

Emilia Lahtinen

PUURAKENTEISTEN VÄLIPOHJIEN VERTAILU JA OPTIMOINTI

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK)

Teollinen puurakentaminen

2025



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä	Emilia Lahtinen
Työn nimi	Puurakenteisten välipohjien vertailu ja optimointi
Toimeksiantaja	Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Oy
Vuosi	2025
Sivut	99 sivua, liitteitä 4 sivua
Työn ohjaajat	Marko Voutilainen, Verner Laari ja Juha-Pekka Luukkainen

TIIVISTELMÄ

Puurakenteisten välipohjien mitoittavaksi tekijäksi tulee usein värähtelymitoitus, joka on Suomessa ylimitoitettua, joten puurakenteiset välipohjaratkaisut tarvitsevat lisää tutkimusta. Opinnäytetyössä käsiteltiin PuuHyVä-hankkeen tekemiä laboratoriomittauksia erilaisille puurakenteisille välipohjille. Savonlinnan teollisen puurakentamisen laboratorioissa puurakenteiset välipohjat rakennettiin todelliseen mittakaavaan ja niistä mitattiin ominaistajuutta ja taipumaa eri rakennusvaiheissa.

Opinnäytetyön keskeisin tavoite oli vertailla kolmea puurakenteista välipohjaratkaisua, joissa kannattajapalkkeina toimii TK-palkki, easi-joist®-palkki ja LVL 48 P -palkki. Jokaisesta ratkaisusta on kaksi versiota, jotta niitä voidaan vertailla keskenään. Välipohjaratkaisuista tehtiin LCA-, kustannus- ja ominaisuusvertailua. Hiilijalanjäljen ja kustannusten laskenta perustui materiaalin pohjalta tehtyihin laskelmiin. Vertailun pohjalta tehtiin optimaalisia välipohjaratkaisuja, joissa huomioidaan kustannus- ja materiaalitehokkuus sekä hiilijalanjälki. Optimoinnissa hyödynnettiin Exceliä.

Jotta puurakenteisten välipohjien ylimitoitusta voidaan tutkia, verrattiin ominaistajuuden ja taipuman laboratoriomittauksia laskennallisiin mitoitusarvoihin. Laboratoriomittausten tarkoitus oli todistaa, että välipohjarakenteet ovat taipuman ja ominaistajuuden osalta parempia kuin laskennalliset arvot. Optimoinnin tarkoituksena oli selvittää, pystytäänkö joitain materiaaleja poistamaan välipohjarakenteesta ja mitkä palkit toimivat parhaiten välipohjassa.

Laboratoriomittauksien tulokset antoivat hyvää informaatiota jokaisen rakennusvaiheen muutoksista. Levytykset ja poikittaisjäykistyksen jäykistyvät rakennetta, mikä pienensi ominaistajuutta ja taipumaa. Jotta puurakenteisille välipohjille pystyttiin tekemään taipumatarkastelu, tuli ominaistajuuden täyttää korkeataajuuslattiaan kriteerit. Tärkeimpänä kriteereihin vaikutti päällimmäisenä kerroksena oleva betonivalu.

Asiasanat: puurakenteinen välipohjaratkaisu, vertailu, optimointi, värähtely, taipuma

Degree title	Bachelor of Engineering
Author	Emilia Lahtinen
Thesis title	Comparison and optimization of wooden intermediate floors
Commissioned by	South-Eastern Finland University of Applied Sciences
Time	2025
Pages	99 pages, 4 pages of appendices
Supervisors	Marko Voutilainen, Verner Laari and Juha-Pekka Luukkainen

ABSTRACT

The design factor for timber intermediate floors is often vibration performance, which in Finland tends to be over-designed, creating a need for further research on timber floor solutions. This thesis examines laboratory measurements conducted in the PuuHyVä project on various timber intermediate floor systems. Full-scale timber floor assemblies were built in the Savonlinna Industrial Wood Construction and Technical Testing Laboratory, where their natural vibration frequency and deflection were measured at different construction stages.

The main goal of the thesis was to compare three timber intermediate floor solutions, in which the supporting beams are TK beams, easi-joist® beams, and LVL 48 P beams. Each solution has two versions so that they can be compared with one another. A life-cycle assessment as well as a cost and performance comparison were carried out for the floor systems. The calculations of carbon footprint and costs were based on material quantities. Based on the comparison, optimal floor solutions were developed, taking into account costs, material efficiency, and carbon footprint. Excel was used for the optimisation.

To investigate the over-design of timber intermediate floors, laboratory measurements of natural vibration frequency and deflection were compared to calculated design values. The purpose of the laboratory measurements was to demonstrate that the floor structures perform better in terms of deflection and natural vibration frequency than the calculated values suggest. The aim of the optimisation was to determine whether certain materials can be removed from the floor structure and which beam types perform best.

The laboratory results provided valuable information on changes occurring at each construction stage. The sheathing boards and transverse stiffeners increased the stiffness of the structure, which reduced both natural vibration frequency and deflection. In order to perform the deflection analysis of timber intermediate floors, the natural vibration frequency had to meet the criteria for high-frequency floors. One of the most influential criteria was the concrete topping layer.

Keywords: wooden intermediate floor solution, comparison, optimization, vibration, deflection

KÄSITTEET

Elinkaari	Elinkaari kattaa tuotteen, palvelun tai rakennuksen kaikki vaiheet alusta loppuun asti. Elinkaari koostuu hankinnasta, valmistuksesta, kuljetuksesta, käytöstä, huollosta, korjauksesta ja käytöstä poistamisesta.
Eurokoodi	Eurokoodi on eurooppalainen virallinen rakennusalan standardikokoelma. Eurokoodi määrittelee kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet. Puurakenteisia välipohjia määrää Eurokoodi 5.
Hiilijalanjälki	Tuotteen tai toiminnon elinkaaren aikana syntyvät kasvihuonekaasut, jotka pääsevät ilmaan. Hiilijalanjälki ilmaistään hiilidioksidiekvivalenteina (CO ₂ e).
Kannattajapalkki	Rakennusosa, joka toimii kantavana elementtinä rakenteessa. Kannattajapalkki kantaa ja jakaa kuormituksia. Tässä työssä kannattajapalkkeina ovat TK-palkki, easi-joist®-palkki ja LVL 48 P -palkki.
Kustannustehokkuus	Mahdollisimman pienillä kustannuksilla saadaan mahdollisimman hyvä lopputulos. Kustannustehokkuus kuvaa hyötyjen ja kustannusten suhdetta.
Kustannusvertailu	Kustannusvertailussa tarkastellaan eri vaihtoehtojen kustannuksia ja verrataan niitä keskenään. Vertailulla pyritään löytämään taloudellisesti järkevin ratkaisu.
Materiaalitehokkuus	Haluttu lopputulos saadaan käyttämällä materiaalit säästeliäästi, jolloin materiaalmäärä on mahdollisimman pieni. Tavoitteena on vähentää hukkaa ja pienentää ympäristövaikutuksia.
Ominaistaajuus	Tarkoittaa rakenteen luontaista värähtelytaajuutta, joka syntyy herätteestä, kuten liikkeestä tai iskusta. Ominaistaajuutta mitataan ja sen yksikkö on hertsi [Hz].
Optimointi	Pyritään etsimään tai ideoimaan paras mahdollinen ratkaisu. Optimoinnissa hyöty maksimoidaan. Optimoinnissa huomioidaan mm. alhaiset kustannukset ja materiaalmäärät.
Puuhybridirakenne	Rakenne, jossa yhdistetään puu ja jokin toinen materiaali. Rakenteessa pyritään hyödyntämään materiaalien parhaimmat ominaisuudet.
PuuHyVä-hanke	Tutkimus- ja kehityshanke, jossa optimoidaan puu- ja hybridirakenteisten välipohjien suunnittelua. Hankkeessa huomioidaan kustannus- ja materiaalitehokkuus sekä hiilijalanjäljen pienentäminen.

Standardimittaukset	Mittaukset, jotka tehdään virallisten standardien mukaisesti. Tällöin mittaukset ovat vertailukelpoisia ja luotettavia.
Taipuma	Tarkoittaa kuormituksesta johtuvaa rakenteen muodonmuutosta alkuperäisestä asennosta. Taipuma ilmoitetaan millimetreinä [mm]. Värähtelymitoituksen taipumatarkastelussa pistekuorma on 1 kN eli 100 kg.
Vertailu	Tarkastellaan vähintään kahta asiaa, joista huomioidaan eroavaisuudet ja yhtäläisyydet. Vertailun pohjalta pystytään tekemään perusteltuja johtopäätöksiä.
Välipohja	Välipohja on rakennuksen kerrosten välinen vaakatasossa oleva rakenne. Välipohja toimii kantavana rakenteena sekä ääni- ja lämpöeristeenä. Välipohjalla on tärkeä merkitys turvallisuuden ja toimivuuden kannalta. Välipohjaan sijoitetaan rakennuksen tekniikkaa.
Välipohjaratkaisu	Välipohja, jolle on kehitelty hyvä rakenne, jotta se toimii parhaimmalla tavalla. Ratkaisu sisältää toiminnalliset ja tekniset ratkaisut, jotka vaikuttavat kantavuuteen, akustiikkaan, eristykseen ja rakennusfysiikkaan ominaisuuksiin.
Värähtely	Tarkoittaa toistuvaa, edestakaista liikettä kappaleessa tai rakenteessa. Tässä yhteydessä tarkastellaan välipohjien värähtelyä, joka aiheutuu kävelystä.
Ylimitoitus	Rakenteen ylimitoitus tarkoittaa sitä, että se on mitoitettu tarpeettoman vahvaksi verrattuna todelliseen kuormitukseen. Suomessa puurakenteiset välipohjat ovat usein ylimitoitettuja.

LYHENTEET JA YKSIKÖT

easi-joist®-palkki	Palkissa paarteet ovat lujuuslajitelluista puuosista ja paarteiden välissä on metalliset easi-joist®-vinosauvat, jotka ovat Wolf Systems Ltd:n kehittelemät.
EPD	Lyhenne tarkoittaa ympäristöselostetta (Environmental Product Declaration, EPD). Ympäristöseloste on varmennettu ja standardoitu asiakirja, jossa kuvataan ympäristövaikutukset elinkaaren ajalta.
Hz	Lyhenne tulee sanasta hertsi, joka on taajuuden yksikkö. Yksikkö kuvaa sitä, että kuinka monta kertaa ilmiö toistuu sekunnissa. Hz voidaan ilmoittaa muodossa 1/s.
jm	Lyhenne tarkoittaa juoksumetriä, joka kuvaa yhden metrin mittaista jaksoa materiaalissa, jota ei myydä valmiina kappaleina.
kg CO ₂ e	Lyhenne tarkoittaa kilogrammaa hiilidioksidiekvivalenttia (kilogram carbon dioxide equivalent, kg CO ₂ e). Mittayksikkö, jolla kuvataan kaikkien kasvihuonekaasujen yhteisvaikutusta ilmastonmuutokseen.
kN	kN tulee sanasta kilonewton. 1 kN on 1000 N. Newton kuvaa voimaa ja se on SI-järjestelmän yksikkö.
LCA	Lyhenne tarkoittaa elinkaariarviointia (Life Cycle Assessment, LCA). LCA-vertailussa vertaillaan eri tuotteiden ja palveluiden ympäristövaikutuksia koko elinkaaren ajalta.
LVL 48 P -palkki	Lyhenne tarkoittaa viilupuuta (Laminated Veneer Lumber, LVL). LVL 48 P -palkki valmistetaan standardin EN 14374 mukaisesti 3 mm paksuista havupuuviiiluista, jotka ovat lujuuslajiteltuja. Viilujen syysuunta on palkin pituussuuntainen ja viilut ovat liimattu toisiinsa kiinni formaldehydiliimalla.
mm	Lyhenne tulee sanoista millimetri, joka on pituuden yksikkö.
OSB-levy	Levy on valmistettu ristiin liimatuista pitkistä ja ohuista puulastuista (Oriented strand board, OSB).
PEFC	Kansainvälinen järjestelmä, joka edistää kestävä metsänhoitoa (Programme for the Endorsement of Forest Certification).
RIL	Lyhenne tulee sanoista Rakennusinsinöörien Liitto ry. RIL on valtakunnallinen asiantuntija järjestö rakennusalalla.

SFS-EN	Lyhenne tarkoittaa Suomen Standardisoimisliiton (SFS) vahvistamaa eurooppalaista standardia (European Norm, EN).
TK-palkki	TK-palkki on ristikkorakenteinen välipohjapalkki, joka on valmistettu lujuuslajitellusta sahatavarasta ja kiinnityksessä on käytetty rakennekäyttöön tarkoitettua liimaa.
UE-GHG	Lyhenne tarkoittaa päästöjä, jotka syntyvät ennen varsinaista tuotantoprosessia (Upstream Emissions of Greenhouse Gases, UE-GHG). UE-GHG-päästöt voivat muodostaa suuren osan tuotteen tai palvelun hiilijalanjäljestä.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	10
2	PUUHYVÄ-HANKE.....	11
3	VÄLIPOHJARATKAISUT.....	12
3.1	Mikä on välipohja?	13
3.2	Välipohjaratkaisut	16
3.2.1	Välipohjaratkaisu A	17
3.2.2	Välipohjaratkaisu B	21
3.2.3	Välipohjaratkaisu C	24
4	LCA-ARVIOINTI JA -VERTAILU.....	27
5	KUSTANNUSVERTAILU	37
6	VÄRÄHTELYMITOITUS	40
7	TULOKSET.....	44
7.1	Ominaistaajuuden mittausjärjestelyt	44
7.2	Taipuman mittausjärjestelyt	46
7.3	Runkovaiheen mittaustulokset.....	47
7.4	Mittaustulokset OSB-levytyksen ja poikittaisjäykistyksen jälkeen	50
7.5	Alapuolisen koolausvaiheen mittaustulokset	52
7.6	Kipsilevytyksen jälkeiset mittaustulokset	54
7.7	Betonivalun jälkeiset mittaustulokset	56
8	ANALYSOINTI.....	58
8.1	Johtopäätökset	59
8.2	Ominaisuusvertailu	70
9	YHTEENVETO JA OPTIMOINTI	74
10	POHDINTA.....	87
	LÄHTEET.....	90
	KUVALUETTELO	94
	TAULUKKOLUETTELO.....	97

LIITTEET

Liite 1. Kustannuslaskelma

Liite 2. Betonivalun aikaiset taipumatulokset

Liite 3. Optimointi-Excelin laskenta

1 JOHDANTO

Puurakenteisissa välipohjissa mitoittavaksi tekijäksi tulee usein värähtelymitoitus, jota tutkitaan PuuHyVä-hankkeessa Savonlinnan teollisen puurakentamisen laboratoriossa. Hankkeen yksi osapuoli on Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Oy, joka on opinnäytetyön toimeksiantaja. Hankkeessa toteutettiin laboratoriomittauksia ominaistaajuudesta ja taipumasta, joita hyödynnetään opinnäytetyössä. Opinnäytetyö perustuu hankkeen tekemiin puurakenteisiin välipohjaratkaisuihin, joten työstä rajataan pois muut puurakenteiset välipohjaratkaisut. (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2023.)

Opinnäytetyössä käsitellään välipohjaratkaisujen elinkaarta, päästöjä, kierrätettävyyttä yleisellä tasolla sekä tehdään palkeista LCA-vertailua materiaali-pohjaisen hiilidioksidilaskennan perusteella. Välipohjaratkaisuista vertaillaan kustannuksia neliometriä kohden ja kustannuksissa otetaan huomioon materiaalien hinnat vuodelta 2025. Kun välipohjaratkaisuista on saatu standardien mukaiset mittaustulokset taipumasta sekä ominaistaajuudesta, käsitellään ja vertaillaan mittaustuloksia. Välipohjien ominaisuusvertailussa ei huomioida muita ominaisuuksia.

Opinnäytetyön tavoitteena on tehdä LCA-vertailun, kustannusvertailun, laboratoriomittaustulosten ja ominaisuusvertailun perusteella optimointia. Optimointiehdotuksissa otetaan huomioon kustannus- ja materiaalitehokkuus. Optimointia tehdään Excelin pohjalta, jossa parametreina ovat LCA- ja materiaalikustannusparametrit. Näitä parametreja verrataan pituusparametriin, koska välipohjien jännevälien pituuden ovat erimittaiset. Ehdotus pohjautuu siihen, että laatu ei heikkene, vaan pysyy hyvänä. Tämä tarkoittaa sitä, että välipohjarakenne on luja ja se täyttää värähtelymitoituksen vaatimukset, vaikka rakenteeseen tehdään muutoksia. Optimoinnin kautta etsitään jännevälien maksimipituudet.

Välipohjien laboratoriomittaukset käynnistyivät opinnäytetyön tekohetkellä, joten opinnäytetyö on ajankohtainen. Opinnäytetyöllä on merkitystä, koska siinä tehdään optimointia, jota hanke voi hyödyntää tulevissa tutkimuksissa. Opinnäytetyön tutkimusongelmana on selvittää, että vastaako todelliset mittaustulokset laskennallisiin mitoitusarvoihin. Tutkimuskysymyksinä ovat seuraavat

kysymykset: ”Mikä on laskennallisten ja todellisten mittausten eroavaisuus?”, ”Mitkä ovat parhaimmat optimointiehdotukset?” ja ”Miten LCA-vertailu, kustannusvertailu, laboratoriomittaukset ja ominaisuusvertailua vaikuttavat optimointiin?”. Opinnäytetyön lopussa vastataan tutkimuskysymyksiin.

Opinnäytetyössä käytetään kvalitatiivista tutkimusmenetelmää, koska mittaus- tuloksia analysoidaan, tulkitaan ja niistä tehdään johtopäätöksiä. Mittaustulosten pohjalta luodaan vertailua ja optimointia. Opinnäytetyö on tutkimuksellinen työ. Tutkimusaineistona käytetään monipuolisesti erilaisia tietolähteitä, standardeja ja tutkimuksia. Teollisen puurakentamisen laboratoriossa tehdyt tutkimustulokset ovat tärkeä osa tutkimusaineistoa, koska niiden pohjalta tehdään vertailua ja optimointiehdotuksia. Kirjallisuutena hyödynnetään kirjoja, julkaisuja, tutkimuksia, tieteellisiä artikkeleita, internetsivuja, RT-kortistoa, standardeja, asetuksia ja englanninkielistä kirjallisuutta.

2 PUUHYVÄ-HANKE

Luvussa 2 käsitellään PuuHyVä-hanketta, johon opinnäytetyön tekeminen perustuu. PuuHyVä-hanke on hankekokonaisuus, jossa ovat mukana Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Karelia ammattikorkeakoulu, Luonnonvarakeskus ja Tampereen yliopisto. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun osuus toteutuu teollisen puurakentamisen laboratoriossa: Puu- ja hybridirakenteisen välipohjatuotteiden optimoinnin innovaatioverkosto. (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu s.a.)

Hankkeen toimenpiteinä ovat kenttämittaukset alle 10 vuotta vanhoista rakennuksista, mekaaniset testaukset laboratoriossa välipohjaratkaisuista ja kyselytutkimukset käyttäjätyytyväisyydestä ja -kokemuksista. Mittauksissa testataan taipumaa, värähtelyä, akustiikkaa, ilmastoinneristystä, askeläänieristystä sekä liitosääneneristystä. Ominaisista juuttia mitataan standardoidulla mittausmenetelmällä ja värähtelymittarilla. (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2023.)

Hankkeessa valmistetaan useita erilaisia puurakenteisia välipohjaratkaisuja. Tässä työssä käsitellään kuutta eri välipohjaversiota, joille tehdään mittauksia taipuman ja ominaisista juuden osalta. Yhtä välipohjaa tehdään kaksi kappaletta, joten niillä on sama kannattajapalkki. Välipohjat poikkeavat toisistaan

hieman, jotta niitä voidaan vertailla keskenään ja löydetään optimaalisimmat ratkaisut. Kuvassa 1 on valmiit välipohjaratkaisut. Näiden suunnittelua auttoi se, että hankkeessa tehtiin alkuvaiheessa mittauksia osittain samantyyllisille välipohjille. (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2023.)



Kuva 1. Valmiit välipohjat (kuva: Fanny Malmstedt 2025)

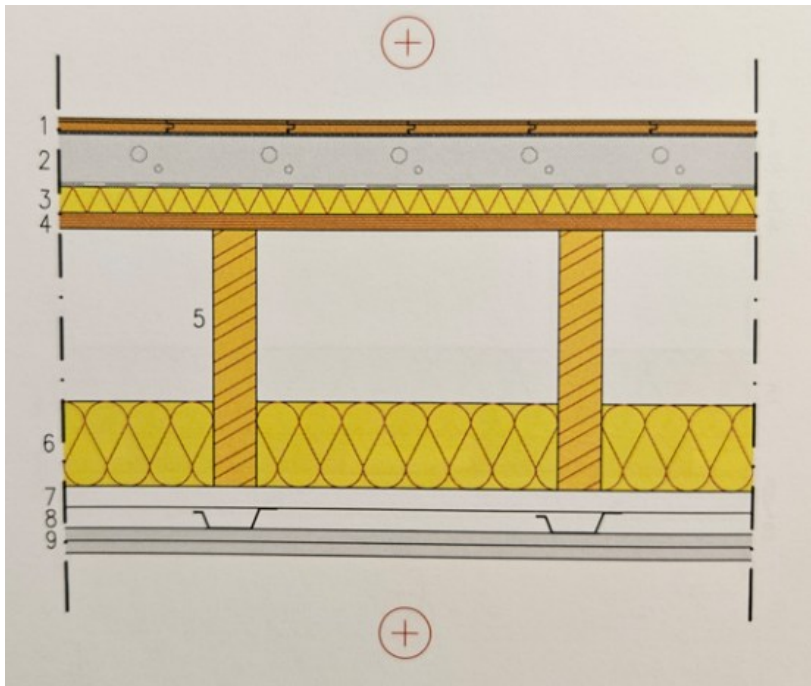
PuuHyVä-hankkeen tavoitteena on etsiä uusia innovaatioita sekä parantaa välipohjarakenteen tehokkuutta huomioimalla kustannus- ja materiaalitehokkuus. Jotta hybridirakenteisten välipohjien tuottaminen on tehokasta, tulee hyödyntää materiaalien parhaat ominaisuudet. Tavoitteina ovat hiilijalanjäljen pienentäminen, käyttäjäkokemusten ymmärtäminen ja puuhybridivälipohjien suunnittelun tehostaminen ja laadukkaampi rakentaminen. (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2023.)

3 VÄLIPOHJARATKAISUT

Luvussa 3 käsitellään puurakenteisen välipohjan rakennetta ja toimivuutta, joita on havainnollistettu kuvilla. Luvussa tuodaan esille hankkeessa testattavia välipohjaratkaisuja ja niiden materiaaleja. Jokaisesta välipohjaratkaisusta on kaksi versiota, joita pystytään vertaamaan toisiinsa. Välipohjissa on erimitaiset jännevälit, joilla on vaikutusta mitoitukseen, koska pitkät jännevälit lisäävät taipumaa (Puuinfo Oy 2020).

