



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Joonas Nieminen

# Hybridirakennusten kuormansiirtorakenteet

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Rakennesuunnittelu

Opinnäytetyö

23.11.2020

Tekijä Otsikko	Joonas Nieminen Hybridirakennusten kuormansiirtorakenteet
Sivumäärä Aika	42 sivua + liite 23.11.2020
Tutkinto	Insinööri (ylempi AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Hannu Hakkarainen Yliopettaja DI Ari Laitinen Projektipäällikkö
<p>Opinnäytetyö käsittelee hybridirakennusten kuormansiirtorakenteita. Opinnäytetyössä käsitellään kuormansiirtorakenteiden rakennesuunnittelijalle tärkeät asiat tiiviiksi ja helppolukuisiksi tietopaketeiksi. Kuormansiirtorakenteita käsitellään myös muista kuin rakennesuunnittelijan näkökohdista, ja tämän takia tietopaketti soveltuu myös muulle kohderyhmälle, kuten esimerkiksi arkkitehteille, rakennuttajille ja työmaahenkilöstölle.</p> <p>Opinnäyte koottiin allekirjoittaneen omista kokemuksista, alan kirjallisuudesta, kollegoiden kanssa käydyistä keskusteluista ja hyödyntämällä internetin rakennusalaan liittyviä tietolähteitä. Rakennettuja kohteita käsittelevä aineisto on kasattu suurimmilta osin allekirjoittaneen omista suunnitteluprojekteista, kollegoiden projekteista ja niistä kertyneistä kokemuksista, mutta osin myös esitelmänä olleiden projektien aineistosta.</p> <p>Opinnäytetyössä käsitellään seuraavia kuormansiirtorakenteita: erilaiset matalapalkkirakenteet, seinämäiset palkkirakenteet, siirtolaattarakenteet ja erilaiset ulokkeelliset rakenteet. Jokaisen rakenteen ominaisuudet ja suositellut käyttökohteet käydään läpi. Ominaisuuksia arvioidaan muun muassa mitoituksellisesti, rakennusteknisesti, työteknisesti, taloudellisesti, työturvallisuudellisesti ja onnettomuustilanteesta aiheutuneista vaikutuksista. Kuormansiirtorakenteen vaikutusta rakennukseen jäykistykseen on arvioitu hyvin pintapuolisesti, koska tämä aihealue olisi niin iso, että sen syvempi perehtyminen on rajattu tämän työn ulkopuolelle.</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena on auttaa etenkin nuorempia rakennesuunnittelijoita eri kuormansiirtorakenteiden ominaisuuksien ymmärtämisessä. Lisäksi työllä halutaan lisätä tietoisuutta kuormansiirtorakenteiden merkittävydestä hybridirakennuksissa. Työ on pyritty tekemään helposti luettavaan muotoon, joka perehdyttäisi lukijan valittavissa olevien ratkaisujen haasteisiin ja mahdollisuuksiin. Työ ei mene kovinkaan syvälle rakenteiden yksityiskohtaiseen mitoitukseen, mutta pyrkii toimimaan aloitus- ja infopakettina yksityiskohtaisempaan suunnitteluun.</p>	
Avainsanat	Hybridirakennus, kuormansiirtorakenne, rakennesuunnittelu

Author(s) Title	Joonas Nieminen Load transfer structures for hybrid buildings
Number of Pages Date	42 pages + appendix 23 November 2020
Degree	Master's Degree in Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Supervisors	Hannu Hakkarainen Principal Lecturer Ari Laitinen Project Manager
<p>The purpose of this thesis is to study the load transfer structures of hybrid buildings. This thesis identifies important issues for the structural designer of load transfer structures in a concise and easy-to-read information package. Load-bearing structures are not only discussed from structural designers' view, but also from the perspective of other stakeholders, such as architects, builders and site personnel. Therefore, the compiled information package is also suitable for the use of these interest groups.</p> <p>The research material for this thesis consists of the authors own experiences, relevant literature in the field, discussions with colleagues and by utilising information sources related to the Internet construction industry. The material for the reference projects has been compiled mostly from experience gained from the author's own design projects, but also partly from the material of colleagues and the projects presented.</p> <p>The thesis deals with load transfer structures: various low beam structures, deep beam structures, transfer plate structures and various cantilever structures. The properties and recommended uses of each structure are reviewed. The properties are evaluated, for instance in terms of structural engineering, construction technology, work technology, economy, occupational safety and the impact of the building on the operation of an accident situation. The impact of the load transfer structure on the stiffening of the building is assessed very superficially, as this topic area is so extensive that a more profound inquiry into it is beyond this work.</p> <p>The purpose of the thesis is to help younger structural designers to understand the properties of different load transfer structures. Besides, the work aims to increase awareness of the importance of load transfer structures in hybrid buildings. The researcher has aimed to make the work easy to read, so it would familiarise the reader with the challenges and possibilities of the solutions that can be chosen. The work does not assess the detailed structural engineering of the structures broadly but instead, seeks to serve as a start-up and information package for more detailed design.</p>	
Keywords	hybrid building, load transfer structure, structural engineering

## Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Rajaukset	3
2	Yleistä	4
2.1	Hybridirakennukset yleisesti	4
2.2	Hybridirakentamisen historia ja nykytilanne Suomessa ja maailmalla	4
2.3	Kuormansiirtorakenteet yleisesti	5
3	Kuormansiirtorakenteet	7
3.1	Seinämäiset palkit	7
3.2	Kuormansiirtolaatat	10
3.2.1	Jälkijännitetty kuormansiirtolaatta	12
3.2.2	Kuitubetoniraidoitettu kuormansiirtolaatta	15
3.3	Matalapalkit	15
3.3.1	Jännitetyt matalapalkit	16
3.4	Ulokkeelliset kuormansiirtorakenteet	17
3.4.1	Lippupalkki	18
4	Kuormansiirtorakenteiden ominaisuudet ja suosituskäyttökohteet	18
4.1	Mitoitus (rakennelaskenta)	18
4.2	Rakenteelliset ominaisuudet	19
4.2.1	Kuormansiirtorakenteen vaikutus jäykistykseen	21
4.3	Onnettomuustilanteen aikainen vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti	22
4.4	Työtekniilliset ominaisuudet	23
4.5	Kustannustekijät	24
4.6	Työturvallisuudelliset ominaisuudet	25
5	Hybridirakennukset ja niiden kuormansiirtorakenteet	26
5.1	Lauttasaaren liikekeskus	27
5.2	Pasilan Tripla	30
5.3	Niittykummun torni	32
5.4	Lapinmäentien Louhenlinna	34
5.5	Kalasataman Redi	37
6	Esimerkkilaskelmien johdanto ja yhteenveto	38
6.1	Johdanto	38

6.1.1 Seinämäisen palkin laskelmien yhteenveto	39
6.1.2 Siirtolaattalaskelmien yhteenveto	40
7 Yhteenveto	40
Lähteet	1
Liite 1, Esimerkkilaskelmat	1
7.1 Seinämäinen palkki	1
7.1.1 Taivutusmitoitus	1
7.1.2 Leikkausmitoitus	2
7.1.3 Kuormien kohdistuminen rakenteessa	3
7.2 Siirtolaatta	4
7.2.1 Kuormien kohdistuminen rakenteessa	4
7.2.2 Laatan kapasiteetti	6
7.2.3 Laatan momentit	7

## 1 Johdanto

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Sitowise Oy, joka on yksi Suomen suurimpia rakennetun ympäristön suunnittelu- ja konsulttiyrityksiä. Rakennesuunnittelu kuuluu yhteen Sitowise Oy:n monista palvelualoista. Asuinkerrostalojen rakennesuunnittelussa Sitowise Oy on yksi Suomen suurimmista. Yhtiössä on suunniteltu lukuisia hybridirakennuksia.

Hybridirakennuksilla ymmärretään tässä opinnäytetyössä rakennuskomplekseja, joissa eri käyttötarkoitusta palvelevina rakennuskerroksia liitetään samaan kokonaisuuteen. Tyypillisesti näitä ovat asuin-/liikerakennukset, joissa ylemmät asuinkerrokset liitetään alapuolisiin liike-, pysäköinti- tai muihin vastaaviin kerroksiin. Ylempien kerrosten kuormitukset on välttämätöntä siirtää alempien kerrosten käytettävyyden asettamien vaatimusten mukaisesti.

Hybridirakennukset ovat pääsääntöisesti niin sanottua korkeaa rakentamista. Korkea rakentaminen on Suomessa varsin uusi ilmiö, varsinkin asuinkerrostalojen osalta. Pääsääntöisesti korkeaa rakentamista on Suomessa tehty ainoastaan kahtena menneenä vuosikymmenenä ja pääkaupunkiseudulle keskittyen, mutta ilmiö on selkeästi kasvamaan päin koskien myös muita kasvukeskuksia. Korkealla rakentamisella ei ole olemassa yksiselitteistä määritelmää, mutta Suomessa tornitaloksi kutsutaan rakennuksia, joiden kerrosmäärä on 12 tai enemmän. Tämä työ keskittyy ainoastaan korkean rakentamisen kohteisiin.

Kuormansiirtorakenteeksi käsitetään rakenteita, joiden välityksellä kuormaa siirretään sekä pysty- että vaakasuunnassa. Asuinkerrostalojen kantavat rungot ovat Suomessa pääsääntöisesti teräsbetonisia ja siitä syystä tässä työssä keskitytään ainoastaan betoniin kuormansiirtorakenteisiin.

Kuormansiirtorakenteista on olemassa kattavasti tietoa sekä kirjallisina julkaisuina että internetissä. Yleisesti ottaen tieto on etenkin hybridirakennusten osalta hyvin pirstaloitunutta. Opinnäytetyön tavoitteena on nivoa tätä tietoa yhteen ja esittää hybridirakennusten kuormansiirtorakenteisiin liittyvät eri tekijät pääasiassa rakennesuunnittelun näkökulmasta mahdollisimman tiiviinä ja helppolukuisena yleisesityksenä. Työllä pyritään myös kasvattamaan tietoisuutta kuormansiirtorakenteen merkityksestä korkeassa hybridirakentamisessa.

Opinnäytetyön tavoitteena on lisäksi antaa laajempi käsitys siitä, mitä asioita minkäkin rakenteen kannalta pitää huomioida ja mitä mahdollisuuksia kukin kuormansiirtorakenne mahdollistaa. Työ ei keskity pelkästään rakennesuunnittelua koskeviin kysymyksiin, vaan tarkoitus on käsitellä aiheita myös muiden sidosryhmien näkökulmasta, erityisesti arkkitehtien, rakennuttajien ja työmaahenkilöstön. Tämä on erityisen tärkeää, koska parhaimpaan lopputulokseen päästään huomioiden kaikkien projektiosapuolien toiveet ja tavoitteet. Niiden pohjalta valitaan yhdessä toteutettava ratkaisu. Valittava kuormansiirtorakenne vaikuttaa esimerkiksi arkkitehdin pohjaratkaisuihin, rakennuttajan kustannuksiin, työmaan toteutusaikatauluihin ja rakentamisen vaikeuteen.

Opinnäytetyössä vaikeat tekniset asiat on pyritty selittämään helppolukuisesti ja paikoitellen yksinkertaistetusti, jotta työstä olisi hyötyä etenkin nuoremmille rakennesuunnittelijoille. Työ on haluttu pitää kohtuullisen lyhyenä ja tiivinä, jonka luettuaan lukijalla on käsitys erityyppisistä kuormansiirtorakenteista sekä niiden perusluonteista mahdollisuuksineen ja haasteineen. Tämän jälkeen on helppo siirtyä yksityiskohtaisempien ohjeiden ja oppaiden pariin. Aihetta käsittelevää suomenkielistä kirjallisuutta on tosin aika vähän saatavissa.

Työ on tehty tutustumalla alan painettuun kirjallisuuteen sekä eri tietolähteisiin internetissä, haastattelemalla asiantuntijoita ja kollegoja Sitowise Oy:ssä sekä ammentamalla tekijän omaa 13 vuoden kokemushistoriaa rakennesuunnittelijana Sitowise Oy:ssä. Tärkeimmät haastateltavat olivat projektipäällikkö Ari Laitinen ja projektipäällikkö Jukka Ukko.

Suomessa rakentamista ohjaa maankäyttö- ja rakennuslaki, jonka tarkemmat säännökset ja ohjeet kootaan Suomen rakennusmääräyskokoelmaan. Rakennusmääräysten tekniset vaatimukset koskien rakenteiden lujuutta ja vakautta täyttyvät, kun rakenteet suunnitellaan eurokoodien mukaan. Eurokoodista löytyy varsin kattavat laskentaohjeet kuormansiirtorakenteiden laskentaan, pois lukien muutamia yksityiskohtia kuten ohjeet kuitubetonirakenteisiin, 3-ulotteisiin ristikkomenetelmiin ja muutamiin siirtolaatan laskentaohjeiden yksityiskohtiin. Muita täydentäviä ohjeita ja oppaita löytyy mm. Rakennusinsinööriliiton julkaisuista, Betoniyhdistyksen julkaisuista sekä betonirakenteiden kansainvälisen organisaation FIB:n julkaisuista.

## 1.1 Rajaukset

Kuormansiirtorakenteet ovat yleisesti ottaen hyvin monimutkaisia, paikoitellen jopa vaikeimpia mahdollisia rakennesuunnittelutehtäviä, ja tämän takia tämä opinnäytetyö on vain yleisluonteinen katsaus. Jokainen kuormansiirtorakenne olisi jo yksinään oman tutkielmansa aihe. Merkittävimmät aihealueen ulkopuolelle rajatut osakokonaisuudet ovat kuormansiirtorakenteen vaikutus rakennusten jäykistykseen ja kuormansiirtorakenteiden yksityiskohtaisempi mitoitus. Molemmat aiheet ovat niin laajoja, että niitä ei tässä työssä ollut mahdollista tämän tarkemmin käsitellä.



## 2 Yleistä

### 2.1 Hybridirakennukset yleisesti

Sanalla hybridi tarkoitetaan eri asioiden yhdistelmää, joista muodostuu kokonaisuus. Tässä opinnäytetyössä hybridirakennuksella tarkoitetaan rakennuksen eri käyttötarkoitusten yhdistelmää. Tyypillisiä esimerkkejä ovat esimerkiksi kauppakeskus yhdistettynä asuinkerrostaloon, julkinen tila yhdistettynä liikennöintiterminaaliin, pysäköintilaitos yhdistettynä asuin- ja liiketiloihin sekä erilaiset valtaväylien päälle rakennettavat kansirakenteet. Tässä opinnäytetyössä keskitytään erityisesti tapaukseen, jossa kauppakeskus yhdistetään asuinkerrostaloon.

Yleisesti ottaen hybridirakennuksiksi ei mielletä rakennuksia, joissa esimerkiksi liiketiloja sijaitsee rakennuksen maantasokerroksessa ja rakennus muilta osiltaan on asuinkerrostalo. Sen sijaan kokonaisen kauppakeskuksen sijoittaminen asuinkerrostalon alapuolisiin kerroksiin on hybridirakennus. Yksittäisten liiketilojen sijoittaminen asuinkerrostaloon ei yleisesti ottaen vaadi rakennuksen rungolta muutoksia, vaan liiketilat saadaan istutettua asuinkerrostalon runkoon. Kokonaisen kauppakeskuksen sijoittaminen asuinkerrostaloon vaatii kappakerroksen osalta oman runkoratkaisun ja asuinkerrostalon osalta oman runkoratkaisun ja tässä opinnäytetyössä keskitytään näiden ratkaisujen yhteensovittamiseen.

### 2.2 Hybridirakentamisen historia ja nykytilanne Suomessa ja maailmalla

Hybridirakentamista esiintyy käytännössä vain suurissa metropolikaupungeissa. Ensimmäisten hybridien syntyä voi pitää 1930-lukua, jolloin on syntynyt ajatus päivittäisten aktiviteettien yhdistämisestä eli toimistojen, asuntojen, liiketoimintojen, hotellien ja teattereiden yhdistämisestä samaan rakennuskokonaisuuteen. Seuraava suurempi harppaus tapahtui 1960-luvulla, jolloin urbaani kaupunkisuunnittelu alkoi kehittyä maailman teknologisen kehityksen myötä. Siitä lähtien maailmaan suurkaupunkeihin on aloitettu rakentaa pilvenpiirtäjiä tasaiseen tahtiin, joista iso osa hybridirakennuksia.

Suomessa hybridirakentaminen on alkanut käytännössä vasta 2000-luvulla ja Helsinkiin keskittyen. Hybridirakennusten rakentamisen määrä on alun jälkeen lähtenyt kasvuun. Hybridejä tehdään pääsääntöisesti liikenteen solmukohtiin, metro- ja junaratojen läheisyyteen ja usein jopa suoraan niiden päälle.

### 2.3 Kuormansiirtorakenteet yleisesti

Kuormansiirtorakenteeksi käsitetään rakenteita, joiden välityksellä kuormaa siirretään sekä pysty- että vaakasuunnassa. Tässä opinnäytetyössä kuormansiirtorakenteella tarkoitetaan erityisesti erimallisten runkojen välillä tapahtuvaa kuormansiirtoa esimerkiksi asuinkerrostalon rungon kuormien siirtämistä pilari-palkki-rungolle. Kuormaa vaakasuunnassa voidaan ja kannattaa siirtää asuinkerrostalorungossa kerroksittain, jolloin kuorma ei keskity yksittäiseen rakenneosaan. Tämä työ keskittyy tapauksiin, joissa kuormien vaakasuuntainen siirtäminen kerroksittainen ei ole mahdollista, vaan kuorma on siirrettävä erityyppisten runkojen rajakohdassa.

Tyypillisiä kuormansiirtorakenteita ovat:

- seinämäiset palkit
- matalapalkkirakenteet
  - o jännitetyt palkit
  - o harjateräsraudoitetut palkit
- kuormansiirtolaatta ("paksulaatta")
  - o jälkijännitetty laatta
  - o harjateräsraudoitettusiirto laatta
- sekä erilaiset ulokkeelliset rakenteet
  - o lippupalkit

Oikean rakenteen valintaan vaikuttaa moni asia. Merkittävin tekijä on rakenteen lujuus. Rakenteen pitää olla riittävän luja, jotta se on käyttöturvallinen. Käyttöturvallisuutta optimoidaan, jotta ei tehdä turhan kalliita ratkaisuja ja usein ns. liian lujat ovat usein myös liian suuria rakenteita. (Hietikko 2015, s.13)

On tunnettu tosiasia, että merkittävin tekijä raudoitettujen betonirakenteiden kuormansiirtokykyyn on leikkausvälin suhde rakenteen teholliseen korkeuteen. Lujuuslaskennan kannalta kuormansiirtorakenteita voisi yksinkertaistaen jakaa kahteen ryhmään: taipuviin ja taipumattomiin. Taipuvia mitoitetaan pääsääntöisesti palkkiteorialla, kun taas taipumattomia tapauskohtaisesti joko palkkiteorialla, levyteorialla tai ristikkomenetelmin. Tulosten erot palkkiteorian ja levyteorian välillä ovat pieniä (noin 5 %), kun sivu/korkeus suhde on suurempi kuin kolme. (Salmi, Virtanen 2008, s. 196)

Taipuviin kuormansiirtorakenteisiin kuuluvat matalapalkit (harjateräspalkit ja jännitetyt palkit), siirtolaatta ja erilaiset ulokkeelliset ratkaisut. Taipumattomiin kuuluvat seinämäiset palkit sekä erilaiset ristikkomenetelmän mukaiset ratkaisut.

