

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

KOTELOPUOMIN PÄÄN MUOTOILU VINOUTUMISTA JA VÄÄNTÖÄ VASTAAN
DESIGNING OF A BOX GIRDER AGAINST DISTORTION AND TORSIONAL LOAD

Lappeenrannassa 30.5.2014

Miro Ahlfors

Tarkastaja: Professori Timo Björk

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	4
2	TEORIA	5
2.1	Kotelopalkki väännössä	5
2.1.1	Bimomentti	6
2.1.2	Voimien maadoittuminen	7
2.2	Elementtimenetelmä	7
3	TUTKIMUSKOHDE JA MENETELMÄT	9
3.1	Tutkittavat puomit	9
3.2	Puomin poikkileikkauksen vinoutuminen	10
3.3	Normaalijännitykset	11
4	TULOKSET	13
4.1	Poikittaisten taivutusjännitysten tarkastelu	13
4.2	Pitkittäisten normaalijännitysten tarkastelu	16
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	19
	LÄHTEET	20

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

ν	Poissonin luku kimmoisalla alueella
τ	Leikkausjännitys [N/mm ²]
A	Putken poikkipinnan keskiviivan rajaama pinta-ala [mm ²]
d_{ero}	Vinoutuneen poikkileikkauksen lävistäjien erotus [mm]
$d1$	Vinoutuneen poikkileikkauksen lyhyempi lävistäjä [mm]
$d2$	Vinoutuneen poikkileikkauksen pidempi lävistäjä [mm]
E	Kimmomoduuli [N/mm ²]
F	Puomin haarukkaa taivuttava voima [N]
l	Voimaparin etäisyys toisistaan [mm]
M_v	Vääntömomentti [Nmm]
t	Putken seinämäpaksuus [mm]
FEM	Finite element method, elementtimenetelmä

1 JOHDANTO

Palkin vääntöakselin suhteen epäkeskinen kuormitus aiheuttaa palkkiin vääntökuormituksen. Poikittain epäkeskinen kuormitus synnyttää palkkiin vinoutumisjännityksiä. Jännityksiä syntyy reunaehtojen mukaisesti sekä poikittais- että pitkittäissuunnassa. Jos nämä jännitykset erityisesti ohutlevyrakenteissa kasvavat liian suuriksi, puhtaan väännön teoria ei riitä kuvaamaan väännön synnyttämää jännitystilaa.

Tämän työn tarkoituksena on selvittää elementtimenetelmän avulla haarukkapuomin vinoutumista ja siitä syntyvien jännitysten suuruuksia, kun puomi on tuettu täysin jäykästi toisesta päästä. Staattinen vääntökuormitus aiheutetaan puomiin sen haarukoissa vaikuttavan voimaparin avulla, jolloin vääntö ohjautuu puomiin laippojen kautta.

Työn tavoitteena on selvittää haarukkapuomiin syntyvien poikittaisten taivutusjännitysten ja pitkittäisten normaalijännitysten suuruudet, kun päätylevyllä jäykistettyä puomia jäykistetään lisäksi palkin sisään poikkileikkauksen tasoon asetetulla jäykistelevyllä. Työssä vertaillaan vinoutumisjännitysten maadoittumista sisäjäykistelevyn sijainnin suhteen. Tutkimuksessa rajoitutaan neliö- ja suorakaideprofiileiden tarkasteluun.

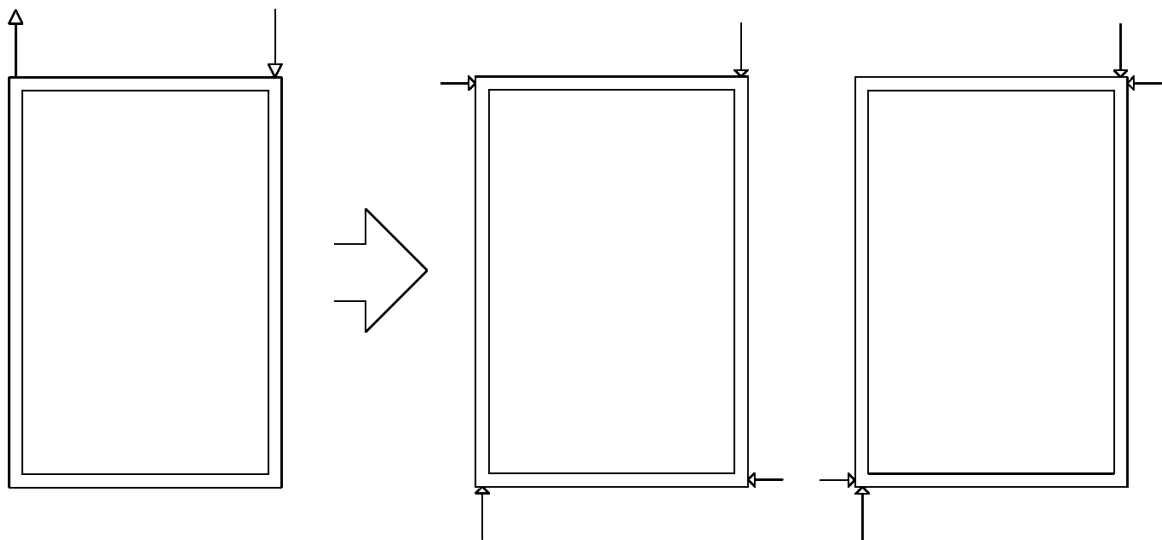
Tämä tutkimus pohjautuu Simo Nikulan Lappeenrannan konetekniikan osastolle tekemään diplomityöhön haarukkavoimien aiheuttamista vinoutumisjännityksistä puomissa.

2 TEORIA

Seuraavassa osiossa kerrotaan olennainen teoria kotelopalkista vääntökuormituksessa ja elementtimenetelmästä yleisesti, ja sen hyödyntämisestä ohutlevyrakenteissa.

2.1 Kotelopalkki väännössä

Kaksoissymmetrisen kotelopalkin vääntökuormitus voidaan jakaa puhtaaseen vääntöön ja vinouttavaan voimaan. Kuvassa 1 on jaettujen voimakomponenttien periaate. Kuvan ensimmäisessä kotelopalkin poikkileikkauksessa näkyy voimapari, joka voidaan jakaa toisessa leikkauskuvassa näkyviin vääntäviin ja kolmannessa vinouttaviin voimiin. (Nikula, 1990, s. 3.)



