



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

ANTTI VIITANEN

POLYURETAANIERISTEISET TERÄSRAKENTEISET PIENTALO-  
SEINÄELEMENTIT

Diplomityö

Tarkastaja: professori Ralf Lindberg  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Rakennetun ympäristön tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa 8. kesäkuu-  
ta 2011

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

**VIITANEN, ANTTI:** Polyuretaanieristeiset teräsrakenteiset pientaloseinäelementit

Diplomityö, 85 sivua, 31 liitesivua

Huhtikuu 2012

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Ralf Lindberg

Avainsanat: polyuretaani, kylmämuovattu, teräs, orsi, seinä, elementti, pientalo, passiivitalo

Tämän työn tavoitteena oli kehittää polyuretaanieristeinen teräsrakenteinen pientaloseinäelementti ja tutkia sen rakennusfysikaalista toimivuutta sekä luoda periaateratkaisut elementin liitoksista ja yksityiskohdista. Elementti kehitettiin passiivitasoisena vastamaan tämän päivän energiatehokkaan rakentamisen tarpeita. Suunnittelussa otettiin huomioon elementin pitkälle automatisoitu teollinen valmistustapa, vaikka varsinaiseen elementtirakennuslinjastoon ei otettu kantaa. Elementtiä suunniteltaessa kiinnitettiin erityistä huomiota kustannustehokkuuteen ja lämmöneristävytyteen sekä kosteustekniiseen toimivuuteen Suomen ilmastossa.

Lähdemateriaalista ei löytynyt valmiita ratkaisuja passiivitasoiseen teräsrunkoiseen seinärakenteeseen, joten rakennetta alettiin kehittää ennakkoluulottomasti tyhjältä pöydältä. Yli kahdestakymmenestä rakennehahmotelmasta poimittiin lupaavimmat ratkaisut, joita tutkittiin riittävällä tarkkuudella kantavuuden, lämmöneristävytyden ja kustannusten kannalta lopullista valintaa varten. Valinnassa päädyttiin C-Termorangalla toteutettuun ratkaisuun erinomaisien teknisien ominaisuuksin ja teolliseen tuotantoon liittyvien mahdollisuuksien vuoksi. Valitussa ratkaisussa Termorankojen välissä on mineraalivilla ja molemmin puolin kipsilevyt. Yhtenäinen polyuretaanikerros on tämän kantavan osan ulkopuolella ja ulkopuolen pintarakenteet ovat kiinnitetty ansain polyuretaanikerroksen läpi Termorankoihin.

Elementin kantavuus mitoitettiin Rautaruukki Oy:n ProfBeam-ohjelmalla yksi- ja kaksikerroksisiin pientaloihin. Lämmöneristävyttä tutkittiin lämpöhäviöiden tasauskannan kautta ja HEAT-ohjelmistolla, akustiikkaa Heikki Helimäki Oy:n ILPO-ohjelmalla ja kosteusteknistä toimivuutta HAM-ohjelmilla. Tiiviyyttä sekä palo-ominaisuuksia tutkittiin lähinnä rakentamismääräyskokoelman ohjeiden ja määräyksien pohjalta.

Elementin teräsosien vahvuus on pääsääntöisesti 1,0 - 1,5 mm ja polyuretaanikerroksen paksuus 200 mm. Elementin kokonaispaksuus on 384 mm, U-arvo 0,092 W/m<sup>2</sup>K, paino 64 kg/m<sup>2</sup>, ilmaääneneristävyys 51 dB ja materiaalikustannus ~60 €/m<sup>2</sup>. Elementti voidaan materiaalivalinnoista riippuen toteuttaa myös 356 mm paksuna 0,088 W/m<sup>2</sup>K U-arvolla. Rakenteelle suunniteltiin useita eri liitosratkaisuja ja yksityiskohtia mitoitusesimerkkeineen, joiden ansiosta elementtiä voidaan käyttää laaja-alaisesti ja joustavasti erilaisissa pientaloissa.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

**VIITANEN, ANTTI:** Wall Element with Steel Frame and Polyurethane Insulation for Small Houses

Master of Science Thesis, 85 pages, 31 Appendix pages

April 2012

Major: Structural Engineering

Examiner: Professor Ralf Lindberg

Keywords: polyurethane, cold-formed, steel, profile, wall element, small house, passive house

The goal of this work was to develop a wall element with steel frame and polyurethane insulation for small houses, examine its performance and develop the element further at a detailed level. The additional goal was to research the performance and usage of cold formed-steel and polyurethane together in an external wall structure in general. The element was developed for a passive energy level solution used in energy efficient buildings. The element was going to be produced in a highly automated factory. This was kept in mind during the development process, although the design of the automatic assembly line was not a part of this work. Particularly the cost efficiency and hygrothermal performance in Finnish climate were important factors, when developing and designing the element.

There was no source material to be found about passive energy level steel framed external wall structures. After some early stage brainstorming the projects workgroup had outlined over twenty different element types to choose from. The most interesting ones were examined closer and compared by thermal performance, material cost, and strength. An element type with C-Termoranka-profile was chosen. This solution was the best alternative when it comes to technical performance and possibilities in automated industrial production. This element type has 100 mm mineral wool between steel profiles and gypsum boards on its both sides. Outside this load-bearing part is the 200 mm thick polyurethane layer and outer structures according to cladding materials.

The steel frame was dimensioned with Rautaruukki PLC's ProfBeam software. Thermal performance was examined with HEAT software and using C3/2010, D2/2010 and D3/2010 sections from Finnish rules and regulations of construction. Acoustics was examined with Heikki Helimäki Oy's ILPO software and hygrothermal performance with HAM software. Airtightness and fire performance were studied by using the Finnish rules and regulations of construction.

In the final element almost every steel part and profile is 1,0 - 1,5 mm thick. U-value of the element is 0,092 W/m<sup>2</sup>K, total thickness 384 mm, and weight 64 kg/m<sup>2</sup>. The airborne sound insulation capability is 51 dB and the material cost is ~60 €/m<sup>2</sup>. The element can also be built as 356 mm thick with 0,088 W/m<sup>2</sup>K U-value by using polyurethane and mineral wool with better  $\lambda$ -value. The element can be used widely in different small houses due to its versatile design and options.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty SPU Oy:n tuotekehitysosastolla. Diplomityön tilaajat ovat Rautaruukki Oyj ja SPU Oy. Diplomityön on ohjannut professori Ralf Lindberg Tampereen teknilliseltä yliopistolta ja Pasi Käkälä SPU Oy:ltä. Projektin kehitysryhmään kuului ohjaajien lisäksi Jyrki Kesti, Reima Niemi ja Pekka Roivio Rautaruukki Oyj:ltä, Ari Kemppainen SPU Oy:ltä ja Pertti Iso-Mustajärvi Tampereen teknilliseltä yliopistolta.

Diplomityö oli luonteeltaan tuotekehitysprojekti, jonka tavoitteena oli kehittää uusi tuote. Projektissa otettiin huomioon lopputuotteen kaupallisuus ja tuotannollisuus sekä laajemmin teknisen toimivuuden kannalta tärkeimmät seikat. Laajan kokonaisuuden vuoksi diplomityössä oli mukana paljon eri osa-alueiden ammattilaisia. Minun roolini tässä projektissa oli koota tämän ryhmän osaaminen yhteen ja tuottaa sen pohjalta tietoa sekä ratkaisuja, joita käsiteltiin erikokoisissa ryhmissä. Oli hienoa päästä työskentelemään niin laaja-alaisen asiantuntijaryhmän kanssa.

Kiitän Rautaruukki Oyj:tä ja SPU Oy:tä, että pääsin mukaan tähän mielenkiintoiseen ja opettavaiseen tuotekehitysprojektiin. Ralf Lindbergiä ja Pasi Käkälää kiitän opastuksesta ja asiantuntemuksesta diplomityön eri vaiheissa. Lisäksi kiitän Jyrki Kestiä teräsrakentamisen asiantuntemuksesta, Ari Kemppaista lukuisista innovatiivisista ideoista ja innostamisesta uudenlaisiin ratkaisuihin ja Pertti Iso-Mustajärveä erityisesti siitä, että hän keksi ja esitti valintaprosessin loppusuoralla valituksi tulleen elementtiratkaisun. Kiitokset myös koko kehitysryhmälle panoksesta, ideoinnista ja innokkuudesta. Lisäksi kiitän SPU Oy:n kehitysinsinööri Krista Luukkaista neuvoista, ideoista, tuesta ja motiivoinnista diplomityön aikana.

Rakenteen laaja-alainen tutkiminen riittävällä tarkkuudella oli haastava tehtävä. Sain siihen suuren avun Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan osaston henkilökunnalta. Kiitän yliassistentti Ari Aaltoa neuvoista liitosten ja yksityiskohtien mitoituksessa, professori Markku Heinisuota asiantuntemuksesta teräsorsijärjestelmien yksityiskohtien suunnittelussa, projektipäällikkö Timo Inhaa asiantuntemuksesta paloteknisissä kysymyksissä ja tutkimusjohtaja Juha Vinhaa opastuksesta kosteus- ja lämpöteknisissä tarkasteluissa.

Lopuksi kiitän Ari Kemppaista ja Reima Niemeä elementin koekohteiden etsinnästä ja hankkimisesta sekä projektin eteenpäin viemisestä laajalla rintamalla. Kiinnostus markkinoilla antoi pontta diplomityön teolle, ja innostuin entisestään kehittämään rakennetta mahdollisimman pitkälle hyväksi tuotteeksi.

Tampereella 04.04.2012

Antti Viitanen

# SISÄLLYS

Termit ja määritelmät.....	viii
1 Johdanto .....	1
1.1 Tavoitteet .....	1
1.2 Rajaukset.....	2
1.3 Työn suoritus.....	2
2 Rakenne ja materiaalit.....	4
2.1 Elementin tavoiteominaisuudet ja raja-arvot .....	4
2.2 Teräksen ja polyuretaanin ominaisuudet.....	5
2.3 Rautaruukki Oyj ja SPU Oy .....	6
3 Rakenteen valinta .....	8
3.1 Rakenteen hahmottelu.....	8
3.2 Lupaavimmat rakenteet.....	9
3.3 Orsien kantavuuden mitoitus.....	10
3.4 Polyuretaanipaksuuden mitoitus .....	12
3.4.1 Eristevahvuudet ja U-arvo .....	13
3.4.2 Lämmöneristeiden kehittyminen ja rakenteen kokonaispaksuus .....	14
3.5 Materiaalikustannukset .....	15
3.6 Käytettävät rakennustarvikkeet.....	17
3.6.1 Lämmöneristeet .....	17
3.6.2 Kantava runko.....	19
3.7 Rakennevaihtoehtojen erot ja valinta .....	20
3.7.1 C-orssi .....	22
3.7.2 Z-orssi.....	22
3.7.3 $\Omega$ -orssi .....	22
3.7.4 Termoranka .....	23
3.7.5 Valinta.....	23
4 Valitun rakenteen toiminta.....	25
4.1 Kantavuus.....	25
4.1.1 ProfBeam-ohjelman yleiset mitoituseriaatteet.....	25
4.1.2 ProfBeam-ohjelmalla saadut tulokset.....	26
4.2 Lämmöneristävyys .....	28
4.2.1 HEAT-ohjelmien yleiset toimintaperiaatteet ja käyttö .....	28
4.2.2 Lämpöhäviöiden tasauslaskennan yleiset periaatteet .....	30
4.2.3 Lämpöhäviöiden tasauslaskenta tutkittavalla rakenteella.....	33
4.2.4 Tulokset .....	34
4.3 Tiiviys .....	35
4.3.1 Ilmatiiviys .....	35
4.3.2 Vesihöyrytiiviyys.....	36
4.3.3 Huomioon otettavat seikat suunnittelussa ja rakentamisessa .....	37
4.4 Akustiikka .....	38

4.4.1	ILPO-ohjelman kuvaus .....	39
4.4.2	Rakenteen ilmaääneneristävyyteen vaikuttavat tekijät .....	40
4.4.3	Rakenteiden ilmanääneneristävyys .....	40
4.4.4	Väliseinät .....	41
4.5	Kosteustekninen toimivuus .....	42
4.5.1	DOF-Lämpö-ohjelman yleiset toimintaperiaatteet .....	43
4.5.2	DOF-Lämpö-ohjelman käyttö työssä .....	44
4.5.3	Tutkimuksia höyrynsulun sijainnista Suomen ilmastossa .....	45
4.5.4	Passiivirakentamisen haasteet .....	47
4.6	Palo-ominaisuudet .....	47
4.6.1	Palomääräykset ja tutkittava rakenne .....	48
4.6.2	P1- ja P2-luokan rakenteet .....	49
5	Valitun rakenteen yksityiskohdat .....	51
5.1	Elementtien väliset pystysaumamat .....	52
5.1.1	Mitoitusperiaatteet .....	53
5.1.2	Pystysauma pitkällä sivulla .....	55
5.1.3	Pystysauma nurkassa .....	56
5.2	Elementin ja sokkeliin liitos .....	58
5.2.1	Liitos U-orrella .....	58
5.2.2	Liitos teräslevyllä ja -tangoilla .....	59
5.2.3	Mitoitusperiaatteet .....	60
5.2.4	Liitoksen muut komponentit .....	61
5.3	Elementin liitos ylä- ja välipohjaan .....	62
5.3.1	Mitoitusperiaatteet .....	62
5.3.2	Palkkivaihtoehdot ja yläpohjaliitos .....	63
5.3.3	Välipohjaliitos .....	65
5.4	Ovi- ja ikkunakiinnitykset .....	66
5.5	Elementin nostaminen .....	68
5.6	Ulkoverhous .....	69
5.6.1	Puupaneeli .....	70
5.6.2	Rappaus .....	70
5.6.3	Tiili .....	70
5.6.4	Teräs .....	70
5.6.5	Aurinkopaneeli .....	71
5.7	Talotekniikka .....	71
5.7.1	Asennustila .....	71
5.7.2	Läpiviennit ja reiät .....	71
5.8	Väliseinät .....	72
5.9	Kiintokalusteiden kiinnitys .....	73
5.9.1	Sisällä .....	73
5.9.2	Ulkona .....	74
5.10	Laatu ja käsittely .....	74

5.10.1	Saumojen vaahdotus.....	74
5.10.2	Suojaus ja rakentamisen kosteudenhallinta.....	75
5.10.3	Vaurioiden toteaminen ja korjaaminen.....	76
5.10.4	Yhteenveto.....	76
6	Tulokset.....	78
6.1	Rakennevaihtoehdot.....	78
6.2	Tulosten tarkkuus.....	79
6.3	Tavoitteiden saavuttaminen.....	80
7	Johtopäätökset.....	81
7.1	Elementti.....	81
7.2	Käytännön merkitys.....	82
7.3	Toimintasuositukset.....	83
7.4	Jatkotutkimustarve.....	83
7.5	Työn onnistuminen.....	85
	Lähteet.....	86
	Liite 1: RET pientalo.....	88
	Liite 2: Brainstorming-avainsanalista.....	90
	Liite 3: Valintavaiheeseen lasketut eristepaksuudet.....	91
	Liite 4: Kuormien laskenta.....	93
	Liite 5: Materiaalikustannusarvio.....	95
	Liite 6: C-orren kapasiteetit.....	96
	Liite 7: Rakennuksen lämpöhäviöiden tasauslaskenta.....	98
	Liite 8: Ilmääneneristävyys.....	100
	Liite 9: Lämpötila- ja kosteuslaskelmat, DOF-Lämpö.....	101
	Liite 10: Kiinnikemekanismeja.....	102
	Liite 11: Elementtien välisen pystysauman kiinnikkeiden mitoitus.....	103
	Liite 12: Elementin sokkeliliitoksen sekä U-orren mitoitus.....	105
	Liite 13: Elementin yläpalkin mitoitus.....	108
	Liite 14: Elementin rakenteiden mitoitus ikkuna-aukon kohdalla.....	110
	Liite 15: Elementin nostaminen.....	115
	Liite 16: Elementin kuvat ja ominaisuudet.....	118

## TERMIT JA MÄÄRITELMÄT

Adiabaattinen	DOF-Lämpö-ohjelman raja, jonka toisella puolella olevaan aineeseen ei siirry eikä poistu lämpöä.
Avohuokoinen eriste	Lämmöneriste, jonka avohuokoinen rakenne mahdollistaa ilman ja kosteuden liikkumisen eristeessä.
Diffuusiotiivis	Materiaali, jossa ei tapahdu vesihöyryn diffuusiota.
Dynaaminen jäykkyys	Kuvaa materiaalin tai rakenneosan jäykkyyttä ja vaikuttaa materiaalin tai rakenteen resonanssitaajuuteen ja ilmaääneneristävyyteen.
E-luku	Rakennuksen kokonaisenergiankulutusta kuvaava luku, joka on energiamuotojen kertoimilla painotettu rakennuksen vuotuinen ostoenergiankulutus rakennustyyppin standardikäytöllä lämmitettyä nettoalaa kohden. E-luku saadaan lasquemalla yhteen ostoenergian ja energiamuotojen kertoimien tulot energiamuodoittain.
ERA 17	Toimintaohjelma, joka edistää rakennetun ympäristön energiatehokkuutta, vähäpäästöisyyttä ja laatua ja koostuu maankäytöstä, uudis- ja korjausrakentamisesta, rakennusten ylläpidosta ja uusiutuvan energian hyödyntämisestä. Toimintaohjelma on visioitu Sitran ja Tekesin sekä laajan asiantuntijajoukon voimin.
HAM	Yleisnimitys ohjelmille, jotka voidaan mallintaa ja simuloida lämmön, ilman ja kosteuden liikkeitä rakenteessa (Heat, Air, Moisture).
Hiilijalanjälki	Luku, joka kuvaa tuotteen, toiminnan tai palvelun ympäristövaikutuksen. Hiilijalanjäljelle ei ole tällä tarkkaa yhtenäistä määritelmää.
Ilmatiiviys	Kuvaa rakennekerroksen tai rakenteen kykyä päästää ilmaa lävitseen.
Ilmanvuotoluku $n_{50}$	Ilmanvuotoluku $n_{50}$ [1/h] kuvaa rakennusvaipan ilmanpitävyyttä. Se ilmoittaa montako kertaa rakennuksen ilmatilavuus vaihtuu tunnissa rakennusvaipan vuotoreittien kautta, kun rakennukseen aiheutetaan 50 Pa ali- ja ylipaine.
Ilmanvuotoluku $q_{50}$	Ilmanvuotoluku $q_{50}$ [m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> ] kuvaa rakennusvaipan ilmanpitävyyttä. Se ilmoittaa rakennusvaipan keskimääräisen vuotoilmavirran tunnissa 50 Pa paine-erolla kokonaissämittöjen mukaan laskettuna rakennusvaipan pinta-alaa kohden. Rakennusvaipan pinta-alaan lasketaan ulkoseinät aukoksineen sekä ylä- ja alapohja.
Ilmaääneneristysluku $R_w$	Kahden huoneen tai muun tilan välistä ilmaääneneristävyyttä kuvaava luku, joka saadaan vertaamalla taajuuskaistoit-



	<p>tain mitattua ilmaääneneristävyyttä standardoituun vertailukäyrään. Ilmaääneneristyslukua merkitään <math>R_w</math> [dB], jos kyseessä on eristävän rakenteenlaboratoriomittaus, ja <math>R'_w</math> [dB], kun kyseessä on mittaus rakennuksesta.</p>
Ilmaääni	Äänilähteestä ilman välityksellä ympäristöön leviävä ääni.
Primäärienergia	Jalostamatonta luonnon energiaa mitattuna siinä muodossa kuin se on ennen muunnosprosessia, kuten esimerkiksi uraania, maalämpöä, vesivoimaa ja niin edelleen.
Kylmäsilta	Rakennusosassa oleva, viereisiin aineisiin verrattuna hyvin lämpöä johtavasta aineesta tehty rakenneos, jonka kohdalla lämpötilaeron vaikutuksesta rakennusosan pintojen läpi kulkevan lämpövirran tiheys on jatkuvuustilassa viereiseen alueeseen verrattuna suurempi.
LCA	Life Cycle Assessment (LCA) on menetelmä, jolla arvioidaan ympäristökuormaa tuotteen, toiminnan tai prosessin koko elinkaaren ajalta valmistuksesta kierrätykseen tai hävittämiseen. LCA analyysille ei ole vielä yhtä vakiintunutta määrittelymenetelmää.
LCC	Life Cycle Cost (LCC) on menetelmä, jossa tutkitaan ja arvioidaan tuotteen, toiminnan tai prosessin vaikutusta ympäristöön. Lähtötietoina voidaan käyttää LCA analyysin tuloksia. LCC analyysille ei ole vielä yhtä vakiintunutta määrittelymenetelmää.
Lisäkonduktanssi	Lisäkonduktanssi ilmoittaa kylmäsilasta aiheutuvan lisäyksen jatkuvuustilassa rakennusosan läpi kulkevaan lämpövirtaan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien ympäristöjen välillä on yksikön suuruinen.
LTO	Ilmanvaihtokoneen osana oleva lämmöntalteenottolaite, joka ottaa talteen lämpöä poistoilmasta ja lämmittää sillä tuloilmaa.
LTO:n vuosihyötysuhde	Rakennuskohtainen ilmanvaihdolle laskettava arvo, jonka lähtöarvoina käytetään muun muassa LTO:n lämpötilasuhdetta. Arvo kuvaa LTO:n suorituskykyä kyseisessä rakennuksessa.
Lämpöhäviö	Rakenteen, laitteen tai ilmiön kautta tapahtuva lämpöenergian siirtyminen rakennuksen sisältä ulos [W/K].
Lämpötilasuhde	Ilmanvaihtolaitteen LTO-laitteen ominaisuus, joka määritellään EN 308 mukaan. Testissä laitteen tulo- ja poistoilmavirrat ovat yhtä suuret. Lämpötilasuhde kuvaa LTO:n suorituskykyä.
Lämmönjohtavuus	Lämmönjohtavuus ( $\lambda$ ) ilmoittaa lämpövirran tiheyden jatkuvuustilassa pituusyksikön paksuisen tasa-aineisen aine-

	kerroksen läpi, kun lämpötilaero ainekerroksen pintojen välillä on yksikön suuruinen.
Kastepiste	Lämpötila, jossa vesihöyryä sisältävän kaasun suhteellinen kosteus on 100 %.
Kondensoituminen	Tiivistymistä, jossa kaasumainen aine vaihtaa olomuotoaan nesteeksi. Rakenteisiin voi tapahtua veden kondensoitumista lämpötilan muutoksen seurauksena, jos rakenteessa olevaa kosteuspitoisuutta ei rajoiteta ja lämpötilanmuutokset ovat kondensoitumiselle suotuisat.
Konvektio	Tarkoittaa kaasuseoksen liikkumista kokonaispaine-eron vaikutuksesta.
Kosteusmäärä	Vesihöyryn määrä ilmassa [ $\text{g}/\text{m}^3$ ].
Kyllästymiskosteus	Kastepisteessä ilman sisältämä määrä vesihöyryä [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]
Lämmönläpäisykerroin	Lämmönläpäisykerroin ilmoittaa lämpövirran tiheyden, joka jatkuvuustilassa läpäisee rakennusosan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien ympäristöjen välillä on yksikön suuruinen. Lämmönläpäisykerrointa kutsutaan myös U-arvoksi ja sen yksikkö on $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ .
Lämmönvastus (R)	Termisessä jatkuvuustilassa olevan tasapaksun ainekerroksen tai kerroksellisen rakenteen lämmönvastus ilmoittaa rakenteen eri puolilla olevien isotermisten pintojen lämpötilaeron ja ainekerroksen läpi kulkevan lämpövirran tiheyden suhteen. Lämmönvastuksen yksikkö on $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ .
Nollaenergiatalo	Tarkat määritelmät vaihtelevat lähteestä riippuen. Lähtökohtaisesti nollaenergiatalo on omavarainen energiankulutuksen suhteen.
Ominaislämpökapasiteetti	Kuvaa kuinka paljon lämpöenergiaa sitoutuu materiaaliin lämpötilaeroa ja massaa kohden. Yksikkö on $\text{J}/\text{Kkg}$ . Ominaislämpökapasiteetti voidaan ilmoittaa myös esimerkiksi materiaalin tilavuuteen suhteutettuna.
Passiivitalo	Rakennus, jonka lämmitysenergian tarve on $25 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ja tiiviys on $\leq 0,6 \text{ l/h}$ [24] ja primäärienergian tarve $\leq 130 - 140 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$ riippuen rakennuksen sijainnista. Diplomityössä käytettävät viitteelliset U-arvot passiivitalolle ovat seuraavat [25] [26]; <ul style="list-style-type: none"> <li>• yläpohja <math>\sim 0,07 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}</math></li> <li>• ulkoseinä <math>\sim 0,09 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}</math></li> <li>• alapohja <math>\sim 0,09 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}</math></li> </ul> (tuulettuva ja maanvarainen) <p>Lämpöhäviöiden tasauslaskennassa rakennuksen suunnitteluratkaisun ominaislämpöhäviö saa olla enintään 85 % rakennukselle määritetystä vertailulämpöhäviöstä, jotta ra-</p>

	kennus on matalaenergiatasoinen [14]. Passiivitasoiselle rakennukselle käytetään tässä työssä viitteellistä 60 - 70 %.
Pintavastus	Ilmoittaa rakennusosan pinnan ja sisä- tai ulkopuolisen ympäristön välisen rajakerroksen lämmönvastuksen.
PIR	Polyisosyanuraatti, joka on yksi eristemateriaaliryhmä.
Rakennuksen ulkovaippa	Koostuu rakennusosista, jotka erottavan ulkoilman lämmöneristetyistä tiloista.
RET pientalo	Työssä on käytetty tyyppipientalona soveltuvin osin Rakennusten energiatehokkuus (RET) -hankkeessa määriteltyä pientaloa. Tyyppipientalo edustaa normaalia suomalaista pientaloa muun muassa mittojensa ja käyttönsä kannalta. Tyyppipientalo on esitelty pääpiirteittäin liitteessä 1. [15]
Shear lag	Ilmiö, jossa kylmämuovattujen teräsosien osittaisen kiinnityksen johdosta osan kiinnitetty alue ylikuormittuu, vaikka kiinnittämätön alue ei ole täysin loppuun asti kuormitettu.
Sisäinen konvektio	Ilman liikkumista avohuokoisessa lämmöneristeessä lämpötila- ja ilmanpaine-erojen vaikutuksesta.
Sivutiesiirtymä	Äänenpaineen välittymistä kahden tilan välillä varsinaisen tiloja jakavan rakennusosan ohi.
Stationääritila	Jatkuvuustila, jossa systeemiin tulee ja poistuu vakiomäärä ainetta ja lämpöenergiaa samassa ajassa. Stationääritilassa lämpötilat ja aineiden pitoisuudet ovat saavuttaneet tasapainotilan eivätkä muutu ajan kuluessa.
Suhteellinen kosteus	Ilman kosteusmäärä suhteessa kyllästymiskosteuteen, jota kutsutaan RH:ksi [%].
Vesihöyryn diffuusio	Tarkoittaa vesihöyrymolekyylien satunnaista liikkumista ilmassa tai huokoisen aineen huokosissa. Liikkuminen pyrkii tasoittamaan vesihöyryn osapaineen tai vesihöyrypitoisuuden paikallisia eroja höyryn siirtyessä pienempään osapaineeseen tai vesihöyrypitoisuuteen päin.
Vesihöyrynläpäisevyys	Ilmoittaa vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksumaisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien ero (tai vesihöyryn osapaine-ero) on yksikön suuruinen. [kg/m <sup>2</sup> sPa]
Vesihöyrytiiviyys	Kuvaa rakennekerroksen tai rakenteen kykyä päästää vesihöyryä lävitseen.
$\lambda_D$	CE-merkin mukainen keskihajonnan huomioon ottava lämmönjohtavuuden arvo, joka määritellään eurooppalaisen tuotestandardin mukaan, mutta se ei sellaisenaan käy suunnittelukäyttöön.

# 1 JOHDANTO

Energiatehokkuusvaatimukset kiristyvät 20 % vuonna 2012 voimaan astuvien määräysten perusteella. Seuraavan kiristysvaiheen on ennakoitu olevan 2015 ja lähes nollaenergiataso viimeistään vuonna 2020. Suomessa on kuitenkin kansalliseksi tavoitteeksi asetettu lähes nollaenergiataso jo vuonna 2017 (ERA17 hanke). Näin voimakas kiristymisen tarkoittaa murrosta rakentamisessa sekä rakenteiden että talotekniikan osalla. Myös lämmöneristämiskulttuurissa tultaneen kokemaan suuria muutoksia. Perinteisillä rakenteilla toteutettuna rakenteiden paksuudet kasvavat hyvin voimakkaasti. Rakenteiden paksuuden kasvaminen puolestaan lisää liittyvien rakenteiden kustannuksia, lisää kuljetuksia ja muuta logistiikkaa, aiheuttaa ongelmia asutuskeskusten ahtailla tonteilla, vaikeuttaa elementti- ja taloteollisuuden tuotantoa ja valmistusprosesseja jne. Niin ikään rakenteiden pitkäaikaiskestävyys saattaa muodostua kriittiseksi tekijäksi rakenteiden paksuuden kasvaessa. Energiatehokkuusvaatimusten kiristymisen myötä onkin haettava uusia tehokkaampia valmistusmenetelmiä ja ratkaisuja, jotka poikkeavat perinteisistä menetelmistä ja ratkaisuista.

Yksi tapa vastata näihin haasteisiin voisi olla teräsrakenteiden hyödyntäminen yhdessä tehokkaiden polyuretaanieristeiden kanssa pientaloseinäelementeissä ja -rakenteissa. Pientaloseinäelementillä voi olla saavutettavissa kustannustehokkuutta teollisen valmistuksen kautta. Tavoitteena on kehittää rakenteellisesti toimivia sovelluksia ottaen huomioon rakenteiden elinkaariäkillisyys ja valmistus. Pääpaino asetettiin kuitenkin ensisijaisesti rakenteelliseen toimintaan.

## 1.1 Tavoitteet

Diplomityön tavoitteena on luoda edellytykset kustannustehokkaalle ja teollisesti valmistettavalle pientalon teräsrunkoiselle seinäelementille. Lisäksi tavoitteena on selvittää teräsrakenteiden käyttöä yleisesti yhdessä SPU Eristeiden kanssa. Seinärakenne suunnitellaan passiivitasoisena ratkaisuna vastaamaan tämän päivän tarpeita energiatehokkaaseen rakentamiseen. Poliittisella tasolla on päätetty, että tästä energiatehokkuustasosta muodostuu lähitulevaisuudessa koko uudisrakentamisen energiatehokkuustaso.

Passiivitalo-määritelmää voidaan lähestyä usealla eri tavalla. Yleisempi, rakennuksen kokonaisenergian kulutukseen perustuva, tarkastelutapa on käyttökelpoisempi tarkasteltaessa rakennusta kokonaisuutena. Tässä tarkastelutavassa seinän lämmöneristyskyvyn raja-arvoihin vaikuttavat rakennuksessa muun muassa käytettävät lämmitysmuodot, ikkunat, ovet, sijainti, suuntaukset, arkkitehtuuri, muiden rakenteiden lämmönläpäisykertoimet jne. Koska kokonaisenergian kulutukseen vaikuttaa useat rakennuksen yksilölliset ominaisuudet, tässä työssä on rajoitettu tarkastelemaan energiankulutusta

käyttäen lämpöhäviöiden tasauslaskentaa, jossa tarkastellaan vain rakennuksen ulkovai-pan, ilmanvaihdon ja ilmapuotojen kautta tapahtuvia lämpöhäviöitä. Lämpöhäviöiden tasauslaskennassa käytetään soveltaen RET pientaloa, joka on esitetty diplomityön kan-nalta tärkeiltä osin liitteessä 1.

Diplomityössä käsiteltävän seinärakenteen tarkastelu luotettavasti voi olla haastavaa lämpöhäviöiden tasauslaskennan kautta, koska työssä tarkasteltava seinäelementti on vain yksi osa koko rakennusta. Tämän vuoksi elementtiä tarkastellaan myös lämmönlä-päisykertoimien, eli U-arvojen, kautta. Passiivitalon seinän viitteellinen U-arvon yläraja vaihtelee lähteestä riippuen paljonkin. Tässä työssä käytetyt U-arvot ovat arvioitu useita eri lähteitä käyttäen.

Diplomityössä selvitetään seinärakenteen rakennusfysikaalista toimintaa, kuten lämmöneristyskykyä, palo-ominaisuuksia, tiivyyttä, kosteusteknisiä ominaisuuksia ja ääneneristyskykyä. Lisäksi työssä tarkastellaan rakenteen lujuutta ja pitkäaikaiskestä-vyyttä. Rakenteen liittyminen muihin rakenteisiin (ala-, väli- ja yläpohja sekä ikkunat ja ovet) sekä yksityiskohtien hahmottelu kuuluvat myös työhön.

Diplomityöltä odotetaan tuloksena tietoa polyuretaanin ja teräksen yhteiskäytön mahdollisuuksista ja rajoitteista sekä ratkaisuja polyuretaanieristeiselle teräsrakenteisel-le elementille. Lisäksi arvioidaan saatuja tuloksia ja esitetään työn aikana ilmenneet lisäkehitystä ja tutkimusta vaativat asiat. Myös diplomityön antia sekä hyviä ja huonoja puolia arvioidaan.

## 1.2 Rajaukset

Diplomityöhön ei kuulu taloteollisuuden valmistusprosessien ja automatisoinnin suunnittelu. Kuitenkin rakenteiden valinnassa taloteollisuuden tarpeet pyritään ottamaan huomioon. Pääpaino on teknisesti toimivan ratkaisun löytämisessä.

Rakenteesta ei tehdä LCC/LCA- tai hiilijalanjälkianalyysia, koska näiden määrittä-miseen ei ole vielä laadittu yhtenäisesti käytettävää tai hyväksyttyä menetelmää. Silti polyuretaanin ja teräksen vahvuuksien, kuten erinomaisen lämmöneristyskyvyn ja pit-käaikaiskestävyyden sekä lujuuden, tehokkaalla hyödyntämisellä pyritään saamaan ra-kenteesta mahdollisimman pitkäikäinen ja energiatehokas.

E-lukua, joka kertoo rakennuksen kokoenergiankulutuksen neliometriä kohden, ei määritellä, koska se on rakennuskohtaisesti yksilöllinen. Yläpohja- ja alapohjarakenteet sekä perustukset eivät kuulu seinäliitoksia lukuun ottamatta tämän työn piiriin.

## 1.3 Työn suoritus

Diplomityön alussa tutustutaan teräksen ja polyuretaanin ominaisuuksiin ja rakenne-vaihtoehtoja ideoidaan kehitysryhmässä projektipalavereissa. Toimiva teräsrunkoinen polyuretaanieristeinen rakenne voidaan toteuttaa monella eri tavalla, joten vaihtoehtoja on paljon. Vaihtoehtoja ideoidessa pidetään mielessä rakenteen toteutettavuus ja kus-

tannustehokkuus. Myös seinäelementin teollinen valmistus otetaan huomioon. Tärkeimpänä tavoitteena on kuitenkin löytää järkevä ja teknisesti toimiva ratkaisu.

Lupaavimpien rakennevaihtoehtojen kantavuutta ja lämmöneristyskykyä arvioidaan riittävällä tarkkuudella valintaa varten. Rakennratkaisujen välillä pyritään löytämään tuotannollisia eroja ja rajoitteita sekä arvioimaan niitä. Näiden tarkastelujen pohjalta valitaan paras vaihtoehto.

Valittua rakennetta ja sen rakennusfysikaalista toimivuutta käsitellään tarkemmin sekä rakenteen yksityiskohtia ja osia kehitetään pidemmälle. Lopussa arvioidaan työn antia ja tuloksia. Lisäksi esitetään lisäkehitystä vaativat asiat.

## 2 RAKENNE JA MATERIAALIT

### 2.1 Elementin tavoiteominaisuudet ja raja-arvot

Elementin keskeisimmät tavoiteominaisuudet:

- U-arvo  $\sim 0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Elementti mahdollistaa RET pientalon passiivitasoisena lämpöhäviöiden tasauslaskennan kautta tarkasteltuna
- Elementti mahdollistaa ilmatiiviin rakentamisen, ilmanvuotoluku  $n_{50} \leq 0,6 \text{ 1/h}$
- Elementin kokonaispaksuus logistiikkasyistä  $\leq 384 \text{ mm}$
- Sovellettavissa yksi- ja kaksikerroksisiin rakennuksiin
- Kustannustehokas

Kustannustehokkuus pitää sisällään esimerkiksi käytettävien eri orsityyppien määrän ja seinän kokonaispaksuuden optimoinnin. U-arvossa voidaan tarpeen vaatiessa joustaa kustannustehokkuuden vuoksi. Seinän paksuutta arvioidessa käytetään 28 mm ulkoverhouskerrosta, 30 mm tuuletusväliä ja 13 mm paksua kipsilevyä, jonka käyttö vaihtelee ratkaisusta riippuen. Elementin ulkopintaan kiinnitettävät ikkunoiden ja ovien pielilaudat sekä pellit kasvattavat elementin paksuutta 50 mm (pielilaudat 20 mm ja pellit 30 mm). Elementin esivalmistusaste tulee olla mahdollisimman korkea, koska tehdastyön tehokkuus on huomattavasti suurempi verrattuna työmaatyöhön. Elementin paksuutta voidaan kuitenkin rajoittaa pielilautojen ja pellin asentamisella vasta työmaalla. Kokonaispaksuuden yläraja saatiin kysymällä talopakettivalmistajilta elementin maksimipaksuutta, jonka jälkeen kokonaispaksuus aiheuttaa haasteita ja lisäkustannuksia tuotannon ja logistiikan kannalta.

Käytettävän rakennusmateriaalin määrää pyritään minimoimaan kustannustehokkuusnäkökulman vuoksi. Lisäksi rakennusmateriaalimenekkiä minimoimalla voidaan vaikuttaa positiivisesti rakenteen mahdolliseen luokitteluun tulevaisuudessa, koska Suomessa on kaavailtu 2017-vuodeksi rakennusmateriaalien arvottamista hiilidioksidipäästöjen mukaan. [1]

Rakenteessa ja liitoksissa pyritään välttämään kylmäsiltoja, koska passiivitasoisessa rakennuksessa kylmäsiltojen suhteellinen osuus vaipan lämpöhäviöistä kasvaa. Termorangan käyttöä voidaan harkita  $\geq 100 \text{ mm}$  korkeilla orsien poikkileikkauksilla. Matalammilla poikkileikkauksilla orret ovat umpiterästä, koska Termorangan reikärivien mahtuminen matalampiin poikkileikkauksiin on haastavaa. Termorangan 6-reikäinen reikäriivi sijaitsee keskellä poikkileikkauksen uumaa 60 mm matkalla. Mahdolliset orsiin

tehtävät läpiviennit voisivat heikentää matalan, alle 100 mm korkean, termorei'itetyn orren kantokykyä merkittävästi. Orsien vahvuusvaihtoehtoja ovat 1,0; 1,2; 1,5; 2,0 ja 2,5 mm.

Elementin liittyminen muihin rakenteisiin tulee olla helposti toteutettavissa. Seinäelementin lämmöneristekerros pyritään jatkamaan mahdollisimman yhtenäisenä ylä- ja alapohjan liitoksien yli koko ulkovaipan yhtenäisen lämmöneristekerroksen saavuttamiseksi. Seinärakenteen liittyminen muihin rakenteisiin ja rakenteen toteutukseen liittyviä seikkoja pohditaan rakennetta valittaessa kehitysryhmän kokemukseen perustuen.

Hyvät laadunvalvontamahdollisuudet sekä yksinkertaisesti toteutettava rakenne ja liitokset mahdollistavat laadukkaamman ja riskittömämmän rakentamisen, koska työn ja elementin laadun tarkistusmahdollisuus kaikissa tuotannon vaiheissa ja yksinkertaiset ratkaisut pienentävät rakennusvirheen riskiä. Rakenteiden ja liitosten tulee olla siis sellaisia, että elementin ja rakentamisen laatu voidaan tarkistaa kaikissa elementinvalmistus- ja rakennusprosessin vaiheissa elementtitehtaalla ja työmaalla. Tämä painottuu yksityiskohtia suunniteltaessa valitulle rakenteelle, mutta myös rakenteen valintavaiheessa se otetaan huomioon jättämällä liian monimutkaiset rakenteet pois.

Seinärakenteen sisäpuolelle tulee olla mahdollista tehdä LVIS-asennuksia sekä asentaa äänen- ja lisälämmöneristysmateriaalia tarvittaessa 50 - 100 mm. Tällaisena materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi pehmeää mineraalivillaa.

Orren laipan tulee olla vähintään 50 mm leveä, jotta siihen pystytään kiinnittämään tukevasti kipsilevy. Rungon, johon kipsilevy kiinnitetään, jako tulee olla kipsilevyn kiinnityksestä johtuen korkeintaan 600 mm. [2]

## 2.2 Teräksen ja polyuretaanin ominaisuudet

Passiivitasoinen rakenne asettaa haasteita rakenteessa käytettäville rakennusmateriaaleille. Polyuretaani on umpisolurakenteensa ansiosta itsessään riittävän ilma- ja vesihöyrytiivis materiaali, jotta erillistä höyrynsulkua ja tuulensuojakerrosta ei tarvita. Lisäksi polyuretaanin erinomaisen lämmöneristyskyvyn ansiosta eristekerros jää suhteellisen ohueksi.

Alumiinilaminoitujen SPU Eristeiden (PIR) lämmönjohtavuus ( $\lambda_D$ ) kuivissa olosuhteissa on tuotteesta riippuen 0,023 (SPU AL) tai 0,022 (SPU SP) W/mK [3]. Tässä työssä käytetään pääasiallisesti SPU AL -tuotetta.

Polyuretaanieristeet voidaan kiinnittää muihin materiaaleihin liimalla tai mekaanisilla kiinnikkeillä. Eristelevyt voidaan kiinnittää tiiviisti toisiinsa polyuretaanivaahdolla tai liimalla.

Ääneneristyskyky tulee ottaa huomioon seinärakennetta suunnitellessa ja valittaessa etenkin erityisalueilla rakennettaessa. Rakenteessa voidaan käyttää erillistä ääntä hyvin eristävää materiaalia parantamaan rakenteen ääneneristyskykyä.

Terästä voidaan käyttää monipuolisemmin rungossa kuin perinteisempiä materiaaleja, kuten esimerkiksi puuta. Käytettäessä puuta kahden polyuretaanikerroksen välissä on



riski, että orgaanisena materiaali puu ei kestä täysin umpinaisessa tilassa. Terästä sen sijaan voi käyttää kahden polyuretaanikerroksen välissä.

Tavoitteena on saada rakenteesta passiivitasoinen. Jotta tähän tavoitteeseen päästään, kylmäsiltojen määrä ja suuruus tulee pyrkiä minimoimaan. Teräksen mahdollistama kantavan rungon monipuolinen sijoittelu seinärakenteessa edesauttaa passiivitasoiseen rakenteeseen pääsemiseen kohtuullisella eristepaksuudella.

Teräsorsissa voidaan käyttää reikärivejä vähentämään orren aiheuttamaa lisäkonduktanssia. Tällaisia orsia kutsutaan Termorangoiksi.

Teräksen kiinnitysvaihtoehtoja ovat hitsaus, liimaus ja erilaiset mekaaniset kiinnikkeet. Kiinnityksissä voidaan hyödyntää myös teräsosiin kiinnitettäviä pikakiinnikkeitä ja vastakappaleita.

Mittatarkat teräsorret soveltuvat hyvin teolliseen elementtituotantoon. Teräksen lujuusominaisuudet ovat erinomaiset. Tämä mahdollistaa riittävän kantavuuden saavuttamisen ohuilla ja matalilla poikkileikkauksilla.

Kaiken kaikkiaan teräksen ja polyuretaanin ominaisuudet mahdollistavat useita toimivia passiivitasoisia rakennevaihtoehtoja. Rakenteesta tulee näillä materiaaleilla myös suhteellisen kevyt, koska polyuretaani on lämmöneristeeksi kevyttä ja kantava runko tehdään kevyistä teräsorsista.

Polyuretaanilla eristettäessä passiivitasoisen rakenteen kokonaispaksuus pysyy kohtuullisena. Kevyemmät ja ohuemmat rakenteet tuovat säästöjä etenkin kuljetuskustannuksissa, kun useampi elementti mahtuu samaan kuormaan, perustuksiin kohdistuu vähemmän kuormaa ja elementit voidaan asentaa pienemmällä nostokalustolla.

### **2.3 Rautaruukki Oyj ja SPU Oy**

Diplomityö tehdään Rautaruukki Oyj:lle ja SPU Oy:lle. Rautaruukki Oyj toimittaa metalliin perustuvia komponentteja, järjestelmiä ja kokonaisuuksia rakentamiseen ja konepajateollisuuteen. Vuonna 2010 Rautaruukki Oyj:n liikevaihto oli 2 415 M€, keskimäärin 2000-luvulla liikevaihto on ollut reilut 3 000 M€ vuodessa. Yritys työllistää noin 11 700 työntekijää 27 maassa. Rautaruukki Oyj emoyhtiöön kuuluvat Ruukki Construction (rakentamisen liiketoiminta), Ruukki Engineering (konepajaliiketoiminta) ja Ruukki Metals (erikoisterästuotteet).

Ruukki Constructionin päämarkkina-alueet ovat Pohjoismaat, Balttia, itäinen Keski-Eurooppa, Venäjä ja Ukraina. Kilpailuetuja ovat muun muassa pitkäaikaiset asiakassuhteet ja vahva asema Pohjoismaissa ja Baltiassa, innovatiiviset ja energiatehokkaat tuotteet, ratkaisut ja palvelut, tunnettu brändi kattotuotteissa, vahva projektihallinnan osaaminen ja uusien, turvallisuutta edistävien, energiatehokkaiden, rakentamista nopeuttavien ja tehostavien ratkaisujen kehittäminen.

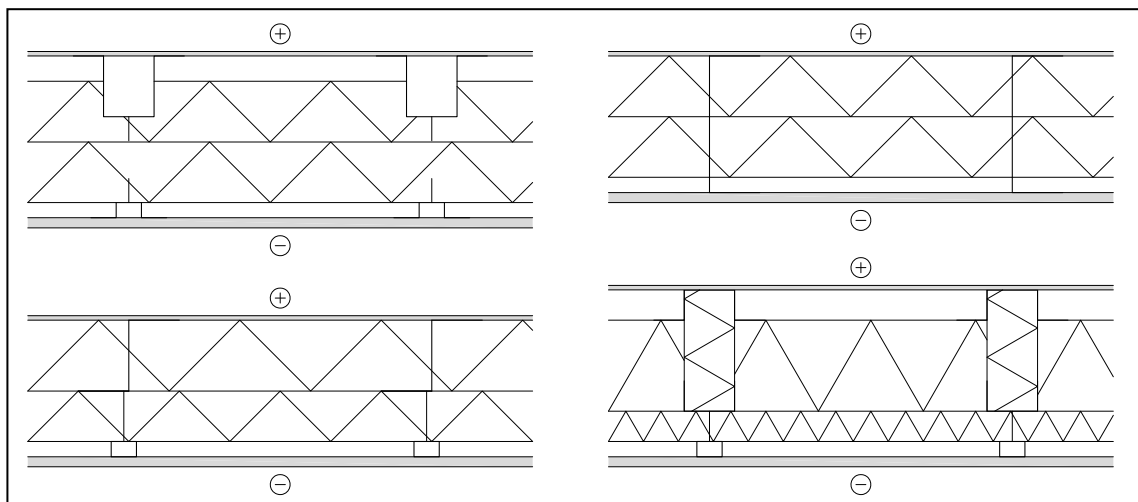
SPU Oy valmistaa rakennusmateriaaleja, päätuotteenaan polyuretaanista valmistettavat SPU Eristeet. Vuonna 2010 yrityksen liikevaihto oli noin 18 M€ ja liikevaihdon kasvu on ollut vuosittain noin 30 - 40 %. SPU Oy työllistää noin 50 henkilöä. Suomen lisäksi tuotteita myydään muihin Pohjoismaihin, Baltiaan ja Venäjälle. Venäjällä SPU

Oy toimii Pietarissa sijaitsevan yrityksen SPU Systems OOO:n kautta. SPU Oy:n kilpailutuja ovat perinteisiä eristemateriaaleja tehokkaammat SPU Eristeet, vahva tuotekehitys sekä profiloituminen energiatehokkaan rakentamisen edelläkävijänä.

## 3 RAKENTEEN VALINTA

### 3.1 Rakenteen hahmottelu

Rakennevaihtoehtoja ideoitiin diplomityöohjaajien Ralf Lindbergin (TTY) ja Pasi Käkelän (SPU Oy) sekä kehitysryhmän voimin, johon kuuluivat Jyrki Kesti (Rautaruukki Oyj), Reima Niemi (Rautaruukki Oyj), Pekka Roivio (Rautaruukki Oyj), Ari Kemppainen (SPU Oy) ja Pertti Iso-Mustajärvi (TTY). Aluksi pohdittiin vaihtoehtoja, miten eri tavoin elementti voitaisiin toteuttaa. Materiaalina pohdintoihin käytettiin edellisistä brainstorming-tyyppisistä palavereista koottua avainsanalistaa, joka on liitteenä 2, ja muutamaa hahmotelmaa rakennevaihtoehtoista. Kuvassa 3.1 on muutama esimerkki alustavista rakennehahmotelmista.



**Kuva 3.1.** Alustavia rakennevaihtoehtohahmotelmia.

Palaverin tuloksena valittiin rakenteet, joita päätettiin tutkia tarkemmin. Valinnat tehtiin tässä vaiheessa pääosin olemassa olevaan kokemukseen perustuen. Lämmöneristepaksuuksia arvioitiin riittäväksi todetulla tarkkuudella siten, että ensin laskettiin 50 - 100 mm paksuille mineraalivillakerroksille lämmönvastusarvoja ottaen huomioon eri vahvuisten teräsorsien lisäkonduktanssit. Sitten laskettiin tarvittava polyuretaanikerroksen paksuus, jotta päästiin tavoiteltuun U-arvoon kullakin mineraalivillakerroksen paksuudella. Polyuretaanikerrosta laskettaessa otettiin huomioon ansaiden lisäkonduktanssi. Näin saatiin taulukko, josta pystyi lukemaan tarvittavan polyuretaanikerroksen ja koko elementin paksuuden, kun tiedettiin käytetyn orren poikkileikkauksen korkeus ja teräksen vahvuus. Alustava lämmöneristepaksuuslaskelma on liitteessä 3.

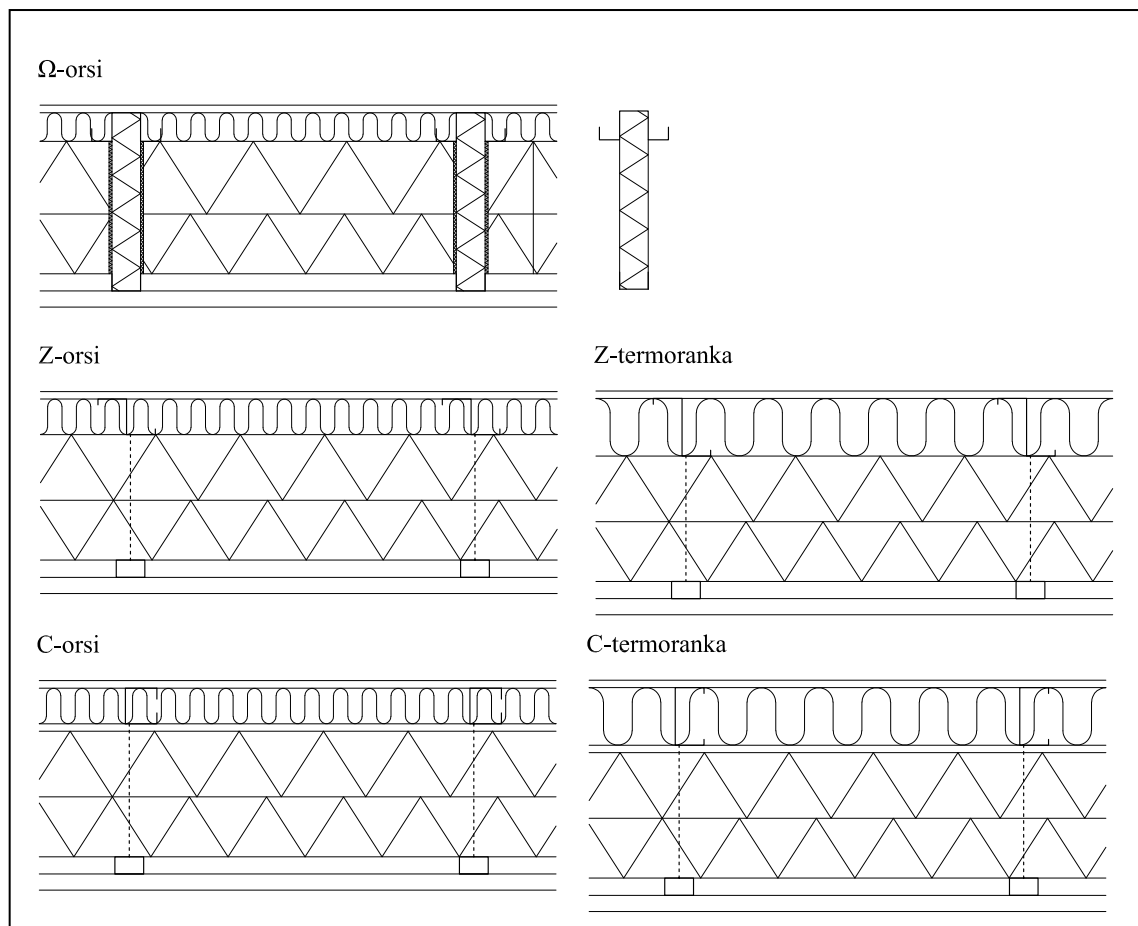
Koska seinärakenteeseen täytyi saada ääneneristysyistä massaa, joka sijaitisi mielellään elementin sisäpuolella, suljettiin pois sisäverhousmateriaalin kiinnitys suoraan

polyuretaanieristeen pintaan. Ääneneristysmateriaalin asennustilaan voitaisiin asentaa myös johdot ja putket. Ilman ääneneristystilaa johdoille ja putkille olisi täytynyt työstää urat polyuretaaniin.

Koko eristekerroksen läpi menevät orret hylättiin, jotta kylmäsiltojen vaikutus rakenteen U-arvoon pienenesi. Ne hylättiin myös liian järeinä niihin kohdistuviin kuormiin nähden. Pienempien rankojen kantavuus riitti hyvin kuormien kantamiseen ja ne olivat kustannustehokkaampia. Orsivaihtoehtoja olivat C- ja U-orret sekä Z- ja  $\Omega$ -orret reunakäänteillä tai ilman.

### 3.2 Lupaavimmat rakenteet

Ideointipalaverien tuloksena päätettiin tutkia tarkemmin kuvan 3.2 mukaisia rakenteita lämmöneristävyyden ja kantavuuden kannalta ennen lopullista valintaa.



**Kuva 3.2.** Rakennerratkaisut, joiden lämmöneristävyyteen ja kantavuuteen perehdyttiin tarkemmin ennen lopullista valintaa.