Taipuvilla ratkaisuilla siirretään kuormaa yleisesti ottaen huomattavasti matalammalla ratkaisulla sivusuunnassa kuin taipumattomilla. Jännitetyillä betonipalkeilla päästään pisinmillään 20 metrin jänneväleihin, jännittämättömillä palkeilla päästään noin 8 metriin. Ulokkeellisilla ratkaisuilla maksimitat ovat noin 3...5 metriä. Maksimijännevälit ovat suoraan verrannollisia palkille kohdistuvaan kuormaan. Kuormankantokyky on taipuvilla ratkaisuilla verrattain huono.

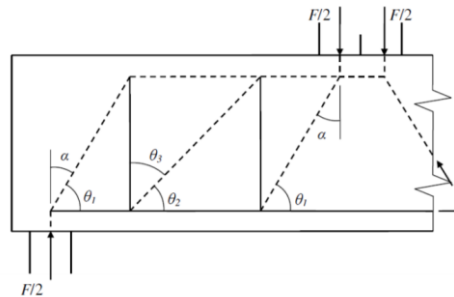
*Suurimassa osassa betonirakenteiden mitoituksesta voidaan soveltaa perinteisesti käytettyä palkkiteoriaa, joka perustuu siihen, että rakenteen poikkileikkaukset pysyvät tasoina kuormitettunakin eli muodonmuutos on lineaarista ja leikkausmuodonmuutosta ei otaksuta tapahtuvan.* (Koskimies 2014, s. 9)

Mitoituksen kulkua rajoittavia rasituksia ovat leikkaus ja taivutus. Taivutuksen kohdalla yleensä ensimmäisenä tulee vastaan taipuma. Jännevälin ollessa suuri maksikuorman määrää taipuma. Jänneväliä kaventaessa maksimikuormaa saadaan kasvatettua, mutta melko nopeasti leikkausvoimakestävyys tulee määrääväksi. Leikkausvoimakestävyttä voidaan kasvattaa rakennekorkeutta kasvattamalla, joka ajaa nopeasti vaihtoehtoisten ratkaisujen käyttöön.

Taipumattomien ratkaisujen ehdoton vahvuus on suuri kuormansiirtokyky. Heikkouksia ovat vaadittava korkeus sekä tuotantoteknillisesti rajoittava suhteellisen pieni jänneväli, erityisesti elementtirakenteissa. Eurokoodi luokittelee palkit, joiden sivu/korkeus suhde on pienempi kuin kolme  $L_{eff} / h > 3$ . Alustavaan mitoitukseen suurille kuormille karkeana arvona voidaan pitää 45 asteen kulmaa. Eli yhden metrin korkeudella siirretään kuormaa yhteen suuntaan yksi metri, ja kun palkkimaisilla rakenteilla kuormaa siirretään molempiin suuntiin, niin jänneväliksi saadaan 2 metriä. Tämä on vanha sääntö, jossa seinämäisen palkin efektiivinen korkeus katsotaan olevan korkeintaan palkin tehollinen pituus. Perinteisellä asuinkerrostalon 3 metrin kerroskorkeudella saavutetaan helposti kuuden metrin jänneväli, joka on tapauskohtaisesti aika helposti kasvatettavissa useilla metreillä. (Sääski 2017, s. 50)

Ristikkomenetelmän juuret ovat peräisin 1920-luvulta, jolloin Eemil Mörch kehitti klassisen ristikkoanalogian saksalaisen rakennusinsinöörin Wilhelm Ritterin ajatuksesta mitoitaa betonipalkki veto- ja puristussauvoina. Ristikkomenetelmästä löytyy lisää seuraavassa kappaleessa ja esimerkiksi Joonas Koskimiehen AMK-opinnäytetyössä *Ristikkomenetelmä (Strut-and-tie modeling)* (Koskimies 2014).

Ristikkomenetelmällä mitoitetun palkin periaatteet havainnollistetaan kuvassa 1.

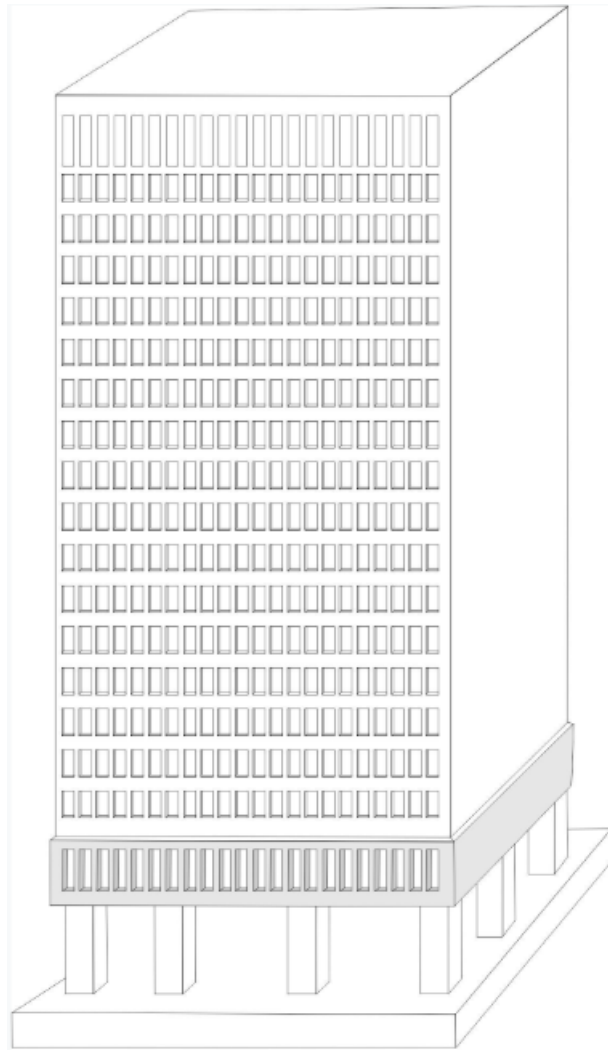


Kuva 1 Ristikkomenetelmällä mitoitetun palkin periaatteet, (Koskimies 2014; Ristikkomenetelmä)

### 3 Kuormansiirtorakenteet

#### 3.1 Seinämäiset palkit

Seinäiset palkit ovat käytetyimpiä kuormansiirtorakenteita hybridirakennuksissa mm. suuren kuormankantokyvyn ja kustannustehokkuuden vuoksi. Seinämäisiksi palkeiksi luokitellaan palkit, joiden sivu/korkeus suhde on pienempi kuin kolme, ja palkkeja mitoitetaan joko sovelletuin Bernoulli'n taivutusteoriain eli kehittyneemmillä palkkiteorioilla, plastisuuden alaraja teoreemoin (ristikkomenetelmin) tai epälineaarisen jännitys-kauman teorialla (FEM). Nykyään suunnittelutoimistoissa pääsääntöinen työkalu on tietokoneavusteinen elementtilaskenta eli FEM -laskenta. Seinämäistä palkkia havainnollistetaan kuvassa 2 harmaalla värillä.



Kuva 2 Havainnekuva seinämäisestä palkista (harmaa rakenne)

Ristikkomenetelmässä seinän sisään muodostetaan ristikko, joka muodostuu betonisista puristuskaistoista, teräksestä muodostuvista vetopaarteista sekä paarteet yhdistävistä solmuista. Paarteiden jännitykset ratkaistaan ulkoisten pistekuormien avulla ja ne mitoitetaan kestäämään rakenteen kuormat. (Leskelä 2008, s.106) Ristikkomenetelmä on yksinkertainen mitoitusmenetelmä, jota voidaan käyttää monimuotoisissa rakenneosissa. Ristikkomenetelmän laskut voi ratkaista käsilaskentanakin. Ristikkomenetelmän haasteena on sopivan ristikon luonti, minkä takia takia menetelmässä ei välttämättä ole yhtä oikeaa ratkaisua, vaan erilaisten ristikoiden pohjalta syntyy erilaisia ratkaisuja, joiden tulokset voivat heitellä hyvinkin paljon. Käyttörajatilaan ristikkomalli ei juurikaan sovellu, koska mallien käyttö perustuu plastisuusteoriaan ja sen alarajateoreemaan (Leskelä 2008, s. 159.) Ristikkomenetelmällä voi tosin ratkaista yksinkertaisten mallien käyttörajatilatarkastelua esimerkiksi teräsjännitysten ja halkeamaleveyden suuruuden osalta.

Mutta tämä soveltuu ainoastaan yksinkertaisten rakenteiden tarkasteluun eikä vähäänkään monimutkaisempiin rakenteisiin.

Elementtimenetelmässä (FEM) perusyhtälöt johdetaan lujuusopin perussuureita hallitsevista osittaisdifferentiaaliyhtälöistä tai vaihtoehtoisesti näiden kanssa ekvivalenttisista työ- ja energiaperiaatteista. Elementtimenetelmässä geometrisesti mutkikas kappale jaetaan äärellisiin osiin, jotka ovat geometrialtaan yksinkertaisia. Kappaletta kuvataan elementtijoukolla, jota sanotaan elementtiverkoksi tai laskentamalliksi. Elementtiverkko koostuu siis joukosta elementtejä, jotka liittyvät toisiinsa solmuissa. Elementtiverkon jokaiseen solmuun liittyvät tietyt, lujuuslaskennan kannalta kiinnostavat suureet, jotka vielä jakaantuvat siirtymä- ja voimasuureisiin. Siirtymäsuureita ovat translaatiosiirtymät ja rotaatiosiirtymät eli kiertymät. Vastaavasti voimasuureisiin kuuluvat jännityskomponentit, kannattimen poikkileikkauksen rasitukset ja pintarakenteen leikkauksen rasitustiheydet. (Lähteenmäki 2014, s.2)

Elementtimenetelmän käyttö suunnittelutoimistoissa on lisääntynyt ja tulee varmasti lisääntymään merkittävästi muun muassa tietokoneohjelmien kehittymisen myötä. Elementtimenetelmän huonona puolena on tulosten oikeellisuuden toteaminen. Tuloksiin vaikuttavat suuresti laskennassa käytetyt parametrit muun muassa elementtiverkon osalta ja tämä aiheuttaa varsin suurta poikkeamaa tuloksissa. FEM-laskennan antamia tuloksia on syytä säännöllisesti vertailla esimerkiksi käsilaskennalla. Hyvin yleinen toimintatapa FEM-laskennan suhteen on poimia FEM-mallista jännitykset ja jatkaa yksityiskohtien mitoitus ns. käsin laskentana.

Seinämäiset palkit raudoitetaan molempien pintojen verkkoraudoituksella ja vetosauvat otetaan vastaan vetoraudoituksella, joka ankkuroidaan kokonaisuudessa tuelle. Veto-raudoituksen ankkurointi alkaa solmun etureunasta.

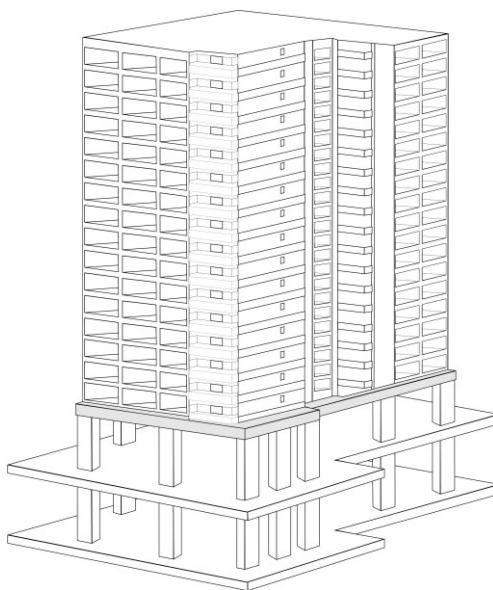
Eurokoodeissa (SFS EN 1992-1-1 9.7) annetaan seuraavat ohjeet seinämäisistä teräs-betonipalkeista:

- (1) Seinämäiset palkit varustetaan normaalisti toisiaan vastaan kohtisuorasta raudoituksesta muodostetulla verkolla, joka tulee vastakkaisten pystypintojen kummankin pinnan lähelle, vähimmäisraudoituksen ollessa As.dbmin.

- (2) Verkon kahden vierekkäisen tangon väli saa olla enintään rakenneosan paksuus kaksinkertaisena tai enintään 300 mm.
- (3) Ristikkomallissa huomioon otettuja vetosauvoja vastaava raudoitus ankkuroidaan kestävänsä täysin tasapainon edellyttämä voima solmussa (ks. SFS EN 1992-1-1 9.7 kohta 6.5.4) käyttämällä taivutettuja tankoja, käyttämällä U-lenkkejä tai ankkurointilaitteita, ellei solmun ja palkin pään välille voida järjestää riittävää, ankkurointipituuden  $l_{bd}$  edellyttämää pituutta.

### 3.2 Kuormansiirtolaatat

Kuormansiirtolaatta, jota usein kutsutaan myös paksulaataksi, on yleisesti ottaen kallis ja vaikea rakentaa. Havainnekuva siirtolaatasta on esitetty kuvassa 3. Siirtolaatta tarjoaa alapuolisten pilareiden ja yläpuolisten seinälinjojen suhteen vapaan sijoittelun, kun taas palkkimaiset ratkaisut joudutaan tarkasti sijoittamaan toistensa suhteen. Kuormalinjojen vapaa sijoittelu mahdollistaa arkkitehtisuunnittelulle huomattavasti paremmat lähtökohdat kuin palkkimaisten kuormansiirtorakenteiden kanssa. Siirtolaatan suunnittelun vaikeus ei johdu pelkästään sen päälle kohdistuvien kuormien suuruudesta (lujuuslaskenta), vaan myös sen vaikutuksesta rakennuksen kokonaisvaltaiseen käyttäytymiseen (jäykistysvaikutukset). Siirtolaatan kalleus johtuu pääosin materiaalikustannuksista mutta myös työvoimakustannuksista.



Kuva 3 Havainnekuva siirtolaatasta (harmaa rakenne)

Siirtolaatta on paksu yhtenäinen teräsraudoitettu betonilaatta, jonka paksuus on yleensä metristä ylöspäin. Korkeassa rakentamisessa paksuus on normaalisti 2...3 metriä.

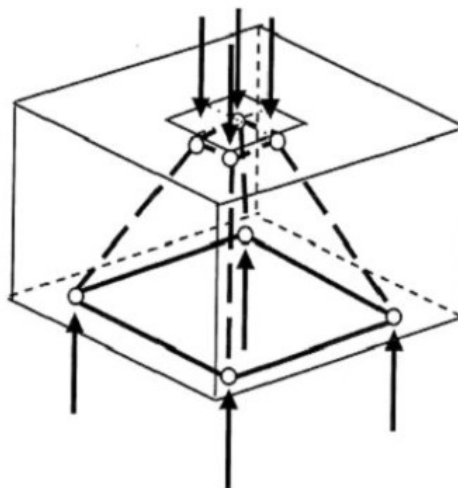
Geometrisen luonteensa vuoksi paksulaattaa ei voida tarkastella yksinkertaistettujen poikkileikkausteorioiden avulla, joita käytetään suurimassa osassa rakenneosien mitoituksessa. Paksulaattaa ei voi tarkistella puhtaasti palkkiteorialla, levyteorialla tai seinäteorialla, vaan siirtolaatan mitoitukseen käytetään FEM-laskentaa, 3-ulotteisia ristikkomenetelmiä tai näiden yhdistelmiä. Puhtaasti käsilaskentana mitoitus on lähes mahdotonta tehdä laatan kompleksisesti jakautuneiden jännitysten takia.

Suunnittelutoimistoissa mitoitus on tapana yksinkertaistaa ja jakaa niin, että FEM-mallinnuksella saadaan laattaan vaikuttavat rasitukset ja näitä rasituksia käydään rakenneosa kerrallaan joko käsilaskennalla tai tietokoneavusteisesti läpi. Pilarialueilla tarkistetaan laatan lävistysmitoitus, seinäalueilla tarkistetaan leikkaus- ja lävistyskestävyys ja taivutetuilla alueilla (B-alueet) taivutuskestävyys.

Ristikkomenetelmässä rakenne jaetaan B-alueisiin (Bernoulli) ja D-alueisiin (epäjatkuuus). B-alueiden mitoitus voidaan suorittaa perinteisesti käytetyllä palkkiteorialla, joka perustuu siihen, että poikkileikkaukset pysyvät tasoina kuormitettuinakin eli muodonmuutos on lineaarista ja leikkausmuodonmuutosta ei otaksuta tapahtuvan. Rakenteiden epäjatkuvuuskohdissa (D-alueissa) oletus ei kuitenkaan pidä paikkaansa. Usein näiden epäjatkuvuusalueiden mitoitus pohjautuu koetuloksien tai kokemusten synnyttämiin yleisesti hyväksyttyihin sääntöihin. (Koskimies 2014, s. 6)

3-ulotteisten ristikkomenetelmien käyttö kompleksisen luonteensa ja suppean suunnitteluohjelmäärän takia on vielä toistaiseksi aika harvinaista niin meillä Suomessa kuin muuallakin. 3-ulotteiset ristikkomenetelmien ratkaisumallit (kuvassa 4 on havainnekuva tästä) soveltuvat hyvin symmetrisiin rakenteisiin, kuten esimerkiksi nelipaaluksen paaluanturan mitoitukseen. Toisin sanoen rakenteisiin, joiden ristikkotasot voidaan tarkastella 2-ulotteisina tasoina erikseen ja sen jälkeen tarkastella symmetriset kohtisuorassa kulmassa toisiinsa vaikuttavat solmualueet erikseen. Mutta rakenteet, joissa ristikkotasot eivät ole symmetrisiä ja joiden solmupisteisiin vaikuttaa epäsymmetrisessä kulmassa sauvat, ovat hankalia mitoittaa. Tämä aihealue on kokonaisuutena niin iso, että se on rajattu tämän opinnäytetyön ulkopuolelle.



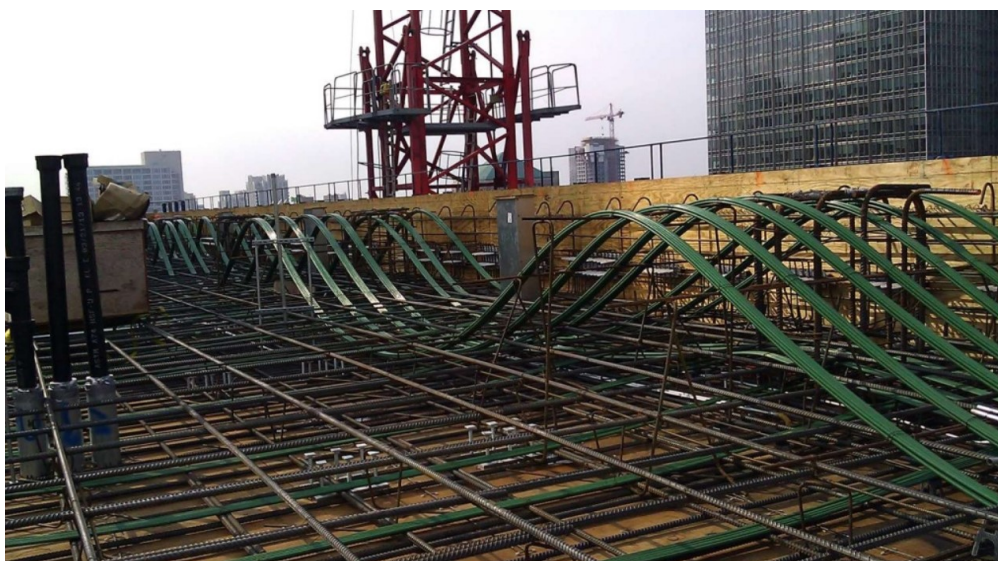


Kuva 4 Havainnekuva 3-ulotteisesta ristikkomenetelmästä, (Engström 2011, s.35)

Siirtolaatta raudoitetaan ylä- ja alapinnan harjateräsraudoitteilla. Raudoitusta asennetaan sellaisille alueille, joissa muodostuu vetorasituksia. Lisäksi pilarialueilla lävistysmurtoa vastaan.

