

Natalia Päivöke

# Rakennusta jäykistävän profiilimaston vääntöjäykkyyden osuus rasiusten jakaumassa

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Rakennustekniikka  
Insinöörityö  
25.4.2012



## ALKULAUSE

Tämä insinööri työ tehtiin Finnmap Consulting Oy:lle. Työtäni ohjaavat yrityksen puolelta rakennesuunnittelija Suvi Heikkilä ja Metropolia Ammattikorkeakoulun puolelta lehtori Jouni Kalliomäki. Kiitokseni heille saamastani tuesta ja opastuksesta.

Työni onnistumisen on tehnyt mahdolliseksi Finnmap Consulting Oy:n tarjoama työympäristö, sen tekniikka ja lähdekirjallisuuden saatavuus sekä M-sektorin työtovereiden, erityisesti Anssi Vuorenmaan ja Mika Nuorasan neuvot.

Kiitos aviopuolisolleni ja perheelleni, jotka ovat kannustaneet ja tukeneet minua koko opiskelunaikana.

Helsingissä 25.4.2012

Natalia Päivöke

Tekijä Otsikko	Natalia Päivöke Rakennusta jäykistävän profiilimaston vääntöjäykkyyden osuus rasi- tusten jakaumassa
Sivumäärä Aika	54 sivua + 5 liitettä 25.4.2012
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaaja(t)	Rakennesuunnittelija, DI Suvi Heikkilä Lehtori Jouni Kalliomäki
<p>Tämä insinööri-työ tehtiin rakennetekniikkaan erikoistuneelle suunnittelu- ja konsultointiyri-tykselle Finnmap Consulting Oy:lle. Työssä tarkasteltiin korkean toimistorakennuksen jäykistysjärjestelmää vääntöilmion osalta. Insinööri-työn tavoitteena oli selvittää avoimen profiilimaston vääntöjäykkyyden osuus rakennusta kaatavien voimien jakaumaan.</p> <p>Teoreettisena taustana insinööri-työssä on myös esitetty ohutseinämäisen avoimen poikki-leikkauksen vääntöteoriaa eri vääntötapausten osalta.</p> <p>Profiilimaston vääntöjäykkyyden vaikutusta rakennukseen kohdistuvien vaakavoimien jakaumaan tutkittiin sekä analyyttisesti että käyttämällä elementtimenetelmänalyysia StruSoft FEM-Design 10.0 -ohjelman avulla. Tutkimusta varten luotiin kahdeksankerroksinen rakennusmalli, jonka alin kerros on kellari, ja jäykistysjärjestelmä muodostuu profiilimastosta ja mastoseinästä. Profiilimasto valittiin tässä työssä tehdystä Finnmap Consulting Oy:n toteutuneiden projektien jäykistysjärjestelmien kartoituksesta.</p> <p>Tutkimuksessa kävi ilmi, että profiilimaston vääntöjäykkyys pienentää yksittäisen mastoseinän vaakavoimaosuutta, muttei vaikuta paljon profiilimaston vaakarasi-tykseen.</p> <p>Tuloksista tuli myös esiin profiilimaston vääntöjäykkyyden ja jäykistysjärjestelmän rakenteen asiayhteys. Sekä analyyttisen että numeerisen menetelmien tulokset osoittivat, että rakenteellisesti profiilimastosta riippuvaisissa jäykistysjärjestelmissä mastotornin vääntöjäykkyyden vaikutus yksittäisen mastoseinän osalta on merkittävä. Tutkimuksen rakennusmallin tapauksessa sen ansioista mastoseinän voimajakauma pienenee jopa 32 %.</p> <p>Tutkimuksen tulosten perusteella profiilimaston vääntöjäykkyyden hyväksi käyttö rakennuksen stabiiliteettitarkastelussa vaatii profiilimaston erillistä mitoitus- tusta vääntöille. Näin ollen osamaston vääntöjäykkyyden huomioimisen tarvetta rakennuksen vakavuuden tarkastelussa on harkitseva tapauskohtaisesti.</p>	
Avainsanat	jäykistysjärjestelmä, voimajakauma, profiilimasto, vääntöjäykkyys, vapaa vääntö, estetty vääntö

Author	Natalia Päivöke
Title	The role of a building's core torsional stiffness in the distribution of stress
Number of Pages	54 pages + 5 appendices
Date	25 April 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Suvi Heikkilä, Structural Engineer, M.Sc. Jouni Kalliomäki, Lecturer
<p>This graduate research and development project was carried out at and for Finnmap Consulting Oy – a company specializing in structural design and consulting. The subject of this study was the torsion of high office buildings' bracing system. The aim of this research was to determine the role of an open-section core's torsional stiffness in a horizontal lateral loading distribution.</p> <p>This research was also based on a warping torsion theory for different torsional cases in thin-walled sections.</p> <p>The influence of core torsional stiffness to the distribution of horizontal forces directed at a building was studied both analytically and by using a finite element analysis, with a help of StruSoft FEM-Design 10.0 program. For this study, a structural model of an eight floor building was created, the lowest floor of which is a cellar. Its bracing system is formed of its core and a shear wall. The core chosen for this research was used in projects concerning the survey of bracing systems, implemented by Finnmap Consulting Oy.</p> <p>During the research, it was found out that the torsional stiffness of a core reduces horizontal forces of a single shear wall.</p> <p>The result also showed that the torsional stiffness of a core and a bracing system are connected to each other. Both analytical and numerical results demonstrated that the influence of a core's bracing system to the torsional stiffness of a single shear wall is significant. In the case of this research model, it reduces the distribution of forces to a share wall up to 32 %.</p> <p>On the basis of the research results, the stability analysis of a core torsional stiffness requires separate torsional calculations.</p>	
Keywords	bracing system, core, torsional stiffness, free torsion, constrained torsion

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Tutkimuksen asettelu	3
3	Jäykistysjärjestelmä	5
3.1	Mastoseinäjäykistys	5
3.2	Mastoseinä	7
3.3	Profiilimasto	8
4	Ohutseinämäisen avoimen poikkileikkauksen vääntöteoria	9
4.1	Väännön peruskäsitteitä	10
4.2	Vääntötapaukset	11
4.3	Vääntömomentti	12
4.4	Vääntörasitukset	16
4.5	Poikkileikkaussuureet	19
5	Suunnittelun lähtökohdat	21
5.1	Rakennusmalli	21
5.2	Rakenteen kuormat	22
5.3	Lisävaakavoimat	25
6	Tutkimusmenetelmät	26
6.1	Analyttinen ratkaisu	26
6.1.1	Laskentakoordinaatitot	27
6.1.2	Osamastojen jäykkyydet	28
6.1.3	Kiertokeskiö	31
6.1.4	Voimajakaumat	32
6.2	Numeerinen analyysi	34
6.3	Laskenta	35
7	Tulokset	37
8	Tulosten vertailu	43

8.1	Osamastojen voimajakaumat	43
8.2	Tason kiertymä	45
8.3	Analyttinen ja numeerinen ratkaisu	47
8.4	Profiilimaston vaakavoiman vaikutuspiste	48
8.5	Johtopäätökset	49
9	Yhteenveto	51
	Lähteet	53
	Liitteet	
	Liite 1. Jäykistävät profiilimastot	
	Liite 2. Rakennusmallin luonnon kuormat	
	Liite 3. Rakennusmallin kokonaisvaakavoimat	
	Liite 4. Analyttisen ratkaisun tulokset	
	Liite 5. Numeerisen analyysin tulokset	

## Lyhenteet ja määritelmät

Eurokoodi	eurooppalaisia kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia rakentamismääräyksiä.
FEM	<i>Finite Element Method</i> . Elementtimenetelmä. Numeerinen menetelmä differentiaali- ja integraaliyhtälöiden ratkaisuun.
FEM-Design	mallinnusohjelma kantavien betoni-, teräs- ja puurakenteiden FEM-analyysiin ja suunnitteluun.
G	poikkileikkauksen painopiste.
Profiilimasto	jäykistävä LVIS-kuilu, hissi- tai porrastorni tai niiden yhdistelmä, joka muodostaa yhtenäisen poikkileikkauksen.
S	poikkileikkauksen vääntökeskiö.
Merkinnät	
B	bimomentti
E	kimmomoduuli
G	liukumoduuli
H	osamaston korkeus
$I_v$	vääntöneliömomentti
$I_\omega$	käyritysmisjäyhyys
$I_x, I_y$	jäyhyysmomentti vastaavasti x- ja y-akselin suhteen
KL	vääntötapausten luonnehtiva parametri

$K_x, K_y$	x- ja y-suuntaiset osamaston jäykkyydet
$K_T$	jäykistysjärjestelmän vääntöjäykkyys
$L$	vääntösauvan pituus
$M$	ulkoinen pistemäinen vääntömomentti
$m$	tasan jakautunut ulkoinen vääntömomentti
$Q_x, Q_y$	x- ja y-suuntaiset vaakavoimien resultantit
$Q_{x,i}, Q_{y,i}$	x- ja y-suuntaiset osamaston vaakavoimajakaumat
$S_\omega$	sektoriaalinen staattinen momentti
$T$	sisäinen pistemäinen kokonaisvääntömomentti
$T_v$	Saint Venantin vääntömomentti
$T_\omega$	sektoriaalinen vääntömomentti
$T_{xy,\omega}$	profiilimaston vääntöjäykkyys
$T_{xy,v}$	mastoseinän vääntöjäykkyys
$\theta$	vääntymä
$\sigma$	normaalijännitys
$\tau$	leikkausjännitys
$\varphi$	kiertymä (vääntökulma)
$\omega$	sektoriaalinen koordinaatti



## 1 Johdanto

Insinööriä tehdään rakennetekniikkaan erikoistuneelle suunnittelu- ja konsultointiyritykselle Finnmap Consulting Oy:lle. Yrityksen suunnittelutoiminta kohdistuu sekä uudis- että korjausrakentamiseen laajoissa kohderyhmissä. Toiminnassa osana on myös tutkimus ja kehitys.

Tässä insinööriä rajoitetaan tarkastelemaan korkean toimistorakennuksen jäykistäviä rakenteita vääntöilmion osalta. Korkeiden rakennusten jäykistys toteutetaan yleensä mastoseinäjäykistyksellä, joka usein on ainoa mahdollinen jäykistystapa. Mastoseinäjäykistys koostuu mastoseinistä ja -torneista. Mastotorneihin luetaan LVIS-kuilut, hissi- ja porrastornit, joita sanotaan myös profiilimastoiksi. Rakennuksen muodon ja jäykistysjärjestelmän mahdollisesta epäsymmetrisyydestä johtuen rakennukselta vaaditaan myös vääntöjäykkyyttä.

Aiemmin väännön vaikutukseen teräsbetonirakenteisiin on kiinnitetty suhteellisin vähän huomiota. Siksi tänä päivänä väännön toiminta ja sen analyysi on vielä kehittyvä alue rakennesuunnittelussa. Profiilimastojen poikkileikkausten monimutkaisuus ja epäjatkuvuus profiilimaston pituusakselin suunnassa lisäävät työmäärää jäykistysjärjestelmän sekä analyttisissä että numeerisissa ratkaisuissa.

Tavallisesti suunnitteluprosessissa mastotornit käsitellään erillisistä ohutseinämaisistä suorista mastoseinistä koostuviksi, joista jokaisen suorakaidepoikkileikkauksen vääntöjäykkyys on pieni, mistä johtuen profiilimastojen vääntöjäykkyyttä laskettaessa suorakaidepoikkileikkausten summaa ei huomioida voimajakauman laskennassa. Tässä tapauksessa väännöstä aiheutuvat lisärasituksetkin mastotorniin voidaan sulkea pois sen mitoituksista.

Kuitenkin profiilimastojen poikkileikkaukset omaavat suhteellisen suuret vääntöjäykkyydet suoraan mastoseinään verrattuna. Näin ollen jäykistävien mastotornien osuus koko rakennuksen vääntökestävyydessä voi olla ratkaiseva. Varsinkin rakennuksilla, joilla vääntökestävyys muodostuu lähes pelkästään jäykistävän mastotornin vääntöjäykkyydestä.

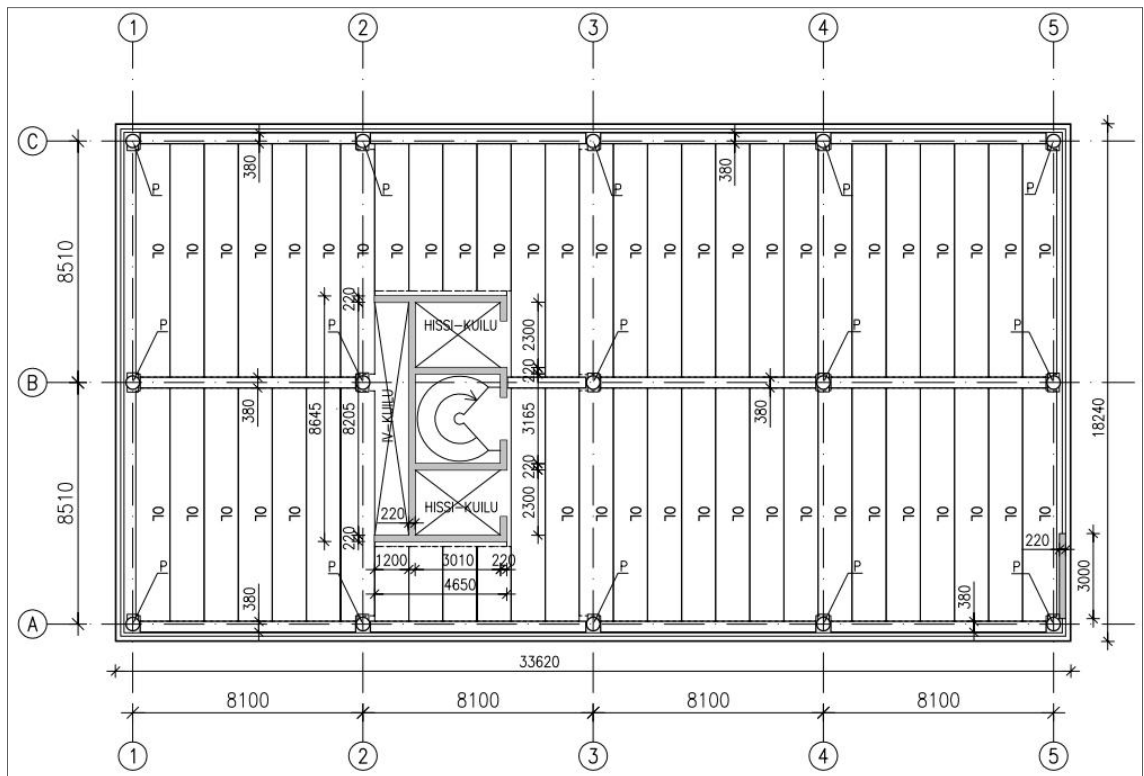
Kiinnostava kysymys on, miten merkittävä on profiilimaston vääntöjäykkyyden vaikutus rakennuksen stabiliteettiin? Minkä verran se vaikuttaa osamastojen voimajakaumaan? Tämän insinööriyön päätavoitteena on selvittää avoimen profiilimaston vääntöjäykkyyden osuus rakennusta kaatavien voimien jakaumaan.

Tutkimusta varten luodaan kahdeksankerroksinen (yksi kellarikerros) rakennusmalli, jonka jäykistysjärjestelmä koostuu avoimesta profiilimastosta ja mastoseinästä. Rakennusmallin jäykistävät rakenteet suunnitellaan paikallavaletuiksi. Tavoitteet saavutetaan laskemalla jäykistäville rakenteille jakautuvat voimasuureet normeissa ja eurokoodeissa esitetyillä laskentamenetelmillä analyttisesti ja käyttämällä numeerista analyysia FEM-Design 10.0 -ohjelman avulla. Analyttisen laskennan aputyökaluna käytetään Microsoft Excel -ohjelmaa. Voimajakaumat määritetään rakennusmallin kuudennen kerroksen katon tasolla murtorajatilan kuormitusyhdistelmälle. Tutkimusmenetelmien tulosten suuruksia ja suhteita vertaillaan keskenään. Lopputulokset esitetään taulukko- ja diagrammivertailuina. Niiden pohjalta tehdään johtopäätöksiä. Kirjallisuuden avulla pyritään löytämään ratkaisuja tai ehdotuksia mahdollisiin ongelmakohtiin.

## 2 Tutkimuksen asettelu

Väännön toiminta ja analyysi jäykistävässä rakenteissa on hyvin laajaa ja suhteellisen vähän käytetty alue. Tästä syystä insinööri työ rajoitetaan niin, että tutkittavan alueen tulokset olisivat mahdollisimman selkeitä ja luotettavia.

Profiilimaston vääntöjäykkyyden osuus kokonaisstabiiliteetin tarkastelussa tutkitaan rakennusmallin avulla (kuva 1). Malli luodaan Finnmap Consulting Oy:n käynnissä olevan projektin pohjalta valiten mukaan vain sen ei-jäykistävät rakenteet ja lisäämällä siihen tutkimuksen tarkoitukseen sopiva jäykistysjärjestelmä. Malliksi tehtiin kahdeksankerroksinen toimistorakennus, jonka alin kerros on kellari.



Kuvio 1. Rakennusmallin pohjakuva.

Jäykistysjärjestelmä valitaan niin, että rakennuksen vääntökestävyys muodostuu lähes pelkästään jäykistävän mastotornin vääntöjäykkyydestä, mikä antaa mahdollisuuden saada tutkimukseen selkeät vertailuarvot.

Jäykistysjärjestelmä muodostetaan hissi- ja porrastornista ja umpinaisesta mastoseinästä. Rakennusmallista tehdään kolme tutkimusvaihtoehtoa mastoseinän eri pituuksilla:

- vaihtoehto 1: mastoseinän pituus on 7 metriä
- vaihtoehto 2: mastoseinän pituus on 3 metriä
- vaihtoehto 3: ei ole mastoseinää.

Profiilimaston valinta perustuu Finnmap Consulting Oy:n toteutuneiden projektien jäykistysjärjestelmien kartoitukseen. Valinnan lähtökohtana ovat profiilimaston poikkileikkaussuureet ja lähinnä sen vääntötapaus. Valintana on sellainen profiilimasto, joka rakennusmallissa vastaisi parhaiten todellista rakennetta, pystyisi yksinään toimimaan koko rakennuksen jäykistävänä osamastona ja sen vääntötoiminta voitaisiin käsitellä yhdistetyn väännön teorian mukaan.

Kartoitus tehtiin jäykistävien profiilimastojen ratkaisuihin nähden kymmenistä eri projekteista, joiden kohteina ovat toimistorakennukset. Tutkittujen profiilimastojen poikkileikkaussuureet on laskettu Section Editor -ohjelman avulla, joka on osa StruSoft FEM-Design -ohjelmistoa. Kartoituksen tulokset on esitetty liitteessä 1.

Mastoseinän ja profiilimaston poikkileikkaukset oletetaan vakioiksi koko jäykisteiden korkeudelta. Mastotorni käsitellään yhtenäisenä avoimena poikkileikkauksena. Poikkileikkauksen aukkojen osittaisen sulkemisen vaikutusta ei huomioida.

Tässä työssä laskennallisesti tarkastellaan vain vaakavoimien jakauma jäykistäville rakenteille murtorajatilassa. Muiden rakenteiden kantavuutta ei tarkastella, vaan ne pyritään arvioimaan sellaisiksi, että rakennus toimii.

Rakennusmallin ei-jäykistävien rakenteiden liitokset oletetaan niveliksi. Näiden tai muidenkaan liitosten toimintaa tai vaatimuksia ei tarkastella.

Rakennukseen kohdistuvat kuormat määritetään eurokoodien SFS-EN 1991-1 osien 1, 3 ja 4 sekä SFS-EN 1992-1-1 mukaisesti. Tuulikuorman oletetaan vaikuttavan ulkoseinää vastaan kohtisuorasti. Sivutuulitapauksia ei käsitellä. Hyötykuormat määritetään rakennusmallin käyttötarkoituksen mukaisesti.

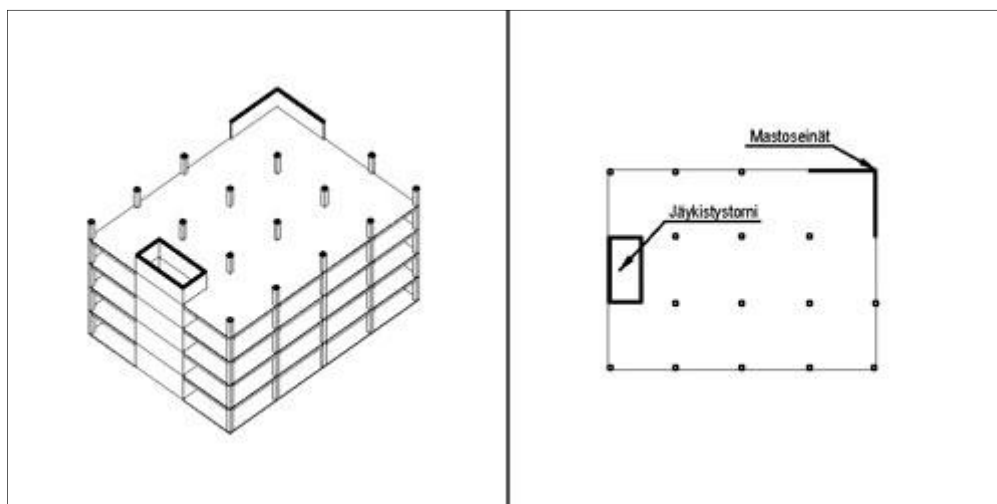
Tutkimuksessa tarkastelun kohteena ovat vain profiilimasto ja mastoseinä. Voimaja-kaumat jäykistäville rakenteille ja jäykistysjärjestelmän kiertymä tarkastellaan rakennusmallin kuudennen kerroksen tasolla. Lisäksi tarkastellaan profiilimaston kiertymä rakennusmallin koko korkeudella ja osittain mastotornin vääntörasitukset sen kiinnityskohdalla.

### 3 Jäykistysjärjestelmä

Jäykistysjärjestelmän tehtävänä on varmistaa rakennusrungon sekä työaikaisen että lopullisen stabiiliteetin säilyminen ja siirtää rakennukseen kohdistuvien vaakakuormitusten aiheuttamat rasitukset perustuksiin ja edelleen maapohjaan. Tässä luvussa selostetaan yleisesti tutkimuskohteessa käytetty jäykistysjärjestelmä ja sen osat.

#### 3.1 Mastoseinäjäykistys

Mastoseinäjäykistys (kuva 2) muodostuu mastoseinistä ja profiilimastoista kuten LVIS-kuiluista ja hissi- ja porrastorneista. Mastoseinät ja -tornit ovat tehokkaita jäykistyksessä niiden suuren jäykkyyden ja kestävyuden ansiosta, mikä antaa mahdollisuuden pitää niiden määrän jäykistysjärjestelmässä suhteellisen pienenä.

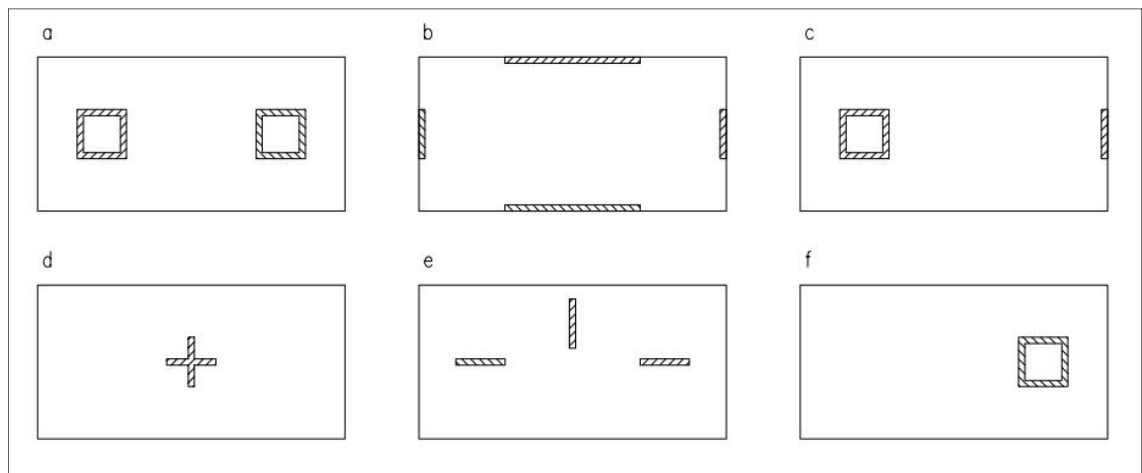


Kuvio 2. Mastoseinäjäykistys [1].

Rakennukseen sopivan jäykistystavan valintaan vaikuttavat monet tekijät, joista rakennuksen muunneltavuus ja käyttötarkoitus ovat usein määrääviä. Toimisto- ja liikera-

kennusten arkkitehtuurisissa ratkaisuissa halutaan usein minimoida jäykistävien rakenteiden määrä tilankäytön ja muunneltavuuden vuoksi. Lisäksi toimistorakennukset ovat suhteellisen korkeita ja niiden välipohjarakenteet usein toistuvat kerroksittain, mikä sallii jatkuvien jäykistysosien käytön. Näin ollen sellaisissa rakennuksissa mastoseinäjäykistys toimii tehokkaasti sekä arkkitehtonisesti että rakenteellisesti.