$\Omega$ -orrella toteutetussa ratkaisussa polyuretaanikappaleen molemmille lyhyille sivuille liimataan teräsorsi. Sisäpuolelle jäävä  $\Omega$ -orsi kantaa kuormat. Ulkopuolella olevaan U-orteen kiinnitetään ulkoverhousmateriaali, jonka paino välittyy kantavalle  $\Omega$ -orrelle polyuretaanikappaleen välityksellä. Yhtenäinen polyuretaanilämmöneristekerros liima-

taan polyuretaanikappaleen,  $\Omega$ - ja U-orren muodostaman tolpan kylkeen. Asennustilan korkeus, joka täytetään mineraalivillalla, määräytyy  $\Omega$ -orren poikkileikkauksen korkeuden mukaan. Etuna tässä rakenteessa on sen kylmäsiltojen vähyyt. Markkinoilla on samankaltaisia tuotteita, mutta  $\Omega$ -orrella toteutettu ratkaisu poikkeaa näistä ratkaisuista jäykän polyuretaaniytimen ja  $\Omega$ -orren laippojen tarjoaman asennuspinta-alan suhteen.

Z-orrella toteutetuissa ratkaisuissa ulkoverhous kiinnitetään tuuletusvälin muodostamaan rakenteeseen, joka on kiinnitetty ansailla sisäpuolella olevaan kantavaan pystyorteen. Asennustila määräytyy pystyorren poikkileikkauksen korkeuden mukaan. Tämä ratkaisua voidaan toteuttaa termorei'itetyllä orrella tai ilman rei'itystä.

C-orrella toteutetussa ratkaisussa orren molemmin puolin on kipsilevy, joiden välissä on asennustila. Tällöin pystyorsien molemmat laipat ovat tuettuna, jolloin orsien kantokyky paranee. Lisäksi toinen kipsilevykerros parantaa rakenteen ääneneristyskykyä. Rakenne, johon ulkoverhous kiinnitetään, on kiinnitetty ansailla polyuretaanikerroksen läpi kantavaan runkoon. Tällä ratkaisulla saattaa olla tuotannollisia etuja muihin vaihtoehtoihin nähden, kun kantava osa ja eristävä osa voidaan valmistaa erikseen. Kantava ja eristävä osa voidaan yhdistää työmaalla tai tehtaalla. Lisäksi kantavan osan rakenteella voidaan toteuttaa rakennuksen kantavat ja kevyet väliseinät. Toinen kipsilevy parantaa myös elementin palonkestokykyä.

Nämä viisi ratkaisua mahdollistavat esimerkiksi välipohjien rakentamisen ilman, että yhtenäistä lämmöneristekerrosta joudutaan katkaisemaan. Näiden rakenneratkaisujen runko mitoitetaan yksi- ja kaksikerroksisen rakennuksen kuormille. Polyuretaanikerroksen paksuus mitoitetaan tavoite U-arvon mukaan.

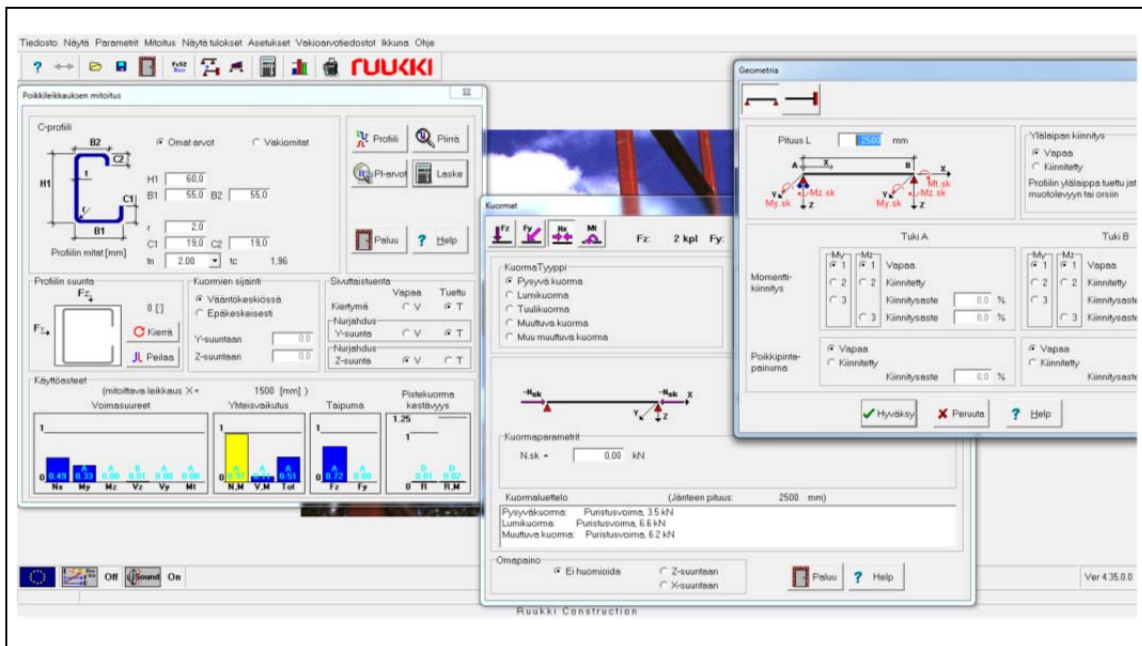
### 3.3 Orsien kantavuuden mitoitus

Orret mitoitettiin yksi- ja kaksikerroksisille versioille tyyppitalosta. Mitoitus tehtiin Rautaruukki Oyj:n ProfBeam mitoitusohjelmalla, joka mitoittaa orret EN 1993 Eurokoodi 3 mukaan. Näin ollen myös kuormat laskettiin Eurokoodin mukaan. Kuormalaskut ovat liitteessä 4.

Orsien teräslaatuuna käytettiin S350 GD+Z ja pituutena 2500 mm. Orren sisempi laippa (ohjelmassa ylälaippa) oletettiin kiinnitetyksi Z-orrella toteutetuissa ratkaisuissa, joissa kipsilevy on ainoastaan sisäpuolella. C-orrella toteutetuissa ratkaisuissa, joissa kipsilevyt ovat orren molemmin puolin, molemmat laipat oletettiin kiinnitetyksi. Ristikko- ja välipohjakuormiin lisättiin epäkeskisyyttä. Epäkeskisyytenä käytettiin 25 mm ja se otettiin ohjelmassa huomioon orren yläpään kohdistuvana momenttina. Momentti kuormitti orsia niin päin, että momentin aiheuttama puristusvoima kohdistui orren vapaana olevaan laippaan. Näin tuulikuorman ja epäkeskisyyden yhteisvaikutus saatiin mahdollisimman kriittiseksi. Tuulikuorma syötettiin ohjelmaan tasaisena kuormana koko orren matkalle. Orret mitoitettiin niin, että niiden kantokyky oli lähes kokonaan käytetty.

Ohjelman teräsvahvuusvaihtoehdot ovat 0,25 mm välein, vaikka valmistettavien orsien teräs vahvuudet ovat 1,0, 1,2, 1,5, 2,0 ja 2,5 mm. Käytännössä 1,25 mm vahvat

orret voidaan toteuttaa 1,5 mm vahvoilla orsilla. Poikkileikkausten korkeus tulee olla  $\leq 100$  mm. ProfBeam:iin voidaan määrittellä vapaasi poikkileikkauksen mitat, joka mahdollisesti joustavasti vakiokokoisista poikkileikkauksista poikkeavien mittojen käytön. Ohjelma ilmoittaa orren kuormituskapasiteetin käyttöasteen prosentteina normaali-, leikkaus- ja taivutusvoimille, yhteisvaikutukselle, taipumalle ja pistekuorman kestäväydelle. Ohjelma tekee orrelle myös hoikkuustarkastelun. Kuvassa 3.3 on esitetty ProfBeam:n valinta- ja mitoitusikkunoita.



**Kuva 3.3.** Rautaruukki Oyj:n ProfBeam mitoitusohjelma, kaksikerroksisen rakennuksen seinän C-orren mitoitus.

Poikkileikkauksen korkeus vaihteli orsityypistä ja rakennuksen kerrosten lukumäärästä riippuen 50 - 100 mm välillä. Z-orrella toteutettuna poikkileikkauksen korkeus oli yksikerroksisessa ratkaisussa 62 mm ja kaksikerroksisissa ratkaisussa 70 mm. Kipsilevyn kiinnityspinta-alavaateen, 50 mm, vuoksi Z-ortena käytettiin reunakäänteistä versiota, koska ilman reunakäänteitä 50 mm pitkät laipat vaatisivat kohtuuttoman paksun teräsvahvuuden, jotta laipat eivät olisi liian hoikkia. Riittävä kantavuus saavutettiin myös 100 mm korkeilla, erittäin ohuilla, Z-orsilla. Tämä antaa mielenkiintoisen vaihtoehdon matalille poikkileikkauksille, koska 100 mm korkeissa poikkileikkauksissa voidaan käyttää ohutta Termorankaa. Tämä saattaa olla ratkaiseva tekijä rakenteen lämmöneristyskykyä ja kokonaispaksuutta tarkasteltaessa. Lisäksi teräsvahvuudella on suuri vaikutus orren materiaalimenekkiin ja kustannukseen.

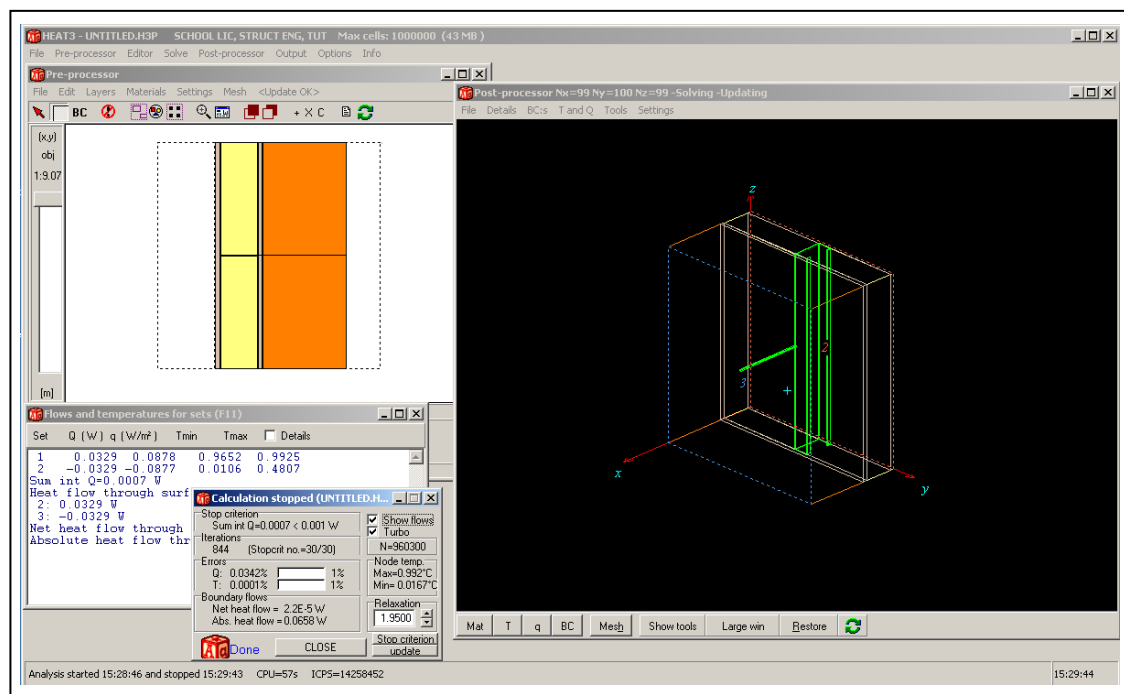
Kun kipsilevytyks on orren molemmin puolin, päästään C-orrella noin 10 % parempaan kantavuuteen vastaavankokoiseen reunakäänteiseen Z-orteen nähden. Lisäkipsilevy tuo C-orrella toteutettuun ratkaisuun merkittävästi lisää kantokykyä. Kyseisellä rakenteella päästään lähes aina yhdellä kipsillä tehtyä rakennetta 0,5 mm ohuemmalla teräsvahvuudella ja 20 mm matalammalla poikkileikkauksella. Kipsilevyn kiinnityspinta-alavaateesta, 50 mm, johtuen U-orren käyttö C:n sijaan ei ole järkevää, koska U-

orren laipan piteuden kasvaessa teräksen paksuutta täytyy kasvattaa kohtuuttomasti, jotta laipat eivät olisi liian hoikkia. C-orrella ei tätä ongelmaa ollut reunakäänteidensä ansiosta, joten perusratkaisu on järkevintä toteuttaa kantavuuden näkökulmasta molemmiin puolin levytettynä ja C-orrella. Riittävä kantavuus saavutetaan yksi- ja kaksikerroksisille rakennuksille 60 mm korkealla poikkileikkauksella teräksen vahvuutta säätämällä. Riittävä kantavuus saavutettiin myös 100 mm korkeilla poikkileikkauksilla, joilla päästiin vielä ohuemmalla teräspaksuudella, kuin Z-orrella.

Myös  $\Omega$ -orsilla toteutettu ratkaisu on varteenotettava vaihtoehto. Sillä saavutettiin tarvittava kantavuus jo hyvin matalilla orsilla (50 ja 60 mm) riippuen rakennuksen kerrosmäärästä, tosin  $\Omega$ -orren teräsmenekki on suurempi Z- ja C-orsilla toteutettuihin ratkaisuihin nähden. Kun  $\Omega$ -orsiksi valitaan reunakäänteinen vaihtoehto, voidaan orsi toteuttaa 0,5 mm ohuempana. Siksi myös  $\Omega$ -ortena käytetään reunakäänteistä ortta.

### 3.4 Polyuretaanipaksuuden mitoitus

Rakennevaihtoehdot mitoitettiin HEAT2 (versio 6.0) ja HEAT3 (versio 4.0.0.2) -ohjelmilla. HEAT2 laskee kaksiulotteista ja HEAT3 kolmiulotteista lämmönsiirtymistä.  $\Omega$ -orsilla toteutetut rakenteet mitoitettiin HEAT2:lla, koska niissä ei ole epäjatkuvuuskohtia pystysuunnassa. Muut rakenteet mitoitettiin HEAT3:lla, jotta niissä käytettävät ansaat tulevat huomioonotetuiksi mahdollisimman todenmukaisesti. Kuvassa 3.4 on esitetty yksi HEAT3-ohjelmalla tehty malli.



**Kuva 3.4.** HEAT3-ohjelmalla tehty malli, C-orsi kahdella kipsilevyllä.

Ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet on esitetty taulukossa 3.1. Rakenteet mitoitettiin käyttäen ääneneristemateriaalina mineraalivilla 37 ja polyuretaanina SPU

AL -eristettä. Mineraalivilla 33:sta, SPU SP:tä sekä polyuretaani 21 ja 20:tä käytettiin arvioidessa eristemateriaalikehityksen vaikutusta rakenteen kokonaispaksuuteen ja lämmöneristyskykyyn. Ohjelmien toimintaperiaatteita ja lämmöneristävyyteen liittyviä seikkoja käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.2.

**Taulukko 3.1. HEAT-ohjelmissä käytetyt materiaaliominaisuudet.**

Materiaali	Lämmönjohtavuus (x- ja y-suunnassa) W/mK	Ominaislämpökapasiteetti MJ/m <sup>3</sup> K
Kipsilevy	0,2400	0,48910
Mineraalivilla 33	0,0330	0,03149
Mineraalivilla 37	0,0370	0,03149
Tuulensuojalevy/kova m.villa 31	0,0310	0,03149
Polyuretaanisaumavaahto	0,0300	0,05250
SPU AL	0,0230	0,05250
SPU SP	0,0220	0,05250
Polyuretaani 21	0,0210	0,05250
Polyuretaani 20	0,0200	0,05250
Teräs	50,000	3,57700
Termorangan uuma, 6 reikäriiviä	9,1513	3,57700
Termorangan uuma, 10 reikäriiviä	4,6445	3,57700
Puu	0,14(x) ja 0,22(y)	0,90000

### 3.4.1 Eristevahvuudet ja U-arvo

Termorei'ittämättömiä orsia käytettäessä orsien välissä olevan mineraalivillakerroksen lämmöneristyskyky oli heikko eikä sen paksuuden kasvattamisella ollut suurta merkitystä koko rakenteen U-arvoon. U-arvotavoitteen (0,09 W/m<sup>2</sup>K) täyttävä polyuretaanikerroksen paksuus käytettäessä termorei'ittämättömiä orsia oli 230 mm. Termorankoja käytettäessä mineraalivillakerroksen lämmöneristyskyky kasvoi merkittävästi, jolloin 100 mm mineraalivillakerroksen lisäksi tarvittiin vain 200 mm, jotta päästiin lähelle U-arvotavoitetta.

Termorangoilla toteutetuissa rakenteissa oli mineraalivillaa polyuretaanikerroksen lämpimällä puolella suhteellisen paljon polyuretaanikerroksen paksuuteen nähden. Tämän rakenteen osalta tarkistettiin, onko polyuretaanin muodostaman höyrinsulkukerroksen lämpimällä puolella liikaa avohuokoista lämmöneristettä. Lähteestä ja olosuhteista riippuen höyrinsulun lämpimällä puolella saa olla korkeintaan ¼ seinärakenteen lämmöneristyskyvystä [5]. Tätä sääntöä noudatettaessa 200 mm polyuretaanikerroksen (0,023 W/mK) lämpimällä puolella saa olla korkeintaan 107 mm mineraalivillaa (0,037 W/mK).



Jos Termorangan kanssa käytetään paremmin lämpöä eristävää mineraalivillaa (0,033 W/mK), polyuretaania (0,023 W/mK) tarvitaan vain 190 mm U-arvotavoitteen täyttämiseksi. Polyuretaanikerroksen (190 mm, 0,023 W/mK) muodostaman höyrynsulun lämpimällä puolella voi olla kuitenkin korkeintaan 91 mm mineraalivillaa (0,033 W/mK), joten 100 mm mineraalivillakerros (0,033 W/mK) ei täytä edellä mainittua sääntöä. Käytännössä tällä mineraalivillakerroksella riski on kuitenkin olematon. Taulukossa 3.2 on U-arvoja eri eristeyhdistelmillä.

**Taulukko 3.2.** U-arvoja eri eristeyhdistelmillä. Orret ovat kaksikerroksisille ratkaisuille.

POIKKI- LEIKKAUS	PU pak- suus [mm]	Villan paksuus [mm]	U-arvo [W/m <sup>2</sup> K]		U-arvo [W/m <sup>2</sup> K]	
			SPU AL ( $\lambda_D=0,023$ W/mK)		SPU SP ( $\lambda_D=0,022$ W/mK)	
			Villa 37	Villa 33	Villa 37	Villa 33
$\Omega$ (rk)	230	60	0,088	0,087	0,085	0,084
Z (rk)	230	70	0,089	0,088	0,086	0,085
Z (rk) termo	200	100	0,093	0,091	0,090	0,088
C	230	60	0,090	0,089	0,087	0,086
C termo	200	100	0,092	0,091	0,089	0,088

Polyuretaanikerroksen (200 mm, 0,022 W/mK) lämpimälle puolelle voidaan laittaa enintään 100 mm paremmin eristävää mineraalivillaa (0,033 W/mK), jotta rakenne toimii kosteusteknisesti oikein [5]. Rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen palataan tarkemmin kappaleessa 4.5.

Käytettäessä paremmin lämpöä eristävää mineraalivillaa (0,033 W/mK) termorei'ittämättömien orsien kanssa, ei saavuteta juurikaan lisäetua koko rakenteen U-arvossa normaaliin mineraalivillaan (0,037 W/mK) nähden, koska orren aiheuttaman voimakkaan lisäkonduktanssin takia mineraalivillakerroksen lämmöneristyskyky pysyy heikkona. Orsien eri teräsvahvuuksilla ei ole merkittävää vaikutusta rakenteen U-arvoon.

$\Omega$ -orren vaikutusta seinän lämmöneristävyyteen tarkasteltaessa otettiin huomioon 0,5 mm vaahto/liimasauaman osuminen teräsorren kohdalle. Se heikensi rakenteen U-arvoa muutamia tuhannesosia, joten sauma vaikutti lähinnä U-arvon pyörityksiin.

### 3.4.2 Lämmöneristeiden kehittyminen ja rakenteen kokonaispaksuus

Polyuretaanin lämmöneristyskyky paranee jatkuvasti materiaalikehityksen myötä. Tällä hetkellä markkinoilla on polyuretaania, jonka lämmönjohtavuus on 0,022 W/mK. Jos rakenteessa käytetty polyuretaani (0,023 W/mK) korvataan paremmalla polyuretaanilla (0,022 W/mK), tarvittavan polyuretaanikerroksen paksuus ohenee 10 mm. Sama trendi jatkuu polyuretaanin lämmönjohtavuuden pienentyessä 0,022 W/mK:sta edelleen alaspäin. Eli lämmönjohtavuuden pudotessa 0,001 W/mK tarvitaan 10 mm vähemmän eristettä. Polyuretaanin lämmönjohtavuuden ollessa 0,020 W/mK, polyuretaania tarvittaisiin

30 mm vähemmän kuin nyt käytettävällä polyuretaanilla (0,023 W/mK). Polyuretaanin lämmönjohtavuutta pienentämällä, voidaan saada kustannussäästöjä logistiikassa ja materiaalikustannuksissa ohuempien rakennevahvuuksien kautta.

Tehokkaampien polyuretaani- ja mineraalivillaeristeiden käytöllä voidaan päästä U-arvossa lähelle 0,080 W/m<sup>2</sup>K työssä tarkasteltavilla rakenteilla ja eristepaksuuksilla. Kuten taulukosta 3.2 voidaan todeta, käytettäessä paremmin eristävää mineraalivillaa saavutetaan lähes poikkeuksetta 0,001 W/m<sup>2</sup>K pienempi U-arvo. Vaihtamalla SPU AL SPU SP:hen, saavutetaan 0,003 W/m<sup>2</sup>K pienempi U-arvo. Keskeistä elementin U-arvolle ja kokonaispaksuudelle on siis polyuretaanin kehittyminen.

Ω-orrella toteutetulla ratkaisulla on mahdollista päästä lähelle 0,080 W/m<sup>2</sup>K U-arvossa jopa 361 mm elementin kokonaispaksuudella, jos polyuretaanin lämmönjohtavuus saadaan pudotettua 0,021 W/mK. Polyuretaania, jonka lämmönjohtavuus on 0,020 W/mK, valmistetaan jo ulkomailla. SPU Oy:llä on tuotevalikoimassa myös SPU XT -eristelevy, jonka lämmönjohtavuus on 0,007 - 0,019 W/mK. SPU XT:ssä käytetään polyuretaania ja tyhjiöeristettä. Tätä tuotetta voidaan yhdistää SPU AL tai SP -eristeeseen parantaen polyuretaanikerroksen lämmönvastusta entisestään. Tekniset valmiudet ohuen ja 0,080 W/m<sup>2</sup>K U-arvon omaavan elementin valmistamiseen ovat siis jo olemassa.

### 3.5 Materiaalikustannukset

Seinäelementtinelion todellisia kokonaiskustannuksia oli tässä vaiheessa erittäin vaikea arvioida, koska tuotannon kustannukset ja rakentamisen työkustannukset riippuvat suuresti elementtiä valmistavasta ja asentavasta tahosta. Tuotantokustannukset riippuvat myös elementin tuotantotavasta ja käytettävistä laitteista ja menetelmistä. Tuotannosta on visioitu pitkällä tähtäimellä hyvin pitkälle automatisoitua, jossa suurelementti etenee linjastolla ja koneet tekevät elementtiin tarvittavat asennukset rakennesuunnitelmien mukaan. On myös pohdittu toista vaihtoehtoa suurelementille, missä moduulimittaisista pienistä elementeistä kootaan joko erillisellä linjastolla suurelementtejä tai työmaalla valmista talon seinää. Elementtejä valmistetaan aluksi todennäköisesti käsin. Kun kysyntä kasvaa, luo se edellytykset automatisoidun linjan kehittämiseen. Elementin kokonaiskustannusten arvioinnin vaikeuden vuoksi elementtiratkaisujen kustannuseroja arvioitiin tässä vaiheessa ainoastaan materiaalikustannusten kautta.

Työssä käytettiin teräksen ja polyuretaanin todellisia katteellisia työhintoja, jotka saatiin Rautaruukki Oyj:ltä ja SPU Oy:ltä. Ääneneristysmateriaalina käytetyn mineraalivillan ja 13 mm paksun normaalin kipsilevyn hinta arvioitiin yleisen hintatason perusteella. Taulukossa 3.3 on esitetty laskennassa käytetyt materiaalihinnat.

Materiaalikustannuksia laskettaessa on otettu huomioon teräsorsi, polyuretaanieriste, mineraalivilla ja kipsilevyt. Teräsorsien kokonaiskustannuksissa otettiin huomioon tässä vaiheessa vain pystyorret, koska elementin yksityiskohtia ei ollut vielä hahmoteltu. Lopullisessa elementissä on paljon muitakin teräsosia, kuten pystyorret yhteen sitovat osat elementin ylä- ja alareunoissa sekä ikkuna- ja oviaukkojen tukirakenteet. Nämä suunnitellaan vasta kappaleessa 5, joten ne eivät ole mukana tässä kustannuslaskennassa. To-

dennäköisesti teräksen osuus koko materiaalikustannuksista tulee olemaan merkittävästi suurempi lopullisessa elementissä. Ulkoverhousmateriaalit jätettiin materiaalikustannuslaskuista pois, koska ulkoverhousmateriaalia ei ollut päätetty tässä vaiheessa. Materiaalikustannukset muuttuvat rakenteessa käytettävän orren mukaan, koska mineraalivillakerros on orren poikkileikkauksen paksuinen ja polyuretaanikerroksen paksuus taas määräytyy mineraalivillakerroksen paksuuden mukaan.

**Taulukko 3.3.** *Materiaalihinnat, teräsorsien hinnat orsikohtaisesti vasemmalla ja muut materiaalihinnat oikealla.*

<b>Teräsorsi</b>	Hinta [€/m]	
	1 krs.	2 krs.
Ω (rk)	5,40	7,70
Z (rk)	3,90	5,20
Z (rk) termo	4,30	5,20
C termo	4,00	4,30
C	4,10	6,90

<b>Muut materiaalit</b>	
Materiaali	Hinta [€/m <sup>3</sup> ]
SPU AL	150,00
Kipsilevy	10,77*
Mineraalivilla 37	37,50
Mineraalivilla 33	48,21

\* 13 mm kipsilevyn neliöhinta on 1,40 €/m<sup>2</sup>

Polyuretaanin osuus elementin materiaalikustannuksesta on ratkaisusta riippuen 68 - 74 %, orren osuus 15 - 25 %, mineraalivillan osuus 4 - 9 % ja kipsilevyjen osuus 3 - 6 %. Kun elementin kaikki teräsosat otetaan huomioon, tasoittuu polyuretaanin ja teräksen osuudet elementin kokonaiskustannuksista. Voidaan kuitenkin olettaa, että elementin suurin yksittäinen materiaalikustannus on polyuretaani.

Yksikerroksisen rakennuksen seinäneliön hinta liikkuu 45 €/m<sup>2</sup> ja kaksikerroksisen 47 €/m<sup>2</sup> paikkeilla. Ratkaisut, joilla seinäelementin kokonaispaksuus jää ohuemmaksi, sisältävät enemmän polyuretaania ja enemmän terästä. Tästä johtuen ratkaisut, jotka ovat kokonaispaksuudeltaan ohuempia, ovat myös kalleimpia materiaalikustannuksiltaan. Yksikerroksisissa ratkaisuissa kustannuserot eri ratkaisujen välillä olivat pienehköjä, noin ±2,25 €/m<sup>2</sup>. Kaksikerroksisissa ratkaisuissa kustannuserot olivat noin ±3,67 €/m<sup>2</sup>, eli kustannusero kalleimman ja halvimman ratkaisun välillä oli 7,33 €/m<sup>2</sup>. Tämä on jo hyvin merkittävä ero elementin kokonaismateriaalikustannukseen nähden. Edullinen ratkaisu yksikerroksisessa tapauksessa oli myös edullinen kaksikerroksisessa tapauksessa ja vastaavasti kallis yksi kerroksinen ratkaisu oli myös kallis kaksikerroksisessa ratkaisussa.

Edullisimmat ratkaisut olivat Termorangalliset ratkaisut, koska Termorankojen reikäriivien ansiosta paksuhko 100 mm mineraalivillakerros osallistuu lämmöneristämiseen enemmän, jolloin vastaavasti suurimman yksittäisen materiaalikustannuksen aiheuttajaa, polyuretaania, tarvitaan vähemmän. Lisäksi Termorangat olivat erittäin ohuita alentaen myös teräsmenekkiä ja orren hintaa. Kalleimmat ratkaisut olivat C-orsilla toteutettu rakenne kahdella kipsilevyllä ja Ω-orrella toteutettu rakenne. Näissä molemmissa tapauksissa teräs- ja polyuretaanimenekki olivat muita suurempia, johtuen orren poikkileikkauksen mataluudesta. Z-orrella toteutettu ratkaisu oli kustannuksiltaan keskitasoa. Sen

teräskustannus oli Termorankojen tasoa, mutta matalan poikkileikkauksen takia suuremmat polyuretaanikustannukset nostivat sen kokonaiskustannukset hieman korkeammaksi Termorankarakenteisiin nähden. Materiaalikustannuslaskelma on liitteessä 5.

### 3.6 Käytettävät rakennustarvikkeet

Tänä päivänä rakennusmateriaalivalikoima on laajempi kuin koskaan aiemmin. On keskeistä löytää rakennekohtaisesti oikeat materiaalit, jotta lopputuloksesta tulee mahdollisimman tarkoituksen mukainen. Materiaalivalinnoilla on myös merkittävä vaikutus rakennusratkaisuihin. Siksi tässä kappaleessa esitellään ne seikat, joiden takia polyuretaanin ja teräksen käyttö on juuri tässä teollisesti valmistettavassa passiivitasoisessa pientaloiseinäelementissä perusteltua.

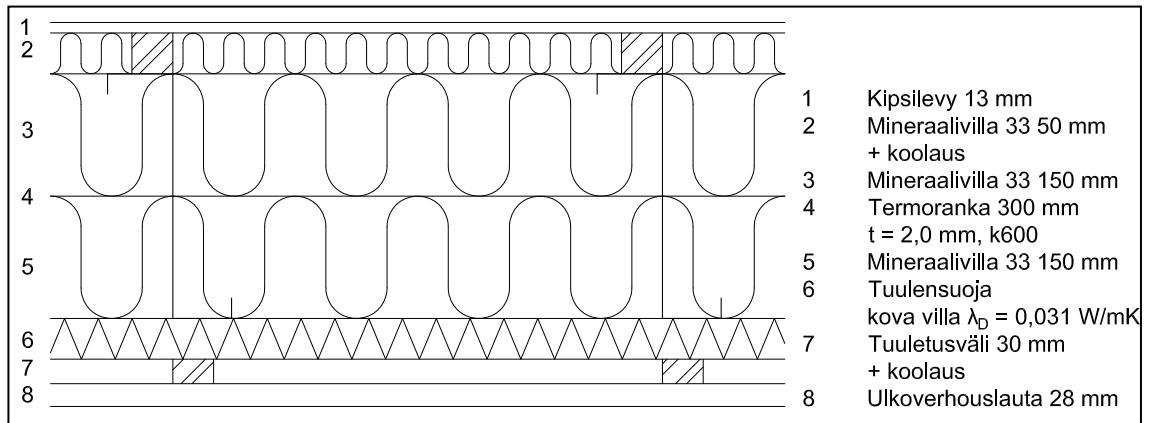
#### 3.6.1 Lämmöneristeet

Lämmöneristevalinta on passiivitasoisessa rakentamisessa yksi keskeisimmistä kysymyksistä, koska eristepaksuus asettaa vaatimuksia muiden rakennusosien ominaisuuksille. Polyuretaanilla eristettäessä päästään passiivitasoon merkittävästi ohuemmalla eristepaksuudella perinteisiin lämmöneristemateriaaleihin nähden. Siksi moni Suomessa rakennetuista passiivitaloista onkin polyuretaanieristeisiä. Tähän ovat syynä myös mineraalivillan nähden kokonaiskustannuksiltaan usein edullisempi hinta [6], edullisemmat elinkaarikustannukset [7] ja kosteustekninen turvallisuus [8], jonka merkitys passiivitasoisissa rakenteissa korostuu entisestään.

Jos elementti pyrittäisiin toteuttamaan mineraalivillalla ja teräsorsilla, orren poikkileikkauksen tulisi olla koko villakerroksen korkuinen, jotta villa saadaan asennettua orsien väliin. Rautaruukki Oyj:n korkein vakiokokoinen 10-reikärisen Termorangan poikkileikkaus on 300 mm korkea, joten orsien välissä olevien eristeiden lisäksi asennettavat lisälämmöneristeet täytyy asentaa joko kantavan rungon sisä- tai ulkopuolelle.

Polyuretaanin ja mineraalivillan käytännön eroja ja vaikutuksia teräsrunkoiseen rakenteeseen tutkittiin täysin mineraalivillalla eristetyin elementin kautta. Mineraalivillalla eristetyssä elementissä käytettiin paremmin lämpöä eristäviä mineraalivilloja; tuulensuojana  $\lambda_D = 0,031 \text{ W/mK}$  mineraalivillaa ja rungon välissä  $\lambda_D = 0,033 \text{ W/mK}$  mineraalivillaa. Runkona käytettiin Z-ortta reunakäänteillä ja se mitoitettiin kaksikerroksiselle tapaukselle ProfBeam-ohjelmalla. Lämmöneristeet mitoitettiin HEAT-ohjelmistolla samalla tavalla, kuin polyuretaanilla eristettyjen ratkaisujen lämmöneristekerrokset mitoitettiin. Kuvassa 3.5 on esitetty kyseinen mineraalivillalla eristetty ratkaisu.

Elementin kokonaispaksuus on 50 mm tuulensuojalla 471 mm ja U-arvo HEAT-ohjelmistolla mitoitettuna  $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , joka ei täytä asetettua U-arvotavoitetta. U-arvon kiristyminen  $0,01 \text{ W/m}^2\text{K}$ :llä passiivitasoisessa rakenteessa mineraalivillaa käytettäessä kasvattaa suhteellisen paljon eristepaksuutta.



**Kuva 3.5.** Mineraalivillalla eristetty teräsrunkoinen ratkaisu.

Kun mineraalivillakerroksen paksuus kasvaa 200 mm:n, siinä alkaa tapahtua merkittävässä määrin sisäistä konvektiota. Sisäisessä konvektiossa ilma liikkuu avoahuokoisen lämmöneristeen sisällä kuljettaen mukanaan lämpöenergiaa ja kosteutta. ”Ulkoseinissä sisäisen konvektion U-arvoa heikentävä vaikutus voi olla 200 mm paksuisessa eristekerroksessa yli 10 %, 300 mm paksuisessa eristekerroksessa yli 15 % ja 400 mm paksuisessa eristekerroksessa yli 20 %” [9]. HEAT3-ohjelma ei ota huomioon avoahuokoisen eristeen sisäistä konvektiota, joten rakenteen tuulensuojakerroksen paksuutta on todennäköisesti kasvatettava merkittävästi, jotta päästään todellisuudessa lähelle U-arvotavoitetta.

Riittävän tiiviyn aikaan saaminen höyrynsulkumuovilla vaatii tässä rakenteessa erityistä huomiota. Lisäksi liitoksia suunniteltaessa täytyy olla tarkkana tiiviyn säilymisen suhteen, koska rakenteessa ei ole yhtenäistä paksua tiivistä eristekerrosta rungon ulkopuolella.

Täysin mineraalivillalla eristetyn elementin materiaalimenekki on huomattavasti polyuretaanilla toteutettua ratkaisua suurempi. Esimerkiksi pystyorsi on tässä ratkaisussa  $12,24 \text{ kg/m}^2$ , kun polyuretaanilla eristetyssä ratkaisussa pystyorsi on vain  $2,68 \text{ kg/m}^2$ . Suurempi orsi on myös huomattavasti kalliimpi pienempään verrattuna. Mineraalivillalla toteutettuna kantavan rungon pystyorsi maksaisi noin kolme kertaa enemmän polyuretaanilla toteutettuun ratkaisuun nähden.

Mineraalivillaratkaisu ei tarjoa uusia tuotannollisia mahdollisuuksia, vaan on perusrakenteeltaan hyvin samankaltainen nykyisin käytettyihin passiivitasoisiin seinäratkaisuihin nähden. Ainoana erona on puurungon korvaaminen Termorangalla.

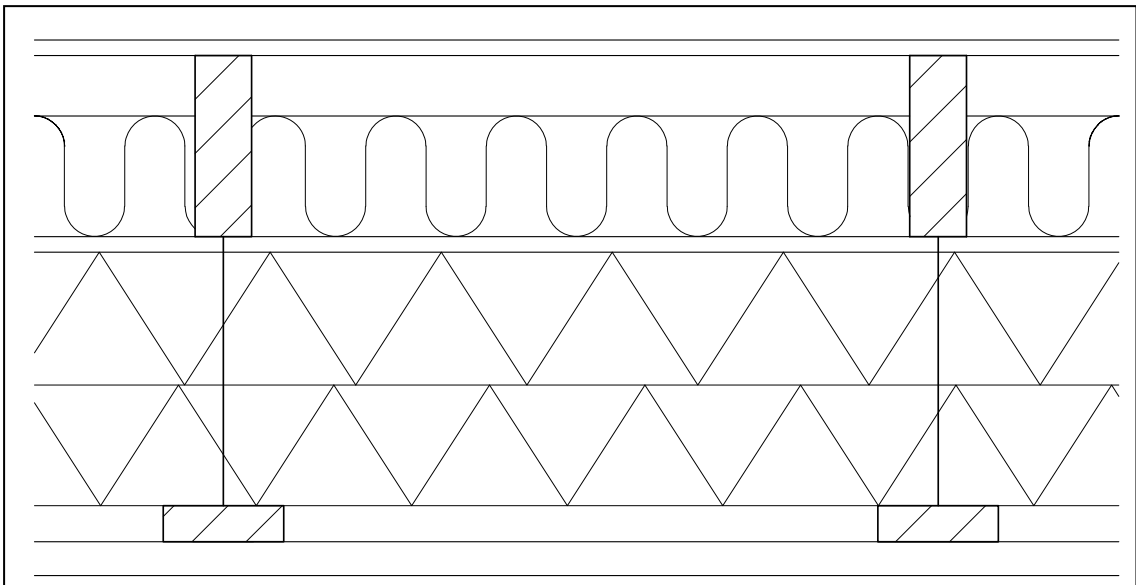
Rakenne on 471 mm paksu, joten se ei täytä 384 mm kokonaispaksuusvaatimusta. Ylipaksut elementit aiheuttavat merkittäviä logistiikkakuluja, jonka takia elementti täytyisi kasata osittain työmaalla. Tällöin myös elementin esivalmistusaste olisi heikko.

Voidaan siis todeta, että polyuretaanin käyttö lämmöneristeenä on tässä rakenteessa järkevämpää mineraalivillaan verrattuna. Polyuretaani mahdollistaa ohuemman rakenteen, pienemmän materiaalimenekin, edullisemmat logistiikkakustannukset ja helpottaa yksityiskohtien suunnittelua tiiviyn kannalta sekä tarjoaa mahdollisuuksia tehokkaaseen teolliseen tuotantoon.

### 3.6.2 Kantava runko

Teräksen erinomaiset lujuusominaisuudet takaavat riittävän kantavuuden erittäin ohuilla ja pienillä poikkileikkauksilla. Pienemmät poikkileikkaukset vähentävät materiaali-menekkiä ja pienentävät hiilijalanjälkeä. Jokainen säästetty kilo painossa helpottaa myös kuljetuksissa ja siirroissa sekä vähentää kuormaa elementin alapuolella oleville rakenteille. Lisäksi teräs on 100-prosenttisesti kierrätettävä materiaali ja kierrätetty teräs on yhtä vahvaa ja kestävää kuin rautamalmista valmistettu teräs. Magneettisuutensa ansiosta se on helposti eroteltavissa muista metalleista. Teräksen erinomaiset elinkaariominaisuudet edellä mainittujen etujen lisäksi asettavan teräksen kärkisijoille ympäristöluokitusjärjestelmissä silloin, kun vaatimukset liittyvät rakennusmateriaaleihin, rakenteisiin ja niiden elinkaariominaisuuksiin sekä rakennustyön aiheuttamiin häiriöihin ympäristölle. Näillä seikoilla on merkitystä jo tämän päivän materiaalivalinnoissa ja ne tulevat korostumaan lähitulevaisuudessa. [10]

Rakenteella on erittäin tiukat paksuus- ja U-arvovaatimukset. Lisäksi tehokas teollinen valmistus edellyttää rakenteelta erilaisia rakenteellisia ratkaisuja verrattuna esimerkiksi paikalla rakennettuihin perinteisiin rakenteisiin. Teräksen korvaamista puulla tutkittiin mitoittamalla puurunko 600 mm jaolla ja samoilla kuormilla, joita käytettiin teräsorsia mitoittaessa. Puurungon mitoitus tehtiin Finnforest Oy:n Finnwood 2.3 -ohjelmalla. Riittävän kantavuus saavutettiin yksi- ja kaksikerroksisissa rakenteissa 48x147 (C24) sahatavaralla. Kuvassa 3.6 on esitetty puurungolla toteutettu elementti.



**Kuva 3.6.** Puurunkoinen ratkaisu.

Rakenteen lämmöneristepaksuudet mitoitetttiin HEAT-ohjelmistolla, jolla rakenteen U-arvoksi saatiin  $0,089 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Puurungon väliin laitettiin maksimimäärä mineraalivillaa, jonka rakenteen kosteustekninen toimivuus sallii ja puurungon molemmiin puolin on 13 mm kipsilevy sekä rungon välissä 100 mm mineraalivillaa ( $0,037 \text{ W/mK}$ ). Polyuretaanikerroksen paksuus on 200 mm, tuuletusväli on 30 mm ja ulkoverhouslaudan paksuus 28 mm. Tuuletusvälin koolaus on kiinni kantavassa rungossa ansailla.

Rakenteen kokonaispaksuus on 431 mm, joten paksuusvaatimus ei täyty puurungolla toteutettuna. Tarkasteltavaa rakennetta ei siis voida toteuttaa puurungolla niin, että kaikki reunaehdot täyttyvät.

Puurungolla toteutetun rakenteen eristekerrokset (mineraalivilla ja polyuretaani) ovat saman paksuiset verrattuna Termorankaiseen rakenteeseen, joten Termorangan reikärivit osoittautuivat heikentämään teräsorren aiheuttamaa lisäkonduktanssia niin hyvin, että Termorangan vaikutus U-arvoon on tässä rakenteessa samaa luokkaa puun kanssa.

Rakennusmateriaalivalinnat tulee tehdä rakennekohtaisesti, koska jokainen rakenne on erilainen. Toimivat ja kustannustehokkaat rakenteet edellyttävät oikeita materiaalivalintoja. Tällä elementillä polyuretaanin ja teräksen käyttö mahdollistaa raja-arvot täyttävän ratkaisun, jollaista muita materiaaleja käyttäen on haastavaa tai mahdotonta toteuttaa. Siksi polyuretaanin ja teräksen käyttö tässä rakenteessa on perusteltua ja tarkoituksen mukaista.

### 3.7 Rakennevaihtoehtojen erot ja valinta

Rakennevaihtoehtoja oli ideointivaiheessa parhaimmillaan noin kaksikymmentä, joista valittiin viisi lupaavinta vaihtoehtoa. Lupaavimman ratkaisun valintaa varten näistä viidestä vaihtoehtoista kerättiin oleelliset tiedot kahteen taulukkoon. Taulukossa 3.4 on esitetty eri orsivaihtoehtojen keskeisimmät arvot ja materiaalikustannukset. Taulukossa 3.5 on esitetty rakennepaksuudet ja U-arvot.

**Taulukko 3.4. Koonti rakennevaihtoehdoista.**

POIKKI-LEIKKAUS	1-kerroksinen				2-kerroksinen				Hinta (keskiarvo) [€/m <sup>2</sup> ]
	Korkeus [mm]	Paksuus [mm]	Käyttöaste* [%]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]	Korkeus [mm]	Paksuus [mm]	Käyttöaste* [%]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]	
	50	1,5	97	47	60	2,0	96	51	49
	A=50, B=50, C=35, D=22				A=60, B=60, C=35, D=25				
	62	1,5	93	45	70	2,0	82	47	46
	A=62, B=50, C=10				A=70, B=50, C=11				
	100	1,25	82	42	100	1,5	99	44	43
	A=100, B=50, C=10 TERMO				A=100, B=50, C=15 TERMO				
	60	1,25	92	46	60	2,0	97	51	49
	A=60, B=55, C=19				A=60, B=55, C=19				
	100	1,0	91	43	100	1,25	98	44	43
	A=100, B=50, C=10 TERMO				A=100, B=50, C=15 TERMO				

\* Orret mitoittaa puristusvoiman ja taivutusvoiman yhdistelmä, käyttöaste ilmoittaa kuinka monta prosenttia orren kantokyvystä on käytetty.

Rakennetta valittaessa kiinnitettiin huomiota ratkaisuun kokonaisuutena. Sen joustavuus tuotannollisesti ja monipuoliset käyttömahdollisuudet olivat tärkeitä valinta kriteerejä. Erityistä painoarvoa annettiin ratkaisun kustannustehokkuudelle ja sille, kuinka todennäköisesti ratkaisusta saataisiin kannattava tuote. Näiden seikkojen arviointi pohjautui kehitysryhmän kokemuksen tuomaan näkemykseen rakenteen soveltuvuudesta käyttötarkoitukseensa ja tuotteeksi. Pohjana valinnalle käytettiin edellä esitettyä materiaalia.

**Taulukko 3.5. Rakennevaihtoehtojen U-arvot ja paksuudet.**

POIKKI- LEIKKAUS	U-arvo [W/m <sup>2</sup> K]		Mineraalivillan paksuus [mm]		Polyuretaanin paksuus [mm]		Eristepaketin* paksuus [mm]		Kokonais- paksuus** [mm]	
	1. krs	2. krs	1. krs	2. krs	1. krs	2. krs	1. krs	2. krs	1. krs	2. krs
Ω (rk)	0,089	0,088	50	60	230	230	293	303	351	361
Z (rk)	0,090	0,089	62	70	230	230	305	313	363	371
Z (rk) termo	0,092	0,093	100	100	200	200	313	313	371	371
C	0,090	0,090	60	60	230	230	316	316	374	374
C termo	0,092	0,092	100	100	200	200	326	326	384	384

\* Eristepaketti sisältää sisäkipsilevyn, orren/mineraalivillan, mahdollisen toisen kipsilevyn ja polyuretaanikerroksen.  
\*\* Kokonaispaksuus sisältää eristepaketin lisäksi tuuletusvälin 30 mm ja ulkoverhousmateriaalin 28 mm.

Vaihtoehtojen erojen selkeyttämiseksi laadittiin taulukko 3.6, jossa vaihtoehdot pisteytettiin ominaisuuksiensa mukaan yhdestä viiteen, antaen parhaimmalle viisi pistettä ja huonoimmalle yhden pisteen. Näin ratkaisut saatiin asetettua paremmuusjärjestykseen teknisien ominaisuuksiensa osalta. Kullekin vaihtoehdoille laskettiin pistekeskisarvo, jolla voitiin arvioida vaihtoehtojen paremmuutta ottaen huomioon kaikki osa-alueet. Taulukossa ei tarkasteltu sellaisia ominaisuuksia, joita ei pystytty mittaamaan millään luvulla, kuten innovatiivisuus tai teolliseen valmistukseen soveltuvuus. Termorankaiset ratkaisut osoittautuivat parhaimmiksi mitattavilta ominaisuuksiltaan. Z- ja Ω-ratkaisut olivat lähellä keskitasoa ja C-ratkaisu sai heikoimman keskiarvon.

**Taulukko 3.6. Vaihtoehtojen vertailutaulukko.**

Ominaisuus	Ω (rk)	Z (rk)	Z (rk) termo	C	C termo
Kokonaispaksuus	5	4	3	2	1
Teräsvahvuus	1	2	4	3	5
U-arvo	5	4	1	3	2
Hinta	1	3	5	2	4
Teräsmenekki	1	3	4	2	5
Keskiarvo	<b>2,60</b>	<b>3,20</b>	<b>3,40</b>	<b>2,40</b>	<b>3,40</b>

Lähes jokaisessa ratkaisussa siirryttäessä yksikerroksisesta ratkaisusta kaksikerroksiseen ratkaisuun, orren paksuus kasvoi yhdellä pykälällä vahvemmaksi ja poikkileikkauksen korkeus kasvoi hieman. Termorangoilla toteutetuissa rakenteissa ja umpinaisella C-orrella toteutetuissa rakenteissa orren poikkileikkauksen korkeus ei kasvanut, vaan ainoastaan teräksen vahvuus muuttui. Kaikista pienin ero eri kerroksisten ratkaisujen välillä oli Termorankarakenteissa. Tästä johtuen Termorankarakenteissa myös materiaalikustannuserot eri kerroksisten ratkaisujen välillä olivat kaikista pienimmät. Tuotannollisesta näkökulmasta voisi olla edullisempaa toteuttaa yksi- ja kaksikerrosratkaisut samalla orrella, jolloin tuotannossa käytettävien orsityyppien määrä vähenisi.

Rakennevaihtoehtojen orret mitoitettiin niin, että niiden kuormituskapasiteetti oli käytetty lähes kokonaan. Jos teräksen vahvuutta kasvatetaan 0,5 mm, kasvaa orren kantokyky poikkileikkauksesta riippuen noin 15 - 25 %.



Näiden seikkojen vuoksi voisi olla edullista toteuttaa seinäratkaisu Termorangalla, esimerkiksi C-vaihtoehdolla, jolloin 1,5 mm vahva orsi riittäisi kantavuuden puolesta hyvin sekä yksi- että kaksikerrokseen rakennukseen. Tällöin orrella olisi ylimääräistä kuormituskapasiteettia sellaisessakin kaksikerroksisessa kohteessa, jossa kuormat ovat tässä työssä käytettyjä kuormia suuremmat. Esimerkiksi tuulikuorma on hyvin paikka-kuntakohtainen ja saattaa vaikuttaa merkittävästi orren mitoittamiseen.

Kaikilla ratkaisulla on mahdollista toteuttaa elementti, joka täyttää sille asetetut raja-arvot ja tavoitteet. Elementin paksuus rajoittaa sen esivalmistusastetta niin, että ainoastaan kalliimmilla ja ohuemmilla ratkaisuilla voidaan harkita ikkunan pielilautojen ja peltien asentamista tehtaalla. Tämä ei kuitenkaan ollut kynnyskysymys ratkaisua valittaessa.

### 3.7.1 C-orssi

Umpinaisella C-orrella ja kahdella kipsilevyllä toteutettua ratkaisua ei valittu, koska sen reunakäänteet ovat niin pitkät, että ne hankaloittavat mineraalivillan asentamista orren sisälle. Lisäksi kyseisen vaihtoehdon kaksikerroksinen vaihtoehto oli kallis verrattuna muihin ratkaisuihin. C-ratkaisu sai vertailutaulukossa järjestäen kolmea ja kahta pistettä, eikä se selvästi erottautunut millään ominaisuudella yli muiden vaihtoehtojen.

### 3.7.2 Z-orssi

Z-orrella toteutettu ratkaisu oli monessa mielessä eri vaihtoehtojen kompromissi. Sen vertailutaulukon pistekeskisarvo oli lähimpänä keskiarvoa, eli kolmesta, joten sitä pidettiin perusratkaisuna, johon muita vaihtoehtoja verrattiin. Tämä ratkaisu ei kuitenkaan tarjonnut selkeitä tuotannollisia etuja ja se ei ollut niin innovatiivinen kuin  $\Omega$ -orrella tai Termorangoilla toteutetut vaihtoehdot.

### 3.7.3 $\Omega$ -orssi

$\Omega$ -orrella toteutetun ratkaisun käyttömahdollisuudet ovat laajat. Sitä voitaisiin käyttää laaja-alaisesti useissa taivutusta, puristusta ja kestävyyttä sekä erinomaista lämmöneristyskykyä vaativissa kohteissa, kuten erilaisissa palkistoissa ja pystyrungoissa. Kyseinen ratkaisu vaati kuitenkin paljon lisätutkimusta. Nyt  $\Omega$ -orrella toteutetun pilarin kantavuus on mitoitettu täysin sisäpuolella olevalle  $\Omega$ -orrelle. Tämä ratkaisu olisi kuitenkin kustannus ja kantavuusmielessä tehokkaampi, jos pilari toimisi kokonaisuudessaan kantava rakenteena. Vertailutaulukossa  $\Omega$ -ratkaisu edusti ääripäitä; U-arvoltaan ja kokonaispaksuudeltaan se paras ratkaisu, mutta hinnassa ja teräsvahvuudessa sekä -menekissä se oli heikoin vaihtoehto.

### 3.7.4 Termoranka

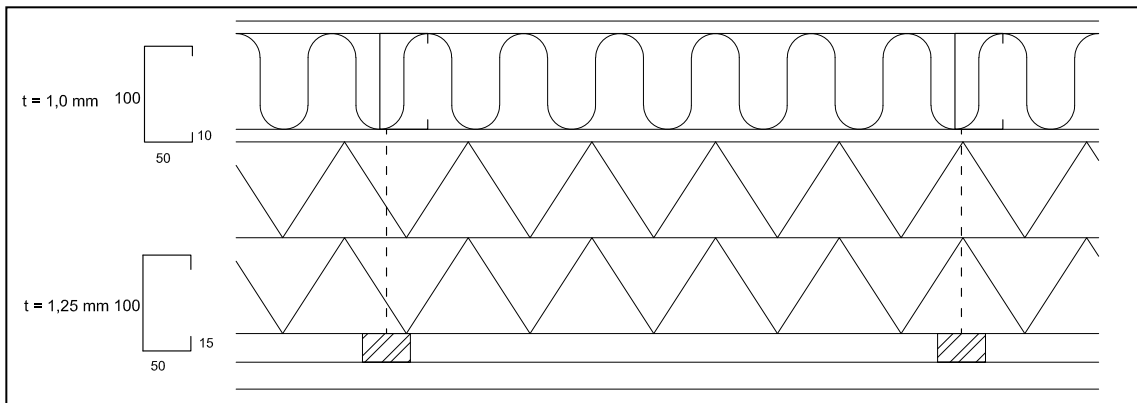
Termorangoilla toteutetut ratkaisut tarjosivat ylivoimaisesti edullisimmat ja kokonaispaksuudeltaan paksuimmat vaihtoehdot. Näissä vaihtoehdoissa myös teräs ja polyuretaanimenekit olivat pienimmät. Lisäksi Termorankavaihtoehtojen mitat olivat lähellä Rautaruukki Oyj:n vakio-orsia, jolloin niiden saatavuus ja kannattavuus olivat myös lähtökohtaisesti paremmat. Termorangoilla toteutetuissa vaihtoehdoissa teräspaksuudet olivat erittäin ohuet, mikä mahdollistaa esimerkiksi erilaiset helpommat ruuvikiinnitykset. Myös edellä mainittu yksi- ja kaksikerroksisten ratkaisujen toteutus samalla orrella oli edullisinta nimenomaan Termorangoilla. Termorankavaihtoehdot (C- ja Z-orssi) saivat vertailutaulukossa saman pistekeskisarvon, eivätkä ne juuri eronneet toisissaan missään taulukon 3.6 ominaisuudessa.

