PUUOSAAMISTA PIRKANMAALLE

Puukerrostalon jäykistys

Euroopan unioni
Euroopan sosiaalirahasto

Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

Aku Aspila

- Master of Science 2020, Structural engineer
- Sweco Rakennetekniikka Oy 2017 – Now
  - Structural designer
  - BIM modelling, TEKLA
  - Mainly concrete apartments buildings
- Tampere University 4/2021 – Now
  - Doctoral student
- Part-time teacher/supportive teacher at NOVIA university of applied science 10/2021 – Now
  - 2 courses in mechanics
  - 4 courses in wood material and designing

Topic of the thesis

CALCULATION METHOD FOR SLIM-FLOOR STEEL-TIMBER COMPOSITE STRUCTURES
Developing the Nordic system concept

Published articles:

1. Elastic design of steel-timber composite beam, 2022

Tavoite:

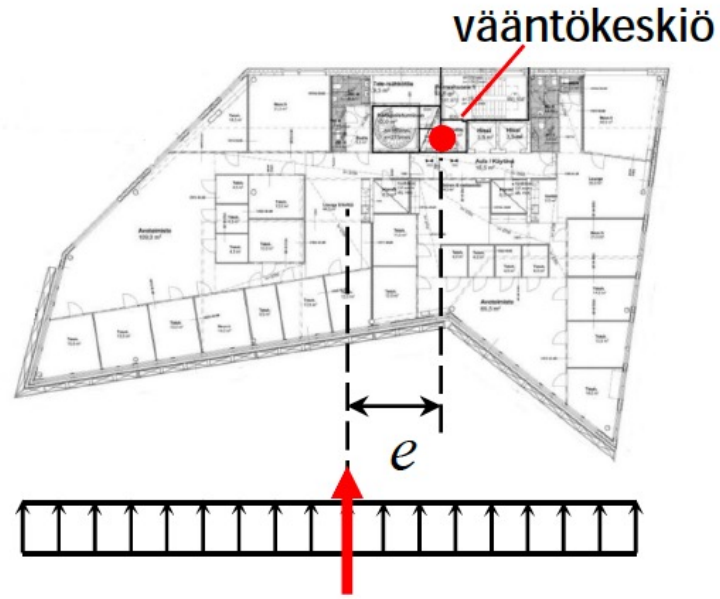
Ymmärtää millaisilla erilaisilla ratkaisuilla puukerrostaloja voidaan jäykistää.

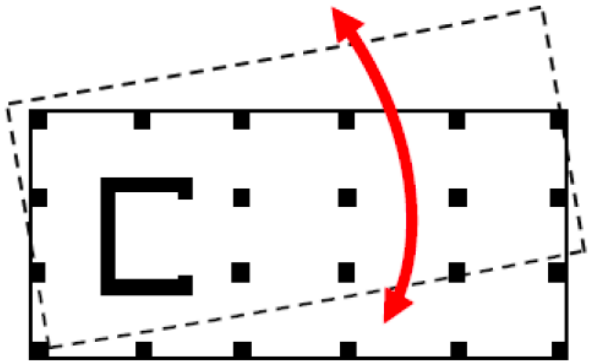
Miten jäykistys poikkeaa betonikerrostalosta

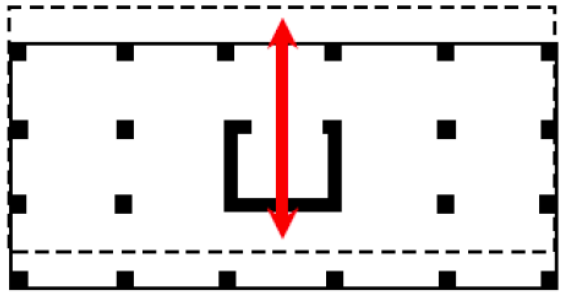
Sisällysluettelo

1. Jäykistysjärjestelmät
2. Jäykistyksen vaikutus arkkitehtisuunnitteluun
3. Välipohjan toiminta yleisesti
4. Puuvälipohjat
5. Jäykistävät seinät
6. Jäykistävien seinien väliset liitokset

- Epäkeskeinen jäykistysjärjestelmä:
  - Tuulikuorman resultantti ei kulje vääntökeskiön kautta
  - Massakeskiö ja vääntökeskiö ovat eri paikassa (maanjäristys)
  - Symmetria (massa ja jäykkyys) vähentää rakenteita ”turhaan” rasittavaa vääntöä.







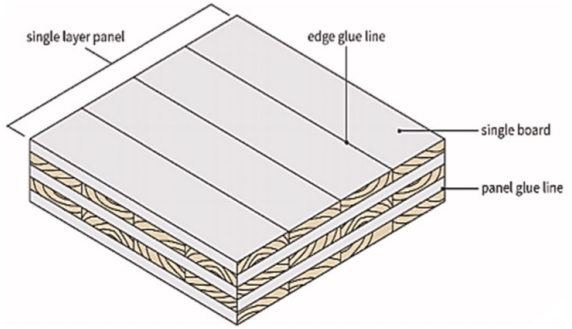
Jäykistysjärjestelmät

Puukerrostalon jäykistysmenetelmiä

- Yleisin puukerrostalon jäykistysmenetelmä (Suomessa) on
  - Levyjäykisteiset seinät + Levyjäykisteiset välipohjat
- Pilari-palkkirungon jäykistämisessä voidaan käyttää
  - Mastopilareita (max 4-kerroksinen rakennus)
  - Diagonaalijäykisteitä
  - Levyjäykisteitä
- Puukerrostalon jäykistämiseen voidaan käyttää myös betonirakenteisia porrastorneja tai betonisia väliseiniä (core)
- Erilaiset hybridivaihtoehdot, joissa yhdistellään puuta, terästä ja betonia ovat usein jäykistysjärjestelmän yksinkertaisen mekaanisen toiminnan aikaansaamiseksi parhaimpia

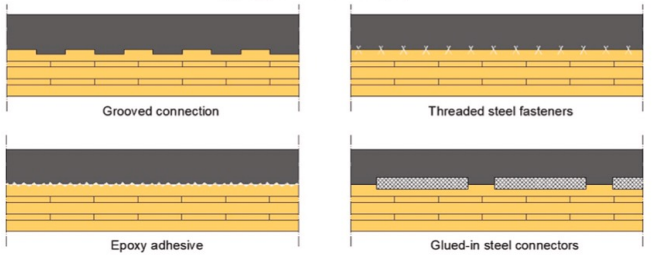
Levyjäykisteinen puukerrostalo

- Levyjäykisteisen puukerotalon toimintaa vaikuttaa suuresti valittu rakennetyyppi
- **CLT seinä**
  - omaa todella hyvän jäykistyskapasiteetin
  - toimii hyvin jäykisteenä vaikka julkisivu olis raskaasti aukoitettu
- **Rankarunko**
  - Jäykistyskapasiteetti on riippuvainen käytettävästä levytyksestä ja levytyksen kiinnityksestä
  - Seinän aukoitus vaikuttaa merkittävästi jäykistyslaskentaan
  - Voidaan materiaalioptimoida ottamaan pystykuormian vastaan
- Välipohjien ja seinien jäykkyyttä voidaan lisätä yhdistelemällä puuta, betonia ja terästä keskenään



(a) Typical CLT composite [2]

(b) Typical TCC floor [13]



(c) CLT–concrete floor with various connections [14]

Fig. 1. Typical timber–concrete floor element.

2

Levyjäykisteinen puukerrostalo

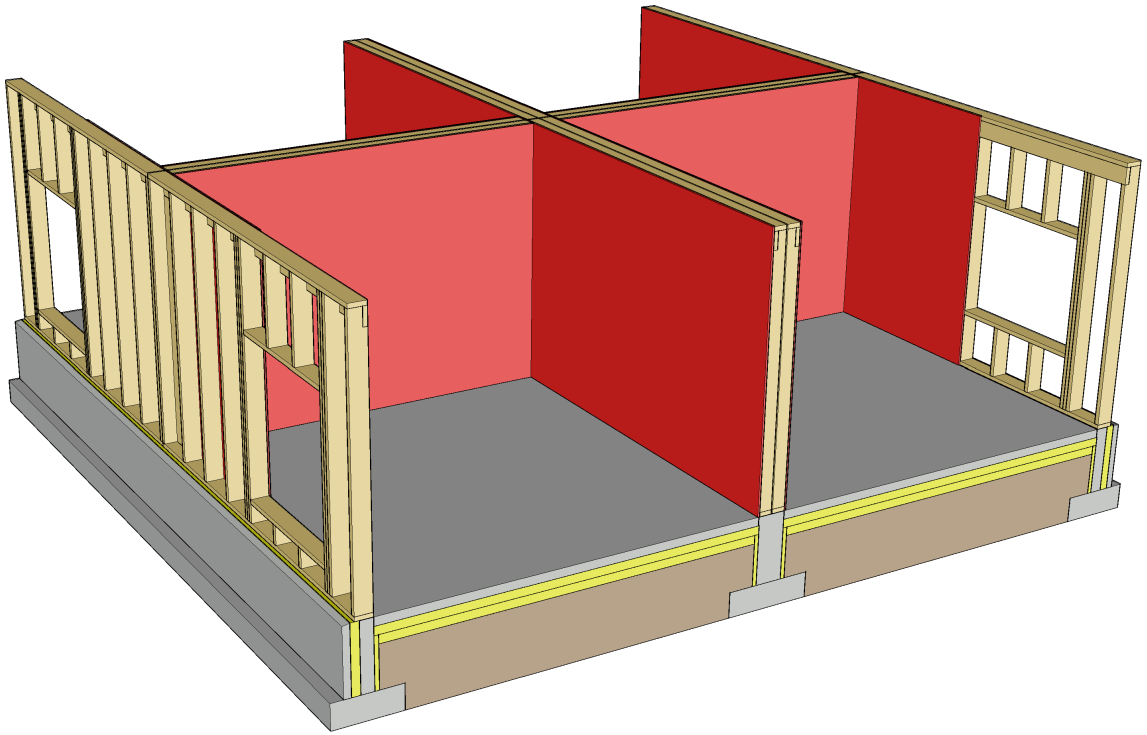
- Jäykistäviä seiniä on usein paljon, joka jakaa jäykistyskuormaa tehokkaasti laajalle alueelle, jonka ansiosta jäykisteiden kiinnitykset ovat siroja ja helppo toteuttaa

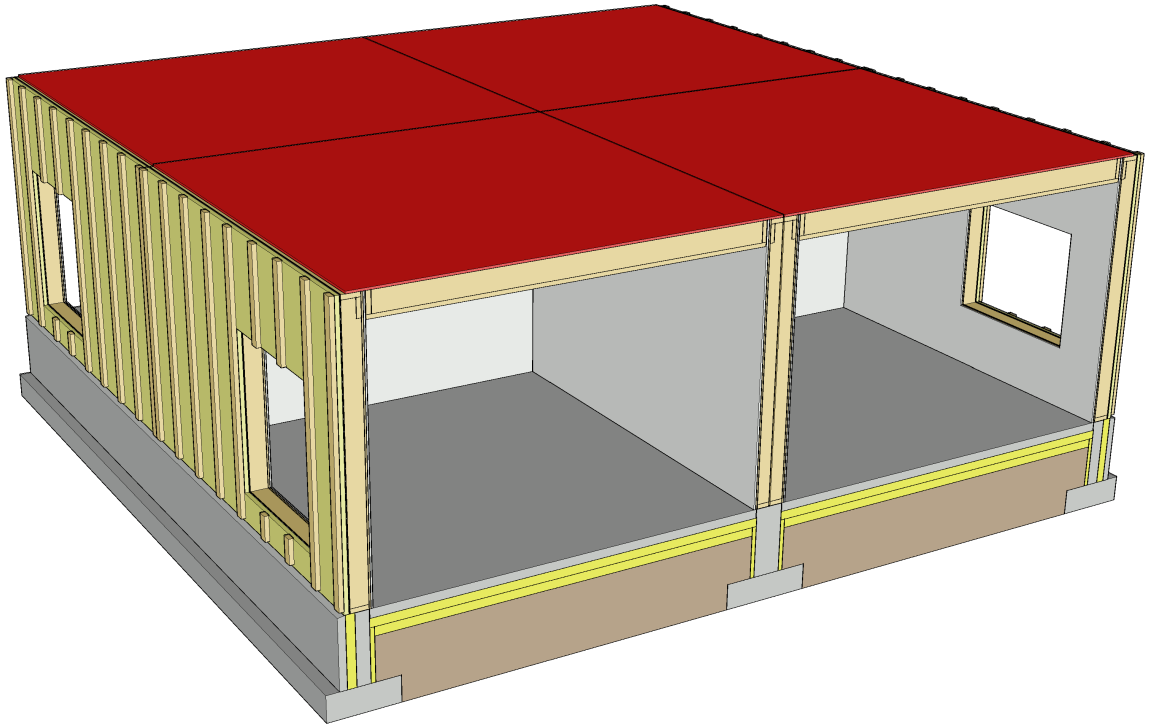
- Aukoitus ja levyn pinnan geometria vaikuttaa suuresti jäykistyksen toimintaan. Mitä umpinaisempi ja “neliömpi” jäykistävä levy on sitä paremmin se toimii jäykisteenä

- Jäykistäville seinille kannattaa pyrkiä keräämään mahdollisimman paljon kuormaa optimaalisen jäykistyskyvyn saavuttamiseksi. Mitä enemmän massaa jäykistävään seinään kohdistuu, sen pienempi riski on jäykistävän seinän ankkurointiin

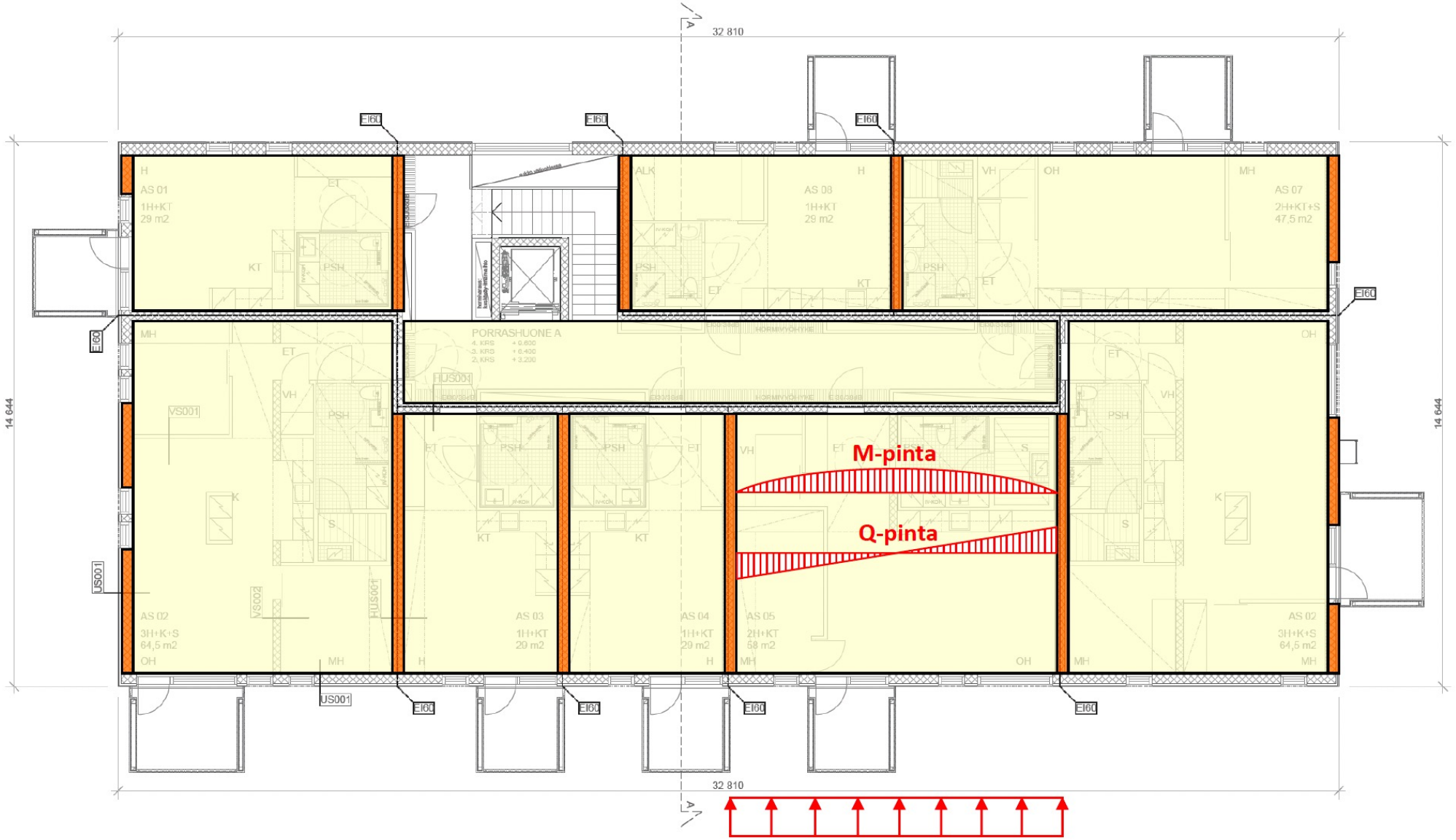
- Rakennus on jäykisteiden runsaan määrän takia hyvinkin stabiili