Riittävään jäykistykseen vaaditaan vähintään kaksi yhdensuuntaista ja yksi niitä vastaan kohtisuorassa oleva seinä. Jäykistyssysteemin tehokkaan toimivuuden kannalta osamastojen oikea sijoittelu on tärkeää. Systemi pyritään aina sijoittamaan koko rakennuksen poikkileikkaukseen nähden symmetrisesti, jotta vältettäisiin vaakakuorman aiheuttama rungon kiertymä. Rungon kiertymän hallinnassa on edullista sijoittaa osamastot kauas toisistaan sekä välttää tilanteita, joissa seinien keskilinjat leikkaavat toisensa samassa pisteessä. Kuvassa 3 on esitetty muutama jäykistävien rakenteiden sijoitusratkaisu.



Kuvio 3. Jäykistävien rakenteiden sijoitusratkaisuja: vaihtoehdot a, b ja c ovat suositeltavia, vaihtoehtoja d, e, f tulee välttää. [2, s. 37.]

Jäykistävät pystyrakenteet toimivat perustuksista jäykästi kiinnitetyn ulokepalkin tavoin. Riittävä pystykuormitus varmistaa niiden toimivan kokonaan puristettuina rakenteina kaikissa kuormitustapauksissa. Suunnittelussa tulee välttää vedolle alttiita rakenteita, koska vedosta aiheuttava betonin halkeilu heikentää rakenteen jäykkyyttä merkittävästi. Mikäli rakenteelle kuitenkin tulee vetoa, on huolehdittava vetovoimien siirtämisestä maapohjan asti, käyttäen seinän vetoraudoitusta ja ankkurointia.

Jäykkinä levyinä toimivat rakennuksen tasot siirtävät vaakakuormat osamastoille. Jäykistävät rakenteet saavat kultakin tasolta kuormaa omien jäykkyyksiensä suhteessa. Mahdolliset aukot, kuten ovet, ikkunat tai läpiviennit, heikentävät niiden jäykkyyttä sekä aiheuttavat halkeilua.

Jäykistävät rakenteet voidaan toteuttaa paikallavalettuina tai betonielementeistä koostuvina. Esimerkiksi mastotornien valmistus liukuvalutekniikalla on kohtuullisen edullista ja rakenteesta saadaan jäykkä ja yhtenäinen kokonaisuus. Elementtirakentamisessa elementtien saumojen liitosten toiminnalla on tärkeä merkitys seinämaston jäykkyydelle. Saumoihin muodostuu sekä vaaka- että pystysuuntaisia rasiituksia. Myös liitostyyppin valinta vaikuttaa rasiitusten jakautumiseen sauma-alueella. Elementtien saumojen toteutus jäykäksi liitokseksi on usein hankalaa ja kallista.

[1; 2.]

### 3.2 Mastoseinä

Tason suuntaisen jäykkyyden, eli jäykkyyden poikkileikkauksen vahvempaan suuntaan, ja kestävyuden ansiosta mastoseinä sopii mainiosti korkeiden rakennusten jäykistysjärjestelmään. Jäykistävät seinät on pyrittävä sijoittamaan niin, että ne kantavat riittävän pystykuorman kumoamaan vaakakuorman aiheuttamat vetorasitukset. Silloin seinään tarvitaan vain minimirauditus.

Mastoseinät voivat olla suoria tai poikkileikkaukseltaan L-, T- tai U-muotoisia, mitä parantaa niiden taivutusjäykkyyttä. Seinät voivat olla umpinaisia tai aukkorivejä sisältäviä. Aukot voivat sijaita seinän tasolla symmetrisesti riveissä tai mielivaltaisissa kohdissa. Aukolliset mastoseinät vaativat erillisen analyysin ja mitoituksen.

Seinäelementeistä koostuvien seinämastojen vaaka- ja pystyliitossaumat on mitoitettava siirtämään normaalivoima- ja leikkausrasiitukset niin, että ne toimivat yhtenäisenä rakenteena. Työmenetelmistä ja käytettävistä materiaaleista riippuen ongelmaksi muodostuu usein elementtisaumojen juotosvalujen kutistumisesta johtuva halkeilu.

Suunniteltaessa pieneen määrän jäykistysseiniä sisältävä jäykistysjärjestelmä, on muistettava, että liian lyhyissä yksittäisissä seinissä vaakavoimat voivat kasvaa suuriksi ja

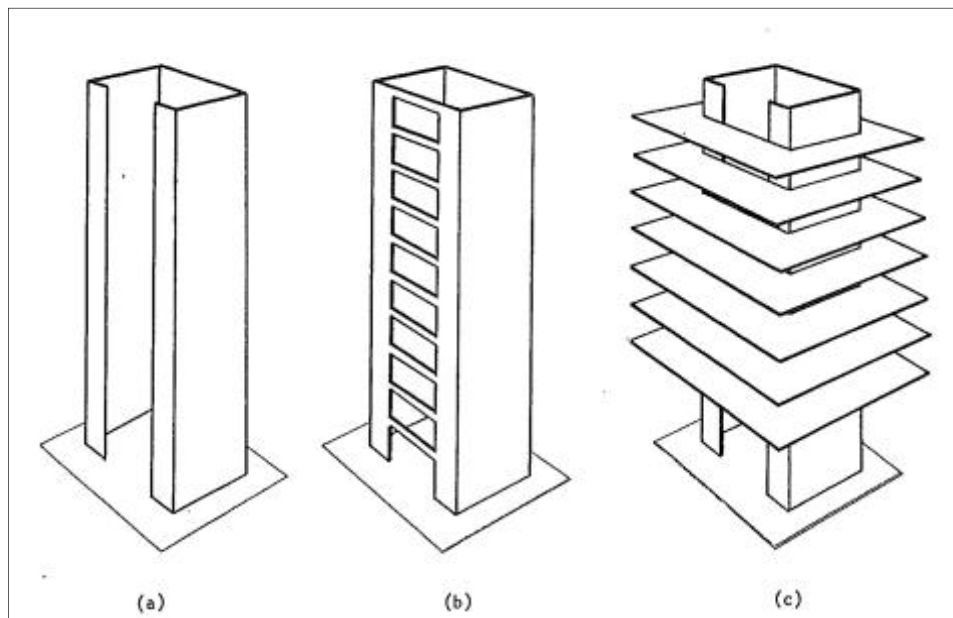
vaatia seinien raudoitteilta merkittäviä kapasiteetteja. Ongelmaksi voi muodostua myös suurten vaakavoimien siirtäminen tasoilta lyhyille jäykistysseinille.

[1; 3.]

### 3.3 Profiilimasto

Profiilimastot, kuten porras- ja hissitornit, ovat mastojäykistysjärjestelmän pääosia. Suuren pääjäyhyysmomentin ansiosta teräsbetonikuilu pystyy yksinään kantamaan koko rakennukseen kohdistuvan vaakakuorman. Profiilimaston poikkileikkaus voi olla avoin tai osittain suljettu aukonylityspalkeilla tai laattatasoilla, kuten esitetty kuvassa 4. Poikkileikkauksen osittainen sulkeminen nostaa profiilimaston vääntöjäykkyyttä ja estää käyritymistä. Sen sijaan palkille ja laatalle muodostuu leikkaus- ja taivutusrasituksia.

Aukkojen sijainti voi muuttaa poikkileikkauksen muotoa mastotornin pituusakseliin nähden, mikä vaikeuttaa sen analysointia profiilina rakennusrungon jäykistyslaskennassa. Näin ollen hissi- ja porrastornit käsitellään useimmiten useista osapoikkileikkauksista muodostuviksi valmistustavasta riippumatta.



Kuvio 4. Yksiaukkoriviset profiilimastot poikkileikkauksiltaan: (a) avoin, (b) osittain suljettu palkkeilla, (c) osittain suljettu tasolaatoilla [3, s. 309].



Vaakakuoman aiheuttamat taipumat ja jännitykset mastotorniin mitoitetaan tavallisesti ulokepalkin tavoin profiilin pääkoordinaatiston suhteen laskettuun jäyhyysmomenttiin pohjautuen. Vääntötoiminnan suhteen profiilimaston dimensioiden, kuten korkeuden, pituuden ja seinämäpaksuuden, suhde sallii sen luokittelamisen ohutseinämäiseksi pal-  
kiksi.

Jos rakennus pääsee myös kiertymään vaakavoiman vaikutuksesta, profiilimaston vääntöjäykkyydellä voi olla merkittävä vaikutus koko rakennuksen vääntökestävyyteen. Kun profiilimasto kiertyy, sen poikkileikkaus pyrkii käyristymään. Toisaalta perustuksiin jäykästi kiinnitetty poikkileikkaus ei pysty käyristymään. Silloin käyristymisen esto aiheuttaa osamastolle sen akselin suuntaisia lisärasituksia, kuten leikkaus- ja normaalijännitykset. Profiilimaston kiinnityskohdassa väännöstä syntyvä normaalijännitys voi olla lähes samansuuruinen kuin taivutusjännitys. Vääntörasitukset on huomioitava rakennesuunnittelussa. Rakennuksissa, jotka ovat rakenteellisesti riippuvaisia mastotor-  
nista, rakennesuunnittelijan pitää osata arvioida, altistuuko kuilu väännölle ja jos altistu-  
tuu, niin se on otettava mukaan rakennesuunnitteluun ja analyysiin. Profiilimaston kier-  
tymisen analysoinnissa on huomioitava sekä vapaan että estetyin väännön vaikutukset.

[1; 3, s. 309-354.]

#### 4 Ohutseinämäisen avoimen poikkileikkauksen vääntöteoria

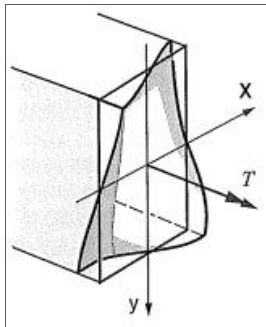
Talonrakennuksessa on useimmiten kysymys tasapainottavasta väännöstä. Tasapainot-  
tavaksi väännöksi kutsutaan vääntötapausta, jossa vääntömomentti on tarpeen raken-  
teen tasapainoehdojen saavuttamiseksi. Tässä työssä rajoitutaan käsittelemään vain  
tätä vääntötapausta ohutseinämäisessä poikkileikkauksessa. Poikkileikkaus oletetaan  
ohutseinämäiseksi, kun toteutuu seuraava ehto  $t \ll s$ , missä  $t$  on poikkileikkauksen  
paksuus ja  $s$  on poikkileikkauksen pidemmän sivun keskiviivan pituus [4, s. 261].

Tässä työssä vääntöteoria esitetään suhteellisen suppeasti ja vain siinä määrin kun  
työn aihepiiri vaati. Avoimien ohutseinämäisten sauvojen väännön teoria perustuu  
otaksumiin, että sauvan poikkileikkaus ei muuta muotoaan eikä leikkausmuodonmuu-  
tosta (liukuma) sauvan seinämän keskipinnalla oteta huomioon. [5.]

#### 4.1 Väännön peruskäsitteitä

Väännön ansiosta poikkileikkaus kiertyy jäykkänä levynä vääntökeskiön ympäri. *Vääntökeskiöksi* ( $S$ ) kutsutaan poikkileikkauspistettä, jonka kautta kulkevat voimat eivät aiheuta sauvan vääntöä. Kaksoissymmetrisen poikkileikkauksen vääntökeskiö yhtyy sen *painopisteeseen* ( $G$ ). [5.]

Poikkileikkauksen kiertyessä sen symmetria-akselit pysyvät suorina samalla kun poikkileikkauksen pinnassa tapahtuu muodonmuutos, eli poikkileikkaustaso käyristyy kuvan 5 mukaisesti. Tätä ilmiötä kutsutaan *poikkipintapainumaksi* tai *deplanaatioksi*. Kaikki poikkileikkaustyypit, paitsi ympyrä- ja ympyrärengaspoikkileikkaus kokevat deplanaation. [4, s. 239-242.]



Kuvio 5. Poikkipintapainuma [4, s. 239].

Vääntötapaukset jakautuvat kolmeen tyyppiin:

- *vapaa vääntö* eli Saint Venantin vääntö
- *estetty vääntö* eli Vlasovin teorian mukainen vääntö
- *yhdistetty vääntö* eli vapaan ja estetyn väännön yhdistelmä.

Vapaassa väännössä sauvan poikkipintapainuma pääsee vapaasti syntymään ja vääntömomentin kuormittamaan poikkileikkaukseen syntyy vapaan väännön leikkausjännityksiä. Kun sauvan poikkileikkaustasojen käyristyminen on osittain tai kokonaan estetty kyseessä on estetty vääntö. Estetty vääntö aiheuttaa sauvaan estetyn väännön leikkaus- ja normaalijännityksiä. Yhdistetyn väännön tapauksessa syntyy kaikki edellä mainitut jännitykset. [6.]

## 4.2 Vääntötapaukset

Vääntömomentti siirtyy sauvassa joko vapaan tai estetyn väännön teorian mukaisesti. Tavallisimmin kuitenkin vääntö jakautuu näiden kahden ääritapauksen yhdistelmäksi.

Sauvan poikkileikkausmuodosta, -suureista, pituudesta ja reunaehdoista riippuu, mikä vääntötapaus kyseisessä sauvassa esiintyy. Poikkileikkausmuotoon nähden poikkileikkaukset voidaan luokitella seuraavasti [6, s. 151]:

- Poikkipintapainumasta vapaat kuten kapeat suorakaide-, T-, L- ja kotelo-poikkileikkaukset, joissa vapaa vääntö on hallitseva.
- Poikkipintapainuman kokevat poikkileikkaukset, joissa voi esiintyä vapaa, estetty tai yhdistetty vääntö. Tähän ryhmään kuuluvat yllä mainittuja lukuun ottamatta kaikki poikkileikkaukset.

Parametrin  $kL$  avulla voidaan arvioida, kuinka vapaa vääntö ja poikkileikkauksen käyrityksen estämisestä aiheutuva vääntö, eli estetty vääntö, sauvassa suhtautuvat toisiinsa. Parametrin arvo lasketaan seuraavasti [6, s. 151]:

$$kL = L \sqrt{\frac{GI_v}{EI_\omega}} \quad (1)$$

$GI_v$  on vapaan väännön vääntöjäykyys, jossa  
 $G$  on sauvan materiaalin liukukerroin  
 $I_v$  on vapaan väännön vääntöneliömomentti  
 $EI_\omega$  on estetyn väännön käyritysjäykyys, jossa  
 $E$  on sauvan materiaalin kimmokerroin  
 $I_\omega$  on käyritysjäyhyys  
 $L$  on sauvan pituus.

Materiaalin liukukerroin lasketaan kaavalla [7, s. 30-31]:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (2)$$

jossa  $\nu$  on Poissonin luku ja halkeilemattomalle betonille sen arvo on 0,2.

Vääntöä koskevat tieteelliset teokset antavat  $kL$  parametrille seuraavat raja-arvot, joiden pohjalta voidaan tehdä päätelmiä sauvan hallitsevasta vääntötapauksesta [5; 8]:

- $kL > 10$ , kyseessä on vapaa vääntö
- $kL < 0,5$ , kyseessä on estetty vääntö
- $0,5 < kL < 10$ , kyseessä on yhdistetty vääntö.

Nämä ehdot voidaan ottaa käyttöön betonirakenteissa. Kuitenkin on muistettava, että esimerkiksi teräsrakenteiden suunnittelussa  $kL$  parametrille asetetaan isompia raja-arvoja [5, s.151]. Siksi rakenteen vääntöanalyysissä on harkittava vääntötapausta tilanteen mukaan.

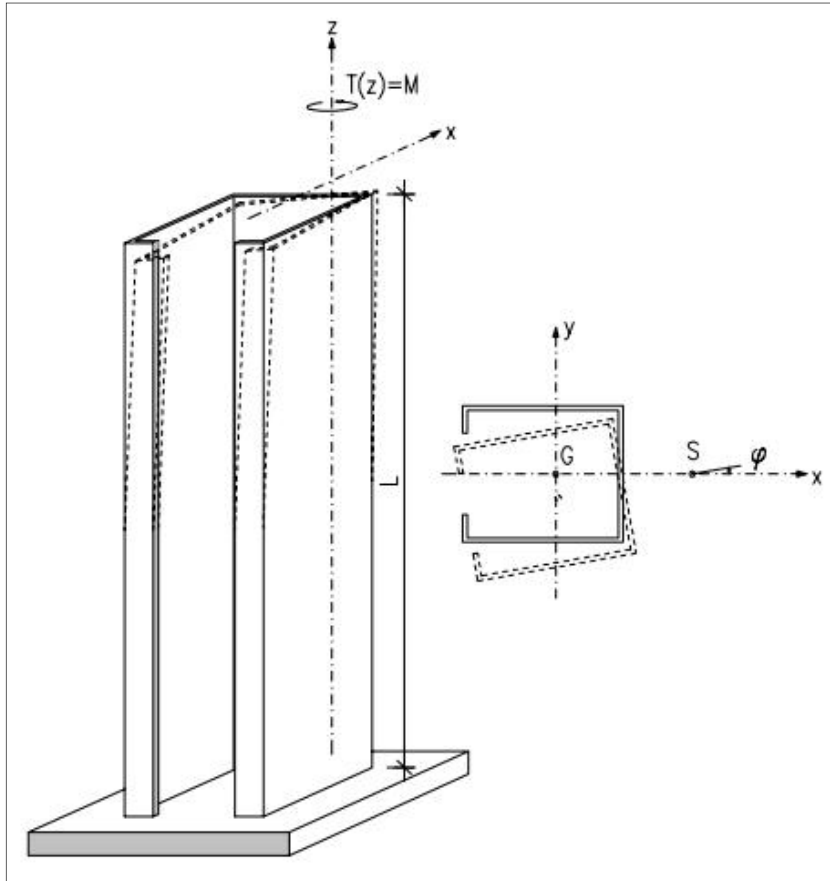
Vääntäteoriaa käsittelevissä julkaisuissa vääntösauvan pituus merkitetään  $L$ -kirjaimella. Tämän työn vääntöteorian osuudesta käytetään samaa merkintätapaa, jotta tarvittaessa olisi helppoa vertailla työssä esitettyjä kaavoja keskenään. Kuitenkin jäykistyslaskennassa vääntösauva käsitellään pystyrakenteena ja sen pituus korkeutena, joka vuorostaan jäykistyslaskennassa merkitään  $H$ -kirjaimella.

Poikkileikkauksen vääntötapausten esimerkit on esitetty liitteessä 1. Liitteeseen kerätyt avoimet poikkileikkaukset ovat tässä työssä tehdyn jäykistysjärjestelmien kartoituksen profiilimaston ratkaisuja. Liitteen 1 poikkileikkaus 1 kuvaa mastoseinätapauksen ja poikkileikkaus 10 tutkimukseen valitun profiilimaston avoimen poikkileikkauksen.

### 4.3 Vääntömomentti

Kuvassa 6 on esitetty perustuksista jäykästi kiinnitetty profiilimasto, jota kuormittaa vääntömomentti ( $M$ ). Staattisesti määrätyn ulokesauvan tapauksessa *sisäinen vääntömomentti* ( $T$ ) on jokaisessa poikkileikkauksessa sama kuin vääntömomenttikuorma, eli  $T(z) = M$ . Salmi ja Pajunen [4] määrittelevät sisäinen vääntömomentin seuraavasti:

Vääntömomentti ( $T$ ) on poikkileikkaukseen syntyvän leikkausjännityskentän yhdistystuloksen momentti, joka estää leikkauksen eri puolilla olevia akselin osia kiertymästä toisiinsa nähden kyseisen leikkauksen kohdalla [4, s. 239].



Kuvio 6. Vääntöä profiilimastossa [3, 5].

Kuvan 6 profiilimaston poikkileikkauksen vääntökulmaa ( $\varphi$ ) kutsutaan poikkileikkauksen *kiertymäksi*. Kiertymä on sauvan pituuskoordinaatin  $z$  funktio, eli  $\varphi = \varphi(z)$ . Poikkileikkauksen muodonmuutosta esittää *vääntymä* ( $\theta$ ), jonka määritellään kaavalla

$$\theta = \frac{d\varphi}{dz} \quad (3)$$

Sauvan minkä tahansa poikkileikkauksen pituusakseliin ( $z$ ) nähden kokonaisvääntömomentti muodostuu seuraavista komponenteista:

$$T(z) = T_v(z) + T_\omega(z) \quad (4)$$

- $T$  on kokonaisvääntömomentti
- $T_v$  on vapaa väännön ilmaiseva Saint Venantin vääntömomentti
- $T_\omega$  on estetyin väännön ilmaiseva *sektoriaalinen vääntömomentti*.

Vapaan väännön momenttia määritetään kaavalla

$$T_v = GI_v \theta = GI_v \frac{d\varphi}{dz}, \quad (5)$$

jossa G on sauvan materiaalin liukukerroin ja  $I_v$  on poikkileikkauksen vapaan väännön vääntöneliömomentti. Poikkileikkauksen muodonmuutoksen ja vastaavan rasituksen yhteyden ilmaisevaa suuretta  $GI_v$  kutsutaan vapaan väännön *vääntöjäykkyydeksi*.

Ulokepalkin jäykässä kiinnityskohdassa kiertymä on nolla, silloin vääntömomentiksi sauvan vapaassa päässä korkeudella L saadaan

$$\Delta\varphi = \frac{T_v L}{GI_v} \quad \Rightarrow \quad T_v = \Delta\varphi \frac{GI_v}{L}, \quad (6)$$

$\Delta\varphi$  on sauvan päiden kiertymäerotus

L on sauvan pituus.

Estetyn väännön sektoriaalinen vääntömomentti vuorostaan määritellään seuraavasti:

$$T_\omega = -EI_\omega \frac{d^3\varphi}{dz^3} = \frac{dB}{dz} \quad (7)$$

$$B = -EI_\omega \frac{d^2\varphi}{dz^2} \quad (8)$$

B on sauvan tarkisteltavan poikkileikkauksen bimomentti.

Käyttämällä esitettyjä vapaan ja estetyn vääntömomenttikomponentteja voidaan määrittää kokonaisvääntömomentin lauseke tarkemmin. Sauvan päässä vaikuttavan piste-mäisen kokonaisvääntömomentin lauseke muodostuu sijoittamalla kaavaan 4 lausekkeet 5 ja 7:

$$-EI_\omega \frac{d^3\varphi}{dz^3} + GI_v \frac{d\varphi}{dz} = T(z) = M \quad (9)$$

Sauvaan vaikuttavan tasaisesti jakaantuneen vääntökuormituksen tapauksessa kokonaisvääntömomentin lauseke 9 muuntuu seuraavaan muotoon, jota kutsutaan *väännön yleiseksi differentiaaliyhtälöksi*:

$$EI_{\omega} \frac{d^4\varphi}{dz^4} - GI_v \frac{d^2\varphi}{dz^2} = m(z) \quad (10)$$

$m$  on vääntömomenttikuorma sauvan pituusyksikköä kohti.

Määritetään kaavassa 9 esitettyjen jäykkyystermien  $GI_v$  (vapaan väännön vääntöjäykkyys) ja  $EI_{\omega}$  (estetyin väännön käyritysmisjäykkyys) suhde parametrin  $k$  avulla

$$k = \sqrt{\frac{GI_v}{EI_{\omega}}} \quad (11)$$

silloin kaava 10 voidaan ilmastaa seuraavassa muodossa:

$$\frac{d^4\varphi}{dz^4} - k^2 \frac{d^2\varphi}{dz^2} = \frac{m}{EI_{\omega}} \quad (12)$$

Väännön yleinen differentiaaliyhtälö löytyy asiaa koskevassa kirjallisuudessa useimmin tässä muodossa. Yhtälön 12 ratkaisemiseen tarvitaan kiertymä eli vääntökulma. Vääntökulman differentiaaliyhtälön yleinen ratkaisu on

$$\varphi(z) = C_1 + C_2 z + C_3 \sinh kz + C_4 \cosh kz + \varphi_0 \quad (13)$$

$C_1$ — $C_4$  ovat sauvan reunaehtojen määrittämiä integroimisvakioita

$k$  on kaavalla 11 määrätty suure

$\varphi_0$  on sauvan kuormitustapauksesta riippuva yksityisratkaisu.

Vääntökulman differentiaaliyhtälön erilaiset yksityisratkaisut ja reunaehtojen vaikutus on selvitetty tarkemmin muun muassa lähteissä 3, 8 ja 9. Tässä esitetään vain kaksi tutkimusaluetta koskevaa tapausta: sauvan pistemäinen ja tasainen vääntökuormitus. Young ja Budynas [9] esittelevät hyvin selkeät taulukot vääntösuureiden laskennan avuksi. Näitä taulukoita käyttäen, pistemäisen vääntömomentin vaikuttaessa avoimeen profiilimastoon korkeudella  $L$  vääntökulman lauseke 14 muodostuu seuraavaksi

$$\varphi(L) = \frac{M(kL - \tanh kL)}{EI_{\omega}k^3} \quad (14)$$

ja avointa profiilimastoa rasitettaessa tasaisella vääntömomentillä koko maston pituudelta vääntökulman lausekkeen 15 muoto on

$$\varphi(L) = \frac{m}{EI_{\omega}k^4} \left[ 1 + \frac{(kL)^2}{2} - \frac{(kL \sinh kL + 1)}{\cosh kL} \right] \quad (15)$$

[3, s. 309-332; 4, s. 239-263; 5; 8; 9.]

#### 4.4 Vääntörasitukset

Vääntöilmiöitä analysoitaessa käytetään vääntösauvan ja taivutuspalkin analogiaa, mikä antaa mahdollisuuden hyödyntää taivutuspalkille johdetut kaavat. Taulukossa 1 on esitetty analogian keskeiset vertailuperiaatteet. [6, s. 152.]