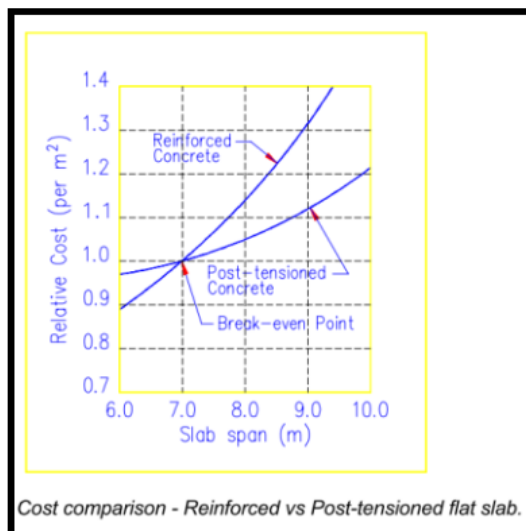
### 3.2.1 Jälkijännitetty kuormansiirtolaatta

Jälkijännitettyyn betonirakenteeseen luodaan puristavia voimia edullisen jännitys- ja muodonmuutostilan aikaansaamiseksi. Puristusvoimat luodaan korkealujuusjänneteräksillä. Kuvassa 5 on esitetty 1600 mm:ä korkean jälkijännitetyn siirtolaatan keskeneräinen raudoitus.



Kuva 5 Keskeneräinen raudoitus (Yoon Kang 2015, s. 3)

Puristusvoimien tarkoitus on parantaa betonin heikkoa vetokestävyyttä korvaamalla betoniteräksiä jänneraudoituksella, vähentää betoniraudoitusta ja vähentää rakenteen muodonmuutoksia. Jänneteräsrakenteet tulevat jännittämättömiä edullisemmaksi, kun jänneväli on  $\geq 7$  m, kuten alla olevassa kuvassa 6 on esitetty.



Kuva 6 Jännitettyjen ja jännittämättömien matalalaattojen kustannusvertailu, (2015 Yoon Kang)

The Institution of Structural engineers on tehnyt tutkimuksen, jossa on vertailtu kahden hybrdirakennuksen siirtolaattojen kustannuksia jälkijännitetyin teräksin sekä perinteisin harjateräksin. Molemmat tutkitut kohteet ovat korkeita rakennuksia. Toinen kohteista on 43-kerroksinen ja toinen on 38-kerroksinen. Toisessa kohteessa siirtolaatta sijaitsee 11. kerroksessa ja toisessa kohteessa 9. kerroksessa. Molempien kohteiden siirtolaatat on mitoitettu sekä perinteisin harjateräksin että jälkijännitetyin harjateräksin. Korkeamman rakennuksen siirtolaatan paksuus perinteisin harjateräksin on 2,8 metriä ja jälkijännitetyinä rakenteina 1,8 metriä. Matalamman rakennuksen siirtolaatan harjateräksinen paksuus on 2,7 metriä ja jännitetyin teräksin 1,8 metriä.

Kuvassa 7 on esitetty tutkimuksen materiaalikustannusten vertailua sekä kuvassa 8 havainnekuva kahdessa osassa valetusta siirtolaatasta.

**Case A: Skyview Residence [43-Storey Residential Building]**

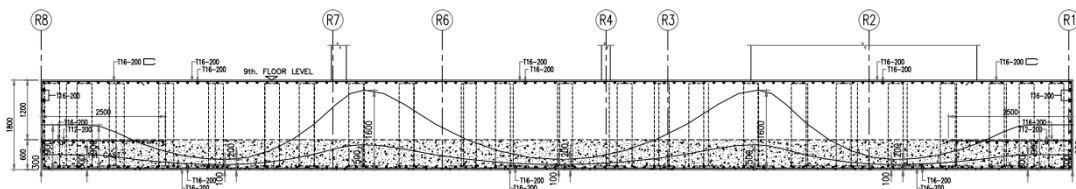
	Concrete (\$)	Rebar (\$)	Tendon (\$)	Form (\$)	ΣSum (\$)
PT	875,960	388,800	762,500	71,250	2,098,510
RC	1,050,420	4,924,800	0	177,270	6,152,490
PT – RC	-174,460	-4,536,000	762,500	-106,020	-4,053,980

**Case B: Rio Serviced Apartments [38-Storey Residential Building]**

	Concrete (\$)	Rebar (\$)	Tendon (\$)	Form (\$)	ΣSum (\$)
PT	764,635	345,600	675,000	100,358	1,885,593
RC	716,140	2,664,000	0	170,316	3,550,456
PT – RC	48,495	-2,318,400	675,000	-69,958	-1,664,863

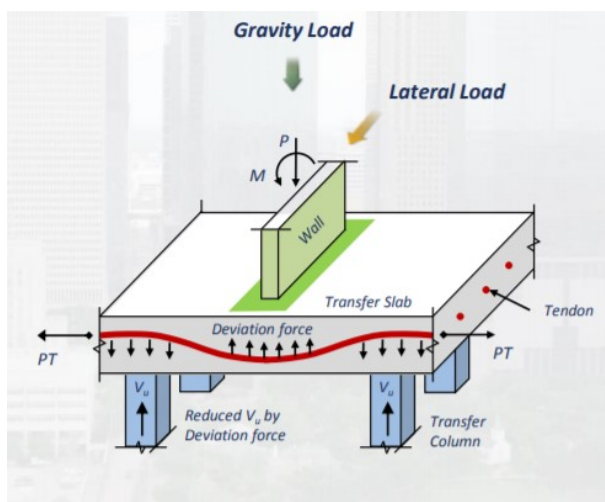
Kuva 7 Jännitettyjen ja jännittämättömien siirtolaattojen kustannusvertailu, (Yoon Kang 2015, s.35)

Siirtolaatoissa jälkijännittämisellä on tarkoituksena parantaa taivutusrasitettuja alueita (B-alueet). B-alueilla betonirakenteeseen luodaan puristusvoimia, jotka pienentävät ve-torasituksia ja rakenteen taipumia.



Kuva 8 Havainnekuva kahdessa osassa valetusta siirtolaatasta, (Yoon Kang 2015, s.10)

Jälkijännitettyjen kuormansiirtolaattojen suunnittelu on erittäin haastavaa. Kuvassa 8 on yksi esimerkki jälkijännitetystä kuormansiirtolaatasta. Tällaisia rakenteita on Suomessa tehty todella vähän, jos lainkaan.



Kuva 9 Periaatekuva jälkijännitetystä kuormansiirtolaatasta, (Yoon Kang 2015, s.11)

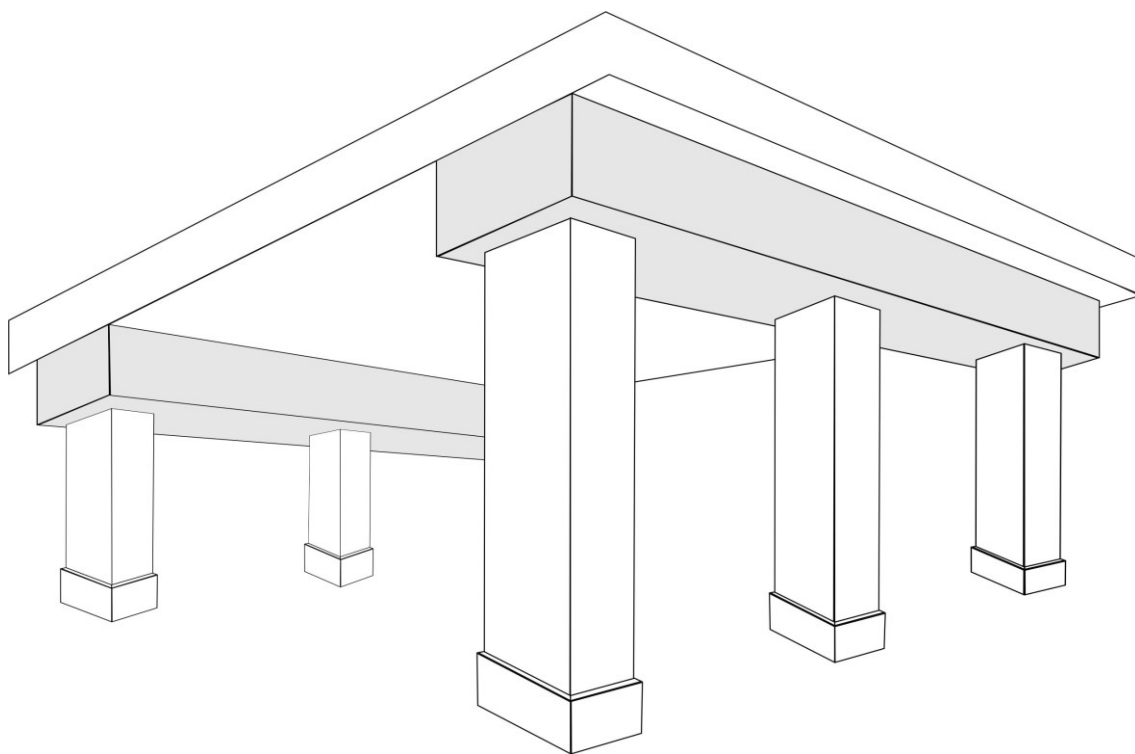
### 3.2.2 Kuitubetoniraudoitettu kuormansiirtolaatta

Kuitubetonin käytölle paksuissa betonilaatoissa olisi selkeää potentiaalia. Kuitubetonidulla laataalla on valmius jakaa kuormitusta laajemmalle alueelle, jolloin saadaan siirtolaattatyypisten rakenteiden suuren koon tuomaa potentiaalista kapasiteettia paremmin hyödynnettyä. Kuituraudoituksella on mahdollista vähentää tankorausituksen määrää merkittävästi ja kuituraudoitus soveltuu hyvin etenkin monimuotoisiin rakenteisiin, kuten esimerkiksi terävänurkkaisiin laattoihin.

Koska kuitubetonisille rakenteille ei ole olemassa Eurokoodi-pohjaisia laskentamenetelmiä ja ohjeistus ylipäättään on hyvin puutteellista ja esimerkiksi kuitubetonin vaikutuksesta rakenteen leikkauskestävyyteen ei ole olemassa toistaiseksi minkäänlaisia suomalaisia suunnitteluohjeita, ei Suomessa tai ylipäättään Euroopassa ole vielä valmiuksia käyttää kuitubetonia järeästi kuormitetuissa kuormansiirtolaatoissa. Mutta toivottavasti tulevaisuudessa tämä mahdollisuus saataisiin hyödynnettyä ja rakennesuunnittelijoilla olisi laskentamenetelmät myös kuitubetonoitujen kuormansiirtolaattojen käyttöön.

### 3.3 Matalapalkit

Matalapalkit eli yleisesti käsitetyt normaalit teräsbetonipalkit ovat talonrakentamisen peruselementtejä. Matalapalkit mitoitetaan palkkiteoriaa noudatellen. Palkkiteoriassa taivutusteorian juuret ovat ns. Bernoulin omaksumassa, jossa oletetaan palkin poikkileikkauksen pysyvän tasona, joka on kohti suorassa palkin pituussäikeitä vastaan (Hirsi 2015, s.15). Esimerkki matalapalkista on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10 Havainnekuva järeästä matalapalkista (harmaa rakenne)

Matalapalkkien käyttö korkeammissa hybridirakennuksissa kuormansiirtorakenteena on harvinaisempaa muun muassa alhaisen kuormankantokapasiteetin takia. Karkeasti ottaen matalapalkit soveltuvat noin muutaman kerroksen kantavien seinälinjojen kuormille. Useamman kerroksen kuormilla taipuma- tai leikkausvoima alkaa olla mitoittava tekijä, joka johtaa toisenlaisen rakenneosan valintaan. Taipuma- tai leikkauskapasiteettia parannettaessa ollaankin monesti jo seinämäisten palkkien dimensioissa. Taipuman ollessa on ainoa rajoittava tekijä eikä leikkauskapasiteetin suhteen olla murtorajoissa, niin silloin vaihtoehtona on myös jälkijännitetty matalapalkki.

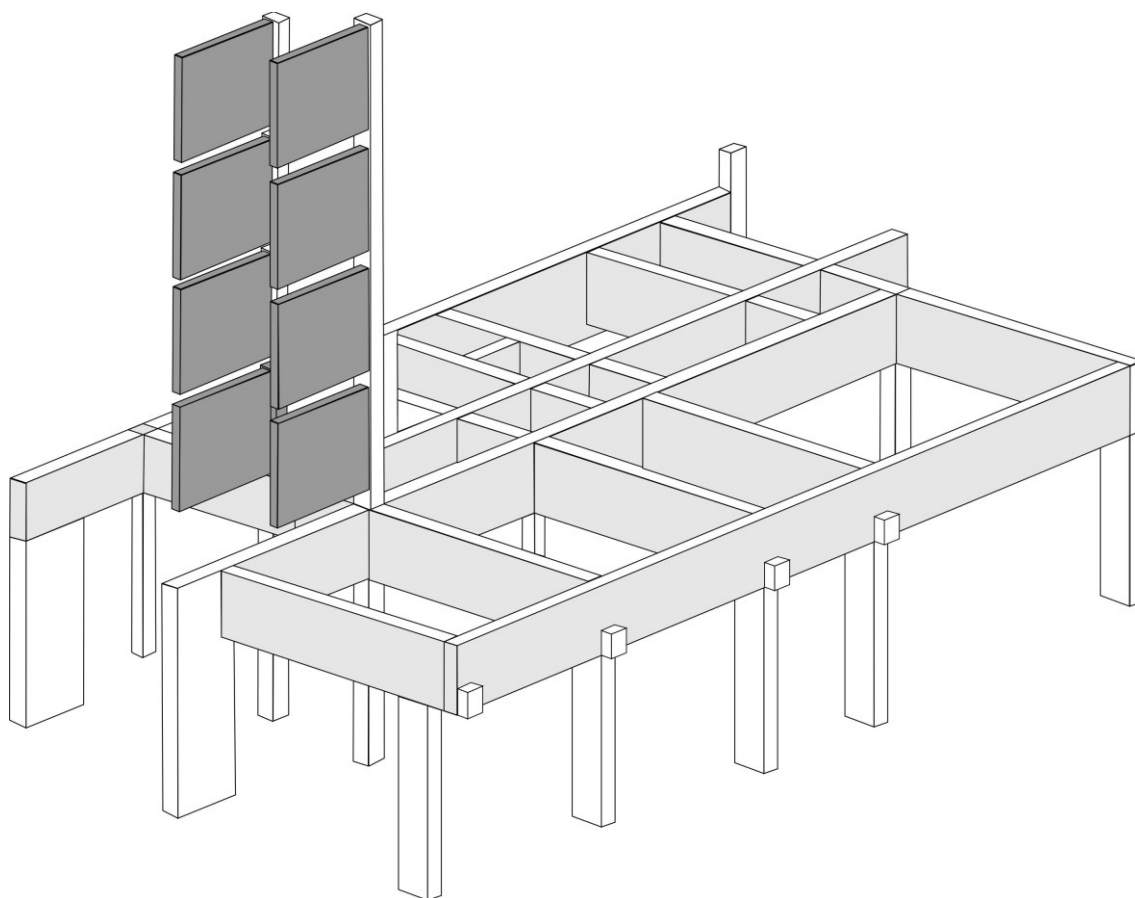
### 3.3.1 Jännitetyt matalapalkit

Jännitetyt palkit ovat kustannustehokkaita rakenneosia silloin, kun perinteisten harjateräspalkkien taivutuskapasiteetti lähenee maksimiaan. Jännepalkeilla päästään huomattavasti pidempiin jänneväleihin kuin perinteisillä palkeilla. Jänneteräspalkkien muita etuja harjateräspalkkeihin verrattuna on muun muassa matalampi palkkikorkeus, kevyempi rakenne, pienemmät taipumat ja halkeamaleveydet ja parempi vedenpitävyys. Huonoina puolina on suuremmat vaatimukset työmaahenkilökunnalle ja suuremmat pätevyysvaatimuudet suunnittelutiimeille ja vaativammat suunnitelmat.

Jännitettyjä betonirakenteita mitoitetaan kehittyneillä taivutusteorioilla lähes pelkästään tietokoneavusteisesti. Jänneteräsrakenteet raudoitetaan osin harjateräsraudoittein ja jänteen suuntaisilla korkealujuisilla jänneteräksillä. Jännitettyjä rakenteita valmistetaan sekä esivalmisteisina betonielementteinä että työmaalla valettavilla rakenteina. Karkeasti ottaen voidaan jakaa elementtirakenteet esijännitetyiksi ja työmaalla jälkijännitetyiksi. Esijännitetty rakenneosia jännitetään ennen betonivalua, kun taas jälkijännitetty rakenne jännitetään vasta, kun betoni on saavuttanut riittävän lujuuden.

### 3.4 Ulokkeelliset kuormansiirtorakenteet

Ulokkeellisia kuormansiirtorakenteita käytetään pienimuotoisemmissa rakenteissa. Suuremmilla kuormilla ulokkeiden pituudet ovat hyvin rajallisia. Yleisimpiä ulokkeellisia rakenteita ovat ulokkeelliset matalapalkit, joita käytetään mm. matalampien hybridirakennusten parkkihalleissa. Muita tyypillisiä kohteita ovat erilaiset julkisivulinjan ulokkeelliset ratkaisut tai parvekkeiden ulokkeellinen ratkaisu, joita voidaan hoitaa helposti kerroksittain esimerkiksi ulokkeellisilla pielillä. Näiden kapasiteetti tulee hyvin nopeasti vastaan, jos tavoitteena on useamman kerroksen kuormien siirto.



Kuva 11 Periaatekuva matalapalkkeista (harmaat rakenteet) ja lippupalkkeista (tummanharmaat rakenteet)

### 3.4.1 Lippupalkki

Lippupalkilla on vain yksi välitön tuki, joten se muistuttaa uloketta. Ne tuetaan usein rakennusrunkoon myös välipohjista. Lippupalkki vastaa mitoitukselta ja monilta muilta ominaisuuksiltaan seinämäistä palkkia. Lippupalkkeja mitoitetaan pääsääntöisesti ristikko- menetelmin tai tietokoneavusteisesti FEM-laskentana.

## 4 Kuormansiirtorakenteiden ominaisuudet ja suosituskäyttökohteet

### 4.1 Mitoitus (rakennelaskenta)

Koska kuormansiirtorakenteiden mitoituksellisia tekijöitä käsitellään monissa kappaleissa ja lopussa on esimerkkilaskelmia, niin tähän kappaleeseen on kasattu vain yleinen laskentajärjestys ja lähdeaineistoa mitoitukseen.

