

Dani Eranka

# Jatkuva sortuma betonirakenteissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennetekniikka

Insinöörityö

10.5.2015

Tekijä(t) Otsikko	Dani Eranka Jatkuva sortuma betonirakenteissa
Sivumäärä Aika	60 sivua + 1 liite 29.4.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikan suuntautumisvaihtoehto
Ohjaaja(t)	Lehtori Jouni Kalliomäki Toimitusjohtaja Hannu Nissinen Osastopäällikkö Veikko Leino
<p>Tämä opinnäytetyö tehtiin rakennesuunnittelu- ja konsultointiyritys SWECO Oy:lle.</p> <p>Työssä käsitellään jatkuvaa sortumaa betoni- ja betoniliittorakenteissa rakennesuunnittelijan näkökulmasta. Opinnäytetyö on jaettu karkeasti kahteen eriävään osaan.</p> <p>Teoriaosiossa käsitellään mikä jatkuva sortuma on käsitteenä, kuinka rakenteiden turvallisuutta tutkitaan suunnitteluvaiheessa, mitä suunnitteluohjeita ja määräyksiä on olemassa jatkuvan sortuman suunnittelulle sekä mitä erityismenettelyn keinoja rakennusvalvonta voi jatkuvan sortuman suunnittelulle määrätä.</p> <p>Tutkiva osio käsittelee jatkuvan sortuman estämisen suunnittelua erittäin haastavassa esimerkki suunnittelukohteessa. Osiossa tutkitaan myös avainasemassa olevan rakenteen suunnitteluperiaatetta laskentaohjelman avulla. Osion esimerkkihohde on oikea suunnittelukohte. Laskentaohjelmalla tehdyt analyysit ovat täysin teoreettisia eivätkä liity esimerkkikohteeseen, mutta osoittavat kuinka avainasemassa olevan rakenteen suunnitteluperiaate toimii.</p> <p>Lähdeaineistona työssä käytettiin alan julkisen kirjallisuuden lisäksi yrityksen omia rakennesuunnittelun kirjallisuus lähteitä sekä yrityksen asiakirjoja esimerkki suunnittelukohteesta.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda kattava raportti jatkuvan sortuman huomioimisesta betonirakenteiden suunnittelussa. Työn läpi lukemalla suunnittelijan pitäisi saada käsitys siitä, milloin jatkuva sortuma on huomioitava betonirakenteiden suunnittelussa ja mitä keinoja jatkuvan sortuman estämiseksi tai sen riskin pienentämiseksi on.</p> <p>Opinnäytetyön tavoite saavutettiin ja tuloksena syntyi raportti, jota rakennesuunnittelija voi käyttää apuna jatkuvan sortuman suunnitteluprosessin ymmärtämiseen.</p>	
Avainsanat	jatkuva sortuma, onnettomuuskuorma, erityismenettely, suunnittelu, riskiarvio, riskianalyysi

Author(s) Title	Dani Eranka Progressive Collapse in Concrete Structures	
Number of Pages Date	60 pages + 1 appendice 29 April 2015	
Degree	Bachelor of Engineering	
Degree Programme	Civil Engineering	
Specialisation option	Structural Engineering	
Instructor(s)	Principal Lecturer Chief Executive Head of Department	Jouni Kalliomäki Hannu Nissinen Veikko Leino
<p>This thesis was made for a building engineering and consulting company SWECO Oy.</p> <p>The thesis studies progressive collapse in concrete and concrete syndicate structures from a structural designers perspective. The thesis is divided in two differing parts.</p> <p>The theory section of the thesis explains what progressive collapse is, how the safety of structures is investigated during the design process, what design guidelines and rules exist for the designing of progressive collapse resistant structures and what special rules the Finnish building supervision department can designate for the designing of progressive collapse resistant structures.</p> <p>The research part of the thesis studies the process of designing progressive collapse resistant structures in a very challenging example building. This section also studies the design principle of load-bearing key point structures with a program that calculates structure support values. The example building used in this section is a real design project but by the designing companies will, the example project will remain anonymous in this thesis. The analyses made with the structure supports calculating program are theoretical and will not relate to the example project. The calculations will, however, show how the design principle of weight supporting key point structures works.</p> <p>Information for the thesis has been searched from public books as well as from the company's own building design information containing literature and the company's documents on the example building.</p> <p>The goal of this thesis was to create a comprehensive report about taking progressive collapse in to account in concrete structure designing. By reading through the thesis a building designer should get an overall understanding of when progressive collapse must be taken in to account in designing of concrete structures and what options there are to prevent or diminish the risk of progressive collapse in structures.</p> <p>The goal of this thesis was achieved and the result is a report that a structural designer can use to understand the process of designing progressive collapse resistant structures</p>		
Keywords	progressive collapse, risk analysis, structure designing	

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Rakenteellisen turvallisuuden varmistaminen	2
2.1	Alustava riskiarvio	3
2.2	Riskiluokaltaan vaativat ja erittäin vaativat rakennuskohteet	3
2.3	Riskianalyysi	4
2.4	Erytymenettely	6
2.5	Riskien hallinta	7
3	Jatkuva sortuma	9
4	Onnettomuuskuormat	11
4.1	Onnettomuusmitoitustilanteet	12
4.2	Törmäys	13
4.3	Rakennuksen sisäiset räjähdykset	14
5	Jatkuvan sortuman hallinta	16
6	Paikallisen vaurion estäminen	17
6.1	Sortumavaaran poistaminen tai vähentäminen	18
6.2	Rakenteiden mitoitus kuormia kestäviksi	18
7	Paikallisen vaurion laajenemisen estäminen	19
7.1	Korvaavan rakennesysteemin valinta ja mitoitus	19
7.2	Liitosten mitoitus	23
8	Jatkuvan sortuman estämisen suunnittelu haastavassa rakennuskohteessa	24
8.1	Alustava riskiarvio	25
8.2	Riskianalyysi	26
9	Jatkuvan sortuman estäminen suunnittelulla	29
9.1	Jatkuvan sortuman estäminen rakenteellisin ratkaisuin	30
9.2	Jatkuvan sortuman riskin pienentäminen laadunvalvonnalla	31

10	Avainasemassa olevan rakenneosan suunnittelumenetelmä	33
10.1	Avainasemassa olevan rakenneosan suunnittelumenetelmän laskentamallit 34	
10.2	Jatkuvien rakenteiden rakennemallin tutkiminen	37
10.3	Päistään nivelöityjen palkkien rakennemallin tutkiminen	46
10.4	Johtopäätökset laskentamalleista	57
11	Yhteenveto	58
	Lähteet	60
	Liitteet	
	Liite 1. Laskentaesimerkki liitosten mitoitukselle	

## Lyhenteet

## 1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö tehdään rakennesuunnittelutoimisto Aaro Kohonen Oy:lle. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Espoossa, mutta sen aluetoimistoja on myös Pietarsaarella, Seinäjoella, Kouvolassa ja Vaasassa. Aaro Kohonen on sulautunut Sweco Rakennetekniikka Oy:hyn vuoden 2015 alusta. Aaro Kohonen Oy on toiminut vuodesta 1972 lähtien Suomessa ja ulkomailla.

Yrityksessä on käynnissä suuria suunnitteluprojekteja, joiden kohteet ovat erittäin vaativia korkean rakentamisen suunnittelukohteita. Suunniteltaessa korkeita rakennuksia jatkuvan sortuman huomioimisen tarve korostuu. Seuraukset jatkuvan sortuman huomioimisen laiminlyönneistä tällaisissa kohteissa voivat olla sekä taloudellisesti että henkilövahingollisesti merkittäviä.

Tämän työn tavoitteena on luoda kirjallinen raportti, jossa selitetään jatkuva sortuma ilmiönä, tiivistetään eurokoodin määräykset ja laskennat jatkuvalla sortumalla, kerrotaan jatkuvan sortuman huomioimistavoista ja käydään läpi jatkuvan sortuman estämisen suunnittelu ja toteutus todellisessa esimerkkikohteessa. Työn läpi lukemalla suunnittelijan pitäisi saada käsitys siitä, milloin jatkuva sortuma on huomioitava betonirakenteiden suunnittelussa ja mitä keinoja jatkuvan sortuman estämiseksi tai sen riskin pienentämiseksi on.

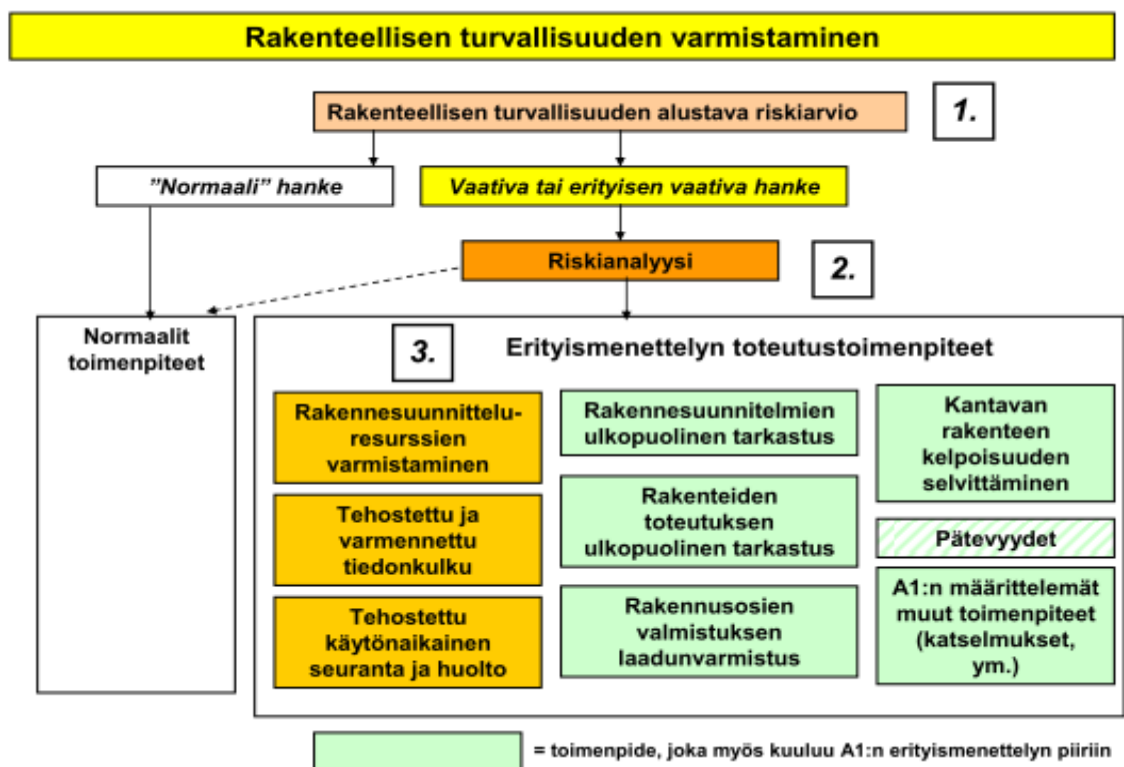
Jatkuva sortuma käsitteenä tarkoittaa paikallisesta rakenteen kantavuuden menetyksestä syntyvää, ketjureaktiomaista kantavien rakenteiden pettämistä. Jatkuva sortuma voi syntyä kun yksittäinen rakenteen osa vaurioituu, myötää tai menettää stabiliteettinsa. Yhden rakenteen pettäessä täytyy muiden rakenteiden pystyä vastaanottamaan kuorma, jonka pettäneen rakenteen oli suunniteltu kantavan. Mikäli muita rakenteita ei ole suunniteltu tällainen yllättävä tilanne huomioon ottaen, syntyy jatkuva sortuma, jossa sortuminen jatkuu rakenteelta toisella kunnes rakennus on kokonaan sortunut tai sortuminen pysähtyy rakenteeseen, joka pystyy kuormat kannattelemaan. Sortuminen päättyy myös kun kuormat eivät voi enää siirtyä eteenpäin toisille rakenteille. Tällöin sortumista syntynyt kuormitus poistuu sortuneen rakennuksen osan mukana. [1, s. 11–12.]

Työssä keskitytään betonirakenteiden, betonielementtirakenteiden ja betoniliittorakenteiden tarkasteluun. Kaikki työssä tehtävät tarkastelut tulevat liittymään suunnitteluvaiheeseen.

## 2 Rakenteellisen turvallisuuden varmistaminen

Rakenteellinen turvallisuus tarkoittaa, että suunnitelluilla rakenteilla on riittävästi lujuutta ja varmuutta kestää kaikki ennakoitavissa olevat kuormitustilanteet. Tämä tavoite saavutetaan kun kaikissa rakennushankkeissa huolehditaan siitä, että rakenteet täyttävät vaatimukset, jotka suunnittelunormit määrittävät. [11, s. 3.]

Rakenteiden turvallisuudesta voidaan varmistua kun hanke käy läpi rakenteellisen turvallisuuden varmistamisen prosessin. Prosessi lähtee liikkeelle alustavalla riskiarviolla.



Kuva 1. Rakenteellisen turvallisuuden varmistamisen eteneminen. [7, s. 8.]

## 2.1 Alustava riskiarvio

Alustavan riskiarvion tavoitteena on selvittää kuuluuko rakennushanke erityismenettelyn piiriin. Alustavan riskiarvion laadinnasta vastaa yleensä rakennushankkeen vastaava rakennesuunnittelija. Riskiarvio sisältää laatijan ehdotukset kyseisessä hankkeessa tarpeelliseksi todetuista erityismenettelytoimenpiteistä.

Alustava riskiarvio toimitetaan rakennusvalvontaan ennen rakennusluvan hakemista tai viimeistään lupahakemuksen kanssa. Rakennusvalvontaviranomainen tekee alustavan riskiarvion perusteella päätöksen rakennushankkeen vaativuudesta ja hankkeelle määrätyistä erityismenettelytoimenpiteistä. [11, s. 28–29.]

## 2.2 Riskiluokaltaan vaativat ja erittäin vaativat rakennuskohteet

Riskiluokaltaan vaativissa ja erittäin vaativissa rakennuskohteissa on hankkeen vetäjällä velvollisuus osoittaa ns. huolehtimisvelvollisuutensa jo ennakkokäsittelyn aikana. Tämä tapahtuu toimittamalla rakennusvalvontaviranomaisille kohteelle tehdyt riskianalyytit ja niiden perusteella laaditut rakennesuunnitelmat. [6, s. 1–2.]

Tämä käytäntö on tullut voimaan vasta lähiaikoina ja sen taustalla on 2000-luvulla tapahtuneet vakavat rakenteiden sortumiset, joiden perusteella rakennusvalvonta on todennut, että aikaisemmin rakenteellisen turvallisuuden takaamiseksi tehdyt toimenpiteet eivät ole olleet riittäviä. [6, s. 1–2.]

Rakennusvalvonta voi määrätä rakennuskohteelle käytettäväksi erityismenettelyyn kuuluvia toimenpiteitä sen rakennus- ja suunnitteluvaiheissa. Usein varsinkin suunnitteluvaiheessa erityismenettelyjä ei kuitenkaan tarvitse erikseen määrätä, sillä suunnitteluorganisaatiot käyttävät erityismenettelyn toimenpiteitä jo automaattisesti kohteissa, jotka niitä vaativat. Tyypillisiä riskiluokaltaan vaativia ja erittäin vaativia kohteita ovat esimerkiksi koulut, katsomot, urheiluhallit, uimahallit, kauppakeskukset ja toimistorakennukset. [6, s. 1–2.]

Kaikille riskiluokaltaan vaativille rakennuskohteille tyypillinen ja riskiluokan määrittävä piirre on suuronnettomuuden vaara. Suuronnettomuudet määritellään suunnitteluohjeistuksessa henkilö-, ympäristö- tai omaisuusvahingoiksi, jotka määrän tai

laadun perusteella ovat erityisen vakavia ja onnettomuuden vaara on täten otettava huomioon korotetuin varmuuskertoimin rakenteita suunniteltaessa. [7, s. 11.]

Hankkeen vaativuus ( <u>vaativuusluokka</u> ):	Vahingon seuraamus ( <u>seuraamusluokka</u> ):		
	Suuri (3)	Keskisuuri (2)	Vähäinen(1)
Suuri (3)	③	③	②
Keskisuuri (2)	③	②	1
Vähäinen (1)	②	1	1



= *erityismenettely*

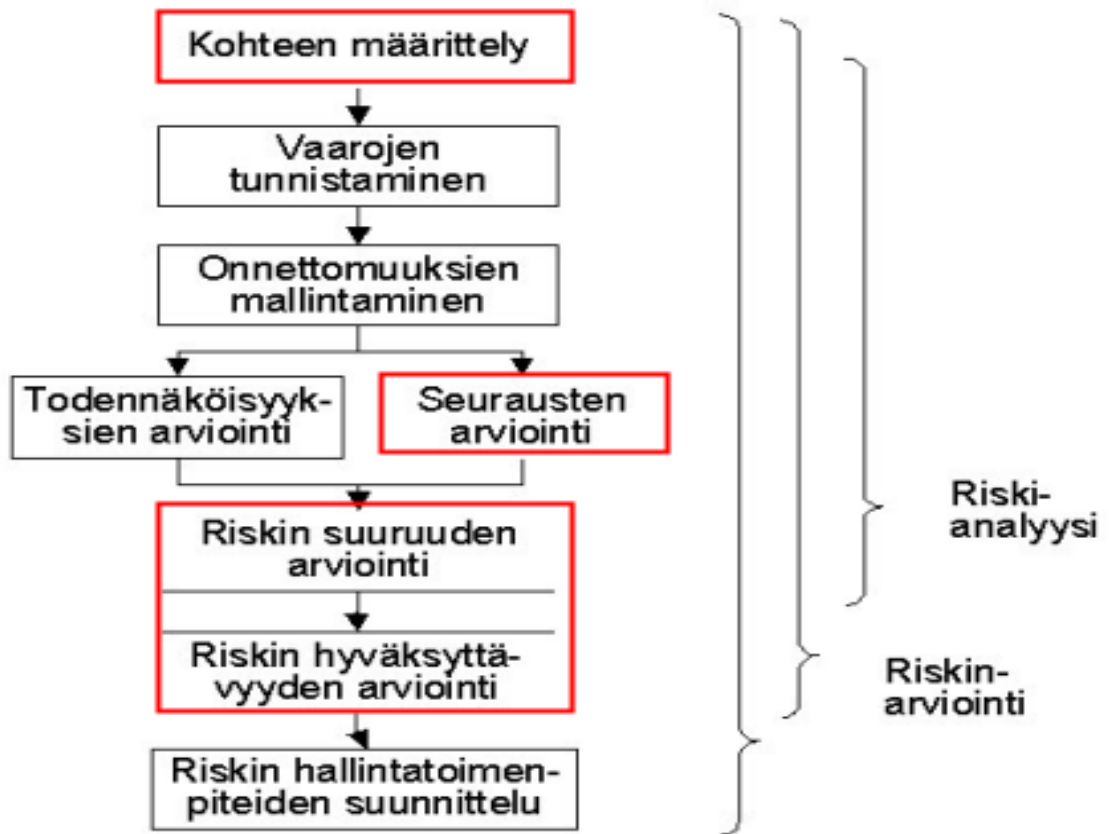


= *erityismenettelyä valikoidusti*

Kuva 2. Riskitasoluokkaan perustuva erityismenettelyn laajuuden karkea määrittely rakennuskohteelle. [7, s. 26.]

### 2.3 Riskianalyysi

Riskianalyysi on osa riskienhallintaprosessia, joka pitää käydä läpi seuraamusluokaltaan vaativien CC3 ja joskus CC2 luokan rakennuskohteille. Riskianalyysillä kartoitetaan kohteelle haastavia rakennetyyppejä ja ulkoisia riskitekijöitä kuten onnettomuuskuormia. Riskianalyysin jälkeen havaitut ongelmakohdat ja ulkoiset vaikuttajat käydään läpi työryhmässä, jonka tehtävä on pyrkiä pienentämään kohteelle löydetty riskitekijät hyväksyttävälle tasolle. Riskianalyysin laajuus riippuu suunnittelukohteen vaativuudesta. Suunnitteluprosessi ei voi jatkua ennen kuin on todennettu, että kohteen riskitekijät ovat sallitulla tasolla. [5, s. 4–5.]



Kuva 3. Kohteen riskienhallinta prosessin eteneminen. Punaisella merkityt aiheet sisältävät erityismenettelyohjeisiin. [5, s. 5.]

Riskianalyysiä käytetään vain erittäin vaativissa suunnittelu- ja rakennuskohteissa. Sen tarkoitus on kartoittaa toteutuksen, käytön ja suunnittelun vahinkoseuraamukset ja niiden todennäköisyys sekä määrittää rakennuskohteelle sopivat toimenpiteet riskien hallitsemiseksi. [9, s. 11.]

Riskianalyysin laadinta kuuluu yleensä vastaavan rakennesuunnittelijan vastuualueeseen. Vastaava rakennesuunnittelija kokoaa hankkeen eri osapuolten tuottamat, riskianalyysin kannalta oleelliset tiedot yhteen ja luo niistä asiakirjan. Asiakirja pidetään ajan tasalla tekemällä siihen tarvittaessa tarkennuksia ja muutoksia rakennustöiden edetessä. [9, s. 11.]

Muita riskianalyysin osallistuvia osapuolia ovat rakennushankkeen tilaaja, joka toimittaa analysoitavaksi toteutukseen ja käyttöön liittyvät lähtötiedot. Vastaava työnjohtaja tekee tiivistelmän hankkeen rakentamiseen liittyvistä kriittisistä tai haastavista työvaiheista. Kiinteistön omistajalta saadaan rakennuksen käyttöön liittyviä lähtötietoja ja riskitekijöitä. Työmaan ulkopuolisilta toimijoilta kuten rakennesuunnittelijoilta sekä elementtien

valmistajilta ja asentajilta pyydetään omat riskianalyyysinsä, jotka liitetään osaksi koko hankkeen riskianalyysiä. Mahdolliset ulkopuoliset tarkastajat, esimerkiksi rakennesuunnitelmien ulkopuoliset tarkastajat, tarkastavat riskianalyysin sisällön oman osaamisalueensa osalta ja osallistuvat tarvittaessa myös riskianalyysin laadintaan. [9, s. 11.]

Riskianalyysin laadinta alkaa aina rakennuskohteen lähtötietoihin perustuvalla alustavalla riskianalyysillä. Tämä alustava riskianalyysi luodaan yleensä jo rakennusluvan hakuvaiheessa. Varsinainen lopullinen riskianalyysi tehdään vasta kun kaikki siihen tarvittavat tiedot ovat riskianalyysin laatijan käytettävissä. Alustavan riskianalyysin pohjalta laaditaan toimenpidesuunnitelma, jota päivitetään, mikäli hankkeeseen tulee muutoksia. Alustava riskianalyysi päivittyy lopulliseksi riskianalyysiksi rakennushankkeen edetessä, kun kohteesta saadaan lisätietoja analyysia varten. [9, s. 11–12.]

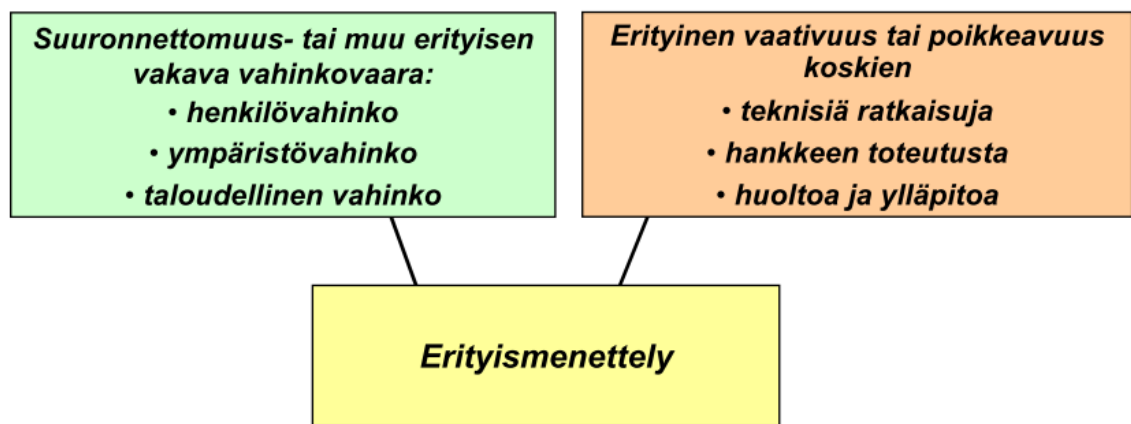


Kuva 4. Riskianalyysi on tärkeä osa vaativan rakennushankkeen riskienhallintaprosessia. [5, s. 10.]

#### 2.4 Erityismenettely

Rakennushankkeessa tulee noudattaa erityismenettelyä, jos hankkeen suunnittelussa, käytössä tai rakentamisessa tapahtuvasta virheestä voi olla seurauksena suuronnettomuus tai suuronnettomuuden vaara. Rakennusvalvontaviranomainen päättää rakennusluvan hakuvaiheessa, aloituskokouksessa tai viimeistään rakennustöiden aikana erityismenettelyn tarpeesta ja sen laajuudesta rakennuskohteessa. [7, s. 12–13.]

Erityismenettely voi kohdistua vain joihinkin hankkeen osa-alueisiin kuten suunnitteluun tai suunnitteluun ja käyttöön. Rakennusvaiheeseen liittyvät erityismenettelytoimenpiteet liittyvät usein työn vaativuuteen. Rakennusvalvontaviranomainen voi todeta jonkin hankkeen työvaiheen olevan niin haastava, että sen tekijällä tulisi olla erityisosaamista vastaavan työn tekemisestä. Tällaisia työvaiheita voivat olla esimerkiksi perustustyöt haastavissa olosuhteissa tai helposti vaurioituvassa ympäristössä, kantavien rakenteiden asennus- ja liittorakennetyöt sekä jännitettyjen betonirakenteiden valmistus ja asennus työmaalla. [7, s. 12–13.]



Kuva 5. Erityismenettelyn piiriin kuuluvat rakennushankkeet. [7, s. 15.]

Rakenteiden turvallisuuden varmentaminen edellyttää erityismenettelyyn sisältyvien toimenpiteiden käyttämistä rakennuskohteessa. Riskianalyysi on yksi erityismenettelyyn sisältyvistä toimenpiteistä ja yksi sen tehtävistä on kartoittaa mitä muita erityismenettelyn toimenpiteitä kohteessa tulisi käyttää. Muita yleisiä toimenpiteitä ovat suunnittelijoiden ja työnohtajien pätevyyksien ja resurssien tarkempi varmistus, suunnittelijoiden tehostetut työmaatarkastuskäynnit, elementtiosien laadunvalvonnan tehostus ja rakennesuunnitelmien ulkopuolinen tarkastus.[6, s. 2–4.] Erityismenettelyissä käytettävät toimenpiteet on määritetty tarkasti Suomen rakentamismääräyskokoelman (RakMK) eri osissa. [5, s. 5.]