Taulukko 1. Vääntösauvan ja taivutuspalkin analogia [5; 6].

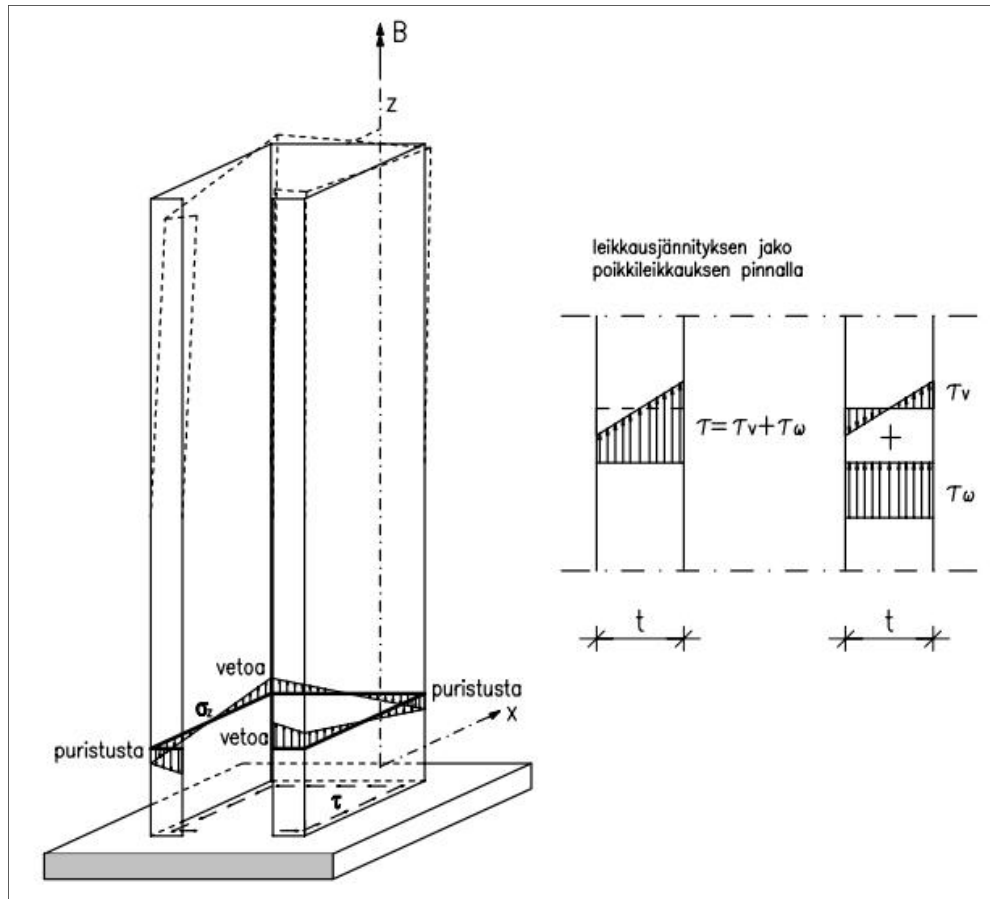
Vääntösauva		Taivutuspalkki	
Rasitus	Merkintä	Rasitus	Merkintä
pistemäinen ulkoinen kokonaisvääntömomentti	M	pistekuorma	F
tasan jakaantunut ulkoinen kokonaisvääntömomentti	m	tasan jakaantunut kuorma	q
sisäinen vääntömomentti	$T_v, T_{\omega}$	leikkausvoima	Q
bimomentti	B	taivutusmomentti	M
vääntökulma	$\Phi$	taipuma	v

Analogiaa käyttäessä vääntösauvan ja analogisen taivutuspalkin reunaehtojen vastavuus on keskeinen ehto. Vääntöä koskevista tieto- ja opetuskirjallisuudesta löytyy taulukoituja vääntösuureiden kaavoja yleisimmille erilaisille kuormitustapauksille ja reunaehdoille. Muutama esimerkki löytyy Kylmämuovatut profiilit [6] ja Youngin ja Budynasin [9] kirjoista.

Kuten edellä oli mainittu, vääntö aiheuttaa sauvaan leikkaus- ja normaalirasitukset sen vääntötapausten mukaisesti. Tavallisimmin kuitenkin sauvassa syntyvät samanaikaisesti



vapaan ja estetyn väännön sekä leikkaus- että normaalirasitukset. Estetyn väännön aiheuttama normaalijännitys on kuitenkin leikkajännitystä merkittävämpi. Kuvassa 7 on esitetty perustuksista jäykästi kiinnitetyn avoimen profiilimaston jännitysjaakaumia.



Kuvio 7. Avoimen poikkileikkauksen jännitysten jakaumia [3, 5].

Vapaan väännön tapauksessa leikkajännityskenttä ( $\tau_v$ ) muuttuu poikkileikkauksen paksuussuunnassa lineaarisesti vastakkaiseen arvoonsa ja ilmentyy seuraavasti [5; 6, s. 152]:

$$\tau_v(z) = \frac{T_v(z)}{I_v} t, \quad (16)$$

jossa  $t$  on poikkileikkauksen seinämän paksuus. Suorakaidepoikkileikkauksen leikkajännityksen maksimiarvo sijaitsee poikkileikkauksen pitkän reunaviivan keskipisteessä.

Estetyn väännön tapauksessa leikkausjännityskenttä ( $\tau_\omega$ ) on poikkileikkauksen jokaisessa pisteessä vakio ja likimain keskiviivan suuntainen. Leikkausjännitykset saadaan laskettua kaavalla [5; 6, s. 154]:

$$\tau_\omega(z, s) = \frac{T_\omega(z)S_\omega(s)}{I_\omega} t, \quad (17)$$

jossa  $t$  on poikkileikkauksen seinämän paksuus ja  $S_\omega$  on *sektoriaalinen staattinen momentti* tarkasteltavassa kohdassa. Leikkausjännityksen maksimiarvo saadaan käyttämällä laskennassa sektoriaalisen staattisen momentin maksimiarvoa. Yhdistetyn väännön tapauksessa leikkausjännitys lasketaan molempien leikkausjännityskomponenttien summana, kuten näkyy kuvasta 7.

Bimomentin aiheuttama normaalijännitys ( $\sigma_z$ ) voidaan laskea kaavalla [6]:

$$\sigma_z(z) = \frac{B(z)\omega(s)}{I_\omega}, \quad (18)$$

jossa  $\omega(s)$  on *sektoriaalinen koordinaatti* poikkileikkauksen tarkasteltavassa pisteessä.

Todellisessa tilanteessa rakenneosaa rasittavat useat kuormitukset samanaikaisesti. Jäykistävien mastorakenteiden tapauksessa kyse on samanaikaisesta puristuksesta tai vedosta, taivutuksesta ja mahdollisesta väännöstä. Silloin rakenneosan kokonaisnormaalijännitys ( $\sigma_{z.kok}$ ) lasketaan lueteltujen jännitystapausten summana kaavalla [5]:

$$\sigma_{z.kok}(s, z) = \frac{N(z)}{A} + \frac{M_x(z)}{I_x} x - \frac{M_y(z)}{I_y} y + \frac{B(z)}{I_\omega} \omega(s) \quad (19)$$

$N$  on vaikuttava puristus-/vetovoima

$A$  on poikkileikkauksen pinta-ala

$M_x, M_y$  on sauvan taivutusmomentti vastaavasti poikkileikkauksen x- ja y-akselin suhteen

$I_x, I_y$  on poikkileikkauksen jäyhyysmomentti vastaavasti x- ja y-akselin suhteen

$x, y$  on etäisyys neutraaliakselista tutkittavaan kohtaan.

#### 4.5 Poikkileikkaussuureet

Taivutusta luonnehtivat poikkileikkaussuureet määritetään poikkileikkauksen koordinaattiakseleiden suhteen. Näin ollen on hyvä mainita poikkileikkauksen koordinaattisysteemi. Varsinkin epäsymmetrisen poikkileikkauksen ollessa kyseessä on otettava huomioon sen eri koordinaatistojen suhteen laskettujen ominaissuureiden vaikutus lopputuloksiin.

Peruskoordinaatisto, eli xyz-koordinaatisto, on yleensä pääkuormituskomponenttien suuntainen. Laskennan kannalta on edullista asettaa kappaleen *painopistekoordinaatisto* ja *peruskoordinaatisto* samansuuntaisiksi. [4.]

Kappaleen poikkileikkauksen tasoa, johon ei kohdistu lainkaan leikkausjännitystä, kutsutaan jännitystilan päätasoksi ja sen normaalin suuntaa pääsuunnaksi. Päätasoon akselit muodostavat poikkileikkauksen *pääkoordinaatiston*. Symmetrisen poikkileikkauksen pääkoordinaatisto yhtyy poikkileikkauksen painopistekoordinaatistoon. Epäsymmetrisen poikkileikkauksen pääkoordinaatisto saadaan kiertämällä sitä painopistekoordinaatiston ympäri. [4.]

Sauvan vääntöominaisuudet määritetään sen vääntökeskiön suhteen. Vääntöanalyysiin tarvitaan poikkileikkauksen olennaiset suureet kuten vääntökeskiön koordinaatit, sektoriaalinen koordinaatti, vääntöneliömomentti ja käyristymisjäyhyys. Yleisessä muodossa poikkileikkaussuureet ilmoitetaan pintaintegraalina, mutta suorista elementeistä muodostuvien profiilien poikkileikkausarvot on myös kätevä ilmaista summamuodossa. Kaavoissa 20-23 käytetty suureiden indeksointi  $i=1\dots n$  tarkoittaa elementtien numerointia. [6, s. 90-113.]

Sektoriaalinen koordinaatti pisteessä  $k$  [6, s. 93]:

$$\omega = \int h ds \quad \Rightarrow \quad \omega_k = \sum_{i=1}^k \sum h_i s_i \quad (20)$$

$h$             on elementin kohtisuoraetäisyys origosta  
 $s$             on elementin keskiviivan pituus.

Sektoriaalinen staattinen momentti [6, s. 93]:

$$S_{\omega} = \int \omega dA = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\omega_a + \omega_1) i * A_i \quad (21)$$

A on poikkileikkauksen pinta-ala  
 $\omega_a$  on elementin alkupään sektoriaalinen koordinaatti  
 $\omega_1$  on elementin loppupään sektoriaalinen koordinaatti.

Avoimen poikkileikkauksen Saint Venantin vääntöneliömomentti [3, s. 321; 6, s. 94]:

$$I_v = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n s_i t_i^3 \quad (22)$$

s on poikkileikkauksen keskiviivan pituus  
t on poikkileikkauksen seinämän paksuus.

Käyritysmisjäyhyys [6, s. 94]:

$$I_{\omega} = \int \omega^2 dA = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n (\omega_a^2 + \omega_a \omega_1 + \omega_1^2) i * A_i \quad (23)$$

A on poikkileikkauksen pinta-ala  
 $\omega_a$  on elementin alkupään sektoriaalinen koordinaatti  
 $\omega_1$  on elementin loppupään sektoriaalinen koordinaatti.

Yleisessä muodossa esitetyt kaavat ovat päteviä kaikissa poikkileikkauksen koordinaatistoissa. On vain muistettava merkitä eri koordinaatistoissa lasketut suuret asianmukaisesti. Esimerkki löytyy liitteestä 1. [6, s. 90-113.]

Vääntökeskiön paikan laskentaan tarvitaan poikkileikkauksen jäyhyysmomentti, käyritysmisjäyhyys ja mahdollinen pääkoordinaatiston kulma painopistekoordinaatistoon nähden. Kylmämuovautut profiilit [6] teoksessa on hyvin esitetty käsinlaskentaesimerkkejä yksinkertaisille poikkileikkaustapauksille. Tässä työssä poikkileikkaussuureet sekä vääntökeskiön koordinaatit on laskettu Section Editor -ohjelman avulla, joka laskee poikkileikkaussuureet pintaintegraalien pohjalta. [3, s. 315-323.]

## 5 Suunnittelun lähtökohdat

Työn tutkimusosuus koostuu tutkimusta varten luodun rakennusmallin ja siihen kohdistuvien kuormien selostuksesta sekä tutkimusmenetelmien ja tuloksien esittelystä. Tulosten pohjalle tehdyt johtopäätökset esitetään tämän työn tuloksina.

### 5.1 Rakennusmalli

Tutkimuskohteena käytetään Finnmap Consulting Oy:n käynnissä olevan projektin pohjalta luotua rakennusmallia. Rakennusmalli poikkeaa prototyypistä jäykistysjärjestelmän ja ulkomittojen osalta. Kantavat rakenteet, julkisivu- ja yläpohjaratkaisut ovat kuitenkin prototyypissä olevien kaltaisia. Rakennusmallin runko muodostuu pilari-palkkijärjestelmästä ja ontelolaatoista kuten esitetty kuvassa 1.

Tässä työssä rakennusmalliksi on valittu seitsemänkerroksinen toimistorakennus, jossa on kahdeksas maanalainen kellarikerros. Jäykistysjärjestelmä muodostuu hissi- ja porraskuilusta ja umpinaisesta mastoseinästä. Kummankin osamaston seinämäpaksuudet ovat 220 mm. Rakennusmallin rakenneosien luettelo on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Rakennusmallin rakenneosat.

Rakenneosa	Osan paksuus, mm	Osan koko, mm	Betoni
jäykistävät rakenteet	220		C35/45
palkki		380x480	C35/45
pilari (P)		D480	C35/45
ontelolaatta (OL)		P32	C50/60
pintavalu	80		C25/30
lepotaso	200		C35/45

Profiilimasto on valittu tässä työssä tehdystä Finnmap Consulting Oy:n toteutuneiden projektien jäykistysjärjestelmien kartoituksesta. Valinnan peruste on tuotu esille tutkimuksen asettelussa luvussa 2. Työssä käytetyssä profiilimastossa on symmetrinen avoin poikkileikkaus, jonka ulkomitat ovat 4,650 m x 8,645 m. Kuilun keskeinen osa on porrashuone ja sen molemmilla sivuilla sijaitsevat identtiset hissikuilut. Profiilimaston poikkileikkaus mittoineen on esitetty kuvassa 1. Sen poikkileikkaussuureet on laskettu

Section Editor -ohjelmalla, joista tutkimuksen kannalta tärkeimmät on esitetty liitteessä 1 (profiili numero 10).

Tutkimusta varten valitaan kolme erilaista mastoseinän pituutta, joiden pohjalle muodostuu kolme erilaista laskentamallia. Mastoseinän pituudeksi oletetaan seitsemän ja kolme metriä. Kolmas laskentamalli sisältää vain profiilimaston.

Rakennusmalli on muodoltaan suorakaide, jonka ulkomitat ovat 33,62 x 18,24 metriä. Kerroksien korkeudet jakautuvat seuraavasti: 7. kerroksen korkeus on 3,72 metriä, 1. - 6. kerrokset ovat 3,6 metrisiä ja kellarikerroksen korkeus on 3,48 metriä. Rungon korkeus on  $H=(3,72+3,6*6+3,48)$  m=28,8 m. Rakennuksen korkeus maan tasolta sisältää yläpohjan rakenteita ja arvoltaan on 26 metriä. Näin voidaan todeta, että työtä varten luotu rakennusmalli sisältää tutkimuksen kannalta halutut rakenteet ja vastaa asetettuja tutkimusrajoituksia.

## 5.2 Rakenteen kuormat

Rakennuksen kokonaisvakavuutta laskettaessa on huomioitava siihen kohdistuvat sekä pystysuuntaiset kuormat että vaakakuormat. Pystysuuntaisiksi kuormiksi luetaan rakenteiden omat painot, hyötykuormat sekä lumikuorma. Merkittävimmät vaakakuormat ovat tuulikuorma sekä rakenteiden vinoudesta ja epäkeskisyydestä aiheutuvat lisävääkavoimat. Vaakakuormiin kuuluvat myös maanpaine-, jarru- sekä nosturi- ja työkonekuormat. Lisäksi rakenteita voivat rasittaa pakkovoimat. Tässä työssä kuormien jakamista jäykistäville rakenteille laskettaessa huomioidaan vain pystysuuntaiset kuormat sekä edellä luetellut merkittävimmät vaakakuormat. [2, s. 11-12.]

Rakennukseen kohdistuvat kuormat määritetään eurokoodien mukaisesti. Rakennuksen sijaintialueeksi, joka vaikuttaa luonnonkuormien määrittämiseen, valitaan Helsingin seudun tasainen alue, joka voidaan luokitella maastoluokkaan III. Lumikuorma lasketaan eurokoodin SFS-EN 1991-1-3 [10] mukaisesti käyttäen tasokattorakenteille annettuja laskentamääräyksiä. Rakennukseen kohdistuva tuulikuorma määritetään eurokoodin SFS-EN 1991-1-4 mukaan. Tuulikuorma lasketaan koko rakenteeseen vaikuttavana kaavalla 24 [11, s. 44]:

$$F_w = c_s c_d * c_f * q_p(z_e) * A_{ref} \quad (24)$$

$F_w$	on rakenteen tuulikuorma
$c_s c_d$	on rakennekerroin
$c_f$	on rakenteen voimakerroin
$q_p(z_e)$	on puuskanopeuspaine nopeuspainekorkeudella $z_e$
$A_{ref}$	on rakenteen tuulenpaineen vaikutusala.

Puuskanopeuspaine määritetään huomioimalla rakennuksen korkeuden ja sivumitan suhteen vaikutus nopeuspainekorkeuteen. Tuulikuorma määritetään kohdistuvan rakennuksen lyhyeen sivuun eli x-suuntaan sekä pitkään sivuun eli y-suuntaan. Luonnonkuormien laskenta on esitetty liitteessä 2.

Rakenteen pystysuuntaiset kuormat kuten rakenneosien omat painot ja hyötykuormat on määritetty rakennusmallin käyttötarkastuksen pohjalta eurokoodin SFS-EN 1991-1-1 [12] mukaan. Rakennusmalliin kohdistuvat kuormat on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Rakennusmallin ominaiskuormat.

Kuorma	Kuorman ominaisarvo, kN/m <sup>2</sup>	Sijainti
Pysyväkuorma		
yläpohjarakenteet	1,5	7. krs katto
taso	4,0	kaikkien kerrosten katot
pintavalu	2,0	kaikkien kerrosten katot
pilari	4,5 kN/m	kaikissa kerroksissa
palkki	4,56 kN/m	kaikissa kerroksissa
jäykistävät seinät	5,5	kaikissa kerroksissa
lepotaso	5,0	K-6. krs katot
julkisivut	2,25	1.-7. krs
kellariseinät	6,50	kellari
Muuttuvakuorma		
tason hyötykuorma	2,5	kaikkien kerrosten katot
lepotason hyötykuorma	3,0	kaikkien kerrosten katot
väliseinät	0,5	kaikissa kerroksissa
vesikatto	0,4	7. krs katto
lumi	2,0	7. krs katto
tuuli Y-suuntaan	0,92	kaikkien kerrosten katot
tuuli X-suuntaan	0,73	6.-7. krs katot
	0,64	K-5. krs katot

Kaikkien kuormien määrittämisessä on otettu huomioon myös edellä mainittujen eurokoodien Suomen kansallisten liitteiden soveltamisohjeet. Rakenteen kuormat on laskettu seitsemän metrin pituiselle mastoseinälle. Niitä arvoja käytetään kaikissa luvussa 5.1 mainituissa laskentamallivaihtoehdoissa. Tämän yksinkertaistuksen perusteena on erimittaisien mastoseinien painoeroavuuksien vähäinen vaikutus tason kokonaiskuormitukseen. Lisäksi käyttämällä mitoituksessa isompaa tasokuorman arvoa ollaan jopa varmallalla puolella näissä laskentamallivaihtoehdoissa, joissa mastoseinän paino on pienempi.

Rakennusmallin rasitusten jakauma jäykistäville rakenteille lasketaan murtorajatilan kuormitusyhdistelmällä. Kuormitusyhdistelmä määritetään eurokoodin SFS-EN 1990 ja sen Suomen kansallisen liitteen mukaan kaavalla 25 ottaen huomioon rakennuksen seuraamusluokan määrittämä kuormakerroin  $K_{FI}$ , jonka arvo tutkimuksen tapauksessa on 1,0 [13, s. 80].

$$1,15 \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1,5 Q_{k,j} + 1,5 \sum_{i > 1} \psi_{o,i} * Q_{k,i} \quad (25)$$

$G_{k,j}$  on epäedullisen vaikutuksen aiheuttava pysyvä kuorma

$Q_{k,1}$  on määräävä muuttuva kuorma

$Q_{k,j}$  on muut muuttuvat kuormat

1,15; 1,5 ovat epäedullisen vaikutuksen huomioivat osavarmuuskertoimia vastavasti pysyville ja muuttuville kuormille, määrätty Suomen kansallisen liitteen mukaan

$\psi_{o,i}$  on Suomen kansallisen liitteen mukaan määritetty muuttuvan kuorman yhdistelykerroin.

Rakennuksen vakavuuden tarkastelussa painotetaan vaakavoimien vaikutusta, mistä syystä laskelmissa tuulikuorma otetaan määräävänä muuttuvana kuormana. Tutkimuskohteen muiden muuttuvien kuormien yhdistelykertoimet ovat samanarvoisia,  $\psi_0=0,7$ .

[10; 11; 12; 13.]



### 5.3 Lisävaakavoimat

Rakennusten geometriset epätarkkuudet otetaan huomioon rakenteen epäedullisena lisärasituksena. Sellaiset lisärasitukset huomioidaan stabiiliteetilaskelmissa vain murto- ja onnettomuusrajatiloissa. Eurokoodi SFS-EN 1992-1-1 (Eurokoodi 2) määrittelee jäykistysjärjestelmää kuormittavan lisävaakavoiman seuraavasti:

$$H_i = \theta_i(N_b - N_a) \quad (26)$$

$H_i$  on mittaepätarkkuuksista aiheutuva poikittaisvoima  
 $N_a$  on pystykuorma tarkasteltavan tason yläpuolella  
 $N_b$  on pystykuorma tarkasteltavan tason alapuolella  
 $\theta_i$  on rakenteen vinous.

Epätarkkuudet vuorostaan huomioidaan vinouden avulla seuraavasti [7, s. 54-56]:

$$\theta_i = \theta_o * \alpha_h * \alpha_m, \text{ jossa} \quad (27)$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l}}, \text{ ehto } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5(1 + \frac{1}{m})}$$

$\alpha_h$  on korkeuteen perustuva pienennyskerroin  
 $\alpha_m$  on rakenneosien määrään perustuva pienennyskerroin  
 $\theta_o$  on rakenteen vinouden perusarvo, joka Suomessa käytetään 1/200, rad  
 $l$  on rakennuksen korkeus, m  
 $m$  on jäykistysjärjestelmän vaakavoimaan vaikuttavien pystyrakenteiden määrä.

Jäykistävien mastorakenteiden hoikkuudella on merkitystä kokonaisvakavuuteen. Erityisesti korkeissa rakennuksissa jäykistävät mastoseinät ja profiilimastot ovat hoikkia rakennuksen korkeuteen nähden. Niiden taipuminen vaakakuormista ja epäkeskisyyksistä johtuen aiheuttaa edelleen lisäepäkeskisyyttä ja lisää taipumaa mastorakenteelle. Ra-

kenteen siirtymätilasta aiheutuvaa voimasuureiden lisäystä kutsutaan toisen kertaluvun vaikutukseksi. [1.]

Eurokoodin 2 mukaan toisen kertaluvun vaikutukset on otettava huomioon aina, kun niiden todennäköinen vaikutus rakennuksen stabiiliteettiin on merkittävä. Rakennuksen kokonaistarkastelussa toisen kertaluvun vaikutuksen huomioimisen tarvetta voidaan arvioida Eurokoodin 2 liitteessä H esitetyillä menetelmällä [7, s. 211-213]. Tässä työssä rakennusmallin toisen kertaluvun vaikutusten merkitystä tarkastettiin juuri täällä menetelmällä. Laskelmien mukaan toisen kertaluvun vaikutusta ei tarvitse huomioida. Tutkimuskohteen lisävaakavoimien ja toisen kertaluvun vaikutuksen laskennat ovat esitetty liitteessä 3.

## 6 Tutkimusmenetelmät

Profiilimaston vääntöjäykkyyden vaikutusta rakennukseen kohdistuvien vaakavoimien jakaumaan arvioidaan sekä analyyttisesti että käyttämällä numeerista analyysiä. Tässä luvussa esitetään molempien tutkimusmenetelmien laskentaperiaatteet ja käytetyt oletukset sekä tutkimuksen tulokset muodostavat tekijät.