Taivutetun palkinmitoituksen työnkulku on yleensä seuraavanlainen. Mitoitus murtorajatilassa taivutukselle, leikkaukselle, väännölle ja näiden yhdistetyt rasitukset huomioiden. Jonka jälkeen mitoitus käyttörajatilassa halkeilulle ja taipumalle. Näiden jälkeen huomioidaan käyttöiän, onnettomuus- ja palomitoituksen vaatimukset. Matalapalkkien koon kasvaessa oikein järeiksi mitoitus ei varsinaisesti muutu miksikään, mutta työmaatekniisiin asioihin alkaa tulla muutoksia, esimerkiksi muottitekniikkaan ja betonin lujuudenkehittymiseen. Aineistoa matalapalkkien mitoittamiseen löytyy mm. Betoniyhdistyksen julkaisusta *Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja* By 211, osat 1, 2 ja 3, 2014 (BY-Koulutus, 2015) ja Suomen rakennusinsinöörien liiton julkaisusta *RIL 202-2011 Betonirakenteiden suunnitteluohje*. (Suomen rakennusinsinöörien liitto, 2011)

Jännitettyjen matalapalkkien mitoitus on haastavampaa kuin teräsbetonirakenteiden. Jännitetyn rakenteen mitoituksessa otetaan huomioon teräsbetonirakenteen perustapaukset taivutus, leikkaus, vääntö, taipuma, halkeilu yms. Näiden lisäksi on huomioitava jännepunoksiin liittyviä asioita, kuten jännitysmenetelmä, jännittämisjärjestys, jännittämisvoima ja erilaiset jännityshäviöt. Jännitettyjen rakenteiden mitoitusohjeita löytyy esimerkiksi Betoniyhdistyksen julkaisusta *Tartunnattomat jänteet betonirakenteissa 2017* By 69. (Merikallio, 2017)



Bernoullin hypoteesin mukaan seinämäisten palkkien jännitysjakaumaa ei voi tarkastella yksinomaan perinteisellä palkkiteorialla, vaan mitoituksessa on käytettävä sovellettuja menetelmiä. Näitä menetelmiä ovat sovellettu Bernoullin teoria (sovellettu teoria lineaarisesta muodonmuutoksesta), plastisuuden alaraja teoreema (ristikkomenetelmä) tai epälineaarisen jännitysjakauman teoria (FEM) (Schäfer, 1987, s. 141.). Näitä kaikkia menetelmiä on käsitelty tarkemmin kappaleessa 3.1 Seinämäiset palkit, joten niihin ei tässä kappaleessa sen syvemmin pureuduta. Aineistoa seinämäisten palkkien mitoittamiseen löytyy mm. Betoniyhdistyksen julkaisusta *Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008 By 210* (Suomen rakennusinsinöörien liitto, 2017) sekä FIB-yhdistyksen julkaisusta *Design examples for strut-and-tie models 2011 FIB-bulletin 61*. (Schäfer 1987, s.25)

Siirtolaatan rasitukset selvitetään pääsääntöisesti tietokoneavusteisesti FEM-laskennalla, jonka jälkeen rakenteen yksityiskohdat ratkotaan rakenneosia kerrallaan joko tietokoneavusteisesti tai käsin laskennalla. Pilarialueilla tarkistetaan laatan lävistyskestävyys ja seinäalueilla tarkistetaan leikkaus- ja lävistyskestävyys, sekä taivutetuilla alueilla taivutuskestävyys. Siirtolaattojenkin mitoittamiseen aineistoa löytyy esimerkiksi Betoniyhdistyksen Betoniyhdistyksen julkaisusta *Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja By 211*, osat 1, 2 ja 3, 2014 (Leskelä, 2015) ja Suomen rakennusinsinöörien liiton julkaisusta *RIL 202-2011 Betonirakenteiden suunnitteluohje* (Suomen rakennusinsinöörien liitto, 2011)

Ulokkeellisia kuormansiirtorakenteita mitoitetaan käytännössä samoilla periaatteilla kuin muitakin vastaavia rakenteita. Eli matalat ulokkeet matalapalkkien kaavoilla ja seinämäiset, pääsääntöisesti joko ristikkomenetelmin tai FEM-laskennalla.

#### 4.2 Rakenteelliset ominaisuudet

Koska rakenteellisia ominaisuuksia käydään tässä opinnäytetyössä monissa eri kappaleissa, joten tässä kappaleessa ei perehdytä niihin sen syvällisemmin.

Seinämäisen palkin ominaisuuksista merkittävimpiä on oikeilla mittasuhteilla suuri kuormansiirtokyky. Monikymmenkerroksisten rakennusten kuormaa pystytään siirtämään kohtalaisen hoikkien seinien avulla. Jännevälit ovat kumminkin hyvin rajalliset suhteessa vaadittuun korkeuteen. Haittapuolena on erityisesti suuresti kuormitetuilla seinillä rajoite suurien aukkojen suhteen, varsinkin oviaukkojen osalta. Kapasiteetti pienenee merkittävästi mitä suurempia aukkoja seinään on tarkoitus tehdä. Tästä syystä seinämäisiä palkkeja on vaikea saada sijoittumaan hyvin pohjaratkaisuun. Yleinen ongelma on alueilla,



joissa seinämäisiä palkkeja on lähekkäin, koska huoneratkaisuista tulee helposti huonoja, esimerkiksi oviaukkoja ei saada paikkoihin, joihin haluttaisiin ja joskus ei meinaa löytyä paikkaa oviaukolle ollenkaan. Seinämäiset palkit sietävät talotekniikan vaatimaa rei'itystä suhteellisen hyvin, koska reiät ovat yleisesti ottaen pieniä verrattuna esimerkiksi oviaukkoihin ja reiät sijaitsevat seinän yläpäässä eli puristusalueella, kun taas oviaukot sijaitsevat alapäässä katkaisemassa vetoaluetta. Näin ollen ongelma on pääsääntöisesti vain suurempien aukkojen kuten oviaukkojen kanssa.

Seinämäisiä palkkeja saa suhteellisen hyvin tehtyä asuinkerrostalon rungossa teräsbetonielementteinä. Pituus tai paino ovat yleensä ensimmäisiä asioita, jotka rajoittavat rakenteiden esivalmistamisen, jota kutsutaan elementoinniksi. Betonielementtien rajat ovat Suomessa yleensä kahdeksan metrin pituusraja ja 10–12 tonnin painoraja. Toinen ongelma seinämäisten palkkien esivalmistamisessa ovat liitosten kestävyys. Leikkausvoimaa elementtiliitokset siirtävät kohtalaisen huonosti. Käytetyin liitostapa on vaijerilenkkiliitos, joka on helposti käsiteltävä, mutta sen kuormansiirtokapasiteetti on huono. Harjateräslenkkiliitos olisi kapasiteetin puolesta hyvä vaihtoehto, mutta työmaalle se on varsin ongelmallinen liitostapa. Lenkkien taivuteltavuus on huono, joka tekee elementin asentamisesta hyvin hankalaa ja hidasta. Jotain uusia liitosmalleja on myös tullut, mutta niiden käyttö on toistaiseksi ollut aika vähäistä.

Paksulaatan merkittävimpiä rakenteellisia ominaisuuksia on sen kyky luoda pohjaratkaisusta vapaa, eli esimerkiksi pilari-palkkirungon päälle valettu paksulaatta mahdollistaa yläpuolisten rakenteiden vapaan sijoittelun. Siinä missä esimerkiksi seinämäisten palkkien kanssa on toimittava sijoittelun suhteen hyvin rajoitetusti, paksulaatta mahdollistaa hyvin vapaan pohjaratkaisun.

Yksi paksulaatan huonoimmista puolista on ratkaisun hinta. Paksulaatta on kallis tehdä, materiaalikustannukset ovat suuret ja se on esimerkiksi kohtalaisen työläs valmistaa. Paksulaattaa ei voi esivalmistaa tehtaalla, ja paksulaatta on aika rajallinen suurien kuormien suhteen. Sen suurimmin kuormitettu kohta määrää paljolti myös viereisten rakenteiden dimensiot, eli tässäkin mielessä se on kustannustehoton ratkaisu. Toisin sanoen siinä missä seinämäisen palkin dimensioita ja raudoituksia tarkastellaan kohta kerrallaan, niin paksulaatan dimensiot ja suurin osa raudoituksista määräytyy rasitetuimpien kohtien mukaan. Tämän takia laatan paksuutta ei ole järkevää vaihdella ja sama pätee osin myös raudoitukseen, eli raudoitus halutaan pitää selkeänä ja mahdollisemman yhtenevänä. Materiaalikustannuksiin voi vaikuttaa muun muassa vaihtamalla harjateräs

korkealujuiseen jännitettyyn teräkseen, mutta näistä ratkaisuista on Suomessa suhteellisen vähän kokemusta, jos lainkaan, ja nämä ovat suunnittelijalle hyvin haastavia rakenteita. (Jukka Ukon henkilökohtainen haastattelu 29.08.2020)

Matalapalkkien hyvä ominaisuus on pitkä jänneväli, mutta vastaavasti huono on kuormankantokyky. Matalapalkit sopivat hyvin noin muutaman kerroksen kuormansiirtoon, mutta hyvin nopeasti taipuman määrä alkaa olla rajoittava tekijä. Selkein keino parantaa taipumaa on kasvattaa palkin korkeutta, joka ajaa siihen, että nopeasti ollaankin seinämäisen palkin dimensioissa. Jännittämättömät matalapalkit sopivat lähinnä ei-kantavien seinien kantamiseen tai esimerkiksi ulkoseinärakenteiden kantamiseen. Jännitetyillä palkeilla päästään hyvin esimerkiksi autohallien suuriin holvien jänneväleihin tai pihankansirakenteiden kannatteluun. Kantavien seinälinjojen kannattelussa yksi jännitettyjen palkkien haaste on kuorman ajallisesti epätasainen muodostuminen, eli jännitettyjä palkeja ei voida jännittää heti alkuun lopulliseen jännitykseen, koska kuorma rakenteen päällä on ajan hetkellä niin pieni. Jos palkki jännitettäisiin välittömästi lopulliseen voimaan ilman että jännevoimaa tasapainottavaa kuormaa on riittävästi palkin päällä, palkkiin muodostuu ei toivottuja muodonmuutoksia. Tästä syystä jännevoimaa on lisättävä sitä mukaa kuin rakennus etenee, eli tasapainottavaa kuormaa saadaan palkeille.

Ulokkeellisilla ratkaisulla saadaan rakennusrunkoon kohtalaisen helposti parempi kuormalinjojen sijoittelu ja rakennuksen ulkonäköön vaikuttavia sijoitteluratkaisuja. Ulokkeellisella ratkaisulla saadaan esimerkiksi ulkoseinälinjaa sisäänvedettyä maantasokerroksissa tai autopaikoituskerroksessa autopaikoille paikoitusjärjestely.

Huonona puolena on huono kuomankantokyky. Suuremmilla kuormilla ulokemitta lyhenee hyvin merkittävästi. Jos pohjaratkaisu antaa myöden lippupalkeille, niillä saadaan suhteellisen suuri kuomakantokyky muutamien metrien ulokkeille. Jos pohjaan eivät sovi lippupalkit, vaan rakenne on tehtävä matalampana, niin vaihtoehdoiksi jäävät erilaiset ulokepalkkiratkaisut. Nämä eivät tosin pysty merkittäviä kuormia siirtämään pidemmillä ulokkeilla. Näissäkin tapauksissa taipuman vaikutus on hyvin ratkaiseva tekijä rakenteen toiminnalle.

#### 4.2.1 Kuormansiirtorakenteen vaikutus jäykistykseen

Minkä tahansa siirtorakenteen suuri haitta on rakennekerroksen äkillinen muutos rakennuksen sivuttaisjäykkyyteen. Sivuttaisjäykkyyden muutos on suora seuraus siitä, että rakenneosat eivät jatku yhtenäisinä perustuksille asti. Tämä asia on erityisesti huomioitava

korkeiden rakennusten osalta ja se on syytä ottaa suunnittelunprosessin varhaisessa vaiheessa tutkinnan alle.

Koska kuormansiirtorakenteen vaikutus rakennuksen kokonaisstabiileuteen on niin laaja kokonaisuus, tästä opinnäytetyöstä nämä asiat on haluttu ulkopuolelle.

#### 4.3 Onnettomuustilanteen aikainen vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti

Hybridirakennukset ovat käytännössä poikkeuksetta seuraamusluokassa CC3b. Harvoin kerrosmäärä tai koko olisi näissä rakennuksissa niin pieni, että seuraamusluokka olisi jotain muuta kuin CC3b.

CC3b-luokan rakenteissa on vaurionsieto varmistettava vaihtoehtoisin kuormansiirtoreitein ja mikäli vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti ei ole mahdollinen, kriittisimpiä osia voidaan käsitellä avainasemassa olevaksi rakenneosaksi. Tähän luokkaan rakennusosia voi sijoittaa, jos muut menetelmät olisivat liian monimutkaisia, liian kalliita tai liian työläitä toteuttaa. Lähes poikkeuksetta kriittisimmät rakenneosat ovat kuormansiirtorakenteet.

Hyvin usein kuormansiirtorakenteet luokitellaan avainasemassa olevaksi rakenneosaksi, koska vaihtoehtoinen kuormansiirtoreitti olisi liian monimutkainen tai kallis toteuttaa. Avainasemassa olevan rakenneosan periaatteena on kestää normaalien kuormitusten lisäksi onnettomuuskuorma. Onnettomuuskuorma voi olla määräämättömässä suunnassa vaikuttava pistemäinen kuormitus tai tasaisesti vaikuttava kuormitus. Onnettomuuskuorman suositusarvo on  $34 \text{ kN/m}^2$ , joka on lähes poikkeuksetta muihin kuormansiirtorakenteissa vaikuttaviin kuormiin nähden hyvin mitätön.

Koska vaihtoehtoisen kuormansiirtoreitin ja muiden jatkuvan sortuman estämiseen liittyviin asioihin perehtyminen on monisyistä ja yksityiskohtaista, on näiden tarkempi käsittely rajattu tämän työn ulkopuolelle. Näistä asioista löytyy lähdekirjallisuutta paljon esimerkiksi Suomen rakennusinsinöörien liiton julkaisusta *RIL 201-4-2017 Jatkuvan sortuman estäminen*. (Suomen rakennusinsinöörien liitto, 2011)

#### 4.4 Työtekniset ominaisuudet

Työteknisessä mielessä kuormansiirtorakenteet ovat yleisesti ottaen hyvinkin haastavia, mutta tilanne helpottuu huomattavasti, jos rakenne on mahdollista tehdä elementtirakenteena. Kuitenkin hyvin usein rakenteet ovat joko koon tai painon puolesta niin suuria, että tämä ei ole mahdollista.

Paksulaatta on työteknisesti haastava rakenne. Raudoittaminen on hankalampaa verrattuna ns. normaaliin holvin raudoittamiseen mm. laatan suuren paksuuden takia. Raudotus on usein hyvin järeätä esim. T32 k150. Leikkaushakoina käytetään usein tehdasvalmisteisia raudoitushäkkejä ja raudoituksien esivalmistamien helpottaa ja nopeuttaa huomattavasti, jos se vain on muiden reunaehtojen myötä mahdollista. Lävistysraudoitukseen on hyvä käyttää tyssätappeja, esimerkiksi Peikko PSB. Nykyään niillä on jo riittävät tuotehyväksynät olemassa. (Jukka Ukon henkilökohtainen haastattelu 29.08.2020)

Paksulaattojen haasteena ovat myös erittäin suuret työnaikaiset valupaineet. Esimerkiksi 2 metrin paksuisen laatan valupaine on jo  $50 \text{ kN/m}^2$ , ja tämän suuruiseen kuorman tukeminen perustustasolta asti voi olla hyvin haastavaa. Toinen huomioitava asia on tuentojen painumattomuus perustustasolla. Yksi keino varmistua tuentojen painumattomuudesta, on valaa työnaikaisille tuennoille perustustasolle kantava laatta, esim. kuitubetonilaatta. Jos valumuotinpohja pääsee siirtymää tai taipumaan esim. jännevälien keskeltä, seuraa siitä helposti raudoitusten nousu pintaan tukien kohdalla.

Yksi vaihtoehto suurien valupaineiden hallintaan on jakaa paksulaatan valu kahteen osaan. Ensimmäisenä valetaan esimerkiksi noin 30 cm:ä paksu pohjavalu, joka kantaa lopun paksulaatan valupaineet. Näin tehden perustustasolle vietävä valupaine on huomattavasti pienempi.

Muita työtekniisiä asioita paksulaatassa on suuren betonivalun lämpötilanhallinta. Lämpötilat nousevat helposti liian korkealle. Lujuuden kehitykseen on olemassa apukeinoja mm. tuuletusputket laatan sisällä, johon kytketty puhallin puhalttaa kuivaa ilmaa laattaan. Tällaisiin yksityiskohtiin kannattaa keskittyä riittävän ajoissa suunnittelussa, koska järjestelmällä voi olla vaikutuksia m. raudoituksiin. (Jukka Ukon henkilökohtainen haastattelu 29.08.2020)

Seinämäisten palkkien työtekniikassa yksi haastavampia tekijöitä on korkealle rakennettaessa valupaineiden hallinta. Varsinkin jos alla on pilaripalkkirunko, tukien sijoittaminen

on haastavaa, kun alapuoliset tuet ovat aika harvakseltaan ja maanpinta saattaa olla hyvinkin matalalla. Sama pätee usein ulokkeellisten rakenteiden kanssa. Hyvin usein ulokkeellisten rakenteiden alla ei ole lähistöllä rakenteita, joihin valupaineita saisi tuettua, vaan valumuottien takia on rakennettava suuria rakenteita hankaliin paikkoihin. Työnaikaisissa tuennoissa on myös yleinen ongelma, että jos niitä joudutaan tekemään maanpinnasta asti eli useamman alemman kerroksen läpi, niin se tahdistaa ja hidastuttaa työmaan rakentamista alempien kerrosten osalta. Nämä ovat asioita, joihin kannattaa keskittyä aikaisessa suunnitteluvaiheessa.

Esimerkkinä valutuntoihin voi mainita Lauttasaaren liikekeskuksen lippupalkkien ja alapuolisen holvin tuennan. Lippupalkit ja holvi ovat kokonaan lasirakenteisen metron pääsisäänkäynnin kohdalla. Pääsisäänkäyntiä ei voinut katkaista työmaa-aikana, jonka takia päädyttiin tekemään työnaikaiset valumuotit liittolaatasta, joka tuettiin ulokkeellisilla teräspalkeilla, jotka jäivät rakennusrungon sisään myös lopullisesti.

#### 4.5 Kustannustekijät

Eri kuormansiirtorakenteilla on erilainen vaikutus rakentamisen kokonaiskustannuksiin mm. seuraavasti:

- suunnittelukustannukset
- materiaalikustannukset
- työvoimakustannukset
- työaikataulun aiheuttamat rakentamiskustannukset

Rakentamiskustannuksien merkittävin tekijä on kuormansiirtorakenteiden elementointi, eli mahdollisuus valmistaa tehtaalla ja sen jälkeen kuljettaa työmaalle. Jos kuormansiirtorakenne on mahdollista tehdä betonielementteinä ja kuljettaa työmaalle, rakentamisen kustannukset pysyvät kohtuullisina. Hyvin usein kuormansiirtorakenteet ovat joko niin leveitä, korkeita, painavia tai kaikkien näiden yhdistelmä, että rakennetta ei voida valmistaa muualla kuin työmaalla. Suurien paikallavalurakenteiden tekeminen työmaalla on hidasta ja vaatii paljon työvoimaa. Hyvin usein suurien tuntojen rakentaminen myös tahdistaa ja hidastaa alempien kerrosten rakentamista. Tämä on suurin työmaa-aikatauluun vaikuttava tekijä.

Materiaalikustannuksista merkittävin tekijä on teräs. Teräs voidaan jakaa kahteen ryhmään: normaali harjateräs sekä kalliimpi korkealujuusteräs. Korkealujuusterästä käytetään jännitettyihin rakenteisiin.

Suunnittelukustannuksien merkittävin tekijä on siinä, käytetäänkö jännitettyjä rakenteita vai ns. normaaleja harjateräsbetonirakenteita. Jännitettyjen rakenteiden suunnittelu on kalliimpaa muun muassa, siksi että se on vaativampaa, niiden suunnitteluun vaaditaan suunnittelijalta pätevyyksiä enemmän ja niihin pätevöityneitä suunnittelijoita on vähän. Suomessa on reilu kolmisenkymmentä jännitettyjen rakenteiden suunnittelijaa, joista iso osa on elementtitehtaiden palveluksessa.