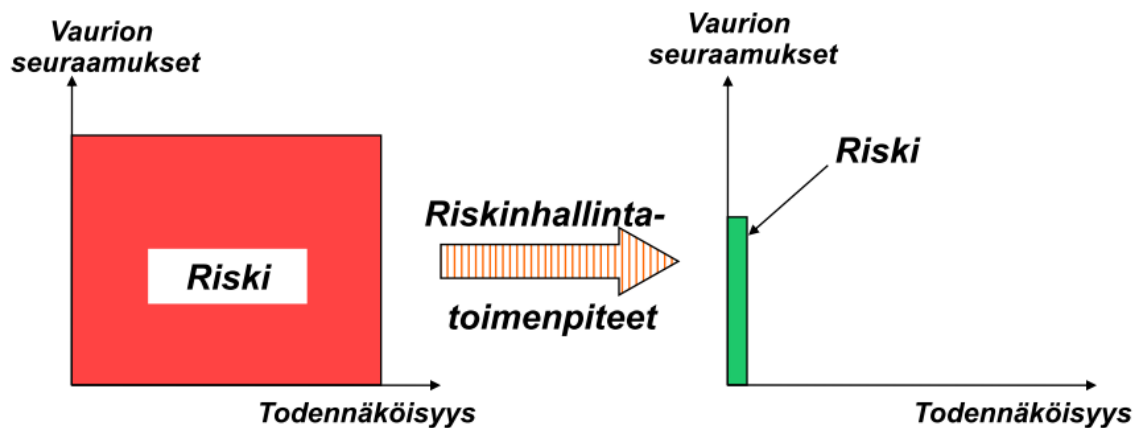
## 2.5 Riskien hallinta

Edellä mainitut toimenpiteet liittyvät kaikki rakennushankkeiden riskiluokan ja vaativuuden tunnistamiseen, kohteen riskien tunnistamiseen sekä kohteeseen liittyvien

erityismenettelytapojen kartoittamiseen. Kaikki nämä keinot edistävät rakenteellisen turvallisuuden varmistamista kohteessa. [7, s. 8–11.]

Erittäin oleellinen osa rakenteellisen turvallisuuden varmistamista on myös riskien hallinta. Jotta riskien hallinta on mahdollista, täytyy riskianalyysillä saatujen tulosten olla kattavat ja realistiset. Riskianalyysissä voi nousta esiin myös ennakoimattomia riskitekijöitä, joita ei voida poistaa kokonaan. Tällaisissa tapauksissa riskien hallinnan tavoitteena on pienentää tapahtuman todennäköisyyttä ja pyrkiä hallitsemaan ennakoimattoman onnettomuustapauksen seurauksia. Ennakoimattomat riskitekijät johtuvat virheistä, joita ei voida huomioida etukäteen. [7, s. 8–11.]

Riskianalyysin tiivistetty tavoite on varmistaa rakenteiden sietokyky onnettomuuskuormista johtuville vaurioitumiselle. Riskianalyysissä voi nousta esiin rakenteita, jotka vaurioituessaan voivat aiheuttaa laajempia sortumia tai jatkuvaa sortumaa. Tällaiset riskitekijät ovat ns. liian suuria riskitekijöitä. Riskien hallinnan tarkoitus on poistaa tai pienentää hyväksyttävälle tasolle riskianalyysissä esiin nousseet riskitekijät. Riskin suuruutta voidaan pienentää vähentämällä tapaturman todennäköisyyttä ja pienentämällä tapaturmasta aiheutuvien vahinkojen seuraamuksia. [7, s. 8–11.]



Kuva 6. Riskienhallintatoimenpiteillä pyritään pienentämään riskianalyysissä esiin nousseita riskitekijöitä. [11, s. 4.]

### 3 Jatkuva sortuma

Jatkuva sortuma huomioidaan rakennuksen vakavuuden suunnittelussa siten, että tutkitaan rakennetta, jossa osa jäykistävästä tai kantavista rakenteista ei ole käytettävissä. Tällöin jäljelle jäävien käytössä olevien rakenteiden tulee pystyä kannattelemaan niille siirtyvät kuormat ja taata rakenteen vakavuus. Jatkuvan sortuman estämistä suunniteltaessa pitää kiinnittää erityisesti huomiota rakenneosien välisiin liitoksiin ja jänneväliltään pitkiin jatkuviin rakenteisiin. Näissä rakennetyypeissä riski jatkuvan sortuman syntymiselle on erityisen suuri. Jänneväliltään pitkät rakenteet voidaan pilkkoa pienempiin osiin, jolloin jatkuvan sortuman riski pienenee, mutta toisaalta yksittäisten rakenneosien valmistus- ja materiaaliviat korostuvat, jolloin paikallisia vaurioita ja sortumia voi tapahtua helpommin. [1, s. 11–12.]

Eurokoodin osan 1991-1-7 mukaan rakenteet tulee pyrkiä suunnittelemaan niin, ettei muutaman rakenneosan poistuminen käytöstä, esimerkiksi paikallisen vaurioitumisen johdosta, aiheuta jatkuvaa sortumaa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi monikerroksisen rakennuksen tulee pysyä pystyssä, vaikka sen jäykistävästä rakenteesta esim. tulipalon tai paikallisen räjähdysten vuoksi muutama kantava pilari menettää kantokykynsä kokonaan. [1, s. 11–12.]

Tämä ei tarkoita sitä, että rakenteiden muodonmuutoksia yllättävästi lisääntyneen kuorman johdosta pyrittäisiin estämään. Koska oikein suunnitelluissa rakenteissa tällaisia yksittäisten rakenteiden kantokyvyn menetyksiä ei pääse tapahtumaan kuin ennalta arvaamattomissa onnettomuustilanteissa olisi kohtuutonta, että rakenteet tulisi suunnitella kestäämään aiheutuvat lisäkuormat täysin myötäämättä. Lisäksi muille rakenteille siirtyvät kuormat ovat usein niin suuret ja kuormitusnopeudet niin suuria ja yllättäviä, että se olisi käytännössä lähes mahdotonta. [1, s. 11–12.]

Eurokoodissa jatkuvaa sortumaa koskevat ohjeet on rajattu koskemaan vain tunnettuja onnettomuuskuormia sekä rakennuksia, joissa voi samalla hetkellä olla paljon ihmisiä. Hallirakenteille jatkuvan sortuman alue rajataan vain pinta-alalle, jonka eurokoodi määrittää alusortuman lähialueeksi. Tämä alue on usein vain tietty määritetty pinta-ala, joka johdetaan rakennuksen koko pinta-alasta. [1, s. 11–12.]

Yksikerroksissa rakennuksissa jatkuvan sortuman estämisen tarkastelua ei rakenteiden yksinkertaisuuden takia usein tarvitse tehdä lainkaan. Poikkeuksena voi olla rakennus,

jonka kattorakenne on erityisen monimutkainen yhtenäinen rakenne kuten avaruusristikko tai rakennus, jossa henkilövahinkojen riski on suuri. Tällaisissa rakenteissa jatkuvan sortuman estäminen harkitaan ohjeen mukaan aina tapauskohtaisesti. [1, s. 11–12.]

Asennustöiden aikana rakenteet ovat erityisen herkkiä virheille, jotka saattavat johtaa sortumiin. Asennuksen aikana rakenteet ovat usein kokonaan väliaikaisten jäykistysten ja asennustukien varassa. Virheet asennustukien sijaintien tai kantavuuden suunnittelussa johtavat helposti laajoihin sortumiin, koska jatkuvaa sortumaa ei ole asennusaikana huomioitu. Tärkeää on myös, ettei asennustyönäikaisia tukia poisteta liian aikaisin, koska tukemattomana rakenteilla ei välttämättä ole vielä kestävyttä kantaa edes omaa painoaan. Esimerkkinä ontelolaataston asennus, jonka asennusaikaisten tukien poisto ennen saumavalua tai ennen saumavalun kuivumista tarpeeksi voi johtaa ja on johtanutkin koko laataston sortumiseen jatkuvana sortumana. [1, s. 12–13.]

Koska jatkuvan sortuman aiheuttaja on usein ennalta vaikeasti huomioitava onnettomuustilanne, on niiden onnettomuuskuormien arvioimista varten laadittu ohjeita ja rakenteiden mitoittamiselle sopivia suunnitteluohjeita ja mitoituskriteereitä. Nämä ohjeet ja kriteerit perustuvat tunnettuihin onnettomuuskuormiin, jotka eurokoodin osa EN 1991-1-7 määrittää. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että eurokoodi määrittää rakenteiden suunnittelulle tietyn onnettomuuskertoimen muiden varmuuskertoimien lisäksi. Onnettomuuskerroin määräytyy oletettavien tunnettujen onnettomuuskuormien määristä. Jos rakennus voidaan olettaa alttiiksi esim. tulipaloille, isojen kulkuneuvojen törmäyksille ja tulville on onnettomuuskerroin suurempi kuin rakennukselle, joka oletetaan alttiiksi vain tulipaloille. Jos rakennukseen kohdistuu vain eurokoodin määrittämiä, tunnettuja onnettomuuskuormia ei sille tarvitse tehdä kohdekohtaista riskianalyysia, koska rakennuksen riskiluokka ja kuormituskertoimet voidaan määrittää niiden mukaisesti. [1, s. 12–13.]

On olemassa myös ennakoimattomia kuormitustilanteita, joita ei pystytä tarkalleen määrittämään. Ennakoimattomat onnettomuudet tapahtuvat ennalta-arvaamattomasta syystä, eikä niistä ole tilastotietoja, jonka takia niiden kokonaisriskin määrittäminen on mahdotonta. Ennakoimattomissa onnettomuuksissa on osasyynä lähes aina virhe rakennusprosessissa. Rakenteita suunniteltaessa ei voida varautua ennakoimattomiin onnettomuuksiin nostamalla tapauskohtaisesti kuormien varmuuskertoimia, koska yhtäkään aiemmista onnettomuuksista ei ole voitu selittää vain rakenteiden ylikuormalla.

Onnettomuudet ovat johtuneet aina useammasta virheestä suunnittelussa, asentamisessa ja materiaali valinnoissa. [1, s. 13.]



Kuva 7. Esimerkki ennakoimattomasta onnettomuudesta. Puuelementtien valmistusvirheestä ja kattorakenteiden puutteellisesta suunnittelusta aiheutunut kattorakenteen jatkuva sortuma. [4, s. 2.]

#### 4 Onnettomuuskuormat

Suomen Standardisoimisliitto SFS määrittää eurokoodin osassa EN 1991-1-7 toimintaperiaatteet määriteltävissä oleviin onnettomuuskuormiin perustuen. Standardin osassa EN 1991-1-7 käydään läpi onnettomuuskuormien luokitukset, mitoitusilanteet ja onnettomuusmitoitukset törmäyksille ja sisäisille räjähdyksille. [2, s. 10–14.]

Taulukko 1. Tunnetut onnettomuuskuormat, aiheuttajat ja suunnitteluohjeet, joissa niitä käsitellään.

Eurokoodin tunnetut onnettomuuskuormat	Aiheuttajat	Ohjeet suunnittelijalle
Törmäyskuormat	ajoneuvo, trukki, laiva, juna jne.	EN 1991-1-7, Luku 4
Räjähdykskuormat	kaasu-, pöly-, massaräjähdykset	EN 1991-1-7, Luku 5
Tulipalo	palavat materiaalit	EN 1992-1-2, koko standardi
Paikallinen vaurio (virheestä)	suunnittelu- tai asennusvirheet	EN 1992-1-1, koko standardi ja Betoninormikortti 23

Muut tapahtumat	rakenteen kantavuuden menetys	EN 1992-1-1, koko standardi ja Betoninormikortti 23
-----------------	-------------------------------	---

#### 4.1 Onnettomuusmitoitustilanteet

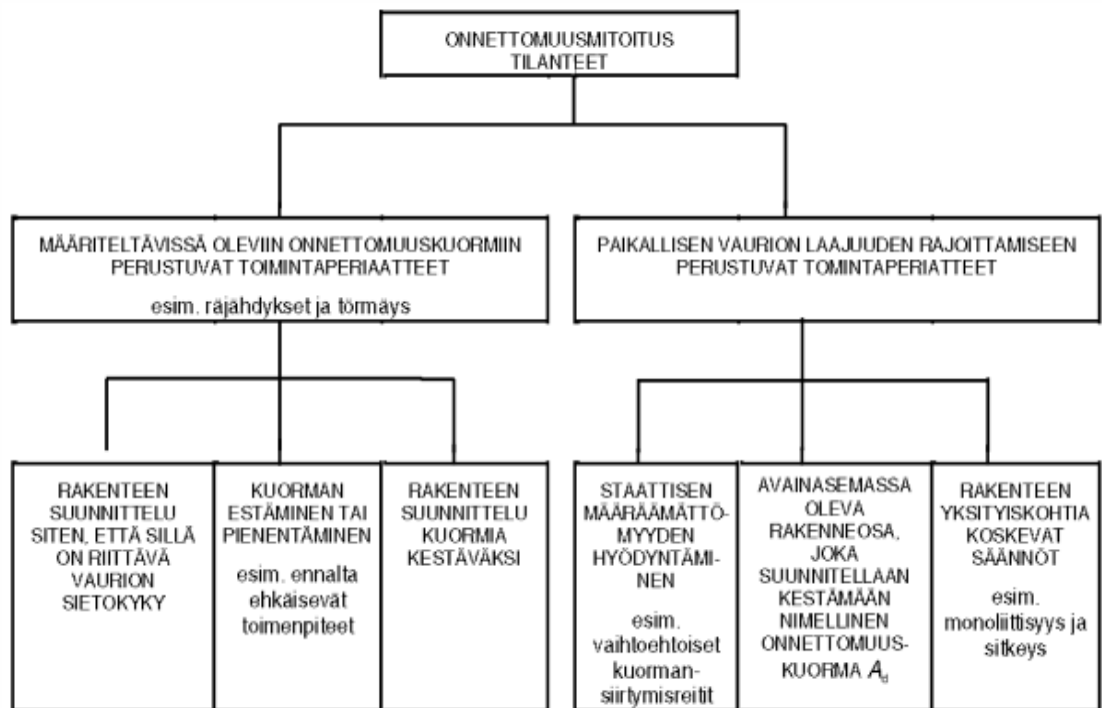
Rakenteiden suunnitteluun liittyvät onnettomuusmitoitustilanteet on jaettu standardissa karkeasti kahteen osaan. Paikallisten vaurioiden laajuuden rajoittamiseen perustuvat toimintaperiaatteet ovat suunnittelutapoja jatkuvan sortuman estämiselle, joilla pyritään estämään kuormien siirtyminen hallitsemattomasti muille rakenteille. Tähän pyritään suunnittelemalla rakenteet siten, että kuormat siirtyvät hallitusti vaihtoehtoisia siirtymisreittejä pitkin rakenteille, jotka kestävät kuormat sortumatta. Rakenteet saadaan kestämään yllättävät kuormat erityisen sitkeillä liitoksilla tai tekemällä onnettomuuskuormille kriittisillä paikoilla olevista kantavista rakenteista niin vahvoja, että ne kestävät niille kohdistuvat onnettomuuskuormat. [2, s. 14; s. 26.]

Määriteltävissä oleviin onnettomuuskuormiin perustuvan toimintaperiaatteen suunnittelulla pyritään jatkuva sortuma estämään siten, että onnettomuuskuorman aiheuttamaa kantavan rakenteen kantokyvyn menetystä ei pääse tapahtumaan. Esimerkiksi oletettu onnettomuuskuorma, ajoneuvon törmäminen kantavaan rakenteeseen, voidaan estää suunnittelemalla puskurit tälle onnettomuuskuormalle alltiina oleville kantaville rakenteille. Rakennus voidaan myös suunnitella siten, että se säilyy vakaana, vaikka kantavasta rakenteesta poistuisikin onnettomuuskuormasta johtuen kantavia osia. [2, s. 14; s. 26.]

Onnettomuustilanteen toimintaperiaatteen määrittely suunnittelussa on aina tapauskohtaista. On pohdittava mille onnettomuuskuormille juuri kyseinen kohde on altis ja sitä kautta määritettävä mikä jatkuvan sortuman estämisen tapa on tehokkain. Jatkuvan sortuman estämisen suunnittelulle voi tulla myös muita rajoittavia tekijöitä, kuten arkkitehdin määrittämät ulkonäkö kriteerit, jolloin voi olla, että törmäyskuorman estävien puskureiden suunnittelu ei ole mahdollista. [2, s. 14; s. 26.]

Toimintaperiaatteen määrittelyyn voi käyttää myös kohteen seuraamusluokkaa. Seuraamusluokka yhden (CC1) kohteet eivät vaadi onnettomuuskuormien erityistarkasteluja. Seuraamusluokka kahden (CC2) kohteet vaatii yksinkertaista onnettomuuskuormien analyysia. Seuraamusluokka kolmen (CC3) kohteille on syytä

tehdä kattava onnettomuuskuormien analysointi. Onnettomuuskuormien vaikutuksien tarkempi tarkastelu voi edellyttää riskianalyysin tekoa kohteelle. [2, s. 28.]



Kuva 8. Kaavio onnettomuusmitoitustilanteiden suunnittelunperiaatteille. [2, s. 14.]

## 4.2 Törmäys

Tunnetuista onnettomuuskuormista yleisin on törmäyksistä aiheutuva onnettomuuskuorma. Törmäyskuormaa voi aiheuttaa esimerkiksi ajoneuvo, trukki, juna, laiva tai lentokone. Törmäyskuorman suuruuden määrittämistä varten on pohdittava mille näistä törmäyskuormista kohde on alttiina. Kohteen törmäyskuormaksi laskentoja varten valitaan suurimman kuorman aiheuttava onnettomuustilanne. Esimerkiksi sama kohde voi olla altis ajoneuvon ja trukin törmäyksille. Näistä kahdesta törmäyskuormasta laskennassa käytetään vain suurempaa kuormaa. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi varastohallit ja pysäköintitalot. [2, s. 30.] [3, s. 123–125.]

Törmäyskuorman tarkka määrittäminen vaatii hieman syvempää analysointia. Kuorman laskennassa oletetaan usein, että törmäyksen kohde absorboi kaiken törmäyksestä

syntyvän energian. Tämä oletus on väärä, mutta ei haitallinen sillä laskenta pysyy silloin varmallalla puolella. Todellisuudessa osa törmäysenergiasta häviää muualle kuin törmäyksen kohteeseen. Törmäysenergian suuruuteen eniten vaikuttavat asiat ovat törmäävän esineen massa ja nopeus. Törmäävän esineen ja törmäyksen kohteen materiaalit vaikuttavat myös syntyvään voimaan. [2, s. 30–32] [3, s. 123–125.]

Yleisimmille törmäyskuormille on kuitenkin olemassa valmiiksi laskettuja, varmallalla puolella olevia oletusvoimia. Näiden staattisten mitoituskuormien käyttö onnettomuuskuormien laskennassa on täysin sallittua ja suositeltavaa, sillä ne helpottavat ja nopeuttavat laskentaa huomattavasti. Joskus kohde on kuitenkin altis erikoisemmille törmäyskuormille, jolloin itse tehty laskenta kuormien suuruksien määrittämiseksi on välttämätöntä. [2, s. 30–32] [3, s. 123–125.]

Liikenteen luokka	Kuorma $F_{dx}^a$ [kN]	Kuorma $F_{dy}^a$ [kN]
Moottoritiet sekä valta- ja kantatiet	1 000	500
Maantiet	750	375
Taajamien tiet ja kadut	500	250
Pihat ja autotallit, joihin:		
— henkilö- ja pakettiautot pääsevät kulkemaan	50	25
— kuorma-autot pääsevät kulkemaan <sup>b</sup>	150	75

<sup>a</sup>  $x$  = normaali liikenteen suunta,  $y$  = normaalin liikenteen suuntaa vastaan kohtisuoraan.  
<sup>b</sup> Termi "kuorma-auto" tarkoittaa ajoneuvoja, joiden suurin bruttopaino on yli 3,5 tonnia.

Kuva 9. Ajoväylän läheisyydessä sijaitsevien rakenteiden törmäyksestä aiheutuvat ohjeelliset mitoituskuormat. [2, s. 32.]

Vastaavia taulukoita voi löytää eurokoodin onnettomuuskuormat osiosta kaikille eurokoodin tuntemille törmäyskuormille.

#### 4.3 Rakennuksen sisäiset räjähdykset

Rakennukset sisäisten räjähdysten mahdollisuus tulee huomioida silloin kun suunnitellaan rakenteita, joissa säilytetään tai joita pitkin kuljetetaan tai kulkeutuu räjähtävää materiaalia kuten paloherkkiä kaasuja, pölyä tai räjähdysherkkää kaasua muodostavia nesteitä. Yleisimpiä tällaisia rakenteita ovat energiansiirtokanavat ja tunnelit. Räjähdysaineiksi luokiteltujen materiaalien vaikutukset eivät kuulu tähän soveltamisalaan, koska niissä räjähdysvaara on ilmeinen eikä yllättävä

onnettomuuskuorma. Lisäksi räjähdysvaarallisten materiaalien säilömiselle, kuljettamiselle ja käytölle on olemassa omat tarkat säädöksensä. [2, s. 48.]

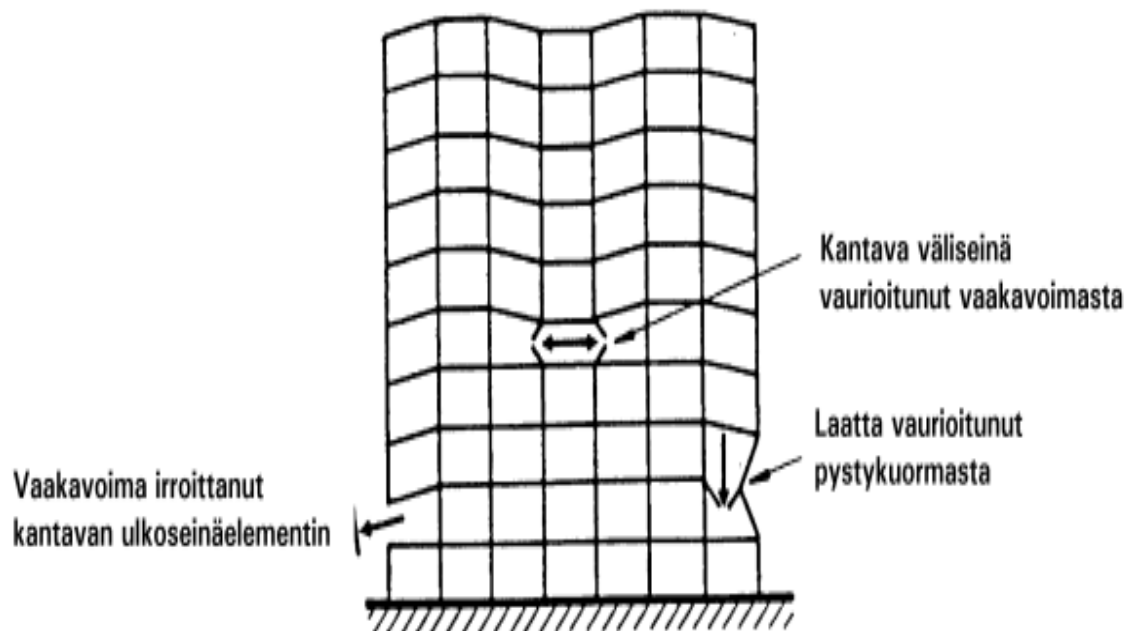
Staattisen räjähdyskuorman laskemiseksi täytyy tehdä laskennan kannalta varmalle puolelle jääviä yksinkertaistuksia. Räjähdyskuorman suuruus riippuu monesta tekijästä, mutta yksinkertaistettuna se voidaan tiivistää yhteen tekijään, räjähdysen aiheuttamaan paineeseen. Räjähdysen aiheuttamaan paineeseen vaikuttaa monta tekijään. Räjähdys on itse asiassa vain erittäin nopeaa palamista eli mitä palamisherkeempää ainetta sitä voimakkaampi räjähdys. Räjähdysen voimakkuuteen vaikuttaa myös tilavuus. Tiiviimmässä tilassa tapahtuva nopea palaminen aiheuttaa suuremman paineen ja siten voimakkaan räjähdysreaktion. Näiden periaatteiden perusteella räjähdyskuormille saadaan laskettua ominaisarvoja räjähdystyyppiin (kaasuräjähdys, pölyräjähdys ja massaräjähdys), räjähdysalueen pinta-alaan ja räjähdysalueella olevien aukkojen kuten ikkunoiden perusteella. Aukot pienentävät räjähdyksestä syntyvää kuormaa, koska paine joka kuorman aiheuttaa pääsee purkautumaan aukoista ulos. [2, s. 48–50.] [3, s. 128–132.]

Suunnitteluperiaatteet sisäinen räjähdys huomioiden ovat hyvin yksinkertaiset, rakenteet pitää suunnitella niin, ettei sisäpuolinen räjähdys voi aiheuttaa jatkuvaa sortumaa. Rakenteiden vaurioituminen on sallittua, kunhan rakenteen vaurioituminen ei aiheuta koko rakennuksen vakauden menetystä. Suunniteltaessa rakenteita räjähdyskuormia huomioiden oletetaan kuorman synnyttävä räjähdyspaine vaikuttavaksi täydellä teholla ja samanaikaisesti kaikkiin räjähdystilaa rajoittaviin pintoihin. Tällä tavoin laskennassa käytettävät lähtöarvot saadaan varmalle puolelle. Mikäli todetaan, että räjähdysen huippupaine on niin suuri, että rakenteita ei voida suunnitella sitä kestäväksi, voidaan painetta pienentää suunnittelemalla räjähdystilaa rajoittaviin pintoihin paineenpurkausluukkuja, joiden tarkoitus on päästää räjähdyspainetta purkautumaan ulos tilasta täten pienentäen huippupainetta. Paineen purkautuminen räjähdysluukkujen kautta voi aiheuttaa viereisille rakennuksille paineiskuun, joka näiden tulee kestää. Tämä paineisku on verrattavissa ulkopuoliseen räjähdykseen. Suunnittelussa voidaan myös joutua huomioimaan räjähdyksestä syntyvä alipaine, joka seuraa ensimmäisen ylipainevaiheen jälkeen. Alipaineesta syntyvä räjähdyskuorma ei ole niin suuri kuin ylipaineen aiheuttava kuorma, mutta vastakkaisuuntainen, jolloin se voidaan joutua huomioimaan esimerkiksi rakenteiden jäykistämisisä. [2, s. 48–50.] [3, s. 128–132.]

## 5 Jatkuvan sortuman hallinta

Jatkuva sortuma syntyy kun paikallisesta vauriosta syntyy ketjureaktio, joka johtaa useampien rakenteiden pettämiseen. Paikallisen vaurion voi aiheuttaa onnettomuuskuorma tai jokin yllättävä tekijä, kuten ontelolaataston tippuminen tuilta. Myös poikkeuksellisen kova tulipalo, johon suunnittelussa ei ole varauduttu voi aiheuttaa kantavien rakenteiden vaurioitumista ja siten jatkuvan sortuman syntymistä. [10, s.3.]

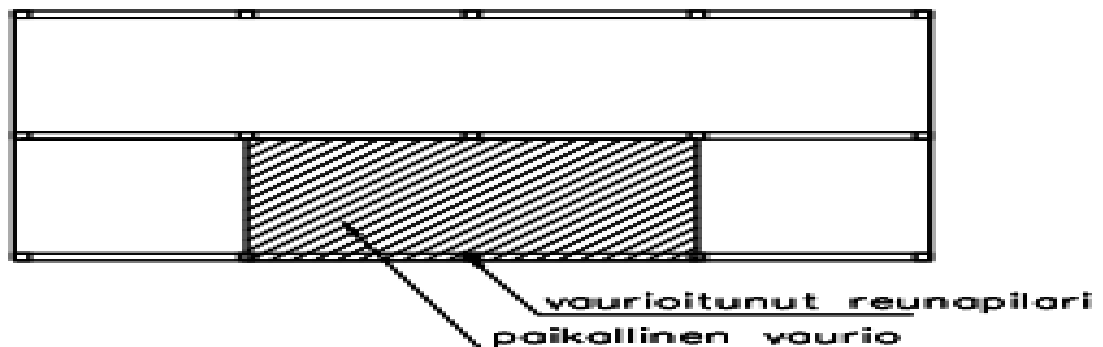
Jatkuvan sortuman hallinnalla on tarkoitus varmistua siitä, ettei mikään yllättäväkään paikallinen vaurio pääse leviämään ketjureaktiomaisena jatkuvana sortuma rakenteissa. Jatkuva sortuma rajoitetaan sitomalla rakenteet toisiinsa sideteräksin tai erityisen vahvojen liitosten avulla. Tällöin elementtien välille saadaan riittävän suuri vetovoimakapasiteetti ja jatkuvuus, jolloin rakenteelle tulevia yllättäviä kuormia siirtyy tasaisesti kaikille sidoksissa oleville rakenteille. [10, s.3.]



