

1 LISÄKIINNITYSTUTKIMUKSEN YHTEENVETO JA TULOSTEN TARKASTELU

Teollistumisen aikakaudella elinkeinorakenteen muutos siirsi asumisen painopistettä maaseudulta kohti kaupunkeja. Asuntojen suuri kysyntä vaati asuntotuotannolta tehokkuutta, johon elementtiteollisuus tarjosi ajalleen modernin ratkaisuvaihtoehdon. BES-järjestelmän mukanaan tuomat vakioidut elementtityypit ja liitosdetaljit vahvistivat betonin asemaa asuinkerrostalojen runkoratkaisuissa myös julkisivujen osalta, joissa sandwich-elementeistä tuli yleisin rakenneratkaisu jo 1960-luvun aikana.

Nopeaa kehitystahtia seurasi rakenteiden laadullinen heikkeneminen. Julkisivuissa käytetyt tekniset ratkaisut eivät kyenneet vastaamaan pitkäaikaiskestävyyden asettamiin vaatimuksiin, jolloin korjaustarpeita alkoi esiintyä varsin pian elementtien käyttöönoton jälkeen. Tilanne johti betonirakenteiden suunnitelmallisen kunnossapidon ja korjausmenetelmien kehittämiseen, mikä käynnisti myös julkisivuja koskevan korjaustoiminnan.

Julkisivujen korjaustarvetta arvioidaan aina tapauskohtaisesti suoritettun kuntotutkimuksen perusteella. Korjaustapa valitaan ennalta määritettyjen kriteerien perusteella eri vaihtoehtoja vertailemalla. Usein suurin painoarvo on korjaustavan teknisellä soveltuvuudella, mutta merkitystä on myös esimerkiksi taloudellisilla näkökohdilla tai pyrkimyksellä parantaa koko rakennuksen energiatehokkuutta.

Peittävää korjaustapaa eli ns. verhouskorjausta sovelletaan yleisesti pitkälle vaurioituneen julkisivun korjausmenetelmänä, jossa uusi verhousrakenne kiinnitetään vanhan ulkokuoren pintaan. Yhdessä lisälämmöneristeen kanssa asennettava uusi pintaverhous muuttaa vanhan rakenteen kuormitusolosuhteita, mikä vaikuttaa myös vanhan elementin kuorien väliseen kiinnitysvarmuuteen.

1.1 Lisäkiinnitystarpeen laskennallinen arviointi

Vanhan seinärakenteen lisäkiinnitystarve muodostuu, mikäli vanhan rakenteen betonikuorien välinen puristus- tai vetokapasiteetti todetaan vallitseviin kuormitusolosuhteisiin nähden riittämättömäksi. Tässä tutkimustyössä betonivalmisteisten sandwich-elementtien toimintaa tarkasteltiin laskennallisesti FEM-ohjelmistolla (Ansys Mechanical APDL 15.0), jolloin keskeisenä päämääränä oli vanhan elementin kuorien välisen kiinnitysvarmuuden määrittäminen eri tilanteissa sekä

tutkimuksen päätavoitteen mukainen lisäkiinnitystarpeen ja siihen vaikuttavien tekijöiden arviointi.

Laskenta suoritettiin 3D-rakennemalleilla, joissa vanha elementti mallinnettiin todellisten mitta- ja materiaalitietojen mukaisesti käyttämällä verhoukorkorjattavana olevien elementtien valmistusajankohtaan suhteutettuja lähtöarvoja. Poikkileikkausmitoiltaan 1980-luvun lopulle tyypillisiin ei-kantaviin sandwich-elementteihin sisällytettiin umpielementin sekä ikkuna-aukollisen ruutuelementin perusmallit, joista koostettiin laskentaa varten erilaisia muunnelmia. Betonikuorien välisenä sideraudoitteena toimi laskentatapauksesta riippumatta diagonaaliansas, jonka perusmallina sovellettiin Peikko Oy:n valmistamaa PD-200 tyyppin ansarakennetta.