Jännittämättömien kuormansiirtorakenteiden suunnittelun vaativuudessa ei ole merkittäviä eroja, vaikkakin lähtökohtaisesti kaikki kuormansiirtorakenteet ovat vaativia suunnittelutehtäviä. Merkittävämpi suunnittelukustannuksin vaikuttava tekijä on valitun rakenteen monimuotoisuus. Mitä enemmän rakenteessa on yksityiskohtia kuten kavennuksia, syvennyksiä, korkovaihteluja, koloja ja vaihtuvia raudoituksia, yms, sitä työläämpi ja vaikeampi rakenne kokonaisuudessaan on. Toki mitä suurempia ja korkeammin kuormitettuja rakenteet ovat, sitä vaikeampia ne ovat suunnitella, mutta eri kuormansiirtorakenne vaihtoehtojen suhteen ei ole niin merkitystä.

Kuormansiirtorakenteen vaikutuksen hyötypinta-aloihin (eli ns. myytäviin neliöihin) voi karkeasti jakaa kahteen ryhmään. Toiseen kuuluu käytännössä pelkästään seinämäiset palkit ja toiseen muut matalammat rakenteet. Seinämäiset palkit ovat usein vähintään kerroksen korkuisia rakenteita rakennuksen rungossa, joiden sijoittelu rungon sisään vaikuttaa merkittävästi arkkitehtisuunnitteluun. Seinämäisten palkkien sijoittelu on tehtävä tarkasti kantavien linjojen alle ja niihin ei voi tehdä juurikaan suurempia aukkoja, esimerkiksi oviaukot ovat käytännössä pois suljettuja. Matalammat kuormansiirtorakenteet puolestaan ovat alle kerroksen korkuisia, ja ne sijoitetaan yleensä kerrosten väliin.

#### 4.6 Työturvallisuudelliset ominaisuudet

Työturvallisuuteen on kaikkien kuormansiirtorakenteiden kanssa kiinnitettävä suurta huomiota, joten se on asia, johon kannattaa paneutua hyvissä ajoin. On yleistä, että hybridirakennuksessa alemmat kerrokset ovat pilaripalkkirunkoisia ja niiden päälle rakennetaan paljon työvoimaa ja aikaa vaativia haastavia rakenteita. Pilari-palkkirungossa työtasoja tukevat rakenteet saattavat olla hyvinkin kaukana toisistaan, ja tästä syystä

rakenteista tulee haastavia, ellei niitä ole huomioitu riittävän ajoissa suunnittelun yhteydessä.

## 5 Hybridirakennukset ja niiden kuormansiirtorakenteet

Seuraavaan kappaleeseen on poimittu hybridirakennusten esimerkkikohteita niin, että mahdollisimman monia erilaisia kuormansiirtorakenteita tulisi käsiteltyä. Kaikki kohteet pois lukien Kalasataman Torni ovat Sitowise Oy:n suunnittelemaa rakennesuunnitelmien osalta. Kalasataman Torni on Swecon suunnittelema. Kohteet sijaitsevat pääkaupunkiseudulla ja kaikki on rakennettu vuosien 2010-2020 välisinä aikoina. Niittykummun torni ei varsinaisesti ole hybridirakennus. Kohde on valittu esimerkkikohteeksi sen takia kun se on niin hybridirakennuksen kaltainen ja tätä eroa varsinaiseen hybridirakennukseen on kappaleessa käsitelty.

Kohteet ja niissä käytetyt kuormansiirtorakenteet on tiivistetty listaksi:

Kohde	Kuormansiirtorakenne
Lauttasaaren liikekeskus	Matalapalkit ja lippupalkit
Tripla	Seinämäiset palkit
Niittykummun torni	Matalapalkit, mutta valittu myös sen takia, kun ks. hybridirakennuksessa ei ole suurimmilta osin kuormansiirtorakenteita
Lapinlahden Ilveshovi	Siirtolaatta
Kalasataman Redi	Seinämäiset palkit ja jännitetyt ulokkeelliset kuormansiirtorakenteet



## 5.1 Lauttasaaren liikekeskus

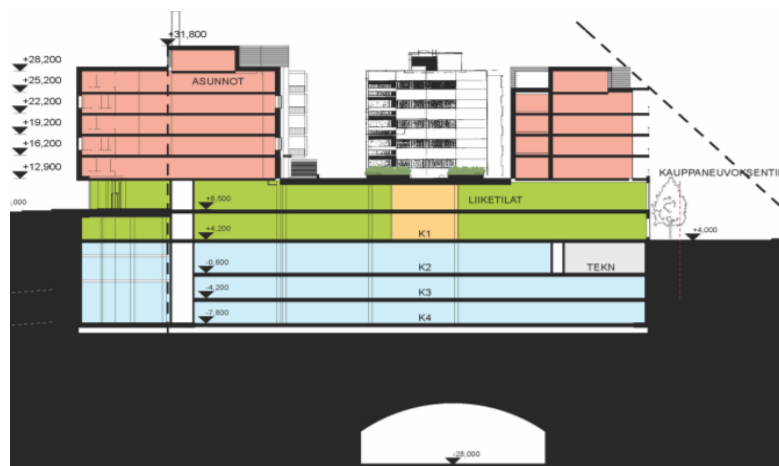
Lauttasaaren liikekeskus on 11-kerroksinen hybridirunkoinen rakennus, jonka ylimmät kuusi kerrosta ovat asuinkerroksia. Maantasokerros ja ylin kellarikerros ovat liiketiloja ja kolme alinta kellarikerrosta on autopaikoitusta. Rakennuksessa yhdistyy siis kolme erilaista käyttötarkoitusta. Kuvassa 12 näkee Lauttasaaren asuntojen massoittelua ympäröivään kaupunginosaan.



Kuva 12 Havainnekuva Lauttasaaren Liikekeskuksesta, (Lähde 10, Sitowisen rakennelaskelma dokumentit kohteesta Lauttasaaren liikekeskus)

Asuinkerrostalojen runko on hyvin tyypillinen, pistemäinen porrashuone sijaitsee rakennuksen keskellä ja huoneistot porrashuoneen ympärillä. Ulkoseinälinjat ovat kantavia. Rungon mitat ovat 30 m x 17 m. Kuvassa 13 on esitetty läpileikkaus kohteesta. Kuvasta näkee myös metron sijainnin suhteessa kohteeseen.





Kuva 13 Lämpöleikkauskuva Lauttasaaren Liikekeskuksesta, (Lähde 10, Sitowisen rakennelaskelma dokumentit kohteesta Lauttasaaren liikekeskus)

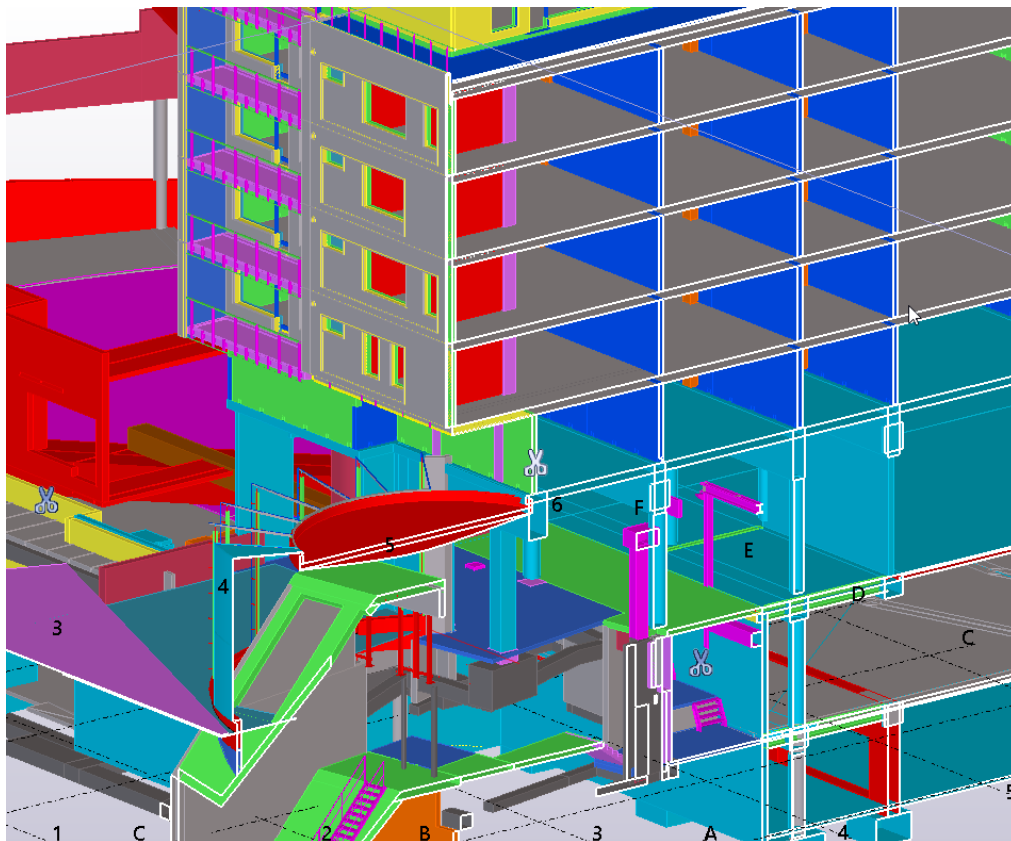
Väliseinien kuormat kuormansiirtorakenteiden tasossa on keskimäärin 700...1350 kN/m välissä ja palkkien momentit 5,5 MNm...9,55 MNm välissä. Kantavat väliseinät ja ulkoseinät ovat jännittämättömien teräsbetonisten matalapalkkien päällä. Palkkien dimensiot ovat keskimäärin 1350 mm x 500 mm, ja palkistot on mitoitettu T-poikkileikkauksena ja jatkuvina. Harjateräsmäärä on tämänkokoisiin palkkeihin kohtalaisen suuri, mikä tekee raudoittamisen yksityiskohdista hyvin hankalia, esimerkiksi risteävät palkkinurkat ovat hyvin ahtaita.

Rakennus on osittain metron lasirakenteisen sisäänkäynnin yläpuolella, jonka takia yli puolet rakennuksen päädyistä on kannateltu kerroksittain kahdella lippupalkkilinjalla. Lippupalkkien leveys on 4 metriä ja korkeus 3 metriä per kerros. Lippupalkkien päissä on 480x480mm pilarit, ja koko lippupalkkirakenne on tehty paikallavaluna. Lippupalkkimaisissa rakenteissa on tärkeä huomioida rakenteen ulokkeellisuudesta johtuvan kohtalaisen suuren taipuman vaikutus viereisiin rakenneosiin. Tässä kohteessa ei ollut ns. liittyvissä rakenneosissa lasirakenteita tai vastaavia, joille taipuma olisi ollut ongelma.

Rakennuksen rungon jäykistys on levyjäykisteisenä, jossa vaakakuormat (tuuli ja epäkeskisyydet) siirtyvät levyrakenteisena toimivan teräsbetonilaatan välityksellä seinärakenteille. Seinärakenteet siirtävät kuormat alaspäin kellarikerrokseen, jossa on teräsbetoniseiniä ja vinosauvoja, jotka siirtävät kuormat kallionvaraisille teräsbetonianturoille.



Kuva 14 Raudoituskuva Lauttasaaren Liikekeskuksesta. Katkoviivoitetulla alueella matalapalkit. (Kuva: Joonas Nieminen)



Kuva 15 Havainnekuva Lauttasaaren Liikekeskuksen kuormansiirtorakenteista, (Lähde 10, Sito-  
wisen rakennelaskelma dokumentit kohteesta Lauttasaaren liikekeskus)

## 5.2 Pasilan Tripla

Pasilan Triplan asunto-osa on 21-kerroksinen hybridirakennus. Rakennuksen 12 (+1) ylintä kerrosta ovat asuinkerroksia (+IV-konehuone), kerrokset K1 – K3 ovat kauppakeskusta ja alimmat 4 kerrosta ovat pysäköintiä. Kerrosten K8 – K1 on liike- ja paikoitustiloille tyypillinen paikallavalettu pilari-palkki -runko, jossa jänneväliä on maksimoitu jälkijännitetyillä palkeilla ja laatastoilla. Kuvassa 16 on arkkitehdin luoma havainnekuva Pasilan Triplasta.

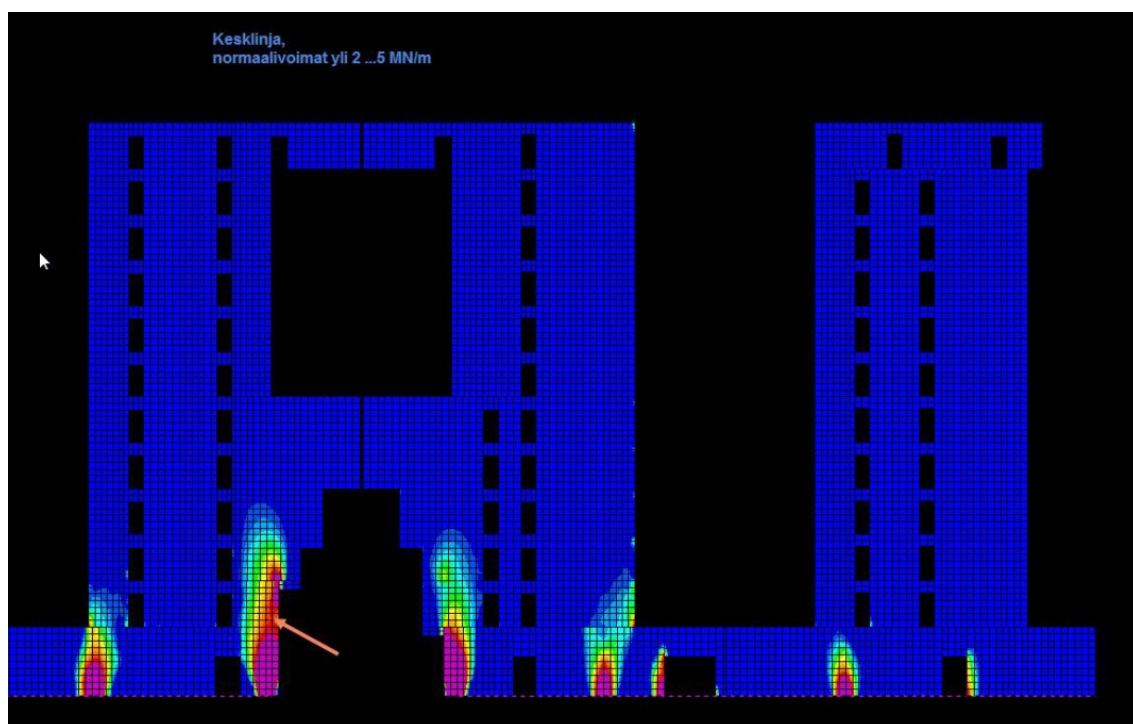


Kuva 16 Havainnekuva Pasilan Triplasta, (Sitowisen rakennelaskelmadokumentit kohteesta As Oy Pasilan Tripla)

Asuinkerrostalojen runko on suorakaiteen muotoinen 17,5 m x 47 m. Rungossa on pyritty minimoimaan kantavien seinien määrä vaihtamalla osa huoneistojen välisistä seinistä ei-kantaviksi harkkomuurausseiniksi. Näin ollen kantaviksi seiniksi ovat jäänyt ulkoseinät, pistemäisen porrashuoneen seinät sekä holvintuennan kannalta välttämättömät seinät, noin 8 metrin välein.

Rakennuksen kuormat keskittyvät 1. kerroksen pitkittäisille ulkoseinille ja keskilinjan väliseinälle. Runkoa myös monimutkaistaa huomattavasti rakennuksen päädyssä oleva kerroksittain kasvava ja suurimmillaan 8 metrin uloke. Rungon alin kerros on koko-

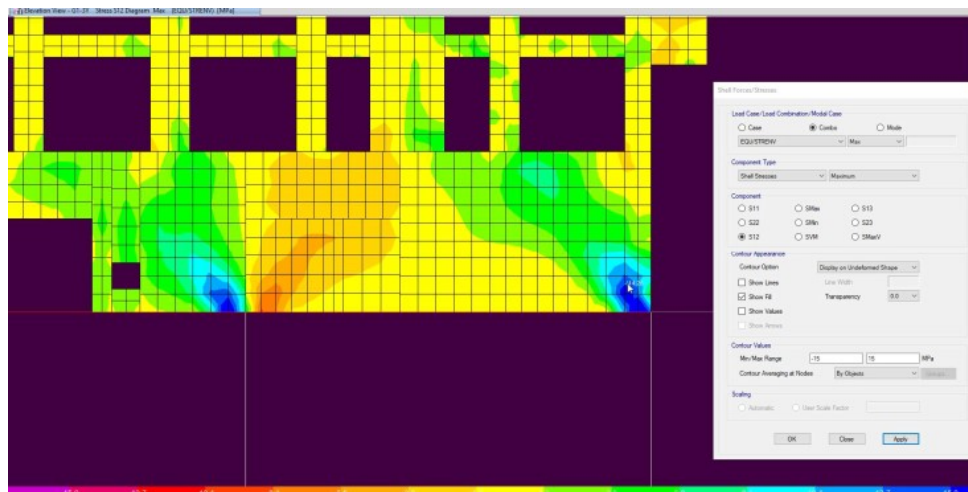
naan paikallavalettu (seinät ja holvit) sekä ulokkeen ympärillä olevat seinät ovat paikallavalettu kuudenteen kerrokseen asti. Kuormansiirtorakenteena on seinämäiset palkit. Normaalivoimat 1.kerroksen kohdalla ovat suurilta osin luokkaa 2...5 MN/m ja suurimmillaan kuormat ovat 8 MN/m. Kuormansiirtorakenteiden seinät ovat paksuudeltaan 300...400mm:ä paksuja. Kuvassa 17 on esitetty Triplan keskilinjan normaalivoimajakaumaa.



Kuva 17 FEM-mallista ruutukaappaus, Kuvassa esitetty keskilinjan normaalivoimat yli 2...5MN/m, (Sitowisen rakennelaskelma dokumentit kohteesta As Oy Pasilan Tripla)

Pilariväli kauppakeskuksessa on keskimäärin 12 metrin luokkaa ja suurimmillaan jopa 16,5 metriä. Suurten kuormien ja harvan pilarivälin takia suunnittelun kannalta haastavimpana asiana kuormansiirtorakenteessa on leikkausvoimien hallitseminen. Tukialueilla leikkausjännitys kasvaa jopa arvoon  $\sim 15 \text{ N/mm}^2$ . Tämän takia seiniin tuli raudoitusta kolmeen tasoon molempiin pintoihin. Maksimileikkausraudoitus on vinorausoitusta T20K75. Kuvassa 16 havainnollistetaan leikkausvoimajakaumaa.





Kuva 18 FEM-mallista ruutukaappaus, Kuvassa esitetty reunalinjan leikkausjännitykset yli  $15\text{N/mm}^2$ , (Sitowisen rakennelaskelma dokumentit kohteesta As Oy Pasilan Tripla)

Asuinrakennuksen rungon jäykistys on tehty levyjäykisteisenä, jossa vaakakuormat (tuuli ja epäkeskisyydet) siirtyvät levyrakenteisena toimivan teräsbetonilaatan välityksellä seinärakenteille. Seinärakenteet siirtävät kuormat alaspäin kellarikerrokseen, jossa jäykistys hoidetaan seinillä ja jäykillä betonikehillä. Välipohjat raudoitetaan toimimaan yhtenäisinä levyinä, jotka siirtävät kuormat kallionvaraisille teräsbetonianturoille.

### 5.3 Niittykummun torni

Niittykummun Torni on 26-kerroksinen uudisrakennus, jossa asuinhuoneistoja on kerroksissa 3 - 24, 1. ja 2. kerroksessa on liikekeskuksen liiketiloja ja tekniset tilat sijaitsevat kahdessa alimmassa kellaritilassa. Niittykummun tornin runko on muodoltaan asuinkerrostaloille perinteinen ns. kirjahyllyrunko. Suorakaiteen muotoinen runko jonka leveys on 38 metriä ja pituus 23 metriä, jossa on koko rakennuksen pituinen porraskäytävä keskellä ja asunnot sivuilla. Kuvassa 19 Niittykummun torni ja sen ympäristöä.



