

**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - YLEMPI AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# BETONIKERROSTALON JÄYKISTYKSEN VOIMASUUREET

TEKIJÄ Jukka Laitinen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä Jukka Laitinen			
Työn nimi Betonikerrostalon jäykistyksen voimasuureet			
Päiväys	18.4.2024	Sivumäärä/Liitteet	58/18
Toimeksiantaja Sweco Finland Oy			
Tiivistelmä			
<p>Opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä betonikerrostalon jäykistyksen peruspiirteisiin, koota yhteen näitä havainnollistava teoriaosuus ja sen pohjalta luoda Excel-laskentapohja näiden ilmiöiden tarkastelun tueksi. Laskentapohja kehitettiin tukemaan betonikerrostalon esisuunnittelua ja toimimaan vertailulaskelmana FEM-laskentamalleille.</p> <p>Työn toteutusta ja laskentapohjan kehitystä ohjasi toimeksiantajan puolesta opinnäytetyöryhmä. Teoriaosuus kokosi yhteen tarvittavat tiedot jäykistyslaskennan perusteista, lainsäädännöstä ja alan normeista. Laskentapohjan vertailulaskennassa hyödynnettiin tilaajan toteutunutta kerrostalokohdetta ja sen toteutusvaiheessa käytettyä laskentamallia.</p> <p>Työn lopputuotteena syntyi tavoitteiden mukaisesti oppimateriaali ja toimeksiantajan käyttöön kehitetty Excel-laskentapohja. Kiinnostavana havaintona vertailulaskennassa huomattiin, että Excel- ja FEM-laskennan tuloksissa oli merkittävä ero erityisesti kaatavan momentin suhteen. FEM-malleissa välipohja toimii osaltaan jäykistävänä rakenteena jäykistävien seinien välissä, kun taas Lineaarissa käsinlaskennassa välipohjien vaikutusta ei huomioida. Molempien laskentamenetelmien tulokset vastasivat muilta osin melko tarkasti toisiaan ja mahdollisille eroille löydettiin selittäviä tekijöitä, joita voisi edelleen tutkia ja siten jatkokehittää laskentapohjaa. Laskentamallin rajoitteita ja realiteetteja on pohdittu syvemmin työn lopussa. Toimeksiantaja voi hyödyntää opinnäytetyön tuotoksia, kun uusia kohteita suunnitellaan. Excel-laskentapohjalla voidaan mahdollisesti välttää työläämpien laskentamallien tekeminen yksinkertaisissa rakennuskohteissa.</p>			
Avainsanat betonikerrostalo, jäykistyksen voimasuureet, betonikerrostalon jäykistäminen			

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Master's Degree Programme In Civil Engineering	
Author Jukka Laitinen	
Title of Thesis Stiffening Calculations and Analysis in Concrete Apartment Buildings	
Date 18 April 2024	Pages/Appendices 58/18
Client Organisation Sweco Finland Oy	
<b>Abstract</b> <p>The goal of the thesis was to understand the basic principles of stiffening in concrete apartment buildings, to put together a theory section explaining these ideas, and then create an Excel tool to help analyze them. The purpose of the tool was to assist in the initial design stages of concrete apartment buildings and to compare results with the FEM method (Finite Element Method).</p> <p>The thesis group, working on behalf of the client, oversaw the project and the development of the Excel tool. The theory section gathered all the necessary information about stiffening calculations, relevant laws, and industry standards. To test the Excel tool, the data received from an actual apartment building project was compared with the calculation model used during the project's construction phase. At the end of the project, also the limitations and practical considerations of the calculation model were discussed.</p> <p>As a result, the objectives were met, and the client received educational material and an Excel tool tailored for their purposes. In addition, it was found out that there was a significant difference in the results between the Excel and FEM calculations, particularly regarding the overturning moment. Unlike in the manual calculations, the FEM models regarded the intermediate floor as a stiffening structure contributing to the building's stability between the stiffening walls. Despite this difference, the overall results from both methods were quite similar, with explanations found for any disparities, offering potential areas for further improvement of the Excel tool.</p> <p>The findings from this thesis can be valuable for the client when planning their future projects. Moreover, the Excel tool could potentially simplify the process of creating calculation models for straightforward building projects, thus saving time and effort.</p>	
<b>Keywords</b> Concrete apartment buildings, stiffening	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	5
2	BETONIKERROSTALON JÄYKISTYSSUUNNITTELUN PERUSTEET .....	6
2.1	Betonikerrostalon kantavat ja jäykistävät rakenteet .....	7
2.2	Suunnittelu, toteutusjärjestelmä ja laskentamenetelmät .....	9
2.3	Kuormitukset .....	9
2.4	Materiaaliominaisuudet .....	11
2.5	Suunnittelutehtävien vaativuus, työnjako ja suunnitelmien laadunvarmistus .....	12
3	BETONIRUNGON TOIMINTA KUORMIEN JAKAUTUMINEN .....	13
3.1	Rungon jäykistysosien toiminta ja voimasuureet .....	13
3.2	Jäykistävän seinän jäykkyyden määrittäminen .....	16
3.3	Rasituksen jakautuminen jäykistäville rakenneosille symmetrisellä jakaumalla .....	20
3.4	Rasituksen jakautuminen jäykistäville rakenneosille epäsymmetrisellä jakaumalla .....	22
3.5	Vaakavoimien osuuden jäykistäville seinälinjoille .....	28
3.6	Seinän jäykkyyden heikennystekijät .....	29
3.7	Seinän jäykkyyttä lisäävät tekijät .....	30
4	SEINÄN RASITUKSET .....	32
4.1	Seinän rasitukset ja epäkeskisyyden rajoittaminen .....	32
4.2	Vedetyn seinän voimasuureet .....	36
4.3	Seinälinjan rasitus normaalivoimalle .....	39
4.4	Seinälinjan rasitus leikkausvoimalle .....	39
4.5	Seinälinjan pystysaumojen rasitukset .....	41
4.6	Seinälinjan vaakasaumojen rasitukset .....	42
5	BETONIKERROSTALON VOIMASUUREIDEN LASKEMINEN .....	44
5.1	Laskentakohteen lähtötiedot ja kuormitukset .....	44
5.2	Jäykistysvoimasuureet .....	47
5.3	Seinälinjan voimasuureet .....	49
6	POHDINTA .....	55
	LÄHTEET .....	57
	LIITE 1: $\kappa$ -KERROIN .....	59
	LIITE 2: LASKELMAT .....	65

## 1 JOHDANTO

FEM-laskentamallien käyttö on yleistynyt rakennesuunnittelussa viimeisen vuosikymmenen aikana. Suunnittelua on tehostettu lisäksi parametrisella suunnittelulla, mikä tehostaa laskentamallien tekemistä entisestään. Uudet rakennesuunnittelijat käyttävät opintojensa aikana FEM-ohjelmia ja oppivat siten nykyaikaisten suunnittelumenetelmien perusteita. Pitkälle kehitetyt ohjelmat sisältävät kuitenkin ominaisuuksia, joita rakennesuunnittelijat eivät osaa hyödyntää tai niiden toimintamekanismeja ei ymmärretä. Laskentamalleissa on helppo tehdä virheitä ilman, että niihin osaa kiinnittää huomiota. Siksi laskelmat pitäisi pystyä tarkastamaan myös vaihtoehtoisin laskentamenetelmin. Kokee neet suunnittelijat ovat tottuneet tekemään suuruusluokkatarkastelua paperin ja laskimen tai Excelin avulla, mutta nuoret rakennesuunnittelijat ohjautuvat helposti hyödyntämään vain laskentaohjelmia eivätkä kehitä käsinlaskentataitoa.

Käsinlaskenta on aina likimääräistä suuruusluokkatarkastelua, jonka rajoitteet täytyy ymmärtää. Seinien voimasuureiden määrittäminen käsinlaskennalla on lisäksi työläs prosessi. Vertailulaskelman tekeminen FEM-laskennan kanssa on aikaa vievää ja usein tulokset eivät kohtaa. Käsinlaskennassa on haastavaa huomioda todellisia tilanteita, kuten aukkojen vaikutusta seinän jäykkyyteen, risteävien seinien vaikutusta tai välipohjalaatan vaikutusta kokonaisjäykkyyteen. Tämän opinnäytetyön tavoite on kehittää oppimateriaalia, joka auttaa rakennesuunnittelijaa ymmärtämään betonirunkoisen kerrostalon jäykistykseen liittyviä ilmiöitä. Lisäksi tavoitteena on kehittää laskentapohja, jonka avulla voidaan tarkastaa FEM-laskelmien tuloksia sekä tehdä esisuunnittelua betonikerrostalolle ennen mahdollista FEM-mallin tekemistä. Työn tilaaja Sweco Finland Oy:ssä suunnitellaan jatkuvasti uusia kerrostalokohteita ympäri Suomen.

Tämän opinnäytetyön kirjallisen osuuden rakenne on muotoiltu opetusmateriaaliksi, joka esittelee jäykistysuunnittelussa huomioitavat olennaiset ilmiöt. Betonirungon jäykistykseen periaatteet esitellään teoriatasolla, yksinkertaisin esimerkein sekä todellisen rakennuskohteen kautta. Työssä ei keskitytä kuormien määrittämiseen, koska kuormien määrityksen oletetaan olevan tuttua jäykistysuunnittelijalle.

## 2 BETONIKERROSTALON JÄYKISTYSSUUNNITTELUN PERUSTEET

Maankäyttö- ja rakennuslain mukaan rakennus suunnitellaan lujaksi ja vakaaksi. Rakennuksen on kyettävä kestämaan siihen kohdistuvan kuormituksen. Rakennus ei saa sortua eikä siihen saa syntyä haittaavia muodonmuutoksia. Rakenteiden suunnittelussa tulee käyttää eurokoodia ja sen kansallisia valintoja, jolloin rakenteita koskevat olennaiset tekniset vaatimukset täyttyvät. (Ympäristöministeriö 2024.)

Rakenteiden lujuutta ja vakautta koskevissa rakennesuunnitelmissa tulee jäykistykseen liittyen esittää (Ympäristöministeriön asetus kantavista rakenteista 477/2014):

- jäykistysjärjestelmän rakenteellista toimintaa ja jäykistämistä kuvaavat rakennemallit,
- seuraamusten vakavuuden, toteutusta koskevat vaatimukset tai toteutusluokan, ympäristöolosuhdeluokan sekä toleranssiluokan,
- kuormat ja kuormien yhdistelyt,
- voimasuureet,
- murtorajatilan ja käyttörajatilatarkastelut (myös onnettomuustarkastelun),
- toteutuksen aikaisen ja valmiin rakenteen jäykistys.

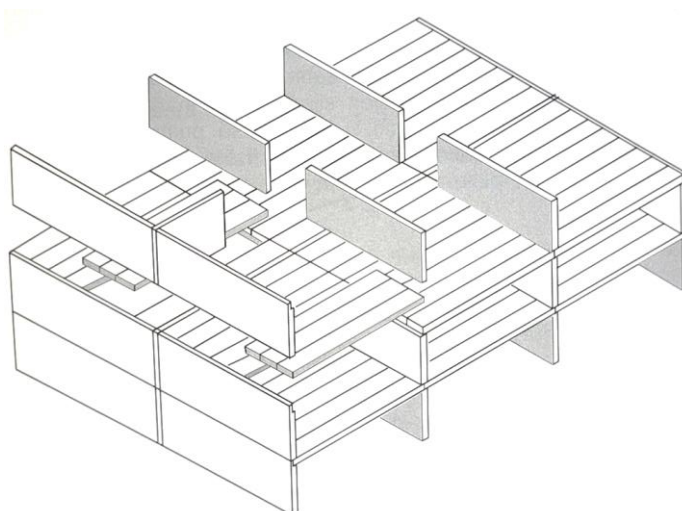
Rakenteiden suunnittelussa ja toteutuksessa useimpien kaupunkien rakennusvalvonta noudattaa Topten-käytäntöjä, mikä edistää hyvää rakennustapaa, sujuvoittaa ja yhtenäistää rakentamistapoja sekä ennaltaehkäisee virheiden syntymistä. Topten-käytäntöjen mukaan rakennesuunnittelija laatii kohteesta rakenteiden suunnittelun ja toteutuksen perusteet -asiakirjan. Betonirakenteisen kerrostalon jäykistykseen toteutukseen liittyvät asiat esitetään rakenteiden suunnittelun ja toteutuksen perusteet -asiakirjassa ja ne on lueteltu alla. (Topten 2023.)

- Kantavat ja jäykistävät rakenteet, rakennejärjestelmän kuvaus:
  - o pystyrakenteet (pilari, seinä), vaakarakenteet (palkisto, ristikot, laatat jne.),
  - o jäykistävät rakenteet,
  - o vaurionsietokykyä varmistavat rakenteet onnettomuustilanteessa,
  - o liikuntasaumot,
  - o rakenteiden käyttöikä.
- Suunnittelu ja toteutusjärjestelmä:
  - o käytetty suunnittelujärjestelmä,
  - o toteutusjärjestelmät,
  - o ohjeisto.
- Laskentamenetelmät:
  - o stabiliteetti,
  - o onnettomuustilanteet toimintaperiaatteet,
  - o rakenneosien mitoitus.
- Kuormitukset:
  - o pysyvät kuormat,
  - o muuttuvat kuormat,
  - o tuulikuormat,

- lumikuormat,
- törmäys ja onnettomuuskuormat.
- Materiaaliominaisuudet:
  - toteutusluokka,
  - toleranssiluokka,
  - rasitusluokat,
  - teräslaadut.
- Suunnittelutehtävien vaativuus, työnjako ja suunnitelmien laadunvarmistus:
  - suunnitteluorganisaatioiden välinen työnjako,
  - vastaavan rakennesuunnittelijan vastuulliset suunnittelutehtävät,
  - rakennesuunnittelun vaativuus (kantavat ja jäykistävät betonirakenteet; elementtisuunnittelu),
  - suunnitelmien laadunvarmistuksen perusteet (rakennesuunnitelmien tarkastussuunnitelma, kantavien rakenteiden suunnitelmien laadunvarmistuksen suorittajat, seuraamusten vakavuuden vaikutus, tarkastajien kelpoisuusvaatimukset täytyttävä),
  - tarkastusperiaatteet.

## 2.1 Betonikerrostalon kantavat ja jäykistävät rakenteet

Tyypillisen betonikerrostalon jäykistysjärjestelmä koostuu kantavista betoniseinistä ja ontelolaatasta. Jäykistävät seinälinjat vievät kuormat perustuksille ja kerroskohtaiset laatastot jakavat vaakakuormat tasossa jäykistäville seinälinjoille. Variaatioita erilaisille runkoratkaisuille on useita. Asuinkerrostalon rungot voivat olla hyvin jäykistettyjä toiseen suuntaan, mutta toisessa suunnassa ei ole välttämättä välipohjilta tulevaa omapainoa ja jäykistäviä seiniä on vähän. (Elementtisuunnittelu 2024a). Kuva 1 havainnollistaa tyypillistä jäykistysjärjestelmää.



KUVA 1. Runkotyypinä levyjärjestelmä (Leskelä 2008, 521)

Kantavat väliseinät (yleensä 200 mm) ovat usein raudoittamattomia, kun kerrokset toistavat itseään (Elementtisuunnittelu 2024a). Alimmat kerrokset raudoitetaan, kun seinälinjoilla esiintyy aukkojen takia vaihtelua tai normaalivoimamitoitus vaatii raudoitusta. Ulkoseinien raudoitusperiaate on usein

monimuotoisempi riippuen aukotuksen säännöllisyydestä. Raudoitustarve voi esiintyä myös, jos seinän leikkausjännitykset muodostuvat liian suuriksi (EN1992-1-1: Betonirakenteiden suunnittelu 2015, 189).

Talotekniikan ratkaisut vaikuttavat rakennuksen jäykistykseen. Jos seinien tilalla käytetään talotekniikkaelementtejä, on näitä kohtia seinissä käsiteltävä aukkoina. Aukko muodostuu jäykistävälle seinälinjalle sekä välipohjaan. Pakkovoimia hallitaan liikuntasaumoilla, jotka jakavat pitkät rakennukset eri jäykistyslohkoiksi. Liikuntasaumien on huomioitava tuulen imun ja paineen määrityksissä sekä seinälinjojen mahdollisena epäjatkuvuutena. Rakenteiden käyttöikä vaikuttaa mahdollisesti kuormituksen suuruuteen sekä betonipeitteen paksuuteen. (Elementtisuunnittelu 2024a.)

Rakennukselle tulee varmistaa riittävä vaurionsietokyky onnettomuustilanteissa. Vaakavoimia vastaan mitoitettu rakennus ei ole riittävä täyttämään lain vaatimuksia jatkuvan sortuman osalta. Tätä varten on kehitetty sidejärjestelmä: välipohjarakenteet tulee sitoa pystyrakenteisiin sekä pystyrakenteet tulee sitoa toisiinsa pystysiteillä, kun kerroksia on yli 4. (Elementtisuunnittelu 2024a.)

Rungon riittävää jäykkyyttä voidaan arvioida jo alkuvaiheessa likimääräisellä kaavalla 1, jossa vaakakuormista aiheutuvaa rasitusta verrataan rungon taivutusjäykkyyteen (Elementtisuunnittelu 2010, 6). Kaavan 1 termejä on selkeytetty lähteeseen verrattuna ja ne on esitetty kuvassa 2.

$$\Sigma EI \leq \frac{q * b * h_1^3}{8} + \frac{P * h_2^2}{3} \quad (1)$$

missä

$\Sigma EI$  = Tarkasteltavan suunnan taivutusjäykkyyksien summa (Nmm<sup>2</sup>)

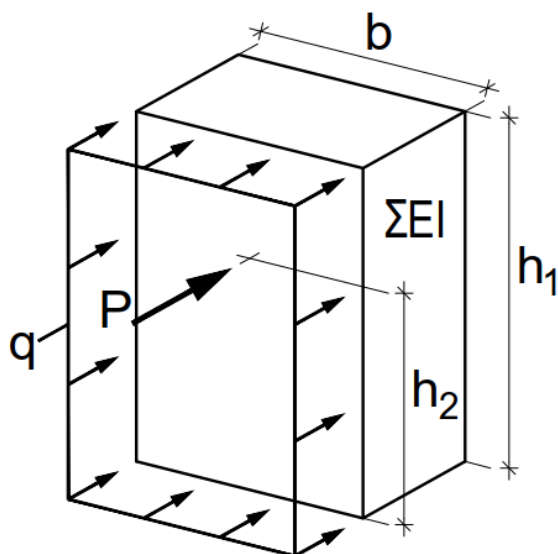
$q$  = vaakakuorma käyttörajatilassa sisältäen tuulen ja lisäepäkeskisyydet (N/mm<sup>2</sup>)

$b$  = rakennuksen leveys (mm)

$h_1$  = rakennuksen korkeus (mm)

$P$  = vaakasuuntainen pistekuorma käyttörajatilassa (N)

$h_2$  = pistekuorman korkeus (mm)



KUVA 2. Jäykistykseen riittävyyden arviointiin liittyvät termit (Laitinen 2024, muokattu alkuperäislähteestä Elementtisuunnittelu 2010, 6)



## 2.2 Suunnittelu, toteutusjärjestelmä ja laskentamenetelmät

Kantavat ja jäykistävät betonirakenteet tulee suunnitella eurokoodien SFS-EN 1990, SFS EN 1991 ja SFS-EN 1992 mukaan. Näitä täydentää kunkin standardin Suomen kansalliset liitteet ja tuotestandardit. (Elementtisuunnittelu 2024b.) Rakenteiden voimasuureiden laskenta ja mitoitus voidaan tehdä käsinlaskennalla (myös Excel-laskentapohjat) tai tarkoitukseen kehitettyjen FEM-ohjelmistojen avulla.

Rakennuksen mitoituksessa tulee huomioida yksittäisten rakenneosien mitoituksen lisäksi rakennuksen kokonaisvakavuus (stabiliteetti) sekä siirtymät. Korkeilla rakennuksilla tarkastellaan lisäksi rakennuksen ominaistaajuus. Vaakavoimien siirtäminen hallitusti rakennuksen runkoa pitkin perustuksille ja edelleen maaperään täytyy osoittaa laskelmin (Elementtisuunnittelu 2024a). Jäykistävät seinät tulee liittää perustuksiin voimaliitoksin mahdollisissa vetotilanteissa. Vetotilanteissa täytyy osoittaa vastapainon riittävyys vetoa (kaatumista) vastaan.

## 2.3 Kuormitukset

Rakennuksen jäykistystä suunniteltaessa on huomioitava kaikki siihen kohdistuvat kuormat. Pystysuuntaisia (jäykistäviä) kuormia ovat rakennusosien massa, maan massa, lumikuormat, henkilö- ja tavarakuormat. Vaakasuuntaisia (kaatavia) kuormia ovat tuulikuorma, lisävaakavoimat (rakenteen kaltevuus, epäkeskisyydet ja vinous), mahdollinen toisen kertaluvun momentti, maanpaine kuormat sekä liikennöityjen alueiden lähellä törmäyskuormat (onnettomuustilanteet). (Elementtisuunnittelu 2010, 9.) Rakennuksen stabiliteettia parantavia muuttuvia kuormia (hyötykuormat ja lumi) ei hyödynnetä staattista tasapainoa laskettaessa (Elementtisuunnittelu.fi 2024a). Kuormitukset määritetään SFS-EN 1991-1 (2002) mukaan. Kuormituksiin vaikuttaa rakennuksen seuraamusluokka (CC) ja siitä määräytyvä luotettavuusluokka (RC), jonka perusteella kuormakerroin  $K_{FI}$  määritetään (EN1990: Rakenteiden suunnittelun perusteet 2006, 136–138). Määritetyt kuormat toimivat lähtötietoina jäykistykseen ja rakenneosien mitoitukseen.

Eurokoodin mukaan rakenteeseen kohdistuu lisävaakavoimia, jotka aiheutuvat rakenneosien mittaepätarkkuudesta, vinoudesta ja asennustoleransseista. Mittaepätarkkuudet aiheuttavat rakenteeseen vaakavoiman, jonka suuruus on omapaino jaettuna arvolla 200...400 riippuen rakennuksen ominaisuuksista. Lisävaakavoimaan vaikuttaa jäykistysjärjestelmässä jäykistävien osien lukumäärä, sekä rakennuksen korkeus (EN1992: Betonirakenteiden suunnittelu 2015, 54–56).

Toisen kertaluvun vaikutukset tulee myös huomioida erityisen korkeissa rakennuksissa, jossa jäykistävät seinät ovat mittasuhteiltaan hoikkia. Toisen kertaluvun vaikutukset on otettava huomioon, jos ne ovat yli 10 %. Toisen kertaluvun vaikutuksen huomioimiseen on kaksi lähestymistapaa. Menetelmää 1 käytetään silloin, kun seinät ovat jäykistysjärjestelmässä pääosin ehjiä. Jos jäykistysjärjestelmän seinissä on useita aukkoja ja leikkausmuodonmuutokset ovat siten merkittäviä, käytetään menetelmää 2. (EN1992-1-1: Betonirakenteiden suunnittelu 2015, 64–67.)

Betonirakennuksilla, joissa jäykistävät seinät ovat pääsääntöisesti ehjiä, voidaan soveltaa tietyin rajoituksin kaavan 2 mukaista tarkastusta ja ehdon toteutuessa ei toisen kertaluvun vaikutuksia tarvitse huomioida. (EN1992-1-1: Betonirakenteiden suunnittelu 2015, 66).

$$F_{V,Ed} \leq k_1 * \frac{n_s}{n_s * 1,6} * \frac{\sum E_{cd} * I_c}{L^2} \quad (2)$$

missä

$F_{V,Ed}$  = Jäykistäviin osiin vaikuttava pystysuuntainen kokonaiskuorma (N)

$k_1$  = 0,31 yleinen kerroin (ei muutettu kansallisessa liitteessä) (-)

$k_2$  = 0,62 korvataan kerroin  $k_1$ , jos osoitetaan, että betoni ei halkeile (-)

$n_s$  = kerrosten lukumäärä (-)

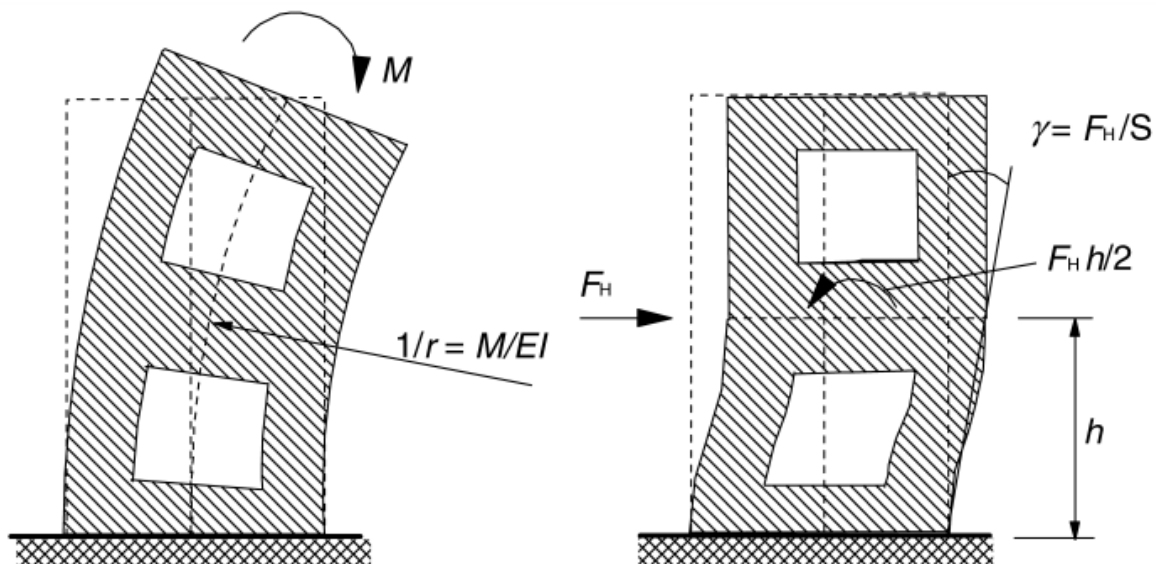
$E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}}$  betonin kimmokerroin, jossa  $\gamma_{CE} = 1,2$

$I_c$  = jäykistävien osien jäyhyysmomentti (halkeilematon (mm<sup>4</sup>))

$L$  = rakennuksen kokonaiskorkeus (mm)

Kaava 2 soveltuu käytettäväksi, kun vääntöön liittyvä epästabiilius ei tule määrääväksi tekijäksi, leikkausmuodonmuutokset ovat merkityksettömiä (jäykistysjärjestelmän seinissä ei ole pääasiassa merkittäviä aukkoja), kiertymät ovat merkityksettömiä, jäykistysosat ovat pääsääntöisesti jäykkyydeltään koko korkeudeltaan yhtä jykkiä ja pystykuorma kasvaa lineaarisesti kerroksittain. (EN1992-1-1: Betonirakenteiden suunnittelu 2015, 66).

Rakennuksissa, joissa jäykistysseinissä on merkittävästi aukkoja ja leikkausmuodonmuutokset ovat merkittäviä, on ehdon toteutuminen arvioitava toisella menetelmällä kaavan 3 avulla. Mikäli ehto toteutuu, toista kertalukua ei tarvitse huomioida. Kuvassa 3 on havainnollistettu määrääväksi tullutta leikkausmuodonmuutoksen tapausta, kun se tulee määrääväksi.



KUVA 3. Leikkausmuodonmuutos on merkittävä aukkoisessa seinässä (EN1992-1-1: Betonirakenteiden suunnittelu 2015, 209).

$$F_{V,Ed} \leq \left( 0,1 * F_{V,B} = \frac{F_{V,BB}}{1 - \frac{F_{V,BB}}{F_{V,BS}}} \right) \quad (3)$$

missä

$F_{V,Ed}$  = Jäykistäviin osiin vaikuttava pystysuuntainen kokonaiskuorma (N)

$F_{V,B}$  = Rakennekokonaisuuden nurjahduskuorma (N)

$F_{V,BB}$  = Rakennekokonaisuuden nurjahduskuorma taivutuksen vaikutuksille (N)

$F_{V,BS}$  = Rakennekokonaisuuden nurjahduskuorma leikkauksen vaikutuksille (N)

Mikäli todetaan, että menetelmän ehto ei toteudu, on toisen kertaluvun vaikutukset huomioitava. Se tehdään suurentamalla vaakakuorman määrää kaavan 4 mukaisesti (Elementtisuunnittelu 2010, 11):

$$F_{H,Ed} \leq \frac{F_{H,0Ed}}{1 - \frac{F_{V,Ed}}{F_{V,B}}} \quad (4)$$

missä

$F_{H,0Ed}$  = Lineaarisesti laskettu vaakavoima (tuuli, lisävaakavoima) (N)

$F_{V,Ed}$  = Pystysuora kokonaisvoima jäykistäviin osiin (N)

$F_{V,B}$  = Rakennekokonaisuuden nurjahduskuorma (N)

Tavanomaisissa kerrostaloissa (4–12 kerrosta) toisen kertaluvun vaikutuksia ei yleensä tarvitse huomioida. EN1992-1-1 (2015) betonistandardin liitteestä H voi arvioida tarkemmin nurjahduskuorman määrittämiseen liittyvää ohjeistusta, jos kaavojen ehdot eivät täyty ja toisen kertaluvun vaikutukset tulee huomioida.

## 2.4 Materiaaliominaisuudet

Teräsbetonilla on hyvä puristuskapasiteetti, mutta suhteellisen pieni vetokapasiteetti. Jäykistäviin levyihin kohdistuvia vektorasituksia hallitaan betoniraudoituksella, jolloin halkeamaleveydet rajoitetaan riittävän pieniksi betonin säilyvyyden ja mekaanisen toimivuuden kannalta. Betoniseinät tehdään pääsääntöisesti elementtirakenteisena ja betonilaatu valitaan tavanomaisesti lujuusluokkien C25/30 ja C30/37 välillä, kuitenkin tavanomaisissa kohteissa enintään C50/60. (Elementtisuunnittelu 2024c).

Betonirakenteet jaetaan kolmeen toteutusluokkaan 1, 2 ja 3. Seuraamusluokan CC2 rakennukset ovat vähintään toteutusluokkaa 2 ja seuraamusluokassa CC3 on toteutusluokka 3. Toleranssiluokkia betonirakenteilla on 2. Toleranssiluokkana käytetään yleensä arvoa 1 (EN13670: Betonirakenteiden toteuttaminen, 30). Tavanomaisissa kerrostaloissa ei yleisesti käytetä pienennettyjä osavarmuuskerroimia, mikä johtaisi tiukempaan toleranssiluokkaan. (Suomen rakentamismääräyskokoelma, betonirakenteet 2019, 6).

Rasitusluokat valitaan olosuhteiden mukaan noudattamalla standardin EN1992-1-1 (2015) mukaista menettelyä. Perustukset ja maan sisässä olevat rakenteet ovat yleisesti XC2-rasitusluokkaa ja jäykistävät seinät lämpimissä sisätiloissa X0- tai XC1-rasitusluokkaa. Rasitusluokan valinnalla varmistetaan

betoniterästen säilyvyys, mikä on perustuksilla, sekä kantavilla rakenteilla vähintään 50 vuotta ja yleensä 100 vuotta. (EN1992-1-1: Betonirakenteiden suunnittelu, 48).

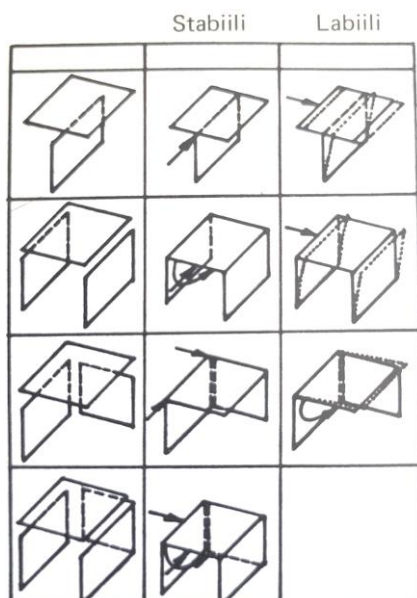
## 2.5 Suunnittelutehtävien vaativuus, työnjako ja suunnitelmien laadunvarmistus

Betonikerrostalojen suunnittelijaan kohdistuvat vaatimukset riippuvat kohteen vaativuudesta. Vaativat kohteet jaetaan vaativa (V) ja vaativa (V+) -kategorioihin. Vaativan kohteen kerrosala on yli 300 m<sup>2</sup>, jänneväli 6–25 metriä ja kerroksia 2–12. 2–8 Kerroksiset rakennukset ovat vaativia ja 9-12 kerroksiset kuuluvat vaativa (V+) luokkaan. Tätä suuremmat ja jänneväleiltään yli 25 metriset rakennukset kuuluvat poikkeuksellisen vaativaan (PV) luokkaan. (FISE 2023.)

Suunnitteluorganisaation tulee tunnistaa kohteen vaativuus sekä yksittäisten rakenneosien suunnittelun vaativuus. Kohteen vaativuuden mukaan tehtävät jaetaan suunnitteluorganisaation kesken ja vastaava rakennesuunnittelija ottaa vastuun rakennesuunnittelun kokonaisuudesta viranomaisen suuntaan. Rakennesuunnittelijan on huolehdittava rakennesuunnitelmien tarkastamisesta ja laadunvarmistamisesta ennen julkaisua. Laskelmat, piirustukset ja tekstiasiakirja tulee tarkastaa ja niiden tarkastuslaajuus tehdään vaativuuden perusteella. Laatujärjestelmässä tulee olla nimetyt vastuuhenkilöt ja roolit tarkastusprosessissa. Poikkeuksellisen vaativissa kohteissa laadunvarmistus tehdään myös suunnitteluorganisaation ulkopuolisen pätevän suunnittelijan toimesta. (Ympäristöministeriön asetus kantavista rakenteista 477/2014.)

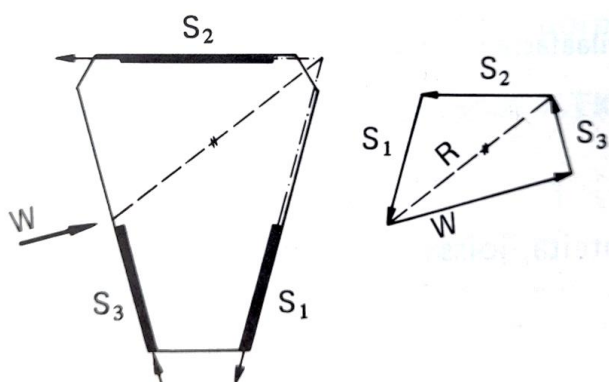
### 3 BETONIRUNGON TOIMINTA KUORMIEN JAKAUTUMINEN

Rungon jäykistys tarkoittaa vaakavoimien siirtämistä runkoa pitkin perustuksille. Runko tulee suunnitella stabiiliksi siten, että jäykistäviä rakenneosia on riittävästi vastaanottamaan jokaisen suunnan kuorman ja epäkeskisyyksistä johtuvan kiertymän. Runko on labiili, mikäli jäykistäviä rakenneosia on liian vähän. (Suomen Betoniyhdistys ry 1995, 46.) Kuva 4 esittelee stabiilin ja labiilin järjestelmän eroja.