Kuva 10. Onnettomuuskuormien aiheuttamia paikallisia rakennevaurioita. [10, s. 2.]

## 6 Paikallisen vaurion estäminen

Paikallisen vaurion estäminen on rakenteiden suunnittelussa käytetty keino ennakoimattomien onnettomuustapausten riskien pienentämiseksi. Suunnittelutavan periaatteena on että, onnettomuuskuormille alttiit rakenteet suunnitellaan niin, että paikallista sortumaa ei pääse syntymään. Suunnitteluohjeissa annetaan kaksi lähestymistapaa, joilla paikallisen vaurion estäminen tai paikallisesta vauriosta aiheutuvan sortuman estäminen on mahdollista. [10, s. 3–4.]



Kuva 11. Kantavan rakenteen pettäminen johtaa paikalliseen vaurioon. Vaurioaluetta pyritään hallitsemaan rakenteiden suunnittelulla jatkuva sortuma huomioiden. [10, s. 9.]

Törmäyksille alttiit rakenteet tulee mitoittaa SFS-EN 1991-1-7 ohjeen mukaisille törmäyskuormille. Näin suunnitelluille rakenteille katsotaan törmäyskuormasta aiheutuvan rakenteen sortumisen tulleen estetyksi ja täten myös törmäyskuormasta aiheutuva jatkuvan sortuma on estetty. [10, s. 13.]

Tulipalolle alttiit rakenteet tulee mitoittaa SFS-EN 1991-1-2 palomitoitus ohjeen mukaan. Kun rakenteet suunnitellaan ohjeen määrittämille palonkestoajoille, voidaan näiden rakenteiden olettaa kantavan palonkestoajan aikana syntyvät kuormat sortumatta. Palolle alttiina oleville rakenteilla voi kuitenkin syntyä muodonmuutoksia, joiden seurauksena voi muihin rakenteisiin syntyä odottamattomia kuormia ja kantokykyä heikentäviä muodonmuutoksia. Tämän takia elementtien väliset liitokset tulee suunnitella siten, että rakennus kestää muodonmuutokset sortumatta. [10, s. 13.]

Palotilanteessa osastovien rakenteiden täytyy toimia koko vaadittavan palonkestoajan. Tämän takia palotilanteessa paikalliset sortumat eivät ole sallittuja. Jatkuva sortuma

palotilanteessa katsotaan estetyksi kun rakenteet suunnitellaan SFS-EN 1991-1-2 palomitoitus ohjeen mukaan. [10, s. 13.]

Koska palotilanteessa ei sallita paikallisia sortumia lainkaan, tulee palotilanteen ja onnettomuuskuormista aiheutuvaa jatkuvan sortuman riskiä tutkia erillisinä kuormitustapauksina. Lisäksi yllättävän ankaran tulipalon aiheuttama jatkuvan sortuman vaara tulkitaan ennakoimattomaksi onnettomuustilanteeksi ja on siten normaali palotilanteesta poikkeava kuormitustapaus ja vaatii erillistä tutkintaa. [10, s. 13.]

### 6.1 Sortumavaaran poistaminen tai vähentäminen

Suunnitteluperiaatteena voi olla estää paikallisesta vauriosta aiheutuvan alkusortuman syntyminen rakenteellisen suunnittelun avulla. Yksinkertaisimmillaan tämä voi tarkoittaa vain esimerkiksi törmäysonnettomuuskuormalle alttiin kantavan seinä- tai pilarirakenteen suojaamista suojarakentein, jolloin törmäyskuorman aiheuttama kantavan rakenteen vaurioitumisen riskiä ei ole. [10, s. 4.]

Haasteellisempaa suunnittelua sen sijaan vaatii esimerkiksi räjähdysten aiheuttamien rakenteellisen vaurioiden hallitseminen. Räjähdyksistä syntyvän kuorman rakenteille aiheuttaa räjähdyspaine. Räjähdyksistä syntyviä rakenteiden vaurioita pyritäänkin suunnittelussa estämään hallitsemalla juuri räjähdyspaineen purkautumista niin, ettei suurta vaurioita aiheuttavaa kuormaa pääse syntymään kantaville rakenteille. Yksinkertainen menetelmä, jolla tämä lopputulos voidaan saavuttaa, on suunnitella rakennuksen kevyiden rakenteiden liitokset heikommiksi kuin kantavien rakenteiden liitokset. Tällöin kevyiden rakenteiden liitokset pettävät räjähdysten voimasta ennen kantavien rakenteiden liitoksia ja räjähdyspaine pääsee purkautumaan ulos tai rakennuksen muihin osiin vahingoittamatta kantavia rakenteita kriittisesti. Koska kantavia rakenteita tai niiden liitoksia ei vaurioitunut, ei sortumisvaaraa ole. [10, s. 4.]

### 6.2 Rakenteiden mitoitus kuormia kestäviksi

Tämän suunnitteluperiaatteen toimintaperiaate on erittäin yksinkertainen. Onnettomuuskuormille alttiit kantavat rakenteet pyritään suunnittelemaan niin vahvoiksi, että ne kestävät onnettomuuskuormat sekä mahdollisesti onnettomuustilanteissa

syntyvät ylikuormat. Käytännössä tämä tarkoittaa rakenteiden koon tai teräsmäärän kasvattamista niin paljon, että ne kestävät suuretkin kuormat. Menettelytapa ei ole kovin suosittu, sillä rakenteiden kasvattaminen lisää automaattisesti myös rakennuskustannuksia, jolloin rakenteesta voi tulla erittäin epätaloudellinen. Rakenteiden kasvattaminen vähentää myös käytettävissä olevan vapaan tilan alaa. [10, s. 4.]

## **7 Paikallisen vaurion laajenemisen estäminen**

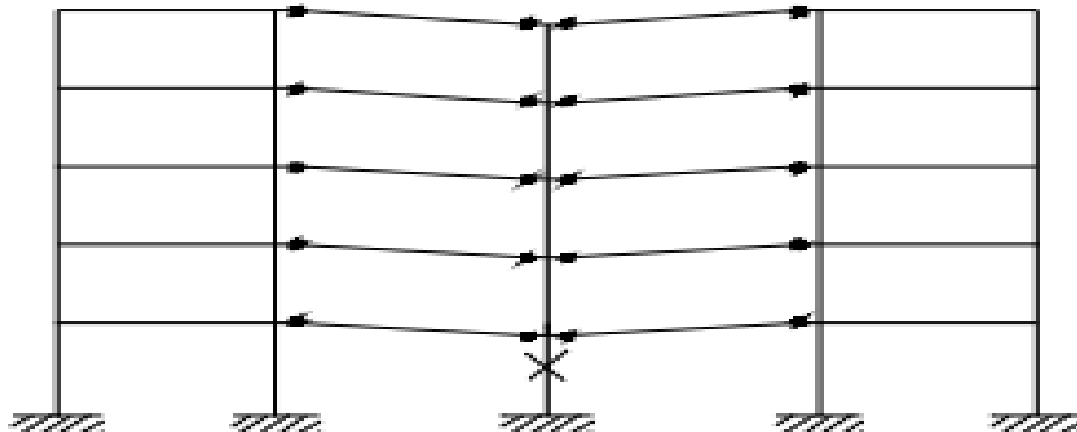
Tämän suunnitteluperiaatteen rakenteiden suunnittelu, jatkuva sortuma huomioiden perustuu rakenteiden vaurioitumisesta alkavan alkusortuman hallintaan. Suunnitteluperiaatteen ajatuksena on, että onnettomuuskuorman aiheuttama rakenteiden kantavuuden menetys sallitaan tietyn suuruisella pienehköllä alueella, mutta niin ettei vaurio pääse etenemään laajemmaksi jatkuvana sortumana. Suunnitteluohjeiden mukaan jatkuva sortuma tulkitaan estetyksi, jos sortuneet alueet rajoittuvat alkuperäisen vaurioituneen rakenteen lähiympäristöön. [10, s. 4–5.]

Jotta alkusortuma ei pääse etenemään jatkuvana sortumana laajemmaksi, täytyy vaurioitumattomina säilyneiden rakenteiden pystyä kannattelemaan niille vaurioituneilta rakenteilta siirtyvät kuormat. Tätä vaurioitumattomista rakenneosista koostuvaa kantavaa rakennetta kutsutaan korvaavaksi rakennesysteemiksi. Kun rakenneosat liitetään toisiinsa riittävän suuren kestävyuden ja sitkeyden omaavin liitoksien, syntyy onnettomuustilanteesta ehjänä säilyneistä rakenteista yhtenäinen korvaava kantava rakenne, joka pystyy vastaan ottamaan kuormat vaurioituneilta rakenneosilta. Korvaava kantava rakennesysteemi suunnitellaan siten, että rakenteet kestävät suuretkin muodonmuutokset ja kuormitustilanteen muutokset esimerkiksi vetoa kestävinä köysirakenteina. Oikean korvaavan rakennesysteemin valintaan ja mitoitukseen vaikuttaa suunnittelukohteen kantavan rakenteen malli ja kuormat. [10, s. 4–5.]

### **7.1 Korvaavan rakennesysteemin valinta ja mitoitus**

Kun rakenteita suunnitellaan onnettomuuskuormat huomioiden tätä suunnitteluperiaatetta käyttäen, on tärkeää ymmärtää, että korvaavalta rakennesysteemiltä ei vaadita mitään muuta kuin että se kestää sille siirtyvät kuormat

sortumatta. Suuretkin muodonmuutokset korvaavalle rakennesysteemille ovat sallittuja, kunhan sortuminen on estetty. Rakenteisiin ja niiden välisiin liitoksiin syntyvät plastiset nivelet ovat myös sallittuja. [10, s. 4–5.]



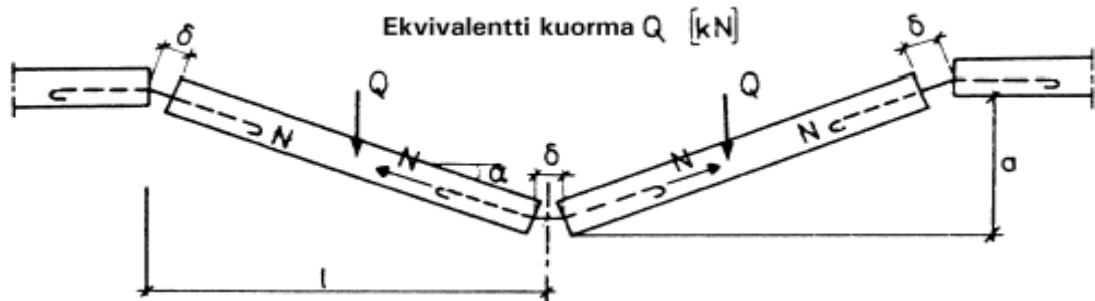
Kuva 12. Plastiset nivelet syntyvät rakenteiden välisiin liitoksiin. Alimman kerroksen pilari on oletettu vaurioituneeksi. [10, s. 5.]

Koska korvaavan kantavan rakennesysteemin syntymisen edellytyksenä on, että rakenteiden liitoksiin voi syntyä plastisia niveliä, vaaditaan liitoksilta silloin normaalia suurempaa kestävyyttä. Poikkeuksena massiiviset rakenteet, jotka voivat pystyä kannattelemaan kuormat palkkina, jolloin plastisia niveliä ei synny. Kun alimman kerroksen pilari vaurioituu ja sen kantavuus putoaa, putoavat rakenteet, joita pilari kannatteli yllättäen alaspäin. Jotta rakenteet eivät romahtaisi putoamisen yllättävästä voimasta, vaaditaan rakenteiden liitoksilta erityisen suurta vetokapasiteettiä ja muodonmuutoskykyä. Putoamisesta aiheutuva kappaleiden liike-energia saadaan vaimennettua elementtisaumojen liitoksiin asennettavilla saumateräksillä. Suunnittelijan tehtävä on mitoittaa saumaterästen koko ja sijainti optimaalisiksi. [10, s. 5–6.]

Korvaavaan rakennesysteemiin voi kuulua myös rakenteita, jotka eivät normaalitilanteessa toimi kantavina rakenteina. Tällaiset rakenneosat ja niiden liitokset tulee mitoittaa kestäväksi niille onnettomuustilanteessa syntyvät rasitukset. [10, s. 5.]

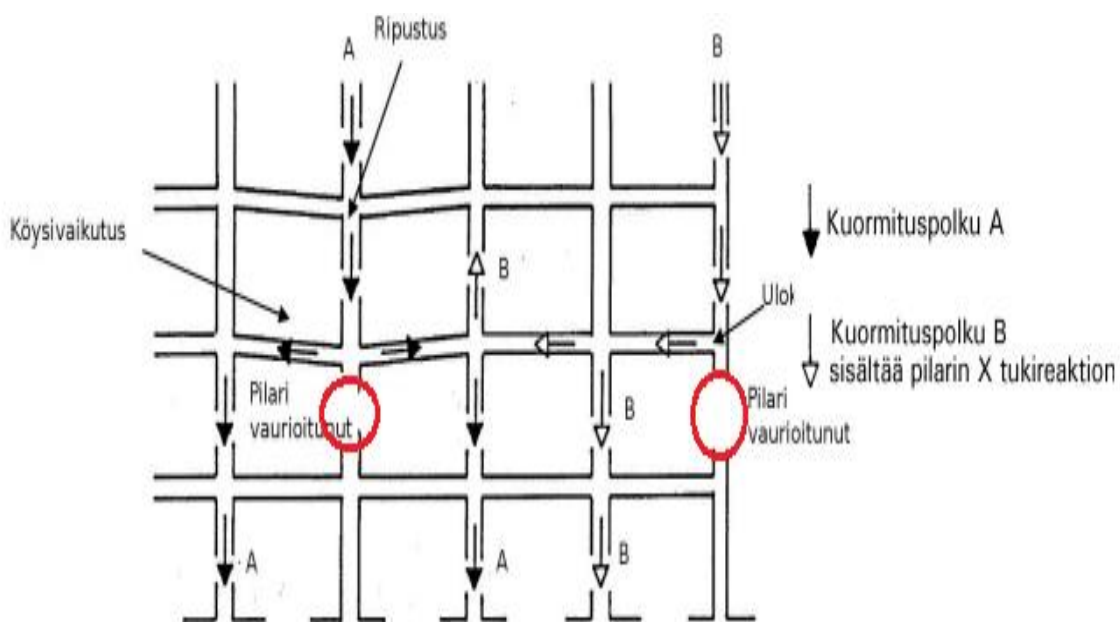
Korvaavan rakennesysteemin suunnittelun lähtökohtana on, että onnettomuustilanteesta jäljelle jäävä kantavarakenne pystyy saavuttamaan stabiileetin suurten muodonmuutosten ja kuormien siirtymien kautta. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että vaikka joitakin kantavan rakenteen osia vaurioituisi onnettomuuskuormasta johtuen kantokyvyttömiksi, pystyvät muut rakenneosat saavuttamaan nopeasti

voimatasapainon ja kestävät niille yllättävästi siirtyvät lisäkuormat sortumatta ja kaatumatta. Elementit, jotka tukeutuivat vaurioituneeseen rakenteeseen jäävät roikkumaan vain liitostensa varaan. [10, s. 5–6.]



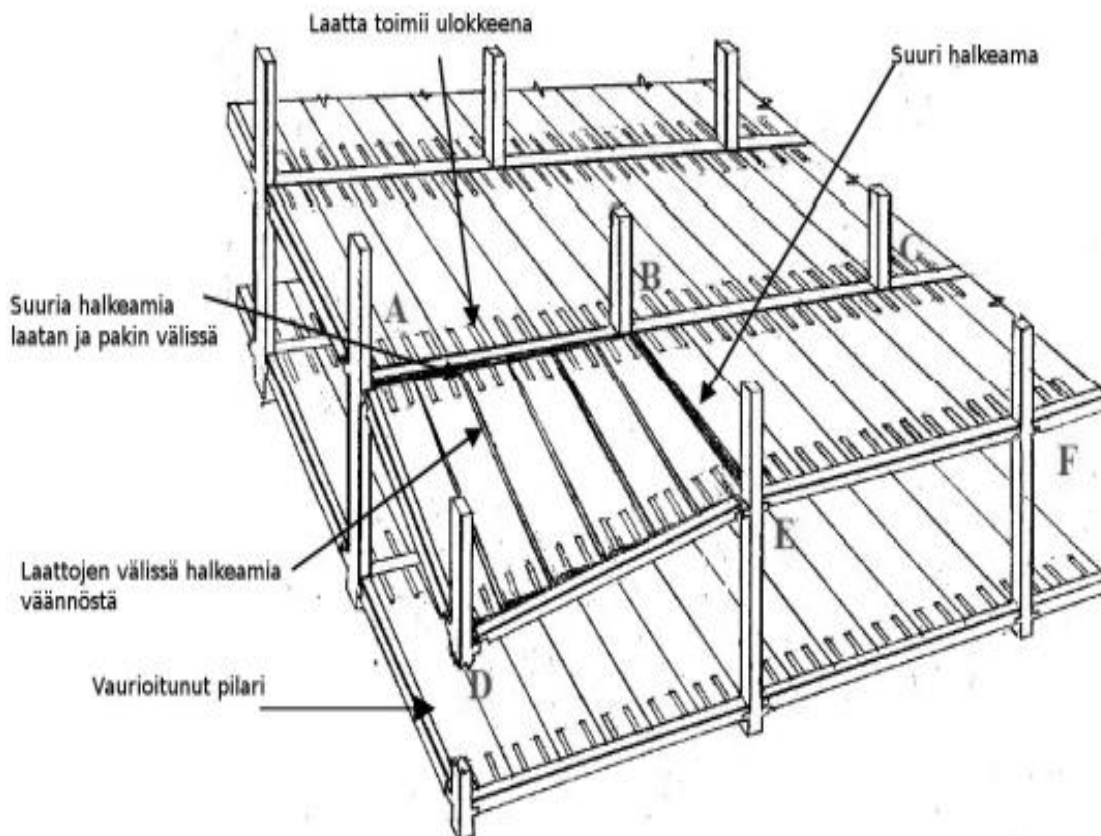
Kuva 13. Elementit roikkuvat vain liitostensa varassa kun niiden alta on vaurioitunut niitä kannatteleva rakenneosa. [10, s. 10.]

Jotta korvaavan rakennesysteemin toimintaa voidaan tarkastella, täytyy rakenteelle simuloida onnettomuustilanne, jossa yksi rakennusta tukevista rakenteista vaurioituu eli poistuu käytöstä. Tämä tapahtuu mallintamalla koko kantava rakenne ja poistamalla sitten yksi rakenneosa kerrallaan käytöstä jonka jälkeen tutkitaan mitä vaurioita kyseisen rakenneosan poistaminen aiheuttaa rakennukselle. Samalla arvioidaan myös mahdollisen vaurioitumisalueen laajuutta ja tutkitaan miten kuormat siirtyvät vaurioituneilta rakenteilta korvaavalle rakennesysteemille. Korvaava rakennesysteemi mitoitetaan näiden onnettomuustilanteen jälkeisten pysyvien ja muuttuvien kuormien mukaan. [10, s. 5–6.]



Kuva 14. Esimerkki korvaavan rakennesysteemin kuormien siirtymisreiteistä. Kaikki liitokset on suunniteltu muuttuvan plastisiksi niveliksi onnettomuustilanteessa. [10, s. 6.]

Korvaavaa rakennesysteemiä suunniteltaessa on huomioitava, että kun pystykuormia vastaanottavia rakenneosia poistetaan käytöstä, siirtyvät pystykuormat suurelta osin vaakavoimiksi, jos rakenne ei siirrä voimia palkkirakenteena. Nämä syntyvät vaakavoimat saadaan siirrettyä jäykistävillä pystyrakenteille vain vaakarakenteiden välityksellä. Näitä vaakarakenteita kutsutaan jäykistäviksi levyrakenteiksi ja sellaisena voi toimia esimerkiksi välipohjalaatasto. Jotta kuormat voivat siirtyä pystyrakenteille, täytyy jäykistävien levyrakenteiden säilyä yhtenäisinä. Kestävien liitosten ansiosta vaakarakenteisiin voi syntyä suuriakin muodonmuutoksia, mutta ne kestävät romahtamatta ja kuormat pääsevät siirtymään niitä pitkin jäykistävillä rakenteille. Vaakarakenteet toimivat ns. köysirakenteina ja ottavat vastaan sekä veto- että puristusvoimaa. Elementtien välisten liitosten suuretkin halkeilut ja muodonmuutokset ovat sallittuja, kunhan liitos kestää ja pystyy siirtämään vaakakuormia jäykistävillä rakenteille, pois vahinkoalueelta. [10, s. 10–12.]



Kuva 15. Välipohjalaatasto toimii jäykkänä levyrakenteena, jota pitkin onnettomuustilanteessa syntyvät vaakakuormat siirtyvät jäykistäville pystyrakenteille. [10, s. 12.]

## 7.2 Liitosten mitoitus

Rakenteiden liitoksia suunniteltaessa tulee noudattaa periaatetta, että liitosten täytyy kestää myös poikkeukselliset kuormitus- ja onnettomuustilanteet. Mikäli, liitoksia ei ole suunniteltu kestävään esimerkiksi onnettomuuskuormasta aiheutuvia kuormituksen muutoksia voi pahimmassa tapauksessa paikallisena vauriona alkanut tilanne laajentua jatkuvan sortuman myötä jopa koko rakennuksen sortumiseen. [10, s. 2.]

Paikallisen vaurion aiheuttajia voi olla monia, mutta vain ennakoitavissa olevat onnettomuuskuormat voidaan ottaa huomioon suunnittelussa. Ennakoimattomia vaurion aiheuttajia voivat olla esimerkiksi perustusten ennakoimaton painuminen ja elementtien putoaminen alempana olevien rakenteiden päälle esimerkiksi poikkeuksellisista lämpö- ja kosteusliikkeistä tai asennusaikaisesta virheestä johtuen. [10, s. 2.]

Eurokoodi määrää, että elementtien liitokset tulee suunnitella siten, että paikallisesta vauriosta ei pääse syntymään jatkuvaa sortumaa. [10, s. 2.]

Tunnettujen onnettomuuskuormien aiheuttamat paikalliset vauriot otetaan liitosten suunnittelussa aina huomioon. Tämän lisäksi SFS-EN 1991-1-7 osassa asetetaan liitosten suunnittelulle vaatimuksia ennakoimattomista onnettomuustilanteista aiheutuvien riskien pienentämiseksi hyväksytylle tasolle. Ennalta arvaamattomien onnettomuustilanteiden riskien pienentämiselle suunnitteluohjeissa annetaan kaksi eri tapaa. Ensimmäinen tapa pyrkii siihen, ettei paikallista vauriota pääse edes tapahtumaan, jolloin sortumisvaaraa ei pääse syntymään. Toinen huomattavasti monimutkaisempi, mutta joskus taloudellisempi tapa pyrkii paikallisesti vauriosta aiheutuvan sortuman hallitsemiseen siten, että koko rakennuksen stabiiliteetin menetys ei ole vaarassa. [10, s. 3.]

Jatkuva sortuma voidaan todeta rajoitetuksi kun elementtien väliset liitokset suunnitellaan SFS-EN 1991-1-7:n ja Betoninormikortti 23: Liitosten mitoitus onnettomuuskuormille mukaan. [10, s. 13.]

Elementtien välisten liitosten mitoituksesta on tehty liitteeksi selventävä laskentaesimerkki. Laskentaesimerkki on erittäin karkea eikä sitä tule käyttää apuna oikeassa suunnittelussa. Esimerkkilaskun tarkoitus on vain havainnollistaa liitosten mitoituksen laskennan kulkua ja selventää eurokoodin ohjeistusta rakenteiden liitosten mitoituksesta onnettomuuskuormille.

## **8 Jatkuvan sortuman estämisen suunnittelu haastavassa rakennuskohteessa**

Jatkuvan sortuman huomioiminen suunnittelussa korostuu haastavissa rakennushankkeissa. Rakennushankkeesta voi tehdä haastavan moni ulkoinen tekijä, kuten esimerkiksi sijainti lähellä vesialuetta, jossa mahdolliset tulvat tuovat vaikeutta suunnitteluun. Toisaalta rakennus voi myös sijaita sisämaassa, mutta alueen seismisyydestä johtuen maanjäristykset voivat olla todellinen uhka. Yleisimmin rakennushankkeesta tekee kuitenkin haastavan rakennuksen koko tai monimutkaiset rakenteet. Etenkin korkeissa rakennuksissa jatkuvan sortuman huomioiminen tulee olla erittäin tarkkaan mietitty, sillä seuraukset laiminlyönneistä tulisivat olemaan suuret. [12.]

Tämä opinnäytetyön osio keskittyy jatkuvan sortuman suunnittelun avaamiseen oikeassa rakennushankkeessa. Osion tarkoituksena on havainnollistaa kuinka jatkuva sortuma huomioidaan oikeassa rakennesuunnittelukohteessa. Esimerkkikohte on erittäin korkea tornitalo ja siten erittäin haastava suunnittelukohte, jossa jatkuvan sortuman huomioimiseen on jouduttu käyttämään paljon suunnitteluresursseja. [12.]

## 8.1 Alustava riskiarvio

Haastavissa rakennushankkeissa hankkeen vastaava rakennesuunnittelija laatii erityismenettelyohjeen mukaisen alustavan riskiarvion, joka tulee toimittaa rakennusvalvontaan viimeistään rakennuslupaa hakiessa. Esimerkki kohteen tapauksessa alustava riskiarvio toimitettiin rakennusvalvontaan jo hyvissä ajoin etukäteen, koska tiedettiin hankkeen laajuudesta johtuen, kaikkien rakennusvalvontaan toimitettavien asiakirjojen tarkastusten vievän paljon aikaa.

Alustavassa riskiarviossa ehdotettiin kohteelle erityismenettelyiksi riskianalyysiä sekä suunnitelmien ulkopuolisia tarkastuksia. Riskianalyysin osaksi ehdotettiin tarkennuksia siihen, miltä osin suunnitelmien ulkopuolinen tarkastus tulisi olla tarkennettua. Arviossa todetaan, että tarkennetut tarkastuksen tulevat luultavasti liittymään hankkeessa käytössä oleville tavallisesta poikkeaville haastaville rakenneratkaisuille sekä ennakoimattomia onnettomuuskuormia huomioiville rakennesuunnitelmille. [12.]

Riskiarviossa todetaan hankkeen erityisiksi rakennushaasteiksi sen pitkä rakennusaika sekä se, että kohteen sijainnin takia rakennusalueen tulee olla käyttökelpoinen ainakin liikenteen osalta myös rakentamisen aikana. [12.]

Suunnittelun kannalta kohteesta tekee haastavan sen poikkeuksellinen korkeus ja normaalista arkkitehtuurista poikkeavat muodot. Rakenteissa tulee olemaan myös betoniliitto rakenteita, joiden suunnitteluun tulee aina kiinnittää erityistä huomiota. [12.]

Rakennuksen korkeuden takia myös tuulikuorman huomioimiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Varsinkin rakenteiden jäykistäminen tulee olemaan haasteellinen. Koska tornirakennukseen tulee asumiskäyttöön tarkoitettuja huoneistoja, täytyy rakenteiden vaakajäykistys ja äänieristävyys olla kunnossa mukavuus syistä. Rakennusaikaiseen tuentaan tulee korkeissa rakennuksissa perehtyä erityisen tarkkaan.

Tuulikuorman vaikutus on huomattava kun vasta osa tornin jäykistävästä rakenteista on pystyssä.

Alustavassa riskiarviossa todetaan esimerkki rakennushankkeen kokonaisuutena kuuluvan korkeimpaan riskiluokkaan CC3, mutta jotkin rakennusten osat tulevat kuulumaan alempiin luokkiin CC1 ja CC2. Näihin otetaan kantaa erikseen suunnittelun edetessä pidemmälle. [12.]