Levyjäykisteinen puukerrostalo

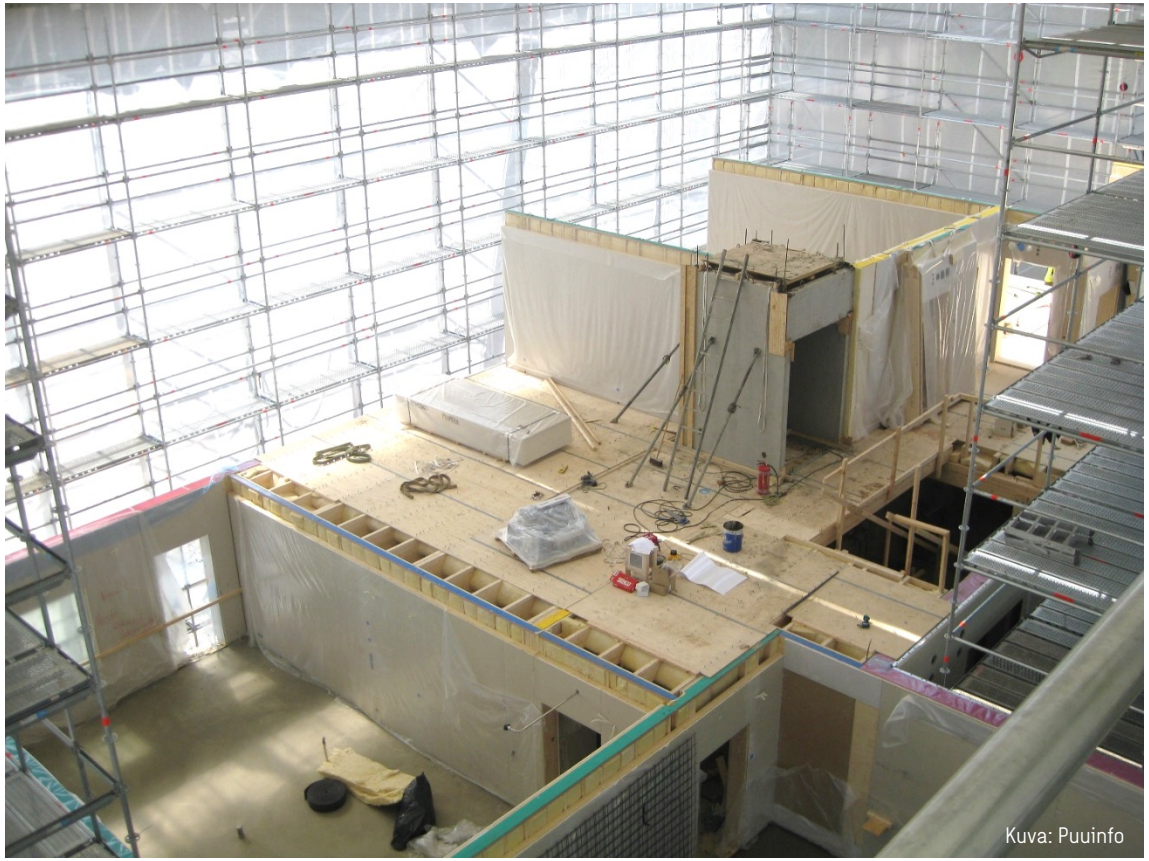




Levyjäykisteinen puukerrostalo



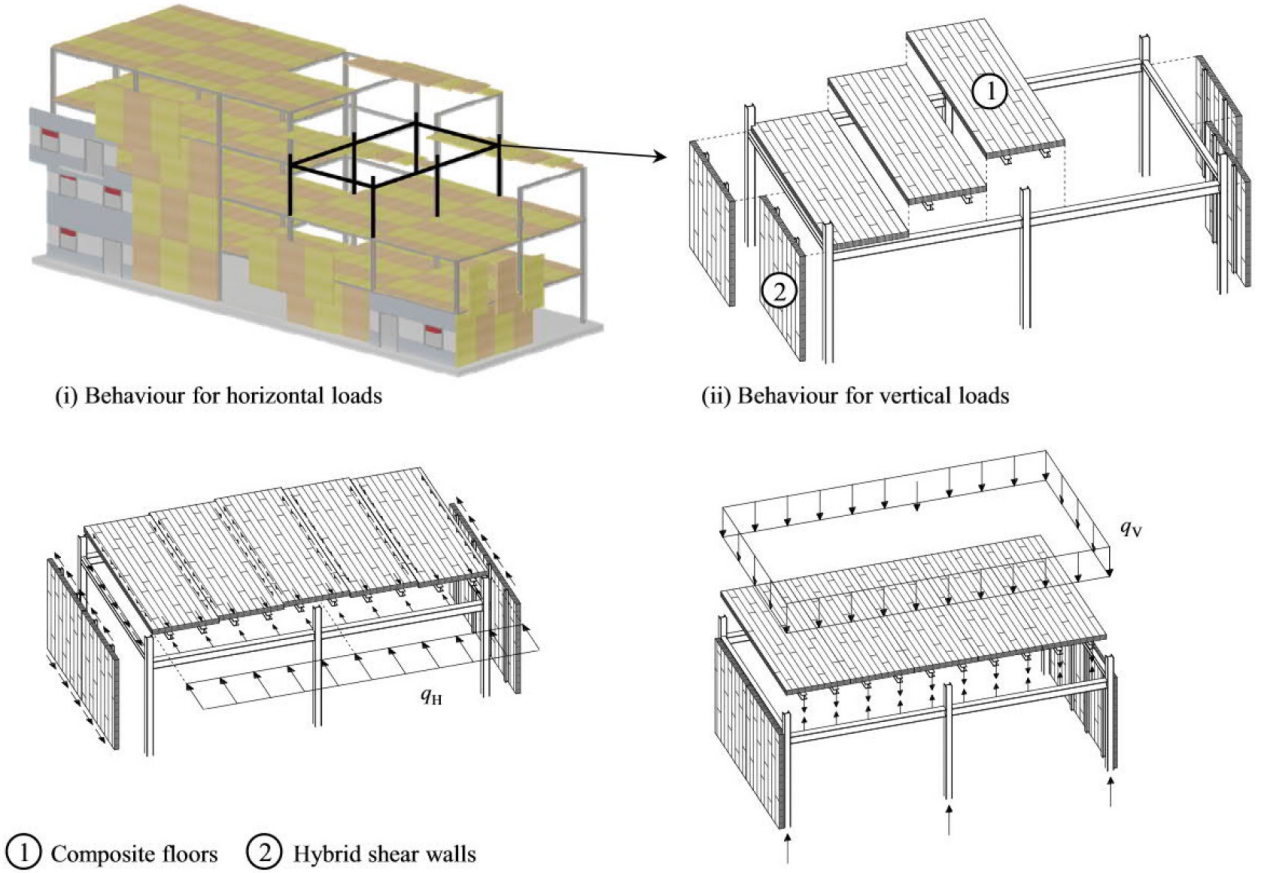
Levyjäykisteinen puukerrostalo


Kuva: Puuinfo

Kuva: www.aiff.net.au

Hybridi ratkaisu: Levyjäykisteinen puukerrostalo

- Kuvassa havainnollistettu teräskehikon jäykistystä käyttäen CLT välipohajia ja CLT levyjäykisteitöä seinissä
  - Loss et al. 2017
  - Loss et al. 2016



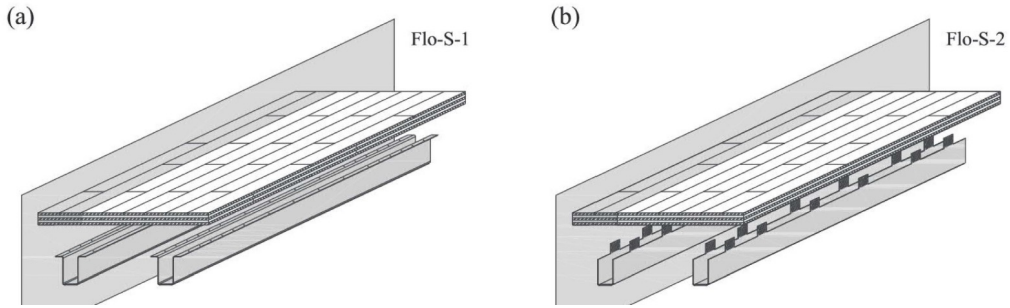


Fig. 1. Axonometric view of the building and exploded view of the hybrid structure with load path depicted for the vertical and horizontal loads.

Hybridi ratkaisu: Levyjäykisteinen puukerrostalo

- Kuvassa havainnollistettu teräskehikon jäykistystä käyttäen CLT välipohajia ja CLT levyjäykisteitöä seinissä
  - Loss et al. 2017

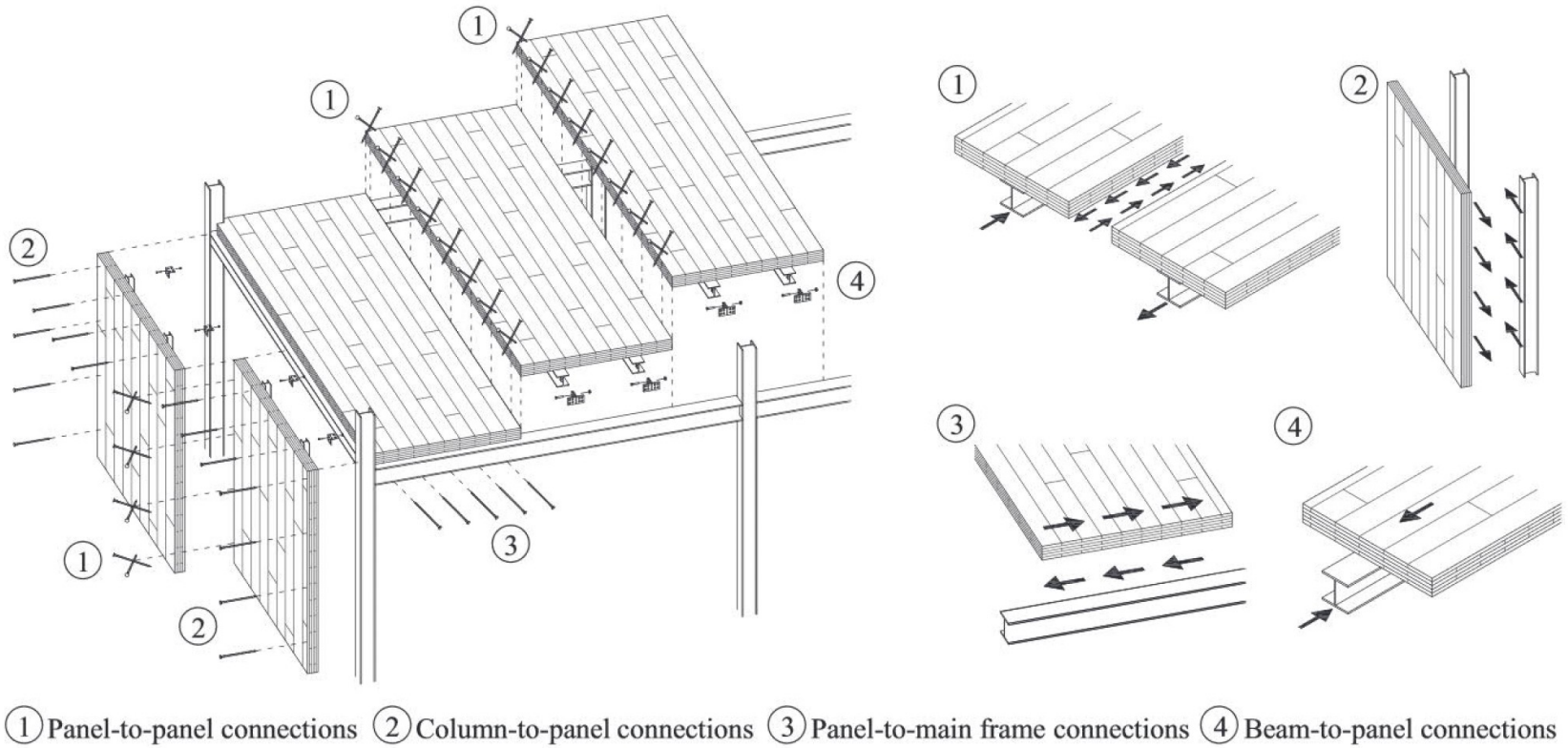


Fig. 2. Connections of the construction system. Different types of fasteners with steel-to-timber and timber-to-timber shear plane configurations.

Hybridi ratkaisu: Levyjäykisteinen puukerrostalo

- Roncari et al. 2021

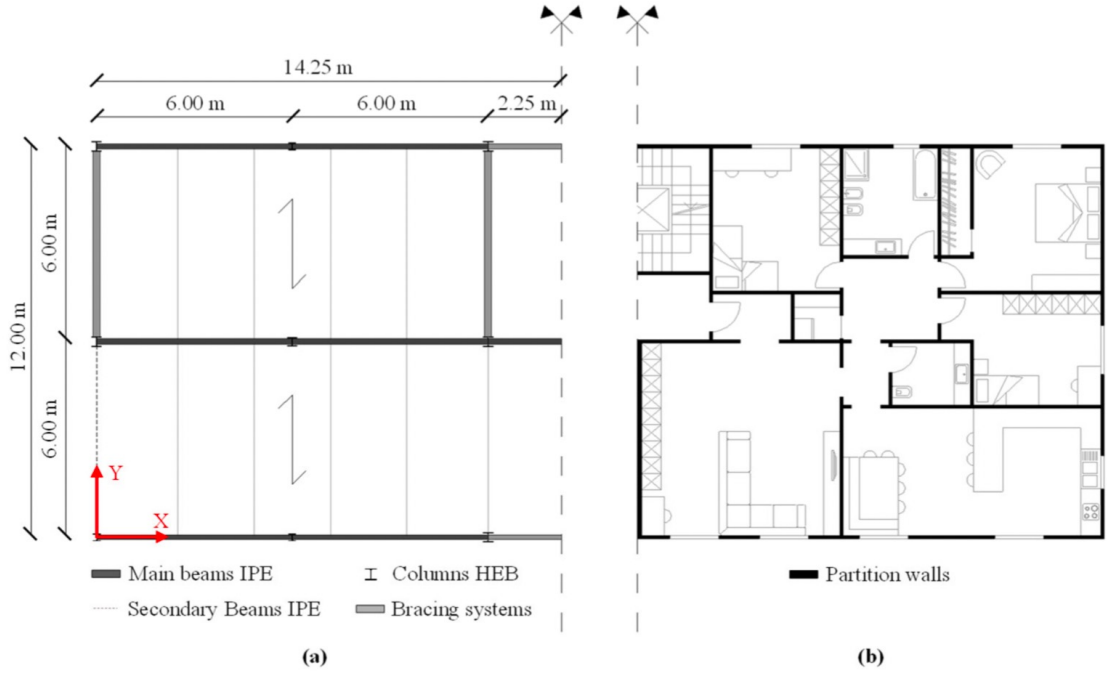


Figure 1. Structure arrangement (**a**) and apartments' layout (**b**).

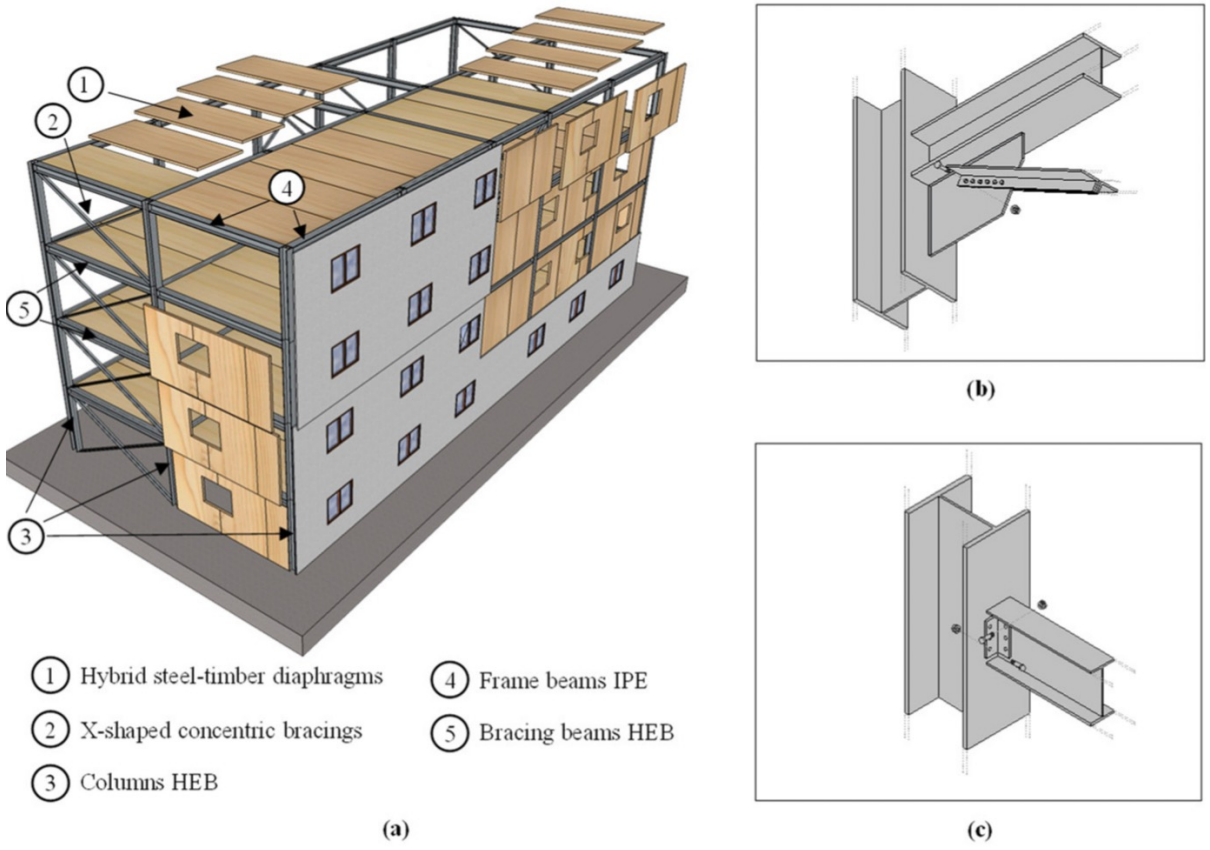


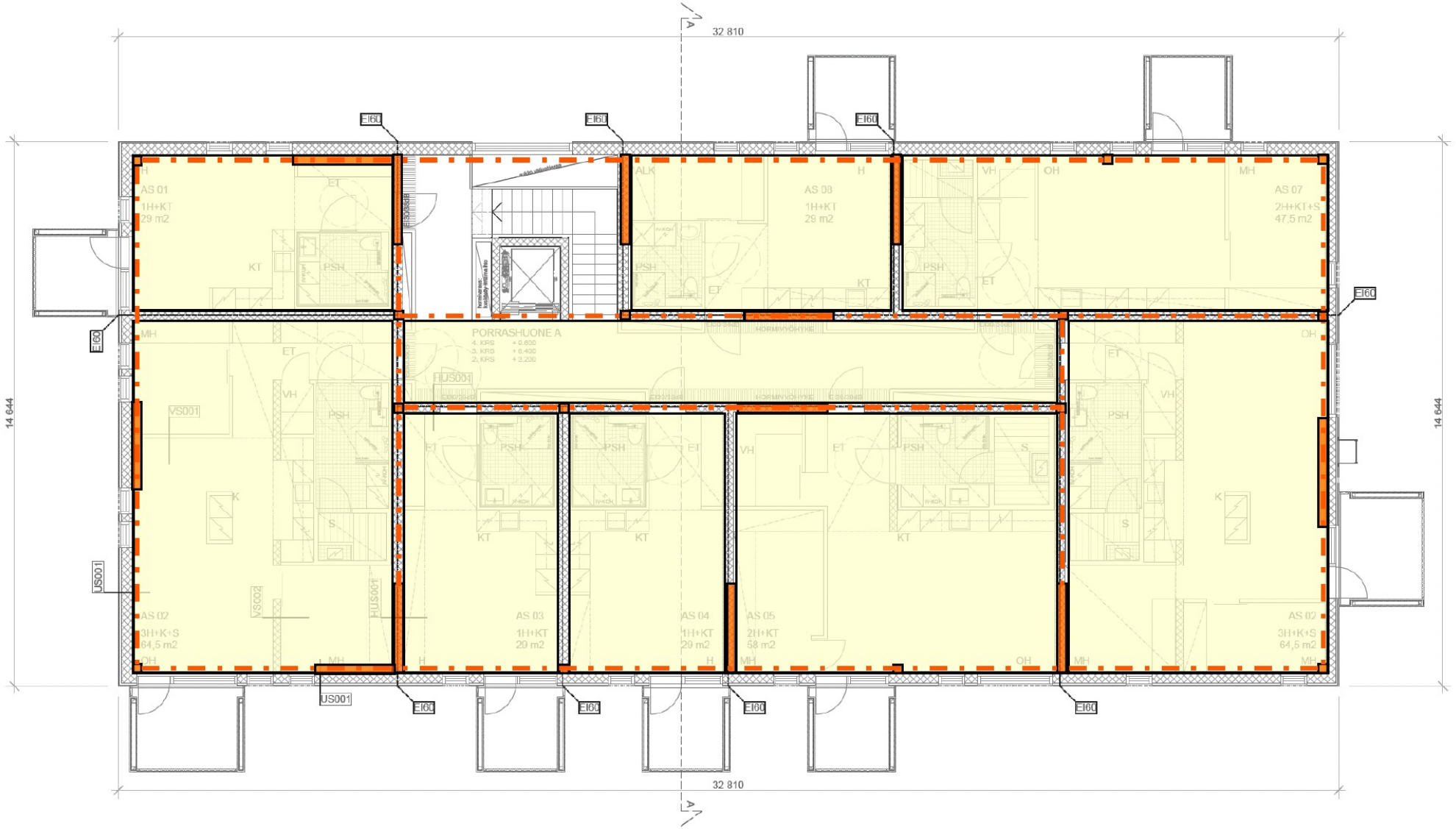
Figure 2. Building construction model (**a**); Bracing joints (**b**); Beam-to-column joints (**c**).