Ainoa merkille pantavat ero oli kipsilevyjen käytöstä johtuvat paksuuserot. Kahdella kipsilevyllä toteutetussa ratkaisussa elementin kokonaispaksuus on tarkalleen 384 mm, joka on ehdoton yläraja elementin kokonaispaksuudelle. Kahden kipsilevyn tuomat edut ääneneristävyydessä, tuotannollisuudessa ja rungon jäykkyydessä ovat kiistattomat. Elementin palonkesto on myös parempi kahden kipsilevyn ansiosta.

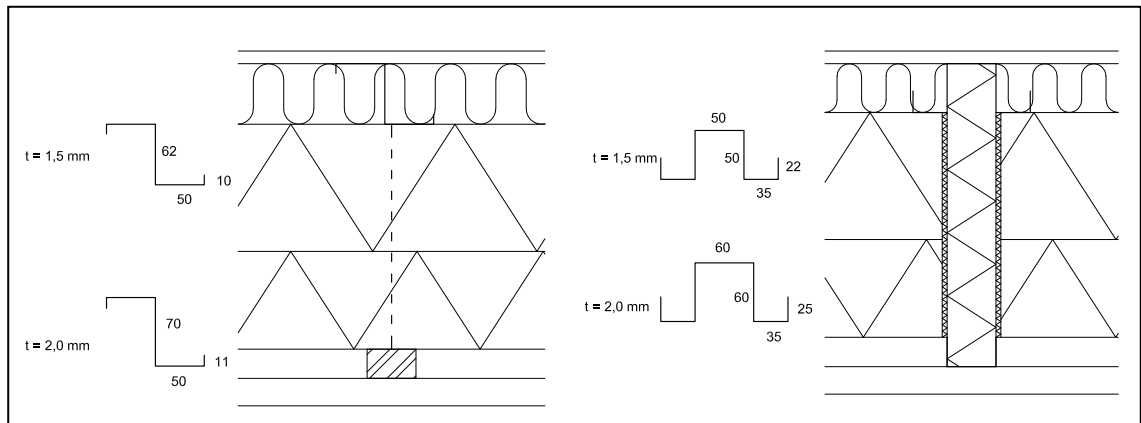
### 3.7.5 Valinta

Lisätutkimus- ja kehittämistarpeen vuoksi  $\Omega$ -orrella toteutettua rakennetta ei valittu ensisijaiseksi rakenteeksi, mutta se päätettiin pitää mukana projektissa potentiaalinsa takia. Myös Z-orrella toteutettu rakenne päätettiin pitää työssä mukana toisena vaihtoehtoisena ratkaisuna, koska siinä ei varsinaisesti ollut mitään vikaa. Tässä vaiheessa ei haluttu sulkea pois toteutuskelpoisia ratkaisuja, koska yksityiskohtia tarkasteltaessa vaihtoehdoista saattaa löytyä uusia rajoitteita tai mahdollisuuksia, jolloin ratkaisun vaihto voisi olla järkevää.

Valintaprosessissa päädyttiin valitsemaan C-orrella toteutettu Termorankarakenne ensisijaiseksi ratkaisuksi, jota aletaan kehittää valmiiksi tuotteeksi. Valintaan vaikutti ennen kaikkea valituksi tulleen rakenteen edulliset materiaalikustannukset, lähellä vakiokojoja oleva orren poikkileikkaus, materiaalinemenekin vähyys ja monipuoliset toteutusmahdollisuudet sekä hyvät tuotannolliset lähtökohdat. Kuvassa 3.7 on esitetty valituksi tullut rakenne ja kuvassa 3.8 kaksi vaihtoehtoista rakennetta.



**Kuva 3.7.** Valituksi tullut rakenne.



**Kuva 3.7.** Vaihtoehtoiset rakenteet.

Valituksi tullut rakenne muistuttaa kantavan runkonsa puolesta ulkomailla paljon käytettyä teräsorsirunkoista seinärakennetta. Nämä rakenteet ovat kuitenkin poikkeuksetta paikallarakentamiseen, joten niiden yksityiskohdat on suunniteltu paikallarakentamisen ehdoilla. Lisäksi niiden lämmöneristystaso on usein erittäin heikko. Seuraavaksi tutkitaan tarkemmin valitun rakenteen toimivuutta ja kehitetään sille elementti rakentamista tukevia yksityiskohtavaihtoehtoja.

## 4 VALITUN RAKENTEEN TOIMINTA

### 4.1 Kantavuus

Kantavan teräsrungon mitoitus tehtiin pääosin Rautaruukki Oyj:n ProfBeam-ohjelmalla. Ohjelman käyttö runkoa mitoittaessa on kerrottu lyhyesti kappaleessa 3.2. Ohjelmalla mitoitettiin myös runkotolppien yläpuolella oleva vaakaorsi, joka tasaa kattoristikoiden kuormia runkotolpille ja toimii kantavana rakenteena ikkuna- ja oviaukkojen yli. Tämän orren mitoitus on käyty läpi kappaleessa 5.3. Lisäksi kappaleessa 5 on esitetty liitosten mitoitusperiaatteita. Elementin alapuolella olevan U-orren mitoitus on esitetty myös kappaleessa 5.2.

#### 4.1.1 ProfBeam-ohjelman yleiset mitoitusperiaatteet

ProfBeam:n mitoitus perustuu pääosin Eurokoodi 3:seen (EC3). EC3:ssa on annettu yleiset mitoitus säännöt teräsrakenteille SFS-EN 1993-1-1 ja lisäsäännöt kylmämuovatuille terässauvoille SFS-EN 1993-1-3 + AC. Yleisessä osassa on terässauvojen yleiset mitoitusperiaatteet murto- ja käyttörajatiloissa. Lisäsäännöissä on tarkennettu yleisohjeen soveltamista kylmämuovatuille sauvoille sekä esitetty seikkoja, jotka täytyy ottaa huomioon yleisen osan lisäksi kylmämuovattuja sauvoja mitoittaessa. Seuraavaksi käydään läpi EC3:sen keskeisimmät tarkastelut kylmämuovatuille sauvoille.

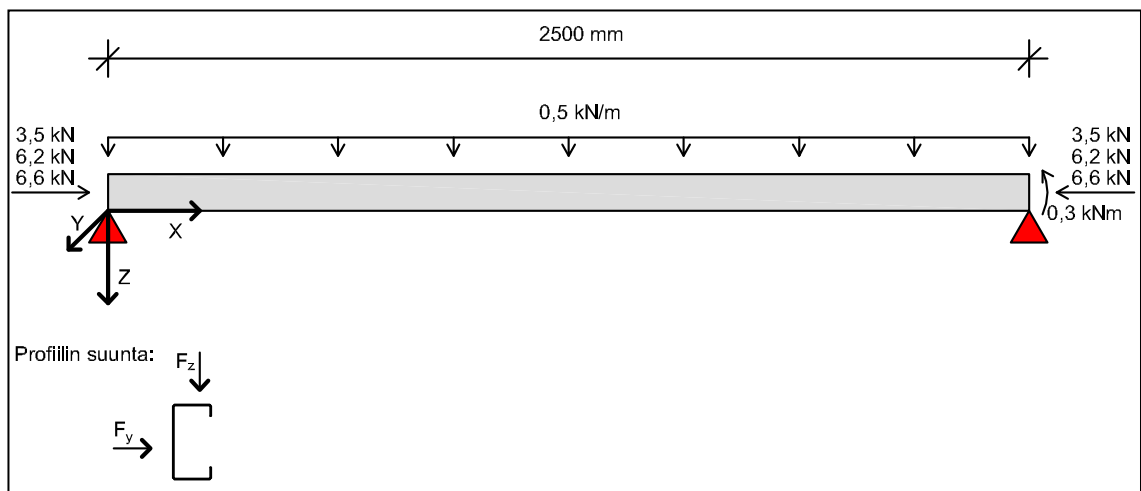
Murto- ja käyttörajatarkastelussa tarkastellaan orren poikkileikkauksen veto-, puristus-, taivutus- ja vääntökestävyyttä sekä näiden rasiusten yhdistelmiä, joita ovat yhdistetty veto ja taivutus sekä yhdistetty puristus ja taivutus. Yksittäisiä rasituksia tarkastellaan vertaamalla poikkileikkaukseen kohdistuvaa mitoituskuormaa poikkileikkauksen mitoituskestävyyteen. Tämä suhdeluku ei saa ylittää ykköstä. Kuormitusyhdistelmiä tarkasteltaessa eri mitoituskuormien ja mitoituskestävyyksien suhdelukujen summa ei saa ylittää ykköstä. Murto- ja käyttörajatarkastelussa otetaan huomioon myös paikallinen lommahdus, kokonaislommahdus, vinoutumisnurjahdus sekä shear lag.

Nurjahduskestävyyttä tarkastellaan eri nurjahdustapauksilla, jotka ovat taivutusnurjahdus sekä vääntö- ja taivutusvääntönurjahdus. Lisäksi tarkastellaan taivutetun sauvan kiepsahdus sekä taivutus ja aksiaalinen puristus. Yleisesti vinoutumiselle herkkien poikkileikkausten osalta otetaan huomioon puristettujen laippojen mahdollinen kiepsahdus ja laippojen poikittainen taivutus. Myös paikallisen lommahduksen ja vinoutumisnurjahduksen vaikutukset otetaan huomioon. Taivutettujen sauvojen kiepsahdustarkastelu tehdään sellaisille sauvoille, jotka eivät ole tuettu riittävästi sivusuunnassa kiepsahdukselle. Sauvat, joiden puristettu laippa on riittävästi tuettu sivusuunnassa, eivät ole alttiita kiepsahdukselle.

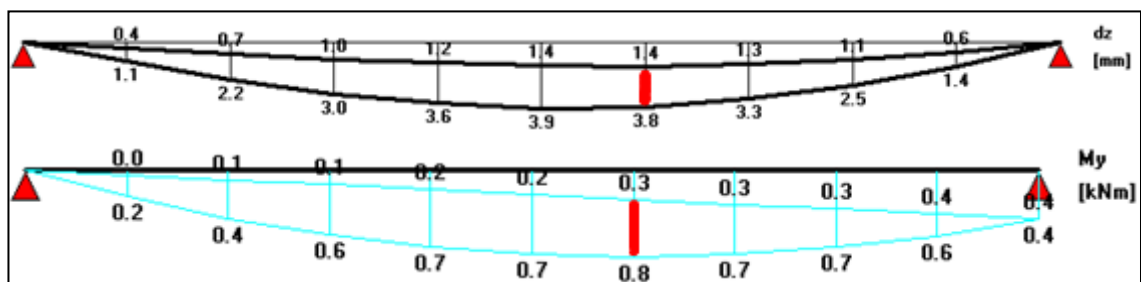
Käyttörajatilataarkasteluissa osoitetaan, että ominaiskuormien aiheuttamat muodonmuutokset ja halkeamat eivät ylitä annettuja rajoja. Tarvittaessa osoitetaan myös, että rakenteen muodonmuutokset eivät aiheuta haitallisia lisärasituksia muihin rakenteisiin eikä rakenteeseen synny sen käyttötarkoitukseen nähden haitallista värähtelyä. Tarkastelu tehdään joko muodonmuutosten osalta plastisuusteorian tai siirtymien osalta kimmo-teorian mukaan. Plastisuusteoriaa käytettäessä otetaan huomioon mahdollinen voimien ja momenttien uudelleen jakautuminen.

#### 4.1.2 ProfBeam-ohjelmalla saadut tulokset

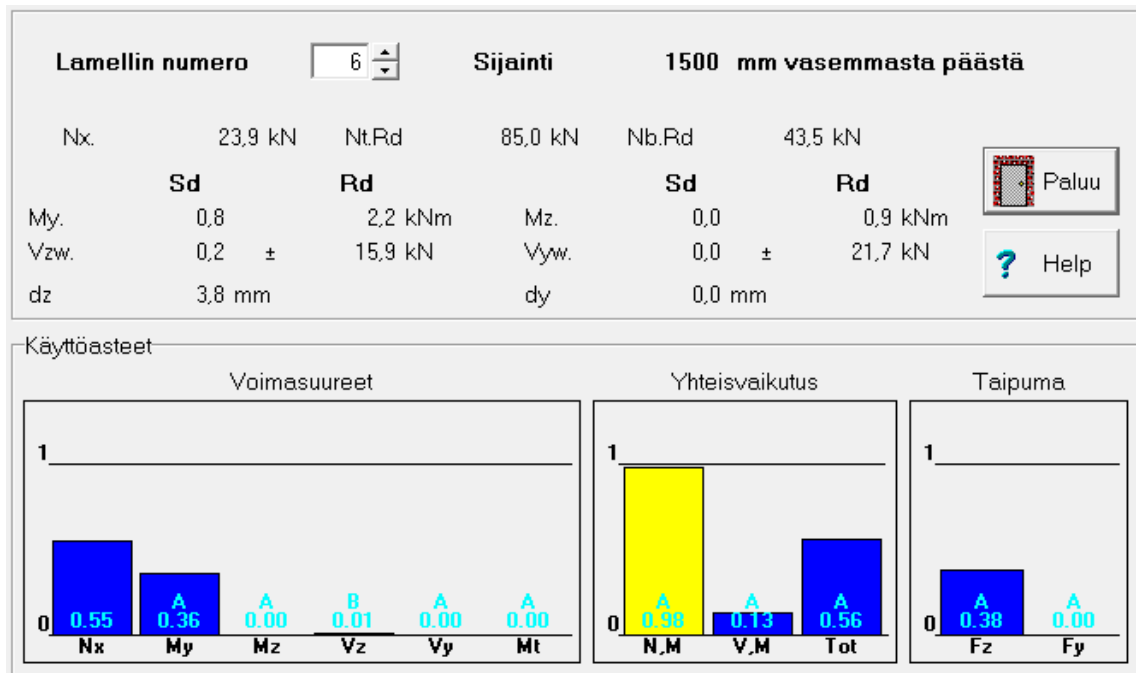
ProfBeamista voi tulostaa kuvia muun muassa orren kuormista, jännitystiloista ja taipumista. Kuvassa 4.1 on esitetty orteen kohdistuvat kuormat ja poikkileikkauksen sekä koordinaatistojen suunnat kaksikerroksisessa tapauksessa. Orren puristusvoimina ovat hyötykuorma, omapaino ja lumikuorma. Tuulikuorma on tasaisena kuormana ja puristuskuormien epäkeskisyys otetaan huomioon orren toisessa päässä vaikuttavalla momentilla. Kuvassa 4.2 on esitetty orren momenttijakauma sekä taipumat kuvan 4.1 kuormitustapauksella. ProfBeam jakaa orren lamelleihin, joissa se laskee orren poikkileikkauksen jännitystilaa. Kuvan 4.1 orren momenttijakauma saavuttaa maksimiarvonsa kuudennen lamellin kohdalla, jossa se saavuttaa myös suurimmat käyttöasteensa. Kuudes lamelli on merkitty punaisella kuvaan 4.2. Kuvassa 4.3 on esitetty kuudennen lamellin kohdalla vallitsevat kuormat, kapasiteetit ja taipumat.



Kuva 4.1. Orren kuormat ja koordinaatisto, kaksikerroksinen tapaus.



Kuva 4.2. Orren taipumajakauma (ylhäällä) ja taivutusmomenttijakauma (alhaalla) kuvan 4.1 kuormituksella.



**Kuva 4.3.** Kuudennessa lamellissa (merkitty kuvaan 4.2. punaisella) vaikuttavat voimat ja taipumat sekä käyttöasteet.

Kuvan 4.3 termit:

- Nx Sauvan normaalivoiman laskenta-arvo (puristusta/vetoa X-akselin suuntaa)
- Nt.Rd Vetovoimakapasiteetti
- Nb.Rd Puristusvoimakapasiteetti
- Sd Lamellissa vaikuttava kuorma (laskenta-arvo)
- Rd Lamellin kohdalla kapasiteetti
- My Momentti/kapasiteetti Y-akselin ympäri
- Mz Momentti/kapasiteetti Z-akselin ympäri
- Vzw Leikkausvoima/kapasiteetti Z-akselin suuntaa
- Vyw Leikkausvoima/kapasiteetti Y-akselin suuntaa
- dz Taipuma Z-akselin suuntaa
- dy Taipuma Y-akselin suuntaa

Kuten kuvasta 4.3 näkee, poikkileikkauksen mitoittava kuormitus on puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutus, jonka kapasiteetti on käytetty lähes kokonaan 1,25 mm vahvalla teräksellä. Poikkileikkauksen muut kapasiteetit ja nurjahduskapasiteetit on esitetty liitteessä 6.

## 4.2 Lämmöneristävyys

U-arvoon perustuva tarkastelu tehtiin HEAT-ohjelmilla. Ohjelma soveltuu yleisen lämmönjohtumisen-, kylmäsiltojen-, eri rakenneosien U-arvojen- ja pohjarakenteiden kautta tapahtuvien lämpöhäviöiden laskentaan, pintalämpötilojen arviointiin, lämmöneristeiden asennuksen optimointiin sekä lattialämmitysjärjestelmien- ja ikkunan karmien analysointiin. Lämpöhäviöiden tasauslaskenta, jossa otetaan huomioon rakennuksen ulkovaipan, ilmavuojen ja ilmanvaihdon lämpöhäviöt sekä rakennuksen mitat, tehtiin Ympäristöministeriön laatimien MS Excel -taulukkopohjien avulla.

### 4.2.1 HEAT-ohjelmien yleiset toimintaperiaatteet ja käyttö

HEAT-ohjelmaan muodostetaan tarkasteltava rakenne käyttäen suorakaiteita (2D) tai suorakulmaisia särmiöitä (3D). Näille objekteille määritellään materiaaliominaisuudet, jotka ovat lämmönjohtavuus x- ja y-suunnassa sekä ominaislämpökapasiteetti suhteessa kappaleen tilavuuteen. Sitten mallille määritellään rajatilat. Seinärakenteita tarkasteltaessa käytettiin yhden asteen lämpötilaeroa, joten ulkopinnan lämpötilaksi määriteltiin 0 °C ja sisälämpötilaksi +1 °C. Laskenta tehtiin stationääritilassa. Sisä- ja ulkopinnoilla käytettiin 0,13 m<sup>2</sup>K/W pintavastuksia rakentamismääräyskokoelman C4 (2003) ja EN 6946 mukaan. Seinämällin ylä- ja alareuna asetettiin adiabaattisiksi. Sitten mallille määritellään solujako, joka jakaa mallin pieniin soluihin. Jokainen solu käyttäytyy materiaaliominaisuutensa mukaan. Ohjelma laskee näiden solujen vuorovaikutusta toisiinsa, eli lämpövirtaa niiden läpi. Solujen tiheyttä voi ohjelmassa säädellä. Tulos on sitä tarkempi, mitä tiheämpi soluverkko on. Malleissa käytettiin tiheää soluverkkoa ohuiden ja pienien teräsosien takia, 122 500 (2D) ja 1 000 000 (3D) solua.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + I(x, y, z, t) = C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$C = \rho * c_p$$

missä C = ominaislämpökapasiteetti tilavuuden suhteen [J/m<sup>3</sup>K]

ρ = materiaalin tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

c<sub>p</sub> = ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]

I = sisäinen lämmönkehitys/lämpöhäviö [W/m<sup>3</sup>]

T = lämpötila [K]

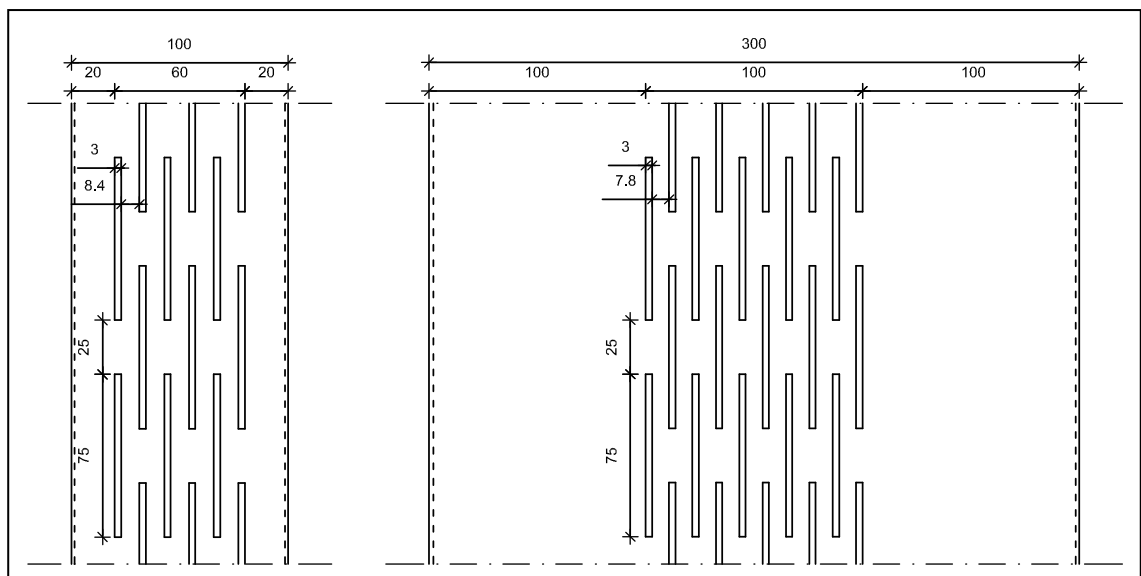
t = aika [s]

Ohjelma käyttää lämpövirtoja laskiessaan johtumisen energiataseyhtälöä (4.1). Yhtälö on kolmiulotteiselle tapaukselle (HEAT3). Kaksiulotteisessa tapauksessa (HEAT2) yhtälöstä jää z-termit pois. Stationääritapauksessa yhtälön oikea puoli on nolla. Myös sisäinen lämmönkehitys/lämpöhäviö oli lasketuilla malleilla nolla. Ohjelma laskee mallin numeerisesti ja ilmoittaa rakenteen läpi virtaavan lämpövirran tiheyden, eli U-arvon [W/m<sup>2</sup>], ja tuloksen virheen, joka tässä tapauksessa oli <0,01 %.

Termorangan uuman lämmönjohtavuus laskettiin HEAT2:lla. Termorangassa, joka poikkileikkauksen korkeus on 100 mm, reikärivejä on 6 kappaletta ja ne sijaitsevat poikkileikkauksen uumassa keskellä 60 mm alueella. Vastaavasti mineraalivillaeristeesssä rakenteessa käytetyn Termorangan reikärivejä on 10 kappaletta ja ne sijaitsevat orren uumassa 100 mm alueella. Kuvassa 4.4 on esitetty mallinnuksessa käytettyjen rei'itysten tarkat mitat.

HEAT-ohjelmissa myös reiälle täytyy antaa materiaaliominaisuudet. Termoranka on rakenteessa tiukasti kahden mineraalivillakerroksen välissä ja teräspaksuudet ovat erittäin ohuita. Siksi rankoja mallinnettaessa oletettiin, että Termorangan reikien sisällä on ainakin osittain mineraalivillaa ja reiässä oleva ilma on suhteellisen suljetussa ja liikkumattomassa tilassa. Mineraalivillan lämmönjohtavuus on 0,037 W/mK. Reiän lämmönjohtavuutta heikennettiin oleellisesti mineraalivillan lämmönjohtavuudesta, koska mineraalivilla ei kuitenkaan ole tasaisesti reiässä, koska reikien muoto ja reunat oletettiin estävän villan tasaisen jakautumisen reiässä. Reiän ominaislämpökapasiteettina käytettiin ilman ominaislämpökapasiteettia vakioaineessa 1 kJ/Kkg ja tiheytenä 1,293 kg/m<sup>3</sup>, joista laskettiin ohjelmaan syötettävä ominaislämpökapasiteetti 0,001293 MJ/m<sup>3</sup>K. Reiän lämmönjohtavuutena käytettiin 0,050 W/m<sup>2</sup>K.

Saatus Termorangan uuman lämmönjohtavuutta (6-reikäinen 4,6445 W/mK ja 10-reikäinen 9,1513 W/mK) käytettiin HEAT3:n malleissa orren uumassa. Teräksen lämmönjohtavuus ilman rei'itystä on 50 W/mK, joten termorei'ityksellä on merkittävä vaikutus orren uuman lämmönjohtavuuteen.



**Kuva 4.4.** Termorankojen tarkat mitat, joita käytettiin Termorangan uuman lämmönjohtavuutta laskiessa HEAT2:lla. Vasemmalla on 6-reikäinen ja oikealla 10-reikäinen Termorangan uuma.

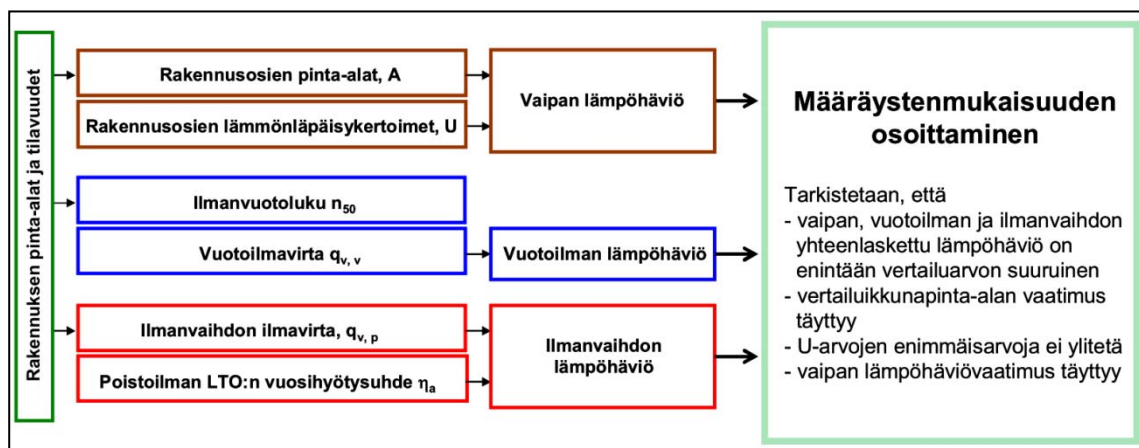
Rakennevaihtoehtojen eristepaksuuksia arvioitiin rakenteen valintavaiheessa liitteen 3 mukaan. Nämä eristepaksuudet olivat yllättävän lähellä ohjelmalla saatuihin tarkkoihin tuloksiin nähden. HEAT ohjelmisto soveltuu hyvin teräsosia sisältävän rakenteen



tarkasteluun, koska se ottaa huomioon lisäkonduktanssin EN ISO 10211 standardin mukaan. Lisäksi ohjelmalla voidaan tarkastella ikkunoiden ja ovien karmien lämmönjohtavuuksia, koska ohjelma on validoitu myös EN ISO 10077-2 standardille. [11] [12]

#### 4.2.2 Lämpöhäviöiden tasauslaskennan yleiset periaatteet

Rakennuksen lämpöhäviöiden tasauslaskennassa tarkastellaan rakennuksen lämpöhäviöitä, joita ovat vuotoilman ja ilmanvaihdon kautta tapahtuvat häviöt sekä ulkovaipan läpi johtumalla tapahtuvat lämpöhäviöt. Jokaiselle näille kolmelle lämpöhäviölle on asetettu raja-arvot, joita rakennus ei saa ylittää. Lisäksi lämpöhäviöiden summa ei saa ylittää asetettua raja-arvoa. Rakennuskohtaiset raja-arvot määräytyvät rakennuksen pinta-alan ja tilavuuden sekä ennalta annettujen vertailuarvojen mukaan. Tämä tarkastelu sallii rakennuksen lämmöneristeiden joustavamman mitoituksen vanhoihin U-arvoihin perustuvan menetelmän sijaan, koska lämpöhäviöiden tasauslaskennassa voidaan kompensoida heikompia osa-alueita kohtuuden rajoissa muilla vahvemmillä osa-alueilla. Esimerkiksi heikommalla LTO:lla varustettua ilmanvaihtokonetta voidaan kompensoida paremmalla ulkovaipan lämmöneristyskyvyllä. Kuvassa 4.5 on esitetty lämpöhäviöiden tasauslaskennan vaiheet ja määräystenmukaisuuden osoittaminen. [13]



*Kuva 4.5. Lämpöhäviöiden tasauslaskennan vaiheet ja määräystenmukaisuuden osoittaminen. [13]*

Vaipan lämpöhäviötä laskettaessa rakenteelle lasketaan kaksi lämpöhäviötä; vertailuratkaisun ja suunnitteluratkaisun lämpöhäviö. Vaipan vertailuratkaisun lämpöhäviö lasketaan rakennuksen laajuustietojen ja rakentamismääräyskokoelmassa annettujen määräysten ja ohjeiden mukaan. Rakentamismääräyskokoelmassa on kerrottu esimerkiksi vertailuratkaisun ikkunapinta-alan osuus prosentteina maanpäällisistä kerrospinta-aloista ja rakennusosien U-arvot (RakMK C3 2010). Esimerkiksi seinälle on määritelty vertailuratkaisun U-arvoksi  $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Vaipan vertailuratkaisun lämpöhäviötä laskettaessa rakentamismääräyskokoelmassa esitetty rakennusosan vertailuratkaisun U-arvo kerrotaan rakennusosan todellisella pinta-alalla. U-arvojen ja pinta-alojen tulojen summasta saadaan vaipan vertailuratkaisun lämpöhäviö kaavalla (4.2). Saatua vertailurat-

kaisun lämpöhäviötä käytetään ylärajana varsinaiselle suunnitteluratkaisun lämpöhäviölle.

Suunnitteluratkaisun lämpöhäviö lasketaan samoilla menetelmillä ja laajuustiedoilla, paitsi sen laskemisessa käytetään rakennuksen todellisia arvoja, kuten todellisia ikkunoiden pinta-aloja ja rakennusosien todellisia U-arvoja, jotka on saatu rakentamismääräyskokoelman C4, EN laskentastandardin tai muun hyväksyttävän laskentatavan mukaan. Näin saatua suunnitteluratkaisun lämpöhäviötä verrataan vertailuratkaisun lämpöhäviöön. Suunnitteluratkaisun lämpöhäviön ja vertailuratkaisun lämpöhäviön suhde saa olla enintään 1,3.

Tämä mahdollistaa heikomman ulkovaipan rakennusosan kompensoimisen toisella, paremmin eristetyllä, rakennusosalla. Rakennusosien U-arvoille on kuitenkin rakentamismääräyskokoelmassa määritelty enimmäisarvot, joita osa ei saa ylittää. Ylärajat ovat erittäin korkeat, lämpimissä tiloissa  $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$  (muut kuin ikkunat) ja  $1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$  (ikkunat). [14]

*Rakennuksen vaipan lämpöhäviön yhtälö [14]*

$$\begin{aligned} \sum H_{joht} = & \sum (U_{ulkoseinä} * A_{ulkoseinä}) + \sum (U_{yläpohja} * A_{yläpohja}) \\ & + \sum (U_{alapohja} * A_{alapohja}) + \sum (U_{ikkuna} * A_{ikkuna}) \\ & + \sum (U_{ovi} * A_{ovi}) \quad (4.2) \end{aligned}$$

jossa

$\sum H_{joht}$	rakennusosien yhteenlaskettu ominaislämpöhäviö [W/K]
U	rakennusosan lämmönläpäisykerroin [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]
A	rakennusosan pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

Kuten vaipan lämpöhäviötä laskettaessa, myös vuotoilman lämpöhäviötä laskettaessa lasketaan vertailuratkaisun ja suunnitteluratkaisun lämpöhäviöt. Vertailuratkaisun vuotoilman lämpöhäviön laskennassa käytetään  $2,0 \text{ 1/h}$  ( $n_{50}$ ) vuotolukua. Suunnitteluratkaisun vuotoluku määritellään mittaamalla. Jos mittaustuloksia ei ole saatavilla, käytetään suunnitteluratkaisun vuotolukuna  $4,0 \text{ 1/h}$ . Vuotoluvun avulla määritellään vuotoilmakerroin, jonka avulla edelleen lasketaan vuotoilmavirta. Vuotoilmavirran avulla lasketaan vuotoilman ominaislämpöhäviö. Vuotoilman lämpöhäviö lasketaan alla olevilla kaavoilla (4.3) (4.4) (4.5). [14]

*Rakennuksen vuotoilman lämpöhäviön laskenta [14]*

VUOTOILMAKERROIN

$$n_{vuotoilma} = \frac{n_{50}}{25} \quad (4.3)$$

jossa

$n_{vuotoilma}$	rakennuksen vuotoilmakerroin, kertaa tunnissa [1/h]
-----------------	---

$n_{50}$  rakennuksen vuotoluku 50 Pa paine-erolla, kertaa tunnissa [1/h]

#### VUOTOILMAVIRTA

$$q_{v,vuotoilma} = n_{vuotoilma} * \frac{V}{3600} \quad (4.4)$$

jossa

$q_{v,vuotoilma}$	vuotoilmavirta [m <sup>3</sup> /s]
$n_{vuotoilma}$	rakennuksen vuotoilmakerroin, kertaa tunnissa [1/h]
$V$	rakennuksen ilmatilavuus [m <sup>3</sup> ]
3600	kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos m <sup>3</sup> /h => m <sup>3</sup> /s [s/h]

#### VUOTOILMAN OMINAISLÄMPÖHÄVIÖ

$$H_{vuotoilma} = \rho_i * c_{pi} * q_{v,vuotoilma} \quad (4.5)$$

jossa

$H_{vuotoilma}$	vuotoilman ominaislämpöhäviö [W/K]
$\rho_i$	ilman tiheys, 1,2 [kg/m <sup>3</sup> ]
$c_{pi}$	rakennuksen tilavuus [m <sup>3</sup> ]
$q_{v,vuotoilma}$	vuotoilmavirta [m <sup>3</sup> /s]

Ilmanvaihdon lämpöhäviö lasketaan kaavalla (4.6). Laskennassa tarvitaan lähtötiedoiksi rakennuksen palvelualueiden, eli tilojen, tulo- ja poistoilmavirrat, ilmanvaihdon käyttöajat ja käytettävän ilmanvaihtokoneen poistoilman LTO:n vuosihyötysuhde. Vertailu ja suunnittelulämpöhäviöitä laskettaessa käytetään samoja tulo- ja poistoilmavirtoja sekä käyttöaikoja. Ainoa muuttuja vertailu- ja suunnittelulämpöhäviöiden välillä on ilmanvaihtokoneen poistoilman LTO:n vuosihyötysuhde. Vuosihyötysuhteeseen vaikuttavat ilmanvaihtokoneen käyttötapa, tulo- ja poistoilmavirta, rakennuksen maantieteellinen sijainti, huonelämpötila, jäteilman minimilämpötila jäätymissuojauksessa sekä ilmanvaihtokoneen valmistajan ilmoittama LTO:n tuloilman SFS-EN 308 mukaan määriteltä lämpötilasuhde. Vuosihyötysuhde laskettiin Ympäristöministeriö internet-sivuilta saadulla MS Excel -pohjaisella laskimella. Vertailuratkaisun ilmanvaihtokoneen vuosihyötysuhteena käytetään 45 %. [13]

*Rakennuksen ilmanvaihdon lämpöhäviön kaava. [13]*

$$H_{iv} = \rho_i * c_{pi} * q_{v,poisto} * t_d * r * t_v * (1 - \eta_a) \quad (4.6)$$

jossa

$H_{iv}$	ilmanvaihdon ominaislämpöhäviö [W/K]
$\rho_i$	ilman tiheys, 1,2 [kg/m <sup>3</sup> ]
$c_{pi}$	ilman ominaislämpökapasiteetti, 1000 [Ws/kgK]
$q_{v,poisto}$	poistoilmavirta [m <sup>3</sup> /s]
$t_d$	ilmanvaihtojärjestelmän keskimääräinen käyntiaikasuhde [h/24h]
$t_v$	ilmanvaihtojärjestelmän viikoittainen käyntiaikasuhde [vrk/7vrk]

$r$	muuntokerroin, joka ottaa huomioon ilmanvaihtojärjestelmän vuorokautisen käyntiajan, kerroin on 1,00 ympärivuorokautisessa käytössä, 0,93 päiväaikaisessa käytössä ja 1,07 yöaikaisessa käytössä
$\eta_a$	ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde, joka on lämmöntalteenottolaitteistolla vuodessa talteenotettavan ja hyödynnettävän energian suhde ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsemaan energiaan, kun lämmöntalteenottoa ei ole

Vaipan, vuotoilman ja ilmanvaihdon lämpöhäviöt lasketaan yhteen. Suunnitteluratkaisun kokonaislämpöhäviö täytyy olla yhtä suuri tai pienempi kuin vertailuratkaisun kokonaislämpöhäviö. Passiivitasoiselle rakennukselle ei ole määritelty, kuinka paljon pienempi rakennuksen suunnitteluratkaisun kokonaislämpöhäviö saa olla vertailuratkaisun lämpöhäviöön nähden. Vuoden 2010 lämmöneristysmääräysten mukaisen ja matalaenergiatasoisen rakennuksen välisen eron energiankulutuksessa voidaan ajatella olevan hieman pienempi, kuin matalaenergia- ja passiivitasoisen rakennuksen ero. Matalaenergiatasoiseksi rakennukseksi lasketaan rakennus, jonka suunnitteluratkaisun kokonaislämpöhäviö on enintään 85 % vertailutasosta. Tätä suuruusluokkaa käyttäen tässä työssä käytettävän passiivitasoisen rakennuksen suunnitteluratkaisun kokonaislämpöhäviönä käytetään 60 - 70 % vertailutasosta. Rakennuksen, jossa käytetään työssä tutkittavaa seinärakennetta, suunnitteluratkaisun kokonaislämpöhäviön suhde vertailuratkaisun lämpöhäviöön vaihtelee luonnollisesti kohdekohtaisesti, koska siihen vaikuttaa monta muuta tekijää seinärakenteen lisäksi.

#### 4.2.3 Lämpöhäviöiden tasauslaskenta tutkittavalla rakenteella

Tasauslaskenta tehtiin Ympäristöministeriön internet-sivuilta saatavalla D3 Tasauslaskin 2010 (versio helmikuu 2009) -Excel-taulukkopohjalla. Tasauslaskimeen syötettävät ilmanvaihto-osion arvot laskettiin niin ikään Ympäristöministeriön internet-sivuilta saatavalla D3-2010 LTO-laskin Tasauslaskimeen (versio lokakuu 2009) -Excel-taulukkopohjalla. Tasauslaskelma ja LTO-laskimen taulukot ovat liitteessä 7. Tasauslaskennassa käytettiin soveltaen RET pientaloa (liite 1).

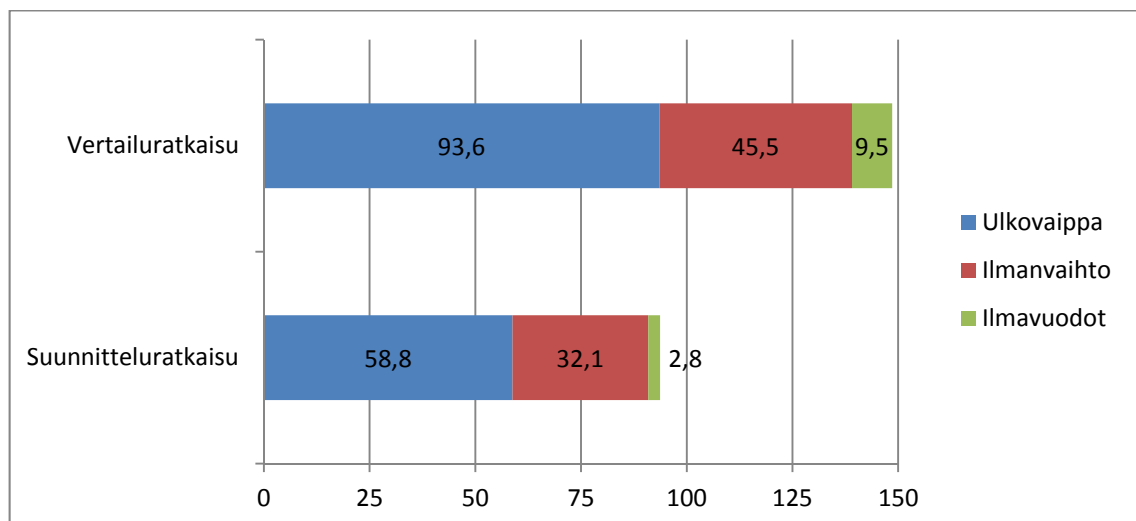
Rakennuksen laajuustiedot otettiin suoraan tyyppipientalon määritelmästä. Eri rakennusosien pinta-alat laskettiin RET pientalo -liitteeseen. Kerroskorkeutena käytettiin rakennuksen keskimääräistä kerroskorkeutta, johon sisältyy välipohja. Tässä tapauksessa kerroskorkeutena käytettiin kolmea metriä. Tasauslaskennan rakennusosien U-arvot otettiin passiivitalon määritelmän viitteellisistä U-arvoista. Seinän U-arvona käytettiin kappaleessa 3.3 seinäelementille laskettua U-arvoa. Ikkunoiden ja ulko-ovien U-arvoina käytettiin 0,80 W/m<sup>2</sup>K, joka edustaa markkinoiden energiatehokkaampaa tarjontaa. Passiivitaso edellyttää energiatehokkaita ikkunoita ja ovia. Ilmanvuotolukuna käytettiin 0,6 l/h (n<sub>50</sub>), joka on passiivitasoisen rakennuksen yläraja. Valitulla ratkaisulla päästään todennäköisesti alhaisempaan ilmanvuotolukuun, mutta tätä ylärajaa käytettäessä saadaan varmalla puolella oleva ominaislämpöhäviö vaipan ilmavuotojen suhteen. Ilman-

vaihdon kautta tapahtuvan ominaislämpöhäviön laskemiseen tarvittavat poisto- ja tuuloilmavirrat sekä käyntiajat saatiin suoraan RET pientalon määritelmästä. Ilmavirrat on esitetty liitteessä 1. Ilmanvaihtokoneen SFS-EN 308:n mukaan määritelty LTO:n tuuloilman lämpötilasuhde yhtä suurilla ilmavirroilla valittiin keskiluokkaa edustava 80 %, koska RET pientalon määritelmässä kyseinen suhdeluku oli 50 %, joka ei täytä edes tämän päivän minimivaatimuksia. Jäätymissuojauksen termostaatin asetusarvona käytettiin RET pientalon määritelmän +5 °C. [15]

Tarkasteltava seinärakenne yhdistettynä soveltaen RET pientalon rakenteisiin täyttää sille annetut tavoitteet myös rakennuksen lämpöhäviöiden tasauslaskennassa. Rakennuksen vertailuratkaisun kokonaisominaislämpöhäviö 149 W/K ja suunnitteluratkaisun 94 W/K, joka on 63 % vertailutasosta. Rakenne alittaa kirkkaasti sille asetetun 70 % ylärajan vertailutasosta. Tämä antaa tasauslaskennan kannalta tilaa valita vähemmän lämpöeristäviä rakennusosia ja heikommalla lämpötilasuhteella varustetun ilmanvaihtokoneen.

#### 4.2.4 Tulokset

Ulkovaipan vertailuratkaisun ominaislämpöhäviö on 93,6 W/K ja suunnitteluratkaisun 58,8 W/K, eli 63 % vertailutasosta. Ilmanvuotojen vertailuratkaisun ominaislämpöhäviö on 9,5 W/K ja suunnitteluratkaisun 2,8 W/K, eli 29 % vertailutasosta. Ilmanvaihdon vertailuratkaisun ominaislämpöhäviö on 45,5 W/K ja suunnitteluratkaisun 32,1 W/K, eli 71 % vertailutasosta. Näin ollen suurin liikkumavara on tasauslaskennan kannalta rakennuksen ulkovaipan tiiviyydessä, joskin sen vaikutus kokonaislämpöhäviöön on pieni. Toisaalta passiivitasoisen rakennuksen ilmanvuotoluku ei saa kuitenkaan ylittää 0,6 l/h ( $n_{50}$ ), jota tasauslaskennassa on käytetty. Vähiten liikkumavaraa on ilmanvaihtokoneen valinnassa. Ominaislämpöhäviöt on esitetty kuvassa 4.6.



**Kuva 4.6.** Suunnitteluratkaisun ja vertailuratkaisun ominaislämpöhäviöt [W/K].

Seinäratkaisun U-arvo täyttää passiivitasoisen rakennuksen viitteellisen  $\sim 0,09$  W/m<sup>2</sup>K vaatimuksen. Lisäksi sen käyttö RET pientalossa mahdollistaa passiiviener-

giatasoisen kokonaisratkaisun lämpöhäviöiden tasauslaskennalla tarkasteltuna, jossa sen kokonaisominaislämpöhäviö on 63 % vertailutasosta. Voidaan siis todeta, että kyseessä on passiivitasoinen seinäratkaisu, jonka käyttö erilaisissa passiivitaloratkaisuissa on joustavaa elementin erinomaisen lämmöneristyskyvyn ansiosta. Muut rakennusosat voidaan valita vapaasti kohdekohtaisesti tarpeiden mukaan, eikä elementti aseta tiukkoja vaatimuksia muiden rakennusosien, tiiviiden tai ilmanvaihdon suhteen.

### 4.3 Tiiviys

Tiiviys kuvaa rakennuksen ulkovaipan ilma- ja vesihöyrytiiviyyttä. Sisä- ja ulkoilman lämpötila- ja paine-erot sekä tuuli aiheuttavat sen, että olosuhde-erot pyrkivät tasaantumaan ulkovaipan läpi. Jos ulkovaippa ei ole ilmatiivis, ilmaa virtaa rakenteeseen kuljettaen mukanaan lämpöä ja kosteutta. Ilman hallitsematon vuoto rakenteisiin aiheuttaa ylimääräisiä lämpöhäviöitä ja pahimmassa tapauksessa kosteusvaurioita. Kun ulkovaippa ei vuoda, asumismukavuus paranee vedon tunteen vähentyessä ja koneellinen ilmanvaihto toimii paremmin sille tarkoitetulla tavalla. Tämä edistää myös asumisen terveellisyyttä, kun painesuhteiden vaihdella sisäilmaan ei pääse hallitsemattomien ilmanvuotojen kautta epäpuhtauksia, kuten homeita ja kuituja.

#### 4.3.1 Ilmatiiviys

Rakenteen ilmatiiviyyttä arvioidaan vaipan ilmanvuotoluvun  $n_{50}$  [1/h] tai  $q_{50}$  [m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>] avulla. Ennen ja osittain vielä tänä päivänä käytetään ilmanvuotolukuna  $n_{50}$ :tä. Se kertoo kuinka monta kertaa rakennuksen ilmatilavuuden verran ilmaa vaihtuu vaipan läpi tunnissa sisä- ja ulkoilman paine-eron ollessa 50 Pa. Paineekoemenetelmä on esitetty standardissa SFS-EN 13829. Esimerkiksi lämpöhäviöiden tasauslaskennassa käytetään  $n_{50}$ -lukua.

Samalla painekokeella määritetään myös uudempi ilmanvuotoluku  $q_{50}$ , joka kertoo rakennuksen vaipan neliön läpi virtaavan ilmavirran kuutioina tunnissa. Tämä tarkoittaa sitä, että ilmavuodon määrä suhteutetaan  $q_{50}$ -luvussa vaipan pinta-alaan, eikä rakennuksen ilmantilavuuteen, kuten vanhassa  $n_{50}$ -luvussa. Suomen rakentamismääräyskokoelmassa annetaan suositus- ja raja-arvoja ilmatiiviydelle. Osassa määräyksissä käytetään  $n_{50}$ -lukua ja osassa  $q_{50}$ -lukua. Riippuen rakennuksen geometriasta,  $q_{50}$ -luku on usein hieman vaativampi, kuin  $n_{50}$ -luku. Lisäksi  $q_{50}$ -luku kuvaa paremmin rakennuksen ulkovaipan todellista ilmatiiviyyttä, koska se on suhteutettu rakennuksen ulkovaipan pinta-alaan.

Tyypillisen hyvän ilmatiiviyden omaavan pientalon  $n_{50}$ -luku on 1 - 3. Matalaenergia ja passiivitasoisessa rakentamisessa pyritään niin pieneen ilmanvuotolukuun kuin mahdollista. Viitteelliseksi ylärajaksi on määritelty 0,6 ( $n_{50}$ ). Käytännössä monissa toteutuneissa passiivitalohankkeissa on päästy reilusti tätä arvoa alemmas. Pienimmät mitatut arvot ovat olleet polyuretaanieristeisellä puutalolla 0,1 1/h ja kivitalolla 0,08 1/h. Näin alhaisilla ilmanvuotoluvuilla mittausmenetelmän ja -laitteiston tarkkuus tulee ottaa

huomioon, koska menetelmä on alun perin tarkoitettu mittaamaan ilmanvuotolukuja asteikolla 1 - 10.

Rakentamismääräyskokoelman osassa D3 (2012) todetaan, että "Kosteusteknisen turvallisuuden, hyvän sisäilmaston ja energiatehokkuuden kannalta tulisi rakennusvai-pan ilmanvuotoluvun  $q_{50}$  olla enintään  $1 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ". Lisäksi rakentamismääräyskokoel- man osassa C3 (2007) sanotaan, että "Sisäilmaston, rakenteiden sekä lämmitys- ja il- manvaihtojärjestelmän toiminnan kannalta rakennuksen ilmanpitävyyden tulisi olla lä- hellä ilmanvuotoluvun arvoa  $n_{50} = 1 \text{ 1/h}$ ". Ilmatiiviydellä on suuri merkitys rakennuksen keskeisien toimintojen kannalta.

Painekoe tullaan todennäköisesti tekemään lähitulevaisuudessa kaikille uusille pien- taloille. Pieni ilmanvuotoluku ei vielä kuitenkaan yksin takaa oikeasti tiivistä rakennet- ta. Rakenteessa voi olla yksittäisiä suuria reikiä, jotka eivät välttämättä tule ilmi muuten ilmatiiviissä rakennuksessa, koska painekoe tehdään koko rakennukselle. Yksittäiset isotkin rakennusvirheet vaikuttavat vähän kokonaisilmavuotoon, vaikka paikallisesti voivat aiheuttaa suuria ongelmia. Siksi painekoe ei saisikaan olla pelkkä ilmanvuotolu- vun määrittämistä varten tehtävä toimenpide, vaan kokonaisuudessa tulee paikantaa vai- pan mahdolliset epäkohdat ja korjata ne.

Painekoe kannattaakin tehdä talvella, jolloin painekokeen yhteydessä voidaan suo- rittaa myös lämpökamerakuvaus mahdollisten suurien vuotokohtien paikallistamiseksi. Painekoe yhdistettynä lämpökamerakuvaukseen onkin oiva työkalu rakentamisen laa- dun tarkastamiseen. Painekokeen ja lämpökamerakuvaksen ajoittaminen kylmään ai- kaan ei kuitenkaan ole aina mahdollista ja siksi laadunvarmistus rakennusvaiheessa on ensiarvoisen tärkeää. On aina halvempaa tehdä kerralla kunnollista jälkeä, kuin korjata virheitä jälkikäteen. Ilmatiiviyys tulee ottaa huomioon erityisesti yksityiskohtia ja raken- nusvaiheita suunniteltaessa.

### 4.3.2 Vesihöyrytiiviyys

Ilmatiiviytensä lisäksi polyuretaani on myös vesihöyrytiivis. Vesihöyrytiiviyys kuvaa rakennekerroksen kykyä estää vesihöyryn pääsy rakennekerrokseen ja sen läpi. Vesi- höyryn pääsy seinärakenteeseen voi esimerkiksi vaurioittaa rakenteita, jos se pääsee tiivistymään vetenä rakenteeseen. Erityisesti passiivitasoisessa rakenteessa veden tiivistyminen, eli kondensoituminen, on vaarallista, koska rakenteen kuivumisaika voi olla pitkä rakenteen läpi virtaavan pienen lämpövirran vuoksi.

Tutkittavassa elementissä tiiviin kerroksen muodostaa 200 mm paksu polyure- taanikerros seinärakenteen ulkopinnassa. Polyuretaanieristelevyjen vesihöyrynlä- päisevyys riippuu käytettävästä polyuretaanilaadusta ja laminaateista. Elementissä käy- tettävän SPU AL 200 eristelevyn, jossa on molemmilla puolilla diffuusiotiivis alumiini- laminaatti, vesihöyrynläpäisevyys on noin  $2,5 \cdot 10^{-13} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$ . Jos 200 mm polyure- taanikerros tehdään kahdesta SPU AL 100 eristelevystä, joissa molemmissa levyissä on molemmilla puolilla diffuusiotiivis alumiinilaminaatti, koko polyuretaanikerroksen ve- sihöyrynläpäisevyys on noin  $0,7 \cdot 10^{-13} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$ . Perinteisesti rakennettaessa höyryn-

sulkukerros tehdään 0,2 mm paksulla höyrynsulkumuovilla (polyeteeni), jonka vesihöyrynläpäisevyys on  $20 \cdot 10^{-13} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$ .

Tutkittavassa rakenteessa käytettävän SPU AL kerroksen vesihöyrynläpäisevyys on noin kahdeksan kertaa pienempi kuin perinteisesti käytetyssä höyrynsulkumuovissa. Lisäksi SPU AL ei menetä merkittävästi tiiviyttään jos sen pintaan tulee yksittäisiä pieniä vaurioita. Siksi sen käyttö höyrynsulkuna onkin turvallisempaa kuin perinteisillä materiaaleilla.

### 4.3.3 Huomioon otettavat seikat suunnittelussa ja rakentamisessa

Ilmatiivyyden kannalta kriittiset paikat polyuretaanin käytettäessä ovat läpivientien ja eristelevyjen saumojen oikeaoppinen tiivistäminen polyuretaanisaumavaahdolla. Polyuretaanieristeiden saumojen vaahdottamiseen ja rakenteisiin tiivistämiseen käytetään yksikomponenttista polyuretaanisaumavaahtoa. SPU AL levyissä on puolipontti, johon saumavaahto vaahdotetaan. Sitten levyt painetaan pontteihinsa kiinni. Läpivientä varten polyuretaanieristekerrokseen leikataan läpivietävää putkea tai muuta kappaletta suurempi aukko, jonka jälkeen putki tiivistetään saumavaahdolla eristeeseen. Vaahdotustyön laadulla on suuri merkitys lopputuloksen ilmatiivyyteen.

Ulkoseinästä pyritään tehdä niin ilma- ja vesihöyrytiivis kuin mahdollista. Siksi vaahdotustöiden tekeminen elementtilinjastolla tehdasolosuhteissa on suotavaa ja työmaalla vaahdottamisen määrä tulee pitää minimissä. Tehtaalla tiivistäminen ja levyjen kiinnittäminen toisiinsa voidaan tehdä myös liimoilla, jolloin liitoksista voidaan saada vielä tasalaatuisempia, tiukempia ja tiiviimpiä. Liiman käyttöä polyuretaanin saumaamisessa tehdasolosuhteissa olisi hyvä tutkia. Koska tällä hetkellä ei ole saatavilla tutkimuksia aiheesta, käytetään saumoissa polyuretaanivaahtoa.

Työmaalla elementtien polyuretaanikerroksen saumat tiivistetään saumavaahdolla. Suurin osa saumoista sijaitsee talon nurkissa, koska kaikki suorat sivut pyritään tekemään yhdestä elementistä. Vaahdottamisen helppouteen on kiinnitettävä huomiota yksityiskohtia suunniteltaessa. Vaahtosaumaa varten on hyvä jättää noin 15 mm vaahdotusvara eristeiden väliin, jotta vaahtopistoolia mahdollaan viemään vaivattomasti saumassa. Saumat vaahdotetaan maksimissaan 100 mm kerrallaan, jolloin 200 mm paksu sauma tulee vaahdottaa vähintään kahdella vaahtokerroksella ja 200 - 300 mm paksu sauma vähintään kolmella vaahtokerroksella, joka voi tulla eteen esimerkiksi 45° viistetyissä nurkasaumoissa. Näin varmistetaan, että mahdollinen vaahdon epätasainen paisuminen ei aiheuta ongelmia ja eikä tiiviys kärsi.