Kuva 1. Väännön aiheuttamien voimien jako.

Ohutseinäiselle putkelle puhtaasta väännöstä aiheutuva leikkausjännitys oletetaan vakioksi koko seinämäpaksuuden yli, jolloin leikkausjännitys τ voidaan laskea Bredt'in kaavalla seuraavasti (Ylinen, 1970, s. 641):

$$\tau = \frac{M_v}{2 \cdot t \cdot A} \quad (1)$$

Yhtälössä (1) M_v on vääntömomentti, t on putken seinämäpaksuus ja A tarkoittaa putken poikkipinnan keskiviivan rajaamaa pinta-alaa (Ylinen, 1970, s. 641).

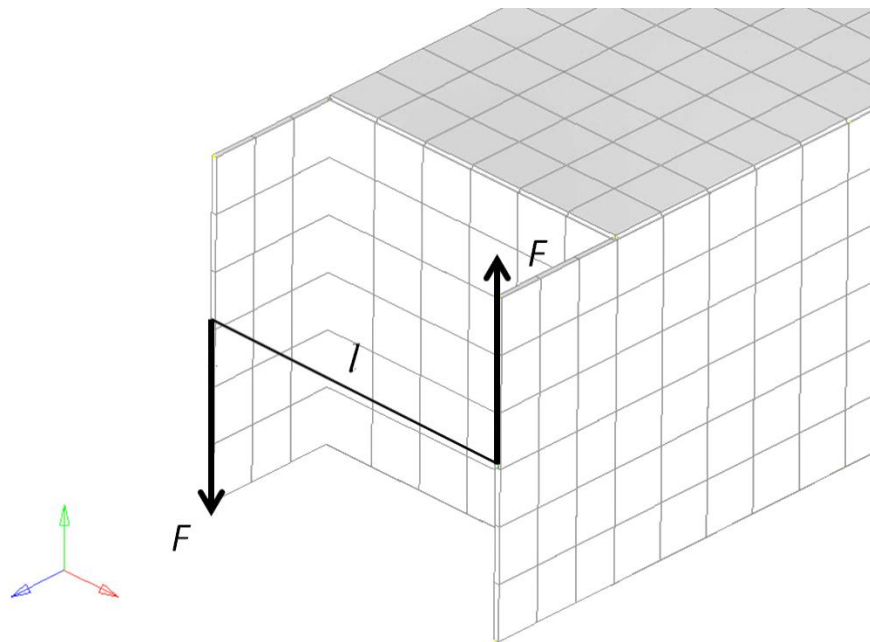
Vinouttavaa voimaa voidaan maadoittaa jäykistämällä kotelon poikkileikkaus siitä kohdasta, jossa ulkoinen vääntömomentti vaikuttaa koteloon. Jos poikkileikkausta ei jäykistetä, syntyy palkkiin poikittaissuuntaista taivutusjännitystä ja pituussuuntaista normaali-jännitystä. (Nikula, 1990, s. 2-3.)

2.1.1 Bimomentti

Puomiin synnytetään vääntömomentti päädyssä olevien haarukoiden avulla. Haarukat ajatellaan erillisiksi ulokepalkeiksi, joista toista taivutetaan ylöspäin ja toista alaspäin kuvan 2 mukaisesti. Voimat muodostavat keskenään voimaparimomentin eli bimomentin. Voimaparin aiheuttaman vääntömomentin suuruus on laskettavissa seuraavasti (Nikula, 1990, s. 4):

$$M_v = F \cdot l \quad (2)$$

Yhtälössä (2) F on haarukkaa taivuttava voima ja l voimaparin etäisyys toisistaan (Nikula, 1990, s. 4).



Kuva 2. Voimapari haarukkapuomissa.

2.1.2 Voimien maadoittuminen

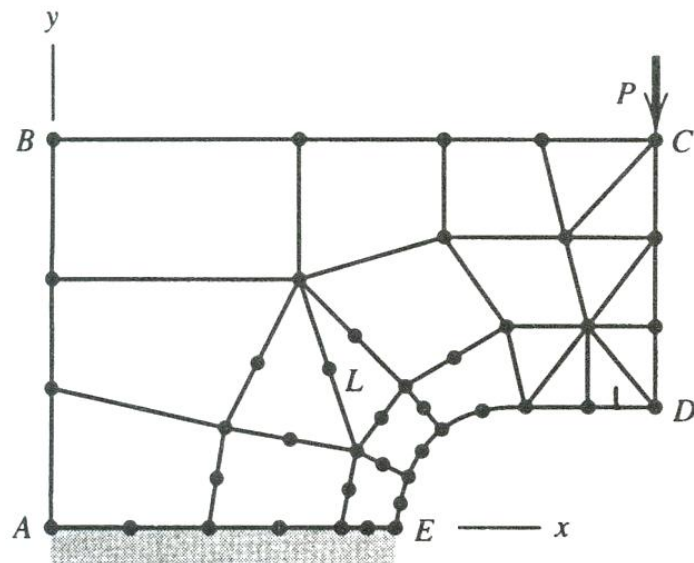
Puomin päähän hitsatulla jäykistelevyillä voidaan vinouttavia voimia maadoittaa heti puomin päässä. Päätylevy voidaan olettaa äärettömän jäykäksi, mutta sen jäykkyys on mahdollista määrittää. Kun jäykistelevyjä asetetaan kaksi peräkkäin, saadaan maadoitettua bimomentti tehokkaasti. Yleisesti bimomentti maadoittuu tällöin kokonaan, eikä vinoutumisesta syntyviä rasituksia ole olennaista ottaa huomioon. Kuitenkin kyseinen ratkaisu on melko kallista ja tietysti turhaa, jos rakenne suunnitellaan ylimääräiset jännitykset huomioon ottaen. (Nikula, 1990, s. 16-18.)

2.2 Elementtimenetelmä

Elementtimenetelmistä (FE-menetelmä, finite element method) yleisin on siirtymämenetelmä, jossa siirtymät ovat tuntemattomia ja voimat tunnetaan. Tämän takia siirtymämenetelmä on insinööritehtävissä käytetyin. Siirtymämenetelmästä voidaan käyttää myös nimeä jäykkyysmenetelmä. (Hakala, 1980, s. 21.)

