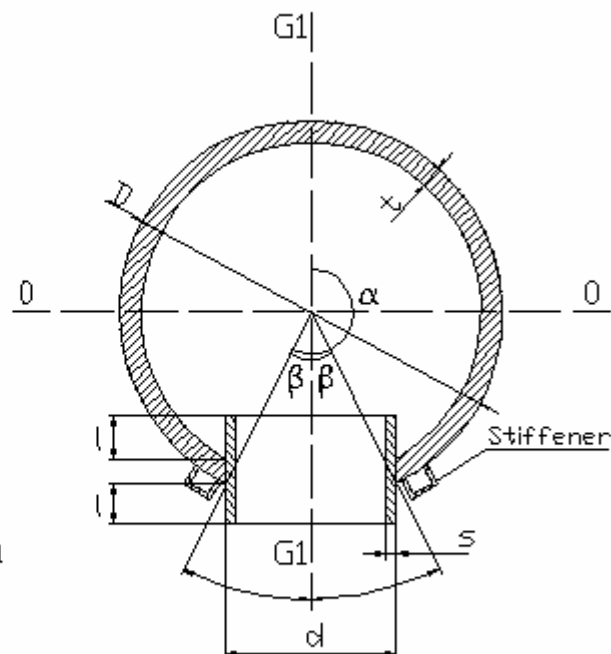
$$A_1 := \pi \cdot r^2 \quad A_2 := \pi \cdot (r - t)^2 \quad A_D := A_1 - A_2$$

$$A_o := \frac{2 \cdot \beta}{360\text{deg}} \cdot A_D \quad \Rightarrow \quad A_o = 7.746 \times 10^4 \text{mm}^2$$

$$A_p := s \cdot (t + 2 \cdot l)$$

Moment of inertia(uncut cylinder)

$$I_{\text{all}} := \frac{\pi}{4} \cdot [r^4 - (r - t)^4]$$



CROSS-SECTION AREA NEEDED FOR EACH STIFFENER:Method A

$$A_{\min A} := 1.25 \cdot r \cdot t \cdot \sin(\beta)^{0.5} \quad \Rightarrow \quad A_{\min A} = 9.016 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

Method B**Moment of inertia on axle G-G = 0-0**

$$Y_{1a} := r \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot \sin(\alpha)}{3 \cdot \alpha} \cdot \left(1 - \frac{t}{r} + \frac{1}{2 - \frac{t}{r}} \right) \right] \quad e := r - Y_{1a} \quad \Rightarrow \quad e = 786.842 \text{ mm}$$

$$I_{\alpha GG} := r^3 \cdot t \cdot \left[\left(1 - \frac{3t}{2r} + \frac{t^2}{r^2} - \frac{t^3}{4r^3} \right) \cdot \left(\alpha + \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) - \frac{2 \sin(\alpha)^2}{\alpha} \right) \dots \right. \\ \left. + \frac{t^2 \cdot \sin(\alpha)^2}{3 \cdot r^2 \cdot \alpha \cdot \left(2 - \frac{t}{r} \right)} \cdot \left(1 - \frac{t}{r} + \frac{t^2}{6r^2} \right) \right]$$

$$I_{\text{stiffenerGG}} = 2 \cdot A_{\min B} \cdot (r \cdot \cos(\beta) + e)^2 \quad I_{\text{pipeGG}} := 2 \cdot A_p \cdot \left[\left(r - \frac{t}{2} \right) \cdot \cos(\beta) + e \right]^2$$

$$I_{\alpha GG} + I_{\text{stiffenerGG}} + I_{\text{pipeGG}} = I_{\text{all}} \quad \Rightarrow \quad A_{\min B} := \frac{-(I_{\alpha GG} - I_{\text{all}} + I_{\text{pipeGG}})}{2 \cdot (\cos(\beta) \cdot r + e)^2}$$

$$\Rightarrow \quad A_{\min B} = 2.465 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