Pilari-palkkirunko: mastopilarijäykisteinen puukerrostalo

- Rakennuksen pystykuormatulee keskittää jäykistäville komponenteille
- Aukoitus rakennuksessa on vapaata niin vaipan kuin sisätilojenkin osalta
- Usein jäykistävät elementit ja niiden väliset liitokset ovat kooltaan massiivisia → ei päästä (kannata) korkeisiin rakennuksiin
- Jäykistävien komponenttien sijoitteluun tulee kiinnittää huomiota, jotta lopputulos on mahdollisimman stabiili

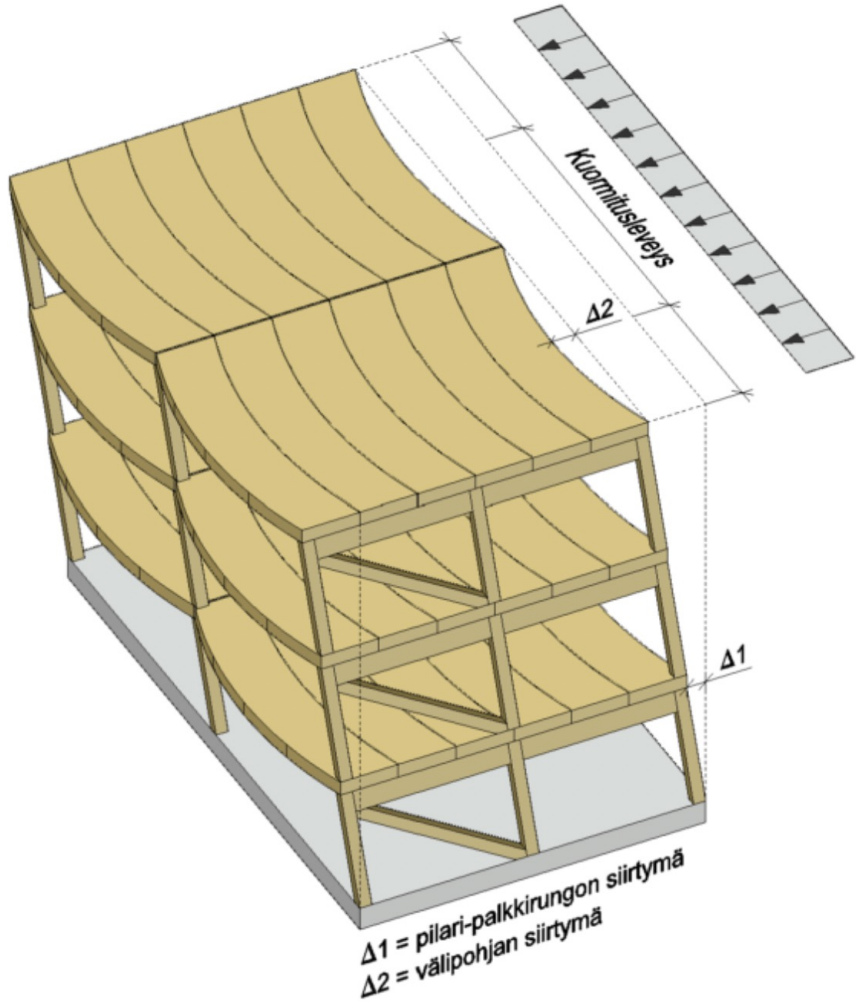
Pilari-palkkirunko: mastopilarijäykisteinen puukerrostalo

Pilari-palkkirunko: mastopilarijäykisteinen puukerrostalo

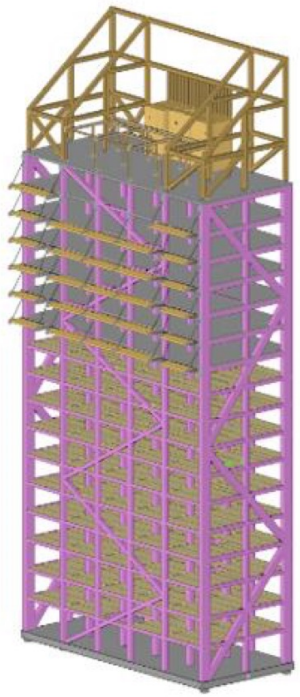


Pilari-palkkirunko: diagonaalijäykisteinen puukerrostalo

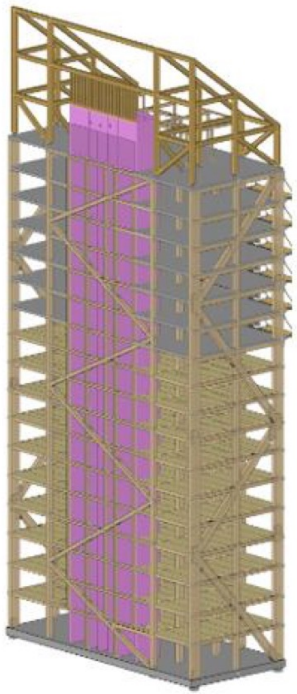
- Aukoitus rakennuksessa on vapaata niin vaipan kuin sisätilojenkin osalta
- Jäykistävät elementit ja niiden väliset liitokset kasvavat rakennuksen korkeuden kasvaessa
- Menetelmällä päästään hyvinkin korkeisiin rakennelmiin
- Jäykisteiden sijoittelun tulee kiinnittää huomiota stabiilin lopputuloksen saavittamiseksi



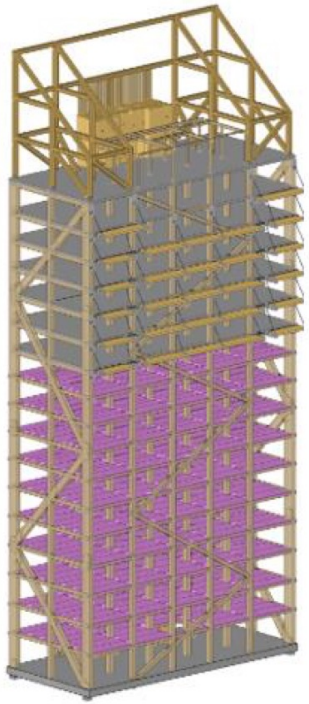
Pilari-palkkirunko: diagonaalijäykisteinen puukerrostalo



Glulam
1400 m^3



CLT
450 m^3

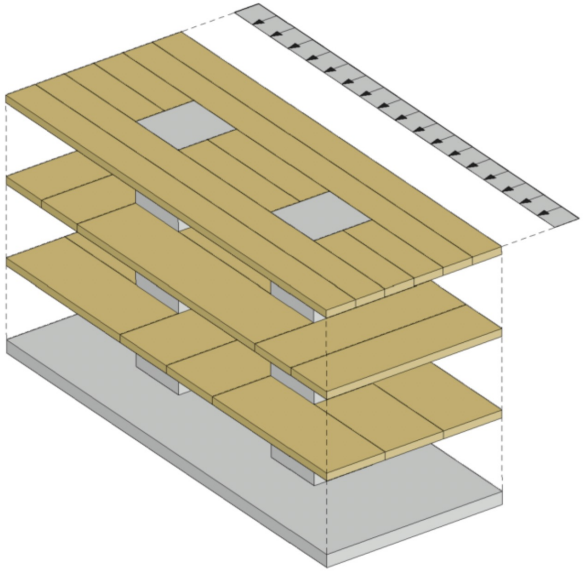


Trä8 floors / concrete slabs
5250 m^2 / 3675 m^2
650 m^3 / 1100 m^3

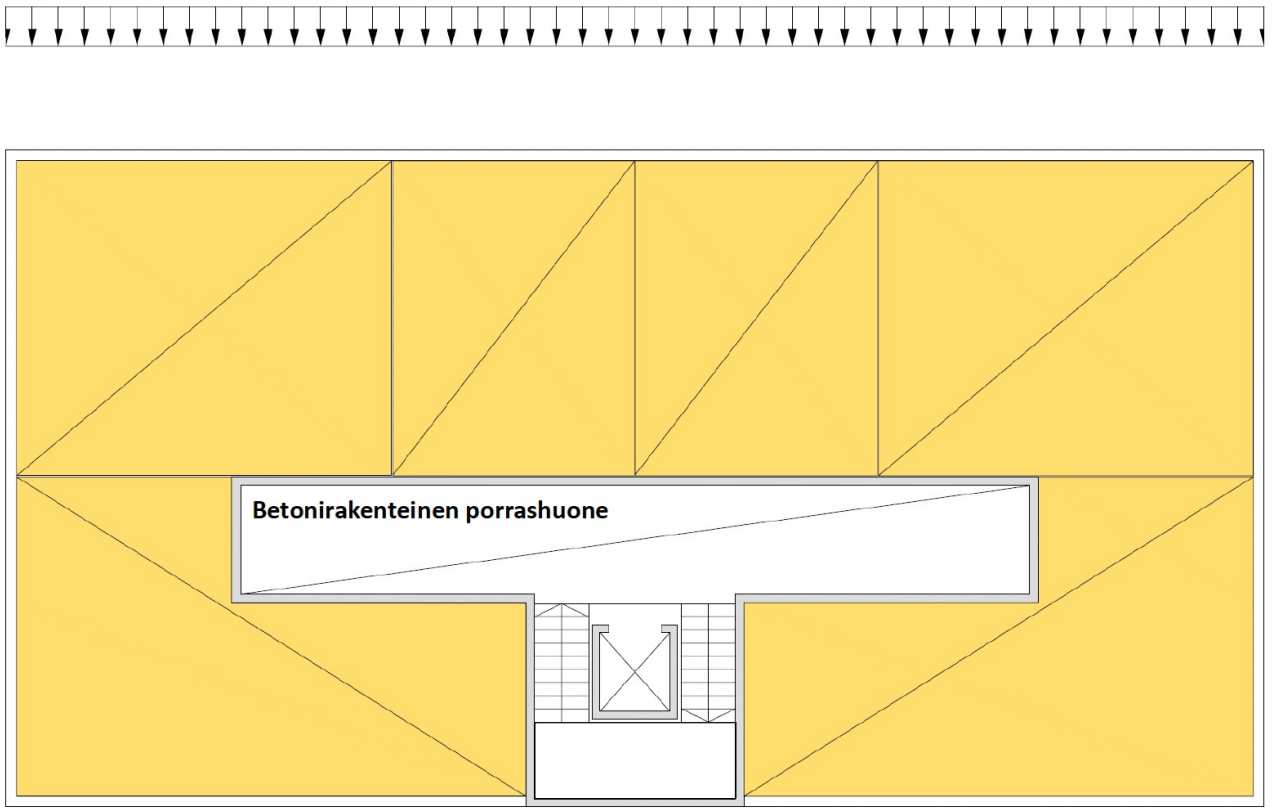
Figure 1: Mjøstårnet. Photo taken Oct 19, 2018

Betonirakenteilla jäykistetty puukerrostalo

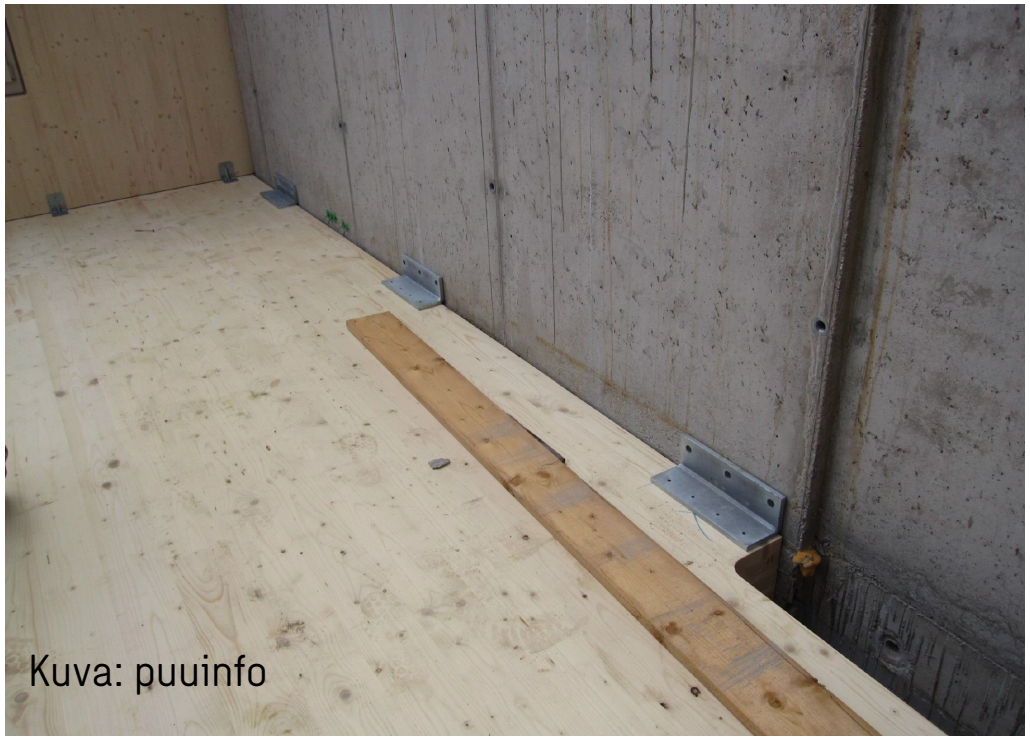
- Kuvassa on betonirakenteisella porrastornilla jäykistetty CLT-rakenteinen puukerrostalo
- Porrastornien hyödyntäminen jäykistyksessä edellyttää, että huoneistot on suunniteltu sen ympärille
- Välipohjalaatastot tulee voida kiinnittää porrastorniin, jotta kuormat välittyvät



Betonirakenteilla jäykistetty puukerrostalo



Betonirakenteilla jäykistetty puukerrostalo



Kuva: puuinfo

Kuvat: University of British Columbia

Jäykistyksen vaikutus arkkitehtisuunnitteluun

Jäykistyksen vaikutus arkkitehtisuunnitteluun

- Onnistunut jäykistysratkaisu on tiiviin yhteistyön tulos, jossa vuoropuhelu arkkitehdin, rakennesuunnittelijan, LVIS-suunnittelijan sekä toteuttavana osapuolen kanssa on aloitettu heti luonnossuunnittelussa.

- Jokainen jäykistysjärjestelmä vaatii omat toimenpiteensä parhaan toiminnan saavuttamiseksi, minkä johdosta tiivis vuoropuhelu eri osapuolten välillä on tärkeää.