3.1 Mikä on välipohja?

Välipohja on rakennuksen kerrosten välinen rakenne, joka on vaakatasossa. Välipohja toimii kantavana rakenteena, joka voi olla esimerkiksi betoni- tai puurakenteinen. Puurakentamisessa välipohjalla tarkoitetaan osaa, joka on alakerran katon ja yläkerran lattian välinen liitos. Välipohjassa on usea kerros eri materiaaleja, koska välipohja koostuu pintarakenteista ja kantavasta osasta. (Karelia ammattikorkeakoulu 2025.)



Kuva 2. Esimerkkikuva puurakenteisesta palkkivälipohjasta (Kovalainen ym. 2021, 114)

Kuvassa 2 näkyy esimerkki välipohjan materiaalikerroksista. Alimmat kipsilevykerrokset ovat alakerran katon pintamateriaalit ja ylimmät materiaalikerrokset betonilaatta ja parketti ovat yläkerran lattian pintamateriaalit. Pintakerrosten välissä on välipohjan kantavaosuus ja esimerkkikuvassa puiset palkit toimivat kantavana rakenteena. Rakenteessa on koolaukset, levytykset sekä eristeet lämmön- ja askeläänieristykseen. (Kovalainen ym. 2021, 114.)

Välipohjalla on tärkeä merkitys turvallisuuden ja toimivuuden kannalta. Mitoituksessa tulee ottaa huomioon jäykistys, yläpuolelta tulevat kuormat, kantavien palkkien pituus, palkkityyppi, taipuma sekä värähtely. Välipohjan suunnittelussa tulee huomioida akustiikka ja paloturvallisuus. (Siikanen 2016, 262.) Suunnittelussa välipohjarakenteen vaaditut ääneneristävyysarvot tulee täyttyä, koska välipohjan tulisi estää äänen kulkeutuminen. (RT 83-10902: 2007.)



Kuva 3. Välipohjan rakennetta ja jäykistystä

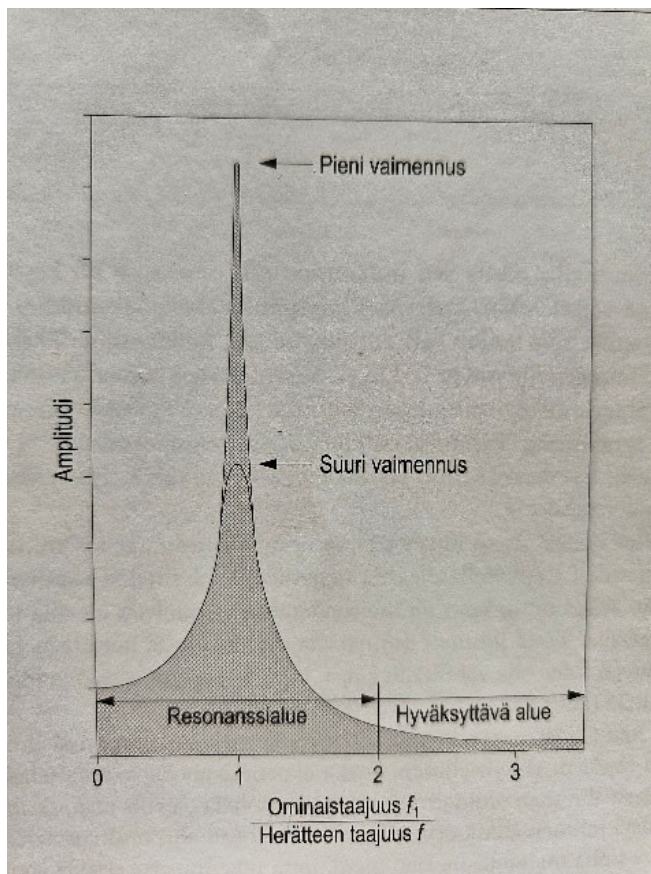
Kuvassa 3 esitetään välipohjan jäykistäviä rakenteita. Levytyksellä saadaan jäykistettyä rakennetta. Kuvassa 3 on OSB-levy palkkien päällä jäykistämässä rakennetta ja kipsilevy on alapinnassa jäykistämässä rakennetta. Poikittaisjäykistyksellä saadaan lisättyä jäykistystä ja se sijaitsee palkkien välissä sekä alapuolinen koolaus toimii poikittaisjäykisteenä. (Lahtela 2021, 3, 8.)

Puurakenteisen välipohjan rakenteellisiin vaatimuksiin vaikuttavat palomääräykset, joissa tulee huomioida osastointi, kantavuus, suojaverhous ja pintamateriaalit. Välipohjan värähtelyyn vaikuttaa rakenteen jäykkyys. Puuvälipohjat ovat monimutkaisia rakenteita, minkä takia sen suunnittelu ja tutkiminen on tärkeää, jotta säästytään rakennusvirheiltä. (Karelia ammattikorkeakoulu 2025.) Haasteena puurakenteisilla välipohjilla on pitkät jännevälit, koska puu on joustavaa ja se taipuu. Tämä rajoittaa sen kantavuutta ja jäykkyyttä pitkissä jänneväleissä. Massiivisesta puutavarasta saa 4–5 m jännevälejä. Puulevyuunmaisista palkeista saa 6 m jännevälit. Viilupuulla ja liimapuupalkeilla on hyvin vapaat jännevälipituudet. (Siikanen 2016, 262.) Kuvassa 4 esitetään hankkeen viilupuupalkin jännevälin pituutta.



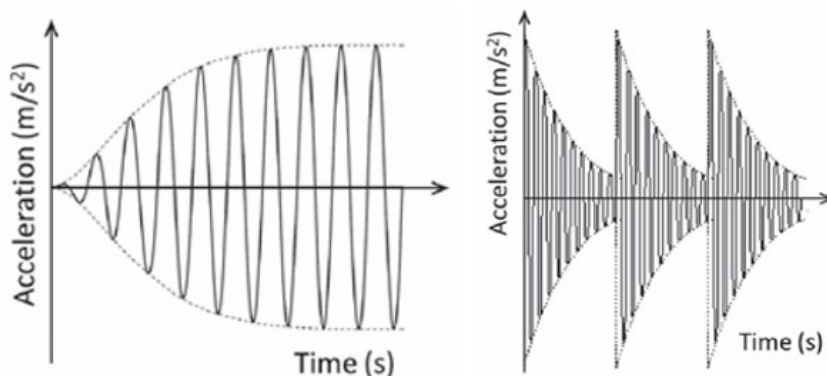
Kuva 4. Hankkeen välipohjaratkaisussa LVL-palkin jännevälän pituus on 6 m

Puurakenteiset välipohjat jaetaan kahteen tyyppiin: matalataajuus- ja korkeataajuuslattiaihin. Matalataajuuslattialla on suuri massa, matala ominaistajuus sekä lattia voi helposti resonoida, koska tätä lattiaa hallitsee värähtely. (Lah-
tela 2018, 11.)



Kuva 5. Resonanssi-ilmiö (Kovalainen ym. 2021, 12)

Resonanssi-ilmiö syntyy ulkopuolisesta herätteestä, jolloin välipohja värähtelee suurella amplitudilla (kuva 5). Tätä tulee välttää, ettei värähtelevä systeemi vaurioidu tai sorru. Systeemi värähtelee voimakkaammin ominaistajuuden alapuolella olevilla taajuuksilla. (Kovalainen ym. 2021, 11.) Jotta värähtely välipohjarakenteissa ei jatku, välipohjat tulee katkaista seinien kohdalta. (Lahtela 2021, 8). Värähtelyä tarkastellaan tarkemmin luvussa 6.



Kuva 6. Värähtelyn malli matala- ja korkeataajuuslattioissa (Lahtela 2018, 12)

Kuvassa 6 esitetään vasemmalla puolella matalataajuuslattian värähtelyä ja oikealla puolella korkeataajuuslattian värähtelyä. Matalataajuuslattiassa värähtely on jatkuvaa ja korkeataajuuslattiassa värähtely on ohimenevää. Korkeataajuuslattiassa on pieni massa, korkea ominaistajuus ja se on herkkä taipumalle, joka johtuu kävelykuormituksesta. (Lahtela 2018, 11–12.) Aiheetta tarkastellaan tarkemmin luvussa 6.

3.2 Välipohjaratkaisut

Hankkeen välipohjaratkaisut ajatellaan olevan huoneiston välipohjia. Käsiteltävät välipohjaratkaisut ovat jo käytössä olevia ratkaisuja ja tavoitteena on tehdä välipohjaratkaisuista optimaaliset ja saada vertailun kautta kustannustehokkuutta sekä havainnoitua, mitä vaikutuksia värähtelyllä ja taipumalla niihin on. (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2023.)

Opinnäytetyön aloitusvaiheessa ensimmäisen erän välipohjat olivat runkovaiheessa (kuva 7). Ensimmäisen erän välipohjissa kannattajapalkkeina ovat TK-palkki, easi-joist®-palkki ja LVL 48 P -palkki. Laboratoriomittaukset alkoivat

välipohjien runkovaiheesta, jolloin jokaiselle palkille mitattiin alin ominaistuu-
uus sekä taipuma 1 kN pistekuormasta. (Kaakkois-Suomen ammattikorkea-
koulu 2023.)



Kuva 7. Ensimmäisen erän välipohjat runkovaiheessa

Välipohjaratkaisuihin tulee ala- ja yläpintaan levytykset, joilla varmistetaan, että kannattajapalkit eivät pääse kiepahtamaan, koska levytys toimii jäykisteenä sekä rakenne on tuettu. Tässä opinnäytetyössä käsitellään kolmea välipohjaratkaisua ja jokaisesta ratkaisusta on kaksi versiota. (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2023.)

3.2.1 Välipohjaratkaisu A

Ensimmäisessä välipohjaratkaisussa on käytetty kannattajapalkkina TK-palkkia, joka on ristikkorakenteinen välipohjapalkki (kuva 8). TK-palkki on valmistettu lujuuslajitellusta sahatavarasta ja kiinnityksessä on käytetty rakennekäyttöön tarkoitettua liimaa, joten rakenteessa ei ole mekaanisia kiinnikkeitä. TK-palkissa on erinomaiset värähtely- ja taipumaominaisuudet ja rakenne on jäykkä. Kaikki TK-palkit koekuormitetaan tehtaalla valmistuksen yhteydessä 1,8-kertaisella nimelliskuormalla ja ne soveltuvat kaikkien rakennustyyppien välipohjiin. (TK-palkki s.a.)



Kuva 8. TK-palkki

Avoin rakenne on TK-palkin hyöty, jolloin koteloinnit ja alaslaskut voidaan minimoida, koska talotekniikka mahtuu palkiston sisään (kuva 8). Palkkien kiinnitys voidaan tehdä ala- tai yläpaarteesta. TK-palkkeja valmistaa Teeri-Kolmio Oy Ylöjärvellä. (TK-palkki s.a.)

Ensimmäisessä vertailuratkaisussa TK-palkki on kiinnitetty toisesta päästä yläpaarteesta ja toisesta päästä alapaarteesta (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025). Kuvassa 9 on esitetty yläpaarrekiinnitys.



Kuva 9. TK-palkin kiinnitys yläpaarteesta

TK-palkin yläpaarreakiinnityksessä palkin pää on kiinnitetty kahdella ruuvilla (6 x 100 mm) runkorakenteeseen (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025). Kuvassa 10 on esitetty alapaarreakiinnitys.



Kuva 10. TK-palkin kiinnitys alapaarteesta

TK-palkin toinen pää on kiinnitetty alapaarteesta runkorakenteisiin vinoruuviliitoksella, jossa on käytetty kahta ruuvia (6 x 100 mm). Toisessa vertailuratkaisussa (kuva 11) TK-palkki on kiinnitetty ruuveilla (6 x 100 mm) molemmista päistä yläpaarteesta. (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025.)



Kuva 11. TK-palkin kiinnitys yläpaarteesta

Molemmissa välipohjaratkaisuissa palkit ovat sijoitettu 600 mm välein. Rakenteessa TK-palkkeja on kolme kappaletta. Välipohjaratkaisun rakennettu koko laboratorioissa on 2404 mm x 6553 mm. Välipohjan pinta-ala on 15,75 m². Välipohjan jännevälin pituus on 6400 mm. Kannattajapalkin ylä- ja alapuolella on materiaalikerroksia (kuva 12). (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025.)



Kuva 12. TK-välipohjan rakenteita

Molemmissa välipohjaratkaisuissa materiaalikerrokset ovat samoja. Taulukossa 1 on välipohjaratkaisu A:n materiaalikerrokset ylhäältä alaspäin.

Taulukko 1. Välipohjaratkaisu A:n materiaalikerrokset

Materiaali	Rakennepaksuus
Betoni	50 mm
OSB-levy	18 mm
TK-palkki	400 mm
Mitallistettu sahatavara	48x48 mm, jako 400 mm välein
Kipsilevy	13 mm

Välipohjan materiaalikerrokset ovat betoni, OSB-levy, TK-palkki, koolaukset mitallistetusta puutavarasta ja kipsilevy.

3.2.2 Välipohjaratkaisu B

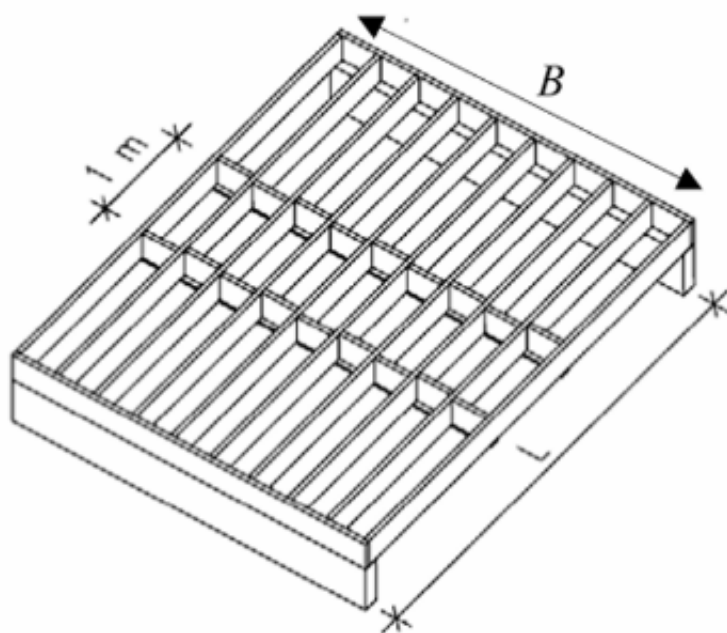
Toisessa välipohjaratkaisussa on käytetty LVL 48 P -palkkia (kuva 13). LVL tarkoittaa viilupuuta ja sen lyhenne on englanninkielisistä sanoista Laminated Veneer Lumber. LVL valmistetaan standardin EN 14374 mukaisesti. (Kevarinmäki 2017, 20.) Palkki valmistetaan 3 mm paksuista havupuuviiluista, jotka ovat lujuuslajiteltuja. Viilujen syysuunta on palkin pituussuuntainen ja viilut ovat liimattu toisiinsa kiinni formaldehydiliimalla. Jotta viilupuun lujuus ei alene, viilujen jatkoliitokset on limitetty sekä viistetty. Viilupuuta käytetään palkkina syrjällään. Viilupuun jännevälin pituus on yleensä välillä 5–12 m. Viilupuun paksuus on välillä 27–75 mm. (Siikanen 2016, 108–109.) Tässä välipohjaratkaisussa on käytetty 63 mm paksuista ja 300 mm korkuista viilupuuta (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025).



Kuva 13. LVL 48 P -palkki

LVL 48 P -palkin ominaisuuksia ovat lujuus, jäykkyys, mitta- ja muotopysyvyys ja erinomainen lujuus-painosuhte (Metsä Wood 2024, 1). LVL sopii kantavaksi palkiksi vaaka- sekä pystyrakenteisiin, joten se soveltuu hyvin välipohjarakenteisiin. LVL mahdollistaa pitkät jännevälit ja sen taipuma on vähäinen. (Stora Enso Oyj s.a., 6.)

Vertailukappaleissa toisessa ratkaisussa on poikittaisjäykistys ja toisessa ei ole. Palkin jänneväli L on yli 4 m, jolloin käytetään kahta poikittaisjäykistettä palkkien välissä (Puuinfo Oy 2020, 22).



Kuva 14. Käytetään kahta poikittaisjäykistettä B:n suunnassa, kun jänneväli $L > 4$ m (Puuinfo Oy 2020, 22)

Poikittaisjäykisteet tehtiin palkkien väliin kuvan 14 mukaisesti. Kuvassa 15 on rakennetut poikittaisjäykisteet samasta viilupuusta kuin palkit. Poikittaisjäykistysten alapuolelle laitettiin sahatavaralaudat tukemaan rakennetta.



Kuva 15. Kaksi poikittaisjäykistettä pitkien palkkien välissä (kuva: Niko Kinnunen 2025)

Välipohjarakenteen mitat laboratoriossa ovat 1604 mm x 6000 mm. Välipohjan pinta-ala on 9,62 m². Kannattajapalkit ovat 63 mm leveitä ja 300 mm korkeita sekä ne ovat sijoitettu 450 mm välein. Välipohjan jännevälin pituus on 5800 mm. (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025.)



Kuva 16. LVL 48 P -palkit asennettuna

Kuvassa 16 esitetään palkkien kiinnitys alapaarteesta kulmarauudoilla. Palkin molemmat päät ovat kiinnitetty samalla tavalla. (Kaakkois-Suomen ammatti- korkeakoulu 2025.) Kannattajapalkin ylä- ja alapuolella on materiaalikerroksia. Poikittaisjäykistämättömän välipohjaratkaisun materiaalit ovat taulukossa 2.

Taulukko 2. Poikittaisjäykistämättömän välipohjaratkaisu B:n materiaalikerrokset

Materiaali	Rakennepaksuus
Betoni	50 mm
OSB-levy	18 mm
LVL 48 P -palkki	300 mm
Mitallistettu puutavara	48x48 mm, jako 400 mm välein
Kipsilevy	13 mm

Poikittaisjäykistämättömässä välipohjaratkaisussa on vähemmän materiaalia, jotka ovat betoni, OSB-levy, LVL 48 P -palkki, koolaukset mitallistetusta puutavara ja kipsilevy. Taulukossa 3 on poikittaisjäykistetyn välipohjaratkaisun materiaalit.

Taulukko 3. Poikittaisjäykistetyn välipohjaratkaisu B:n materiaalikerrokset

Materiaali	Rakennepaksuus
Betoni	50 mm
OSB-levy	18 mm
LVL 48 P ja poikittaisjäykistykset	300 mm

Sahatavaralauta	22 mm
Mitallistettu puutavara	48x48 mm, jako 400 mm välein
Kipsilevy	13 mm

Poikittaisjäykistetyin välipohjaratkaisun materiaalit ovat betoni, OSB-levy, LVL 48 P -palkki ja poikittaisjäykistykset samasta materiaalista, sahatavaralauta, koolaukset mitallistetusta puutavarasta ja kipsilevy.

3.2.3 Välipohjaratkaisu C

Kolmas välipohjaratkaisu on easi-joist®-palkki (kuva 17), jossa paarteet ovat lujuuslajitelluista puuosista ja paarteiden välissä on metalliset easi-joist®-viinosauvat, jotka ovat Wolf Systems Ltd:n kehittelemät. (Wolf Systems Ltd 2019.) Kantavissa rakenteissa rakentamismääräykset edellyttävät, että sahatavara on lujuuslajiteltua. Jotta sahatavara voidaan lujuuslajitella, tulee se tehdä visuaalisesti tai koneellisesti. Tämän perusteella saadaan kimmomoduuli ja lujuusluokka. Sahatavaran lujuus- ja jäykkyysominaisuudet tulee olla luotettavat, joten lujuuslajittelu tulee tehdä. (Siikanen 2016, 60, 99.)



Kuva 17. Easi-joist®-palkki

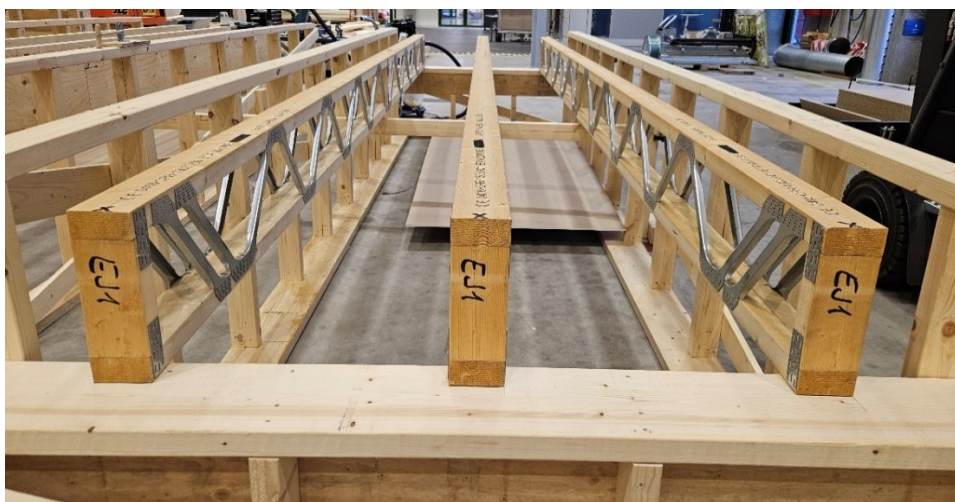
Palkit ovat vahvoja, kevyitä ja niillä on erinomainen kantavuus. Easi-joist®-palkit ovat helppo asentaa ja palkkeihin on helppo sisällyttää läpiviennit ja tilava-
raukset. Nämä easi-joist®-palkit valmistaa Sepa Oy ja ne valmistetaan Suomessa, Keiteleellä. (Sepa Oy s.a.)

Välipohjarakenteen mitat laboratoriossa ovat 1604 mm x 5500 mm. Välipohjan pinta-ala on 10,37 m². Ensimmäisessä vertailuratkaisussa kannattajapalkkeja on 300 mm jaolla, joten palkkeja on viisi kappaletta välipohjarakenteessa (kuva 18). Välipohjan jännevälän pituus on 5300 mm. (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025.)



Kuva 18. Ensimmäisessä ratkaisussa on viisi kappaletta easi-joist®-palkkeja

Kuvasta 18 nähdään, että ensimmäisessä ratkaisussa palkit ovat tiheästi. Toisessa vertailuratkaisussa palkit ovat 600 mm jaolla (kuva 19), joten palkkeja on kolme kappaletta (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025). Tämä palkkijako on tyypillisempi välipohjapalkkeille.



Kuva 19. Easi-joist®-palkit 600 mm välein

Kuvasta 19 nähdään, että toisessa versiossa palkit ovat harvemmassa. Easi-joist®-palkit on kiinnitetty alapaarteesta runkorakenteeseen vinoruuviliitoksella. Yhdessä päässä kiinnitys on tehty kahdella ruuvilla. (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025.) Vinoruuviliitosta havainnollistaa kuva 20.



Kuva 20. Easi-joist®-palkin kiinnitys alapaarteesta vinoruuviliitoksella

Alapaarteen kiinnitys on tehty 6 x 100 mm ruuveilla. Kuvassa 21 havainnollistetaan easi-joist®-välipohjan materiaaleja ja rakenteita.



Kuva 21. Easi-joist®-välipohjan materiaaleja ja rakenteita

Välipohjaratkaisun kannattajapalkin ylä- ja alapuolella on materiaalikerroksia. Taulukossa 4 on välipohjaratkaisun materiaalikerrokset ylhäältä alaspäin.