## 8.2 Riskianalyysi

Haastavissa suunnittelukohteissa tulisi panostaa kattavan riskianalyysin tekoon aina. Riskianalyysin teko on kuitenkin pakollista vain hankkeissa, joihin se määrätään tehtäväksi rakennusvalvonnan toimesta. Suomessa on käytäntö, että viimeistään rakennuslupaa hakiessa rakennusvalvontaan toimitetaan, yleensä rakennesuunnittelijoiden laatima alustava riskiarvio, jossa otetaan kantaa hankkeen vaativuudesta ja annetaan omat suositukset erityismenettelytoimenpiteistä, joita kohteessa olisi syytä käyttää. Rakennusvalvonta tekee lopullisen päätöksen erityismenettelyistä ja niiden laajuuksista. Koska kohde on erittäin korkea ja haastava rakennuskohde määräsi rakennusvalvonta kattavien riskianalyysien tekemisen pakolliseksi.

Riskianalyysien tekoa varten suunnittelutoimisto loi työryhmän johon kuuluu kohteen suunnittelusta vastaavia rakennesuunnittelijoita sekä ulkopuolinen riskianalyysi asiantuntija. Ulkopuolinen asiantuntija hankittiin varmistamaan, että kohteen riskianalyysi tulee olemaan kattava ja samalla ulkopuolisen tarkastama. [12.]

Riskianalyysin tekoa varten on suomen rakennusinsinöörien liitto laatinut viidestä pääkohdasta koostuvan kysymyslistan. Kysymyslistan läpi käymällä voi työryhmä kartoittaa hankkeelle ne kohdat, joissa työryhmän mielestä riski on koholla. Kysymyslistan toimintaperiaate on yksinkertainen. Työryhmä vastaa jokaiseen kysymykseen arvioimalla kysymyksen riskin suuruutta numeroarvolla 1, 2 tai 3. Arvo 1 toteaa riskin olevan niin pieni, että siihen ei tarvitse puuttua. Arvo 2 tarkoittaa lievästi kohonnutta riskiä, jolloin tulisi pohtia toimenpiteitä, joilla kyseinen arvo saataisiin laskettua arvoon 1. Arvo 3 tarkoittaa erittäin kohonnutta riskiä, joka johtaa

automaattisesti toimenpiteisiin riskin pienentämiseksi ainakin arvoon 2, mutta tavoitteena tulisi aina olla arvo 1 eli pienin mahdollinen riskinarvo. [12.]

Työryhmässä todettiin heti alkuun, että koska suunnittelu on edelleen kesken ja koska joitakin tavaran toimittajia ei ole vielä valittu, ei kysymyslistaa voida käydä kokonaisuudessaan läpi. Työryhmässä päätettiin käydä läpi riskianalysikyselyn osat 1-3, jotka tähän mennessä saatavilla tiedoilla voidaan käydä läpi riittävällä tarkkuudella. Läpikäytävät osiot liittyvät organisaatioon, kuormituksiin ja rasituksiin sekä suunnitteluun liittyviin riskeihin. Osiot, joita ei voitu vielä käydä läpi puutteellisten lähtötietojen takia liittyvät valmistuksen sekä kuljetuksen ja asennuksen aikaisiin riskeihin. [12.]

#### 4. VALMISTUS

**OHJE:** RL = Riskiluku

RL = 1 => Riski ei ole koholla, RL = 2 => Riski on hieman koholla RL = 3 => Riski on selvästi koholla!

Nro	RL	Kysymys
4.1		Käytetäänkö rakenne-elementtien liitoksissa rakenteita, joiden toiminnasta on aiempaa kokemusta ja/tai testituloksia?
4.2		Onko hitsausliitoksista, joiden hyväksikäyttöaste on yli 50 %, laadittu luettelo ohjeen B7 (standardin SFS 2373) mukaisesti.
4.3		Onko ruuviliitokset varmistettu mutterien löystymiseltä (aukikiertyminen)?
4.4		Onko suunnittelijan kanssa sovittu, kuinka tehdään jatkosten laippojen hitsausliitosten mitoitus, ja laadunvarmistus?
4.5		Onko rakenteiden valmistaja ennen tehnyt vastaavanlaisia rakennustuotteita/-osia?
4.6		Onko vakioliitoksien suunnittelussa tarkastettu vakioteräsosien yhteensopivuudet (siltä varalta jos poiketaan suunnitelmista)?

Kuva 15. Ote suomen rakennusinsinöörien liiton laatimasta riskianalyysi kysymyslistan valmistus osiosta. [12.]

Koko kysymyslistassa on n.100 kysymystä, jotka pitää kaikki käydä tarkkaan läpi, jotta riskianalyysi on luotettava. Riskin oikea arvio on koko kysymyslistan perusta, jos kysymyksiin ei paneuduta kunnolla, tulee riskille annettua arvo helposti liian kevyin perustein. Tällöin jotkin hankkeelle oleelliset riskit jäävät kokonaan huomioimatta, koska työryhmä tulee jatkossa pohtimaan ratkaisuja vain kohtiin, joissa on aikaisemmin todettu lievää (2) tai selvästi kohonnutta (3) riskiä. Riskianalyysiä tehtäessä tärkeintä onkin varata sille riittävästi aikaa. [12.]

Työryhmän ensimmäinen tehtävä on tunnistaa kysymyskohdat, joissa riskin todetaan olla kohdalla. Ryhmän seuraava tehtävä on pohtia ratkaisuja ja keinoja, joilla riskiarvot saataisiin laskettua hyväksyttävälle tasolle. [12.]

Esimerkki kohteelle työryhmä halusi myös, että työturvallisuuteen kiinnitetään erityistä huomiota työmaan laajuuden ja rakennusaikaisen siviiliikenteen takia. Työryhmä totesi työturvallisuuden kriittiseksi kehitys kohdiksi tiedonsiirtymisen rakennushankkeen eri osapuolten välillä sekä asennuskokonaisuuksien läpi käymisen yhdessä urakoitsijoiden ja suunnittelijoiden kanssa. Suunnittelijat tulevat rakennushankkeen aikana muutenkin olemaan huomattavasti enemmän läsnä työmaalla ja työmaakokouksissa kuin normaalisti. Rakennustyömaalle valittiin turvallisuuskoordinaattori, jonka tehtävä on pitää huoli työturvallisuuden tasosta. [12.]

Rakennushankkeen laajuuden ja monimutkaisuuden takia suunnitteluryhmässä todettiin kysymyslistassa olevan puutteita. Varsinkin suunnittelu osion kysymyslista oli liian suppea kyseiseen hankkeeseen. Työryhmä pohti mahdollisia suunnittelun riskejä, joita kysymyslista läpikäymällä ei normaalisti tulisi huomioitua. Työryhmän pohtimat riskit lisättiin listaan ja niiden riski arvioitiin samalla tavalla arvoin 1-3. [12.]

3.30	<b>2</b>	TM4: Onko huolehdittu kalliokaivannon tiiveys merivesivuotoja vastaan? + toimenpiteet suunniteltu
3.31	<b>2</b>	TM5: Onko betonin valmistuksessa varmistettu betonin vähimmäislujuus? + toimenpiteet: kokeiltava valmiista rakenteesta (ohje!)
3.32	<b>2</b>	TM7: Onko sovittu riittävän kattavasta laadunvalvontamenettelystä betonin osalta? + suunnittelijan ja viranomaisen vaatimukset huomioon ottava ohje laaditaan

Kuva 16. Esimerkkejä työryhmän itse pohtimista riskitekijöistä esimerkki kohteessa. [12.]

3.15	<b>2</b>	Onko selvitetty rakenteiden värähtelyt?
------	----------	---

Kuva 17. Esimerkki kysymyslistan perusteella havaitusta kohonneesta suunnitteluosion riskistä. [12.]

Kysymyslistan läpikäytyä työryhmän tehtäväksi tulee miettiä ratkaisuja ja keinoja kohonneiksi todettujen riskikohtien riskin pienentämiseksi. Esimerkki kohteessa työryhmä pohti onko rakenteiden värähtelyyn perehdytty riittävällä tarkkuudella. Työryhmä pohtii miltä rakenneosin värähtelyä tulisi tutkia tarkennetusti. Ratkaisut kerätään liitteeseen, johon on kerätty kysymyslistan kaikki kohdat, joissa kohonnutta

riskiä arvioitiin olevan. Liitteessä esitetään ratkaisut riskin pienentämisiin kohta kohdalta. [12.]

3.15	Tornien ja alapuolisten rakenneosien rajapinnat ja niiden dynaaminen kestävyys tulee selvittää tarkasti (konsentraatiot)
------	--

Kuva 18. Esimerkki työryhmän ratkaisusta rakenteiden värähtelyyn liittyvän suunnitteluriskin pienentämiseksi. [12.]

Lopuksi työryhmä loi vielä aikataulun puutteellisen riskianalyysin päivittämisestä. Aikataulutus seuraa työmaan etenemisen aikatauluja. Riskianalyysiä päivitetään sitä mukaan, kun rakennushanke ja suunnitelmat etenevät, ja tarvittavat tiedot riskianalyysin puuttuvien osioiden tekemiseen ovat saatavilla. [12.]

## 9 Jatkuvan sortuman estäminen suunnittelulla

Luvussa viitattava esimerkki suunnittelukohde on edelleen sama erittäin haastava CC3 luokkaan kuuluva poikkeuksellisen korkea tornirakennus. Osa tornin rakenteista kuuluu kuitenkin luokkaan CC2, joka näiden rakenteiden osalta helpottaa suunnittelua hieman.

Perusteet jatkuvan sortuman estämiselle saadaan Eurokoodin osasta SFS-EN1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet, jonka luvussa 2 on määritetty vaatimukset rakenteiden kestävyydelle niiden käyttöön ajaksi. Lisäksi Eurokoodin osassa SFS-EN1991-1-7 on ohjeita jatkuvan sortuman estämiseksi sekä ohjeet yleisien onnettomuuskuormien huomioimisesta.

Kohteen korkeat rakennukset kuuluvat toimenpideluokkaan 3. Toimenpideluokka määräytyy SFS-EN1991-1-7 taulukon A.1 mukaan. Toimenpideluokka määrittää suositeltavat jatkuvan sortuman estämistoimenpiteet. [13.]

## 9.1 Jatkuvan sortuman estäminen rakenteellisin ratkaisuin

Kohteen rakenneratkaisuja on jouduttu miettimään tarkkaan juuri jatkuvan sortuman estämisen takia. Rakennesuunnittelussa ei missään nimessä haluttu lähteä tutkimaan rakenteiden poistamisen vaikutuksia muihin rakenteisiin eli avainasemassa olevan rakenneosan suunnittelumenetelmää. Avainasemassa olevan rakenneosan toimintamalli toimii tutkitusti hyvin vain yksinkertaisille rakennemalleille, joten tässä monimutkaisessa korkeassa rakennushankkeessa ei haluttu ottaa riskiä siitä, pystytäänkö tällaiset monimutkaiset rakenteet mallintamaan oikein, jotta analyyseista saataisiin riittävän tarkkoja tuloksia korvaavan rakennesysteemin suunnittelemiseen. Lisäksi kohteen rakenteet ovat suunniteltu niin, ettei tilannetta, jossa rakenteen osa joutuisi yksin vastaanottamaan ennakoimattomia rasituksia pääse syntymään, vaan rasituksen jakautuvat useammille osille. [13.]

Korvaavan rakennesysteemin suunnittelumallin sijaan rakenteiden suunnittelussa on pyritty pienentämään rakenteiden sortumavaaraa hyväksyttävälle tasolle tai poistamaan sortumisvaara kokonaan. Tämä onnistuu valitsemalla esimerkiksi pilarit jatkuviksi. [13.]

Kun kaikki kantavat pilarit ovat vähintään kahden kerroksen korkuisia jatkuvia liittopilareita, on niiden kantavuuden menetys sivuttaisista kuormista lähes mahdotonta. Kun päällekkäiset pilarit hitsataan vielä yhteen jatkohitsauksin, eivät pilarit voi siirtyä asemistaan, koska ne ovat jatkuvasti vähintään toisesta päästä jäykästi kiinni. Lisäksi jatkuvat pilarit tarkoittavat, että yhdelle pilarille tulee huomattavasti suurempi määrä pystykuormaa. Tämä taas lisää pilarien poikittaiskuormien kestävyttä, sillä mitä suurempi pystyrakenteiden normaalivoima on, sitä suurempi täytyy pystyrakennetta sijoiltaan puskevan vaakakuorman olla. Suuri normaalivoima takaa, ettei pilariin pääse syntymään vetojäännityksiä. [13.]

Kantavien palkistojen osalta kohteessa on jouduttu myös tekemään järkeviä rakenteellisia ratkaisuja jatkuvan sortuman huomioimiseksi. Koska kohteen palkkijaot ja jännevälit ovat paikoin hyvinkin pitkiä, ylittyy eurokoodissa määrätty 100m<sup>2</sup> sortumisalue joillain kohdin. Alue määräytyy eurokoodin ohjeiden mukaan alkusortumasta. Jos yksi palkki pettää, niin kuinka iso alue palkin kannattelevia rakenteita sortuu. Tässä tapauksessa palkistot kannattelevat ontelolaatastoja. Näiden alueiden palkit suunnitellaan siten, että 100m<sup>2</sup> sortuma-alue ei ylity. Ratkaisu voisi olla esimerkiksi palkkijaon pienentäminen näiltä sortuma-alueilta, mutta esimerkkikohteen tapauksessa

tämä ei ollut mahdollista. Kohteessa päädyttiin kahteen muuhun eurokoodin hyväksymiin tapoihin sortuma-alueen pienentämiseksi. [13.]

Sortuma-alueen rajoittamiseksi toimenpide luokan 2b alueella palkkeihin suunnitellaan EN1991-1-7 määäämät vaakasidonat. Vaakasidonnan laskentakuormana käytetään eurokoodista löytyvistä kuormista 20kN/m tai 70kN suurempaa arvoa. Vaakasidontojen tarkoitus on estää palkin kannattelemien ontelolaatastojen sortuminen, mikäli niitä kannatteleva palkki pettää. [13.]

Toimenpideluokka 3 yli 100m<sup>2</sup> sortuma-alueen ylittävien palkkien osalta päädyttiin lisäksi tehostettuihin, ainetta rikkomattomiin tarkastuksiin palkkien hitsien osalta. Kriittiset liitosalueiden hitsit tullaan tarkastamaan 100-prosenttisella varmuudella ja palkkien ylä- ja alalaippojen hitsit tullaan tarkastamaan palkkityyppien edellyttämillä tarkastuslaajuuksilla. Tarkastuksen laajuus merkitään rakennesuunnitelmiin. [13.]

## 9.2 Jatkuvan sortuman riskin pienentäminen laadunvalvonnalla

Rakennustöiden ja suunnittelun laadunvalvonnalla on merkittävä osa ennakoimattomien onnettomuuskuormien syntymisen riskin pienennyksessä. Kun rakennustöiden, elementtien asennusten ja suunnitelmien valvonta on kattavaa ja laadukasta voidaan rakennushankkeessa luottaa siihen, että yllättäviä onnettomuuskuormia ei pääse syntymään esimerkiksi suunnitteluvirheistä tai rakenteiden sortumisista asennusaikana. [13.]

Varsinkin asennusaikaiset stabiliteetin menetykset ovat erityisen vaarallisia, koska kaikki rakennusta jäykistävät osat eivät ole vielä asennettuna vaan jäykistys hoidetaan osin tilapäisin asennusaikaisin tuennoin. Rakenteet ovat siis asennusaikana erityisen herkkiä jatkuvan sortuman syntymiselle. Tällaisten asennus aikaisten ennakoimattomien onnettomuuskuormien riskin voidaan eurokoodin mukaan katsoa olevan huomioitu asennustöiden aikaisella valvonnalla. Esimerkkikohteessa valvonta toteutetaan käytännössä siten, että suunnittelijat käyvät itse työmaalla tarkastamassa asennettavia raudoituksia eivätkä valutyöt voi työmaalla jatkua ilman suunnittelijan hyväksyntää. Lisäksi suunnittelijat seuraavat työmaan etenemistä ja muita asennustöitä. Työmaalla on käytössä laatukansio jälkiseurantaa varten, johon kirjataan kaikki suoritettut tarkastukset ja niissä havaitut mahdolliset puutteet. [13.]

Rakennesuunnittelun osalta laadunvalvonta esimerkkikohteessa lähtee liikkeelle jo riskianalyysi vaiheesta. Riskianalyysin avulla kartoitetaan juuri kyseiselle rakennuskohteelle oleellisia ennakoimattomia uhkia. Riskianalyysin pohjana käytetään Rakennusinsinöörien liiton laatimaa riskianalyysimallia, jota on vielä muokattu soveltumaan paremmin korkeaan rakentamiseen. Riskianalyysi prosessin laadunvarmistamiseksi riskianalyysi työryhmään palkattiin vielä ulkopuolinen asiantuntija varmistamaan, että tämänkin työvaiheen laadunvalvonta on ensiluokkaista. Koska esimerkin rakennushanke tulee kestävänsä pitkään, tullaan myös riskianalyysiprosessia jatkamaan koko suunnittelu- ja rakennusvaiheen ajan. Työryhmä tulee kokoontumaan rakennushankkeen edetessä workshop-istuntoihin pohtimaan seuraavien työvaiheiden riskejä ja ratkaisuja riskien pienentämiseksi. [13.]

Itse rakennesuunnittelun osalta esimerkki kohteessa on käytössä laaja ulkopuolinen suunnitelmien tarkastus. Ulkopuolisia tarkastajia on nimetty erikseen rakennushankkeen eri rakenteille ja rakennusfysiikan osioille. Useampi ulkopuolinen tarkastaja takaa tämänkin kokoisessa rakennushankkeessa rakenteiden kestävyden. Kommunikointiin ulkopuolisten tarkastajien ja suunnittelijoiden kesken on kiinnitetty huomiota, jotta voidaan taata, että tieto mahdollisista muutoksista suunnitelmiin liikkuu esteettä. Ulkopuoliset tarkastajat pidetään jatkuvasta ajan tasalla suunnitelmien etenemisistä ja seuraavista suunnitteluaiheista. Ulkopuoliset tarkastajat tekevät lisäksi omia rakennusfysikaalisia laskelmia korkeiden tornirakenteiden osalta. Näitä laskelmia vertaamalla suunnittelijoiden omiin laskelmiin voidaan varmistua laskelmien tarkkuudesta. [13.]

Lisävarmuutta kaikille pystyrakenteille tuo CC3 seuraamusluokan varmuuskerroin  $k_{f1}$ , joka CC3 luokan rakenteiden kuormille on 1,1. Tätä kerrointa käytetään suunnittelussa tornirakennuksen kaikille pystyrakenteille. Lisävarmuudeksi rakenteille, jätetään myös eurokoodin mukaiset kerrosvähennykset huomioimatta hyötykuormille. Pystyrakenteiden osalta varaudutaan kaikkialla siis täysin hyötykuormiin, joka edelleen lisää rakenteiden kuormakestävyden varmuutta. [13.]

Lopuksi rakenteiden suunnittelussa on vielä huomioitu materiaalivalinnat. Tornin kaikki rakenteet ovat suurelta osin paikalla valettua betonia, joka omaa huomattavasti paremmat sitkeysominaisuudet kuin elementtivalmisteet. Sitkeyden ansiosta rakenteet kestävät mahdolliset ennakoimattomat kuormitustilanteet paremmin kuin elementtirakenteet. Sitkeyden ansiosta rakenteisiin voi tulla huomattavia

muodonmuutoksia, mutta rakenteet tulevat kestävänsä nopeasti kuormitustilanteiden muutokset sortumatta. [13.]

## **10 Avainasemassa olevan rakenneosan suunnittelumenetelmä**

Avainasemassa olevan rakenneosan suunnittelumenetelmä on erinomainen jatkuvan sortuman estämisen suunnitteluperiaate yksinkertaisille rakenteille. Menetelmän rakenneanalyysit toimivat perustana korvaavan rakennesysteemin suunnittelulle. Yksinkertaisille rakenteille etuna on, että analysoimalla niitä avainasemassa olevan rakenneosan suunnittelumenetelmällä tullaan helposti lopputulokseen, että jatkuvan sortuman vaaraa ei ole, eikä sen huomioimiseksi näin ollen lisätoimenpiteitä rakennesuunnittelun osalta tarvita.

Yksinkertaisissa suunnittelukohteissa rakenteet voidaan suunnitella usein niin, että jatkuvan sortuman estämiseksi ei tarvita mitään erityistoimenpiteitä. Suunnittelemalla rakenteet jatkuviksi ja liitoksia välttämällä saadaan yksinkertaisesta rakennemallista usein jo pelkästään materiaalivalinnoilla riittävän sitkeä jatkuvan sortuman estämiseksi. Materiaalivalinnassa huomioitavaa on, että paikallavalurakenteet ovat aina sitkeämpiä kuin elementtirakenteet.

Avainasemassa olevan rakenneosan suunnittelumenetelmän ongelmat alkavat rakenteiden muuttuessa monimutkaisemmiksi. Monimutkaisten rakenteiden analysointi tarkasti on hankalaa ja korvaavaan rakennesysteemin suunnittelemisesta tulee epävarmaa. Herää kysymyksiä kuten, pystytäänkö nykyaikaisilla laskentaohjelmilla laskemaan riittävän tarkasti mille rakenteille kuormat siirtyvät, kun avainasemassa oleva rakenne poistetaan. Koska koko suunnittelumenetelmän perusta on juuri analysoida laskennallisesti kuinka paljon muiden rakenteiden kuormat kasvavat yhden rakenteen osan poistuessa systeemistä, eivät tämän tyyppiset epävarmuudet voi olla sallittuja suunniteltaessa rakenteita jatkuva sortuma huomioiden.

Suunnittelumenetelmällä voidaan siis analysoida yksinkertaisia ja vähäisiä kuormia kannattelevia rakenteita erittäin helposti, mutta rakenteiden muuttuessa monimutkaisemmiksi ja kuormien lisääntyessä, esimerkiksi rakennuksen koon ollessa poikkeuksellisen suuri, tulisi avainasemassa olevan rakenneosan suunnittelumenetelmää välttää jatkuvan sortuman suunnittelussa.

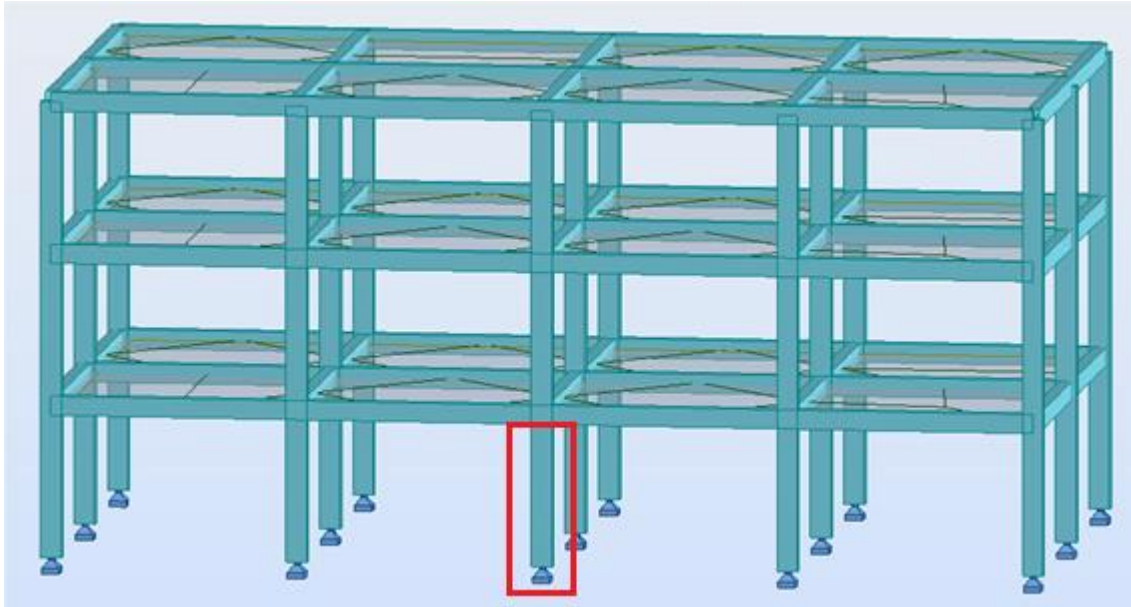
Haastavissakin suunnittelukohteissa on kuitenkin syytä tehdä avainasemassa olevan rakenneosan mallinnus. Malli antaa osviittaa kuormien suuruuksista ja ennen kaikkea kuormien suuruuksien muutoksista, joka on erittäin olennaista tietoa jatkuvan sortuman estämisen suunnittelulle.

Avainasemassa olevan rakenteen laskentamallin ajatus on yksinkertainen. Kohteen kantava rakennesysteemin tai useimmiten osa siitä, mallinnetaan johonkin käytössä olevaan rakennelaskenta ohjelmaan. Rakennesysteemille lisätään kuormat ja kuormitusyhdistelmät normaalisti ja laskenta ajetaan läpi. Seuraavaksi rakenteesta poistetaan jokin avainasemassa oleva kantava rakenne ja laskenta ajetaan uudestaan läpi. Ajatuksena on, että kyseinen poistettu rakenne olisi oletettu vaurioituneeksi onnettomuuskuorman johdosta ja on täten menettänyt kantavuutensa kokonaan. Laskennan tuloksena saadaan uudet kuormat rakenteille ilman vaurioitunutta osaa. Näitä tuloksia vertaamalla tulokseen, joka saatiin rakenteen ollessa ehjä, saadaan käsitys siitä kuinka paljon kuormat muilla rakenteilla lisääntyvät.

Jos rakenne on hyvin suunniteltu ja riittävän yksinkertainen, saavutaan usein tulokseen, että kuormat rakenteilla lisääntyvät, mutta muodonmuutokset ovat sen verta pieniä, että sortumavaaraa ei ole. Tällaisissa tapauksissa voidaan jatkuva sortuma todeta estetyksi ja sen suunnittelu päättyy tähän yksinkertaiseen mallinnukseen.

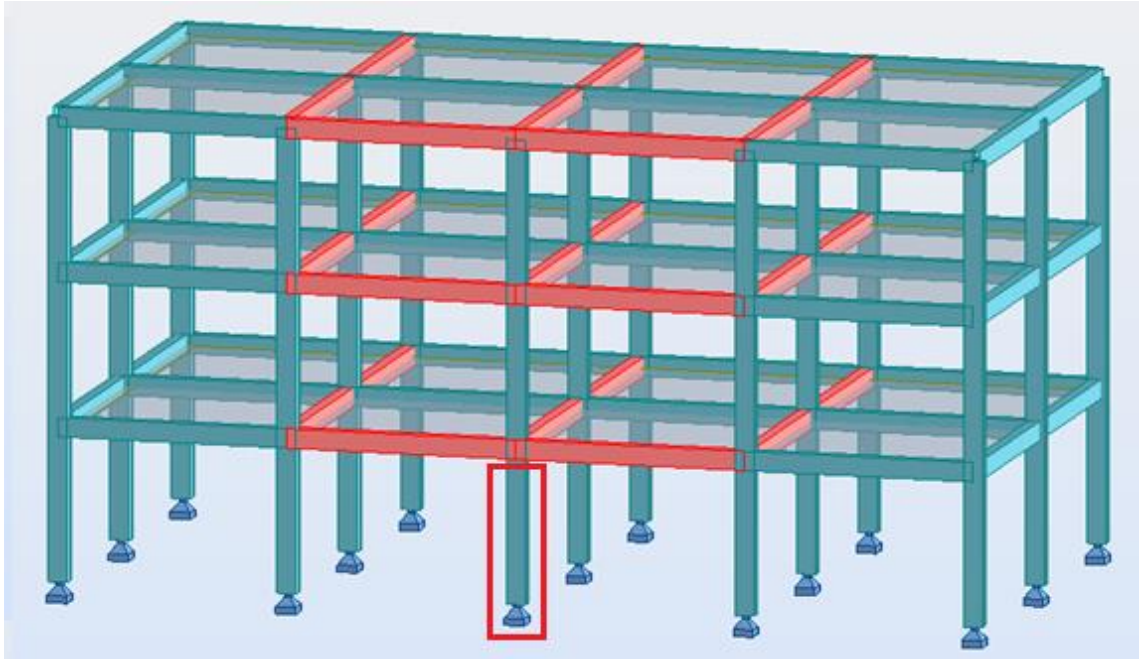
#### 10.1 Avainasemassa olevan rakenneosan suunnittelumenetelmän laskentamallit

Koska esimerkkikohteen rakenteet olivat monimutkaisia ja kuormat poikkeuksellisen suuria, ei kohteen suunnittelussa käytetty avainasemassa olevan rakenteen suunnittelumenetelmää. Kohteelle tehtiin vertailevat laskelmat kuitenkin vaurioituneen rakenteen toiminnan arvioimiseksi. Havainnollistaakseni suunnittelumenetelmän toimintaa, on tässä kappaleessa esitetty erittäin yksinkertainen rakennemalli ja sen kuormienmuutoslaskelmat Robot Structural Analysis ohjelmaa käyttäen.