Kuormitustietoihin sisällytettiin rakenteiden painot, kosteus- ja lämpötilamuodonmuutoksista aiheutuvat pakkovoimat, tuulikuormituksen paine- ja imuvaikutukset sekä sisäkuoreen kohdistuva pystykuormitus. Rasisolosuhteiden valinnassa pyrittiin huomioimaan rakenteen kannalta pahin mahdollinen kuormitustilanne kuitenkin välttämällä laskenta-arvojen tarpeetonta yliarviointia.

Suoritetut rakenneanalyysit käsiteltiin kolmessa erillisessä laskentavaiheessa olettamalla materiaaliominaisuudet koko laskennan ajan lähtötietojen mukaisia suunnitteluarvoja vastaaviksi.

Ensimmäinen laskentavaihe

Ensimmäisessä laskentavaiheessa vertailussa olivat diagonaalivoimien jakaumat korjaamattoman lähtötilanteen ja verhoukorkorjatun rakenteen välillä tilanteessa, jossa vanhan elementin eristekerroksen ei oletettu välittävän voimasuureita. Laskenta osoitti pakkovoimien ja erityisesti muodonmuutosgradientin selkeästi hallitsevan vaikutuksen diagonaalien kokonaisvoimakehityksen kannalta. Verhoukorkorjauksen lisääminen kasvattaa ansaiden suurimpia puristusrasituksia, mutta vetorasitusten ääriarvot pienenevät korjauksen aiheuttamista olosuhdemuutoksista johtuen lisättyjen rakenteiden painosta huolimatta.

Umpielementeillä tehdyissä tarkasteluissa verhoukorkorjauksen lisääminen johtaa rasisetuimpien puristusdiagonaalien nurjahtamiseen, jolloin sideraudoitus ei yksinään riitä kattamaan korjauksesta aiheutuvia kuormituksia. Vetorasitusten kannalta umpielementtien ansaiden kapasiteetti on riittävä vielä suositusjakoa (k 600) pidempää ansasjakoa (k 1200) käytettäessä. Ruutuelementin tapauksessa vastaavaa kapasiteetin ylittymistä ei havaittu vaan rasisustasoissa jäätiin melko selvästi umpielementin alapuolelle.

Toinen laskentavaihe

Toisessa laskentavaiheessa tarkasteltiin laskentaa varten tehtyjen yksinkertaistuksien vaikutuksia diagonaalirasituksiin sekä arvioitiin saatujen tulosten yleistämismahdollisuutta. Umpielementtien toimintaa käsiteltiin myös aiempaa laajemmin ottamalla mukaan vanhan eristekerroksen vaikutukset.

Puristusrasituksia välittävä vanha eristekerros nostaa selvästi elementin kuorien välistä puristuskapasiteettia, jolloin diagonaaliterästen nurjahtaminen ei enää rajoita elementin kantavuutta. Eristeen toimiessa vetorasitukset keskittyvät alimmille ja ylimmille vetodiagonaaliriveille selkeiden maksimiarvojen sijaitessa elementin ulkokuoren ylänurkkien alueella. Umpielementillä tehdyissä tarkasteluissa kantavuusongelmia ilmeni ainoastaan pidennettyä ansasjakoa (k 1200) käytettäessä. Muissa laskentatapauksissa vanhan rakenteen kapasiteetti oli valittuihin kuormitusolosuhteisiin nähden riittävällä tasolla.

Umpielementin sisäkuoren paksuutta kasvattamalla (80 mm → 150 mm) pyrittiin simuloimaan kantavien elementtityyppien käyttäytymistä. Laskennan tulokset vastasivat suurimpien diagonaalirasitusten osalta lähes täysin ei-kantavalla elementillä saatuja riippumatta siitä, oliko vanhan eristekerroksen vaikutus mukana tarkastelussa vai ei. Kun sideraudoitteen ominaisuuksissa ei tapahdu muutoksia, sisäkuoren jäykkyyden vaihtelulla ei laskennan perusteella voida todeta olevan merkittävää vaikutusta ansaiden voimakehitykseen.