- Seuraavassa tarkastellaan arkkitehtisuunnittelun näkökulmasta kutakin jäykisteratkaisua ja niihin liittyviä seikkoja, joilla jäykisteratkaisusta saadaan optimaalinen

Jäykistyksen vaikutus arkkitehtisuunnitteluun

Levyjäykistys

- Jäykistäviä seiniä tulee sijoittaa tasaisesti koko rakennuksen alueelle
- Jäykistävien seinien tulee sijaita samalla kohdalla eri kerroksissa
- Jäykistävissä seinissä tulee olla riittävän pitkä levytetty osuus
- Jäykistävissä seinissä ei voi olla suuria aukkoja peräkkäin
- Jäykistävien seinien tulee olla pituudeltaan suunnilleen samanlaisia, jotta vaakasiirtymissä ei ole suuria eroja
- Välipohjien kantosuunnat tulisi valita siten, että välipohjat välittävät mahdollisimman paljon omapainoa jäykistäville seinille (ankkurointi-voiman vähentäminen)

Jäykistyksen vaikutus arkkitehtisuunnitteluun

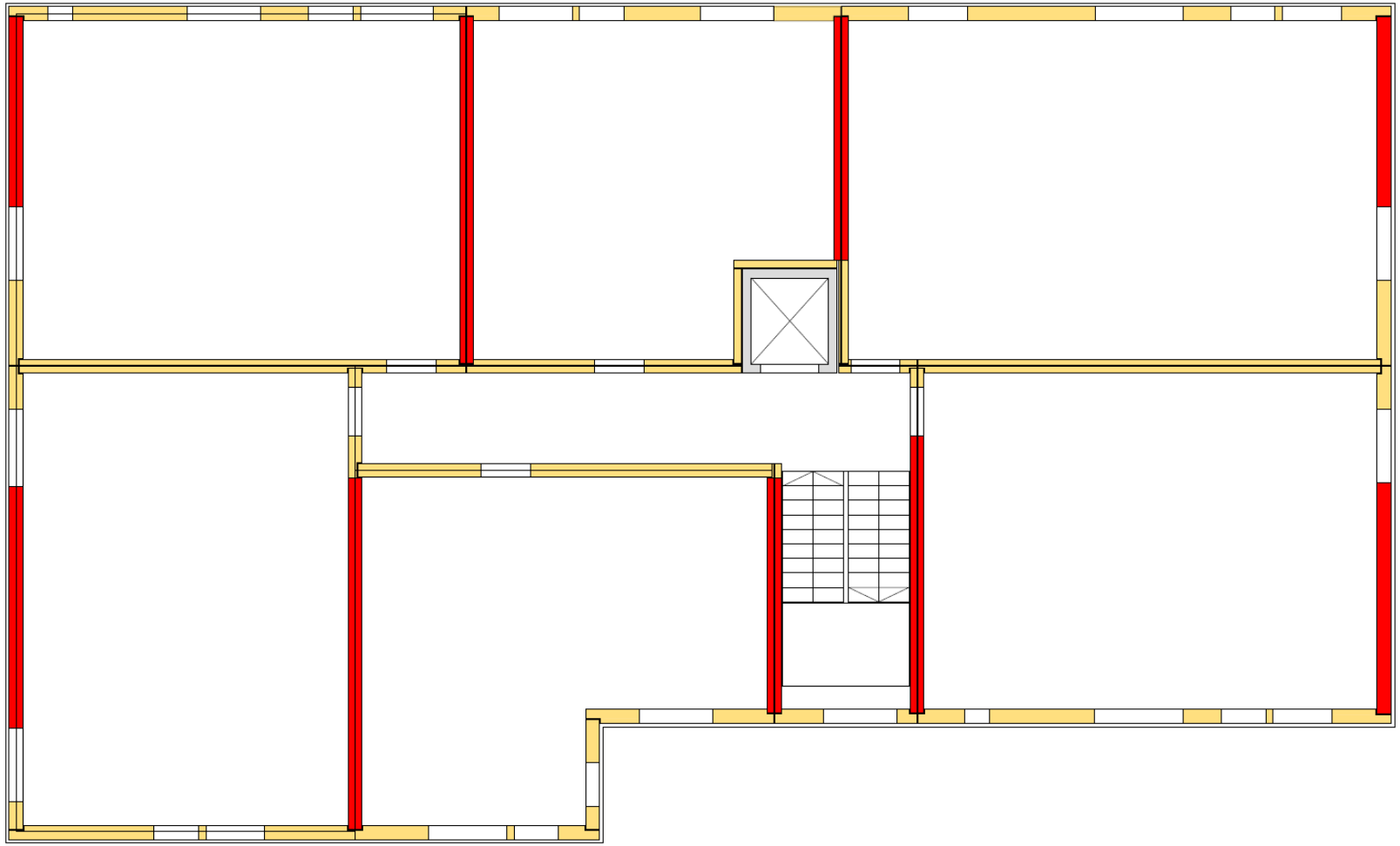
Pilari-palkki runko

- Jäykistävien elementtien (pilarit, diagonaalit, levytykset) symmetrinen sijoittelu
- Kuormien keskittäminen jäykistäville komponenteille
- Riittävän tilan varaaminen jäykisteille (esim LVI putkien läpiviennit tarkistettava)

Yleistä

- Puukerrostaloon ei voi tehdä välipohjilla suuria ulokkeita
- Rakennetyypit ja liittymädetaljit sekä voimaliitostyypit tulee suunnitella luonnostasolle yhdessä rakennesuunnittelijan kanssa jo hankkeen alkuvaiheessa
- Puukerrostalosta ei voi tehdä runkosyvyydeltään yhtä hoikkaa kuin betonikerrostalosta, tämä vaikuttaa suuresti tarpeeseen ankkuroida jäykistäviä elementtejä (seiniä) perustuksiin

Esimerkki jäykistävien seinien sijoittelusta

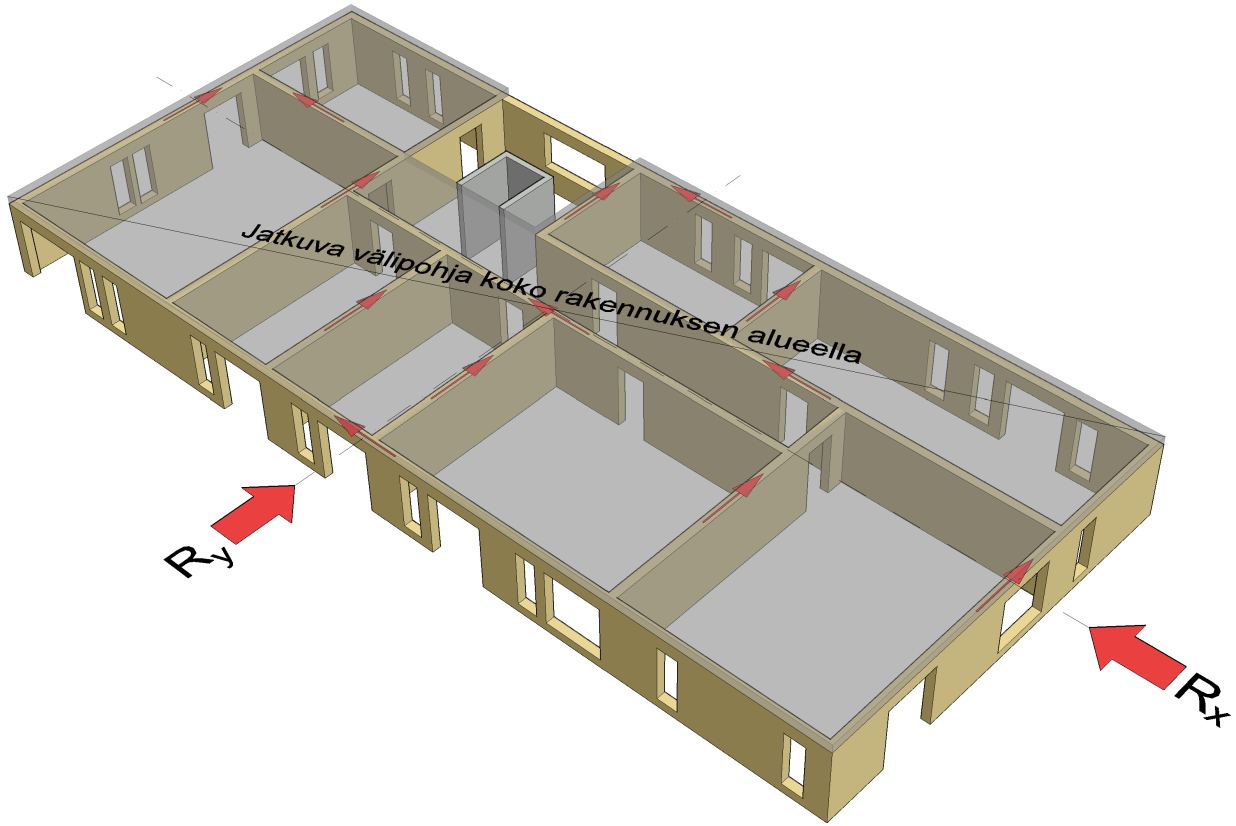


Välipohjan toiminta yleisesti

Välipohjan toiminta yleisesti

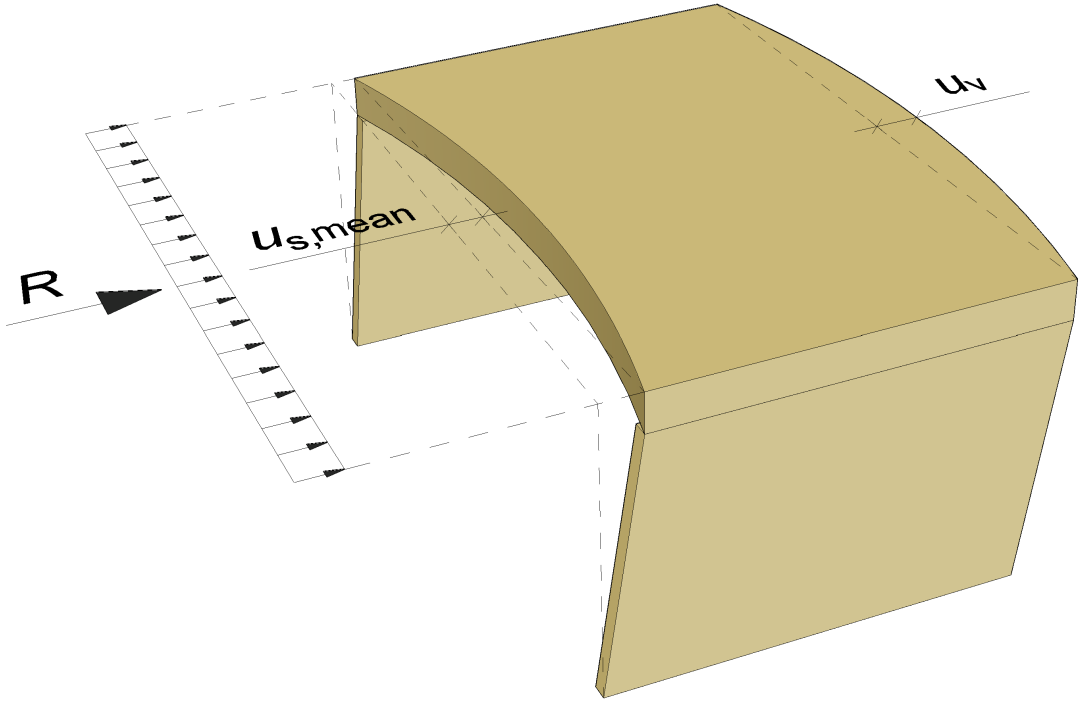
- Välipohjan jäykistystekninen toiminta on keskeisessä osassa kerrostalon jäykistämisessä
- Betonirakennuksessa välipohjaa käsitellään tavallisesti yhtenäisenä jäykistävänä levynä, joka jakaa vaakakuormituksen jäykistäville seinille
- Jäykistävät seinät vastaanottavat vaakakuormituksen seinien jäykkyyksien suhteessa

- Puisilla välipohjilla tarkastelu kuitenkin poikkeaa tästä



Välipohjan jäykkyysvaatimus

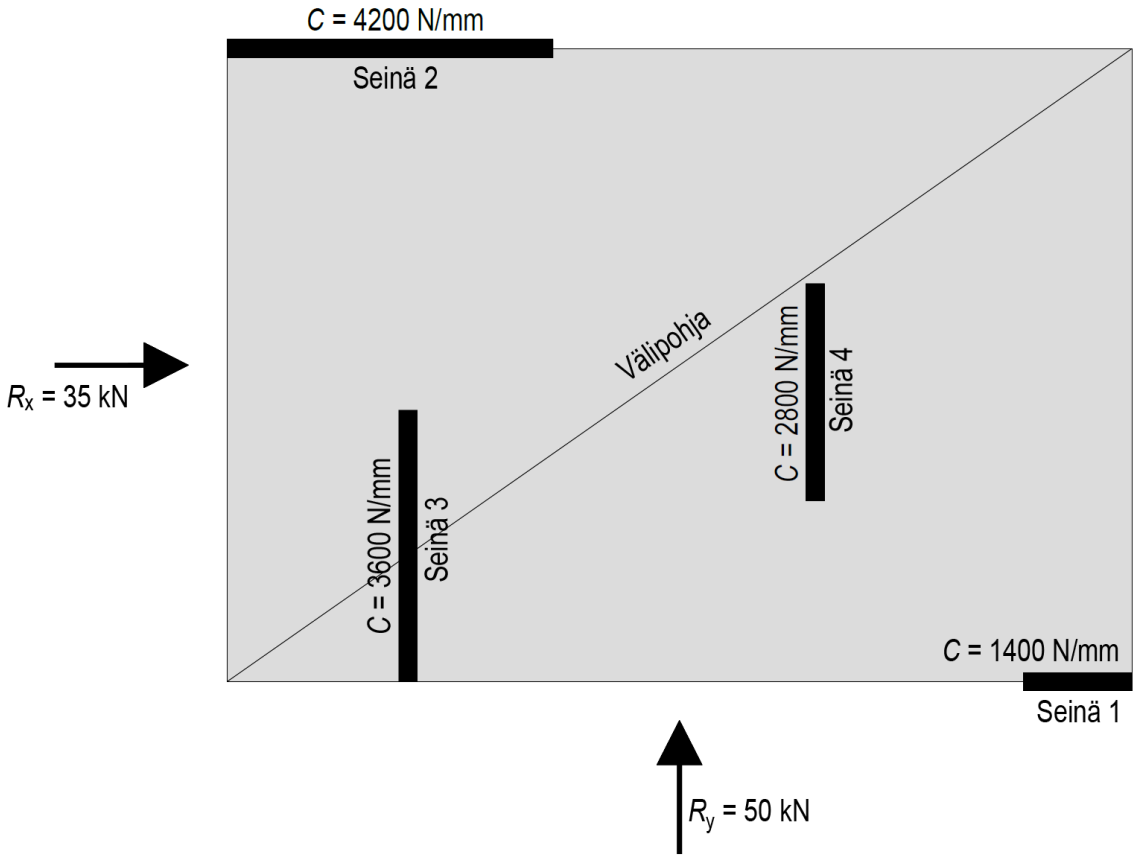
- Maailmalta löytyy erilaisia ohjeita välipohjan jäykkyyden ja jäykistä-vien seinien jäykkyyden suhteelle
- Esimerkki
  - Joustamaton välipohja (rigid)
    - $u_v \leq 0{,}5 \cdot u_{s,mean}$
  - Jäykkä välipohja (stiff)
    - $0{,}5 \cdot u_{s,mean} < u_v \leq 2{,}0 \cdot u_{s,mean}$
  - Joustava välipohja (flexible)
    - $u_v > 2{,}0 \cdot u_{s,mean}$



u_v = välipohjan siirtymä
$u_{s,mean}$ = seinien keskimääräinen vaakasiirtymä

Joustamattoman välipohjan toiminta

- Joustamaton välipohja mitoitetaan toimimaan yhtenäisenä kappaleena, joka jakaa vaaka-kuormituksen resultantit jäykistäville seinille
- Jäykistävien seinien kuormitus saadaan määritettyä seinien jäykkyyksien ja välipohjan vääntökeskiön avulla



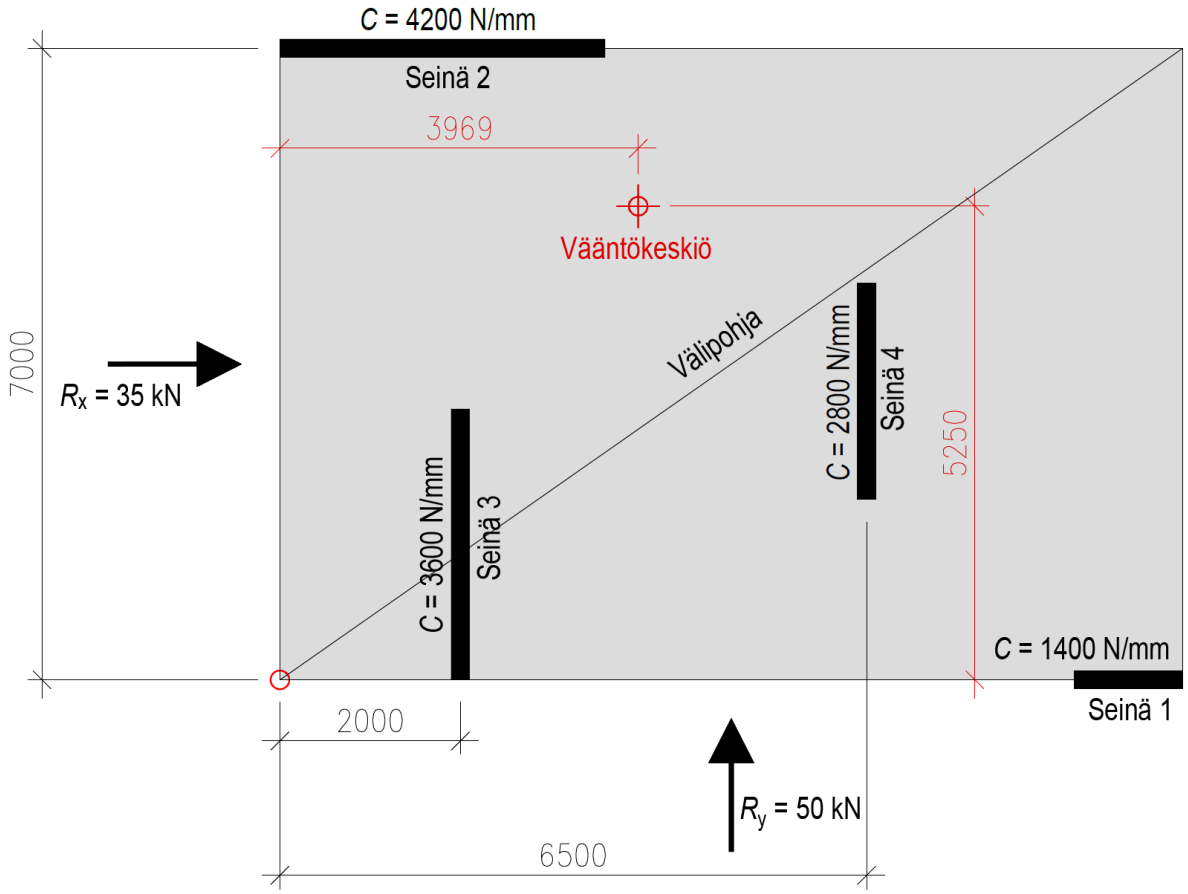
Joustamattoman välipohjan toiminta

- Vääntökeskiön määrittämisessä huomioidaan sekä x- että y-suuntaiset seinät

ESIMERKKI VÄÄNTÖKESKIÖN MÄÄRITTÄMISESTÄ

$$x = \frac{3600 \cdot 2000 + 2800 \cdot 6500}{3600 + 2800} = 3969$$

$$y = \frac{4200 \cdot 7000 + 1400 \cdot 0}{4200 + 1400} = 5250$$



Joustamattoman välipohjan toiminta

SEINIEN KUORMITUS ULKOISESTA KUORMITUKSESTA R_x = 35 kN

Seinä 1

$$F_{x,1} = \frac{1400}{1400+4200} \cdot 35000 + \frac{35000 \cdot 1750 \cdot 1400 \cdot 5250}{\left(1400 \cdot 5250^2 + 4200 \cdot 1750^2\right) + \left(3600 \cdot 1969^2 + 2800 \cdot 2531^2\right)} = 14{,}2 \text{ kN}$$