Taulukko 4. Välipohjaratkaisu C:n materiaalikerrokset

Materiaali	Rakennepaksuus
Betoni	40 mm
OSB-levy	18 mm
Easi-joist®-palkki WS300	306 mm
Mitallistettu sahatavara	48 mm, jako 400 mm välein
Kipsilevy	13 mm

Välipohjaratkaisu C:n materiaalit ovat betoni, OSB-levy, easi-joist®-palkit, koolaukset mitallistetusta puutavarasta ja kipsilevy.

4 LCA-ARVIOINTI JA -VERTAILU

Luvussa 4 käsitellään välipohjaratkaisujen materiaalien elinkaarta, päästöjä, uudelleenkäyttöä ja kierrätystä. PuuHyVä-hankkeessa tehdään LCA-laskentaa, joten tässä opinnäytetyössä ei tehdä LCA-laskentaa ohjelmalla välipohjaratkaisujen hiilijalanjäljestä eikä tuoda esille hankkeen tekemää laskentaa. Opinnäytetyössä käsitellään yleisellä tasolla materiaalien elinkaarta ja vertaillaan niitä keskenään. Kaikista palkeista ei löydy EPD-selostetta, joten palkkien materiaalien hiilidioksidipäästöjä verrataan Ympäristöministeriön päästötietokannan pohjalta. LCA-vertailun tarkoituksena on saada palkit paremmuusjärjestykseen, jotta niitä voidaan hyödyntää optimoinnissa.

Elinkaariarvioinnissa tuodaan esille välipohjaratkaisujen ympäristövaikutuksia elinkaaren ajalta. Pyritään tunnistamaan kehityskohteet, jotta saataisiin vähennettyä ympäristökuormitusta. Arvioinnissa huomioidaan mm. raaka-aineet, energia, päästöt, jätteet ja loppusijoituskohde. (Liljeström 2024.) Puuvälipohjien ilmastopäästöt elinkaaren ajalta ovat suuremmat kuin muissa kantavissa rakenteissa, koska puuvälipohja koostuu monesta materiaalikerroksesta (Karelia ammattikorkeakoulu 2025).

Tarkasteltavat välipohjaratkaisut ovat hybridirakenteisia ja niissä puu on suurimmassa roolissa. Aalto-yliopiston tutkimuksen mukaan puu rakennusmateriaalina on kasvihuonekaasupäästöjen suhteen parempi vaihtoehto kuin betoni, teräs ja muuraus. Tutkimuksessa arvioitiin materiaaleihin sitoutuneita UE-

GHG päästöjä, jotka syntyvät tuotantoketjun alkuvaiheessa. Tutkimuksen tuloksena oli, että puisissa rakennuksissa oli 23 % vähemmän UE-GHG-päästöjä kuin muissa rakennuksissa. Alkuvaiheessa puulla on 30 % vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä kuin betonilla, teräksellä ja tiilellä. (Amiri & Junnila 2025, 1.) Kuvassa 22 esitellään välipohjan puumateriaaleja.



Kuva 22. Puurakenteisen välipohjan puumateriaaleja

Puulla on hyvä hiilensidontapotentiaali, mutta tulee varmistaa hiilen pitkäaikainen varastointi, ettei hiili vapaudu takaisin ilmakehään. Puu on uusiutuva luonnonvara ja puun kasvu on hidasta. Jotta luonnon ekosysteemi ei horju, tulee puutavara hankkia sertifioiduista kestävästä metsistä. (Aalto-yliopisto 2025, 1.) Metsäsertifiointilla tarkoitetaan sitä, että metsiä käytetään kestävästi ja vastuullisesti. Metsien käsittely on tällöin ekologisesti, sosiaalisesti ja taloudellisesti kestävä. Sertifikaatilla on kriteerit, joiden mukaan metsänomistajat toimivat. (Metsäkeskus s.a.)

Kaikkea hakattua puuta ei hyödynnetä tehokkaasti rakentamisessa, mikä vaikuttaa puurakentamisen hiilivarastopotentiaaliin. Suunnittelussa tulisi huomioida käyttöiän pidentäminen, jolloin rakennukset olisivat pitkäikäisempiä ja hiilensidontapotentiaali varmistuisi. Jotta puu rakennusmateriaalina on pitkäikäinen ja kestävä, se tulee säilyttää oikein, jotta kosteus ei pääse vahingoittamaan sitä. Puurakentamisessa huomioidaan paloturvallisuus, jolloin voidaan

käyttää puun pintaan laitettavaa palonkestävää pinnoitetta. Tällainen puu tulee käsitellä erityisjätteenä ja sen kierrättäminen ja uudelleenkäyttö on rajallista. Pinnoitettava sisältävän puumateriaalin hiilijalanjälki suurenee, koska tuotteen elinkaari jää lyhyeksi purkamisen jälkeen. (Amiri & Junnila 2025, 1, 2.)

Suomessa rakentamisen yhteydessä syntyvää puujätettä on pääasiassa käytetty energiana. Tämä on kannattavaa sellaiselle puujätteelle, jossa on laadullisia ongelmia ja sitä ei voida hyödyntää mihinkään. Puu energianlähteenä vähentäisi turpeen ja kivihilen käyttöä. Hyvälaatuinen puu tulisi kierrättää ja uudelleen käyttää. Puujätettä voidaan käyttää puukomposiitin ja lastulevyn valmistukseen. (Manninen & Myllymaa 2015, 10, 13, 27.)

Tutkittavissa välipohjaratkaisuissa on betonivalu päällimmäisenä kerroksena (kuva 23). Betonin lujuusluokka on C30/37 ja suurin kiviainesraekoko on 8 mm. Betonissa on käytetty kuitua, jonka koko on 12 mm. Betonin hiilijalanjäljen haasteena on sementin valmistus, jossa vapautuu suuria määriä hiilidioksidia, koska kalkkikiveä kuumennetaan, jotta saadaan sementtiä. Kalkkikivi saadaan maaperästä louhimalla. Lisäpäästöinä ovat betonin sekoitus, kuljetukset sekä valaminen. Vähähiilistä betonia on kehitetty, jossa on sementin sijaan käytetty masuunikuonaa tai lentotuhkaa, joita saadaan teollisuuden sivuvirtoina. Betonilla on hiilinieluminaisuus, jolloin valmiisiin betonirakenteisiin sitoutuu hiilidioksidia ilmakehästä. (Betoni s.a.)



Kuva 23. Päällimmäinen kerros välipohjissa on betonia

Suomessa betonijätettä syntyy paljon, arvioitu määrä on 2,5 miljoonaa tonnia. Betonijätteen kierrätettävyyden on tällä hetkellä 80 %. Betonipurkujätettä murskataan ja sitä käytetään maanrakentamisessa ja uusissa betonituotteissa korvaamaan kiviainesta. Valmistuksen ylijäämänä syntyy betonijätettä, joka tulisi hyödyntää. (Betoni s.a.)

Betonivalun alla on OSB-levy (Oriented strand board), joka on valmistettu risiin liimatuista pitkistä ja ohuista puulastuista. Lastujen syysuunta on vakio ja liimausvaiheessa levy puristetaan korkealla paineella ja lämmöllä kasaan. Levyn paksuus voi olla 5–25 mm. (Siikanen 2016, 122.) OSB-levyä käytetään paljon rakentamisessa sen keveyden takia sekä kustannusten takia, koska ne ovat pienet verrattuna levyn lujuusominaisuuksiin. Levyn puumateriaali on herkkä kosteudelle, jolloin sen lujuusominaisuudet heikkenevät ja materiaali alkaa laajenemaan kosteudesta. OSB-levyjä ei valmisteta Suomessa, joten niiden kuljettamiseen menee energiaa. OSB-levyjä tuodaan Suomeen Euroopasta ja USA:sta. OSB-levyn loppusijoitus tapahtuu usein polttamalla energiana. OSB-levy sisältää liimoja ja hartsiyhdisteitä, joten sen materiaalikierrätys on haastavaa ja rajallista. (Puuproffa s.a.)

Kannattajapalkin alapuolella käytetään erikoiskovaa kipsilevyä, joka on lasikuituvahvistettu (kuva 24). Kipsilevyn keskiosa on valmistettu kipsistä ja lasikuidusta sekä ulkopinnat on valmistettu kartongista. Raakakipsi eli kalsiumsulfaatti saadaan maaperästä. Kalsiumsulfaatti on epäorgaaninen mineraaliyhdiste ja se ei ole uusiutuva luonnonvara, koska se ei uusiudu luonnollisesti kulutusta vastaavalla nopeudella. Vaihtoehtona kipsikivelle on hiilivoimaloissa syntyvä kipsi. Kipsilevyjä voidaan kierrättää takaisin levyn valmistusprosessiin, mutta se ei tällä hetkellä toteudu kovin hyvin Suomessa. Kipsilevyjätettä voi käyttää maanparannusaineena, jos se jauhetaan. (RT 32-10633: 1997.)



Kuva 24. Välipohjan alin kerros on kipsilevyä

Suomessa valmistetaan kipsilevyjä kahden valmistajan toimesta. Valmistajat käyttävät kierrätetyn kipsin lisäksi tuontikipsiä, jonka louhintaan ja kuljettamiseen menee energiaa. Kipsilevyn kartonkipinta on kierrätettyä kartonkia. Erikoiskova kipsilevy tuottaa enemmän päästöjä kuin normaali kipsilevy, mutta se kestää paremmin kulutusta, joten sen käyttöikä on pidempi. (Gyproc s.a.)

Ratkaisu A

TK-palkit valmistetaan kotimaisista raaka-aineista Suomessa, Ylöjärvellä (TK-palkki s.a.). Valmistus tapahtuu Suomessa, mikä tarkoittaa sitä, että kuljetuspäästöt ovat pienet, koska Suomen sisällä kuljetusvälimatkat ovat lyhyet. Palkit on valmistettu puusta, mikä on kasvihuonekaasupäästöiltään hyvä valinta. Ristikoiden kiinnityksessä on käytetty rakennekäyttöön tarkoitettua liimaa. Valmistaja ei ole ilmoittanut, että mitä liimaa tarkalleen kiinnityksessä on käytetty, joten päästöjen tarkasta määrästä ei ole tietoa. Kuvassa 25 esitetään palkin materiaaleja ja liimausta. Koska palkki on ristikkorakenteinen, siinä on säästetty puumateriaalia. Laboratoriotestejä varten rakennettiin tämä välipohjaratkaisu ja palkit ovat uusia. Jos ajatellaan TK-palkin elinkaarta, se tulisi testaus-
ten jälkeen kierrättää tai uudelleenkäyttää. Näin puutavara ei päädy jätteeksi tai energiaksi.



Kuva 25. TK-palkin materiaalit ja liimaus

Tuotteelle ei löydy EPD-selostetta, mutta tässä työssä hyödynnetään materiaaleille laskettuja päästöjä. Sitä kautta arvioidaan päästöjen määrät, jotta päästään numeeriseen arviointiin, jota hyödynnetään optimoinnissa. Ympäristöministeriön päästötietokannan mukaan höylätyn puutavaran päästöt ovat 0,114 kg CO₂e/kg. Tiheyden muunnoskerroin on 469 kg/m³. Kuutiota kohden päästöt ovat 53,5 kg CO₂e/m³. Palkki on ristikkorakenteinen, mikä vaikuttaa puun määrään kuutiota kohden. Palkissa on liimaa kiinnityskohdissa ja liiman osuus on vähäistä. Liimalle ei löytynyt suoraan lukua hiilijalanjäljestä, mutta liimapuun päästöjä hyödyntäen puutavaran ja liiman yhteispäästöt ovat keskimäärin 0,18 kg CO₂e/kg. (Ympäristöministeriö 2025.)

Ratkaisu B

LVL 48 P -palkkia valmistaa Suomessa Metsä Wood ja Stora Enso Wood Products. Metsä Woodin mukaan LVL 48 P -palkkiin on laskennallisesti varastoitunut hiiltä hiilidioksidiksi keskimäärin 783 kg CO₂ yhtä kuutiota kohden. LVL 48 P -palkin sisältämät liimat sisältävät formaldehydiemissioita 0,018 ppm, jotka alittavat E1-luokan vaatimuksen, kun raja-arvona on 0,100 ppm. LVL 48 P -tuote on valmistettu kestävästi kasvatetusta puusta eli se on PEFC-sertifioitu. Tämä takaa sen, että luonnon monimuotoisuus on huomioitu. Valmistaja tekee tuotteet määrämittaan, jolloin materiaalihukkaa ei synny. (Metsä Wood 2024, 1–2.)

Metsä Woodin LVL 48 P -tuotteella on EPD-seloste, jonka mukaan LVL 48 P -palkin käyttöikä on 100 vuotta, joten sillä on pitkä elinkaari. EPD-selosteen mukaan käytön aikana ei ole ympäristövaikutuksia. Käytön jälkeen tuotteen voi polttaa energiana tai kierrättää rakennustuotteena. Yritys korvaa jokaisen kaadetun puun neljällä puuntaimella, jotta puiden kaataminen ei vähennä metsien kasvua. (Metsä Wood 2022, 4, 8.)

Stora Enson LVL 48 P -tuotteella on EPD-seloste, jonka mukaan tuotteeseen on varastoitunut hiiltä 816 kg CO₂e/m³. Selosteen mukaan puolet tuotteen kiivapainosta on hiiltä. Puut ovat peräisin kestävänsä metsänhoidon mukaisista metsistä. (Stora Enso Oyj 2023, 10.)



Kuva 26. LVL 48 P -palkki

Valmistajien EPD-selosteet poikkesivat toisistaan, joten käytetään hiilijalanjäljen laskentaan Ympäristöministeriön päästötietokantaa, jonka mukaan LVL-materiaalin päästöt ovat 0,499 kg CO₂e/kg. Muunnoskerroin on 510 kg/m³. Kuutiota kohden päästöt ovat 254,4 kg CO₂e/m³.

Ratkaisu C

Easi-joist®-palkeissa on käytetty vähemmän puuta, koska ristikko-osat ovat terästä, jota pystytään kierrättämään ja uudelleenkäyttämään. Vinosauvat on kiinnitetty puuosiin puristuslevyillä (kuva 27). Vinosauvat valmistetaan Iso-Britanniassa, joten kuljetuksiin kuluu energiaa. (Wolf Systems Ltd 2019.)



Kuva 27. Easi-joist®-palkki

Sepa Oy:n valmistamalle tuotteelle ei löydy EPD-selostetta. Metallisille vinosauvoille on tehty EPD-seloste, jonka mukaan valmistajalle tulee sinkittyä terästä ulkopuoliselta toimittajalta, joista tehdään vinosauvoja. EPD-seloste ei kata käyttövaihetta. Palkin elinkaaren lopussa vinosauvat voidaan poistaa puusta käsin. Tuote on täysin kierrätettävissä, mutta kierrätysaste voi vaihdella. EPD-selosteen mukaan vinosauvojen päästöt ovat 2,10 kg CO₂e/kg. (Wolf Systems Ltd 2024, 5–6, 9.) Jos päästöarvot halutaan muuttaa kuutiota kohden, käytetään teräksen tiheytenä 7850 kg/ m³. Ympäristöministeriön päästötietokannan mukaan sinkityn teräksen hiilidioksidipäästöt ovat 2,902 kg CO₂e/kg, mikä on suurempi arvo kuin valmistajan EPD-selosteessa kerrottu arvo. Käytetään tässä yhteydessä valmistajan ilmoittamaa lukua. Lisätään siihen höylätyn puutavaran päästöt 0,114 kg CO₂e/kg, joten hiilijalanjäljen yhteissummaksi tulee 2,214 kg CO₂e/kg. (Ympäristöministeriö 2025.)

VERTAILU

Välipohjaratkaisut eroavat toisistaan pääasiassa kannattajapalkin osalta. Jokaisessa versiossa käytetään kipsilevyä, OSB-levyä ja betonivalua. Betoni on laadultaan kuituvahvistettua. Kuidun koko on 12 mm ja sen määrä on 0,9 kg/m³. Kipsilevyt ovat valmistettu osittain kierrätetystä kipsistä. Jotta materiaalien osalta hiilidioksidipäästöt olisivat matalammat, tulisi valita betoniksi vähähiilistä betonia. OSB-levyt tulisi hankkia Euroopan markkinoilta, jolloin kuljetuspäästöt olisivat pienemmät. Betonivalun alla on OSB-levy ja näiden välissä ei ole eristystä. Näin ollen betonin kosteus pääsee suoraan OSB-levyn pintaan, mikä johtaa OSB-levyn turpoamiseen, muodonmuutoksiin ja liiman kestävyysheikkenemiseen. Kun betonivalua poistetaan, OSB-levyn uudelleenkäyttö ei ole mahdollista, jos levyyn on tullut rakenteellisia muutoksia.

Ratkaisut A ja C ovat molemmat ristikkotyypisiä kannattajapalkkeja. Ratkaisu A on puuta, jonka kiinnityksiin on käytetty liimaa. Ratkaisu C:ssä on puun lisäksi terästä. Molemmat ratkaisut valmistetaan Suomessa. Ratkaisu C:n teräksiset vinosauvat tulevat Iso-Britanniasta, joten niiden Suomeen kuljetukseen kuluu energiaa ja päästöjä riippuen kuljetusmuodosta. Ratkaisu A:n sisältämät liimat haastavat palkin kierrättämistä. Laboratoriotesteissä palkkeja kuormitetaan hetkellisesti, joten palkit eivät välttämättä palaudu alkuperäiseen muotoon, jolloin niiden käyttötarkoitus voi muuttua purkamisen jälkeen. Jos

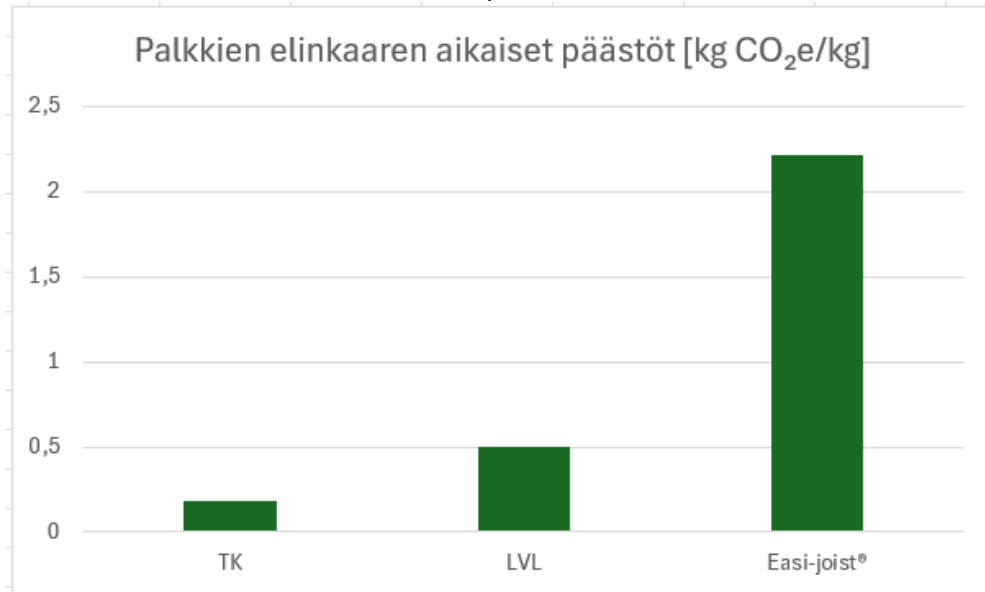
palkkeja ei voi käyttää purkamisen jälkeen sellaisenaan, ratkaisu C:stä on helppo irrottaa vinosauvat, koska ne on kiinnitetty puristuslevyillä. Terässauvat saadaan irti puuosista, joten molemmat osat voidaan kierrättää tai uudelleen käyttää sellaisenaan. Ratkaisu A:n ristikko-osat on liimattu paarteisiin kiinni, joten niiden irrottaminen ehjänä ei ole mahdollista. Puumateriaalin voi kierrättää, koska siinä ei ole mitään pinnoitteita. Ratkaisu A:n hiilidioksidipäästöt ovat 0,18 kg CO₂/kg ja ratkaisu C:n 2,214 kg CO₂e/kg. Pohdinnan kautta päästää tulokseen, että ratkaisussa A on 92 % verran pienemmät hiilidioksidipäästöt kuin ratkaisu C:ssä, joten LCA-vertailussa se on parempi vaihtoehto.

Ratkaisut A ja B ovat materiaaleiltaan samankaltaiset, koska niissä on käytetty puutuotteita sekä molemmissa tuotteissa on käytetty liimaa, joka aiheuttaa päästöjä. Ratkaisussa B on materiaalia enemmän kuin ratkaisussa A. Jos ratkaisut ovat kuormituksen jälkeen ehjiä, niitä voi käyttää uudelleen, jolloin niiden elinkaari pitenee. Uudelleenkäyttöä varten rakenteellinen eheys tulee varmistaa. Laboratoriotestauksissa kuormitus ei ole pitkäaikaista, joten palkit ovat todennäköisesti uudelleenkäytettäviä. Ratkaisusta B on EDP-seloste, mutta ratkaisusta A ei ole. Ratkaisu A:n hiilidioksidipäästöt ovat 0,18 kg CO₂e/kg ja ratkaisu B:n 0,499 kg CO₂e/kg. Materiaalit ovat samantyylliset, joten päästöjen osalta materiaalin määrä vaikuttaa päästöjen suuruuteen. LCA-vertailussa ratkaisu A on parempi vaihtoehto, koska sillä on 64 % pienemmät päästöt kuin ratkaisu B:llä.

Ratkaisuissa B:n ja C:n vertailussa huomataan, että ratkaisu C:n terässauvat pystytään irrottamaan puupaarteista. Jos sauvat vahingoittuvat, taipuvat tai vääntyvät irrotuksessa, silloin ne tulee kierrättää, koska teräksen kierrätys on mahdollista. Jos kuormituksen jälkeen palkit ovat rakenteellisesti ehjiä, niitä voidaan uudelleenkäyttää. Laboratoriotesteissä kuormitus ei ole pitkäaikaista, joten palkit ovat mahdollisesti rakenteellisesti ehjiä. Ratkaisu B:n lujuusluokiteltu LVL-tuote voidaan mahdollisesti uudelleenkäyttää, koska sen ominaisuudet säilyvät hyvin. LVL 48 P -palkin kierrättäminen materiaalina on rajallista, koska se sisältää liimoja ja on monikerroksinen. Molempien ratkaisujen kannattajapalkkeja voidaan kierrättää tai uudelleenkäyttää. Ratkaisu B:n hiilidioksidipäästöt ovat 0,499 kg CO₂e/kg ja ratkaisu C:n 2,214 kg CO₂e/kg. LCA-vertailussa ratkaisu B on parempi vaihtoehto, koska sillä on 77 % pienemmät

päästöt kuin ratkaisu C:llä. Taulukossa 5 esitetään palkkien elinkaaren aikaiset päästöt.