KUVA 4. Stabiili ja labiili runko (Suomen Betoniyhdistys ry 1995, 46)

Rakennus voidaan todeta stabiiliksi, kun siihen vaikuttavat voimat ovat tasapainossa. Rungolle varmistetaan riittävä varmuus kaatumista sekä liukumista vastaan. Kuvassa 5 on esitetty seinien jäykistysysteemi ja voimien jakautuminen, kun seinien jäykkyydet ovat keskenään yhtä suuret.

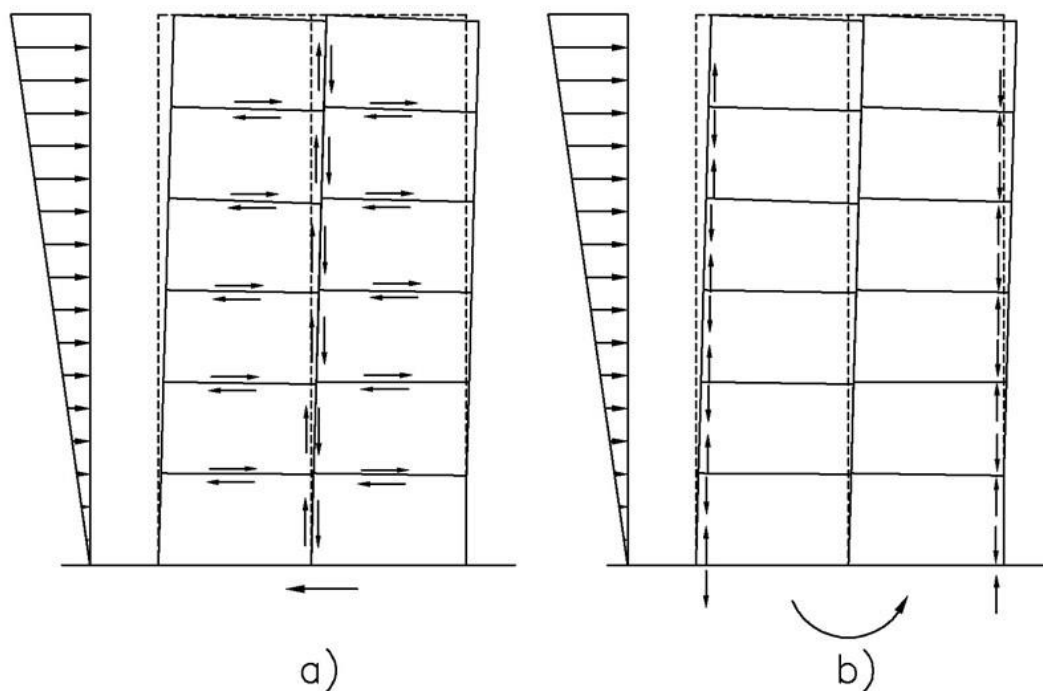


KUVA 5. Seinien voimien jakaantuminen. (Saarinen, Kinnunen & Tiira 1986, 510)

#### 3.1 Rungon jäykistysosien toiminta ja voimasuureet

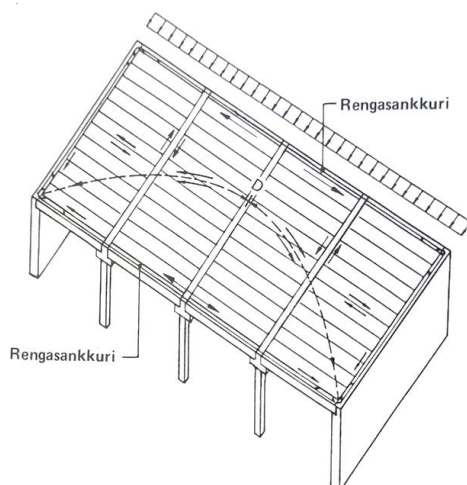
Rakenteeseen kohdistuvia perusrasituksia ovat puristus, veto, leikkaus, vääntö ja taivutus (Suomen Betoniyhdistys ry 1995, 35). Jäykistykseen käytetyillä levyrakenteilla tarkastellaan yleensä puristus-, veto- ja leikkausrasituksia. Jäykistävät seinälinjat muodostavat ulokemaisen levyrakenteen, joka on kiinnitetty perustuksiin. Levyrakenteet muodostuvat useista osista (betonielementeistä), joiden vä-

lille muodostuu liitosvoimia (kuva 6). Osien väliset liitokset tulee mitoittaa kestäämään niihin kohdistuvat voimat, jotta jäykistävä levyrakente toimii suunnitellusti. Tyypillisen elementtikerrostalon elementtiliitokset pystysuunnassa on tehty vajjerilenkein. Osien välisten vaakasaumojen voimat siirtyvät kitkan ja harjaterästappien kautta. (Elementtisuunnittelu 2024a.)



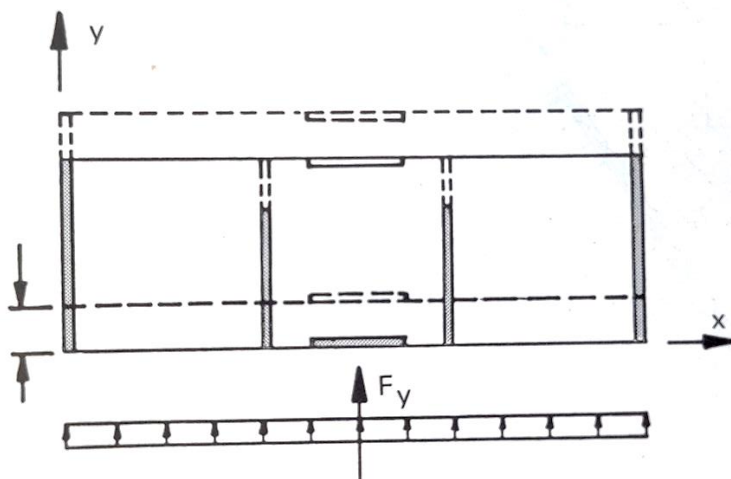
KUVA 6. Jäykistysseinien liitosvoimat (Elementtisuunnittelu 2024a)

Kerroskohtaiset välipohjat välittävät kuormat jäykistäville seinälinjoille. Ontelolaatastoon kohdistuvia rasituksia hallitaan betonin hyvillä puristusominaisuuksilla, rengasteräksillä, saumateräksillä ja liitoksilla viereisiin rakenneosiin. Ontelolaatasto tulee mitoittaa vaakavoimia vastaan levyn tavoin (puristus- ja vetokomponentit). Mitoituksessa tulee huomioida aukotukset, hissikulut ja muut epäjatkuvuudet. Välipohja tulee sitoa pystyrakenteisiin siten, että voimat välittyvät pystyrakenteisiin kitkan (sijoittaminen seinien väliin), puristuksen (betonivaarnat) tai liitoksien (lenkit, vaarnatapit) kautta (kuva 7). Jäykistysvoimien lisäksi huomioidaan jatkuvan sortuman vaatimukset. (Elementtisuunnittelu 2024a.)



KUVA 7. Välipohjan toimintaperiaate vaakavoimia vastaan (Suomen Betoniyhdistys ry 1995, 46)

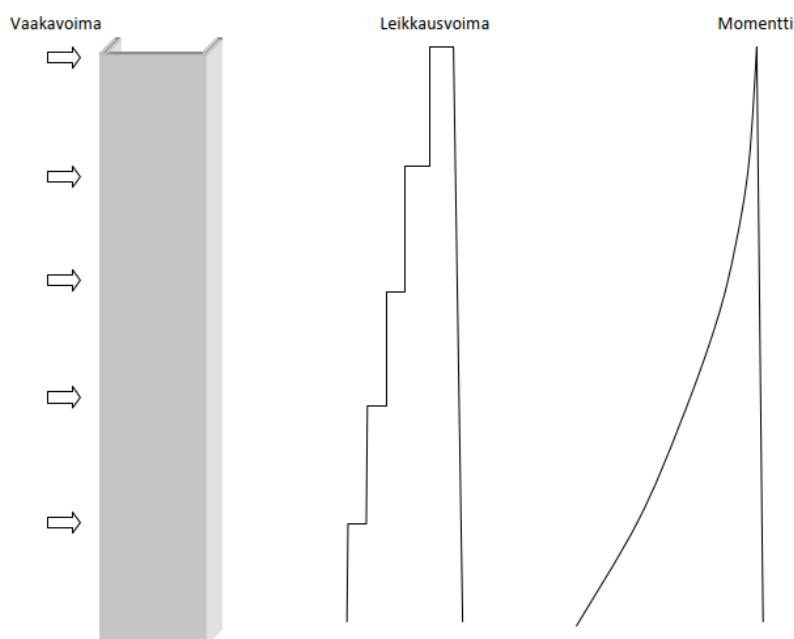
Jäykistävien seinälinjojen sijoittelussa tavoitellaan lähtökohtaisesti symmetrisyyttä ja tasavälisyyttä (kuva 8). Seinälinjojen tulisi mennä ylhäältä alas yhtä linjaa. Kun usein alimmissa kerroksissa tulee poikkeamia seinälinjoihin, aiheuttaa se alimpien kerroksien välipohjille suurempia rasituksia ja vaatimuksen siirtää kuormia toisille seinälinjoille epäjatkuvuuskohtissa. (Suomen Betoniyhdistys ry 1995, 45).



KUVA 8. Symmetrinen seinien sijoitus (Suomen Betoniyhdistys ry 1995, 45)

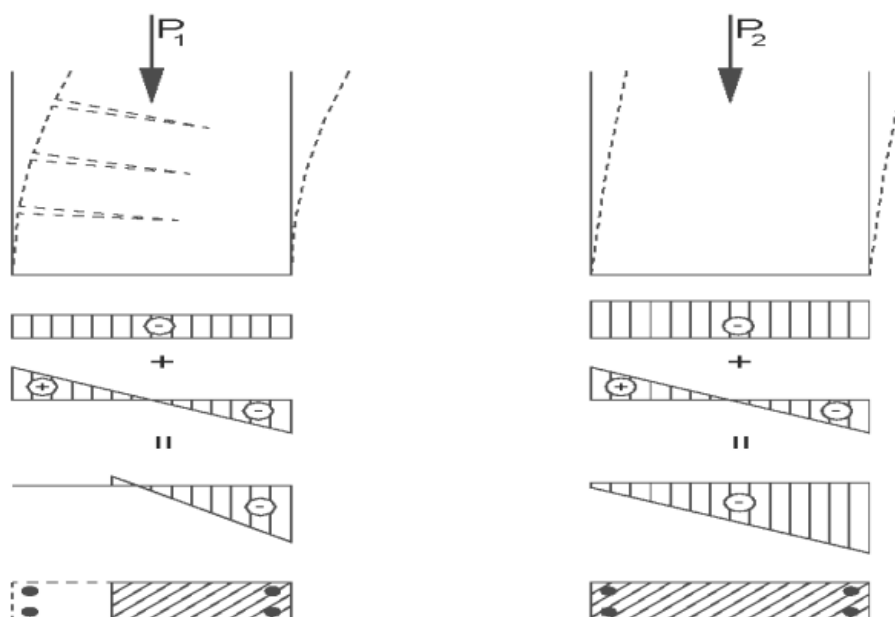
Seinien kuormat jakaantuvat symmetrisessä ja epäsymmetrisessä tapauksessa seinien jäykkyyksien suhteessa. Lisäksi seinien epäsymmetrisyydestä aiheutuu kiertymä, joka aiheuttaa joko lisäkuormaa tai keventää seinään kohdistuvaa kuormitusta. Rakennuksen kokonaissiirtymä muodostuu siirtymästä ja kiertymästä. (Saarinen ym. 1986, 513).

Vaakavoimien aiheuttamat rasitukset summautuvat alimmille seinätasaille. Momentti- ja leikkausvoimarasitukset ovat suurimmillaan alimmassa kerroksessa. Kuvassa 9 havainnoidaan vakaavoimista aiheutuvan momentin ja leikkausvoimien summautumista.



KUVA 9. Voimien summa kerroksittain (Elementtisuunnittelu 2010, 41).

Riippuen pystykuorman ja kaatavien voimien yhteisvaikutuksesta seinälinja voi olla kokonaan puristettu tai osittain vedetty. Kun puristavaa kuormaa on riittävästi, ei momentista aiheutuva vetojännitys mene koskaan vedon puolelle (kuva 10). Seinän mitoitus käydään läpi myöhemmissä kappaleissa.



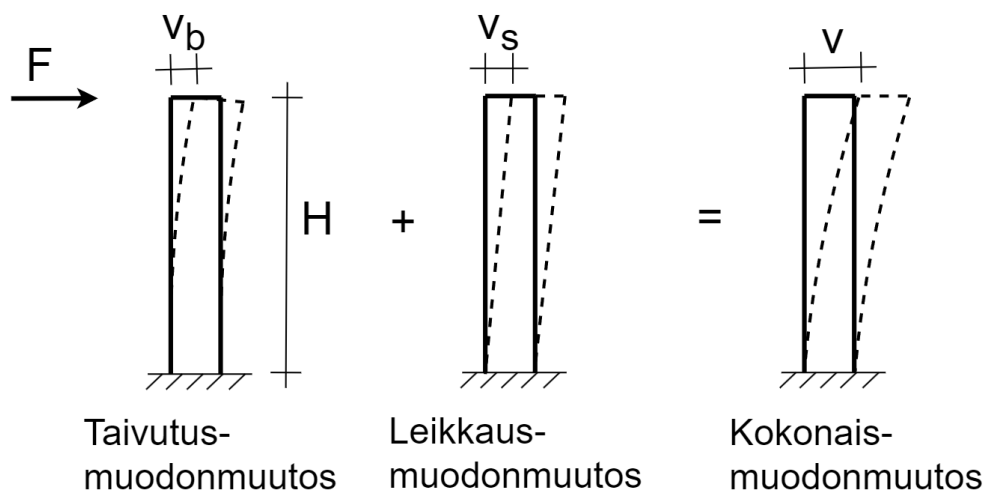
KUVA 10. Osittain vedetty ja puristettu poikkileikkaus sekä kokonaan puristettu poikkileikkaus (Elementtisuunnittelu 2010, 5)

### 3.2 Jäykistävän seinän jäykkyyden määrittäminen

Jäykistävän seinän ottama osuus rakennukseen kohdistuvasta kuormituksesta riippuu tarkasteltavan seinän jäykkyyden suhteesta rungon kokonaisjäykkyyteen. Jäykkyyden määrittämiseen on lähteestä riippuen erilaisia lähestymistapoja. Leskelän (2008, 182) mukaan kuormien jakautumisessa eri seinille ja jäykkyyden määrittämisessä ollaan riittävän lähellä, kun verrataan pelkästään jäykistysosien jäyhyysmomenttia ( $I$ ). Tämä on perusteltua, kun kimmomoduuli ja seinien muut ominaisuudet paitsi pituus ovat lähellä toisiaan. EN1992-1-1 (2015, 214) antaa periaatteen enintään 25 kerroksisen rakennuksen jäykistysosan jäykkyyteen, jossa taivutusjäykkyyttä ( $EI$ ) verrataan kokonaisjäykkyyteen, johon lisätään kiertokeskiön vaikutus. Tarkimman lähestymistavan esittää Rakennusteollisuuden (1995, 24–31) lähde, jota myös Elementtisuunnittelu (2010, 26–34) referoi aineistossaan. Viimeksi mainittujen lähteiden periaate perustuu taivutus ja leikkausmuodonmuutoksen huomioimiseen jäykkyyden määrittämisessä ja opinnäytetyön kaavoissa ja kuvissa käytetään tätä menetelmää.

Seinän jäykkyys muodostuu sen kyvystä vastustaa muodonmuutoksia. Seiniin kohdistuu kahdenlaisia muodonmuutoksia: taivutuksesta aiheutuvat muodonmuutokset ja leikkauksesta aiheutuvat muodonmuutokset (kuva 11, Elementtisuunnittelu 2010, 26).





KUVA 11. Seinän muodonmuutokset (Laitinen 2024, muokattu alkuperäislähteestä Elementtisuunnittelu 2010, 26)

Seuraavissa kaavoissa esitetään vain tarkasteltava seinän suunta. Taivutuksesta aiheutuvat jäykkysominaisuudet voidaan ratkaista ulokepalkin tavoin taipumasta ja leikkausmuodonmuutoksesta johdetuilla kaavalla. Vaakavoima sijoitetaan seinän yläpäähän, jolloin kuvan 10 seinärakenteen taipuma voidaan laskea palkin kaavalla 5. ja leikkausmuodonmuutos ratkaistaan kaavalla 6.

$$v_b = \frac{F * H^3}{3 * E * I} \quad (5)$$

missä

$v_b$  = siirtymä taipumasta (b = bending) (mm)

$F$  = seinän yläosaan kohdistuva vaakavoima (N)

$H$  = seinän korkeus (mm)

$E$  = betonin kimmomoduulin arvo (N/mm<sup>2</sup>)

$I$  = seinän jäyhyysmomentti tarkastelusuuntaan (mm<sup>4</sup>)

$$v_s = \frac{F * \kappa * H}{G * A} \quad (6)$$

missä

$v_s$  = siirtymä leikkausmuodonmuutoksesta (s = shear) (mm)

$F$  = seinän yläosaan kohdistuva vaakavoima (N)

$\kappa$  = leikkauspinta-alan kerroin (-)

$H$  = seinän korkeus (mm)

$G$  = seinän liukumoduuli (N/mm<sup>2</sup>)

Hooken lain mukaan kappaleeseen kohdistettu voima on suoraan verrannollinen jousen venymään. Yleinen muoto jousivakiolle esitetään kaavassa 7 (Koulutuksen tutkimuslaitos/Peda.net 2024) (termit yhtenäistetty tämän materiaalin kanssa).

$$k = \frac{F}{v} \quad (7)$$

missä

$k$  = jousivakio (N/mm)

$F$  = kappaleeseen kohdistuva voima (N)

$v$  = siirtymä (mm)

Kappaleen jäykkyyttä voidaan kuvata jousivakion avulla. Jäykkyyysluku saadaan yhdistämällä jousivakion ja muodonmuutoksen kaava termin siirtymän  $v$  avulla. Jäykkyyttä kuvaava termi  $k$  saadaan taiputukselle kaavasta 8 ja leikkausmuodonmuutokselle kaavasta 9 (Rakennusteollisuus 1995, 29). Jousivakio  $k$  kuvastaa tässä yhteydessä kappaleen jäykkyyttä. Kaavat esitetään lähteissä käänteislukuna  $1/k$ , jolloin sen voidaan ajatella kuvastavan jäykkyyden sijaan rakenteen joustavuutta. Yksikkönä tulolle on tällöin [mm/N], joka kuvastaa siirtymää jokaista Newton-yksikköä kohden.

$$\frac{1}{k_b} = \frac{H^3}{3 * E * I} \quad (8)$$

missä

$k_b$  = seinän jäykkyys (taipuma) (N/mm)

$H$  = seinän korkeus (mm)

$E$  = betonin kimmomoduulin arvo (N/mm<sup>2</sup>)

$I$  = seinän jäyhyysmomentti (mm<sup>4</sup>)

$$\frac{1}{k_s} = \frac{\kappa * H}{G * A} \quad (9)$$

missä

$k_s$  = seinän jäykkyys (leikkaus) (mm)

$H$  = seinän korkeus (mm)

$A$  = poikkileikkauksen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

$G = 2 * (1 + \nu) =$  seinän liukumoduuli (N/mm<sup>2</sup>)

$\kappa$  = leikkauspinta-alan kerroin (-)

Leikkauspinta-alan  $\kappa$ -kertoimen määrittäminen on selkeä suoralle seinälle, mutta jos seiniä yhdistetään poikkiseiniin ja nämä huomioidaan jäykistyksessä, on kertoimen määrittäminen hankalampaa. Yleinen muoto differentiaaliyhtälölle sen ratkaisemiseen poikkileikkauksen muodosta riippumatta on kaavassa 10. (Rakennusteollisuus 1995, 29.) Kertoimen  $\kappa$  määrittämistä ja yhtälön ratkaisua on käyty tarkemmin läpi eri muodoilla liitteessä 1.

$$\kappa = \frac{A}{I^2} \int \frac{S(y)^2}{t(y)} dx \quad (10)$$

missä

$\kappa$  = leikkauspinta-alan kerroin (-)

$A$  = poikkileikkauksen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

$I$  = seinän jäyhyysmomentti kappaleen tarkastelu suunnassa (mm<sup>4</sup>)

$S$  = staattinen momentti poikkileikkauksen painopisteessä tarkasteltavassa suunnassa (mm<sup>3</sup>)

$t$  = poikkileikkauksen paksuus (mm)

Kokonaisjäykkyys seinälohkolle muodostuu seinän tai usean seinän yhdistelmän taivutus- ja leikkausjäykkyyden summasta. Jäykistävän osan kokonaisjäykkyys on kaavan 11 mukainen. Kaavasta huomioidaan, että jäykkyyksien arvot  $k_b$  ja  $k_s$  on summattu yhteen ja liukumoduuli on korvattu liukumoduulin ratkaisukaavalla (ks. kaavan 9 termit). (Rakennusteollisuus 1995, 31.)

$$k = \frac{E}{\frac{H^3}{3 * I} + \frac{2 * (1 + \nu) * \kappa * H}{A}} \quad (11)$$

missä

$k$  = tarkasteltavan seinän jäykkyys (N/mm)

$E$  = betonin kimmomoduuli (N/mm<sup>2</sup>)

$I$  = seinän jäyhyysmomentti (mm<sup>4</sup>)

$H$  = seinän korkeus (mm)

$\nu$  = Poissonin luku (betonilla  $\nu = 0,2$ ) (-)

$\kappa$  = leikkauspinta-alan kerroin (-)

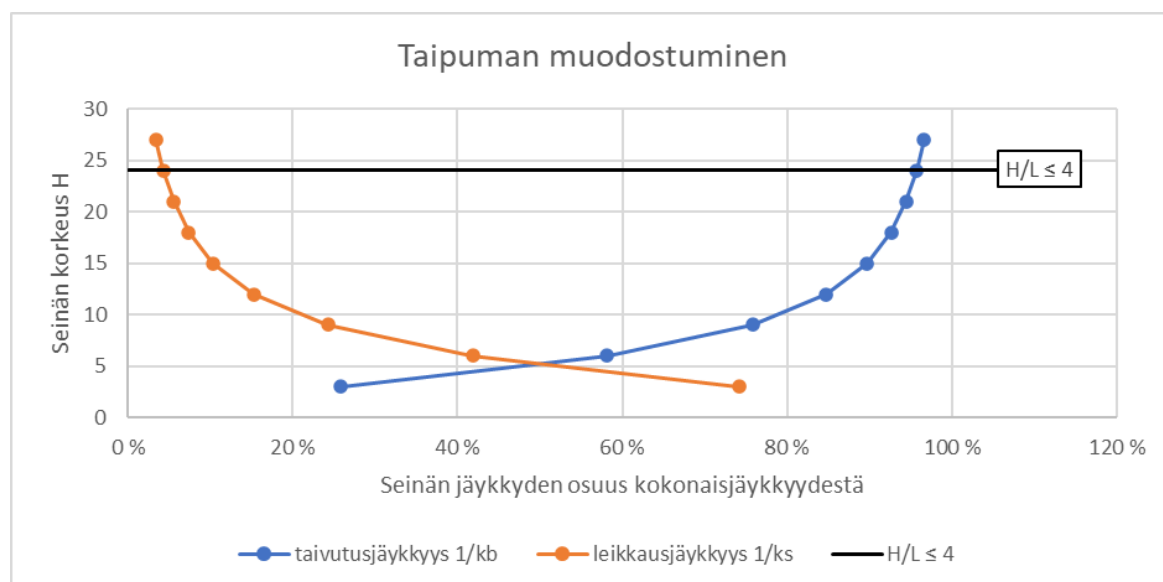
$A$  = poikkileikkauksen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

Leikkausmuodonmuutos tulee ottaa huomioon, jos seinälinjat ovat matalia ja pitkiä (sivusuhte  $H/L \leq 4$ ) (Rakennusteollisuus 1995, 29). Tarkastellaan leikkausmuodonmuutoksen vaikutusta esimerkki-seinällä, jonka pituus  $L = 6$  metriä ja leveys  $b = 0,2$  metriä. Taulukossa 1 on esitetty taivutusjäykkyyden ja leikkausjäykkyyden osuudet seinän korkeuden  $H$  (m) suhteen. Huomioitavaa jäykkyydessä on, että mitä suuremman osuuden taivutus- tai leikkausjäykkyys edustaa kokonaisjäykkyydestä, sitä pienempi sen osuus on kokonaistaipuman osuudesta. Jäykempi kappale sallii suhteessa pienemmän taipuman. Lähteissä esitetty jäykkyyden käänteisluku (joustavuus/taipuisuus)  $1/k$  kuvastaa paremmin seinän siirtymää voiman yksikköä kohden (mm/N).

TAULUKKO 1. Esimerkkiseinän jäykkyyssosuudet seinän korkeuden suhteen (Laitinen 2024)

	H (m)	H/L	$k_b$ (N/m)	$k_s$ (N/m)	$\Sigma k$ (N/m)	$1/k_b$	$1/k_s$	$\Sigma 1/k$	$1/k_b$ %	$1/k_s$ %	
1krs	3	0,5	13,13	4,56	17,695	0,076	0,219	0,295	26 %	74 %	
2krs	6	1	1,64	2,28	3,922	0,609	0,439	1,048	58 %	42 %	
3krs	9	1,5	0,49	1,52	2,007	2,056	0,658	2,713	76 %	24 %	
4krs	12	2	0,21	1,14	1,345	4,873	0,877	5,750	85 %	15 %	
5krs	15	2,5	0,11	0,91	1,017	9,517	1,096	10,613	90 %	10 %	raja- arvo H/L ≤4
6krs	18	3	0,06	0,76	0,821	16,445	1,316	17,761	93 %	7 %	
7krs	21	3,5	0,04	0,65	0,690	26,114	1,535	27,649	94 %	6 %	
8krs	24	4	0,03	0,57	0,596	38,981	1,754	40,735	96 %	4 %	
9krs	27	4,5	0,02	0,51	0,525	55,502	1,973	57,476	97 %	3 %	

Taulukosta 1 ilmenee, että mitä matalampi seinä, sen suurempi on leikkausjäykkyyden osuus. Kuva 12 esittää seinäesimerkistä taivutus- ja leikkausjäykkyyksien prosenttiosuudet.

KUVA 12. Esimerkkiseinän ( $L = 6$  m) jäykkyyssosuudet seinän korkeuden suhteen (Laitinen 2024)

Huomioidaan taulukosta ja kaaviosta, että kun  $H/L$  on lähellä arvoa 4, niin leikkausjäykkyyden osuus on alle 5 %. Muutamaa kerrosta ylempänä osuus on enää 1 %:n luokkaa. Leikkausmuodonmuutoksen merkitystä on vaikea arvioida betonikerrostalolla. Matalissa, alle 5-kerroksisissa rakennuksissa osuus on kuitenkin aina yli 10 % esimerkkiseinän tapauksessa.

### 3.3 Rasituksen jakautuminen jäykistäville rakenneosille symmetrisellä jakaumalla

Kaikki rakennukseen kohdistuvat kuormat jaetaan niitä vastaanottaviin rakenneosiin. Pystykuormat kulkeutuvat suoraviivaisesti kuormitusalan mukaan pystylinjoille. Vaakakuormat jakautuvat jäykistävien osien jäykkyyksien suhteessa. Tämä tarkoittaa, että kaikkien jäykistävien linjojen jäykkyydet täytyy laskea ja kokonaisvaakakuorma jakaa jäykkyyksien prosenttiosuuksien suhteessa. Lisäksi lähes kaikissa rakennuksissa rungon epäsymmetrisyys aiheuttaa rakennukselle kiertymän, mikä joko vähentää kiertoakeskiön puolella olevien seinien rasituksia tai lisää kiertoakeskiöstä kauempana olevien

seinien rasituksia. Kun rakenneosat on sijoitettu täysin symmetrisesti ja niillä on keskenään symmetrisen jäykkyyden tarkasteltavaan suuntaan, ei rakennukseen aiheudu minkäänlaista kiertymistä. Tällöin kuormat jaetaan suoraviivaisesti jäykkyyksien suhteessa ja siirtymä tapahtuu vain tarkasteltavaan suuntaan. Tarkasteltavassa suunnassa kokonaiskuormasta aiheutuva vaakavoima jäykistävälle seinälle saadaan kaavasta 12. (Rakennusteollisuus 1995, 24–31):

$$Q = \frac{k}{\Sigma k} * F \quad (12)$$

missä

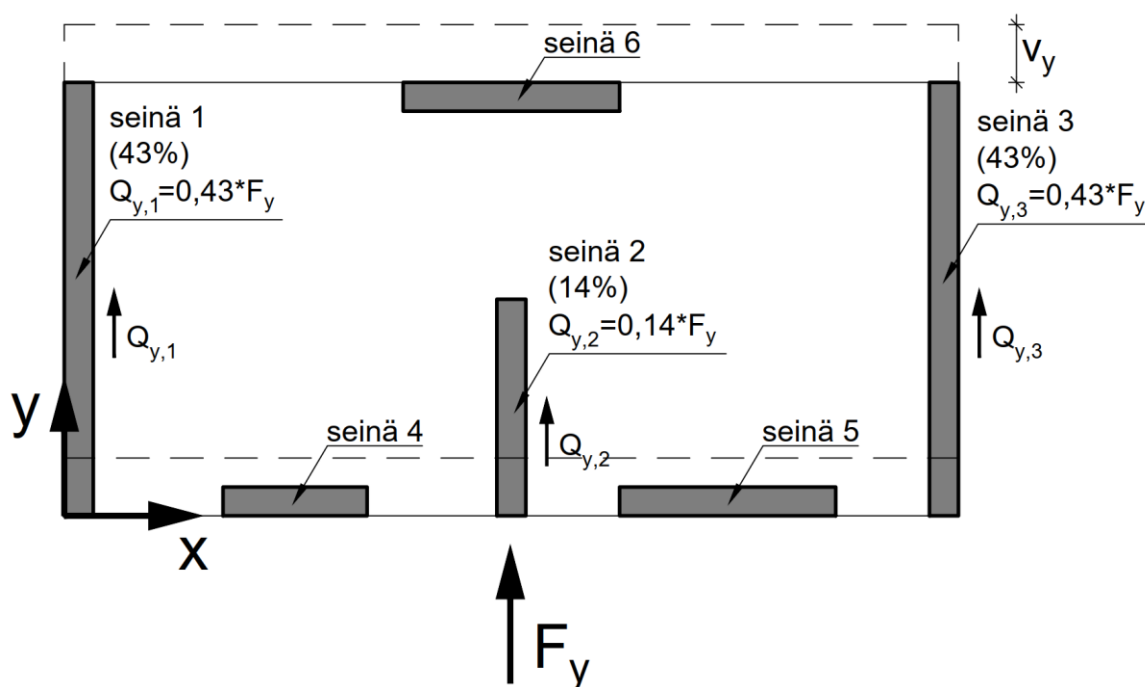
$Q$  = tarkasteltavan jäykistysseinän vastaanottama vaakavoima (N)

$k$  = tarkasteltavan jäykistysseinän jäykkyys (N/mm)

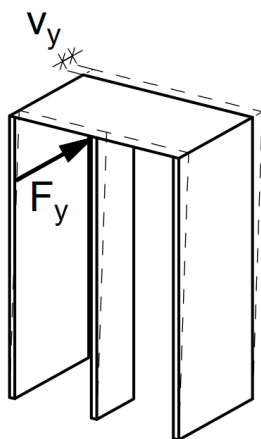
$\Sigma k$  = kaikkien jäykistysseinien yhteenlaskettu jäykkyys (N/mm)

$F$  = rakenteeseen kohdistuvan vaakavoiman resultantti tarkasteltavaan suuntaan (N)

Kuvassa 13 on esimerkki symmetrisestä seinien sijoittelusta  $y$ -suunnan vaakavoimaa vastaan. Kuvaan on merkitty prosenttiosuudet laskennasta saadusta yksittäisen seinän jäykkyyden osuudesta koko systeemin jäykkyyteen ( $y$ -suunnassa). Seinään kohdistuva vaakavoima  $Q_{y,i}$  on suoraan prosenttiosuuden mukainen osa kokonaisvoimasta  $F_y$ . Symmetrinen jakauma aiheuttaa pelkästään  $y$ -suunnan siirtymän, jota kuvassa kuvataan korostetusti termillä  $v_y$  (kuva 14).