### 6.1 Analyytinen ratkaisu

Mastojäykistysjärjestelmän kokonaisvakavuutta käsinlaskennalla tarkastaessa käytetään seuraavia oletuksia:

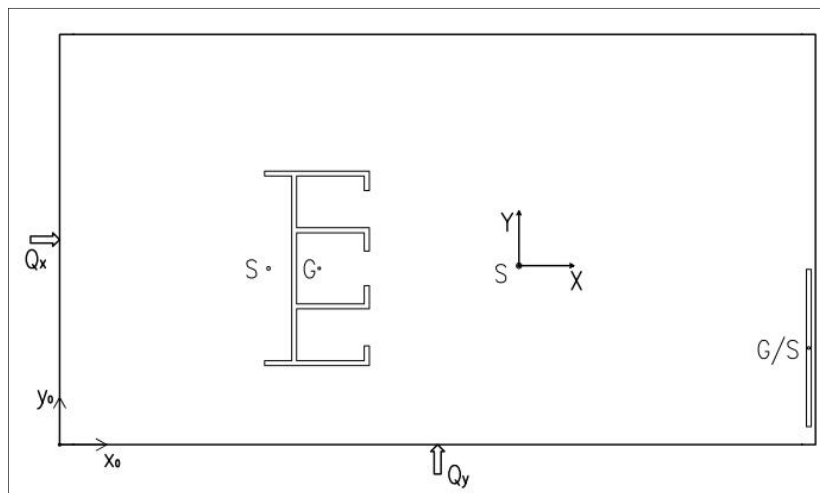
- vaakakuormat vaikuttavat tarkasteltavan kerroksen laataston tasossa
- jäykkänä levynä toimiva laatasto siirtää vaakakuormat jäykistäville rakenteille
- pystyrakenneosat kiinnitetään nivelellisesti kerroksen kattoon
- jäykistejärjestelmää tarkastellaan yksi kerros kerrallaan
- jäykistävien rakenteiden jäykkyys on vakio niiden pituusakseliin nähden
- koordinaatistojärjestelmänä käytetään xyz-koordinaatistoa, jossa z on pysty-akseli. [14.]

Vaakakuormat jaetaan jäykistäville rakenteille niiden taivutus- ja leikkausjäykkyyksien suhteessa, siten osamastojen jäykkyydet ovat stabiiliteettitarkastelun pääasialliset suu-

reet. Kiertymävaikutuksen arvioimiseksi tarvitaan jäykistysjärjestelmän poikkileikkauksen kiertokeskiön koordinaatit sekä osamastojen vääntöjäykkyydet ja vääntökeskiöiden sijainnit. Tämän jälkeen rakennusta kaatavat voimat voidaan jakaa osamastoille käyttäen kuormitusten aiheuttamaa jäykistysjärjestelmän poikkileikkauksen siirtymätilaa ja tasapainoehtoja. [2; 15.]

### 6.1.1 Laskentakoordinaatit

Ennen analyyttisen menetelmän laskentakaavojen esittämistä on perehdyttävä tässä työssä käytettävään koordinaatistosysteemiin. Stabiilitteettitarkastelun laskelmat tehdään rakennuksen tarkasteltavan tason poikkileikkaukseen nähden ja, kuten luvussa 4.5 on tullut esille, poikkileikkauksen symmetrisyys vaikuttaa hallitsevan koordinaatiston valintaan. Tutkimuksen rakennusmallin sekä sen jäykistävien rakenteiden poikkileikkaukset ovat symmetrisiä, joten niiden pää-, painopiste- ja peruskoordinaatistojen suunnat yhtyvät toisiinsa. Tästä syystä laskentaa varten luotua  $x_0y_0z_0$ -koordinaatistoa nimitetään pääkoordinaatistiksi. Tässä työssä käytetyn koordinaatistosysteemin merkintä- ja indeksointiperiaate on esitetty kuvassa 8.



Kuvio 8. Rakennusmallin poikkileikkauksen koordinaatit, periaatekuva.

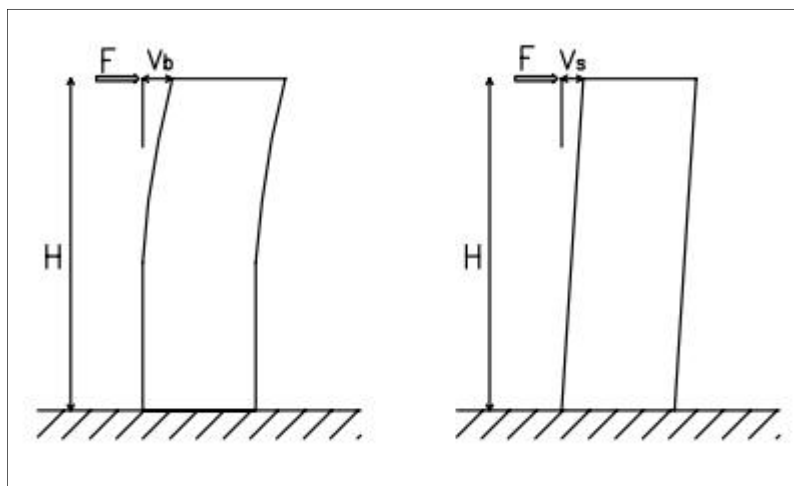
Pääkoordinaatisto sijoitetaan rakennuksen vasempaan ulkonurkkaan. Osamastojen kiertokeskiöiden/painopisteiden sijaintikoordinaatit pääkoordinaatiston origon suhteen merkitään  $x_{0,i}$  ja  $y_{0,i}$ , missä  $i$  on osamaston indeksi. Rakennuksen jäykistysjärjestelmän kiertokeskiön koordinaatisto merkitään  $X, Y$  -koordinaatistiksi ja sen origon suhteen

määritetyt osamastojen kiertokeskiöiden/painopisteiden koordinaatit vastaavasti  $X_i$  ja  $Y_i$ , missä  $i$  on osamaston indeksi. Poikkileikkausten kiertokeskiöiden sijainnit on merkitty S-kirjaimella ja painopisteiden vuorostaan G-kirjaimella. Kuvassa 8 on myös esitetty tasoon vaikuttavien vaakavoimien ( $Q_x$ ,  $Q_y$ ) resultanttipaikat, jotka sijaitsevat rakennuksen kummankin sivun puolivälissä.

Tässä työssä tutkitaan kolme erilaista rakennusmallin vaihtoehtoa, jotka poikkeavat toisistaan yksittäisen mastoseinän pituudella. Kummassakin laskentamallissa käytetään esitettyä koordinaatistosysteemiä yhdenmukaisin merkinnöin ja indeksoinnein.

### 6.1.2 Osamastojen jäykkyydet

Yksi analyyttisen ratkaisun oletuksista on osamaston nivelellinen kiinnitys kerroksen kattoon. Sen perusteella laskennassa voidaan käsitellä osamastot ulokepalkin tavoin toimivina ja tarkastella niitä kerroksittain kuvassa 9 esitetyn kuormitustapauksen mukaisesti. Ulokepalkin päässä vaikuttava pistekuorma aiheuttaa osamastolle taivutus- ja leikkausmuodonmuutokset. Osamaston kokonaismuodonmuutos ilmenee siten taivutuksesta ja leikkauksesta johtuvien siirtymien summana.



Kuvio 9. Osamaston siirtymät [15].

Kuvassa 9 esitetyn kuormitustapauksen siirtymät voidaan yleisessä muodossa määrittää seuraavasti:

$$v_b = F \frac{H^3}{3EI} = \frac{F}{K_b}, \quad \text{jossa } K_b = \frac{3EI}{H^3} \quad (28)$$

$$v_s = F \frac{Hk_s}{GA} = \frac{F}{K_s}, \quad \text{jossa } K_s = \frac{k_s GA}{H} \quad (29)$$

$v_b$	on taivutuksen aiheuttama siirtymä
$v_s$	on leikkauksen aiheuttama siirtymä
$F$	on osamastoa kuormittava pistekuorma
$K_b$	on osamaston taivutusjäykkyys
$K_s$	on osamaston leikkausjäykkyys
$H$	on osamaston korkeus
$A$	on poikkileikkauksen pinta-ala
$G$	on osamaston liukumoduuli
$E$	on osamaston kimmomoduuli
$I$	on osamaston jäyhyysmomentti tarkasteltavassa suunnassa
$k_s$	on leikkausjäykkyyserroin, joka määräytyy poikkileikkauksen perusteella.

Koska osamaston kokonaissiirtymä muodostuu taivutuksen ja leikkauksen siirtymien summasta, voidaan kaavojen 28 ja 29 perusteella johtaa yksittäisen osamaston jäykkyyden ( $K$ ) yleinen lauseke

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_s} \quad (30)$$

Osamaston jäykkyys tietyssä suunnassa määritellään voimaksi, josta se saa yhden yksikön suuruinen siirtymän. Ulkoisten vaakakuormien katsotaan vaikuttavan rakennukseen sen pääakseleiden eli x- ja y-suunnissa. Mielivaltaisessa suunnassa vaikuttava tuulikuorma voidaan jakaa pääakseleiden suuntaisiin komponentteihin. Siten mastoseinän jäykkyydet määritetään vaikuttavan vaakavoiman suunnassa ja merkitetään vastaavalla alaindeksillä.

Analyttisessä ratkaisussa suoran seinän leikkausjäykkyyden osuus kokonaisjäykkyydestä voidaan jättää huomioimatta, jos seinän korkeus-pituussuhde on isompi kuin 4. Lisäksi rakenteen korkeuden kasvaessa leikkausmuodonmuutoksen vaikutus osamaston jäykkyyteen pienenee taivutusmuodonmuutukseen verrattuna. Kaavojen 28 ja 29 mukaan taivutuksen vaikutus kasvaa rakenneosan korkeuden kolmannessa potenssissa ja leikkausvoiman vaikutus vuorostaan lineaarisesti. Siten yksinkertaistuksena voidaan harkinnan mukaan leikkausvoiman muodonmuutosvaikutus jättää huomioimatta. Tässä työssä osamaston jäykkyydeksi määritetään vain sen taivutusjäykkyyden osuus.

Epäsymmetriselle osamaston poikkileikkaukselle on lisäksi määritettävä xy-merkkinen jäykkyystekijä ja huomioitava se stabiliteettilaskennassa. Laskentaperiaatteet sellaiseen tapaukseen löytyvät tarvittaessa Betoniteollisuus ry:n teoksesta [2] ja internetsivustosta [15].

Ulkoinen vaakakuorma aiheuttaa tutkimuskohteeseen myös kiertymän, jolloin osamastojen voimajakamaan vaikuttaa lisäksi jäykistysjärjestelmän vääntöjäykkyys. Kaava 31 esittelee jäykistysjärjestelmän vääntöjäykkyyden ( $K_T$ ), jonka määrittämiseen tarvitaan osamastojen taivutus-, leikkaus- sekä vääntöjäykkyydet.

$$K_T = \sum K_{x,i} Y_i^2 + \sum K_{y,i} X_i^2 + \sum T_{xy,i} \quad (31)$$

$X_i, Y_i$	ovat osamaston vääntökeskiön/painopisteen koordinaatit jäykistysjärjestelmän kiertokeskiön suhteen
$K_{x,i}$	on osamaston x-suuntainen jäykkyys
$K_{y,i}$	on osamastoon y-suuntainen jäykkyys
$T_{xy,i}$	on osamaston vääntöjäykkyys.

Vääntöteorian luvussa (luku 4) tuli esiin mahdollisuus käyttää vääntö- ja taivutustapausten analogiaa, jonka mukaan vääntösauvan kiertymä vastaa palkin taipumaa. Osamaston vääntöjäykkyys voidaan silloin tulkita momentiksi, joka antaa osamastolle yhden yksikön kiertymän.

Sauvan vääntöjäykkyyden lauseke määritetään kuten taivutus- ja leikkausjäykkyydet (kaavat 28, 29) pohjautuen tässä työssä vääntöteoriaa koskevien lähteiden tietoihin ja ottaen huomioon vääntösauvan kuormitus- ja kiinnitystapaukset. Analyttisessä ratkai-

lussa käytetyn kuormitusmallin mukaan (kuva 9) tutkittavan profiilimaston vääntöjäykkyyden lauseke johdetaan kaavaa 14 käyttäen

$$T_{xy,\omega} = \frac{EI_{\omega}k^3}{kL - \tanh kL} \quad (32)$$

ja mastoseinän vääntöjäykkyyden lauseke kaavaa 6 käyttäen

$$T_{xy,v} = \frac{GI_v}{L} \quad (33)$$

$T_{xy,\omega}$  on profiilimaston vääntöjäykkyys

$T_{xy,v}$  on mastoseinän vääntöjäykkyys.

Suorakaidepoikkileikkauksen vääntöjäykkyys on suhteellisen pieni sen taivutusleikkausjäykkyyteen verrattuna, mikä johtuu suorakaidepoikkileikkauksessa hallitsevasta vapaasta väännöstä. Siten yksinkertaistettuna jäykkyysjärjestelmän vääntöjäykkyyttä käsinlaskettaessa yksittäisen mastoseinän vääntöjäykkyyttä ei oteta huomioon. Mikäli analyysissä jäykistävä mastotorni jaetaan useiksi suoriksi mastoseiniksi, joista jokainen voidaan mitoitaa erikseen, niiden vääntöjäykkyydet myös jätetään laskennasta pois.

Tässä työssä selvitetään, minkä verran profiilimaston vääntöjäykkyys vaikuttaa osamastojen voimajakaumaan kun se käsitetään nimenomaan yhtenäisenä rakenteena. Profiilimaston vääntöjäykkyys määritetään Eurokoodin 2 mukaan halkeilemattomassa tilassa. Yksittäisen mastoseinän vääntöjäykkyyttä ( $T_{xy,v}$ ) tutkimuksen analyttisissä ratkaisuisissa ei huomioida.

[2; 7; 14; 15.]

### 6.1.3 Kiertokeskiö

Jäykistäville rakenteille jakautuvien vaakavoimien osuuksien selvittämiseksi haetaan mastosysteemin tarkasteltavan tason kiertokeskiö. Sen määrittämiseksi tarvitaan osamastojen vääntökeskiöiden sijainnit. Kaksoissymmetrisen poikkileikkauksen, kuten esimerkiksi suorakaidepoikkileikkauksen vääntökeskiö- ja painopistesijainnit yhtyvät toi-

siinsa. Symmetrisen ja epäsymmetrisen poikkileikkauksen vääntökeskiön sijainti poikkeaa painopistesijainnista.

Kun analyttisessä ratkaisussa osamaston vääntöjäykkyyttä ei huomioida, voidaan olettaa laataston jakaman vaakavoiman vaikuttavan rakenteen painopisteeseen. Profiilimaston vääntöjäykkyyttä huomioidessa jäykistysjärjestelmän kiertokeskiön koordinaatit määritetään profiilimaston vääntökeskiön suhteen.

Jäykistysjärjestelmän poikkileikkauksen kiertokeskiön paikka riippuu myös osamastojen jäykkyyksistä ja siirtyy jäykkyydeltään suuremman osamaston suuntaan. Kiertokeskiön koordinaatit lasketaan kaavoilla

$$X = \frac{\sum K_{y,i} * x_{0,i}}{\sum K_{y,i}} \quad (34)$$

$$Y = \frac{\sum K_{x,i} * y_{0,i}}{\sum K_{x,i}} \quad (35)$$

$X, Y$  on tarkasteltavan tason jäykistysjärjestelmän kiertokeskiön koordinaatit  
 $x_{0,i}, y_{0,i}$  ovat osamaston kiertokeskiön/painopisteen koordinaatit pääkoordinaatiston origon suhteen.

Jäykistävien rakenteiden vääntökeskiöiden/painopisteiden koordinaatit mastosysteemin kiertokeskiön koordinaatiston origon suhteen lasketaan seuraavasti:

$$X_i = x_{0,i} - X \quad (36)$$

$$Y_i = y_{0,i} - Y \quad (37)$$

[2; 15.]

#### 6.1.4 Voimajakaumat

Analyttisessä ratkaisussa rakennusta kuormittavan vaakavoiman katsotaan vaikuttavan jokaisen kerroksen laataston tasolla. Sitä tarkastellaan pääakseleiden suuntaisina



pistekuormaresultanteina ( $Q_x, Q_y$ ). Vaakakuorman lisäksi tutkittavaa rakennusta kuormittaa vääntömomentti, joka määritetään kaavalla

$$M = Q_x(y'_0 - Y) - Q_y(x'_0 - X) \quad (38)$$

$x'_0, y'_0$  ovat vaakavoimaresultanttien koordinaatit pääkoordinaatistossa.

Tämän työn analyyttisessä laskennassa oletetaan vääntömomentin ja kiertymän positiiviseksi suunnaksi myötäpäivään. Ulkoisten ja sisäisten voimien tasapainoehdot määritetään seuraavasti:

$$Q_x = v_x \sum K_{x,i} \quad (39)$$

$$Q_y = v_y \sum K_{y,i} \quad (40)$$

$$M = \varphi(\sum T_{xy,\omega} + \sum K_{x,i} * Y_i^2 + \sum K_{y,i} * X_i^2) \quad (41)$$

$Q_x, Q_y$  ovat tarkasteltavan tason vaakavoimien resultantit vastaavasti x- ja y-suunnassa

M on tarkasteltavan tason vääntömomentti

$\varphi$  on tarkasteltavan tason kiertymä.

Jäykistävän rakenteen oletetaan ottavan vastaan vain sen suuntaisen vaakakuorman osuuden. Siten siirtymätilan perusteella voidaan ratkaista voimajakaumat osamastolle

$$Q_{x,i} = K_{x,i}v_x - K_{x,i}Y_i\varphi \quad (42)$$

$$Q_{y,i} = K_{y,i}v_y + K_{y,i}X_i\varphi \quad (43)$$

Profiilimaston vääntömomentti määritetään seuraavasti:

$$M_{xy,\omega} = T_{xy,\omega} * \varphi \quad (44)$$

[2; 15.]

## 6.2 Numeerinen analyysi

Numeerisen analyysin avulla halutaan todentaa osamastoille analyttisessä ratkaisussa saatu voimajakauma sekä analysoida eri menetelmällä saatujen tulosten mahdolliset poikkeamat. Numeerinen analyysi tehdään elementtimenetelmällä käyttäen StruSoft FEM–Design 10.0 -ohjelmaa. Tähän tutkimukseen käytetään 3D Structure -moduulia ohjelman seitsemästä erillisestä moduulista.

3D Structure -modulin avulla rakenteet mallinnetaan kolmiulotteisina. Kolmiulotteinen laskentamalli vastaa kohtuullisen hyvin todellista rakennetta ja antaa muita mallinnustapoja tarkempia tuloksia. Tästä syystä 3D Structure -moduuli sopii parhaiten tämän tutkimuksen numeeriseen analyysiin. Kuitenkin kolmiulotteisen mallin heikkoutena voi olla laskentamallin määrittämiseen sekä tulosten analysointiin kuluva aika. Lisäksi numeerisen analyysin tuloksiin vaikuttavat merkittävästi laskentamallin oikea määrittäminen ja tarkkuus. [14.]

Klassinen vääntäteoria sopii analysoitaessa yksittäisiä profiilimastoja, joiden ominaisuudet ovat yhdenmukaisia koko rakenteessa. Todellisuudessa mastotornit muodostavat kombinaation muiden jäykistävien rakenteiden kanssa ja niiden ominaisuudet vaihtelevat pituuteen nähden. Silloin on avuksi jäykistysmatriisiin pohjautuva tietokoneanalyysi. Vääntötoiminta profiilimastossa on mahdollista analysoida eri mallintamistyyppjä käyttäen. Vaikka väännön numeerinen analyysi ei kuulu tämän työn tutkimuspiiriin, on mainittava, että esimerkiksi Smith ja Coull [3] esittelevät kolme vääntömallinnustyyppiä: elementtimenetelmä-, two-column- ja single-column -mallit, joista elementtimenetelmäanalyysi on suositeltavampi. Profiilimaston mallintaminen väännölle on kuitenkin suhteellisen haastava tehtävä ja vaatii FEM-ohjelman perusteellista osaamista. [3.]

Rakennusmallin pohjalta luodaan kolme erilaista laskentamallia, jotka eroavat toisistaan vain mastoseinän pituuden osalta ja niiden avulla kerätään tietoa jäykistävien rakenteiden voimajakaumista. Voimajakaumat määritetään luvussa 5.2 esitetylle murto-rajatilakuormitusyhdistelmälle (kaava 25). Laskentamalleihin otetaan mukaan vain primäärirakenteet eli jäykistävät ja kantavat rakenteet. Muut rakenteet sekä pintavalut määritetään laskentamalleihin kuormina.

Mallit (kuva 10) rakennetaan pitäen lähtökohtina seuraavia oletuksia: pilarit ovat kerroskorkuisia, palkit yksiaukkoisia ja kummatkin kiinnitetään nivelellisesti, sekä ontelolaattojen liitokset ovat nivelelliset. Profiilimaston seinät mallinnetaan kerroskorkuisina, jäykästi kiinnitettyinä toisiinsa pystysaumoissa ja nivelellisesti vaakasaumoissa. Mastoseinän vaakasaumat ovat vastaavasti nivelelliset. Jäykistävien seinien vaakaliitosten nivelratkaisu varmistaa sen, etteivät seinät ota vastaan niihin kohtisuorassa suunnassa vaikuttavia kuormia. Näin seinät välittävät perustuksille vain niiden suuntaiset vaakakuormat.



Kuvio 10. Laskentamalli, havainnekuva.

Kuormat, epätarkkuuksista aiheuttava lisävaakavoima mukaan lukien, mallinnetaan pintakuormina. Tuulikuormat asetetaan rakennuksen kummallekin sivulle viivakuormana kerroslaatastojen reunoille.

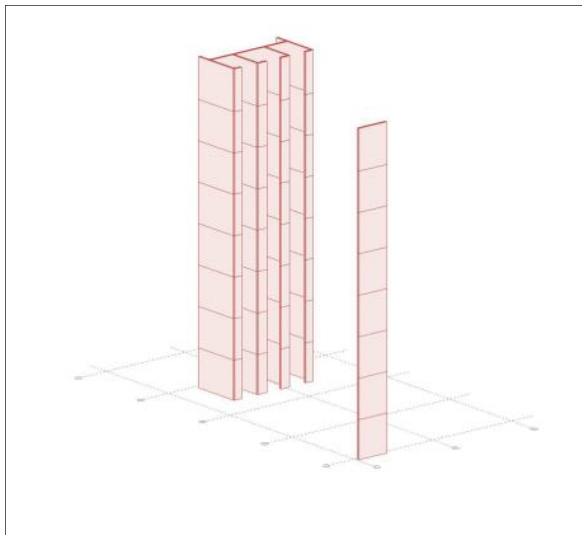
### 6.3 Laskenta

Tutkimuksen tarkastelun kohteena on pääasiassa rakennusmallin jäykistysjärjestelmän voimajakauma jäykistäville rakenteille. Sitä varten tehtiin luvussa 6 esitettyjen kaavojen pohjalta Excel-laskentataulukko, joka toimii analyyttisen ratkaisun laskentapohjana

kaikissa kolmessa rakennusmallin tutkimusvaihtoehdossa. Rakenneosien koordinaattien määrittämiseen käytetään apuna AutoCAD 10.0 -ohjelmalla mallinnettua rakennusmallin pohjapiirustusta.

Analyttisessä laskennassa stabiileettitarkastelut tehdään kerroksittain. Profiilimaston vääntöjäykkyyden vaikutusta rakennuksen vakavuuteen tutkittaessa riittää laskea voimajakauma osamastoille vain yhdelle kerrostasolle. Tutkimuksen näkökulmasta tarkasteltavaksi tasoksi tulee valita suurimmalla vaakakuormalla kuormitettu taso. Valintaan vaikuttaa myös kerroksen korkeus, koska sillä on vaikutusta osamastojen jäykkyyksiin. Kuormitusten osalta valinta tehtiin rakennusta kuormittavien vaakavoimien laskennan perusteella (liite 3). Kaikkien lueteltujen ehtojen pohjalta tutkimukseen valittiin kuudennen kerroksen katto.

Tutkimuksen keskeinen tarkasteltava vaihtoehto on rakennusmallin jäykistys profiilimastolla ja kolmemetrillä mastoseinällä (kuva 11). Lisäksi selvitetään kuilun vääntöjäykkyyden vaikutus voimajakaumaan myös seuraavissa ääritapauksissa: jäykistysjärjestelmä on melko tasainen eli mastoseinän pituus on seitsemän metriä ja rakennuksen vääntökestävyys on pelkän kuilun vääntöjäykkyyden varassa. Jälkimmäisessä tapauksessa selvitetään myös kuilun maksimivääntökulma ja bimomentti.



Kuvio 11. Rakennusmallin jäykistysjärjestelmä, havainnekuva.

Voimajakaumat osamastolle lasketaan sekä x- että y-suuntaisille vaakakuormituksille. Tutkimuksessa kuitenkin tarkastellaan vain y-suuntainen kuormitustapaus jäykistysjär-

jestelmän rakenteen vuoksi. X-suuntainen vaakavoima vaikuttaa vain profiilimastoon ja lisäksi sen suuruus on paljon pienempi y-suuntaisen vaakakuorman verrattuna.

Profiilimasto tarkastellaan käsinlaskennassa yhtenäisenä poikkileikkauksena sekä vertailua varten useista suorista mastoseinistä koostuvana. Jäykistysjärjestelmän osamastoille lasketaan tapausten mukaan voimajakaumat ja tarkasteltavan tason kiertymä. Tapauksiksi luetaan erilaiset profiilimaston käsittelytavat kuten esimerkiksi yhtenäinen poikkileikkaus. Laskennassa tarkasteltavat tapaukset selvitetään tarkemmin tulosten esittelyn yhteydessä.

Rombach [16] vertailee eri mallinnustapoja rakennuksen mastoseinäjäykisteille. Vertailun kohteeksi hän on ottanut muun muassa profiilimaston vaakavoiman vaikutuspisteen, jonka voidaan olettaa sijaitsevan poikkileikkauksen painopisteessä vääntökeskiön sijaan. Rombach tarkastelee poikkileikkauksen laskenta-akseleiden sijoittamisen vaikutusta jäykistävien rakenteiden voimasuurreisiin. Tuloksista havaitaan, ettei mallinnuksessa vaikutuspisteen sijainti vaikutta suuresti sauvan kiertymään eikä vääntömomenttiin. Tässä työssä päätavoitteiden rinnalla halutaan tehdä Rombach-tyyppinen vertailu analyttisessä laskennassa. [16.]