Taulukko 5. Palkkien elinkaaren aikaiset päästöt



Vertailussa käytetään hiilijalanjäljestä yksikköä kg CO₂e/kg. Laskennassa ei ole huomioitu palkkien kuljetuspäästöjä. Ne eivät ole numeerisessa vertailussa olennaisia, koska optimointia varten luodaan parametrit palkkien materiaalien perusteella. Jotta optimointia voi tehdä Excelin avulla, ratkaisut pitää laittaa paremmuusjärjestykseen. LCA-vertailussa ratkaisu A on paras vaihtoehto elinkaariarvioinniltaan. Seuraavana on ratkaisu B ja viimeisenä ratkaisu C. Ratkaisu A:n parametri on 1, ratkaisu B:n parametri on 1,2 ja ratkaisu C:n parametri on 2,6.

Laboratorion välipohjien purkamisen jälkeen materiaalit tulisi kierrättää ja uudelleen käyttää, koska se on mahdollista. LCA-vertailussa ratkaisut ovat keskenään samankaltaisia, koska niiden päämateriaali on puu. Ratkaisut A ja B ovat puuta, joissa on käytetty liimaa. Ratkaisu A:ssa puun määrä on paljon pienempi kuin ratkaisu B:n. Ratkaisu C eroaa materiaaliltaan siinä, että ristikot ovat terästä, jolla on hyvät kierrätysmahdollisuudet, mutta teräksen valmistaminen tuottaa paljon päästöjä.

Laboratoriotestauksissa palkkien kuormitus on lyhytaikaista, joten palkkien uudelleenkäytöllä on suuret mahdollisuudet. Palkit on kiinnitetty ruuveilla runko-

rakenteisiin, joten ne on helppo purkaa. Palkkien alapuoliset koolaukset ja kipsilevyt on kiinnitetty ruuveilla, joten ne pystytään irrottamaan palkeista. Jos kipsilevyt ovat säilyneet ehjänä, niitä voidaan käyttää uudelleen. Kipsilevyissä ei saa olla halkeamia, murtumia eikä kosteutta. Palkkien yläpuoliset OSB-levyt on kiinnitetty liimalla, joten näiden irrottamisessa saattaa olla haasteita, koska levyt voivat rikkoutua irrotuksesta. Jos palkit saadaan ehjänä irrotettua, se kasvattaa niiden elinkaarta ja käyttömahdollisuuksia.

5 KUSTANNUSVERTAILU

Välipohjarakenteiden kustannuksia analysoidaan ja vertaillaan luvussa 5. Puuvälipohjien rakennuskustannukset ovat korkeahkot, koska puuvälipohjassa on monta kerrosta rakenteita, joissa on eri materiaalikerroksia ja mekaanisia kiinnikkeitä. Puuvälipohjat ovat usein kallein yksittäinen rakennusosa kokonaisuutta tarkasteltaessa. Nykyisten standardien myötä Suomessa puurakenteisten välipohjien suunnittelu on ylimitoitettua, jolloin välipohjat ovat tarpeettoman vahvoja todelliseen kuormitukseen nähden. Tällöin materiaalin määrä nousee ja sitä kautta kustannukset nousevat. (Karelia ammattikorkeakoulu 2025.)

Tässä opinnäytetyössä vertaillaan välipohjaratkaisujen laskennallisia kustannuksia välipohjaneliötä kohden vuoden 2025 hinnoilla. Kaksi tärkeää kustannustietoa palkkien osalta jäi saamatta valmistajilta, joten kaikkien palkkien hinnat lasketaan materiaalin perusteella, joten kustannustiedot ovat arvioituja ja siten eivät ole täysin paikkaansa pitäviä. Kustannuslaskennassa on käytetty pääosin Cronvall Oy:n ja K-raudan internetsivuja. Muita lähteitä ovat *Rakennusosien kustannukset 2025* -kirja ja valmistajan antamaa kustannustietoa. Kustannusvertailun tarkoituksena on saada kustannukset palkkien osalta paremmuusjärjestykseen, jotta niitä voidaan hyödyntää optimoinnissa.

Kustannuslaskelmissa ei ole huomioitu materiaalien hukkaa. Kustannukset rajattiin vain materiaalien kustannuksiin, joten laskennasta jätettiin pois muut kustannukset, kuten talvirakentamisen kustannukset sekä työ- ja asennuskustannukset. Liitteessä 1 on Excel-taulukko välipohjaratkaisujen kustannuslaskelmasta. Kustannuslaskelmassa on ilmoitettu välipohjan kokonaiskustannus sekä neliöhinta Alv 25,5 % ja Alv 0 %. Tuloksena saatiin, että ratkaisu A on halvin vaihtoehto ja se on 38 % prosenttia halvempi kuin kallein ratkaisu.

Ratkaisu A

TK-palkki tulee asennusvalmiina, joten se on nopea asentaa, jolloin työ määrä ja sen kustannukset vähenevät työmaalla. Vähäiset kiinnikkeiden käytöt vähentävät kustannuksia. (TK-palkki s.a.) TK-palkin kustannus koostuu puutavara- ja liimasta. TK-palkin kustannukset on laskettu materiaalin perusteella. TK-palkin juoksumetrihinnaksi arvioidaan 15,4 €/jm Alv 25,5 % ja 12,3 €/jm Alv 0 %.

Ratkaisu B

LVL 48 P -palkkeja on saatavilla suoraan rautakaupoista monessa eri koossa, mutta tässä välipohjaratkaisussa on käytetty erikoiskokoa 63 mm, joka pitää tilata tehtaalta. LVL 48 P -palkin materiaalikustannus on 22,6 €/jm Alv 25,5 % ja 18 €/jm alv 0 %. LVL 48 P -palkki on massiivinen, homogeeninen palkki, jossa ei ole koloja. Palkissa on paljon materiaalia, koska palkin lujuus perustuu yhtenäisiin viiluihin. Palkin puumateriaalin määrä nostaa kustannuksia.

Ratkaisu C

Easi-joist®-palkin asennus on nopea ja helppo sekä talotekniikka on yksinkertainen sijoittaa palkistoon. Easi-joist®-palkki tulee tilata tehtaalta, joten sen tilaamisessa tulee huomioida toimitusajat. (Sepa Oy s.a.) Palkin kustannukset on arvioitu materiaalin perusteella. Materiaalina ovat puupaarteet sekä sinkityt teräksiset vinosauvat. Easi-joist®-palkin juoksumetrihinnaksi arvioidaan 19,1 €/jm Alv 25,5 % ja 15,2 €/jm Alv 0 %.

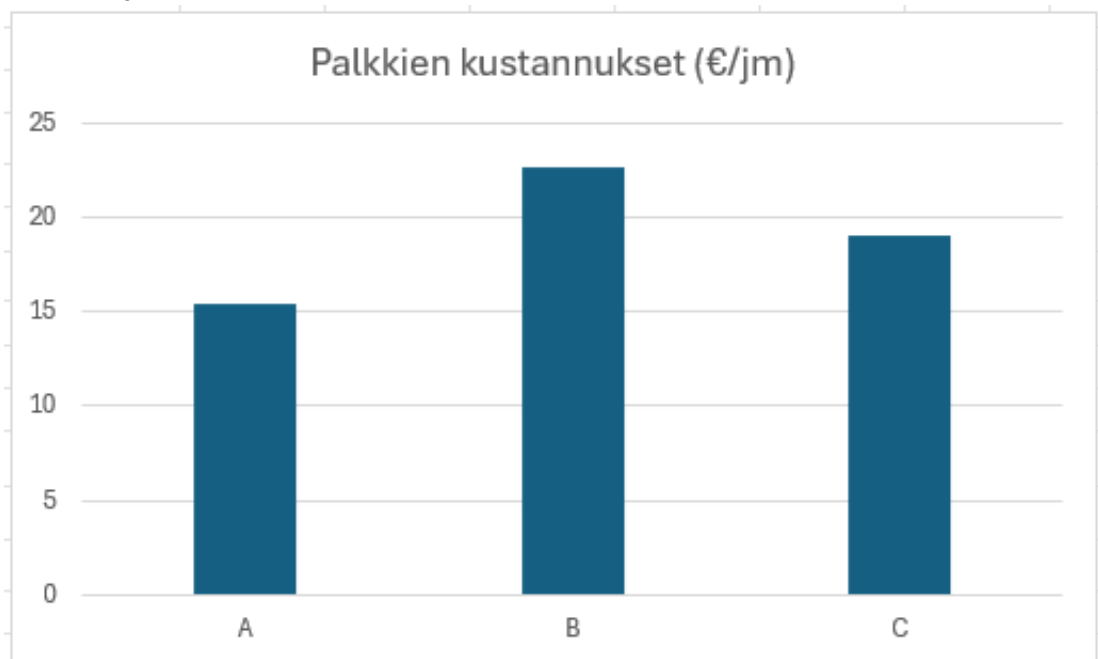
Vertailu

Välipohjat eroavat toisistaan vain palkin ja sen kiinnityksen osalta. Jokaisessa välipohjassa on betonivalu, OSB-levy, koolaukset, kipsilevy ja kiinnikkeet. Näiden materiaalien osalta materiaalikustannus neliometriä kohden on keskimäärin 48 €. Välipohjarakenteen kokonaiskustannus määräytyy palkin kustannuksen ja palkkien määrän mukaan.

Ratkaisu A:n kokonaiskustannus on 67,8 €/m² Alv 25,5 % ja 54,0 €/m² Alv 0 %. Ratkaisu A:lla on vain yksi hinta, koska vertailuväli pohjissa materiaalin määrä ei muutu. Ratkaisu B:llä on kaksi kokonaiskustannusta, koska toisessa on poikittaisjäykistys ja materiaalin määrä on suurempi. Ratkaisu B:n kokonaiskustannus ilman poikittaisjäykistystä on 96,4 €/m² Alv 25,5 % ja 76,8 €/m² Alv 0 %. Poikittaisjäykistykseen kanssa kokonaiskustannus on 100,7 €/m² Alv 25,5 % ja 80,2 €/m² Alv 0 %. Ratkaisu A on 33 % halvempi kuin ratkaisu B:n kalliimpi vaihtoehto.

Ratkaisussa C toisessa versiossa on viisi palkkia ja toisessa on kolme palkkia, joten palkkien suurempi määrä nostaa kokonaiskustannuksia. Ratkaisu C:n kokonaiskustannus kolmella palkilla on 84,9 €/m² Alv 25,5 % ja 67,7 €/m² Alv 0 %. Viidellä palkilla kokonaiskustannus on 108,8 €/m² Alv 25,5 % ja 86,7 €/m² Alv 0 %. Ratkaisu A on 38 % prosenttia halvempi kuin ratkaisu C:n kalliimpi ratkaisu. Taulukossa 6 on palkkien kokonaiskustannukset.

Taulukko 6. Palkkien kustannukset



Kokonaiskustannuksiltaan ratkaisu A on halvin ja kokonaiskustannuksiltaan kallein on ratkaisu C, jossa on viisi palkkia. Jos verrataan kustannuksia samalla palkkimäärällä, silloin ratkaisu B on kallein. Palkkien hintoja verratessa palkki A on 32 % halvempi kuin palkki B ja 19 % halvempi kuin palkki C.

Jotta optimointia voi tehdä Excelin avulla, ratkaisut tulee laittaa paremmuusjärjestykseen palkkien materiaalikustannusten perusteella. Ratkaisuissa A ja C on käytetty vähiten materiaalia palkkien osalta. Vertailussa ratkaisu A on paras vaihtoehto, koska siinä on materiaalit ja kustannukset pienimmät. Seuraavana on ratkaisu C ja viimeisenä ratkaisu B.

Optimointia varten luotiin parametrit vertailun pohjalta ja ne ovat: ratkaisu A:n parametri on 1, ratkaisu B: parametri on 2 ja ratkaisu C:n parametri on 1,5. Näin ratkaisujen materiaalikustannukset otetaan huomioon optimoinnissa. Kustannuslaskenta on suuntaa antava ja se on riittävä tarkkuus kustannuksia tarkasteltaessa, koska laskennasta saatiin parametrit optimointia varten.

6 VÄRÄHTELYMITOITUS

Luvussa 6 käsitellään puurakenteisten välipohjien mitoittavaa tekijää, värähtelymitoitusta. PuuHyVä-hankkeessa tehdään puurakenteisille välipohjille laboratoriomittauksia ominaistaajuuden ja taipuman tarkastelun osalta. Todellisilla mittaustuloksilla pystytään tekemään vertailua laskennallisiin mittaustuloksiin. Laboratoriomittauksissa noudatetaan SFS-EN 16929:2018 standardia.

Puurakenteisten välipohjien suunnittelussa tulee noudattaa eurooppalaisia rakennusstandardeja eli Eurokoodeja. Puurakenteisten kantavien rakenteiden suunnitteluperustestandardi on Eurokoodi 5. Eurokoodi on yksityiskohtaisempi ja laajempi kuin suomalaiset puurakenteiden suunnitteluohjeet. Suomessa noudatetaan kansallisia raja-arvoja. (Siikanen, 132.) Osassa 1 on yleiset sekä rakennuksia koskevat säännöt. (SFS-EN 1995-1-1: 2014).

Eurokoodi 5 käytetään, kun suunnitellaan käytettävän sahatavaraa, höylättyä tai pyöreätä puutavaraa, liimapuuta tai puisia tuotteita, jotka on tarkoitettu rakentamiseen. Eurokoodi 5 vaatimukset koskevat mekaanista kestävyyttä, säilyvyyttä, käyttökelpoisuutta ja palonkestävyyttä. (Kevarinmäki 2017, 15.) Eurokoodit tulevat uudistumaan vuosien 2025–2027 aikana, jolloin värähtelymitoituksen raja-arvot tulevat helpottumaan (Toratti 2023). Tässä opinnäytetyössä huomioidaan voimassa oleva Eurokoodi 5 ja värähtelymitoituksen kansalliset raja-arvot.

Värähtely on toistuvaa, edestakaista liikettä, joka aiheutuu yleisimmin kävelystä. Värähtelyä aiheuttaa pyykinpesukone ja liikennetäriä. Ihminen pystyy aistimaan kehontuntemuksilla värähtelyn. Värähtelyä tapahtuu kevyissä välipohjissa. Koska puurakenteinen välipohja on kevyt, silloin siinä tapahtuva värähtely tulee ottaa huomioon suunnittelussa. (Lahtela 2018, 2.)

Välipohjan värähtelymitoitus tulee usein mitoittavaksi tekijäksi puurakenteisten välipohjien suunnittelussa. Värähtelymitoitus tehdään RIL 205-1-2017 ohjeiden mukaisesti. Värähtelymitoituksessa tarkastellaan välipohjan ominaistajuutta ja taipumaa. Suomessa välipohjan ominaistajuus pitää olla yli 9 Hz, koska muutoin kyseessä on matalataajuuslattia ja Suomessa ei ole mitoitusmenetelmää tällaiselle välipohjalle. (Puuinfo Oy 2020.)

Ominaistajuus

Ominaistajuus f [Hz] tarkoittaa taajuutta, jolla värähtelijä värähtelee. Värähtely on voimakkainta, kun värähtely saavuttaa suurimman amplitudin. Värähtelyllä on alin ominaistajuus, jolle on laskentakaava. Alin ominaistajuus on merkittävä suunnittelun kannalta, koska sen taajuus kertoo, kuinka herkästi materiaali reagoi herätteeseen. Kun välipohjaan tulee ulkopuolinen heräte, silloin voi syntyä resonanssi, jos herätteen taajuus on sama kuin ominaistajuus. Resonanssi-ilmiö tulee suunnittelussa estää, jotta sitä ei tapahtuisi. (Puuinfo Oy 2021.)

Asuin- ja toimistorakennusten välipohjille voidaan käyttää yksinkertaistettua värähtelymitoitusta (Kevarinmäki 2017, 197). Hankkeen välipohjat on tuettu kahdelta sivulta, joten ominaistajuuden laskennassa voidaan käyttää yksinkertaistettua kaavaa (Talja ym. 2002, 21).

Tämänhetkinen laskentatapa ominaistajuudelle on yksinkertaistettu, koska siinä ei huomioida esimerkiksi rakenteiden liitosten jäykkyyden vaikutusta, massojen sijoittumista, ympäröiviä rakenteita tai pintarakenteita. Värähtelymitoitus on usein ylimitoitettua Suomessa, jolloin välipohjarakenne on tarpeettoman kestävä, jolloin kustannukset, rakenteen paino ja materiaalihukka lisääntyvät. (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu s.a.) Välipohjarakenteen alin ominaistajuus määritetään yhtälön 1 mukaisesti.

$$f_1 = \frac{\pi}{2 * L^2} * \sqrt{\frac{(EI)_L}{s * m}} \quad (1)$$

jossa	L	lattiarakenteen jänneväli	[m]
	(EI) _L	lattiapalkin taivutusjäykkyys	[Nm ²]
	s	lattiapalkkien välinen etäisyys	[m]
	m	lattian oman painon ja hyötykuormasta osuuden 30 kg/m ² yhteensä laskettu massa	[kg/m ²]

Eurokoodi 5:n kansallisessa liitteessä on määritetty alimman ominaistaajuuden suositusraja-arvoksi 9 Hz, jolloin ei tarvitse tehdä erityistarkastelua, jos tämä raja-arvo täyttyy (kuva 28). Kun alin ominaistaajuus on yli 9 Hz, silloin tehdään taipumatarkastelu välipohjarakenteelle. (Lahtela 2018, 23.)

Ominaistaajuus

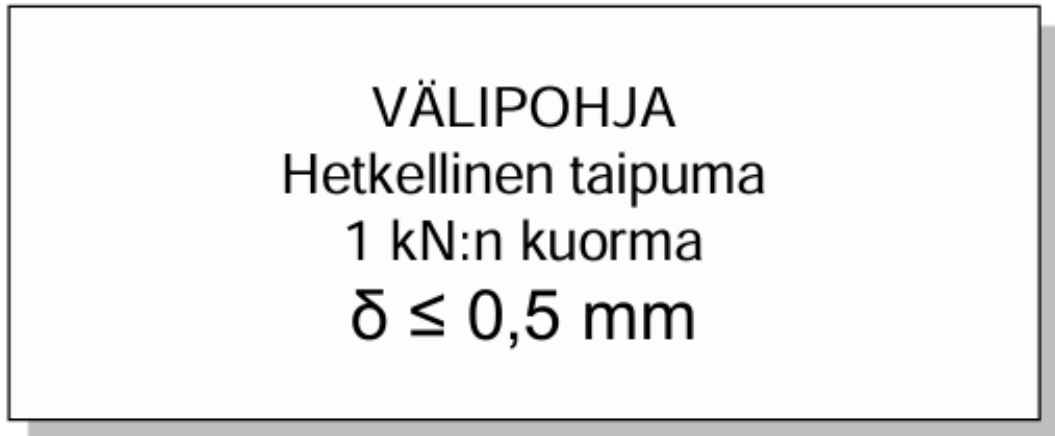
Matalataajuuslattia $f_1 < 9$ Hz Erityistarkastelu (kiihtyvyyss)	Korkeataajuuslattia $f_1 \geq 9$ Hz Taipumatarkastelu
--	--

Kuva 28. Välipohjan värähtelymitoitus määräytyy ominaistaajuuden mukaan (Lahtela 2018, 19)

Ominaistaajuuteen vaikuttavat välipohjan jänneväli, paino ja kantavan rakenteen jäykkyys. Matalataajuuslattia määräytyy helposti, jos lattia on painava. (Puuinfo Oy 2020.) Lähivuosina tulee eurokoodiuudistus, jossa ominaistaajuuden raja-arvo laskee 8 Hz:iin (Toratti 2023).

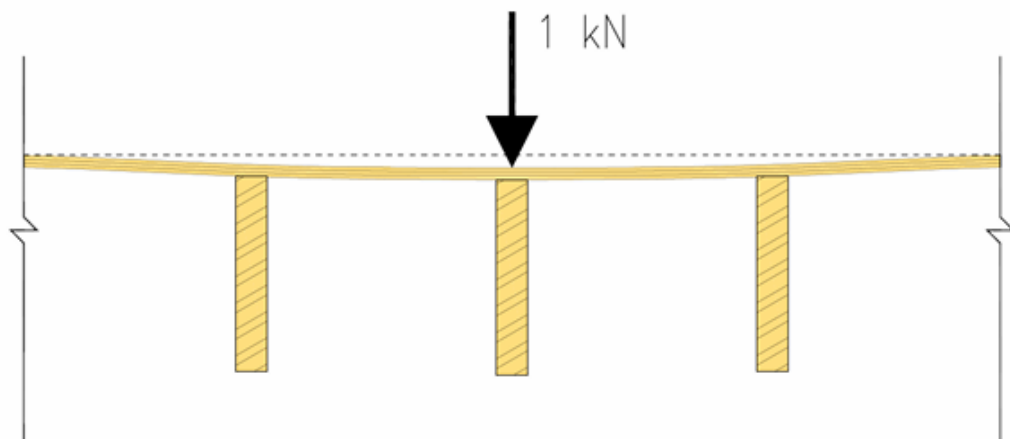
Taipuma

Taipumatarkastelussa Eurokoodi 5:n kansallisessa liitteessä värähtelymitoituksessa suoritusravoksi rakenteen taipumalle on annettu 0,5 mm, kun pistevoimana on 1 kN (kuva 29) (Puuinfo Oy 2020). 1 kN pistevoiman aiheuttama suurin hetkellinen taipuma lattiapalkille, kun kuorman jakautumista ei huomioida viereisille palkeille. Taipumatarkastelu tehdään, kun ensin on tiedossa, että ominaistaajuus ylittää 9 Hz raja-arvon. (Kevarinmäki 2017, 199, 230.)



Kuva 29. Välipohjan hetkellisen taipuman raja-arvo (Lahtela 2018, 20)

Eurokoodiuudistuksen myötä taipuma-arvo tulee muuttumaan 0,5 mm:stä arvoon 1,0 mm (Toratti 2023).



Kuva 30. Taipumatarkastelu 1 kN pistekuormalla (Lahtela 2018, 32)

Mittaustilanteessa kuormitustapaus on kolmipistekuormitus, jossa välipohja on päistä tuettu ja välipohjan keskeltä kuormitetaan kolmannella pisteellä (kuva 30). Välipohjarakenteen taipuma määritetään yhtälön 2 mukaisesti (Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL ry, 71).

$$f = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot EI} \quad (2)$$

jossa	F	kuorma	[N]
	L	lattiarakenteen jänneväli	[mm]
	EI	lattiapalkin taivutusjäykkyys	[Nmm ²]

Jos kyseessä on korkeataajuuslattia, silloin tarkastellaan taipumaehto lattiaan kriittisimmän pisteen mukaan. Referenssipisteiksi määritellään lattian kohdat, joissa pistekuorman aiheuttama taipuma on arvioitu olevan suurimmillaan. Usein riittää keskipisteen ja reuna-alueen tarkastelu, jos kyseessä on yksinkertainen lattia. Muulloin referenssipisteitä tarvitaan enemmän. (Talja ym. 2002, 26, 30.)

7 TULOKSET

Luvussa 7 tuodaan esille laboratoriomittausten toteutusta ja mittauksista syntyneitä tuloksia. Hankkeessa tehtävät laboratoriomittaukset suoritetaan standardin SFS-EN 16929:2018 mukaisesti (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025). Tuloksia käsiteltäessä välipohjia tarkastellaan kantavan palkin mukaan eikä ratkaisun mukaan. Koska yhdestä ratkaisusta on kaksi versiota, tämä helpottaa tulosten lukemista. Ominaistaajuuden ja taipuman mittaustuloksia analysoidaan ja niistä tehdään johtopäätöksiä luvussa 8.