Yhden pistevoiman kuormittavaa palkkia tarkasteltaessa halutaan tietää, mikä on voiman ja siirtymän välinen riippuvuus. Olettaessa rakenteen käyttäytyvän lineaarisesti, voidaan rakenteen joustavuuden avulla ratkaista siirtymä kuormitustilassa jousen käyttäytymisen tavoin. Palkki on jatkuva systeemi, joten todellisuudessa sen jokaisella pisteellä on oma siirtymänsä. Periaatteessa pisteitä on palkissa ääretön määrä, jolloin vapausasteita on myös äärettömästi. Jotta palkkia voidaan tutkia, on käytettävä äärellistä määrää vapausasteita. Tämän saavuttamiseksi palkki jaetaan äärelliseen määrään osa-alueita, joita kutsutaan elementeiksi. (Hakala, 1980, s. 19.)

Elementit liittyvät toisiinsa pisteissä, joita kutsutaan solmuiksi. Kuvassa 3 elementit ovat kolmion ja nelikulmion muotoisia alueita ja pisteet ovat solmuja. Viivat kuvaavat elementtien rajoja. Tätä kokonaisuutta kutsutaan verkotukseksi. Kahdella tai useammalla elementillä, jotka liittyvät samalla solmulla, on keskenään sama siirtymäkomponentti kyseisen solmun kohdalla. (Cook, 1994, s. 3-4.)



Kuva 3. Mielivaltainen kappale mallinnettu elementeillä (Cook, 1994, s, 4).

FE-analyysissä tehdään rakenteesta malli, joka käyttäytyy määrättyjen analyttisten tai numeeristen käsitteiden mukaisesti. Verkotuksessa halutaan välttää väärän muotoisia elementtejä, esim. nelikulmioelementti, jossa pitkä sivu on huomattavasti pidempi kuin lyhyt sivu. Verkotuksen pitäisi olla mahdollisemman tiheä kuvatakseen todellista rakennetta, mutta tietokoneiden laskentatehon rajoissa. On ajan hukkaa laskea liian tiheällä verkotuksella, jos karkeampi verkotus riittää tarkasteltavassa tilanteessa. FE-menetelmässä lasketaan solmujen siirtymiä, joita käytetään laskiessa venymiä ja lopulta jännityksiä. (Cook, 1994, s. 6-7.)

Kuvan 3 elementti B on lineaarinen elementti, jonka sivut pysyvät suorina deformaatiassa. Parabolisella elementillä on myös sivuilla solmut kuten kuvan 3 L-elementti. Siksi parabolinen elementti voi mallintaa vakio ja lineaarisen venymätilan, joka syntyy puhtaasta taivutuksesta. Täten se on tehokkaampi elementti, mutta raskaampi laskettava. (Cook, 1994, s. 5.)

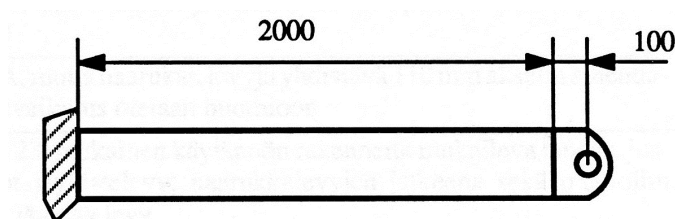
3 TUTKIMUSKOHDE JA MENETELMÄT

Tutkimuskohteena on seitsemän erilaista haarukkapuomirakennetta. Puomit mallinnetaan ja analysoidaan staattisessa kuormituksessa elementtimenetelmän avulla Siemensin Femap-ohjelmalla (versionumero 11.0.0), jossa analyysilaskentaohjelmaksi käytetään NX Nastrania. Puomit mallinnetaan parabolisilla kuorielementeillä. Puomin tuenta asetetaan täysin jäykäksi estämällä päädyn solmuilta kaikkien akseleiden suuntainen siirtymä ja kiertymä.

Tarkoituksena on verrata välilevyillä jäykistettyjen haarukkapuomien vinoutumista ja syntyvien jännityksien eroja vääntökuormituksessa. Tutkimuksessa tarkastellaan tuloksien eroja, kun puomin profiilia, seinämäpaksuutta ja jäykistelevyn sijaintia muutetaan rakenteessa. Puomirakenteen kulmissa tutkitaan mahdollisesti bimomentin aiheuttamia aksiaalisia ja vinoutumisen aiheuttamia poikittaissuuntaisia normaalijännityksiä, ja kuinka paljon jäykistelevyt maadoittivat näitä jännityksiä. Antisymmetriasta johtuen oli riittävää tarkastella vain yhtä kulmaa puomissa. Kiertyvästä poikkileikkauksesta johtuen on kuitenkin syytä mallintaa koko palkki.

3.1 Tutkittavat puomit

Kaikissa tutkittavissa tapauksissa käytetään kuvan 3 mukaisen puomin pituusmittoja. Tällöin kuormitus sijaitsee 100 mm palkin päästä. Voimaparin etäisyys l kuvassa 2 on 240 mm ja pysyy vakiona kaikilla puomimalleilla. Kuormittava voimapari asetetaan siten, että puomiin aiheutuu vääntömomentti suuruudeltaan 36 kNm. Teräksen materiaalivakiot ovat kimmomoduuli E 210 GPa ja Poissonin vakio ν 0,3 (SFS-EN 1993-1-1, 2005, s. 28). Palkin omaa painoa ei oteta huomioon, sillä tutkitaan vain väännöstä aiheutuvia jännityksiä.



Kuva 3. Periaatekuva haarukkapuomin mitoista millimetreinä (Nikula, 1990, s. 28).