Epäkeskisen kuormituksen vaikutuksien arviointi perustui umpielementin sisäkuoren pystykuormalle annettavaan alkuepäkeskisyyden arvoon - 20 mm tai + 20 mm. Pelkän sideraudoitteen toimiessa epäkeskisyyden vaikutukset näkyvät selvimmin puristusdiagonaalien rasituksissa, joihin niillä on kuormitussuunnasta riippuen joko edullinen tai epäedullinen vaikutus. Laskennan perusteella kuormituksen epäkeskisyys tai rakenteen vinous voi johtaa puristuskapasiteetin ylittymiseen keskeistä kuormitustilannetta todennäköisemmin, jolloin puristuskapasiteetin lisääminen on perusteltua pelkän sideraudoitteen toimiessa erityisesti korkean kuormitusasteen omaavilla elementeillä.

Vanhan eristekerroksen vaikutusta epäkeskiseen pystykuormaan tarkasteltiin kuormittamalla umpielementti murtoon verhouksrakenteen painoa lisäämällä. Välitöntä lisäksiinnitystarvetta ei laskentatulosten perusteella ilmennyt, sillä suurimmat sallitut kuormitukset olivat kaikissa tapauksissa selvästi normaalisti käytettävien raskaimpien verhouksjärjestelmien painon yläpuolella. Kuormituksen epäkeskisyydestä aiheutuu huomattava epävarmuustekijä arvioitaessa elementin kiinnitysvarmuutta erityisesti kantavien elementtityyppien kohdalla.

Kolmas laskentavaihe

Kolmannessa laskentavaiheessa tarkastelu keskittyi ulkokuoren betonin halkeiluun verhoukorkorjauksen jälkeisissä olosuhteissa. Oma tapauksena mukaan otettiin yksinkertaistettu rakennemalli, jolla tarkasteltiin ansaspaarten ankkurointisyvyyden tai vaihtoehtoisesti parretankoa ympäröivän betonin vaurioitumisen vaikutuksia ansaan ulosvetolujuuteen.

Verhoukorkorjauksen jälkeen vaikuttavalla kuormitusyhdistelmällä todennäköinen ulkokuoren halkeilualue rajoittuu elementin keskialueen ulkopintaan ansaiden parrelinjojen mukaisesti. Lähes kauttaaltaan puristettuna toimivalla ulkokuoren sisäpinnalla vastaavaa halkeilua ei esiinny, jolloin kuormitusolosuhteista johtuvalla betonin halkeilulla ei tulosten perusteella ole suoraa vaikutusta ansaiden ankkurointikapasiteettiin.

Ansaspaarten ankkurointisyvyyden tai vaihtoehtoisesti betonissa etenevän heikkousvyöhykkeen vaikutuksia arvioitiin muuttamalla parretta suojaavaa betonipeitepaksuutta ja määrittämällä laskennallisesti parretangon ulosvetolujuutta vastaava kuormitus. Suojaavan betonipeitteen ollessa yli 20 mm ei parteen ankkuroinnilla ole laskennan perusteella vaikutusta ansaan kapasiteettiin. Murtoon vaadittava kuormitus laskee tasaisesti aina 10 mm:n peitepaksuuteen asti, minkä jälkeen ansaan ulosvetolujuus putoaa jyrkästi saavuttaen 5 mm:n betonikerroksella enää 38 % lähtötilanteen arvosta.

Johtopäätökset

Laskentatulosten perusteella määritetyt arviot eri elementtityyppien lisäkiinnitystarpeesta ovat esitettynä kootusti taulukossa 1.1.

Taulukko 1.1 Eri elementtityyppien lisäkiinnitystarve laskentatulosten perusteella.

LASKENTAT APAUS	Vanha eristekerros mukana laskennassa	Ansasja ko	Lisäkiinnityst arve	Rajoittava tekijä
Umpielementti	Ei	k 600	Kyllä	Puristuskapasiteetti
Ruutuelementti	Ei	k 600	Kyllä	Puristuskapasiteetti
Umpielementti	Ei	k 1200	Kyllä	Puristuskapasiteetti
Umpielementti	Kyllä	k 600	Ei	-
Umpielementti	Kyllä	k 1200	Kyllä	Vetokapasiteetti
Umpielementti, kantava	Ei	k 600	Kyllä	Puristuskapasiteetti
Umpielementti, kantava	Kyllä	k 600	Ei	-

Edellä esitetyt tulokset ovat voimassa, mikäli rakenteiden kiinnitysosissa tai niitä ympäröivässä betonissa ei esiinny lujuusominaisuuksia heikentäviä vaurioita.