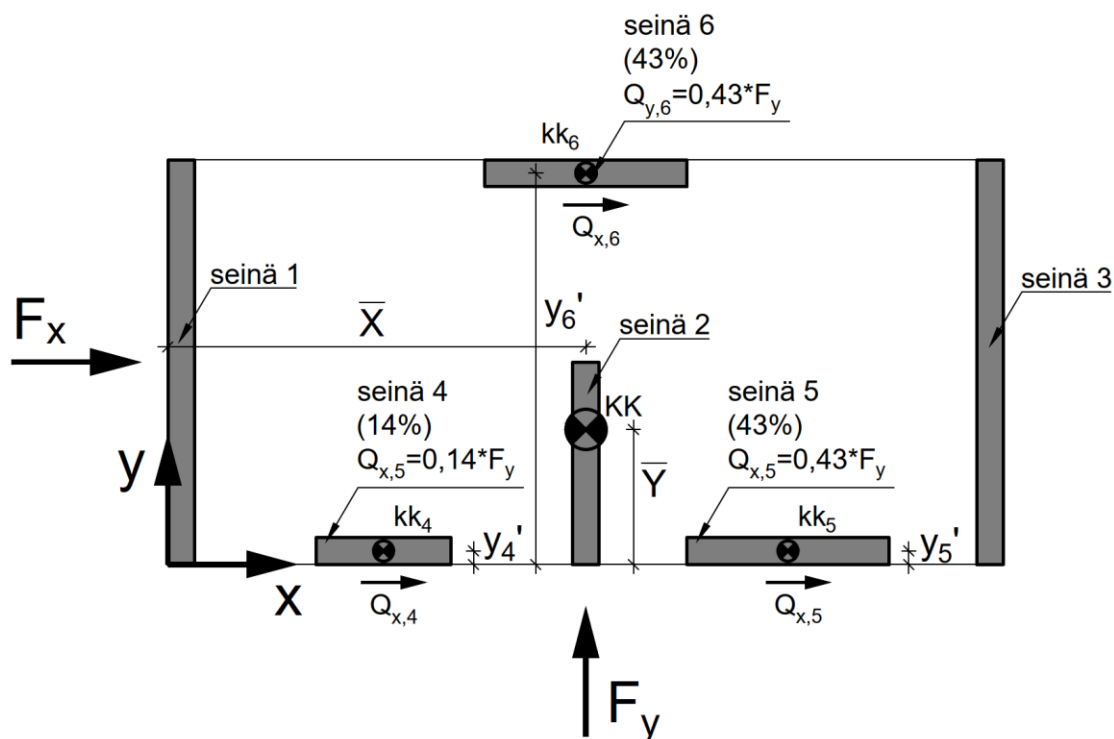
KUVA 13. Vaakavoiman jakautuminen symmetrisessä rungossa (Laitinen 2024, muokattu alkuperäislähteestä Rakennusteollisuus 1995, 27)



KUVA 14. Siirtymä  $v_y$  symmetrisessä rungossa (Laitinen 2024)

### 3.4 Rasituksen jakautuminen jäykistäville rakenneosille epäsymmetrisellä jakaumalla

Kun rakenneosat on sijoitettu epäsymmetrisesti, aiheutuu koko jäykistyssysteemiin kiertymä välipohjatasossa. Kiertymän ratkaisemiseksi täytyy ensiksi ratkaista kiertoakeskiön ( $KK =$  koko systeemin kiertoakeskiö) sijainti. Epäsymmetrisuus ja kiertymä aiheuttavat tarkastelu-suuntaa vastaan kohtisuoraan suuntaan myös rasituksia, jolloin kohtisuoran suunnan seinät täytyy myös huomioida jäykistyssysteemissä. Kiertoakeskiön paikka voidaan ratkaista painopisteen laskemisen periaatteella, mutta korvaamalla massa jäykkyydellä. Yksinkertainen periaate on valita tasolle origo vasempaan alareunaan ja laskea koordinaatit tähän pisteeseen. (Rakennusteollisuus 1995, 26–28.) Kuvassa 15 on  $F_x$  suuntainen voima, joka rasittaa epäsymmetristä jäykistyssysteemiä.



KUVA 15. Kiertoakeskiön määrittäminen epäsymmetrisen rungon suuntaan ja seinien rasitusjakauma suoraan jäykkyyksien suhteessa, kun kiertoakeskiötä ei vielä huomioida (Laitinen 2024, muokattu alkuperäislähteestä Rakennusteollisuus 1995, 27).

Kiertokeskiön laskemiseen tarvitaan yksittäisen jäykistävän osan kiertoakeskiön sijainti ( $kk =$  jäykistävän seinän kiertoakeskiö). Yksittäisen seinän kiertoakeskiöt sijaitsevat kaksoissymmetrisillä poikkileikkauksilla painopisteessä. Erillisten seinien yhteispoikkileikkauksissa sijainti on laskettava erikseen. Liitteessä 1 on esimerkkejä poikkileikkauksista, joissa kiertoakeskiö ei sijaitse painopisteessä.

Jokaisen jäykistävän seinän vaikutus otetaan huomioon kaavalla 13. Kuvassa 15 havainnoidaan kiertoakeskiön ( $KK$ ) sijainti  $y$ -suunnassa, joka on koordinaatti  $\bar{Y}$  origosta. Koordinaatti  $\bar{X}$   $x$ -suunnassa saadaan vastaavasti  $y$ -suunnan seinien jäykkyyksistä  $F_y$ -suunnan voimaa vastaan. Yksittäisten seinien painopisteiden etäisyydet  $y'$  ja  $x'$  tarkoittavat etäisyyttä origoon  $(0,0)$ . (Rakennusteollisuus 1995, 27–28.)

$$\bar{Y} = \frac{\sum k_x y'}{\sum k_x} ; \quad \bar{X} = \frac{\sum k_y x'}{\sum k_y} \quad (13)$$

missä

$\bar{Y}$  = Kiertokeskiön ( $KK$ ) etäisyys origosta  $y$ -suunnassa (mm)

$\bar{X}$  = Kiertokeskiön ( $KK$ ) etäisyys origosta  $x$ -suunnassa (mm)

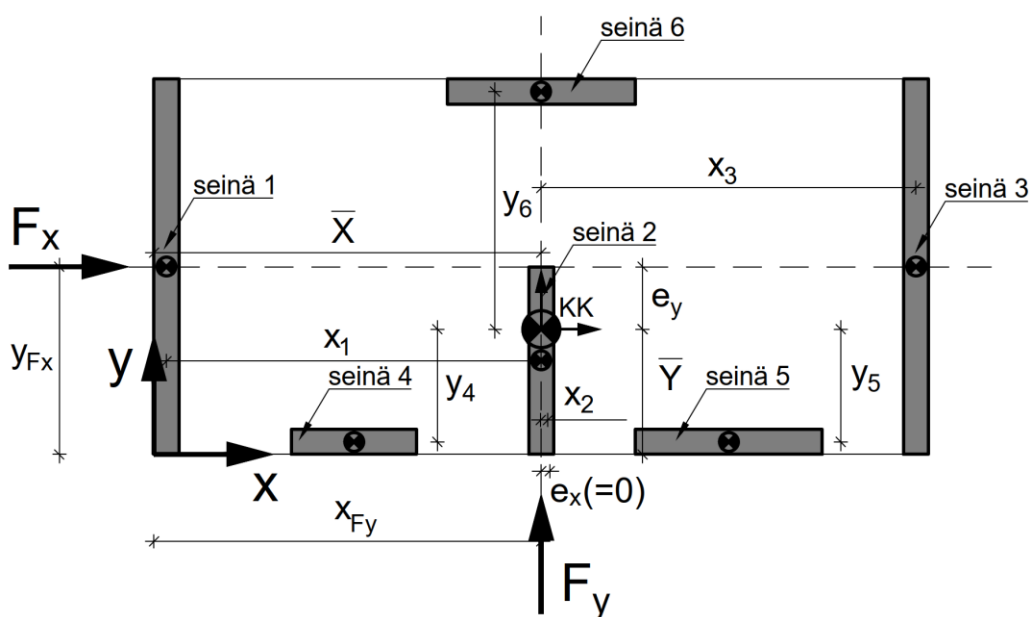
$k$  = tarkasteltavan jäykistysseinän jäykkyys (N/mm)

$\sum k$  = kaikkien jäykistysseinien yhteenlaskettu jäykkyys (N/mm)

$x'$  = seinän painopisteen etäisyys origoon  $X$ -suunnassa

$y'$  = seinän painopisteen etäisyys origoon  $Y$ -suunnassa

Vaakavoimien  $F_y$  ja  $F_x$  resultantit sijaitsevat seinälinjojen puolivälissä. Jäykistysjärjestelmään kohdistuva momentti saadaan ratkaistua resultanttivoiman vaikutussuoran kohtisuoran etäisyyden  $e_y$  ja  $e_x$  avulla kiertoakeskiöön ( $KK$ ) (kaava 14). Epäkeskisyyksien paikat on havainnointi kuvassa 16 ja arvot voidaan ratkaista kaavalla 10 (termejä selkeytetty tämän materiaalin mukaiseksi Rakennusteollisuuden (1995) lähteeseen verrattuna).



KUVA 16. Kiertokeskiö ( $KK$ ) uutena origona, seinien kiertoakeskiöiden ( $kk$ ) etäisyydet kiertoakeskiöön ( $KK$ ) ja resultanttivoimien epäkeskisyydet kiertoakeskiöön (Laitinen 2024, muokattu alkuperäislähteestä Rakennusteollisuus 1995, 27)

$$e_x = \bar{Y} - y_{F_y} \quad ; \quad e_y = \bar{X} - x_{F_x} \quad (14)$$

missä

$e_y = F_x$  resultanttivoiman etäisyys kiertoakeskiöön (mm)

$e_x = F_y$  resultanttivoiman etäisyys kiertoakeskiöön (mm)

$y_{F_y} = F_x$  resultanttivoiman etäisyys origoon (puolet rakennuksen syvyydestä) (mm)

$x_{F_x} = F_y$  resultanttivoiman etäisyys origoon (puolet rakennuksen leveydestä) (mm)

Uusi origo tasolle valitaan kiertoakeskiön (*KK*) mukaan, johon kuormien vaikutus on yksinkertainen sijoittaa. Tällöin merkisäännöt (+/-) ovat kaavassa 15 oikein ja kokonaismomentti summautuu oikein. Jäykistävien osien kiertoakeskiöetäisyydet määräytyvät nyt uuteen origoon kaavan 11 mukaisesti, jota kuva 16 havainnollistaa. (Rakennusteollisuus 1995, 27–28.)

$$M = F_y * e_x - F_x * e_y \quad (15)$$

missä

$M$  = Epäkeskisyydestä aiheutuva momentti (positiivinen suunta vastapäivään) (Nmm)

$F_y$  = y-suunnan resultanttivoima (N)

$F_x$  = x-suunnan resultanttivoima (N)

$e_y = F_x$  resultanttivoiman etäisyys kiertoakeskiöön (mm)

$e_x = F_y$  resultanttivoiman etäisyys kiertoakeskiöön (mm)

Kuvassa 16 ilmenee myös jäykistävien seinien etäisyys kiertoakeskiöön (*KK*). Etäisyys voidaan laskea kaavalla 16. Vaakavoimat aiheuttavat tasoon siirtymän ja epäkeskisyydestä aiheutuva momentti kiertymän. Muodonmuutokset on esitetty korostetusti kuvissa 17 ja 18. (Rakennusteollisuus 1995, 28.)

$$x = x' - \bar{X} \quad ; \quad y = y' - \bar{Y} \quad (16)$$

missä

$x$  = jäykistysseinän kiertoakeskiön (*kk*) etäisyys tason kiertoakeskiöön (*KK*) x-suunnassa (mm)

$y$  = jäykistysseinän kiertoakeskiön (*kk*) etäisyys tason kiertoakeskiöön (*KK*) y-suunnassa (mm)

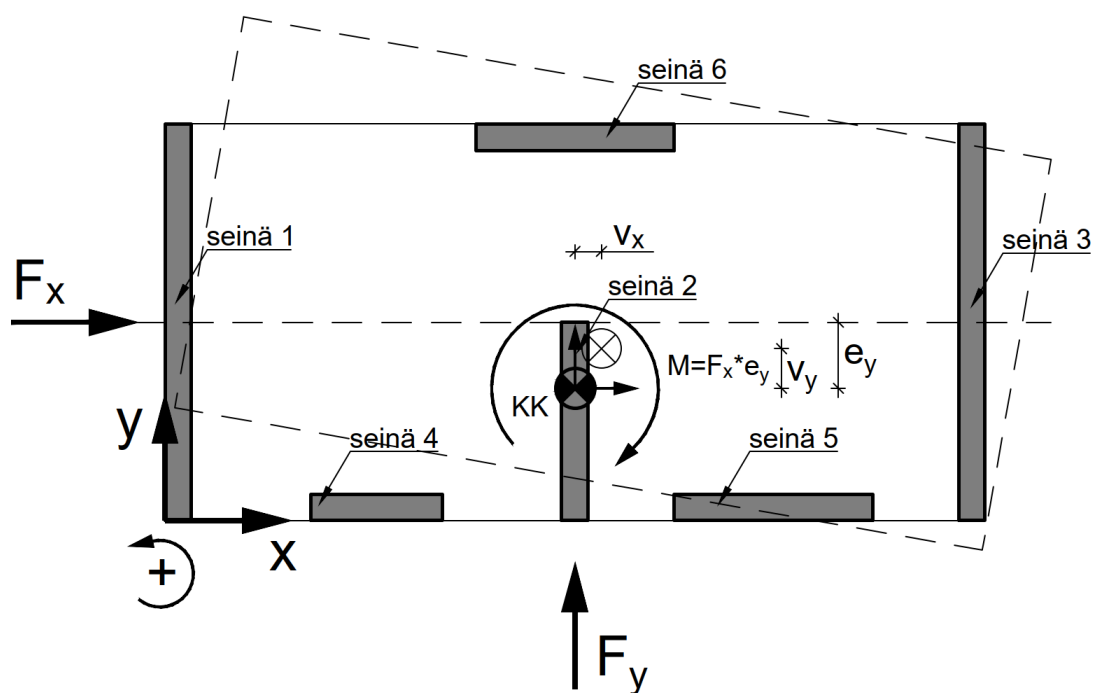
$x'$  = jäykistysseinän kiertoakeskiön (*kk*) etäisyys origoon X-suunnassa (mm)

$y'$  = jäykistysseinän kiertoakeskiön (*kk*) etäisyys origoon X-suunnassa (mm)

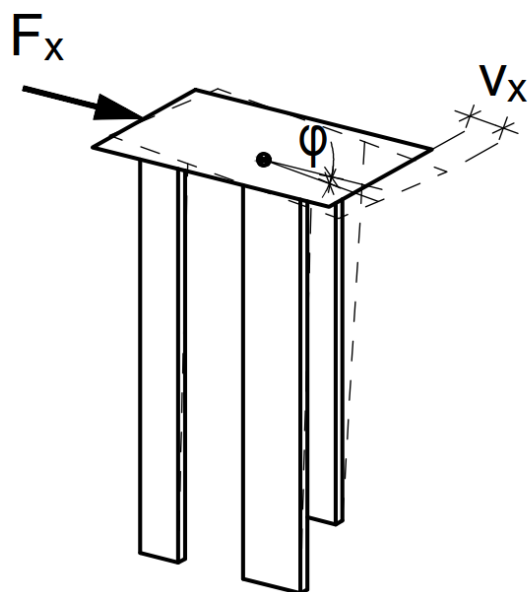
$\bar{Y}$  = Kiertoakeskiön (*KK*) etäisyys origosta y-suunnassa (mm)

$\bar{X}$  = Kiertoakeskiön (*KK*) etäisyys origosta x-suunnassa (mm)





KUVA 17. Siirtymät ja kiertymä (Laitinen 2024, muokattu alkuperäislähteestä Rakennusteollisuus 1995, 27)



KUVA 18. Siirtymä ja kiertymä x-suuntaan (Laitinen 2024, muokattu alkuperäislähteestä Rakennusteollisuus 1995, 27)

Siirtymät ja kiertymä voidaan ratkaista tasapainoehtojen avulla. Ulkoisista kuormista aiheutuva voima  $F$  (N) on tasapainoehdon mukaan siirtymän (mm) ja voiman  $F$  suuntaisten seinien kokonaisjäykkyyden (N/mm) tulo. Tasapainoehdon toteutuminen on esitetty kaavassa 17 ja 18. (Rakennusteollisuus 1995, 28.)

$$F_x = v_x * \sum k_x \quad (17)$$

missä

$F_x$  = resultanttivoima x-suunnassa (N)

$v_x$  = tason siirtymä x-suuntaan (mm)

$k_x$  = x-suuntaisen seinän jäykkyys (N/mm)

$$F_y = v_y * \sum k_y \quad (18)$$

missä

$F_y$  = resultanttivoima y-suunnassa (N)

$v_y$  = tason siirtymä y-suuntaan (mm)

$k_y$  = y-suuntaisen seinän jäykkyys (N/mm)

Siirtymä  $v$  voidaan suoraan ratkaista tasapainoehdon kaavasta voiman  $F$  ja kokonaisjäykkyyden  $k$  osamäärällä. Vastaavasti Momentin (Nmm) tasapainoehto muodostuu kiertymän arvon  $\varphi$  (rad) ja kokonaisvääntöjäykkyyden (Nmm/rad) tulosta. Kokonaisjäykkyyteen kuuluu summata kaikkien yksittäisten jäykistävien seinien vääntöjäykkyys ja aiemmin ratkaistu jäykkyys muutettuna momentiksi. Usean seinän muodostelmista vääntöjäykkyys ratkaistaan esimerkiksi Rakennusteollisuuden (1995, 32–34) lähteessä esiintyvillä kaavoilla. Periaate vääntöjäykkyyden laskennassa on sama kuin suorien seinien jäykkyyden määrittämisessä, mutta siirtymän sijaan tarkastellaan kiertymää. (Rakennusteollisuus 1995, 31.) Kaavassa 19 on esitetty momentin tasapainoehto:

$$M = \varphi * (\sum T_{xy} + \sum k_x * y^2 + \sum k_y * x^2) \quad (19)$$

missä

$M$  = epäkeskisyydestä aiheutuva momentti (Nmm)

$\varphi$  = kiertymä (rad)

$T_{xy}$  = jäykistävän osan vääntöjäykkyys (Nmm/rad)

$k_x$  = x-suuntaisen seinän jäykkyys (N/mm)

$k_y$  = y-suuntaisen seinän jäykkyys (N/mm)

$x$  = jäykistysseinän kiertokeskiön ( $kk$ ) etäisyys tason kiertokeskiöön ( $KK$ ) x-suunnassa (mm)

$y$  = jäykistysseinän kiertokeskiön ( $kk$ ) etäisyys tason kiertokeskiöön ( $KK$ ) y-suunnassa (mm)

Kaavassa esiintyvä  $T_{xy}$  viittaa yksittäisen jäykisteosan vääntöjäykkyyteen. Suoralla jäykistävällä seinällä ei katsota olevan vääntöjäykkyyttä, mitä tarvitsee huomioida (vapaa vääntö), mutta jäykistävät mastot aiheuttavat joko estetyn väännön tai vapaan väännön ja estetyn väännön yhdistelmän. Kaavassa 16 esiintyvien termien  $k$  ja  $L$  tulolla voidaan arvioida raja-arvojen kautta, millainen vääntöta-paus on kyseessä. Päivöke (2012) on opinnäytetyössään avannut jäykistystornin vääntöjäykkyyden vaikutusta, josta aihetta voi tutkia tarkemmin. Kun  $kL > 10$  on kyseessä vapaa vääntö. Kun  $0,5 <$

$kL < 10$  on kyseessä vapaan väännön ja estetyin väännön yhdistelmä. Kun  $kL < 0,5$  on kyseessä estetty vääntö. (Päivöke 2012, 11.)

Vääntöjäykkyyden laskenta on monimutkainen differentiaalilaskennan prosessi. Erilaisia tapauksia kuormituksille ja poikkileikkaustilanteille on useita. Esimerkkinä väännön aiheuttaman kiertymän arvo  $\varphi$  rakenneosalle (avoin profiilimasto) voidaan laskea pistemäisessä kuormitustapauksessa korkeudella ( $L$ ) kaavan 20 mukaisesti (Päivöke 2012, 16).

$$\varphi(L) = \frac{M * (kL - \tanh * kL)}{EI_{\omega} * k^3} \quad (20)$$

missä

$\varphi(L)$  = kiertymä seinän korkeudella  $L$  (rad)

$M$  = epäkeskisyydestä aiheutuva momentti (Nmm)

$L$  = jäykistävän seinän korkeus (yleensä  $L=H$ ) (mm)

$k$  = parametri, joka kuvaa vapaan väännön vääntöjäykkyyden ja estetyin väännön käristymisjäykkyyden suhdetta ( $k = \sqrt{\frac{GI_v}{EI_{\omega}}}$ ) (ei yksikköä)

$\tanh$  = hyperbolinen tangentti

$EI_{\omega}$  = estetyin väännön käristymisjäykkyys, jossa  $E$  = betonin kimmomoduuli (N/mm<sup>2</sup>) ja  $I_{\omega}$  = käristymisjäyhyys (mm<sup>4</sup>)

$GI_v$  = vapaan väännön vääntöjäykkyys, jossa  $G$  = betonin liukumoduuli (N/mm<sup>2</sup>) ja  $I_v$  = vääntöneliömomentti (mm<sup>4</sup>)

Periaate vääntöjäykkyyden laskennassa on sama kuin suorien seinien jäykkyyden määrittämisessä, mutta siirtymän sijaan tarkastellaan kiertymää  $\varphi$  (jousivakion periaatteen mukaan). (Rakennusteollisuus 1995, 28.) Vääntöjäykkyyden  $T_{xy}$  arvo avoimelle profiilimastolle saadaan kaavasta 21 (Päivöke 2012, 31):

$$T_{xy} = \frac{EI_{\omega} * k^3}{kL - \tanh * kL} \quad (21)$$

missä

$T_{xy}$  = Jäykistävän osan vääntöjäykkyys (Nmm/rad)

$L$  = Jäykistävän seinän korkeus (yleensä  $L=H$ ) (mm)

$\tanh$  = Hyperbolinen tangentti

$k$  = parametri, joka kuvaa vapaan väännön vääntöjäykkyyden ja estetyin väännön käristymisjäykkyyden suhdetta ( $k = \sqrt{\frac{GI_v}{EI_{\omega}}}$ ) (ei yksikköä)

$EI_{\omega}$  = estetyin väännön käristymisjäykkyys, jossa  $E$  = betonin kimmomoduuli (N/mm<sup>2</sup>) ja  $I_{\omega}$  = käristymisjäyhyys (mm<sup>4</sup>)

$GI_v$  = vapaan väännön vääntöjäykkyys, jossa  $G$  = betonin liukumoduuli (N/mm<sup>2</sup>) ja  $I_v$  = vääntöneliömomentti (mm<sup>4</sup>)

Vääntöjäykkyys on pieni jäykistemastoilla, joiden poikkileikkaus on suora seinä tai koostuu vain kahdesta seinäosasta (T- tai L-poikkileikkaus). Vääntöjäykkyys tulee huomioida useamman kuin kahden

seinän tapauksessa (I-, U, ja neliöpoikkileikkauksissa). Kaksois-symmetrisillä jäykistemastojen poikkileikkauksilla kuormien vaikutuspiste on kappaleen painopisteessä. Epäsymmetrisillä jäykistemastoilla kuorma vaikuttaa kiertokeskiössä (*kk*).

Todetaan kaavoissa esiintyvistä vääntöjäykkyyden arvoista, että kerrostalokohteissa vääntöjäykkyyden merkitys on häviävän pieni, eikä sitä kannata huomioida. Eurokoodi (liite I) ei esimerkiksi ota mitään kantaa vääntöjäykkyyden huomioimiseen alle 25 kerroksisissa rakennuksissa (EN1992-1-1 2015, 214). Mastojäykisteisissä toispuoleisissa rungoissa sekä korkeissa rakennuksissa menetelmän käyttöä kannattaa harkita. Lisäksi todetaan, että halkeilleessa betonissa vääntöjäykkyyden arvo muuttuu edelleen ja sen huomioiminen analyttisesti on haastavaa. Päivökkeen (2012, 37–51) Opinnäytetyössä on käsitelty erittäin epäsymmetristä runkojärjestelmää, ja siinäkin voidaan tuloksista todeta väännön vaikutuksen kuormituksen jakautumiseen olevan merkittävä vain, jos jäykistäviä seinäjä on vähän ja niiden jäykkyys on hyvin pieni. Väännön tarkempi tarkastelu rajataan ulos tästä opinnäytetyöstä, mutta sitä haluttiin avata ilmiönä, koska se esiintyy lähteissä ja voi aiheuttaa hämmennystä jäykistyslaskennan kannalta.

### 3.5 Vaakavoimien osuuden jäykistäville seinälinjoille

Kun siirtymien  $v_x$ ,  $v_y$  ja kiertymän  $\varphi$  arvot on ratkaistu, voidaan jäykisteseiniin kohdistuva kuormitus ratkaista niiden avulla. Käytännössä epäkeskisyydestä aiheutuva momentti joko lisää tai vähentää seinään kohdistuvia kuormia. Seinien vaakasuuntainen kuormitus  $Q$  voidaan ratkaista kaavojen 22 ja 23 mukaan. Jäykistemastoon kohdistuu lisäksi vääntömomenttia kaavan 24 mukaan, mikäli vääntöjäykkyys jäykistemastolle huomioidaan laskennassa (ei-tavanomaiset kerrostalokohteet). (Rakennusteollisuus 1995, 28.)

$$Q_x = k_x * v_x - k_x * y * \varphi \quad (22)$$

missä

$Q_x$  = seinään aiheutuva rasisus vaakavoimista X-suuntaan, kun epäkeskisyyttä huomioitu (N)

$v_x$  = tason siirtymä X-suuntaan (mm)

$k_x$  = x-suuntaisen seinän jäykkyys (N/mm)

$y$  = jäykistysseinän kiertokeskiön (*kk*) etäisyys tason kiertokeskiöön (*KK*) Y-suunnassa (mm)

$\varphi$  = kiertymä (rad)

$$Q_y = k_y * v_y - k_y * x * \varphi \quad (23)$$

missä

$Q_y$  = seinään aiheutuva rasisus vaakavoimista Y-suuntaan, kun epäkeskisyyttä huomioitu (N)

$v_y$  = tason siirtymä Y-suuntaan (mm)

$k_y$  = y-suuntaisen seinän jäykkyys (N/mm)

$x$  = jäykistysseinän kiertokeskiön (*kk*) etäisyys tason kiertokeskiöön (*KK*) X-suunnassa (mm)

$\varphi$  = kiertymä (rad)

$$M_{xy} = T_{xy} * \varphi \quad (24)$$

missä

$M_{xy}$  = jäykistemastoon kohdistuva vääntömomentti (Nmm)

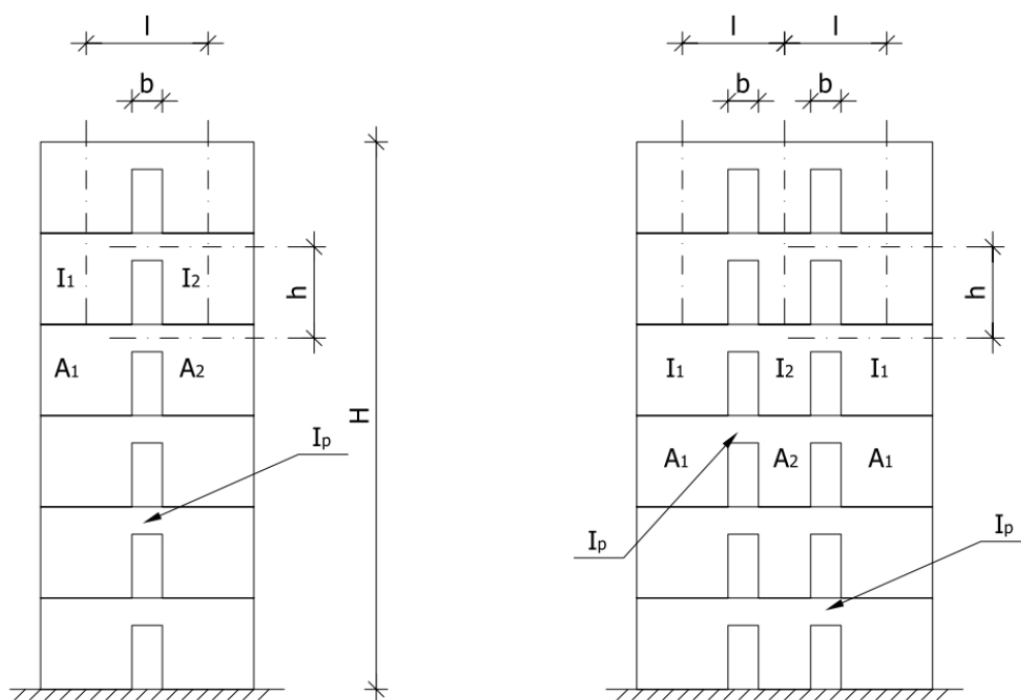
$T_{xy}$  = jäykistävän osan vääntöjäykkyys (Nmm/rad)

$\varphi$  = kiertymä (rad)

Monikerroksisessa rakennuksessa, jossa kuormitus tulee rakennukseen usealta kerrokselta, pitäisi jäykistys huomioida kerroksittain. Edellä mainitut kaavat huomioivat jäykkyyden siten, että vain yksi pistekuorma vaikuttaa tarkasteltavan seinän ja rakennuksen yläpäässä. Jakauma voi siten muuttua alemmissa kerroksissa, joissa seinien määrä ja pituuden ja korkeuden suhde muuttuvat ja leikkausjäykkyyden osuus kasvaa. Tämä tuo laskentaan oman haasteensa ja on työlästä.

### 3.6 Seinän jäykkyyden heikennystekijät

Edellisessä osiossa on tarkasteltu suoraa ehjää seinää. Seinän jäykkyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat lisäksi halkeilu ja mahdolliset aukot (ovet ja ikkunat). Halkeilun vaikutuksiin ei tässä työssä perehdytä, vaan seinien voimasuureet määritetään kimmoteorian mukaisesti. Aukollisten seinien jäykkyyden arviointi voi olla työlästä ja käsinlaskenta-menetelmillä vain suuntaa antavaa. Insinööriyössä "Rakennusta jäykistävän aukollisen seinälevyn jäykkyys" (Savolainen 2012) on käsitelty useita tapoja seinän jäykkyyden arviointiin, kuten: Rosman'in menetelmä, Lewickin menetelmä sekä ekvivalentin jäykkyyden menetelmä. Rosmanin menetelmää on käsitelty myös Rakennusteollisuuden (1995, 41–44) lähteessä. Kuvassa 19 on havainnollistettu Rosman'in menetelmää.

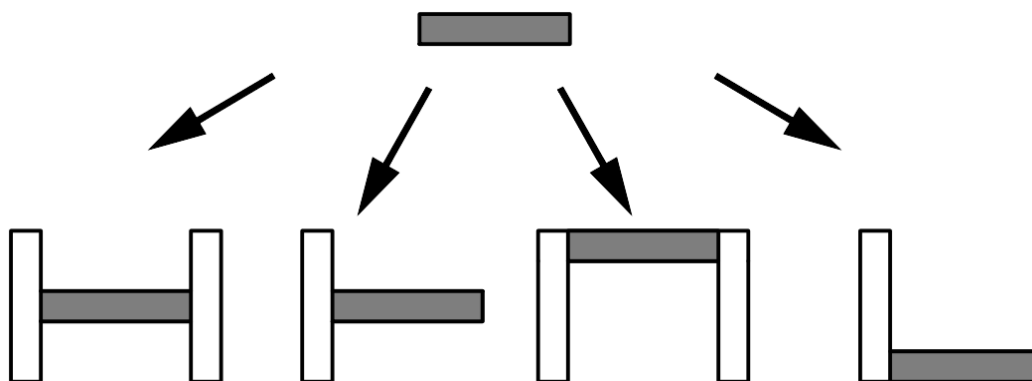


KUVA 19. Rosman'in menetelmän mukaisesti jaetut aukkoseinän pinta-alat ja jäyhyysmomentit (Savolainen 2012, 16, joka mukailee lähdeettä Rakennusteollisuus 1995, 42).

Savolaisen (2012) insinööriyössä on tehty vertailulaskelmia laskentamallin kanssa kullakin menetelmällä. Työn tulokset osoittavat, että ekvivalentti jäykkyyden menetelmä oli tarkastelussa lähimpänä FEM-laskentamallin tuloksia. Seuraavaksi tarkin oli Rosman'in menetelmä ja Lewickin menetelmän tulokset osoittautuivat liian paljon jäykkyyttä heikentäviksi, koska se ei soveltunut staattiseen malliin. Kaikkien menetelmien tuloksista voidaan todeta, että virheet ovat kymmeniä prosentteja jäykkyyden määrittämisessä riippuen tarkastelukorkeudesta. (Savolainen 2012, 36–37.) Seinän jäykkyyden heikennyksen tutkiminen rajataan pois tästä työstä, mutta ilmiö on syytä tiedostaa verratessa käsineläskentää esimerkiksi FEM-laskentamalleihin.

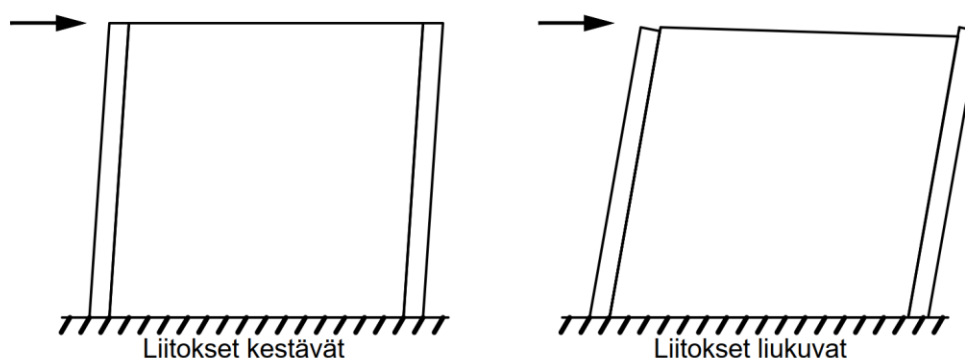
### 3.7 Seinän jäykkyyttä lisäävät tekijät

Seinälinjat usein risteävät viereisiin seiniin. Kun liitosvoimat mitoitetaan kestävästi, voidaan poikkileikkauksen laskennallista jäykkyyttä lisätä. Tällöin poikkileikkauksesta muodostuu esimerkiksi T-, L-, I- tai U-poikkileikkauksia kuvan 20 mukaisesti. (Rakennusteollisuus 1995, 32–24.)