Numeerista analyysiä käytetään pelkästään voimajakauman tarkasteluun ja vertailuun vastaavaan analyttiseen laskennan tuloksiin.

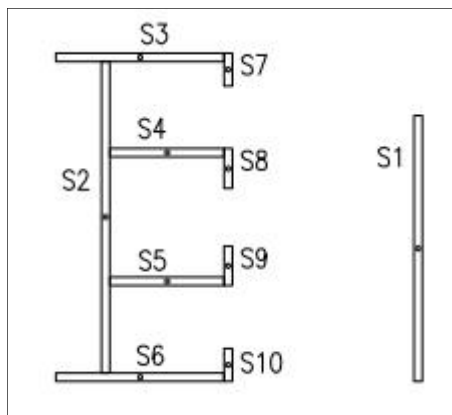
## 7 Tulokset

Analyttisen laskennan ja elementtimenetelmän analyysin tulokset esitetään taulukoina kolmelle rakennusmallin vaihtoehdolle. Taulukoissa esitetyt tulokset on ryhmitelty seuraavasti:

- Tapaus 1 (T1) käsittelee jäykistysjärjestelmän koostuvana yksittäisistä mastoseinistä profiilimasto mukaan lukien.
- Tapaus 2 (T2) käsittelee jäykistysjärjestelmän koostuvana profiilimastosta ja mastoseinistä (S1). Profiilimaston poikkileikkauksen vaakavoiman vaikutuspisteen oletetaan sen painopiste.

- Tapaus 3 (T3) käsittelee jäykistysjärjestelmän koostuvana profiilimastosta ja mastoseinästä (S1). Profiilimaston poikkileikkauksen vaakavoiman vaikutuspiste sijaitsee sen vääntökeskiössä.
- Tapaus 4 (T4) on muuten samanlainen kun tapaus 3, mutta lisäksi laskennassa huomioidaan profiilimaston vääntöjäykkyys.

Analyyseissa profiilimastoa tarkastellaan sekä yhtenäisenä, että useista seinästä koostuvana rakenteena. Kuvassa 12 annetaan laskentatulosten esittelyssä käytettävä seinien indeksointi.



Kuvio 12. Jäykistävien rakenteiden indeksointi laskennassa.

Profiilimaston vääntöjäykkyys on laskettu Osamastojen jäykkyydet -luvussa (luku 6.1.2) esitetyllä kaavalla (kaava 32). Tutkimuksen rakennusmallin profiilimaston vääntöjäykkyyden ( $T_{xy,\omega}$ ) arvo on  $2,84 \cdot 10^8$  kNm. Vääntöjäykkyyden suuruus on sama kaikille kolmelle laskentamallivaihtoehdolle.

Taulukkoon 4 on kerätty analyyttisen ja numeerisen analyysin tulokset rakennusmallin tutkimusvaihtoehdolle 1 eli tilanteelle, jossa yksittäisen mastoseinän (S1) pituus oletetaan seitsemäksi metriksi.

Taulukko 4. Voimajakaumat osamastoille, tutkimusvaihtoehto 1.

Osamasto		Seinän pituus, m	Analyttinen laskenta								Numeerinen analyysi
			Tapaus 1		Tapaus 2		Tapaus 3		Tapaus 4		
			$\Phi$ , deg	5,79E-06	$\Phi$ , deg	-5,74E-06	$\Phi$ , deg	-7,71E-06	$\Phi$ , deg	-7,42E-06	
			$Q_{y,i}$ , kN	$Q_{y,i}$ , kN	$Q_{y,i}$ , kN	$Q_{y,i}$ , kN	$Q_{y,i}$ , kN	$Q_{y,i}$ , kN			
masto- seinä	S1	7,00	92,016	-7,61	-20,49	-18,97	27,30				
profiilimasto	S2	8,205	96,99								
	S7	0,87	0,12								
	S8	1,038	0,21								
	S9	1,038	0,21								
	S10	0,87	0,12								
	yhtenäinen rakenne			97,65	197,29	210,17	208,65	-208,11			
tason kokonais- vaakavoima, $Q_y$ , kN			189,68	189,68	189,68	189,68	-180,81				

Taulukkoon 5 on kerätty analyttisen ja numeerisen analyysin tulokset rakennusmallin tutkimusvaihtoehtolle 2 eli tilanteelle, jossa yksittäisen mastoseinän pituus oletetaan kolmeksi metrisiksi.

Taulukko 5. Voimajakaumat osamastoille, tutkimusvaihtoehto 2.

Osamasto		Seinän pituus, m	Analyttinen laskenta								Numeerinen analyysi
			Tapaus 1		Tapaus 2		Tapaus 3		Tapaus 4		
			$\Phi$ , deg	-1,06E-04	$\Phi$ , deg	-1,09E-04	$\Phi$ , deg	-1,28E-04	$\Phi$ , deg	-8,79E-05	
			$Q_{y,i}$ , kN	$Q_{y,i}$ , kN	$Q_{y,i}$ , kN	$Q_{y,i}$ , kN	$Q_{y,i}$ , kN	$Q_{y,i}$ , kN			
mastoseinä	S1	3,00	-35,04	-43,07	-55,96	-37,86	4,65				
profiilimasto	S2	8,205	224,13								
	S7	0,87	0,11								
	S8	1,038	0,19								
	S9	1,038	0,19								
	S10	0,87	0,11								
	yhtenäinen rakenne			224,73	232,75	245,64	227,54	-186,70			
tason kokonaisvaakavoima, $Q_y$ , kN			189,68	189,68	189,68	189,68	-182,05				

Taulukossa 6 on esitetty tutkimusvaihtoehdon 3 tulokset. Tämä vaihtoehto käsittelee pelkästään profiilimastosta muodostuvan jäykistysjärjestelmän.

Taulukko 6. Voimajakaumat osamastoille, tutkimusvaihtoehto 3.

Osamasto		Seinän pituus, m	Analyytinen laskenta						Numeerinen analyysi
			Tapaus 1		Tapaus 3		Tapaus 4		
			$\Phi_i$ , deg	-4,68E-02	$\Phi_i$ , deg	0	$\Phi_i$ , deg	-2,88E-04	
			$Q_{y,i}$ , kN	$Q_{y,i}$ , kN	$Q_{y,i}$ , kN	$Q_{y,i}$ , kN			
profiilimasto	S2	8,205	561,86						
	S7	0,87	-68,96						
	S8	1,038	-117,13						
	S9	1,038	-117,13						
	S10	0,87	-68,96						
	yhtenäinen rakenne			189,68	189,68	189,68	-180,62		
tason kokonaisvaakavoima, $Q_y$ , kN			189,68	189,68	189,68	-180,62			

Analyyttisen ratkaisun jäykistyslaskentojen laskutoimitukset on esitetty liitteessä 4.

Numeerisen analyysin tulokset esitetään tässä luvussa jälkikäsiteltävinä ja taulukoituina. Tulosten keräämiseen käytetty Sections-työkalu ei anna suoraan osamastojen rasitusten arvoja ja siksi tulokset on jälkikäsiteltävä manuaalisesti. Liitteessä 5 esitetään numeerisen analyysin tulosten jälkikäsitteilyn tavat.

Numeeristen ja analyttisen tuloksien ero on 4–5 %, minkä johdosta osamastoihin kohdistuva vaakavoima on pienempi kuin rakennukselle laskettu kokonaisvaakakuorman resultantti ( $Q_y$  on 189,68 kN). Ero aiheutuu todennäköisesti ohjelman tavasta tasetta tulokset keskiarvoiksi ja jälkikäsitteilyn laskennasta.



Y-suuntaisesta kuormituksesta profiilimaston kaikille seinille tulee seinän pituista kuormitusta, joka x-suuntaisille seinille syntyy rakennuksen kiertymästä. X-suuntaisten seinien voimat kuitenkin kumoavat toisensa. Siksi taulukkoon 7 on koottu vain y-suuntaisten seinien voimajakaumat.

Taulukko 7. Numeerisen analyysin jälkikäsitellyt tulokset.

Osamasto		Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3
		$Q_{y,i}$ , kN	$Q_{y,i}$ , kN	$Q_{y,i}$ , kN
mastoseinä	S1	27,30	4,65	-
profiilimasto	S2	-195,44	-124,06	16,08
	S7	29,26	-8,01	-82,17
	S8	-22,21	-76,67	-158,75
	S9	13,0	75,62	129,85
	S10	-33,58	-53,57	-85,63
	yhtenäinen rakenne	-208,98	-186,70	-180,62
tason kokonaisvaakavoima, $Q_y$ , kN		-181,68	-182,05	-180,62

Elementtimenetelmän analyysi antaa tiedot rakenneosien käyttäytymisestä kuormituksessa. Profiilimaston kohdalla on kiinnostava miten voimat jakautuvat sen seinille ja mitä pitää ottaa huomioon seinän mitoituksessa. Analyyttisen laskennan perustella voidaan arvioida vain koko rakenteelle jakautuva voimaosuus. Taulukosta 7 näkyy, että tutkittavan profiilimaston lyhyisiin oviaukkojen sivuilla sijaitseviin seiniin kohdistuu suuret voimat, varsinkin profiilimaston ollessa ainoa jäykistävä rakenne.

Tutkimusvaihtoehto 3, kun rakennusmallin jäykistää vain profiilimasto, on mielenkiintoinen kuilun sisäisten rasitusten näkökulmasta. Kuitenkin tämän työn puitteissa lasketaan vain profiilimaston huipulla vaikuttavan vääntökulman maksimi arvo ja sen bimo-mentti profiilimaston juuressa.

Laskennassa mastotorni katsotaan tasaisella vääntömomentilla ( $m$ ) kuormitetuksi. Vääntömomentti määritetään rakennukseen vaikuttavasta kokonaisvaakavoimasta eli tuulikuormasta ja lisävaakavoimasta (liite 3). Laskenta tehtiin murtorajatilassa.

Vääntökulman laskentaan käytetään työssä esitetty kaava 15. Tarkasteltavan kuormitustapauksen bimomentin lauseke muodostuu yleiskaavasta 8 seuraavasti [3, s. 338]:

$$B(z) = -\frac{m}{k^2} \left[ \frac{(kL \sinh kL + 1) \cosh kz}{\cosh kL} - kL \sinh kz - 1 \right], \quad (45)$$

jossa profiilimaston juuressa  $z$  koordinaatin arvo on 0 ja  $L$  on profiilimaston korkeus kiinnityskohdasta. Taulukossa 8 esitetään laskennassa käytetyt suureet ja tulokset.

Taulukko 8. Profiilimaston rasitukset, vaihtoehto 3.

Kokonaisvaakavoima pituusyksikköä kohti	$q_y$	kN/m	47,27
Profiilimaston korkeus	$L$	m	28,80
Kimmomoduuli	$E$	MPa	34000,00
Liukumoduuli	$G$	MPa	14166,67
Vääntöneliömomentti	$I_v$	$m^4 \times 10^{-2}$	9,76
Käyritysmisjäyhyys	$I_\omega$	$m^6 \times 10^2$	1,29
Parametri $k$	$k$	1/m	0,017721
Parametri $kL$	$kL$	-	0,51
Epäkeskisyyys	$ex$	m	7,52
Tasainen vääntömomentti pituusyksikköä kohti	$m$	kNm/m	355,47
Profiilimaston maksimikiertymä	$\varphi(L)$	deg	0,36
Bimomentti profiilimaston juuressa	$B(0)$	kNm <sup>2</sup>	-138700,6
Taivutusmomentti profiilimaston juuressa	$M(0)$	kNm	-19603,8

Vääntö- ja taivutustapausten analogiaa käyttäen voidaan vertailla bimomentin ja taivutusmomentin vaikutuksia. Taivutusmomentti profiilimaston kiinnityskohdalla lasketaan kaavalla

$$M(0) = -\frac{mL^2}{2} \quad (46)$$

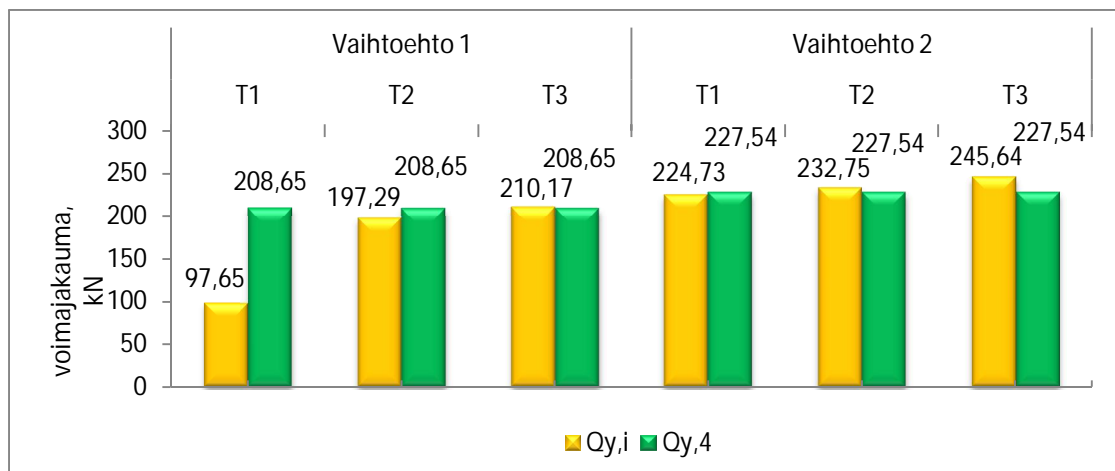
Vääntöteorian yhteydessä esitetystä kaavasta 19 ilmenee, että kumpikin mainituista momentista vaikuttaa lineaarisesti rakenteen normaalijännityksiin (kaavan kaksi jälkimäistä jäsentä). Tulosten perusteella voidaan todeta, että profiilimaston kiinnityskohdalla bimomentin suuruus on paljon taivutusmomenttia suurempi. Tämän perustella voidaan päätellä, että väännön aiheuttamat normaalijännitykset profiilimastoon ovat merkittävämpiä taivutuksen aiheuttamiin verrattuna.

Profiilimaston maksimikiertymän suuruus on myös huomattava, 0,36 asteetta. Tason kiertymät ovat suuruusluokaltaan tämän arvon tuhannesosia, kuten havaitaan taulukoista 4, 5 ja 6. Näistä laskelmista nähdään, että profiilimaston vääntöanalyysillä on merkittävä osuus varsinkin rakenteellisesti mastotornista riippuvaisten rakennusten rakennesuunnittelussa.

## 8 Tulosten vertailu

### 8.1 Osamastojen voimajakaumat

Profiilimaston vääntöjäykkyyden vaikutusta vaakavoimien jakaumaan tarkastellaan sekä profiilimaston että mastoseinän osuudesta. Pääsialliseksi vertailukohteeksi otetaan jäykistysjärjestelmät, jotka muodostuvat profiilimastosta ja mastoseinästä ja poikkeavat toisiaan profiilimaston vääntöjäykkyyden käsittelyn osalta eli tapaukset T3 ja T4. Profiilimaston voimajakauman vertailudiagrammi on esitetty kuvassa 13.

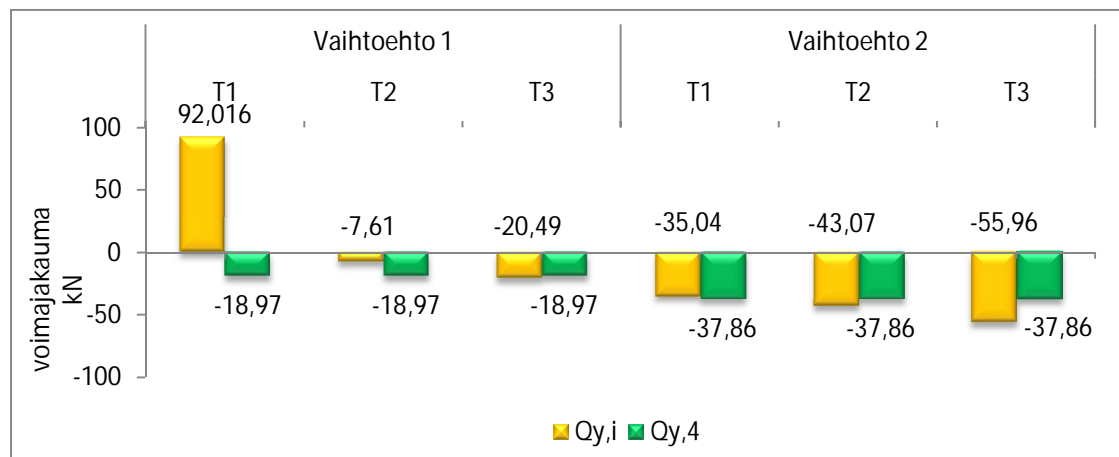


Kuvio 13. Profiilimaston voimajakaumat.

Kuvassa esitettyjen tapauksien T1, T2 ja T3 profiilimaston voimajakaumia ( $Q_{y,i}$ ) vertailaan tapauksen T4 profiilimaston voimajakaumaan ( $Q_{y,4}$ ) eri vaihtoehtojen osalta. Samaa esitystapaa käytetään myös mastoseinän ja tason kiertymän vertailudiagrammeissa.

Profiilimaston osalta merkittävää voimajakauman eroa ei tullut esiin. Silloin kun vääntöjäykkyys huomioidaan laskennassa, profiilimaston vaakavoimaosuus pienenee. Mastoseinän pituuden ollessa seitsemän metriä (vaihtoehto 1) profiilimaston vaakavoimien pienennys on 0,7 % ja pituuden ollessa kolme metriä (vaihtoehto 2) vaakavoimien pienennys on 7,4 %.

Yksittäisen mastoseinän osalta profiilimaston vääntöjäykkyys vähentää mastoseinän kuormitusta. Seinän vaakarasiituksen pienentäminen on eduksi varsinkin lyhyen jäykistävän seinän tapauksessa, johtuen sen altistumisesta vedolle. Kolmemetrisen mastoseinän vaakavoiman osuus pienenee jopa 32 %. Seitsemän metrisen seinän voimajakauma pienenee 8 %. Mastoseinän voimajakaumalaskennan tulosten vertailudiagrammi on esitetty kuvassa 14. Diagrammissa vaaka-akselin alapuolella on esitetty tapauksen T4 vaakavoimajakauman arvot ( $Q_{y,4}$ ).



Kuvio 14. Mastoseinän (S1) voimajakaumat.

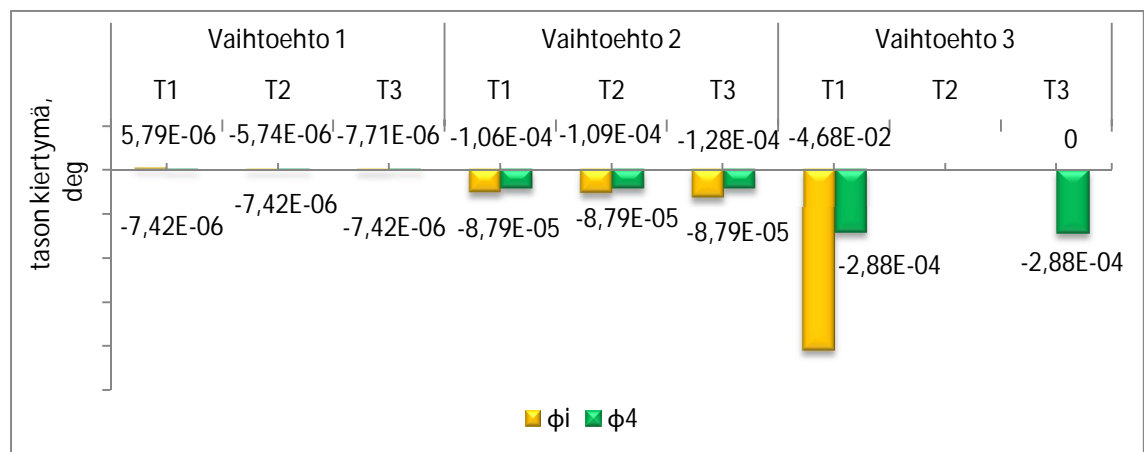
Voimajakauman ero on suuri vaihtoehdon 1 tapauksessa, kun vertaillaan irtonaisista seinistä koostuvan (tapaus T1) ja yhtenäisenä rakenteena olevan profiilimaston, jonka vääntöjäykkyys lasketaan mukaan (tapaus T4), rasiituksia. Yhtenäisen profiilimaston kuormitus on 114 % isompi kuin sen muodostavien irtonaisten seinien yhteen lasketut kuormitukset. Yksittäisen mastoseinän rasiitus tässä tapauksessa pienenee 80 %. Tämä johtuu tarkasteltavan tason vääntökeskiön sijainnista. Kun tarkastellaan jäykistysjärjestelmää useista mastoseinistä koostuvana y-suunnassa, systeemi on suhteellisen symmetrinen seinien S1 ja S2 (kuva 12) ollessa jäykkyydeltään melko samanlaisina. Silloin vääntökeskiö sijaitsee näiden seinien lähes puolivälillä. Voimat jakautuvat seiiniin S1 ja

S2 melko tasan. Profiilimasto-mastoseinä-jäykistysjärjestelmässä tason vääntökeskiö sijaitsee lähempänä jäykempää profiilimastoa, mikä vaikuttaa tässä tapauksessa voimajakaumaan huomattavasti.

Kun tarkastellaan tutkimusvaihtoehdon 2 vastaavat tapaukset, huomataan, että tapauksessa T4 rasitukset kasvavat profiilimaston osalta vain 1,2 % ja mastoseinän 8 %. Lyhyen mastoseinän tapauksessa (vaihtoehto 2) myös useista mastoseinistä koostuvan jäykistysjärjestelmän vääntökeskiö sijaitsee lähempänä mastotornin seinäryhmää, mikä vaikuttaa voimajakaumaan.

## 8.2 Tason kiertymä

Tason kiertymän suureita vertaillaan pääasiallisesti tarkastelemalla samat tapaukset kuten voimajakaumien osalta eli tapaukset T3 ja T4, jotka poikkeavat toisiaan profiilimaston vääntöjäykkyyden käsittelyn osalta. Tulosten vertailudiagrammi on esitetty kuvassa 15. Diagrammissa vaaka-akselin alapuolella esitetyt arvot vastaavat tapauksen T4 tason kiertymiä ( $\phi_4$ ).



Kuvio 15. Tason kiertymä.

Tutkimusvaihtoehdot ovat jäykistysjärjestelmän kiertymiseen nähden hyvin erilaisia. Vaihtoehto 1 on melko symmetrinen massiivisen yhtenäisen mastoseinän ansiosta. Vaihtoehdot 2 ja 3 vuorostaan ovat kiertymälle aika herkkiä, koska jäykistysjärjestelmän kiertokeskiön paikka siirtyy jäykkyydeltään suuremman rakenteen eli profiilimaston suuntaan.

Seitsemänmetrisen mastoseinän tapauksessa profiilimaston vääntöjäykkyydestä aiheutuu tason kiertymän pieneneminen 4 %. Jäykistysjärjestelmän, joka sisältää vääntöjäykän profiilimaston rinnalla kolmemetrinen seinän, kiertymä pienenee 31 %.

Profiilimaston ollessa rakennuksen ainoana jäykistävänä rakenteena (vaihtoehto 3) tason kiertokeskiö sijaitsee profiilimaston vääntökeskiössä. Analyyttisen laskennan mukaan tason kiertymä tässä tilanteessa on nolla, kun mastotornin vääntöjäykistys jätetään pois laskennasta. Kuitenkin ulkoisen kuorman vaikutuksesta tasoon syntyy momentti. Tämän havainnon mukaan laskentakaavat eivät todennäköisesti ole riittävät yhden jäykistävän rakenteen stabiliteettitarkasteluun.

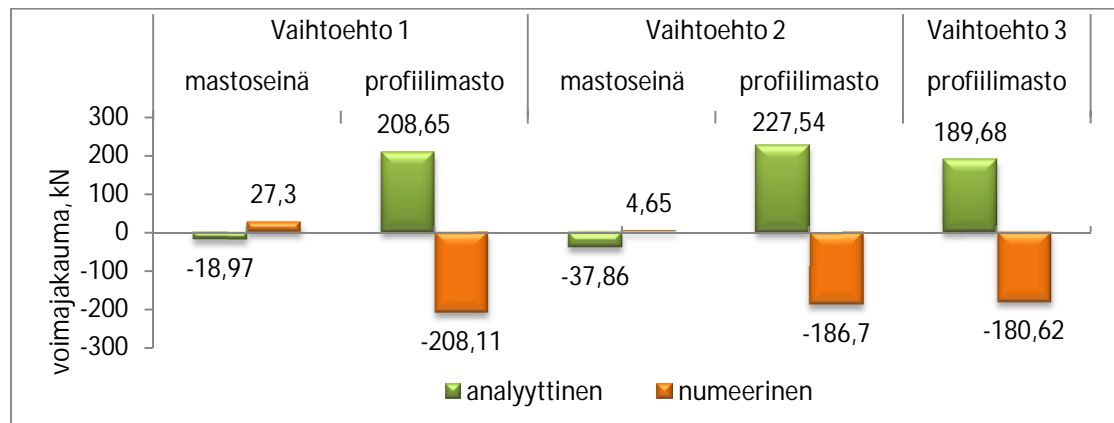
Silloin, kun mastotornin vääntöjäykkyys on mukana, analyttinen laskenta muuntuu kiertymän osalta profiilimaston sisäisen kiertymän laskennaksi tarkasteltavassa tasossa. Tasoa kuormittava momentti on tässä tapauksessa profiilimaston vääntömomentti. Profiilimaston huipulla vaikuttavan kiertymän maksimiarvo on silloin 0,36 astetta (taulukko 8).