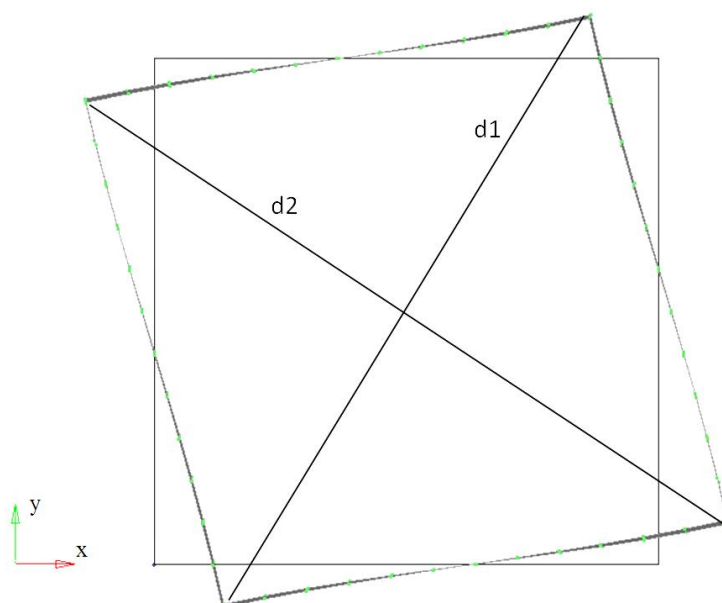
Pääsääntöisesti tutkitaan neliöprofiilin käyttäytymistä, mutta vertailun vuoksi mallinnetaan myös kaksi eri seinämäpaksuista suorakaideprofiilia. Kaikki jäykistelevyt sijoitetaan kohtisuorasti palkin pituusakselille. Taulukossa 1 on lueteltu tutkitut puomit.

Taulukko 1. Tutkittujen puomimallien kuvaukset

	Profiili [mm]	Kuvaus
A	240x240x4	Jäykistelevy vain puomin päässä
B	240x240x4	Jäykistelevy puomin päässä ja sisäjäykistelevy 200 mm etäisyydellä päästä
C	240x240x4	Kuten B, mutta sisäjäykistelevyn etäisyys päästä 400 mm
D	240x240x4	Kuten B, mutta sisäjäykistelevyn etäisyys päästä 600 mm
E	240x240x6	Kuten A suuremmalla seinämäpaksuudella 6 mm
F	340x240x4	Suorakaideprofiili päätylevyllä, jossa haarukkalevyiksi jatkuvat sivut ovat pidempiä
G	340x240x6	Kuten F suuremmalla seinämäpaksuudella 6 mm

3.2 Puomin poikkileikkauksen vinoutuminen

Puomien elementtimalleille suoritetaan staattinen FE-analyysi, jolla saadaan selville puomien deformaatiot. Selvitetään kuormituksesta aiheutuneet siirtymät puomin poikkileikkauksen kulmissa kuvan 4 xy-tasossa koko puomin pituudella. Puomin vinoutumista havainnollistetaan suurella d_{ero} , joka määritetään kuormitustilassa olevan puomin poikkileikkauksen keskiviivan muodostaman nelikulmion lävistäjien $d2$ ja $d1$ erotuksella. Lävistäjät ovat esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Vinoutuneen poikkileikkauksen lävistäjät.

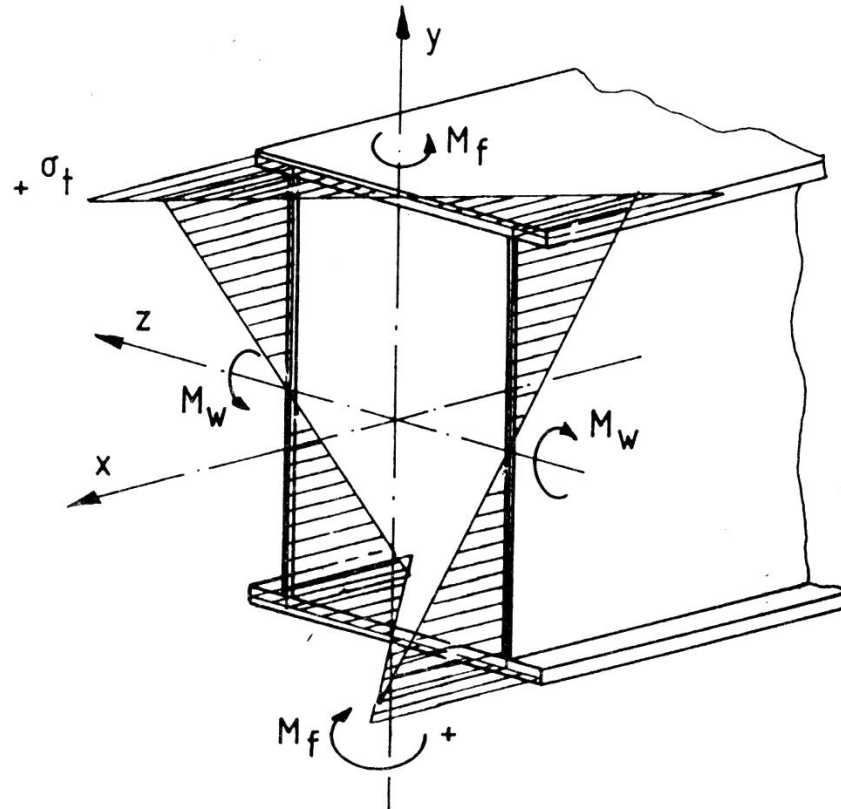
3.3 Normaalijännitykset

Palkin vääntömomentti sisältää vapaan ja estetyn väännön aiheuttamat momentit. Vapaasta väännöstä seuraa vain leikkausjännityksiä. Estetystä väännöstä seuraa leikkausjännityksiä ja normaalijännityksiä. Estetyn väännön vaikutus syntyy, kun poikkileikkauksen vapaata käyritystä ei pääse tapahtumaan, mikä aiheuttaa poikkileikkaukseen normaalijännitystilaa ja pieniä leikkausjännityksiä. Näiden suurimmat arvot eivät vaikuta samoissa kohdissa. Normaalijännityksien suurimmat arvot esiintyvät siellä, missä taivutusmomentti on suurin, ja leikkausjännityksien suurimmat arvot kohdissa, joissa leikkausvoimat ovat suurimmat. (Leskelä & Kumar, 2010, s. 50.)

Eurocode 3 rakenneosien mitoitusohjeen mukaan suljetun poikkileikkauksen tapauksessa, estettyä vääntöä ei tarvitse ottaa huomioon kestävyystarkastelussa staattisen kestävyuden ollessa kriittinen. Sillä voidaan todeta vapaan väännön aiheuttamat leikkausjännitykset hallitseviksi. (Leskelä & Kumar, 2010, s. 50.) Tässä työssä tarkastellaan kuinka suuri vaikutus on estetyn väännön ja vinouttavien voimien aiheuttavilla normaalijännityksillä, kun kyseessä on suljettu profiili.