KUVA 20. Seinän liittyminen risteävään seinään ja siitä muodostuva poikkileikkaus (Laitinen 2024)

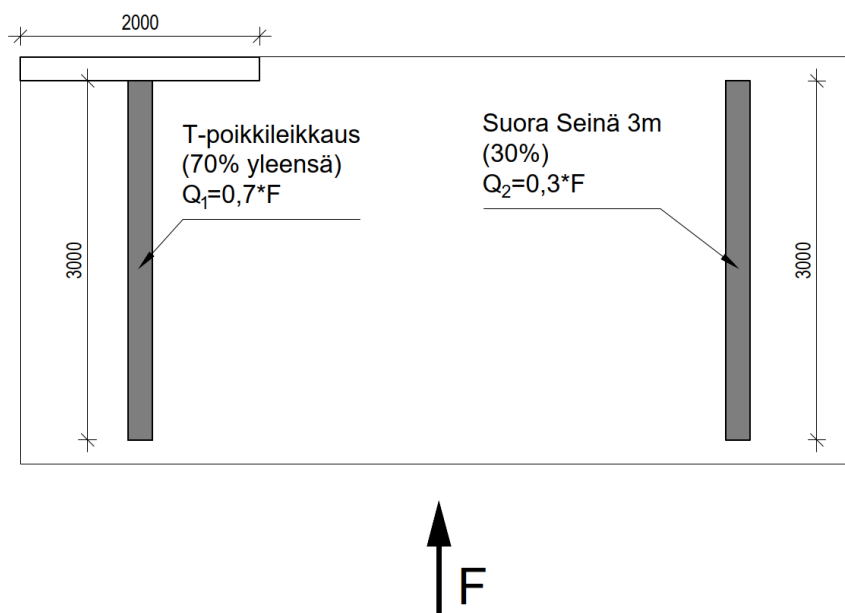
Seinän taivutusjäykkyyden määrittäminen on näille seinien yhdistelmille suoraviivaista, kun muuttunut jäyhyysmomentti voidaan ratkaista muodostuneen poikkileikkauksen mukaan. Leikkausjäykkyyden määrittäminen on työläämpää. Liitteessä 1 on esitetty Rakennusteollisuuden (1995, 32–34) lähteen mukaisia arvoja  $\kappa$ -kertoimelle. Kun usean seinän yhdistelmiä käytetään, on risteävien seinien saumakohtat mitoitettava kestävästi rajapintaan muodostuva leikkausvoima. Pystysauman leikkausvoima tulee ratkaista ja pystysauman mitoitus tehdään yleensä vaijerilenkeille. Jos liitokset liukuvat, on kokonaisjäykkyys epämääräinen (kuva 21).



KUVA 21. Risteävän seinän pystysauman toiminta (Laitinen 2024)

Kun pystysauman riittävä kestävyys pystytään todentamaan, voidaan uumaseinän jäykkyyttä arvioida esimerkiksi vertaamalla suoran seinän ja yhdistelmäseinän jäykkyyden suhdetta.

Verrataan esimerkkinä 3 metriä pitkää seinää, joka liittyy risteävään 2 metriä pitkään seinään sen keskeltä (T-poikkileikkaus). Suoran seinän jäykkyys määritetään kaavan 7 mukaisesti. T-poikkileikkauksen jäykkyyden määrittämisessä käytetään muutettua  $\kappa$ -kerrointa liitteen 1 mukaisesti, sekä jähyysmomentti ja pinta-ala määritetään T-poikkileikkauksesta. Kuvassa 22 on esitetty kuormitustilanne 5–10 kerroksissa ja taulukossa 2 on esitetty seinien kuormitusosuudet.



KUVA 22. Suoran seinän ja T-poikkileikkauksen jäykkyyksien vertailun kuormitustilanne sekä kuormitusjakauma 5–10 kerroksissa (Laitinen 2024)

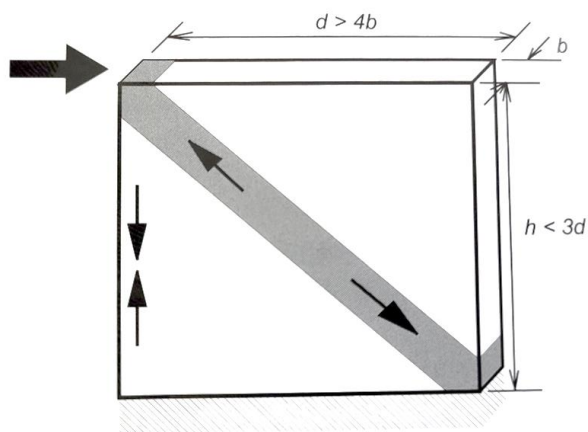
TAULUKKO 2. Suoran seinän ja T-poikkileikkauksen jäykkyyksien vertailutaulukko (Laitinen 2024).

krs	H (m)	Kokonaisjäykkyys			Kuormaosuudet	
		$k_{3m}$	$k_{T-PL}$	$\Sigma k$	$k_{3m} \%$	$k_{T-PL} \%$
1krs	3	0,955	1,452	2,407	40 %	60 %
2krs	6	0,174	0,342	0,516	34 %	66 %
3krs	9	0,056	0,121	0,178	32 %	68 %
4krs	12	0,025	0,055	0,080	31 %	69 %
5krs	15	0,013	0,029	0,042	30 %	70 %
6krs	18	0,007	0,017	0,025	30 %	70 %
7krs	21	0,005	0,011	0,016	30 %	70 %
8krs	24	0,003	0,007	0,011	30 %	70 %
9krs	27	0,002	0,005	0,007	30 %	70 %
10krs	30	0,002	0,004	0,005	30 %	70 %

Tuloksista huomataan, että alimpien viiden kerroksen jälkeen kuormaosuudet jakautuvat suoraan jähyysmomentin ( $I$ ) suhteessa. T-poikkileikkauksen taivutusjäykkyys aiheuttaa kuormien jakautumiseen merkittävän eron ja tämä on syytä huomioida laskelmissa. T-poikkileikkauksen risteyskohdan pystyliitos (yleensä vaijerilenkit) tulee mitoittaa kestävästi pystysauman leikkausrasitus, kun T-poikkileikkauksen jäykkyyttä käytetään laskelmissa. Liukuva ja myötävä liitos aiheuttaisi kuorman jakautumista isommalla osuudella suoralle seinälle.

## 4 SEINÄN RASITUKSET

Jäykistäviä seiniä kutsutaan leikkausseiniksi ja mastoseiniksi. Seinät ovat jäykkiä vaakasiirtymien suhteen. Seinän toimintaperiaate yläreunaan tulevaa rasitusta vastaan on esitetty kuvassa 23. Puristusvyöhyke vie kuorman alaspäin kohti tukea samalla muodostaen vetokomponentin reunaan. Sisäiset voimat saatetaan tasapainoon betonin puristusominaisuuksien ja raudoituksen veto-ominaisuuksien avulla. Halkeilematon betoni kestää vetovoimia lievästi kuormitetuilla seinillä, jolloin raudoitusta ei välttämättä tarvita. (Leskelä 2008, 157.)

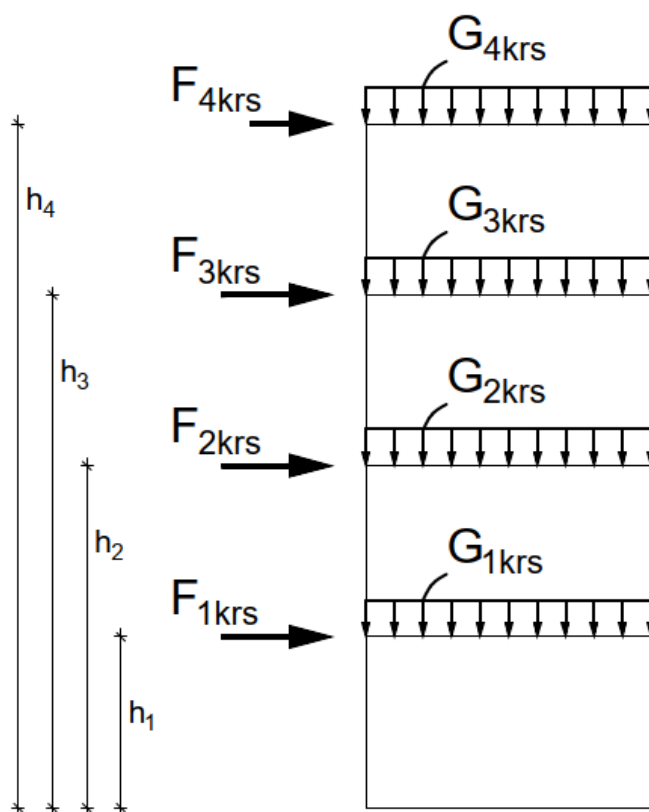


KUVA 23. Seinään sisäiset voimasuureet yläreunan vaakavoimasta (Leskelä 2008, 157)

### 4.1 Seinän rasitukset ja epäkeskisyyden rajoittaminen

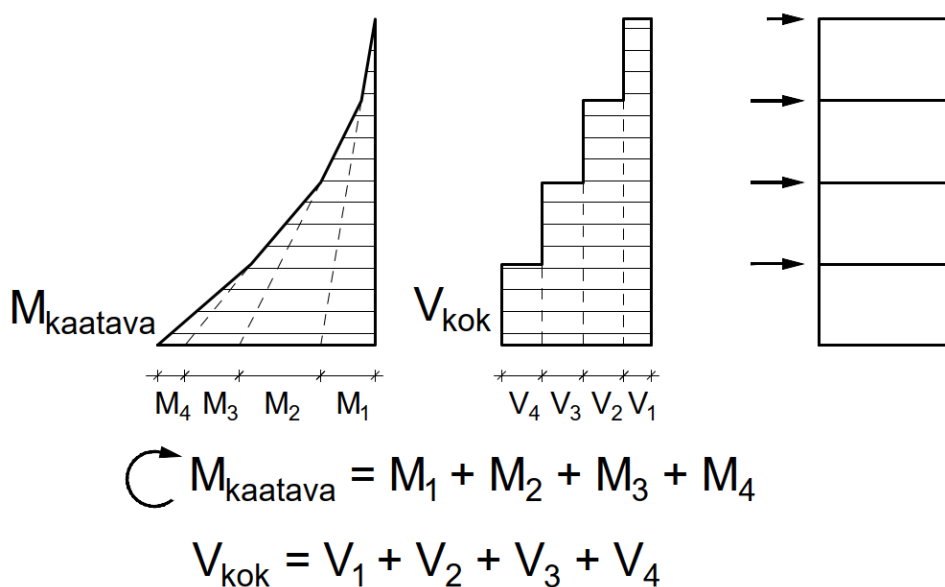
Vaakavoimien resultantti ratkaistaan kerroksittain ja resultanttivoima jaetaan seinälinjoihin jäykkyyksien suhteessa luvun 3 kaavojen mukaan. Seinälinjaan kohdistuvien vaakavoimien avulla voidaan ratkaista seinään kohdistuvat sisäiset rasitukset. Vaakavoimat pyrkivät kaatamaan jäykistävän seinän. Seinän ja välipohjan omapaino pyrkii pitämään rakennuksen tasapainossa vastustaen kaatumista. Stabiiloivina kuormina hyväksytään vain rakenteiden omapaino, mitkä kerrotaan stabiliteettilaskelmissa 0,9-kertoimella. (Rakennusteollisuus 1995, 35–36.) Kuvassa 24 havainnoidaan kaatumisvarmuuteen vaikuttavia kuormia.





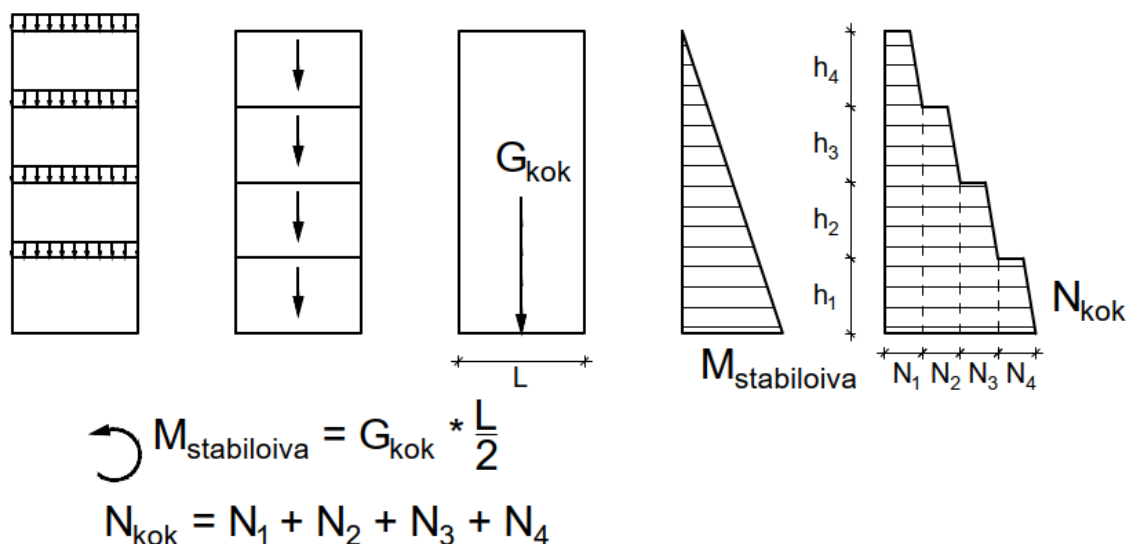
KUVA 24. Kaatumisvarmuuteen ja sisäisiin voimiin vaikuttavat kuormitukset (Laitinen 2024)

Vaakasuurtaiset voimat aiheuttavat rakenteeseen kaatavan momentin sekä leikkausvoiman. Jokainen kerros lisää kaatavaa momenttia vaakavoiman ja momenttivarren tulosta ja anturatasossa oleva kaatava momentti summataan kerroksittain yhteen. Leikkausvoima summautuu kumulatiivisesti kerroksittain suoraan vaakavoiman suuruudella. Kuvassa 25 on havainnoitu vaakavoimista aiheutuvia rasituksia ja niiden kuvaajia:



KUVA 25. Vaakavoimien rasitukset (Laitinen 2024, muokattu alkuperäislähteestä Elementtisuunnittelu 2010, 41)

Jäykisteseinän pystyssä pitävät kuormat aiheuttavat rakennetta stabiloivan momentin. Lisäksi pysty-kuormat aiheuttavat seiniin normaalivoiman. Kuvassa 26 on havainnoinut pystykuormista aiheutuvaa stabiloivaa momenttia ja normaalivoimaa sekä niiden kuvaajia. Normaalivoiman kuvaajassa välipohjilta tuleva kuorma lisää kerralla normaalivoiman määrää ja seinän omapaino lineaarisesti seinän korkeuden suhteen. Jäykällä kappaleella momentti voidaan laskea pystykuormien kokonaisresultanttivoiman ja seinän leveyden tulona.



KUVA 26. Pystyvoimien rasitukset (Laitinen 2024)

Kaatumisvarmuus tarkastetaan staattisen tasapainon rajatilassa (EQU) ja se saavutetaan, kun osoitetaan, että tasapainoa heikentävät kuormat eivät ole suuremmat, kuin tasapainoa parantavat kuormat. Eurokoodin mukainen kaava ulkoisten rasitusten suhteen voidaan esittää tässä tapauksessa kaatavan ja stabiloivan momentin muodossa edellä esitettyjen kuormista aiheutuvien momenttien suhteen (kaava 25) (EN1990: Rakenteiden suunnittelun perusteet 2006, 78):

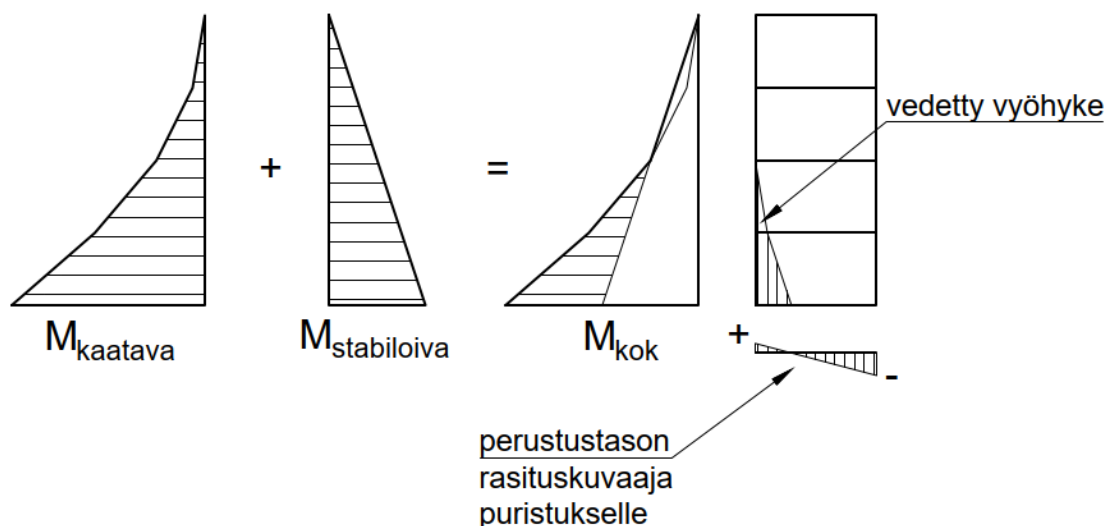
$$M_{d,dst} \leq M_{d,std} \quad (25)$$

missä

$M_{d,dst}$  = kaatava, tasapainoa heikentävä momentti (Nmm)

$M_{d,std}$  = stabiloiva, Tasapainoa parantava momentti (Nmm)

Huomioidaan tässä kuormitusyhdistelyssä, että omapaino on edullista kuormaa ja kerrotaan 0,9 kertoimella (Elementtisuunnittelu 2010, 42). Mikäli kaatava momentti on suurempi, kuin pystyssä pitävä momentti, on kaatumisvakavuuden varmistamiseksi seinälinja sidottava perustuksiin ja perustukset mitoitettava siten, että anturan kaatumisvarmuus on riittävä. Tämä työ rajataan tarkastelemaan pelkästään riittävää sidontavoimaa perustuksiin, eikä perustuksien mitoitusta oteta huomioon. Myös osaseinien liitoksiin saattaa muodostua vetäviä voimia kerroksittain, jotka täytyy hallita pultein ja koko pulttilinja viedä tarvittaessa ylhäältä alas perustuksiin. Kuvassa 27 on havainnollistettu kokonaismomenttia ja sen aiheuttamaa rasituskuvaajaa, kun kaatavan kuormat aiheuttavat vedetyn tilan rakenteeseen:



KUVA 27. Kokonaismomentti ja vedetty alue seinälinjalla (Laitinen 2024)

Rakennusteollisuuden (1995, 54) lähteessä on kuvattu likimääräistä oletusta, että vetojäännityksiä ei tule, jos momentista aiheutuva epäkeskisyyden ei mene liian reunaan (ns. sydänalueen raja). Epäkeskisyyden raja-arvo on esitetty kaavassa 26.

$$e_d \leq \frac{d}{3} \quad (26)$$

missä

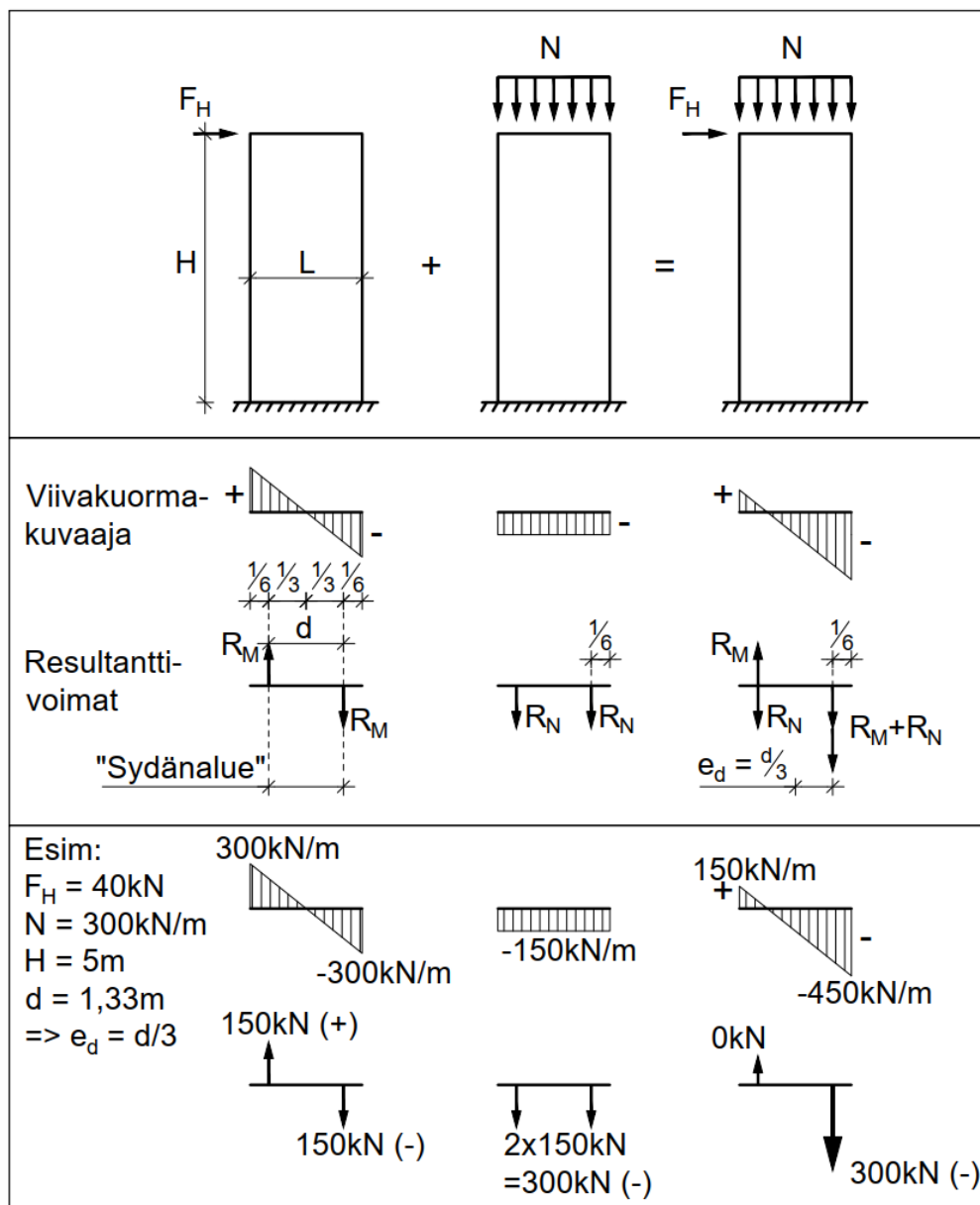
$$e_d = \frac{M_{d,dst}}{N_{d,std}} = \text{epäkeskisyyden (mm)}$$

$M_{d,dst}$  = kaatava, tasapainoa heikentävä momentti (Nmm)

$N_{d,std}$  = stabiloiva normaalivoima (N)

$d$  = poikkileikkauksen tehollinen korkeus (seinän tehollinen leveys) (mm)

Kuvassa 28 on avattu statiikan kautta kimmoteorian mukaista tukireaktion jakaumaa seinän alapäässä. Asetetaan tuet kolmiokuorman resultantin kohdalle  $1/3$  pisteeseen ja samoin normaalivoiman resultantti samoihin pisteisiin molempiin reunoihin. Kun momentin ja normaalivoiman suhde on sellainen, että epäkeskisyyden rajoittuu arvoon  $d/3$  (sydänalue) tehollisesta leveydestä, ei vetopuolen resultanttivoimaa ole. Voidaan todeta, että rakenne ei kaadu tässä tapauksessa, kun vetävää resultanttivoimaa ei muodostu.



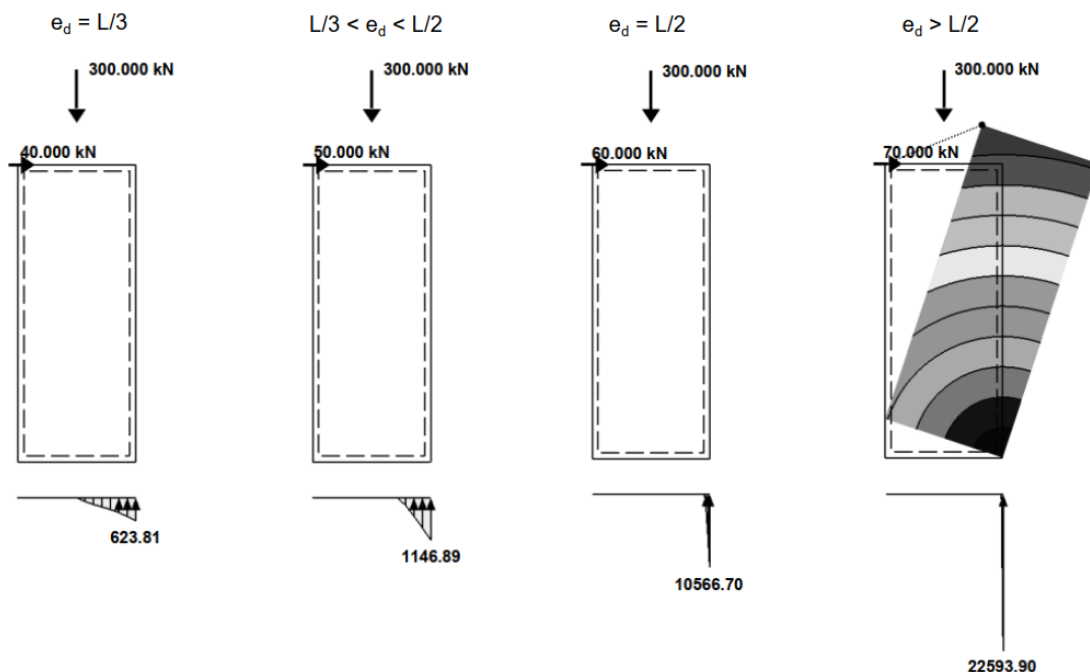
KUVA 28. Seinän epäkeskisyyden rajoittaminen  $d/3$  arvoon, jolloin rakenteessa ei katsota olevan vetokomponenttia (Laitinen 2024).

Kuvassa 28 olevan esimerkin arvot on asetettu siten, että 2 metriä leveään ja 5 metriä korkeaan seinään aiheutuisi kaavan mukaan epäkeskisyyttä  $d/3$ . Kun seinän alaosa on viivatuki, näyttäisi seinä menevän vedolle reunastaan. Tämä ei vielä tarkoita kaatumisvarmuuden menetystä, vaan todetaan, että resultanttivoima ylöspäin rajoittuu silloin arvoon 0, eikä vetorasitusta likimäärin katsota olevan. (Rakennusteollisuus 1995, 54).

#### 4.2 Vedetyn seinän voimasuureet

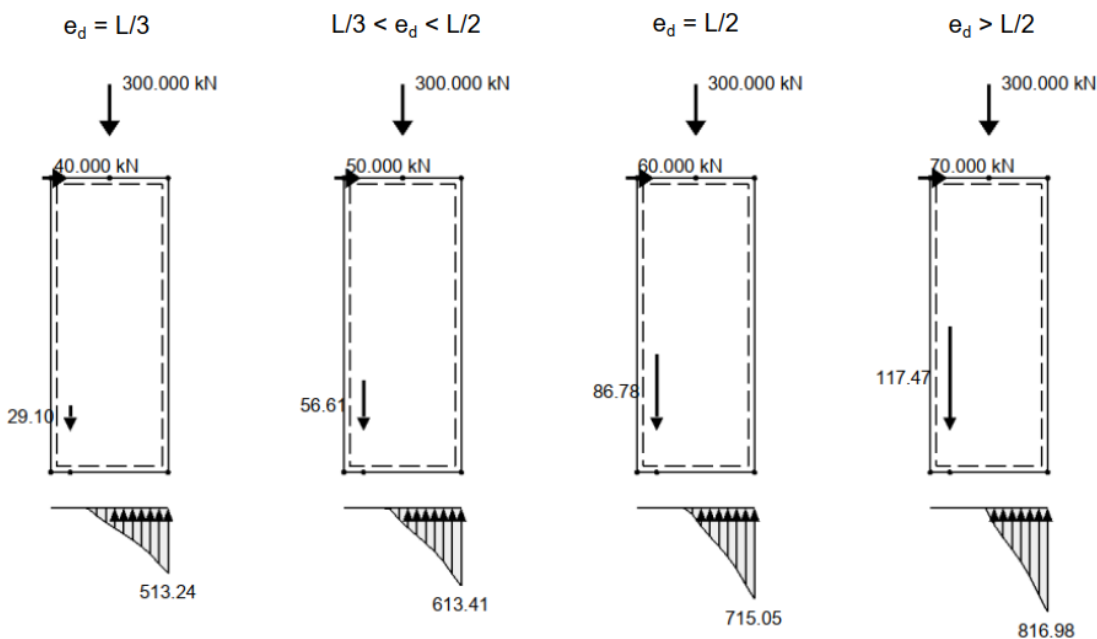
Jäykän kappaleen kaatumisessa kuvan 27 jännitys jakauma tai kuvan 28 viivatuen tukireaktiot ovat virheellisiä, koska viivatuki ei ota laskennallisesti vastaan vetoa ilman vetopuolelle laitettua pulttia. Kun seinän reuna menee vedolle, ei se lähde nousemaan, vaan kaatumisvarmuutta on vielä jäykänä kappaleena. Kuvassa 29 on RFEM-ohjelmalla tehty laskentavertailu, jossa epäkeskisyyttä ylittää raja-arvon  $L/3$  ( $L$  = jäykän kappaleen leveys). Tukireaktion toiminta on rajoitettu siten, että vetopuolelle ei voi syntyä tukireaktiota. Kuvaajista nähdään, että kun vetopuolen tukireaktiota ei synny,

kasvaa puristuspuolen rasitus. Mitä suurempi epäkeskisyydestä tehdään, sitä pienemmäksi puristus-  
ala käy. Voima reunassa kasvaa singulaariseksi raja-arvon  $L/2$  lähellä. Ylityksen jälkeen stabiileetti  
menetetään (jäykän kappaleen kaatuminen).



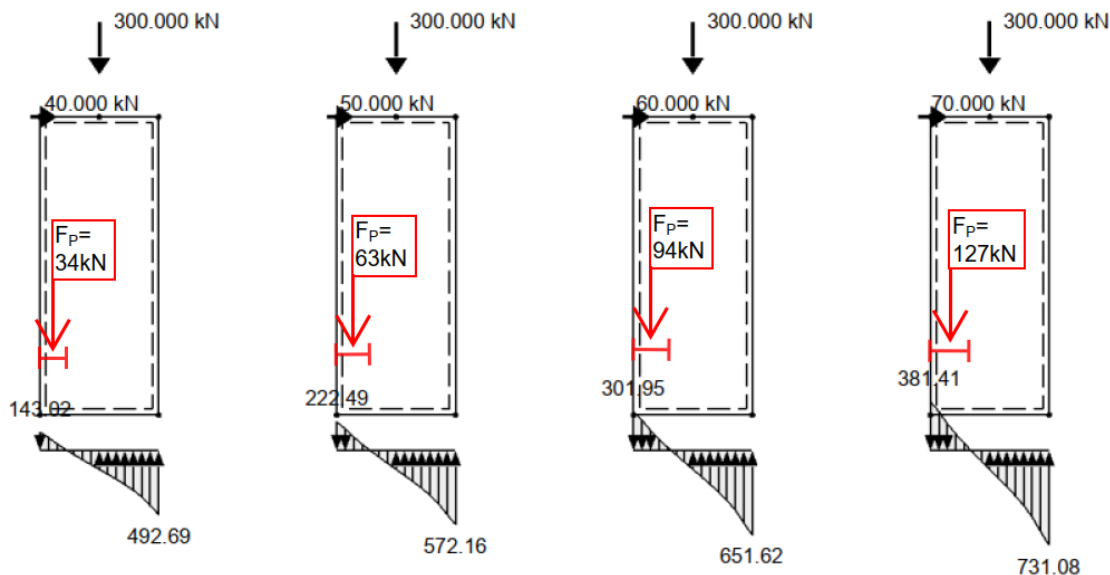
KUVA 29. Tukireaktion toiminta, kun  $e_d > L/3$  ja vetopuolelle ei synny tukireaktiota (Laitinen 2024)

Kun seinän voimat menevät vedolle, on rakenne ankkuroitava perustukseen. Jäykän kappaleen lä-  
hestymistapaa ei voida sellaisenaan hyödyntää, koska reunajännitys kasvaa liian suureksi. Tästä  
syytä  $L/3$  on hyvä raja-arvo, jonka ylittyessä pulttia käytetään. Sen ylittyessä pultti muodostaa sei-  
nään vetopuolen tukireaktion, eivätkä jännitykset pääse nousemaan liian suuriksi. Kun vastaaviin  
seiniin asetetaan tukipiste pultin kohdalle (resultanttipisteeseen), näytävät tukireaktiot kuvan 30  
mukaisilta.



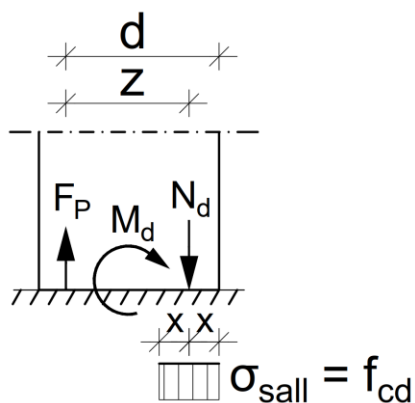
KUVA 30. Tukireaktion toiminta, kun  $e_d > L/3$  ja pultti lisätty vetopuolelle (Laitinen 2024)

Tukireaktioiden suuruus vetopuolella on tällöin likimäärin sama, kuin jos viivatuelle sallisi vetopuolen tukireaktion. Pultin vetovoimaan summataan koko vetopuolen tukireaktio vetoalueen pituudelta. Ideaalitalanteessa pultti asetetaan silloin kolmiokuvaajan resultantin kohdalle  $1/3$  pisteeseen reunasta. Resultanttivoimat on esitetty kuvassa 31.



KUVA 31. Tukireaktion toiminta, kun  $e_d > L/3$  ja tukireaktio on vetopuolella (Laitinen 2024).

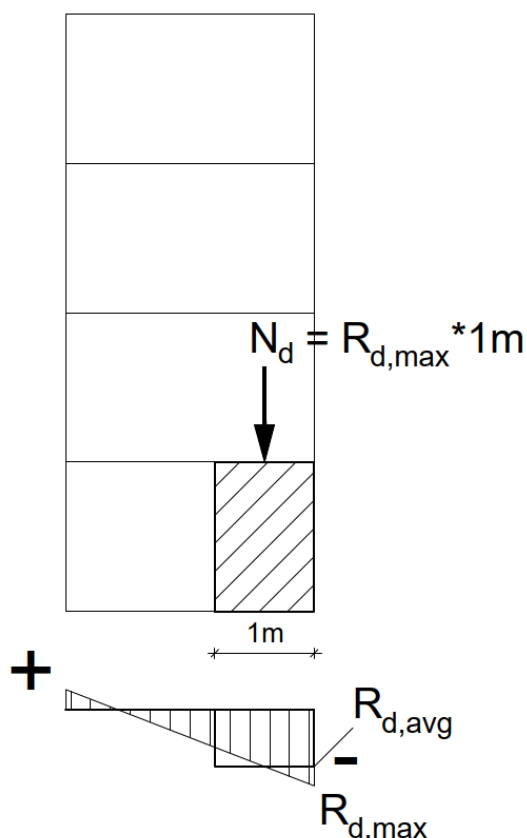
Edellä mainittu lähestymistapa edustaa kimmoteorian mukaista laskentaan. Elementtisuunnittelun (2010, 43) lähde antaa kuvan plastisuusteorian mukaisesta menettelystä, jossa jännitys jakauma puristuspuolella on tasoitettu. Tätä menettelytapaa ei ole kuitenkaan avattu lähteessä. Seinää voidaan ajatella palkkina ja jännitys jakauma tasataan puristuspuolella tasaiseksi (kuten palkin tapauksessa). Vastaavasti vetopuolella voimapari muodostuu pultin kohdalle, jossa vetoteräs sijaitsee. Voimasuureiden mitoittaminen voidaan tehdä palkin kaavoilla, mutta lopputulokseen pääseminen ei ole yhtä yksinkertaista, kuin palkin tapauksessa. Menetelmä on työläs ja vaatii osaamista mm. integrointiin poikkileikkauksen yli, josta ratkaistaan normaalivoiman sijainti suhteessa pulttiin. (Swecon sisäinen koulutus, 2017.) Kuvassa 32 sallitaan jännitystaso betonin puristuslujuudelle. Tämä ei kuitenkaan ole hyvä tapa, koska seinän hoikkuus voi rajoittaa sallittua puristusjännitystä, kun seinä mitoitetaan nurjahdukselle (ks. kappale 4.3).