Pidennetyllä ansasjaolla tehdyt laskennat sekä ansaspaarten ankkurointitarkastelu antavat viitteitä siitä, että betonin tai teräsosien vaurioitumisen aiheuttama ansaan kapasiteetin putoaminen voi jo paikallisella vaikutuksella johtaa ketjumaisesti etenevään vetomurtoreaktioon, jolloin lisäkiinnittämisestä tulee perusteltua erityisesti vaurion vaikutusalueen sijaitessa rasiitetuimpien ansaiden tai ansadiagonaalien alueella.

Elementissä etenevän teräskorroosion vaikutusten arviointi riippuu vaurion laajuudesta ja vaurioasteesta. Diagonaaliansailla terästen korrosio pienentää paitsi toimivaa poikkileikkausta myös tartuntaominaisuuksia, jolloin lisäkiinnittämisestä tulee perusteltua pitkälle edenneissä vauriotapauksissa ansaspaarten ankkurointikapasiteetin heikentymisen kautta. Korroosiorasitusten kantavuusvaikutusten huomioiminen on mahdollista esimerkiksi teräsrakenteiden käyttöikäsuunnittelun tehollisiin poikkileikkauksiin perustuen, mikä on käyttökelpoinen menetelmä erityisesti kuorielementtien kiinnityksiä tutkittaessa. Kuorielementeillä jo yksittäinen kiinnikevaurio voi johtaa lisäkiinnitystarpeeseen kiinnikemäärän ollessa tavallisesti elementtikohtaisesti pieni. Kiinnitysvarmuutta ja lisäkiinnikkeiden käyttöä on näissä kohteissa arvioitava aina tapauskohtaisesti.

1.2 Lisäkiinnikkeiden mitoitus

Olemassa olevan rakenteen kiinnitysvarmuuden tarkastelu vaatii aina huolellisen kuntotutkimuksen, joka toimii lisäkiinnitystarpeen arvioinnin lähtökohtana. Tässä tutkimuksessa lisäkiinnikkeiden mitoitusta lähestyttiin rakennesuunnittelijan näkökulmasta, jolloin pääpaino oli kiinnikerungon mitoittamisen sijaan kiinnikekohtaisten rasitusten määrittämisessä.

Suunnittelun kannalta varmallalla puolella oleva ratkaisu on mitoittaa lisäkiinnikkeet kaikille ulkokuoreen kohdistuville rasituksille, mutta myös vanhan rakenteen lujuusominaisuuksien hyödyntäminen on tapauskohtaisesti mahdollista. Riittävä varmuustaso on saavutettavissa rajoittavaa tai heikentynyttä kiinnityskapasiteettia kasvattamalla (kts. taulukko 1.1) käytössä olevia kiinniketyyppejä soveltaen. Puristuskapasiteettia voidaan lisätä vaaka-ankkuroinnilla, kun taas vetotapauksessa käytetään tapauksesta riippuen vinoankkureita tai vaaka- ja vinoankkureiden yhdistelmiä. Vanhan eristeen puristuslujuuden hyödyntämismahdollisuus poistaa normaalitilanteissa puristusankkuroinnin tarpeen, jolloin vaaka-ankkureiden käytön ratkaisee mitoitus tuulen imuvaikutukselle.

Ankkurikohtaisten rasitusten määrittämisen jälkeen suunnittelijan tehtäväksi jää ankkurin valinta siten, että käytettävä kiinnike soveltuu vaikuttaviin kuormituksiin, ympäröiviin olosuhteisiin ja alustan asettamiin ehtoihin kiinniketoimittajan ohjeistuksen sallimissa rajoissa.