Yhtenäinen 200 mm polyuretaanikerros mahdollistaa alle 0,6 ilmanvuotoluvun ilman karkeitä virheitä saumavaahdon kanssa. Tästä on useita käytännön esimerkkejä, joissa kantavan rungon ulkopuolella on käytetty 100 - 200 mm polyuretaania. Polyuretaanieristeisissä pientaloissa on menty mitatuissa ilmanvuotoluvussa tyypillisesti alle 0,6 l/h.

Polyuretaanieristeitä käytettäessä on ilmatiivistä rakentamista edesauttanut muun muassa levyjen saumojen helppo tiivistäminen saumavaahdolla ja rungon eteen tai taak-



se, asennettavat yhtenäiset eristekerrokset. Seinän eristekerroksen liittyminen muihin rakenteisiin riippuu valituista rakenneratkaisuista. Elementin liitoksia muihin rakennusosiin suunniteltaessa tulee kiinnittää huomiota tiiviiden säilymiseen.

Esimerkiksi sokkelin kohdalla 200 mm eristekerros voi jatkua hieman ohuempana sokkelin kylmällä puolella. Sokkelin ja elementin eristekerrosten sauma vaahdotetaan tiiviiksi saumavaahdolla.

Yläpohjassa seinän yhtenäinen eristekerros voidaan vaahdottaa esimerkiksi SPU Passiivikaton tyyppisellä ratkaisulla suoraan kattoelementin polyuretaanieristeeseen, jolloin polyuretaanikerros kiertäisi koko rakennuksen ulkovaipan ympäri yhtenäisenä alapohjaa lukuun ottamatta. SPU Passiivikatto on niin sanottu sandwich-elementti, jossa eristekerros on kahden puolelleen välissä. Elementin ylä- ja alapinnassa kulkevat rimat tuovat elementtiin jäykkyyttä ja kantavuutta. Rimat tarjoavat myös ylhäällä tuuletusvälin katerakenteille sekä alhaalla asennustilan kattoasennuksille. Passiivikattoelementin osat on kiinnitetty toisiinsa liimaamalla, joten se on kylmäsillaton rakenne.

Koska ilmatiiviyys on rakennuskohtaisesti mitattava ja laskettava asia, johon vaikuttaa muutkin rakenneratkaisut, on vaikeaa arvioida tutkittavan rakenteen ilmatiiviyttä. Lähtökohdat äärimmäisen ilma- ja vesihöyrytiivin rakennukseen tekemiseen ovat kuitenkin hyvät. Yhtenäinen 200 mm polyuretaanikerros erottaa tehokkaasti sisä- ja ulkoilman toisistaan. Tavoitearvoon, eli alle 0,6 l/h, pääsy ei pitäisi olla vaikeaa seinän osalta. Jos ilmanvuotoluku on yli 1 l/h, voidaan rakentamismääräyskokoelmaan perustuen todeta, että kyseessä on riskirakenne, jossa ilmanvaihto ei toimi sille suunnitellulla tavalla, rakennus ei ole energiatehokas ja sisäilma ei ole terveellistä. Vuodot voivat kuitenkin olla muissa rakenteissa, esimerkiksi yläpohjassa, jolloin seinärakenne toimii sille suunnitellulla tavalla. Lähtökohtaisesti voidaan kuitenkin sanoa, että passiivitasoinen talo täytyy olla ehdottoman tiivis ( $\leq 0,6$  l/h), jotta se pystyy täyttämään sille asetetut energiatehokkuusraja-arvot. Rakennekohtaisesti passiivitasoon voidaan päästä heikommallakin ilmanvuotoluvulla, mutta 1 l/h voidaan pitää energiatehokkaan ja toimivan rakennuksen ilmanvuotoluvun ylärajana.

#### 4.4 Akustiikka

Tässä kappaleessa käsitellään seinäelementin ääneneristysominaisuuksia. Rakenteen kyvyllä estää ulkoa tulevan melun pääsy sisälle on suuri vaikutus asumismukavuuteen. Rakentamismääräyskokoelman osassa C1 (1998) on määräyksiä ja ohjeita ääneneristyksessä ja meluntorjunnassa. Pientaloille ei ole määritetty mitään vaatimuksia ääneneristyksen suhteen rakentamismääräyskokoelmassa, mutta asemakaavassa määrätään usein rakennuksille ääneneristävyydelle minimiarvoja.

Ääneneristystä arvioidessa käytetään ilmanääneneristävyyttä R [dB]. Luku kertoo kuinka suuren osan rakenne eristää siihen kohdistuvasta äänitehosta. Kun ilmaääneneristävyys on 10 dB, rakenteen läpi välittyy kymmenesosa rakenteen kohdanneesta äänitehosta, 30 dB yksi tuhannesosa ja 60 dB yksi miljoonasosa. Rakenteelle lasketaan R-arvo taajuuskaistoittain 50 Hz - 5000 Hz, jolloin rakenteen ilmaääneneristävydestä

saadaan kuvaaja, jossa on esitetty ilmaääneneristävyydet kullakin taajuudella. Tästä kuvaajasta määritellään ilmaääneneristysluku  $R_w$  [dB] kolmannesoktaavikaistoittain vertailukäyrämenetelmällä, joka on esitetty standardissa ISO 717-1 [16].

Ilmaääneneristysluvun vertailukäyrä perustuu osittain puheen äänispektriin, joten se kuvaa parhaiten rakenteen ääneneristävyyttä, kun äänilähteenä on puhe. Pientalon ympäristössä yleisin äänilähde on liikennemelu. Rakennuksen sijainnista riippuen äänilähteenä voi olla myös raide- tai lentoliikennemelu. Nämä eri äänilähteet voidaan ottaa huomioon spektripainotustermeillä  $C$  raide- ja lentoliikennemelulle ja  $C_{tr}$  liikennemelulle. Standardissa ISO 717-1 on määritelty äänispektrit, joilla voidaan laskea spektripainotustermit ilmaääneneristävyydestä. Spektripainotustermejä käytetään lisäämällä tarkasteltavan melun painotustermi ilmaääneneristävyyssalvoon  $R_w$ . Näin ollen rakenteen ilmaääneneristyskyky liikennemelua vastaan on  $R_w + C_{tr}$  ja raide- ja lentoliikennemelua vastaan  $R_w + C$ . [16]

Sivutiesiirtymällä tarkoitetaan äänen siirtymistä tilasta toiseen tiloja erottavaa rakennetta sivuavien rakenteiden kautta. Sivutiesiirtymiä ei tässä työssä käsitellä laskennallisesti, koska ne riippuvat muista rakenteista ja liitosratkaisuista. Sivutiesiirtymiä pyritään kuitenkin minimoimaan yksityiskohtia suunniteltaessa. Keskeisiä paikkoja sivutiesiirtymien kannalta ovat väliseinän liittyminen ulkoseinärakenteeseen ja ulkoseinän yläreunan ratkaisu. Jos esimerkiksi kattoristikoiden kuormat kantava orsi sijoitetaan seinäelementin orsia sitovan U-orren päälle, ääneneristyskyky saattaa kärsiä elementin yläosissa ja sivutiesiirtymät kasvaa.

#### 4.4.1 ILPO-ohjelman kuvaus

Rakenteiden ilmaääneneristyskykyä arvioitiin Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy:n kehittämällä ILPO-laskentaohjelmalla. Ohjelmalla mallinnettiin kaksikerroksiset versiot kolmesta parhaasta ratkaisusta. ”Mallinnusohjelma ottaa huomioon rakenteen rakennekerrosten materiaaliominaisuudet ja paksuudet, rakennekerrosten välissä olevien ilmapääläien paksuudet, tyhjän ja absorbtiomateriaalilla täytetyn ilmapäälän ominaisuudet sekä rakennekerrosten väliset kytkennät”. ”Yksinkertaistetussa muodossa tärkeimmät rakenteiden ilmaääneneristävyyteen liittyvät laskentamenetelmät on esitetty myös lähteessä [17]”.

ILPO-laskentaohjelman tarkkuutta on arvioitu vertaamalla sillä saatuja tuloksia vastaavien rakenteiden mitattuihin arvoihin. Laskentatarkkuustarkastelussa käytettiin kahdenkymmentä toisistaan poikkeavaa rakennetta. Poikkeama lasketun ja mitatun arvon välillä oli yleensä enintään  $\pm 1$  dB. Yksittäisillä rakenteilla poikkeama oli alle  $\pm 5$  dB. Suurempia poikkeamia esiintyi lähinnä hyvin pienillä ja suurilla taajuuksilla. Näitä poikkeamia selittää mittaamiseen liittyvä epävarmuus, joka kasvaa mitattaessa hyvin pieniä ja suuria taajuuksia. Ohjelmalla laskettujen ilmaääneneristyslukujen korrelaatiokerroin oli 0,97, keskiarvo poikkeamasta  $-0,3$  dB ja keskihajonta  $1,6$  dB. Ohjelman tarkkuus ilmaääneneristysluvulle on suurella todennäköisyydellä  $\pm 2$  dB. [18]

#### 4.4.2 Rakenteen ilmaääneneristävyyteen vaikuttavat tekijät

Ulkoseinärakenteessa ääntä eristävänä osana toimii pääasiallisesti kantava osa, jossa mineraalivilla ja kantava teräsrunko ovat kahden kipsilevyn välissä. Myös polyuretaanikerros, joka toimii pääasiallisena lämmöneristeenä, tuo rakenteelle massaa ja osaltaan parantaa seinärakenteen ilmaääneneristävyyttä. Kantava osa on akustisen toimintansa kannalta kaksinkertainen rakenne, jossa kahden rakenneosan, eli tässä tapauksessa kipsilevyjen, välissä on absorptiomateriaalina mineraalivilla. Kipsilevyt ja mineraalivilla muodostavat massa-jousi-massajärjestelmän, jossa mineraalivilla toimii jousena.

Rakenteen ilmaääneneristävyys riippuu kipsilevyjen massoista sekä niiden etäisyydestä toisiinsa nähden. Lisäksi ilmaääneneristävyyteen vaikuttaa käytettävän teräsorren dynaaminen jäykkyys, joka kuvaa materiaalin jäykkyyttä ja vaikuttaa rakenteen resonanssitaajuuteen. Rakenteen ilmaääneneristävyys kasvaa nopeasti rakenteet resonanssitaajuuttaan korkeammilla taajuuksilla. Mitä pienempi dynaaminen jäykkyys on, sitä alhaisempi on myös resonanssitaajuus ja ilmaääneneristysluku. Teräsorren dynaaminen jäykkyys on pienempi kuin puun dynaaminen jäykkyys ja siksi se heikentää huomattavasti vähemmän rakenteen ilmaääneneristävyyttä. Orren termorei'itys parantaa entisestään orren dynaamista jäykkyyttä. ILPO:lla lasketuissa malleissa käytettiin vakioko-koisien teräsorsien mitatuista dynaamisista jäykkyyksistä approksimoituja dynaamisia jäykkyyksiä. Myös ylhäällä ja alhaalla käytettävien U-orsien jäykkyys vaikuttaa ilmaääneneristävyyteen. Mitä enemmän U-orssi sallii kimmoisia liikkeitä, sitä vähemmän pysytorret heikentävät ilmaääneneristävyyttä lähellä ylä- ja alareunaa.

Seinän ilmaääneneristävyyttä voidaan parantaa kasvattamalla seinän massaa lisäämällä ylimääräisiä kipsilevykerroksia. Pientä parannusta voidaan saavuttaa myös mitoittamalla ylä- ja alorret kimmoisiksi. Mineraalivillana tulee käyttää pehmeää mineraalivillaa, koska kova mineraalivilla voi kytkeä ulomman ja sisemmän kipsilevyn toisiinsa, jolloin seinän ilmaääneneristävyys heikkenee merkittävästi. Muulla mineraalivillan ominaisuudella ei ole merkitystä ilmaääneneristävyyden kannalta.

#### 4.4.3 Rakenteiden ilmanääneneristävyys

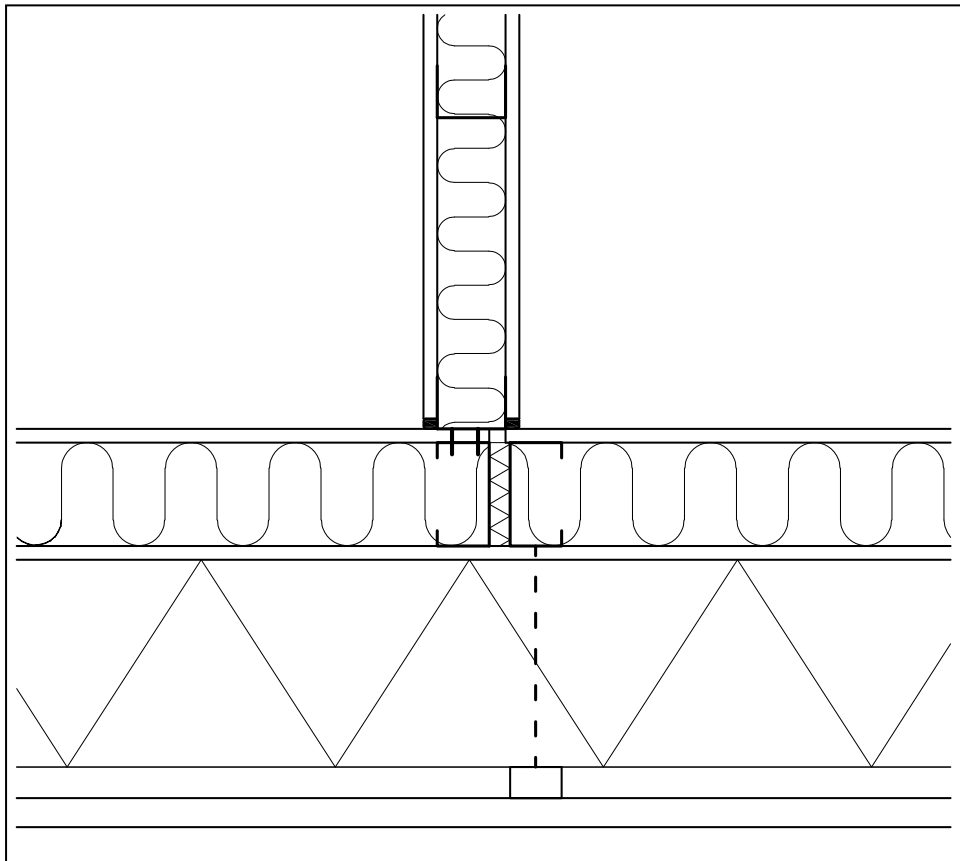
Tyypillisesti puurunkoisen pientalon seinän ilmaääneneristysluku  $R_w + C_{tr}$  on noin 39dB ja  $R_w + C$  noin 42dB. Asemakaavan minimiarvot ääneneristävyydelle riippuvat alueen melukuormasta ja voivat vaihdella paljon paikkakunnittain. Kaavamääräyksissä tyypillisesti liikennemelualueilla ulko- ja sisämelutasojen erotus on 35 dBA luokkaa. Lento- ja raidemelualueilla on usein asetettu tiukempia vaatimuksia rakenteiden ääneneristävyydelle. Tutkittavan rakenteen ilmaääneneristävyyttä käsittelevä osa Insinööri Heikki Helimäki Oy:n raportista on liitteenä 8. Kaksikerroksisten rakennetarkaisuiden ilmaääneneristysluvat tutkittavilla rakenteilla olivat seuraavat:

- |                      |                      |                      |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| • C-orssi (termo)    | • $\Omega$ -orssi    | • Z-orssi            |
| ○ $R_w$ 51 dB        | ○ $R_w$ 42 dB        | ○ $R_w$ 43 dB        |
| ○ $R_w+C$ 50 dB      | ○ $R_w+C$ 41 dB      | ○ $R_w+C$ 42 dB      |
| ○ $R_w+C_{tr}$ 46 dB | ○ $R_w+C_{tr}$ 38 dB | ○ $R_w+C_{tr}$ 38 dB |

C-orrella toteutetun ratkaisun ilmaääneneristävyys on selvästi parempi keskimääräisen pientalon ilmaääneneristävyyteen verrattuna.  $\Omega$ - ja Z-orsilla toteutetut ratkaisut edustavat pientalojen keskimääräistä ilmaääneneristävyyttä. Rakenteiden ilmaääneneristävyyttä voidaan parantaa lisäämällä kipsilevykerroksia kantavan osan ulko- tai sisäpintaan. Toisen kipsi-villa-kipsi-kerroksen lisääminen muuttaa seinärakenteen akustisen toiminnan kannalta kolminkertaiseksi, jolloin seinän ilmaääneneristävyys laskee keskeisillä taajuuskaistoilla. Siksi kipsilevykerrosten lisääminen on ainoa järkevä tapa parantaa seinän ilmaääneneristävyyttä. Yksi 13 mm lisäkipsilevykerros parantaa yleisesti rakenteen ilmaääneneristävyyttä noin +5 dB. Tarpeen tullen melualueilla voidaan käyttää tätä menetelmää parantamaan seinärakenteen ilmaääneneristävyyttä. Jos melu on normaalilla tasolla, ei erillisiä toimenpiteitä tarvita.

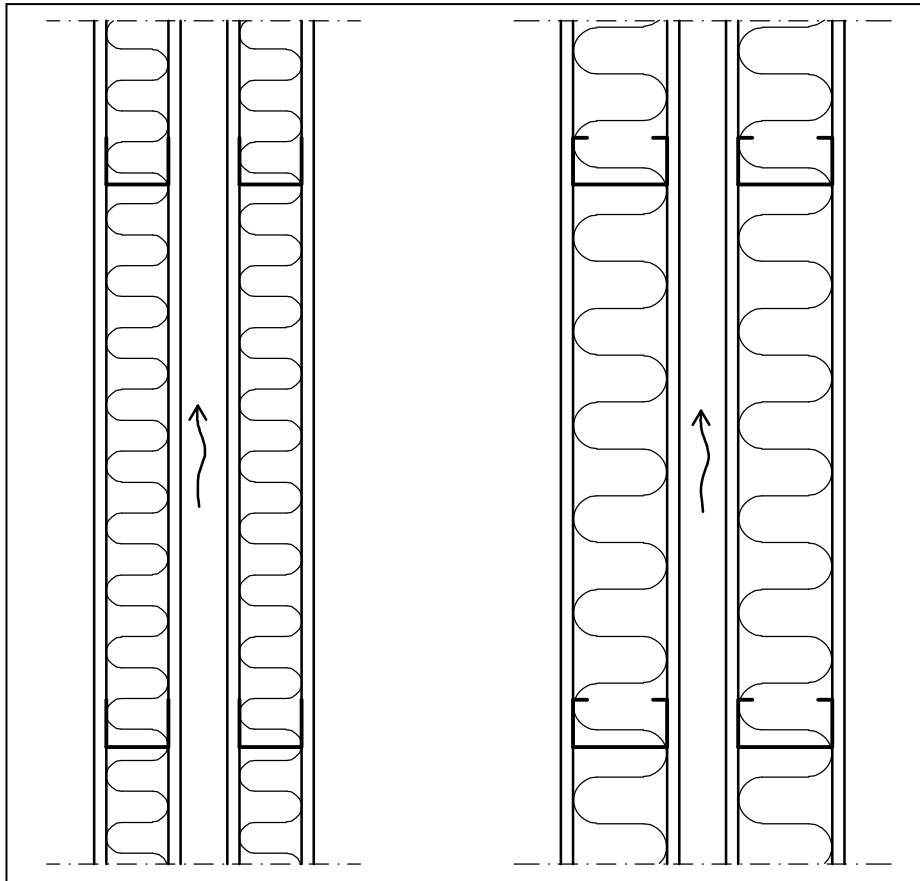
#### 4.4.4 Väliseinät

Keveyen tai kantavan väliseinän ja ulkoseinän liitos voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Liitoksessa tulisi kuitenkin pyrkiä mahdollisimman pieniin sivutiesiirtymiin. Kaikista yksinkertaisimmillaan liitos voidaan tehdä kiinnittämällä väliseinän U-orsi ruuvilla ulkoseinän kipsilevyn läpi pystyorteen. Ulkoseinään voidaan tarvittaessa lisätä ylimääräisiä runkotolppia väliseinien kohdille. Ongelmana tässä yksinkertaisessa ratkaisussa on kuitenkin sivutiesiirtymät. Ääni välittyy huoneesta toiseen yhtenäisen sisäkipsilevyn välityksellä.



*Kuva 4.7. Väliseinän liitos ulkoseinään. [16]*

Paremmen lopputuloksen aikaansaamiseksi kipsilevy täytyy katkaista väliseinän kohdalla. Kuvassa 4.7 on esitetty tällainen liitosratkaisu. Ulkoseinässä on kaksi C-ortta vastakkain. Orsien välissä on sullottua mineraalivillaa tai elastinen kaistamateriaali. Kevyen väliseinän U-orsi on kiinnitetty ruuviliitoksella ylimääräiseen C-ortteen. Kipsilevy on katkaistu ulkoseinän C-orsien välistä. Näin saadaan aikaiseksi liitos, jonka kautta välittyvä melu on huomattavasti vähäisempää yksinkertaisempaan liitokseen verrattuna. Tämä liitostapa on kuitenkin hieman työlämpi toteuttaa.



**Kuva 4.8.** Rivitalon asuntojen välinen seinä. Vasemmalla kevyt väliseinä ja oikealla kantava väliseinä.

Rivitalokohteissa pyritään mahdollisimman hyvään ilmaääneneristävyyteen asuntojen välisissä väliseinissä. Yksi ratkaisu toteuttaa asuntojen välinen väliseinä on käyttää kahta erillistä väliseinäelementtiä tai ulkoseinäelementin kantavaa osaa. Seinä voidaan toteuttaa joko kantavana tai kevyenä väliseinä ja orsivalinta tehdään sen mukaisesti. Seinäelementtien väliin jätetään ilmväli, kuten kuvassa 4.8 on esitetty.

## 4.5 Kosteustekninen toimivuus

Rakenteiden kosteustekninen toimivuus ja rakennusaikainen kosteuden hallinta on ollut jo jonkin aikaa yleisen keskustelun aiheena. Laiminlyönnit suunnittelussa ja työmaato-

teutuksessa sekä kosteustekniseen toimivuuteen vaikuttavien tekijöiden tunnistaminen ja hallinta eivät aina rakennusalan kaikilla toimijoilla ole ollut hallussa. Rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen liittyy myös, ehkä eniten kaikista rakennusfysikaalisista ilmiöistä, kansanuskomuksia ja virheellisiä käsityksiä, jotka ovat syvällä niin osassa rakennusalan tekijöissä kuin sen asiakkaissakin. Tässä kappaleessa käsitellään elementin kosteusteknistä toimivuutta ja rakentamisen kosteudenhallintaa, työmaatekniikkaa käsitellään aiheeseen liittyen kappaleessa 5.10.

Rakenteen kosteusteknisen toimivuuden tärkeys korostuu entisestään lämmöneristyskyvyn parantuessa, koska silloin rakenteen uloimmat kerrokset ovat kylmempiä vähäisen ulos virtaavan lämmön vuoksi. Jos tällaisessa rakenteessa virtaa myös kosteutta sisältä ulospäin, voi se kriittisissä olosuhteissa kondensoitua rakenteeseen.

Rakentamismääräyskokoelman osassa C2 (1998) on määräykset ja ohjeet koskien kosteusvaurioiden syntymisen välttämistä rakentamisessa. Näitä vaurioita voidaan välttää estämällä sisäilman vesihöyryn haitallinen konvektio vaipan riittävällä tiiviydellä. Tällöin syntyvät edellytykset pitää rakennus pääsääntöisesti alipaineisena. Rakennuksen ulkopinnan ja sen yksityiskohtien tulee estää veden ja lumen haitallinen tunkeutuminen rakenteisiin myös tuulen vaikutuksesta. Ulkoseinärakenteiden ja siihen liittyvien rakenteiden vesihöyrynvastus ja ilmatiiviys täytyy olla sellaiset, että seinän kosteuspitoisuus sisäilman vesihöyryn diffuusion tai konvektion vuoksi ei muodostu haitalliseksi. Rakennuskosteuden ja rakenteeseen satunnaisesti tunkeutuvan kosteuden on voitava poistua vahinkoa tai terveystriskiä aiheuttamatta. Avohuokoisen lämmöneristeen lämpimällä puolella täytyy olla höyrynsulku tai rakennekerros, jonka vesihöyrynvastus on viisinkertainen verrattuna kylmällä puolella olevaan rakennekerrokseen. Tästä voidaan poiketa mikäli kokemukseen perustuen tai tutkimuksin on osoitettu, että rakenne on kosteusteknisesti toimintavarma. [19]

Tarkasteltavassa rakenteessa polyuretaani muodostaa tiiviin ja yhtenäisen höyrynsulkukerroksen kantavan villaeristeen osan kylmälle puolelle. Höyrynsulku on nyt avohuokoisen eristeen kylmällä puolella ja sen vuoksi tämän rakenteen kosteustekninen toimintavarmuus täytyy erikseen osoittaa.

#### **4.5.1 DOF-Lämpö-ohjelman yleiset toimintaperiaatteet**

Rakenteen kosteusteknistä toimivuutta tutkittiin D.O.F. tech Oy:n DOF-Lämpö ohjelmalla. DOF-Lämmöllä voidaan analysoida kerroksellisten rakenteiden lämpö- ja kosteuskäyttäytymistä. Sen U-arvolaskenta perustuu yläraja/alaraja tarkasteluun ja siksi se ei sovellu U-arvon laskentaa rakenteissa, joissa on suhteellisen pieniä, suuren lämmönjohdavuuden omaavia, osia, kuten teräsorsia.

Sen sijaan rakenteen kosteustekniseen tarkasteluun se soveltuu, koska rakenteen kosteusteknisen toimivuuden kannalta kriittisin piste on rankojen välissä polyuretaanin ja ulomman kipsilevyn rajapinnassa. Teräsorret johtavat sisältä lämpöenergiaa villan sisään ja ansaisiin, jolloin orsien kohdalla ja niiden välittömässä läheisyydessä on hie-man lämpimämpää kuin muualla rakenteessa samalla syvyydellä. Koska orren lähellä on lämpimämpää, kondenssin riski on pienempi verrattuna kylmempiin alueisiin. Siksi

rakennetta analysoidessa käytetään seinän leikkausta rankojen välistä mahdollisimman kaukana teräsosista.

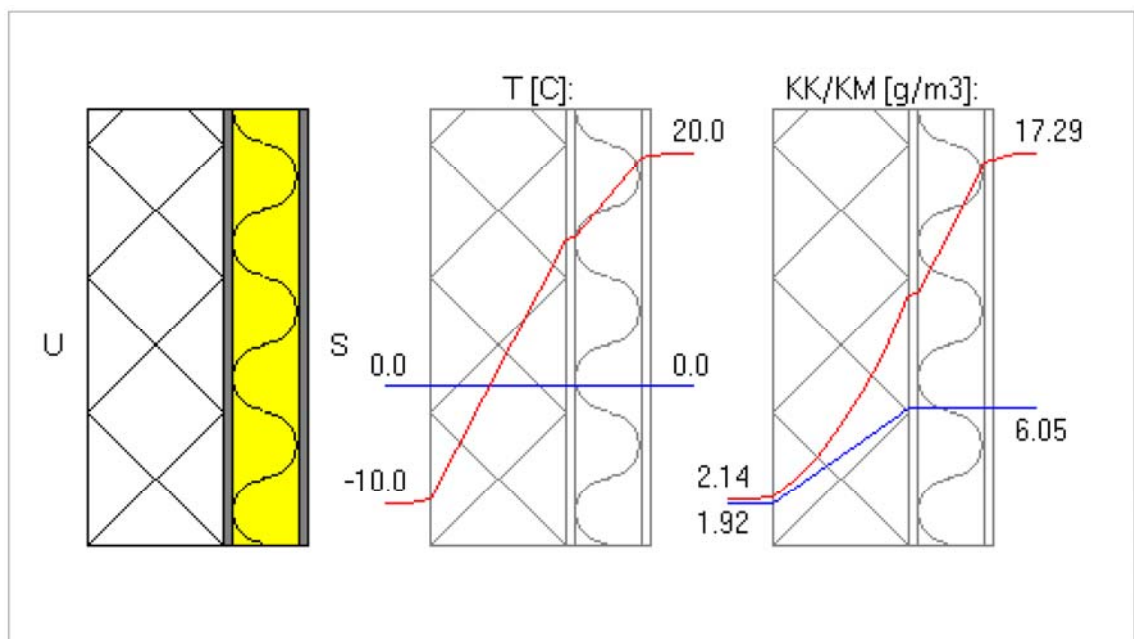
**Taulukko 4.1.** *DOF-Lämmössä käytetyt olosuhdetiedot ja materiaaliominaisuudet.*

Lämpö- ja kosteusolosuhteet			Materiaaliominaisuudet			
Olosuhde	Sisällä	Ulkona	Materiaali	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Vesihöyrynläpäisevyys [kg/m <sup>2</sup> sPa]	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
Lämpötila [°C]	20	-10	Polyuretaani	0,023	$2,4 \cdot 10^{-13}$	30
RH [%]	35	90	Mineraalivilla	0,037	$1 \cdot 10^{-9}$	47
Kosteuslisä [g/m <sup>3</sup> ]	~4	-	Kipsilevy	0,24	$2 \cdot 10^{-9}$	730

DOF-Lämpö arvioi kondensaation määrän esistandardi pr EN ISO 13788 mukaan. Rakennetta analysoidessa käytettiin taulukon 4.1 mukaisia olosuhteita ja materiaaliarvoja. Käytettävät arvot edustavat keskimääräisiä talviolosuhteita, joita käytetään vuoden kylmimpien olosuhteiden sijaan, koska DOF-Lämpö laskee mallin stationääritilassa eikä ota huomioon olosuhteiden vaihtelua. Kosteuslisä on otettu ISO EN 13788 standardista rakennusluokka kolmen mukaan. Suhteelliset ilmankosteudet ja ulko- sekä sisälämpötila on otettu Juha Vinhan väitöskirjassa käytetystä talven keskimääräisestä olosuhdearvoista.

#### 4.5.2 DOF-Lämpö-ohjelman käyttö työssä

Kuvassa 4.9 on rakenneleikkauksen DOF-Lämmöllä laskettu lämpö- ja kosteuskäyrät. Kuten 4.9 kuvasta näkee, ulomman kipsilevyn ja polyuretaanikerroksen väliin ei synny kastepistettä tarkasteltavilla olosuhteilla.



**Kuva 4.9.** *DOF-Lämmöllä laskettu kosteustekninen analyysi valitusta leikkauksesta taulukon 4.1 arvoilla.*

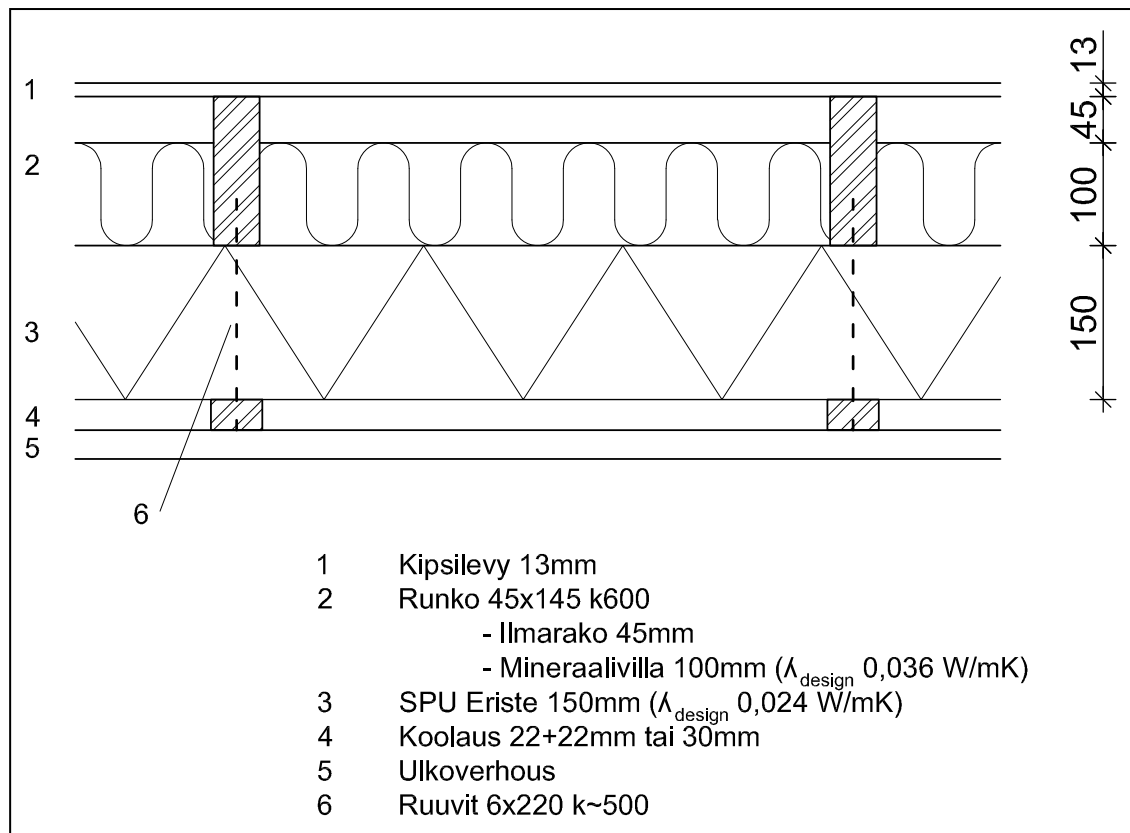
Ulomman kipsilevyn ja polyuretaanin välissä kyllästymiskosteus on  $11,00 \text{ g/m}^3$ . Kosteusmäärä samassa pisteessä on vain  $6,05 \text{ g/m}^3$ , eli kondensoitumista ei tapahdu. Kondensoitumista ei tapahdu silloinkaan, kun ulkolämpötila lasketaan  $-35 \text{ °C}$  ja sisäilman kosteuslisä nostetaan  $5 \text{ g/m}^3$ . Tällöin kyllästymiskosteus ja kosteusmäärän erotus ulomman kipsilevyn ja polyuretaanin rajapinnassa on  $2,2 \text{ g/m}^3$ .

Käytettäessä taulukko 4.1:n arvoja ja mineraalivillan tilalla parempaa, lämmönjohdavuudeltaan  $0,033 \text{ W/mK}$ , mineraalivillaa, ei kondensoitumista DOF-Lämmön mukaan tapahdu. Näillä arvoilla kyllästymiskosteus ja kosteusmäärän erotus kipsilevyn ja polyuretaanin rajapinnassa on  $4,54 \text{ g/m}^3$ .

Jos hetkellistä kondenssia kuitenkin tapahtuu kriittisissä olosuhteissa, pääsee rakenteeseen kondensoitunut kosteus kuivumaan sisälle päin, kun olosuhteet normalisoituvat. Tätä edesauttaa tiivis ja hyvin lämpöä eristävä polyuretaanikerros, jonka ansiosta mineraalivilla pysyy kylmälläkin säällä suhteellisen lämpimänä. Tällaiset kriittiset olosuhteet ovat kuitenkin harvinaisia. DOF-Lämmön tulosraportti on liitteenä 9.

### 4.5.3 Tutkimuksia höyrynsulun sijainnista Suomen ilmastossa

Polyuretaanilla ja mineraalivillalla eristetyn ratkaisun, jossa mineraalivilla on polyuretaanin lämpimällä puolella, kosteusteknistä toimivuutta on tutkittu VTT:llä. Tutkittava rakenne oli kuva 4.10 mukainen.



**Kuva 4.10.** VTT:llä tutkittu rakenne.



Rakennetta tutkittiin lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden simulointiin tarkoitettulla WUFI 4.2 Pro ohjelmalla (HAM). Ohjelmalla voidaan ratkaista 1-ulotteisen rakenneleikkauksen kosteustekninen toimivuus tunneittain muuttuvissa ulko- ja sisäilmaolosuhteissa. Rakennetta tarkasteltiin kolmen vuoden ajan jakson ajan alumiinilaminoidulla ja paperipintaisella SPU Eristeellä. "Koko tarkastelujakson ajan molempien rakenteiden kokonaiskosteus oli vuositasolla laskeva, ts. rakenne kuivui kaiken aikaa. Suhteellisen kosteuden tasot kriittisessä rajapinnassa olivat laskevia ja alun jälkeen alle 80 % RH tasolla. Tulosten perusteella rakenteet ovat kosteusteknisesti toimivia ja turvallisia." Rakenteen toimivuus perustuu SPU Eristeen hyvään lämmöneristyskykyyn ja diffuusin kosteudensiirron vastukseen, mistä johtuen mineraalivillan ja SPU Eristeen rajapinta pysyy tarpeeksi lämpimänä, ettei kondenssia tapahdu. [20]

Tämän VTT:n tutkimuksen pohjalta voidaan päätellä, että SPU Eristeen lämpimälle puolelle voidaan sijoittaa mineraalivillaa siinä määrin, että mineraalivillan lämmöneristyskyky on  $1/2,25$  (~0,44) kertainen SPU Eristekerroksen lämmöneristyskykyyn nähden. Tähän suhdelukuun perustuen käytettäessä SPU AL (0,023 W/mK) ja mineraalivillaa (0,037 W/mK) voidaan SPU AL eristekerroksen lämpimälle puolelle sijoittaa enintään 143 mm mineraalivillaa, jonka lämmöneristyskyky edustaa noin vajaata yhtä kolmasosaa 200 mm polyuretaanikerroksen lämmöneristyskyvystä.

Tässä VTT:n tutkimuksessa tutkittiin vain yhtä rakennetta. Tutkimuksessa oli käytettävissä vain simulaatiosta saatu data, eikä rakenteen toimivuudesta ole käytettävissä tutkimustietoa laboratorio- tai kenttäolosuhteissa. Siksi tätä tutkimusta ei voi mielestäni soveltaa yleisesti kaikkiin rakenteisiin. Kaikki kolme tutkittavaa rakennetta kuitenkin täyttivät tämän vaateen.

Juha Vinha on tutkinut väitöskirjassaan puurunkoisen seinärakenteen kosteusteknistä toimivuutta Suomen ilmasto-olosuhteissa. Väitöskirjassa esiteltiin rakenteen kosteus- ja lämpötekniistä toimivuutta simuloiva malli, jolla simuloitiin erilaisia rakenteita. Samanlaisien rakenteiden lämpö- ja kosteusolosuhdevaihteluita mitattiin kenttä- ja laboratorio-olosuhteissa ja vertailtiin niitä simuloinnilla saatuihin tuloksiin. Mallia hienosäädettiin edelleen mittausdatan avulla, jonka jälkeen mallilla arvioitiin erilaisien rakenteiden kosteus- ja lämpökäyttäytymistä.

Osana tutkimusta oli höyrinsulun sijainti seinärakenteessa. Vinha väitöskirjan mukaan hyvänä nyrkkisääntönä voidaan pitää, että vähintään  $\frac{3}{4}$  lämmöneristeistä on höyrinsulun kylmällä puolella. Vinha toteaa myös, että tähän suhdelukuun on päätyntä Nielsenin (1995) omassa tutkimuksessaan [21]. [5]

VTT:n tutkimukseen verrattuna tätä suhdelukua voidaan pitää yleisesti luotettavana, koska sen määrittelyssä on käsitelty aihetta laajemmin ja tutkimuksessa on käytetty pelkän HAM mallinnuksen lisäksi laboratorio- ja kenttätestejä. Vinhan väitöskirjan mukaan käytettäessä SPU AL (0,023 W/mK) ja mineraalivillaa (0,037 W/mK), 200 mm SPU AL eristekerroksen lämpimälle puolelle voidaan sijoittaa enintään 107 mm mineraalivillaa. Elementti täyttää tämän vaatimuksen 100 mm mineraalivillaeristekerroksellaan. Tämä 107 mm on 36 mm vähemmän kuin VTT:n tutkimuksen saatu enimmäispak-

suus, joten Vinhan väitöskirjan suhdeluku on VTT:n tutkimusta varmemmalla puolella. Tutkittavaa ratkaisua voidaan siis pitää höyrynsulun sijainnin osalta toimivana.

#### 4.5.4 Passiivirakentamisen haasteet

Passiivirakentamisen haasteita rakenteiden rakennusfysikaaliselle toiminnalle on tutkittu FRAME projektissa. Projekti on parhaillaan käynnissä ja sen etenemisestä on pidetty kaksi yleisöseminaaria, mutta varsinaisia raportoituja tuloksia ei ole vielä julkaistu. Jäljellä on vielä kaksi yleisöseminaaria. FRAME projektin pääasiallisena tavoitteena on selvittää vaipparakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa Suomen ilmastossa ottamalla huomioon ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäämisen vaikutukset.

FRAME projektin toisessa yleisöseminaarissa ilmi tulleita passiivirakentamisen haasteita olivat muun muassa pidemmät kuivumisajat lämmöneristekerrokset vesihöyrynvastuksen kasvamisen ja ilmastomuutoksen takia, rankemmat viistosadekuormat julkisivulle, veden kondensoitumisriski ulko-osien viilentyessä, kesälämpötilojen myötä kosteusvirran kääntyminen sisäänpäin aiheuttaen kosteuden tiivistymistä rakenteen sisäosiin sekä sisäisen konvektion kasvu avohuokoisen eristekerroksen paksuuden kasvaessa, joka heikentää rakenteen kosteusteknistä toimivuutta sekä lämmöneristyskykyä. Tutkittavalla rakenteella näitä ongelmia ei rankemman sääkuorman lisäksi esiinny.

Erityisesti kesälämpötiloissa tapahtuva kosteusvirran kääntyminen sisäänpäin, saattaa aiheuttaa ongelmia avohuokoisilla eristeillä eristetyissä rakenteissa, kun vesihöyry törmää höyrynsulkumuoviin rakenteen sisäpinnassa ja kondensoituu vetenä rakenteeseen. Tutkittavalla rakenteella ei tätä ongelmaa ole, koska sen ulkopuolella on äärimmäisen vesihöyrytiivis polyuretaanikerros, joka toimii kesähelteellä höyrynsulkuna mineraalivilla lämpimällä puolella.

Suojaava ja lämpöä eristävä polyuretaanikerros on rakenteen ulkopinnassa, jossa säärasitusten on arveltu tulevaisuudessa kasvavan. Kosteudelle herkät materiaalit, kuten kipsilevyt ja mineraalivilla, ovat polyuretaanikerroksen sisäpuolella suojassa ulkoilmalta. Tämä edesauttaa elementin toimimista myös tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa.

Kuten edellä on esitetty, tarkasteltavalla rakenteella on hyvät edellytykset toimia kosteusteknisesti hyvin. Rakenteen käyttöikä voidaan arvioida varsin pitkäksi, koska rakenteen säätä kestävät komponentit ovat ulkoilmaa vasten sekä rakenteessa ei tapahdu sisäilmankosteuden haitallista tiivistymistä polyuretaanin ja ulomman kipsin rajapintaan. Kesähelteillä kosteusvirran päinvastainen suunta ei aiheuta ongelmia, koska höyrynsulkukerros on rakenteen ulkopinnassa. Rakenteen pitkä käyttöikä parantaa myös rakenteen ekologisuutta.

## 4.6 Palo-ominaisuudet

Rakentamismääräyskokoelmassa luokitellaan rakennukset paloluokkiin P1, P2 ja P3, jotka kuvaavat rakennuksen yleistä palonkestokykyä P1:n ollessa vaativin luokka. Rakennuksen paloluokan mukaan määräytyy siinä käytettäviin rakennusosiin kohdistuvat vaatimukset palonkestokyvyn osalta, joita ovat kantavuus R, tiiviys E ja eristävyys I.

Näille vaatimuksille annetaan aikaraja, jonka rakennusosan täytyy kestää. Esimerkiksi REI 60 tarkoittaa rakennusosaa, jonka täytyy säilyttää kantavuus, tiiviys ja eristävyys palon sattuessa 60 minuuttia. Lisäksi pintamateriaaleille ja osastoivien rakennusosien materiaaleille voidaan antaa lisävaatimuksia. Materiaalit on luokiteltu niiden palokäyt-  
täytymisen mukaan taulukon 4.2 mukaisiin luokkiin.

**Taulukko 4.2. Rakennusmateriaalien paloluokat**

A1	Tarvikkeet, jotka eivät osallistu lainkaan paloon.
A2	Tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on erittäin rajoitettu.
B	Tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on hyvin rajoitettu.
C	Tarvikkeet, jotka osallistuvat paloon rajoitetusti.
D	Tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on hyväksyttävissä.
E	Tarvikkeet, joiden käyttäytyminen palossa on hyväksyttävissä.
F	Tarvikkeet, koiden käyttäytymistä ei ole määritetty.
s1	Savuntuotto on erittäin vähäistä.
s2	Savuntuotto on vähäistä.
s3	Savuntuotto ei täytä s1 eikä s2 vaatimuksia.
d0	Palavia pisaroita tai osia ei esiinny.
d1	Palavat pisarat tai osat sammuvat nopeasti.
d2	Palavien pisaroiden tai osien tuotto ei täytä d0 eikä d1 vaatimuksia.

Esimerkiksi B-s2, d0 tarkoittaa materiaalia, jonka osallistuminen paloon on hyvin rajoitettua, savuntuotto vähäistä ja palavia pisaroita tai osia ei esiinny. Elementissä käytettävän SPU AL eristelevyn paloluokka on E-s2, d0, kipsilevyn A2-s1, d0 ja mineraalivillan A1 tai A2-s1, d0.

#### 4.6.1 Palomääräykset ja tutkittava rakenne

Tarkasteltava pientalo kuuluu paloluokkaan P3, kuten lähes kaikki pientalot. P3 luokan rakennusosille ei rakentamismääräyskokoelmassa ole asetettu mitään vaatimuksia talon ja autokatoksen välistä seinää lukuun ottamatta, kun autokatos on enintään 4 metrin päässä asuinrakennusta. Myös naapuritontin rakennukset täytyy ottaa huomioon palo-  
vaatimuksia tarkasteltaessa. Rakentamismääräyskokoelman osassa E4 (2005), joka käsittelee autosuojien paloturvallisuutta, todetaan; "Jos P3-luokan rakennuksen kokonaiskerrosala on enintään 2400 m<sup>2</sup> ja osaston koko enintään 400 m<sup>2</sup>, voivat maanpäälliset osastoivat rakennusosat olla EI 30 -luokkaa." "P3-luokkaiseksi voidaan rakentaa yksi-kerroksinen autosuojarakennus." "P3-luokan erillisessä autosuojarakennuksessa, joka on kerrosalaltaan enintään 1000 m<sup>2</sup>, sisäpuoliset seinä- ja kattopinnat voivat olla luokkaa D-s2, d2." Näin ollen autokatoksen ja asuinrakennuksen välisen seinän täytyy pysyä tiiviinä ja eristävä palon sattuessa 30 minuuttia. Lisäksi seinärakenteen autosuojan puo-

leisen pintamateriaalin täytyy olla vähintään luokkaa D-s2, d2. Tuuletusvälin sisäpuoleiselle materiaalille ei ole paloluokkavaatimuksia.

Valitulla rakenneratkaisulla ensimmäisenä autokatosta vasten on julkisivuverhousmateriaali, sitten tuuletusväli ja 200 mm polyuretaania sekä kipsi-villa-kipsi kantava osa. Alumiinilaminoidun SPU AL eristeen paloluokka on E-s2, d0 ja ulkoverhouksena käytettävän puun paloluokka on vähintään D-s2, d2, joten elementin ulkoverhouksen pintaluokka on kunnossa. Tarvittaessa autokatoksen ja asuinrakennuksen välissä olevan seinän SPU AL eristeen paloluokkaa voidaan parantaa luokkaan C-s2, d0 käyttämällä SPU AL eristeessä paksumpaa (50 µm) diffuusiotiivistä alumiinilaminaattia. Palotilanteissa polyuretaani huonosti palavana rakennustarvikkeena hidastaa paloa.

Yleisesti teräsrunkoisella väliseinärakenteella, jossa on 66 mm mineraalivillaa ja molemmin puolin 13 mm kipsilevyt, saavutetaan EI 30 -luokka. Tästä löytyy tyyppiratkaisut usean mineraalivilla- ja kipsilevyvalmistajan rakennekirjastosta, joten voidaan olettaa, että tarkasteltavassa rakenteessa 100 mm mineraalivillaa 13 mm paksujen kipsilevyjen välissä täyttää helposti EI 30-luokan. Lisäksi paloa hidastamassa on 200 mm polyuretaania. Näin ollen autosuoja ei aiheuta toimenpiteitä ulkoseinän suhteen P3-luokan rakennuksessa.

#### **4.6.2 P1- ja P2-luokan rakenteet**

Rakennetta voidaan käyttää myös soveltaen P2- ja P1-luokan rakennuksissa ja palonkestoa sekä pintaluokkaa voidaan parantaa monin eri tavoin.

Yksi vaihtoehto on käyttää palokipsilevyjä tarpeen mukaan elementin ulko- tai sisäpinnassa. Kipsilevyjen käytöstä paloa osastoivana materiaalina löytyy paljon käyttökokemuksia ja se on tuttu materiaali. Hyviä puolia kipsilevyssä on myös sen edullinen hinta ja hyvä saatavuus. Palokipsilevyyn kosteudenkestävyys ei kuitenkaan ole sen vahvimpia puolia, koska niissä käytettävät orgaaniset materiaalit ovat herkkiä homehtumaan. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää paremmin ulkoilmaolosuhteita kestäviä tuulensuojakipsilevyjä. Näitä tuotteita käytettäessä tulee aina noudattaa valmistajan ohjeita.

Toisena vaihtoehtona on koolattu tai liimattu mineraalivilla kipsilevyjen välissä. Tätä voidaan käyttää vain seinärakenteen ulkopinnassa, koska kosteusteknisen toimivuuden kannalta sisäpuolelle ei voida lisätä juuri ollenkaan mineraalivillaa. Mineraalivilla toisi seinärakenteelle lisää lämmöneristyskykyä, jos se pysyy kuivana, ja sen käytöstä paloa osastoivana materiaalina on myös paljon kokemuksia ja sen saatavuus on hyvä. Mineraalivillaa käytettäessä ulkopinnassa täytyy ottaa huomioon sen viemä suuri tila. Tuuletusväliin koolattu monen kymmenen millimetrin paksuinen mineraalivillakerros kasvattaa elementin kokonaispaksuus merkittävästi.

Kolmantena vaihtoehtona on magnesiumoksidi-levy, eli MgO-levy. Palo-osastointiin tarkoitettulla laadukkaalla MgO-levyllä on paremmat palonkest ominaisuudet kuin palonsuojakipsilevyllä, joten sillä päästään ohuemmalla levykerroksella samaan lopputulokseen kuin kipsilevyllä. Lisäksi MgO-levy on homehtumaton, koska siinä ei ole orgaanisia materiaaleja ja siten soveltuu käytettäväksi elementin molemmin puolin. Sitä on helppo työstää ja kiinnittää eri materiaaleihin. MgO-levyn käyttö

Suomessa ei ole toistaiseksi kovin yleistä, mutta maailmalla niitä on käytetty yli 100 vuotta. MgO-levyjen saatavuus Suomessa on huono ja tällä hetkellä Suomessa on yksi MgO-levyn maahantuoja. Tuotteen lanseerausta Suomessa on suunnitellut myös muut kansainväliset yritykset.

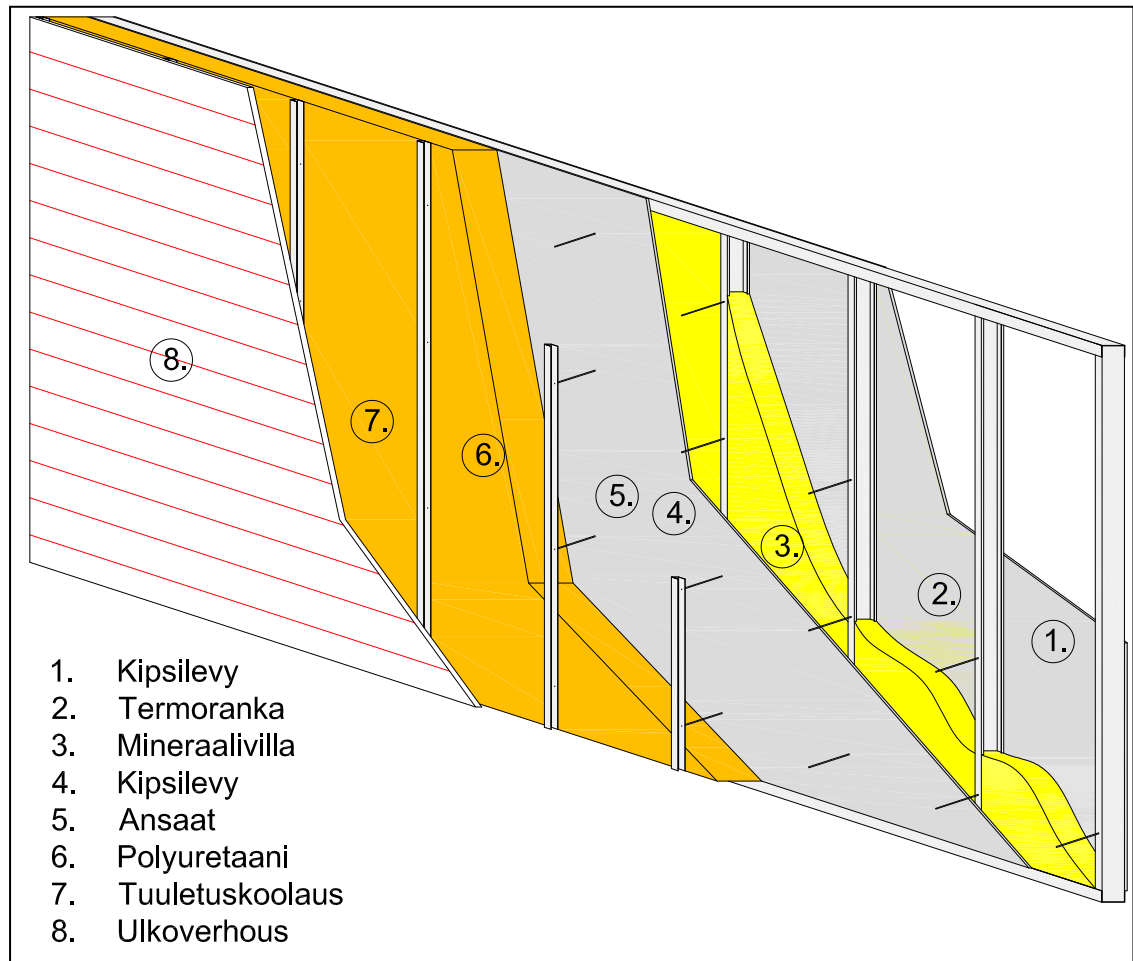
## 5 VALITUN RAKENTEEN YKSITYISKOHDAT

Tässä kappaleessa käsitellään elementtiin liittyviä yksityiskohtia ja liitoksia sekä niiden mitoitusperiaatteita. Kevyitä teräsorsikehikoita on rakennettu maailmalla lukuisin eri liitos- ja rakenneratkaisuin. Näitä ratkaisuja käytettiin pohjana elementin yksityiskohtien hahmottelussa. Yksityiskohtia hahmoteltiin kehitysryhmän voimin pienemmissä ideariihissä, joissa syntyi paljon hyviä uusia ideoita. Useimmissa tapauksissa päädyttiin kuitenkin perinteisempiin ratkaisuihin, koska uudet liitosmekanismit olisivat vaatineet paljon tutkimusta ja jatkokehitystä, jotta niitä olisi voitu käyttää elementissä.