Vertaillaan irtonaisista seinistä koostuvan (tapaus T1) ja yhtenäisenä rakenteena olevan tapauksen T4 profiilimaston kiertymiä. Vaihtoehdon 2 osalta profiilimaston vääntöjäykkyyden ansiosta tason kiertymä pienenee 20 %. Vaihtoehdon 1 osalta tason kiertymä kasvaa 28 %. Tämä johtuu vääntökeskiön sijainnista, kuten oli jo mainittu voimajakaumien vertailun yhteydessä.

Tapausten T1 ja T3 (vaihtoehdot 1 ja 2) vertailun tulokset osoittavat, että analyttisessä laskennassa profiilimaston käsittely yhtenäisenä rakenteena ilman sen vääntöjäykkyyden huomioimista kasvattaa jonkin verran jäykistysjärjestelmän poikkileikkauksen kiertymää. Vaihtoehdon 3 osalta näkyy, että profiilimaston käsittely yhtenäisenä rakenteena pienentää huomattavasti tason kiertymä.

### 8.3 Analyyttinen ja numeerinen ratkaisu

Numeerisen analyysin tuloksia verrataan analyttiseen laskentatapaukseen 4 (T4). Tapauksessa T4 ulkoinen vaakavoima jaetaan osamastoille profiilimaston vääntöjäykkyys huomioiden, mikä vastaa elementtimenetelmän analyysia. Tulosten vertailudiagrammi on esitetty kuvassa 14.



Kuvio 16. Analyttisen ja numeerisen analyysien tulosten vertailu.

Tutkimusmenetelmien tulosten merkit ovat päinvastaisia, mikä voi johtua siitä, että numeerisen voimajakauman merkki määräytyy tulosten keräämiseen käytetyn Sections -työkalun luontisuunnan perusteella. Toki kummassakin menetelmässä voimajakauma-periaate pysyy samana. Voimien absoluuttisia arvoja vertaillaan keskenään.

Profiilimaston osalta numeerisen ja analyttisen ratkaisun tulosten erot eivät ole isoja. Tutkimusvaihtoehtojen 1 ja 3 osalta elementtimenetelmän tulosten arvot ovat maksimissaan 5 % pienempiä analyttisen laskennan tuloksiin verrattuna. Vaihtoehdon 2 tapauksessa tutkimusmenetelmien voimajakaumien ero on noin 18 %. Sen sijaan mastoseinän rasiusten erot ovat huomattavia. Mastoseinän pituuden ollessa kolme metriä (vaihtoehto 2) laskentamalli jakaa seinälle merkittävästi vähemmän voimaa analyttiseen tulokseen verrattuna. Vaakavoimien ero on jopa 88 %. Seitsemänmetrisen mastoseinän (vaihtoehto 1) voimaosuus taas kasvaa 44 %.

On kuitenkin huomioitava, että numeerisen analyysin tulokset jäävät analyttisen laskennan tuloksia pienemmiksi, kuten oli jo mainittu tulosten esittelyn yhteydestä. Siten

jäykistävien rakenteiden eri menetelmien tulosten ero todellisuudessa on laskettua pienempi.

Lisäksi seinien osalta tulosten erot voi johtua mallinnustavasta. Analyttisessä laskennassa profiilimasto on käsitelty avoimena poikkileikkauksena, mallinnettu profiilimasto toimii kuitenkin osittain suljettuna oviaukkojen kohdilla tason laatastolla. Silloin poikkileikkauksen ekvivalentti vääntöneliömomentti on isompi kuin avoimen poikkileikkauksen vääntöneliömomentti, mikä nähdään kaavasta

$$I_v = \frac{1}{3} \sum bt^3 + \frac{\Omega^2}{\phi \frac{d_s}{t}}, \quad (47)$$

jossa ensimmäinen termi vastaa todellisen poikkileikkauksen vääntöneliömomenttia ja toinen kuvailee profiilin osittain suljetun osan [3, s. 329]. Tämä tarkoittaa siitä, että poikkileikkaus sillä kohdalla on jäykempi, mikä vaikuttaa vuorostaan mastoseinän voimajakaumaan.

Tässä luvussa esitetyt tulokset riittävät osoittamaan numeerisen ratkaisun tarkkuuden ja todistamaan molempien laskentamenetelmien kelpoisuuden.

#### 8.4 Profiilimaston vaakavoiman vaikutuspiste

Insinööriyössä pyritään myös tekemään analyttisen laskennan osalta Rombach-tyyppinen vertailu, eli tarkastelemaan profiilimaston poikkileikkauksen laskenta-akseleiden sijoittamisen vaikutusta jäykistävien rakenteiden kuormitukseen. Vertailu tehdään tapausten T2 ja T4 sekä T2 ja T3 välillä. Kummassakin tapauksessa profiilimasto käsitellään yhtenäisenä rakenteena. Kuitenkin tapauksessa T2 profiilimaston laskenta-akselit sijoitetaan sen poikkileikkauksen painopisteeseen eikä vääntöjäykkyyttä oteta huomioon. Tapauksissa T3 ja T4 profiilimaston vaakavoiman vaikutuspiste sijaitsee sen vääntökeskiössä. Tapauksen eron muodostaa siis vääntöjäykkyys, kuten edellä oli mainittu. Vertailu tehdään kuvissa 13 ja 14 esitettyjä diagrammeja käyttäen.

Profiilimaston osalta laskenta-akseleiden sijoittaminen poikkileikkauksen painopisteeseen vääntökeskiön sijaan ei aiheuttaa suuria eroja kuilun rasituksille. Profiilimaston käsittely yhtenäisenä rakenteena ilman sen vääntöjäykkyyden huomioimista pienentää



vaihtoehtojen 1 ja 2 osalta mastotornin vakavoiman osuutta 6–7 %, jos laskenta-akselit sijoitetaan poikkileikkauksen painopisteeseen (T2). Sen vuoksi, että profiilimaston vääntöjäykkyys otetaan huomioon ja voiman vaikutuspiste sijaitsee vääntökeskiössä (T4), mastotornin voimasuureet vaihtoehdon 1 osalta kasvavat 6 % ja vaihtoehdon 2 pienenevät noin 2 % tapauksen T2 profiilimastoon verrattuna.

Mastoseinän osalta rasiusten erot ovat huomattavia. Vertailemalla tapausten T2 ja T3 tuloksia huomataan, että laskenta-akselien sijoittaminen profiilimaston poikkileikkauksen painopisteeseen vääntökeskiön sijasta pienentää mastoseinän rasiuksia. Seitsemänmetrisen mastoseinän (vaihtoehto 1) osalta ero on jopa 169 % ja kolmemetrinen mastoseinän (vaihtoehto 2) osalta on 30 %. Tilanne voi olla vaarallinen, jos seinälle lasketaan pienemmät voimat todellisten sijasta, varsinkin kun kyseessä on lyhyt seinä.

Tulokset osoittavat, että analyyttisessä ratkaisussa profiilimaston poikkileikkauksen laskenta-akselien sijoittaminen painopisteeseen ei vaikuta paljontaan profiilimaston rasiukseen. Sen sijaan se vaikuttaa tason kiertymään ja sen kautta yksittäisen mastoseinän rasiukseen. Näin ollen analyyttisessä laskennassa stabiliteettitarkastelut on tehtävä profiilimaston vääntökeskiön suhteen, silloin ollaan varmallalla puolella myös muiden jäykistysjärjestelmän osamastojen suhteen.

## 8.5 Johtopäätökset

Tuloksista kävi ilmi profiilimaston vääntöjäykkyyden ja jäykistysjärjestelmän rakenteen keskinäinen vaikutus. Rakennuksen jäykistysjärjestelmän ollessa suhteellisen tasapainottava profiilimaston vääntöjäykkyydestä ei tule merkittävää. Tilanne on toinen kun kyse on rakenteellisesti mastotornista riippuvaisista rakennuksista, kuten tämän työn tutkimusvaihtoehto 2. Siinä jäykistysjärjestelmä muodostuu profiilimastosta ja kolmemetrisestä yksittäisestä mastoseinästä. Sekä analyyttisen että numeerisen menetelmien tulokset osoittavat, että sellaisissa jäykistyssesteemissä profiilimaston vääntöjäykkyyden vaikutus vaakarasitusten jakaumaan on merkittävä.

Profiilimaston vääntöjäykkyyden osuutta vaakavoimien jakaumaan tarkasteltiin sekä profiilimaston että mastoseinän osalta. Profiilimaston osalta merkittävää rasiusten eroa ei tullut esiin kummassakaan jäykistysjärjestelmässä. Tutkimuksen yksittäisen masto-

seinän pituuden ollessa seitsemän metriä profiilimaston vaakavoimien ero on hyvin pieni ja seinän pituuden ollessa kolme metriä vaakavoimien ero on 7,4 %.

Sen sijaan mastoseinän kuormitus vähenee profiilimaston vääntöjäykkyyden ansiosta. Seitsemänmetrisen seinän voimajakauman osuus pienenee 8 % kun taas kolmemetrin mastoseinän vaakavoiman osuus pienenee jopa 32 %. Näistä tuloksista näkyy profiilimaston vääntöjäykkyyden ja jäykistysjärjestelmän muodon vuorovaikutus. Tutkimusvaihtoehdon 2 osalta myös numeerinen analyysi osoittaa, että profiilimaston vääntöjäykkyyden hyväksi käytöllä voidaan pienentää lyhyen seinän vaakarasituksia.

Numeerisen analyysin tulokset tukevat analyttisen vastaavia tuloksia jäykistyssysteemien ratkaisujen osalta. Profiilimaston osalta tulosten erot eivät ole isoja. Sen sijaan mastoseinän vaakavoimaosuuksien erot ovat huomattavia. Numeerisen analyysin osalta haasteeksi muodostui laskentamallin tuottamien tulosten jälkikäsitteily. Siksi kaikissa kolmessa laskentamallissa numeerisen analyysin ja analyttisen laskennan tuloksissa on 4–5 % ero.

Elementtimenetelmän analyysin tulosten perusteella huomattiin, että suunnittelussa on kiinnitettävä huomio profiilimaston sisäiseen voimajakaumaan. Profiilimaston seinien rasitukset voivat olla hyvin suuria varsinkin profiilimaston ollessa ainoa rakennuksen jäykistävä rakenne. Lisäksi profiilimaston vääntörasitukset on ehdottomasti otettava mukaan profiilimaston mitoituksiin, koska ne ovat taivutuksen aiheuttamiin verrattuina huomattavasti suurempia. Rakenneosan mitoituksessa on huomioitava sekin, että betonin halkeilu pienentää merkittävästi profiilimaston vääntöjäykkyyttä.

Myös tason kiertymän osalta huomataan profiilimaston vääntöjäykkyyden vaikutuksen ja jäykistysjärjestelmän rakenteen asiayhteys. Seitsemänmetrisen mastoseinän sisältävän jäykistysjärjestelmän tason kiertymä pienenee profiilimaston vääntöjäykkyydestä 4 % ja kolmemetrin seinän sisältävän järjestelmän jopa 31 %.

Analyttisen tarkastelun osalta kävi ilmi, että profiilimaston poikkileikkauksen laskentaakseleiden sijoittaminen painopisteeseen vääntökeskiön sijasta vaikuttaa tason kiertymään ja aiheuttaa liian edulliset voimajakaumat mastoseinälle. Näin ollen stabiliteettitarkastelussa on tarkasteltava profiilimastoa sen poikkileikkauksen vääntökeskiön suhteen, varsinkin jos laskennassa ei otetta huomioon profiilimaston vääntöjäykkyyttä.

Lisäksi profiilimaston käsittely yhtenäisenä rakenteena antaa analyttisessä laskennassa lähempänä todellista tilannetta olevat tulokset.

Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan päätellä, että profiilimaston vääntöjäykkyyden huomioiminen stabiiliteettitarkastelussa riippuu tarkasteltavasta jäykistysjärjestelmästä. Rakennesuunnittelijan on tapauksen mukaisesti harkittava profiilimaston vääntöjäykkyyden mukaan ottamista, koska se vaatii rakenteen erillistä mitoitusta väännölle.

## 9 Yhteenveto

Insinööriyössä selvitettiin avoimen profiilimaston vääntöjäykkyyden vaikutus rakennusta kaatavien voimien jakaumaan. Tutkimus tehtiin kahdeksankerroksisen rakennusmallin avulla. Tulokset saatiin käyttämällä kahta tutkimusmenetelmää: analyttinen ja numeerinen analyysi.

Tutkimuksesta tuli esiin, että profiilimaston vääntöjäykkyys pienentää yksittäisen mastoseinän vaakavoimaosuutta, muttei vaikuta paljon profiilimaston vaakarasiinukseen. Olennainen havainto on profiilimaston vääntöjäykkyyden ja jäykistysjärjestelmän rakenteen asiayhteydessä. Profiilimaston vääntöjäykkyydestä saadaan etua rakenteellisesti mastotornista riippuvaisissa jäykistysjärjestelmissä. Työssä saatiin myös käsitys vääntötoiminnasta.

Tulokset osoittavat kummankin tutkimusmenetelmän kelpoisuuden ja tarkkuuden. Kuitenkin päätelmät tehtiin pääasiassa analyttisen menetelmän pohjalta. Elementtimenetelmän ratkaisut ovat luotettavia jos malli määritetään oikein. Kääntöpuolena on mallin herkkyys virheille. Tästä syystä numeerisen laskentamallin tulokset pitäisi todentaa jollakin toisella, esimerkiksi analyttisellä menetelmällä. Toisaalta vaativimmissa kohdeissa näiden kahden menetelmän tulosten väliset erot voivat olla hyvinkin suuret, mikä johtuu analyttisen ratkaisun oletuksista ja yksinkertaistuksista. Silloin on vertailuun parempi käyttää muita mallinnustapoja.

Jäykistävien betonirakenteiden väännön toiminta ja analyysi ovat vielä suhteellisen tuntemattomia, siksi työn tekeminen oli mielenkiintoista ja haastavaa. Sivuuon jäi profiilimaston vääntöjäykkyyden vaikutus rakennusta kaatavien voimien jakaumaan.

limaston mallinnus vääntötarkastelua varten. Tämän tyypistä elementtimenetelmän analyysia on hyvin vähän käytetty. Tältä osin työtä olisi hyvä jatkaa ja tutkia väännön aiheuttamien rasitusten jakauma profiilimastossa.

## Lähteet

- 1 Elementtisuunnittelu.fi. Jäykistysjärjestelmät. 2012. Verkkosivu. <<http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennuksenjaykistys/jaykistysjarjestelmat>>. Päivitetty 15.helmikuuta 2010. Luettu 9.2.2012
- 2 Valmisosarakentaminen II. Osa G. Elementtirakennuksen jäykistys. 1995. Lahti: RTT Rakennusteollisuuden ry., Betoniteollisuusjaosto.
- 3 Smith, Bryan Stafford & Coull, Alex. 1991. Tall building structures: Analysis and design. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- 4 Salmi, Tapio, Pajunen, Sami.2010. Lujuusoppi. Tampere: Klingendahl Paino Oy
- 5 Tuomala, Markku. 2011. Sovellettu kimmoteoria. Julkaisematon luentomoniste. Tampereen tekninen yliopisto.
- 6 Rautaruukki Oy. Kylmämuovatut profiilit. Suunnittelu ja käyttö. 1987. Metalliteollisuuden Kustannus Oy.
- 7 SFS-EN 1992-1-1. 2005. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- 8 Avointen ohutseinämäisten sauvojen vääntötehtävän ratkaiseminen. Verkkodokumentti. <[https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/rak-54.../Rak-54\\_3100\\_ki\\_2.pdf](https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/rak-54.../Rak-54_3100_ki_2.pdf)>. Luettu 24.09.2011.
- 9 Young, W. C., Budynas, R.G. 2002. Roark's formulas for stress and strain. Chapter 10. Torsion. Verkkodokumentti. <[ftp://sumin.in.ua/books/DVD-010/Young\\_W.C.,\\_Budynas\\_R.G.\\_Roark%5Bap%5Ds\\_Formulas\\_for\\_Stress\\_and\\_Strain\\_\(2002\)\(7th\\_ed.\)\(en\)\(851s\).pdf](ftp://sumin.in.ua/books/DVD-010/Young_W.C.,_Budynas_R.G._Roark%5Bap%5Ds_Formulas_for_Stress_and_Strain_(2002)(7th_ed.)(en)(851s).pdf)>. Luettu 9.2.2012.
- 10 SFS-EN 1991-1-3+AC. 2005. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- 11 SFS-EN 1991-1-4+AC+A1. 2005. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- 12 SFS-EN 1991-1-1+AC. 2005. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat. Tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- 13 SFS-EN 1990+A1+AC. 2005. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- 14 Jaakkola, Tuomas. 2011. Monikerrosrunгон jäykistävien elementtirakenteiden numeerisen mallintamisen ohjeistus. Diplomityö. Oulun yliopisto.

- 15 Jäkistysjärjestelmät. Laskentaperiaatteet. Verkkodokumentti. Betonteollisuus ry. 2010.  
<<http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennuksenjakykistys/laskentaperiaatteet>  
>. Luettu 9.2.2012.
- 16 Rombach, G. A. 2004. Finite element design of concrete structures. London: Thomas Telford Publishing.

## Jäykistävät profiilimastot

Parametrit kL (kaava 1) on laskettu tutkimuksen rakennusmallin profiilimaston arvoilla: maston pituus kiinnityskohdasta (L) on 28,8 metriä, betonin lujuusluokka on C35/45 ja sen vastaava kimmokerroin (E) on 34 GPa, betonin liukukerroin (G) on 14,17 GPa.

Profiilimaston poikkileikkaus		Poikkileikkaussuureet				kL	Vääntö tapaus
		nimike	merkki	yksikkö	arvo		
1		Pinta-ala	A	mm <sup>2</sup> x10 <sup>4</sup>	175	18,25	vapaa vääntö
		Painopistekoordinaatisto					
		Vääntökeskiö (S)	Xs	mm	0,0		
			Ys	mm	0,0		
		Jäyhyysmomentti	Ix	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,7150		
			Iy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>10</sup>	0,9115		
			Ixy	mm <sup>4</sup>	0,0023		
		Vääntöneliömomentti	Iv	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>10</sup>	3,5638		
		Käyritysmisjäyhyys	Iω	mm <sup>6</sup> x 10 <sup>20</sup>	0,00037		
		Pääkoordinaatisto					
		Koord. kulma	α	rad	0,00		
Jäyhyysmomentti	I1	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,7150				
	I2	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>10</sup>	0,9115				
2		Pinta-ala	A	mm <sup>2</sup> x 10 <sup>4</sup>	267,50	1,38	yhdistetty vääntö
		Painopistekoordinaatisto					
		Vääntökeskiö (S)	Xs	mm	-2162,0		
			Ys	mm	0,0		
		Jäyhyysmomentti	Ix	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,9597		
			Iy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,2871		
			Ixy	mm <sup>4</sup>	3826,00		
		Vääntöneliömomentti	Iv	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>10</sup>	5,5526		
		Käyritysmisjäyhyys	Iω	mm <sup>6</sup> x 10 <sup>20</sup>	0,101		
		Pääkoordinaatisto					
		Koord. kulma	α	rad	0,00		
Jäyhyysmomentti	I1	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,9597				
	I2	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,2871				
3		Pinta-ala	A	mm <sup>2</sup> x 10 <sup>4</sup>	387,55	1,19	yhdistetty vääntö
		Painopistekoordinaatisto					
		Vääntökeskiö (S)	Xs	mm	-1564,0		
			Ys	mm	31,8		
		Jäyhyysmomentti	Ix	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	1,1340		
			Iy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,5036		
			Ixy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,0053		
		Vääntöneliömomentti	Iv	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>10</sup>	7,7114		
		Käyritysmisjäyhyys	Iω	mm <sup>6</sup> x 10 <sup>20</sup>	0,1871		
		Pääkoordinaatisto					
		Koord. kulma	α	rad	-0,0084		
Jäyhyysmomentti	I1	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	1,1340				
	I2	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,5036				

Profilimaston poikkileikkaus		Poikkileikkaussuureet				kL	Vääntö tapaus
		nimike	merkki	yksikkö	arvo		
4		Pinta-ala	A	mm <sup>2</sup> x10 <sup>4</sup>	763,90	0,44	estetty vääntö
		Painopistekoordinaatisto					
		Vääntökeskiö (S)	Xs	mm	1269,0		
			Ys	mm	-632,7		
		Jäyhyysmomentti	Ix	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	3,2000		
			Iy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	5,9460		
			Ixy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,9341		
		Vääntöneliomomentti	Iv	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>10</sup>	15,7351		
		Käristymisjäyhyys	Iω	mm <sup>6</sup> x 10 <sup>20</sup>	2,7470		
		Pääkoordinaatisto					
		Koord. kulma	α	rad	1,8700		
Jäyhyysmomentti	I1	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	6,2340				
	I2	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	2,921				
5		Pinta-ala	A	mm <sup>2</sup> x 10 <sup>4</sup>	485,75	0,44	estetty vääntö
		Painopistekoordinaatisto					
		Vääntökeskiö (S)	Xs	mm	-961,6		
			Ys	mm	6508,0		
		Jäyhyysmomentti	Ix	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	2,9380		
			Iy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	1,2910		
			Ixy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,1114		
		Vääntöneliomomentti	Iv	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>10</sup>	10,1590		
		Käristymisjäyhyys	Iω	mm <sup>6</sup> x 10 <sup>20</sup>	1,7890		
		Pääkoordinaatisto					
		Koord. kulma	α	rad	-0,6722		
Jäyhyysmomentti	I1	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	2,9460				
	I2	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	1,2840				
6		Pinta-ala	A	mm <sup>2</sup> x 10 <sup>4</sup>	378,60	0,93	yhdistetty vääntö
		Painopistekoordinaatisto					
		Vääntökeskiö (S)	Xs	mm	-219,4		
			Ys	mm	2189,0		
		Jäyhyysmomentti	Ix	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,4873		
			Iy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	1,7050		
			Ixy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	-0,0412		
		Vääntöneliomomentti	Iv	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>10</sup>	5,1678		
		Käristymisjäyhyys	Iω	mm <sup>6</sup> x 10 <sup>20</sup>	0,2052		
		Pääkoordinaatisto					
		Koord. kulma	α	rad	1,5370		
Jäyhyysmomentti	I1	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	1,7060				
	I2	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,4859				
7		Pinta-ala	A	mm <sup>2</sup> x 10 <sup>4</sup>	291,90	0,56	yhdistetty vääntö
		Painopistekoordinaatisto					
		Vääntökeskiö (S)	Xs	mm	-72,9		
			Ys	mm	4415,0		
		Jäyhyysmomentti	Ix	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,8436		
			Iy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,6223		
			Ixy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	-0,1725		
		Vääntöneliomomentti	Iv	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>10</sup>	3,8990		
		Käristymisjäyhyys	Iω	mm <sup>6</sup> x 10 <sup>20</sup>	0,4307		
		Pääkoordinaatisto					
		Koord. kulma	α	rad	0,5000		
Jäyhyysmomentti	I1	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,9379				
	I2	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,5280				



Profilimaston poikkileikkaus		Poikkileikkaussuureet				kL	Vääntö tapaus
		nimike	merkki	yksikkö	arvo		
8		Pinta-ala	A	mm <sup>2</sup> x 10 <sup>4</sup>	498,43	0,29	estetty vääntö
		Painopistekoordinaatisto					
		Vääntökeskiö (S)	Xs	mm	4112,0		
			Ys	mm	-2988,0		
		Jäyhyysmomentti	Ix	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	2,5890		
			Iy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	1,5460		
			Ixy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,0857		
		Vääntöneliömomentti	Iv	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>10</sup>	8,1490		
		Käyritysmisjäyhyys	Iω	mm <sup>6</sup> x 10 <sup>20</sup>	3,4170		
		Pääkoordinaatisto					
		Koord. kulma	α	rad	-0,0814		
		Jäyhyysmomentti	I1	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	2,5960		
I2	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>		1,5390				
9		Pinta-ala	A	mm <sup>2</sup> x10 <sup>4</sup>	487,52	0,62	yhdistetty vääntö
		Painopistekoordinaatisto					
		Vääntökeskiö (S)	Xs	mm	-3017,0		
			Ys	mm	-656,3		
		Jäyhyysmomentti	Ix	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	3,3790		
			Iy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	1,0570		
			Ixy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	0,0872		
		Vääntöneliömomentti	Iv	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>10</sup>	8,0124		
		Käyritysmisjäyhyys	Iω	mm <sup>6</sup> x 10 <sup>20</sup>	0,7231		
		Pääkoordinaatisto					
		Koord. kulma	α	rad	-0,0375		
		Jäyhyysmomentti	I1	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	3,3830		
I2	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>		1,0540				
10		Pinta-ala	A	mm <sup>2</sup> x 10 <sup>4</sup>	591,80	0,51	yhdistetty vääntö
		Painopistekoordinaatisto					
		Vääntökeskiö (S)	Xs	mm	-2256,0		
			Ys	mm	0,0		
		Jäyhyysmomentti	Ix	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	5,5130		
			Iy	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	1,0610		
			Ixy	mm <sup>4</sup>	-0,1831		
		Vääntöneliömomentti	Iv	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>10</sup>	9,7603		
		Käyritysmisjäyhyys	Iω	mm <sup>6</sup> x 10 <sup>20</sup>	1,2950		
		Pääkoordinaatisto					
		Koord. kulma	α	rad	0,0000		
		Jäyhyysmomentti	I1	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>	5,5130		
I2	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>13</sup>		1,0610				

## Rakennusmallin luonnon kuormat

### LUMIKUORMA

$S_k$	2,5	kN/m <sup>2</sup>
$\mu$	0,8	

$q_{k,lumi}$	2,0	kN/m <sup>2</sup>
--------------	-----	-------------------

Lumikuorman ominaisarvon laskentakaava:  $q_{k,lumi} = \mu * S_k$

### TUULIKUORMA

#### Rakennus

H (kork.maasta)	26,00	m
L (pituus)	33,62	m
B (leveys)	18,24	m

#### Lähtötiedot

maastoluokka	0	II	III	
puuskanop.paine, $q_p(z)$ , 7.krs, 26m	1,30	0,83	0,66	kN/m <sup>2</sup>
puuskanop.paine, $q_p(z)$ , 5.krs, 18m (18,24m)			0,58	kN/m <sup>2</sup>

rakennekerroin, $c_s c_d$ (s.138)	1,0
-----------------------------------	-----

voimakerroin, $c_f$ (15<H<50 m)	Pitkä sivu(L), Y-suunta	Lyhyt sivu(B), X-suunta	
tehollinen hoikkuus, $\lambda$ , H=14	0,83	1,54	
tehollinen hoikkuus, $\lambda$ , H=50	2,08	3,84	
tehollinen hoikkuus, $\lambda$ , H=26m	1,25	2,31	interpoloitu
sivusuhte d/b	0,54	1,84	
voimakerroin, $c_f$	1,4	1,1	interpoloitu

Tuulikuorma tasolle

tuulikuorma, $q_{k,tuuli}$ , 7.krs	0,92	0,73	kN/m <sup>2</sup>
tuulikuorma, $q_{k,tuuli}$ , 5.krs		0,64	kN/m <sup>2</sup>

Tuulikuorman ominaisarvon laskenta kaavalla 24.

	pitkä sivu, Y-suunta			lyhyt sivu, X-suunta		
	$q_k$ , kN/m	$F_k$ , kN	$F_d$ , kN	$q_k$ , kN/m	$F_k$ , kN	$F_d$ , kN
7.krs katto	31,06	79,53	119,29	13,24	33,90	50,85
6.krs katto	31,06	113,70	170,55	13,24	48,47	72,70
5.krs katto	31,06	111,83	167,75	11,64	41,89	62,84
4.krs katto	31,06	111,83	167,75	11,64	41,89	62,84
3.krs katto	31,06	111,83	167,75	11,64	41,89	62,84
2.krs katto	31,06	111,83	167,75	11,64	41,89	62,84
1.krs katto	31,06	111,83	167,75	11,64	41,89	62,84
K.krs katto	31,06	55,92	83,88	11,64	20,95	31,42
YHT.	248,52	808,31	1212,46	96,31	312,78	469,17

Tuulikuorman mitoituslaskenta kaavalla 25.