Välipohjarakenteille tehtiin mittauksia ominaistaajuudesta ja taipumasta jokaisessa rakentamisen vaiheessa. Ensimmäiset mittaukset tehtiin runkovaiheessa, kun palkit olivat kiinni seinärakenteissa. Testimittaukset tehtiin keskimmäisen palkin keskikohtaan. Laboratoriomittauksissa tulee huomioida, että välipohjilla on erimittaiset jännevälit, joten tulokset eivät ole suoraan verrattavissa keskenään. Luvussa 9 suhteutetaan tulokset pituusmetriä kohden.

7.1 Ominaistaajuuden mittausjärjestelyt

Jotta palkkien ominaistaajuutta voi mitata, palkkiin tulee saada heräte (SFS-EN 16929: 2018, 10). Heräte annettiin puisella vasaralla (kuva 31), joka antoi iskun palkkiin omalla painollaan eli se vapautettiin yläasennosta alas.



Kuva 31. Puinen vasara toimi herätteenä palkille

Herätteen tuli olla 500 mm päästä mittauslaitteesta. Kun mittauslaite oli valmis mittaamaan, vasara vapautettiin alas. Standardin mukainen mittauslaite on kiihtyvyyssmittari. (SFS-EN 16929: 2018, 10.) Näissä mittauksissa käytettiin langatonta värähtelymittalaitetta (kuva 32), joka on uudenlainen mittalaite ominaistaajuuden mittaamisen. Mittalaite antoi tuloksen heti ja siirsi sen tietokoneohjelmaan, joten tuloksia pystyi seuraamaan reaaliajassa.



Kuva 32. Langaton värähtelymittalaite

Mittalaite on herkkä ja se mittaa ympäriltä tulevat äänet, joten mittaushetkellä ylimääräisiä ääniä ei saa kuulua (SFS-EN 16929: 2018, 10). Runkovaiheen jälkeen tehtiin jäykistykset runkoon. Heräte tuotettiin puisella vasaralla, mutta se ei toiminut, koska runko oli jäykkä. Värähtelymittaukset toteutettiin heel-drop-testimenetelmällä (kuva 33). Siinä henkilö pudottautuu päkiöiltä kanta-päilleen ja pudotuskorkeus on 60 mm. Loput mittaukset toteutettiin tällä menetelmällä. (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2023.)

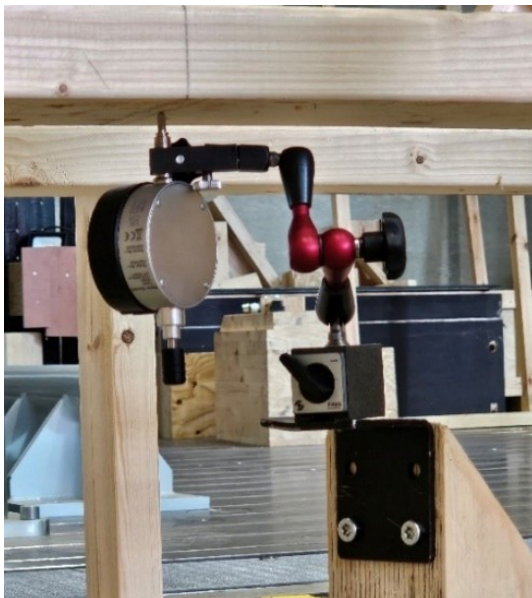


Kuva 33. Ominaistaajuuden mittaaminen heel-drop-menetelmällä (kuva: Katja Rinkinen 2025)

Mittausten tuloksena saatiin välipohjan alin ominaistaajuus, joka toimii välipohjan määrittävänä arvona (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2023).

7.2 Taipuman mittausjärjestelyt

Taipumaa mitattiin Mahr-merkkisellä mittakellolla (kuva 34), joka oli helppo kiinnittää magneettialasta tukirakenteisiin.



Kuva 34. Taipuman mittaaminen mittakellolla

Mittakello laitettiin mittaamaan taipumaa kannattajapalkin alapinnasta. Palkkien taivutus tuli tehdä ohjeiden mukaisesti 1 kN eli pistekuormalla keskipisteestä. Mittauksissa käytetty todellinen paino oli 105 kg eli 1,03 kN (kuva 35).

Kuormitus tilanne oli kolmipistetaivutus, jossa välipohja oli päistä tuettu ja välipohjan keskeltä kuormitettiin kolmannella pisteellä. Kuormituspisteen pinta-ala oli 200 cm².



Kuva 35. Palkin kuormitus

Taipumamittauksissa käytettävää painoa oli helppo siirtää laboratorion nosturilla, joten mittausten tekeminen oli nopeaa.

7.3 Runkovaiheen mittaustulokset

Kun välipohjat oli rakennettu runkovaiheeseen, tehtiin ensimmäiset mittaukset ominaistaajuuden ja taipuman osalta. Laboratoriomittauksissa ensin tehtiin ominaistaajuusmittaukset ja sen jälkeen taipumamittaukset.

Ominaistaajuus

Taulukossa 7 esitetään ominaistaajuuden mittaustulokset. Mittaukset tehtiin keskimmäisen palkin keskikohtasta ja herätteenä oli puinen vasara. Heräte tehtiin samalla tavalla, joten tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään.

Taulukko 7. Runkovaiheen mittaustulokset ominaistaajuudesta (mukaien Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025)

Mittaus	Lattia nro	Kerros	Mittapiste	Mittasarja	Heräte	Klo	[Hz]	Keskiarvo
1.	1	TK	Keskikohta	3066	vasara	10.14.00	24,59	25,13
2.	1	TK	Keskikohta	3068	vasara	10.15.00	25,4	
3.	1	TK	Keskikohta	3070	vasara	10.16.00	25,4	
1.	2	LVL 48 P	Keskikohta	3078	vasara	10.21.00	18,29	18,41
2.	2	LVL 48 P	Keskikohta	3080	vasara	10.22.00	18,36	
3.	2	LVL 48 P	Keskikohta	3082	vasara	10.23.00	18,59	
1.	3	Easi-joist®	Keskikohta	3084	vasara	10.25.00	26,52	24,67
2.	3	Easi-joist®	Keskikohta	3086	vasara	10.26.00	24,18	
3.	3	Easi-joist®	Keskikohta	3088	vasara	10.27.00	24,08	
4.	3	Easi-joist®	Keskikohta	3090	vasara	10.29.00	23,88	
1.	4	TK	Keskikohta	3092	vasara	10.31.00	25,3	25,23
2.	4	TK	Keskikohta	3094	vasara	10.31.00	25,2	
3.	4	TK	Keskikohta	3096	vasara	10.32.00	25,2	
1.	5	LVL 48 P	Keskikohta	3098	vasara	10.35.00	18,69	18,66
2.	5	LVL 48 P	Keskikohta	3100	vasara	10.36.00	18,8	
3.	5	LVL 48 P	Keskikohta	3102	vasara	10.37.00	18,49	
1.	6	Easi-joist®	Keskikohta	3104	vasara	10.40.00	24,28	24,11
2.	6	Easi-joist®	Keskikohta	3106	vasara	10.41.00	24,18	
3.	6	Easi-joist®	Keskikohta	3108	vasara	10.41.00	23,88	

TK-palkkirakenteen ominaistaajuuden mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 25,13 Hz ja 25,23 Hz. LVL 48 P -palkkirakenteen ominaistaajuuden mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 18,41 Hz ja toisen osuuden mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 18,66 Hz. Easi-joist®-palkin ominaistaajuuden mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 24,67 Hz ja 24,11 Hz. Kaikkien vertailupalkkien tulokset olivat hyvin lähellä toisiaan, joten niitä pystytään vertaamaan keskenään.

Taipuma

Taipuman osalta mittaustulokset esitetään taulukossa 8. Mittaukset tehtiin keskimmäisen palkin keskikohdasta ja painona oli 1,03 kN ja taipumaa mittasi mittakello.

Taulukko 8. Runkovaiheen mittaustulokset taipumasta (mukailien Kaakkois-Suomen ammatti-korkeakoulu 2025)

Mittaus	Lattia nro	Kerros	Klo	[mm]	Keskiarvo
1.	1	TK	12.32.16	1,918	1,92
2.	1	TK	12.33.17	1,926	
3.	1	TK	12.34.03	1,927	
1.	2	LVL 48 P	12.35.48	2,280	2,29
2.	2	LVL 48 P	12.36.54	2,290	
3.	2	LVL 48 P	12.38.02	2,296	
1.	3	Easi-joist®	12.39.29	2,528	2,55
2.	3	Easi-joist®	12.41.04	2,560	
3.	3	Easi-joist®	12.41.50	2,563	
1.	4	TK	13.5.2028	1,973	1,98
2.	4	TK	13.6.1939	1,984	
3.	4	TK	13.7.1942	1,989	
1.	5	LVL 48 P	13.9.1943	2,294	2,31
2.	5	LVL 48 P	13.10.1955	2,310	
3.	5	LVL 48 P	13.11.1947	2,314	
1.	6	Easi-joist®	13.13.10	2,675	2,69
2.	6	Easi-joist®	13.14.52	2,698	
3.	6	Easi-joist®	13.15.59	2,706	

Ensimmäisen TK-palkkirakenteen taipuman mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 1,92 mm ja toisen TK-palkkirakenteen taipuman mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 1,98 mm. LVL 48 P -palkkirakenteen ensimmäiset mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 2,29 mm ja toisen osuuden mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 2,31 mm. Ensimmäisen easi-joist®-palkin mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 2,55 mm ja toisen mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 2,69 mm.

7.4 Mittaustulokset OSB-levytyksen ja poikittaisjäykistyksen jälkeen

Poikittaisjäykistyksen ja OSB-levytyksen aikaiset mittaustulokset tehtiin vaiheittain ja kaikista tilanteista ei ole mittaustuloksia. Taulukoihin koottiin tehdyt mittaukset. Välipohjasta numero 2 eli LVL 48 P -välipohjasta ei ole mittaustulosta jäykistyksen jälkeen, koska siihen ei tehty poikittaisjäykistystä. TK-välipohjilla ei ole mittaustuloksia pelkästä OSB-levytysvaiheesta, koska poikittaisjäykistykset tehtiin ennen levytysvaihetta.

Ominaistaajuus

Ominaistaajuuden mittaustulokset ovat taulukossa 9. TK-välipohjille ei ole mittaustuloksia pelkästä OSB-levytysvaiheesta. Levytysvaiheen LVL 48 P -välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 16,08 Hz ja 16,10 Hz, joten tulokset ovat samankaltaiset. Easi-joist®-välipohjan levytysvaiheen ensimmäinen mittaustulos oli keskiarvoltaan 20,42 Hz ja toinen mittaustulos oli keskiarvoltaan 18,76 Hz. Näissä mittaustuloksissa on pientä poikkeamaa.

Taulukko 9. Ominaistaajuuden mittaustulokset OSB-levytyksen ja poikittaisjäykistyksen jälkeen (mukaillen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025)

Mittaustiedot			OSB-levytys			OSB-levytys + poikittaisjäykistys		
Mittaus	Lattia nro	Kerros	Klo	[Hz]	Keskiarvo	Klo	[Hz]	Keskiarvo
1.	1	TK				11.30.00	15,04	15,09
2.	1	TK				11.31.00	15,14	
3.	1	TK				11.37.00	15,1	
1.	2	LVL 48 P	7.46.00	16,56	16,08			
2.	2	LVL 48 P	7.47.00	15,75				
3.	2	LVL 48 P	7.51.00	15,92				
1.	3	Easi-joist®	7.57.00	20,42	20,42	14.39.00	20,22	20,19
2.	3	Easi-joist®	7.58.00	20,52		14.40.00	19,61	
3.	3	Easi-joist®	8.2.2000	20,32		14.41.00	20,73	
1.	4	TK				11.52.00	14,83	14,73
2.	4	TK				11.54.00	14,63	
3.	4	TK				11.54.00	14,73	
1.	5	LVL 48 P	8.6.2000	16,05	16,10	14.28.00	15,04	15,14
2.	5	LVL 48 P	8.7.2000	16,19		14.31.00	15,04	
3.	5	LVL 48 P	8.7.2000	16,05		14.32.00	15,34	
1.	6	Easi-joist®	12.35.00	18,69	18,76	14.36.00	18,29	18,12
2.	6	Easi-joist®	12.36.00	18,8		14.36.00	17,88	
3.	6	Easi-joist®	12.37.00	18,8		14.37.00	18,19	

Poikittaisjäykistyksen jälkeen TK-välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 15,09 Hz ja 14,73 Hz. LVL 48 P -välipohjasta vain toisesta oli mittaustulos ja se oli keskiarvoltaan 15,14 Hz. Easi-joist®-välipohjan mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 20,19 Hz ja 18,12 Hz.

Taipuma

Taipuman mittaustulokset ovat taulukossa 10. TK-välipohjille ei ole mittaustuloksia pelkästä OSB-levytysvaiheesta. Levytysvaiheen LVL 48 P -välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 1,02 mm ja 1,02 mm, joten mittaustulokset ovat samat. Easi-joist®-välipohjan levytysvaiheen ensimmäinen mittaustulos oli keskiarvoltaan 0,86 mm ja toinen mittaustulos oli keskiarvoltaan 1,39 mm.

Taulukko 10. Taipuman mittaustulokset OSB-levytyksen ja poikittaisjäykistysen jälkeen (mukaillen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025)

Mittaustiedot			OSB-levytys			OSB-levytys + poikittaisjäykistys		
Mittaus	Lattia nro	Kerros	Klo	[mm]	Keskiarvo	Klo	[mm]	Keskiarvo
1.	1	TK				13.2.2020	0,701	0,71
2.	1	TK				13.3.2029	0,708	
3.	1	TK				13.4.1931	0,709	
1.	2	LVL 48 P	13.07.18.	1,018	1,02			
2.	2	LVL 48 P	13.08.16.	1,024				
3.	2	LVL 48 P	13.09.14.	1,03				
1.	3	Easi-joist®	13.10.42.	0,848	0,86	12.55.26	0,567	0,57
2.	3	Easi-joist®	13.11.57.	0,858		12.57.02	0,575	
3.	3	Easi-joist®	13.13.00.	0,861		12.58.03	0,578	
1.	4	TK				13.31.34	0,67	0,68
2.	4	TK				13.32.38	0,678	
3.	4	TK				13.33.38	0,681	
1.	5	LVL 48 P	13.35.04	1,006	1,02	12.59.22	0,752	0,76
2.	5	LVL 48 P	13.36.07	1,03		13.00.35	0,766	
3.	5	LVL 48 P	13.37.07	1,036		13.01.41.	0,77	
1.	6	Easi-joist®	13.38.28	1,382	1,39	13.03.34.	0,895	0,90
2.	6	Easi-joist®	13.39.28	1,398		13.04.40.	0,907	
3.	6	Easi-joist®	13.40.31	1.403		13.04.40.	0,91	

Poikittaisjäykistysen jälkeen TK-välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 0,71 mm ja 0,68 mm. LVL 48 P -välipohjasta vain toisesta oli mittaustulos ja se oli keskiarvoltaan 0,76 mm. Easi-joist®-välipohjan mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 0,57 mm ja 0,9 mm.

7.5 Alapuolisen koolausvaiheen mittaustulokset

Kun välipohjien yläpintaan oli kiinnitetty OSB-levyt ja tehty jäykistykset, laitettiin palkkien alapintaan koolaukset 48 mm x 48 mm mitallistetusta puutavara- rasta. Tämän jälkeen tehtiin mittaukset ominaistaajuuden ja taipuman osalta.

Ominaistaajuus

Ominaistaajuuden mittaustulokset ovat taulukossa 11.

Taulukko 11. Ominaistaajuuden mittaustulokset alapuolisen koolauksen jälkeen (mukaillen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025)

Mittaus	Lattia nro	Kerros	Mittapiste	Mittasarja	Heräte	Klo	[Hz]	Keskiarvo
1.	1	TK	Keskikohta	3210	HD	10.35.00	14,83	14,97
2.	1	TK	Keskikohta	3212	HD	10.36.00	15,24	
3.	1	TK	Keskikohta	3214	HD	10.37.00	14,83	
4.	1	TK	Keskikohta	3216	HD	10.38.00	15,04	
1.	2	LVL 48 P	Keskikohta	3218	HD	10.40.00	15,75	15,58
2.	2	LVL 48 P	Keskikohta	3220	HD	10.41.00	15,24	
3.	2	LVL 48 P	Keskikohta	3222	HD	10.42.00	15,75	
4.	2	LVL 48 P	Keskikohta	3224	HD	10.43.00	17,75	
1.	3	Easi-joist®	Keskikohta	3226	HD	10.45.00	19,51	19,23
2.	3	Easi-joist®	Keskikohta	3228	HD	10.45.00	19	
3.	3	Easi-joist®	Keskikohta	3230	HD	10.46.00	19,1	
4.	3	Easi-joist®	Keskikohta	3232	HD	10.46.00	19,3	
1.	4	TK	Keskikohta	3238	HD	10.57.00	14,83	14,77
2.	4	TK	Keskikohta	3240	HD	10.58.00	14,86	
3.	4	TK	Keskikohta	3242	HD	10.58.00	14,63	
1.	5	LVL 48 P	Keskikohta	3252	HD	11.6.2000	15,04	14,87
2.	5	LVL 48 P	Keskikohta	3254	HD	11.7.2000	14,94	
3.	5	LVL 48 P	Keskikohta	3256	HD	11.7.2000	14,63	
4.	5	LVL 48 P	Keskikohta	3258	HD	11.8.2000	14,83	
1.	6	Easi-joist®	Keskikohta	3244	HD	11.00.00	16,87	17,21
2.	6	Easi-joist®	Keskikohta	3246	HD	11.1.2000	17,27	
3.	6	Easi-joist®	Keskikohta	3248	HD	11.2.2000	17,48	
4.	6	Easi-joist®	Keskikohta	3250	HD	11.2.2000	17,48	

TK-välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 14,97 Hz ja 14,77 Hz, joten tulokset ovat samankaltaiset. LVL 48 P -välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 15,58 Hz ja 14,87 Hz. Easi-joist®-välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 19,23 Hz ja 17,21 Hz.

Taipuma

Alapuolisen koolausvaiheen taipuman mittaustulokset ovat taulukossa 12.

Taulukko 12. Taipuman mittaustulokset alapuolisen koolauksen jälkeen (mukaillen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025)

Mittaus	Lattia nro	Kerros	Klo	[mm]	Keskiarvo
1.	1	TK	14.51.53	0,665	0,67
2.	1	TK	14.53.04	0,671	
3.	1	TK	14.54.02	0,672	
1.	2	LVL 48 P	14.55.35	0,8	0,81
2.	2	LVL 48 P	14.56.39	0,814	
3.	2	LVL 48 P	14.57.40	0,82	
1.	3	Easi-joist®	14.59.29	0,548	0,55
2.	3	Easi-joist®	15.00.36	0,55	
3.	3	Easi-joist®	15.1.1941	0,549	
1.	4	TK	15.22.14	0,58	0,59
2.	4	TK	15.23.21	0,588	
3.	4	TK	15.24.22	0,589	
1.	5	LVL 48 P	10.58.28	0,744	0,76
2.	5	LVL 48 P	10.59.32	0,764	
3.	5	LVL 48 P	11.00.41	0,766	
1.	6	Easi-joist®	15.29.24	0,863	0,87
2.	6	Easi-joist®	15.30.29	0,874	
3.	6	Easi-joist®	15.31.36	0,877	

TK-välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 0,67 mm ja 0,59 mm. LVL 48 P -välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 0,81 mm ja 0,76 mm. Easi-joist®-välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 0,55 mm ja 0,87 mm.

7.6 Kipsilevytyksen jälkeiset mittaustulokset

Koolauksen alapuolelle laitettiin kipsilevyt ja tehtiin sen jälkeen mittaukset ominaistajuuden ja taipuman osalta.

Ominaistajuus

Ominaistajuuden mittaustulokset ovat taulukossa 13.

Taulukko 13. Ominaistajuuden mittaustulokset kipsilevytyksen jälkeen (mukaan Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025)

Mittaus	Lattia nro	Kerros	Mittapiste	Mittasarja	Heräte	Klo	[Hz]	Keskiarvo
1.	1	TK	Keskikohta	3278	HD	12.16.00	13,61	13,63
2.	1	TK	Keskikohta	3280	HD	12.18.00	13,61	
3.	1	TK	Keskikohta	3282	HD	12.18.00	13,68	
1.	2	LVL 48 P	Keskikohta	3284	HD	12.21.00	14,02	14,04
2.	2	LVL 48 P	Keskikohta	3286	HD	12.21.00	14,16	
3.	2	LVL 48 P	Keskikohta	3288	HD	12.22.00	13,95	
1.	3	Easi-joist®	Keskikohta	3290	HD	12.24.00	17,54	17,48
2.	3	Easi-joist®	Keskikohta	3292	HD	12.24.00	17,48	
3.	3	Easi-joist®	Keskikohta	3294	HD	12.25.00	17,41	
1.	4	TK	Keskikohta	3296	HD	12.27.00	13,41	13,33
2.	4	TK	Keskikohta	3298	HD	12.27.00	13,31	
3.	4	TK	Keskikohta	3300	HD	12.28.00	13,28	
1.	5	LVL 48 P	Keskikohta	3302	HD	12.30.00	13,82	13,77
2.	5	LVL 48 P	Keskikohta	3304	HD	12.31.00	13,89	
3.	5	LVL 48 P	Keskikohta	3306	HD	12.32.00	13,61	
1.	6	Easi-joist®	Keskikohta	3308	HD	12.35.00	15,54	15,28
2.	6	Easi-joist®	Keskikohta	3310	HD	12.36.00	15,16	
3.	6	Easi-joist®	Keskikohta	3312	HD	12.37.00	15,14	

TK-välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 13,63 Hz ja 13,33 Hz, joten tulokset ovat samankaltaiset. LVL 48 P -välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 14,04 Hz ja 13,77 Hz. Easi-joist®-välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 17,48 Hz ja 15,28 Hz.

Taipuma

Kipsilevytyksen jälkeiset taipuman mittaustulokset ovat taulukossa 14.

Taulukko 14. Taipuman mittaustulokset kipsilevytyksen jälkeen (mukaillen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025)

Mittaus	Lattia nro	Kerros	Klo	[mm]	Keskiarvo
1.	1	TK	13.39.47	0,576	0,58
2.	1	TK	13.40.48	0,582	
3.	1	TK	13.41.48	0,584	
1.	2	LVL 48 P	13.43.27	0,702	0,71
2.	2	LVL 48 P	13.44.46	0,716	
3.	2	LVL 48 P	13.45.50	0,72	
1.	3	Easi-joist®	13.47.10	0,49	0,49
2.	3	Easi-joist®	13.48.21	0,496	
3.	3	Easi-joist®	13.49.41	0,498	
1.	4	TK	14.7.1941	0,521	0,53
2.	4	TK	14.8.1957	0,531	
3.	4	TK	14.10.2015	0,531	
1.	5	LVL 48 P	14.18.45	0,658	0,67
2.	5	LVL 48 P	14.19.52	0,67	
3.	5	LVL 48 P	14.21.04	0,674	
1.	6	Easi-joist®	14.23.40	0,737	0,74
2.	6	Easi-joist®	14.25.05	0,748	
3.	6	Easi-joist®	14.26.05	0,749	

TK-välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 0,58 mm ja 0,53 mm, joten tulokset ovat samankaltaiset. LVL 48 P -välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 0,71 mm ja 0,67 mm. Easi-joist®-välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 0,49 mm ja 0,74 mm.