1.3 Epävarmuustekijöitä

Lisäkiinnitystarpeen laskennallista määrittämistä vaikeuttaa vanhojen julkisivuelementtien todellisissa rasitusolosuhteissa ja materiaaliparametreissa esiintyvä runsas hajonta, sillä muuttujien varioinnilla voidaan vaikuttaa olennaisesti saataviin laskentatuloksiin. Erityisen haasteellisena voidaan pitää vanhan elementin puristuskapasiteetin arviointia, sillä selkeää raja-arvoa ei voida esittää siitä, millaisissa tapauksissa puristusrasitukset välittyvät vielä ansadiagonaalien ja milloin vastaavasti vanhan eristemateriaalin kautta.

Verhouskorjauksen asentaminen ilman lisäkiinnittämistä johtaa suurella todennäköisyydellä toimivien puristusdiagonaalien nurjahtamiseen, jos elementin todellinen kuormitustilanne vastaa tässä tutkimuksessa käytettyjä olosuhteita. Puristusrasitusten siirtyminen ansailta eristeelle kasvattaa huomattavasti vanhan ulkokuoren siirtymätilaa, jolloin liikemahdollisuus on otettava huomioon uuden pintaverhouksen suunnittelussa välttämällä muodonmuutoksille arkoja pintamateriaaleja. Mikäli elementin sideraudoitteissa ei esiinny vaurioita, ei murtorajatilaa todennäköisesti saavuteta vaan liiallisten siirtymien rajoittaminen voi lopulta määrittää lisäkiinnitystarpeen. Diagonaalien nurjahtamistodennäköisyys kasvaa siirryttäessä kohti nykyvaatimusten mukaisia eristepaksuuksia, jolloin pienemmän U-arvon omaavien elementtien puristusrasitus voi vaatia toimivaa eristekerrosta jo ennen verhouskorjauksen asentamista. Näissä tapauksissa korjausratkaisu ei olennaisesti kasvata vanhan elementin siirtymiä.

Eristemateriaalin käyttäytyminen vanhassa elementissä riippuu eristemateriaalin jäykkyydestä, josta erityisesti vanhojen rakenteiden osalta on saatavilla vain vähän tietoa. Lujuusominaisuudet voivat ajan kuluessa heikentyä käytetyistä suunnitteluarvoista, minkä lisäksi jännitys-muodonmuutosyhteys voi suuren kuormituspaineen alla sisältää epälineaarisuuksia tässä tutkimuksessa oletetun lineaarisen materiaalmallin sijaan. Näistä syistä johtuen vanhan elementin käyttäytyminen uudessa kuormitustilanteessa on vaikeasti ennustettavissa, mikäli vanhaa rakennetta ei päätetä lisäkiinnittää.

Lisäkiinnitystarvetta arvioitaessa eri epävarmuustekijöiden huomioiminen tuo runsaasti riskitekijöitä mukaan suunnitteluprosessiin, jolloin lopullinen päätös on tehtävä usean eri osatekijän summana. Taulukossa 1.2 on esitetty kootusti joitain elementtikohtaisia näkökulmia ja ominaisuuksia, jotka osaltaan madaltavat vahvistamattomana toteutettavan korjausratkaisun riskitasoa.

Taulukko 1.2 Korjauksen riskitasoa madaltavia elementtikohtaisia ominaisuuksia, mikäli verhoukorkorjaus toteutetaan ilman lisäkiinnittämistä.

Ominaisuus/tekijä	Peruste
Ei-kantava tai kevyesti kuormitettu elementti	- Sisäkuoren pystykuormituksen ja kuormituksen epäkeskisyyden vaikutus diagonaalirasitukseen vähäinen
Ruutuelementti	- Kosteusmuodonmuutoksen vaikutus aukotuksien johdosta umpielementtiä pienempi
Lisäeristemateriaalina EPS tai muu tiivis eriste	- Mineraalivillaan verrattuna pienemmät kosteusmuodonmuutosrasitukset
Elementti valmistettu vuonna 1985 tai sen jälkeen	- Vanhan eristeen suunnittelupuristuslujuus suuri - Puristusdiagonaalien mahdollinen nurjautuminen jo korjausta edeltävissä olosuhteissa
Muodonmuutoksia salliva uusi pintaverhouk	- Alustan liikkeet eivät aseta lisäehtoja uudelle pintaverhoukselle

Korjauskohteisiin sisältyy todennäköisesti useita eri tapauksia, joissa vanhan elementin kiinnitysvarmuus ilman lisäkiinnitystä voidaan perustellusti todeta riittäväksi. Vanhan rakenteen vahvistamatta jättäminen vaatii kuitenkin lähes poikkeuksetta huolellista kohdekohtaista analysointia sekä erillisen laskennallisen tarkastelun suorittamista.