KUVA 32. Plastisuusteorian mukainen mitoitusmenettely seinän voimasuureiden ratkaisemiseen (Laitinen 2024, muokattu alkuperäislähteestä Elementtisuunnittelu 2010, 43).

#### 4.3 Seinälinjan rasitus normaalivoimalle

Seinän puristuspuolen reuna mitoitetaan normaalivoimalle. Varmalla puolella oleva (kimmoteorian mukainen) lähestymistapa on käyttää puristuspuolen viivatukireaktion huippuarvoa ( $R_{d,max}$ ) mitoituksessa (Leskelä 2008, 426). Koska seinä mitoitetaan yleensä 1 metrin mittaisena osana, voi suunnittelija pitää perusteltuna tasoittaa kolmion muotoinen tukireaktio kuvan 33 mukaisesti ( $R_{d,avg}$ ). Jäykistävästä seinälinjasta tarkastetaan eniten puristettu yhden metrin levyinen seinäosa. Seinän mitoittamista nurjahdukselle ei käsitellä tässä työssä.



KUVA 33. Seinän normaalivoiman määrittäminen tukireaktion avulla seinän nurjahdusmitoitusta varten (Laitinen 2024)

#### 4.4 Seinälinjan rasitus leikkausvoimalle

Eurokoodissa (EN19921-1, 84; 188–190) annetaan ohjeistus leikkausraudoituksen mitoittamiseen luvussa 6.2., mutta ohjeistus leikkausraudoittamattomasta poikkileikkauksesta seinille on esitetty luvussa 12.6.3 (kun haurasmurtumisen mahdollisuus voidaan rajata pois). Seuraavat kaavat 27–34 perustuvat tähän Eurokoodin kohtaan. Leikkausraudoituksen tarpeellisuutta arvioidaan leikkausjännityksen ja betonin yhdistetyn puristus ja leikkausmitoitustilanteiden kautta. Mitoitusehto leikkauskestävyydelle esitetään kaavassa 27:

$$\tau_{cp} \leq f_{cvd} \quad (27)$$

missä

$\tau_{cp}$  = poikkileikkaukseen kohdistuva leikkausjännitys ( $N/mm^2$ )

$f_{cvd}$  = yhdistetty mitoituslujuus leikkauksen ja puristuksen kuormittamalle betonille ( $N/mm^2$ )

Poikkileikkauksessa olevat jännitykset määritetään ulkoisista kuormista. Leikkausjännitys määritetään kaavan 28 mukaan ja puristusjännitys kaavan 29 mukaan:

$$\tau_{cp} = \frac{k * V_{Ed}}{A_{cc}} \quad (28)$$

missä

$\tau_{cp}$  = poikkileikkaukseen kohdistuva leikkausjännitys (N/mm<sup>2</sup>)

$k$  = kerroin, jonka suositusarvo 1,5 (kansallisessa liitteessä ei ole mainittu tätä kerrointa opinnäytetyötä tehtäessä) (ei yksikköä)

$V_{Ed}$  = seinään kohdistuva leikkausvoima (N)

$A_{cc}$  = seinäpoikkileikkauksen tehollinen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_{cc}} \quad (29)$$

missä

$\sigma_{cp}$  = poikkileikkaukseen kohdistuva puristusjännitys (N/mm<sup>2</sup>)

$N_{Ed}$  = seinään kohdistuva normaalivoima (N)

$A_{cc}$  = seinäpoikkileikkauksen tehollinen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

Puristusjännityksen raja-arvosta riippuu, miten  $f_{cvd}$  määritetään. Raja-arvo on esitetty kaavassa 30:

$$\sigma_{c,lim} = f_{cd,pl} - 2 * \sqrt{f_{ctd,pl} * (f_{ctd,pl} + f_{cd,pl})} \quad (30)$$

missä

$\sigma_{c,lim}$  = puristusjännityksen raja-arvo (N/mm<sup>2</sup>)

$f_{cd,pl}$  = puristuskestävyyden mitoituslujuus (N/mm<sup>2</sup>)

$f_{ctd,pl}$  = vedetyn betonin mitoituslujuus (N/mm<sup>2</sup>)

Vetokestävyyden mitoituslujuus määritetään kaavan 31 mukaisesti ja puristuslujuuden mitoitusarvo kaavan 32 mukaisesti:

$$f_{ctd,pl} = \alpha_{ct,pl} \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_C} \quad (31)$$

missä

$f_{ctd,pl}$  = vedetyn betonin mitoituslujuus (N/mm<sup>2</sup>)

$\alpha_{ct,pl}$  = vetolujuuden kerroin raudoittamattomalle betonille [kansallisessa liitteessä 0,6 (viitattu 3/2024)] (ei yksikköä)

$f_{ctk,0,05}$  = betonin ominaisvetolujuus (N/mm<sup>2</sup>)

$\gamma_C$  = betonin materiaaliosavarmuuskerroin (-)



$$f_{cd,pl} = \alpha_{cc,pl} \frac{f_{ck}}{\gamma_C} \quad (32)$$

missä

$f_{cd,pl}$  = puristetun betonin mitoituslujuus (N/mm<sup>2</sup>)

$\alpha_{cc,pl}$  = puristuslujuuden kerroin raudoittamattomalle betonille [kansallisessa liitteessä 0,7 (viitattu 3/2024)] (-)

$f_{ck}$  = betonin ominaispuristuslujuus (N/mm<sup>2</sup>)

$\gamma_C$  = betonin materiaaliosavarmuuskerroin (-)

Leikkauksen ja puristuksen kuormittaman betonin mitoituslujuus  $f_{cvd}$  määritetään kaavalla 33 tai 34 riippuen raja-arvosta  $\sigma_{c,lim}$  ja vallitsevasta puristusjännityksestä  $\sigma_{cp}$ :

$$f_{cvd} = \sqrt{f_{ctd,pl}^2 + \sigma_{cp} * f_{ctd,pl}} \quad ; \text{ kun } \sigma_{cp} \leq \sigma_{c,lim} \quad (33)$$

$$f_{cvd} = \sqrt{f_{ctd,pl}^2 + \sigma_{cp} * f_{ctd,pl} - \left(\frac{\sigma_{cp} - \sigma_{c,lim}}{2}\right)^2} \quad ; \text{ kun } \sigma_{cp} > \sigma_{c,lim} \quad (34)$$

missä

$f_{cvd}$  = Yhdistetty mitoituslujuus leikkauksen ja puristuksen kuormittamalle betonille (N/mm<sup>2</sup>)

$f_{ctd,pl}$  = vedetyn betonin mitoituslujuus (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{cp}$  = poikkileikkaukseen kohdistuva puristusjännitys (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{c,lim}$  = puristusjännityksen raja-arvo (N/mm<sup>2</sup>)

Mikäli kaavojen ehdot eivät toteudu eli leikkausjännitys on suurempi, kuin puristuksen ja leikkauksen mitoituslujuus, on seinään määritettävä leikkausraudoitus.

#### 4.5 Seinälinjan pystysaumojen rasitukset

Pitkät seinälinjat koostuvat usein monista elementeistä ja pystysaumoja muodostuu rakenneosien välille. Pystysaumamat muodostuvat joko suoran seinän tapauksissa elementtijaon mukaisesti sauma-kohtiin tai poikkiseinän liitoskohtaan. Pystysauma toteutetaan pääsääntöisesti vaijerilenkein ja kovasti kuormitetuissa tapauksissa harjateräslenkein. Suoran seinän tapauksessa pystysaumaan kohdistuva leikkausvoima voidaan ratkaista kaavan 35 mukaan (Rakennusteollisuus 1995, 55). Kaavan 35 pystysauman leikkausrasituksen termit on selvennetty kuvassa 34.

$$V_d = F_d * \frac{S}{I} \quad (35)$$

missä

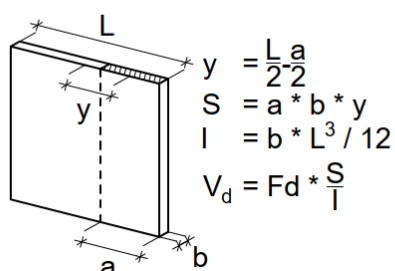
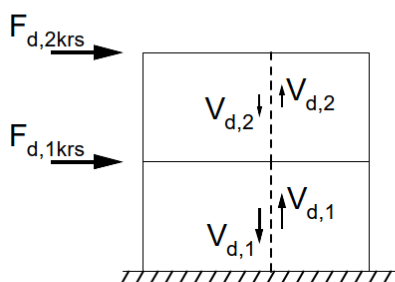
$V_d$  = sauman leikkausvoima (N/mm<sup>2</sup>)

$F_d$  = tarkasteltavan seinän yläreunan vaakavoima (N)

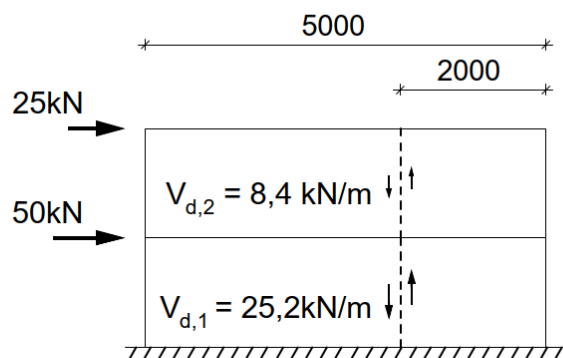
$S$  = staattinen momentti (ks. Liite 1) (mm<sup>3</sup>)

$I$  = jäyhyysmomentti (mm<sup>4</sup>)

PYSTYSAUMAN  
LASKENNAN TERMIT:



LASKENTAESIMERKKI  
SUORALLE SEINÄLLE:



$$y = 1,75\text{m}$$

$$S = 0,2\text{m} \cdot 2\text{m} \cdot 1,75\text{m} = 0,7\text{m}^3$$

$$I = 0,2\text{m} \cdot (5\text{m})^3 / 12 = 2,083\text{m}^4$$

$$V_{d,2} = 25\text{kN} \cdot 0,7\text{m}^3 / 2,083\text{m}^4 = 8,4\text{ kN/m}$$

$$V_{d,1} = 75\text{kN} \cdot 0,7\text{m}^3 / 2,083\text{m}^4 = 25,2\text{ kN/m}$$

KUVA 34. Pystysauman leikkausrasitus ja laskentaesimerkki (Laitinen 2024)

#### 4.6 Seinälinjan vaakasaumojen rasitukset

Seinälinjojen vaakasaumat muodostuvat kerroksien välille. Vaakasauman rasitus on ylemmältä seinältä tuleva vaakavoima alemman seinän yläpintaan. Vaakasauman kapasiteetti muodostuu ylemmältä seinältä tulevasta normaalivoimasta ja kitkasta. Kapasiteettia voidaan lisätä harjaterästapeilla, mikäli kitka ei yksin riitä vaakavoimaa vastaan. Kitkasta tuleva vaakavoimakapasiteetti seinälle saadaan kaavasta 36 (Rakennusteollisuus 1995, 56)

$$V_{uc} = \mu_c \cdot N_{d,std} \quad (36)$$

missä

$V_{uc}$  = vaakasauman kitkavoima (N)

$\mu_c$  = betonin kitkakerroin (0,27)

$N_{d,std}$  = Stabiloiva normaalivoima (N)

Mitoitusehto vaakavoimia vastaan saadaan kaavan 37 mukaan, kun kitkavoima  $V_{uc}$  on suurempi kuin saumaan kohdistuva vaakavoima  $Q_d$ . Kuvassa 35 on havainnoitu vaakavoiman hallintaan liittyviä liittyviä termejä vaakasaumassa.

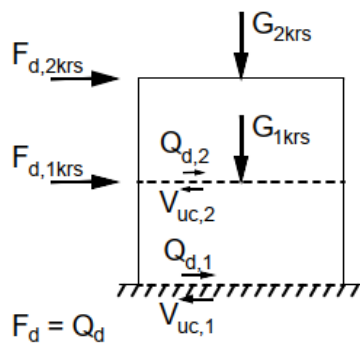
$$V_{uc} \geq Q_d \quad (37)$$

missä

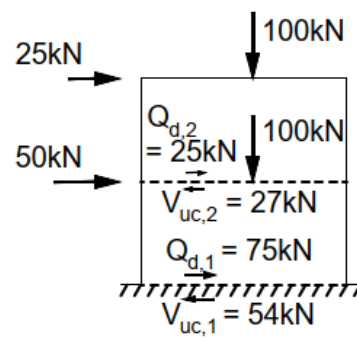
$V_{uc}$  = Maksimikitkavoima (N)

$Q_d$  = Sauman vaakavoima (N)

VAAKASAUMAN  
LASKENNAN TERMIT:



LASKENTAESIMERKKI  
SUORALLE SEINÄLLE:



$$V_{uc,2} = 100\text{kN} \cdot 0,27 = 27\text{kN} (> Q_{d,2} = 25\text{kN}) \text{ OK!}$$

→ KITKA ON RIITTÄVÄ!

$$V_{uc,1} = 200\text{kN} \cdot 0,27 = 54\text{kN} (< Q_{d,1} = 75\text{kN}) \text{ EI OK!}$$

→ KITKA EI OLE RIITTÄVÄ!  
→ HARJATERÄSTAPPEJA KÄYTETTÄVÄ

KUVA 35. Vaakasauman vaakarasiitukset ja kitkavoima (Laitinen 2024)

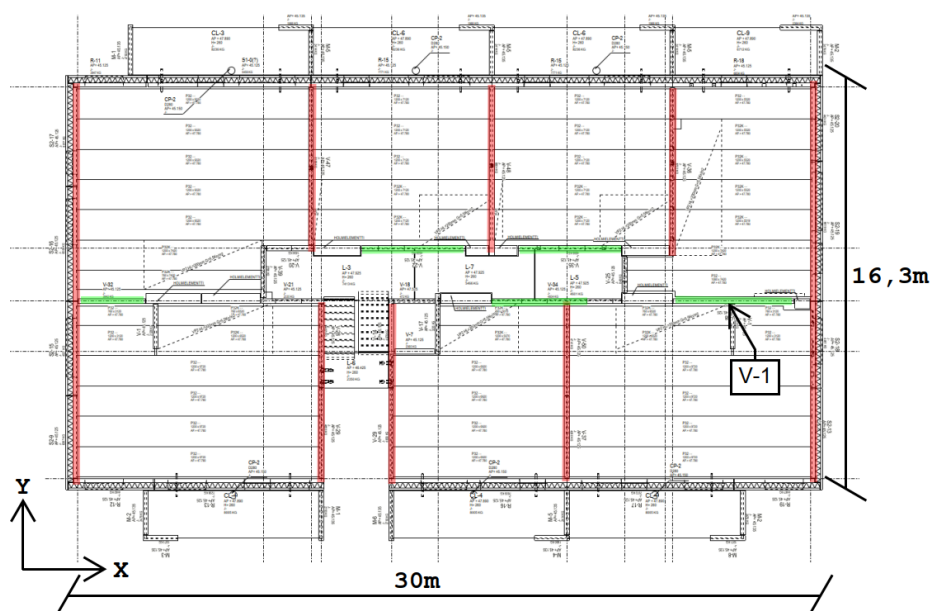
## 5 BETONIKERROSTALON VOIMASUUREIDEN LASKEMINEN

Opinnäytetyön kehitystyönä tehtiin teoriaosion mukainen Excel-laskentapohja. Esimerkkikohteeksi valittiin tyypillinen kerrostalokohde, jonka toisessa suunnassa oli vähän jäykistäviä seiniä. Valinnalla pyrittiin siihen, että vaakavoimien osuus suhteessa pystykuormiin olisi edes jossain määrin merkittävä ja niihin liittyvät laskentailmiöt näkyisivät laskelmissa.

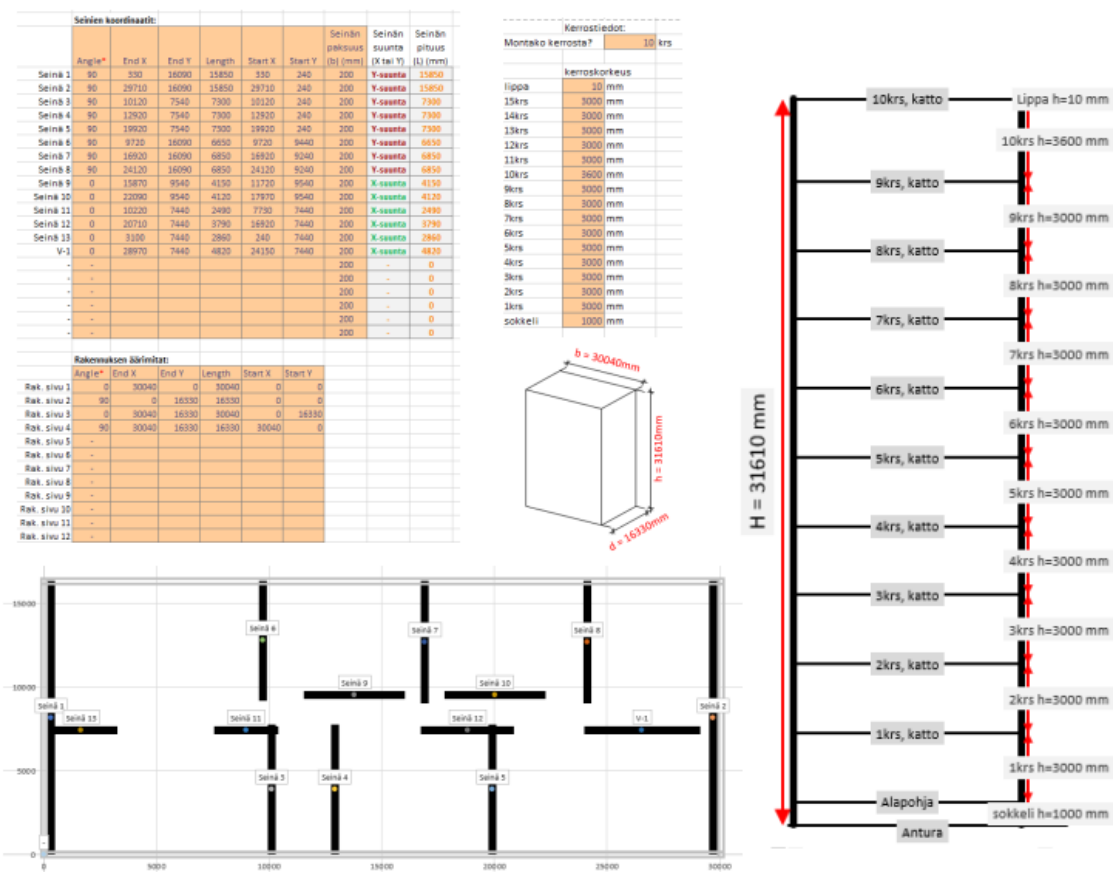
Vertailulaskenta suoritettiin FEM-laskentamallin ja Excel-laskentapohjan välillä. FEM-laskentamalli on tehty RFEM-ohjelmalla. Laskelmat on avattu tarkemmin Excelin osalta liitteessä 2 ja tähän osioon kootaan lähtötiedot, suunnitteluparametrit ja molempien laskelmien tulokset vertailutaulukkona. Tarkoituksena on arvioida tuloksien oikeellisuutta sekä Excel-pohjan käytettävyyttä. Kehitystyön tavoitteena on ollut tehdä käyttöliittymästä käyttäjäystävällinen ja parametrisoida mahdollisimman monia asioita suunnittelun helpottamiseksi. Tavoite oli lisäksi säilyttää Excelin luettavuus havainnoimalla parametrien syöttöä kuvin ja kaavioin.

### 5.1 Laskentakohteen lähtötiedot ja kuormitukset

Kohteeksi valittiin yhteensä 10-kerroksinen betonielementtinen asuinkerrostalo. Jäykistyslaskennan ensimmäisessä vaiheessa määritetään jäykistävät linjat. Excel-laskennassa pohjakaaviosta valitaan tässä vaiheessa vain merkitykselliset seinät jäykistykseen kannalta (kuva 36). Suhteessa muihin seiniin lyhyet seinät jätetään pois. Väliseinät, joiden ovipieli on erityisen kapea, lyhennetään aukko ja pieli pois kokonaispituudesta. Pohjakuvasta nähdään myös, että seinälinjojen väleihin on sijoitettu Elpo-hormeja, joita jäykistyksessä ei voi hyödyntää. Ei-kantavassa suunnassa olevat ulkoseinät ajatellaan ei-jäykistävinä seininä, joille huomioidaan vain omapaino. Pohjakaaviosta valitaan vertailtavaksi ja tarkasteltavaksi seinäksi y-suunnassa merkitty seinä V-1. Geometrian lähtötiedot syötetään Exceliin koordinaatteina ja käyttöliittymä on suunniteltu siten, että seinälinjat voi piirtää Autocadissa yksittäisinä viivoina ja ohjelmasta saadut koordinaatit tuoda Exceliin. Kuvassa 36 on havainnoitu kohteen pohjakaaviota, jossa y-suuntaan jäykistäviä seiniä on reilusti, mutta x-suuntaan vähän. Kuvassa 37 lähtötiedot lisätään laskentapohjaan.

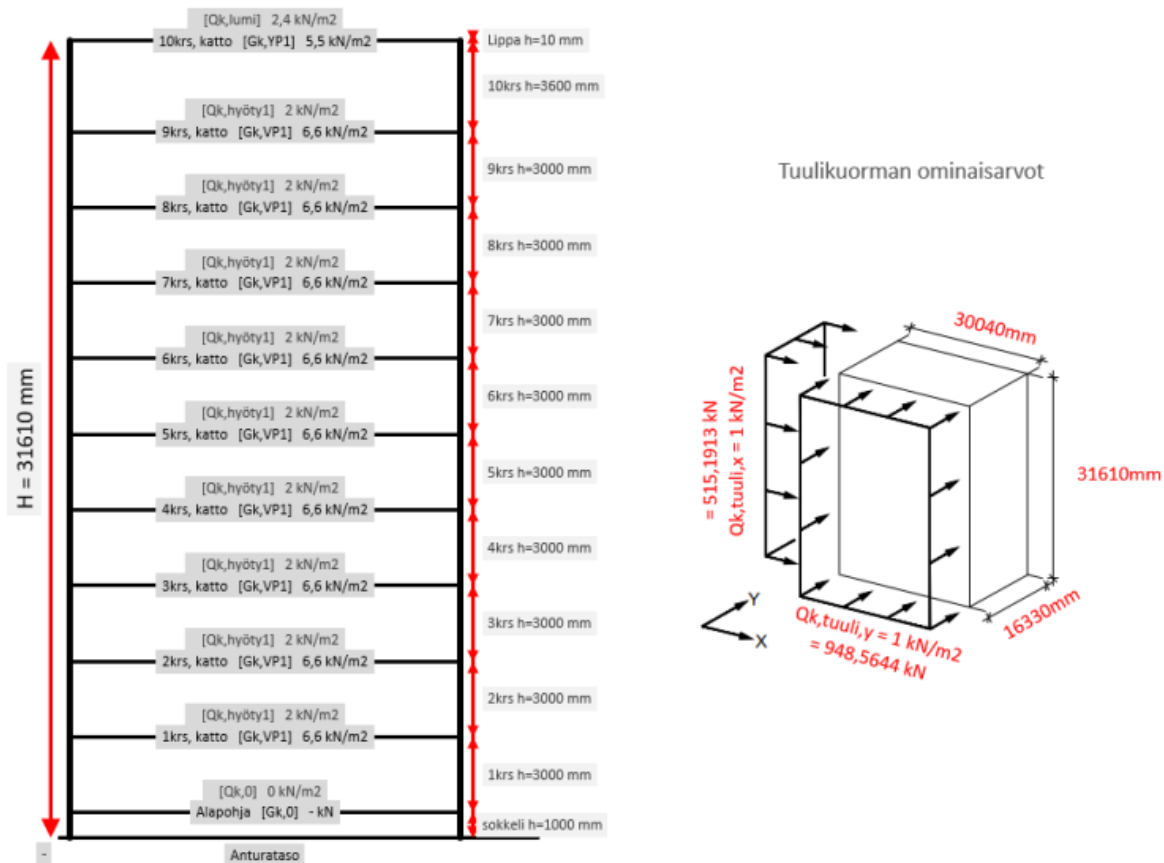


KUVA 36. Esimerkkikohteen jäykistävät seinät (Laitinen 2024)



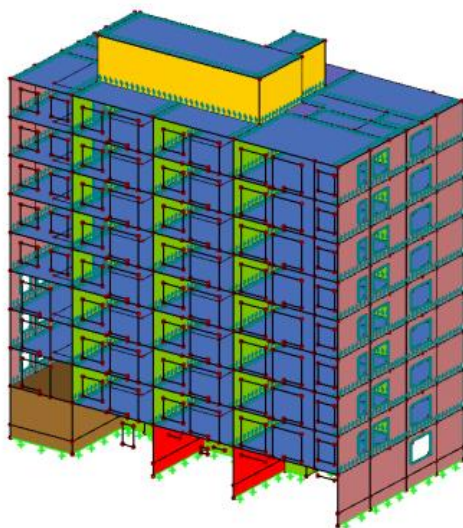
KUVA 37. Geometrian syöttö Exceliin (Laitinen 2024)

Elementtikerrostalo on rakennettu tavanomaisesti teräsbetonelementeistä ja välipohjat koostuvat ontelolaatoista. Rakenteiden suunnittelun ja toteutuksen perusteet -asiakirjasta löytyvät kunkin rakennetyypin neliökuormat tai rakenneosien tilavuuspainot. Omapainot, hyötykuormat, lumikuormat ja tuulikuormat lisätään laskentapohjaan. Ei-jäykistävät seinälinjat lisätään juoksumetreinä, jotta ne huomioituvat omapainon lisävaakavoimaan. Jäykistävien seinälinjojen kerroskuormat ja kuormituslevydet lisätään myös manuaalisesti. Syötetyt arvot havainnollistuvat laskentapohjassa kuvan 38 mukaisesti.



KUVA 38. Määritetyt ominaiskuormitukset laskentapohjassa (Laitinen 2024)

Huomataan RFEM-laskentamallin (kuva 39) ja Excel-laskentapohjan välillä, että Excel laskee asiat huomattavasti suoraviivaisemmin. Esimerkiksi väestönsuoja ja 1. kerroksen muutokset eivät taivu vielä tähän laskentapohjaan, vaan ne täytyy yksinkertaistaa kokonaan pois. Ylin kerros on tehty kokonaisuena Excelissä, kun se todellisuudessa on kokonaista kerrosta pienempi ullakkotila. Kuvassa 204 on havainnollistettu FEM-laskentamallia. FEM-laskentamalli tehtiin vastaavalle tilanteelle, kuin Excel geometrian ja kuormituksen osalta. Tarkastellaan täsmäävätkö molempien laskentatapojen summakuormat taulukon 3 mukaisesti. Todettiin tuloksista, että ominaiskuormat ovat riittävän lähellä toisiaan, jotta vertailua seinien jäykkyyksistä ja käyttäytymisestä voidaan tehdä. Pienille ero-uuksille myös löydettiin tyydyttävät selitykset.



KUVA 39. FEM-laskentamalli esimerkkikohteesta (Laitinen 2024)

TAULUKKO 3. Laskentamenetelmien ominaiskuormien vertailu (Laitinen 2024)

		Excel	RFEM	ero	Huom.
Omapaino summa	$\Sigma G_k$	55721 kN	51955 kN	7 %	Lisätty FEMistä puuttuvia 1 krs 1000kN. Excelissä ylin kerros kokonainen
Hyötykuorma	$\Sigma Q_{k,hyöty}$	9078 kN	8845 kN	3 %	Lisätty lumikuorma hyötykuormaan
Tuulikuorma X	$Q_{k,tuuli,x}$	515 kN	516 kN	0 %	Lisätty hieman FEM kuormaa, että täsmää, eri pinta-ala
Tuulikuorma Y	$Q_{k,tuuli,y}$	949 kN	909 kN	4 %	Excel huomioi äärimitat, FEM huomioi vain seinän keskilinjoihin.
Lisävaakavoima X	$\Theta_{i,x}$	1/ 400	1/ 200		
	$G_{k,H,x}$	139 kN	162 kN	-16 %	Laskentamallista puuttuu käsin syötetyt omapainot, tämä on korvattu käyttämällä 1/200 arvoa.
	$Q_{k,H,x}$	23 kN	0 kN	-	Hyötykuorman lisävaakavoimaa ei ole lisätty ollenkaan
Vaakavoimat yht.		162 kN	162 kN	0 %	Lisävaakavoimien kokonaisvaikutus suunnilleen yhtä suuri
2. kertaluvun lisävaakavoima	$F_{H,0Ed}$	0 kN	0 kN	0 %	2. kertaluvun vaikutusta ei tarvitse huomoida

## 5.2 Jäykistyksen voima- ja momentti

Kuormitusyhdistelyissä huomioidaan yhdistelyt kaatumisvarmuudelle, maksimi pysty- ja vaakakuormille ja käyttörajatiloille kuvan 40 mukaisesti.

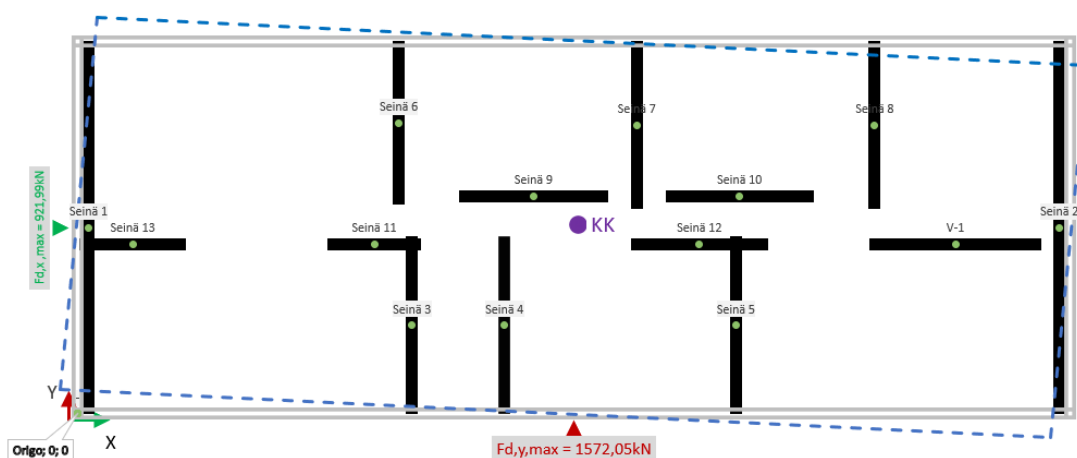
MRT1 [EQU] (Staattinen tasapaino)		0,90	*G <sub>k</sub> +	0,00	*Q <sub>k,h</sub> +	1,50	*Q <sub>k,tuuli</sub>
MRT2 (max omapaino)		1,35	*G <sub>k</sub> +	0,00	*Q <sub>k,h</sub> +	0,00	*Q <sub>k,tuuli</sub>
MRT3 (max pystykuorma1)		1,15	*G <sub>k</sub> +	1,50	*Q <sub>k,h</sub> +	0,70	*Q <sub>k,tuuli</sub>
MRT4 (max pystykuorma2)		0,90	*G <sub>k</sub> +	1,05	*Q <sub>k,h</sub> +	1,50	*Q <sub>k,tuuli</sub>
KRT1 (ominais [ch] tuuli)		1,00	*G <sub>k</sub> +	0,70	*Q <sub>k,h</sub> +	1,00	*Q <sub>k,tuuli</sub>
KRT2 (ominais [ch] hyöty)		1,00	*G <sub>k</sub> +	1,00	*Q <sub>k,h</sub> +	0,60	*Q <sub>k,tuuli</sub>
KRT3 (tavallinen[fr] tuuli)		1,00	*G <sub>k</sub> +	0,30	*Q <sub>k,h</sub> +	0,20	*Q <sub>k,tuuli</sub>
KRT4 (tavallinen[fr] hyöty)		1,00	*G <sub>k</sub> +	0,50	*Q <sub>k,h</sub> +	0,00	*Q <sub>k,tuuli</sub>
KRT5 (pitkäaikais [qp] hyöty)		1,00	*G <sub>k</sub> +	0,30	*Q <sub>k,h</sub> +	0,00	*Q <sub>k,tuuli</sub>
oma1			*G <sub>k</sub> +		*Q <sub>k,h</sub> +		*Q <sub>k,tuuli</sub>

KUVA 40. Kuormitusyhdistelyt (Laitinen 2024)

Kuormitusyhdistelyistä aiheutuvat kuormien maksimiarvot ovat taulukon 4 mukaiset. Runko on melko symmetrinen, joten epäkeskisyydestä aiheutuva momentti jää pieneksi, eikä sen merkitys seinän voimasuureisiin merkittävä. Kuvassa 41 on havainnoitu kiertoakeskiön sijaintia ja siirtymää korostetusti.

TAULUKKO 4. Excel-laskentapohjan jäykistykseen vaikuttavat suuret (Laitinen 2024)

X-suunnan vaakavoima MAX	$F_{x,d}$ max	922 kN
Y-suunnan vaakavoima MAX	$F_{y,d}$ max	1572 kN
Normaalivoiman Summa MAX	$N_d$ max	77696 kN
Epäkeskisyyt	$e_x$	-139 mm
	$e_y$	-132 mm
Kokonaismomentti	M	-96 kNm
Siirtymät	$v_x$	0,052 mm
	$v_y$	0,004 mm
Kiertymä	$\varphi$	-1,4E-12 rad
		-7,8E-11 astetta



KUVA 41. Pohjakaavio ja kuormat (Laitinen 2024)

Seinälinjojen vertailussa huomattiin, että FEM-laskentamallissa 1. kerroksen väestönsuoja vetää itseensä alimman kerroksen vaakavoimia, eivätkä voimasuuret ole vertailukelpoisia anturatasossa.