7.7 Betonivalun jälkeiset mittaustulokset

Kipsilevytyksen jälkeen tehtiin OSB-levyn päälle betonivalu jokaiseen välipohjaan. Valu kuivui 28 vuorokautta, kunnes välipohjiin voitiin tehdä mittauksia. Betonivalun kuivuessa mitattiin taipumaa välipohjien alapinnasta ilman painoa, koska painava betonimassa aiheutti itsessään taipumaa välipohjaan. Betonivalun aikaiset mittaustulokset ovat liitteessä 2. Näitä mittaustuloksia analysoidaan luvussa 8.1.

Ominaistaajuus

Betonivalun jälkeiset ominaistaajuusmittaustulokset ovat taulukossa 15.

Taulukko 15. Ominaistaajuuden mittaustulokset betonivalun jälkeen (mukailien Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025)

Mittaus	Lattia nro	Kerros	Mittapiste	Mittasarja	Heräte	Klo	[Hz]	Keskiarvo
1.	1	TK	Keskikohta	299	HD	9:52	9,89	9,82
2.	1	TK	Keskikohta	301	HD	9:53	9,88	
3.	1	TK	Keskikohta	303	HD	9:53	9,69	
1.	2	LVL 48 P	Keskikohta	305	HD	9:56	13,17	13,13
2.	2	LVL 48 P	Keskikohta	307	HD	9:56	13,25	
3.	2	LVL 48 P	Keskikohta	309	HD	9:57	12,97	
1.	3	Easi-joist®	Keskikohta	311	HD	9:59	14,93	14,81
2.	3	Easi-joist®	Keskikohta	313	HD	10:00	14,73	
3.	3	Easi-joist®	Keskikohta	315	HD	10:00	14,63	
4.	3	Easi-joist®	Keskikohta	317	HD	10:01	14,83	
5.	3	Easi-joist®	Keskikohta	319	HD	10:01	14,93	
1.	4	TK	Keskikohta	321	HD	10:05	9,28	9,16
2.	4	TK	Keskikohta	323	HD	10:08	8,98	
3.	4	TK	Keskikohta	325	HD	10:09	9,28	
4.	4	TK	Keskikohta	327	HD	10:10	9,08	
1.	5	LVL 48 P	Keskikohta	329	HD	10:11	13,44	13,53
2.	5	LVL 48 P	Keskikohta	331	HD	10:12	13,72	
3.	5	LVL 48 P	Keskikohta	333	HD	10:13	13,51	
4.	5	LVL 48 P	Keskikohta	335	HD	10:13	13,44	
1.	6	Easi-joist®	Keskikohta	337	HD	10:16	11,60	11,61
2.	6	Easi-joist®	Keskikohta	339	HD	10:17	11,70	
3.	6	Easi-joist®	Keskikohta	341	HD	10:18	11,39	
4.	6	Easi-joist®	Keskikohta	343	HD	10:18	11,76	

TK-välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 9,82 Hz ja 9,16 Hz. LVL 48 P -välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 13,13 Hz ja 13,53 Hz. Easi-joist®-välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 14,81 Hz ja 11,61 Hz. TK- ja LVL 48 P -välipohjien arvot olivat keskenään samankaltaisia. Easi-joist®-välipohjien tuloksissa oli hajontaa.

Taipuma

Betonivalun jälkeiset taipuman mittaustulokset ovat taulukossa 16.

Taulukko 16. Betonivalun jälkeiset taipuman mittaustulokset (mukaillen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025)

Mittaus	Lattia nro	Kerros	Klo	[mm]	Keskiarvo
1.	1	TK	12:01	0,288	0,29
2.	1	TK	12:02	0,296	
3.	1	TK	12:03	0,296	
1.	2	LVL 48 P	12:05	0,224	0,23
2.	2	LVL 48 P	12:06	0,232	
3.	2	LVL 48 P	12:07	0,236	
1.	3	Easi-joist®	12:09	0,239	0,24
2.	3	Easi-joist®	12:10	0,244	
3.	3	Easi-joist®	12:11	0,245	
1.	4	TK	12:18	0,273	0,28
2.	4	TK	12:20	0,285	
3.	4	TK	12:21	0,288	
1.	5	LVL 48 P	12:23	0,204	0,21
2.	5	LVL 48 P	12:24	0,212	
3.	5	LVL 48 P	12:25	0,214	
1.	6	Easi-joist®	12:27	0,379	0,39
2.	6	Easi-joist®	12:29	0,39	
3.	6	Easi-joist®	12:30	0,394	

TK-välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 0,29 mm ja 0,28 mm. LVL 48 P -välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 0,23 mm ja 0,21 mm. Easi-joist®-välipohjien mittaustulokset olivat keskiarvoltaan 0,24 mm ja 0,39 mm. TK- ja LVL 48 P -välipohjien arvot olivat keskenään samankaltaisia. Easi-joist®-välipohjien tuloksissa oli hajontaa, koska toisessa välipohjassa palkit ovat harvemmassa.

8 ANALYSOINTI

Mittaustuloksien analysointia, johtopäätöksiä ja välipohjaratkaisujen ominaisuusvertailua tuodaan esille luvussa 8. Ominaistaajuusmittaukset aloitettiin käyttämällä herätteenä puista vasaraa. Tätä herätettä käytettiin runkovaiheessa, kun palkit olivat yksittäin kiinni seinärakenteissa. Seuraavassa vaiheessa vasaran heräte ei enää toiminut, koska mittaustulokset poikkesivat paljon edellisistä mittauksista, jolloin heräte oli liian pieni. Menetelmää vaihdettiin ja käytettiin heel-drop-menetelmää, joka antoi luotettavampia mittaustuloksia. Impulssi voi olla vasara, kantapäillä tai vapaalla pudotuksella aiheutettu heräte (SFS-EN 16929: 2018, 9). Kaikki loput ominaistaajuusmittaukset tehtiin samalla menetelmällä.

Laboratorion vieressä oli mittausten hetkellä rakennustyömaa käynnissä, mikä voi vaikuttaa ominaistaajuuden mittaustuloksiin, koska rakennustyömaan koneet voivat aiheuttaa värähtelyä. Standardin mukaan mittaushetkellä ei saisi olla häiriötekijöitä (SFS-EN 16929: 2018, 10). Ominaistaajuusmittauksissa oli joitakin mittaustuloksia, jotka poikkesivat muista mittaustuloksista. Nämä mittaukset olivat virheellisiä ja ne huomattiin heti, koska tulokset näkyivät reaaliajassa tietokoneella. Mittauksia tehtiin, kunnes saatiin luotettavia tuloksia. Opinnäytetyöstä on jätetty pois virheelliset mittaustulokset, koska niitä oli vähän.

Standardista poiketen ominaistaajuusmittauksissa käytettiin uutta värähtelymittaria, joka on erilainen kuin standardissa vaaditaan. Taipumamittauksissa pistekuorma oli 5 kg suurempi kuin vaadittu pistekuorma. Mittaustuloksia ei ole suhteutettu oikealle pistekuormalle eli 1 kN kuormalle. Virheiden välttämiseksi jokaisesta mittausvaiheesta tehtiin vähintään kolme mittausta, joten voidaan todentaa, että mittaustulokset ovat luotettavia. Jälkikäteen mittauksia on vaikea tehdä, koska välipohjia rakennettiin koko ajan eteenpäin. Taipumamittauksissa käytettiin samaa painoa ja samoja mittakelloja. Ominaistaajuusmittauksissa käytettiin kahta eri herätemenetelmää, mutta samaa mittalaitetta.

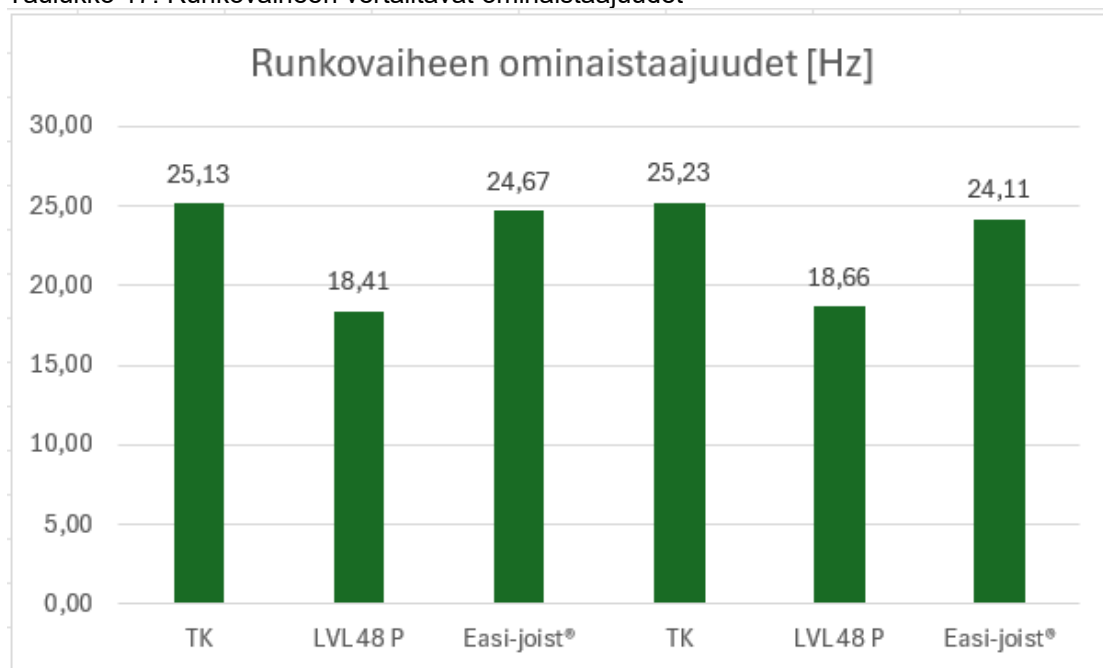
8.1 Johtopäätökset

Jos välipohjalla on suuri ominaistaajuus, se kertoo sen rakenteellisen jäykkyyden ja massan suhteesta. Suuri ominaistaajuus viittaa kevyeen rakenteeseen, koska suuri massa alentaa ominaistaajuutta. Rakenteen jäykkyys vaikuttaa ominaistaajuuden suuruuteen. (Puuinfo Oy 2020.)

Runkovaihe

Suoritettujen ominaistaajuuden mittaukset onnistuivat, koska mittaustulokset olivat linjassa vertailupalkkien kanssa eikä poikkeamia ollut. Taulukossa 17 on runkovaiheen mittaussosuiden tulokset ja niistä voidaan päätellä, että TK-palkilla on suurin ominaistaajuus. Ominaistaajuuteen vaikuttaa rakenteen jäykkyys, paino ja jänneväli, jolloin TK-palkin ominaistaajuus viittaa siihen, että rakenne on kevyempi ja se vastustaa värähtelyä tehokkaammin, jolloin se on rakenteeltaan jäykkä. (Puuinfo Oy 2020.)

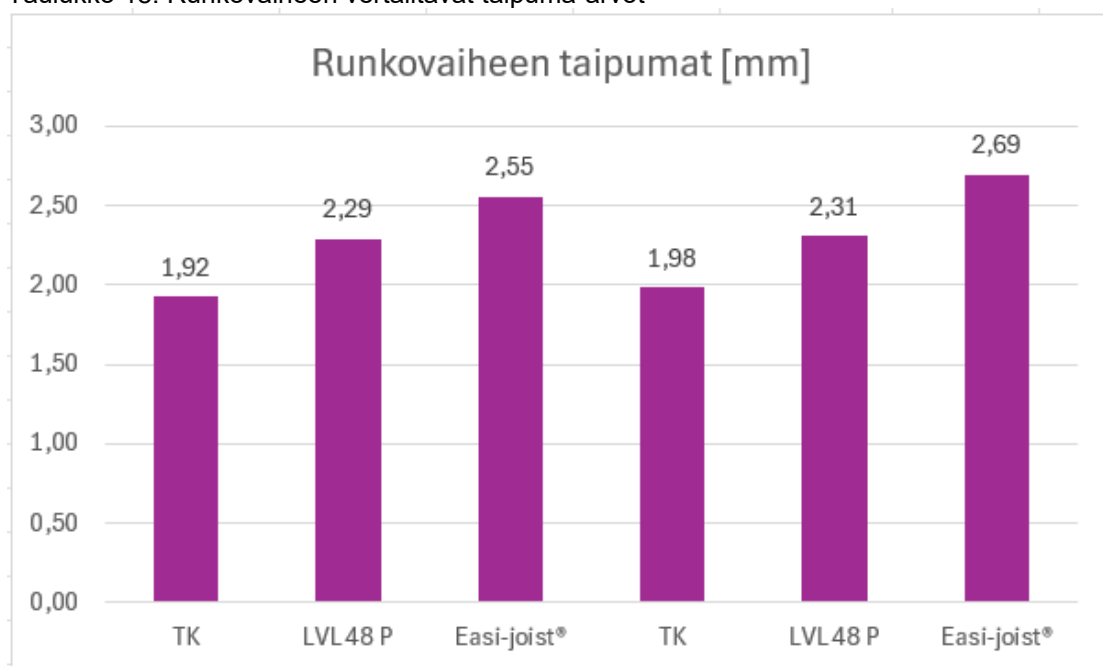
Taulukko 17. Runkovaiheen vertailtavat ominaistaajuudet



Seuraavaksi korkein ominaistaajuus on easi-joist®-palkilla, joka on rakenteeltaan samantyylinen eli ristikkomallinen. Molempien palkkien ominaistaajuudet ovat lähes samat. Alhaisin ominaistaajuus on LVL 48 P -palkilla, mikä viittaa siihen, että se on painavampi kuin ristikkomalliset kannattajapalkit, koska siinä ei ole aukkoja. Suuri massa laskee ominaistaajuutta (Puuinfo Oy 2020).

Suoritettujen taipumamittaukset onnistuivat, koska vertailtavissa palkeissa mitaustulokset ovat keskenään samanlaisia eikä poikkeamia ollut. Taulukossa 18 esitetään runkovaiheen taipumamittaukset ja easi-joist®-palkilla oli suurin taipuma ja TK-palkilla oli pienin taipuma. Tämä tarkoittaa sitä, että TK-palkit kestävät enemmän kuormitusta ja easi-joist®-palkit kestävät vähiten kuormitusta. Vertailupalkeissa mitaustulokset olivat samankaltaiset. Mittauksissa mitattiin yhtä palkkia ja se oli keskimäinen palkki.

Taulukko 18. Runkovaiheen vertailtavat taipuma-arvot



Vertailupalkkien taipumien keskiarvoista laskettuna easi-joist®-palkkien taipuma oli 0,67 mm suurempi kuin TK-palkkien. LVL 48 P -palkin taipuma oli keskiarvoilla laskettuna 0,34 mm suurempi kuin TK-palkkien. Tässä vaiheessa nähdään, että miten palkit eroavat toisistaan. Palkkien taipumilla on 0,7 mm eroja keskenään.

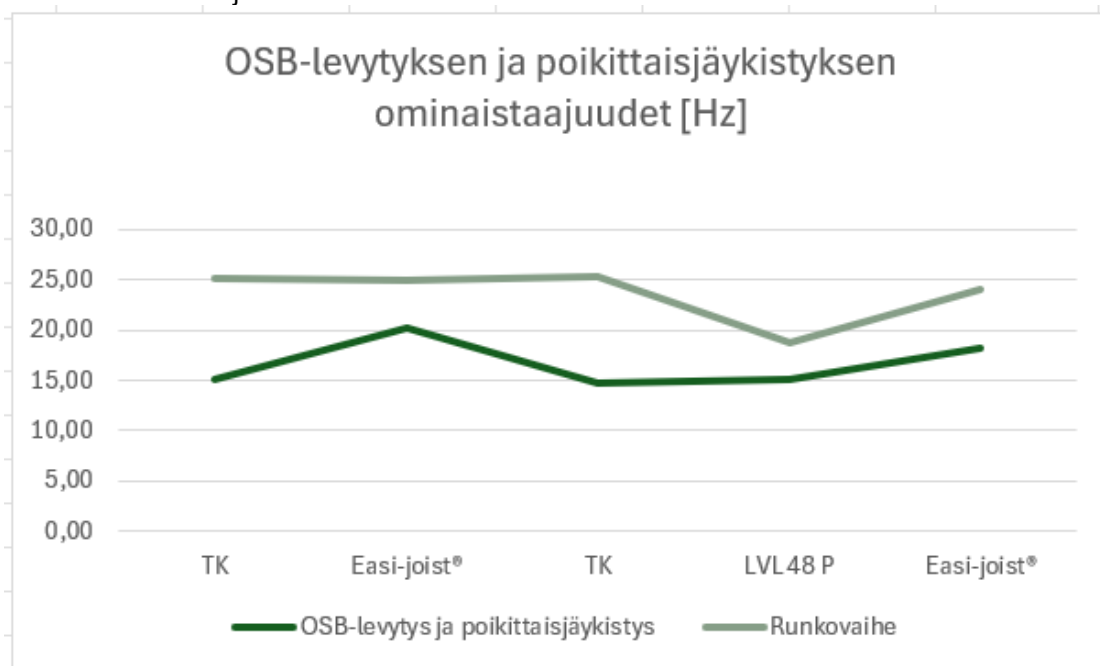
OSB-levytytys ja poikittaisjäykistys

Runkovaiheessa mittaukset tehtiin palkeille, jotka olivat kiinnitetty seinärakenteisiin. Levytyksen myötä rakenteet muuttuivat välipohjarakenteiksi. Mittaustuloksista pystytään päättelemään, että OSB-levytyksellä on jäykistävä vaikutus välipohjiin, koska niiden ominaistajuusarvot ja taipuma-arvot pienentyivät huomattavasti alkuperäisistä mitaustuloksista. Ominaisajuuden vertailtavat arvot levytyksen ja poikittaisjäykistysen jälkeen ovat taulukossa 19.

Levytyksen ja poikittaisjäykistyksen jälkeen TK-välipohjien ominaistajuuden arvot pienentyivät keskiarvoisesti 10,27 Hz, mikä on suuri muutos. Toisen LVL 48 P -välipohjan ominaistajuutta ei ole mitattu levytyksen ja poikittaisjäykistyksen jälkeen, koska siinä ei ole poikittaisjäykistystä. Mitatun LVL 48 P -välipohjan ominaistajuus pienentyi keskiarvoisesti 3,4 Hz alkuperäisestä arvosta. Tämä arvo on pienempi kuin muilla, koska palkki itsessään on painavampi kuin muut ristikkorakenteiset palkit.

Easi-joist®-välipohjien ominaistajuuden arvot pienentyivät keskiarvoisesti 5,23 Hz. Easi-joist®-välipohjien ominaistajuuden arvot poikkesivat toisistaan eniten, 2,07 Hz. Tässä mittausvaiheessa toisella easi-joist®-välipohjalla oli suurin ominaistajuus ja TK-palkilla oli pienin ominaistajuus. Easi-joist®-välipohjan suuri ominaistajuus viittaa siihen, että sen rakenne ei ole yhtä jäykkä kuin muilla välipohjilla.

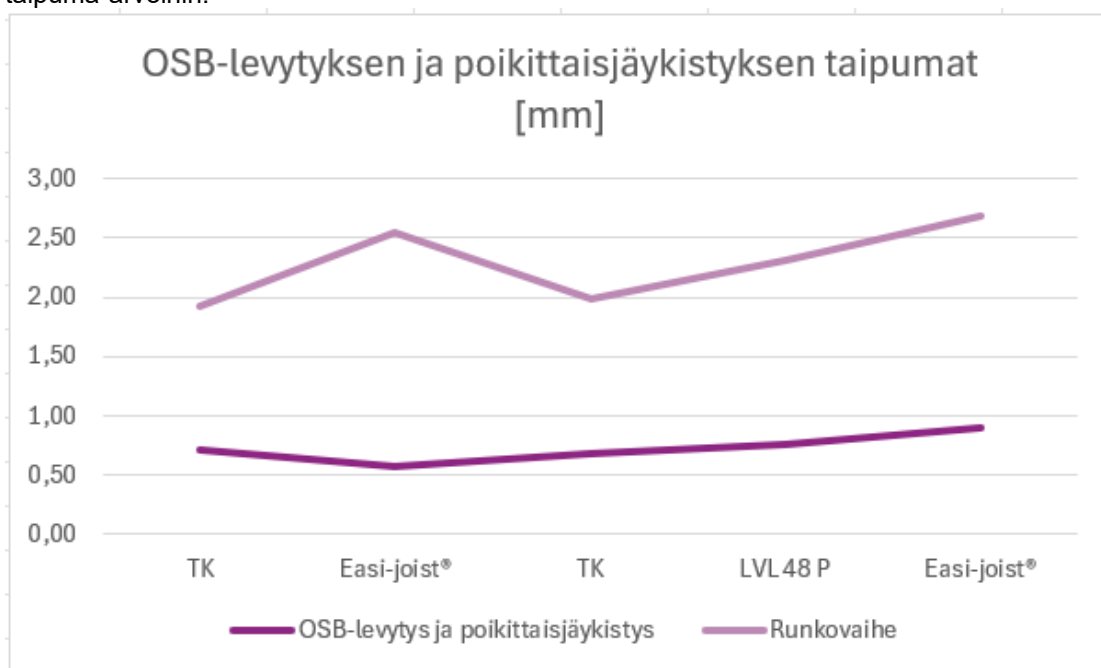
Taulukko 19. OSB-levytyksen ja poikittaisjäykistyksen ominaistajuusarvoja verrataan runkoihin ominaistajuusarvoihin.



Vertailtavat taipuma-arvot ovat taulukossa 20. Levytyksen ja poikittaisjäykistyksen jälkeen TK-välipohjien taipuma-arvot pienentyivät keskiarvoisesti 1,25 mm. Toisen LVL 48 P -välipohjan taipumaa ei ole mitattu levytyksen ja poikittaisjäykistyksen jälkeen, mutta mitatun LVL 48 P -välipohjan taipuma-arvo pienentyi keskiarvoisesti 1,54 mm alkuperäisestä arvosta. Taipuman muutos oli suurempi kuin TK-palkilla.

Easi-joist®-välipohjien taipuma-arvot pienentyivät keskiarvoisesti 1,89 mm. Easi-joist®-välipohjien taipuma-arvot poikkesivat toisistaan. Taipuma-arvojen erotus oli 0,33 mm. Näissä mittaustuloksissa on poikkeamaa, mikä viittaa siihen, että toisessa välipohjassa palkkeja on viisi kappaletta ja toisessa on kolme kappaletta. Päätelmänä saadaan, että mitä enemmän palkkeja on, sitä pienempi taipuma on. Kun verrataan mittaustuloksia kolmella palkilla, nähdään, että easi-joist®-välipohjan mittaustulos oli huonoin. Se viittaa siihen, että palkin teräsosat viruvat ja antavat periksi.

Taulukko 20. OSB-levytyksen ja poikittaisjäykistyksen taipuma-arvoja verrataan runkovaiheen taipuma-arvoihin.