1.4 Tutkimuksen rajaukset ja rajoitukset

Laskentaa varten koottujen kuormitustietojen valintaan pyrittiin sisällyttämään rakenteen kannalta aina mitoittavin tilanne, jolloin tulokset ovat varmalla puolella useimpien seinäelementtien tapauksessa. Käytettävää varmuustasoa ei kuitenkaan voida luotettavasti määrittää, sillä erityisesti pakkovoimien kosteusmuodonmuutosten määrittämisessä tehdyt yksinkertaistukset ja kosteus-kutistuma -yhteyden olosuhderiippuvuus vaikeuttavat kuormitusten suuruusluokan täsmällistä arviointia. Teoreettisten laskenta-arvojen soveltuvuus käytäntöön tulisi tästä syystä vahvistaa kokeellisesti.

Ensimmäisessä ja toisessa laskentavaiheessa käytetty lineaarinen laskentateoria ei huomioi ulkokuoren betonin halkeilusta ja virumasta johtuvaa jäykkyyden muutosta, jolloin rakenteen todennäköinen ylijäykkyys johtaa todellista selkeästi suurempiin jännitysarvoihin. Tulostarkkuutta voitaisiin siten parantaa toistamalla esitetty laskenta epälineaarisilla materiaalimalleilla, sillä näiden ominaisuuksien laajamittainen huomioiminen ei ollut mahdollista tämän tutkimustyön resurssien puitteissa. Saatujen teoreettisten tulosten vastaavuutta todellisiin arvoihin tulisi myös arvioida koekuormituksin ennen tutkimustulosten soveltamista käytännössä.

Elementtikohtaista käsittelyä olisi myös mahdollista laajentaa ottamalla mukaan vanhan ulkokuoren eri pinnoitteiden ja pintamateriaalien vaikutukset. Edelleen tässä tutkimuksessa käytettyjä laskentamalleja olisi kehitettävä myös muuttuviin poikkileikkausmittoihin, poikkeaviin elementtimuotoihin, eri lisäeristemateriaaleihin ja verhousmateriaalien kiinnitysjärjestelmien ominaisuuksiin soveltuviksi.

Lisätutkimuksia vaaditaan erityisesti erilaisille ruutuelementeille sekä epäkeskisen kuormituksen rasittamille kantaville elementeille. Ei-kantavien elementtien tutkimustulokset antoivat viitteitä huomattavista eroista ansaiden rasiustasoissa epäkeskisyyden vaikuttaessa eri suunnissa, jolloin vaikutus korostunee raskaammin kuormitetuilla elementtityypeillä. Ruutuelementeillä luotettavamman tuloksen saaminen edellyttää aukon reunoilta etenevän kutistuman sekä erilaisten aukotustapausten tarkastelua. Myös vanhojen eristemateriaalien todellisista puristuskapasiteeteista tulisi tehdä erillinen selvitys, sillä tekijällä on suora vaikutus elementtikohtaisen lisäkiinnitystarpeen arviointiin.

Lisäkiinnitystarpeen määrittäminen perustuu kuntotutkimustuloksiin, jolloin erityisesti vanhojen rakenteiden vahvistamatta jättäminen vaatii todennäköisesti lisäresursseja kiinnitysjärjestelmien kunnon varmistamiseen. Lisäkiinnitysten osuus korjaushankkeen kokonaiskustannuksista on taas melko pienessä roolissa, jolloin talousnäkökulman lähempi tarkastelu voi nousta lopullisen lisäkiinnityspäätöksen kannalta merkittävään asemaan.