Kuva 19. Laskennassa käytettävä rakennemalli, jossa kaikki rakenteet jatkuvia (RM1). Poistettavaksi rakenneosaksi on valittu etualalla olevan keskimmäisen pilarin alimman kerroksen 4 metriä korkea osuus. [14.]

Rakennemalli on yksinkertainen kehärakenne, jonka pilarit on jäykästi tuettuja. Kaikki pilarit ja palkit ovat teräsbetonia ja mitoiltaan identtisiä  $b \times h$ , 300 x 500 profiileja. Pilarit ovat 6 metrin etäisyydellä toisistaan sekä syvyys- että vaakasuunnassa. Kerroskorkeus on 4 metriä. Pitkän sivun jatkuvat palkit ovat pituudeltaan  $L=24\text{m}$  ja lyhyemmän sivun palkit  $L=12\text{m}$ . Raudoitukset määrät ovat ohjelmiston automaattisesti luomat minimiraudoitukset ja betonin lujuus on vain C12/15. Tasojen betonilaatustot ovat paksuudeltaan 300mm ja betonin lujuus sama C12/15. Laskentamallin kuormiksi on valittu yläkerroksessa vaikuttava lumikuorma  $2,5\text{kN/m}^2$  sekä välikerroksilla vaikuttava hyötykuorma  $2.5\text{kN/m}^2$ . Rakenteiden omanpainon ohjelma huomioi automaattisesti. Tuulikuormaa ei ole huomioitu.

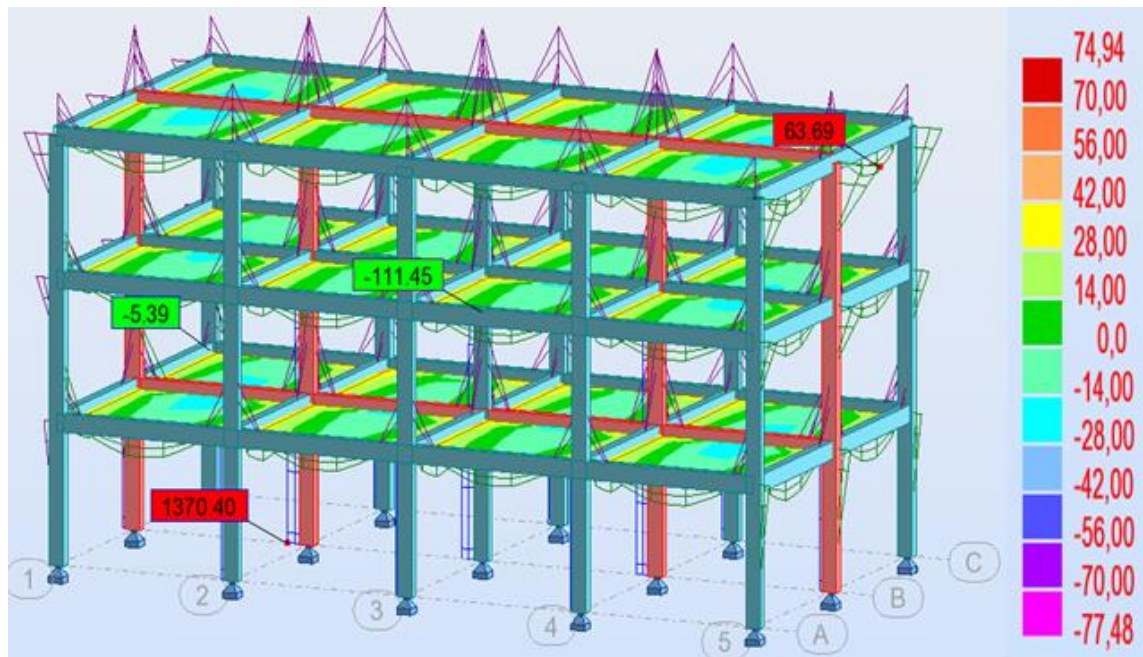


Kuva 20. Laskennassa käytettävä rakennemalli, jossa punaisella merkatut palkit ovat molemmista päistään nivelellisiä, 6 metriä pitkiä yksiaukkoisia rakenneosia (RM2). Poistettavaksi rakenneosaksi on valittu sama pilarin osa kuin aikaisemmassa mallissa. [14.]

Päistään niveloityjä palkkeja sisältävä rakennemalli on kuormiltaan, materiaaliominaisuuksiltaan sekä mitoiltaan täysin identtinen ainoastaan jatkuvia rakenteita sisältävän rakennemallin kanssa. Eri rakennemallien tarkoitus on näyttää, kuinka rakenteiden jatkuvuus vaikuttaa koko rakenteen toimintaan, kun avainasemassa oleva rakenneosia vaurioituu.

Laskennat tullaan pitämään yksinkertaisina, eikä esimerkiksi onnettomuustilanteessa mahdollista betonin halkeilua tulla huomioimaan laskennoissa. Tarkoitus on demonstroida vain kuormien siirtymisiä rakenteissa. Huomioitavaa on myös, että todellisuudessa rakenteiden rauditusvalinnat vaikuttavat merkittävästi kuormien jakautumisiin. Esimerkiksi jos liitokset suunnitellaan väärin, on mahdollista, että kuormat eivät pääse jakaantumaan eri rakenneosien kesken lainkaan. Tällöin tuloksena on helposti, vaurioituneen rakenneosan sortuminen. Näissä laskennoissa kuormat pääsevät siirtymään optimaalisesti rakenneosilta toisille.

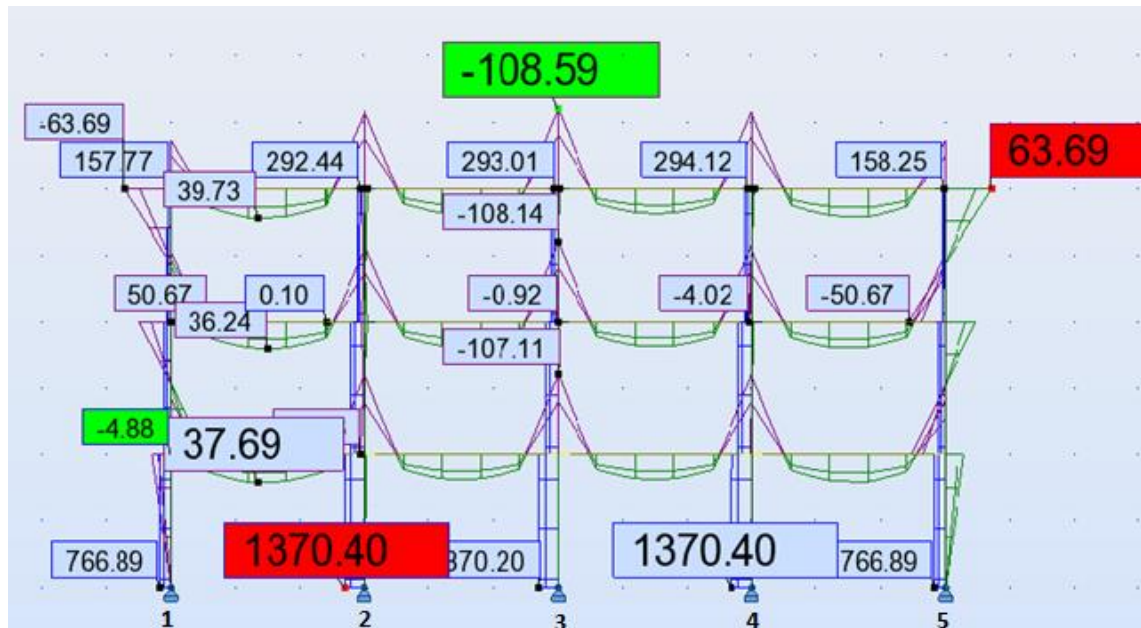
## 10.2 Jatkuvien rakenteiden rakennemallin tutkiminen



Kuva 21. Jatkuvien rakenteiden rakennemalli (RM1). Kuvassa näkyvät pilareille mitoittavat momenttikuormat (kNm), pilareille mitoittava puristuskuorma (kN) sekä laatastojen jännitysjaakaumat. [14.]

Kuvan 21 mallista ei ole vielä poistettu avainasemassa olevaa rakenneosaa. Kuvasta nähdään lähtötilanteen kuormajakaumat. Mitoittavat taivutusmomentit pilareille syntyvät linjan B reunimmaisille pilareille ja mitoittava puristuskuorma hieman yllättäen pilarille B2 ja B4 eikä pilarille B3.

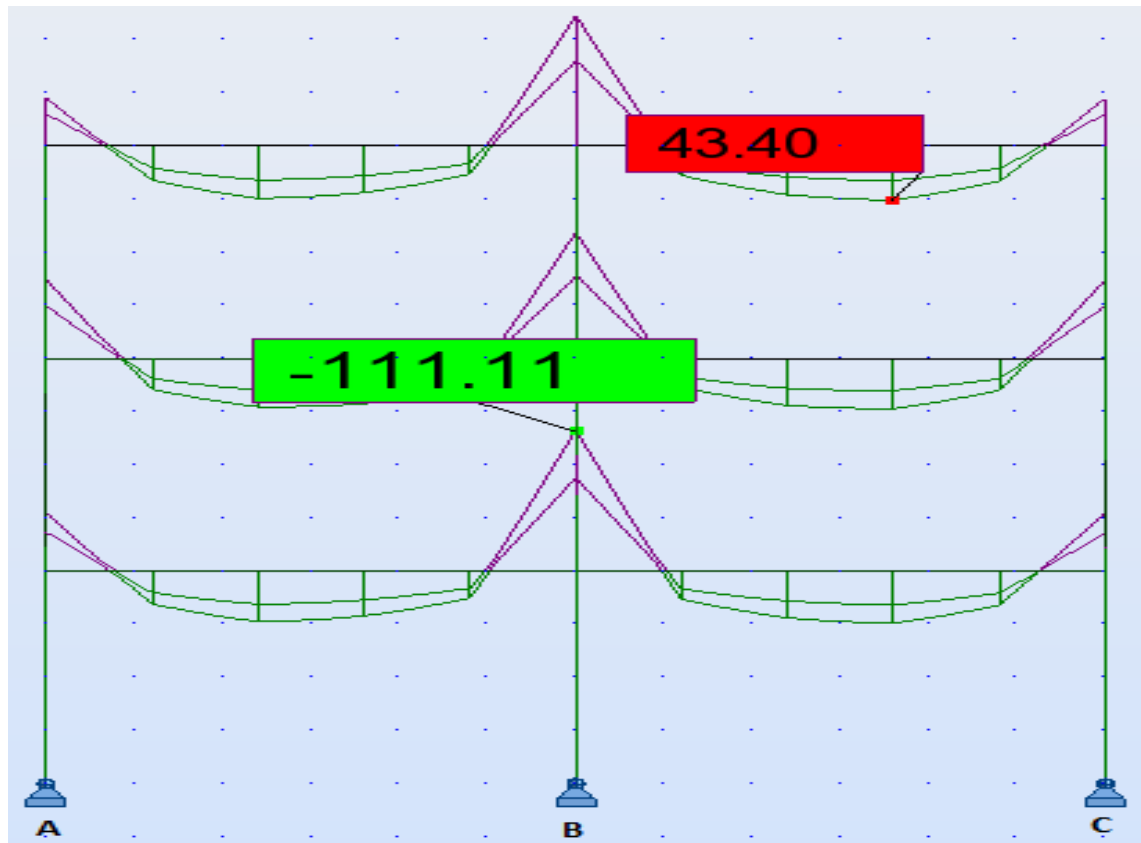
Laatastojen jännitysjaakaumista voidaan havaita, että suurimmat jännitykset laatoille syntyvät nurkkiin ja linjan B suuntaisten palkkien läheisyyteen. Tämä on syytä ottaa huomioon laatastoihin mahdollisesti suunniteltavien reikien sijaintien valinnoissa.



Kuva 22. Leikkauskuva linjalta B-B, RM1 rakennemallista. Rakenteiden momenttien ja puristuskuormien tarkastelua. [14.]

Tarkastellaan B-linjan suuntaisia vaakarakenteita tarkemmin leikkauskuvasta B-B. Linjan rakenteisiin syntyy maksimikuormia pilareille sekä pitkille palkeille. Leikkauskuvasta nähdään, että rakenteen pilareiden mitoittavaksi puristuskuormaksi tulee 1370,4 kN ja pilareille mitoittavaksi taivutusmomentiksi 63,69 kNm.

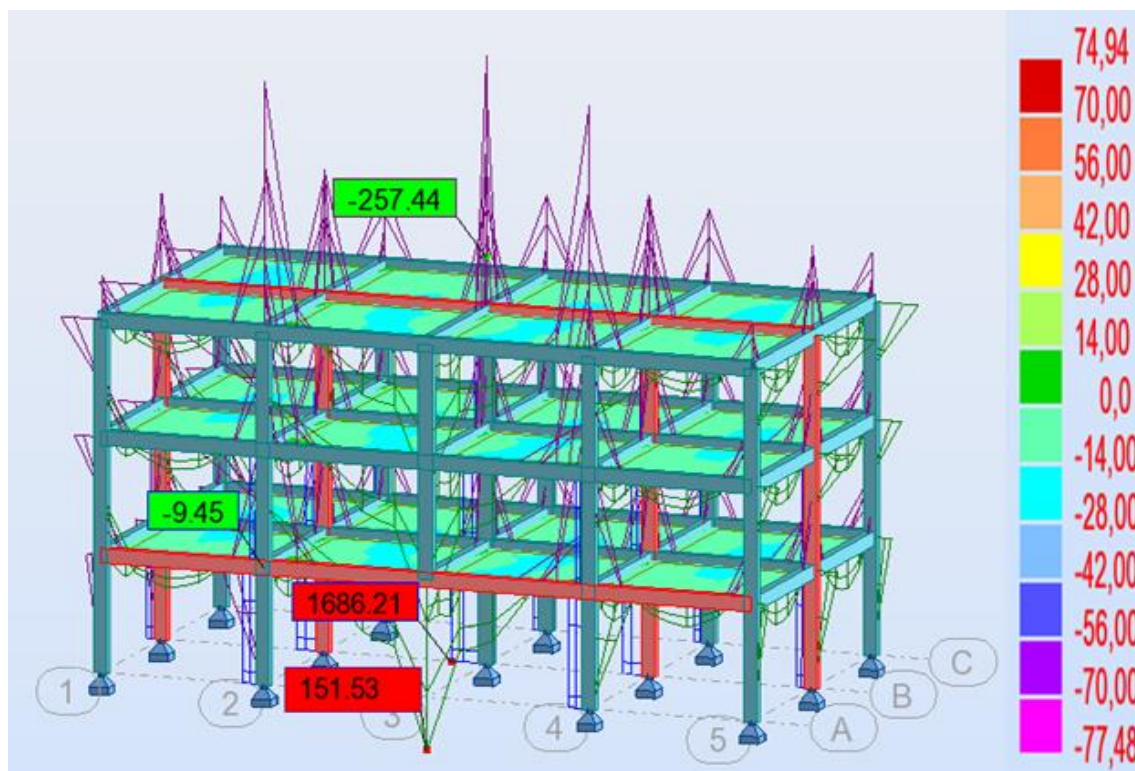
Leikkauskuvasta nähdään myös 24 metrisille pidemmän sivun palkeille mitoittavat momentit. Rakennuksen pidempien palkkien suurin kenttämomentti syntyy pilareiden B1 ja B2 väliin ja sen suuruus on 37,69 kNm. Palkkien suurin momentti tuella on pilarin B3 kohdalla ja sen arvo on -108,59kNm.



Kuva 23. Leikkauskuva linjalta 4-4, RM1 rakennemallista. [14.]

Kuvan 23 leikkauskuvasta nähdään lyhyempien 12 metriä pitkien, syvyysuuntaisten jatkuvien palkkien mitoittavat taivutusmomentit. Palkki sijaitsee samalla linjalla kuin mitoittavan puristuskuorman pilari, eli pystysuuntaiset kuormat ovat tällä linjalla suurimmat.

Lyhyempien palkkien suurin kenttämometti syntyy ylimmän kerroksen pilareiden B4-C4 väliin ja sen suuruus on 43,4kNm. Lyhyempien palkkien suurin momentti tuella on alimman kerroksen pilarin B4 kohdalla ja sen arvo on -111,10kNm.



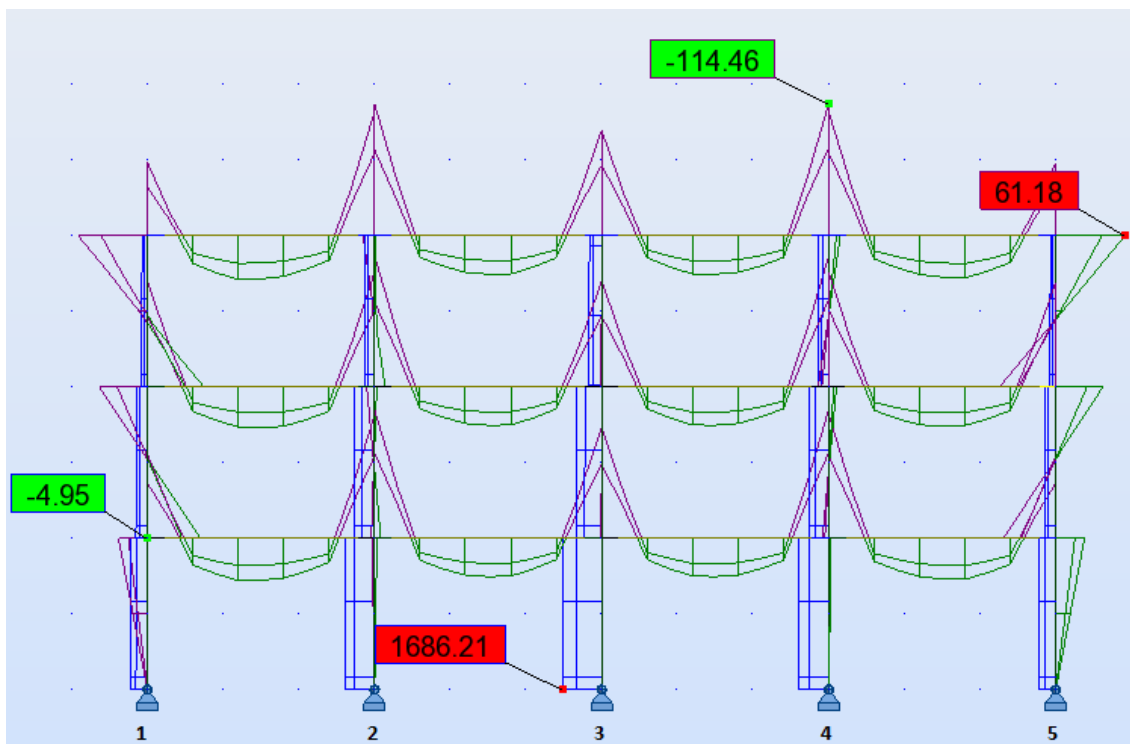
Kuva 24. Jatkuvien rakenteiden rakennemalli, josta avainasemassa oleva rakenneosia on poistettu (RM1P). [14.]

Kuvan 24 rakennemalli simuloi tilannetta, jossa pilari A3 on vaurioitunut ja menettänyt kantavuutensa kokonaan alimman kerroksen osalta. Todellisuudessa tämä voisi vastata tilannetta, jossa esimerkiksi ajoneuvo törmää rakenteeseen ja vaurioittaa sitä niin, että rakenne ei kykene enää kannattelemaan kuormia.

Vertailemalla kuvia 24 ja 21 nähdään heti muutoksia rakenteiden kuormissa. Pilareiden mitoittava puristuskuorma kasvaa lähtötilanteesta noin 300kN:a. Suurin puristus syntyy edelleen pilareille B2 ja B4. Myös laatastojen jännitysjakauksissa voidaan havaita eroja. Jännitykset kasvavat lähestyessä vaurioaluetta.

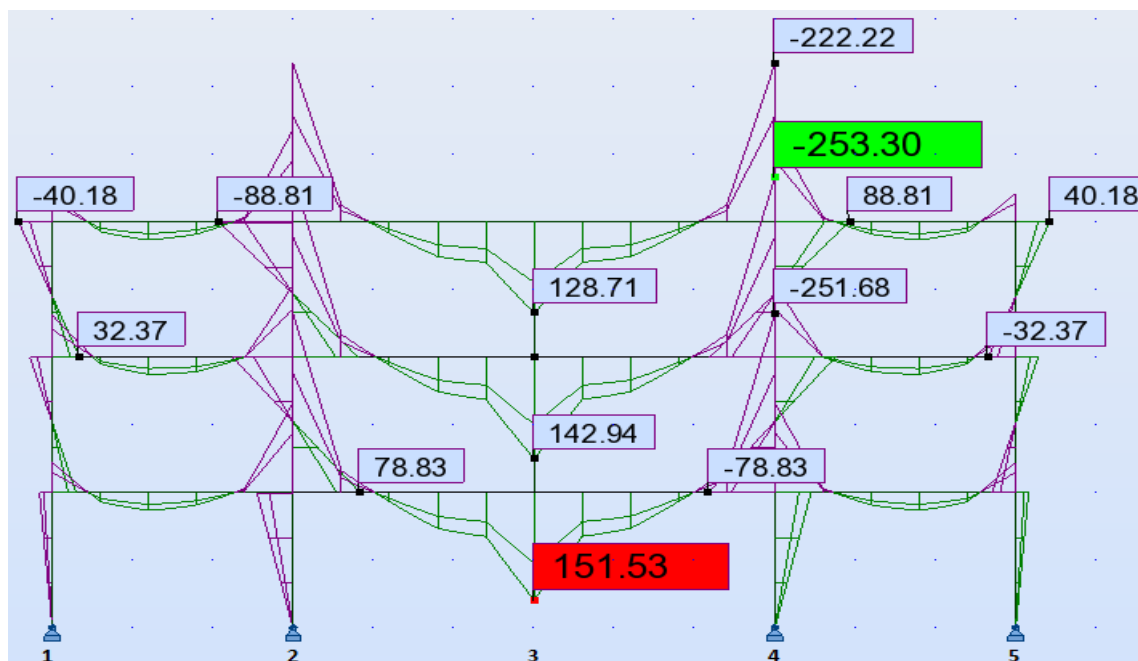
Jotta laatastot eivät romahda alas niitä kannattelevan rakenneosan vaurioituessa, tulee kaikkiin laatastoihin suunnitella rengasraudoitukset. Rengasraudoitusten suunnittelusta ja laskennasta on yksinkertainen esimerkki työn liitteena nro 1. Jos laattoihin halutaan tehdä reikiä mahdollisten läpivientien takia, pitää reikien vaikutuksia laatan kuormien kulkeutumiseen tutkia erikseen. Reiän vaikutus kuormien kulkeutumiseen laatalta riippuu reiän ja laatan koosta. Mitä suuremman pinta-alan reikä kattaa laatan pinta-alasta, sitä suurempi on reiän vaikutus kuormien kulkeutumiseen. Pahimmassa tapauksessa laatta

voi haljeta reiän kohdalta, kun onnettomuustilanteessa laatta alkaakin toimia ulokkeena, kun sitä kannatteleva rakenne vaurioituu. Tällaisessa tapauksessa reiän kohdalle on mahdollista suunnitella laattaan lisäraudoitusta, joka kuljettaa kuormat reiän ohi rengasraudoitusten kautta tuille.



Kuva 25. Leikkauskuva mallista RM1P linjalta B-B. Näyttää pilareiden mitoittavan taivutusmomentin sekä puristuskuorman. [14.]

Pilareiden mitoittava taivutusmomentti ei muutu merkittävästi ja sijaitsee edelleen linjan B reunimmaisilla pilareilla. Tämä nähdään selkeästi linjan B-B leikkauskuvasta.



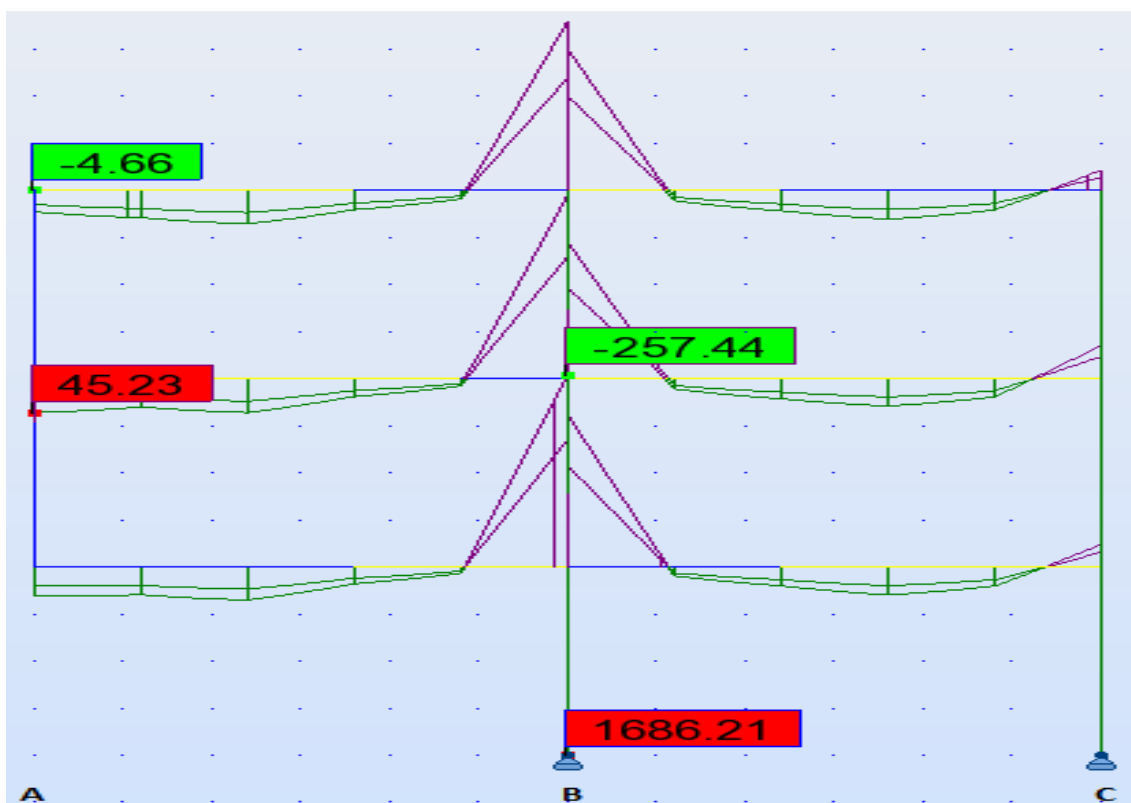
Kuva 26. Leikkauskuva mallista RM1P linjalta A-A. Kuormien muutokset pitkille palkeille kun avainasemassa oleva rakenneosia poistettu. [14.]