Termorangan käyttöä pientaloissa on pohdittu aiemminkin. Silloisessa rakenteessa lämmöneriste oli Termorangan välissä, höyrynsulkumuovi ja kipsilevy Termorangan sisäpuolella sekä tuulensuojalevy, tuuletusväli ja ulkoverhous Termorangan ulkopuolella. Tällöin rakenteiden liitoksissa ja saumoissa piti ottaa huomioon erityisesti tiiviiden säilyminen tyydyttävällä tasolla. Tämä asetti haasteita sen aikaisille yksityiskohdille, mitkä ratkaistiin usein käyttämällä liitoksissa elastisia eristekaistoja ja tiivisteitä. Nyt kantava Termoranka on täysin lämpöä eristävän ja tiiviin polyuretaanikerroksen lämpimällä puolella, jolloin liitosten ja yksityiskohtien suunnittelussa lämmöneristävyys- ja tiiviyssasiat on helpompi ottaa huomioon.

Liitosten ja yksityiskohtien suunnittelussa täytyy kiinnittää erityistä huomiota siihen, että tiivis kerros on kantavan osan ulkopuolella. Tällöin on vaarana, että mineraalivilla jää teräsorren ja polyuretaanin muodostaman kahden tiiviin pinnan väliin, jossa se joutuu umpioon eikä pääse kuivumaan sisäänpäin. Näin ollen mineraalivillakerroksen täytyy olla auki sisäänpäin kaikissa liitoksissa ja yksityiskohdissa. Tämä vaatii erityistä tarkkuutta suunniteltaessa elementtien saumaa nurkassa. Lisäksi ratkaisuja pohdittaessa täytyy ottaa huomioon mahdollisten sivutiesiirtymien minimointi ja ääneneristävyuden säilyttäminen. Tuotannollisesta näkökulmasta seinärakenteessa tulee olla mahdollisimman vähän epäjatkuvuuskohtia. Toisin sanoen itse orsien väliin tulee sijoittaa mahdollisimman vähän toisistaan poikkeavia osia.

Elementistä, johon liitokset ja yksityiskohtat suunnitellaan, on hahmotelma kuvassa 5.1. Hahmotelma on alustava ja sen yksityiskohtat tarkentuvat seuraavissa kappaleissa. Elementin molemmissa laidoissa on C-orssi niin, että orren laipat osoittavat elementin keskelle ja C-orren uuma on tasattu ylhäällä ja alhaalla olevan U-orren päiden kanssa. Runkotolppien lisäksi ylä- ja alarret sekä muut tarvittavat poikittaiset orret pyritään tekemään mahdollisuuksien mukaan Termorangasta. Hahmotelma on elementin perusrakenteesta. Perusrakenne pyritään pitämään tuotannollisista syistä mahdollisimman vakiona. Kaikki lisätukirakenteet ja kiinnittämiseen tarvittavat lisäosat lisätään pääsääntöisesti perusrakenteen ulkopuolelle.



*Kuva 5.1. Hahmotelma seinäelementistä.*

Elementissä käytettävät orsien keskinäiset ruuviliitokset tehdään sinkityillä poraruuveilla. Poraruuvien kierteettömän porakärjen tulee olla suurempi kuin kiinnitettävien levyjen yhteispaksuus. Käytettävien ruuvien laatu täytyy olla varmistettu. Ruuveiksi soveltuvat esimerkiksi sinkityt litteä- tai torx-kantaiset poraruuvit. [22]

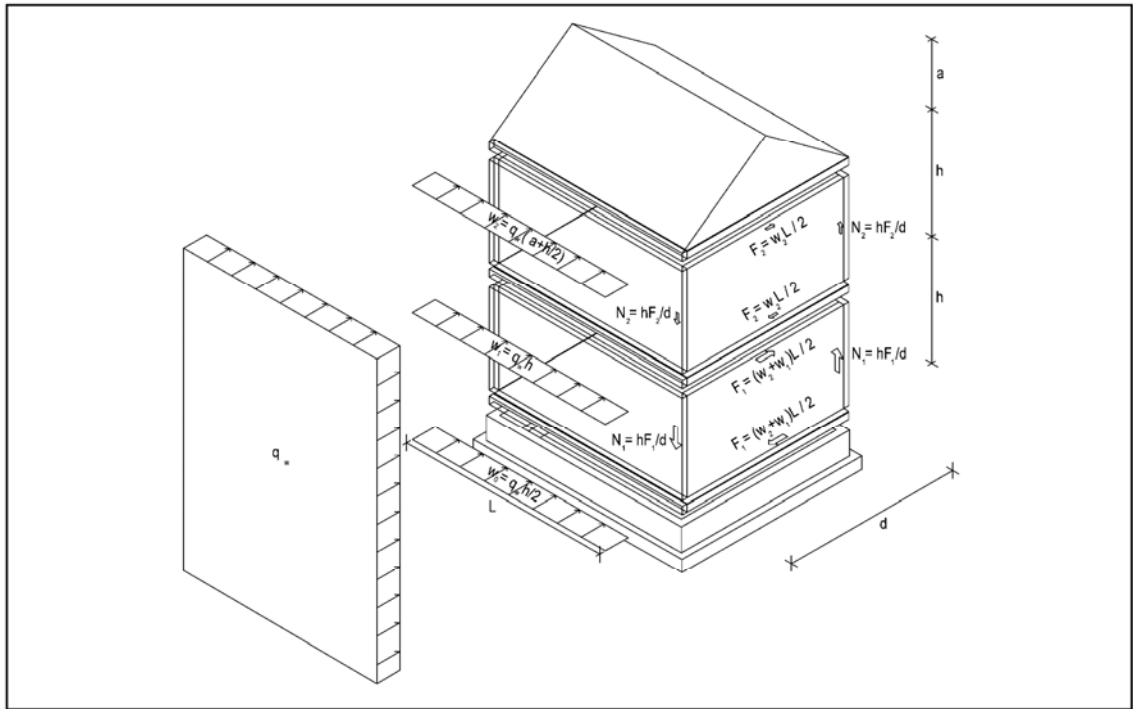
Ruuvien mitoitus tehdään SFS-EN 1993-1-3 + AC mukaan, koska liitettävien levyjen teräsytimien kokonaispaksuus on alle 4 mm. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää ruuvi-valmistajien valmiita mitoitusaulukoita. Ruuviliitosten sijaan tai lisäksi voidaan käyttää hitsausta ja erilaisia liimoja.

## 5.1 Elementtien väliset pystysaumot

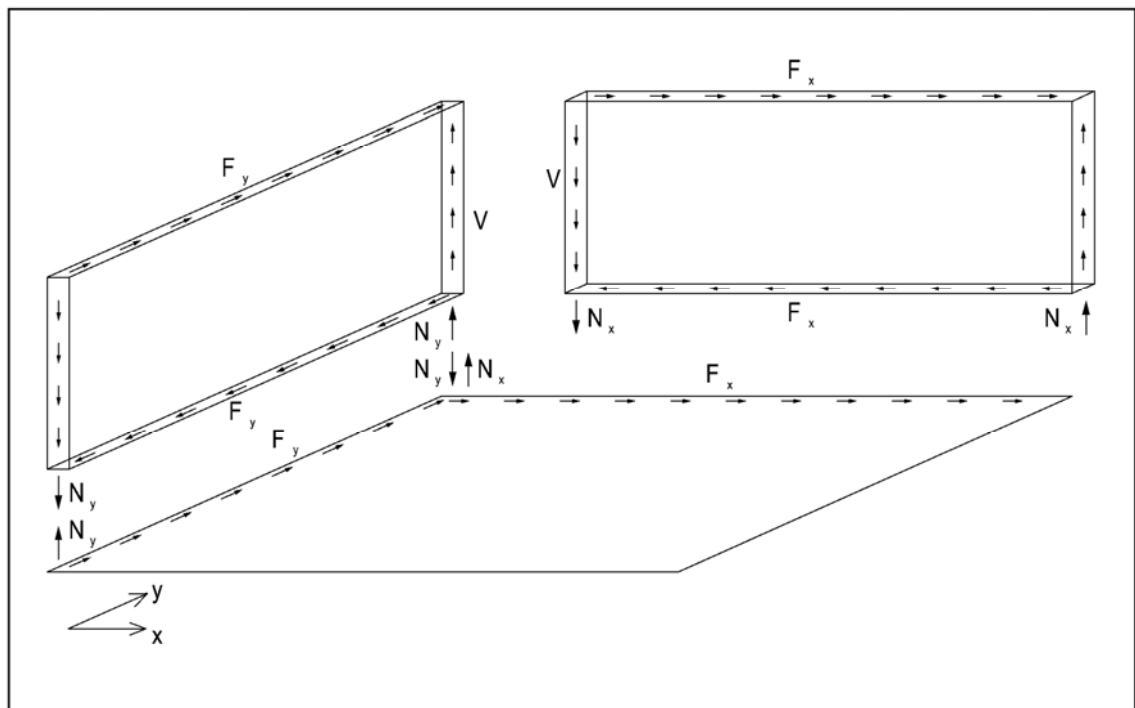
Elementtien välisellä liitoksella varmistetaan muun muassa, että seinärakenne pysyy yhtenäisenä, tiiviinä, eristävänä ja elementin pintamateriaalit eivät halkeile liitosten kohdalta. Elementtejä liitetään toisiinsa joko pitkällä sivulla tai nurkassa. Elementtisaumojen liitokset mitoitetaan niihin kohdistuvien kuormien perusteella. Elementtien pystysaumoihin kohdistuu kuormitusta rakenteen tuulikuormasta rakenteen jäykistyksen kautta.

### 5.1.1 Mitoitusperiaatteet

Tuulikuorma siirtyy vaakarakenteiden kautta pystyrakenteisiin kuvan 5.2 mukaan ja aiheuttaa jännitystiloja elementtien saumoissa. Elementtien samoissa vaikuttavat voimat on esitetty kuvassa 5.2 ja 5.3. Seinän yläosan vaakakuormista johtuen elementin pätyihin aiheutuu nostava tai puristava voima kuvan 5.4 mukaan. Pädyn liitoksia mitoitettaessa voidaan hyödyntää elementin päässä vaikuttavaa ylä- ja välipohjan omaa painoa  $G$  kuvassa 5.5 esitetyltä matkalta.

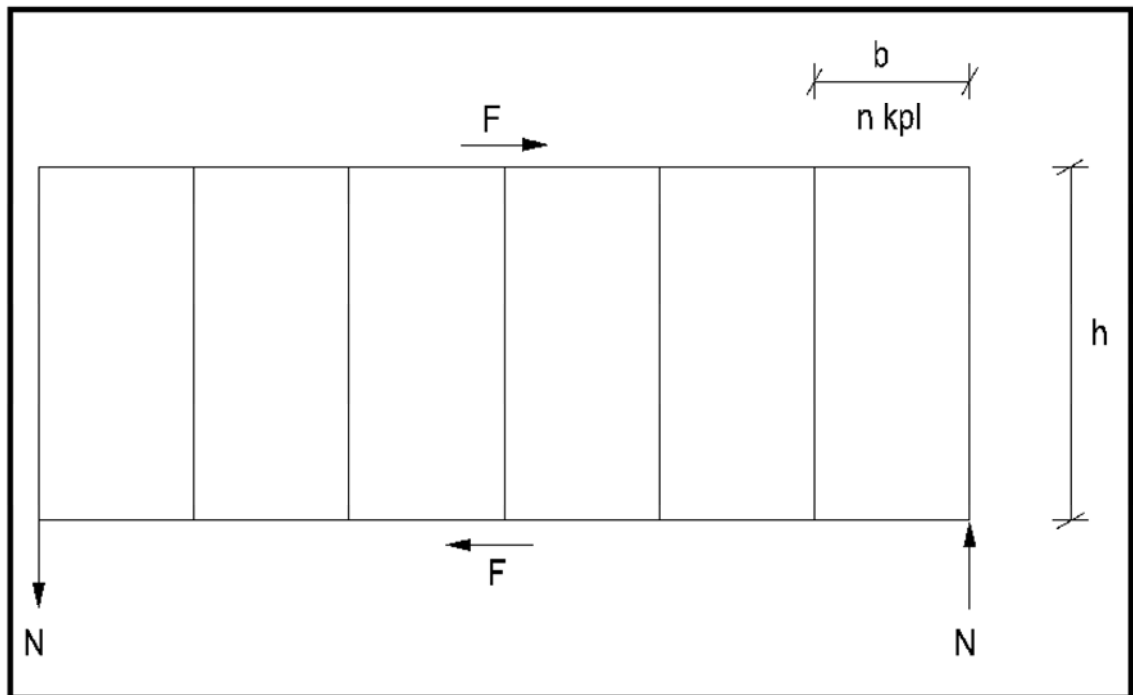


**Kuva 5.2.** Tuulikuorman jakautuminen rakenteisiin. [23]

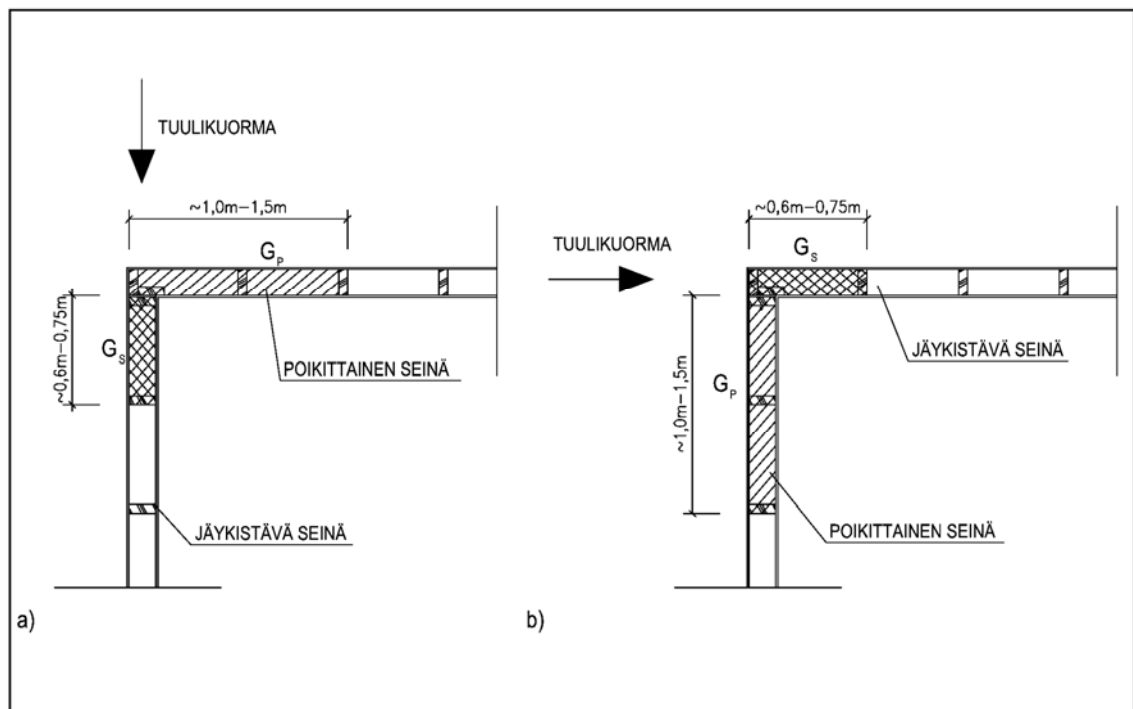


**Kuva 5.3.** Elementtien samoissa vaikuttavat voimat. [23]





**Kuva 5.4.** Elementin nurkassa vaikuttavan normaalivoiman laskennassa käytettävät tekijät. [23]



**Kuva 5.5.** Oman painon hyödyntäminen ankkuroinnissa. [23]

Elementin nurkassa vaikuttava voima  $N$  voidaan laskea kaavalla 5.1, kun tunnetaan kuvassa 5.4 oleva voima  $F$  ja jäykistyslevyjen korkeus ja leveys sekä määrä.

$$N = \frac{F \cdot h}{n \cdot b} \quad (5.1)$$

$$N_t = \sum_{j=1}^m N_j - \sum_{j=1}^m (G_{pi} + G_{si}) \quad (5.2)$$

$$V = G_p \quad (\text{tapaus a, kuva 5.5}) \quad (5.3)$$

$$V = N - G_p \quad (\text{tapaus b, kuva 5.5}) \quad (5.4)$$

Jos voima  $N$  on suurempi kuin kuvassa 5.5 esitettyjen  $G_{pi}$  ja  $G_{si}$  summa, täytyy kaavan 5.2 voima  $N_t$  ankkuroida elementtien päissä perustuksiin saakka. Elementtien välissä vaikuttava leikkausvoima  $V$  lasketaan kaavojen 5.3 ja 5.4 mukaan. [23] Sauman kiinnikkeet mitoitetaan saumassa vaikuttavien voimien mukaan.

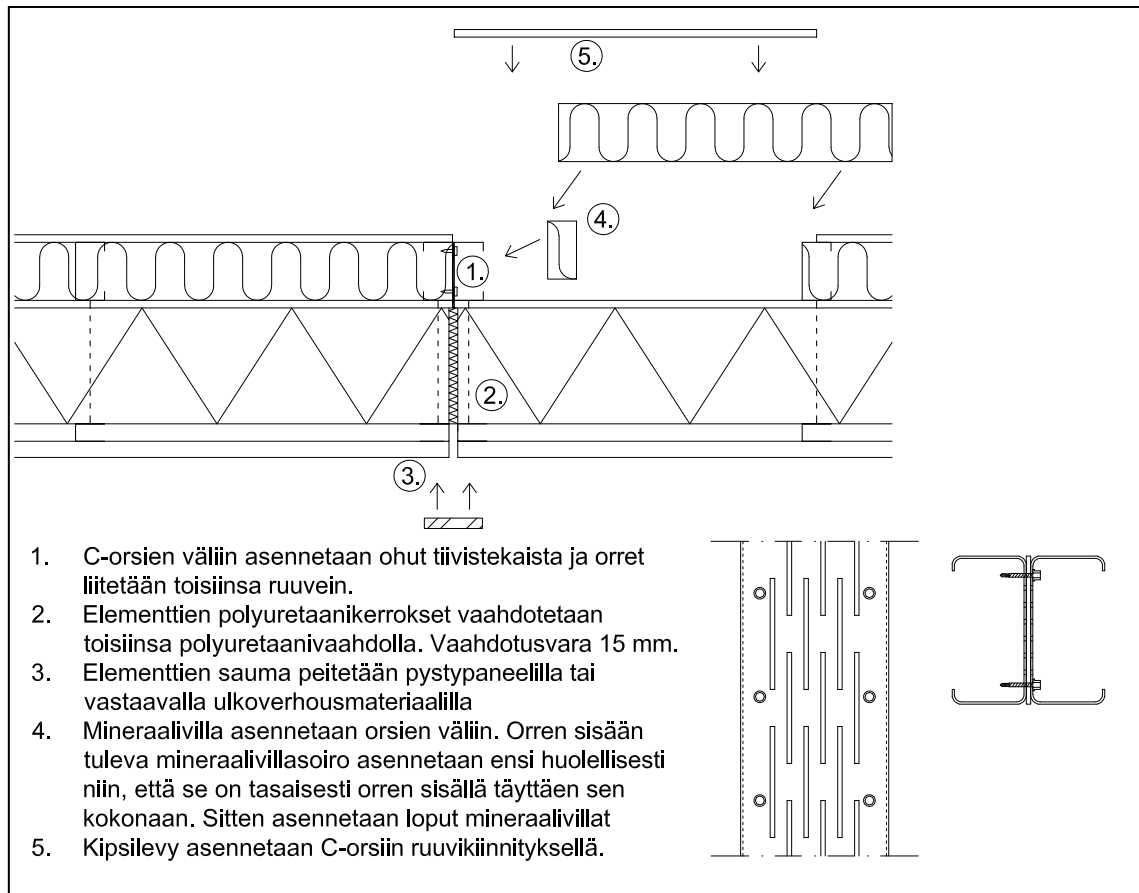
Vaikka edellä esitetty elementtisaumoissa vaikuttavien voimien laskentatapa on puurunkoisten elementtien suunnitteluoppaassa, voidaan sitä kuormien laskennan osalta soveltaa tässä työssä tutkittavalle rakenteelle, koska tutkittavan rakenteen kantavan rungon toimintaperiaate on samanlainen oppaassa esitetyn puurakenteen kanssa. Saumojen mitoitus on kohdekohtaista ja riippuu muun muassa tuulikuormasta, kerrosten lukumäärästä ja kerroskorkeudesta.

### 5.1.2 Pystysauma pitkällä sivulla

Pitkän sivun elementtisaumavaihtoehtoja on monia. Pohdimme kehitysryhmän voimin uudenlaisia liittotapoja niiden tarkoituksenmukaisuuden ja asennukseen vaikuttavien seikkojen perusteella. Uudet ideat olivat mielenkiintoisia, toteutettavia ja nopeita asentaa sekä elementin esivalmistusaste voitiin viedä niissä pitkälle. Uudet kiinnitysmekanismit olisivat kuitenkin vaatineet jatkokehitystä, joten niiden käyttäminen tässä työssä ei ollut mielekästä. Uudenlaisien kiinnitysmekanismien kustannusten arvioiminen olisi ollut myös hankalaa. Erikoiskiinnikkeiden käyttö tulee vartenotettavaksi vaihtoehdoksi, kun elementtien valmistusmäärät ovat suuria. Erilaisia tässä kohtaa hylättyjä kiinnitysmekanismia on liitteessä 10.

Pitkän sivun elementtisauma päädyttiin tekemään perinteisellä ruuvikiinnityksellä, koska se on yksinkertainen, yleisesti käytetty ja edullinen ratkaisu. Se lienee myös kustannustehokkain tapa kiinnittämiseen elementin käyttöönoton yhteydessä, kun tuotantomäärät ovat vielä pieniä. Liitteessä 11 on esitetty kiinnikkeiden mitoitusesimerkki pystysaumoiille.

Ruuviliitos tehdään kuvan 5.6 mukaan. Elementistä jätetään reunimmainen kipsilevy ja mineraalivillakaistale pois, jolloin ruuvikiinnitys on helppo ja nopea tehdä työmaalla. Kun kiinnitys on tehty, asennetaan mineraalivillakaistale ja kipsilevy paikoilleen. Tämä kiinnitystapa ei vaadi mitään erikoistyökaluja tai uusia työskentelytapoja.

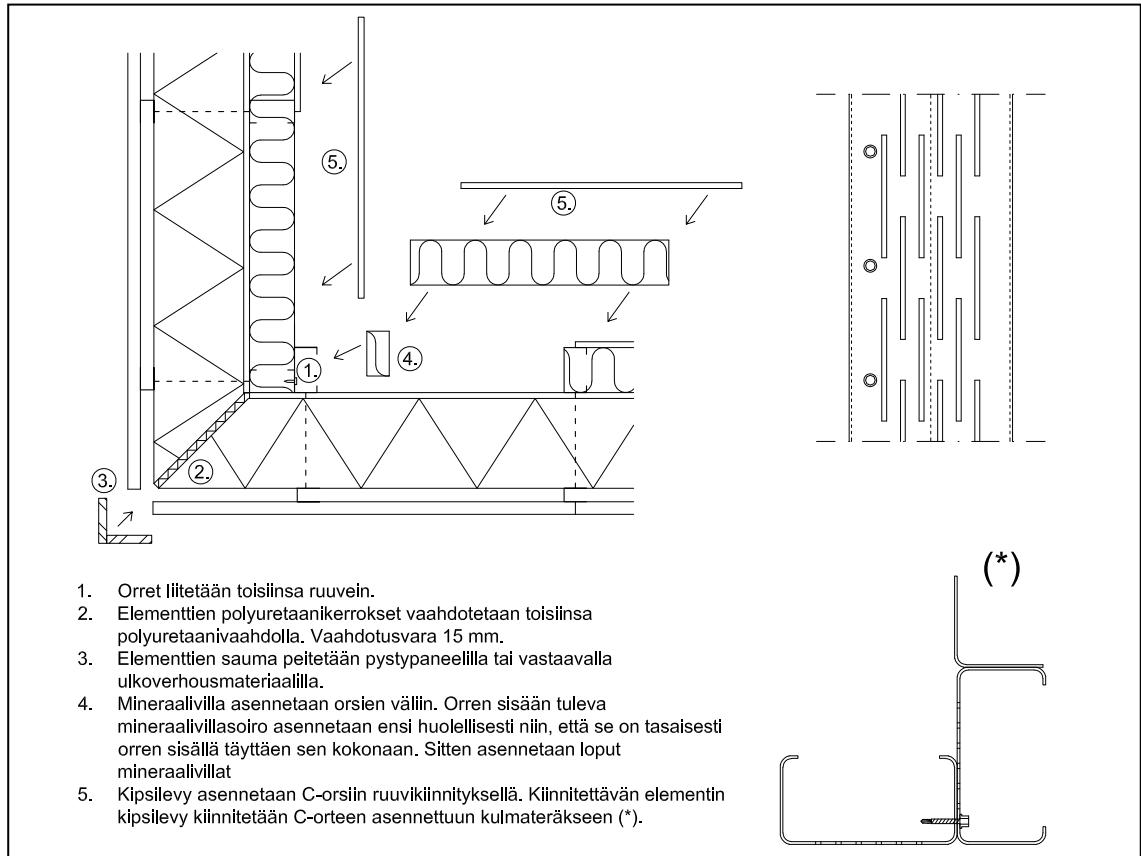


**Kuva 5.6.** Elementin pystysauma pitkällä sivulla.

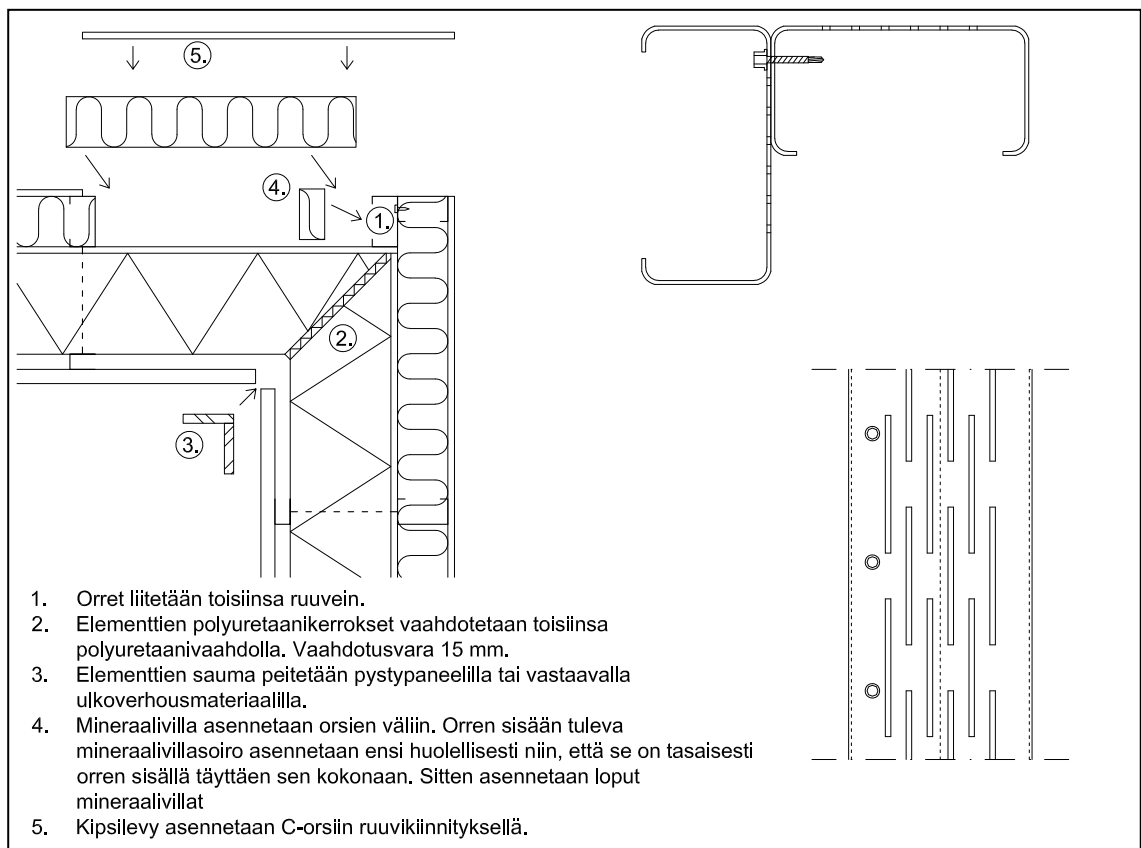
Laippojen reunakäänteet rajoittavat ruuvien kiinnitystä uuman reunoille. Ruuvit sijoitetaan orren uuman reunoille molemmin puolin mahdollisimman lähelle laippoja. Liitteen 11 esimerkkilaskuun perustuen liitos kestää hyvin pienellä määrällä ruuveja. Orret tulisi kiinnittää koko matkalta toisiinsa. Siksi on suositeltavaa, että tässä tapauksessa käytetään viisi kahden ruuvia 600 mm välein uuman molemmin puolin. Ylin ja alin ruuvirivi on 50 mm etäisyydellä orren päästä. Käytettävän ruuvin kokonaisvahvuus on 3,5 mm.

### 5.1.3 Pystysauma nurkassa

Nurkan pystysauma toteutetaan kuvan 5.7 ja 5.8 mukaan. Elementin polyuretaanikerros viistotetaan nurkassa 45° kulmaan ja viistouksissa on otettu huomioon saumausvara 15 mm. Liitos on peruseriaatteiltaan sama kuvan 5.6 liitoksen kanssa, paitsi nyt orsien uumat eivät ole vastakkain. Nyt orren uuma kiinnitetään kiinnitettävän orren laippaan yhdellä ruuvirivillä. Tämä täytyy ottaa huomioon ruuveja mitoittaessa, koska yhden ruuvirivin käytöllä on vaikutusta esimerkiksi orren nettopoikkileikkauksen kestävyys-teen. Muutoin ruuvien mitoitus menee liitteen 11 mukaan.



**Kuva 5.7. Elementin pystysauma ulkonurkassa.**



**Kuva 5.8. Elementin pystysauma sisänurkassa.**

Elementtisaumojen yksityiskohdat suunnitellaan ulkoverhousvalinnat huomioon ottaen. Jos nurkka on eri kulmassa kuin 90°, voidaan liitos toteuttaa oikeaan kulmaan taivutetuilla kulmateräksillä ja teräslevyillä.

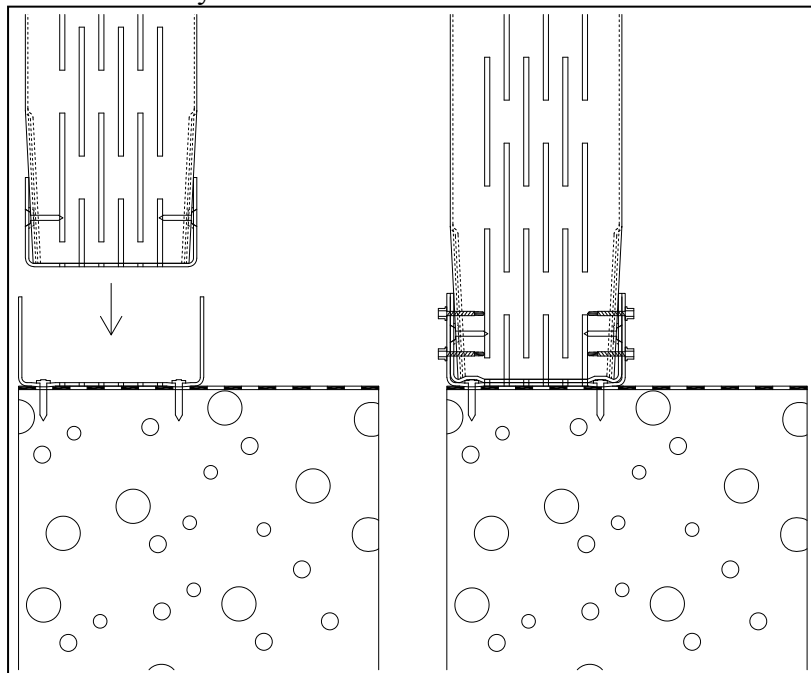
## 5.2 Elementin ja sokkeliin liitos

Seinäelementin ja sokkelin liitoksella varmistetaan, että elementti ei pääse liikkumaan sivusuunnassa ja sen kantavia rakenteita pitkin tulevat kuormat voidaan viedä sokkelin kautta anturalle. On tärkeää, että liitosta voidaan käyttää laajasti erilaisien sokkeli- ja alapohjaratkaisujen kanssa. Orsien liitokset tehdään ruuviliitoksin, aivan kuten elementin pystysaumoissakin.

Rungon pystyorsa yhdistää elementin alapinnassa oleva termorei'itetty U-orso. Sisäkipsilevyä ja polyuretaanikerrosta ei ole viety tämän U-orren päälle elementin kiinnityksen vuoksi. Elementti voidaan kiinnittää sokkeliin usealla eri tavalla. Seuraavaksi esitellään kaksi eri liitostapaa.

### 5.2.1 Liitos U-orrella

Ensimmäisessä vaihtoehdossa, sokkeliin kiinnitetään U-orso. U-orren kiinnityksessä käytetään siihen soveltuvia kiinnikkeitä, kuten ammuttavia nauloja tai vastaavia kiinnikkeitä. Kiinnikkeiden kanta tulee olla riittävän matalia, jotta se ei estä elementin U-orren tasaista asentamista sokkelin U-orren sisään. Elementin U-orso myötäilee sokkelin U-orren kiinnikkeiden muotoja, mutta kiinnikkeiden vähyden takia siitä ei muodostu ongelmaa. Sokkelin U-orso ohjaa asennuksen yhteydessä elementin oikealle paikalle ja siten parantaa elementin asennuksen mittatarkkuutta. Elementti lasketaan sokkelissa olevaan U-orteen ja kiinnitetään siihen molemmin puolin ruuvein. Elementin ja sokkelin liitos on esitetty kuvassa 5.9.

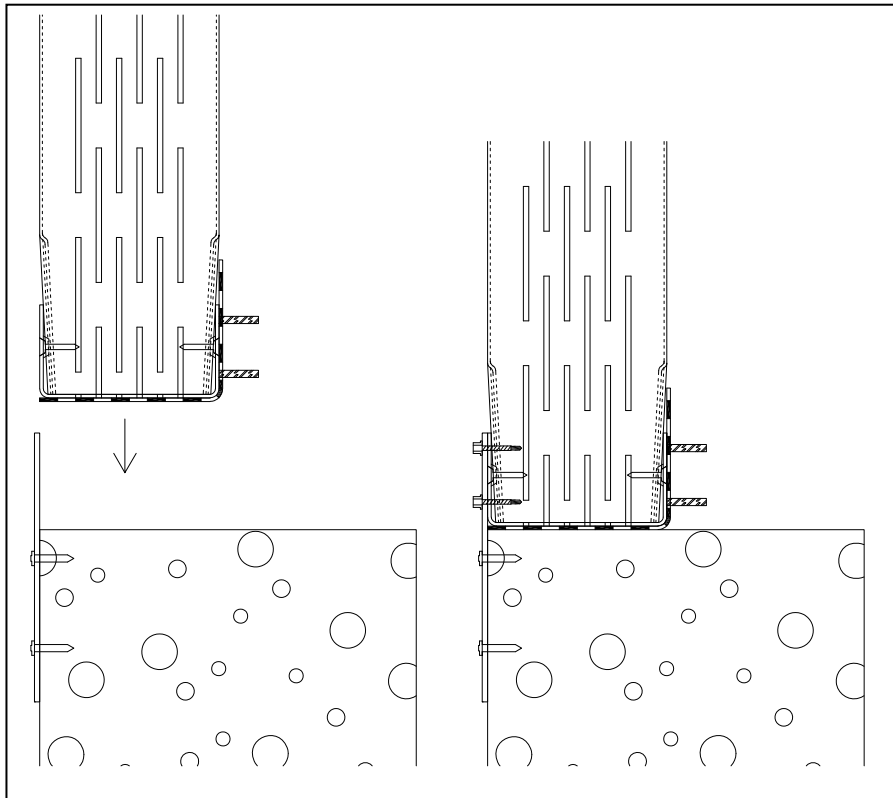


**Kuva 5.9.** Elementin ja sokkelin liitos.

Tämä kiinnitystapa on erittäin joustava elementin alapuolisiin rakenteisiin nähden. Sitä voidaan käyttää tuulettuvissa ja maanvaraisissa alapohjissa. U-orsi voidaan kiinnittää myös teräs- ja puurakenteisiin.

### 5.2.2 Liitos teräslevyllä ja -tangoilla

Toinen vaihtoehto elementin kiinnitykseen on jättää sokkelin U-orsi kokonaan pois ja kiinnittää elementti sokkeliin teräslevyllä. Tämä liitos on esitetty kuvassa 5.10. Teräslevy on ampumalla naulattu kiinni sokkelin ulkopintaan. Elementti asennetaan sitä vasten ja kiinnitetään levyyn poraruuveilla. Elementin U-orren sisälaippaan on kiinnitetty tehtaalla tartuntaraudat, jotka kiinnittävät U-orren sisälaipan sokkeliin lattiavalun yhteydessä. Myös betonin ja teräksen välissä käytettävä bitumikermi voidaan kiinnittää tehtaalla valmiiksi elementtiin, jolloin elementtiasennusta varten sokkeliin täytyy olla asennettuna valmiiksi vain teräslevy. Tartuntaraudat voidaan kiinnittää elementtiin hitaamalla tai pystyorsien kiinnitykseen voidaan käyttää sellaisia kiinnikkeitä, joissa tartuntarauda on kiinnikkeen toisessa päässä.



**Kuva 5.10.** Vaihtoehtoinen elementin ja sokkelin liitos.

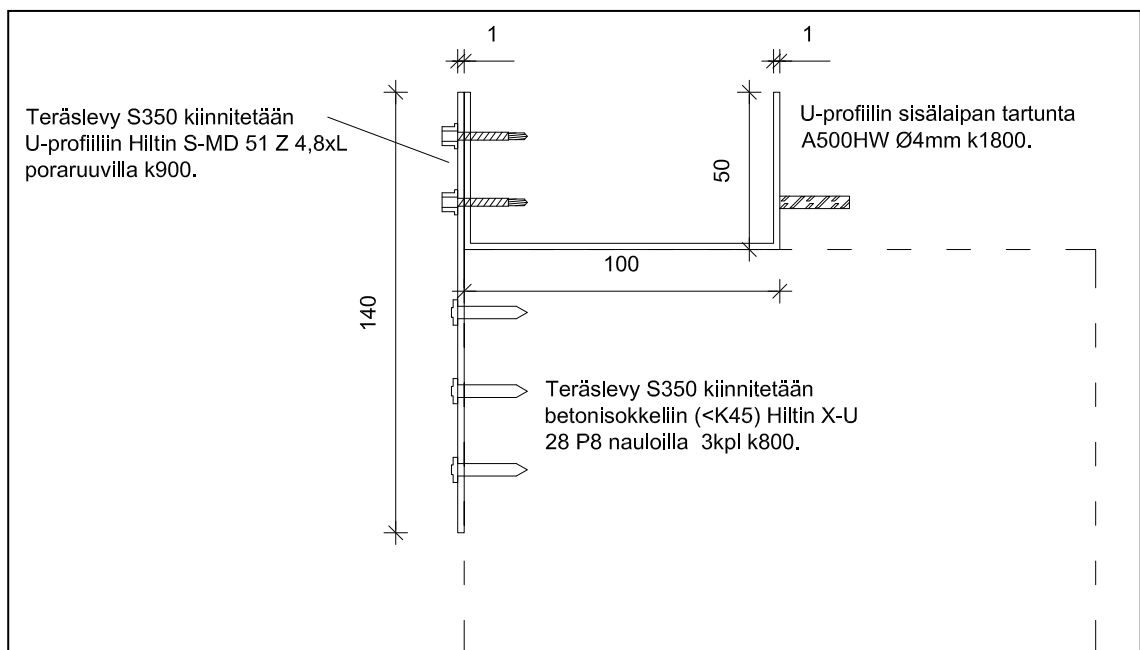
Tämä vaihtoehto sopii erityisesti maanvaraiselle alapohjalle, mutta sitä voidaan käyttää myös tuulettuvan alapohjan kanssa, kunhan se otetaan huomioon kiinnikkeitä mitoitettaessa.

### 5.2.3 Mitoitusperiaatteet

Pystykuormat välittyvät pystyorsilta sokkelille kontaktin kautta, joten elementin ja sokkelin välinen liitos mitoitetaan vain rungon jäykistyksestä tulevalle leikkausvoimalle sekä tuulikuormasta aiheutuvalle leikkausvoimalle. Jäykistyksestä johtuvien mahdollisten pystykuormien ankkurointi sokkeliin hoidetaan lisäkiinnikkeillä elementtien pystysaumojen kohdalla. U-orren ja C-orsien muodostaman jäykän rakenteen ansiosta tuulikuorman aiheuttama momentti liitoksessa on niin pieni, että sitä ei tarvitse ottaa huomioon. Kiinnikkeiden kiinnityspinta-alavaatimus mitoittaa liitoksen U-orret ja mahdolliset muut teräsosat.

Liitosta mitoitettaessa otetaan huomioon liitoksen tyypistä riippuen asennusjärjestys. Kuvan 5.10 liitoksessa betonilaatta valetaan seinäelementtien asennuksen jälkeen, joten liitoksen ulommat osat mitoitetaan kestävämmän liitokseen kohdistuvat kuormat kokonaisuudessaan. Kun betonilaatta on valettu, elementin tartuntateräkset ottavat myös kuormia vastaan, jolloin liitoksen varmuus kaksinkertaistuu ja siitä tulee erittäin jäykkä. Tämä heikentää hieman seinän ilmaääneneristyskykyä seinän alaosassa.

Kuvan 5.9 liitosta mitoitettaessa ei tarvitse ottaa tätä huomioon, koska elementti kiinnitetään elementin asennuksen yhteydessä molemmilta puolilta. Tämä liitos sallii suurempia liikkeitä kuvan 5.10 liitokseen verrattuna, mutta se on työläämpi ja todennäköisesti myös kalliimpi toteuttaa.



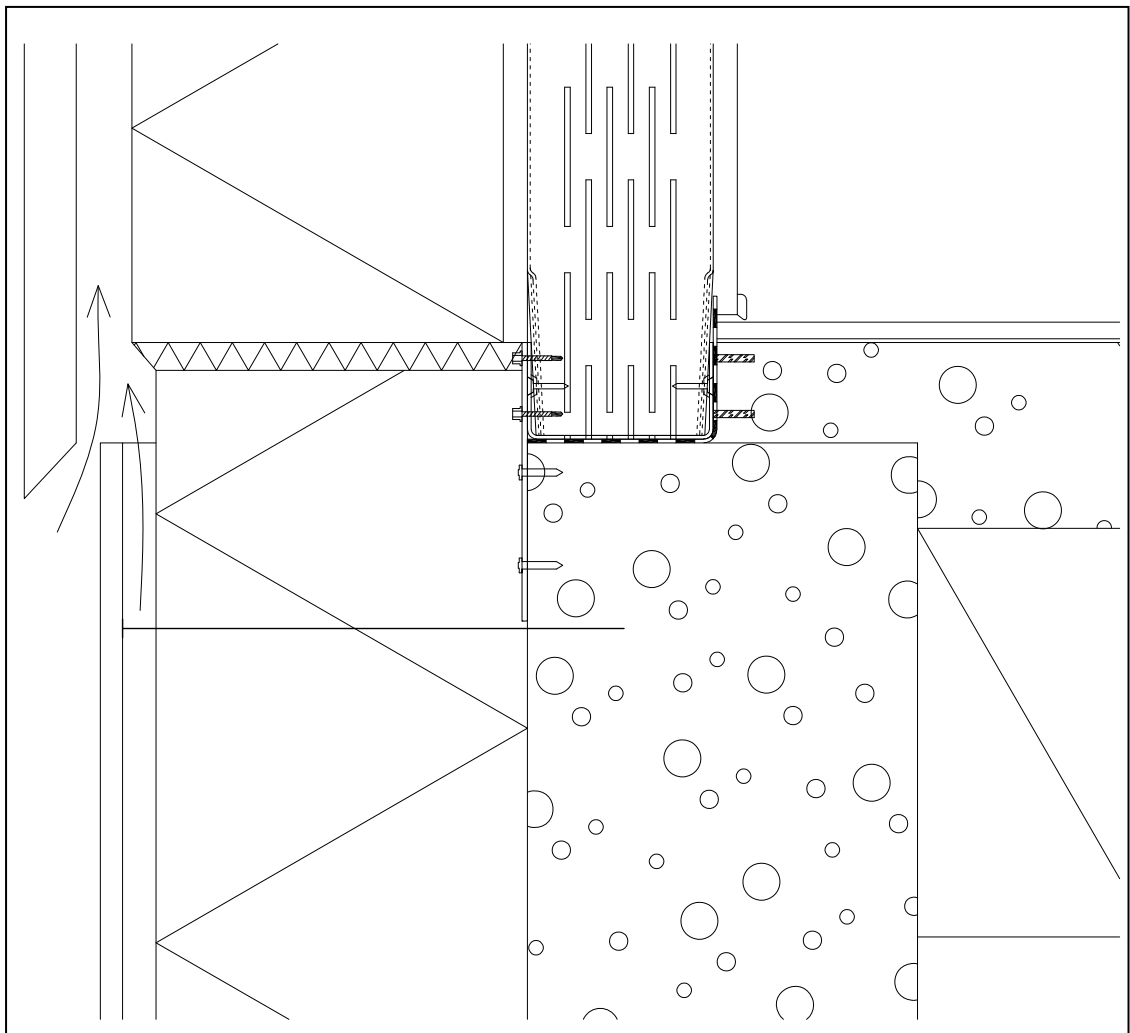
**Kuva 5.11.** Liitteessä 12 mitoitettu liitos.

Kuvan 5.10 mukainen liitos soveltuu rakennukseen, jossa lattia valetaan ulkoseinien asennuksen jälkeen. Jos alapohjaratkaisu on tuulettuva tai lattia valetaan ennen seinien asennusta, täytyy liitos tehdä kuvan 5.9 mukaan. Liitosten ja käytettävien U-orsien mitoitustapa on kohdekohtainen, koska liitoksen kuormat riippuvat tuulikuormasta. Liitteessä

12 on esitetty kuvan 5.10 liitostavalla toteutetun yksikerroksisen rakennuksen U-orren, teräslevyn ja kiinnikkeiden mitoitus. Kuvassa 5.11 on esitetty liitteessä 12 mitoitettu liitos.

#### 5.2.4 Liitoksen muut komponentit

Kun elementti on asennettu paikoilleen, asennetaan seuraavaksi sokkelin eriste. Sokkelin ja elementin eristeiden välinen sauma vaahdotetaan tiiviiksi. Sokkelin eristeen päälle asennetaan koolaus ja pintamateriaali, esimerkiksi sokkelilevy. Sisällä tehdään lattiava-lu, jonka päälle tulee pintamateriaalit. Kuvassa 5.12 on leikkaus valmiista sokkelin ja elementin liitoksesta.



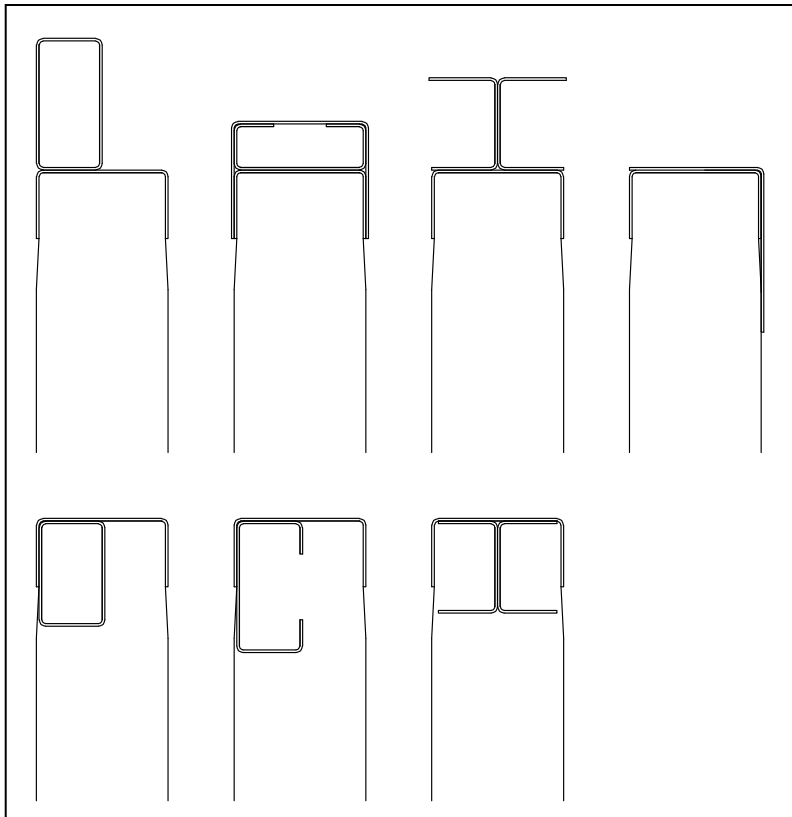
**Kuva 5.12.** Sokkelin ja elementin liitos viimeistelyineen.

Sokkelin eristettä voidaan tarvittaessa työstää yläreunastaan, jotta elementin kiinnikkeet eivät hankaloita sokkelin eristeen asennusta. Lähtökohtaisesti elementin kiinnikkeinä tulee kuitenkin käyttää matalakantaisia kiinnikkeitä, jolloin sokkelin eriste voidaan painaa tiiviisti sokkeliä vasten. Elementin ja sokkelin eristeiden välinen saumavara on vähintään 15 mm.



### 5.3 Elementin liitos ylä- ja välipohjaan

Ylä- ja välipohjan kuormat tasataan runkotolpille palkin avulla. Palkki toimii myös kantavana rakenteena ikkuna- ja oviaukkojen yli. Se asennetaan ylhäällä kulkevan U-orren päälle, jolloin esimerkiksi kattoristikoiden jako ei vaikuta palkin alapuolisiin rakenteisiin. Tämä helpottaa elementin teollista valmistamista, kun elementissä on vähemmän muuttujia.



*Kuva 5.13. Elementin palkkivaihtoehtoja.*

Toisena vaihtoehtona olisi sijoittaa palkki ylhäällä kulkevan U-orren alle. Tämäkään vaihtoehto ei ole huono, mutta sen arveltiin hidastavan teollista tuotantoa siinä määrin, että siitä luovuttiin. Ilman palkkia kattoristikoiden jako olisi vaikuttanut runkotolppien sijaintiin ja mitoitukseen, jolloin jokaisen kattoristikon tai välipohjan palkin alla olisi täytynyt olla runkotolppa. Tämä olisi heikentänyt edelleen elementin teollista valmistamista ja joustavaa käyttöä erilaisissa rakenteissa. Kuvassa 5.13 on esitetty erilaisia yläpalkkivaihtoehtoja.

#### 5.3.1 Mitoitusperiaatteet

Suurin osa pystyosien kuormituksesta välittyy alapuolisiin rakenteisiin laippojen ja reunakäänteiden kautta. Siksi väli- ja yläpohjaliitoksia suunniteltaessa pystykuormat ohjataan mahdollisimman suoraan laipoille ja pelkästään uuman kuormitusta vältetään. Palkkiin kohdistuu kuormia yläpohjasta kattoristikoiden tai -palkkien kautta sekä lisäksi

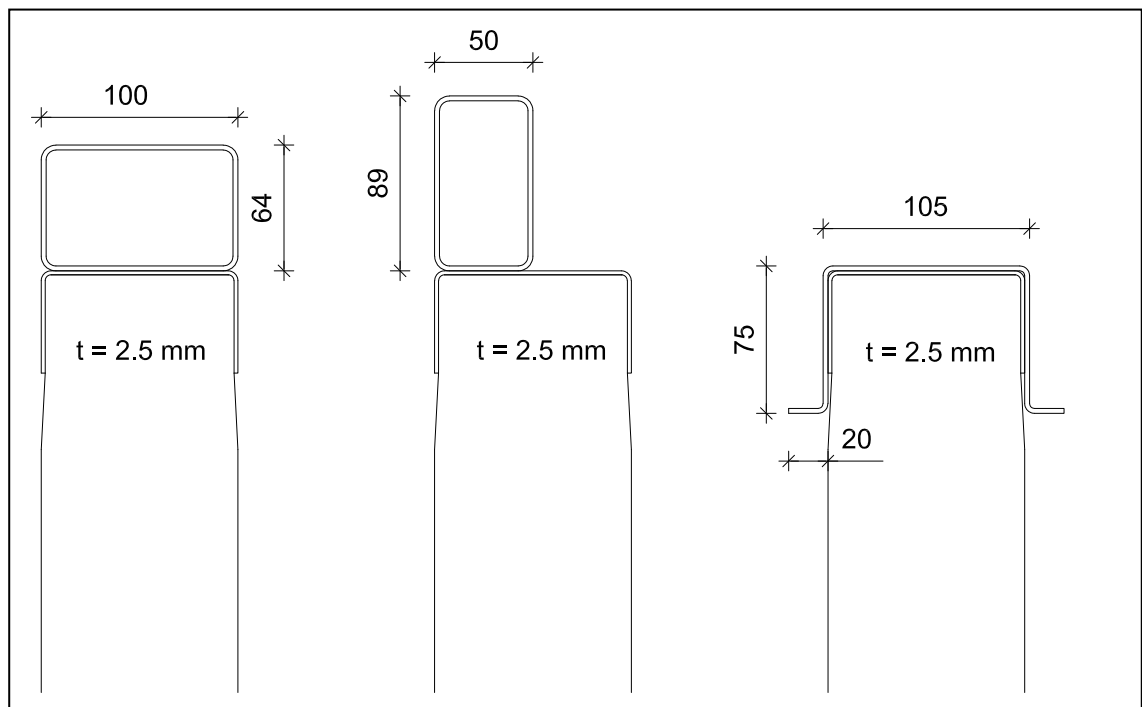
kaksikerroksisessa tapauksessa välipohjasta. Palkin täytyy kantaa kuormat ikkuna- ja oviaukkojen yli aukkojen reunoissa oleville vahvennetuille runkotolpille. Suurimmat kuormat palkille aiheutuvat suurien ikkuna-aukkojen kohdalla, joten palkin mitoitus tehdään suurimman ikkuna-aukon mukaan. Liitteessä 13 on esimerkki yksikerroksisen rakennuksen seinäelementin putkipalkin mitoituksesta, kun seinäelementissä on 1200 x 1200 mm kokoinen ikkuna.

Koska ProfBeam mitoittaa vain yksiaukkoisia palkkeja, mitoitus tehtiin laskemalla ensin kolmiaukkoisessa palkissa vaikuttavat taivutus- ja leikkausvoimat. Sitten laskettiin kolmiaukkoisen palkin keskimmäisen aukon tuilla vaikuttavat tukivoimat ja taivutusmomentit, jonka jälkeen keskimmäisen aukon palkki ja siihen vaikuttavat voimat syötettiin ProfBeam-ohjelmaan.