Seinä 2

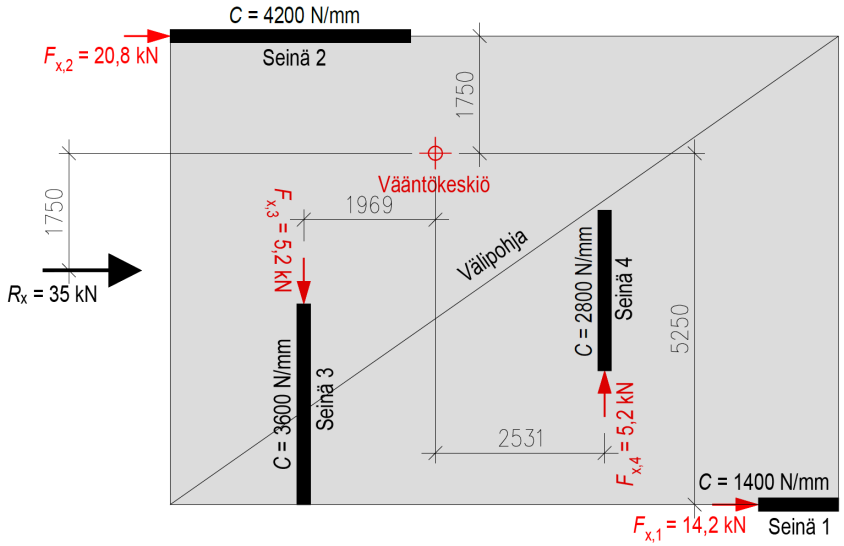
$$F_{x,2} = \frac{4200}{1400+4200} \cdot 35000 - \frac{35000 \cdot 1750 \cdot 4200 \cdot 1750}{\left(1400 \cdot 5250^2 + 4200 \cdot 1750^2\right) + \left(3600 \cdot 1969^2 + 2800 \cdot 2531^2\right)} = 20{,}8 \text{ kN}$$

Seinä 3

$$F_{x,3} = \frac{35000 \cdot 1750 \cdot 3600 \cdot 1969}{\left(1400 \cdot 5250^2 + 4200 \cdot 1750^2\right) + \left(3600 \cdot 1969^2 + 2800 \cdot 2531^2\right)} = 5{,}2 \text{ kN}$$

Seinä 4

$$F_{x,4} = \frac{35000 \cdot 1750 \cdot 2800 \cdot 2531}{\left(1400 \cdot 5250^2 + 4200 \cdot 1750^2\right) + \left(3600 \cdot 1969^2 + 2800 \cdot 2531^2\right)} = 5{,}2 \text{ kN}$$



Joustamattoman välipohjan toiminta

SEINIEN KUORMITUS ULKOISESTA KUORMITUKSESTA $R_y = 50\ \text{kN}$

Seinä 3

$$F_{x,3} = \frac{3600}{3600+2800} \cdot 50000 - \frac{50000 \cdot 1031 \cdot 3600 \cdot 1969}{\left(1400 \cdot 5250^2 + 4200 \cdot 1750^2\right) + \left(3600 \cdot 1969^2 + 2800 \cdot 2531^2\right)} = 23{,}7\ \text{kN}$$

Seinä 4

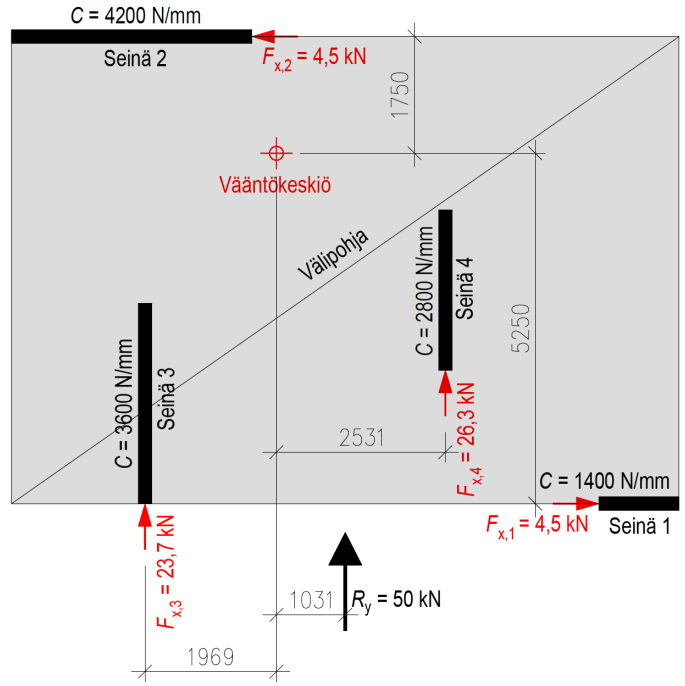
$$F_{x,4} = \frac{2800}{3600+2800} \cdot 50000 + \frac{50000 \cdot 1031 \cdot 2800 \cdot 2531}{\left(1400 \cdot 5250^2 + 4200 \cdot 1750^2\right) + \left(3600 \cdot 1969^2 + 2800 \cdot 2531^2\right)} = 26{,}3\ \text{kN}$$

Seinä 1

$$F_{x,1} = \frac{50000 \cdot 1031 \cdot 1400 \cdot 5250}{\left(1400 \cdot 5250^2 + 4200 \cdot 1750^2\right) + \left(3600 \cdot 1969^2 + 2800 \cdot 2531^2\right)} = 4{,}5\ \text{kN}$$

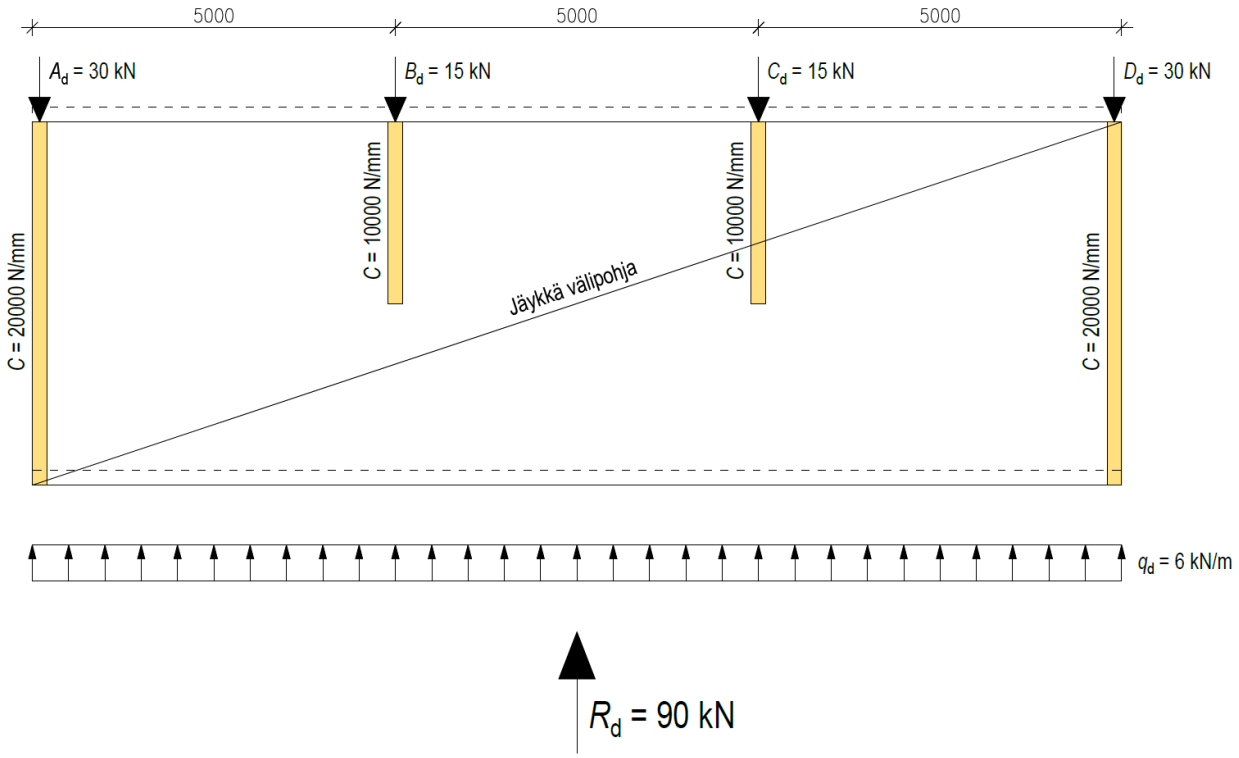
Seinä 2

$$F_{x,2} = \frac{50000 \cdot 1031 \cdot 4200 \cdot 1750}{\left(1400 \cdot 5250^2 + 4200 \cdot 1750^2\right) + \left(3600 \cdot 1969^2 + 2800 \cdot 2531^2\right)} = 4{,}5\ \text{kN}$$



Joustamattoman välipohjan toiminta

- Kuvan välipohja on joustamaton jäykkä kappale
- Ulkoinen kuormitus jakautuu jäykistäville seinille niiden jäykkyyksien suhteessa
- Välipohjan tulee täyttää jäykkyysvaatimus, jotta välipohjaa voidaan käsitellä jäykkänä kappaleena

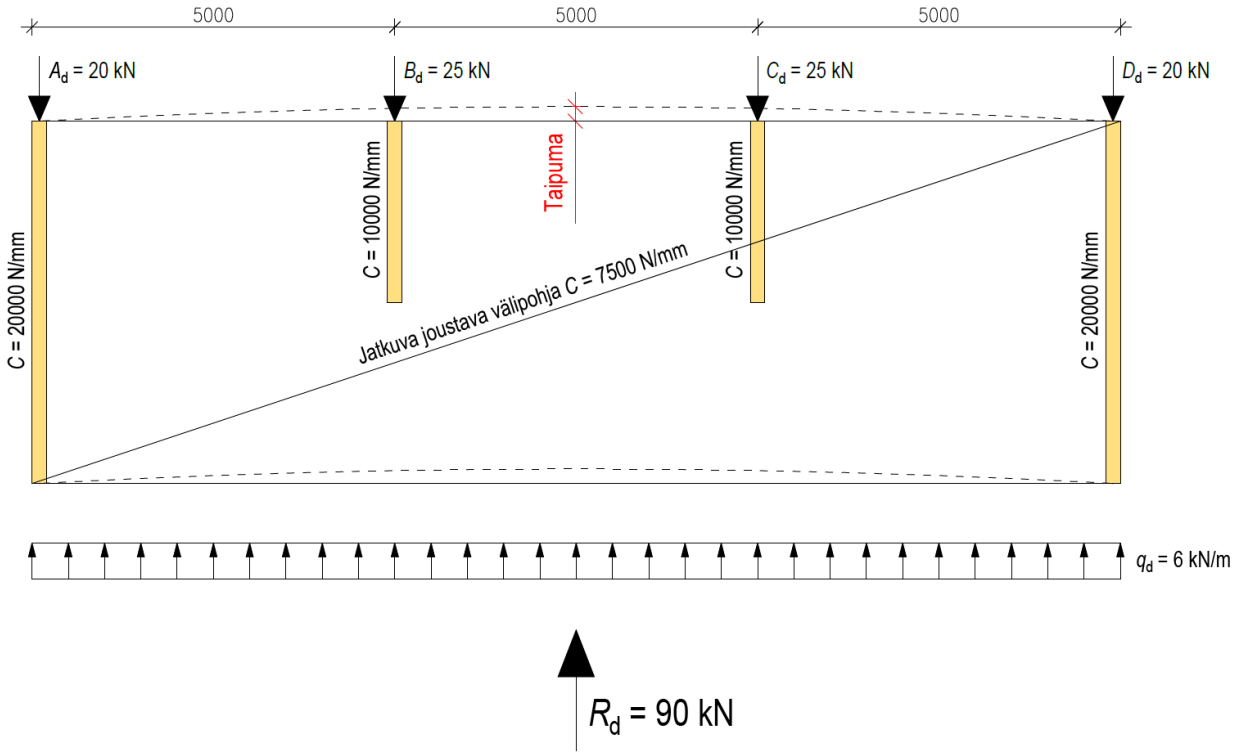


ESIMERKKI SEINÄN TUKIREAKTION MÄÄRITTYMISESTÄ

$$A_d = \frac{20000\ \text{N/mm}}{20000\ \text{N/mm} + 10000\ \text{N/mm} + 10000\ \text{N/mm} + 20000\ \text{N/mm}} \cdot 90\ \text{kN} = 30\ \text{kN}$$

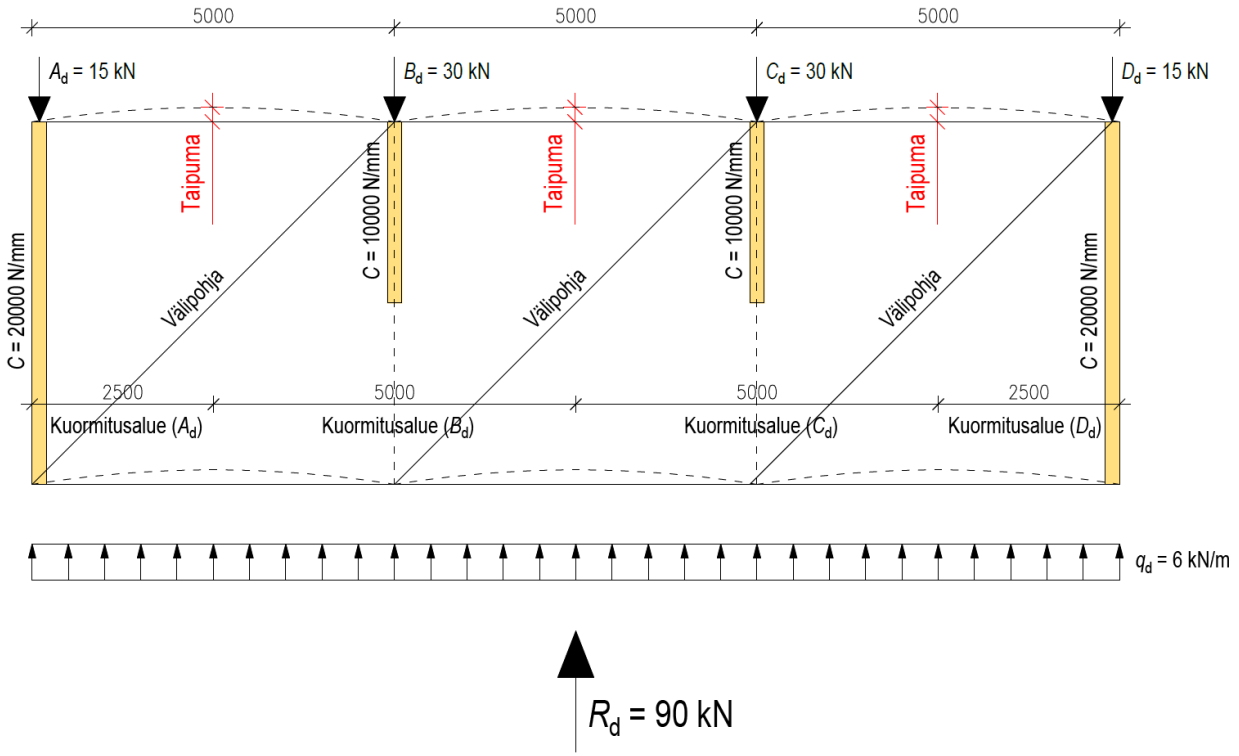
Joustavan välipohjan toiminta

- Kuvan välipohja on joustava
- Jäykistävän välipohjan jäykkyys *C* vaikuttaa seinien kuormitukseen
- Jäykistävien seinien jäykkyys *C* vaikuttaa seinien kuormitukseen



Osista koostuvan välipohjan toiminta

- Kuvan välipohja koostuu useammasta itsenäisesti toimivasta osasta
- Jäykistävien seinien jäykkyys *C* ei vaikuta seinien kuormitukseen
- Ulkoinen kuormitus jakautuu jäykistäville seinille niiden kuormitusalueiden mukaan