Vertaamalla kuvaa 26 kuvan 22 tilanteeseen nähdään mitä muutoksia kuormien jakautumisessa rakenteilla tapahtuu, kun avainasemassa oleva rakenneosia poistetaan käytöstä. Mallin RM1 lähtötilanteesta poiketen pitkien palkkien mitoittava kenttämometti ja momenttituella syntyvätkin linjalle A-A eivätkä linjalle B-B. Kuvia vertaamalla nähdään myös, että palkkien mitoittava kenttämometti lähes viisinkertaistuu lähtötilanteesta ja momentti tuella kaksinkertaistuu. Palkkeja suunniteltaessa nämä kuormien muutokset tulee ottaa huomioon.

Leikkauskuva osoittaa myös, että pilarin vaurioituessa palkkien mitoittavat momentit siirtyvät alueelle, jota vaurioitunut pilari kannatteli. Koska jatkuvan sortuman suunnittelussa pitäisi olettaa, että rakenneosia voi pettää mistä tahansa, on tämä yksinkertainen huomio itse asiassa melko merkittävä.

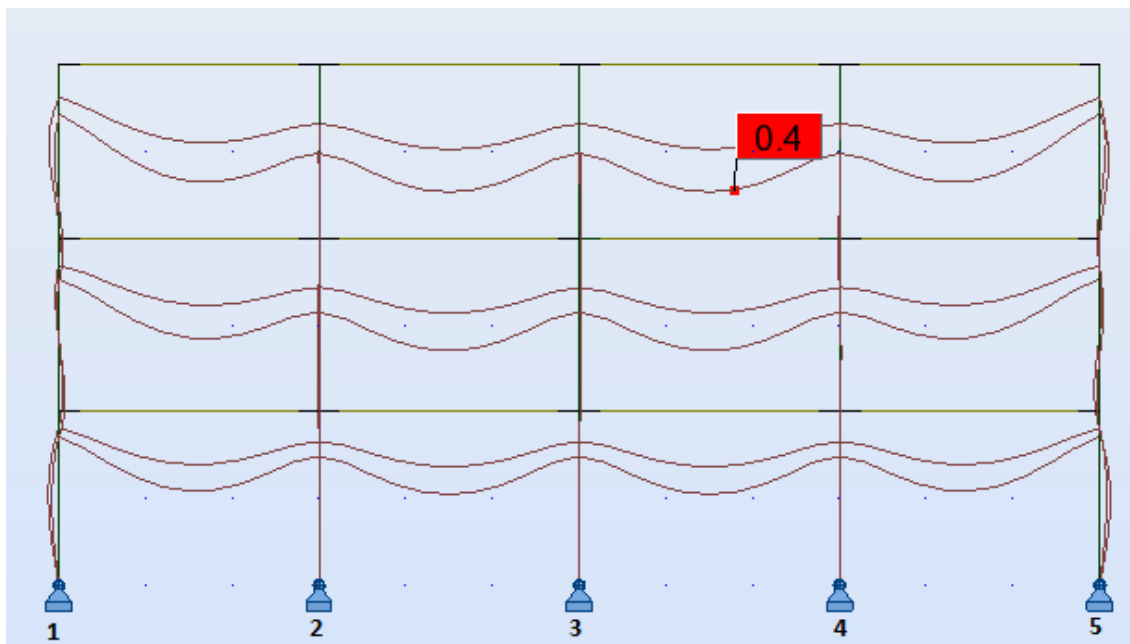
Koska rakenteita voi lähtökohtaisesti pettää mistä tahansa kohdin, täytyy rakenneanalyyysien avulla löytää tilanne, jossa mitoittavat kuormat ovat suurimmat ja mitoittaa koko rakennejärjestelmä näiden kuormien mukaan. Tämä tapahtuu yksinkertaisesti testaamalla samaa rakennemallia useaan kertaan niin, että avainasemassa oleva rakenneosia poistetaan aina eri kohdasta, kunnes löytyy mitoittavien kuormien kannalta kriittisin tilanne. Juuri tästä syystä, mitä

monimutkaisemmat rakenteet ovat, sitä haastavampaa rakenneanalyysien tekeminen avainasemassa olevan rakenneosan suunnitteluperiaatteella on.

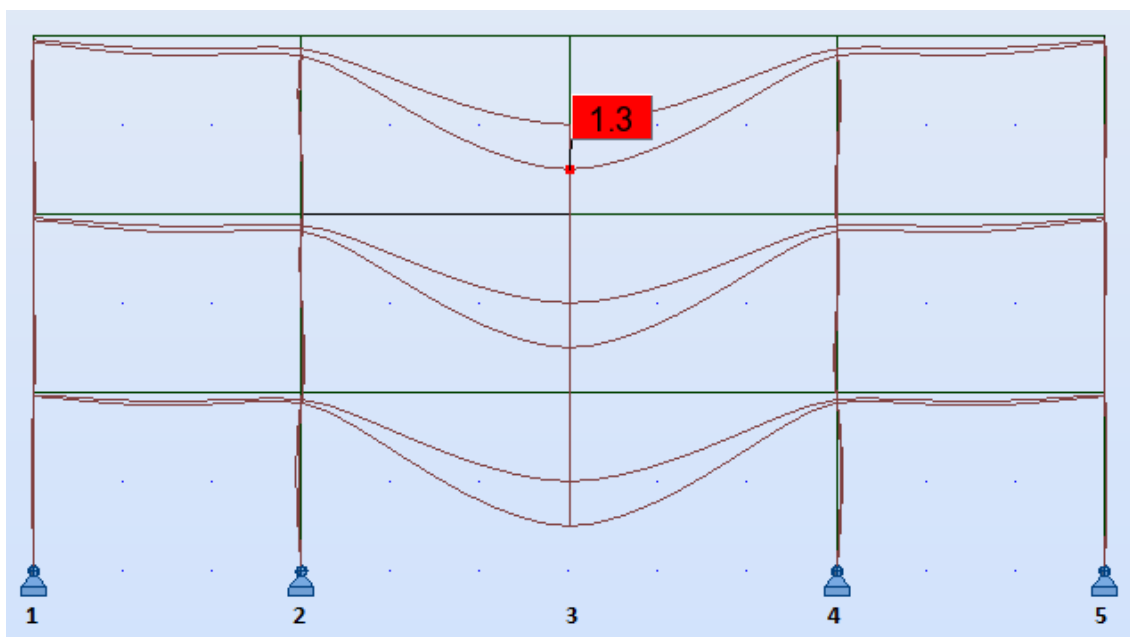


Kuva 27. Leikkauskuva mallista RM1P linjalta 3-3. Kuormien muutokset lyhyille palkeille kun avainasemassa oleva rakenneosa poistettu. [14.]

Kuva 27 osoittaa kuinka lyhyiden 12 metristen jatkuvien palkkien toiminta muuttuu, kun avainasemassa oleva rakenneosa poistetaan. Kaikki linjalla 3 olevat palkit toimivat ulokepalkkeina välillä B-C, koska tuki palkkien alta on poistunut. Tästä johtuen lyhyempien palkkien mitoittava momentti tuella kasvaa lähtötilanteesta yli kaksinkertaiseksi. Koska palkin toiminta muuttuu yllättäen näin merkittävästi, vaatii se palkilta merkittävää sitkeyttä. Palkin raudoitukset ja liitokset tulee suunnitella erittäin tarkkaan.

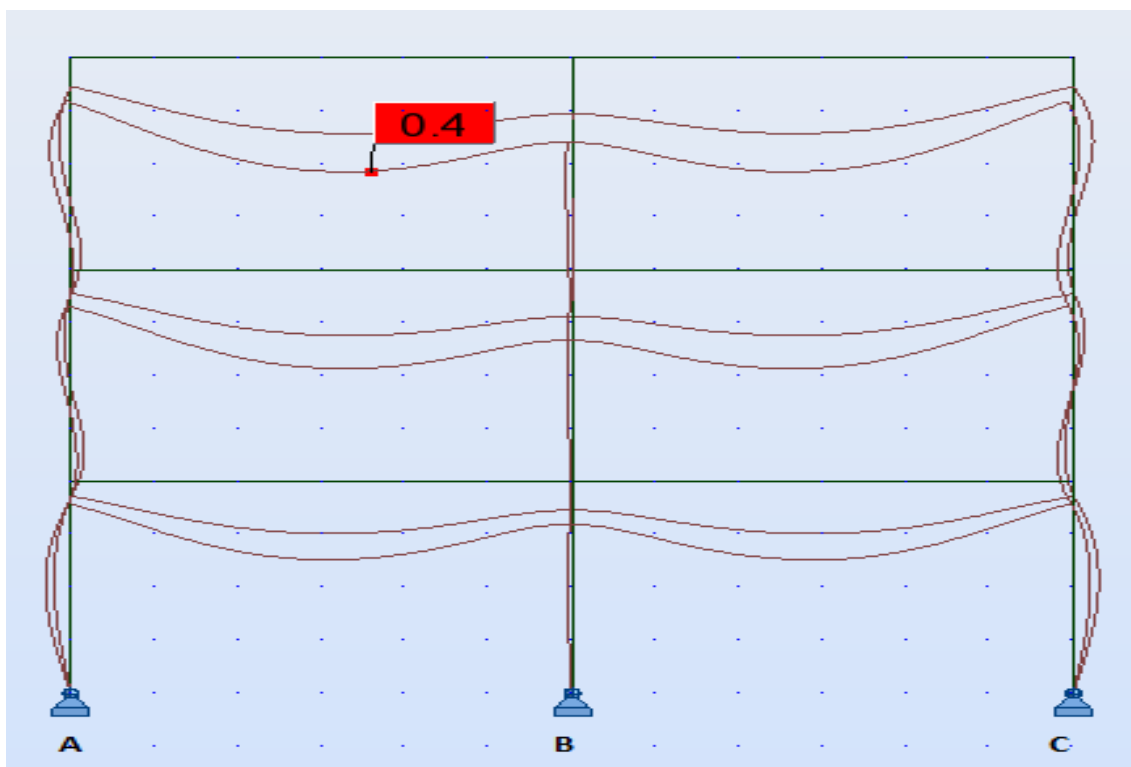


Kuva 28. Rakenteiden muodonmuutokset RM1 rakennemallissa. Leikkaus linjalta A-A, maksimitaipuma 0,4cm. [14.]

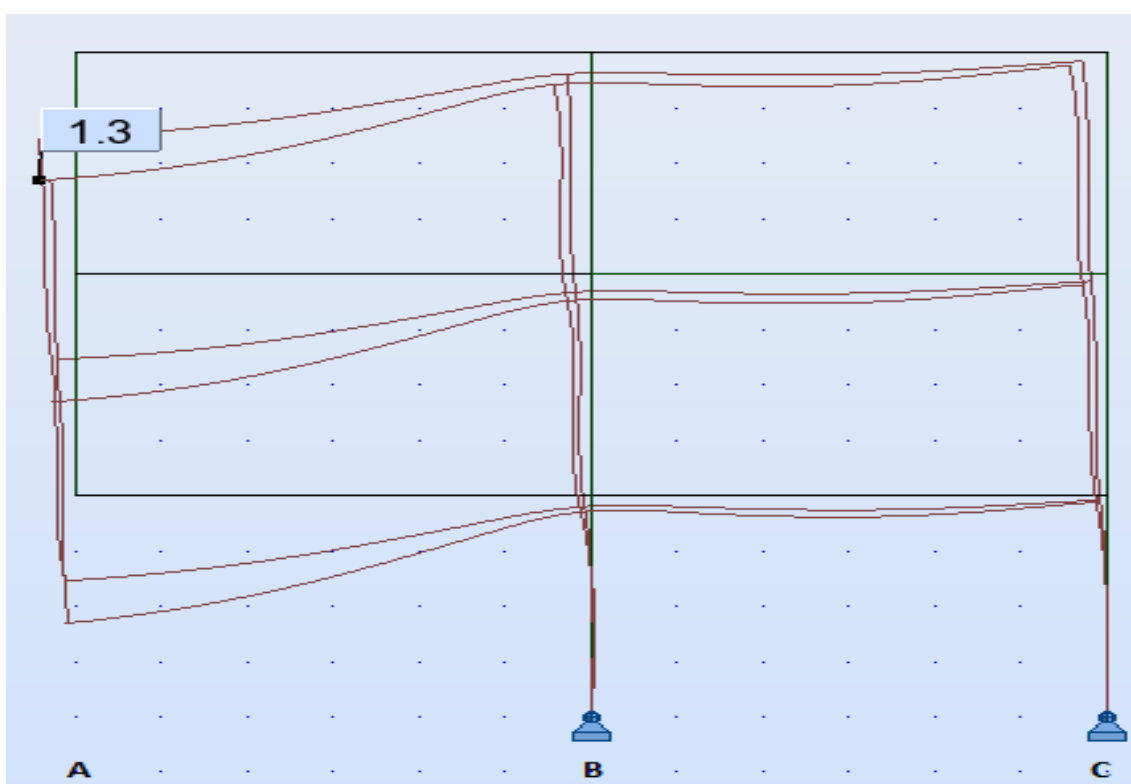


Kuva 29. Rakenteiden muodonmuutokset RM1P rakennemallissa. Leikkaus linjalta A-A, maksimitaipuma 1,3cm. [14.]

Kuvia 28 ja 29 vertaamalla nähdään linjalla A tapahtuvat erot rakenteiden muodonmuutoksissa, kun avainasemassa oleva rakenneosia poistetaan.



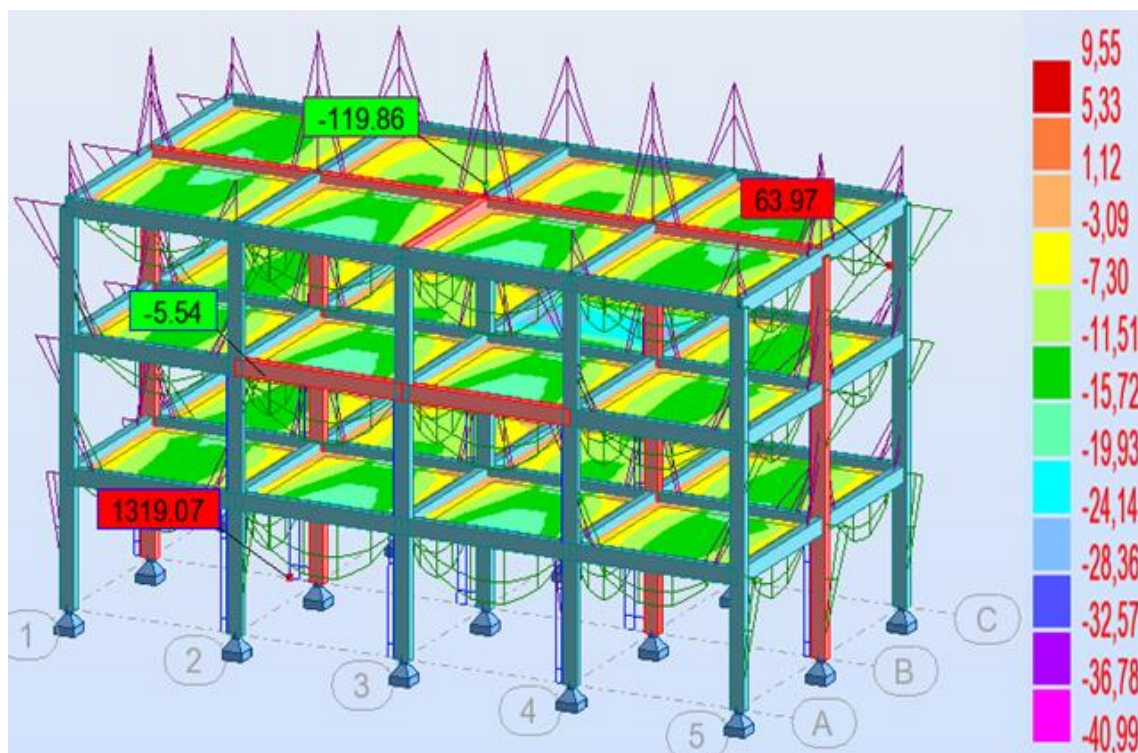
Kuva 30. Rakenteiden muodonmuutokset RM1 rakennemallissa. Leikkaus linjalta 3-3, maksimitaipuma 0,4cm. [14.]



Kuva 31. Rakenteiden muodonmuutokset RM1P rakennemallissa. Leikkaus linjalta 3-3, maksimitaipuma 1,3cm. [14.]

Kuvia 30 ja 31 vertaamalla nähdään linjalla 3 tapahtuvat erot rakenteiden muodonmuutoksissa, kun avainasemassa oleva rakenneosia poistetaan.

### 10.3 Päistään nivelöityjen palkkien rakennemallin tutkiminen

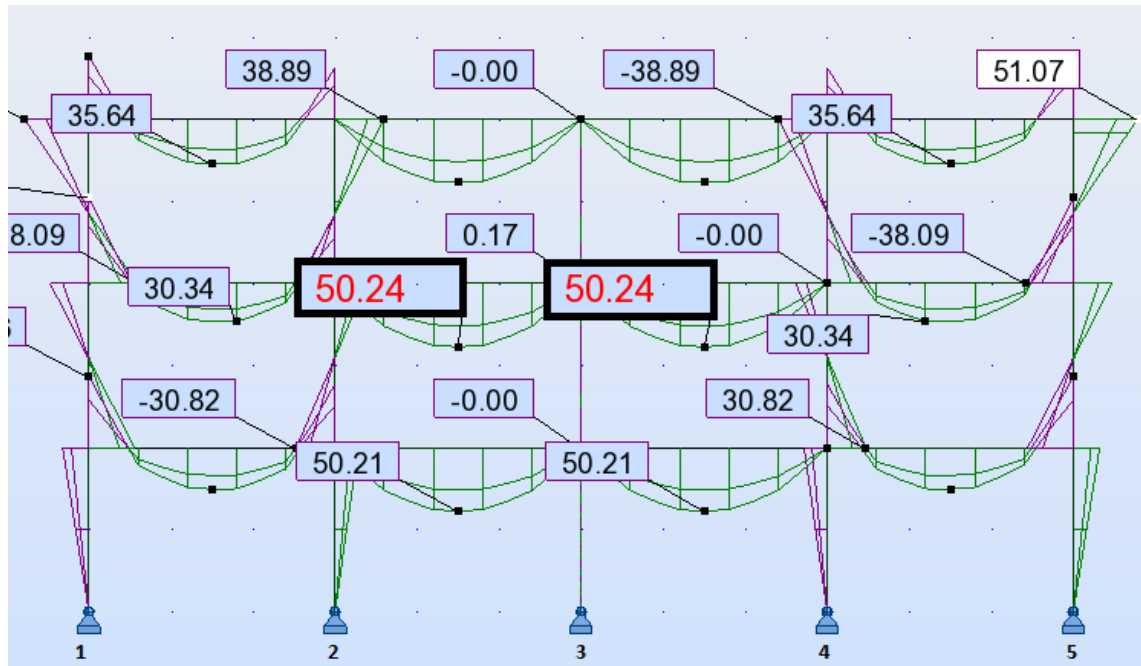


Kuva 32. Päistään nivelöityjen palkkirakenteiden rakennemalli (RM2). Kuvassa näkyvät pilareille mitoittavat momenttikuormat (kNm), pilareille mitoittava puristuskuorma (kN) sekä laatasten jännitysjaakaumat. [14.]

Kuvan 32 mallista ei ole vielä poistettu avainasemassa olevaa rakenneosaa. Kuvasta nähdään lähtötilanteen kuormajakaumat. Mitoittavat taivutusmomentit pilareille syntyvät linjan B reunimmaisille pilareille ja mitoittava puristuskuorma hieman yllättäen pilarille B2 ja B4 eikä pilarille B3. Pilareiden mitoittavat kuormat syntyvät siis lähtötilanteessa samoille rakenteille kuin RM1:en lähtötilanteessa. Lisäksi pilareiden mitoittavat kuormat ovat lähes samat kuin jatkuvien rakenteiden mallissa. Lähtötilanteessa näiden kahden rakennemallin välillä ei siis havaita pilareiden mitoituksen osalta merkittäviä eroja.

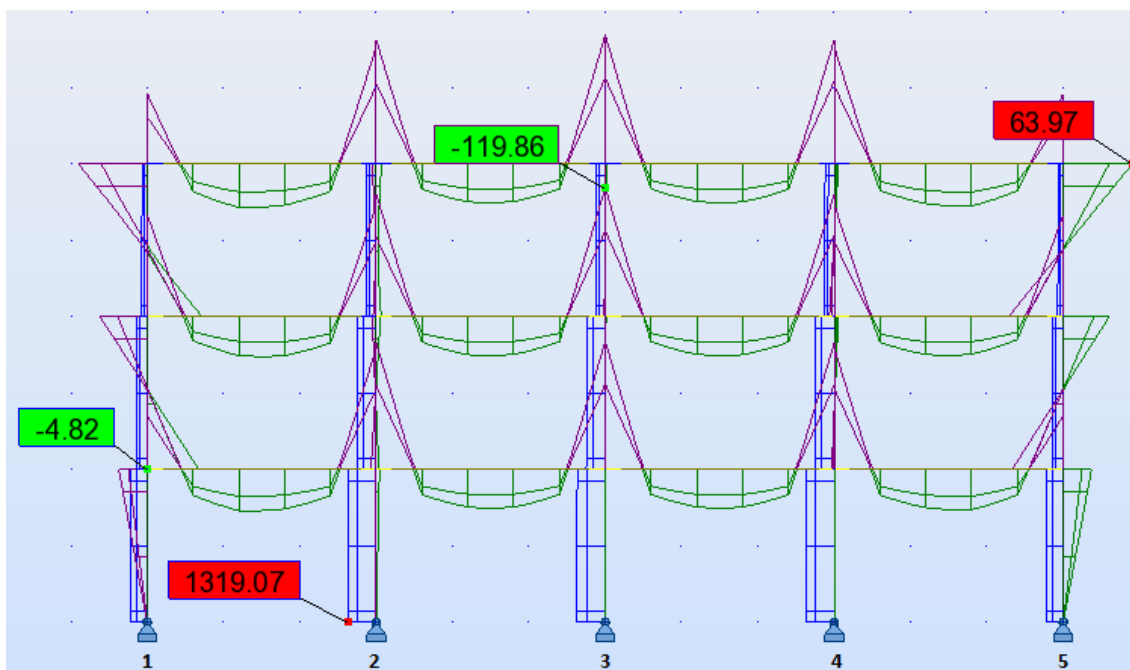
Laatasten jännitysjaakauissa voidaan havaita pieniä eroja rakennusmallien välillä. RM2 mallissa jännitykset jakautuvat hieman tasaisemmin koko laatan alueelle ja jännitykset laattojen nurkissa ovat suuremmat alueilla, joissa laatat tukeutuvat

nivelöityihin palkkeihin. Tämä johtuu siitä, että kenttämomentti nivelöidyille palkeille on suurempi kuin jatkuville palkeille. Koska laatta tukeutuu suurimmaksi osaksi juuri palkin kentän alueelle, on palkin suuremmalla kenttämomentilla laatalle jännitystä lisäävä vaikutus. Toisaalta koska jännitykset jakautuvat laatoille tasaisemmin, on mahdollisten reikien sijoittelu laattoihin helpompaa.



Kuva 33. Leikkauskuva linjalta A-A, RM2 rakennemallista. Nivelöityjen rakenteiden momenttien tarkastelua. [14.]

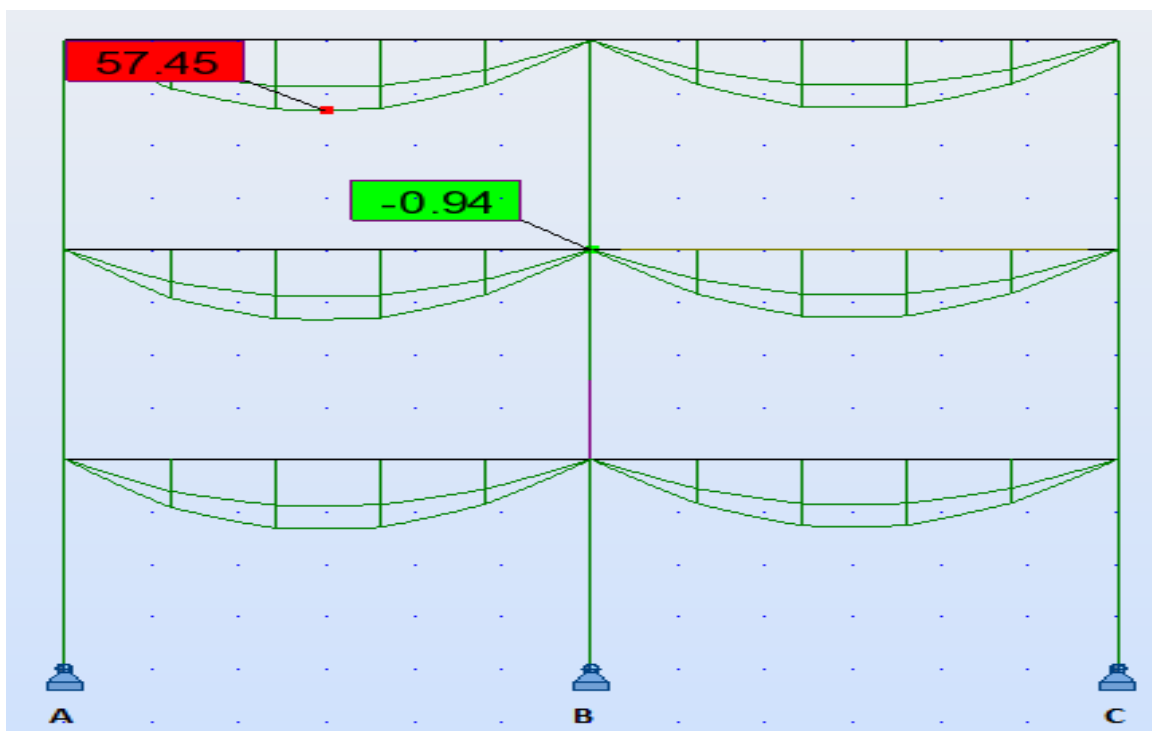
Kuten kuvan 33 leikkauskuva linjalta A-A osoittaa, on kenttämomentti yksiaukkoisilla päistään nivelöidyillä palkeilla suurempi kuin palkeilla, joille muodostuu tuelle momenttia. Yksiaukkoisille palkeille mitoittava kenttämomentti muodostuu linjan A-A palkeille, toiseen kerrokseen väleille 2-3 ja 3-4. Mitoittavan kenttämomentin suuruus on 50,24 kNm.



Kuva 34. Leikkauskuva linjalta B-B, RM2 rakennemallista. Rakenteiden momenttien ja puristuskuormien tarkastelua. [14.]

Koska RM2 ja RM1 rakennemallit ovat kuormiltaan, materiaaliominaisuuksiltaan sekä mitoiltaan täysin identtiset, ovat pilareiden mitoittava puristuskuorma ja momentti lähes samat. Lisäksi RM2 mallissa olevien jatkuvien palkkien osalta tuelle syntyvä maksimimomentti on lähes sama kuin mallissa RM1. Mitoittavaksi puristuskuormaksi pilareille saadaan 1319,07kN ja momentiksi 63,97 kNm. Jatkuville palkeille mitoittavaksi momentiksi tuilla saadaan -119,86 kNm.