Elementin yläreunan palkkina voidaan käyttää putken tilalla myös muitakin poikkileikkauksia, kuten kahta C-ortta, jotka ovat liitetty toisiinsa kiinni uumasta. Tällaisilla symmetrisillä poikkileikkauksilla saavutetaan hyvä kantavuus, kun palkkia rasittaa suuri taivutusvoima. Liitteen 13 esimerkkilaskussa käytettiin kuitenkin putkea, koska sillä on erittäin hyvä taivutuskestävyys umpinaisen poikkileikkauksensa ansiosta. Avonaisista poikkileikkauksista C- ja  $\Omega$ -orret kestävät myös hyvin taivutusta.

### 5.3.2 Palkkivaihtoehdot ja yläpohjaliitos

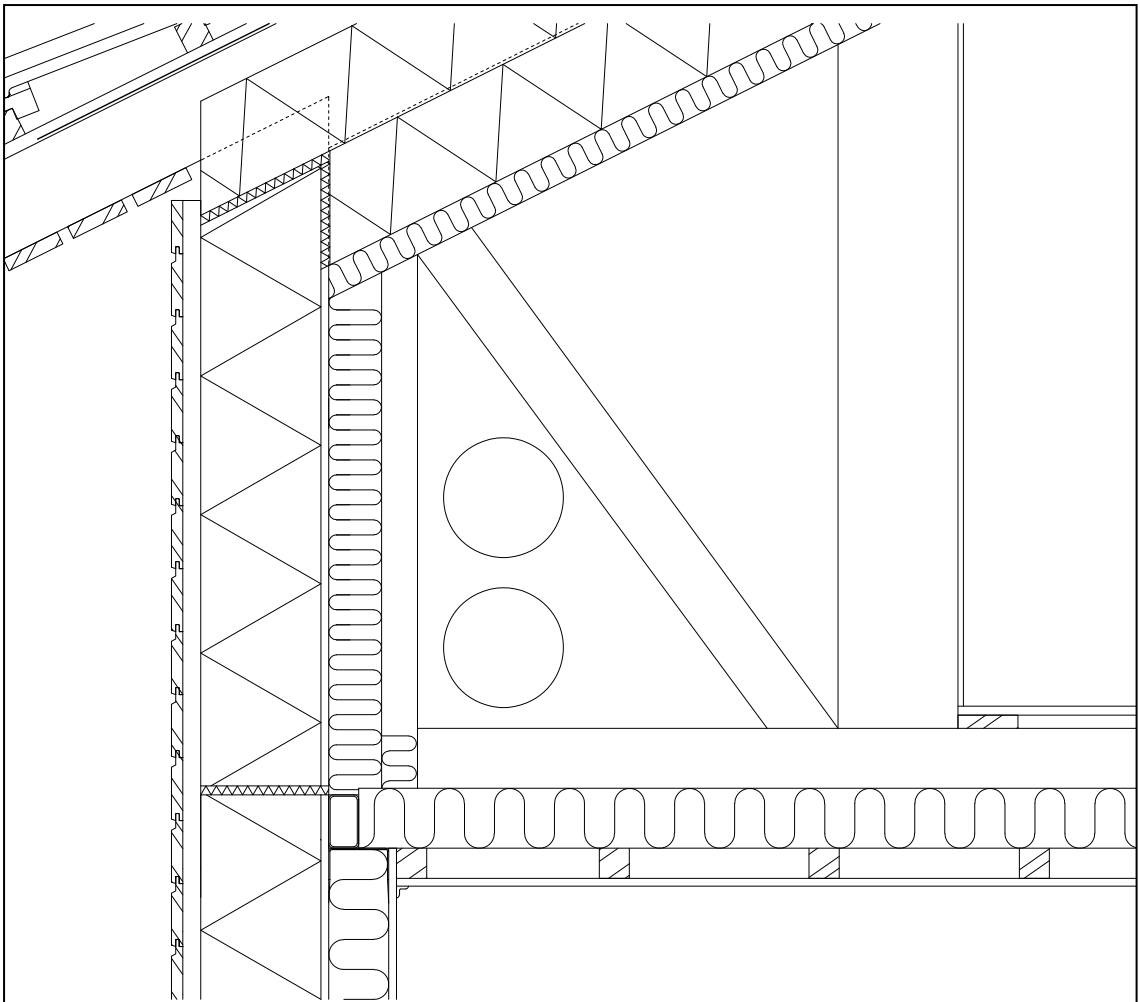
Kuvassa 5.13 on poikkileikkauksia, jotka on mitoitettu liitteessä 13. Liitteen 13 mitoitusesimerkissä käytettiin elementtiä, jonka suurin ikkuna on 1200 x 1200 mm ja kattoristikoiden jako 1200 mm. Palkki mitoitettiin niin, että se kestää kattoristikon osuessa ikkuna-aukon keskelle.



**Kuva 5.13.** Liitteessä 13 mitoitettut orret.

Kaikkien kuvan 5.13 orsien teräsvahvuus on 2,5 mm. Tätä pienemmillä vahvuuksilla orren pistekuormakestävyys ylittyy. Kuvan 5.13 orsien kantokyky on käytetty lähes kokonaan. On kuitenkin huomattava, että tässä tapauksessa kuormitus on erittäin rankka, koska kattoristikoiden jako on suuri ja kattoristikon oletetaan osuvan keskelle ikkuna-aukkoa. Kattoristikon siirtämisellä lähemmäksi ikkuna-aukon reunaa, palkin rasitus vähenee merkittävästi. Käytännössä suunnittelussa tulisi välttää tällaisia tilanteita, joissa palkin maksimimomentit kasvavat suhteellisen suuriksi. Liitteen 13 mitoituksessa ei ole otettu huomioon runkotolppia yhteen sitovan U-orren kantokykyä.

Palkin kiinnikkeiden mitoitus tehdään kohdekohtaisesti tuulikuormasta aiheutuvan leikkausvoiman mukaan. Jos esimerkiksi  $\Omega$ -orrella toteutetussa ratkaisussa  $\Omega$ -orsi kiinnitetään kauttaaltaan kiinni U-orreen, kasvaa U- ja  $\Omega$ -orren muodostaman palkin kantokyky merkittävästi ja  $\Omega$ -orsi voidaan mitoittaa ohuemmaksi. Myös  $\Omega$ -orren mittaluokalla toteutettu C-orsi kestää myös liitteessä 13 esitetyt kuormat. Kuvassa 5.14 on esitetty yläpohjan ja ulkoseinän liitos vaakaan asennetulla putkella.



**Kuva 5.14.** Yläpohjan ja ulkoseinän liitos pystyyn asennetulla putkella.

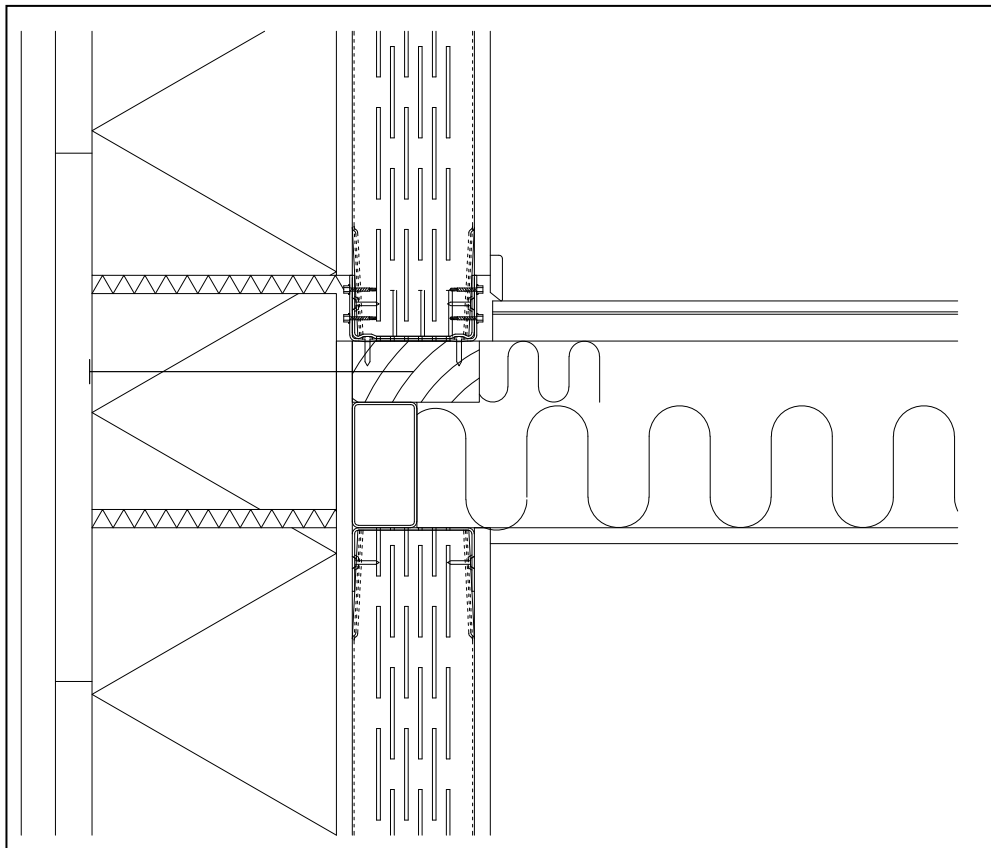
Elementin yläpalkin toteutustapoja on monia ja yhtä parasta ratkaisua tuskin löytyy. Elementtiä valmistettaessa on pohdittava, mikä vaihtoehto sopii parhaiten kyseisen ele-

menttitehtaan elementtirakennustapaan. Esimerkiksi  $\Omega$ -orsia käytettäessä ei välttämättä tarvita ollenkaan U-orrtta, joskin silloin elementtien  $\Omega$ -orret täytyy mitoittaa ennen seinäelementin tekoa ja vakioelementtiä ei näin ollen voida tehdä varastoon.  $\Omega$ -orsia käytettäessä täytyy myös pohtia yläpohjan ja ulkoseinän liittymäkohdan yksityiskohdat, jotta  $\Omega$ -orren reunakäänteet saadaan piiloon.

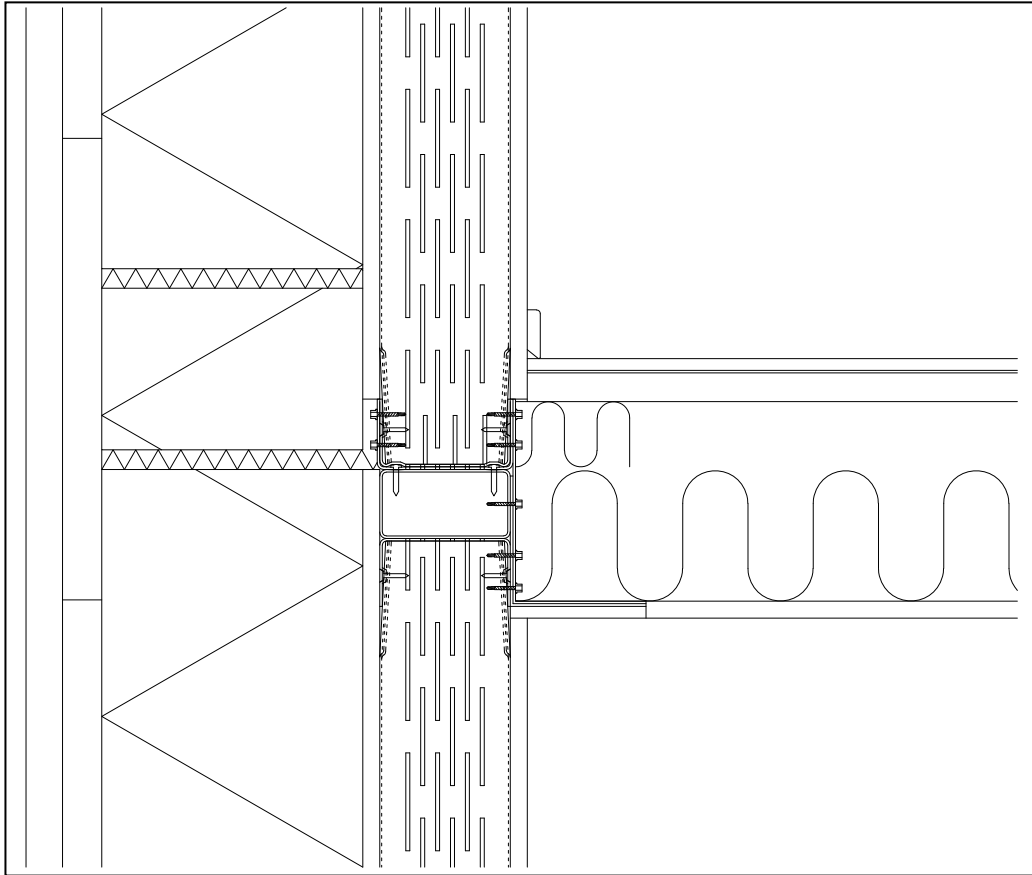
Putkea käytettäessä tällaista ongelmaa ei ole. Putki on kuitenkin kalliimpaa verrattuna muihin vaihtoehtoihin. Pystyyn asennettuna kuormat välittyvät runkotolpan yläpäässä pääosin ulommalle laipalle, mutta putken lämpimälle puolelle voidaan asentaa ääneneristysvilla. Vaakaan asennetulla putkella kuormat jakautuvat tasaisesti runkotolpille, mutta putken kohdalle ei saada asennettua ääneneristysvillaa. Ontto putki heikentää paikallisesti seinärakenteen lämmön- ja ääneneristyskykyä, joten putken täyttämistä täytemateriaalilla tulee harkita.

### 5.3.3 Välipohjaliitos

Välipohja voidaan toteuttaa teräsorsilla, ontelolaatoilla tai puulla. Koska polyuretaanikerros sijaitsee seinärakenteen ulkopinnassa yhtenäisenä, ei rakennuksen ulkovaiipan tiiviys seinän osalta vaarannu välipohjaliitoksessa. Välipohjarakenteet kiinnitetään runkotolppiin palkin välityksellä ja toisen kerroksen kantava osa asennetaan välipohjarakenteista riippuen niin, että kuormat välittyvät mahdollisimman tasaisesti alemmalle elementille. Välipohjan liittyminen ulkoseinärakenteeseen on esitetty kuvassa 5.15.



**Kuva 5.15.** Välipohjaliitos, jossa välipohja tukeutuu suoraan alemman seinäelementin kantaviin rakenteisiin.



**Kuva 5.16.** Välipohjaliitos, jossa välipohja on kiinnitetty vahvalla L-orrella molempiin seinäelementteihin. Vaihtoehtoisesti välipojan palkisto voidaan kiinnittää seinärakenteeseen palkkikengillä.

Välipohjarakenteet voidaan tukea seinän kantavaan runkoon myös erilaisin kulmapaloin ja kiinnikkein. Tämä liitosperiaate on esitetty kuvassa 5.16. Ylemmän ja alemman elementin polyuretaanikerroksen sauma vaahdotetaan tiiviiksi saumavaahdolla.

## 5.4 Ovi- ja ikkunakiinnitykset

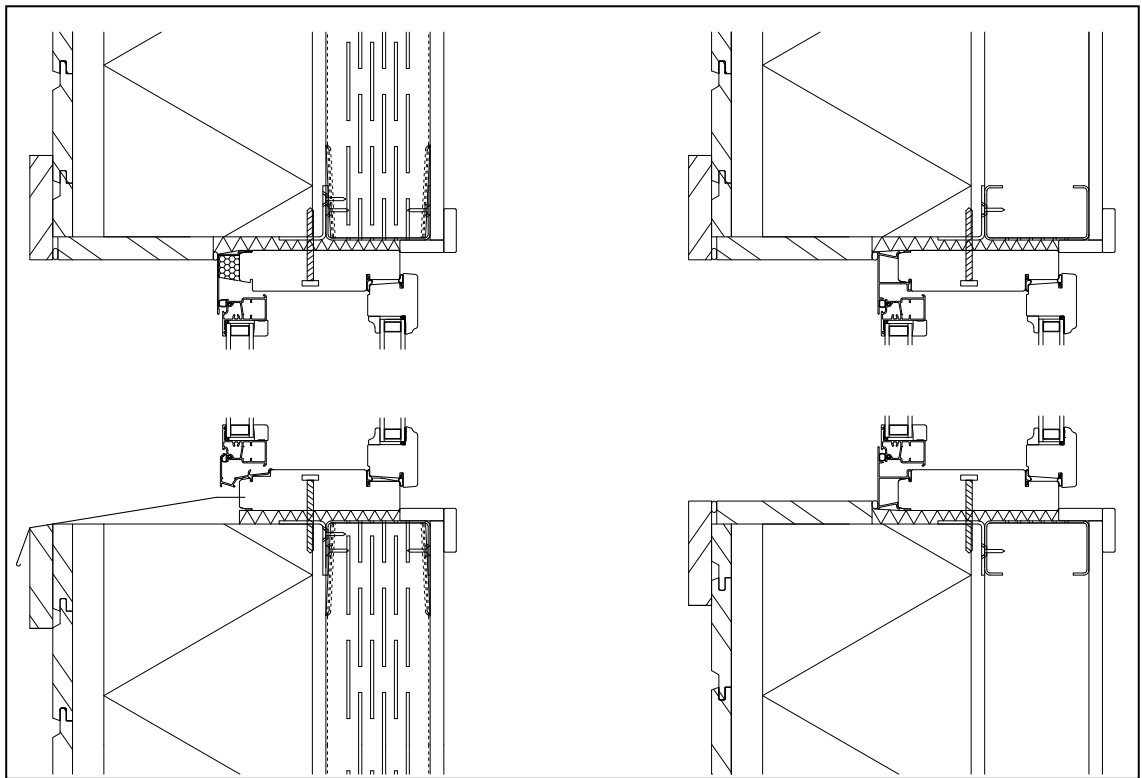
Ovien ja ikkunoiden kiinnittäminen elementtiin toteutetaan niin, että liitoksesta tulee tiivis ja mahdollisimman kylmäsillaton. Erityisesti teräspintoja, jotka ovat suorassa kontaktissa ulko- ja sisäilman kanssa, tulee välttää. Ikkunan lämpöä eristävä osa pyritään sijoittamaan ainakin osittain polyuretaanikerroksen sisälle. Koska kantava runko on kuitenkin polyuretaanin lämpimällä puolella, eikä elementissä ole kiinnityspintaa ikkunan tai oven karmille valmiiksi, täytyy sellainen elementtiin suunnitella. Yleisesti passiivitalon ulkovaipan heikoin kohta tiiviyden ja lämmöneristyskyvyn kannalta ovat ikkunat ja ovet. Siksi on tärkeää, että näihin liitoksiin kiinnitetään erityistä huomiota.

Elementin yläreunassa oleva palkki vie aukkojen yläpuoliset kuormat ikkuna- ja oviaukkojen kohdalla aukkojen sivuilla oleville pystyorsille, joten aukkojen koko vaikuttaa yläpalkin ja aukkojen sivuilla olevien orsien mitoittamiseen. Tällöin elementin orsirakenteet pysyvät mahdollisimman muuttumattomana myös aukkojen kohdalla verrat-

tuna siihen, että aukon kohdalla kuormat sivuille vievä palkki olisi suoraan ikkunan yläpuolella. Tämä parantaa entisestään elementin kustannustehokkuutta tuotannollisesta näkökulmasta, kun voidaan tehdä vakiorunkoista seinää myös aukkojen kohdalla. Yläpalkin mitoitus on esitetty kappaleessa 5.3.

Karmien kiinnitys runkoon hoidetaan L-orsilla, jotka kiinnitetään aukon sivuilla sekä ylhäällä ja alhaalla olevaan runkoon. Kiinnitykset tehdään poraruuveilla. Ruuvit välittävät tuulikuorman ja ikkunan painon L-orsille. L-orso voidaan mitoittaa näille voimille laattana, jossa on pistekuormia tai liitteessä 14 esitetyllä yksinkertaistetulla mallilla.

Voimat välitetään L-orrelta aukon reunoilla oleviin teräs-orssiin, C-orssille sivuilla ja U-orssille ylhäällä ja alhaalla. Aukon yläpuolella oleva U-orso välittää aukon ja seinärakenteen tuulikuormat sivuilla oleville C-orssille ja toimii kiinnitysalustana L-orrelle. U-orren ja C-orren liitoksessa voidaan käyttää esimerkiksi kulmaterästä ruuvikiinnityksellä. Aukon päällä olevien rakenteiden omapaino viedään aukon sivuilla oleville C-orssille elementin päällä kulkevan palkin avulla. Aukon sivuilla olevat C-orret mitoitetaan ProfBeamilla ottaen huomioon aukon aiheuttama lisäkuorma. Ovissa voidaan käyttää tarpeen vaatiessa tukevampia rankoja ja lisätukea oven alla. Ovien kiinnityksiä mitoitettaessa noudatetaan oven valmistajan ohjeita.



**Kuva 5.17.** Ikkunaliitos liitteessä 14 mitoitetulla rakenteella. Vasemmalla on liitoksen pystyleikkaus ja oikealla vaakaleikkaus. Karmien kuvat ovat Fenestra Oy:n DWG-kirjastosta.

L-orren laipan pituutta muuttamalla ikkuna voidaan asemoida halutulle syvyydelle elementissä. L-orren mitoitus riippuu ikkunan tai oven painosta sekä karmisyvyydestä ja karmen kiinnikkeiden sijainnista. Tyypillisiä ikkunan karmisyvyyksiä ovat 130 mm, 150

mm, 170 mm ja 210 mm, joista 170 mm ja 210 mm ovat useimpien energiatehokkaiden ikkunoiden karmisyvyysiksi. Ovien yleisimmät karmisyvyudet ovat 105 mm ja 115 mm.

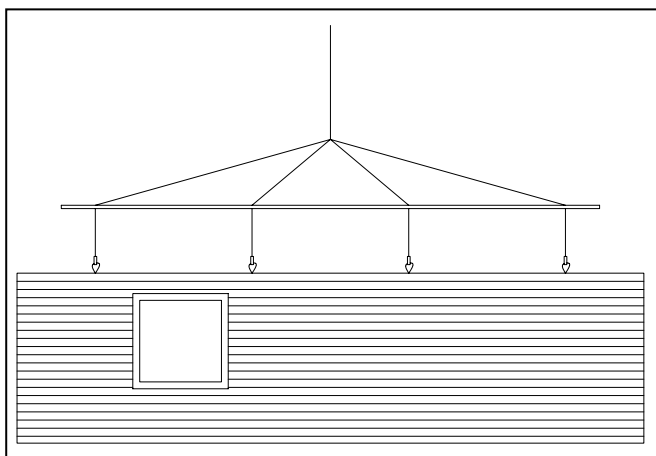
Ikkunan lämpöä eristävän kerroksen sijainnilla seinäelementin polyuretaanikerrokseen nähden on suuri merkitys aukon kylmäsiltojen kannalta. Lämmöneristävyyden kannalta ikkunan eristävä osa kannattaa sijoittaa keskelle polyuretaanikerrosta. Ikkunan sijainnilla on myös ulkonäöllisiä tekijöitä, jotka tulee ottaa huomioon. Ikkunan asema syvyys suunnassa onkin usein näiden kahden tekijän kompromissi.

Rakenteellisia rajoitteita ikkunan asemoimiselle polyuretaanikerrokseen nähden ei kuitenkaan ole. Esimerkiksi 2+2 ikkunassa, jossa karmisyvyys on 175 mm ja koko 12x12, voidaan olettaa, että kahden lasikerran välissä oleva ilma on puolilämmintä, joten ikkuna kannattaa sijoittaa keskelle lämmöneristyskerrosta. Ulkonäköseikoista johtuen käytetään kuitenkin 42 mm pitkää sisämyygiä, joka määrittelee ikkunan sijainnin elementissä syvyys suunnassa. Tämän tapauksen mitoitus on esitetty liitteessä 14. Rakenteellinen liitoksineen on esitetty kuvassa 5.17. Ikkunan kiinnitys voidaan toteuttaa muillakin tavoilla, kunhan liitos on tiivis ja mahdollisimman kylmäsiltoiton.

## 5.5 Elementin nostaminen

Kevyt ja suhteellisen ohut rakenne mahdollistaa elementin liikuttelun kevyelläkin kalustolla. Noin 2,5 metriä korkea elementti painaa noin 160 kg/m. Esimerkiksi passiivitasoinen betonisandwich-elementti 100 mm sisäkuorella, 250 mm polyuretaanilla ja 80 mm ulkokuorella painaa noin 1100 kg/m. Ilman ulkokuortakin toteutettuna, esimerkiksi eristerappauksella, kyseinen betonielementti painaa noin 650 kg/m. Elementin keveys vaikuttaa logistiikan lisäksi rakennuksen perustuksiin kohdistuvaan painoon. Erityisen pehmeälle maaperälle rakennettaessa tällä voidaan saavuttaa hyötyä.

Elementin ja sokkelin väliin asennetaan bitumihuopakaistale. Suositeltavaa on myös solumuovin käyttö bitumin lisäksi tiiviin liitoksen aikaansaamiseksi. Huopakaistale voi olla elementissä valmiina kiinni, kuten kuvassa 5.10 on esitetty, tai se asennetaan erikseen ennen elementin paikoilleen nostamista. Elementin nostoperiaate on esitetty kuvassa 5.18. Nostolenkkien määrä ja sijainti riippuu nostettavasta elementistä ja sen mitoituksesta.



**Kuva 5.18.** Elementin nostoperiaate.

Elementit tuetaan väliaikaisesti maahan yläreunastaan kiilatuilla vinotuilla tarpeen mukaan, esimerkiksi 2 tai 3 kpl per elementti. Tuet otetaan pois, kun rakennus on jäykistetty vesikaton levytyksen sekä mahdollisten jäykistävien väliseinien asennuksen jälkeen. Elementit suojataan säältä tarpeen vaatiessa. [22] Käyttämällä elementtirakenteisia kattojärjestelmiä, saadaan elementin kosteudelle herkät materiaalit säältä suojaan nopeasti.

Elementin täytyy kestää nostoista aiheutuvat kuormat, joten elementin liitoksien ja osien kestävyys on tarkistettava näille kuormille. Esimerkki mitoituksesta on liitteessä 15.

Elementin nostolenkit kiinnitetään kantavaan runkoon, eli elementin päällä kulkevaan teräspalkkiin. Tapauskohtaisesti elementin massakeskipiste syvyys suunnassa voi sijaita polyuretaanikerroksessa, kuten liitteen 15 esimerkkitapauksessa. Tämä aiheuttaa elementtiin vinoutta sitä nostettaessa. Tämä täytyy ottaa huomioon elementin asennusta suunniteltaessa. Esimerkiksi kuvassa 5.10 esitetyllä sokkeliliitosratkaisulla vinoudesta ei ole merkittävästi haittaa, mutta kuvan 5.9 sokkeliliitosratkaisulla vinoudesta voi aiheutua haasteita työmaalla.

Liitteen 15 esimerkkitapauksessa raskas 28 mm puuverhous ja suuri 30 mm tuuletusväli elementin ulkopinnassa siirtävät massakeskipistettä kauemmaksi kantavasta rungosta ja siten aiheuttavat vinoutta elementtiä nostettaessa. Jos verhous ja tuuletusvälin koolaus korvataan esimerkiksi kevyillä ja ohuilla terästuotteilla, elementti voidaan nostaa suurempana.

## 5.6 Ulkoverhous

Julkisivuverhousvalinnalla ja tuuletusvälin toteutustavalla voidaan vaikuttaa elementin kokonaispaksuuteen, ulkopinnan huoltotarpeeseen, pitkäikäisyyteen ja huoltoväliin sekä, kuten edellisessä kappaleessa todettiin, myös elementin suoruuteen sitä nostettaessa. Tuuletusvälin muodostava rakenne, esimerkiksi teräsorsi- tai puukoolaus, kiinnitetään polyuretaanikerroksen läpi  $\varnothing 4 \text{ mm}^2$  4 kpl/m<sup>2</sup> ansaisiin. Tähän tuuletusvälin muodostamaan rakenteeseen kiinnitetään haluttu julkisivuverhousmateriaali.

Julkisivuverhousmateriaali voidaan valita vapaasti lähes ilman rajoitteita. Ansaisiin voidaan kiinnittää useita eri materiaaleja, kuten puuta, tiiltä tai terästä. Usein kaavoituksessa määrätään alueella käytettävät julkisivuverhousmateriaalivaihtoehdot, joten julkisivuverhousmateriaalin valinnanvapaus edesauttaa elementin käyttöä eri alueilla kaavan ulkoverhousmateriaalimääräyksistä riippumatta.

Tuuletusväli nopeuttaa pintarakenteiden kuivumista ja edistää pintarakenteiden pitkäikäisyyttä sekä vähentää kosteuskuormaa sen lämpimällä puolella olevilla rakenteilla. Tuuletusvälin koko riippuu käytettävästä pintamateriaalista ja tuuletusvälin materiaalista.



### 5.6.1 Puupaneeli

Käytettäessä puuta verhouksessa ja tuuletusvälissä, ohjeistettu tuuletusväli on vaakapaneelia käytettäessä on 22 mm [4]. Työssä käytetty 30 mm tuuletusväli on yksi alalla vakiintuneista tuuletusvälin paksuuksista. Puuverhoilua käytettäessä paneelin paksuus yleensä 20 - 28 mm paksu. Puupaneelia käytettäessä tuuletusväli koolataan pystyyn vaakapaneelia käytettäessä ja ristiin pystypaneelia käytettäessä.

### 5.6.2 Rappaus

Rapattu pinta voidaan toteuttaa tuulettuvalla levyrappausjärjestelmällä, jossa tuuletusvälin koolaukseen kiinnitetään rappauslevy ja se rapataan. Jos tuuletusvälin koolauksessa käytetään terästä, tulee ottaa huomioon teräksen lämpöliikkeet. Rappaus on mahdollista tehdä myös suoraan polyuretaanin pintaan. Tällaisia ratkaisuja on kehitetty betonielementteihin ja niitä voisi soveltaa tässä rakenteessa. Suoraan polyuretaanin päälle rapattaessa eristelevy täytyy olla lujasti kauttaaltaan kiinni alustassaan, jotta liikkeet polyuretaanin pinnalla saadaan minimoitua. Suoran rappauksen käyttö tässä elementissä vaatii kuitenkin jatkotutkimusta. Rakenteessa voidaan käyttää myös ohutrappausa mineraalivillan päälle, joka on integroitu SPU Eristeeseen.

### 5.6.3 Tiili

Tiiliverhousta käytettäessä sokkeli täytyy tehdä lämpökatkaistuna, jotta ulkoverhouksmuuraus voidaan tehdä tukevalle alustalle. Lisäksi ansaiden tilalla käytetään tarkoitukseenmukaisia muuraussiteitä. Tiilijulkisivulla tuuletusvälinä käytetään usein 30 mm. Julkisivumuuraus tehdään työmaalla, mutta elementtitehtaalla kiinnitettävien muuraussiteiden pituuden vuoksi elementin kokonaispaksuus saattaa kasvaa yli 384 mm.

### 5.6.4 Teräs

Jos pintaverhousmateriaalina käytetään terästä, Rautaruukki Oyj:ltä löytyy paljon valmiita ulkoverhousjärjestelmiä, jotka on tarkoitettu pääosin suuremman mittakaavan rakentamiseen. Valikoimista löytyy esimerkiksi matalia poimulevyjä, kasetteja ja lamelleja, joita yhdistelemällä on mahdollista toteuttaa arkkitehtuurisesti korkeatasoisia ja pitkäaikaiskestävyydeltään kestäviä sekä huoltotarpeeltaan helppoja pintarakenteita. Näitä ulkoverhousmateriaaleja käytettäessä yhdessä Rautaruukki Oyj:n koolausjärjestelmien kanssa, saavutetaan ulkopintarakenne, jossa ei ole yhtään orgaanista tai muuten ulko-osuhteille herkkää materiaalia ja huollon tarve on minimaalinen. Matalien poimulevyjen paksuudet vaihtelevat 6 - 55 mm, kasettien 5 - 30 mm ja lamellien 30 - 40 mm välillä. Esimerkiksi Rautaruukki Oyj:n 20 mm CA1SS koolausrankaa ja 10 mm paksuista matalaa poimulevyä käytettäessä elementin kokonaispaksuus jää 356 mm. Tämä antaa pelivaraa esimerkiksi erilaisille palokatkoille ja muureille P1- ja P2-luokan rakenteissa elementin kokonaispaksuutta ajatellen.

### 5.6.5 Aurinkopaneeli

Rautaruukki Oyj:llä on valikoimissa teräspaneeli, johon on integroitu aurinkosähköjärjestelmä. Järjestelmä muuttaa auringon säteilyn sähköksi parantaen rakennuksen omavaraisuutta sähkön suhteen. Se ei ole riippuvainen lämmöstä, vaan ainoastaan säteilystä. Tätä paneelia voidaan käyttää joustavasti muiden Rautaruukki Oyj:n julkisivuverhouksjärjestelmien kanssa ja aurinkopaneelien tuottamaa sähkön määrää ja tehoa voidaan kasvattaa myös jälkikäteen lisäämällä paneelien määrää jälkiasennuksena. Paneeli näyttää ulospäin normaalilta, lähes mustalta täyslasijulkisivulta. Rautaruukki Oyj:n aurinkopaneelijärjestelmä avaa mielenkiintoisia mahdollisuuksia tulevaisuuden nolla- ja plusenergiarakentamista ajatellen.

## 5.7 Talotekniikka

Talotekniikka on lisääntynyt huomasti nykyrakentamisessa. Erilaiset laitteet ja järjestelmät, kuten esimerkiksi verkkokaapelit, sähköt ja keskuspölynimuri, vaativat oman asennustilansa myös ulkoseinärakenteessa. Talotekniikka suunnitellaan seinäelementtiin kohdekohtaisesti valmistustavasta aiheutuvat rajoitteet huomioon ottaen. Tässä kappaleessa esitetään kuitenkin huomioita asioita ja yleisiä periaatteita koskien talotekniikkaa.

### 5.7.1 Asennustila

Elementissä kuljetettavat talotekniikan vedot ja asennukset viedään kahden kipsilevyn välisessä tilassa. Kun kaikki talotekniikka saadaan vietyä polyuretaanikerroksen lämpimällä puolella, höyrünsulkua ei tarvitse puhkoa esimerkiksi pistorasioiden kohdalta, kuten perinteisissä rakenneratkaisuissa.

100 mm korkuinen asennustila riittää suuremmillekin putkille. Esimerkiksi keskuspölynimurin putket mahtuvat vaivatta tähän tilaan. Suurin osa kaapeleista ja putkista voidaan viedä mineraalivillan sisällä tai osittain mineraalivillan joukossa.

Sähköjohtoja ei saa viedä mineraalivillan joukossa tai polyuretaanin ja mineraalivillan välissä, vaan ne viedään mineraalivillan ja sisemmän kipsilevyn välissä. Sähköjohtojen asennuksen apuna voidaan käyttää putkituksia.

Myös sähköasiat asennetaan asennustilaan. Rasia kiinnitetään teräsorteen halutulle korkeudelle. Tarvittaessa rasialle voidaan tehdä lisätukia kevyillä teräsorsilla kantavaa runkoa hyödyntäen. Sähköasennukset tulee tehdä sähkösuunnittelijan ja sähköalan turvallisuusohjeiden ja määräysten mukaan.

### 5.7.2 Läpiviennit ja reiät

Koko seinärakenteen läpi menevät läpiviennit, kuten ilmanvaihtoputket, tiivistetään polyuretaanikerrokseen polyuretaanivaahdolla. Läpivietävän putken ja polyuretaanin väliin jätetään 10 - 20 mm tila vaahdotusta varten. Läpivienti vaahdotetaan kahdella yhtenäisellä vaahdotusta, jotta liitoksesta tulee varmuudella tiivis. Vaahdotettaessa tulee ottaa huomioon polyuretaanivaahdon paisuminen. Ylimääräiset vaahdotukset lei-

kataan pois. Vaahtokaistat tulisi pyrkiä kuitenkin vaahdottamaan niin, että leikkaamista ei tarvitse tehdä.

Jos putkituksia joudutaan viemään vaakasuunnassa, täytyy kantavaan pystyorteen tehdä reikiä. Reiät pitää pyrkiä sijoittamaan orren uumaan, koska suurin osa kuormista välittyy C-poikkileikkauksessa laippojen ja reunakäänteiden sekä uuman uloimpien alueiden kautta. Kuten kuvassa 4.3 on esitetty, poikkileikkauksen kuormituskapasiteetti on käytetty lähes täysin kokonaan. Jos orteen tehdään paljon reikiä, voi sen kantokyky heikentyä siinä määrin, että orren paksutta on kasvatettava. Rankojen rei'ittämistä tulisi välttää ja kuljettaa vaakavedot yläpohjassa tai muussa tilassa ja tuoda ne sitten alas seinän asennustilaan oikealla kohdalla. Isompien reikiä kohdalla tulee tarkastella orren kantavuus kohdekohtaisesti.

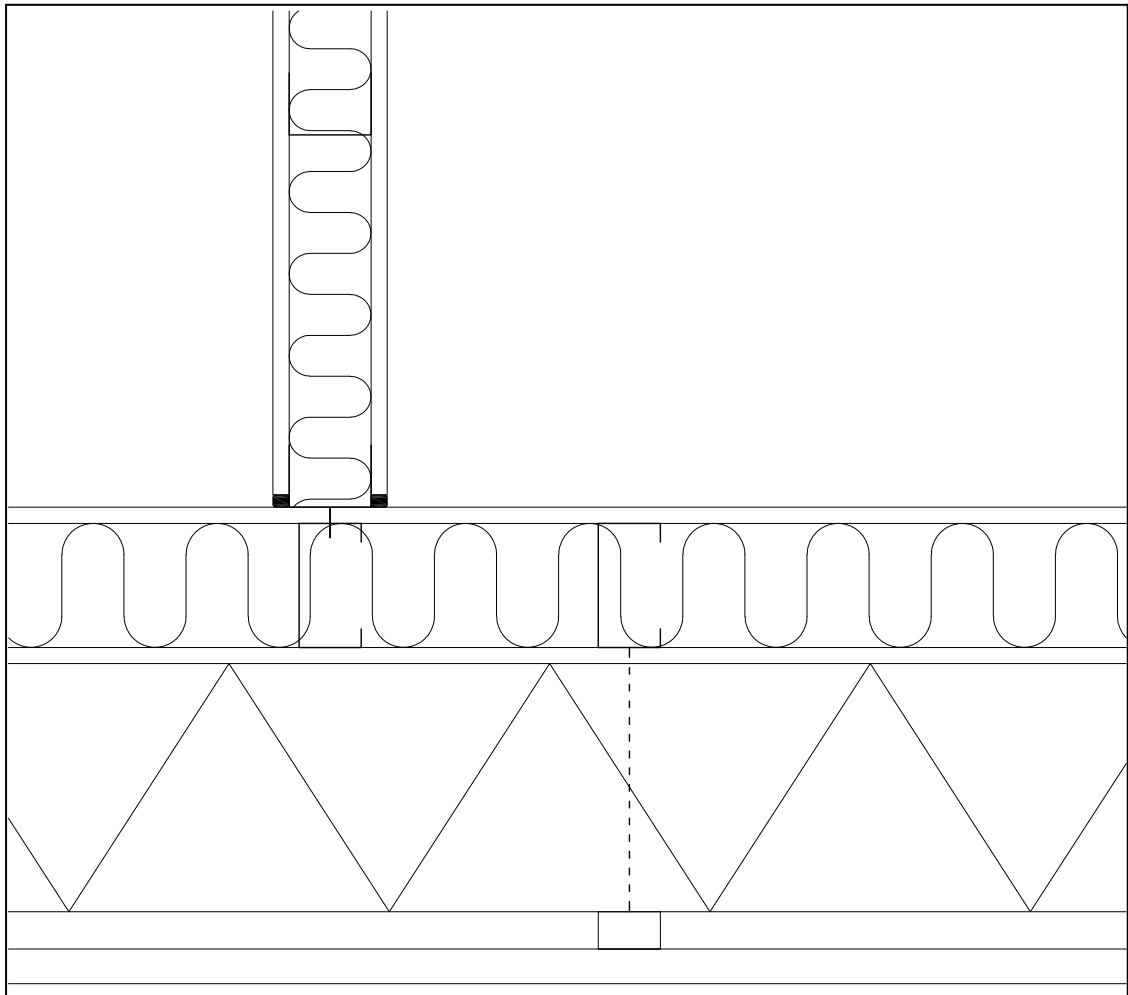
Elementin yläreunaan tehtävien rei'itysten rajoitukset riippuvat elementin yläreunan ja yläpohjan rakenneratkaisuista ja reikiä vaikutus rakenteisiin tulee tarkastella tapauskohtaisesti. Esimerkiksi  $\Omega$ -orrella toteutettuna elementin yläreunan rei'itys ei aiheuta suuria toimenpiteitä, kun reiät tehdään  $\Omega$ -orren uumaan, koska suurin osa orren kuormituksesta kohdistuu laipoille. Vastaavasti pystyyn asennetulla putkipoikkileikkauksella reikiä vienti putken lämpimältä puolelta ei aiheuta ongelmia.

## 5.8 Väliseinät

Ulkoseinäratkaisu ei rajoita erityyppisten väliseinien käyttöä rakennuksessa. Väliseiniksi soveltuvat erilaiset teräsorsi-, puurunko-, betoni- tai harkkoratkaisut. Tuotannollisuuden ja kustannustehokkuuden näkökulmasta teräsorsista toteutettu väliseinäratkaisu sopii hyvin käytettäväksi tarkasteltavan ulkoseinäelementin kanssa, koska kevyistä teräsorsista tehdyn väliseinän rakenne on peruseräiteiltään samanlainen ulkoseinäratkaisun kantavan osan kanssa. Kantavan osan orsien molemmin puolin on kipsilevy ja välissä mineraalivilla. Koska ulkoseinän kantava osa on samanlainen väliseinän kanssa, voidaan väliseinäelementit ja ulkoseinän kantava osa tehdä samalla linjastolla. Tämä parantaa rakennuksen kustannustehokkuutta ja on teollisesti helposti toteutettavissa.

Teräsrunkoinen väliseinä voidaan tehdä kuvan 5.19 mukaisesti 66 mm korkealla U-orrella, jonka molemmin puolin on 13 mm kipsilevyt. Väliseinän rungon kiinnitys ulkoseinään voidaan tehdä kuvan 4.7 mukaan, jolloin sivutiesiirtymät vähenevät merkittävästi väliseinällä erotettujen huoneiden välillä. Kiinnitys voidaan tehdä yksinkertaisemmin kuvan 5.19 mukaan. Väliseinä liitetään poraruuveilla ulkoseinän orteen.

Jos ulkoseinän kantava orsi ei osu väliseinän kohdalle, voidaan väliseinän kiinnitystä varten lisätä ylimääräisiä orsia ulkoseinäelementtiin. Suunnittelussa tulisi kuitenkin pyrkiä sijoittamaan väliseinät siten, että ulkoseinän kantavia orsia voidaan hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti. Tarvittaessa väliseinistä voidaan tehdä kantavia ulkoseinän kantavan osan tavoin. Tämä tekee rakennuksen suunnittelusta joustavaa, mutta ei kuitenkaan aiheuta suuria muutoksia elementin tuotantoon.



**Kuva 5.19.** Väliseinäelementti ja sen liitos ulkoseinään.

Väliseinäelementit voidaan nostaa paikoilleen samalla kertaa, kun ulkoseinät asennetaan. Yksi vaihtoehto on myös asentaa kaikki väliseinäelementit ja ulkoseinäelementin kantavat osat paikoilleen ja tehdä eristystyö työmaalla.

## 5.9 Kiintokalusteiden kiinnitys

Kiintokalusteet voidaan kiinnittää väliseinällä ja ulkoseinällä teräsorsiin. Tämä ei kuitenkaan aina riitä kiinnityspinnaksi esimerkiksi keittiön kiintokalusteiden kohdalla, jolloin kalusteiden paikat määräytyisivät ulkoseinän orsien sijainnin mukaan.

### 5.9.1 Sisällä

Väli- ja ulkoseiniin voidaan asentaa ohuita teräslevyjä kalusteiden kiinnitystä varten. Teräslevyt asennetaan sisemmän kipsilevyn ja teräsorren väliin. Levyjen korkeus lattiapinnasta valitaan ottaen huomioon asennettavat kiintokalusteet. Yleisimmät kiinnityskorkeudet esimerkiksi keittiön työtasolle vaihtelevat 800 - 900 mm välillä. Vastaavasti keittiön yläkaapistojen kiinnityskorkeus on usein 1400 - 2100 mm välillä.

Tarvittaessa teräslevyä voidaan vetää vakiokorkeuksille kaikkiin elementteihin, jolloin seinään voidaan kiinnittää runkojaosta riippumatta raskaampia kalusteita. Teräslevyjen paksuutta voidaan vaihdella tarpeen mukaan, mutta yleisesti käytettyjä paksuuksia ovat 1,0 mm tai paksummat levyt.

Vaikka ylimääräisen teräslevyn vuoksi kipsilevyn kiinnityspintaan tulee epätasaisuutta, on epätasaisuus kuitenkin niin pientä, ettei se aiheuta toimenpiteitä tai esteettisiä haittoja. Myöskään kipsilevyn kiinnitys orteen ei teräslevyn vuoksi vaarannu.

Vaihtoehtoisesti sisäkipsilevy voidaan korvata esimerkiksi vanerilla, jolloin kalusteiden kiinnitys helpottuu entisestään.

## **5.9.2 Ulkona**

Seinän ulkopuolelle kiinnitettävät osat, kuten tikkaat, kiinnitetään alhaalla sokkeliin ja ylhäällä yläpohjan rakenteisiin. Seinän osuudella kiinnitykset tehdään tuuletusvälin koolaukseen. Raskaat osat otetaan huomioon koolausta ja ansaita mitoitettaessa. Esimerkiksi tikkaiden pääasiallinen kiinnitys pyritään kuitenkin hoitamaan sokkelin ja yläpohjan kiinnityksillä. Kaikissa kiinnityksissä noudatetaan kiinnitettävän osan valmistajan ohjeita.

## **5.10 Laatu ja käsittely**

Elementin laadusta voidaan varmistua elementin valmistusvaiheessa ja rakennusvaiheessa. Keskeisimmät tarkasteltavat seikat ovat lopullisen rakenteen toimivuuden kannalta elementtien asianmukainen kiinnitys ja liitokset sekä elementin oikeaoppinen käsittely ja suojaus. Elementin mittatarkkuuden ja suunnitelmien mukaisen toteutuksen hallinta riippuu elementin valmistustavasta. Elementin asentaminen ja liitosten teko sekä tiivistäminen oikein voidaan varmistaa tarkistamalla rakenteet ennen niiden peittämistä mineraalivillalla ja kipsilevyllä.

### **5.10.1 Saumojen vaahdotus**

Polyuretaanikerroksen saumojen tiivistäminen on keskeinen työvaihe rakenteen ilmanpitävyyden, kosteusteknisen toimivuuden sekä hyvä lämmöneristyskyvyn kannalta. Vaahdotuksen onnistumista on vaikea arvioida rakennusvaiheessa, koska vaahtokerrosta voidaan tarkastella vain sauman ulkopuolelta. Siksi on tärkeää, että vaahdotus tehdään oikein ja huolellisesti.

Elementin saumojen vaahdotuksen onnistumisesta voidaan varmistua vasta, kun rakennus on valmis ja sille tehdään painekoe ilmanvuotoluvun määrittämiseksi ja lämpökamerakuvaus pakkasolosuhteissa. Mahdolliset vuotokohdat voidaan näin paikantaa ja korjata.

Vaahdotuksessa kannattaa käyttää vähänpaisuvaa vaahtoa, jolloin vaahton määrän arviointi vaahdottaessa on helpompaa. Vähän paisuvaa vaahtoa käytettäessä myös riski, että paisuva vaahto rikkoo tai taivuttaa elementin rakenteita, on pienempi. Vaahdotetta-

essa tulee pyrkiä siihen, että vaahtoa ei paisu sauman ulkopuolelle, koska kun ylimääräinen vaahto leikataan pois, sauman tiiviys heikkenee hieman.

### 5.10.2 Suojaus ja rakentamisen kosteudenhallinta

Elementin käsittely ja suojaus tulee hoitaa niin, että elementti ei vaurioidu sitä varastoidessa ja käsiteltäessä. Suurin haaste, liittyen käsittelyyn ja suojaukseen, on kosteudenhallinta kaikissa elementin rakennus- ja asennusvaiheissa. Elementtiä käsiteltäessä on myös muistettava, että UV-säteily aiheuttaa esteettistä haittaa paljaan polyuretaanin pinnalla. Pinta muuttaa väriään ja siihen muodostuu hienojakoista pölyä. Eli jos polyuretaani on ollut alttiina auringonvalolle pitkiä aikoja, vaahdotettavat tai pinnoitettavat pinnat tulee harjata puhtaaksi ennen työn jatkamista.

Rakentamisen kosteudenhallintaan on panostettu kasvavassa määrin viime aikoina, koska siinä on havaittu puutteita. Rakentamisen kosteudenhallinta käsittää rakennusaikana rakenteisiin pääsevät kosteuden määrän hallinnan ja rakenteiden kuivumisen. Rakentamisen kosteudenhallinnalla pyritään pienentämään kosteusvaurioriskejä ja vähentämään kosteusvaurioiden syntyä, jolloin korjaustöiden määrä vähenee, materiaalihukka pienenee ja rakenteiden kuivaustarve pienenee. Rakentamisen kosteudenhallinta edellyttää kosteushallintasuunnitelman laadintaa ja rakennustöiden aikataulutusta siten, että se ottaa riittävissä määrin huomioon sääolosuhteet.

Elementin valmistustapaan ei tässä työssä oteta tarkasti kantaa, mutta eri valmistustapavaihtoehtoja on pohdittu. Seinäelementti voidaan valmistaa elementtitehtaalla hyvin korkealle esivalmistusasteelle ja asentaa työmaalla paikoilleen. Vaihtoehtoisesti kantava osa, johon kuuluvat teräsorsi, kipsilevyt ja mineraalivilla, ja polyuretaanikerros voidaan valmistaa ja asentaa työmaalla erikseen. Seinärakenne voidaan rakentaa myös kokonaan työmaalla ilman elementtien käyttöä, vaikkakin se ei välttämättä ole järkevää tässä työssä tutkittavalla C-ratkaisulla. Esimerkiksi  $\Omega$ -ratkaisu voisi soveltua paremmin kokonaan työmaalla tehtäväksi rakenteeksi.

Kun työmaalla rakentaminen lisääntyy, eli siirrytään valmiin elementin asennuksesta elementtiosien asennukseen työmaalla tai rakennetaan koko rakenne paikanpäällä, täytyy työmaalla kiinnittää rakentamisen kosteudenhallintaan enemmän huomiota. Elementin sääolosuhteille herkkiä materiaaleja ovat kipsilevyt ja mineraalivilla. Suojaustarve työmaalla riippuu ennen kaikkea yläpohjaratkaisusta ja sen asennusnopeudesta. Jos seinäelementit saadaan säältä suojaa nopeasti, esimerkiksi SPU Passiivikattoelementtejä käyttämällä, seinäelementtien suojaustarve ja riski vaurioitua pienenee. Elementtien varastointia työmaalla tulee välttää, koska suojaus työmaalla on aina haastavampaa kuin elementtitehtaalla, vaikka elementissä on usein muovisuoja valmiina työmaalle saapuessaan.

Myös elementtitehtaalla on kiinnitettävä huomiota säältä suojaamiseen. Luonnollisesti elementin rakentaminen tehdään sisätiloissa, mutta varastointi ja siirrot tulee tehdä siten, etteivät elementin mineraalivilla ja kipsilevyt pääse kastumaan ja vaurioitumaan. Elementtejä käsiteltäessä ja siirreltäessä on syytä kiinnittää huomiota niiden huputukseen. Jos elementti on pitkiä aikoja huputettuna tiiviinä pakettina ja hupun alle on jäänyt

pieniä määriä kosteutta, elementin herkät materiaalit voivat vaurioitua. Siksi on tärkeää, että huppua käytetään ainoastaan kuljetus- ja asennusaikaisena suojana, eikä pitkäaikaisena varastointisuoja. Elementin kastuessa on varmistettava, että se pääsee nopeasti esteettä kuivumaan.

### 5.10.3 Vaurioiden toteaminen ja korjaaminen

Rakennusaikaisien kosteusvaurioiden toteaminen ja korjaaminen on aina kalliimpaa, kuin elementtien oikeaoppinen käsittely. Jos elementteihin kuitenkin tulee kosteusvaurioita, ne täytyy pystyä havaitsemaan ja korjaamaan. Kosteusvaurioille herkät materiaalit sijaitsevat elementin lämpimällä puolella. Kun kattorakenne on asennettu ja sisätilat ovat säältä suojassa, voidaan mahdolliset kosteusvauriot korjata usein säältä suojassa kuivassa ja lämpimässä tilassa, jolloin elementin lisävaurioitumisriski on pieni.

Kuten kappaleessa 5 on esitetty, elementtien kiinnityksen vuoksi sisempi kipsilevy jätetään tehtaalla asentamatta elementin sivuilla. Ennen näiden kipsilevyjen asentamista voidaan tarkistaa mineraalivillan ja ulomman kipsilevyn kunto elementin reunoilla. Elementin keskiosien kunto voidaan tarkistaa avaamalla rakenne halutulta kohdalta ja poistaa mineraalivilla, jotta päästään käsiksi ulompaan kipsilevyyn.

Kaikki kosteudelle herkät materiaalit ovat seinärakenteen varsinaisen lämmöneristeen lämpimällä puolella, joten niiden kuivuminen sisäänpäin on nopeaa. Pahoin vaurioitunut sisempi kipsilevy ja rankojen välissä oleva mineraalivilla voidaan vaihtaa uusiin helposti sisältä päin säältä suojassa. Jos ulompi kipsilevy vaurioituu, on korjaus huomattavasti haastavampaa. Ulompaa kipsilevyä ei pystytä vaihtamaan ilman mittavia purkutöitä, koska se on toisiinsa ansailla kytkettyjen polyuretaanikerroksen ja Termorankojen välissä. Ulommalla kipsilevyllä on tärkeä tehtävä rankojen jäykistäjänä, joten sen osittainen vaihto sisäpuolelta ei tule kysymykseen.

Tämän takia ulomman kipsilevyn suojaus on ensisijaisen tärkeää. Koko elementti saattaa olla käyttökelvoton jos ulompi kipsilevy vaurioituu pahoin. Ulomman kipsilevyn korvaamista paremmin kosteutta kestäväällä levyllä kannattaa harkita. Tähän voisi soveltaa hyvin esimerkiksi sementtilevy tai magnesiumoksidilevy, joista magnesiumoksidilevy kevyempänä ja edullisempänä saattaisi olla parempi vaihtoehto. Oikeaoppisella elementin käsittelyllä ongelmia ei kuitenkaan pitäisi tulla.

### 5.10.4 Yhteenveto

Elementin mittatarkkuus ja laatu varmistetaan tehtaalla elementtirakennuslinjastosta riippuvilla menetelmillä ja mittareilla. Työmaalla tehtävien liitosten suunnitelmien mukaisuus voidaan todeta ennen liitosten peittämistä päällimmäisillä rakenteilla. Polyuretaanikerroksen saumojen vaahdotuksen onnistuminen voidaan todeta rakennuksen valmistuttua määrittämällä rakennuksen ilmanvuotoluku painekokeella ja kuvaamalla saumat lämpökameralla. Elementin mahdolliset kosteusvauriot voidaan kartoittaa asennuksen yhteydessä liitosten kohdilta ennen niiden peittämistä. Jos on epäily rakennusaikaisista kosteusvaurioista, rakenteita voidaan tarkistaa paikallisilla rakenneavauksilla.