Vinoutumisen tarkastelulla selvitetään kohta, jossa sen arvo on suurin. Täten suurin poikkileikkausta vinouttavan taivutusnormaalijännityksen arvo on määriteltävissä elementtimallista kyseisestä kohdasta. Tutkittujen mallien vinoutumisesta johtuvien taivutusnormaalijännitysten jakautumisen puomin pituuden suhteen on suoraan verrannollinen vinoutumisen kanssa. Jotta normaalijännitysten kokonaiskuva on hahmotettavissa, verrataan taivutusnormaalijännitysten maksimiarvoja pitkittäisiin normaalijännityksiin.

Vinouttavat voimat synnyttävät pitkittäisiä normaalijännityksiä kaksoissymmetriseen kotelopalkkiin kuvan 5 mukaisesti (Kähönen & Niemi, 1986, s. 9). FE-menetelmän avulla selvitetään puomirakenteiden nurkkasolmuihin syntyvät poikkileikkauksen maksiminormaalijännitykset ja niiden muutos puomin pituuden suhteen.



Kuva 5. Pitkittäisten normaalijännitysten jakautuminen kaksoissymmetrisessä kotelopalkissa vinouttavien voimien johdosta (Kähönen & Niemi, 1986, s. 9).

4 TULOKSET

Bredt'in vakioleikkausvuon kaavalla (1) saatiin leikkausjännitykseksi koko 4 mm seinämäpaksuisen neliöprofiilipuomin pituudella 78 N/mm^2 ja 6 mm seinämäpaksuiselle 52 N/mm^2 . 4 mm seinämäpaksuiselle suorakaideprofiilipuomille leikkausjännitykseksi saatiin 55 N/mm^2 ja 6 mm seinämäpaksuiselle 37 N/mm^2 .

Vinoutumisen tulokset on esitetty kuvien 7 ja 8 kuvaajissa. Kuvaajissa poikkileikkauksen lävistäjien erotuksella määritetty arvo koko puomin pituudella kuvaa vinoutumisen arvoa d_{ero} . Odotusten mukaan suurimmat vinoutumiset tapahtuivat pelkillä päätylevyillä jäykistetyissä puomeissa. Näissä puomimalleissa suurin vinoutuminen tapahtui 600 mm etäisyydellä päätylevystä.

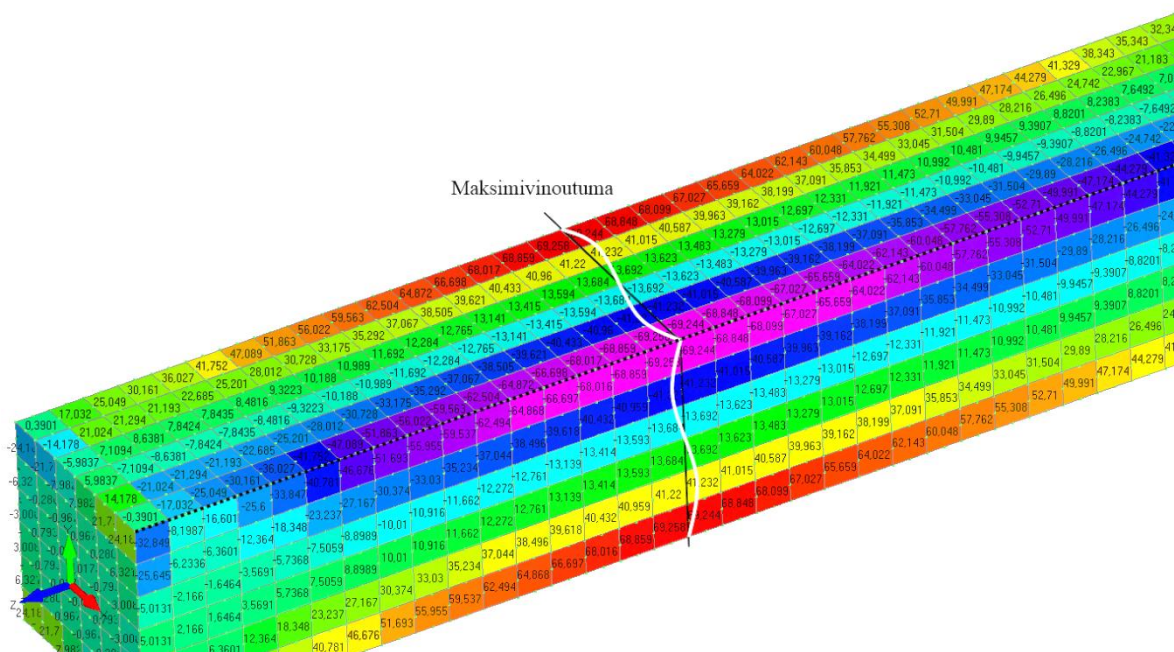
Sisäjäykisteet pienensivät huomattavasti vinoutumista puomissa, mutta eivät kokonaan poistaneet ilmiötä. Parhaan jäykistykseen tutkituissa malleissa aiheutti 400 mm etäisyyteen päätylevystä asetettu jäykiste. Toiseksi jäykimmäksi konstruktioksi vinoutumista vastaan osoittautui 600 mm etäisyyteen päätylevystä asetettu jäykiste. Tässä mallissa kuitenkin vinoutumisen arvo muuttui negatiiviseksi sisäjäykisteen jälkeen.

4.1 Poikittaisten taivutusjännitysten tarkastelu

Vinoutumisesta syntyneiden poikittaisten taivutusjännitysten maksimi-arvot tarkasteltavissa puomimalleissa on esitetty taulukossa 2. Taivutusjännitykset selvitettiin puomimallien kulmissa sijaitsevien kuorielementtien ylä- ja alapintojen poikittaiset normaalijännitykset maksimivinoutumisen kohdalla. Kuvassa 6 on havainnollistettu kuorielementtien yläpinnan eli ulkopinnan keskiarvoistettu poikittainen normaalijännitystila päätylevyllisestä puomista, jonka seinämäpaksuus oli 4 mm. Tutkimuksessa tarkasteltu kulma on merkitty katkoviivalla.