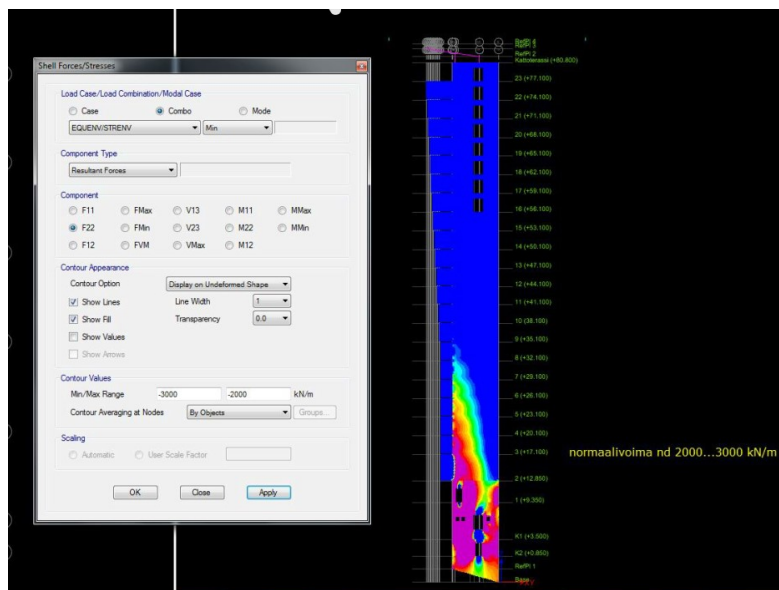
Kuva 19 Havainnekuva Niittykummun Tornista, (Lähde Sitowisen rakennelaskelmadokumentit kohteesta As Niittykummun Torni)

Pitkien sivujen ulkoseinälinjat ovat ei-kantavia, jolloin suurimmat kuormitukset muodostuvat väliseinälinjoille. Väliseinien jännevälit noin 7 metriä. Normaalivoimat perustusten tasolla kantavilla väliseinälinjoilla on keskimäärin 2...3 MN/m.

Niittykummun Torni ei ole hybridirunkoinen, mutta se on hyvin hybridirungon -kaltainen, eli useampi käyttötarkoituksellinen. Rungon kantavat seinälinjat jatkuvat ns. ehjinä myös liiketilakerroksissa. Ulkoseinälinjojen muuttaminen ei-kantaviksi sallii seinien kokonaan pois jättämisen liiketilakerroksissa ulkoseinälinjojen alla. Tämän tyyppinen rakenneratkaisu rajoittaa rakennuksen käyttötarkoitusta huomattavasti, ja tämä soveltuu pienemmille liikehuoneistoille, mutta ei suuremmille. Esimerkiksi päivittäistavarakauppa ei sovellu rakennuksen runkoon juuri lainkaan, tässä kohteessa päivittäistavarakauppa sijoitettiin asuntotornin viereen ja asuntotornin alle on sijoitettu ns. toissijaisia toimintoja kuten pullonpalautuspiste.

Ei-kantavien seinien alapuolella on kuormansiirtorakenteena jännittämättömät matalapalkit 1265mm x 600mm. Kerroksen normaalia korkeampi kerroskorkeus mahdollisti ks. palkkikorkeuden. Rakennuksen rungon jäykistys on levyjäykisteisenä, jossa kantavat sisä- ja osin ulkoseinät toimivat jäykistävinä rakenteina. Välipohjatasot (paikallavalettuja)

toimivat kuormaa jakavina vaakarakenteina, ja koska suurin osa kantavista seinälinjoista jatkuu yhtenäisenä perustuksille asti, ei jäykistykseen kannalta ollut suurempaa haastetta. Kuvassa 20 on esitetty Niittykummun tornin normaalivoimajakaumaa.



Kuva 20 FEM-mallista ruutukaappaus, Kuvassa esitetty väliseinän normaalivoimat yli 2...3MN/m, (Lähde Sitowisen rakennelaskelma dokumentit kohteesta As Niittykummun Torni)

#### 5.4 Lapinmäentien Louhenlinna

Lapinmäentien Louhenlinna on 17-kerroksinen hybridirakennus. Ylimmät 15 kerrosta ovat asuntoja ja niiden alla parkkihalli ja mm. parkkihallin ajoväylä. Asuinkerrostalon runko on pistemäinen, jossa porrashuone sijaitsee rakennuksen keskellä ja huoneistot porrashuoneen ympärillä. Ulkoseinälinjat ovat kantavia. Rungon mitat ovat leveys 26m ja pituus 26m. Kuvassa 21 on esitetty koko Lapinmäentien korttelin asuntojen massoit-  
telua

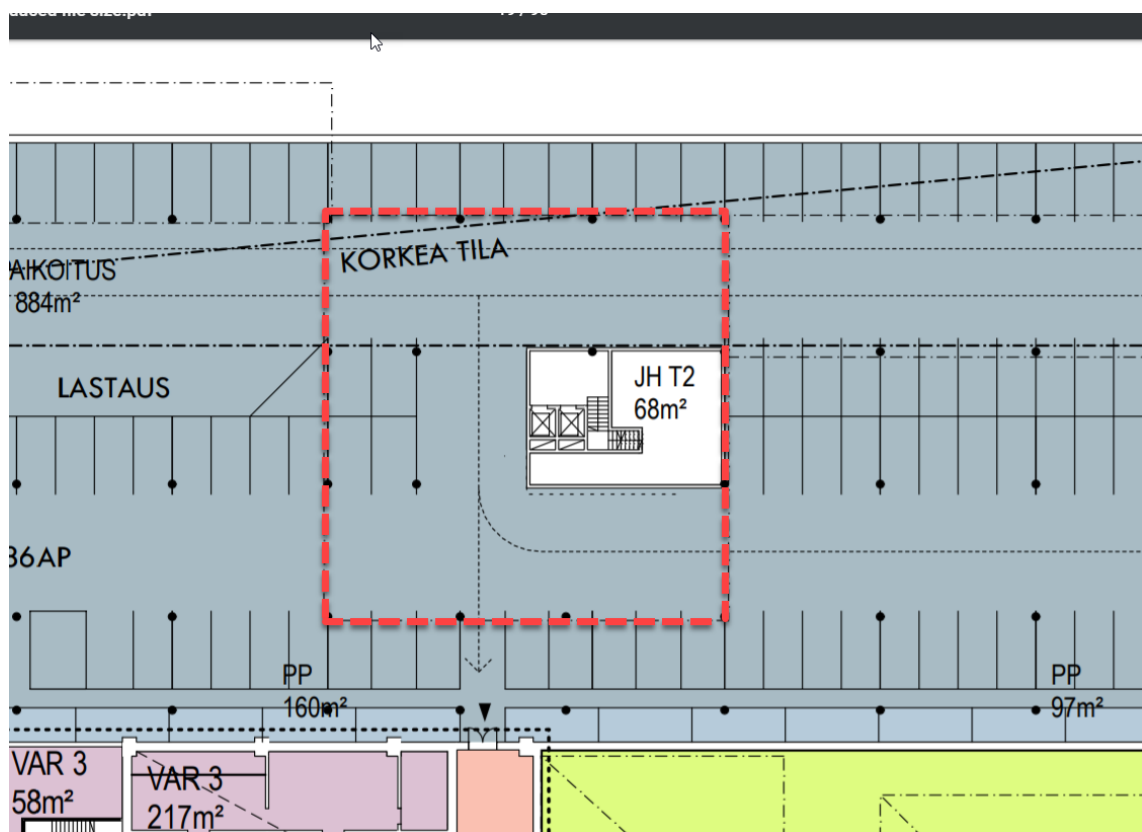


Kuva 21 Havainnekuva Lapinmäentien Louhenlinnasta, (Lähde Sitowisen rakennelaskelma dokumentit kohteesta As Louhenlinna)

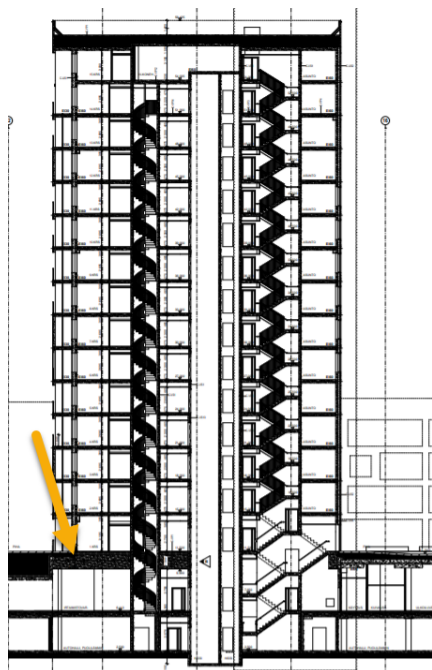
Kuormansiirtorakenteena on 1,3 metriä paksu harjateräksinen siirtolaatta. Pilareiden kohdalla laatussa on paikalliset paksunnokset 400mm(1,7m). Pilariväli siirtolaatan alla on 8,5m, ja porrashuoneen seinät menevät alas asti. Väliseinien kuormat kuormansiirtorakenteiden tasossa ovat 3...3,5 MN/m välissä ja kellarikerroksissa olevien pilareiden kuormat ovat noin 10 MN. Suurin pilarikuorma kohteessa on 16,5MN. Siirtolaatan käyttörajan pystysiirtymät kentissä 8,5 mm – 4,6 mm. Laatan momentit alapinnassa on suurimmillaan 3.7MNm ja yläpinnassa 5.0MN/m. Rauditus on keskimäärin T32 k150 ja rasiuimissa paikoissa T32 k75. Leikkausraudoituksena on käytetty valmiita raudotushäkkejä, joissa 16 mm:set leikkausraudat on hitsattu 20 mm:iin pituussuuntaiseen raudoitukseen. Paksulaatta on valettu kerralla ja sen työnaikaisia tukitorneja varten on perustustasolle valettu 150 mm:ä paksu kuitubetonilaatta, jolla varmistettiin tukien painumattomuus.

Rakennuksen rungon jäykistys on tehty levyjäykisteisenä, jossa kantavat väliseinät toimivat jäykistävinä rakenteina. Välipohjatasot (paikallavalettuja) toimivat kuormaa jakavina vaakarakenteina. Väliseinät siirtävät kuormat alaspäin kellarikerrokseen, jossa paikallavaletut väliseinät ja pilarit siirtävät kuormat källionvaraisille teräsbetonianturoille. Kuvasessa 22 esitetty kellarikerroksen autohallia ja rakennuksen sijoittumista autohalliin.





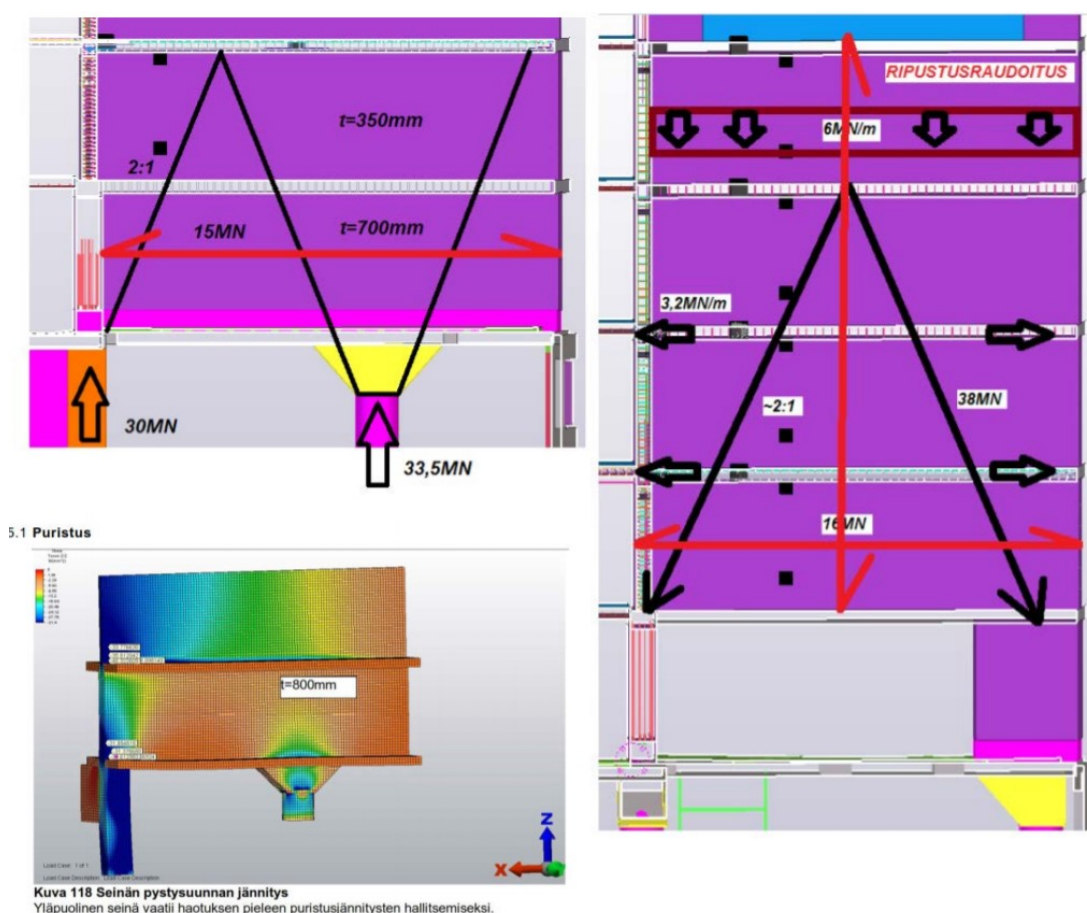
Kuva 22 Havainnekuva Louhenlinnasta, katkoviivalla esitetty asuinrungon sijainti parkkihalliin, (Lähde Sitowisen rakennelaskelma dokumentit kohteesta As Louhenlinna)



Kuva 23 Havainnekuva Louhenlinnasta, Nuolella esitetty kuormansiirtolaatan sijainti, (Lähde Sitowisen rakennelaskelma dokumentit kohteesta As Louhenlinna)

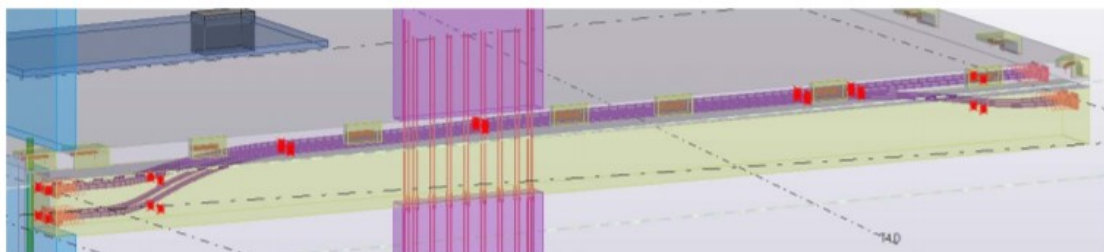
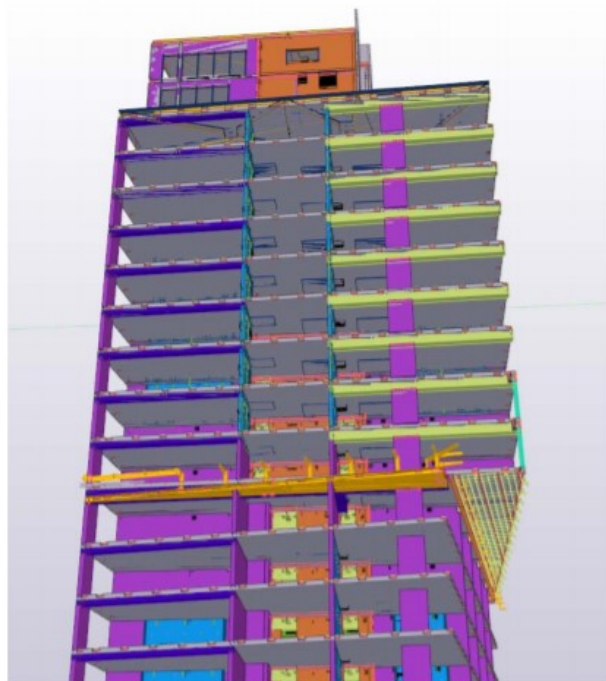
## 5.5 Kalasataman Redi

As Oy Helsingin Redin Kapteeni on Sweco:n rakennesuunnittelema asuinkerrostalokohde kauppakeskus Redin päällä Helsingin Kalasatamassa. Tätä kohdetta käsitellään tässä työssä ainoastaan nähdyn esitelmän pohjalta. Kuvat ovat esitelmästä. Tornin korkeus on 137 metriä merenpinnasta, ja siinä on 37 kerrosta. Jalustassa eli kauppakerroksissa on pilari-palkki -runko ja torniosalla on kantavat seinät ja laatat. Asuinkerrostalon runko on pistemäinen, jossa porrashuone sijaitsee rakennuksen keskellä ja huoneistot porrashuoneen ympärillä. Ulkoseinät ovat ei-kantavia alumiini - lasi elementtejä. Kuormansiirtorakenteina toimii seinämäiset palkit. Pystykuormat kohteessa ovat niin suuria, että seinämäisten palkkien korkeus on kaksi ja jopa kolme kerrosta. Puristuskuorma keksipilareilla 33,5MN. Seinämäisten palkkien paksuus on 700...800 mm:ä. (Toijonen 2019)



Kuva 24 Havainnekuva Kalasataman Redin kuomien jakaantumisperiaatteista, (Lähde 8, Betoni ja korkea rakentaminen, DI Jari Toijonen)

Torni kiertyy korkotasossa +93, mikä on mahdollistettu kerroksittaisella kuormansiirtorakenteella. Rakenne on valittu arkkitehtonisista syistä sekä julkisivun tiukasta taipumara-  
jasta jälkijännitetyin ulokepalkein.



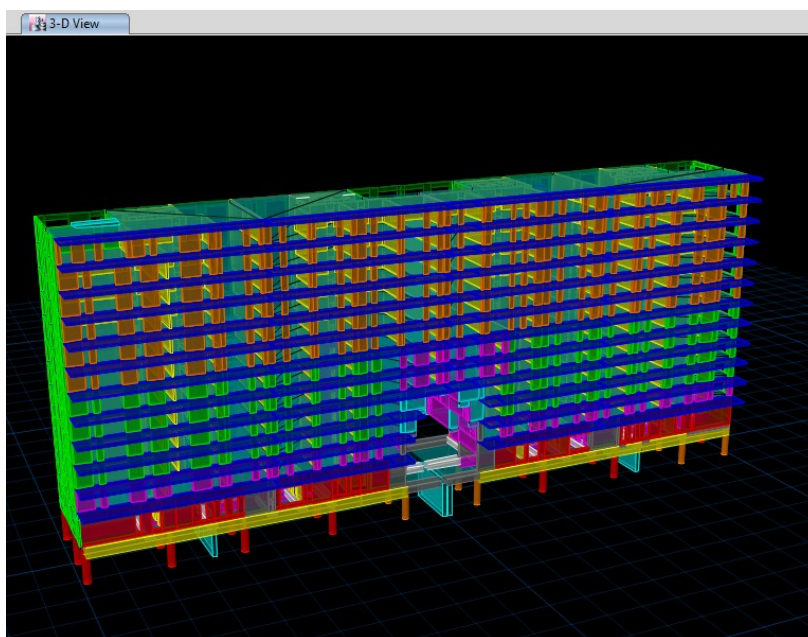
Kuva 25 Havainnekuva Redin jännitetyistä ulokkeellisista kuormansiirtorakenteista, (Lähde 8, Betoni ja korkea rakentaminen, DI Jari Toijonen)

## 6 Esimerkkilaskelmien johdanto ja yhteenveto

### 6.1 Johdanto

Esimerkkilaskelmissa on luvussa 5 esiteltujen hybridirakennusten kuormansiirtorakenteista FEM- laskennan tuloksia. Esimerkkilaskelmissa pyritään tutkimaan kuormien kohdistumista ja rakennekestävyyden raja-arvoja karkealla tasolla, koska kuormansiirtorakenteiden mitoittaminen on niin monisyistä ja yksityiskohtaista, että näiden tarkempi käsittely on rajattu tämän työn ulkopuolelle.