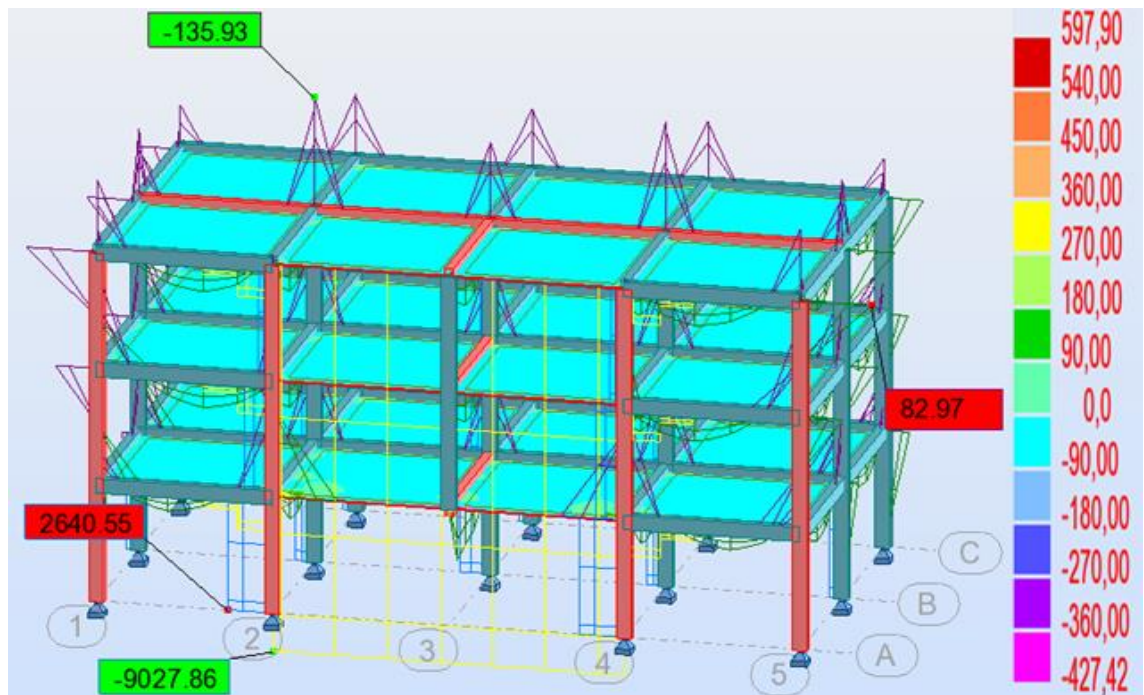
Nämä huomiot eivät ole yllättäviä, sillä palkkien päiden nivelöinti ei vaikuta pystykuormien jakautumiseen rakenteille eikä jatkuvien rakenteiden toimintaan. Jos RM2 mallissa olisi nivelöity lisäksi pilareita, olisi puristuskuormien jakautumisissa huomattavissa eroja RM1 mallin kanssa. Asiaa ei ole lähdetty tarkastelemaan, koska pilareiden nivelöinti vaikeuttaa kuormien jakautumisien tutkimista, kun avainasemassa oleva rakenneosaa poistetaan.



Kuva 35. Leikkauskuva linjalta 3-3, RM2 rakennemallista. [14.]

Kuvasta 35 nähdään mitoittava kenttämometti lyhyemmän sivun päistään nivelöidyille palkeille. Mitoittava momentti syntyy ylimmän kerroksen linjaan 3, välin A-B palkille. Kenttämomentin suuruus on 57,45 kNm ja yksiaukkoisten palkkien momentti tuilla on 0.

Erot kuormien jakautumisissa RM1 ja RM2 rakennemallien välillä, kun avainasemassa olevaa rakenneosaa ei ole vielä poistettu, ovat pieniä. Merkittävin ero näiden mallien välillä onkin vain liitoskohtien lisääntyminen RM2 rakennemallissa. Liitoskohdat ovat rakenteissa aina kriittisiä kohtia niin suunnittelun, valmistuksen kuin asennuksen osalta, joten liitosten määrä tulisi optimaalisessa rakennesuunnittelussa pitää aina mahdollisimman vähäisenä. Tämä ei todellisuudessa tietenkään ole usein mahdollista, joten virheiden riskiä liitosten osalta pitää pyrkiä pienentämään aina mahdollisimman paljon. Jos hankkeessa joudutaan tekemään erityisen haastavia liitosratkaisuja, on valvontaa syytä tehostaa ainakin asennustöiden osalta.

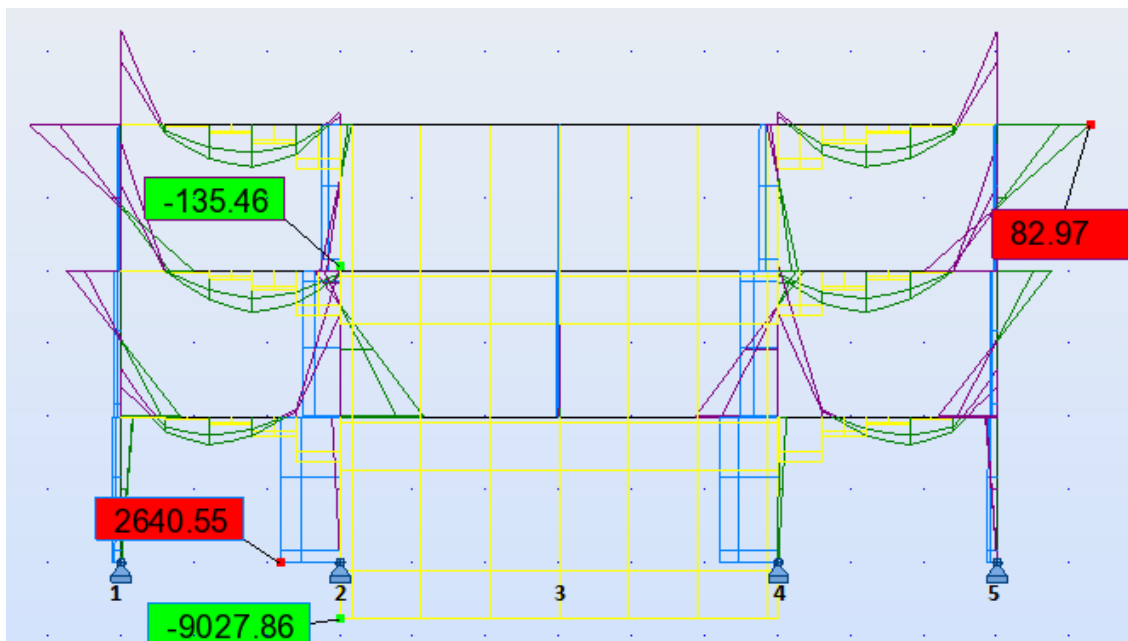


Kuva 36. Päistään nivelöityjen palkkirakenteiden rakennemalli, josta avainasemassa oleva rakenneosaa on poistettu (RM2P). [14.]

Vertaamalla kuvia 36 ja 32 voidaan nähdä kuinka yksiaukkoisia rakenteita sisältävän rakennemallin rakenteiden toiminta muuttuu, kun avainasemassa oleva rakenneosaa poistetaan.

Linjan A välin 2-4 palkkien, joita poistettu rakenneosaa kannatteli, toiminta muuttuu palkkirakenteesta köysirakenteeksi. Robot Structural Analysis ei osaa tätä muutosta tehdä automaattisesti, joten palkit piti muuttaa manuaalisesti köysirakenteiksi, jotta rakenteiden toimintaa voidaan havainnollistaa laskentamallin avulla. Köysimäinen rakenne ottaa vastaan vain vetokuormaa, jolloin sen puristus ja momentti ovat arvoiltaan aina 0.

Kuvasta tämä voidaan havaita pilarien mitoittavan puristuskuorman huomattavana kasvuna lähtötilanteen kuvasta 32. Myös laattojen jännitykset kasvavat merkittävästi, mutta toisaalta jännitykset jakautuvat erittäin tasaisesti. Jännitysten tasainen jakautuminen helpottaa laatastojen rengasraudoitusten suunnittelua.

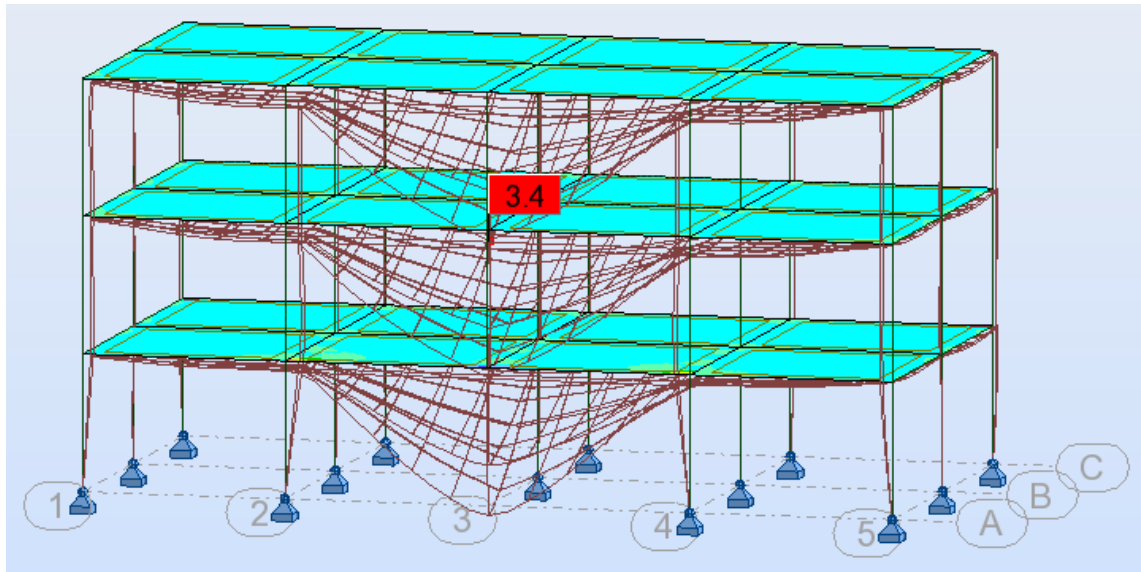


Kuva 37. Leikkauskuva rakennemallin RM2P linjasta A-A. Köysien vetovoima ja pilareiden mitoittavat kuormat. [14.]

Kuvan 37 leikkauskuvasta nähdään tarkemmin pilareiden mitoittavien kuormien kasvu lähtötilanteesta. RM2 mallista pilareiden mitoittava puristuskuorma yli kaksinkertaistuu 2640,55 kN:iin. Mitoittava taivutusmomentti pilareille ei kasva näin radikaalisti, mutta tämäkin kasvu tulee huomioida suunnittelussa. Mitoittavat pilarit siirtyvät linjasta B linjaan A, josta avainasemassa oleva rakenneosa poistettiin.

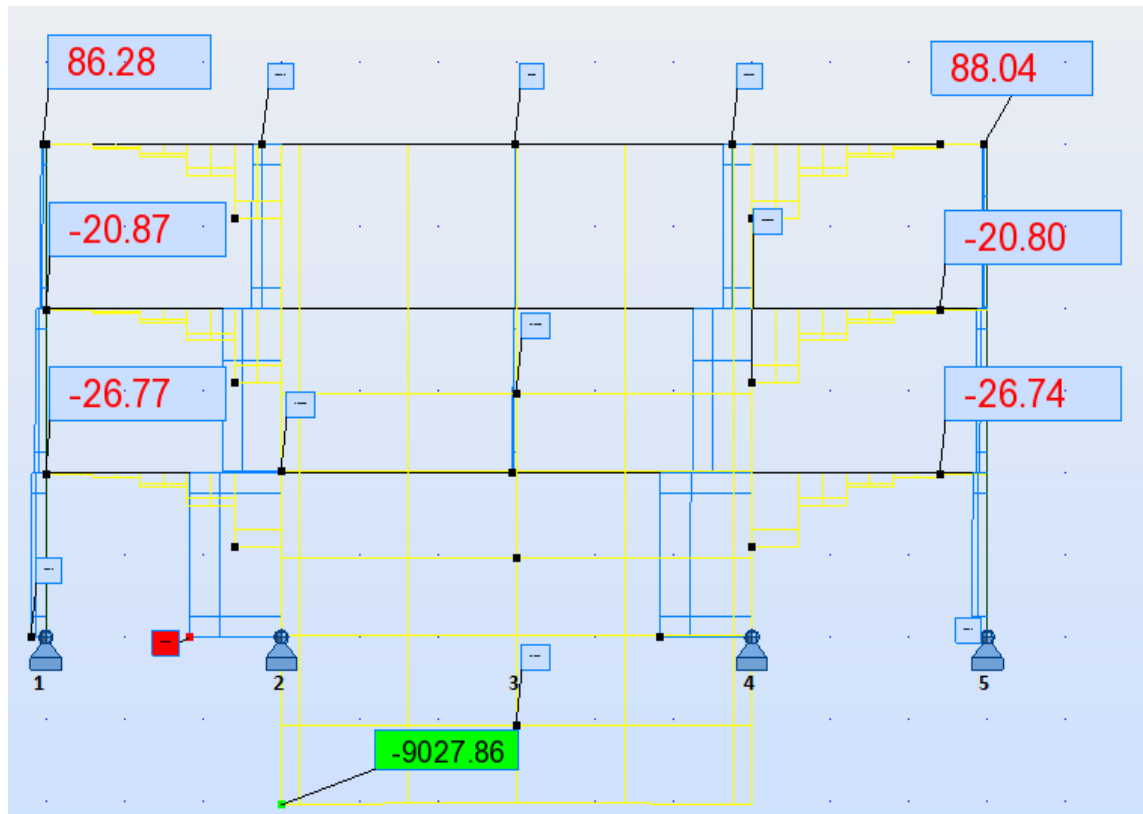
Jatkuvien rakenteiden rakennemallissa mitoittavien pilareiden paikat pysyivät samoina, kun rakenneosa poistettiin. Rakenteiden pystykuormat mallin RM2P linjassa A kasvavat siis huomattavasti, koska päistään nivelöityjen palkkien rakenteellinen toiminta muuttuu vain vetoa vastaanottavaksi köysirakenteeksi.

Koska köysiin syntyy huomattava määrä vetoa, täytyy muiden kantavien rakenteiden pystyä jäykistämään rakennus. Tämä saadaan aikaan suunnittelemalla rakenteiden raudoitukset yhtenäisiksi. Köysirakenteille syntyvä vetokuorma pääsee yhtenäisten raudoitusten ansiosta jakautumaan kaikille rakenteille, eikä rakennuksen stabiiliteetin menetystä pääse syntymään.



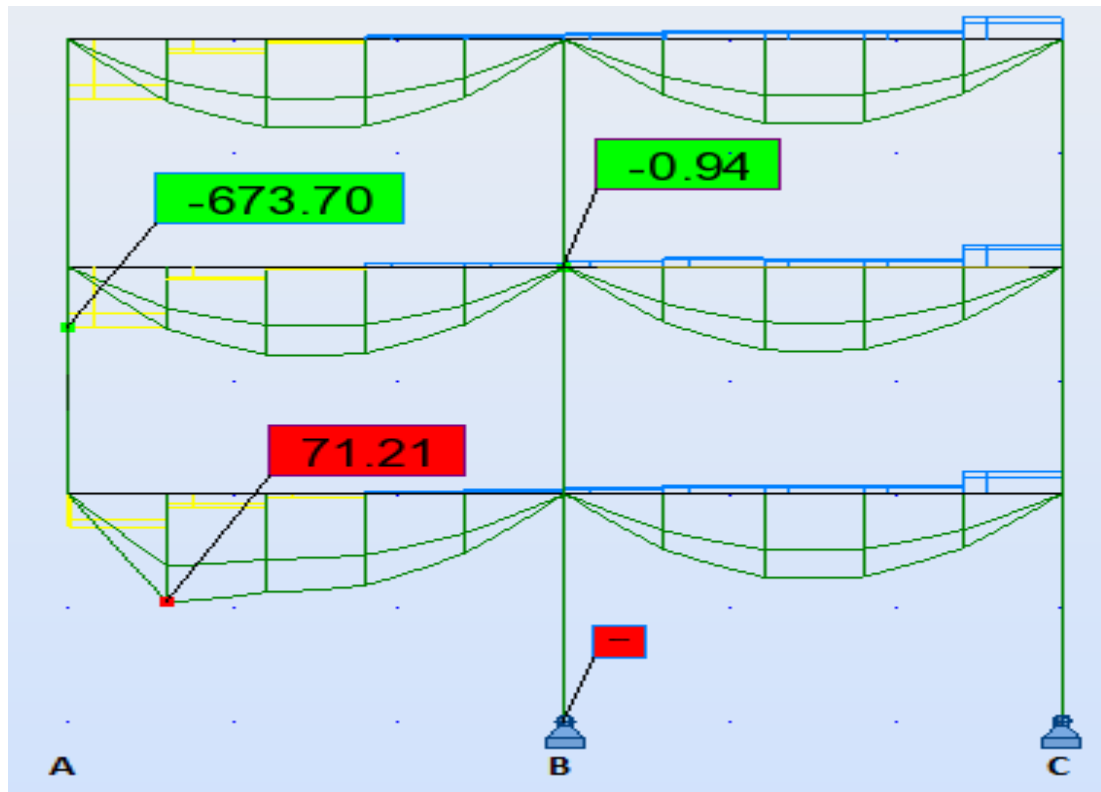
Kuva 38. Rakennemallin RM2P rakenteiden muodonmuutokset 3D-mallista. Köysinä toimivat palkit vetävät kaikkia rakenteita kohti pistettä, josta rakenneosia poistettiin. [14.]

Tarkastelemalla köysirakenteiden toimintaa lähemmin leikkauskuvasta, nähdään kuinka köysirakenteille syntyvät vetokuormat jakautuvat toisiinsa liitoksissa olevien rakenteiden kesken. Jotta kuormat pääsevät jakaantumaan laskentamallin osoittamalla tavalla, täytyy rakenteiden raudoitukset ja liitokset olla suunniteltu oikein.



Kuva 39. Köysirakenteiden vetokuormien jakautumien kaikille liitoksissa oleville rakenteille. [14.]

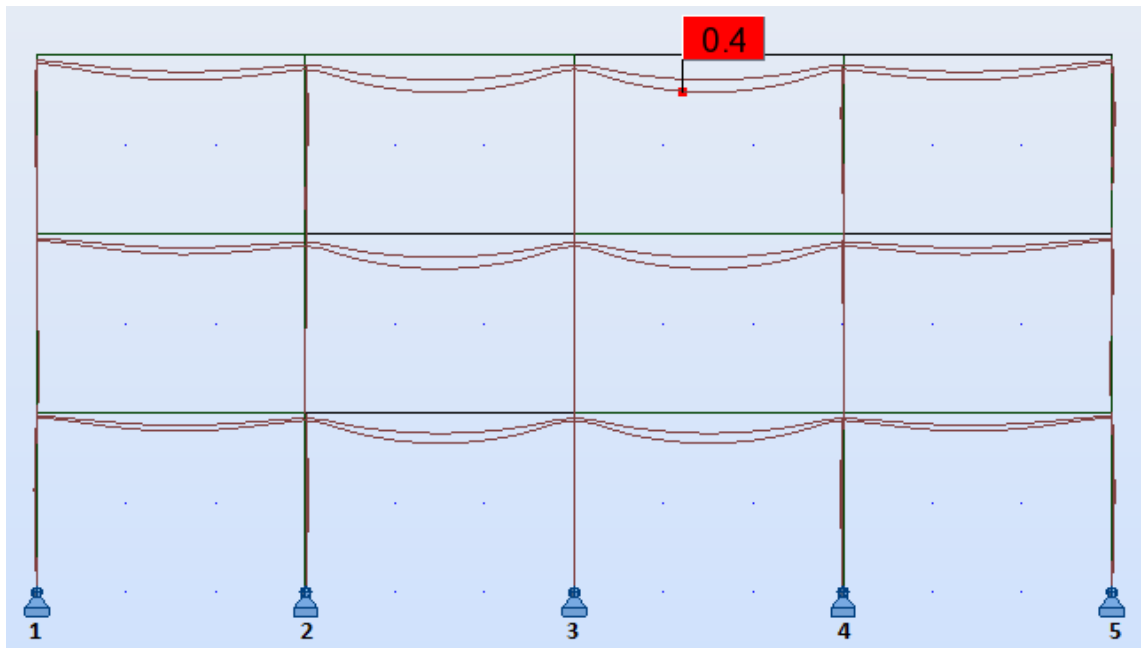
Kuvasta 39 nähdään kuinka köysirakenteessa vaikuttava vetokuorma lähtee jakautumaan linjojen 2 ja 4 liitoskohtien jälkeen muille rakenteille. Valtava vetokuorma jakautuu raudoitusten avulla koko kantavalle rakennesysteemille ja täten, vaikka muodonmuutokset rakenteille olisivatkin suuria, ei jatkuvaa sortumaa pääse syntymään.



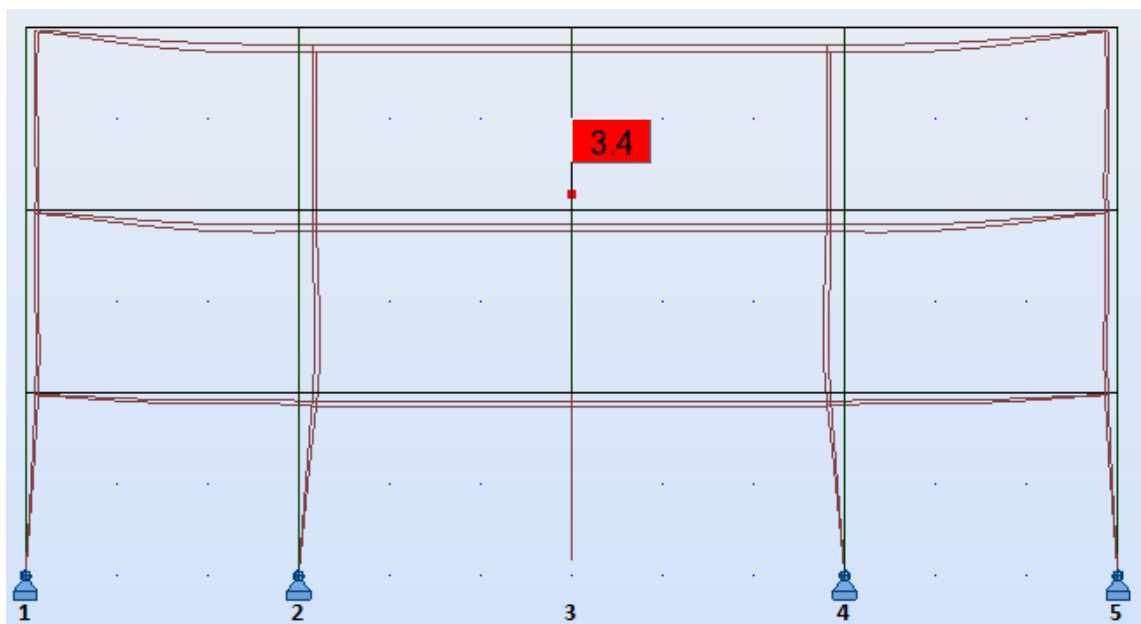
Kuva 40. Leikkauskuva rakennemallin RM2P linjasta 3-3. Palkeille jakautuu vetokuormaa. [14.]

Kuva 40 näyttää, että köysien vetokuorma jakautuu kaikille rakenteille, jotka ovat liitoksissa köysirakenteeseen. Saman linjan 3-3 leikkauskuvassa RM2 mallista ei näillä palkeilla ole vetoa lainkaan. Kuvan palkit toimivat A-B välillä ulokepalkkeina, eli niiden yläpintaan syntyy vetoa. Suunniteltaessa palkkien raudoituksia, täytyy siis huomioida tilanne, jossa palkit voivat toimia ulokkeena ja laskea vetorauditus myös yläpintaan.

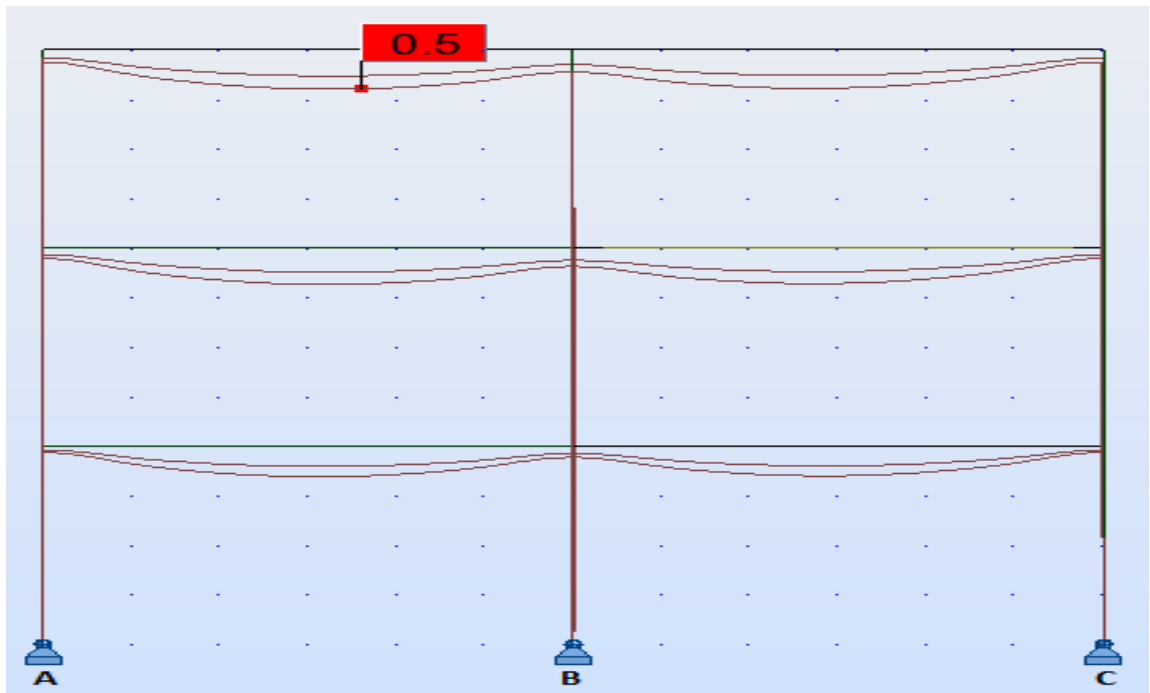
Vetokuormat siirtyvät palkeilta pilareille taivutusmomentiksi ja puristukseksi. Pilareilta kuormat välittyvät lopulta perustuksille. Kuvasta 40 nähdään myös yksiaukkoisten palkkien mitoittava kenttämometti 71,21 kNm kun avainasemassa oleva rakenneosa on poistettu.



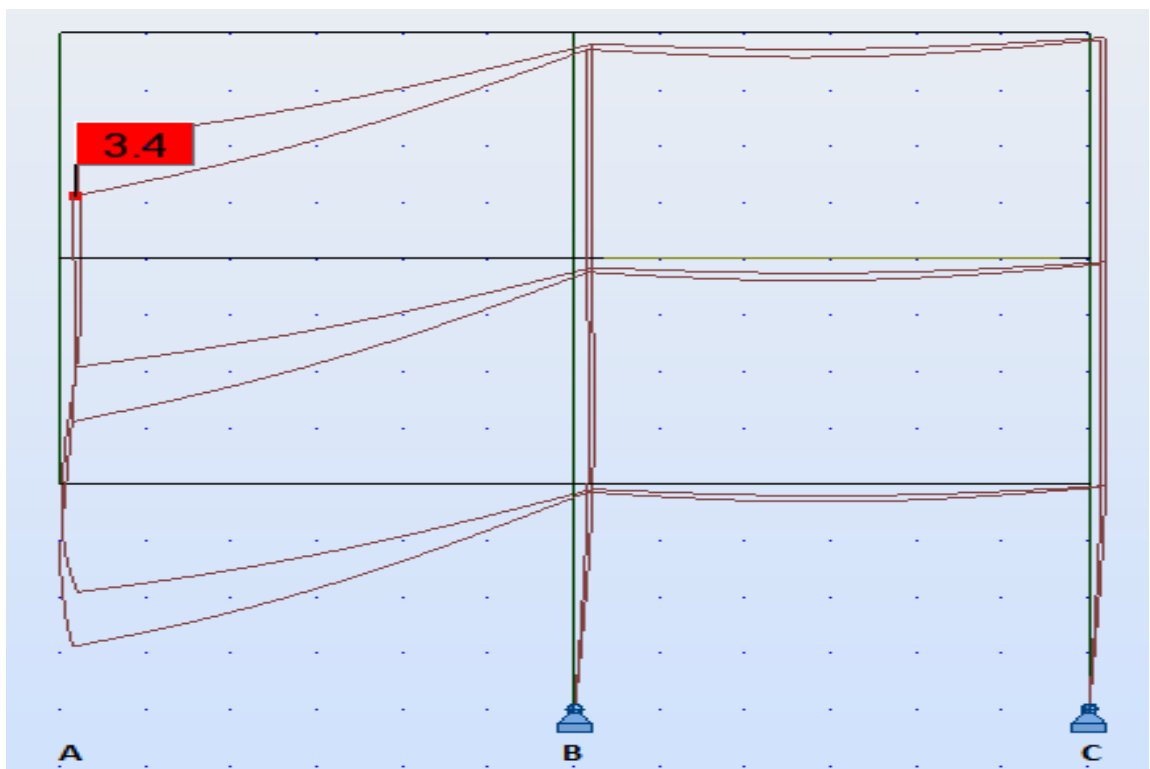
Kuva 41. Rakenteiden muodonmuutokset RM2 rakennemallissa. Leikkaus linjalta A-A, maksimitaipuma 0,4cm. [14.]