Unaltered moment of inertia on axle G1-G1

$$I_{\alpha G1G1} := r^3 \cdot t \cdot \left(1 - \frac{3t}{2r} + \frac{t^2}{r^2} - \frac{t^3}{4r^3} \right) \cdot (\alpha - \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha))$$

$$I_{\text{stiffenerG1G1}} = 2 \cdot A_{\min B} \cdot r^2 \cdot \sin(\beta)^2 \quad I_{\text{pipeG1G1}} := 2 \cdot s \cdot \left[\left(r - \frac{t}{2} \right) \cdot \sin(\beta) - \frac{s}{2} \right]^2$$

$$I_{\alpha G1G1} + I_{\text{stiffenerG1G1}} + I_{\text{pipeG1G1}} = I_{\text{all}}$$

$$\Rightarrow \quad A_{\min C} := \frac{I_{\text{all}} - I_{\alpha G1G1} - I_{\text{pipeG1G1}}}{2 \cdot \sin(\beta)^2 \cdot r^2} \quad \Rightarrow \quad A_{\min C} = 7.09 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

STIFFENER PROPERTIES:**Chosen profile**

- Square bar 250x250 mm

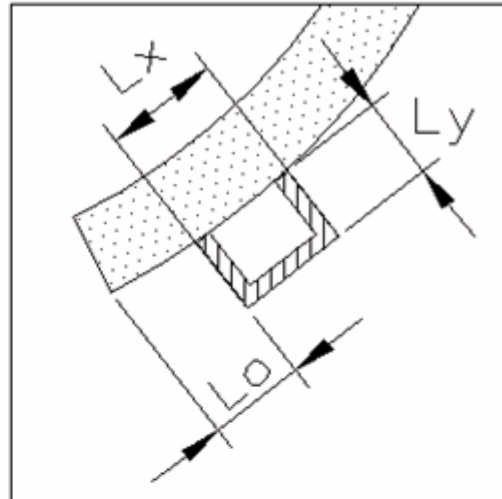
Effective beam length

$$L_n := 2 \cdot d$$

Stiffeners measures and positioning

$$L_x := 250\text{mm} \quad L_y := 250\text{mm}$$

$$L_o := 200\text{mm}$$

**Moment of inertia**

$$I := 3.26 \cdot 10^8 \cdot \text{mm}^4$$

Cross-section area

$$A := 62500\text{mm}^2$$

Modulus of elasticity

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

$$(\text{MPa} \equiv 10^6 \text{Pa})$$

Maximum force and tension: Euler

$$F_n := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_n^2} \Rightarrow F_n = 8.342 \times 10^6 \text{ N} \quad ; \quad \sigma_{el} := \frac{F_n}{A} \Rightarrow \sigma_{el} = 133.466 \text{ MPa}$$

Maximum tension allowed

$$\sigma_{sa} := 210\text{MPa} \quad \alpha_k := \sqrt{\frac{\sigma_{sa}}{\sigma_{el}}} \Rightarrow \alpha_k = 1.254$$

$$\sigma_{nsall} := \begin{cases} \left(\frac{1}{1.5} \cdot \sigma_{sa} \right) & \text{if } 0 \leq \alpha_k \leq 0.2 \\ (0.741 - 0.372 \cdot \alpha_k) \cdot \sigma_{sa} & \text{if } 0.2 < \alpha_k < 1.33 \\ \left(\frac{1}{2.3 \cdot \alpha_k} \cdot \sigma_{sa} \right) & \text{if } 1.33 \leq \alpha_k \end{cases} \Rightarrow \sigma_{nsall} = 57.619 \text{ MPa}$$

Tension in chosen stiffeners

$$F_o := \frac{2 \cdot \beta}{360 \cdot \text{deg}} \cdot F \Rightarrow F_o = 1.211 \times 10^6 \text{ N}$$