## Rakennusmallin kokonaisvaakavoimat

## MITTAEPÄTARKKUDET

				TUULISUUNTA	
		ehto		X-suunta	Y-suunta
$\theta_0$	$\theta$ :n perusarvo	1/200		0,005	0,005
$a_h$	piennensker.	$2/3 < a_h < 1$	0,39	0,70	0,70
m	jäyk.pystyrak.määrä			6,00	4,00
$a_m$	piennensker.			0,76	0,79
l	rak.kork.			26,00	26,00
$\theta$	vinousker.			0,0027	0,0028

Vinouden arvo lasketaan kaavalla 27.

## RAKENNUSMALLIN KOKONAISSVAAKAVOIMAT

	X-suunta				
	Kerroksen pysty kuorma	Lisävaakavoima	Tuuli tasolle		Kok.vaakavoima
	Nd, kN	Hd, kN	Fk, kN	Fd, kN	Qwd, kN
7.krs katto	6955,85	18,59	33,90	50,85	69,44
6.krs katto	7172,55	19,17	48,47	72,70	91,87
5.krs katto	7172,55	19,17	41,89	62,84	82,01
4.krs katto	7172,55	19,17	41,89	62,84	82,01
3.krs katto	7172,55	19,17	41,89	62,84	82,01
2.krs katto	7172,55	19,17	41,89	62,84	82,01
1.krs katto	7172,55	19,17	41,89	62,84	82,01
K krs katto	7408,62	19,80	20,95	31,42	51,22

	Y-suunta				
	Kerroksen pysty kuorma	Lisävaakavoima	Tuuli tasolle		Kok.vaaka voima
	Nd, kN		Hd, kN	Fk, kN	Fd, kN
7.krs katto	6689,83	18,51	79,53	119,29	137,80
6.krs katto	6915,10	19,13	113,70	170,55	189,68
5.krs katto	6915,10	19,13	111,83	167,75	186,88
4.krs katto	6915,10	19,13	111,83	167,75	186,88
3.krs katto	6915,10	19,13	111,83	167,75	186,88
2.krs katto	6915,10	19,13	111,83	167,75	186,88
1.krs katto	6915,10	19,13	111,83	167,75	186,88
K krs katto	7104,41	19,66	55,92	83,88	103,53

Lisävaakavoima lasketaan kaavalla 26.

Kuormien mitoitusarvot lasketaan kaavalla 25.

## TOISEN KERTALUVUN VAIKUTUKSET

Toisen kertaluvun vaikutukset, Y-suunta

Profiilimasto+mastoseinä

Kokonaispystykuorma	$F_{V,Ed}$ , kN	55284,85	
Kerrosten lukumäärä	$n_s$	8	
Rakennuksen kokonaiskorkeus	H, m	29,50	
Betonin kimmokerroin	$E_{cm}$ , kN/m <sup>2</sup>	34000000	
Betonin kimmokerroin	$E_{cd}$ , kN/m <sup>2</sup>	28333333,33	
Jäykistävät osat		S1	Profiilimasto
Osan jäyhyysmomentti	$I_c$ , m <sup>4</sup>	0,4950	55,1300
Osan leveys	b, m	0,22	
Osan pituus	h, m	3,00	
Tarkisteltavan suunnan $\Sigma E_{cd} * I_c$		1576041666,67	
Kerroin	k1	0,31	
Kok.pystykuorman vertailuarvo	$0,1 * F_{V,BB}$ , kN	467847,28	EI OLE

toista kertaluvun vaikutusta

## Toisen kertaluvun vaikutukset, X-suunta

Profiilimasto+mastoseinä

Kokonaispystykuorma	$F_{V,Ed}$ , kN	57399,75	
Kerrosten lukumäärä	$n_s$	8	
Rakennuksen kokonaiskorkeus	H, m	29,50	
Betonin kimmokerroin	$E_{cm}$ , kN/m <sup>2</sup>	34000000	
Betonin kimmokerroin	$E_{cd}$ , kN/m <sup>2</sup>	28333333,33	
Jäykistävät osat		S1	Profiilimasto
Osan jäyhyysmomentti	$I_c$ , m <sup>4</sup>	0,4950	10,6100
Osan leveys	b, m	0,22	
Osan pituus	h, m	3,00	
Tarkisteltavan suunnan $\Sigma E_{cd} \cdot I_c$		314641666,67	
Kerroin	k1	0,31	
Kok.pystykuorman vertailuarvo	$0,1 \cdot F_{V,BB}$ , kN	93401,24	EI OLE toista kertaluvun vaikutusta

Toisen kertaluvun vaikutusten laskenta Eurokoodin 2 liitteen H mukaan.

## Analyyttisen ratkaisun tulokset

Liitteessä esitetyt laskentataulukot on tehty pohjautuen työssä käytetyn analyttisen tutkimusmenetelmään (luku 6.1). Taulukoissa esitetyt suureet on laskettu kaavojen 28–44 mukaisesti. Suureiden merkintä vastaa laskentakaavojen merkintä.

Betoni	C35/45		
Kimmomoduuli	E	34000000	kN/m <sup>2</sup>
Liukumoduuli	G	14166667	kN/m <sup>2</sup>
Poissonin luku	$\nu$	0,20	

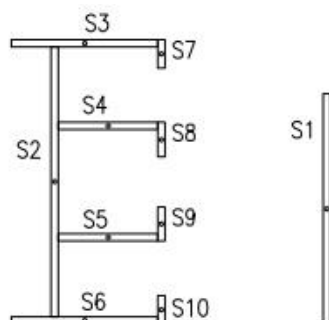
Kokonaisvaakavoiman epäkeskisyyden vääntökeskiöstä, laskentaperiaate:

$$e_x = x'_0 - X$$

$$e_y = y'_0 - Y$$

Laskentataulukossa yleisesti tarkasteltavan tason vaakavoiman resultantti on merkitty  $Q_w$ , esitetyt arvot vastaavat x- ja y-suuntaisten vaakavoimien resultantteja ( $Q_x$ ,  $Q_y$ ).

Laskennassa käytetyn koordinaatistosysteemin merkintä- ja indeksointiperiaate on esitetty kuvassa 8. Alla oleva kuva esittää laskennassa käytetyn irtonaisten seinien indeksoinnin.



6. krs katto	
tason korkeus, H, m	3,60

VAIHTOEHTO 1: mastoseinän pituus on 7 metriä. Tapaus T1 (ks. luku 7)

																								Osamastojen kuormitukset			
Osamasto	b, m	h, m	$I_x, m^4$	$I_y, m^4$	A, m <sup>2</sup>	$x_{0,i}, m$	$y_{0,i}, m$	$K_{x,i}, kN/m$	$K_{y,i}, kN/m$	$K_{x,i} * y_{0,i}, kN$	$K_{y,i} * x_{0,i}, kN$	$X_i, m$	$Y_i, m$	$K_{x,i} * Y_i^2, kNm$	$K_{y,i} * X_i^2, kNm$	Qw, kN	vx, m	vy, m	K <sub>T</sub> , kNm	M, kNm	φ, rad	$K_{x,i} * vx, kN$	$K_{y,i} * vy, kN$	$K_{x,i} * Y_i * φ, kN$	$K_{y,i} * X_i * φ, kN$	Ox,i, kN	Oy,i, kN
X-suunta																											
S3	0,22	4,43	1,594		0,97	11,34	12,06	3,5E+06	0	4,2E+07	0	-7,84	4,09	5,8E+07	0	91,87	1,00E-05		1,21E+08	105,91	8,78E-07	34,97	0	12,51	0	22,46	0
S4	0,22	3,01	0,500		0,66	12,05	9,54	1,1E+06	0	1,0E+07	0	-7,13	1,57	2,7E+06	0							10,97	0	1,51	0	9,46	0
S5	0,22	3,01	0,500		0,66	12,05	6,15	1,1E+06	0	6,7E+06	0	-7,13	-1,82	3,6E+06	0							10,97	0	-1,74	0	12,71	0
S6	0,22	4,43	1,594		0,97	11,34	3,96	3,5E+06	0	1,4E+07	0	-7,84	-4,01	5,6E+07	0							34,97	0	-12,27	0	47,24	0
Σ								9,2E+06	0	7,3E+07	0			1,2E+08	0											91,87	
Y-suunta																											
S1	0,22	7,000	0	6,288	1,54	33,33	4,30	0	1,4E+07	0	4,6E+08	14,15	-3,67	0	2,8E+09	189,68		5,26E-06	4,45E+09	449,41	1,01E-07	0	72,38	0	19,64	0	92,02
S2	0,22	8,205	0	10,127	1,81	10,43	7,84	0	2,2E+07	0	2,3E+08	-8,75	-0,12	0	1,7E+09							0	116,56	0	-19,56	0	96,99
S7	0,22	0,870	0	0,012	0,19	13,66	11,73	0	2,6E+04	0	3,6E+05	-5,52	3,76	0	8,0E+05							0	0,14	0	-0,01	0	0,12
S8	0,22	1,038	0	0,021	0,23	13,66	9,13	0	4,5E+04	0	6,1E+05	-5,52	1,16	0	1,4E+06							0	0,24	0	-0,02	0	0,21
S9	0,22	1,038	0	0,021	0,23	13,66	6,56	0	4,5E+04	0	6,1E+05	-5,52	-1,41	0	1,4E+06	0	0,24	0	-0,02	0	0,21						
S10	0,22	0,870	0	0,012	0,19	13,66	3,96	0	2,6E+04	0	3,6E+05	-5,52	-4,01	0	8,0E+05	0	0,14	0	-0,01	0	0,12						
Σ								0	3,6E+07	0	6,9E+08			0	4,4E+09												189,68

Vääntökeskiön sijainti	X	19,18	m
	Y	7,97	m

	φ, deg
φ <sub>x</sub>	5,03E-05
φ <sub>y</sub>	5,79E-06

Kok. vaakavoiman resultantin paikka	x <sub>0</sub>	16,81	m
	y <sub>0</sub>	9,12	m

Kok. vaakavoiman epäkeski vääntökeskiöstä	ex	-2,37	m
	ey	1,15	m



6. krs katto	
tason korkeus, H	3,60 m

VAIHTOEHTO 1: mastoseinän pituus on 7 metriä. Tapaus T2 (ks. luku 7)

																								Osamastojen kuormitukset		
Osamasto	b, m	h, m	$I_x, m^4$	$I_y, m^4$	A, m <sup>2</sup>	$x_{0,i}, m$	$y_{0,i}, m$	$K_{x,i}, kN/m$	$K_{y,i}, kN/m$	$K_{x,i} * y_0, kN$	$K_{y,i} * x_0, kN$	$X_i, m$	$Y_i, m$	$K_{y,i} * X_i^2, kNm$	$Q_w, kN$	$v_x, m$	$v_y, m$	$K_T, kNm$	M, kNm	$\phi, rad$	$K_{x,i} * v_x, kN$	$K_{y,i} * v_y, kN$	$K_{x,i} * Y_i * \phi, kN$	$K_{y,i} * X_i * \phi, kN$	$Q_{x,i}, kN$	$Q_{y,i}, kN$
X-suunta																										
Profiilimasto	0,22	0	10,61		5,92	9,29	7,84	2,32E+07	0	1,82E+08	0	-4,40	0,00	0	91,87	4,0E-06		0	117,23	0	91,87	0	0	0	91,87	0
$\Sigma$								2,32E+07	0	1,82E+08	0			0											91,87	
Y-suunta																										
S1	0,22	7,0	0	6,29	1,54	33,33	4,30	0	1,37E+07	0	4,58E+08	19,63	-3,54	5,30E+09	189,68		1,4E-06	5,9E+09	-591,18	-1,0E-07	0	19,42	0	-27,03	0	-7,61
Profiilimasto	0,22	0	0	55,13	5,92	11,45	7,84	0	1,21E+08	0	1,38E+09	-2,24	0,00	6,04E+08							0	170,26	0	27,03	0	197,29
$\Sigma$								0	1,34E+08	0	1,84E+09			5,90E+09												189,68

painopiste

Vääntökeskiön sijainti	X	13,69 m
	Y	7,84 m

	$\phi, deg$
$\phi_x$	0
$\phi_y$	-5,74E-06

Kok. vaakavoiman resultantin paikka	$x_0$	16,81 m
	$y_0$	9,12 m

Kok. vaakavoiman epakesk. vääntökeskiöstä	$e_x$	3,12 m
	$e_y$	1,28 m

6. krs katto	
tason korkeus, H	3,60 m

VAIHTOEHTO 1: mastoseinän pituus on 7 metriä. Tapaus T3 (ks. luku 7)

Osamasto	b, m	h, m	$I_x, m^4$	$I_y, m^4$	A, m <sup>2</sup>	$x_{0,i}, m$	$y_{0,i}, m$	$K_{x,i}, kN/m$	$K_{y,i}, kN/m$	$K_{x,i} \cdot y_{0,i}, kN$	$K_{y,i} \cdot x_{0,i}, kN$	$x_i, m$	$y_i, m$	$K_{x,i} \cdot y_i^2, kNm$	$K_{y,i} \cdot x_i^2, kNm$	Qw, kN	vx, m	vy, m	$K_T, kNm$	M, kNm	$\phi, rad$	$K_{x,i} \cdot vx, kN$	$K_{y,i} \cdot vy, kN$	$K_{y,i} \cdot x_i \cdot \phi, kN$	Qx,i, kN	Oy,i, kN	
X-suunta																											
Profiilimasto	0,22	0	10,61		5,92	9,29	7,84	2,32E+07	0	1,82E+08	0	-2,46	0	0	0	91,87	3,96E-06		0	117,23	0	91,87	0	0	91,87	0	
$\Sigma$								2,32E+07	0	1,82E+08	0			0	0										91,87		
Y-suunta																											
S1	0,22	7,0	0	6,29	1,54	33,33	4,30	0	1,37E+07	0	4,58E+08	21,57	-3,54	0	6,40E+09	189,68		1,41E-06	7,13E+09	-959,28		-1,35E-07	0	19,42	-39,92	0	-20,49
Profiilimasto	0,22	0	0	55,13	5,92	9,29	7,84	0	1,21E+08	0	1,12E+09	-2,46	0	0	7,30E+08							0	170,26	39,92	0	210,17	
$\Sigma$								0	1,34E+08	0	1,58E+09			0	7,13E+09											189,68	

vaäntökeskiö

Vaäntökeskiön sijainti	X	11,75 m
	Y	7,84 m

Kok. vaakavoiman resultantin paikka	$x_0$	16,81 m
	$y_0$	9,12 m

Kok. vaakavoiman epäkesk. vaäntökeskiöstä	ex	5,06 m
	ey	1,28 m

$\phi, deg$	0
$\phi_x$	0
$\phi_y$	-7,71E-06

6. krs katto	
tason korkeus, H	3,60 m

VAIHTOEHTO 1: mastoseinän pituus on 7 metriä. Tapaus T4 (ks. luku 7)

Osamasto	b, m	h, m	I <sub>x</sub> , m <sup>4</sup>	I <sub>y</sub> , m <sup>4</sup>	A, m <sup>2</sup>	x <sub>0,i</sub> , m	y <sub>0,i</sub> , m	K <sub>x,i</sub> , kN/m	K <sub>y,i</sub> , kN/m	K <sub>x,i</sub> *y <sub>0</sub> , kN	K <sub>y,i</sub> *x <sub>0</sub> , kN	X <sub>i</sub> , m	Y <sub>i</sub> , m	K <sub>y,i</sub> *X <sub>i</sub> <sup>2</sup> , kNm	Q <sub>w</sub> , kN	v <sub>x</sub> , m	v <sub>y</sub> , m	T <sub>xy</sub> , kNm	K <sub>T</sub> , kNm	M, kNm	φ, rad	K <sub>x,i</sub> *v <sub>x</sub> , kN	K <sub>y,i</sub> *v <sub>y</sub> , kN	K <sub>y,i</sub> *X <sub>i</sub> *φ	Q <sub>x,i</sub> , kN	Q <sub>y,i</sub> , kN	Osamastojen kuormitukset	
X-suunta																												
Profilimasto	0,22	0	10,61		5,92	9,29	7,84	2,32E+07	0	1,82E+08	0	-2,46	0	0	91,87	3,96E-06			2,84E+08	2,84E+08	117,2	4,13E-07	91,87	0	0	91,87	0	
Σ								2,32E+07	0	1,82E+08	0			0												91,87		
Y-suunta																												
S1	0,22	7,00	0	6,29	1,54	33,33	4,30	0	1,37E+07	0	4,58E+08	21,57	-3,54	6,40E+09	189,68		1,41E-06		2,84E+08	7,41E+09	-959,3	-1,29E-07	0	19,42	-38,39	0	-18,97	
Profilimasto	0,22	0	0	55,13	5,92	9,29	7,84	0	1,21E+08	0	1,12E+09	-2,46	0	7,30E+08									0	170,26	38,39	0	208,65	
Σ								0	1,34E+08	0	1,58E+09			7,13E+09													189,68	

vääntökeskiö

Vääntökeskiön sijainti	X	11,75 m
	Y	7,84 m

Kok.vaakavoiman resultantin paikka	x <sub>0</sub>	16,81 m
	y <sub>0</sub>	9,12 m

Kok.vaakavoiman epäkesk. vääntökeskiöstä	ex	5,06 m
	ey	1,28 m

	φ, deg
φ <sub>x</sub>	2,37E-05
φ <sub>y</sub>	-7,42E-06

L	mm	3600
E	MPa	34000
G	MPa	1,42E+04
I <sub>v</sub>	mm <sup>4</sup> × 10 <sup>10</sup>	9,7603
I <sub>ω</sub>	mm <sup>4</sup> × 10 <sup>20</sup>	1,295
k	1/mm	1,8E-05
kL	-	0,06

$$k = \sqrt{\frac{GI_v}{EI_\omega}}$$

$$T_{xy,\omega} = \frac{EI_\omega k^3}{kL - \tanh kL}$$

T <sub>xy</sub>	kNm	2,84E+08
M <sub>y</sub>	kNm	-36,7
M <sub>x</sub>	kNm	117,2

6. krs katto	
tason korkeus H	3,60 m

VAIHTOEHTO 2: mastoseinän pituus on 3 metriä. Tapaus T1 (ks. luku 7)

Osamasto	b, m	h, m	Ix,m <sup>4</sup>	Iy,m <sup>4</sup>	A, m <sup>2</sup>	x <sub>0,i</sub> ,m	y <sub>0,i</sub> ,m	K <sub>x,i</sub> , kN/m	K <sub>y,i</sub> , kN/m	K <sub>x,i</sub> *y <sub>0</sub> , kN	K <sub>y,i</sub> *x <sub>0</sub> , kN	Xi, m	Yi, m	Kx*y <sup>2</sup> , kNm	Ky*x <sup>2</sup> , kNm	Qw, kN	vx, m	vy, m	K <sub>T</sub> , kNm	M, kNm	φ, rad	K <sub>x,i</sub> *vx, kN	K <sub>y,i</sub> *vy, kN	K <sub>x,i</sub> *Yi*φ, kN	K <sub>y,i</sub> *Xi*φ, kN	Qx,i, kN	Oy,i, kN	Osamastojen kuormitukset
X-suunta																												
S3	0,22	4,43	1,594		0,97	11,34	12,06	3,48E+06	0	4,20E+07	0	-0,18	4,09	5,83E+07	0	91,87	1,00E-05		1,21E+08	105,9	8,78E-07	34,97	0	12,51	0	22,46	0	
S4	0,22	3,01	0,500		0,66	12,05	9,54	1,09E+06	0	1,04E+07	0	0,53	1,57	2,69E+06	0							10,97	0	1,51	0	9,46	0	
S5	0,22	3,01	0,500		0,66	12,05	6,15	1,09E+06	0	6,72E+06	0	0,53	-1,82	3,61E+06	0							10,97	0	-1,74	0	12,71	0	
S6	0,22	4,43	1,594		0,97	11,34	3,96	3,48E+06	0	1,38E+07	0	-0,18	-4,01	5,61E+07	0							34,97	0	-12,27	0	47,24	0	
Σ								9,16E+06	0	7,29E+07	0			1,21E+08	0												91,87	
Y-suunta																												
S1	0,22	3,00	0	0,50	0,66	33,33	2,30	0	1,08E+06	0	3,61E+07	21,81	-5,67	0	5,15E+08	189,68		8,12E-06	5,41E+08	-1005,1	-1,86E-06	0	8,79	0	-43,82	0	-35,04	
S2	0,22	8,21	0	10,13	1,81	10,43	7,84	0	2,21E+07	0	2,31E+08	-1,08	-0,12	0	2,58E+07							0	179,74	0	44,39	0	224,13	
S7	0,22	0,87	0	0,01	0,19	13,66	11,73	0	2,64E+04	0	3,61E+05	2,15	3,76	0	1,22E+05							0	0,21	0	-0,11	0	0,11	
S8	0,22	1,04	0	0,02	0,23	13,66	9,13	0	4,48E+04	0	6,12E+05	2,15	1,16	0	2,07E+05							0	0,36	0	-0,18	0	0,19	
S9	0,22	1,04	0	0,02	0,23	13,66	6,56	0	4,48E+04	0	6,12E+05	2,15	-1,41	0	2,07E+05	0	0,36	0	-0,18	0	0,19							
S10	0,22	0,87	0	0,01	0,19	13,66	3,96	0	2,64E+04	0	3,61E+05	2,15	-4,01	0	1,22E+05	0	0,21	0	-0,11	0	0,11							
Σ								0	2,34E+07	0	2,69E+08			0	5,41E+08												189,68	

Vaantokeskiön sijainti	X	11,51 m
	Y	7,97 m

Kok. vaakavoiman resultantin paikka	x <sub>0</sub>	16,81 m
	y <sub>0</sub>	9,12 m

Kok. vaakavoiman epakesk. vääntökeskiöstä	ex	5,30 m
	ey	1,15 m

	φ, deg
φx	5,03E-05
φy	-1,06E-04

6. krs katto
tason korkeus, H
3,60 m

VAIHTOEHTO 2: mastoseinän pituus on 3 metriä. Tapaus T2 (ks. luku 7)