ESIMERKKI SEINÄN TUKIREAKTION MÄÄRITTYMISESTÄ

$A_d = 2{,}5\ \text{m} \cdot 6\ \text{kN/m} = 15\ \text{kN}$

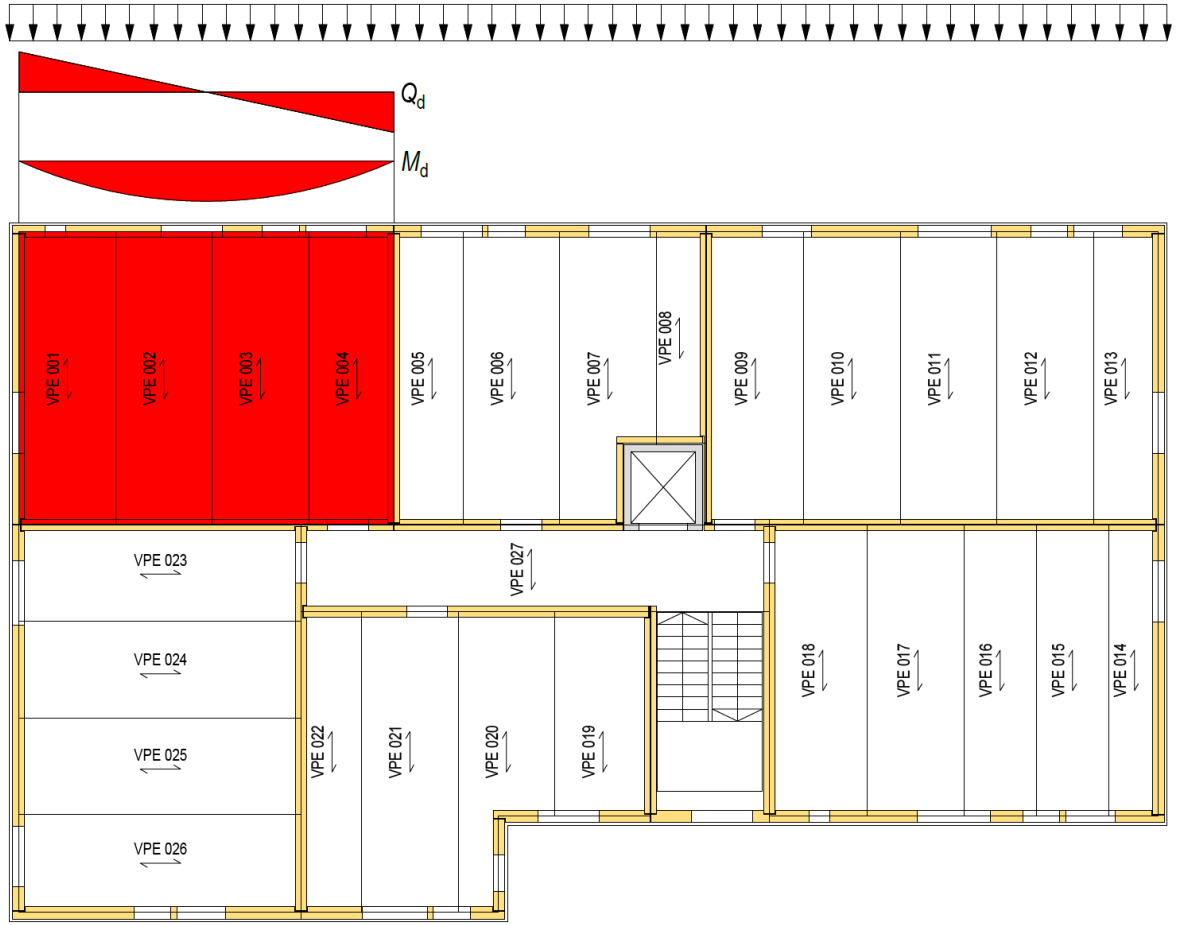
Puuvälipohjat

Puuvälipohjat

- Puuvälipohjat käsitellään joustavana rakennusosana (flexible)
  - Puuvälipohjissa on paljon mekaanisia liittimiä (joustavat liitokset)
- Puuvälipohjasta ei voida tehdä huoneistosta toiseen jatkuvaa ja joustamatonta välipohjaa
  - Akustiikka
  - Värähtely
  - Paljon komponentteja ja joustavia liitoksia

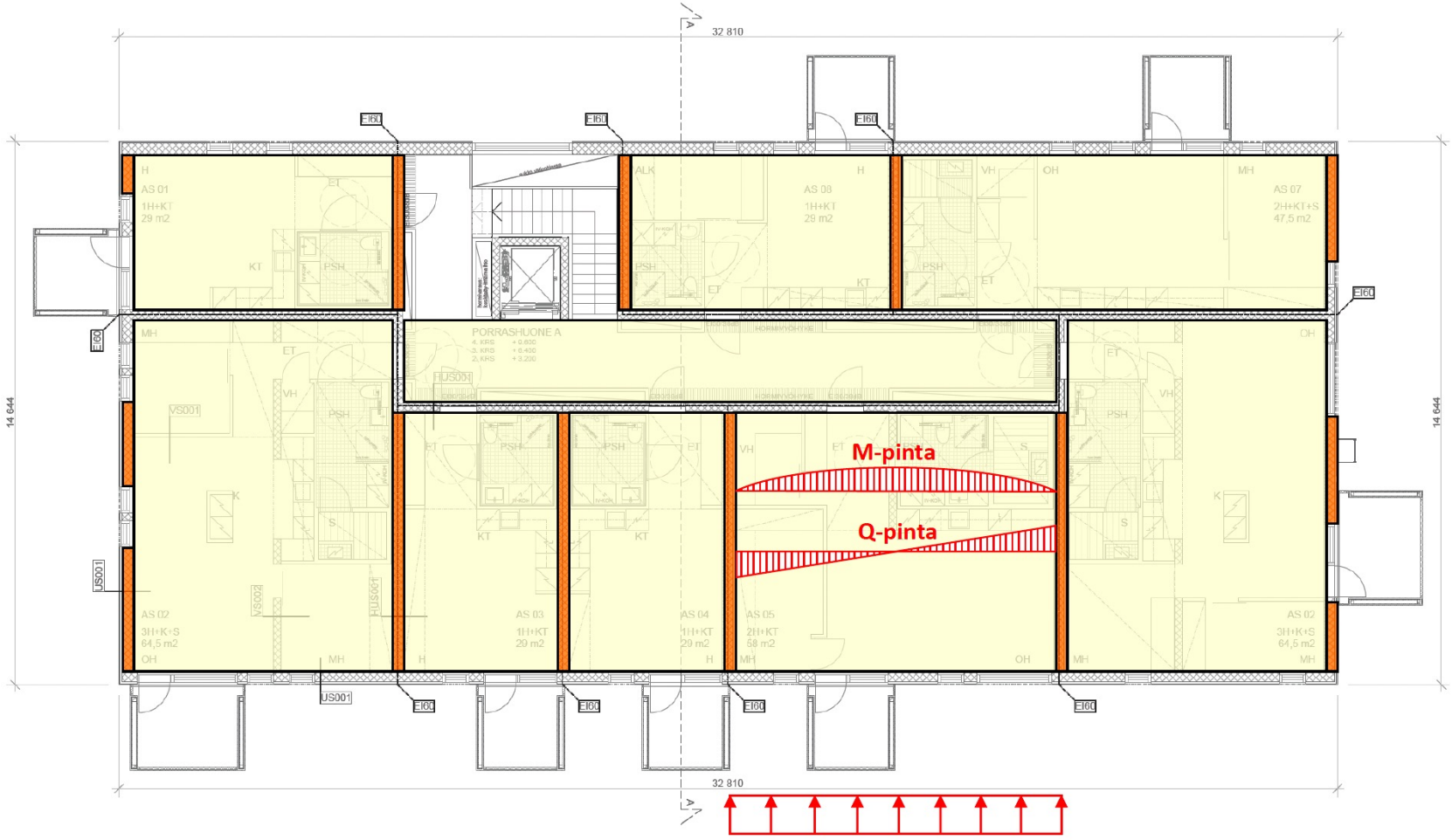
Puuvälipohjat: suurelementit/rankarunko

- Puukerrostalossa välipohjista suunnitellaan huoneistokohtaisia jäykistäviä välipohjia
- Huoneistokohtainen välipohja toimii yksiaukkoisen palkin tapaan



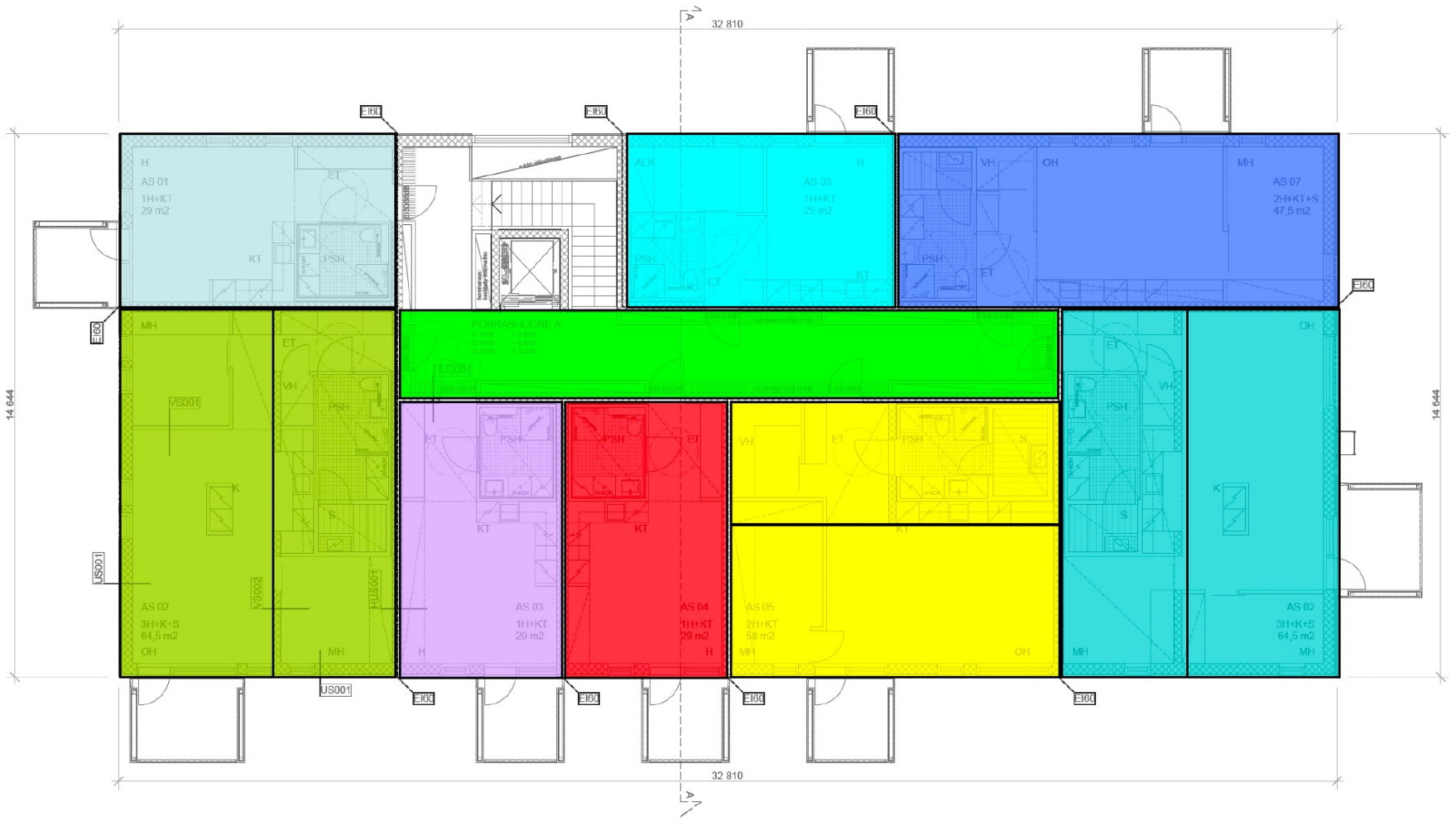
Puuvälipohjat: suurelementit/rankarunko

- Välipohja koostuu omista yksiköistään, joiden jäykistys on lähtökohtaisesti hoidettu kuntoon yksikön sisällä
- Huoneistokohtainen välipohja siirtää vaakakuormituksen jäykistäville seinille
  - Ulkoseinät
  - Huoneistojen väliset seinät (runkopuolisko)



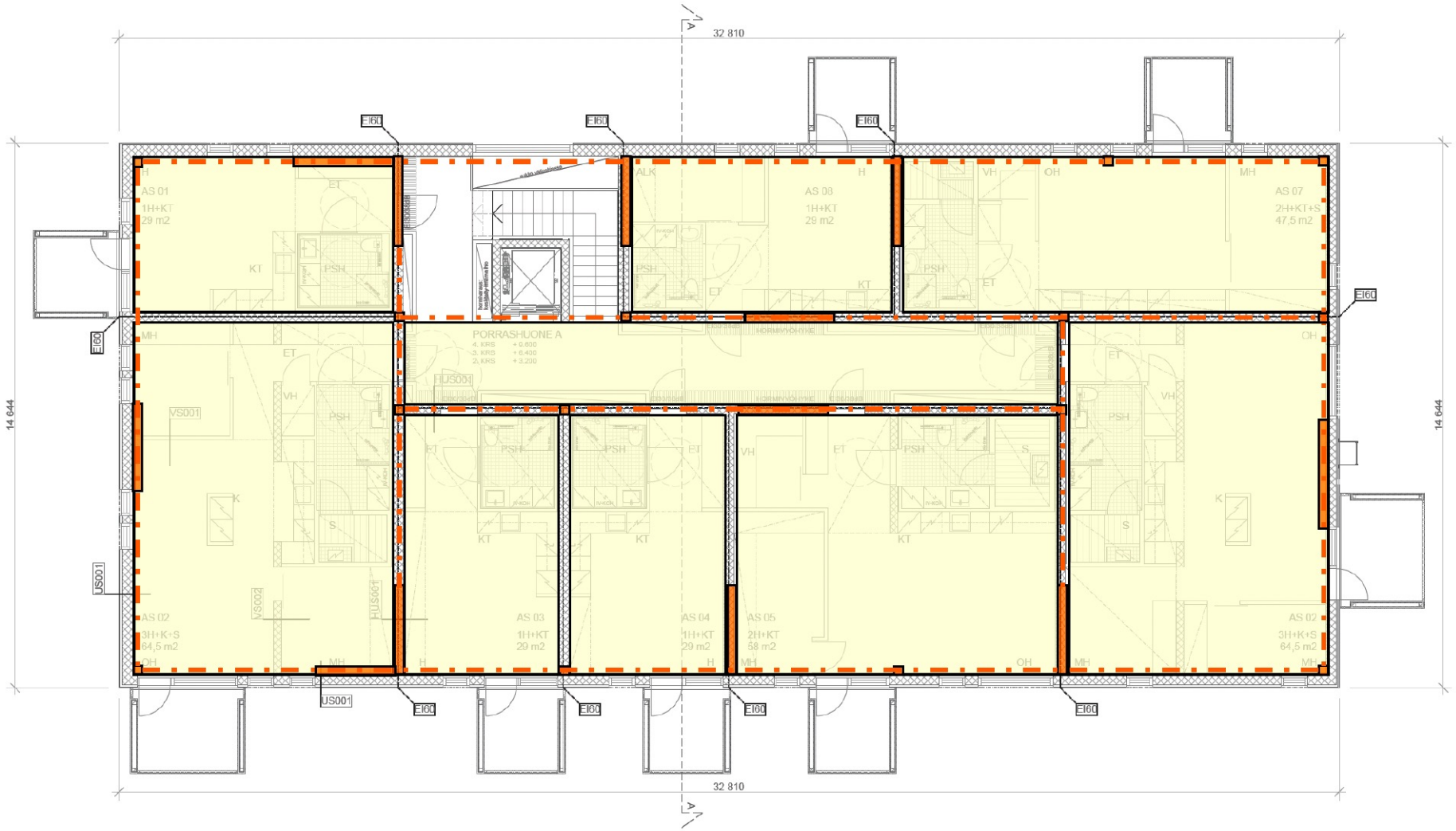
Puuvälipohjat: tilaelementti

- Välipohja koostuu omista yksiköistään, joiden jäykistys on lähtökohtaisesti hoidettu kuntoon yksikön sisällä



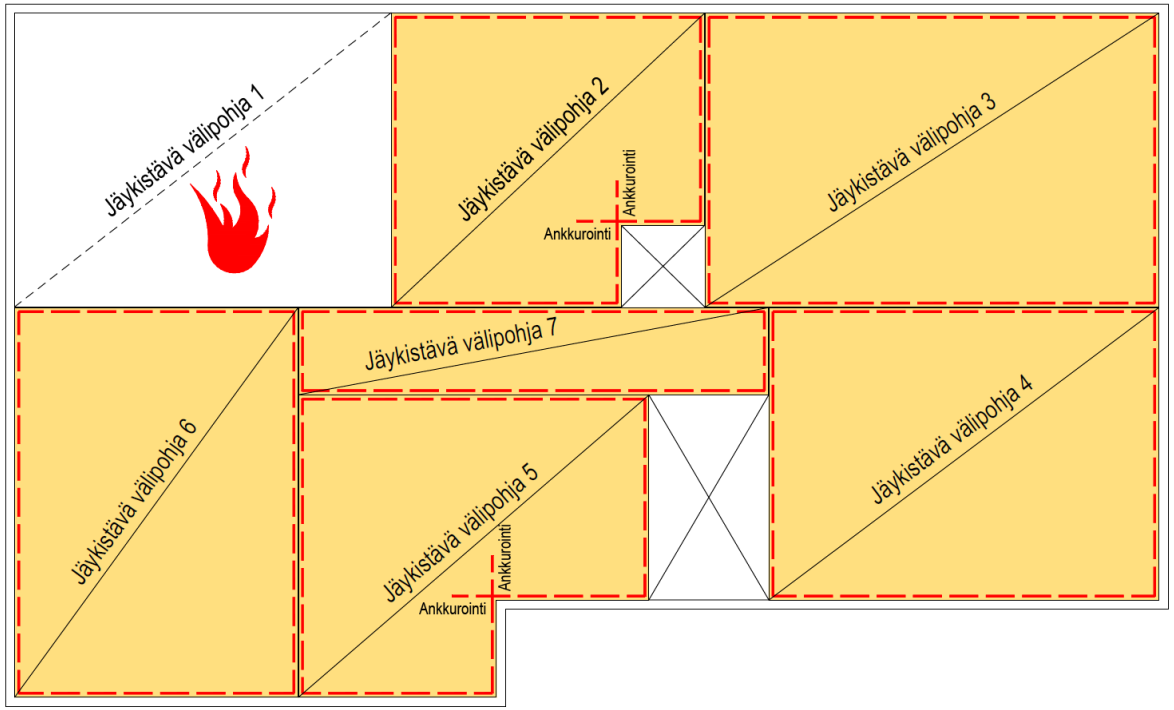
Puuvälipohjat: Pilari-palkki runko

- Välipohja koostuu omista yksiköistään, joiden jäykistys on lähtökohtaisesti hoidettu kuntoon yksikön sisällä