$$\sigma_{\text{support}} := \frac{F_o}{2A}$$

$$\sigma_{\text{support}} = 9.692 \text{ MPa} < \sigma_{nsall}$$

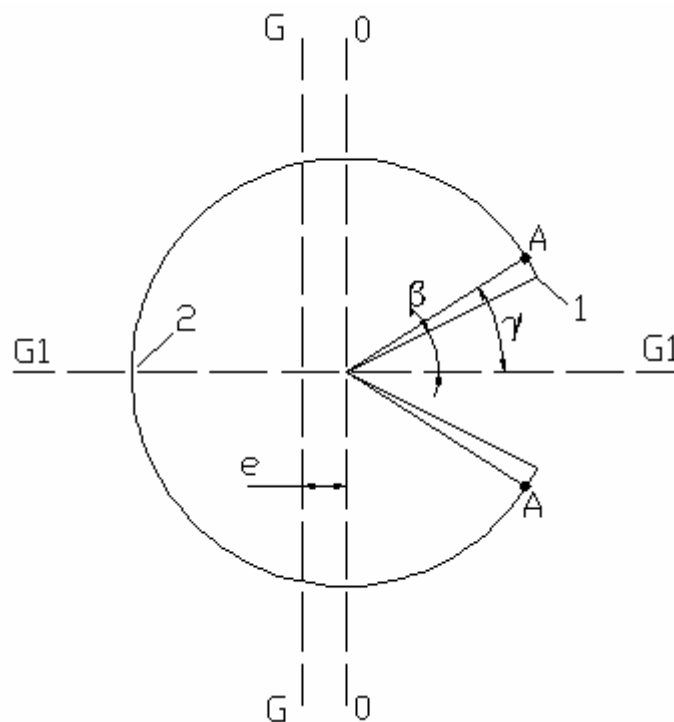
CHECK = "OK"

Change in moment of inertia

$$\gamma := \frac{\left(L_0 + \frac{L_x}{2}\right) \cdot 2 \cdot \pi}{D \cdot \pi} + \beta \quad \Rightarrow \quad \gamma = 0.326 \quad \Rightarrow \quad \gamma = 18.662 \text{ deg}$$

$$I_{GG\text{reinforced}} := I_{\alpha GG} + I_{\text{pipe}GG} + 2 \cdot A \cdot \left[\left(r + \frac{L_y}{2} \right) \cdot \cos(\gamma) + e \right]^2$$

$$I_{G1G1\text{reinforced}} := I_{\alpha G1G1} + I_{\text{pipe}G1G1} + 2 \cdot A \cdot \left[\left(r + \frac{L_y}{2} \right) \cdot \sin(\gamma) \right]^2$$

**Moment of inertia before the opening is cut**

$$I_{\text{all}} = 2.726 \times 10^{13} \text{ mm}^4$$

Moment of inertia after the opening is cut and reinforced

$$I_{GG\text{reinforced}} = 3.272 \times 10^{13} \text{ mm}^4$$

$$I_{G1G1\text{reinforced}} = 2.803 \times 10^{13} \text{ mm}^4$$

Change in bending resistance

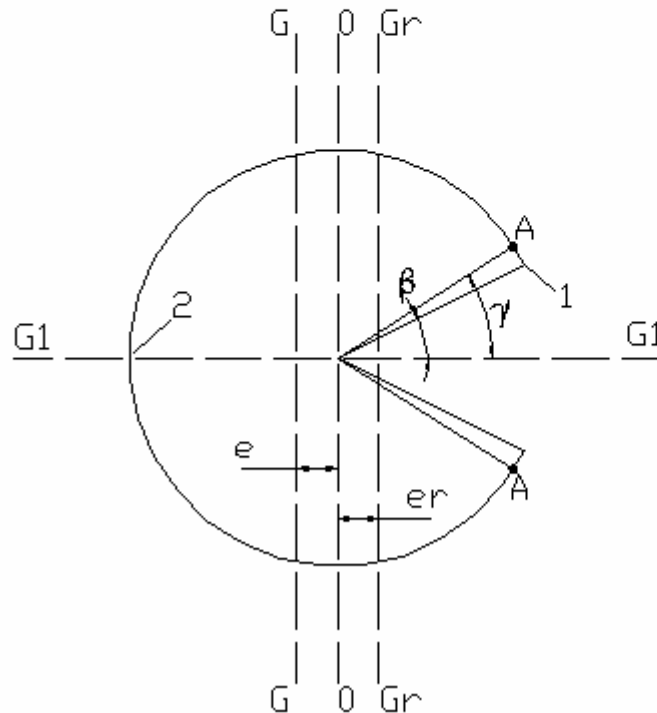
$$e_r := \frac{-e \cdot (A_D - A_0) + \left[\left(r - \frac{t}{2} \right) \cdot \cos(\beta) \right] \cdot 2 \cdot A_p + \left[\left(r + \frac{L_y}{2} \right) \cdot \cos(\gamma) \right] \cdot 2 \cdot A}{(A_D - A_0) + 2 \cdot A_p + 2 \cdot A}$$