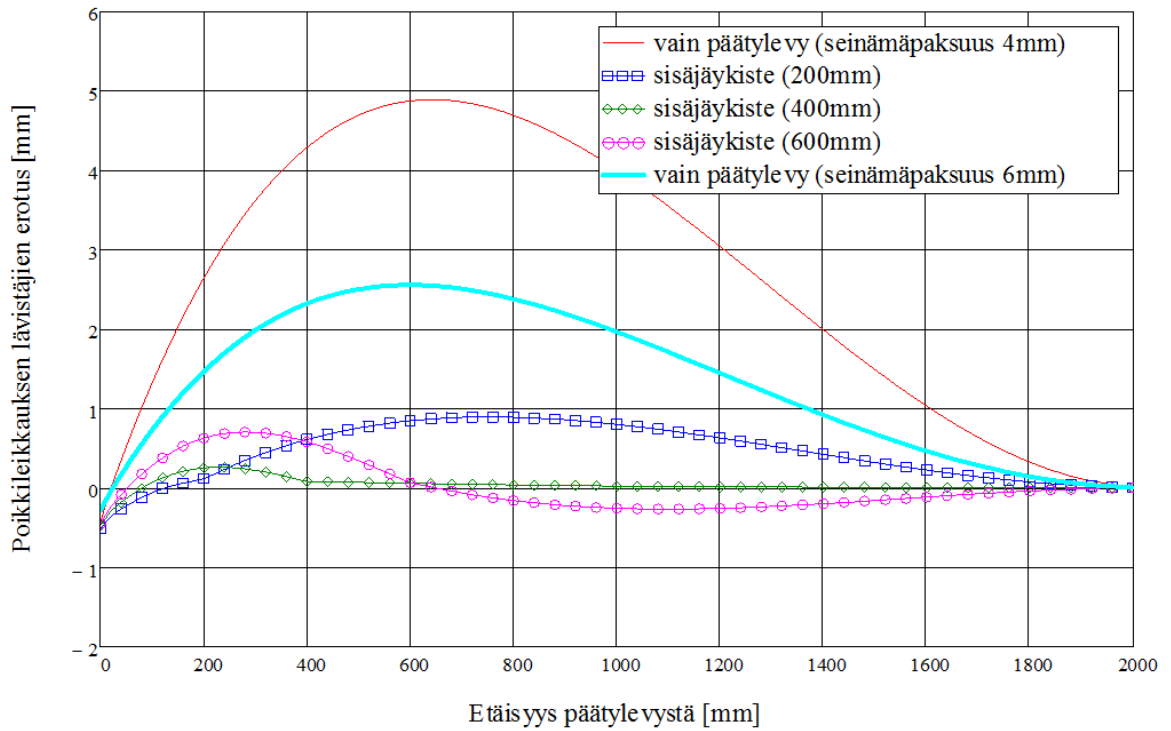
Taulukko 2. Poikittaiset maksimitaivutusjännitykset puomien kulmissa.

	Yläpinnan normaalijänn. [N/mm ²]	Alapinnan normaalijänn. [N/mm ²]
Neliöprofiili, seinämäpaksuus 4 mm		
vain päätylevy	-69,3	70,2
sisäjäykiste 200 mm	-12,6	12,8
sisäjäykiste 400 mm	-4,7	3,7
sisäjäykiste 600 mm	-10,7	10,3
seinämäpaksuus 6 mm		
vain päätylevy	-53,8	55,1
Suorakaideprofiili, vain päätylevy		
seinämäpaksuus 4 mm	-24,8	25,0
seinämäpaksuus 6 mm	-22,1	22,4



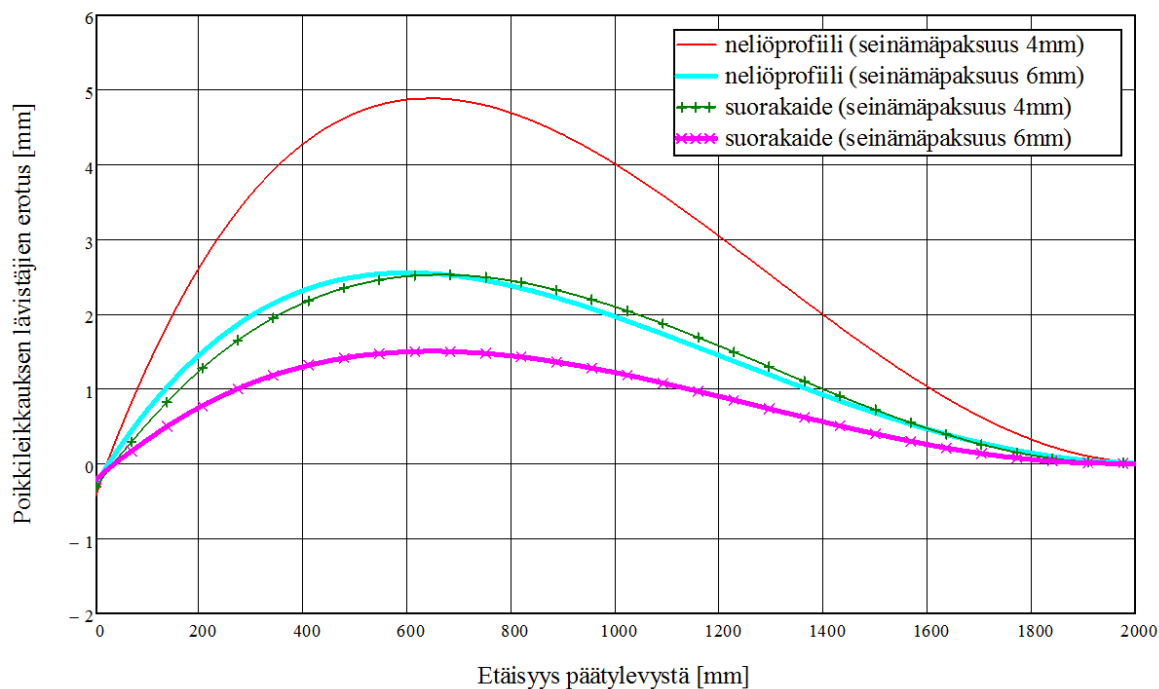
Kuva 6. Puomin poikittainen yläpinnan normaalijännitustila.