Osamasto	b, m	h, m	lx, m <sup>4</sup>	ly, m <sup>4</sup>	A, m <sup>2</sup>	x <sub>0,i</sub> , m	y <sub>0,i</sub> , m	K <sub>x,i</sub> , kN/m	K <sub>y,i</sub> , kN/m	K <sub>x,i</sub> *y <sub>0</sub> , kN	K <sub>y,i</sub> *x <sub>0</sub> , kN	Xi, m	Yi, m	K <sub>x,i</sub> *Yi <sup>2</sup> , kNm	K <sub>y,i</sub> *Xi <sup>2</sup> , kNm	Q <sub>w</sub> , kN	vx, m	vy, m	K <sub>T</sub> , kNm	M, kNm	φ, rad	K <sub>x,i</sub> *vx, kN	K <sub>y,i</sub> *vy, kN	K <sub>x,i</sub> *Yi*φ, kN	K <sub>y,i</sub> *Xi*φ, kN	Q <sub>x,i</sub> , kN	Q <sub>y,i</sub> , kN	Osamastojen kuormitukset	
X-suunta																													
Profiilimasto	0,22	0	10,61		5,92	9,29	7,84	2,32E+07	0	1,82E+08	0	-2,36	0,00	0	0	91,87	3,96E-06		0	117,23	0	91,87	0	0	0	91,87	0		
Σ								2,32E+07	0	1,82E+08	0			0	0											91,87			
Y-suunta																													
S1	0,22	3,00	0	0,50	0,66	33,33	2,30	0	1,08E+06	0	3,61E+07	21,68	-5,54	0	5,08E+08	189,68		1,56E-06		5,13E+08	-979,01	-1,91E-06	0	1,69	0	-44,763	0	-43,07	
Profiilimasto	0,22	0,00	0	55,13	5,92	11,45	7,84	0	1,21E+08	0	1,38E+09	-0,19	0,00	0	4,57E+06							0	187,99	0	44,763	0	232,75		
Σ								0	1,22E+08	0	1,42E+09			0	5,13E+08												189,68		

painopiste

Vaantokeskiön sijainti	X	11,65 m
	Y	7,84 m

Kok. vaakavoiman resultantin paikka	x <sub>0</sub>	16,81 m
	y <sub>0</sub>	9,12 m

Kok. vaakavoiman epäkesk. vääntökeskiöstä	ex	5,16 m
	ey	1,28 m

φ, deg	
φ <sub>x</sub>	0
φ <sub>y</sub>	-1,09E-04

6. krs katto	
tason korkeus, H	3,60 m

VAIHTOEHTO 2: mastoseinän pituus on 3 metriä. Tapaus T3 (ks. luku 7)

Osamasto	b, m	h, m	I <sub>x</sub> , m <sup>4</sup>	I <sub>y</sub> , m <sup>4</sup>	A, m <sup>2</sup>	x <sub>0,i</sub> , m	y <sub>0,i</sub> , m	K <sub>x,i</sub> , kN/m	K <sub>y,i</sub> , kN/m	K <sub>x,i</sub> *y <sub>0</sub> , kN	K <sub>y,i</sub> *x <sub>0</sub> , kN	X <sub>i</sub> , m	Y <sub>i</sub> , m	K <sub>x,i</sub> *Y <sub>i</sub> <sup>2</sup> , kNm	K <sub>y,i</sub> *X <sub>i</sub> <sup>2</sup> , kNm	Qw, kN	vx, m	vy, m	K <sub>T</sub> , kNm	M, kNm	φ, rad	K <sub>x,i</sub> *vx, kN	K <sub>y,i</sub> *vy, kN	K <sub>x,i</sub> *Y <sub>i</sub> *φ, kN	K <sub>y,i</sub> *X <sub>i</sub> *φ, kN	Ox,i, kN	Oy,i, kN	Osamastojen kuormitukset
X-suunta																												
Profilimasto	0,22	0	10,61		5,92	9,29	7,84	2,32E+07	0	1,82E+08	0	-0,21	0,00	0	0	91,87	3,96E-06		0	117,23	0	91,87	0	0	0	91,87	0	
Σ								2,32E+07	0	1,82E+08	0			0	0											91,87	0	
Y-suunta																												
S1	0,22	3,00	0	0,50	0,66	33,33	2,30	0	1,08E+06	0	3,61E+07	23,82	-5,54	0	6,14E+08	189,68		1,56E-06	6,19E+08	-1385,45		-2,24E-06	0	1,69	0	-57,65	0	-55,96
Profilimasto	0,22	0	0	55,13	5,92	9,29	7,84	0	1,21E+08	0	1,12E+09	-0,21	0,00	0	5,51E+06							0	187,99	0	57,65	0	245,64	
Σ								0	1,22E+08	0	1,16E+09			0	6,19E+08												189,68	

vääntökeskiö

Vääntökeskiön sijainti	X	9,51 m
	Y	7,84 m

φ, deg	
φ <sub>x</sub>	0
φ <sub>y</sub>	-1,28E-04

Kok. vaakavoiman resultantin paikka	x <sub>0</sub>	16,81 m
	y <sub>0</sub>	9,12 m

Kok. vaakavoiman epäkesk. vääntökeskiöstä	e <sub>x</sub>	7,30 m
	e <sub>y</sub>	1,28 m

6. krs katto	
tason korkeus, H	3,60 m

VAIHTOEHTO 2: mastoseinän pituus on 3 metriä. Tapaus T4 (ks. luku 7)

Osamasto	b, m	h, m	I <sub>x</sub> , m <sup>4</sup>	I <sub>y</sub> , m <sup>4</sup>	A, m <sup>2</sup>	x <sub>0,i</sub> , m	y <sub>0,i</sub> , m	K <sub>x,i</sub> , kN/m	K <sub>y,i</sub> , kN/m	K <sub>x,i</sub> *y <sub>0</sub> , kN	K <sub>y,i</sub> *x <sub>0</sub> , kN	Xi, m	Yi, m	K <sub>x,i</sub> *Yi <sup>2</sup> , kNm	K <sub>y,i</sub> *Xi <sup>2</sup> , kNm	Qw, kN	vx, m	vy, m	Txy, kNm	K <sub>r</sub> , kNm	M, kNm	φ, rad	K <sub>x,i</sub> *vx, kN	K <sub>y,i</sub> *vy, kN	K <sub>x,i</sub> *Xi*φ, kN	Qx,i, kN	Oy,i, kN	Osamastojen kuormitukset	
X-suunta																													
Profillimasto	0,22	0	10,61		5,92	9,29	7,84	2,32E+07	0	1,82E+08	0	-0,21	0	0	0	91,87	3,96E-06		2,84E+08	2,84E+08	117,23	4,13E-07	91,87	0	0	91,87	0		
Σ								2,32E+07	0	1,82E+08	0			0	0											91,87			
Y-suunta																													
S1	0,22	3,00	0	0,50	0,66	33,33	2,30	0	1,08E+06	0	3,61E+07	23,82	-5,54	0	6,14E+08	189,68		1,56E-06	2,84E+08	9,03E+08	-1385,448	-1,53E-06	0	1,69	-39,55	0	-37,86		
Profillimasto	0,22	0,00	0	55,13	5,92	9,29	7,84	0	1,21E+08	0	1,12E+09	-0,21	0,00	0	5,51E+06									0	187,99	39,55	0	227,54	
Σ								0	1,22E+08	0	1,16E+09			0	6,19E+08													189,68	

vaäntökeskio

L	mm	3600
E	MPa	34000
G	MPa	1,42E+04
I <sub>v</sub>	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>10</sup>	9,76
I <sub>ω</sub>	mm <sup>6</sup> x 10 <sup>20</sup>	1,30
k	1/mm	1,77E-05
kL	-	0,06

$$k = \sqrt{\frac{GI_v}{EI_\omega}}$$

$$T_{xy,\omega} = \frac{EI_\omega k^3}{kL - \tanh kL}$$

Vaäntökeskion sijainti	X	9,51 m
	Y	7,84 m
Kok. vaakavoiman resultantin paikka	x <sub>0</sub>	16,81 m
	y <sub>0</sub>	9,12 m
Kok. vaakavoiman epäkesk. vaäntökeskiosta	ex	7,30 m
	ey	1,28 m

φ, deg	
φ <sub>x</sub>	2,37E-05
φ <sub>y</sub>	-8,79E-05

6. krs katto	
tason korkeus, H	3,60 m

VAIHTOEHTO 3: ei ole mastoseinää. Tapaus T1 (ks. luku 7)

Osamasto	b, m	h, m	$I_x, m^4$	$I_y, m^4$	A, m <sup>2</sup>	$x_{0,i}, m$	$y_{0,i}, m$	$K_{x,i}, kN/m$	$K_{y,i}, kN/m$	$K_{x,i} \cdot y_{0,i}, kN$	$K_{y,i} \cdot x_{0,i}, kN$	$X_i, m$	$Y_i, m$	$K_x \cdot y^2, kNm$	$K_y \cdot x^2, kNm$	$Q_w, kN$	$v_x, m$	$v_y, m$	$K_T, kNm$	M, kNm	$\phi, rad$	$K_{x,i} \cdot v_x, kN$	$K_{y,i} \cdot v_y, kN$	$K_{x,i} \cdot Y_i \cdot \phi, kN$	$K_{y,i} \cdot X_i \cdot \phi, kN$	$Q_{x,i}, kN$	$Q_{y,i}, kN$	Osamastojen kuormitukset
X-suunta																												
S3	0,22	4,43	1,59		0,97	11,34	12,06	3,48E+06	0	4,20E+07	0	0,88	4,09	5,83E+07	0	91,87	1,00E-05		1,21E+08	105,91	8,78E-07	34,97	0	12,51	0	22,46	0	
S4	0,22	3,01	0,50		0,66	12,05	9,54	1,09E+06	0	1,04E+07	0	1,59	1,57	2,69E+06	0							10,97	0	1,51	0	9,46	0	
S5	0,22	3,01	0,50		0,66	12,05	6,15	1,09E+06	0	6,72E+06	0	1,59	-1,82	3,61E+06	0							10,97	0	-1,74	0	12,71	0	
S6	0,22	4,43	1,59		0,97	11,34	3,96	3,48E+06	0	1,38E+07	0	0,88	-4,01	5,61E+07	0							34,97	0	-12,27	0	47,24	0	
$\Sigma$								9,16E+06	0	7,29E+07	0			1,21E+08	0													
Y-suunta																												
S1	0,22	0	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0,00	-10,45	-7,97	0	0	189,68		8,51E-06	1,48E+06	-1206,05	-8,17E-04	0	0	0	0	0	0	
S2	0,22	8,21	0	10,13	1,81	10,43	7,84	0	2,21E+07	0	2,31E+08	-0,02	-0,12	0	9,44E+03							0	188,47	0	373,39	0	561,86	
S7	0,22	0,87	0	0,01	0,19	13,66	11,73	0	2,64E+04	0	3,61E+05	3,21	3,76	0	2,72E+05							0	0	0,22	0	-69,19	0	-68,96
S8	0,22	1,04	0	0,02	0,23	13,66	9,13	0	4,48E+04	0	6,12E+05	3,21	1,16	0	4,62E+05							0	0	0,38	0	-117,51	0	-117,13
S9	0,22	1,04	0	0,02	0,23	13,66	6,56	0	4,48E+04	0	6,12E+05	3,21	-1,41	0	4,62E+05							0	0	0,38	0	-117,51	0	-117,13
S10	0,22	0,87	0	0,01	0,19	13,66	3,96	0	2,64E+04	0	3,61E+05	3,21	-4,01	0	2,72E+05							0	0	0,22	0	-69,19	0	-68,96
$\Sigma$								0	2,23E+07	0	2,33E+08			0	1,48E+06											189,68		

Vääntökeskiön sijainti	X	10,45 m
	Y	7,97 m

Kok. vaakavoiman resultantin paikka	$x_0$	16,81 m
	$y_0$	9,12 m

Kok. vaakavoiman epäkesk. vääntökeskiöstä	$e_x$	6,36 m
	$e_y$	1,15 m

$\phi, deg$	
$\phi_x$	5,03E-05
$\phi_y$	-4,68E-02



6. krs katto	
tason korkeus, H	3,60 m

VAIHTOEHTO 3: ei ole mastoseinää. Tapaus T3 (ks. luku 7)

																										Osamastojen kuormitukset	
Osamasto	b, m	h, m	$I_x, m^4$	$I_y, m^4$	A, m <sup>2</sup>	$x_{0j}, m$	$y_{0j}, m$	$K_{xj}, kN/m$	$K_{yj}, kN/m$	$K_{xj} \cdot y_0, kN$	$K_{yj} \cdot x_0, kN$	$X_i, m$	$Y_i, m$	$K_{xj} \cdot Y_i^2, kNm$	$K_{yj} \cdot X_i^2, kNm$	Qw, kN	vx, m	vy, m	$K_{Tj}$ , kNm	M, kNm	$\phi$ , rad	$K_{xj} \cdot vx, kN$	$K_{yj} \cdot vy, kN$	$K_{xj} \cdot Y_i \cdot \phi, kN$	$K_{yj} \cdot X_i \cdot \phi, kN$	Ox,i, kN	Oy,i, kN
X-suunta																											
Profiillimasto	0,22	0	10,61		5,92	9,29	7,84	2,32E+07	0	1,82E+08	0	0,00	0,00	0	0	91,87	3,96E-06		0	117,23	0	91,87	0	0	0	91,87	0
$\Sigma$								2,32E+07	0	1,82E+08	0			0	0											91,87	
Y-suunta																											
S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0	0,00	-9,29	-7,84	0	0	189,68		1,57E-06	0	-1426,01	0	0	0	0	0	0	0
Profiillimasto	0,22	0	0	55,13	5,92	9,29	7,84	0	1,21E+08	0	1,12E+09	0,00	0,00	0	0							0	189,68	0	0	0	189,68
$\Sigma$								0	1,21E+08	0	1,12E+09			0	0												189,68

vääntokeskiö

Vääntokeskion sijainti	X	9,29 m
	Y	7,84 m

$\phi$ , deg	
$\phi_x$	0
$\phi_y$	0

Kok.vaakavoiman resultantin paikka	$x_0^*$	16,81 m
	$y_0^*$	9,12 m

Kok.vaakavoiman epäkesk. vääntokeskiöstä	$e_x$	7,52 m
	$e_y$	1,28 m

6. krs katto	
tason korkeus, H	3,60 m

VAIHTOEHTO 3: ei ole mastoseinää. Tapaus T4 (ks. luku 7)

Osamasto	b, m	h, m	Ix, m <sup>4</sup>	Iy, m <sup>4</sup>	A, m <sup>2</sup>	x <sub>0,i</sub> , m	y <sub>0,i</sub> , m	K <sub>x,i</sub> , kN/m	K <sub>y,i</sub> , kN/m	K <sub>x,i</sub> *y <sub>0</sub> , kN	K <sub>y,i</sub> *x <sub>0</sub> , kN	Xi, m	Yi, m	Qw, kN	vx, m	vy, m	Txy, kNm	K <sub>T</sub> , kNm	M, kNm	φ, rad	K <sub>x,i</sub> *vx, kN	K <sub>y,i</sub> *vy, kN	K <sub>x,i</sub> *Yi*φ, kN	K <sub>y,i</sub> *Xi*φ, kN	Ox,i, kN	Oy,i, kN	Osamastojen kuormitukset
X-suunta																											
Profiilimasto	0,22	0	10,61		5,92	9,29	7,84	2,32E+07	0	1,82E+08	0	0	0	91,87	3,96E-06		2,84E+08	2,84E+08	117,23	4,13E-07	91,87	0	0	0	91,87	0	
Σ								2,32E+07	0	1,82E+08	0														91,87		
Y-suunta																											
S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0	0	-9,29	-7,84	189,68		1,57E-06	2,84E+08	2,84E+08	-1426,014	-5,03E-06	0	0	0	0	0	0	
Profiilimasto	0,22	0	0	55,13	5,92	9,29	7,84	0	1,21E+08	0	1,12E+09	0	0								0	189,68	0	0	0	189,68	
Σ								0	1,21E+08	0	1,12E+09															189,68	

vaäntökeskiö

L	mm	3600
E	MPa	34000
G	MPa	1,42E+04
Iv	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>10</sup>	9,7603
Iω	mm <sup>4</sup> x 10 <sup>20</sup>	1,295
k	1/mm	1,77E-05
kL	-	0,06

$$k = \sqrt{\frac{GI_v}{EI_\omega}}$$

$$T_{xy,\omega} = \frac{EI_\omega k^3}{kL - \tanh kL}$$

Vääntökeskiön sijainti tuuli X-suuntaan	X	9,29 m
	Y	7,84 m

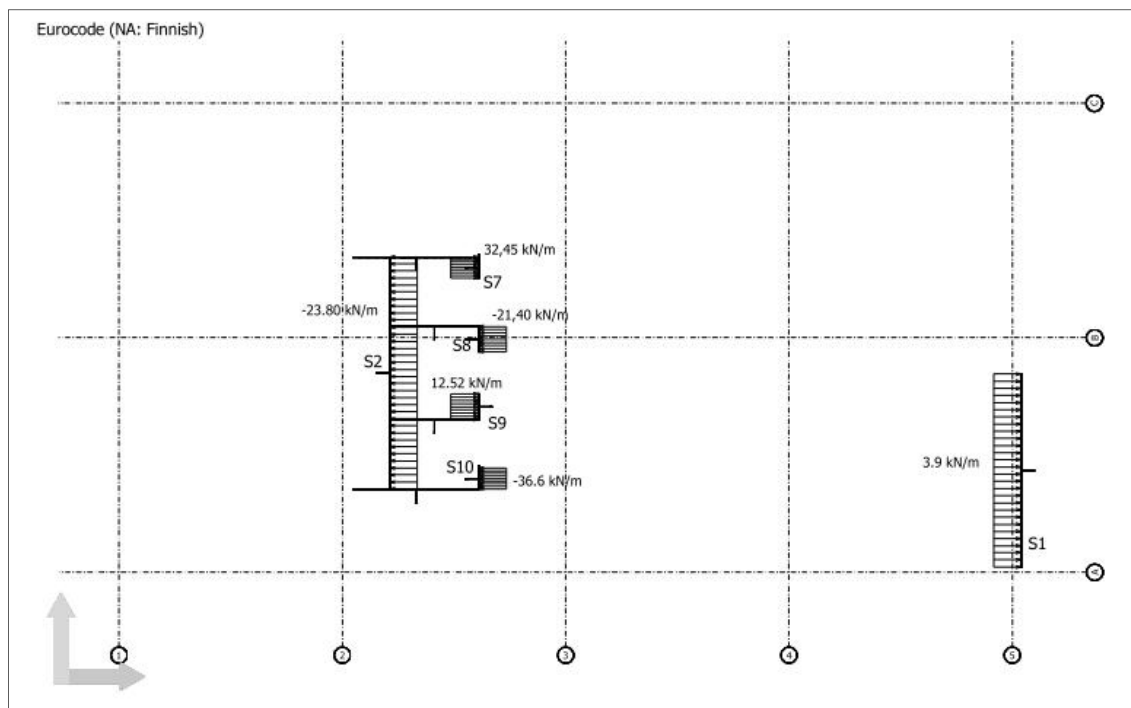
Kok. vaakavoiman resultantin paikka	x <sub>0</sub>	16,81 m
	y <sub>0</sub>	9,12 m

Kok. vaakavoiman epakesk. vääntökeskiöistä	ex	7,52 m
	ey	1,28 m

	φ, deg
φx	2,37E-05
φy	-2,88E-04

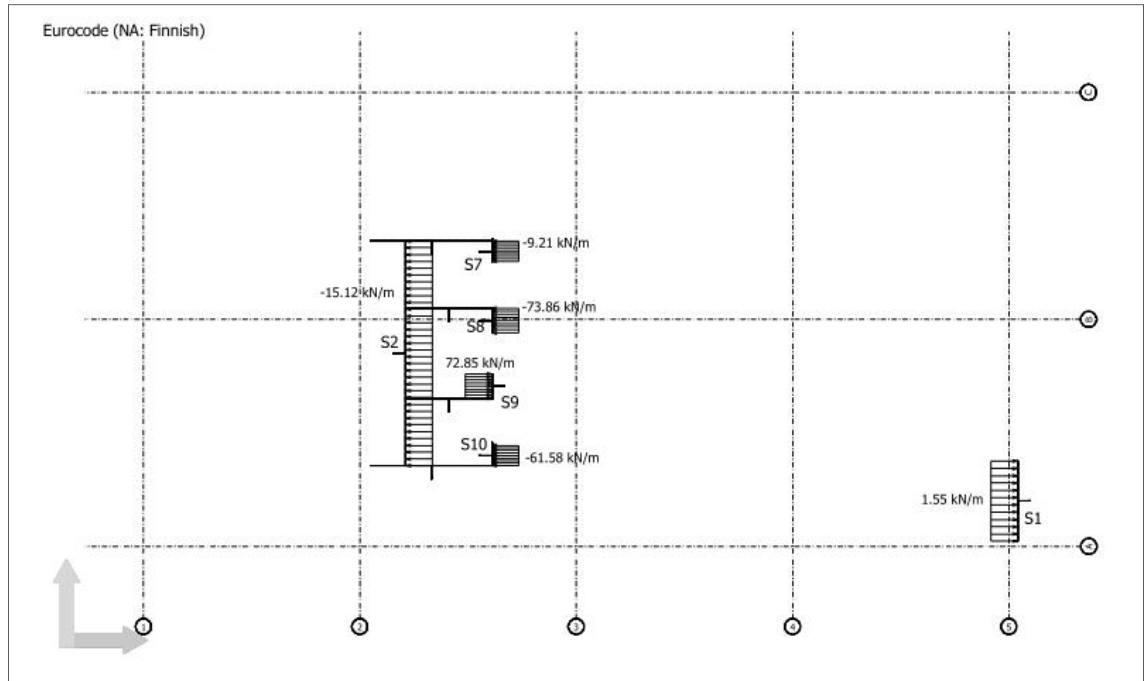
## Numeerisen analyysin tulokset

TUTKIMUSVAIHTOEHTO 1: mastoseinän pituus on 7 metriä.



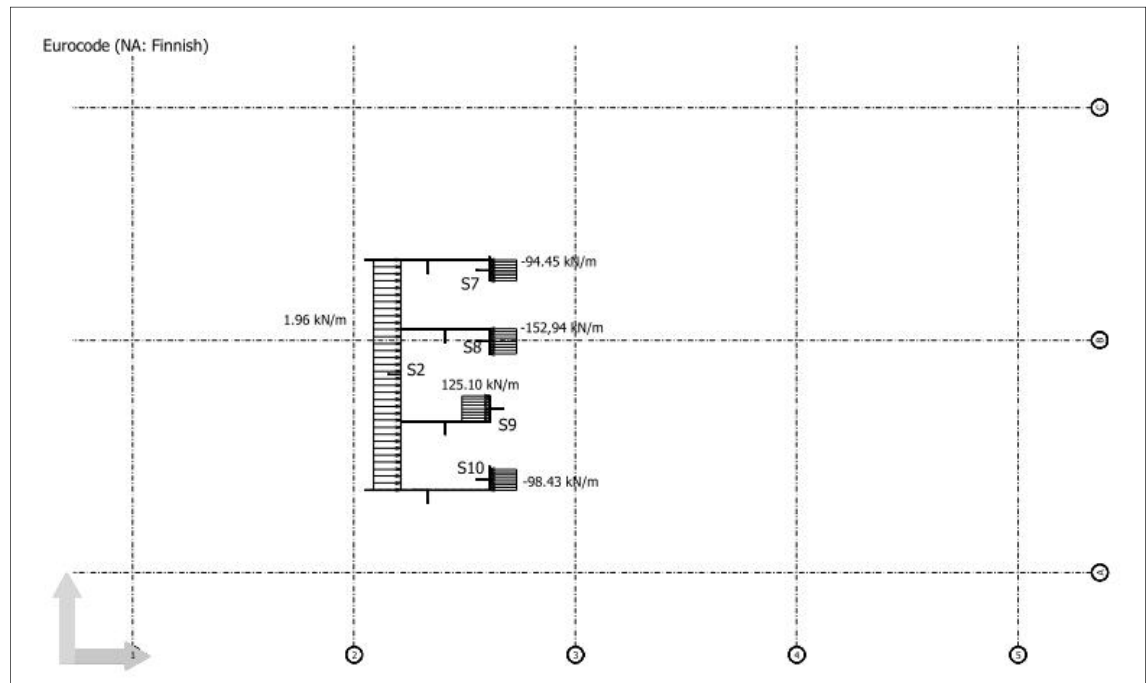
Osamasto		seinän pituus, m	$q_{y,i}$ , kN/m	$Q_{y,i}$ , kN	$Q_y$ , kN
mastoseinä	S1	7,00	3,90	27,30	-180,81
profiilimasto	S2	8,205	-23,80	-195,28	
	S7	0,87	32,45	28,23	
	S8	1,038	-21,40	-22,21	
	S9	1,038	12,52	13,00	
	S10	0,87	-36,60	-31,84	
	yhtenäinen rakenne				

TUTKIMUSVAIHTOEHTO 2: mastoseinän pituus on 3 metriä.



Osamasto		seinän pituus, m	$q_{y,i}$ , kN/m	$Q_{y,i}$ , kN	$Q_y$ , kN
mastoseinä	S1	3,00	1,55	4,65	-182,05
profiilimasto	S2	8,205	-15,12	-124,06	
	S7	0,87	-9,21	-8,01	
	S8	1,038	-73,86	-76,67	
	S9	1,038	72,85	75,62	
	S10	0,87	-61,58	-53,57	
yhtenäinen rakenne				-186,70	

TUTKIMUSVAIHTOEHTO 3: ei ole mastoseinää.



Osamasto		seinän pituus, m	$q_{y,i}$ , kN/m	$Q_{y,i}$ , kN
profiilimasto	S2	8,205	1,96	16,08
	S7	0,87	-94,45	-82,17
	S8	1,038	-152,94	-158,75
	S9	1,038	125,10	129,85
	S10	0,87	-98,43	-85,63
	yhtenäinen rakenne			