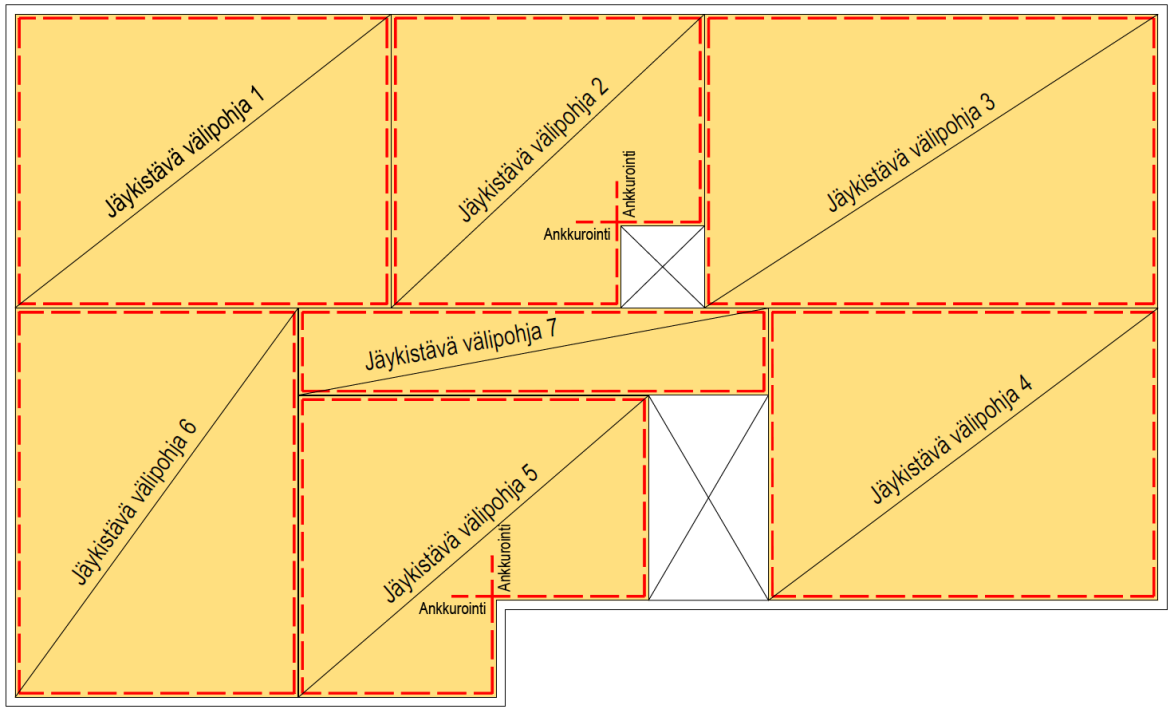
Puuvälipohjat: yleistä

- Itsenäisistä jäykistävistä välipohjista koostuva kokonaisuus on hyvä ratkaisu onnettomuustilanteen varalle
- Onnettomuustilanteessa vaurioituvan huoneiston viereiset jäykistävät rakenteet ovat toimintakykyisiä



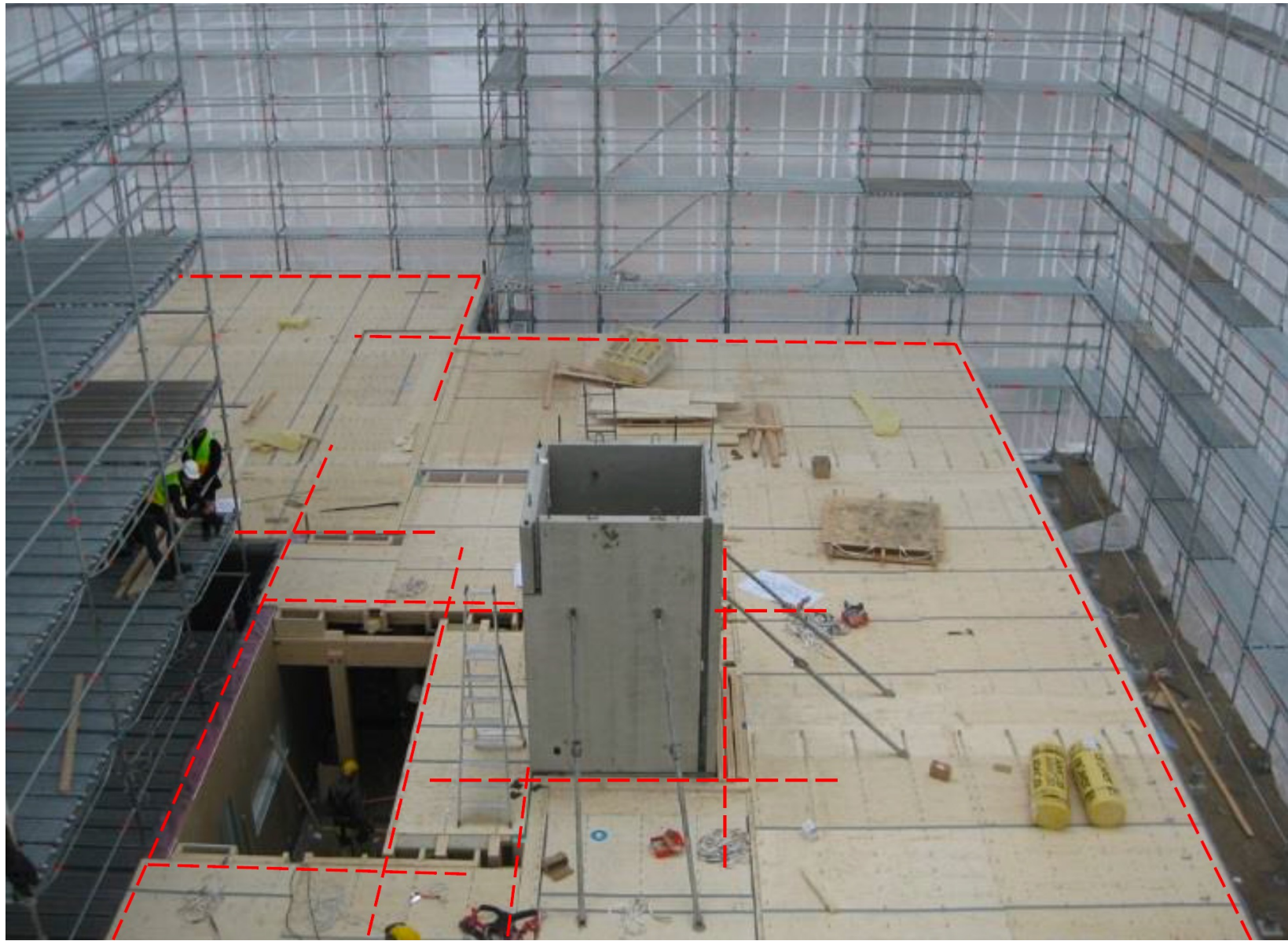
Puuvälipohjat: betoninen porrastorni (muu elementti)

- Huoneistokohtaisissa jäykistävissä välipohjissa tulee olla paarteet kaikilla sivuilla
  - Aukkojen reunoissa ja välipohjan sisänurkissa paarteet tulee ankkuroida jäykistävään levytykseen
- Jäykistävät välipohjat tulee kiinnittää toisiinsa siten, että muodostuu yksi välipohjakokonaisuus. Varsinkin kun jäykistys on toteutettu betonisilla porrastorneilla
  - Kiinnitysten vaikutus akustiikkaan tulee tutkia



Puuvälipohjat: betoninen porrastorni (muu elementti)

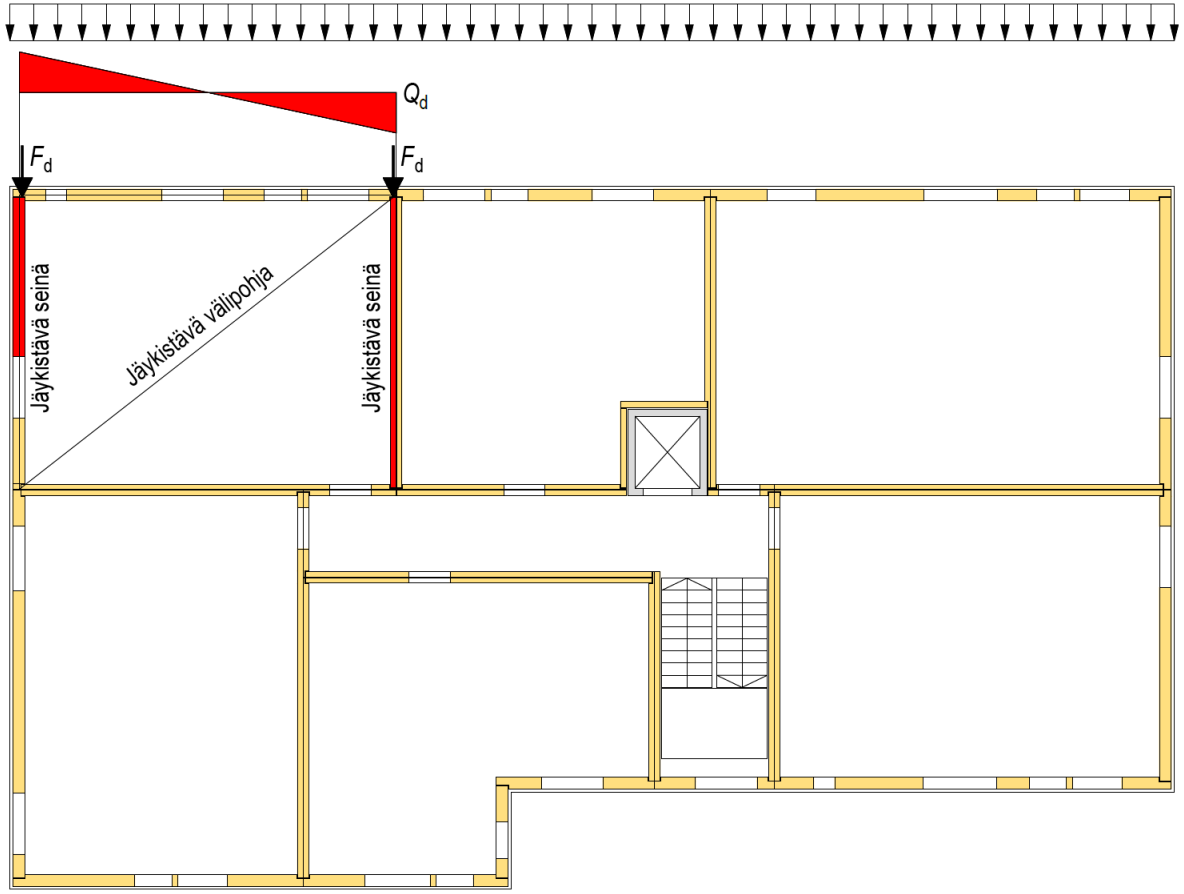
- Jäykistävät välipohjat tulee kiinnittää toisiinsa siten, että muodostuu yksi välipohjakokonaisuus. Varsinkin kun jäykistys on toteutettu betonisilla porrastorneilla



Jäykistävät seinät

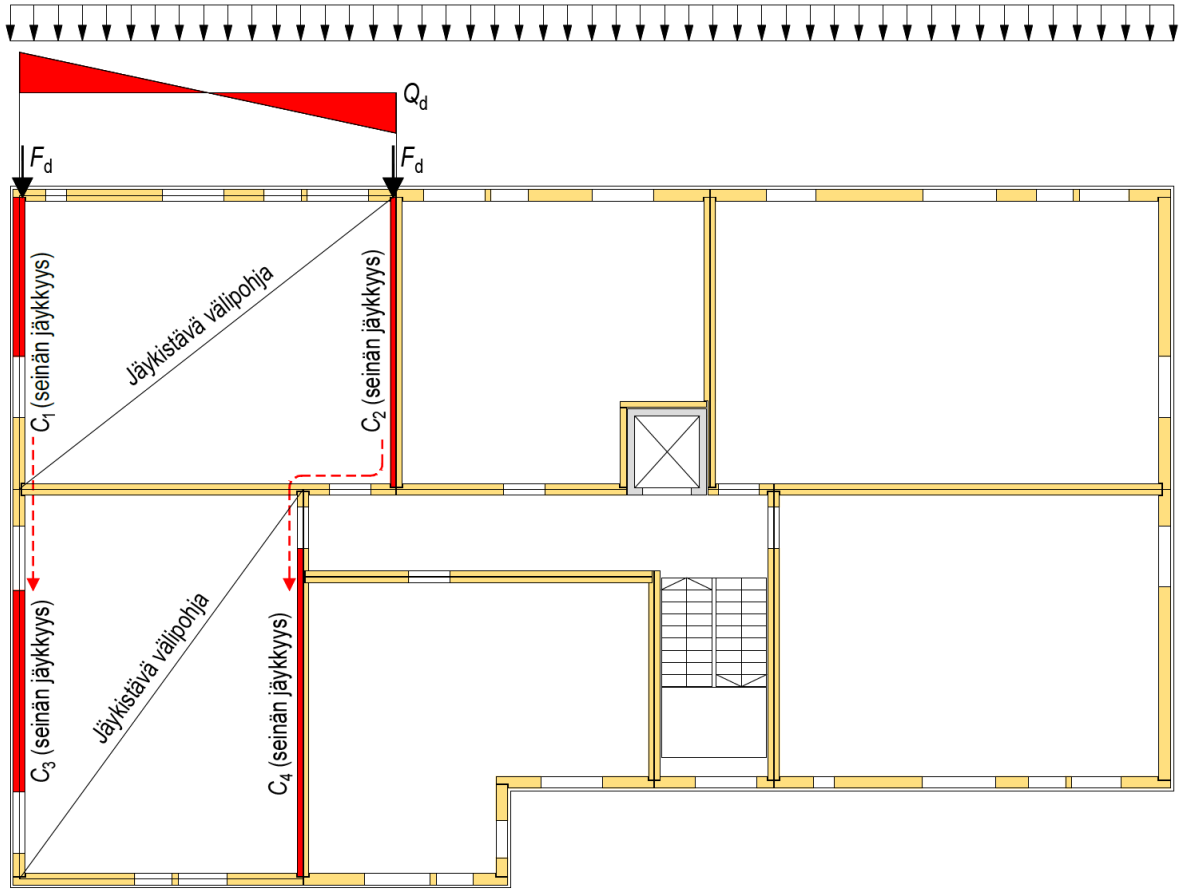
Jäykistävät seinät

- Huoneistokohtainen jäykistävä välipohja välittää vaakakuormituksen jäykistäville seinille
- Seinien jäykkyys tulee suunnitella siten, että välipohjaan ei tule merkittävää kiertymää seinien joustavuudesta



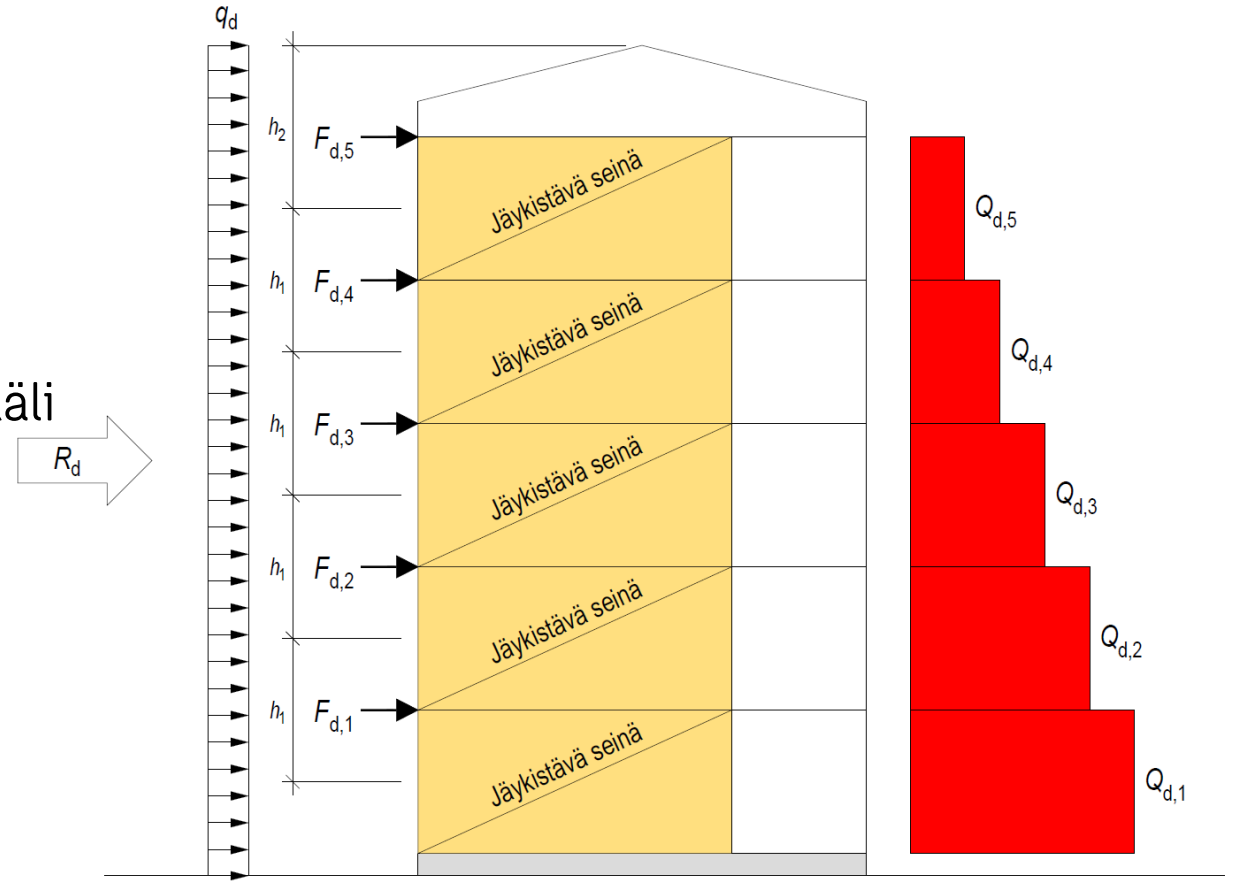
Jäykistävät seinät

- Vaakakuormitusta voidaan jakaa välipohjien avulla huoneistokohtaisen jäykistävän rakennekokonaisuuden ulkopuolisille jäykistäville rakenteille
  - Kuormitus jaetaan seinien jäykkyyksien suhteessa huomioiden kaikki joustavat rakenneosat kuormansiirtoreitillä
- Välipohjien kytkennässä toisiinsa tulee huomioida akustiset vaatimukset



Jäykistävät seinät

- Jäykistävien seinien vaakakuormitus koostuu
  - Tuulikuormasta
  - Lisävaakavoimasta
- Pienempää lisävaakavoimaa voidaan käyttää, mikäli mittaamalla varmistetaan, että asetettu vinoustoleranssi on kerroksittain saavutettu
- Jäykistävien seinien leikkausvoima kasvaa perustuksille mentäessä