Tarvittavat korjaustyöt voidaan tehdä sisällä lämpimissä ja kuivissa olosuhteissa säältä suojassa. Ulomman kipsilevyn kosteusvauriot sekä saumojen vaahdotuksen epäonnistuminen ovat vaarallisimmat paikat, joissa epäonnistumalla aiheutetaan eniten haittaa rakenteen terveellisyydelle ja tarkoituksenmukaiselle toimivuudelle. Lisäksi näiden virheiden, etenkin ulomman kipsilevyn turmeltumisen, korjaus on haastavaa ja kallista jälkeinpäin. Siksi elementin suojaukseen ja saumojen vaahdotukseen on kiinnitettävä aivan erityistä huomiota rakennusvaiheessa.



## 6 TULOKSET

Diplomityön tuloksena saatiin kolme toisistaan poikkeavaan rakennevaihtoehtoa passiivitasoiselle polyuretaanieristeiselle teräsrakenteiselle pientalon seinäelementille. Vaihtoehtoista tehtiin materiaalikustannusarviot katteellisilla Rautaruukki Oyj:n ja SPU Oy:n antamalla materiaalihinnoilla sekä kantavan rungon ja lämmöneristeiden mitoitus. Pääosin tuotannollisiin syihin ja materiaalikustannuksiin perustuen valittiin yksi rakennevaihtoehto yli muiden, jota tarkasteltiin yksityiskohtaisemmin. Tuloksena saatiin valitulla rakenteella toteutetun elementin valmistukseen, asentamiseen ja käyttöön tarvittavat periaateratkaisut yksityiskohdista, joita voidaan käyttää pohjana lopullista tuotetta hahmoteltaessa elementtiä valmistavan yrityksen kanssa.

Uusien rakenneratkaisujen innovatiivinen etsiminen tuotti paljon hyviä ideoita, jotka kuitenkin vaativat paljon jatkotutkimusta ja tarkempaa perehtymistä. Näiden ideoiden potentiaalia arvioitiin suhteessa ensisijaiseen ratkaisuun ja vaikka ensisijainen ratkaisu sopii hyvin teolliseen tuotantoon, saattaa jatkotutkimusta vaativat ideat poikia uusia mahdollisuuksia tulevaisuudessa. Lisäksi ensisijaista ratkaisua tarkasteltaessa nousi pintaan kysymyksiä, jotka kaipaavat lisäselvitystä. Jatkotutkimusta vaativat ideat ja haasteet on esitetty tiivistetysti kappaleessa 7.4.

Kaiken kaikkiaan diplomityö valottaa polyuretaanieristeisen teräsrakenteisen pientaloseinäelementin mahdollisuuksia ja rajoitteita. Se tarjoaa ohuen ja kevyen elementtiratkaisun, joka toimii kosteusteknisesti hyvin Suomen ilmastossa. Lisäksi sillä on erinomainen lämmöneristyskyky ja edellytykset pitkään käyttöikään.

### 6.1 Rakennevaihtoehdot

Rakennevaihtoehtoista valittiin kolme lupaavinta ratkaisua, joista yhteen perehdyttiin tarkemmin. Kaksi muuta vaihtoehtoa vaativat lisätutkimuksia kantavuuden ja yksityiskohtien osalta.

Ensisijainen rakenne, jonka yksityiskohtiin ja rakennusfysikaaliseen toimivuuteen perehdyttiin tarkemmin, on esitetty pääpiirteittäin kuvissa 3.7 ja 5.1. Yksityiskohtaisia kuvia elementin osista on esitetty kappaleen 5 kuvissa. Elementissä on sisäpuolella kahden 13 mm kipsilevyn välissä Termorankarunko. Pystyorsina käytetään kuvan 3.5 mukaista C-orrtta. C-orret sidotaan elementissä yhteen ylhäällä ja alhaalla kulkevilla, tapauskohtaisesti mitoitettavilla, U-orsilla. Elementin päällä kuormia tasaamassa on teräspalkki, joka mitoitetaan myös tapauskohtaisesti. Termorankarungon välissä on 100 mm mineraalivillaa. Kantavasta rungosta, kipsilevyistä ja mineraalivillasta koostuvan kantavan osan kylmälle puolelle liitetään ansain 200 mm kerros polyuretaania. Ulkover-

housmateriaalin kiinnitystä varten asennettava koolaus tai muu tukirakenne kiinnitetään ansaisiin ja ulkoverhousmateriaali kiinnitetään tähän rakenteeseen.

Vaihtoehtoinen rakenne ensisijaiselle rakenteelle on Z-orrella toteutettu ratkaisu, joka on hyvin samankaltainen ensisijaisen rakenteen kanssa. Z-orrella toteutettu ratkaisu on esitetty kuvassa 3.7. Kantavana runkona käytetään Z-ortta ilman termorei'itystä. Kantavassa osassa on kipsilevy ainoastaan sisäpinnassa.

Toinen vaihtoehtoinen rakenne poikkeaa muista valituista rakenteista merkittävästi. Siinä kantavan rungon muodostaa koko seinärakenteen levyinen polyuretaanipilari, jonka molemmissa sivuissa on liimattuna teräs-orisi. Ulommainen U-orisi on ulkoverhouksen kiinnitystä varten ja sisempi  $\Omega$ -orisi kantaa varsinaiset kuormat. Tämä vaihtoehto on esitetty myös kuvassa 3.7. Polyuretaanipilarilla voisi löytyä laajasti käyttöä erilaisissa hyvin lämpöä eristävissä rakenteissa.

Vaihtoehtojen materiaalikustannukset on esitetty liitteessä 5. U-arvoja, rakennekerrosten paksuuksia, kustannuksia ja muita valintaan vaikuttavia tekijöitä on koottuna taulukoissa 3.4 ja 3.5.

## 6.2 Tulosten tarkkuus

Tietokoneohjelmilla tehtyjen mitoituksien tarkkuus on hyvä. Eniten haastetta totuudenmukaisien tulosten saamiseksi oli lähtöarvojen arvioinnissa. Rakenteiden kantavuutta ja lämmöneristävyyttä täytyi pystyä arvioimaan jo työn alkuvaiheessa vaikka rakenteen yksityiskohdat tarkentuivat vasta työn edetessä. Tämä aiheutti epätarkkuutta esimerkiksi rakenteen omaa painoa arvioidessa.

Lisäksi kantavuuteen liittyvät mitoitusapaukset riippuvat monesta muuttujasta, kuten rakennuksen sijainnista, korkeudesta, kerrosten lukumäärästä jne. Siksi useimmat mitoitukset ovatkin esimerkinomaisia eikä niitä tulisi käyttää sellaisenaan todellisen kohteen rakenteissa. Erityisesti yksityiskohtien mitoitusmerkit tarjoavat hyvän lähestymistavan todellisen kohteen liitoksien mitoitukselle, mutta sellaisenaan niitä ei tulisi käyttää. Yksityiskohtien mitoitusmerkit ovat turvallisella puolella olevia yksinkertaistettuja esimerkkejä. Haluttaessa yksityiskohtia voidaan tarkastella tarkemmalla tasolla, jolloin voidaan päästä ohuemmilla rakenteilla ja liittimillä. Kantava runko on mitoitettu niin, että sen kuormituskapasiteetti on käytetty lähes kokonaan.

Lämmöneristepaksuuksien mitoitus on erittäin tarkka ja U-arvot on pyöristetty normaalien pyöristyssääntöjen mukaan. HEAT-ohjelmien ilmoittava virhe U-arvoa määrittäessä on merkityksettömän pieni ja se häviää pyöristyksissä.

Kustannuksia arvioidessa käytössä oli vain materiaalikustannukset, koska elementin tarkka tuotantotapa oli auki. Vaikka materiaalikustannukset pitävät varmasti suuruusluokkansa puolesta paikkansa, todelliset tuotantokustannukset elementille selviävät vasta, kun tuotantotavasta on päätetty. Tällöin eri rakenteiden välille voi löytyä suurempia kokonaiskustannuseroja, kuin mitä materiaalikustannustarkastelu antaa ymmärtää.

Materiaalikustannusarviossa yksittäisten materiaalien osalta polyuretaanin osuus on suurempi kuin kantavien teräsrakenteiden osuus. Tässä materiaalikustannuslaskennassa

ei kuitenkaan otettu mukaan yksityiskohdissa käytettäviä teräsosia ja muita teräsosavaihtoehtoja, kuten ulkoverhousmateriaaleja, koska laskentaa tehdessä elementti oli hahmoteltu vasta hyvin yleisellä tasolla.

### 6.3 Tavoitteiden saavuttaminen

Diplomityön tuloksena saatiin kaikki reunaehdot täyttävä elementtiratkaisu, joka soveltuu hyvin teolliseen tuotantoon. Elementin U-arvo on  $0,092 \text{ W/m}^2\text{K}$ , kun tavoitearvo oli  $\sim 0,090 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Tässä vaatimuksessa oli kuitenkin joustovaraa, jos ratkaisu muilta osin oli hyvä. Elementin kokonaispaksuus ei saanut ylittää 384 mm. Elementin kokonaispaksuus on puuverhoilun kanssa tasan 384 mm, joten se täyttää ohuusvaatimuksen. Lisäksi elementti oikein asennettuna tarjoaa hyvät lähtökohdat tiiviille talolle, jonka  $n_{50} \leq 0,6 \text{ 1/h}$ .

Elementti läpäisee sille asetetut raja-arvot. Kuitenkin, kuten kappaleessa 3.3 todetaan, tehokkaampien polyuretaani- ja mineraalivillaeristeiden käytöllä voidaan päästä U-arvossa lähelle  $0,080 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Lisäksi käyttämällä Rautaruukki Oyj:n ulkoverhousjärjestelmiä elementin kokonaispaksuutta saadaan pienennettyä useita kymmeniä millimetrejä, jolloin elementissä voidaan halutessa käyttää paksumpaa polyuretaanikerrosta ja siten parantaa entisestään elementin U-arvoa. Rakennusmateriaalien kehittymisen ja materiaalivalintojen avulla voidaan siis valmistaa tarkastellulla rakenteella selvästi tavoitteita ohuempi ja paremmin lämpöä eristävä elementti.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Polyuretaanieristeisellä teräsrakenteisella pientaloelementillä on saavutettavissa selvää etua puu- ja kivirakenteisiin pientaloelementteihin nähden teollisessa tuotannossa, keveydessä, ohuudessa ja pitkäaikaiskestävyydessä. Laajan valikoimansa ansiosta kevytorret mahdollistavat suuren määrän erilaisia variaatioita rakenteissa ja niiden yksityiskohdissa. Polyuretaanin erinomaisen lämmöneristävyyden ansiosta yhdistettynä ohuisiin teräsrakenteisiin, myös passiivitasoiset rakenteet voidaan toteuttaa ohuina.

Polyuretaanin käyttö on yleistä energiatehokkaassa rakentamisessa muun muassa sen erinomaisen lämmöneristyskyvyn ansiosta. Aikaisemmin passiivirakennukset ovat olleet pääasiassa puu- tai kivirunkoisia. Tämä työ osoittaa, että monipuolisesti rakentamisessa käytetty polyuretaani soveltuu käytettäväksi myös teräsrakenteisessa pientalossa.

### 7.1 Elementti

Työn tuloksena kehitettiin liitteen 16 mukainen pientaloseinäelementti, jota voidaan käyttää yksi- tai kaksikerroksisissa P3 paloluokan rakennuksissa. Elementin liittymisperiaatteet yläpohjaan, alapohjaan sekä elementtien välisten pystysaumojen liitokset on pohdittu valmiiksi mitoitusesimerkkeineen useaan erilaiseen tapaukseen. Ikkuna- ja oviliitokset voidaan toteuttaa ilman merkittäviä kylmäsiltoja niin, että ikkunan eristävä osa on elementin pääasiallisen lämmöneristeen tasalla. Yksityiskohtia suunniteltaessa on otettu huomioon kylmäsiltojen minimointi sekä tiiviyden säilyttäminen.

Elementin U-arvo on  $0,092 \text{ W/m}^2\text{K}$  ja paksuus 384 mm. Käyttämällä eristevalmistajien parempia tuotteita sekä Rautaruukki Oyj:n ulkoverhousjärjestelmiä, voidaan U-arvossa päästä  $0,088 \text{ W/m}^2\text{K}$  356 mm paksulla elementillä. Nämä muutokset eivät kuitenkaan vaikuta itse rakenteisiin, vaan ainoastaan eristemateriaalivalintoihin. Tähän ei tietääkseni muilla teollisesti valmistettavilla elementtiratkaisuilla ja rakennusmateriaaliyhdistelmillä päästä.

Elementin kaikki ulko-olosuhteille herkat materiaalit, kuten kipsilevyt ja mineraalivilla, ovat 200 mm paksun yhtenäisen polyuretaanikerroksen lämpimällä puolella säältä ja suurilta lämpötilavaihteluilta suojassa. Jos ulkoverhous ja sen tukirakenteet toteutetaan Rautaruukki Oyj:n ratkaisuille, ulko-olosuhteita vasten on vain polyuretaania ja terästä, joiden pitkäaikaiskestävyyssominaisuudet ulko-olosuhteissa ovat erinomaiset. Näin rakenteelle voidaan odottaa myös erittäin pitkää käyttöikää.

Vaikka rakenne on lämmöneristyskyvyltään passiivitasoinen, se toimii kosteusteknisesti turvallisesti Suomen ilmastossa. Yhtenäisen polyuretaanikerroksen ansiosta ulkoseinästä saadaan oikein asennettuna erittäin tiivis ja ilmavuodon. Yhtenäinen poly-

uretaanikerros edesauttaa elementin liittämistä ala- ja yläpohjarakenteisiin ilman merkittäviä epäjatkuvuuskohtia yhtenäisessä polyuretaanikerroksessa liitosten kohdalla.

Kevyen ja ohuen elementin käsittely ja nosto on helppoa, eikä vaadi järeää nostokaluusta, sekä elementtiä alempiin rakenteisiin kohdistuu vähemmän painoa. Noin 2,5 m korkea elementti painaa noin 160 kg/m, kun esimerkiksi vastaavan lämmöneristyskyvyn omaava betonisandwich-elementti painaa noin 1100 kg/m. Elementissä käytettävien orsien ja polyuretaanin mittatarkkuuden ansiosta elementtien asennus on työmaalla helppoa. Jos elementin kosteudelle herkät materiaalit pääsevät turmeltumaan asennuksen yhteydessä, voidaan ne suurimmalta osin korvata uusilla sisältä päin, jolloin korjaustyö voidaan tehdä lämpimissä ja kuivissa olosuhteissa. Myös elementin oikeaoppinen asentaminen liitoksissa voidaan varmistaa ennen pintarakenteiden asentamista.

Elementin kantavan osan, joka koostuu kipsilevyistä, mineraalivillasta ja teräsrungosta, valmistuslinjalla voidaan valmistaa myös rakennuksen kevyet ja kantavat väliseinät. Väliseinät voidaan nostaa paikoilleen samalla kertaa ulkoseinien asennuksen yhteydessä.

## 7.2 Käytännön merkitys

Passiivirakentaminen on aiheuttanut laajaa keskustelua viime vuosina rakennusalalla. Yksi keskeisimmistä kysymyksistä passiivirakentamisessa on passiivirakenteiden kosteustekninen toimivuus. Etenkin avohuokoisilla eristemateriaaleilla eristettyjen ratkaisujen kosteusteknistä toimivuutta on jouduttu arvioimaan uudelleen eristepaksuuksien kasvaessa. Kysyntää toimiville passiivirakenteille kasvaa ja tarjonta ei tunnu pysyvän tällä hetkellä perässä. Tämän työn elementtiratkaisu tarjoaa hyvän ja kosteusteknisesti toimivan vaihtoehdon.

Taloteollisuudella on ollut ongelmia paksujen passiivirakenteiden kanssa. Logistiikkakustannukset nousevat merkittävästi, kun elementin paksuus ylittää 384 mm. Lisäksi, talotehtaasta riippuen, elementtien rakennuslinjat eivät välttämättä taivu paksumpien elementtien valmistamiseen ilman suuria muutoksia elementtirakennuslinjastolla. Tämä työ on osoittanut, että passiivitasoinen seinäelementti voidaan valmistaa ohuena ilman, että elementin teollisesta valmistuksesta joudutaan tinkimään.

Diplomityön tilaajilla, Rautaruukki Oyj:llä ja SPU Oy:llä, on tavoitteena kasvattaa passiivitalotarjontaa ja edistää laadukasta passiivirakentamista tämän elementin kautta. Teräsosien arvon arvioiminen seinäneliötä kohti on huomattavasti haastavampaa kuin polyuretaanin osuutta, koska polyuretaania on elementissä yksityiskohdista ja liitoksista riippumatta 200 mm paksu kerros. Teräksen osuuteen vaikuttaa valitut yksityiskohdat, kuten ikkunat, kerrosten lukumäärä ja elementin yläreunassa kulkevan yläpalkin valinta sekä ulkoverhousmateriaalit. Puupaneelilla verhoillun seinäneliön arvosta noin 60 % on polyuretaania, 30 % terästä ja 10 % muita materiaaleja. Teräksen osuutta eri ratkaisuvaihtoehdoilla on käsitelty tarkemmin kappaleessa 7.3.

### 7.3 Toimintasuositukset

Rautaruukki Oyj:n ja SPU Oy:n tulee jatkossa pohtia yhdessä, millaisella elementillä ja kokonaisratkaisulla lähdetään viemään rakenneratkaisua eteenpäin. Elementtiratkaisua voidaan tarjota talotehtaille sellaisenaan tai sitä voidaan jalostaa. Suomessa ei teräsrunkoisia taloja ole juuri aikaisemmin rakennettu. Laadukkaan passiivitasoinen rakentamisen kasvavan kysynnän vuoksi pientalomarkkinoilla voisi olla tilaa ”täysteräs-taloille”, jotka erottuvat ulospäin puupaneeliverhoilluista puutaloista tai rapatuista kivitaloista.

Rautaruukki Oyj:n tuotteita voitaisiin käyttää kate- ja ulkoverhousmateriaaleina sekä väliseinät olisivat myös teräsrunkoisia. Uskon, että tämä kasvattaisi kiinnostusta ratkaisuun ja nostaisi rakennuksen arvoa. Rautaruukki Oyj:n ulkoverhoustuotteilla voidaan tehdä arkkitehtuurisesti korkeatasoisia näköisiä rakennuksia ja niihin voidaan helposti integroida esimerkiksi Rautaruukki Oyj:n aurinkopaneelijärjestelmiä.

Tämä tulee olemaan erittäin kiinnostava seikka siirryttäessä passiivirakentamisesta nollaenergiarakentamiseen, jossa rakennus on lähes omavarainen energian suhteen. Nollaenergiarakentamiseen siirrytään näillä näkymin uudisrakentamisessa vuonna 2020. Tällä elementtijärjestelmällä rakennettu talo voidaan helposti päivittää passiivitasosta nollaenergiatasoiseksi korvaamalla osa ulkoverhousmateriaaleista Rautaruukki Oyj:n aurinkopaneeleilla ja päivittämällä talotekniikkaa. Päivitys passiivitalosta nollaenergiataloksi helpottuu entisestään, jos ulkoverhouksessa on käytetty Rautaruukki Oyj:n ulkoverhousjärjestelmää. Lämmöneristeiden tai muiden rakenneosien osalta ei elementtiin tarvitse tehdä muutoksia päivityksen yhteydessä.

Rautaruukki Oyj:n kattotuotteet ovat jo nyt tunnettuja laadustaan pientalorakentamisessa. Täysteräs-talossa Rautaruukki Oyj:n tuotteiden osuus jokaista rakennettua taloa kohti on huomattavasti suurempi verrattuna perinteisempiin kokonaisratkaisuihin. Jo teräsrunkoisista väliseinistä saatu terästuotteiden lisämenekki olisi merkittävä. Lisäksi SPU Oy:n tuotteet liitetään vahvasti energiatehokkaaseen rakentamiseen, joten elementti voitaisiin profiloida kestäväksi, luotettavana ja energiatehokkaana tuotteena.

Työssä on osoitettu, että polyuretaanin ja teräksen parhaat ominaisuudet tulevat parhaiten esiin passiivitasoisessa rakentamisessa. Siksi kannattaa vakavasti harkita täysteräs-talokonseptia, vaikkakin se vaatii suurempaa panostusta perinteisempiin kokonaisratkaisuihin verrattuna.

Joka tapauksessa elementtiratkaisun pohjalta kannattaa aloittaa keskustelu talotehtaiden kanssa, jotka voisivat olla kiinnostuneita valmistamaan elementtiä. Ensimmäiset elementit tehdään todennäköisesti käsin hallissa, mutta kun elementin kysyntä kasvaa, mahdollistaa se automatisoidun tuotannon. Tämän elementin kustannustehokkuus perustuu nimenomaan automatisoituun elementtirakennuslinjastoon.

### 7.4 Jatkotutkimustarve

Elementtiä hahmoteltaessa syntyi paljon hyviä ideoita vaihtoehtoisista rakenneratkaisuksista. Monet niistä kuitenkin hylättiin tämän työn osalta liian laajoina kokonaisuuksina.

Elementin osien liittäminen toisiinsa liimalla oli yksi ideoista, joilla voitaisiin nopeuttaa elementin valmistusta elementtitehtaalla. Esimerkiksi ansaat voitaisiin jättää elementistä kokonaan pois, jos polyuretaanikerros liimattaisiin kantavaan osaan. Liimaamista pohdittiin myös työmaaolosuhteissa asennusvaiheessa. Polyuretaanikerroksen valmistuksessa eristelevyjen saumat voitaisiin liimata perinteisen vaahdottamisen sijaan. Saumasta saataisiin näin tiiviimpi ja lujempi. Liimojen käyttö liitoksissa ja saumoissa päätettiin kuitenkin jättää diplomityön ulkopuolelle, koska käytännössä liimakiinnityksien käyttö vaatii paljon tutkimusta, työtä ja viranomaisSELVITYKSIÄ. Liimojen käyttöä kannattaa harkita tulevaisuudessa, kun elementtien kysyntä kasvaa ja niitä aletaan valmistaa automatisoidummin.

Liitokset ja elementin yksityiskohdat on mitoitettu tässä työssä käyttäen kantavuuden kannalta varmallalla puolella olevia yksinkertaistuksia. Jotta elementin osien kaikki kuormituskapasiteetti saadaan käytettyä, tulee näitä liitoksia ja yksityiskohtia tutkia tarkemmin. Kun tuotantomäärät kasvavat, 0,5 mm vahvuusero teräksessä voi merkitä paljon kustannuksissa. Elementin yksityiskohtia ja liitostapoja kannattaa myös kehittää käytännön kokemuksen kautta. Lisäksi työmaalla tai elementtitehtaalla voidaan huomata jotain sellaisia tuotannollisia ja työmaateknisiä seikkoja, joita ei suunnitteluvaiheessa ole osattu ottaa huomioon.

Uusien liitosmekanismien kehittäminen ruuvi kiinnityksen sijaan voi tuoda suuria säästöjä työmaalla. Nyt elementti on osittain auki työmaalle tullessaan, jotta elementtien väliset liitokset voidaan tehdä ruuveilla. Edistyneemmällä kiinnikemekanismeilla elementti voisi olla täysin valmiiksi rakennettu tehtaalla. Työmaalla elementit liitettäisiin nopealla liittimellä toisiinsa ja polyuretaanikerrosten sauma tiivistettäisiin saumavaahdolla tai liimalla.

Perehtyessäni työssä käyttämäni lähdeaineistoon törmäsin usein teräsrunkoisiin ala-, väli- ja yläpohjarakenteisiin. Näistä on paljon valmista tutkimustietoa ja käyttökokemuksia. Täysterästalo-konseptia ajatellen myös näihin rakennusosiin olisi hyvä kiinnittää huomiota.

Rakenneratkaisuja hahmoteltaessa yksi rakennevaihtoehto poikkesi merkittävästi muista. Siinä polyuretaanipalkin molemmille sivuille on liimattu teräsorret. Sisäpuolelle jäävä  $\Omega$ -orsi kantaa kuormat ja ulkopuolella oleva U-orsi on ulkoverhousmateriaalin kiinnitystä varten. Palkki voidaan mitoittaa kantamaan kuormat myös kokonaisuutena ja sillä on useita etuja muihin ratkaisuihin nähden. Sen kylmäsillattomuuden ansiosta elementin paksuus oli merkittävästi pienempi muihin ratkaisuihin verrattuna. Lisäksi palkkia voidaan käyttää paljon laajemmin rakentamisessa aina julkisivuremonteista ja hallirakentamisesta pientalorakentamiseen ja elementtirakentamisesta paikalla rakentamiseen. Palkkia voidaan käyttää kantavana pilarina tai kantavan palkkina. Palkki soveltuu parhaiten sellaisiin kohteisiin, jossa pyritään mahdollisimman hyvään lämmöneristyskykyyn mahdollisimman pienellä eristepaksuudella.

Työssä kehitetyn ratkaisun soveltuvuutta P1 ja P2 paloluokan rakenteisiin ja halleihin pohdittiin työn edetessä. Rakennevaihtoehdoista palkkiratkaisu on mielestäni soveltuvin halleihin sen monipuolisten käyttömahdollisuuksien takia. Myös työssä kehitettyä

elementin tyyppistä ratkaisua voidaan käyttää halleissa. Etuna tässä elementissä on sisäpinnassa oleva kantava osa, jolla päästään hyvään paloluokkaan. Myös palkkiratkaisun paloluokkaa voidaan parantaa molemmiin puolin asennettavilla levyillä ja kivivillakerroksilla.

## 7.5 Työn onnistuminen

Työssä onnistuttiin luomaan pohja tavoitearvot täyttävälle elementille. Työn edetessä ei tullut vastaan seikkoja, joiden perusteella tällä elementillä ei olisi mahdollisuuksia olla taloudellisesti kannattava tuote. Tältä osin työssä päästiin tavoitteeseen. Elementin jatkokehittäminen vaatii mukaan tahon, joka alkaa valmistamaa elementtiä, koska lopulliset yksityiskohdat täytyy hioa elementin valmistajan kanssa sopimaan yhteen valmistajan tuotantoprosessiin.

Elementin esivalmistusaste tuli olla mahdollisimman korkea, mutta ikkunoiden ja ovien peltien ja pielilautojen kiinnitys jouduttiin siirtämään työmaalle paksuusvaatimuksen vuoksi. Pielilaudat ja pellit olisivat kasvattaneet elementin kokonaispaksuutta 50 mm. Tätä ei kuitenkaan pidetty merkittävänä haittana. U-arvovaatimuksessa joustettiin hieman. Kuitenkin samalla rakenteella voidaan päästä reilusti alle tavoitellun U-arvon huomattavasti paksuusvaatimusta ohuemmalla elementillä valitsemalla elementtiin parempia rakennusmateriaaleja.

Saatua ratkaisua piti alun perin käyttää pohjana yleisesti teräsrunkoisille polyuretaanieristeisille pientaloille, mutta työn edetessä tuli selväksi, että tämä ratkaisu on järkevä vain elementtirakentamisessa. Paikallarakentamiseen löytyy paljon valmiita ratkaisuja, joissa on hyödynnetty paikallarakentamisen mahdollistamat menetelmät ja yksityiskohdat.

Työn haasteena oli rajata työ riittävän yleisellä tasolla, jotta työn laajuus pysyi hallinnassa ja että työssä silti käsitellään kaikki tärkeimmät asiat riittävällä tarkkuudella hyvän kokonaiskäsityksen luomiseksi elementistä ja siihen liittyvistä suuruusluokista. Työssä onnistuttiin perehtymään elementin rakenteisiin yleisiä rakennehahmotelmia tarkemmin ja luotiin periaateratkaisut yksityiskohtien mitoituksen ja suunnittelun pohjaksi. Yksityiskohtien mitoitus jäi kuitenkin monen eri rakennuskohtaisen muuttujan takia niin yleiselle tasolle, että mitoituksia ei voi käyttää sellaisenaan toteutettavassa rakenteessa.

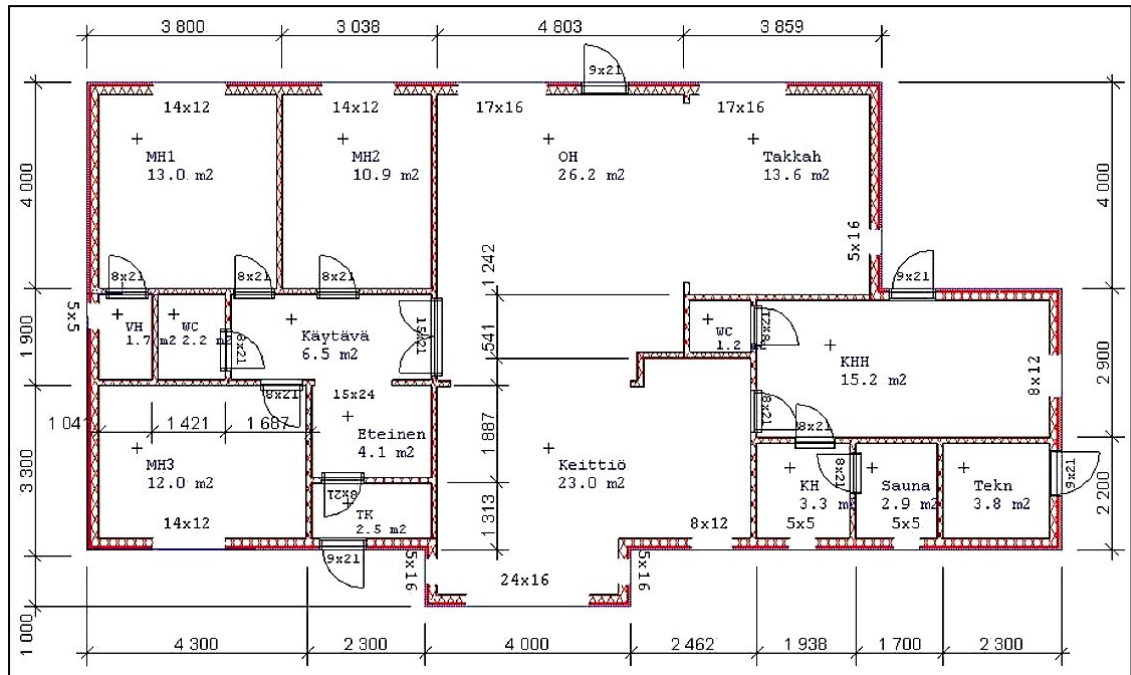


## LÄHTEET

- [1] Oulun kaupunki, Tekninen keskus. 2011. Pienrakentajan opas. [WWW]. [Viitattu 27.4.2011]. Saatavissa: [www.ouka.fi/tekninen/pienrakentajanopas](http://www.ouka.fi/tekninen/pienrakentajanopas)
- [2] Saint-Gobain Rakennustuotteet Oy. 2011. Kipsilevyn asennusohje teräsrunkoseinään. [WWW]. [Viitattu 16.6.2011]. Saatavissa: [www.gyproc.fi/fi/Toteutus/Asennusohjeet](http://www.gyproc.fi/fi/Toteutus/Asennusohjeet)
- [3] SPU Oy. 2011. SPU Eristeiden tekniset ominaisuudet. [WWW]. [Viitattu 8.2.2011]. Saatavissa: [www.spu.fi/eristeet\\_tutkitusti\\_turvallinen](http://www.spu.fi/eristeet_tutkitusti_turvallinen)
- [4] Vepsäläinen, J. et al. 2004. RT 82-10829 Puujulkisivut. Rakennustietosäätiö.
- [5] Vinha, J. 2007. Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions: A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Resistance of the Interior Lining of a Wall Assembly. Tampere University of Technology. Publication 658.
- [6] Kurnitski, J. 2009. Tehontarpeen ja energiankäytön laskentaesimerkkejä. TKK LVI-tekniikanlaboratorio.
- [7] Bre Global by. 2010. Life cycle environmental and economic analysis of polyurethane insulation in low energy buildings.
- [8] Käkelä, P., Jormalainen J. 2011. Kosteusteknisesti turvallinen matalaenergia- ja passiivirakentaminen.
- [9] Vinha, J. et al. 2008. Matalaenergiarakenteiden toimivuus: Tutkimustuloksia ja suosituksia uusiin lämmöneritys- ja energiankulutusmääräyksiin ja -ohjeisiin, loppuraportti. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikanlaitos.
- [10] Rautaruukki Oyj. 2011. Kestävä ja kierrätettävä teräs. [WWW]. [Viitattu 16.6.2011]. Saatavissa: [www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut](http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut)
- [11] Blomberg, T. 2000. HEAT2 - A PC-program for heat transfer in two dimensions. Manual with brief theory and examples. Version 5.0. Lund-Gothenburg for Computational Building Physics. Lisäksi ohjekirjan päivitykset 6.0, 7.0 ja 8.0.

- [12] Blomberg, T. 2001. HEAT3 - A PC-program for heat transfer in three dimensions. Manual with brief theory and examples. Version 4.0. Lund-Gothenburg for Computational Building Physics. Lisäksi ohjekirjan päivitykset 5.0 ja 6.0.
- [13] Tasauslaskentaopas 2010. Rakennuksen lämpöhäviöiden määräystenmukaisuuden osoittaminen. 2010. Ympäristöministeriö.
- [14] Suomen rakentamismääräyskokoelma D3. 2010.
- [15] VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Laitinen, A., Shemeikka, J. 2005. RET - pientalon määrittely, Versio 2.0.
- [16] Kylliäinen, M. 2006. Talonrakentamisen akustiikka. Tutkimusraportti 137. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikanlaitos.
- [17] Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2007. Rakennusten akustinen suunnittelu: akustikan perusteet. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, RIL 243-1-2007.
- [18] Rakennusfysiikka 2009. 2009. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos.
- [19] Suomen rakentamismääräyskokoelma C2. 1998.
- [20] Tutkimusselostus nro. VTT-S-00396-09. 2008. VTT.
- [21] Nielsen, A. 1995. Use of Statistics for Prediction on Condensation in a Wall Construction. Proceedings of Indoor Air Quality of Practice, Moisture and Cold Climate Solutions Conference, Oslo, Norway.
- [22] Teräsrunkarunkoisen pientalon rakentaminen. Rautaruukki Oyj.
- [23] Kilpeläinen, M. et al. [2010]. Avoin puurakennusjärjestelmä - elementtirakenteet ja suunnitteluperusteet. Wood Focus Oy.
- [24] VTT:n ylläpitämä sivusto passiivitaloista. 2011. Passiivitalon määritelmä. [WWW]. [Viitattu 8.2.2011]. Saatavissa: [passiivitalo.vtt.fi/energian\\_kulutus.html](http://passiivitalo.vtt.fi/energian_kulutus.html)
- [25] VTT:n ylläpitämä sivusto passiivitaloista. 2011. Mikä on passiivitalo? [WWW]. [Viitattu 8.2.2011]. Saatavissa: [passiivitalo.vtt.fi/materiaalia.html](http://passiivitalo.vtt.fi/materiaalia.html)
- [26] A-Konsultit Oy. 2008. Pitkämäki, Rakentamisohje, 1. osa-alue.

## LIITE 1: RET PIENTALO



RET pientalon pohjakuva [15]

Yksikerroksisen talon harjan korkeus on 6 m ja kaksikerroksisen 9 m. Talo sijaitsee Jyväskylän esikaupunkialueella.

### RAKENNE

#### Yläpohja (lueteltuna ulkoa sisään)

- Peltikate, kaltevuus  $\leq 30^\circ$ , harjakatto
- Tuuletustila
- Kattoristikot k1200
- Lämmöneriste
- Koolaus 22x100
- Sisäverhouspaneeli (puu) 12 mm

#### Ulkoseinä (lueteltuna ulkoa sisään)

- Ulkoverhous 28 mm
- tuuletusväli 30 mm (koolausmateriaali määritellään työssä)
- Lämmöneriste + runko
- Mahdollinen ääneneriste
- Sisäverhouslevy 13 mm

#### Välipohja (lueteltuna ylhäältä alas)

- Lattialevy
- Lattiavasat + ääneneriste

- Koolaus 50x50
- Sisäverhouslevy

#### RAKENNUKSEN LAAJUUSTIEDOT

- Rakennustilavuus 466 rak-m<sup>2</sup>
- Maanpäälliset kerrostasoalat yhteensä 163 m<sup>2</sup>
- Huonekorkeus 2,5 m
- Ilmatilavuus 355 m<sup>2</sup>
- Keskimääräinen kerroskorkeus 3,0 m

#### RAKENNUSOSAT

- Ulkoseinä 147,5 m<sup>2</sup>
- Yläpohja 147 m<sup>2</sup>
- Alapohja 147 m<sup>2</sup>
- Ikkunat 18,9 m<sup>2</sup>
- Ulko-ovet 8,2 m<sup>2</sup>

#### ILMANVAIHDON ILMAVIRRAT

Käyntiaika jatkuva 24 h/vrk ja 7vrk/vko

Tila	Tuloilmavirta dm <sup>3</sup> /s	Poistoilmavirta dm <sup>3</sup> /s	Tehostus dm <sup>3</sup> /s
MH1	12	-	-
MH2	12	-	-
VH3	-	3	-
MH4	12	-	-
TK5	-	-	-
ET6	-	-	-
WC7	-	10	-
KT8	-	8	25 *)
PH9	-	15	-
SA10	6	6	-
TKN11	-	-	-
WC12	-	10	-
KHH13	-	15	-
TH14	10	-	-
OH15	10	-	-
Yhteensä	62	67	

\*) Käyntiaika 2 h/vrk

LTO:n jäätymissuojauksen termostaatin asetusarvo on +5 °C.

## LIITE 2: BRAINSTORMING-AVAINSANALISTA

Eristeenä käytetään polyuretaania

- Passiivitasoinen eristys
- Eristeen liimaaminen, ei välttämättä vaahdotus
- Eristeen työstettävyys (sahaus, jyrsiminen, leikkautuminen, jne.)
- Ei tarvita muita eristekerroksia
- Rappaus eristeen pintaan?
- Haasteet rappauksen pysyvyydessä

Runko teräsorsista

- Pitkäikäinen
- Monipuoliset käyttömahdollisuudet
- Kestää rankkoja olosuhteita
- Mahdolliset rei'itetyt kylmäkatkot
- Hitsaus

Ratkaisuja

- Erilaisia teräsorsiratkaisuja (z-poikkileikkaus, vastakappaleet)
- Yksi tai kaksi kerrosta polyuretaania
- Sähköt eristeeseen työstettynä tai teräsorrella koteloituna
- Tuuletusväli ulkoverhoukseen ja verhouksmateriaalin kiinnitys?
- Ylä- ja alajuoksu esimerkiksi U-orresta
- Ikkunat ja ovet?
- Sisäpinnan levy liimaamalla eristeeseen tai asennustila orrella

Kysymyksiä

- Elementin liittyminen muihin rakenteisiin?
- Katto kattotuoleista tai SPU passiivikattoelementistä
- Maanvarainen laatta tai tuulettuva alapohja
- Voisiko tätä menetelmää hyödyntää lattia tai kattorakenteissa?

Teollinen tuotanto

- Moduuliajattelu vs. suurseinäelementit
- Seinän piirustuksen syöttö tietokoneelle
- Suurseinäelementtien kasaaminen moduuleista?
- Edullisuus, yksilölliset elementit vs. pitkät sarjat
- Täysin automatisoitu, syötetään vain vakiomittaiset raaka-aineet
- Teräsorsi kelalta, polyuretaani mattona liukuhihnalle jne.

### LIITE 3: VALINTAVAIHEESEEN LASKETUT ERISTEPAKSUUDET

Eristekerrospaksuuden alustavaa arviointia tehty laskelma

Polyuretaanin (PU) lämmönjohtavuus	$\lambda_{DPU} = 0,023 \frac{W}{mK}$
PU:n paksuus	$d_{PU}$
Villan (ääneneristekerros) lämmönjohtavuus	$\lambda_{Dvilla} = 0,037 \frac{W}{mK}$
Villakerroksen paksuus	$d_{villa}$
Sisäpinnan lämmönvastus	$R_{si} = 0,13 \frac{m^2K}{W}$
Ulkopinnan lämmönvastus (tuuletusväli)	$R_{si} = 0,13 \frac{m^2K}{W}$
Tavoitelämmönläpäisykerroin	$U_{tav} = 0,09 \frac{W}{m^2K}$

Lämmönvastus

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

Lämmönläpäisykerroin

$$U = \frac{1}{R}$$

Lisäkonduktanssi otetaan huomioon kaavalla

$$\Delta U_{\psi\chi} = \sum \psi_k * \frac{l_k}{A} + \sum \chi_j * \frac{n_j}{A}$$

, jossa  $\psi_k =$  vaihtelee orren mukaan

$$l_k = 3 \text{ m}$$

$$\chi_j = 0,0035 \frac{W}{K}$$

$$n_j = 4$$

$$A = \frac{1}{0,6} * l_k$$

Villakerroksen (sis. orren) lämmönvastus

$$U_{villa} = \frac{\lambda_{nvilla}}{d_{villa}} + \sum \psi_k * \frac{l_k}{A}$$

$$R_{villa} = \frac{1}{U_{villa}}$$

PU-kerroksen (sis. ansaat) lämmönvastus

$$U_{PU} = \frac{\lambda_{nPU}}{d_{PU}} + \sum \chi_j * \frac{n_j}{A}$$

$$R_{PU} = \frac{1}{U_{PU}}$$

Lasketaan tarvittavan PU-kerroksen paksuus  $d_{PU}$

$$R_{tav} = \frac{1}{U_{tav}}$$

$$R_{tav} = R_{villa} + R_{PU} + R_{si} + R_{se}$$

$$R_{PU} = R_{tav} - R_{villa} - R_{si} - R_{se}$$

$$\frac{\lambda_{nPU}}{d_{PU}} + \sum \chi_j * \frac{n_j}{A} = \frac{1}{R_{tav} - R_{villa} - R_{si} - R_{se}}$$

$$d_{PU} = \frac{\lambda_{nPU}}{\frac{1}{R_{tav} - R_{villa} - R_{si} - R_{se}} - \sum \chi_j * \frac{n_j}{A}}$$

$d_{PU}$ -paksuudet [mm]

Orren vahvuus/korkeus [mm]	100	80	70	60	50
1,5	213	222	228	233	239
2	215	224	229	235	240
2,5	218	226	231	236	241

## LIITE 4: KUORMIEN LASKENTA

Hyötykuorma (SFS-EN 1991-1-1)

- Käyttöluokka A
- Välipohjat, oleskelukuorma  $2,00 \frac{kN}{m^2}$
- Hyötykuorma kaksikerroksisissa rakennuksissa  $5,10 m * 2,00 \frac{kN}{m^2} = 10,20 \frac{kN}{m}$
- Hyötykuorma yhdelle runkotolpalle (k600)  $0,6 * 10,20 \frac{kN}{m} = 6,12 kN$

Lumikuorma (SFS-EN 1991-1-3)

- Maanpinnan lumikuorman ominaisarvo Jyväskylässä  $2,50 \frac{kN}{m^2}$
- Harjakatto, kattokaltevuus  $\leq 30^\circ$
- Muotokerroin 0,8 (normin taulukosta 5.1)
- Lumikuorma katolla  $0,8 * 2,50 \frac{kN}{m^2} = 2,00 \frac{kN}{m^2}$
- Lumikuorma kattometrille (räystästä otettuna huomioon)  $5,50 m * 2,00 \frac{kN}{m^2} = 11,00 \frac{kN}{m}$
- Lumikuorma yhdelle runkotolpalle (k600)  $0,6 m * 11,00 \frac{kN}{m} = 6,60 kN$

Tuulikuorma (SFS-EN 1991-1-4)

- Laskettu yleinen tuulikuorma RIL 201-1-2008 ohjekirjan mukaan
- Maastoluokka 3, esikaupunkialue
- Tasainen maasto, jolloin pinnamuodonvaikutus 1
- Yksikerroksisen talon harjan korkeus  $z_1 = 6 m$
- Kaksikerroksisen talon harjan korkeus  $z_2 = 9 m$
- Tuulenopeuden perusarvo arvolla  $z$ ;  $q_1(6) = 0,38 \frac{kN}{m^2}$  ja  $q_2(9) = 0,45 \frac{kN}{m^2}$
- Jaetaan seinä vyöhykkeisiin rakennuksen mittojen mukaan
- Lasketaan tuulikuorma suurimman rasitusvyöhykkeen mukaan
- Katsotaan taulukosta vyöhykkeille ulkopuolisen paineen kertoimet  $c_{pe,10}$  ja  $c_{pe,1}$ , joista lasketaan molemmille rakenteille kerroin  $c_e$ :  $c_{e1} = 1,3$  ja  $c_{e2} = 1,67$
- Lasketaan tuulikuorma seinäneliölle
- Yksikerroksinen talo  $q = 1,3 * 0,38 \frac{kN}{m^2} = 0,494 \frac{kN}{m^2}$
- Yhdelle runkotolpalle (k600):  $0,6 m * 0,494 \frac{kN}{m^2} = 0,30 \frac{kN}{m}$
- Kaksikerroksinen talo  $q = 1,67 * 0,45 \frac{kN}{m^2} = 0,751 \frac{kN}{m^2}$
- Yhdelle runkotolpalle (k600):  $0,6 m * 0,751 \frac{kN}{m^2} = 0,45 \frac{kN}{m}$

Omapaino, rakenteen mukaan (tyyppitalo, pohjapinta-ala  $9,1 m * 19,0 m$ )

- Kattorakenne: peltikate, kattoristikot
- Välipohja: lattialevy, välipohjan juoksut, katon pintalevy



- Seinärakenne: lautaverhous, polyuretaani, teräsorsi, mineraalivilla, kipsilevy
- Saadaan yksikerroksiselle rakenteelle yhdelle runkotolpalle  $1,9 \text{ kN}$
- Saadaan kaksikerroksiselle rakenteelle yhdelle runkotolpalle  $3,5 \text{ kN}$

Yhteenveto yhdelle runkotolpalle (epäkeskisyys pystykuormille 25 mm)

#### Yksikerroksinen

- Hyötykuorma  $0 \text{ kN}$
- Lumikuorma  $6,6 \text{ kN}$
- Tuulikuorma  $0,30 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
- Omapaino  $1,9 \text{ kN}$
- Epäkeskisyys  $0,17 \text{ kNm}$  (Mt)

#### Kaksikerroksinen

- Hyötykuorma  $6,12 \text{ kN}$
- Lumikuorma  $6,6 \text{ kN}$
- Tuulikuorma  $0,45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
- Omapaino  $3,5 \text{ kN}$
- Epäkeskisyys  $0,32 \text{ kNm}$  (Mt)

## LIITE 5: MATERIAALIKUSTANNUSARVIO

### 1-kerroksinen ratkaisu

	ORSI		POLYURETAANI		MINERAALIVILLA		KIPSILEVY		Hinta yhteensä	Orren:n osuus [%]	PU:n osuus [%]	Villan osuus [%]	Kipsin osuus [%]
	Paino [kg/m <sup>2</sup> ]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]	Paksuus [mm]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]	Paksuus [mm]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]	Määrä [kpl]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]					
Ω (rk)	4,82	9 €	230	35 €	50	2 €	1	1 €	<b>46,78 €</b>	19 %	74 %	4 %	3 %
Z (rk)	3,32	7 €	230	35 €	62	2 €	1	1 €	<b>44,73 €</b>	15 %	77 %	5 %	3 %
Z (rk) termo	3,35	7 €	200	30 €	100	4 €	1	1 €	<b>42,32 €</b>	17 %	71 %	9 %	3 %
C termo	2,68	7 €	200	30 €	100	4 €	2	3 €	<b>43,22 €</b>	15 %	69 %	9 %	6 %
C	3,16	7 €	230	35 €	60	2 €	2	3 €	<b>46,38 €</b>	15 %	74 %	5 %	6 %

### 2-kerroksinen ratkaisu

	ORSI		POLYURETAANI		MINERAALIVILLA		KIPSILEVY		Hinta yhteensä	Orren:n osuus [%]	PU:n osuus [%]	Villan osuus [%]	Kipsin osuus [%]
	Paino [kg/m <sup>2</sup> ]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]	Paksuus [mm]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]	Paksuus [mm]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]	Määrä [kpl]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]					
Ω (rk)	7,30	13 €	230	35 €	60	2 €	1	1 €	<b>50,98 €</b>	25 %	68 %	4 %	3 %
Z (rk)	4,67	9 €	230	35 €	70	3 €	1	1 €	<b>47,19 €</b>	18 %	73 %	6 %	3 %
Z (rk) termo	4,20	9 €	200	30 €	100	4 €	1	1 €	<b>43,82 €</b>	20 %	68 %	9 %	3 %
C termo	3,50	7 €	200	30 €	100	4 €	2	3 €	<b>43,72 €</b>	16 %	69 %	9 %	6 %
C	5,06	12 €	230	35 €	60	2 €	2	3 €	<b>51,05 €</b>	23 %	68 %	4 %	5 %

### 1 + 2-kerroksiset ratkaisut

	ORSI		POLYURETAANI		MINERAALIVILLA		KIPSILEVY		YHT
	1 krs	2krs	1krs	2krs	1krs	2krs	1krs	2krs	
	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]	Hinta [€/m <sup>2</sup> ]	k-arvo Hinta [€/m <sup>2</sup> ]
Ω (rk)	9 €	13 €	35 €	35 €	2 €	2 €	1 €	1 €	49 €
Z (rk)	7 €	9 €	35 €	35 €	2 €	3 €	1 €	1 €	46 €
Z (rk) termo	7 €	9 €	30 €	30 €	4 €	4 €	1 €	1 €	43 €
C termo	7 €	7 €	30 €	30 €	4 €	4 €	3 €	3 €	43 €
C	7 €	12 €	35 €	35 €	2 €	2 €	3 €	3 €	49 €

## LIITE 6: C-ORREN KAPASITEETIT

Kaksikerroksisen rakennuksen pysty-orren kapasiteetit (C-orsi) tutkittavalla rakenteella:

Veto:	Nt.Rd	84,98 kN	A	2.671E+02	mm <sup>2</sup>
Puristus:	Nb.Rd	50,25 kN	Aeff	1.579E+02	mm <sup>2</sup>
Leikkaus:	Vy.Rd	21,69 kN	Av.y	1.180E+02	mm <sup>2</sup>
Leikkaus:	Vz.Rd	15,86 kN	Av.z	1.195E+02	mm <sup>2</sup>
		<b>+Kap/-Kap</b>		<b>+Kap/-Kap</b>	
Taivutus (kimmainen):	Mb.y.Rd	2,16 /	2,16 kNm	Weffy	6.776E+03 / 6.776E+03 mm <sup>3</sup>
Taivutus (kimmainen):	Mb.z.Rd	0,87 /	0,70 kNm	Weffz	2.728E+03 / 2.188E+03 mm <sup>3</sup>
Taivutus (plastinen):	Mpl.y.Rd	2,77 /	2,77 kNm	Wply	8.693E+03 / 8.693E+03 mm <sup>3</sup>
Taivutus (plastinen):	Mpl.z.Rd	1,17 /	0,99 kNm	Wplz	3.667E+03 / 3.125E+03 mm <sup>3</sup>

Nurjahdus Z-akselin suuntaan		Nurjahdus Y-akselin suuntaan		Vääntönurjahdus		Taivutusvääntönurjahdus	
NEy	1.441E+02 kN	NEz	3.881E+03 kN	NT	3.881E+03 kN	NFT	3.881E+03 kN
ky	1,00	kz	1,00	kT	1,00	kFT	1,00
Lamda	0,81	Lamda	0,16	Lamda	0,16	Lamda	0,16
fcr/ty	0,72	fcr/ty	1,00	fcr/ty	1,00	fcr/ty	1,00
Aeff/A	0,71	Aeff/A	0,59	Aeff/A	0,59	Aeff/A	0,59
NbRd	43,5 kN	NbRd	50,3 kN	NbRd	50,3 kN	NbRd	50,3 kN

Taulukon merkinnät:

### 1. Aksiaalikuormat

- Nt.Rd: Vetovoimakapasiteetti
- Nb.Rd: Puristusvoimakapasiteetti
- A: Poikkileikkausala vedolle
- Aeff: Tehollinen poikkileikkausala puristukselle

### 2. Leikkausvoimat

- Vy.Rd: Leikkauskapasiteetti Y-akselin suuntaan
- Vz.Rd: Leikkauskapasiteetti Z-akselin suuntaan
- Av.y: Uuman ala leikkausvoimalle Y-akselin suuntaan
- Av.z: Uuman ala leikkausvoimalle Z-akselin suuntaan

### 3. Taivutusmomentti

- Mb.y.Rd: Kimmainen taivutuskapasiteetti Y-akselin ympäri
- Mb.z.RD: Kimmainen taivutuskapasiteetti Z-akselin ympäri
- Weffy: Kimmainen taivutusvastus Y-akselin ympäri
- Wellz: Kimmainen taivutusvastus Z-akselin ympäri
- Mbl.y.Rd: Plastinen taivutuskapasiteetti Y-akselin ympäri
- Mbl.z.Rd: Plastinen taivutuskapasiteetti Z-akselin ympäri
- Wply: Plastinen taivutusvastus Y-akselin ympäri
- Wplz: Plastinen taivutusvastus Z-akselin ympäri

## 4. Nurjahdus

- $NE_y$ : Ideaalinen nurjahduskapasiteetti Z-akselin suuntaiselle nurjahdukselle
- $NE_z$ : Ideaalinen nurjahduskapasiteetti Y-akselin suuntaiselle nurjahdukselle
- $NT$ : Ideaalinen vääntönurjahduskapasiteetti
- $NFT$ : Ideaalinen taivutusvääntönurjahduskapasiteetti
- $ky$ : Nurjahduspituuden laskentakerroin
- $\lambda$ : Suhteellinen hoikkuus
- $f_{cr}/f_y$ : Myötölujuuden käyttöaste
- $A_{eff}/A$ : Poikkileikkausalan käyttöaste
- $N_{b,Rd}$ : Nurjahduskapasiteetti vastaavan akselin suuntaan



## Rakennuksen lämpöhäviön tasauslaskelma, D3-2010 (voimassa 1.1.2010 alkaen)

<b>Rakennuskohde</b>	<b>Polyuretaanieristeinen teräsrakenteinen pientaloseinäelementti</b>
<b>Rakennuslupatunnus</b>	
Rakennustyyppi	1-kerroksinen pientalo, ikkunapinta-ala 13 % kerrostasosalasta.
Pääsuunnittelija	
Tasauslaskelman tekijä	
Päiväys	
Tulos: Suunnitteluratkaisu	<b>TÄYTTÄÄ VAATIMUKSET JA LÄMPÖHÄVIÖ VASTAA MATALAENERGIATASOA</b>

**Rakennuksen laajuustiedot**

Rakennustilavuus	466 rak-m <sup>3</sup>
Maanpäälliset kerrostasosalat yhteensä	163 m <sup>2</sup>
Kerroskorkeus	3,0 m
Huonekorkeus	2,5 m
Ilmatilavuus, V, lämpimät tilat	355 m <sup>3</sup>
Ilmatilavuus, V, puoliämpimät tilat	m <sup>3</sup>

**Laskentatuloksia**

Julkisivun pinta-ala on 175 m<sup>2</sup>  
 Ikkunapinta-ala on 12 % maanpäällisestä kerrostasosalasta  
 Ikkunapinta-ala on 11 % julkisivun pinta-alasta  
 Lämpöhäviö on 63 % vertailutasosta (lämpimät tilat)

Perustiedot	Pinta-alat, m <sup>2</sup> [A]		U-arvot, W/(m <sup>2</sup> K) [U]			Lämpöhäviöiden tasaus	
	Vertailu- arvo	Suunnittelu- arvo	Vertailu- arvo	Enimmäis- arvo	Suunnittelu- arvo	Vertailu- ratkaisu	Suunnittelu- ratkaisu
<b>RAKENNUSOSAT</b>							
<b>Lämpimät tilat</b>							
Ulkoseinä	142	148	0,17	0,60	0,09	24,1	13,6
Hirsiseinä			0,40	0,60		-	-
Yläpohja	147	147	0,09	0,60	0,07	13,2	10,3
Alapohja (ulkoilmaan rajoittuva)			0,09	0,60		-	-
Alapohja (ryömintätilaan rajoittuva) <sup>1)</sup>			0,17	0,60		-	-
Alapohja (maanvastainen)	147		0,16	0,60	0,09	23,5	13,2
Muu maanvastainen rakennusosa			0,16	0,60		-	-
Ikkunat	24,5	18,9	1,00	1,80	0,80	24,5	15,1
Ulko-ovet	8,2		1,00	-	0,80	8,2	6,6
Kattoikkunat			1,00	1,80		-	-
<b>Lämpimät tilat yhteensä</b>	<b>469</b>	<b>469</b>				<b>93,6</b>	<b>58,8</b>
<b>Puoliämpimät tilat</b>							
Ulkoseinä			0,26	0,60		-	-
Hirsiseinä			0,60	0,60		-	-
Yläpohja			0,14	0,60		-	-
Alapohja (ulkoilmaan rajoittuva)			0,14	0,60		-	-
Alapohja (ryömintätilaan rajoittuva) <sup>1)</sup>			0,26	0,60		-	-
Alapohja (maanvastainen)			0,24	0,60		-	-
Muu maanvastainen rakennusosa			0,24	0,60		-	-
Ikkunat			1,40	2,80		-	-
Ulko-ovet			1,40	-		-	-
Kattoikkunat			1,40	2,80		-	-
<b>Puoliämpimät tilat yhteensä</b>	<b>-</b>	<b>-</b>				<b>-</b>	<b>-</b>
<b>VAIPAN ILMAVUODOT</b>							
<b>Vuotoilma</b>							
Lämpimät tilat	2,0	0,6	0,0079		0,0024	9,5	2,8
Puoliämpimät tilat	2,0					-	-
<b>ILMANVAIHTO</b>							
<b>Hallittu ilmanvaihto</b>							
Lämpimät tilat		0,069		45	61,2	45,5	32,1
Lämpimät tilat, ei LTO-vaatimusta				0		-	-
Puoliämpimät tilat				45		-	-
Puoliämpimät tilat, ei LTO-vaatimusta				0		-	-
<b>Rakennuksen lämpöhäviöiden tasaus</b>							
<b>Lämpimien tilojen ominaislämpöhäviö yhteensä</b>						<b>149</b>	<b>94</b>
<b>Puoliämpimien tilojen ominaislämpöhäviö yhteensä</b>						<b>-</b>	<b>-</b>

<sup>1)</sup> Ryömintätilaan rajoittuvan alapohjan lämpöhäviö kerrotaan luvulla 0,8 rakentamismääräykkoelman osan D3 mukaisesti.