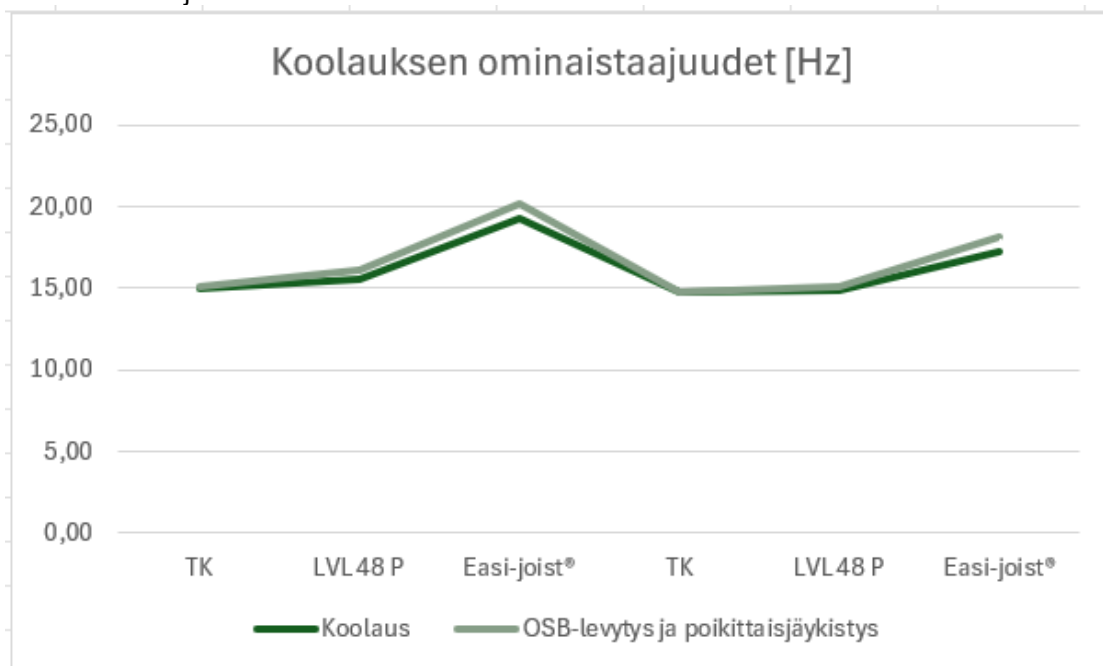


Tässä mittausvaiheessa easi-joist®-välipohjilla taipuman osalta oli suurin sekä pienin taipuma-arvo, joten näissä välipohjissa palkkien määrällä on vaikutusta.

Alapuolinen koolaus

Palkkien alapuolelle laitettiin koolaus, jonka jälkeen tehtiin uudet ominaistajuusmittaukset ja ne esitetään taulukossa 21.

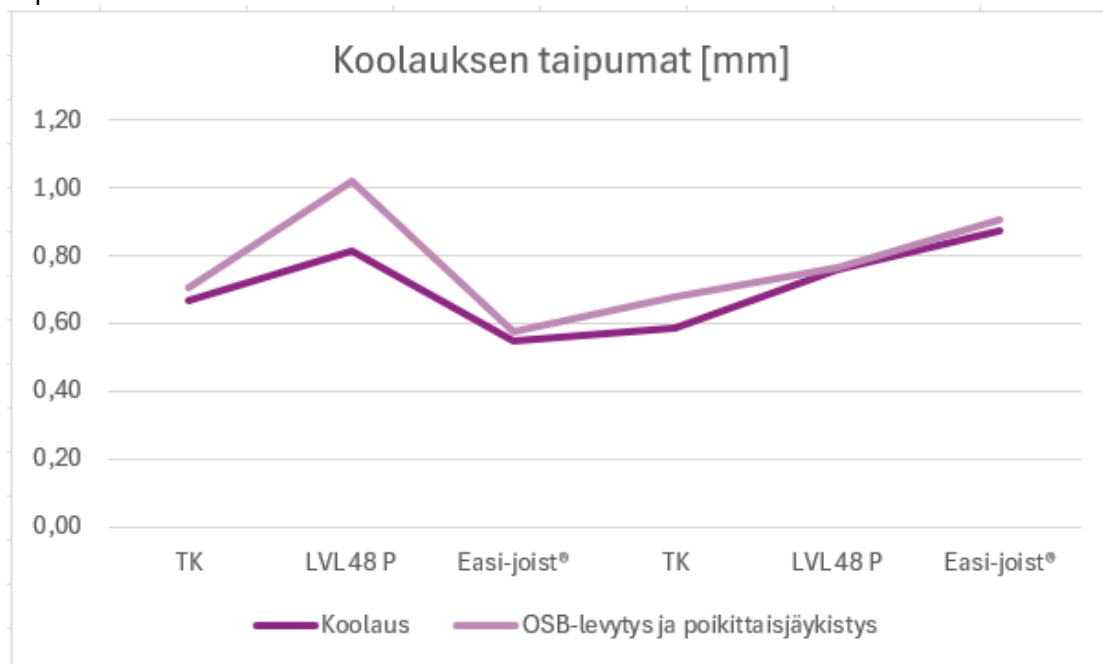
Taulukko 21. Koolauksen ominaistajuuksia verrataan OSB-levytyksen ja poikittaisjäykistykseen ominaistajuuksiin.



Ominaistajuuden mittaustuloksista huomataan taulukosta 21, että arvoihin ei tullut juurikaan muutosta alapuolisen koolauksen jälkeen. TK-välipohjan ja LVL 48 P -välipohjan muutokset olivat pieniä. Easi-joist®-välipohjan arvo laski keskiarvoisesti 0,94 Hz. Mittaustuloksista huomataan, että Easi-joist®-välipohjien ominaistajuuden mittaustulokset olivat suuremmat kuin muiden. Tämä viittaa siihen, että koolaus toi jäykistystä näihin välipohjiin.

Taipumamittaustulokset ovat taulukossa 22. Koolauksen jälkeen TK-palkkien taipuma pienentyi keskiarvoisesti 0,07 mm. Easi-joist®-välipohjien taipuma pienentyi keskiarvoisesti 0,03 mm. Poikittaisjäykistetyyn LVL 48 P -välipohjan taipuma pysyi ennallaan. Ensimmäisen LVL 48 P -välipohjan taipuma muuttui eniten, koska siinä ei ole poikittaisjäykistystä, joten koolaus toimi poikittaisjäykistykseenä ja siten se toi rakenteeseen jäykistystä. Tämän välipohjan taipuma pienentyi 0,21 mm.

Taulukko 22. Koolauksen taipuma-arvoja verrataan OSB-levytyksen ja poikittaisjäykistysten taipuma-arvoihin.



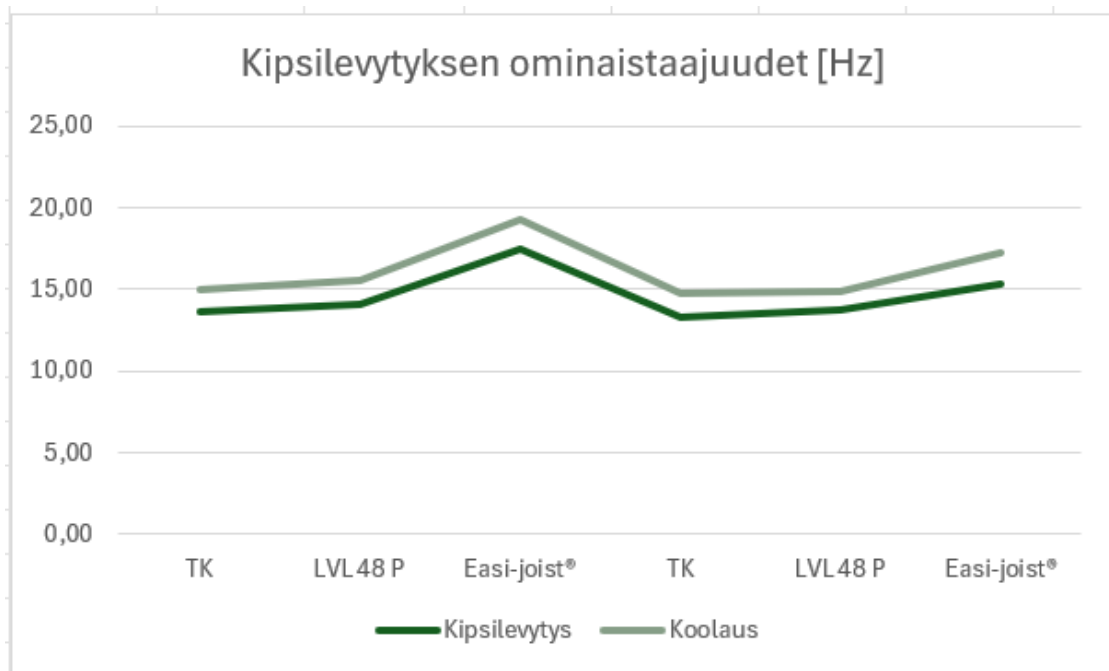
Odotettavaa oli, että taipuma ei suurenisi, koska koolaus lisää rakenteen jäykkyyttä. Tuloksista huomataan, että taipuma pienentyi koolauksen myötä. Taipumamuutokset olivat osittain pieniä edellisiin muutoksiin verrattuna. Suurin muutos taipuman arvoon tuli LVL 48 P -välipohjalle, jossa ei ole poikittaisjäykistettyä. Toiseksi suurin ero taipuman arvojen välillä oli easi-joist®-välipohjilla eli näissä välipohjissa palkkien määrällä on suuri merkitys. Puolet tiheimmällä palkkijaolla easi-joist®-välipohjan taipuma oli pienin. Kun verrataan välipohjia, joilla on sama palkkimäärä eli kolme palkkia, easi-joist®-välipohja taipui eniten ja TK-välipohja vähiten.

Alapuolisen koolauksen mittaustulosten muutokset olivat pieniä. Koolaus yhdisti palkit niiden alapuolelta, jolloin rakenne yhtenäistyi. Koolaus auttoi pitämään palkit suorassa. Mittaustulosten perusteella koolauksella on merkitystä, jos rakenteessa ei ole jo poikittaisjäykistystä. Jännevälän suuruudella on vaikutusta koolauksen merkitykseen.

Kipsilevytytys

Kipsilevytyksen jälkeiset ominaistajuusarvot ovat taulukossa 23. Taulukosta huomataan, että käyrät ovat muodoltaan samanlaisia, joten jokaisen välipohjan ominaistajuuden arvo on pienentynyt suhteessa saman verran. Kipsilevytyksellä on jäykistävä vaikutus ja se vaikutti kaikkiin välipohjiin samalla tavalla.

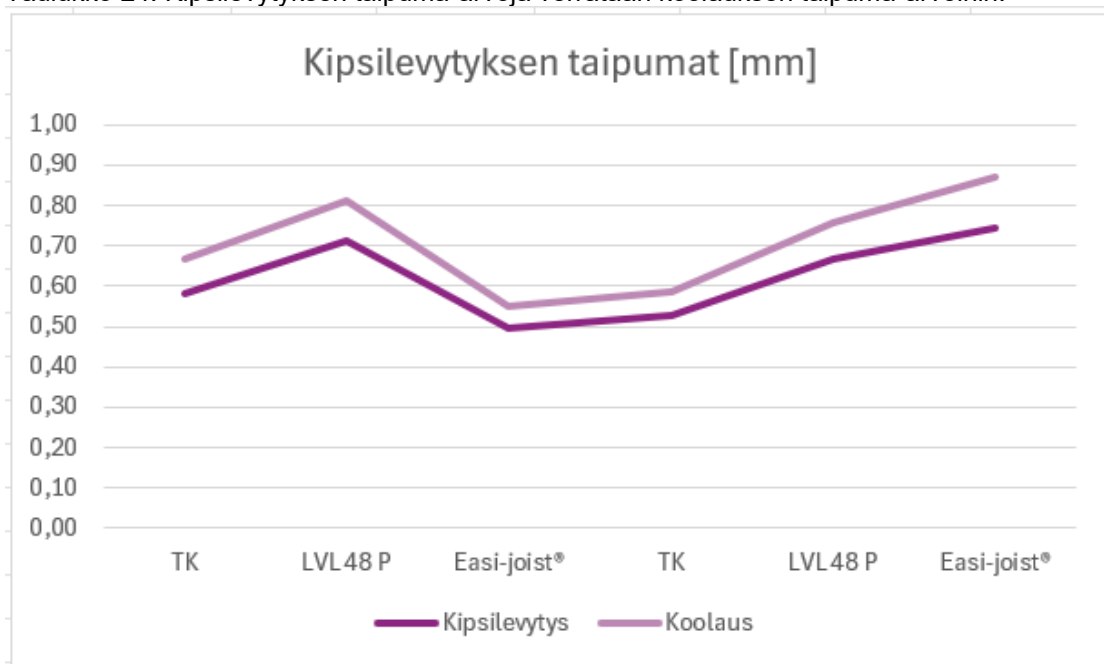
Taulukko 23. Kipsilevytyksen ominaistajuusarvoja verrataan koolauksen ominaistajuusarvoihin.



Jokaisen välipohjan ominaistajuus pienentyi keskimääräisesti 1,5 Hz. Kipsilevytyksen jälkeiset taipuma-arvot ovat taulukossa 24. Taulukosta huomataan, että käyrät ovat muodoltaan samanlaisia, joten jokaisen välipohjan taipuman arvo pienentyi suhteessa saman verran. Kipsilevytytys lisäsi jäykistystä, joten taipuma pienentyi jokaisessa välipohjassa.

Kipsilevytyksen jälkeiset ominaistajuusarvot sekä taipuma-arvot muuttuivat samalla tavalla. Easi-joist®-välipohjien mittaustuloksilla oli suurin hajonta keskenään. Välipohjassa, jossa on viisi palkkia, taipuman arvo oli pienin. Välipohjassa, jossa oli kolme palkkia, taipuman arvo oli suurin. Molemmilla TK-palkeilla oli keskenään samankaltaiset taipuma-arvot. Samoin LVL 48 P -välipohjien mittaustulokset olivat samankaltaiset.

Taulukko 24. Kipsilevytyksen taipuma-arvoja verrataan koolauksen taipuma-arvoihin.



Ennen betonivalua TK-välipohjien mittaustulokset olivat lähellä tavoitetta, että taipuma olisi alle 0,5 mm. Viiden palkin easi-joist®-välipohja täytti vaatimuksen 0,49 mm arvolla. LVL 48 P -välipohjat olivat tavoitteesta noin 0,2 mm päässä.

Betonivalu

Puurakenteisten välipohjien päällimmäinen kerros on betonia. Betoni valettiin suoraan OSB-levyn päälle. Jotta välipohjille voi tehdä lopulliset mittaukset, betonin tulee kuivua 28 vuorokautta, jotta se saavuttaa vaaditun lujuuden. Betonin kuivumista seurattiin mittaamalla taipuman muutosta päivittäin. Välipohjarakenteen alapuolella oli mittari mittaamassa taipumaa. Kuvassa 36 esitetään taipuman mittaustilanne. Mittari oli paikallaan koko ajan ja mittatulokset tarkistettiin joka päivä.

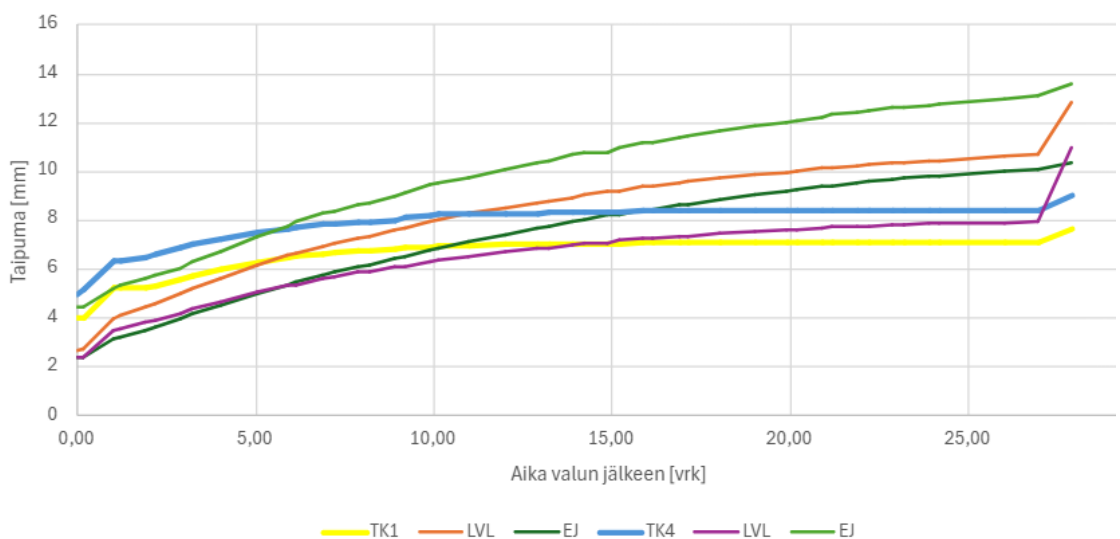


Kuva 36. Betonivalun kuivumisen aikainen taipuman mittaaminen

Liitteessä 2 on betonivalun kuivumisen aikaiset taipuman mittaustulokset. Mittaustuloksista voidaan päätellä, että heti betonivalun jälkeen suurimmat taipumat olivat TK-välipohjilla ja kolmepalkkisella easi-joist®-välipohjalla. Taipumarvot olivat keskimääräisesti välillä 4–5 mm. LVL 48 P -välipohjilla oli pienimmät taipumat, keskimäärin 2,5 mm. Taulukosta 25 nähdään, miten taipumat muuttuivat betonin kuivuessa. Loppuvaiheessa irrotettiin reunatuet, jolloin taipuma lisääntyi. Suurin taipuman muutos oli LVL-välipohjilla.

Taulukko 25. Betonivalun aiheuttama taipuma (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025)

Betonivalun aiheuttama taipuma lattian keskikohdalta mitattuna



Kuivumisen edetessä betonin reunat kuivuivat ensimmäisenä, jolloin betonin paino siirtyi välipohjan keskelle, mikä vaikutti taipuman kasvamiseen. Kun betoni jatkoi kuivumista, paino jakaantui tasaisemmin, jolloin taipumat alkoivat

tasaantua. TK-välipohjien taipuman tasaantuminen alkoi ensimmäisenä ja seuraavana oli LVL 48 P -välipohjat. Easi-joist®-välipohjien taipuma suureni pisimmän aikaa. Loppuvaiheessa taipumalukuja tarkasteltaessa TK-välipohjilla oli pienimmät taipumat.

Ennen lopullisia taipuman ja ominaistajuuden mittauksia välipohjista otettiin reunatuet pois, mitkä olivat betonivalua varten. Kun reunatuet otettiin pois 28 vuorokauden kuluttua, huomattiin, että betoni on edelleen irti päistä. Betonissa lujuus on kohdillaan, mutta betoni tulee laskeutumaan. Kuvasta 37 nähdään, miten betoni on irti reunoista. TK-välipohjissa betonin reunat ovat eniten irti päistä.

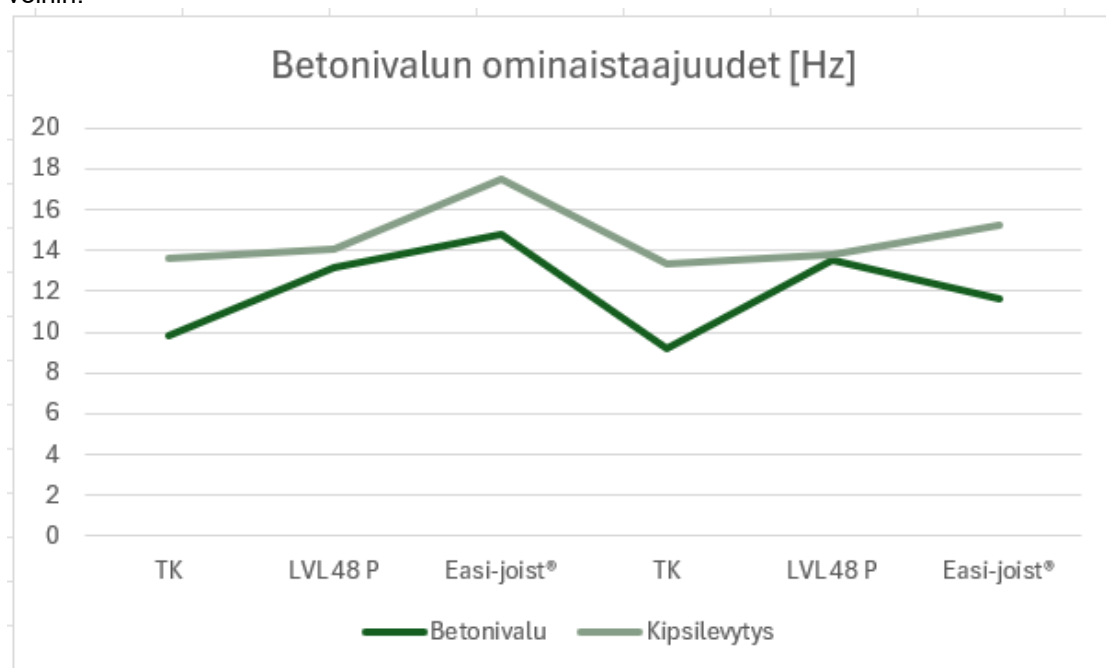


Kuva 37. Betonin kuivuminen (kuva: Juha-Pekka Luukkainen 2025)

Betoni on painavaa, joten se laskee välipohjien ominaistajuutta. Jäykkä kansirakenne jakaa hetkellistä taipumaa useammalle palkille. (Puuinfo Oy 2020.) Välipohjissa betonivalun paksuus on 40–50 mm riippuen välipohjaratkaisusta. Tämä betonin paksuus on matala, mutta se tuo massaa välipohjaan ja parantaa askelääneneristystä. Jos jäykkyyttä ja akustisia ominaisuuksia halutaan parantaa, silloin betonivalun tulisi olla paksumpi. (Puuinfo Oy 2021). Puurakenteisissa välipohjissa puiset palkit toimivat kantavana rakenteena, joten betonikerros ei ole kantava rakenne. Betonivalulla saadaan kestävä pintarakenne välipohjaan.