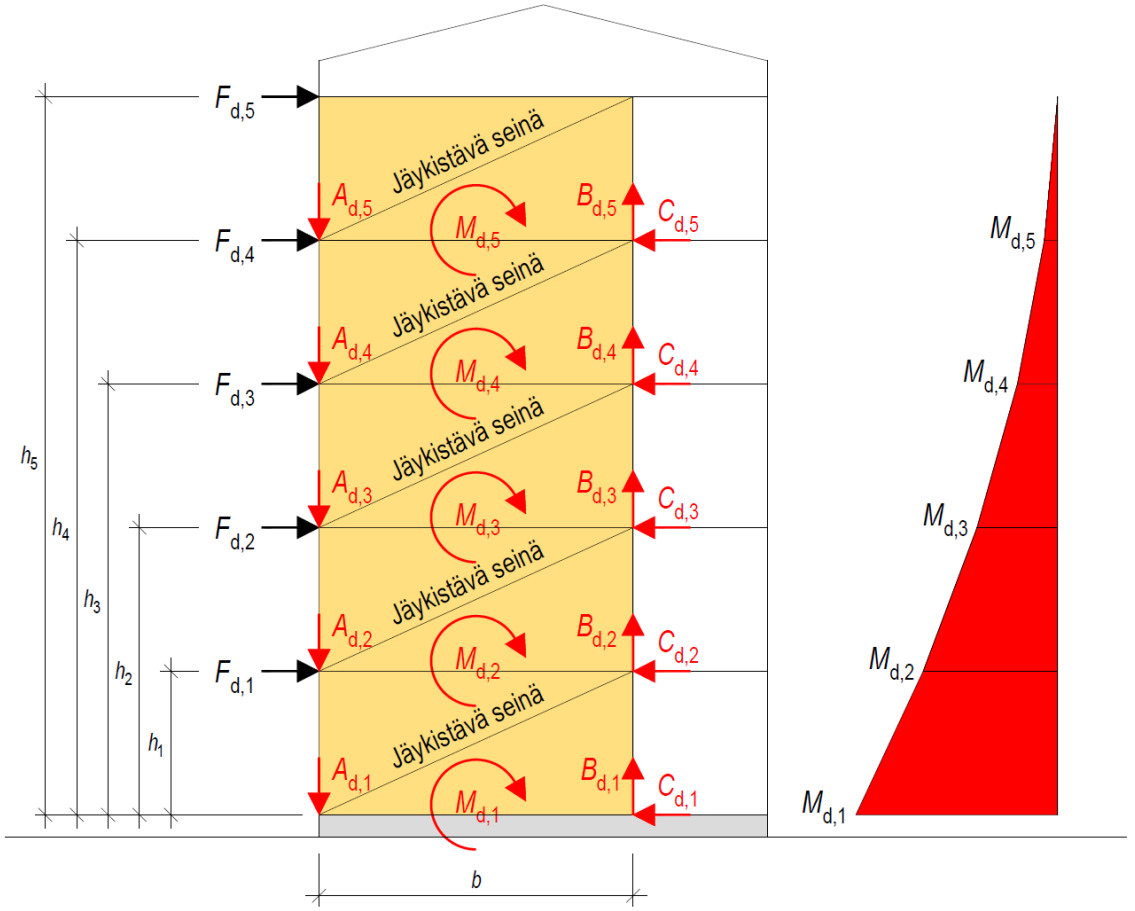


Jäykistävät seinät

- Ulkoisen vaakakuormituksen aiheuttama jäykistävien seinien kaatava momentti kasvaa perustuksille mentäessä
- Jäykistävät seinät tulee ankkuroida, mikäli omapaino ei pysty kumoamaan ankkurointivoimaa

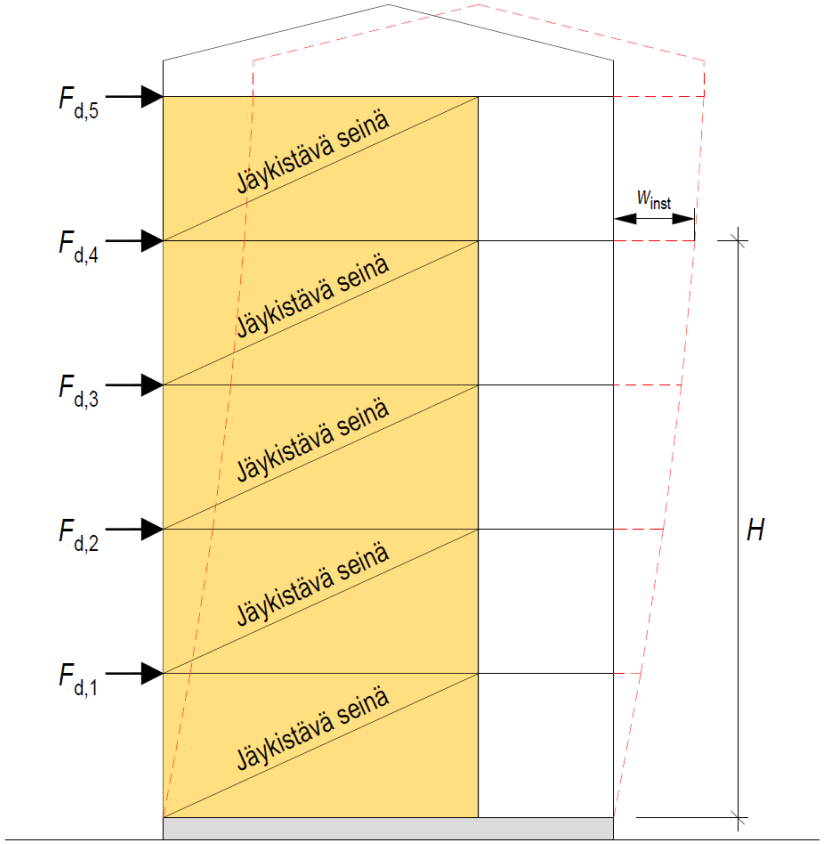
$$M_{d,1} = (h_1 F_{d,1} + h_2 F_{d,2} + h_3 F_{d,3} + h_4 F_{d,4} + h_5 F_{d,5})$$

$$A_{d,1} = \frac{M_{d,1}}{b}$$



Jäykistävät seinät

- Rungon vaakasiirtymä muodostuu päällekkäisten jäykistävien seinien ja niiden liitosten vaaka-siirtymästä
- Kerrostalossa vaakasiirtymä käyttörajatilassa saa olla enintään *H*/500 ylimmän kerroksen lattiatasolla (RIL 205)



Jäykistävien seinien väliset liitokset

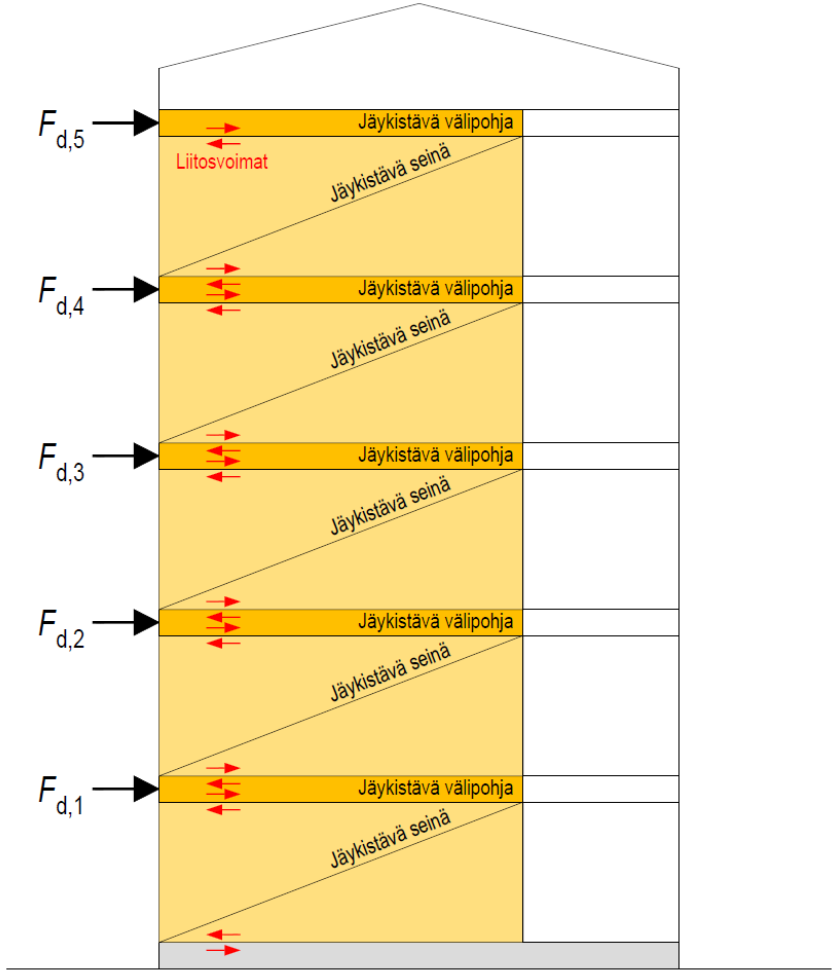
Jäykistävien rakennusosien väliset liitokset

- Jäykistävien rakennusosien liitoksiin syntyy suuria voimia
- Liittymien suunnittelussa tulee huomioida mm. seuraavia
  - Liitoksen kestävyys ja jäykkyys
  - Voimien siirtoreitti jäykistävien rakennusosien välillä
  - Akustiset ja palotekniset seikat
  - Liitoksen valmistettavuus
  - Puurakenteiden kosteuseläminen

Kuva: Tero Lahtela

Jäykistävien rakennusosien väliset liitokset

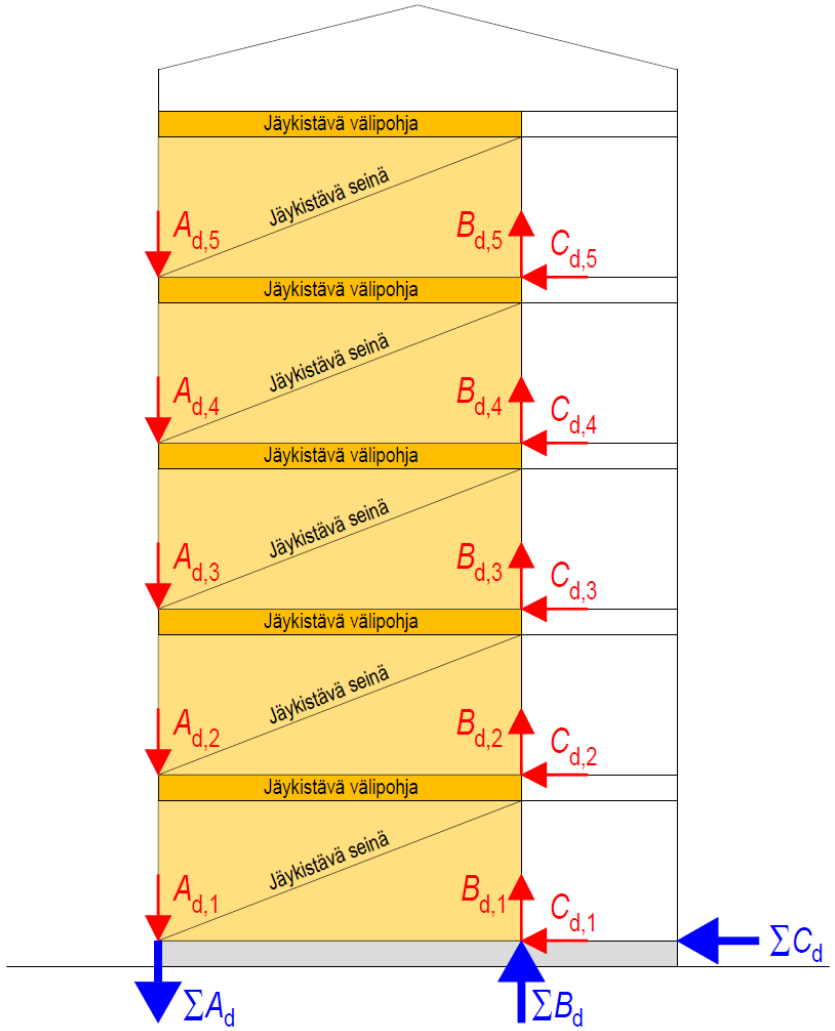
- Jäykistävien seinien ja välipohjien välille syntyy suuria vaakavoimia, kun vaakakuormitusta siirretään perustuksille
- Mitä useampia liitoksia jäykistävien rakennusosien välillä on, sitä haasteellisempaa liitosten rakennesuunnittelu on



Mitä korkeampi talo, sitä järeämmät liitokset

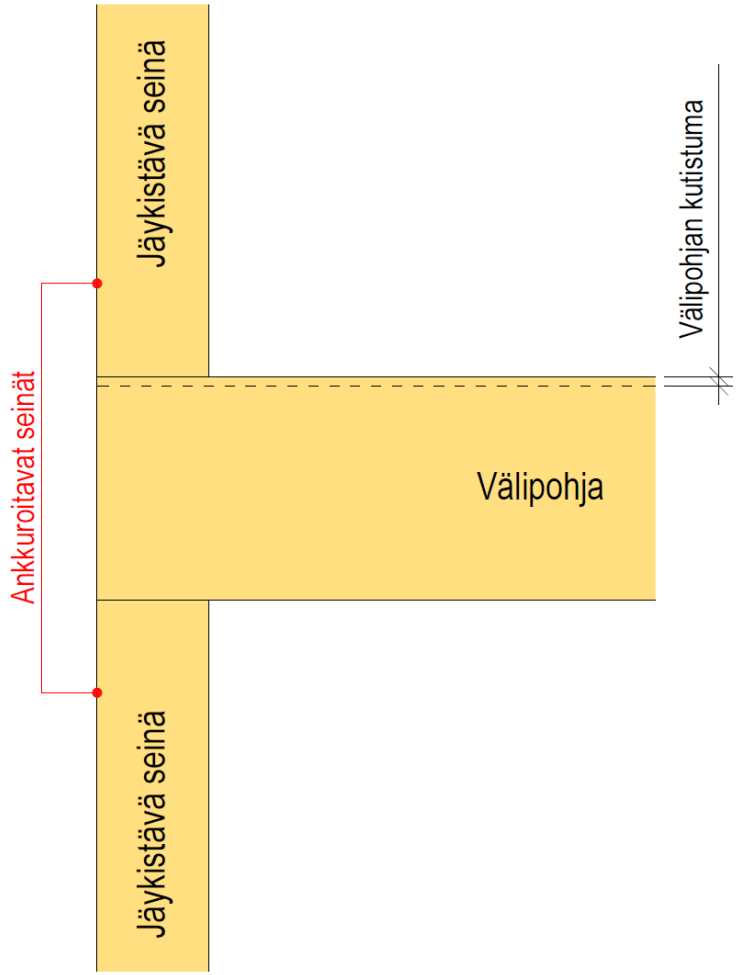
Jäykistävien seinien ankkurointi

- Rakennusosien keveydestä johtuen puukerrostalossa on haasteellista välttää jäykistävien seinien ankkurointi
- Perustustasoon syntyvä ankkurointivoima saattaa kasvaa hyvin suureksi, koska se kertyy perustuksille kaikilta ankkurointia tarvitsevilta jäykistäviltä seiniltä



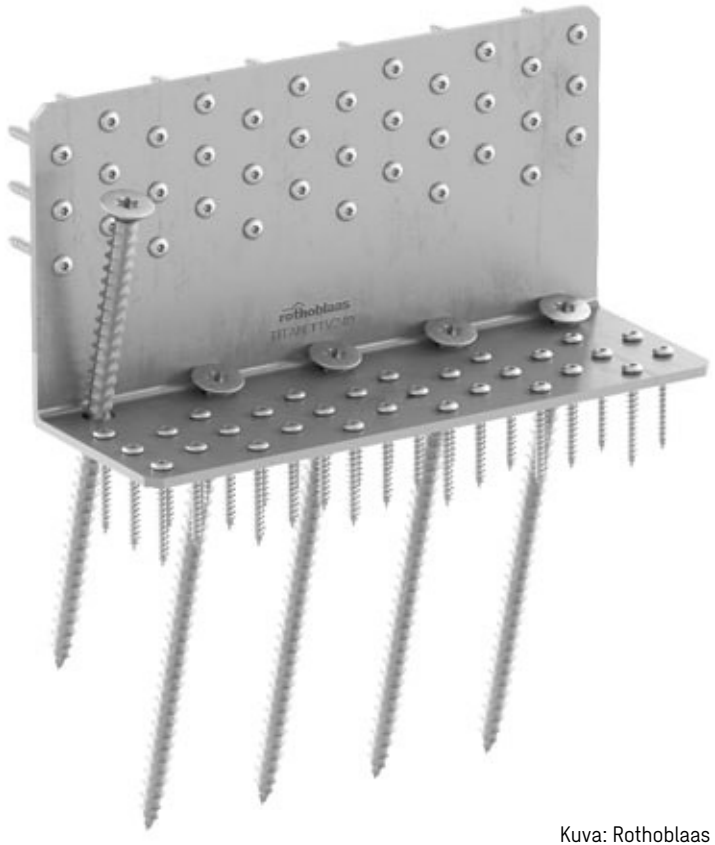
Jäykistävien seinien ankkurointi

- Ankkurointimenetelmää suunniteltaessa tulee tarkastella mm. seuraavia
  - Pysyykö ankkurointi toiminta-kykyisenä ajan kuluessa (ei saa löystyä)
  - Vaikuttaako välipohjan kutistuma ankkuroinnin ja liitososien toimintaan
  - Aiheuttaako ankkurointiosat poikittaista vetoa puurakenteeseen
  - Akustiset ja palotekniset seikat



Jäykistävien seinien ankkurointi

- Kiinnikevalmistajilla on uusia ratkaisuja jäykistävien seinien liitoksiin, joilla voidaan vastaan-ottaa sekä leikkausvoimaa että ankkurointivoimaa
- Välipohjan läpi kierretangoilla ankkuroitavia liitososia ei tule käyttää, koska välipohjan kutistuman seurauksena kierretankojen mutterit löystyvät



Kuva: Rothoblaas

Summary

Puukerrostaloja voidaan jäykistää

- Levyjäykistyksellä (seinissä ja välipohjissa)
- Diagonaaleilla (ristikointi)
- Jäykistävillä mastopilareilla

Kaikki ratkaisut vaativat omat toimenpiteensä ja siksi tiivis suunnittelijoiden yhteistyö heti hankkeen alkuvaiheessa on avain onnistumiseen

Puukerrostalo poikkeaa betonisesta

- Puinen välipohja on joustava ja moniosainen rakenne, kun taas betoninen välipohja on jäykkä yhtenäinen rakenne