Tällä tavalla otetaan huomioon ryömintätilan ilman ulkoilmaa korkeampi vuotuinen keskilämpötila.

Ryömintätilan tuuletusaukkojen määrä on enintään 8 promillea alapohjan pinta-alasta.

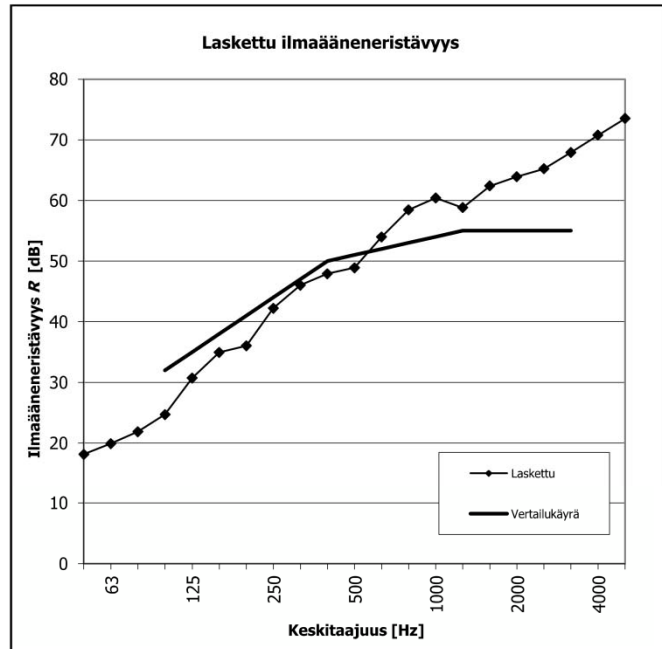
## LIITE 8: ILMAÄNENERISTÄVYYS

### Ilmaääneneristävyyden laskenta

Rakennetyyppi: Termoranka, C-profiili

Rakennekерrokset:	Ulkoverhouslauta	28 mm
	Tuuletusväli, puukoolaus	30 mm
	Polyuretaani	100 mm
	Ansaat halk. 4 mm	4 kpl/ranka
	Polyuretaani	100 mm
	Kipsilevy KN	13 mm
	Mineraalivilla KL-37 + termoranka k600	100 mm
	Kipsilevy KN	13 mm

$f$ [Hz]	$R_{1/3}$ [dB]	$R_{1/1}$ [dB]
50	18	
63	20	20
80	22	
100	25	
125	31	32
160	35	
200	36	
250	42	43
315	46	
400	48	
500	49	51
630	54	
800	58	
1000	60	59
1250	59	
1600	62	
2000	64	64
2500	65	
3150	68	
4000	71	71
5000	74	



Ilmaääneneristysluvut:

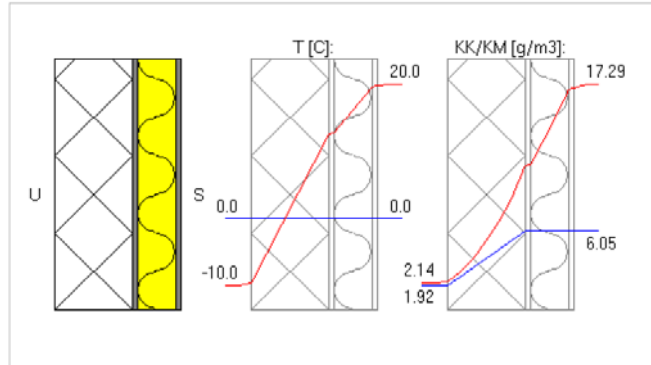
- $R_w$	= 51 dB
- lentomelua vastaan $R_w + C$	= 50 dB
- liikennemelua vastaan $R_w + C_{tr}$	= 46 dB

## LIITE 9: LÄMPÖTILA- JA KOSTEUSLASKELMAT, DOF-LÄMPÖ

Rakennuskohde:	Sisältö:	
Suunnittelija:	Päiväys: 8/23/2011	Tunnus:

### Rakenteen päätiedot:

U-arvo:	0.085 W/m <sup>2</sup> K
Paksuus:	326.000 mm
Pinta-ala:	1.00 m <sup>2</sup>
Paino:	29.68 kg
Hinta:	0.00 euro
Vesihöyryn vastus:	2.315e+05 m <sup>2</sup> hPa/g
Vesih. läpäisykerroin:	4.319e-06 g/m <sup>2</sup> hPa
Lämmönvastus:	11.767 m <sup>2</sup> K/W
Pintavastus, ulko:	0.130 m <sup>2</sup> K/W
Pintavastus, sisä:	0.130 m <sup>2</sup> K/W
Kulma (0-90):	90.000



### Rakenteen kerrostiedot:

KERROS:	T [mm]:	LJ [W/mK]:	VHL [kg/msPa]	Kerrokset ulkoa (U) sisälle (S)	
				Hinta [€/m <sup>3</sup> ]:	Paino [kg/m <sup>3</sup> ]:
1 Polyuretaani (PU)	200.00	0.0230	2.400000e-13	0.00	30.00
2 Kipsilevy	13.00	0.2400	2.000000e-09	0.00	730.00
3 Mineraalivilla 37	100.00	0.0370	1.000000e-09	0.00	47.00
4 Kipsilevy	13.00	0.2400	2.000000e-09	0.00	730.00

T = Paksuus, LJ = Lämmönjohtavuus, VHL = Vesihöyryn läpäisevyys

### Lämpötilat ja kosteudet:

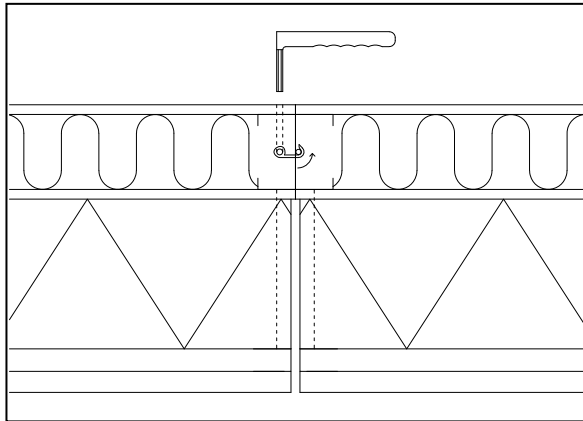
Piste:	3:n päivän kylmin (0.0 h)				
	T [C]:	KK [g/m <sup>3</sup> ]:	KM [g/m <sup>3</sup> ]:	SK [%]:	C [g/m <sup>2</sup> ]:
U	-10.00	2.14	1.92	90.0	0.00
1	-9.67	2.20	1.92	87.5	0.00
2	12.50	11.00	6.05	55.0	0.00
3	12.64	11.09	6.05	54.5	0.00
4	19.53	16.82	6.05	36.0	0.00
5	19.67	16.95	6.05	35.7	0.00
S	20.00	17.29	6.05	35.0	0.00

T=Lämpötila, KK=Kyllästymiskosteus, KM=Kosteusmäärä, SK=Suhteellinen kosteus

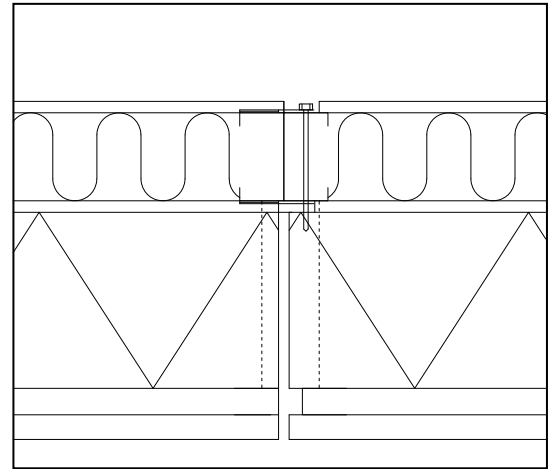
### Lisätiedot:



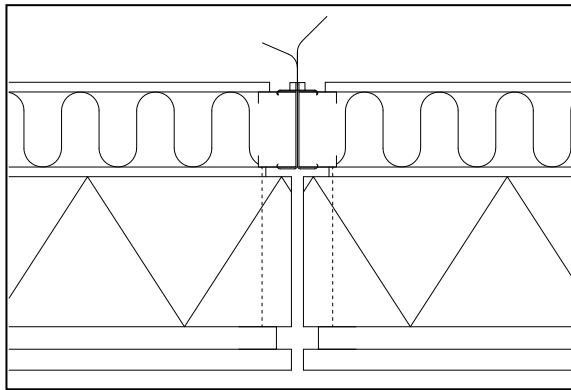
## LIITE 10: KIINNIKEMEKANISMEJA



**Sarana-malli**, jossa elementtien sauman kiinnitys tehdään koukkumaisen ja tankomaisen osan avulla. Koukku voi kääntyä vaaka- ja pystysuunnassa. Kiinnitysmekanismiin on oma työkalu, jolla kiinnitys tehdään. Työkalun vaatima reikä kitataan umpeen kiinnityksen jälkeen.



**Ruuviliitos**, jossa toisen elementin orren laippoihin on kiinnitetty jatkoslevyt. Jatkoslevyt ulottuvat kiinnitettävän elementin laippojen päälle. Kiinnitettävässä elementissä on otettu huomioon ruuviliitoksen vaatima tila. Poraruuvi ruuvataan sisemmästä laipasta aina ulkolaippaan asti, jolloin orret ovat liitetty toisiltaan molemmista laipoistaan.



**Vaijerikiinnitys**, jossa vaijerit on kiinnitetty orsien ulompiin laippoihin. Vaijerit tuodaan elementtien välistä sisäpuolelle ja niihin kiinnitetään kiristyskappale, jossa on tartunnat C-orren sisäpuolen laippoihin.

## LIITE 11: ELEMENTTIEN VÄLISEN PYSTYSAUMAN KIINNIKKEIDEN MITOITUS

Tarkasteltava kohde on yksikerroksinen versio liitteessä 1 esitellystä RET pientalosta.

Harjan korkeus	$h_h = 6 \text{ m}$
Tuulikuorma	$q_t = 0,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Talon pitkän sivun pituus	$L = 15,3 \text{ m}$
Tuulikuorma räystäällä	$q_r = q_t * h_h = 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Levyjäykisteen korkeus	$h_l = 2,5 \text{ m}$
Levyjäykisteen leveys	$b = 0,6 \text{ m}$
Levyjen määrä elementillä	$n = L/b = 25,5$

Tuulikuormasta välittyvä seinän ja ylä- ja alapohjan välissä vaikuttava leikkausvoima

$$F = q_r * L/2 = 22,95 \text{ kN}$$

Normaalivoima elementtien liitoksessa

$$N = \frac{F * h_l}{n * b} = 3,75 \text{ kN}$$

Yläpohjan oma paino  $G_s$  0,75 m ja  $G_p$  1,5 m väliseltä matkalta liitteestä 4 esitetyllä yläpohjaratkaisulla, yläpohjan omasta painosta aiheutuva kuorma on 2,1 kN/m kattoristikoiden jaon ollessa k900

$$G_s = 0,42 \text{ kN}$$

$$G_p = 2,20 \text{ kN}$$

Omasta painosta aiheutuva kuorma on pienempi kuin N, joten ankkuroitava voima on

$$N_t = 3,75 - (0,42 + 2,2) = 1,13 \text{ kN}$$

ja sauman kiinnikkeet mitoitetaan leikkausvoimalle

$$V = G_p = 2,20 \text{ kN}$$

Ruuvien mitoitus tehdään SFS-EN 1993-1-3 + AC mukaan. Koska ruuveja kuormittaa leikkausvoima, tarkastellaan ruuvien reunapuristusjäykkyys ja nettopoikkileikkauksen kestävyys. Ruuvien etäisyydet toisistaan ja orren reunoista tehdään myös SFS-EN 1993-1-3 + AC mukaan.

Käytetään lujuusluokka 4.6 ruuveja, ruuvikoko vähintään M6, uloin halkaisija 3,5 mm (kierteet mukaan lukien), sisempi halkaisija 3 mm (kierteitä ei oteta huomioon).

Vetomurtolujuuden nimellisarvo (S350GD+Z)	$f_u = 420 \text{ N/mm}^2$
Osavarmuuskerroin	$\gamma_{M2} = 1,25$
Ruuvien nimellinen halkaisija	$d = 3,5 \text{ mm}$
Reiän nimellinen halkaisija	$d_0 = 3,2 \text{ mm}$
Ohuemman liitettävän osan paksuus	$t = 1,5 \text{ mm}$
Kerroin, joka riippuu d:stä ja d <sub>0</sub> :sta	$\alpha_b = 1$
Kerroin, joka riippuu t:stä	$k_t = 1$
Kerroin, joka riippuu ruuvien lukumäärästä	$r = 0,2$
Kerroin, joka riippuu d <sub>0</sub> :sta	$u = 20 \text{ mm}$
Liitettävän osan nettopinta-ala	$A_{net} = 285,576 \text{ mm}^2$
(otettu huomioon termorei'itys, ruuvien reiät ja sinkityksen paksuus 0,02mm molemmin puolin)	
Ruuvien jännityspinta-ala	$A_s = 7,07 \text{ mm}^2$
Ruuvien vetomurtolujuus	$f_{ub} = 400 \text{ N/mm}^2$

Reunapuristuskestävyys

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 * \alpha_b * k_t * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = 4410 \text{ N}$$

Nettopoikkileikkauksen kestävyys

$$\beta = 1 + 3 * r * \left( \frac{d_0}{u} - 0,3 \right) = 0,916 \quad , \beta \leq 1$$

$$F_{n,Rd} = \frac{\beta * A_{net} * f_u}{\gamma_{M2}} = 91938 \text{ N}$$

Leikkauskestävyys lujuusluokalle 4.6

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 * f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2}} = 1357 \text{ N}$$

Liitokselta ei vaadita muodonmuutoskykyä, koska siihen kohdistu lämpötilaeroja tms.

Liitokseen kohdistuva leikkausvoima on 2200 N:

$$F_{b,Rd} \geq 2200 \text{ N}$$

$$F_{n,Rd} \geq 2200 \text{ N}$$

$$2 * F_{v,Rd} \geq 2200 \text{ N}$$

Laskennallisesti liitoksessa riittää kaksi ruuvia, joiden halkaisija 3,5 mm. Jotta orret olisivat kauttaaltaan toisissaan kiinni, suositellaan, että ruuvit asennetaan viitenä kahden ruuvien ruuvirivinä termorei'ityksen molemmin puolin. Ylin ja alin ruuvirivi asennetaan 50 mm etäisyydelle orren ylä/ala reunasta.

Monilla ruuvivalmistajilla on taulukoituna valmiiksi ruuvien lujuuksia. Esimerkiksi käytettäessä Hiltin S-MD 51 Z 4,8xL poraruuveja 1,25 mm vahvoilla orsilla, riittää kaksi ruuvia (yhden ruuvien leikkausvoimakapasiteetti 2,05 kN). Mutta kuten edellisessä kappaleessa todettiin, suositellaan käytettävän suurempaa määrää ruuveja.

## LIITE 12: ELEMENTIN SOKKELILIITOKSEN SEKÄ U-ORREN MITOITUS

Tarkasteltava kohde on yksikerroksinen versio liitteessä 1 esitellystä RET pientalosta.

Pystyorren korkeus  $h_o = 2,5 \text{ m}$

Tuulikuorma  $q_t = 0,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Liitteessä 11 laskettu rungon jäykistyksestä aiheutuva leikkausvoima elementin ja sokkelin liitoksessa 15,3 metriä pitkällä elementillä.

$$F_{j'} = 22,95 \text{ kN}$$

Liitteessä 11 laskettu rungon jäykistyksestä aiheutuva leikkausvoima elementin ja sokkelin liitoksessa 1 metrin matkalla.

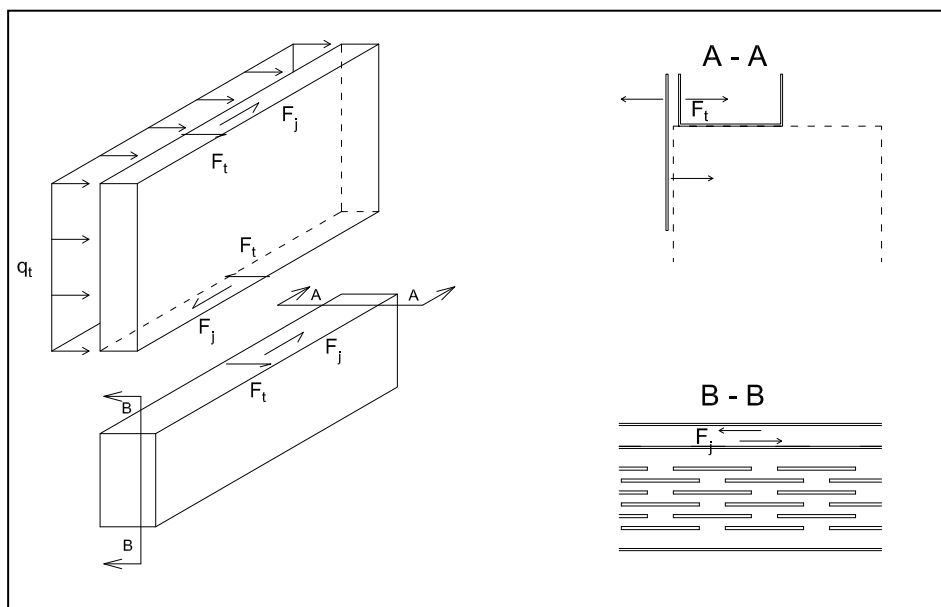
$$F_j = F_{j'} / 15,3 \text{ m} = 1,5 \text{ kN}$$

Seinään kohdistuvasta tuulikuormasta puolet jakautuu elementin ja sokkelin väliselle liitokselle. Toinen puoli välittyy välipohjan kautta jäykistäville rakenteille.

Elementin ja sokkelin liitokseen kohdistuva leikkausvoima metrin matkalla.

$$F_t = q_r * h_o / 2 = 0,625 \text{ kN}$$

$F_j$  ja  $F_t$  eivät voi vaikuttaa liitoksessa samaan aikaan täydellä teholla, koska tuulenpaine voi kuormittaa rakenteita vain yhdestä suunnasta kerrallaan. Voimat on esitetty alla olevassa kuvassa. Voimat voivat olla positiivisia tai negatiivisia.



### Mitoitetaan ensin liitoksen osat voimalle $F_j$

Poraruuvien leikkauskestävyyksiä on taulukoitu valmiiksi monen ruuvivalmistajan toimesta. Esimerkiksi Hiltin poraruuvitaulukon mukaan yhdellä S-MD 51 Z 4,8xL poraruuvilla kiinnitettyjen 1,0 mm vahvojen teräslevyjen liitoksen leikkausvoimakestävyys on:

$$V_{R,k} = 2,9 \text{ kN}$$

josta saadaan laskettua yhdelle ruuville mitoitusarvo leikkauskestävyydelle:

$$V_{rec} = \frac{V_{R,k}}{2,0} = 1,45 \text{ kN}$$

Tarvittava ruuvien määrä metrille

$$jako_{ruuvit} = \frac{V_{rec}}{F_j} = k900 \text{ tai } 2kpl \text{ k1800}$$

Jos liitettävä 1,0 mm teräslevy korvataan 1,5 mm teräslevyllä ja 1,0 mm vahva U-orssi 1,25 mm vahvalla orrella, ruuvien jako on k1900.

### Sitten mitoitetaan liitos voimalle $F_t$

Käytetään samoja Hiltin S-MD 51 Z 4,8xL poraruuveja ja 1,0 mm vahvaa U-ortta ja teräslevyä. Poraruuvitaulukon mukaan yhdellä ruuvilla toteutetun liitoksen kestävyys vedolle on:

$$N_{R,k} = 1,5 \text{ kN}$$

josta saadaan laskettua yhdelle ruuville mitoitusarvo leikkauskestävyydelle:

$$N_{rec} = 1 * \frac{N_{R,k}}{2,0} = 0,75 \text{ kN}$$

Tarvittava ruuvien määrä metrille

$$jako_{ruuvit} = \frac{N_{rec}}{F_t} = k1200$$

U-orren ja teräslevyn liitoksen mitoittaa jäykistyksestä aiheutuva leikkausvoima.

### Sisäpuolen laipan tartuntateräks

U-orren sisäpuolen laipassa käytettävien 4mm A500HW tartuntaterästen kokonaispoikkileikkauspinta-ala metrille täytyy olla yhtä suuri kuin ruuvien. Teräksen leikkauskestävyys:

$$f_{Vd,A500HW} = \frac{500 \text{ MPa}}{1,4} * 0,6 = 187,5 \text{ MPa}$$

4 mm terästen jako

$$jako_{tartunta} = \frac{\pi * (2\text{mm})^2}{\frac{V_{rec}}{f_{Vd,A500HW}} * \frac{1}{0,9}} = \varnothing 4\text{mm k}1800$$

Käytettäessä 4mm S275 takoja, jako on k1000.

### Teräslevyn ja sokkelin liitos

1,0 mm vahva teräslevy ammutaan nauloilla kiinni betonisokkeliin. Nauloina käytetään Hiltin X-U 22 P8 yleisnauloja ja betonin puristuslujuus on pienempi kuin 45 MPa. Myös naulojen leikkaus- ja vetokestävyyksiä on taulukoitu valmiiksi monen ruuvivalmistajan toimesta.

Hiltin X-U 22 P8 leikkaus- ja vetolujuus ovat yhtä suuret yhdelle naulalle:

$$V_{rec} = N_{rec} = 0,2 \text{ kN}$$

Naulojen määrän määrittää leikkausvoima

$$F_j = 1,5 \text{ kN}$$

Tarvittavien naulojen määrä metrille

$$jako_{naulat} = \frac{V_{rec}}{F_j} = 3\text{kpl k}400$$

Vaihtoehtoisesti X-U 28 P8 nauloilla, joilla leikkaus ja vetolujuus ovat 0,4 kN, nauvoja tarvitaan 3kpl k800.

Teräslevyn kiinnitys sokkeliin voidaan tehdä myös sokkelin valun yhteydessä sokkeliin kiinnitettävillä teräksillä tai muilla mekaanisilla kiinnikkeillä.

## LIITE 13: ELEMENTIN YLÄPALKIN MITOITUS

Palkki mitoitetaan tapaukselle, jossa kattokannattajien jako on k1200 ja elementissä oleva ikkuna-aukko on 1200 mm x 1200 mm.

Kattokannattaja osuu keskelle ikkuna-aukkoa, jolloin palkin maksimimomentti on mahdollisimman suuri. Elementin palkki täytyy mitoittaa sen aukon kohdalta, jossa palkkiin kohdistuu suurimmat jännitykset.

Palkki mitoitetaan ProfBeamilla, joka mitoittaa vain yksi-aukkoisia palkkeja. Tätä tapausta käsitellään kolmiaukkoisena jatkuvana palkkina, jossa keskimäinen aukko on 1200 mm ja sivuilla olevat aukot 600 mm.

ProfBeamia varten lasketaan palkin momentit tuilla B ja C Rakentajain kalenterin taulukoiden avulla.

Yhden seinäneliön omapaino

$$P_s = 621 \text{ N/m}^2$$

Ikkunan tukireaktio, joka välittyy palkille

$$F_r = \frac{60 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2}{6} = 0,1 \text{ kN}$$

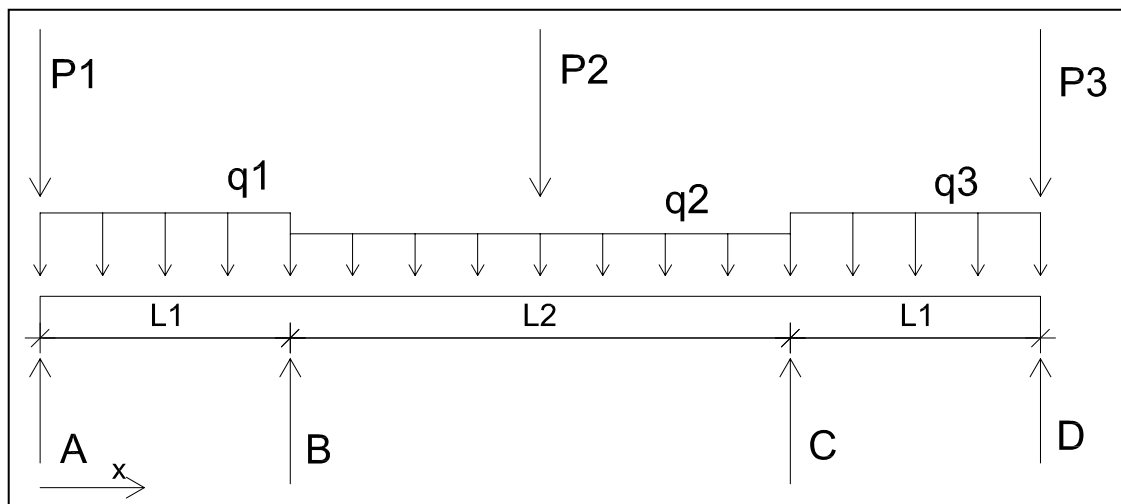
Kattoristikon omapaino

$$P_k = 2,2 \text{ kN/m}$$

Kattoristikon kautta välittyvä lumikuorma

$$P_l = 11 \text{ kN/m}$$

Vapaakappalekuva palkista.



Kattoristikon tukireaktio

$$P1 = P2 = P3 = 1,2 \text{ m} * (P_k + P_l) = 15,84 \text{ kN}$$

Seinän omapaino

$$q1 = q3 = 0$$

$$q2 = P_s * 0,4 \text{ m} + \frac{F_r}{1,2 \text{ m}} = 0,25 \text{ kN/m}$$

Runkotolppien tukireaktiot

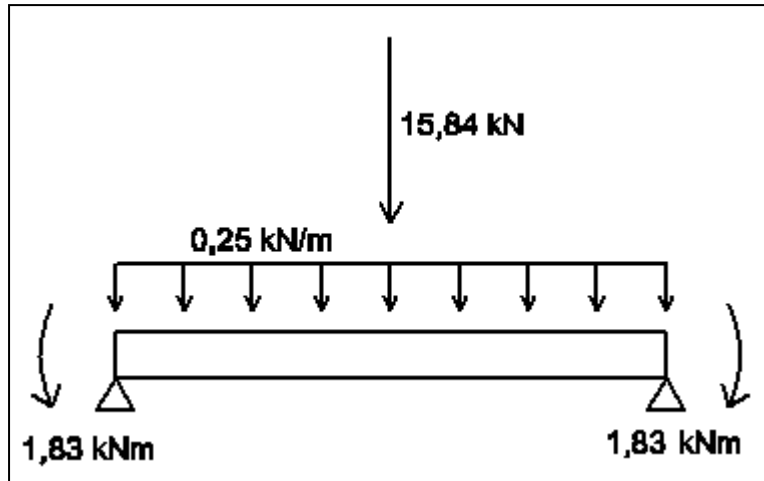
$$A = D \text{ ja } B = C$$

Seinän omapaino ei todellisuudessa jakaudu palkille tasaisesti, vaan se jakautuu palkille pystyorsien kautta. Kuorma  $q2$  on kuitenkin niin pieni, että se voidaan ottaa tässä tapauksessa tasaisena kuormana huomioon.

Lasketaan momentit tuilla B ja C Rakentajain kalenteri 2004 kolmiaukkoisen jatkuvan palkin kaavojen avulla.

$$M_b = q_2 * k_q * L_1^2 + P_2 * k_p * L_1 = -1,83 \text{ kNm}$$

Kun momentti  $M_b$  on selvitetty, voidaan piirtää kuva yksiaukkoisesta palkista, jossa on ProfBeamiin sijoitettavat kuormat. Kattoristikon pistekuormasta 15,84 kN syötettiin 1,2m\*2,2 kN pysyvänä kuormana ja 1,2m\*11kN lumikuormana.



Mitoitetaan palkki yllä olevilla kuormilla ProfBeamilla.

Kuormat kestäviä palkkivaihtoehtoja on esitetty kuvassa 5.13.



## LIITE 14: ELEMENTIN RAKENTEIDEN MITOITUS IKKUNA-AUKON KOHDALLA

### Ikkunaliitoksen mitoitus

Ikkunan koko on 1200 x 1200 mm ja paino 60 kg. Ikkunassa 2+2 lasit. Ikkunan sivulla on 2 ruuvikiinnikettä ja ylhäällä ja alhaalla yhdet ruuvikiinnikkeet. Ikkunan paino jakautuu tasaisesti jokaiselle kiinnikkeelle. Karmin syvyys on 175 mm ja sisäsmyyginä käytetään 42 mm puutavaraa.

Ikkunan tuulikuorma  $q_t = 0,5 \frac{kN}{m^2}$

Käytettävä L-orso voidaan mitoittaa kolmiulotteisena laattana, jossa on ruuvista välittyvä pistekuorma. Tällöin tulos on tarkka, mutta laskenta on työläs.

L-orso voidaan mitoittaa myös yksinkertaisena ulokepalkkina, jolloin laskeminen on nopeampaa. Tulos on epätarkempi, mutta se on silti varmallalla puolella.

Mitoitetaan L-orso ulokepalkkina.

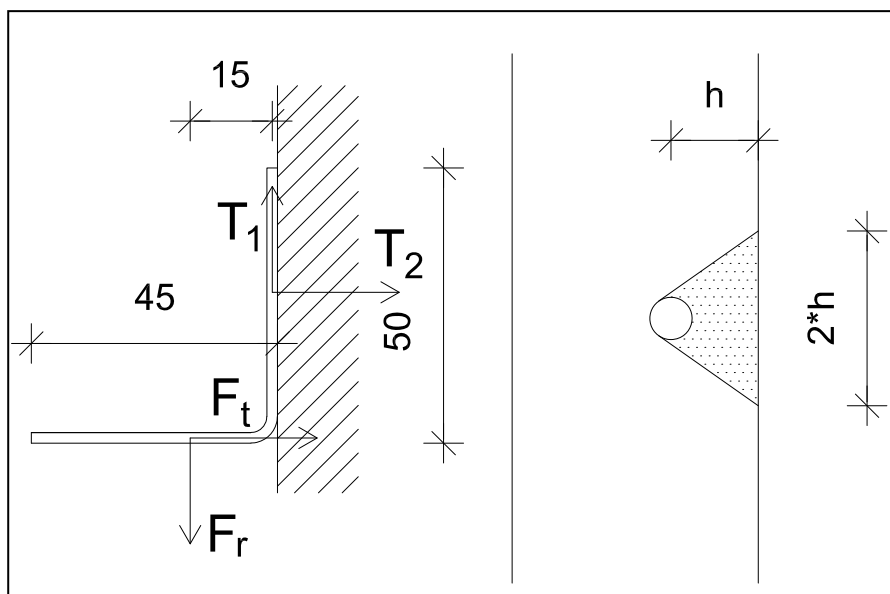
L-orrella kannatellaan ainoastaan ikkunaa, joten ikkunan painosta aiheutuva kuorma yhdelle ruuville

$$F_r = \frac{60kg * 9,81m/s^2}{6} = 0,1 kN$$

Liitosta kuormittaa myös tuulikuorma, josta yhdelle ruuville kohdistuu

$$F_t = \frac{q_t * 1,2m * 1,2m}{6} = 0,12 kN$$

Alla on kuva ulokepalkista vaakaliitoksessa ja ruuvin välittämän kuorman jakautumisesta L-orrella.



L-orren kulmassa vaikuttava momentti  $M_t = F_r * h$   
 $2 * h$  matkalla taivutusvastus  $W = \frac{1}{6} * 2 * h * t^2$ , jossa  $t$  on orren vahvuus

Kuormasta  $F_r$  aiheutuva taivutusjännitys, kun  $t = 1,0$  mm

$$\sigma_{Fr} = \frac{M_t}{W} = 300 \text{ N/mm}^2$$

Kuormasta  $F_r$  aiheutuva taivutusjännitys, kun  $t = 1,5$  mm

$$\sigma_{Fr} = \frac{M_t}{W} = 134 \text{ N/mm}^2$$

Kuormasta  $F_t$  aiheutuva puristusjännitys, kun  $t = 1,0$  mm

$$\sigma_{Ft} = \frac{F_t}{2 * h * t} = 4 \text{ N/mm}^2$$

Kuormasta  $F_t$  aiheutuva puristusjännitys, kun  $t = 1,5$  mm

$$\sigma_{Ft} = \frac{F_t}{2 * h * t} = 2,7 \text{ N/mm}^2$$

S350 GD teräksen myötölujuus

$$\sigma_{S350GD} = \frac{350 \text{ MPa}}{1,4} = 250 \text{ N/mm}^2$$

Jotta L-orso kestäisi paikallisen ruuvin välittämän kuorman, täytyy seuraava ehto toteutua

$$\sigma_{S350GD} \geq \sigma_{Fr} + \sigma_{Ft}$$

Tämä ehto toteutuu 1,5 mm vahvalla L-orrella, mutta ei 1,0 mm vahvalla orrella. Tämä ratkaisu on hyvin varmalla puolella oleva ja tarkemmalla tarkastelulla saattaa selvitä, että myös 1,0 mm vahva orso kestäisi.

Seuraavaksi mitoitetaan ruuvit

Ikkunan kiinnitykseen käytetään ikkunan valmistajan ohjeistamia ruuveja. L-orteen voidaan tehdä tarvittaessa esireikiä.

L-orso kiinnitetään ikkuna-aukon yläreunassa kulkevaan U-orteen ja pystyorsiin ruuvein. Tässä tapauksessa ruuvi-liitokseen kohdistuu leikkaus- ja vetovoimaa.

Liitoksen vetovoima, kun kiinnike sijaitsee 20 mm etäisyydellä 50 mm pitkän laipan yläreunasta

$$F_l = \frac{F_r * 15}{30} = 0,05 \text{ kN}$$

Liitoksen leikkausvoima

$$F_r = 0,1 \text{ kN}$$

Voimat liitoksessa ovat erittäin pieniä laskennallisesti koko ylä-L-orren liittämiseksi riittää yksi X-U 16 P8 naula. Orso tulee kuitenkin olla jämsästi kiinni U-orressa, joten suositellaan käytettäväksi vähintään yhtä X-U 16 P8 naulaa jokaisen pystyorrenkohdalla

ja L-orren reunoilla. Isoimmissa aukoissa voidaan käyttää tiheämpää naulajakoa. Lopullista mitoitus tehdessä otetaan huomioon L-orren mitoista riippuva kulman pyöristyssäde, jonka vuoksi kiinnikkeeseen kohdistuva vetovoima voi kasvaa hieman tuulikuorman vaikutuksesta. Nyt tässä tarkastelussa pyöristystä ja tuulikuormaa ei otettu huomioon.

### Ikkuna-aukon sivulla olevien orsien mitoitus

Kuormat tasataan aukkojen yli aukkojen reunoilla oleville orsille elementin ylhäällä kulkevan palkin kautta. Aukon kohdalla kuormat viedään runkoa pitkin ylös. Tällaista kuormaa ovat lähinnä rakenteiden oma paino.

Aukon sivuilla olevat orret mitoitetaan ProfBeam ohjelmalla pyrkien käyttämään samoja mittoja kuin rungossa yleensäkin on käytetty.

Lasketaan aukon kohdalta ylhäällä kulkevalla palkille vietävät kuormat.

Ikkuna-aukon yläpuolelle jää 400 mm korkuinen seinäalue. Lasketaan tämän alueen omapaino.

Materiaalien tiheyksiä:

Teräs	$\rho_t = 7400 \text{ kg/m}^3$
Mineraalivilla	$\rho_m = 50 \text{ kg/m}^3$
Polyuretaani	$\rho_p = 35 \text{ kg/m}^3$
Kipsilevy	$\rho_k = 700 \text{ kg/m}^3$
Ulkoerohous (puu)	$\rho_u = 450 \text{ kg/m}^3$

Yhden seinäneliön omapaino  $P_s = 621 \text{ N/m}^2$

Ikkunaneliön paino  $P_i = 410 \text{ N/m}^2$

Kaikkien rakenteiden omapaino seinämetrillä

$$P_f = \frac{1,9 \text{ kN}}{0,6 \text{ m}} = 3,17 \text{ kN/m}$$

Sivuorrelle välittyvä omapaino

$$P_t = P_f * (0,6 \text{ m} + 0,3 \text{ m}) = 2,853 \text{ kN}$$

Ikkuna on kevyempi kuin umpinainen seinärakenne ja osa ikkunan painosta viedään alakarmin kautta alas, joten pyöristetään omapaino

$$P_{td} = 2,5 \text{ kN}$$

Lumikuorma  $q_l = 11 \text{ kN/m}$

Lumikuorma sivuorrelle  $q_{ld} = q_l * (0,6 \text{ m} + 0,3 \text{ m}) = 9,9 \text{ kN}$

Mitoitetaan C-orssi ProfBeamilla seuraavilla kuormilla

Lumikuorma  $9,9 \text{ kN}$

Hyötykuorma  $0 \text{ kN}$

Omapaino	2,5 kN
Epäkeskisyys (25 mm)	$(9,9 \text{ kN} + 2,5 \text{ kN}) * 0,025 \text{ m} = 0,31 \text{ kNm}$

ProfBeamilla mitoitettuna 1200x1200 mm aukon sivuille asennetaan samalla poikkileikkauksella runkotolppien kanssa oleva 1,25 mm vahva C-orisi. Yksikerroksisen ratkaisun runkotolppana käytetyn C-orren paksuus oli 1,0 mm, joten orren paksuus kasvaa yhdellä pykälällä. Poikkileikkaus pysyy samana.

1,25 mm vahvan orren, jonka poikkileikkauksen uuman korkeus on 100 mm, laippojen leveys 50 mm ja reunakäänteiden pituus 10 mm, käyttöaste on 83 %, joten orren kapasiteettia ei ole käytetty kokonaan.

1,0 mm vahvalla orrella puristus ja taivutusvoiman yhteisvaikutuskapasiteetti loppuu kesken, jolloin tämän kuormitusyhdistelmän käyttöaste on 127 %.

Aukon yläpuolisten rakenteiden tuulikuormat viedään reunoille aukon yläreunassa kulkevan U-orren ja ylhäällä kulkevan U-orren kautta. Ylhäällä kulkeva U-orren ja palkin yksityiskohdat ja mitoitukset on esitelty kappaleessa 5.3.

Aukon yläpuolisen seinäpinnan tuulikuormasta puolet välittyy aukon yläreunassa kulkevan U-orren kautta sivuille. U-orren ja pysty-orren välinen liitos mitoitetaan tälle kuormalle.

Lasketaan tuulikuorma

Ikkunan asennetaan 900 mm korkeuteen elementin alareunasta, jolloin 1200 mm korkealla ikkunalla ja 2500 mm korkealla seinäelementillä ikkunan yläpuolelle jää 400 mm seinää. Tältä osuudelta puolet tuulikuormasta välittyvät ikkuna-aukon yläreunassa kulkevalle U-orrelle. Lisäksi U-orrelle välittyy ikkunan ruuviliitoksesta  $F_t$  0,12 kN tuulikuormaa.

Ikkuna-aukon yläpuolinen tuulikuorma

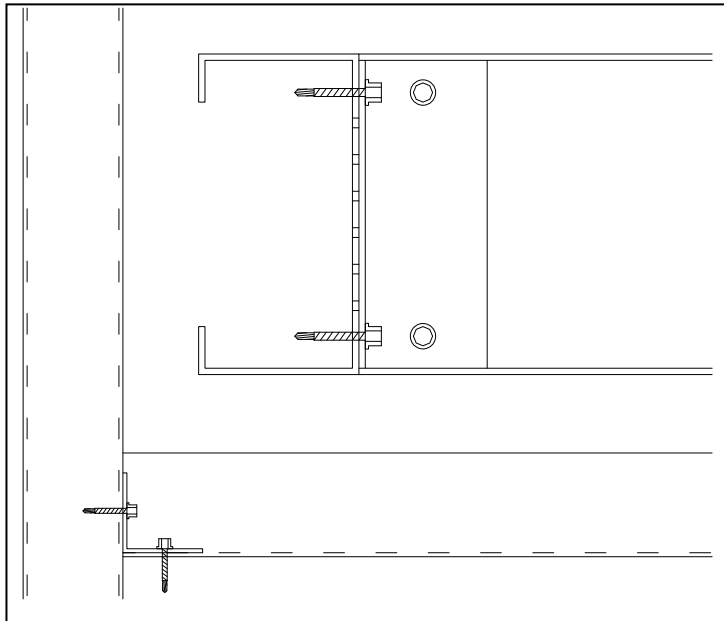
$$q_w = 0,2 \text{ m} * 1,2 \text{ m} * q_t = 0,12 \text{ kN}$$

Kokonaistuulikuorma liitoksessa

$$q_{tot} = \frac{q_w + F_t}{2} = 0,12 \text{ kN}$$

Mitoidetaan liitos tuulikuormalle

Liitos toteutetaan alla olevan kuva mukaan kulmateräksellä



Kulmateräs välittää  $q_{tot}$  suuruisen leikkausvoima sivuorrelle. Käytetään 1,0 mm vahvaa ja 100 mm pitkää kulmaterästä, jossa ruuvikiinnitys kahdella ruuvilla U-orteen ja kahdella ruuvilla sivuorreen.

Hiltin ruuvitaulukon mukaan ruuveiksi riittää S-MD 51 Z 4,8xL poraruuvi, jonka yhden ruuvin leikkauskestävyys 1,0 mm vahvoilla teräslevyillä on 1,45 kN.

## LIITE 15: ELEMENTIN NOSTAMINEN

Mitoitetaan elementin liitokset elementin nostosta aiheutuvalla kuormitustapaukselle. Yläpalkkiratkaisuna käytetään kuvan 5.13 vasemmanpuoleista putkiratkaisua.

Mitoitettava elementti on liitteessä 1 esitetyn RET pientalon 9,2 metriä pitkä seinä.

### ELEMENTIN LIITOKSET

Elementissä on 4 nostolenkkiä tasavälein ja seinäelementin runkotolppien määrä on 17 kpl, kun tolppien jako on 600 mm.

Yhdelle nostolenkille kohdistuu kuormaa 5 tolpalta. Koska runkotolppien jako ei mene tasan elementin pituuden kanssa, tasataan ero yhdellä pienemmällä tolpan välillä. Mitoitetaan elementti nostolenkin kohdalta, jossa tolpat ovat tasavälein, koska tällöin kuormat ovat suurimmat.

Yhden seinäneliön omapaino

$$P_s = 621 \text{ N/m}^2$$

Nostolenkin voima

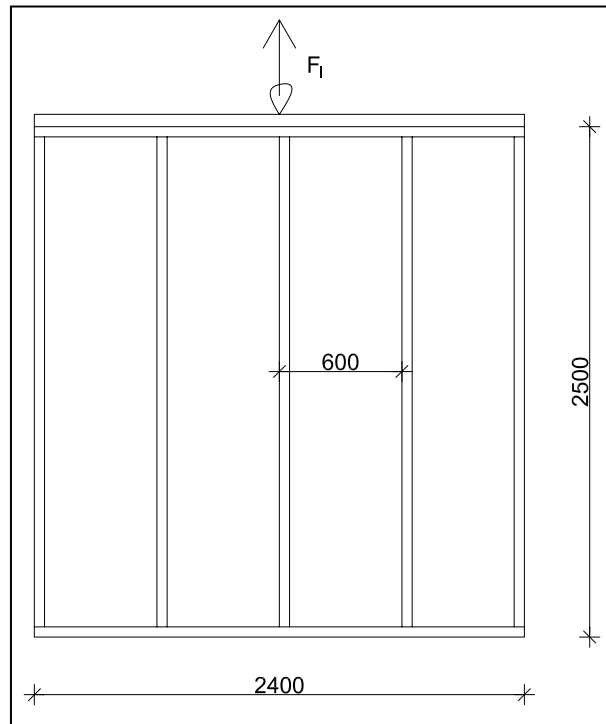
$$F_l = 2,4\text{m} * 2,5\text{m} * P_s = 3,726 \text{ kN}$$

Tolpan (C) ja yläorren (U) liitosvoima

$$F_t = 0,6\text{m} * 2,5\text{m} * P_s = 0,9315 \text{ kN}$$

Yläorren (U) ja putkipoikkileikkauksen liitosvoima

$$F_p = F_l = 3,726 \text{ kN}$$



Tarkistetaan, että tolpan ja yläorren liitos kestää. Käytetään Hiltin S-MD 51 Z 4,8xL poraruuvia molemmilla C-orren laipoilla.

Ruuvikiinnityksen leikkauslujuus, kun molemmat orret ovat 1,0 mm vahvoja, on Hiltin taulukon mukaan 2,9 kN. Leikkausvoima liitoksessa on 0,93 kN, joten liitos kestää.

Mitoitetaan yläorren ja putkipoikkileikkauksen liitoksen kiinnitys. Liitos tehdään alla olevan kuvan mukaisesti Hiltin S-MD 53 Z 4,8xL poraruuveilla termorei'ityksen molemmin puolin.

Yhden ruuvirivin (2 kpl ruuveja) vetolujuus Hiltin taulukon mukaan on 1,0 mm ja 2,5 mm väliselle liitokselle 2,7 kN. Liitoksen kuorma 2,4 metrin matkalla on 3,7 kN, joten ruuvirivejä tarvitaan kaksi per 2,4 metriä.

Putkipoikkileikkaus kiinnitetään yläor-teen yhdellä ruuvirivillä (2 kpl ruuveja) joka toisen pystytolpan kohdalta niin, että elementin molemmissa päissä on ruuvirivi.

Tämän ruuvikiinnityksen vetovoimakapasiteetti koko elementillä on

$$N_{ruuvi} = 9 * 2,7 \text{ kN} = 24,3 \text{ kN}$$

ja leikkausvoimakapasiteetti

$$V_{ruuvi} = 9 * 4,7 \text{ kN} = 42,3 \text{ kN}$$

Liitoksessa vaikuttava vetovoima koko elementin matkalla on

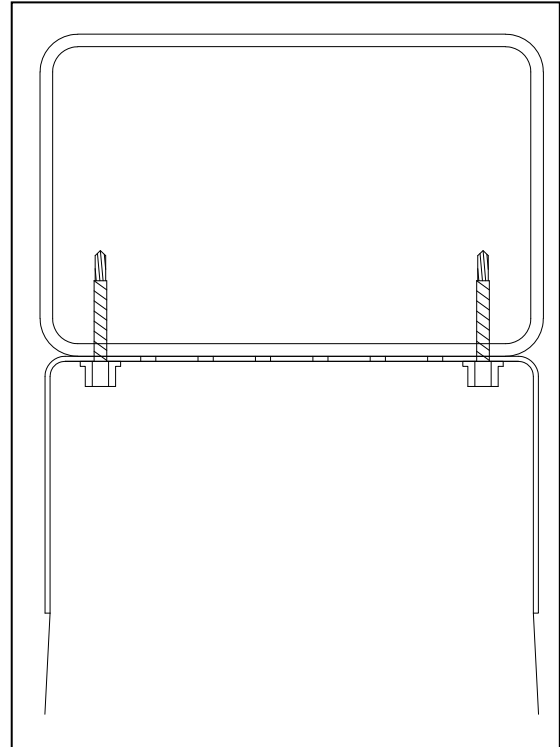
$$N_{kuorma} = 9,2\text{m} * 2,5\text{m} * P_s = 14,3 \text{ kN}$$

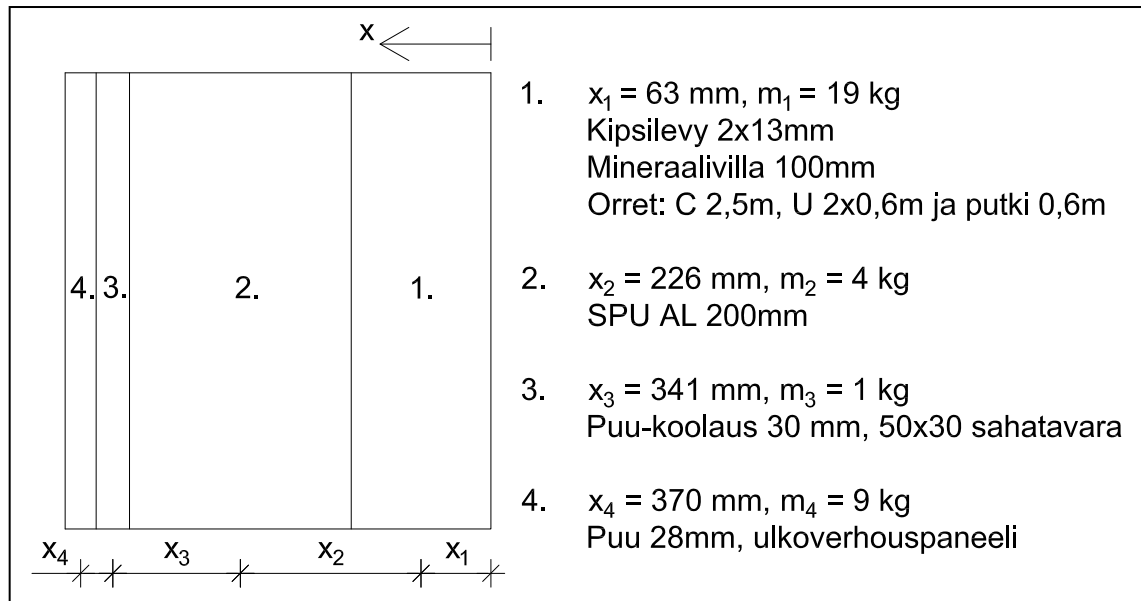
Kiinnitys sitoo erittäin hyvin putki- ja U-orren toisiinsa, jolloin U-orssi osallistuu kuormankantoon myös aukkojen yli. Laskennassa käytetyt kuormat ovat staattisia kuormia ja elementtiä nostettaessa liitoksiin kohdistuu hetkellisesti suurempia dynaamisia kuormia. Siksi on hyvä, että liitoksissa riittää reilusti kapasiteettia staattisiin kuormiin nähden.

## ELEMENTIN NOSTOLENKIT

Nostolenkkeinä käytetään vähintään 3,8 kN kestävästä nostolenkkiä, joka kiinnitetään putkiorteen nostolenkin valmistajan ohjeiden mukaan.

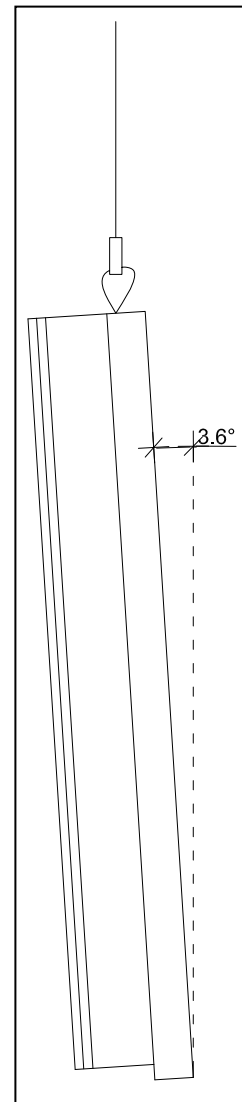
Elementin nostolenkit sijoitetaan elementtiin niin, että elementti pysyy nostettaessa suorassa. Lasketaan lenkkien sijainti seinän syvyys suunnassa.





$$x = \frac{x_1 * m_1 + x_2 * m_2 + x_3 * m_3 + x_4 * m_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} = 175 \text{ mm}$$

Massakeskipiste sijaitsee tässä tapauksessa 175 mm etäisyydellä elementin sisäreunasta. Nostolenkit asennetaan kuitenkin 13 - 113 mm etäisyydelle sisäreunasta. Tästä aiheutuvan epäkeskisyyden vuoksi elementtiä ei pystytä nostamaan täysin suoraan. Lenkit sijoitetaan mahdollisimman kauas sisäreunasta lenkkien valmistajan ohjeiden mukaan. Esimerkiksi kun lenkit asennetaan 83 mm etäisyydelle sisäreunasta, elementti on nostettaessa 3,6° vinossa.





## LIITE 16: ELEMENTIN KUVAT JA OMINAISUUDET

U-arvo	0,092 W/m <sup>2</sup> K
Kokonaispaksuus	384 mm
Ilmaääneneristävyys R <sub>w</sub>	51 dB
Paino	64 kg/m <sup>2</sup>
Materiaalikustannus (ei sis. yläpalkkia ja puuosia)	~52 €/m <sup>2</sup>