Kantavien ja jäykistävien rakenneosien mitoituksessa on käytetty Eurokoodeja (EN) ja niiden Suomen kansallisia liitteitä (NA). Kuormat kuuluvat luotettavuusluokkaan RC3 ja seuraamusluokkaan CC3. Näin ollen murtorajatilassa otetaan huomioon korotuskerron  $KFI=1.1$ . Laskentamallit on tehty Etabs -mallinnusohjelmistolla. Laskentamallit on mallinnettu ns. monoliittisiksi, eli elementtisaumoja ei ole mallinnettu. FEM -verkko on pääsääntöisesti 0,5 m.



Kuva 26 3D -kuva Etabsilla tehdystä laskentamallista. (Lähde, Sitowisen rakennelaskelmadokumentit kohteesta As Oy Pasilan Tripla)

#### 6.1.1 Seinämäisen palkin laskelmien yhteenveto

Kuormien jakautuminen Triplassa poikkeaa perinteisen asuinkerrostalon rungon kuormien jakautumisesta. Kantavien seinien määrä on tukien vähäisyyden takia haluttu pitää mahdollisimman vähäisenä, jonka takia kuormat kasaantuvat suhteellisen suurelta alueelta tukialueelle. Kuormia siirretään vaakasuunnassa pääsääntöisesti ensimmäisessä kerroksessa. Haasteena olikin saada 1.kerrokseen sopiviin paikkoihin ovi- ja ikkuna-aukkoja. Myös LVI -tekniikan vaatimat varaukset olivat hankala yhteensovittaa. Rakennepaksuudet on tehty pääsääntöisesti seinään kohdistuvan kuormituksen perusteella. Paksummat seinät ovat 600 mm paksuja.

### 6.1.2 Siirtolaattalaskelmien yhteenveto

Kuormituksien jakautuminen Louhenlinnassa on hyvin tyypillinen FEM -laskennalla suoritettu kuormajakauma. Jäykät ja paksut seinät keräävät merkittävästi kuormaa. Pilareiden kokoonpuristuma pienentää jonkin verran pilareille kertyvän kuorman määrää. Siirtolaatan dimensiot on Louhenlinnassa viety aika minimiin, mistä suuri raudoitusmääräkin viestii. Olisi todennäköisesti kustannustehokkaampaa, jos laatan paksuutta olisi hieman kasvatettu.

## 7 Yhteenveto

Hybridirakennukset ovat hyvin vaativia suunnittelukohteita kaikkien suunnittelualojen osalta. Kantavat rakenteet eivät hybridirakennuksissa yksinkertaisesti voi jatkua yhtenäisesti ylhäältä alas ilman, että alempien tilojen käytettävyys heikkenisi merkittävästi.

Kuormasiirtorakenteen valintaan vaikuttaa moni asia ja käytettävän ratkaisun päätökseen on vaikuttamassa useampi osapuoli. Päätöksen teossa ovat ensisijaisesti mukana tilaaja, arkkitehti, rakennesuunnittelija ja työmaan edustaja. Jokaisella osapuolella on omista lähtökohdistaan näkemys parhaimmasta rakenteesta, mutta paras ratkaisu syntyy kaikkien näkökulmat huomioivana kokonaisuutena. Merkittävimmät tekijät ratkaisun valintaan ovat käytettävät pohjaratkaisut ja hinta. Osa kuormansiirtorakenteista mahdollistaa vapaamman mahdollisuuden kantavien rakenteiden sijoitteluun, joka taas mahdollistaa arkkitehdille vapaammat mahdollisuudet pohjaratkaisujen tekemiseen. Näiden ratkaisujen toteuttaminen onkin yleensä ottaen haastavampaa ja näin ollen kalliimpaa. Osa kuormansiirtorakenteista on selkeästi helpompi, halvempi ja nopeampi toteuttaa, mutta näissä ratkaisuissa joudutaan tinkimään rakennuksen käytettävyydestä.

Kuvassa 25 sivulla 41 jokaisen kuormansiirtorakenteen hyviä ja huonoja puolia lyhyesti esitettynä.

<b>Kuormansiirto- rakenne</b>	<b>Hyvät ominaisuudet</b>	<b>Haasteet</b>
<b>Seinämainen palkki</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kustannustehokas</li> <li>- Mahdollisuus tehdä elementteinä</li> <li>- Suuri kuormakantokapasiteetti</li> <li>- Yksikertainen ja nopea rakenne työmaalle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vaikutus arkkitehtisuunnitteluun suuri</li> <li>- Elementtinä haasteellinen liitosten suhteen</li> </ul>
<b>Matalapalkki</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vaikutus arkkitehtisuunnitteluun pieni</li> <li>- Kustannustehokas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pieni kuormankantokapasiteetti</li> <li>- Harvoin mahdollista tehdä elementtinä</li> <li>- Vaikea suunnitella jälkijännitettynä</li> <li>- Hidas toteuttaa</li> <li>- Jälkijännitettynä vaikea rakentaa</li> </ul>
<b>Siirtolaatta</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vaikutus arkkitehtisuunnitteluun todella pieni. Mahdollistaa todella vapaat tilaratkaisut</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kallis rakentaa</li> <li>- Vaikea suunnitella, varsinkin jälkijännitettynä</li> <li>- Hidas toteuttaa ja haastava muottiteknisesti</li> </ul>
<b>Ulokkeelliset rakenteet</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vaikutus arkkitehtisuunnitteluun pieni</li> <li>- Mahdollistaa näyttävämpiä arkkitehtonisia ulkoseinäratkaisuja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Huono kuormankantokapasiteetti</li> <li>- Vaikea suunnitella</li> <li>- Hidas toteuttaa ja haastava muottiteknisesti</li> </ul>

Kuva 26 Kuormansiirtorakenteet listattuna, sekä niiden hyvät ominaisuudet ja haasteet.

Erilaiset matalapalkki ratkaisut (jännitetyt ja jännittämättömät) ovat kustannustehokkaita ratkaisuja ja kerrokorkeuden salliessa mahdollistavat suhteellisen vapaat pohjaratkaisut. Matalapalkin alhainen kuormankantokapasiteetti rajoittaa käytön matalampaan rakentamiseen.

Seinämäinen palkki on erittäin kustannustehokas ratkaisu, etenkin esivalmistettuna teräsbetonelementtinä. Seinämäisen palkin kuormankantokapasiteetti on hyvä ja mahdollistaa oikein suunniteltuna hyvinkin korkean rakentamisen. Seinämäisten palkkien käyttö rajoittaa pohjaratkaisua merkittävästi. Palkit ja palkkien tuomat rajoitteet, kuten oviaukotus ja talotekniikan vaatimat reiät on huomioitava jo luonnosvaiheesta lähtien, jotta valittu ratkaisu saadaan toimivaksi.

Erilaiset siirtolaattaratkaisut mahdollistavat erittäin vapaat rajat pohjaratkaisujen tekemiselle. Siirtolaatan kuormankantokapasiteetti mahdollistaa korkean rakentamisen, tosin laatan paksuus kasvaa nopeasti merkittävästi ja joka on huomioitava arkkitehtonisista näkökulmista. Siirtolaatta on työmaateknisesti haastava ja kallis ratkaisu. Siirtolaatta on myös rakennusteknisesti erittäin haastava ratkaisu, johon ei löydy toistaiseksi kovin hyvin suunnitteluohjeita, etenkin jälkijännitetyille laatoille.

Erilaiset ulokkeelliset kuormasiirtorakenteet ovat suhteellisen vähän käytettyjä, mutta suunniteltuina soveltuvat hyvin lyhyihin kuormansiirtoihin, erityisesti ei-kantavien julkisivujen ja autopaikoituksen takia tarvittavaan kuormansiirtoon. Ulokkeellisten ratkaisujen käytössä on huomioitavaa, että rakenteet ja sen yksityiskohdat on otettava hyvin huomioon ja luonnosvaiheesta lähtien, jotta rakenne saadaan toimivaksi.

Järeitä kuormansiirtorakenteita on Suomessa käytetty toistaiseksi kohtalaisen vähän, mutta viime vuosikymmenellä käyttö on lisääntynyt merkittävästi ja suunta näyttää, että käyttö on lisääntymään päin. Aiemmin käyttö on lähinnä keskittynyt liikenteen solmupisteissä olevaan rakentamiseen, mutta viime vuosina myös muualla tapahtuvaan rakentamiseen. Kuormansiirtorakenne muuttaa äkillisesti rakennuksen sivuttaisjäykkyyttä ja vaikuttaa näin ollen merkittävästi rakennusrungon toimintaan. Kuormansiirtorakenne on merkittävä rakennesuunnittelun solmupiste, joka huonosti esisuunniteltuna voi aiheuttaa merkittäviä vaikutuksia jatkosuunnitteluun ja toteutukseen. Muun muassa näiden syiden takia kuormansiirtorakennetta ei saa aliarvioida tai laiminlyödä esisuunnittelun merkitystä. Oikein suunniteltuna kuormansiirtorakenteet parantavat merkittävästi rakennusten käyttötarkoitusta ja mahdollistavat uusien arkkitehtonisten innovaatioiden toteutumisen.



## Lähteet

Hietikko, E. 2015: Palkki. Lujuuslaskennan perusteet. Books on Demand.,

Koskimies, J. 2016: Ristikkomenetelmä (Strut-and tie modeling). Rakennustekniikan AMK-opinnäytetyö, Metropolia AMK. Helsinki.

Sääski, M. 2017: Seinämäisten teräsbetonipalkkien analysointi. Insinööritieteiden korkeakoulun diplomityö, Aalto-yliopisto.

Kang, T. – Yoon, J.K. 2015: *Post-Tensioned Transfer Slab in Vertically Irregular Building*. A presentation in Post-Tensioning Institute Convention 28.04.2015, Houston, Texas, USA. Post-Tension Institute verkkosivusto. [https://www.post-tensioning.org/Portals/13/Files/PDFs/Events/Conventions/TechnicalSessions/2015/042815Yoon\\_Kang.pdf](https://www.post-tensioning.org/Portals/13/Files/PDFs/Events/Conventions/TechnicalSessions/2015/042815Yoon_Kang.pdf) Haettu/Viitattu 17.11.2020.

Lähteenmäki M. 2014: Elementtimenetelmän perusteet. Suomi. Matti Lähteenmäen verkkosivusto, Haettu/Viitattu 01.05.2020

Betoniyhdistys, Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja By 211, osat 1, 2 ja 3

Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL 202-2011 Betonirakenteiden suunnitteluohje

Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL 201-4-2017 Jatkuvan sortuman estäminen

Schäfer Kurt. 1999: *Textbook on Behaviour, Design and Performance* Fib bulletin: Structural Concrete:, volume 3. Stuttgart. Sprint-Druck, 1999, s. 56

Schäfer, Kurt., Schlaich, J., and Jennewein, M., 1987, *Toward a Consistent Design of Structural Concrete*, Julkaisu the Prestressed Concrete Institute, Vol. 32, No. 3, Toukokuu, s. 74-15

Toijonen J. 2019: Esitelmä *Case – T4 Redin Kapteenin, betonirakenteiden suunnittelu*, Betoni ja korkea rakentaminen -seminaarissa 11.6.2019, Helsinki, betoniyhdistyksen verkkosivusto <http://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/korkearakentaminen/toijonen-by-korkean-rakentamisen-seminaari-t4-betonirakenteet.pdf>, Haettu/Viitattu 01.05.2020

Engström, B, 2011: Design and analysis of deep beams, plates and other discontinuity regions. Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden,

Jukka Ukon haastattelu elokuun 29.päivä. Sitowisen toimisto.

Sitowisen rakennelaskelmat kohteesta Lauttasaaren liikekeskus, 28.08.2015

Sitowisen rakennelaskelma dokumentit kohteesta As Oy Pasilan Tripla, 15.04.2016

Sitowisen rakennelaskelma dokumentit kohteesta As Niittykummun Torni, 15.02.2013

Sitowisen rakennelaskelma dokumentit kohteesta As Louhenlinna, 22.03.2019



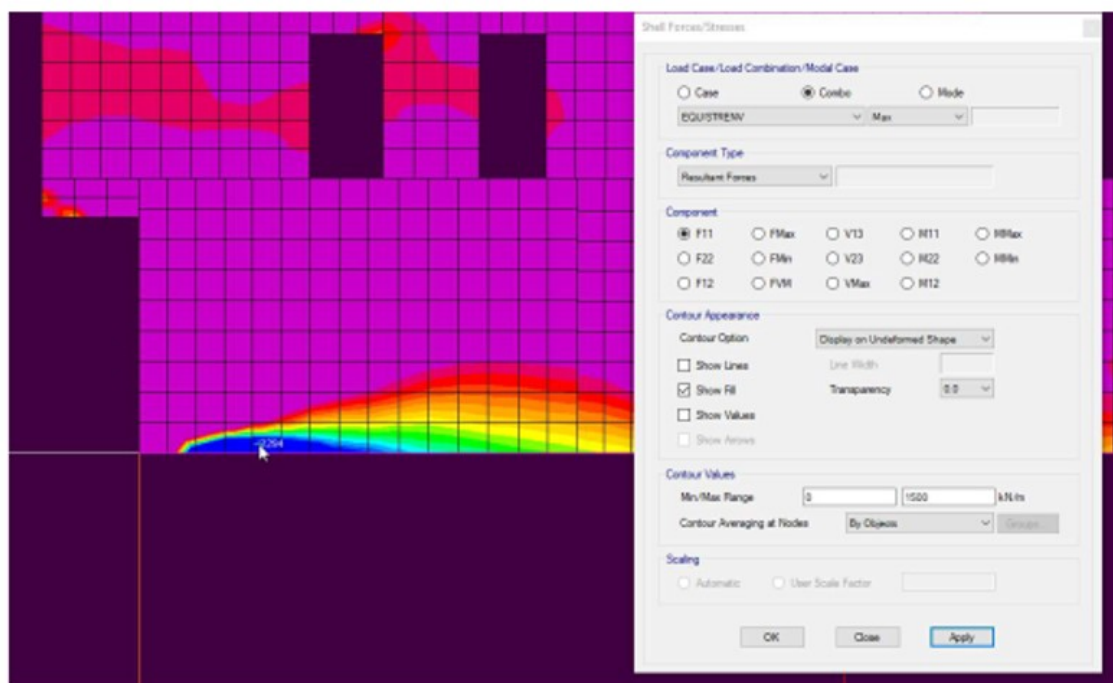
## Liite 1, Esimerkkilaskelmat

### 7.1 Seinämäinen palkki

Esimerkkilaskelmaan on otettu FEM -laskelma Pasilan Triplan seinämäisestä palkista. Seinämäinen palkki sijaitsee ensimmäisessä kerroksessa. Seinä tukeutuu molemmista päistään pilareihin.

#### 7.1.1 Taivutusmitoitus

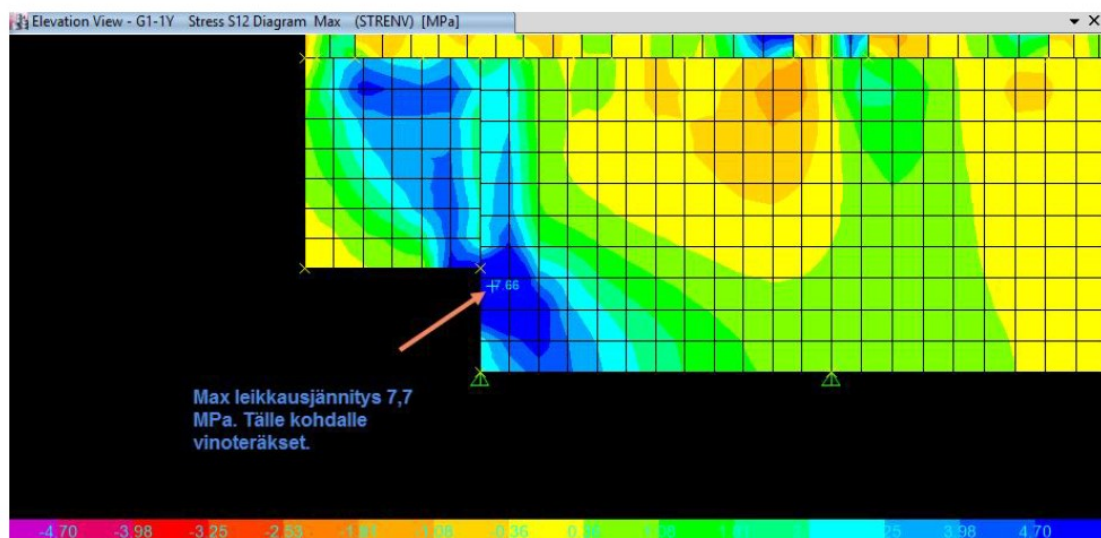
Seinät raudoitetaan maksimivetovoimalle, joka saadaan FEM -mallista.



Kuvio 2. Seinän alapinnan veto kN/m, maksimiarvo  $N_{d,max}=2300\text{kN/m}$

Seinän raudoitetaan kauttaaltaan T16 k150, molempiin pintoihin ja seinäalaoosan lisäraudoitus jaetaan noin 0,4 metrin korkuiselle kaistalle seinän alaosassa  $\sum N_d = 621 \text{ kN}$  ( $A_{s,vaad} = 1367 \text{ mm}^2$ ) → Seinän alaosassa 6T20,  $A_s=1884 \text{ mm}^2$

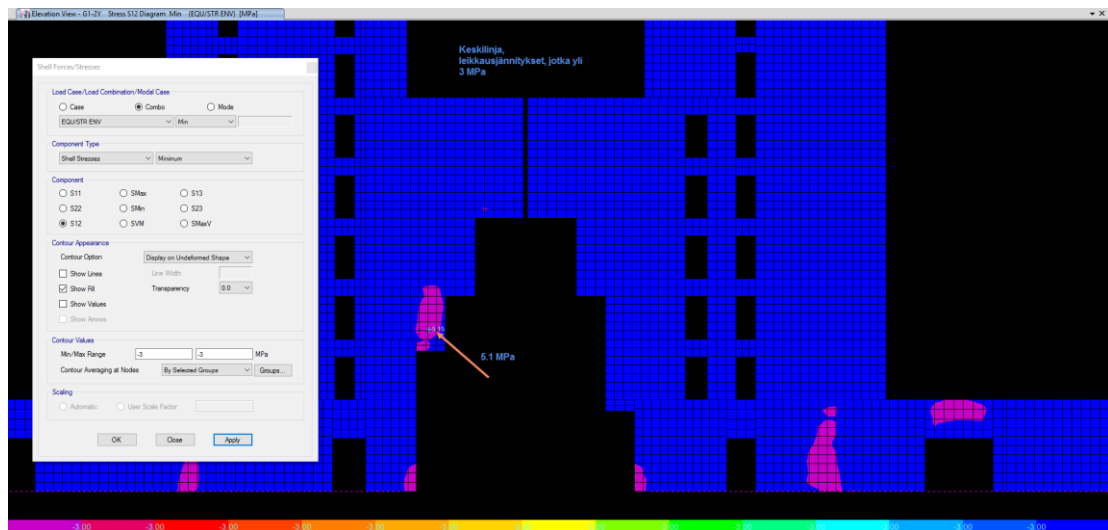
## 7.1.2 Leikkausmitoitus



Kuvio 3. Leikkausjännitysarvot, maksimi leikkausjännitysarvo 7,7 MPa.