$$e_r = 584.121 \text{ mm}$$

$$A_{\text{tot}} := \alpha \cdot t \cdot (2 \cdot r - t) + 2 \cdot A + 2 \cdot A_p$$

$$I_{\text{GrGr}} := I_{\text{GGreinforced}} + A_{\text{tot}} \cdot (-e - e_r)^2$$

$$I_{\text{GrGr}} = 3.446 \times 10^{13} \text{ mm}^4$$


Bending resistance before the opening is cut

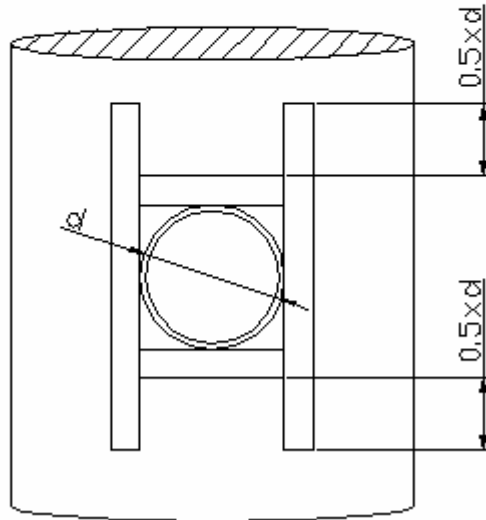
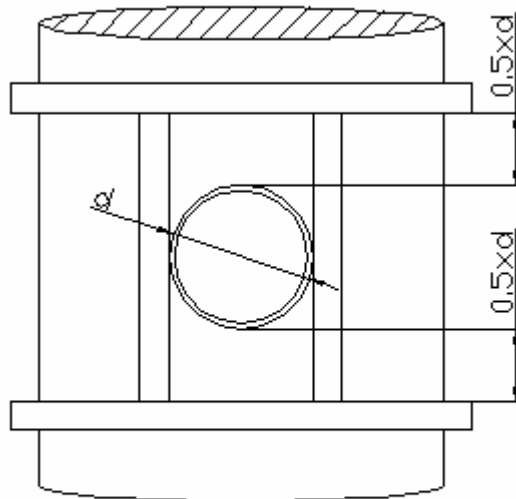
$$Z_{\text{all}} := \frac{\pi}{32} \cdot \frac{[D^4 - (D - 2t)^4]}{D} \quad \Rightarrow \quad Z_{\text{all}} = 3.407 \times 10^9 \text{ mm}^3$$

Bending resistance after the opening is cut and reinforced

$$Z_{1\text{GrGr}} := \frac{I_{\text{GrGr}}}{-e_r + \left(r + \frac{L_y}{2} \right) \cdot \cos(\gamma)} \quad \Rightarrow \quad Z_{1\text{GrGr}} = 4.845 \times 10^9 \text{ mm}^3$$

$$Z_{2\text{GrGr}} := \frac{I_{\text{GrGr}}}{r + e_r} \quad \Rightarrow \quad Z_{2\text{GrGr}} = 4.015 \times 10^9 \text{ mm}^3$$

$$Z_{\text{G1G1}} := \frac{I_{\text{G1G1reinforced}}}{r} \quad \Rightarrow \quad Z_{\text{G1G1}} = 3.504 \times 10^9 \text{ mm}^3$$

STIFFENER POSITIONING:**Option 1: $d < 0.4 \times D$** **Option 2: $d > 0.4 \times D$** 

NOTICE = "Option 1 is preferred in this case"