Vertailulaskennan jatko tehtiin poistamalla alin kerros ja asettamalla tähän tasoon FEM-mallissa viivatuksi. Alin kerros poistettiin samoin Excel-pohjasta. Lisäksi seinälinjoista vapautettiin pystylinja, jotta tulokset ja Excelin toimivuus voidaan todentaa vertailukelpoisella jäykistystilanteella. Taulukossa 5 näkyy kunkin seinälinjan ottama vaakakuorma kokonaiskuormasta x-suuntaan (Huom. "Seinä 14" vastaa alun kaaviossa ollutta "V-1"-seinää).

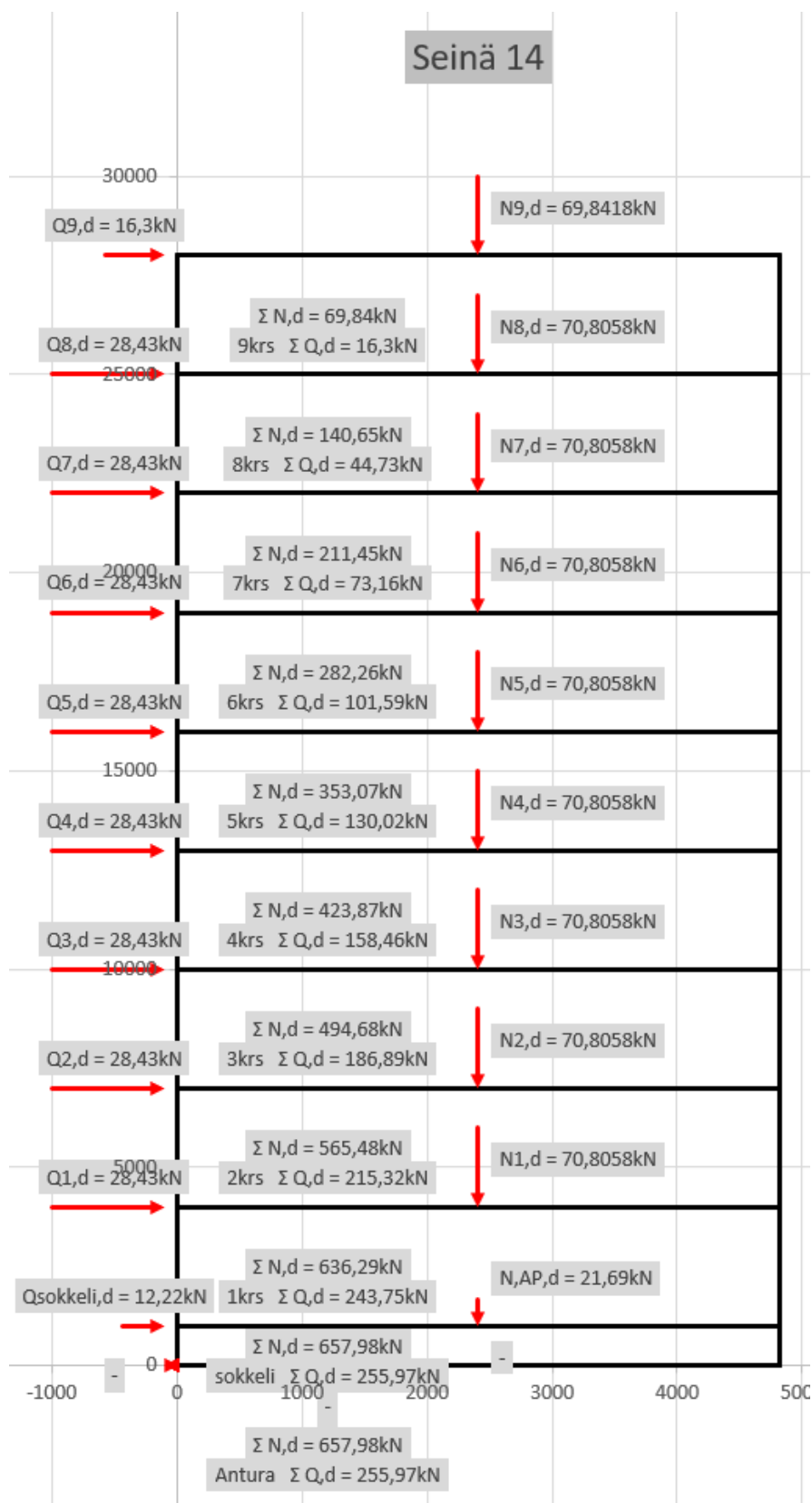
TAULUKKO 5. Seinien jäykkyyssosuudet (Laitinen)

Seinän jäykkyyden osuus ja kuormien jakautuminen X-suuntaan (EQU1):						
	excel		RFEM		ero	huom.
	%	Q <sub>x</sub> (kN)	%	Q <sub>x</sub> (kN)		
Seinä 9	21 %	160	15 %	111	31 %	Oviaukko keskellä
Seinä 10	20 %	156	26 %	192	-23 %	
Seinä 11	4 %	35	12 %	90	-157 %	Viereiset jäykistää FEM
Seinä 12	16 %	121	14 %	104	14 %	
Seinä 13	7 %	53	1 %	5	91 %	Lyhyt seinä erillinen
Seinä 14	32 %	248	32 %	237	4 %	
Σ	100 %	773	100 %	739	4 %	

Seinien jäykkyyssosuuksia voi helposti manipuloida FEM-laskennassa tekemällä erilaisia vapautuksia. Kuormien osuudet vaihtelevat merkittävästi FEM-laskennassa riippuen mallinnetuista elementeistä. Muutamassa seinässä oli aukkoja, jotka heikentävät seinän jäykkyyttä. Exceliin on lisätty mahdollisuus muuttaa jäykkyyttä kertoimella, mutta todellisen jäykkyyden osuuden arviointi vaatii lisätutkimusta, eikä siihen perehdytty enempää tässä työssä. Suunnittelijan tulee arvioida aukkoja ja muita jäykkyyteen vaikuttavia tekijöitä ja tehdä varmallalla puolella oleva oletus lisäämällä tarvittaessa tarkasteltavan seinän jäykkyyttä, kun tutkii kyseistä linjaa.

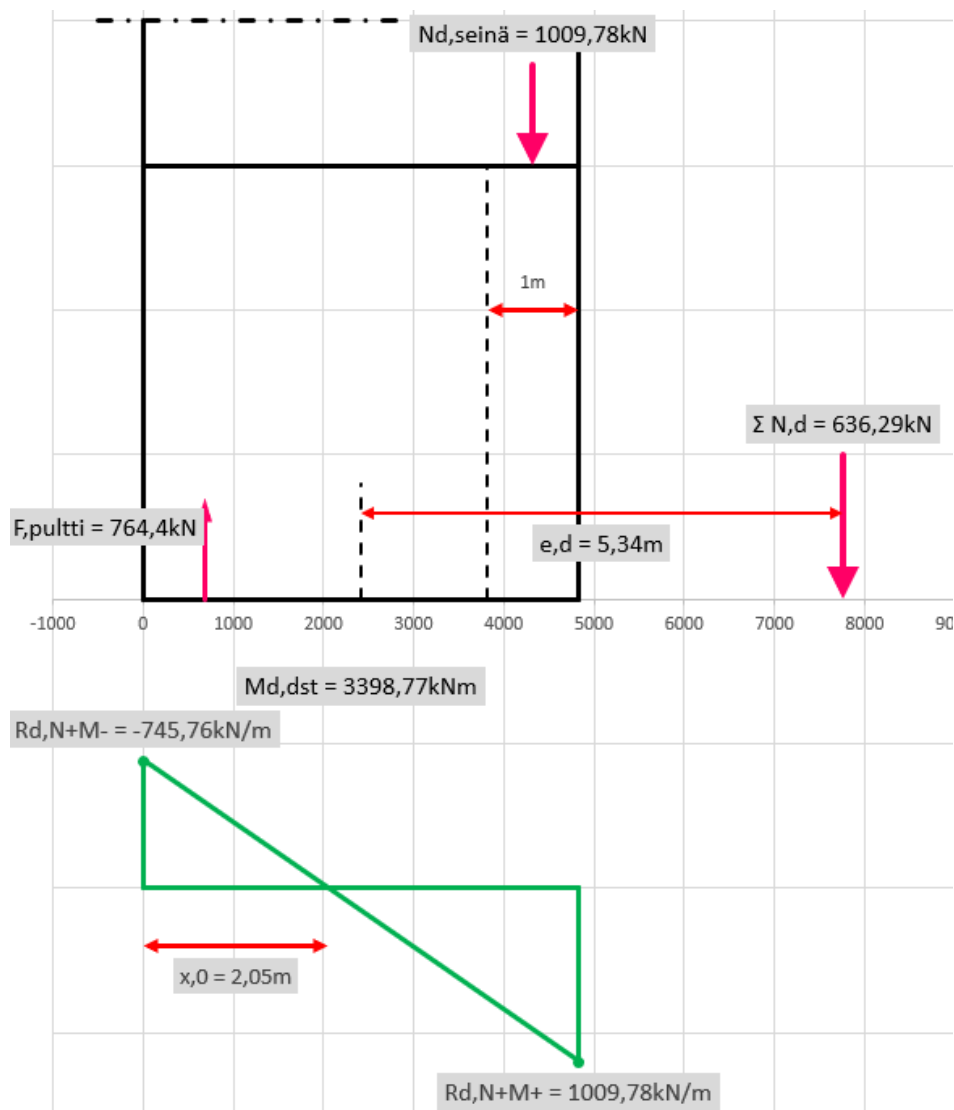
### 5.3 Seinälinjan voimasuureet

Seinälinjalle kohdistuva kuormitus tulee kerroksittain. Kokonaiskuorma jakautuu kerroksien mukaisesti. Näiden voimasuureiden avulla tarkastetaan kaatumisvarmuus, epäkeskisyyss ja vetotilanteessa pultin voimasuureet. Seinälinjan 14 vaakakuormat kerroskohtaisesti ja kumuloituva kuorma kohti anturaa on esitetty kuvassa 42.

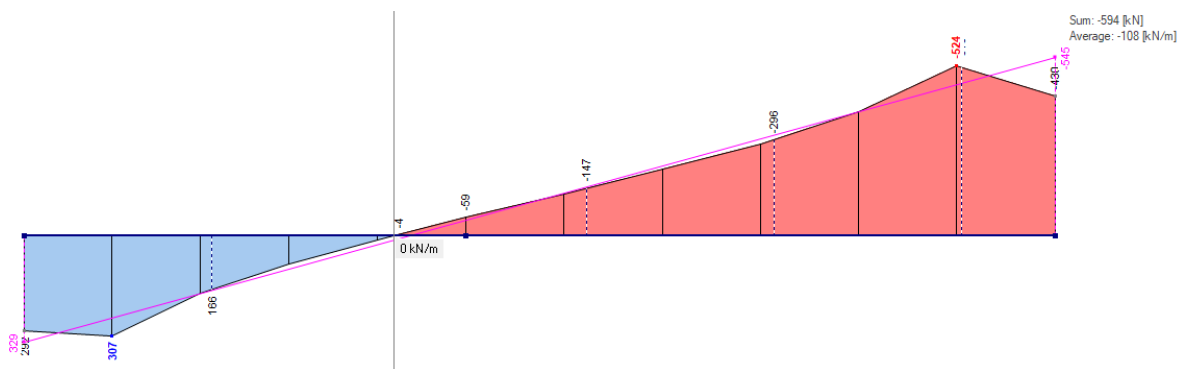


KUVA 42. Seinälinjaan 14 kohdistuva kuormat kerroksittain (Laitinen 2024)

Tarkasteltavaan seinälinjaan kohdistuu suuri vaakavoima suhteessa pystykuormaan. Epäkeskisyyden raja-arvo  $d/3$  ylittyy reilusti. Kuvassa 39 on esitetty laskentapohjan tukireaktio ja vetävä pulttivoima. Vertailuarvot tukireaktiolle FEM-laskennasta on esitetty kuvassa 43.

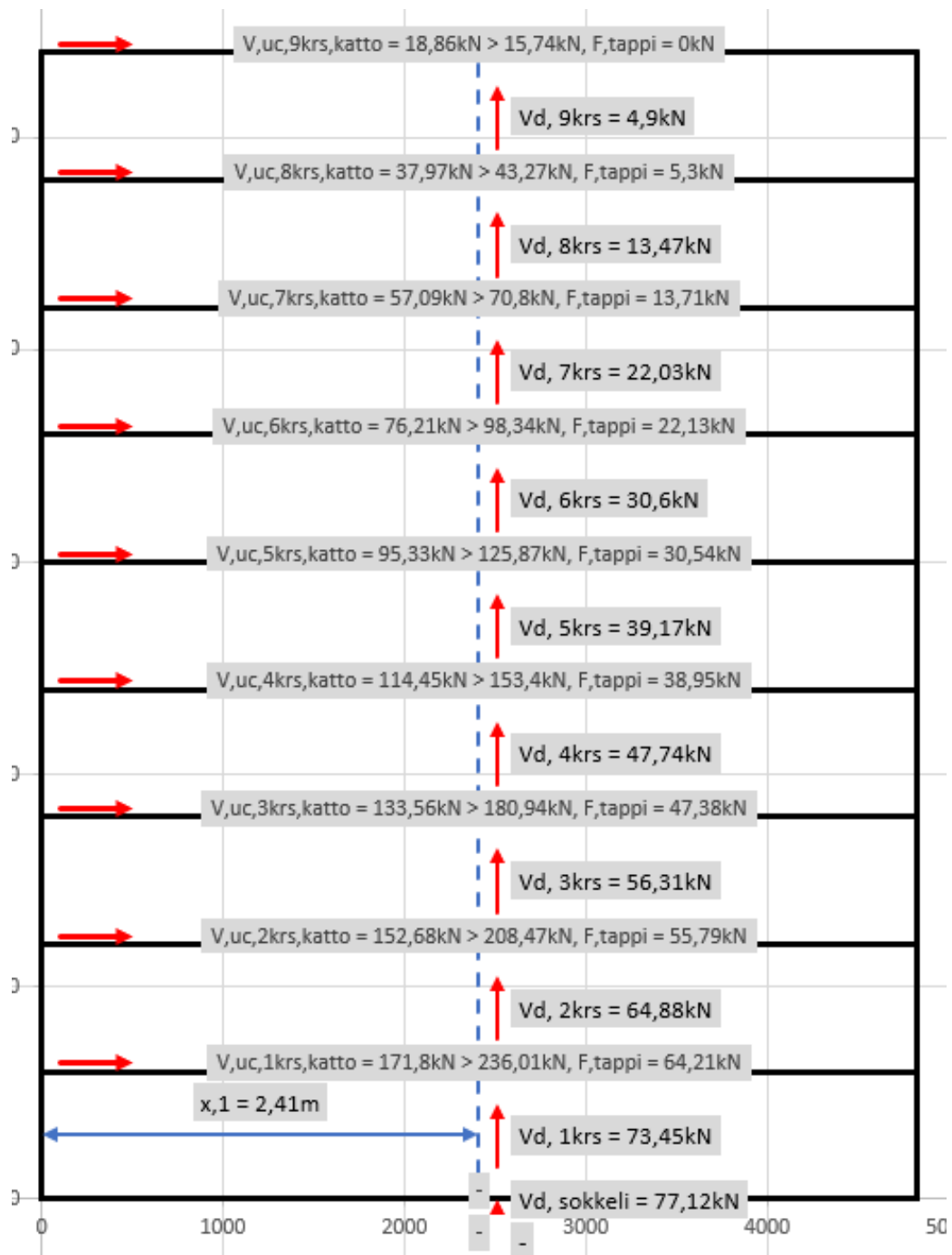


KUVA 39. Seinän alareunan toiminta (Laitinen 2024)



KUVA 43. FEM-laskennan vertailuarvot tukireaktiolle (Laitinen 2024)

Vertailulaskelmaan lisättiin kuvitteellinen pystysauma keskelle, jonka voimasuureet vertailtiin laskentamenetelmien kesken. Laskentapohja määrittää myös vaakasauman kitkan riittävyyden vaakavoimalle. Nämä on esitetty seinälinjalle 14 kuvassa 44.



KUVA 44. Pystysauma ja vaakasauma seinälinjalla (Laitinen 2024)

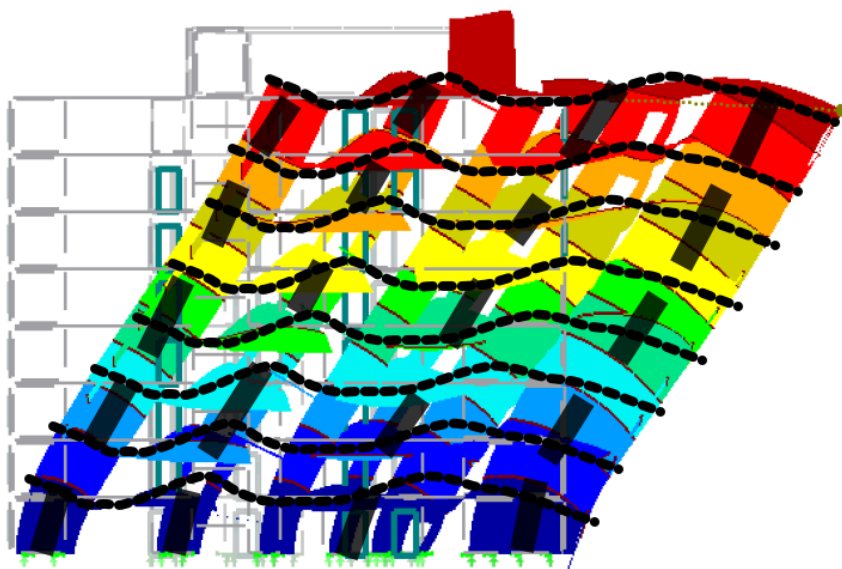
Seinälinjan 14 tapauksessa huomataan, että pelkkä kitka ei riitä vaakasaumassa, vaan osa vaakavoimista täytyy siirtää vaarnatappien välityksellä. Seinälinjaan kohdistuvat voimasuuret ja niiden vertailu laskentamenetelmien välillä esitetään taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Seinälinjan 14 voimasuureiden vertailutaulukko (Laitinen 2024)

	Excel	RFEM	ero	huom.
Pystykuormat $N_d$	636 kN	594 kN	7 %	ok
Vaakakuormat $Q_x$	248 kN	238 kN	4 %	ok
Vetopuoli $R_{d-}$	-746 kN/m	-329 kN/m	56 %	Kertaluokka ero
Puristuspuoli $R_{d+}$	1010 kN/m	594 kN/m	41 %	Kertaluokka ero
Pulttivoima $F_p$	764 kN	342 kN	55 %	Kertaluokka ero
Pystysauma:				
8krs	13 kN/m	14 kN/m	-4 %	Ylimmissä kerroksissa prosentuaaliset erot ovat pienistä voimista johtuen suuret. Alemmissä kerroksissa kertaluokka jakäyttäytyminen on oikean suuntaisia
7krs	22 kN/m	3 kN/m	86 %	
6krs	31 kN/m	8 kN/m	74 %	
5krs	39 kN/m	17 kN/m	57 %	
4krs	48 kN/m	29 kN/m	39 %	
3krs	56 kN/m	41 kN/m	27 %	
2krs	65 kN/m	55 kN/m	15 %	
1krs	73 kN/m	58 kN/m	21 %	

Tuloksista päätellään, että FEM-laskennassa aiheutuva kaatava momentti muodostuu huomattavasti pienemmäksi, kuin lineaarisessa taulukkolaskennassa. Tulokset osoittavat, että kaatava momentti on noin 40 % (~1350 kNm) FEM-mallissa Excel-pohjan kaatavasta momentista (~3400 kNm). Kun laskentamallin tekee FEM-mallissa pelkälle seinälinjalle ja laittaa vastaavat kuormat, ovat tulokset täysin vertailukelpoiset muutaman prosenttiyksikön sisällä. Muilta osin tulokset ovat suhteellisen hyvin linjassa laskentamenetelmien välillä. Vaikka prosenttiosuudet pystysaumassa kasvoivat isoiksi, kertoo se enemmän kuormien pienuudesta ja että pienetkin erot aiheuttavat suuret prosenttiosuudet. FEM-laskenta myös huomioi leikkausvoimassa normaalivoiman vaikutuksen, mitä Excel-laskennassa ei huomioida.

Jäykistysjärjestelmän vaikutusta kaatavan momentin muodostumiseen pitäisi tarkastella omana tutkimusaiheena. Mahdollisia syitä eroavuudelle haettiin eri teorioiden pohjalta. Tukireaktioista nähdään, että poikittaiset seinät ottivat vastaan jonkin verran vaakavoimaa ja niihin aiheutui pelkästä vaakavoimasta pystysuunnan tukireaktioita. Tämä ei kuitenkaan ollut riittävän selittävä tekijä, koska poikittaisseinät poistettiin ja silti tulokset eivät muuttuneet merkittävästi. Suurin syy löytyi laattojen ja seinien liitoksesta. Jatkuva liitos aiheuttaa välipohjiin momenttijäykkyyttä ja laatat ottavat liitoksen kautta vastaan taivutusrasitusta vaakavoimista. Seinät ja laatta toimivat osittain kehärakenteena ja vähentävät kaatavaa momenttia. Korostetut muodonmuutokset ja ilmiö on esitetty kuvassa 45.



KUVA 45. Seinien ja laatan yhteistoiminta FEM-mallissa (Laitinen 2024)

Tuloksien perusteella Excel-laskentapohja antaa vertailukelpoisia tuloksia, mutta eroavuuksia löytyy ja erot voivat olla merkittäviä. Laskentapohjaa käytettäessä tulee osata huomioida sen rajoitteet ja toisaalta ymmärtää laskentamenetelmien eroavuudet.

## 6 POHDINTA

Uuden opetusmateriaalin kokoamisen lisäksi tämän työn tavoite oli kehittää laskentaprosessin tueksi Excel-laskentapohja betonikerrostalon jäykistysvoimien määrittämiseen. Rakennesuunnittelijan tehtäviin kuuluu kerrostalojen voimasuureiden määrittäminen, jotta jäykistysjärjestelmän toiminta voidaan todentaa. Vaikka tavanomaiset betonikerrostalot eivät ole yleensä kriittisiä vaakavoimien suhteen, niiden esittäminen on kuitenkin oleellista suunnittelutyön etenemisen kannalta.

Excel-laskentapohjilla on usein muutamia heikkouksia. Rakennesuunnittelijat saattavat kokea ne liian pelkistetyiksi. Niiden logiikkaa ei välttämättä ymmärrä kuin vain ne laskijat, jotka ovat pohjaa itse kehittäneet. Vaikka laskelmat olisivat oikein ja laskentapohja toimii hyvin, tuloksien luettavuus taulukoista voi olla hankalaa, koska kehitystyössä ei aina ehditä panostaa visuaalisuuteen. Tässä työssä pyrittiin tekemään käyttäjäystävällinen laskentapohja, joka on helppokäyttöinen, visuaalisesti looginen, antaa luotettavia tuloksia ja tulokset esitetään selkeästi.

Toimivan ja käyttäjäystävällisen laskentapohjan tekeminen näin laajaan aiheeseen oli haastavaa. Havainnoivien kaavioiden tekeminen oli aikaa vievää, koska prosessin aikana moni innolla aloitettu kehityssuunta laskentapohjaan ei lopulta osoittautunut järkeväksi ratkaisuksi. Prosessi alun lähtötehtojen syöttämisestä tuloksien raportointiin sisälsi monta välivaihetta ja jokaisen riippuvuuden vieminen alusta loppuun loogisesti ja luotettavasti laskentasääntöjä noudattaen oli moniulotteista. Tästä huolimatta lineaarisen tarkastelun Excel-laskentapohja betonikerrostalolle toimi tulosten perusteella odotellulla tavalla. Laskentapohjaa tulee vielä koekäyttää luotettavuuden varmistamiseksi ja tilaaja jatkaa tätä kehitystyötä edelleen yrityksen sisäisenä työnä.

Alustava palaute laskentapohjasta on ollut rohkaisevaa ja käyttöliittymä on saanut rakennesuunnittelijoilta kiitosta. Työn lomassa laskentapohjan kehittämisestä avautui myös monia uusia näkökulmia, joita ei ehditty tutkia tai ajan puitteissa lisätä laskentapohjaan. Näitä asioita ovat:

- maanpaineen syöttämisen mahdollisuus,
- vaakavoimien tarkastelu kerroksittain,
- laskentapohja huomioi momenttilisän molempien suuntien vaakavoiman maksimiarvolle (pohjaa pitäisi kehittää siten, että vain toinen suunta huomioidaan kerrallaan),
- laskentapohja ei huomioi muuttuvia jäykistyslinjoja (jos alin kerros erilainen),
- pistekuorman syöttämisen mahdollisuus ulokkeellisissa seinissä,
- Excel-pohjan kaavioita ja havainnekuvia voisi vielä täydentää erilaisilla mitoilla ja muuten havainnollisesti.

Laskennassa nousi esille mielenkiintoinen havainto momentin laskennassa. Excelissä välipohjien taivutusjäykkyyttä ei huomioida ollenkaan. Kokeneiden rakennesuunnittelijoiden kanssa käytyjen keskusteluiden perusteella tätä ei välttämättä ole ilmiönä tunnistettu riittävästi tai huomioitu juurikaan FEM-laskelmissa. Laskentapohja menee tässä reilusti varmalle puolelle ollen kaatavan momentin suhteen jopa 100 % suurempi, kuin FEM-mallissa. Toisaalta laattoja ei välttämättä ole mitoitettu näille jäykistysvoimille, mutta jäykkyyttä FEM-mallissa kuitenkin muodostuu. Tätä aihetta pitäisi tutkia enemmän, jotta voidaan varmistua sopivasta toimintamallista vapautuksien tekemiseen ja mahdollisiin rakenneosien jäykkyksien redusoimisiin FEM-laskennassa.

Opinnäytetyön aihe oli mieleinen, koska aiempaa käytännönkokemusta oli karttunut lähes kymmenen vuoden ajan useista kohteista FEM-laskennasta, mutta ei käsinlaskennasta. Tämä on näiden vuosien aikana ollut suuri puute. Projektityössä aiheeseen perehtymiseen tai tiedonhakuun ei ole löytynyt riittävästi aikaa. Excel-laskentapohjan tekeminen oli mielekästä ja opettavaista, mutta myös työlästä. Opinnäytetyön merkitys on ollut suurin tekijälle, mutta myös toimeksiantajan puolesta tämän tyyppiselle laskentapohjan kehitykselle on jo pitkään nähty tarvetta.

Työn tavoitteet saavutettiin, mutta myös useita kehityskohtia tunnistettiin. Excel-laskentapohja on nyt ensimmäisessä versiomuodossa ja jos sen käyttö yleistyy, voidaan arvioida kannattaako sen jatkok kehitys. Mikäli työhön olisi ollut antaa vielä enemmän aikaa, laskentapohjasta olisi kerätty systemaattisesti käyttäjäpalautetta.



## LÄHTEET

Työssä on käytetty seuraavasti tekoälyä:

ChatGPT 2024. OpenAI. GPT-3.5, GPT-4.0. Käytetty tiedon etsintään, Excel-ongelmien ratkaisuun, matemaattisten pulmien ratkaisuun ja kielen tarkastukseen, tammikuu-huhtikuu 2024.  
<https://chat.openai.com>

Lähdeluettelo:

Aalto, Jukka 2024. Rakenteiden lujuusoppi. Verkkojulkaisu. Rakenteiden mekaniikan seura ry.  
[http://rmseura.tkk.fi/opetusmonisteita/RLP\\_L.pdf](http://rmseura.tkk.fi/opetusmonisteita/RLP_L.pdf). Viitattu 17.4.2024

Dlupal Software GmbH 2024. Calculation of Shear Area in SHAPE-THIN. Verkkojulkaisu.  
<https://www.dlupal.com/en/support-and-learning/support/knowledge-base/001405>. Viitattu 17.4.2024

Elementtisuunnittelu 2010. Jäykistysjärjestelmät. Verkkojulkaisu. Betoniteollisuus ry.  
<https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/22083/J%c3%a4ykistysj%c3%a4rjestelm%c3%a4t.pdf>. Viitattu 26.12.2023

Elementtisuunnittelu 2024a. Asuinrakennuksien rakennejärjestelmät. Verkkojulkaisu.  
<https://www.elementtisuunnittelu.fi/rakennejarjestelmat/asuinrakennukset>. Viitattu 26.12.2023

Elementtisuunnittelu 2024b. Normit ja standardit. Verkkojulkaisu. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/suunnitteluprosessi/normit-ja-standardit>. Viitattu 17.4.2024

Elementtisuunnittelu 2024c. väliseinät. Verkkojulkaisu. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/kantokykykayrat/valiseinat>. Viitattu 17.4.2024

EN1990: Eurocode 0: Rakenteiden suunnittelun perusteet 2006. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto. <https://sales.sfs.fi/en/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/150857.html.stx>. Viitattu 17.04.2024.

EN1991: Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat 2002. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto. <https://sales.sfs.fi/en/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/170636.html.stx>. Viitattu 17.04.2024.

EN1992: Eurocode 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt 2015. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto. <https://sales.sfs.fi/en/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/9339.html.stx>. Viitattu 05.01.2024.

EN13670: Betonirakenteiden toteuttaminen. Betonirakenteiden toteutus 2010. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto. <https://sales.sfs.fi/en/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/147763.html.stx>. Viitattu 17.04.2024.

FISE 2023. Betonirakenteiden suunnittelijan pätevyudet. <https://www.patevyysspalvelu.fi/fi/wagtail/pages/hakuohjeet/suunnittelijat/betonirakenteiden-suunnittelija/>. Viitattu 26.12.2023

Hariharan Iyer 2005. The Effects of Shear Deformation in Rectangular and Wide Flange Sections. Opinnäytetyö. Master of Science in Civil Engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University. <http://hdl.handle.net/10919/31421>. Viitattu 17.4.2024

Koulutuksen tutkimuslaitos/Peda.net 2024. Jousivoima on harmoninen voima. Verkkojulkaisu.  
<https://peda.net/oppimateriaalit/e-oppi/lukiot/helsinki/hyl/fysiikka/arkisto/resonanssi-53/l4hvjv/johv>. Viitattu 18.4.2024

Leskelä, Matti 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus BY 210. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.

Päivöke, Natalia 2012. Rakennusta jäykistävän profiilimaston vääntöjäykkyyden osuus rasiusten ja-  
kaumassa. Opinnäytetyö. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Metropolia Ammattikorkeakoulu.  
<https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201204305546>. Viitattu 17.4.2024

Rakennusteollisuus 1995. Betonirakentamisen ohjeista, Valmisosarakentaminen II, Osa G, Elementti-  
rakennuksen jäykistys. RTT Rakennusteollisuus ry.

Saarinen Eero, Kinnunen Jukka, Tiira Seppo 1986. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja, osa 3.  
2. painos. Jyväskylä: Suomen Betoniyhdistys ry.

Savolainen Sami 2012. Rakennusta jäykistävän aukollisen seinälevyn jäykkyys. Opinnäytetyö. Raken-  
nustekniikan koulutusohjelma. Metropolia Ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201204244985>. Viitattu 17.4.2024

Suomen Betoniyhdistys ry 1995. Betonirakenteiden perusteiden oppikirja. 4. painos. Jyväskylä: Suo-  
men Betonitieto Oy.

Suomen Rakentamismääräyskokoelma. Rakenteiden lujuus ja vakaus, Betonirakenteet. 2019. Hel-  
sinki: Ympäristöministeriö. [https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/Betoniraken-  
teet\\_16122019.pdf](https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/Betoniraken-<br/>teet_16122019.pdf). Viitattu 17.4.2024

Swecon sisäinen koulutus 2017. Teräsbetonisen seinän jäykistysmitoitus. Viitattu 17.4.2024

Timoshenko, Stephen 1940. Strength of materials. 2. painos. D. Van Nostrand Company Inc.

TOPTEN 2023. Rakentamisen yhteiset käytännöt. Verkojulkaisu. [https://toptenrava.fi/tulkinta-  
kortti/rakenteiden-suunnittelun-ja-toteutuksen-perusteet-asiakirjamalli/](https://toptenrava.fi/tulkinta-<br/>kortti/rakenteiden-suunnittelun-ja-toteutuksen-perusteet-asiakirjamalli/). Viitattu 25.12.2023

Ympäristöministeriön asetus kantavista rakenteista 477/2014. [https://www.finlex.fi/fi/laki/al-  
kup/2014/20140477](https://www.finlex.fi/fi/laki/al-<br/>kup/2014/20140477). Viitattu 25.12.2023

Ympäristöministeriö 2023. Maankäyttö ja rakennuslaki. <https://ym.fi/rakentamismaaraykset>. Viitattu  
25.12.2023

LIITE 1:  $\kappa$ -KERROIN**Kertoimen määrittäminen**

$\kappa$ -kerroin pienentää leikkausmuodonmuutoksen laskennassa käytettävää poikkileikkauksen pinta-alaa. Kaavassa 1 se kuvastaa todellisen pinta-alan ja leikkauspinta-alan suhdetta (Iyer 2005, 5):

$$\kappa = \frac{A}{A_v} \quad (1)$$

missä

$\kappa$  = leikkauspinta-alan kerroin

$A_v$  = leikkautuva poikkileikkauksen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

$A$  = koko poikkileikkauksen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

Yleinen muoto  $\kappa$ -kertoimelle on esitetty kaavassa 2 (Elementtisuunnittelu 2010, 27):

$$\kappa = \frac{A}{I^2} \int \frac{S(y)^2}{t(y)} dy \quad (2)$$

missä

$\kappa$  = leikkauspinta-alan kerroin (-)

$A$  = koko poikkileikkauksen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

$I$  = seinän jäyhyysmomentti kappaleen tarkastelusuunnassa (mm<sup>4</sup>)

$S$  = staattinen momentti poikkileikkauksen painopisteessä tarkasteltavassa suunnassa (mm<sup>3</sup>)

$t$  = poikkileikkauksen paksuus (mm)

Staattisen momentin yleinen ratkaisu on kaavan 3 mukainen. Staattinen momentti määritetään integroimalla kaikki tarkastelupisteen ulkopuolelle jäävät pinta-alkiot ( $dA$ ) poikkipinnan yli. Pinta-alkion lineaarinen keskiöetäisyys  $x$ - tai  $y$ -suunnassa tarkasteltavasta pisteestä kuvaa staattista momenttia (kuva 1). (Aalto 2024, 32.)