Neliöprofiilimallien vinoutumista puomin pituudella kuvaavat käyrät ovat kuvassa 7. Kuvassa on havainnollistettu 4 mm seinämäpaksuisten puomien vinoutuminen erilaisilla jäykistelevyvariaatioilla. Vertailuksi kuvaajaan on piirretty myös pelkällä päätylevyllä jäykistetyn 6 mm seinämäpaksuisen puomin vinoutuminen.



Kuva 7. Vinoutumisen muutos puomin pituudella.

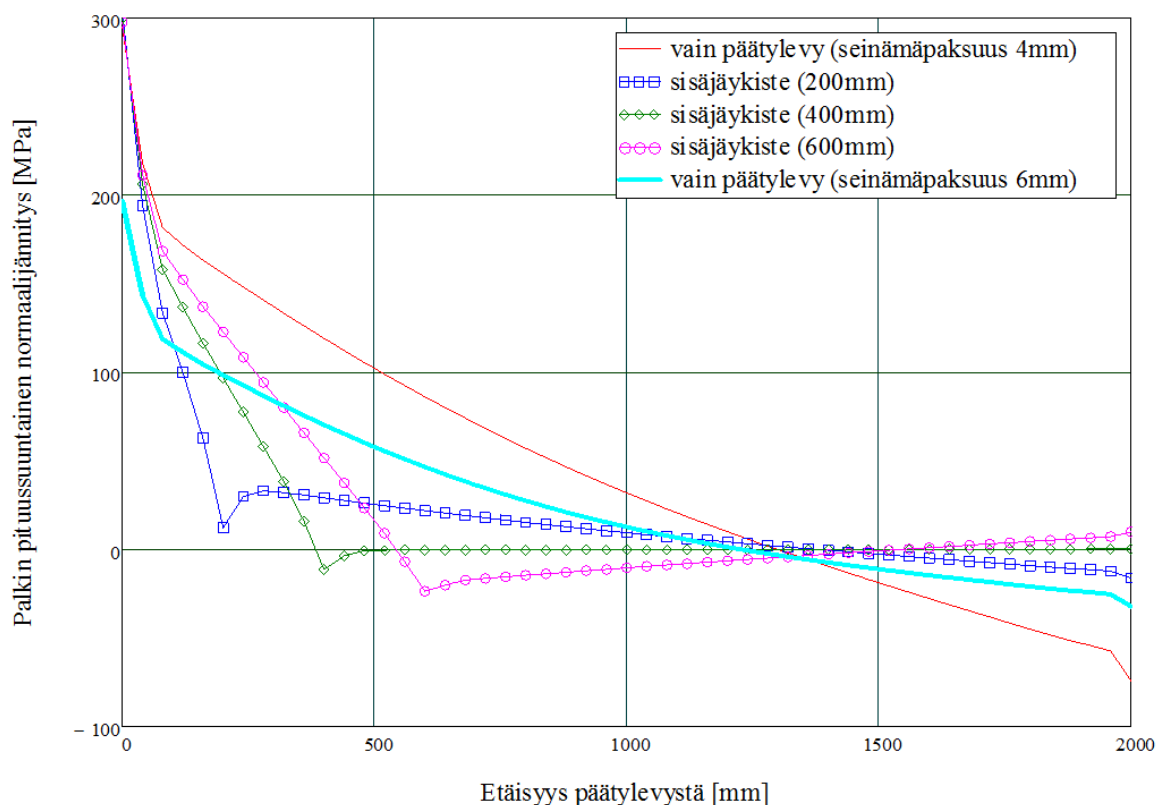
Kuvan 8 kuvaajassa on esitetty neliöprofiilin lisäksi suorakaideprofiilin vinoutuminen. Uumalevyjen ulkomittojen kasvaessa poikittainen normaalitaivutusjännitys pieneni kulmissa vähentäen vinoutumista. Kuvan 8 kuvaajan kaikki neljä puomimallia ovat jäykistetty vain päätylevyllä.



Kuva 8. Neliö- ja suorakaideprofiilin vinoutumisen muutos puomin pituudella.

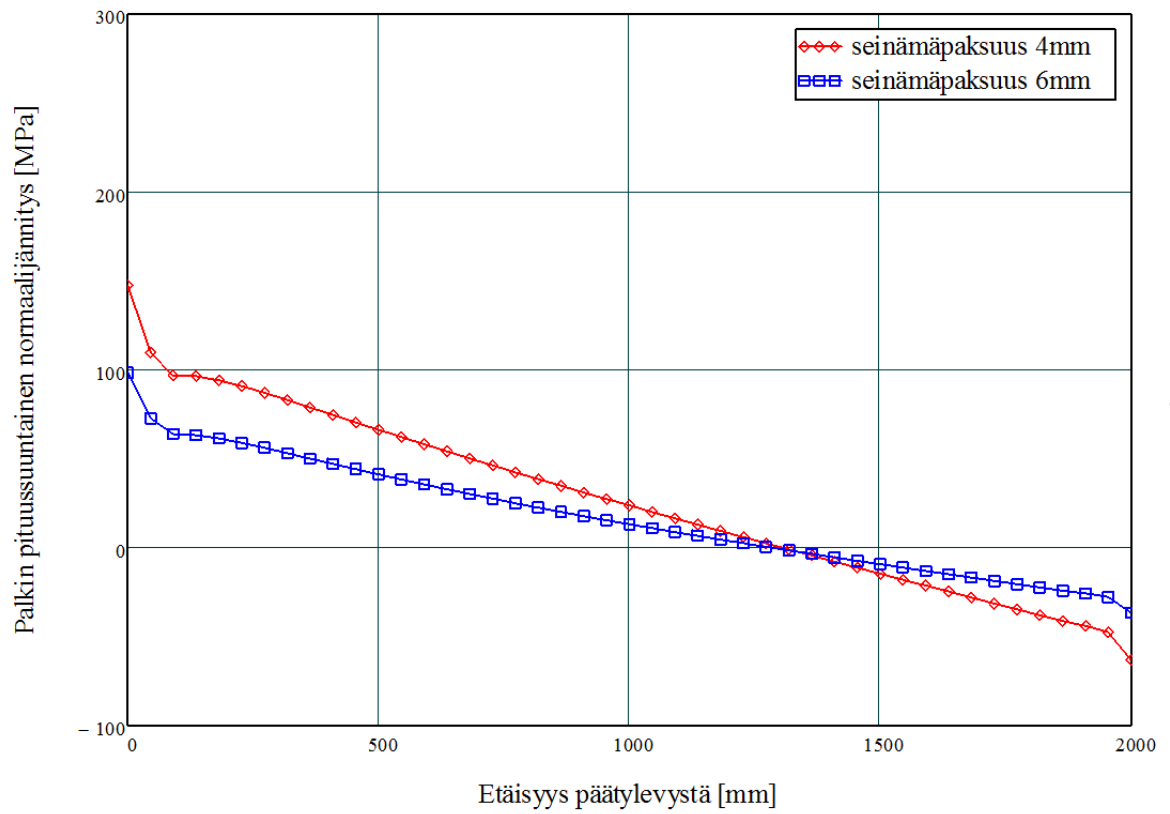
4.2 Pitkittäisten normaalijännitysten tarkastelu