Kuva 42. Rakenteiden muodonmuutokset RM2P rakennemallissa. Leikkaus linjalta A-A, maksimitaipuma 3,4cm. [14.]



Kuva 43. Rakenteiden muodonmuutokset RM2 rakennemallissa. Leikkaus linjalta 3-3, maksimitaipuma 0,5cm. [14.]



Kuva 44. Rakenteiden muodonmuutokset RM2P rakennemallissa. Leikkaus linjalta 3-3, maksimitaipuma 3,4cm. [14.]

#### 10.4 Johtopäätökset laskentamalleista

Laskentamallien tarkoituksena oli tutkia, jatkuvien rakenteiden ja yksiaukkoisten rakenteiden toiminnallisia eroja, avainasemassa olevan rakenneosan vaurioitumisen tilanteessa. Rakennemallit pidettiin tarkoituksella yksinkertaisina, koska laskentojen tulosten tarkoitus oli vain havainnollistaa avainasemassa olevan rakenneosan suunnitteluperiaatteen toimintaa.

Laskentojen perusteella voidaan todeta, että jatkuvat rakenteet ovat jatkuvan sortuman estämisen kannalta suunnittelijalle helpompi rakenneratkaisu kuin lyhyet rakenteet. Jatkuvat rakenteet ovat lyhyitä rakenteita jäykempiä, eikä niissä ole kuormien jakautumisen kannalta erittäin kriittisiä liitoskohtia yhtä paljon.

Laskennoista voidaan myös nähdä kuinka tärkeää, on ymmärtää miten kuormat jakautuvat eri rakenteille, jos jokin kannatteleva rakenne vaurioituu menettäen kantokykynsä kokonaan. Jos kuormien jakautumista ei tutkita, saattaa esimerkiksi palkkien yläpinnan raudoitus jäädä vajaaksi, tilanteessa jossa palkki alkaakin toimia ulokkeena.

Koska Suomessa käytetään paljon ontelolaattoja, on suunnittelijan syytä kiinnittää erityistä huomiota myös laatoitusten jännitysjakautumiin. Liian suuret reiät alueella, jossa jännitys kasvaa kannattelevan rakenneosan poistuessa käytöstä, voi aiheuttaa laataston katkeamisen reiän kohdalta. Tämä taas voi aiheuttaa hyvin herkästi jatkuvan sortuman etenemisen laataston osan tippuessa alemmille rakenteille. Tärkeintä on suunnitella reiät niin, että kuormat pääsevät siirtymään reiän ohi laatastoille suunnitelluille rengasraudoituksille. Tarpeeksi pienten reikien ohi kuormat pääsevät siirtymään itsestään, mutta joissain tilanteissa voidaan joutua reiän ympärille suunnittelemaan lisäraudoitusta, joita pitkin kuormat pääsevät siirtymään kriittisen alueen yli.

Kun rakenteita suunnitellaan jatkuvan sortuman estäminen huomioiden, on tärkeää muistaa, että onnettomuustilanteissa rakenteiden suuretkin muodonmuutokset ovat sallittuja. Oikeastaan ainut suunnittelukriteeri on, että yhden rakenneosan pettäminen ei aiheuta jatkuvaa sortumaa, vaan muut rakenteet kestävät niille siirtyvät kuormat sortumatta.

Laskentamallien päistään nivelöityjen rakenteiden osalta voitiin nähdä huomattaviakin muodonmuutoksia jo pienillä laskentakuormilla. Koska kuormat kuitenkin jakautuivat tasaisesti koko rakennesysteemille, ei rakennus menettänyt stabiliteettiään.

## 11 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda teoria osiosta ja käytännön läheisemmästä tutkivasta osiosta koostuva raportti, joka käsittelee jatkuvan sortuman vaikutuksia betonirakenteissa ja betonirakenteiden suunnittelussa. Opinnäytetyön tavoite saavutettiin ja tuloksena syntyi raportti, jonka lukemalla rakennesuunnittelija saa kattavan käsityksen siitä, miten jatkuvan sortuman riskiä kartoitetaan rakennushankkeissa Suomessa, ja mikä on rakennesuunnittelijan tehtävä jatkuvan sortuman estämisen takaamiseksi.

Ensimmäinen suunnitteluaskel jatkuvan sortuman ehkäisemisen suunnittelussa on aina jatkuvan sortuman riskin kartoittaminen. Jatkuvan sortuman kartoitusprosessi on pitkä ja voi rakennushankkeen vaativuudesta riippuen kestää käytännössä koko hankkeen ajan. Prosessin yksinkertaistamista ja yhtenäistämistä varten on Suomen rakennusinsinöörien liitto luonut ohjeet rakenteellisen turvallisuuden varmistamiselle. Näitä RIL:in ohjeita seuraamalla voi jatkuvan sortuman suunnittelusta vastaava suunnittelija, tai suunnittelijoista koostuva työryhmä, varmistua siitä, että rakennushankkeelle on tehty riittävät toimenpiteet jatkuvan sortuman kartoittamiseksi.

Suomessa jatkuvan sortuman kartoitus alkaa jo ennen rakennusluvan hakua. Suomen rakennusvalvonta edellyttää viimeistään rakennuslupaa hakiessa toimittamaan heille rakennushankkeen alustavan riskiarvion lausunnon. Alustavassa riskiarviossa tulee olla maininta rakennushankkeen vaativuusluokasta. Vaativuusluokka määräytyy eurokoodin osan EN 1990 seuraamusluokka taulukon mukaan. Mikäli hanke kuuluu luokkiin CC2 tai CC3 on läheisemmät tarkastelut jatkuvan sortuman osalta syytä aloittaa.

Jatkuvan sortuman tutkiminen perustuu pitkälti riskianalyysiin. Riskianalyysien tarkoitus on hahmottaa kyseiselle rakennushankkeelle ominaisia riskitekijöitä, jotka pitää huomioida rakenteiden suunnittelussa. Riskianalyysia varten luodaan työryhmä, jonka tehtävä on pohtia eri riskitekijöiden vaikutuksia ja niiden todennäköisyyttä rakennushankkeessa. Käytännössä ryhmä koostuu usein suurimmaksi osaksi

rakennesuunnittelijoista. Työryhmä kokoontuu yhteen ja pitää pöytäkirjaa kokouksista, jotka yhteen koottuna luovat riskianalyysin raportin. Työryhmän tehtävän helpottamiseksi Suomen rakennusinsinöörien liitto on luonut kysymyslistan, jonka läpi käymällä työryhmä kartoittaa rakennushankkeen riskitekijöitä.

Kun jatkuvaa sortumaa edistävät riskitekijät ja rakennushankkeelle ominaiset onnettomuuskuormat on kartoitettu riskianalyysin avulla, voi rakenteiden suunnittelu jatkuvan sortuman ehkäisemiseksi edetä. Rakenteet voi suunnitella monella eri tapaa, mutta tuloksena täytyy olla aina rakenne, joka koko arvioidun käyttöikänsä ajan kestää niin, ettei jatkuvan sortuman vaaraa synny. Etenkin ennakoimattomien onnettomuuskuormien aiheuttamiin teoreettisiin alkusortuma tilanteisiin tulee perehtyä tarkkaan. Rakenteen tulisi aina kestää sortumatta, vaikka yksi sen kantavista osista vaurioituu menettäen kantavuutensa kokonaan.

Koska jatkuvan sortuman ehkäisemiselle on useita eri keinoja, on oikean suunnittelutavan valinta hankkeesta ja suunnittelijasta kiinni. Nyrkkisääntönä raportissa tehtyjen rakenneanalyysien perusteella voidaan todeta, että jatkuvilla rakenteilla on yksiaukkoisia lyhyitä rakenteita huomattavasti paremmat jatkuvaa sortumaa ehkäisevät rakenteelliset ominaisuudet. Mitä vähemmän rakenteessa on liitoskohtia, sitä vähemmän siinä on kohtia, joista rakenne voi pettää. Jos satunnaisia valmistusvirheitä tai inhimillisiä tekijöitä ei huomioida, on betonirakenteiden heikoin kohta aina liitoksissa. Tästä syystä paikallavalettuja betonirakenteita voidaan myös pitää parempana valintana elementtirakenteille, kun rakenteita tarkastellaan jatkuvan sortuman ehkäisemisen näkökulmasta.

Suomessa eurokoodin määrittämiä seuraamusluokka CC3 luokan rakennuksia on vielä melko vähän, mutta uskon että tulevaisuudessa ainakin raportin esimerkkikohteen tapaisia erittäin korkeita tornirakennuksia alkaa nousemaan myös Suomen taivaalle. Toivottavasti myös rakennesuunnittelussa pysytään kehityksen mukana.

## Lähteet

- 1 Rakennusrungon vakavuustarkastelut. 2006. Verkkodokumentti. Rakennusteollisuus.  
<<http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/rakennuksen-jaykistys/laskentaperiaatteet>>. Luettu 19.12.2014.
- 2 SFS-EN 1991-1-7. Yrityksen sisäinen verkkolevy. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Luettu 7.1.2015.
- 3 Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL R.Y. 1999. RIL 144-1997. Pikapaino Paatelainen Oy. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL R.Y.
- 4 Tutkintaselostus. Messuhallin katon romahtaminen Jyväskylässä 1.2.2003. Verkkodokumentti. Onnettomuustutkintakeskus.  
<[http://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2003/b22003y\\_tutkintaselostus/b22003y\\_tutkintaselostus.pdf](http://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2003/b22003y_tutkintaselostus/b22003y_tutkintaselostus.pdf)>.  
Luettu 9.1.2015
- 5 Rakenteellisen turvallisuuden varmistamien riskianalyysillä. Yrityksen sisäinen verkkolevy. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL. Luettu 15.1.2015
- 6 Ohje rakenteellisen turvallisuuden varmistamiseksi. Verkkodokumentti. Espoon kaupunki, Rakennusvalvontakeskus, Tekninen yksikkö.  
<<http://www.espoo.fi/download/noname/%7BB2A82477-7250-47C3-96FA-AB49E2269E10%7D/11931>>. Luettu 15.1.2015
- 7 Erytymenettely – keinoja rakenteellisen turvallisuuden varmistamiseksi. Verkkodokumentti. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL Ry.  
<<http://www.bing.com/search?q=erityismenettely&src=IE-TopResult&FORM=IETR02&conversationid=>>>. Luettu 16.1.2015
- 8 Levanto, Risto. 2014. Yksikönpäällikkö, Helsingin rakennusvalvontavirasto. Haastattelu. 31.1.2014.
- 9 Menettelytavat vaativan rakennushankkeen rakenteellisen turvallisuuden varmistamiseksi. Yrityksen sisäinen verkkolevy. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL Ry. Luettu 16.1.2015.
- 10 Betoninormikortti 23: Liitosten mitoitus onnettomuuskuormille. Yrityksen sisäinen verkkolevy. Luettu 22.1.2015
- 11 RIL 241-2007 Rakenteellisen turvallisuuden varmistaminen. Yrityksen sisäinen verkkolevy. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL. Luettu 6.2.2015
- 12 Yrityksen omat asiakirjat esimerkki suunnittelukohteesta, riskianalyysi workshop istunnot. Yrityksen sisäinen verkkolevy. Luettu 23.3.2015.

- 13 Yrityksen omat asiakirjat esimerkki suunnittelukohteesta, jatkuvan sortuman suunnittelu kohteessa. Yrityksen sisäinen verkkolevy. Luettu 23.3.2015
- 14 Robot Structural Analysis ohjelmistolla tehdyt mallilaskelmat.

## Laskentaesimerkki liitosten mitoitukselle

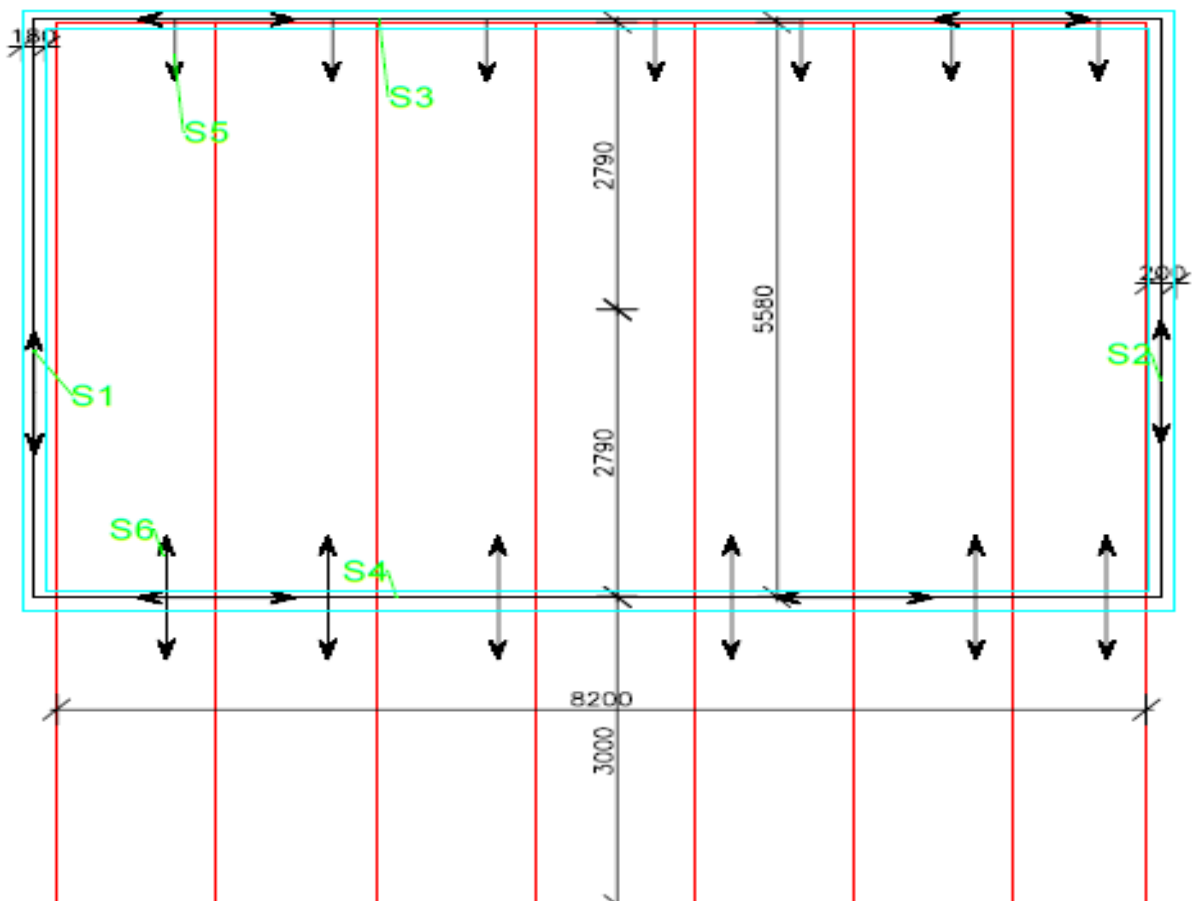
Laskentaesimerkin rakenne on kerrostalon ontelolaatoilla kokoa HL370 toteutettu välipohjarakenne. Ontelolaatat on tuettu kantaviin ulko- ja väliseiniin.

Laskelmat esitetään SFS-EN 1991-1-7 osan mukaisina vähimmäissidevoimalaskelmina. Laataston ympäri kiertävät rengasraudoitukset ja laataston sisäiset saumaraudoitukset.

Vaakarakenteen pysyvän kuorman ominaisarvo:

$g_k = 5.0 \text{ kN/m}^2 + 0.5 \text{ kN/m}^2 + 0.5 \text{ kN/m}^2 = 6.0 \text{ kN/m}^2$  (ontelolaatat hl=370, tasoite, väliseinät)

Sidevoimat  $T_i = (S_i + L_i) \times 20 \text{ kN/m}$ , missä S on etäisyys siteen keskeltä laataston keskelle ja L on etäisyys siteen keskeltä kannattelevan rakenteen reunaan.



Kuva 19. Pystysuuntaiset sidevoimat ja kuormien kertymäalueet.

Kertymäleveydet  $S_i$ :

$$S_1 = 4100\text{mm}$$

$$S_2 = 4100\text{mm}$$

$$S_3 = 2790\text{mm}$$

$$S_4 = 5790\text{mm}$$

#### Sidevoimat $T_i$ :

$$T_1 = (4.1\text{m} + 0.18\text{m}) \times 20\text{kN/m} = 85,6\text{kN}$$

$$T_2 = (4.1\text{m} + 0.2\text{m}) \times 20\text{kN/m} = 86\text{kN}$$

$$T_3 = (2.79\text{m} + 0.09\text{m}) \times 20\text{kN/m} = 57,6\text{kN}$$

$$T_4 = 5.79\text{m} \times 20\text{kN/m} = 115,8\text{kN}$$

#### Teräkset:

A500 HW,  $f_{yk} = 500\text{MPa}$

$$A_{S4} = 115,8\text{kN} \times 1000\text{N}/500\text{N}/\text{mm}^2 = 231,6 \text{ mm}^2$$

Valitaan 3T12 = 339mm<sup>2</sup>

$$A_{S3} = 57,6\text{kN} \times 1000\text{N}/500\text{N}/\text{mm}^2 = 115,2 \text{ mm}^2$$

Valitaan 2T12 = 226mm<sup>2</sup>

$$A_{S2} = 86\text{kN} \times 1000\text{N}/500\text{N}/\text{mm}^2 = 172\text{mm}^2$$

Valitaan 2T12 = 226mm<sup>2</sup>

$$A_{S1} = 85,6\text{kN} \times 1000\text{N}/500\text{N}/\text{mm}^2 = 171,2\text{mm}^2$$

Valitaan 2T12 = 226mm<sup>2</sup>

#### Ontelolaattojen suuntaiset saumateräkset:

#### Reunatuki:

Teräkset k/k 1200

$$V_{k1} = 2.79\text{m} \times (5.0\text{kN}/\text{m}^2 + 0.5\text{kN}/\text{m}^2 + 0.5\text{kN}/\text{m}^2 \times 2.0) = 18.135\text{kN}/\text{m}$$

$$A_{S5} = 1.2 \times 18.135\text{kN}/\text{m} \times 1000\text{N}/500\text{N}/\text{mm}^2 = 43.524\text{mm}^2$$

Valitaan T12 K1200 = 113mm<sup>2</sup>

#### Keskituki:

Teräkset k/k 1200

Vaadittu teräsmäärä on suurempi seuraavista:

$$A_{S6} = (V_{k1} + V_{k2}) / f_{yk} \times 5.58\text{m} / (5.58\text{m} + 3.0\text{m}) \text{ tai } 20\text{kN}/\text{m} / f_{yk}$$

$$V_{k1} = 2.79 \times (5.0\text{kN}/\text{m}^2 + 0.5\text{kN}/\text{m}^2 + 0.5\text{kN}/\text{m}^2 \times 2.0) = 18.135\text{kN}/\text{m}$$

$$V_{k2} = 1.5 \times (5.0\text{kN/m}^2 + 0.5\text{kN/m}^2 + 0.5\text{kN/m}^2 \times 2.0) = 9.75\text{kN/m}$$

$$A_{S6} = 1.2 \times (18.135\text{kN/m} + 9.75\text{kN/m}) \times 1000\text{N}/500\text{N/mm}^2 = 66.924\text{mm}^2$$

$$\text{Valitaan T12 K1200} = 113\text{mm}^2$$

### **Seinien sidonta välipohjaan**

Sidevoiman ominaisarvo

$$F_{tie} = 20\text{kN/m} \leq 150\text{ kN}$$

Teräsvaarna mitoitetaan voimalla  $F_{tie} = 20\text{kN/m}$

Mitoitus tehdään EN-1992-1-1 kohdan 6.25 mukaan. Käytetään onnettomuustilanteen osavarmuuskertoimia.

Laskelmassa on oletettu, että saumassa ei ole puristusjännitystä, jolloin liitoksen kestävyys perustuu pelkästään teräsvaarnan kestävyteen. Laskelman perusteella sauman leikkauskestävyys on riittävä.

Kahden betonisauman leikkausliitoksen kestävyys EN-1992-1-1 (6.25)

Lähtötiedot:

Betoni: C 30/37  
 $f_{ck} := 30 \text{ MPa}$   
 $f_{ctd} := 1.67 \text{ MPa}$   
 $f_{cd} := 21.25 \text{ MPa}$

Onnettomuusmitoitustilanne:  
 $\gamma := 1.2$      $\alpha_{ct} := 1.0$   
 $\gamma_c := 1.2$      $\alpha_{cc} := 0.85$

Teräs: A500 HW  
 $f_{sd} := 500 \text{ MPa}$      $\gamma_s := 1.0$

Vaarnojen halk.  $d := 20 \text{ mm}$

Vaarnojen k-jako  $s := 1200 \text{ mm}$

Vaarnojen kulma  $\alpha := 90$

$$A_s := 314 \text{ mm}^2$$

$$A_i := 200 \text{ mm} \cdot 1200 \text{ mm} = (2.4 \cdot 10^5) \text{ mm}^2$$

$$\rho := \frac{A_s}{A_i} = 0.001$$

Liittymäpinnat:

$$c := 0$$

Jos ei puristusta myös C=0

$$\mu := 0.6$$

$$\sigma_n := 0 \text{ MPa}$$

$$b := 200 \text{ mm}$$

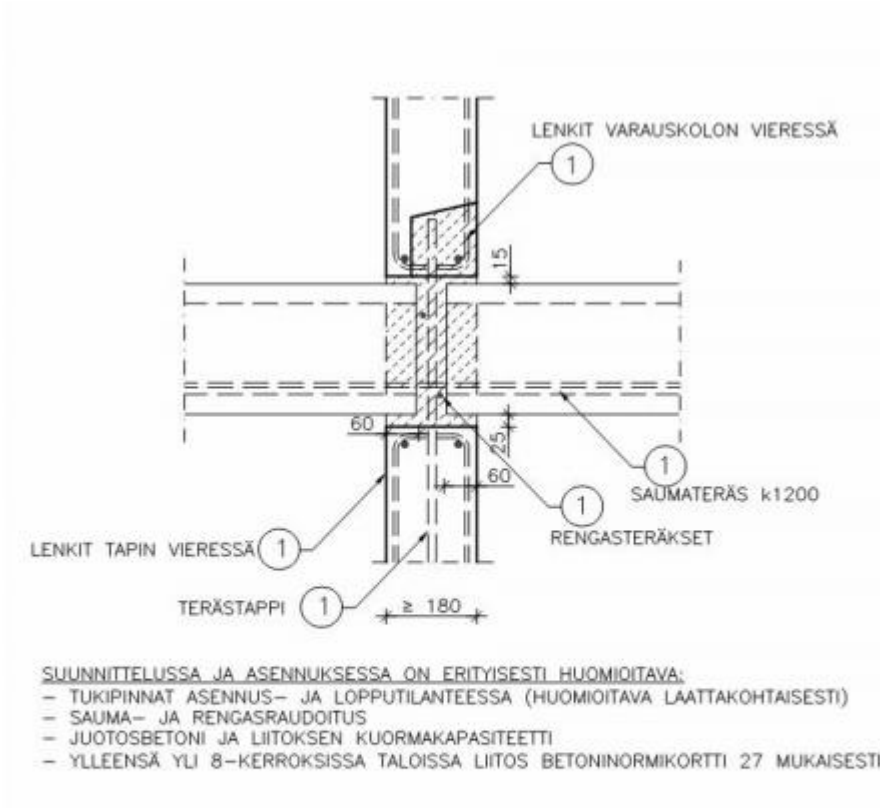
Ohje:

	Hyvin sileä	Sileä	Karhea	Vaamattu	Monoliittinen
c:	0,025	0,35	0,45	0,5	0,625
μ:	0,5	0,6	0,7	0,9	1

Laskenta:  $V_{Rdi} \leq 0.5 \nu f_{cd}$

$$\nu := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{30}{250}\right) = 0.528$$

$$V_{Rdi} := c \cdot f_{ctd} + 0 + \rho \cdot f_{sd} \cdot (\mu \cdot 1 + 0) = 0.393 \text{ MPa} \quad \ll \quad 0.5 \cdot \nu \cdot f_{cd} = 5.61 \text{ MPa}$$



MATERIAALI- JA TARVIKELUETTELO						TUNNUS:	
RY	PO	MAT/TAR	TYYPPI	KOKO	LAATU	MÄÄRÄ	HUOM.
RH	1	TERÄS			A 500 HW		

Kuva 20. Detaljkuva kantavan seinän ja välipohjan liitoksesta.

### **Pystysuuntaiset siteet:**

Kantavien seinien mitoitukselle saadaan ohjeet SFS-EN 1991-1-7 kansallisesta liitteestä. Liitteen mukaan seinien tulee kestää onnettomuustilanteessa esiintyvät vetovoimat, jonka mitoitusarvo on suurin pystysuuntaisen pysyvän ja muuttuvien kuormien mitoitusarvojen yhdistelmä, joka kertyy seinälle yhdestä kerroksesta. Vetovoima ankkuroidaan yläpuoliseen kerrokseen.

Kantavan seinän pystysiteet voidaan sijoittaa enintään 6m välein pitkin seinää ja ne saavat olla enintään 3m etäisyydellä seinän vapaasta päästä

Seuraavassa laskelmassa tarkastetaan väliseinän pystysiteet. Kerroskorkeus on 2.6m ja muuttuvan kuorman yhdistelykerroin on 0.3.

Ripustettava kuorma seinän paino mukaan laskettuna:

$$F=13.0\text{kN/m} + 5.7\text{m} \times (5.0\text{kN/m}^2 + 0.5\text{kN/m}^2 + 0.5\text{kN/m}^2 + 0.3 \times 2.0\text{kN/m}^2) = 50.62\text{kN/m}$$

(seinän paino + seinälle kertyvät kuormat vaakarakenteilta)

$$F_{\text{tot}}= 8.3\text{m} \times 50.62\text{kN/m} = 425.208\text{kN}$$

Lisätään seinän pystysaumoihin 2T16 ankkurointi teräkset.

$$F_R= 2 \times 201\text{mm}^2 \times 500\text{N/mm}^2 = 201\text{kN}$$

Raudoitusten lisäksi tarvitaan seinän kolmannespisteisiin seinäkengät 2 PSK 20 ja jatkospultit 2 HPM/P.

$$F_R= 2 \times 314\text{mm}^2 \times 500\text{N/mm}^2 = 314 \text{ kN}$$

$$F_{R_{\text{tot}}}= 201\text{kN} + 314\text{kN} = 515\text{kN} \geq 425.208\text{kN} \quad \text{OK!}$$