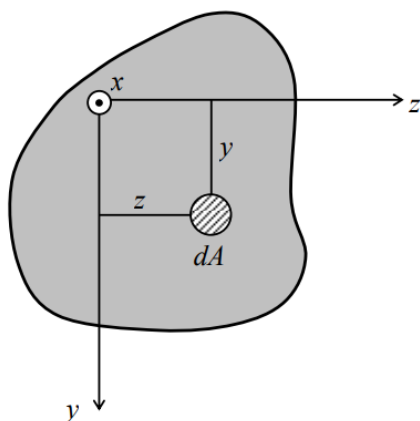
$$S_y = \int_A y * dA \quad (3)$$

missä

$S_y$  = staattinen momentti poikkileikkauksen painopisteessä  $Y$ -suunnassa (mm<sup>3</sup>)

$dA$  = pinta-alkio (mm<sup>2</sup>)

$y$  = tarkasteltavan pinta-alkion etäisyys pinta-alkion keskiöetäisyyteen.

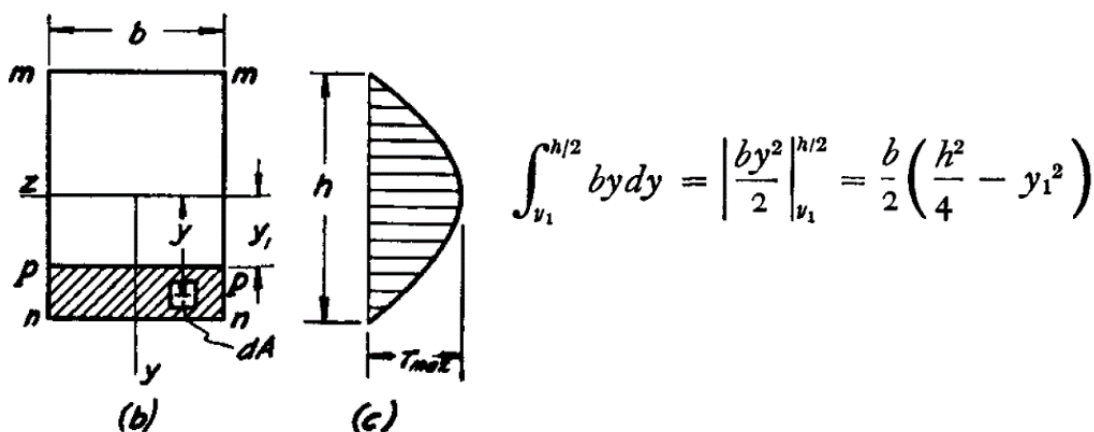


KUVA 1: Staattisen momentin määritelmä pinta-alkiona (Aalto 2024, 32)

Staattista momenttia voidaan hyödyntää leikkauvoiman määrittämisessä joko neutraaliakselilla tai tietyllä korkeudella poikkileikkauksessa (lujuusopissa käytetty Jourawskin kaava). Staattinen momentti kuvaa tarkastelupisteen ulkopuolelle jäävää leikkautuvaa pinta-ala ja sen keskiöetäisyyttä tarkastelupisteeseen.

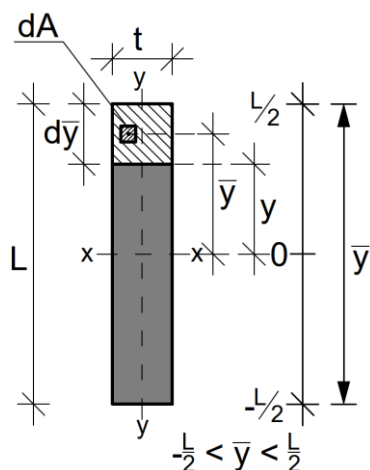
### Suorakaidepoikkileikkaus

Suorakaidepoikkileikkauksella staattinen momentti määritetään kuvan 2 termien mukaisesti:



KUVA 2: Staattisen momentin määritelmä suorakaidepoikkileikkauksessa (Timoshenko 1940, 112).

Suorakaidepoikkileikkauksen tapauksessa ja kaavan 2 termien, kun poikkileikkauksen paksuus  $t$  on vakio, voidaan alkuperäisen yhtälön pinta-alan termi  $dA$  korvata leveyden  $t$  ja pinta-alkion leveyden  $dy$  tulolla. Kuvassa 3 on selkeytetty termit Rakennusteollisuuden (1995) materiaalin mukaiseksi. Koska  $t$  on vakio, eikä muutu  $y$ :n suhteen, viedään se integraalin ulkopuolelle. Valitaan koordinaatisto lähdeteoksen esimerkin mukaan.



KUVA 3: Staattisen momentin termit suorakaidepoikkileikkauksessa (Laitinen 2024, muokattu alkuperäislähteestä Timoshenko 1940, 112)

Differentiaaliyhtälön vaihteluväli määritetään siten, että x-akselilla on 0-kohta. Määrätyn integraalin vaihteluväli on alkupäässä  $-\frac{L}{2}$  edeten kohtaan  $y$ . (Dlupal 2024). Ratkaisu staattiselle momentille suorakaiteen muotoiselle poikkileikkaukselle (tarkastelupiste painopisteessä) esitetään kaavassa 4 (lähteen termit muutettu yhteneväisiksi tämän materiaalin kanssa):

$$S(y) = t \int_{-\frac{L}{2}}^y \bar{y} d\bar{y} = t \left[ \frac{\bar{y}^2}{2} \right]_{-\frac{L}{2}}^y = t \left[ \left( \frac{y^2}{2} \right) - \left( \frac{1}{2} * \frac{L^2}{4} \right) \right] = \frac{t}{2} \left( y^2 - \frac{L^2}{4} \right) \quad (4)$$

Ratkaistu yhtälö voidaan nyt sijoittaa alkuperäiseen  $\kappa$ -kertoimen yhtälöön (kaava 2). Koska  $t$  on vakio eikä muutu  $y$ :n suhteen, otetaan sen muuttuja ( $y$ ) pois yhtälöstä. Kaava 2 muuttuu siten kaavan 5 muotoon ja vaihteluväli tälle integraalille valitaan koko poikkileikkauksen pituuden mukaan (Dlupal 2024):

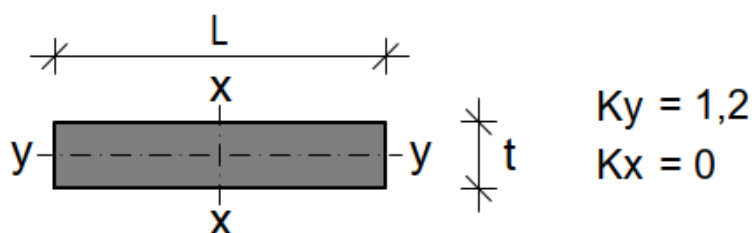
$$\kappa = \frac{A}{I^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\left[ \frac{t}{2} \left( y^2 - \frac{L^2}{4} \right) \right]^2}{t} dy \quad (5)$$

Kaavassa 6 on esitetty yhtälön ratkaisu, josta saadaan  $y$ -suunnan  $\kappa$ -kerroin 1,2. Heikommalle suunnalle kerroin on suorakaiteen muotoisen seinän tapauksessa 0. (Rakennusteollisuus 1995, 32.). Ratkaisussa  $A$  ja  $I^2$  on ratkaistu suorakaiteelle  $t$ :n ja  $L$ :n avulla lujuusopin mukaan. Termeistä tulee yhtenäiset ja huomataan, että moni niistä supistuu pois suoraan laskun edetessä.

$$\begin{aligned}
\kappa &= \frac{L * t}{\left(\frac{t * L^3}{12}\right)^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\left[\frac{t}{2} \left(y^2 - \frac{L^2}{4}\right)\right]^2}{t} dy & (6) \\
&= \frac{L * t}{\frac{t^2 * L^6}{144}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\frac{t^2}{4} \left(y^4 - 2 * \frac{L^2 * y^2}{4} + \frac{L^4}{16}\right)}{t} dy \\
&= \frac{144}{t * L^5} * \frac{t}{4} \left[ \frac{y^5}{5} - \frac{2 * L^2 * y^3}{3 * 4} + \frac{L^4 * y}{16} \right]_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \\
&= \frac{144}{4 * L^5} \left[ \frac{L^4}{16} y - \frac{L^2}{6} y^3 + \frac{1}{5} y^5 \right]_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \\
&= \frac{144}{4 * L^5} \left[ \left( \frac{L^4}{16} * \frac{L}{2} - \frac{L^2}{6} * \left(\frac{L}{2}\right)^3 + \frac{1}{5} * \left(\frac{L}{2}\right)^5 \right) \right. \\
&\quad \left. - \left( \frac{L^4}{16} * \left(-\frac{L}{2}\right) - \frac{L^2}{6} * \left(-\frac{L}{2}\right)^3 + \frac{1}{5} * \left(-\frac{L}{2}\right)^5 \right) \right] \\
&= \frac{144}{4 * L^5} \left[ \left( \frac{L^5}{32} - \frac{L^5}{48} + \frac{L^5}{160} \right) - \left( -\frac{L^5}{32} + \frac{L^5}{48} - \frac{L^5}{160} \right) \right] \\
&= \frac{144}{4 * L^5} \left( \frac{2 * L^5}{32} - \frac{2 * L^5}{48} + \frac{2 * L^5}{160} \right) \\
&= \frac{144}{4 * L^5} \left( \frac{L^5}{30} \right) \\
&= \frac{144}{120} = \frac{6}{5} = 1,2
\end{aligned}$$

### Pinta-ala-kertoimet eri poikkileikkausmuodoille

Likiarvoisia kertoimen  $\kappa$  arvoja on annettu Rakennusteollisuuden (1995, 32–34) lähteessä eri seinämuotojen yhdistelmille. Suoran seinän osalta kertoimet on esitetty suoraan kuvassa 4 ilman kaavoja:

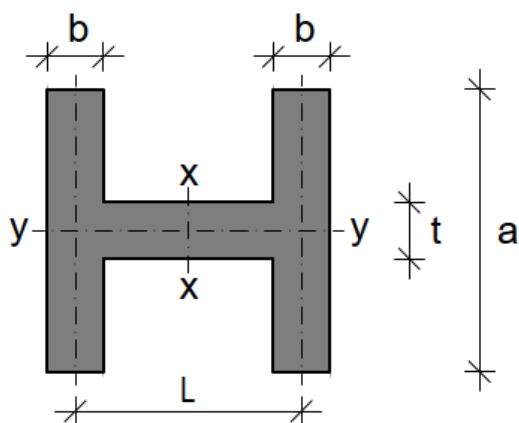


KUVA 4. Suoran seinän  $\kappa$ -kertoimet (Laitinen 2024, muokattu alkuperäislähteestä Rakennusteollisuus 1995, 32)

$$\kappa_y = 1,2$$

$$\kappa_x = 0$$

I-poikkileikkaus:

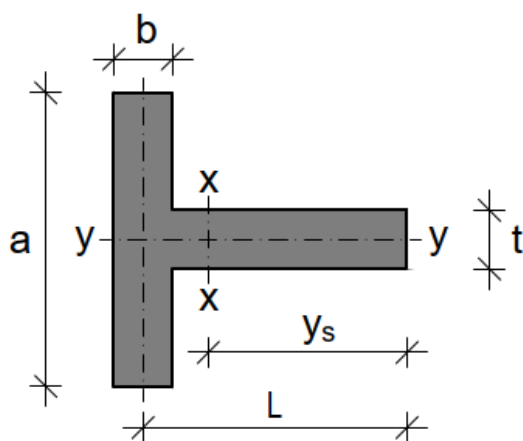


KUVA 5. I-poikkileikkauksen  $\kappa$ -kertoimet (Laitinen 2024, muokattu alkuperäislähteestä Rakennusteollisuus 1995, 32)

$$\kappa_y = \frac{A * \frac{1}{t} * \left( \frac{a^2 * b^2 * L^3}{4} + \frac{a * t * L^4 * b}{12} + \frac{t^2 * L^5}{120} \right)}{I^2} \quad (7)$$

$$\kappa_x = \frac{2,4 * A}{a * b} \quad (8)$$

T-poikkileikkaus:



Kuva 6. T-poikkileikkauksen  $\kappa$ -kertoimet (Laitinen 2024, muokattu alkuperäislähteestä Rakennusteollisuus 1995, 33)

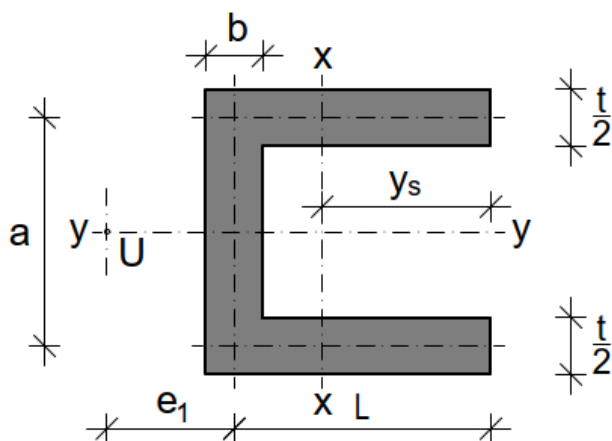
$$\kappa_y = \frac{A * t * \left( \frac{L^5}{20} - \frac{y_s * L^4}{4} + \frac{y_s^2 * L^3}{3} \right)}{I^2} \quad (9)$$

$$\kappa_x = \frac{1,2 * A}{a * b} \quad (10)$$

missä

$y_s$  = seinän pään etäisyys painopisteeseen

U-poikkileikkaus:



KUVA 7. U-poikkileikkauksen  $\kappa$ -kertoimet (Laitinen 2024, muokattu alkuperäislähteestä Rakennusteollisuus 1995, 32)

$$\kappa_y = \frac{A * t * \left( \frac{L^5}{20} - \frac{y_s * L^4}{4} + \frac{y_s^2 * L^3}{3} \right)}{I^2} \quad (11)$$

$$\kappa_x = \frac{A * \frac{1}{b} * \left( \frac{L^2 * t^2 * a^3}{16} + \frac{L * b * a^4 * t}{24} + \frac{b^2 * a^5}{120} \right)}{I^2} \quad (12)$$

missä

$\kappa_y$  = Leikkausmuodonmuutoksen kerroin y-suuntaan

$\kappa_x$  = Leikkausmuodonmuutoksen kerroin x-suuntaan

$A$  = poikkileikkauksen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

$A$  = seinän jäyhyysmomentti y-suuntaan (mm<sup>4</sup>)

$a$  = laipan pituus (mm)

$t$  = uuman paksuus (mm)

$b$  = laipan paksuus (mm)

$L$  = poikkileikkauksen pituus uuman keskeltä laippaseinän päähän (mm)

$U$  = poikkileikkauksen vääntökeskiö, jossa kuormituksen resultantin paikka

$e_1$  = vääntökeskiön etäisyys uumasta (mm)

$y_s$  = uuman pään etäisyys poikkileikkauksen painopisteeseen (mm)

Vääntökeskiön etäisyyden termi  $e_1$  on esitetty kaavassa 13:

$$e_1 = \frac{3 * L^2 * t}{2 * a * b + 6 * L * t} \quad (13)$$

missä

$e_1$  = vääntökeskiön etäisyys uumasta (mm)

$L$  = poikkileikkauksen pituus uuman keskeltä laippaseinän päähän (mm)

$b$  = uuman paksuus (mm)

$t$  = laipan paksuus (mm)

$a$  = uuman pituus (mm)



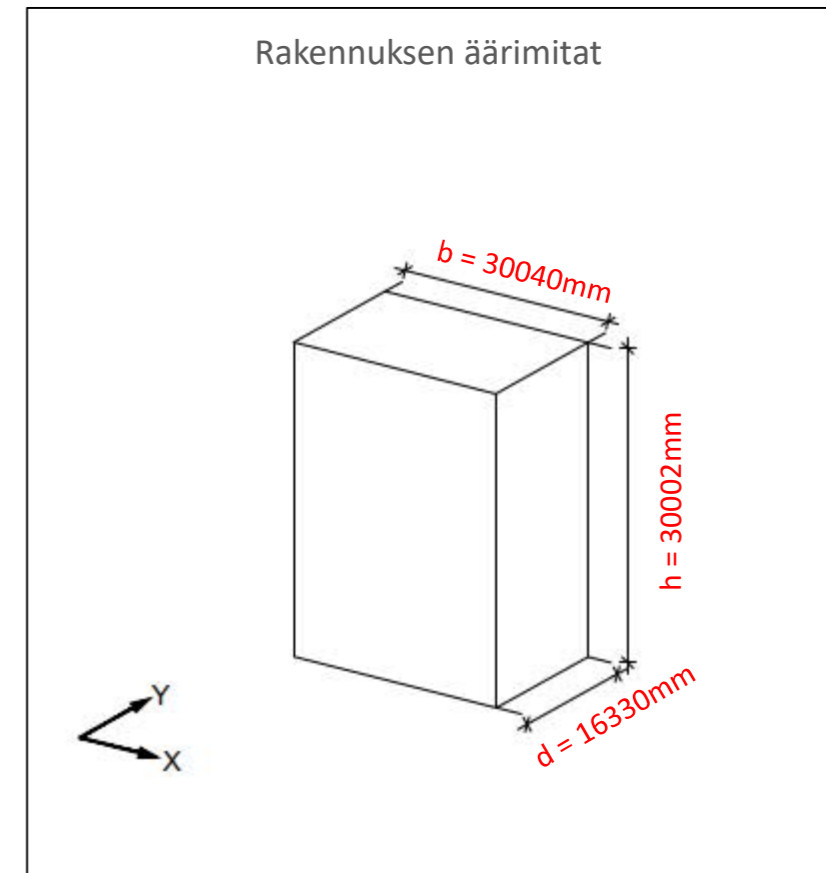
Kohde:	Opinnäytetyön vertailulaskelma
Päiväys:	17.4.2024
Tekijä:	JL

Seinien koordinaatit:

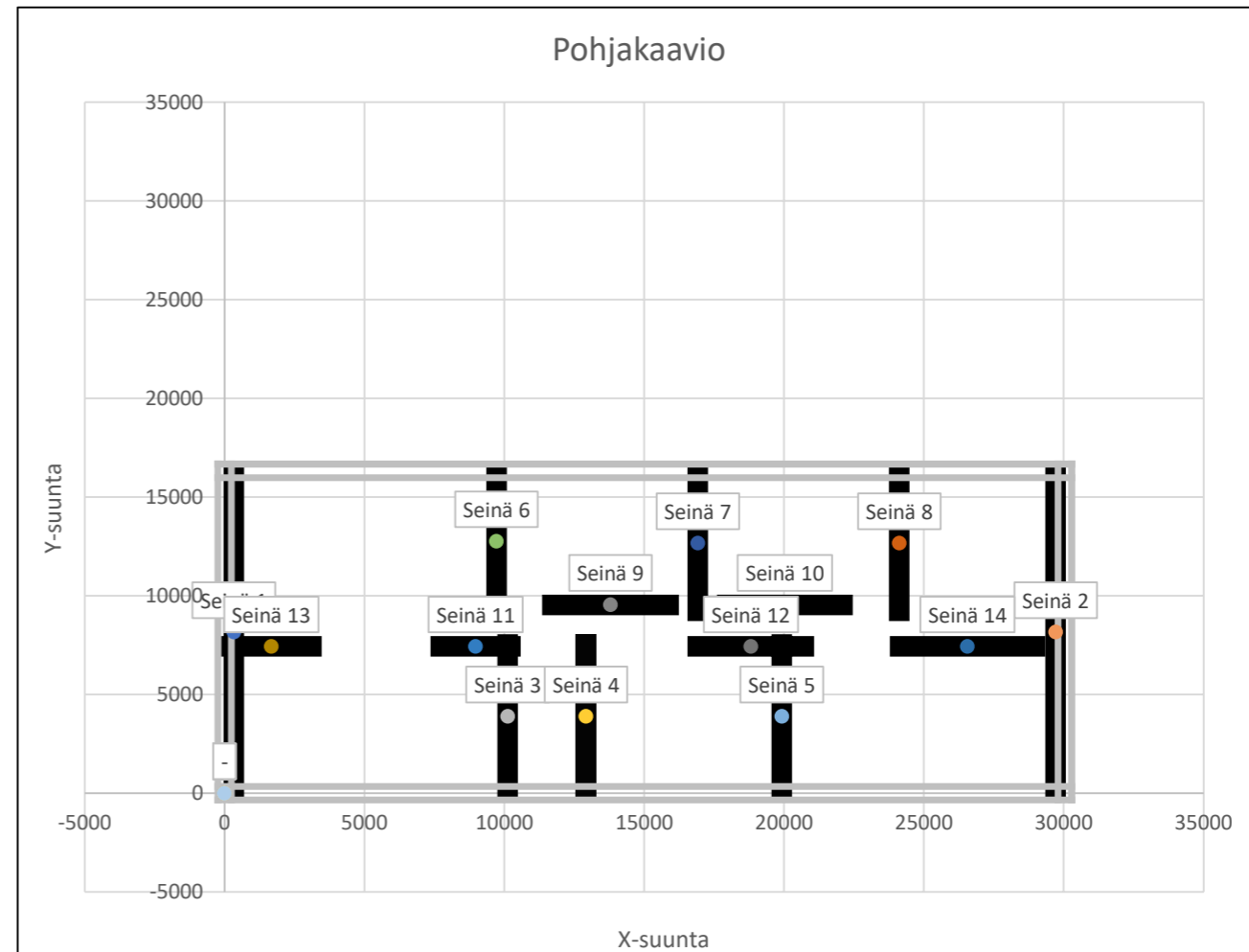
	Angle*	End X	End Y	Length	Start X	Start Y	Seinän paksuus (b) (mm)	Seinän suunta (X tai Y)	Seinän pituus (L) (mm)
Seinä 1	90	330	16090	15850	330	240	180	Y-suunta	15850
Seinä 2	90	29710	16090	15850	29710	240	180	Y-suunta	15850
Seinä 3	90	10120	7540	7300	10120	240	200	Y-suunta	7300
Seinä 4	90	12920	7540	7300	12920	240	200	Y-suunta	7300
Seinä 5	90	19920	7540	7300	19920	240	200	Y-suunta	7300
Seinä 6	90	9720	16090	6650	9720	9440	200	Y-suunta	6650
Seinä 7	90	16920	16090	6850	16920	9240	200	Y-suunta	6850
Seinä 8	90	24120	16090	6850	24120	9240	200	Y-suunta	6850
Seinä 9	0	15870	9540	4150	11720	9540	200	X-suunta	4150
Seinä 10	0	22090	9540	4120	17970	9540	200	X-suunta	4120
Seinä 11	0	10220	7440	2490	7730	7440	200	X-suunta	2490
Seinä 12	0	20710	7440	3790	16920	7440	200	X-suunta	3790
Seinä 13	0	3100	7440	2860	240	7440	200	X-suunta	2860
Seinä 14	0	28970	7440	4820	24150	7440	200	X-suunta	4820
-	-						200	-	0
-	-						200	-	0
-	-						200	-	0
-	-						200	-	0
-	-						200	-	0
-	-						200	-	0
-	-						200	-	0

Rakennuksen äärimitat:

	Angle*	End X	End Y	Length	Start X	Start Y
Rak. sivu 1	0	30040	0	30040	0	0
Rak. sivu 2	90	0	16330	16330	0	0
Rak. sivu 3	0	30040	16330	30040	0	16330
Rak. sivu 4	90	30040	16330	16330	30040	0
Rak. sivu 5	-					
Rak. sivu 6	-					
Rak. sivu 7	-					
Rak. sivu 8	-					
Rak. sivu 9	-					
Rak. sivu 10	-					
Rak. sivu 11	-					
Rak. sivu 12	-					



Pohjakaavio



- \*Laita Angleen "-", jos seinä ei käytössä
- Piirrä ääriinjat autocadissä (origo vasen alareuna) (vasemmalta oikealle) (alhaalta ylös) (prompti: LINE)
- Exporttaa geometriatiedot autocadista exceliin (prompti: DATAEXTRACTION)
- Kopioi tarpeelliset solut. Erittele seinien koordinaatit ja äärimittojen koordinaatit.
- Excelissä voi muuttaa Cad arvot numeroiksi =VALUE(SUBSTITUTE(SUBSTITUTE(A1; ""; ""); ". "; ","))

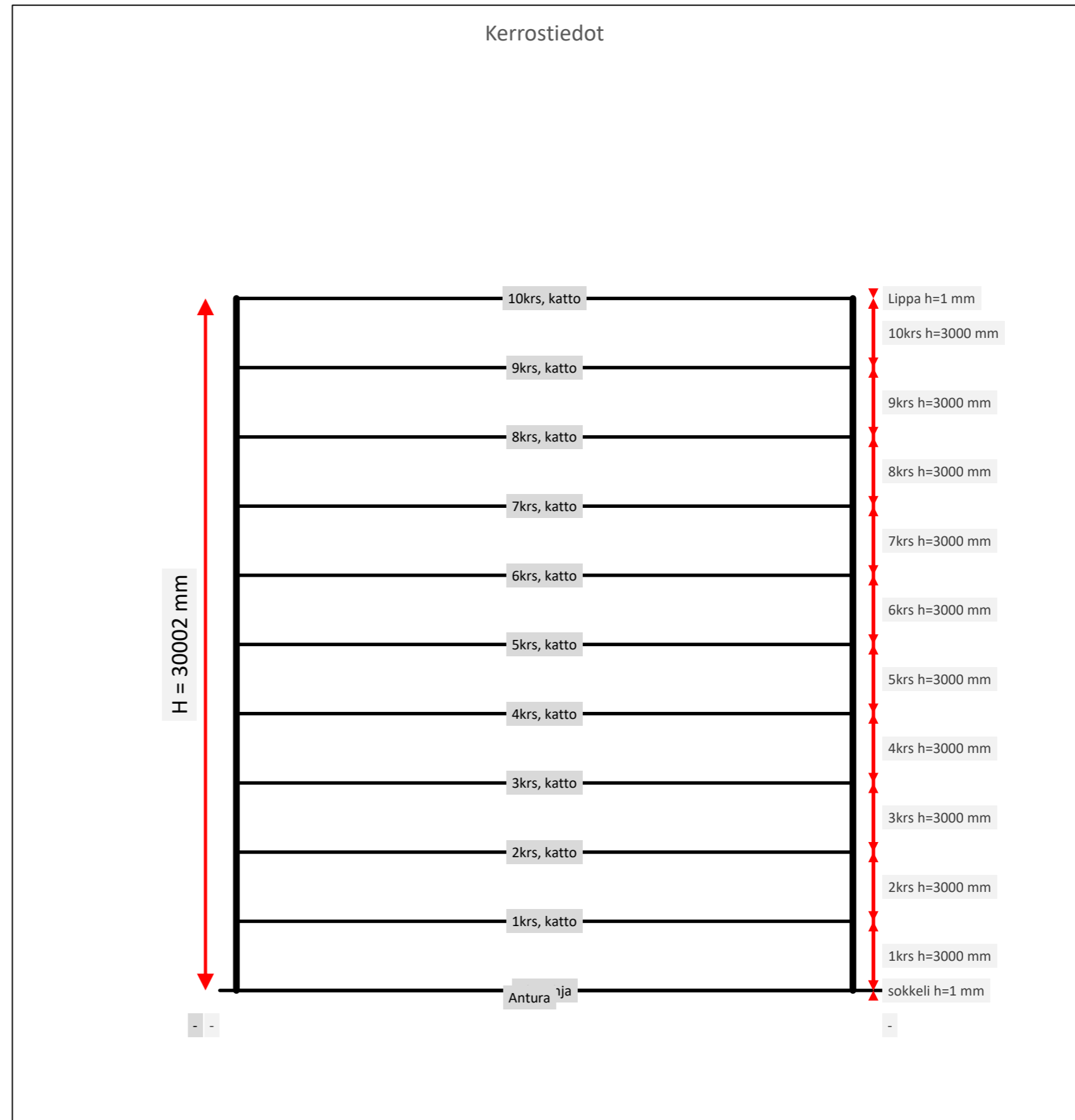
## GEOMETRIATIEDOT

Kerrostiedot:  
Montako kerrosta?  krs (1...15krs)

	kerroskorkeus
lippa	1 mm
15krs	3000 mm
14krs	3000 mm
13krs	3000 mm
12krs	3000 mm
11krs	3000 mm
10krs	3000 mm
9krs	3000 mm
8krs	3000 mm
7krs	3000 mm
6krs	3000 mm
5krs	3000 mm
4krs	3000 mm
3krs	3000 mm
2krs	3000 mm
1krs	3000 mm
sokkeli	1 mm

-Lisää tässä vain kerroskorkeus

-Ylemmissä kerroksissa voi olla mitta, vaikka ei käytössä





## OMINAISKUORMAT JA KUORMITUSTIEDOT

## Tasojen rakennetyypit ja muuttuvan kuorman tyyppi:

	kerros- kuorma $G_{k,taso}$ (kN/m <sup>2</sup> )	Muuttuvan kuorman tyyppi	Muuttuva kuorma $Q_k$ (kN/m <sup>2</sup> )	kerroksen omapaino $G_k$ (kN)	kerroksen muuttuva kuorma $Q_k$ (kN)
15krs, katto	Gk,0	Qk,0	0,00	0,00	0,00
14krs, katto	Gk,0	Qk,0	0,00	0,00	0,00
13krs, katto	Gk,0	Qk,0	0,00	0,00	0,00
12krs, katto	Gk,0	Qk,0	0,00	0,00	0,00
11krs, katto	Gk,0	Qk,0	0,00	0,00	0,00
10krs, katto	Gk,0	Qk,0	0,00	0,00	0,00
9krs, katto	Gk,YP1	Qk,lumi	2,40	2447,50	1068,00
8krs, katto	Gk,VP1	Qk,hyöty1	2,00	2937,00	890,00
7krs, katto	Gk,VP1	Qk,hyöty1	2,00	2937,00	890,00
6krs, katto	Gk,VP1	Qk,hyöty1	2,00	2937,00	890,00
5krs, katto	Gk,VP1	Qk,hyöty1	2,00	2937,00	890,00
4krs, katto	Gk,VP1	Qk,hyöty1	2,00	2937,00	890,00
3krs, katto	Gk,VP1	Qk,hyöty1	2,00	2937,00	890,00
2krs, katto	Gk,VP1	Qk,hyöty1	2,00	2937,00	890,00
1krs, katto	Gk,VP1	Qk,hyöty1	2,00	2937,00	890,00
Alapohja	Gk,0	Qk,0	0,00	0,00	0,00
Antura	Gk,0	Qk,0	0,00	0,00	0,00
summa $\Sigma$				25943,50	8188

Tasojen omapaino  $G_k$ , hyötykuorma  $Q_{k,h}$  ja lumikuorma  $Q_{k,l}$ :

$G_{k,AP1}$	0,00 kN/m <sup>2</sup>	$Q_{k,hyöty1}$	2,00 kN/m <sup>2</sup>
$G_{k,VP1}$	6,60 kN/m <sup>2</sup>	$Q_{k,hyöty2}$	0,00 kN/m <sup>2</sup>
$G_{k,VP2}$	0,00 kN/m <sup>2</sup>	$Q_{k,hyöty3}$	0,00 kN/m <sup>2</sup>
$G_{k,YP1}$	5,50 kN/m <sup>2</sup>	$Q_{k,hyöty4}$	0,00 kN/m <sup>2</sup>
$G_{k,0}$	0,00 kN/m <sup>2</sup>	$Q_{k,lumi}$	2,40 kN/m <sup>2</sup>
		$Q_{k,0}$	0,00 kN/m <sup>2</sup>

## Kerroksen pinta-ala

$A_{kerros}$  445 m<sup>2</sup>

-Määritä lattiapinta-ala, alla oleva äärimitta ei poista porrashuoneen aukkoja jne.