Pitkittäiset normaalijännitykset puomin tarkasteltavassa kulmassa määriteltiin laipalla ja uumalla olevien kulmaelementtien keskiarvolla. Kuvan 9 kuvaajassa on esitetty neliöprofiilimalleihin syntyvät normaalijännitykset puomin pituudella. Sisäjäykisteiden avulla bimomentin aiheuttama pitkittäinen normaalijännitys maadoittui tehokkaasti päätylevyn ja sisäjäykistelevyn etäisyydellä. Sisäjäykistelevy, joka oli sijoitettu 400 mm päähän päätylevystä, maadoitti puomin pitkittäiset jännitykset kokonaan. Toisin sanoen jäykisteen jälkeen vääntö koostui vain puhtaasta väännöstä.



Kuva 9. Pitkittäiset normaalijännitykset neliöpuomimalleissa.

Kuvassa 10 on esitetty suorakaideprofiilimalleihin syntyvät normaalijännitykset kuten edellisessä kuvaajassa. Pitkittäinen normaalijännitys oli pienempi suorakaideprofiileissa verrattuna saman seinämöpaksuisiin neliöprofiileihin. Normaalijännityksen muutos puomin pituuden suhteen käyttäytyi samoin kuin neliöprofiilissa. Ilman sisäjäykisteitä muutos oli lineaarista koko pituudella, pois lukien poikkileikkauksen jäykisteiden kohdalla eli kuormitus- ja tuentapääty. Kuormituspäästä tukeen normaalijännitys muuttui erimerkkiseksi kokonaispituudesta 2/3-osan kohdalla kuten neliöprofiileissakin.



Kuva 10. Pitkittäiset normaaliännitykset suorakaidepuomimalleissa.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Elementtimenetelmän mukaisella tarkastelulla vääntökuormasta syntyi puomiin poikittaisia taivutusjännityksiä ja pitkittäisiä normaalijännityksiä. Jokaisella tutkitulla kuorielementtimallilla havaittiin kyseisten jännitysten aiheutuminen. Seinämäpaksuutta lisäämällä molemmat jännitykset pienenevät. Vinoutumisen arvo puolittui, kun seinämäpaksuus asetettiin 1,5-kertaiseksi päätylevyillä jäykistetyillä puomilla.

Sisäjäykistelevyjä käyttäessä 200 mm etäisyys päätylevystä oli liian vähän, sillä vinoutuminen jatkui jäykisteen jälkeen samansuuntaisena. Suurin poikittainen taivutusjännitys jäi kuitenkin maadoittumisesta johtuen 82 % pienemmäksi kuin pelkällä päätylevyillä jäykistetyissä puomissa. Tutkituista rakenteista parhaimman maadoituksen aiheutti 400 mm etäisyydelle asetettu sisäjäykistelevy, jolloin vinoutuminen oli lähes olematonta.

Jäykistelevyn tarkoituksena oli muuttaa voimaparilla aiheutettu vääntö puomiin puhtaaksi väännöksi, jolloin tämän työn tapauksessa yksinkertaistettuna voimat olisivat asettuneet sekä uumalevyille että laippalevyille aiheuttaen yhtä suuren vääntömomentin puomin vääntökeskiöön. Tämä tilanne oli havaittavissa 400 mm etäisyyteen asetetun sisäjäykisteen tapauksessa. Sisäjäykistelevyn jälkeen pitkittäinen normaali- ja poikittainen taivutusjännitys hävisivät kokonaan.

Puhtaan väännön aiheuttama leikkausjännitys neliöprofiilipuomissa oli suuruudeltaan lähes sama kuin poikittainen maksimitaivutusjännitys, mutta pitkittäisen normaalijännityksen maksimi kuormituspäässä oli jopa yli 3-kertainen Bredt'in leikkausjännitykseen verrattuna.

Suorakaideprofiilissa tutkitut jännitykset pienenevät johtuen kuormituksen ohjaavan uumalevyn korkeuden lisäämisestä. Pelkkä materiaalin lisääminen levykenttää suurentamalla ei ole kuitenkaan paras ratkaisu ohutlevyrakenteissa kasvavan lommahdusriskin takia.

LÄHTEET

Cook, R.1994. Finite element modeling for stress analysis. Canada: John Wiley & Sons, Inc. 320 s.

Hakala, M. 1980. Lujuusopin elementtimenetelmä. 3. painos. Espoo: Otakustantamo. 490 s.

Kähönen, A. & Niemi, E. 1986. Distortion of a double symmetric box section subjected to eccentric loading – using the beam on elastic foundation approach. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Koneenrakennuksen laitos. Julkaisu 36. 37 s.

Leskelä, M. & Kumar, R. 2010. Rakenneosien mitoitus. Teoksessa: Kaitila, O. (toim.). Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus: Eurocode 3 –oppikirja. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry. 46-81 s.

Nikula, S. 1990. Haarukkavoimien aiheuttamat vinoutumisjännitykset puomissa. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. 53 s.

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

Ylinen, A. 1970. Kimmo- ja lujuusoppi II. Porvoo: Werner Söderström osakeyhtiö. 1010 s.