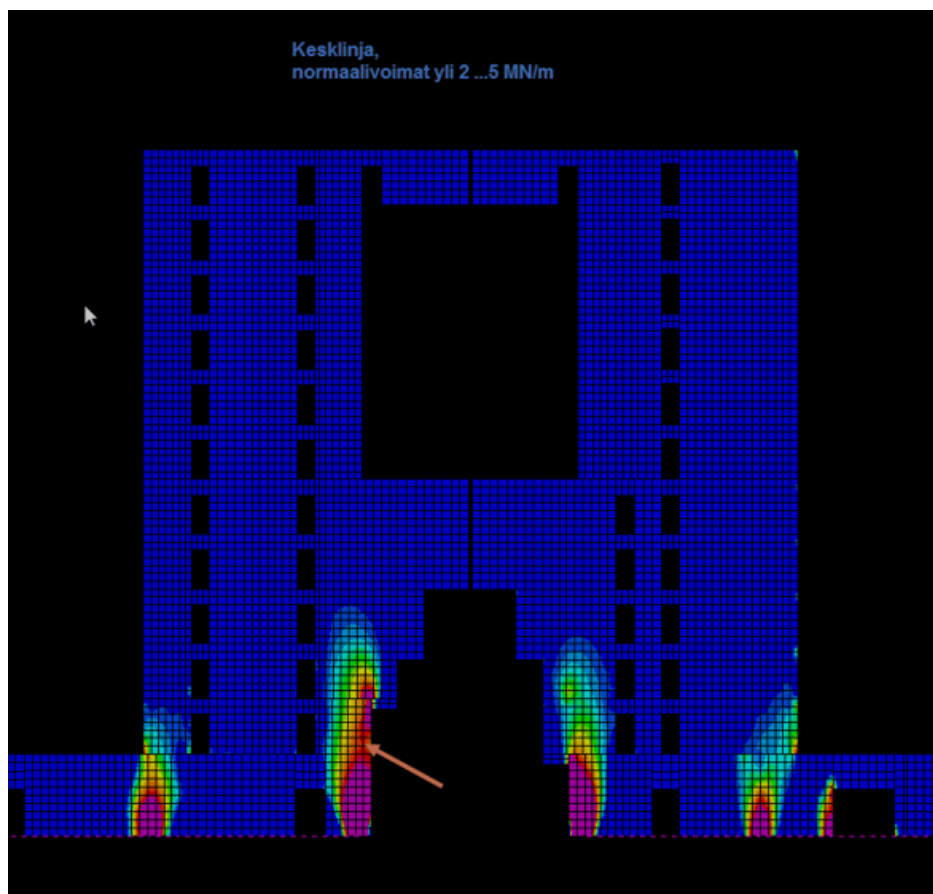
Leikkauskestävyys					Leikkauskestävyys				
$\phi$	16	mm			$\phi$	16	mm		
$A_{sw}$	402	mm <sup>2</sup>	s	150 mm	$A_{sw}$	402	mm <sup>2</sup>	s	100 mm
$f_{swd}$	435	MPa			$f_{swd}$	435	MPa		
C	35	45			C	35	45		
$f_{cd}$	19.8	MPa			$f_{cd}$	19.8	MPa		
$b_w$	250	mm			$b_w$	250	mm		
$\theta$	45.00	deg	$\cot \theta$	1.00	$\theta$	45.00	deg	$\cot \theta$	1.00
$\alpha$	90	deg	$\sin \alpha$	1.000	$\alpha$	45	deg	$\sin \alpha$	0.707
			$\cot \alpha$	0.00				$\cot \alpha$	1.00
$V_1$	0.516				$V_1$	0.516			
$V_{Rd} = A_{sw} f_{swd} \frac{1}{s} (\cot(\theta) + \cot(\alpha)) \sin(\alpha)$					$V_{Rd} = A_{sw} f_{swd} \frac{1}{s} (\cot(\theta) + \cot(\alpha)) \sin(\alpha)$				
$V_{Rd}$	1166	kN/m			$V_{Rd}$	2473	kN/m		
$\tau_{Rd} = \frac{V_{Rd}}{b_w}$					$\tau_{Rd} = \frac{V_{Rd}}{b_w}$				
$\tau_{Rd}$	4.7	MPa			$\tau_{Rd}$	9.9	MPa		
$V_{Rd,max} = b_w V_1 f_{cd} \frac{\cot(\theta) + \cot(\alpha)}{1 + \cot(\theta)^2}$					$V_{Rd,max} = b_w V_1 f_{cd} \frac{\cot(\theta) + \cot(\alpha)}{1 + \cot(\theta)^2}$				
$V_{Rd,max}$	1279	kN/m			$V_{Rd,max}$	2559	kN/m		
$\tau_{Rd,max} = \frac{V_{Rd,max}}{b_w}$					$\tau_{Rd,max} = \frac{V_{Rd,max}}{b_w}$				
$\tau_{Rd,max}$	5.1	MPa			$\tau_{Rd,max}$	10.2	MPa		

Kuvio 4. Vasemmalla puolella pysty- ja vaakaterästyksen leikkauskapasiteetti (T16, k150 m.p) ja oikealla puolella vinoterästyksen leikkauskapasiteetti (T16, k150 m.p. 45 astetta)



Kuvio 5. Leikkausjännityshuiput

### 7.1.3 Kuormien kohdistuminen rakenteessa

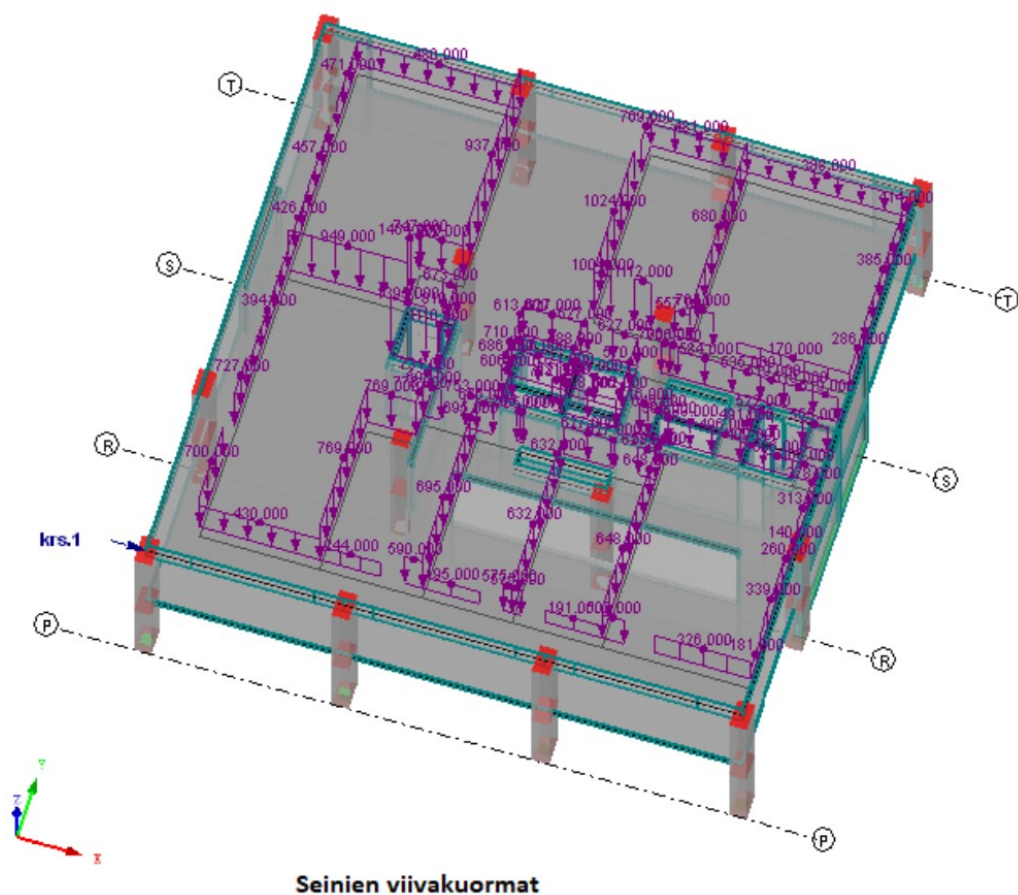


Kuvio 6. Normaalivoimien kasaantuminen tukialueille. Siniset arvot ovat normaalivoima alle 2MN/m. Pilarialueilla normaalivoimat 2 MN/m...5 MN/m.

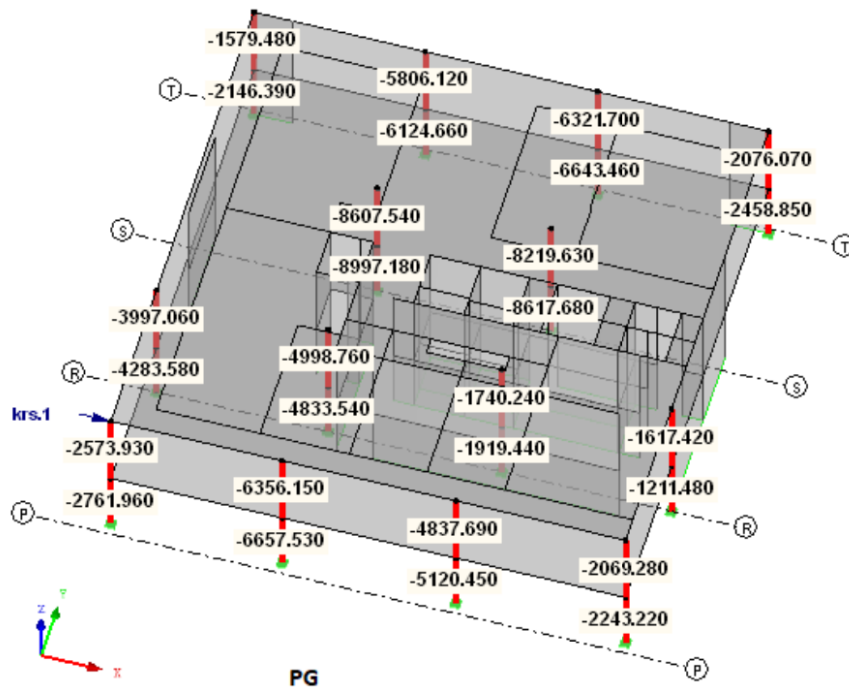
## 7.2 Siirtolaatta

Esimerkkilaskelmaan on otettu FEM -laskelma Lapinmäentien Louhenlinnan kuormansiirtolaatta. Kuormansiirtolaatta sijaitsee K1 -kerroksen katossa. Kuormansiirtolaatta tukeutuu pilareihin ja keskialueella oleviin porrashuoneiden seiniin. Laattaan kohdistuvat kuormat on esitetty kuvioissa 26, 27 ja 28.

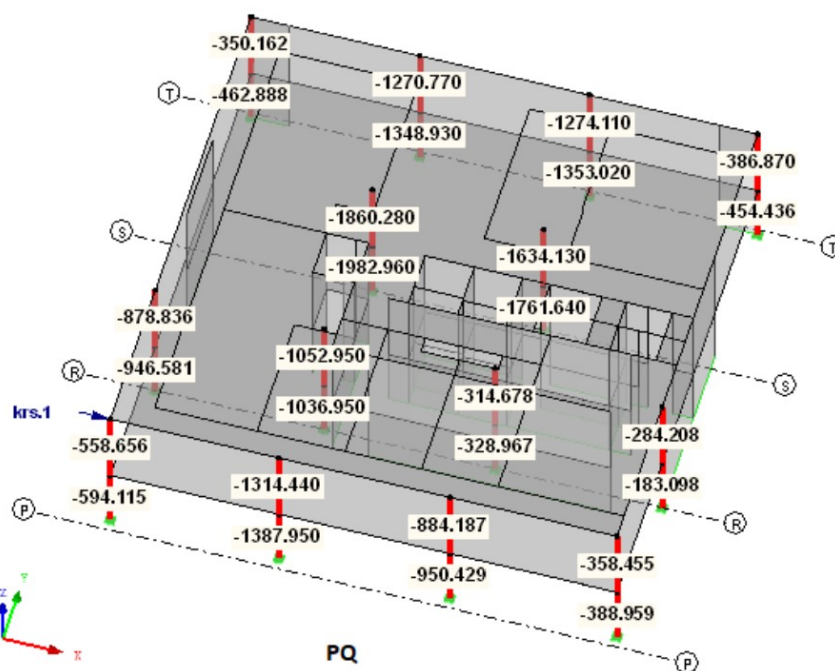
### 7.2.1 Kuormien kohdistuminen rakenteessa



Kuvio 7. Seinäkuormat laatussa



Kuvio 8. Pilarikuormat pysyvistä kuormista



Kuvio 9. Pilareihin kohdistuvat hyötykuormat

## 7.2.2 Laatan kapasiteetti

Teräs	Fyk=	500	N/mm <sup>2</sup>	Betoni	Fck=	50	N/mm <sup>2</sup>				la
	ys=	1,15			acc=	0,85					
	Fyd=	434,8	N/mm <sup>2</sup>		yc=	1,5					
Ulompi paksuin teräs	d=	32	mm		Fcd=	28,333333	N/mm <sup>2</sup>				
Sisempi paksuin teräs	d=	32	mm		Fctm=	4,07	N/mm <sup>2</sup>				
					Fctd=	1,90	N/mm <sup>2</sup>				

Rauditus	As	Momentti kapasiteetti MRT	Leikkauskapasiteetti MRT
Ulompi T32k150	= 5360 mm <sup>2</sup> /m	MRd= 2751,0 kNm/m	VRd= 491,8 kN/m
Sisempi T32k150	= 5360 mm <sup>2</sup> /m	MRd= 2676,4 kNm/m	VRd= 483,4 kN/m
Ulompi T32k125	= 6432 mm <sup>2</sup> /m	MRd= 3262,8 kNm/m	VRd= 522,7 kN/m
Sisempi T32k125	= 6432 mm <sup>2</sup> /m	MRd= 3173,4 kNm/m	VRd= 513,7 kN/m
Ulompi T32k150+T32k150	= 10720 mm <sup>2</sup> /m	MRd= 5182,5 kNm/m	VRd= 619,7 kN/m
Sisempi T32k150+T32k150	= 10720 mm <sup>2</sup> /m	MRd= 5033,3 kNm/m	VRd= 609,1 kN/m

Kuvio 10. Kuva xx. Laatan kapasiteetit 1300 mm laatala

Teräs	Fyk=	500	N/mm <sup>2</sup>	Betoni	Fck=	50	N/mm <sup>2</sup>				la
	ys=	1,15			acc=	0,85					
	Fyd=	434,8	N/mm <sup>2</sup>		yc=	1,5					
Ulompi paksuin teräs	d=	32	mm		Fcd=	28,333333	N/mm <sup>2</sup>				
Sisempi paksuin teräs	d=	32	mm		Fctm=	4,07	N/mm <sup>2</sup>				
					Fctd=	1,90	N/mm <sup>2</sup>				

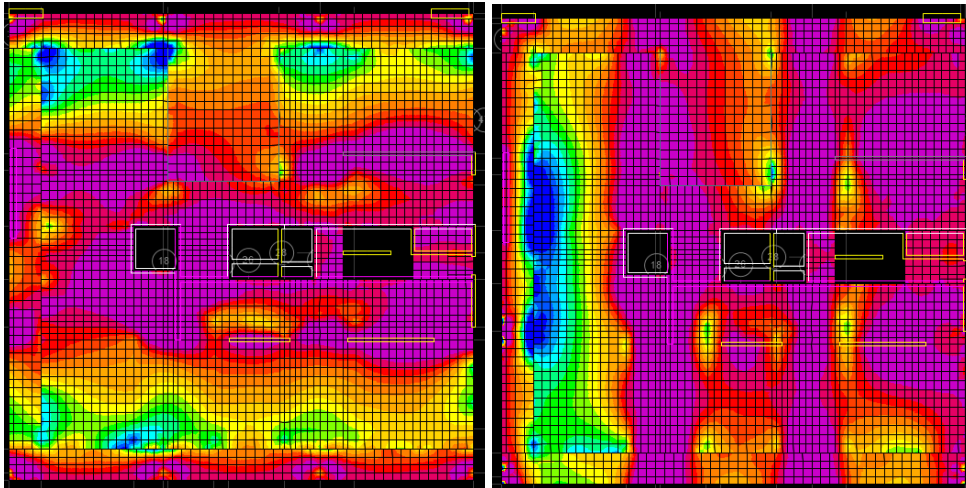
  

Rauditus	As	Momentti kapasiteetti MRT	Leikkauskapasiteetti MRT
Ulompi T32k150	= 5360 mm <sup>2</sup> /m	MRd= 2348,8 kNm/m	VRd= 532,6 kN/m
Sisempi T32k150	= 5360 mm <sup>2</sup> /m	MRd= 2274,2 kNm/m	VRd= 521,7 kN/m
Ulompi T32k125	= 6432 mm <sup>2</sup> /m	MRd= 2795,5 kNm/m	VRd= 566,0 kN/m
Sisempi T32k125	= 6432 mm <sup>2</sup> /m	MRd= 2706,1 kNm/m	VRd= 554,4 kN/m
Ulompi T32k150+T32k150	= 10720 mm <sup>2</sup> /m	MRd= 4505,9 kNm/m	VRd= 671,1 kN/m
Sisempi T32k150+T32k150	= 10720 mm <sup>2</sup> /m	MRd= 4356,7 kNm/m	VRd= 657,4 kN/m

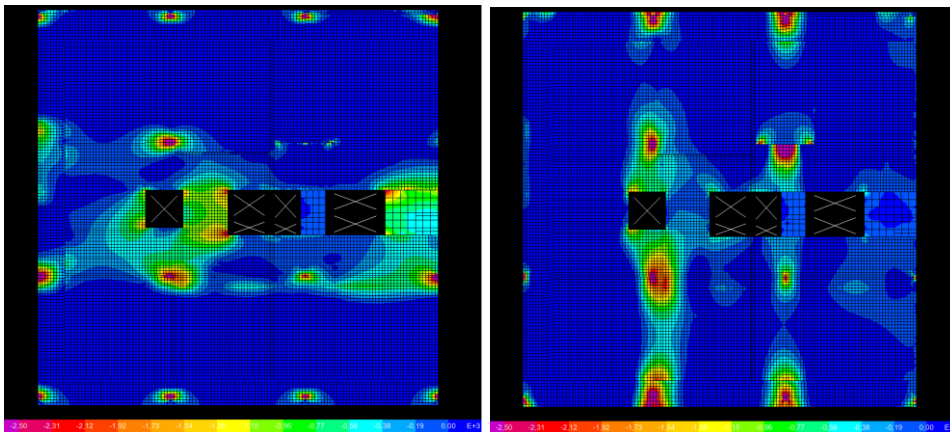
Kuvio 11. Kuva 18. Laatan kapasiteetit 1100 mm laatala.



### 7.2.3 Laatan momentit



Kuvio 12. Vasemmanpuoleisessa kuvassa y-suunnan alapinnanmomentti. Oikeanpuoleisessa kuvassa x-suunnan alapinnanmomentti. Sininen väri ylittää 1600 kNm/m.



Kuvio 13. Vasemmanpuoleisessa kuvassa y-suunnan yläpinnanmomentti. Oikeanpuoleisessa kuvassa x-suunnan yläpinnanmomentti. Momenttiarvot välillä 1-2500 kNm/m.