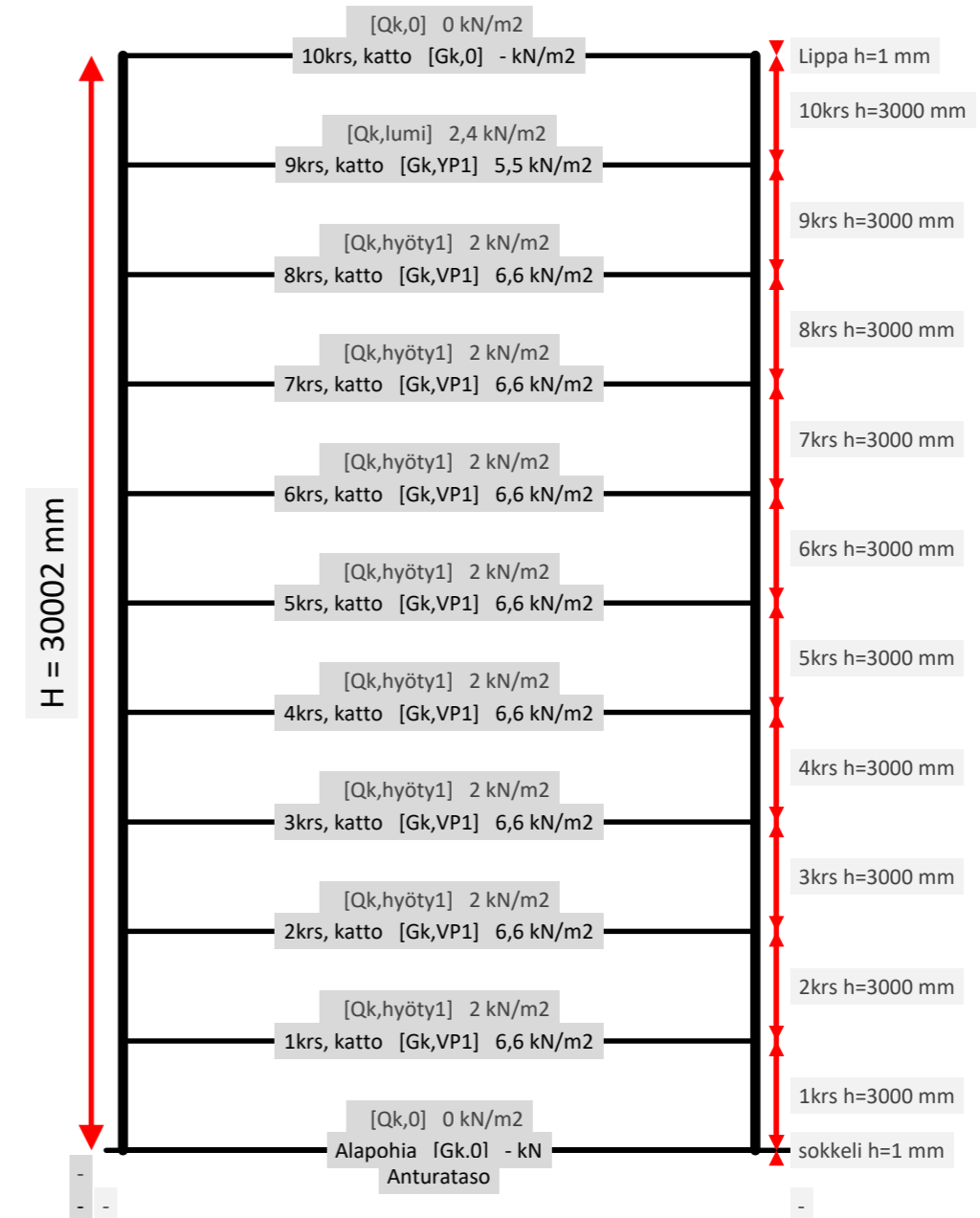
-Määritä rakennetyypit ja kullekin rakennetyypille neliökuorma

-Maanpaine kuorman syöttömahdollisuus puuttuu

automaattisesti laskee 490,6

-HUOM! Pinta-alan laskee äärimittat neliönä! Ei toimi monimuotoiseen, joten muuta käsin, jos ei täsmää

## Omapaino ja hyötykuormat ominaisarvot



## OMINAISKUORMAT JA KUORMITUSTIEDOT

Tuulikuorma  $Q_{k,tuuli}$  x- ja y-suuntaan:

Tuulikuorman ominaisarvo (imu+paine) X-suuntaan

 $Q_{k,tuuli,x}$  1,00 kN/m<sup>2</sup>

Tuulikuorman ominaisarvo (imu+paine) Y-suuntaan

 $Q_{k,tuuli,y}$  1,00 kN/m<sup>2</sup>

Tuulen pinta-ala x-suunta

 $A_{x-suunta}$  489,93166 m<sup>2</sup>

Tuulen pinta-ala y-suunta

 $A_{y-suunta}$  901,25908 m<sup>2</sup> $F_{Wk,tuuli,x}$  489,93166 kN $F_{Wk,tuuli,y}$  901,25908 kN

-Laske tuulen neliökuorma erillisellä laskentatyökalulla molemmista suunnista

-Sisällytä paine+imu

-Lukemasta vähennetty sokkelin korko

Lisävaakavoima  $\theta_i$  menetelmä 2, jäykistysjärjestelmä (EC1992 s.54-56)

Lisävaakavoima	$\theta_{i,x}$	1/400
Lisävaakavoima	$\theta_{i,y}$	1/400
Vinous	$\theta_{i,x}$	0,003
Vinous	$\theta_{i,y}$	0,003
Perusarvo	$\theta_0$	0,005 1/200
Korkeuserroin	$\alpha_h$	0,67
Määräkerroin	$\alpha_{m,x}$	0,76
Määräkerroin	$\alpha_{m,y}$	0,75
Osat x-suunta	$m_x$	6 kpl
Osat y-suunta	$m_y$	8 kpl
apuruutu $\alpha_h$ laskentaan		0,37
Korkeus	h	30,002 m
Omapaino	$\Sigma G_k$	51426,05 kN
Hyötykuorma	$\Sigma Q_{k,hyöty}$	8188,00 kN

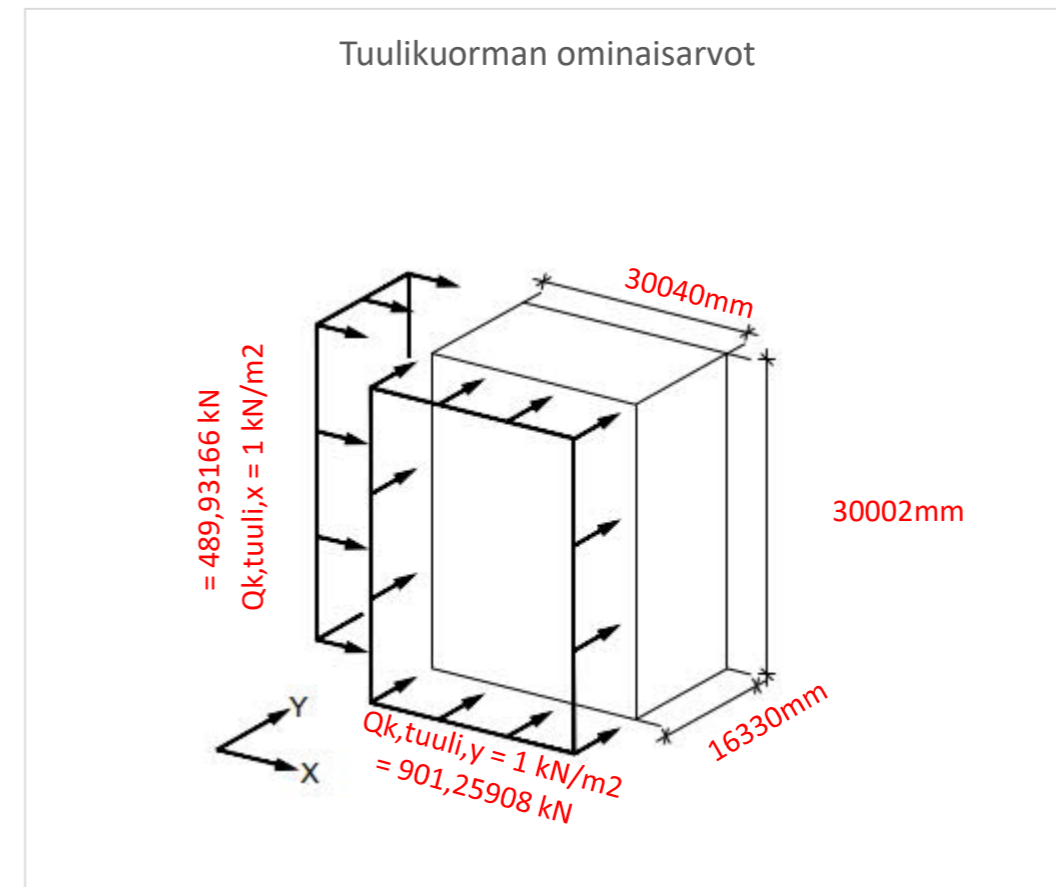
Lisävaakavoimat yhteensä:

 $G_{k,H,x}$  128,57 kN $G_{k,H,y}$  128,57 kN $Q_{k,H,x}$  20,47 kN $Q_{k,H,y}$  20,47 kN

$$\theta_i = \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m$$

## Toisen kertaluvun vaikutukset, menetelmä 1: ehjät seinät (EC1992 s.66)

Pystyosien kuorma	$F_{V,Ed}$	41367,33 kN
kerroin	$k_1$	0,31
kerrosten lukumäärä	$n_s$	9 kpl
Bet. kimmokerroin	$E_{cd}$	1802 N/mm <sup>2</sup>
Jäykistävien seinien $I_c$		1,603E+14 mm <sup>4</sup>
Rak. korkeus	L	30002 mm
Yhtälö (oikea puoli)		62162 kN
Toisen kertaluvun vaikutukset		41367 kN < 62162 kN
Täytyykö ehto?		Kyllä
Huomioidaanko vaikutus?		Ei Toisen kertaluvun vaikutuksia ei tarvitse huomioida

 $F_{H,0Ed}$  0 kN

$$F_{V,Ed} \leq k_1 \cdot \frac{n_s}{n_s \cdot 1,6} \cdot \frac{\Sigma E_{cd} \cdot I_c}{L^2}$$

missä

 $F_{V,Ed}$  = Jäykistäviin osiin vaikuttava pystysuuntainen kokonaiskuorma (N) $k_1$  = 0,31 yleinen kerroin (ei muutettu kansallisessa liitteessä) (-) $k_2$  = 0,62 korvataan kerroin  $k_1$ , jos osoitetaan, että betoni ei halkeile (-) $n_s$  = kerrosten lukumäärä (-) $E_{cd} = \frac{E_{cd}}{\gamma_{CE}}$  betonin kimmokerroin, jossa  $\gamma_{CE} = 1,2$  $I_c$  = jäykistävien osien jäyhyysmomentti (halkeilemätön (mm<sup>4</sup>))

L = rakennuksen kokonaiskorkeus (mm)

-Jos 2. kertaluku huomioidaan, syötä lisävaakavoima

-Huomioidaan G vaakavoiman kanssa

-Laskentapohjaa voisi kehittää tarkastelemaan molemmat suunnat erikseen

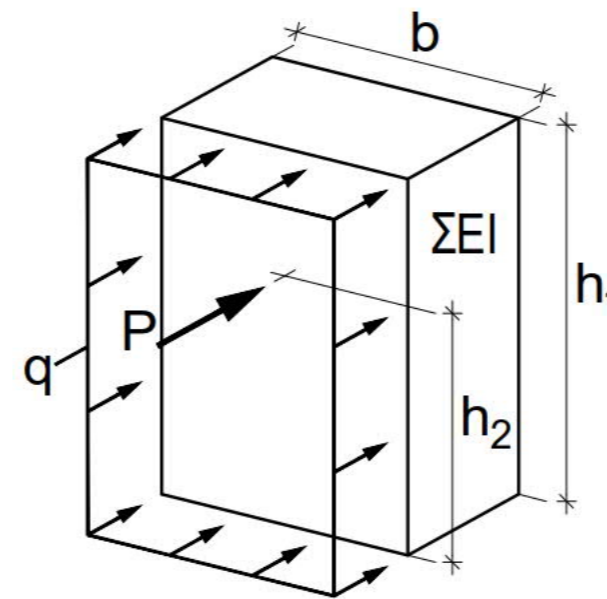
**Rakennuksen riittävän jäykkyyden arviointi**

X-suunta

Jäykkyys	$\Sigma EI_x$	<b>1,90E+17</b> N/mm <sup>2</sup>
KRT vaakavoima	$q_x$	<b>1000</b> N/mm <sup>2</sup>
Leveys x	$b_y$	<b>16330</b> mm
korkeus	$h_1$	<b>30002</b> mm
Yhtälö (oikea puoli)		<b>5,51E+19</b> N/mm <sup>2</sup>
Täytyykö ehto x-suuntaan?		<b>Kyllä</b>
<b>Rakennuksen kokonaisjäykkyys on riittävä x-suuntaan</b>		

Y-suunta

Jäykkyys	$\Sigma EI_y$	<b>5,07E+18</b> N/mm <sup>2</sup>
KRT vaakavoima	$q_y$	<b>1000</b> N/mm <sup>2</sup>
Leveys y	$b_x$	<b>30040</b> mm
korkeus	$h_1$	<b>30002</b> mm
Yhtälö (oikea puoli)		<b>1,01E+20</b> N/mm <sup>2</sup>
Täytyykö ehto y-suuntaan?		<b>Kyllä</b>
<b>Rakennuksen kokonaisjäykkyys on riittävä y-suuntaan</b>		

**-Pistekuormaa ei tarkastella****-Jos ehto ei toteudu, täytyy kokonaisjäykkyyttä parantaa**

## KUORMITUSYHDISTELYT

## Ominaiskuormien summaus:

Jäykistävät seinät yht.	$G_{k,seinät}$	14111,65 kN
Kerrostasot yht.	$G_{k,tasot}$	25943,50 kN
Kevyet seinät yht.	$G_{k,kevyet\ seinät}$	11370,90 kN
Omapaino summa	$\Sigma G_k$	51426,05 kN
Hyötykuorma	$\Sigma Q_{k,hyöty}$	8188,00 kN
Tuulikuorma X	$Q_{k,tuuli,x}$	489,93 kN
Tuulikuorma Y	$Q_{k,tuuli,y}$	901,26 kN
Lisävaakavoima X	$\Theta_{i,x}$	1/400
	$G_{k,H,x}$	128,57 kN
	$Q_{k,H,x}$	20,47 kN
Lisävaakavoima Y	$\Theta_{i,y}$	1/400
	$G_{k,H,y}$	128,57 kN
	$Q_{k,H,y}$	20,47 kN
2. kertaluvun lisävaakavoima	$F_{H,0Ed}$	0 kN

-Lumikuorma sisällytetty hyötykuormaan

-KRT yhdistelyissä oletuksena Luokka A - asuintilat

## Kuormitusyhdistelyiden tulokset:

	Vaakakuormat		Pystykuormat
	$F_x$ (kN)	$F_y$ (kN)	N (kN)
ominaiskuorma	638,97	1050,29	59614,05
MRT1 [EQU] (Staattinen tasapaino)	850,61	1467,60	46283,44
MRT2 (max omapaino)	173,56	173,56	69425,17
MRT3 (max pystykuorma1)	521,51	809,44	71421,96
MRT4 (max pystykuorma2)	872,10	1489,09	54880,84
KRT1 (ominais [ch] tuuli)	632,83	1044,15	57157,65
KRT2 (ominais [ch] hyöty)	442,99	689,79	59614,05
KRT3 (tavallinen[fr] tuuli)	232,69	314,96	53882,45
KRT4 (tavallinen[fr] hyöty)	138,80	138,80	55520,05
KRT5 (pitkäaikais [qp] hyöty)	134,71	134,71	53882,45
tuuli	734,90	1351,89	0,00
oma2	0,00	0,00	0,00
oma3	0,00	0,00	0,00
oma4	0,00	0,00	0,00
oma5	0,00	0,00	0,00
oma6	0,00	0,00	0,00
max	872,10	1489,09	71421,96

## Kuormitusyhdistelyt:

MRT1 [EQU] (Staattinen tasapaino)	0,90	* $G_k$	+	0,00	* $Q_{k,h}$	+	1,50	* $Q_{k,tuuli}$
MRT2 (max omapaino)	1,35	* $G_k$	+	0,00	* $Q_{k,h}$	+	0,00	* $Q_{k,tuuli}$
MRT3 (max pystykuorma1)	1,15	* $G_k$	+	1,50	* $Q_{k,h}$	+	0,70	* $Q_{k,tuuli}$
MRT4 (max pystykuorma2)	0,90	* $G_k$	+	1,05	* $Q_{k,h}$	+	1,50	* $Q_{k,tuuli}$
KRT1 (ominais [ch] tuuli)	1,00	* $G_k$	+	0,70	* $Q_{k,h}$	+	1,00	* $Q_{k,tuuli}$
KRT2 (ominais [ch] hyöty)	1,00	* $G_k$	+	1,00	* $Q_{k,h}$	+	0,60	* $Q_{k,tuuli}$
KRT3 (tavallinen[fr] tuuli)	1,00	* $G_k$	+	0,30	* $Q_{k,h}$	+	0,20	* $Q_{k,tuuli}$
KRT4 (tavallinen[fr] hyöty)	1,00	* $G_k$	+	0,50	* $Q_{k,h}$	+	0,00	* $Q_{k,tuuli}$
KRT5 (pitkäaikais [qp] hyöty)	1,00	* $G_k$	+	0,30	* $Q_{k,h}$	+	0,00	* $Q_{k,tuuli}$
tuuli		* $G_k$	+		* $Q_{k,h}$	+	1,5	* $Q_{k,tuuli}$
oma2		* $G_k$	+		* $Q_{k,h}$	+		* $Q_{k,tuuli}$
oma3		* $G_k$	+		* $Q_{k,h}$	+		* $Q_{k,tuuli}$
oma4		* $G_k$	+		* $Q_{k,h}$	+		* $Q_{k,tuuli}$
oma5		* $G_k$	+		* $Q_{k,h}$	+		* $Q_{k,tuuli}$
oma6		* $G_k$	+		* $Q_{k,h}$	+		* $Q_{k,tuuli}$

Luotettavuusluokan kerroin

$K_{FI} = 1,00$

-KFI kerroin vielä lisäämättä yhdistelyihin



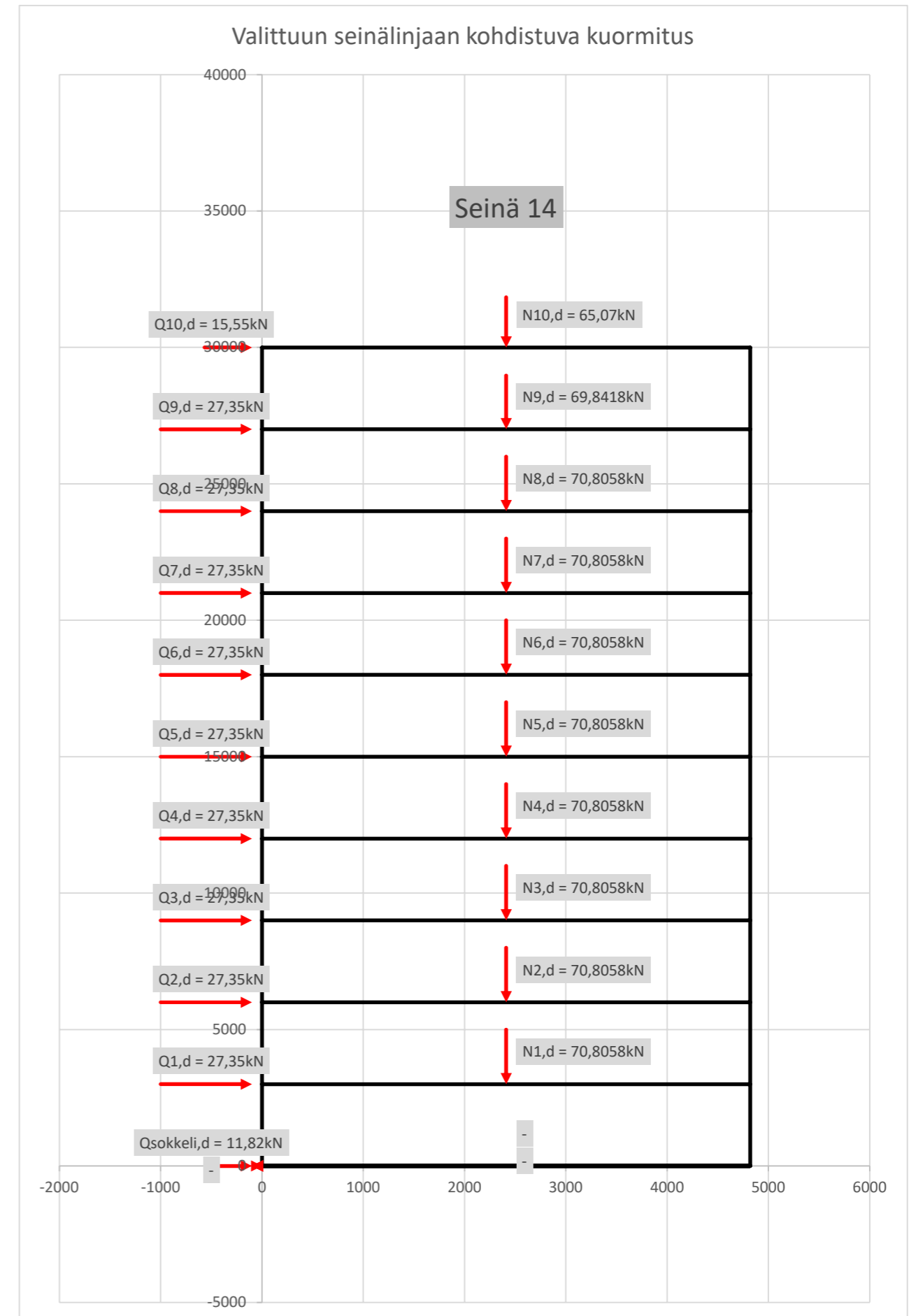


## KUORMITUSYHDISTELYT

## Jäykistävän seinän toiminta:

		vaakavoimat valittu seinä			pystykuormat valittu seinä
15krs	Q15	-	N15	-	
14krs	Q14	-	N14	-	
13krs	Q13	-	N13	-	
12krs	Q12	-	N12	-	
11krs	Q11	-	N11	-	
10krs	Q10	15,55	N10	65,07	
9krs	Q9	27,35	N9	69,84	
8krs	Q8	27,35	N8	70,81	
7krs	Q7	27,35	N7	70,81	
6krs	Q6	27,35	N6	70,81	
5krs	Q5	27,35	N5	70,81	
4krs	Q4	27,35	N4	70,81	
3krs	Q3	27,35	N3	70,81	
2krs	Q2	27,35	N2	70,81	
1krs	Q1	27,35	N1	70,81	
sokkeli	Qsokkeli	11,82	N,AP	-	
Antura	Qantura	-	Anturataso	-	
		vaakavoiman summa			Pystyvoiman summa
		273,54 kN			701,36 kN

- Vaihda seuraavalta välilehdeltä kuormitusyhdistelmä ja seinälinja
- Seinän omapaino huomioidaan oman kerroksen katossa



## SEINÄLINJAN MITOITUS

## Seinälinjan rasitukset:

Valittu kuormitusyhdistelmä:

MRT1 [EQU] (Staattinen tasapaino)

Kertoimet:	G	Q <sub>hyöty</sub>	Q <sub>tuuli</sub>
	0,9	0	1,5

Valittu seinälinja:

Seinä 14

	vaakavoiman summa	Pystyvoiman summa
$\Sigma Q_d =$	247,81 kN	$\Sigma N_d =$ 636,29 kN

## Valitun seinän geometriatietoa:

Seinän pituus	L	4,82 m
Seinän leveys	b	0,20 m

## Tukireaktiot ja jännitykset:

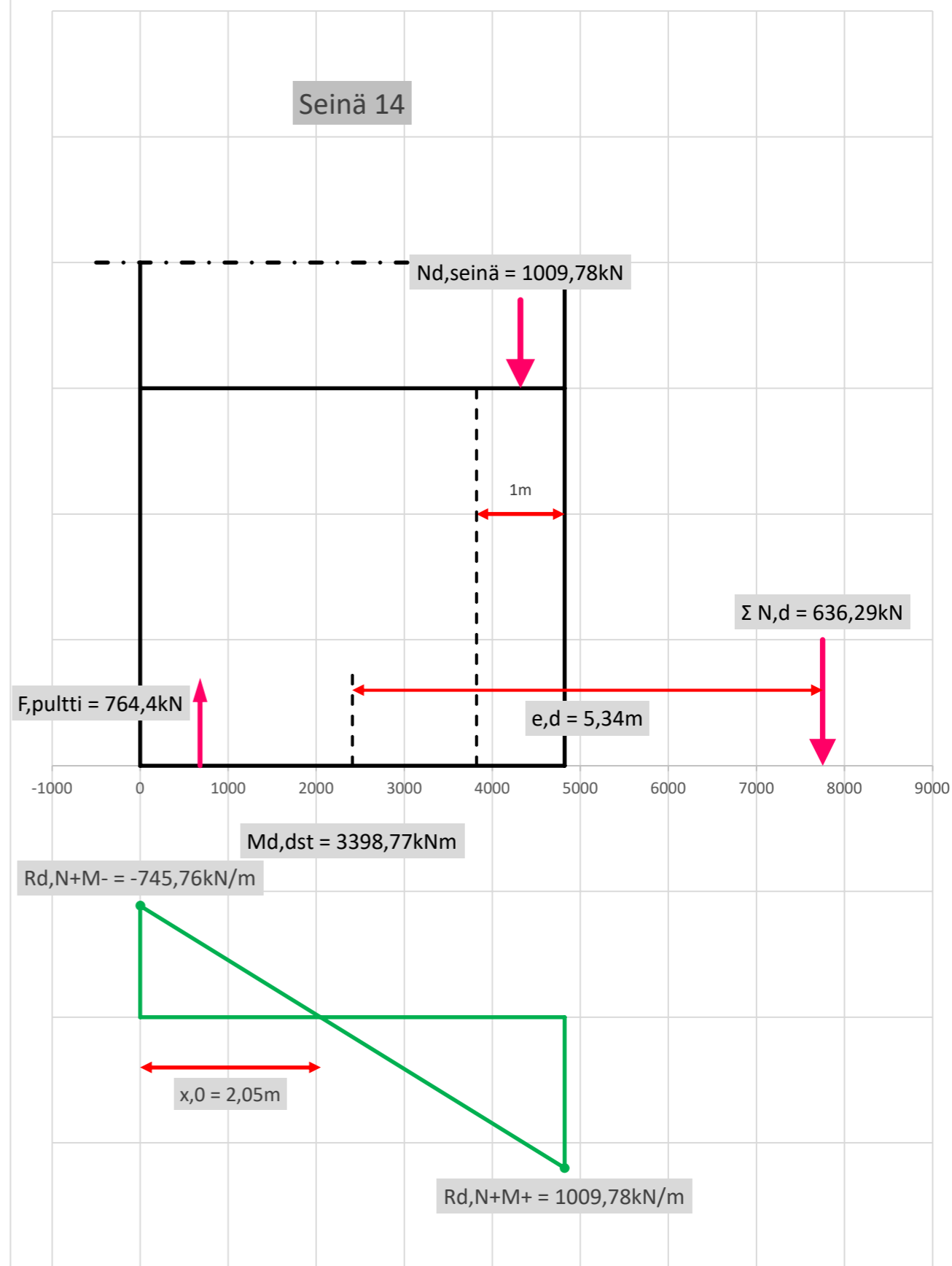
Tukireaktio anturan päälle N	$R_{d,N}$	132,01 kN/m
Tukireaktio anturan päälle M <sub>veto</sub>	$R_{d,M^-}$	-877,77 kN/m
Tukireaktio anturan päälle M <sub>puristus</sub>	$R_{d,M^+}$	877,77 kN/m
Yhdistetty tukireaktio N+M veto	$R_{d,N+M^-}$	-745,76 kN/m
Yhdistetty tukireaktio N+M puristus	$R_{d,N+M^+}$	1009,78 kN/m
N-jännitys anturatasossa	$\sigma_N$	0,66 N/mm <sup>2</sup>
M <sub>veto</sub> -jännitys anturatasossa	$\sigma_{M^-}$	-4,39 N/mm <sup>2</sup>
M <sub>puristus</sub> -jännitys anturatasossa	$\sigma_{M^+}$	4,39 N/mm <sup>2</sup>
Reunajännitys N+M veto	$\sigma_{N+M^-}$	-3,73 N/mm <sup>2</sup>
Reunajännitys N+M puristus	$\sigma_{N+M^+}$	5,05 N/mm <sup>2</sup>
Seinän puristuslujuus	$f_{cd}$	17,00 N/mm <sup>2</sup>
Jännitys $\sigma_{N+M^+} < f_{cd}$		OK, raja-arvo ei ylity

## Seinän kaatumisvarmuus:

Kaatava momentti, anturataso	$M_{d,dst}$	3398,8 kNm
Stabiloiva normaalivoima 0,9*G	$N_{d,std}$	636,23277 kN
Normaalivoiman epäkeskisyys	$e_d$	5,34 m
Seinän tehollinen leveys	d	4,82 m
Epäkeskisyyden raja-arvo	d/3	1,61 m
Kaatumisvarmuus $e_d < d/3$		-Ei vähennetty mitään L-mitasta ---> tätä pitäisi tutkia lisää miten määrittäminen?
Tarvitaanko vetopulttia?		Ei OK, raja-arvo ylittyy ja seinälinja on vedetty
Pulttivoima	$F_{pultti}$	764,4 kN

-Kaatumisvarmuuden tarkastelu tulee tehdä oikeassa yhdistelmässä, jotta momentti tulee oikein

## Seinän tukireaktio ja Normaalivoima



## SEINÄLINJAN MITOITUS

## Leikkausjännitykset ja raudoitustarve leikkaukselle:

	$\tau_{cp}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{cp}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,d}$ N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{cp} < f_{c,d}$ ehto?	Leikkausraudoitus?
15krs	-	-	-	-	-
14krs	-	-	-	-	-
13krs	-	-	-	-	-
12krs	-	-	-	-	-
11krs	-	-	-	-	-
10krs	-	-	-	-	-
9krs	0,02	0,07	1,19	Ok	Leikkausraudoitusta ei tarvita
8krs	0,07	0,15	1,23	Ok	Leikkausraudoitusta ei tarvita
7krs	0,11	0,22	1,27	Ok	Leikkausraudoitusta ei tarvita
6krs	0,15	0,29	1,30	Ok	Leikkausraudoitusta ei tarvita
5krs	0,20	0,37	1,33	Ok	Leikkausraudoitusta ei tarvita
4krs	0,24	0,44	1,36	Ok	Leikkausraudoitusta ei tarvita
3krs	0,28	0,51	1,39	Ok	Leikkausraudoitusta ei tarvita
2krs	0,32	0,59	1,42	Ok	Leikkausraudoitusta ei tarvita
1krs	0,37	0,66	1,45	Ok	Leikkausraudoitusta ei tarvita
sokkeli	0,39	-	1,16	Ok	Leikkausraudoitusta ei tarvita
Antura	0,39	-	1,16	Ok	Leikkausraudoitusta ei tarvita

## k-kerroin leikkausjännitykselle

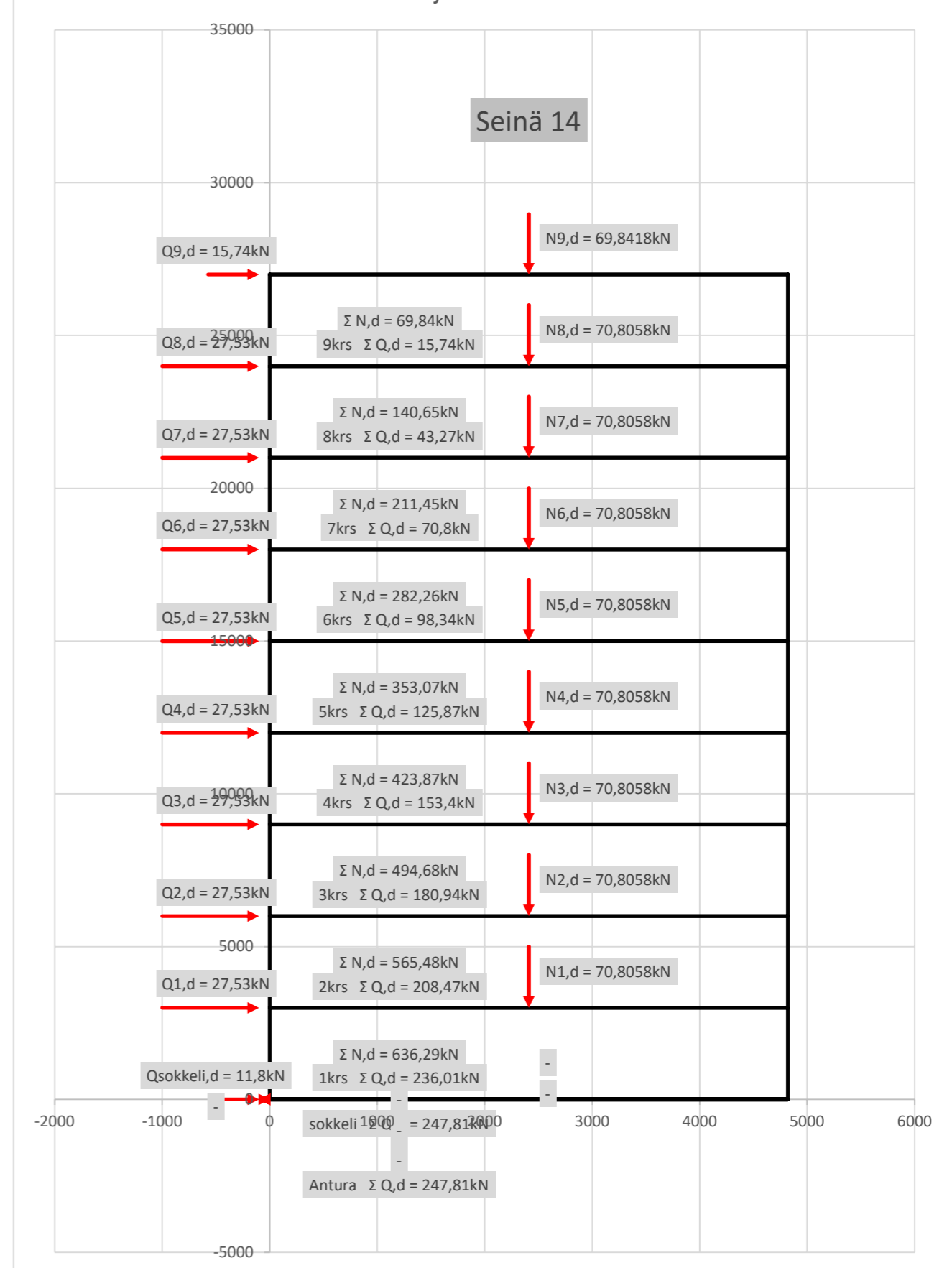
 $F_{ctd,pl}$  $F_{cd,pl}$  $\sigma_{c,lim}$ 

1,5	(EC1992: s.188-190)
1,16	N/mm <sup>2</sup>
14,00	N/mm <sup>2</sup>
5,61	N/mm <sup>2</sup>

## Kerroskohtaiset rasitukset:

	$Q_d$ kN	$N_d$ kN
15krs	-	-
14krs	-	-
13krs	-	-
12krs	-	-
11krs	-	-
10krs	-	-
9krs	15,74	69,84
8krs	43,27	140,65
7krs	70,80	211,45
6krs	98,34	282,26
5krs	125,87	353,07
4krs	153,40	423,87
3krs	180,94	494,68
2krs	208,47	565,48
1krs	236,01	636,29
sokkeli	247,81	-
Antura	247,81	-

## Valittuun seinälinjaan kohdistuva kuormitus



## SEINÄLINJAN MITOITUS

## Kerroskohtainen vaakasauma ja pystysauma:

	kitka	riittääkö kitka?		pystysauma
	$V_{uc}$ kN	$V_{uc} > Q_d?$ kN	$F_{Tappi}$ kN	$V_d$ kN
15krs	-	-	-	-
14krs	-	-	-	-
13krs	-	-	-	-
12krs	-	-	-	-
11krs	-	-	-	-
10krs	-	-	-	-
9krs	18,86	Kyllä	0	4,9
8krs	37,97	Ei	5,3	13,47
7krs	57,09	Ei	13,71	22,03
6krs	76,21	Ei	22,13	30,6
5krs	95,33	Ei	30,54	39,17
4krs	114,45	Ei	38,95	47,74
3krs	133,56	Ei	47,38	56,31
2krs	152,68	Ei	55,79	64,88
1krs	171,8	Ei	64,21	73,44
sokkeli	-	Kyllä	0	77,12
Antura	-	Kyllä	0	-

Betonin kitkakerroin

 $\mu_c$  0,27

Pystysauman sijainti alkupäästä

 $x,1$  2,42 m

-Voit säätää pystysauman paikkaa antamalla etäisyyden seinän lähtöpäästä