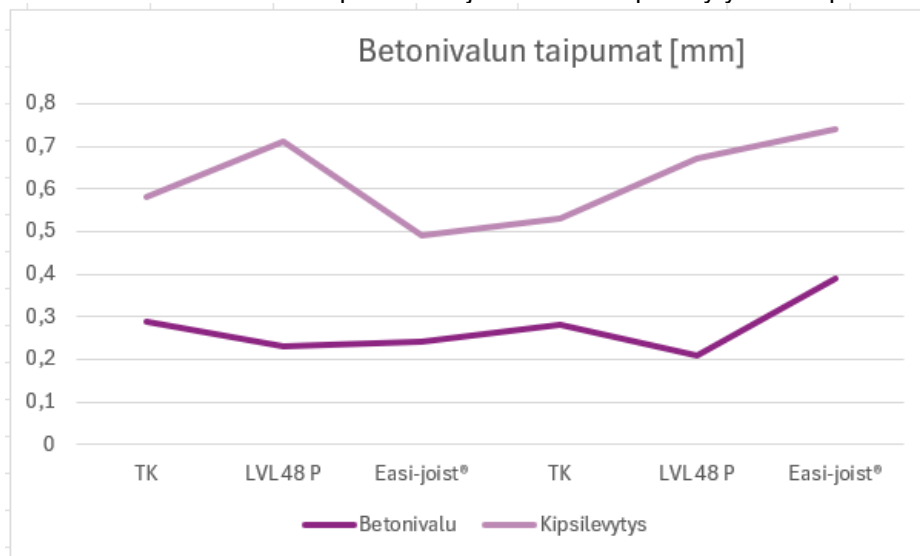
Kun betoni kuivui vaaditun ajan, aloitettiin viimeiset laboratoriomittaukset. Ominaistaajuusmittausten muutokset betonivalun ja kipsilevytyksen välillä ovat taulukossa 26, josta nähdään, että pienimmät muutokset olivat LVL 48 P -välipohjilla. Ominaistaajuuden arvot pienentyivät 0,91 Hz ja 0,24 Hz. Easi-joist®-välipohjilla ominaistaajuuden arvot pienentyivät 2,67 Hz ja 3,67 Hz. TK-välipohjien ominaistaajuuden arvot laskivat 3,81 Hz ja 4,17 Hz. TK-välipohjien muutokset olivat suurimmat. Kaikkien välipohjien ominaistaajuuden arvot olivat yli 9 Hz, jolloin ne ovat korkeataajuuslattialuokituksessa.

Taulukko 26. Betonivalun ominaistaajuusarvoja verrataan kipsilevytyksen ominaistaajuusarvoihin.



Taipumamittausten muutokset betonivalun ja kipsilevytyksen välillä ovat taulukossa 27. Taulukosta nähdään, että betonivalulla oli suuri vaikutus taipuman pienentymiseen. Vaikka betoni on painavaa, se jäykistää välipohjan rakennetta, jolloin taipumat pienenevät.

Taulukko 27. Betonivalun taipuma-arvoja verrataan kipsilevytyksen taipuma-arvoihin.



Suurin muutos taipumassa oli LVL 48 P -välipohjilla, joka oli keskiarvoisesti 0,47 mm. Ennen betonivalua näillä välipohjilla oli muihin nähden suuremmat taipumat. Betonivalun jälkeen taipumat olivat kaikista mittaustuloksista pienimmät. TK-välipohjilla taipuma pienentyi keskiarvoisesti 0,27 mm. Easi-joist®-välipohjilla oli taipuman pienentymisessä hajontaa. Viisipalkkisen välipohjan taipuma pienentyi 0,25 mm ja kolmepalkkisen välipohjan taipuma pienentyi 0,35 mm. Harvemmallalla palkkijaolla oleva easi-joist®-välipohjan rakenne jäykistyi enemmän betonivalun ansioista.

8.2 Ominaisuusvertailu

Ominaisuusvertailussa verrataan ominaistaajuutta ja taipumaa, joille molemmille laskettiin mitoitusarvot jokaisen välipohjan kohdalle. Mitoitusarvoja verrataan todellisiin mitattuihin mittaustuloksiin. Hankkeessa laskettiin valmiille välipohjarakenteille laskennalliset mitoitusarvot, joten vertailua tehdään välipohjien betonivalun jälkeisistä mittauksista. Betonivalu kuivui 28 vuorokautta, kunnes betoni oli kuivaa ja mittaustulokset luotettavia. Mitoitusarvot ja todelliset arvot ovat taulukossa 28, jotta niitä on helppo tulkita.

Opinnäytetyön yksi tutkimuskysymys on: "Mikä on laskennallisten ja todellisten mittausten eroavaisuus?". Tähän kysymykseen tulee vastaus seuraavissa kappaleissa, kun näitä arvoja käsitellään ja vertaillaan.

Taulukko 28. Laskennallisten ja todellisten mittaustulosten vertailu

Välipohja	Laskennallinen ominaistajuus [Hz]	Todellinen ominaistajuus [Hz]	Laskennallinen taipuma [mm]	Todellinen taipuma [mm]
1-TK	-	9,82	-	0,29
4-TK	-	9,16	-	0,28
2-LVL 48 P	7,2	13,13	0,4	0,23
5-LVL 48 P	7,2	13,53	0,4	0,21
3-Easi-joist®	9	14,81	0,3	0,24
6-Easi-joist®	-	11,61	-	0,39

Laskennallisten ominaistajuusmitoitusrvojen mukaan LVL 48 P -välipohja ei täytä vaadittua raja-arvoa 9 Hz, koska sen arvo on 7,2 Hz. Laskennan mukaan tämän välipohjan värähtelymitoitus on yli 131 %. Tämä mitoitus on tehty Finnwood-ohjelmalla (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu 2025). Laskennallisesti LVL 48 P -palkkia tulisi suurentaa, että värähtelymitoitus toteutuisi. Easi-joist®-välipohjalle valmistaja on antanut mitoitusrvot. Ominaisajuuden arvo on sama kuin raja-arvo eli 9 Hz. TK-välipohjille ja kolmepalkkiselle easi-joist®-välipohjalle ominaistajuuden mitoitusrvoa ei ole, joten käytetään vertailevana lukuna raja-arvoa 9 Hz.

Mitattujen ominaistajuusrvojen perusteella pienimmät arvot olivat TK-välipohjilla ja ne olivat 9,82 Hz ja 9,16 Hz. Koska TK-välipohjille ei ole ominaistajuuden mitoitusrvoa, verrataan tuloksia värähtelymitoituksen raja-arvoon 9 Hz ja nämä arvot ovat lähellä toisiaan. LVL 48 P -välipohjien todelliset ominaistajuudet olivat 13,13 Hz ja 13,53 Hz. Nämä ovat keskenään samankaltaiset, mutta poikkeavat laskennallisista arvoista paljon. Ero näille on keskimääräisesti 6 Hz. Tämä tarkoittaa sitä, että LVL 48 P -välipohja on mitoitettu yläkanttiin ominaistajuuden osalta. Easi-joist®-välipohjien todelliset ominaistajuusrvot olivat 14,81 Hz ja 11,61 Hz. Nämä eroavat toisistaan 3,2 Hz. Tulokset eroavat myös laskennallisista arvoista, eroa on välillä 5,81–2,61 Hz. Kaikkien välipohjien todelliset mittaustulokset olivat suuremmat kuin mitoitusrvot, joten välipohjissa on optimointivaraa.

Mitoitusraja taipumalle on 0,5 mm. TK-välipohjille ja viisipalkkiselle easi-joist®-välipohjalle ei ole määritelty laskennallista taipuma-arvoa, joten todellisia ja laskennallisia arvoja ei voi vertailla keskenään. Välipohjat, joille määriteltiin laskennallinen arvo taipumalle, todellinen taipuman arvo on alle vaaditun arvon 0,5 mm. Suurin laskennallinen taipuma on LVL 48 P -välipohjalla, jonka taipuman arvo on 0,4 mm. Pienin laskennallinen arvo on easi-joist®-välipohja, jonka laskennallinen taipuma on 0,3 mm. Mitattujen tulosten perusteella LVL 48 P -välipohjilla oli pienimmät taipuman arvot 0,21 mm ja 0,23 mm. Seuraavana oli viisipalkkinen easi-joist®-välipohja arvollaan 0,24 mm. TK-välipohjien taipuma-arvot olivat 0,28 mm ja 0,29 mm. Suurin taipuma on kolmepalkkisessa easi-joist®-välipohjassa ja arvo oli 0,39 mm.

Laskennallisesti LVL 48 P -välipohjan taipuma oli suurin, mutta mittaustuloksissa tämän välipohjan taipuma oli pienin. Tämän välipohjan laskennassa on ylimitoitusta, koska todellinen taipuma on pienempi kuin laskennallinen taipuma. Eroa näillä mittaustuloksilla on 0,17–0,15 mm. Easi-joist®-välipohjien todellisissa mittaustuloksissa oli hajontaa, koska palkkien määrä on eri. Viisipalkkisen välipohjan todellinen taipuman suuruus oli 0,06 mm pienempi kuin laskennallinen taipuman arvo. Todelliset mittaustulokset osoittivat, että palkki-jaolla on merkitystä.

Puurakenteisilla välipohjilla on pääsääntöisesti suurempi ominaistaajuus kuin betonisilla välipohjilla, koska ne ovat kevyempiä. Betonivalu tuo lisäpainoa välipohjarakenteeseen, joten se madaltaa välipohjan ominaistaajuutta. (Puuinfo 2020.) Kaikki välipohjaratkaisut täyttävät värähtelymitoituksen vaatimukset todellisten mittausten perusteella ja arvoissa on pelivaraa raja-arvoon nähden, joten näitä välipohjaratkaisuja ei ole optimoitu loppuun asti. Koska välipohjien jännevälien pituuksilla on eroavaisuutta, tulee taipumat suhteuttaa metriä kohden. Tällä tavalla voidaan tarkastella taipumien todellisia eroavaisuuksia. Optimoimista käsitellään luvussa 9.

Kun vertailuvälipohjia verrataan keskenään, TK-palkin vertailutuloksissa ei ole suuria eroja. Pienempi taipuma tulee, kun kiinnitykset tehdään toisella ratkaisulla, eli palkin molemmat päät kiinnitetään yläpaarteesta. LVL 48 P -välipohjien vertailussa poikittaisjäykistyksellä saadaan pidempi jänneväli ja alhaisempi ominaistaajuus. Kustannus hieman nousee, mutta se ei ole merkittävä.

Easi-joist®-välipohjan tiheämmällä palkkijaolla saadaan pidempi jänneväli, mutta tällöin kustannukset nousevat.

TK-välipohjissa palkkijako on 600 mm välein. LVL 48 P -välipohjissa palkkijako on 450 mm välein. Easi-joist®-välipohjissa palkkijako on 300 mm ja 600 mm välein. Mittaustulosten perusteella palkkijaolla ja palkkilaadulla on merkitystä. Easi-joist®-välipohjan vertailukappaleissa oli selkeä ero palkkien määrällä. Mitä enemmän palkkeja on, sitä vähäisempi taipuma välipohjarakenteessa on. Kun palkkeja on enemmän, kustannukset nousevat, mutta taipuma pienentyy. Taipuman tuloksissa LVL 48 P -välipohjan taipuma on pienempi kuin TK-välipohjien. Tiheämpi palkkijako vaikuttaa tuloksiin.

Lisähuomiona tulee tarkastella palkin korkeutta. TK-palkin korkeus on 400 mm, LVL 48 P -palkin korkeus on 300 mm ja easi-joist®-palkin korkeus on 306 mm. TK-palkki on korkeampi kuin muut palkit, mikä lisää TK-palkin jäykkyyttä ja vähentää taipuman suuruutta. Palkin korkeus vaikuttaa ominaistajuuden suuruuteen, koska jäykistys lisääntyy, jolloin resonointia ei tapahdu yhtä helposti. (Puuinfo Oy 2020.) Palkin korkeus vaikuttaa suoraan välipohjan korkeuteen. Riippuu siitä, missä välipohja sijaitsee, että onko kannattavaa olla korkeampi kannattajapalkki. Jos palkki on ristikkorakenteinen ja ei tarvitse tehdä alaslaskuja, silloin palkki voi olla korkeampi.

Puurakenteisten välipohjien värähtelymitoitus on usein ylimitoitettua Suomessa, jolloin välipohjarakenne on tarpeettoman kestävä. (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu s.a.) Laskennallisten ja todellisten mittaustulosten perusteella voidaan todeta, onko välipohjarakenteissa ylimitoitusta. TK-välipohjien ominaistajuudelle ei ollut mitoitusarvoja, mutta todelliset ominaistajuusarvot olivat lähellä värähtelymitoituksen raja-arvoa. Ominaisajuuden osalta TK-välipohjat täyttävät korkeataajuuslattiauokituksen ja arvot eivät saa mennä alas päin, ettei välipohjista tule matalataajuuslattioita. TK-välipohjiin ei saa tulla massaa enempää, koska muuten ominaistajuusarvo laskee liian matalaksi. Taipuman arvoilla ei ollut suurta poikkeamaa. TK-välipohjien osalta kyseessä ei ole ylimitoitus.

LVL 48 P -välipohjan laskennallinen ominaistajuus on alle 9 Hz, mikä viittaa siihen, että välipohja ei täytä korkeataajuusluokitusta. Palkin mittoja tulisi

muuttaa, että palkin koko kasvaisi ja ominaistajuus kasvaisi yli 9 Hz. Todellisten mittausten myötä huomattiin, että ominaistajuus oli yli 9 Hz, keksimääräisesti 13,3 Hz. Todellinen mittaustulos osoittaa sen, että ominaistajuus on korkeampi kuin laskennallisesti. Ominaisajuuden osalta tässä välipohjassa on kyse ylityöstä. Välipohja on paljon parempi kuin laskennallinen tulos antaa olettaa. LVL 48 P -välipohjan taipumamittauksista nähdään sama asia, eli laskennalliset tulokset ovat huonommat kuin todelliset tulokset. LVL 48 P -palkissa on enemmän potentiaalia kuin mitä värähtelymityö tulokset kertovat. Palkin kyky pitäisi hyödyntää paremmin.

Easi-joist®-välipohjan viisipalkkiselle versiolle valmistaja antoi mityöarvot. Todelliset mityötulokset ominaisajuuden osalta ovat suuremmat kuin laskennalliset tulokset. Ominaisajuuden osalta mityö on ylityöstä. Taipumamityötulosten perusteella laskennallinen taipuma on suurempi kuin todellinen, joten taipuman osalta mityö on ylityöstä.

9 YHTEENVETO JA OPTIMOINTI

Luvussa 9 tehdään yhteenvetoa LCA-vertailusta, kustannusvertailusta, mityötuloksista ja ominaisuusvertailusta. Vertailujen pohjalta tehdään Excel-pohjaista optimointia ja ideoidaan perusteltuja optimointiehdotuksia, että saadaan parempia versioita välipohjaratkaisuista. Optimoinnissa keskitytään analysointiin ja otetaan huomioon materiaalitehokkuus.

LCA-vertailussa käsiteltiin välipohjaratkaisuja ottaen huomioon materiaalien elinkaaret. Puurakenteisten välipohjien lähtökohta on hyvä päästöjen suhteen, koska puulla on pienet ympäristövaikutukset. Toki välipohjassa on monta materiaalikerrosta, mikä vaikuttaa kokonaiskuvassa huomattavasti ympäristövaikutuksiin (Karelia ammattikorkeakoulu 2025). Tutkimuksen mukaan puun tuotantoketjun alkuvaiheen päästöt ovat 30 % pienemmät kuin betonilla, teräksellä ja tiilellä. Puulla on hyvä hiilensidontapotentiaali ja se on uusiutuva luonnonvara. (Amiri & Junnila 2025, 1.) PuuHyVä-hankkeessa käsiteltävät palkit on valmistettu Suomessa, joten puutavara tulee pohjoisen metsistä. Puurakenteisten välipohjien elinkaareen vaikuttaa paljon niiden suunnitteluikä (Amiri & Junnila 2025, 1).

Jokaisessa välipohjassa on käytetty kipsilevytystä, puukoolausta, OSB-levytystä ja betonivalua. Näiden osalta päästöt ovat samanlaiset, koska materiaalit ovat samat jokaisessa välipohjassa. Välipohjat eroavat toisistaan kannattajapalkeiltaan. Hiilijalanjäljen vertailussa TK-palkilla on pienin hiilijalanjälki. Seuraavaksi pienin hiilijalanjälki oli LVL 48 P -palkilla. Easi-joist®-palkilla on suurin hiilijalanjälki, koska palkki sisältää terästä. Näiden tuomiseen Suomeen kuuluu energiaa ja päästöjä kuljetusten osalta. Testattavien välipohjien elinkaari on lyhyt, koska puurakenteiset välipohjat rakennetaan laboratoriomittauksia varten ja puretaan sen jälkeen pois. Jotta tuotteiden elinkaari olisi mahdollisimman pitkä, materiaalit tulisi uudelleen käyttää tai kierrättää.

Kustannuslaskennassa puuvälipohjat ovat usein kallein yksittäinen rakennusosa kokonaisuutta tarkasteltaessa. Suomessa puurakenteisten välipohjien suunnittelu on ylimitoitettua, jolloin materiaalien kustannukset nousevat. (Karelia ammattikorkeakoulu 2025.) Kustannuslaskennassa on huomioitu materiaalikerrokset ja kiinnikkeet. Kustannuslaskennan tuloksena saatiin, että TK-palkki on halvin materiaalineliöltä ja LVL 48 P -palkki on kallein materiaalineliöltä.

Puurakenteisten välipohjien ominaisuuksien parantamisessa huomioidaan taipuma ja värähtely. Jos taipumaa on liikaa, välipohjan jäykkyyttä tulisi suurentaa sekä pintakerrokset tulisi olla kovempaa materiaalia. Jos välipohjassa haasteena on resonanssi, silloin vaimennusta tulee lisätä. Ominaistaajuuden ollessa liian matala, tulee jäykkyyttä lisätä välipohjarakenteeseen. (Lahtela 2018.)

Laboratoriomittauksissa tuloksena saatiin, että lähtötilanteessa palkkien ominaistaajuudet ja taipumat erosivat toisistaan. TK-palkilla oli suurin ominaistaajuus ja pienin taipuma. LVL 48 P -palkilla oli alhaisin ominaistaajuus ja taipuma oli kahden muun palkin väliltä. Easi-joist®-palkilla ominaistaajuus oli kahden muun palkin väliltä, mutta taipuma oli suurin. Taipuman osalta TK-palkki oli paras vaihtoehto. Runkovaiheessa jokaisella palkkityypillä oli vastaavat mittaustulokset vertailupalkkien kanssa, joten niitä pystyi vertailemaan keskenään.

OSB-levytyksen ja poikittaisjäykistyksen jälkeen rakenteet muuttuivat välipohjarakenteiksi ja koko rakenne vaikutti mittaustuloksiin kokonaisvaltaisesti. TK-välipohjalla oli keskimääräisesti pienin ominaistajuus, joten se muuttui eniten lähtötilanteesta, koska siinä TK-palkin ominaistajuus oli suurin. TK-välipohjan taipuma oli edelleen pienin, mikä kertoo sen hyvästä lujuudesta. LVL 48 P -välipohjan ominaistajuus sai keskimmäisen tuloksen ja easi-joist®-välipohja sai suurimman ominaistajuusarvon. Taipuman osalta easi-joist®-palkki sai suurimman ja pienimmän arvon. Koska levytyksen myötä rakenne muuttui välipohjarakenteeksi, silloin palkkien määrällä on merkitystä. Pienimmän arvon saanut easi-joist®-välipohja sisältää viisi palkkia, kun taas suurimman arvon saanut sisältää kolme palkkia. LVL 48 P -välipohjan taipuma-arvo oli muiden välipohjien keskeltä.

Alapuolisella koolauksella ominaistajuuden arvoihin tuli muutoksia vain easi-joist®-välipohjien osalta alenevasti ja nekin muutokset olivat pieniä. Taipuman osalta TK-välipohjien ja poikittaisjäykistämättömän LVL 48 P -välipohjan arvot laskivat ja muut arvot pysyivät lähes samoina. Kipsilevytyksen jälkeen jokaisen välipohjan ominaistajuuden ja taipuman arvot pienentyivät suhteessa saman verran. Tuloksista huomataan, että levytyksellä on vaikutusta mittaustuloksiin. Levytystä tehdessä tulee huomioida, että levyt on kiinnitetty hyvin, jolloin rakenne on tehty jäykäksi (kuva 38).

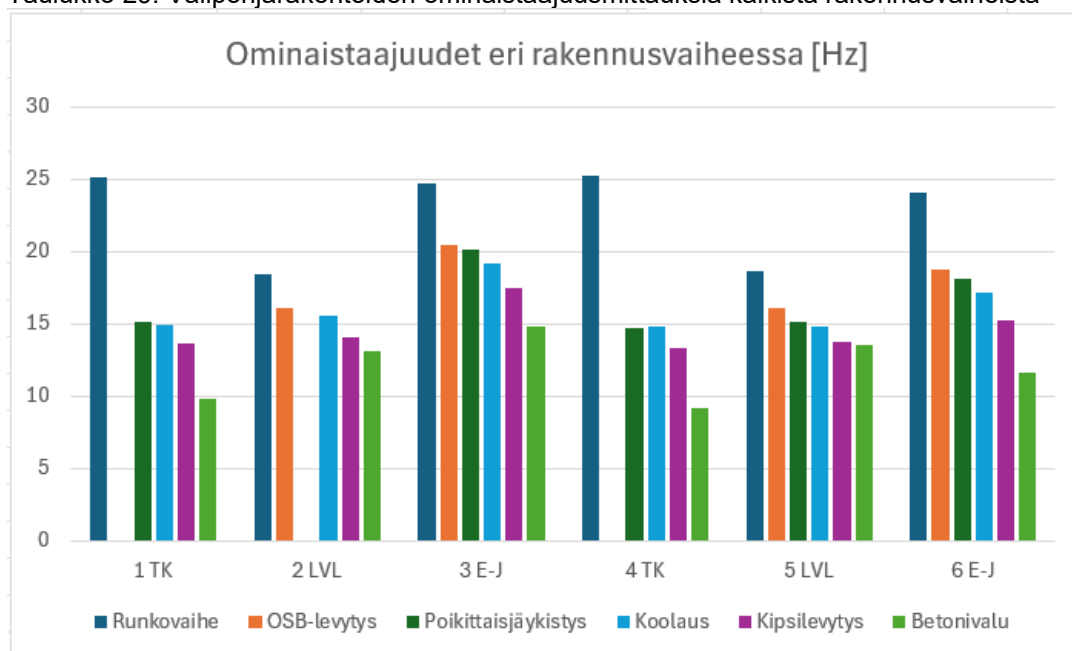


Kuva 38. Levytyksen huolellinen kiinnittäminen liimalla (kuva: Niko Kinnunen 2025)

Ennen betonivalua alin ominaistajuus kaikista arvoista oli 13,33 Hz, joten kaikki välipohjat olivat korkeataajuusluokituksessa. Koska betonin suuri massa alentaa ominaistajuutta, oletuksena on, että jokaisen välipohjan ominaistajuus laskee. (Puuinfo Oy 2020.) Betonivalun jälkeisistä mittauksista nähdään, että kaikkien välipohjien ominaistajuudet laskivat. Betonivalu jäykisti rakennetta, jolloin taipumat pienentyivät ja arvot pysyivät raja-arvojen sisällä.

Lopullisissa mittaustuloksissa TK-välipohjien vertailtavat arvot olivat samankaltaiset, joten TK-palkin kiinnitystavalla ei ole väliä. LVL 48 P -välipohjien mittaustuloksissa oli pieniä eroavaisuuksia, joten lisäjäykistyksellä saa taipumaan jäykkyyttä. LVL-välipohjien poikittaisjäykistys toimi osittain nivelmäisenä rakenteena, koska tuennat ovat kahtena erillisenä osana palkkien välissä. Jäykisteiden alapuolelle laitettiin sahatavaraalauta, jotta se auttaisi parantamaan jäykistystä. Easi-joist®-välipohjien mittaustuloksissa oli suuria poikkeamia. Tiheämmällä palkkijaolla olevalla välipohjalla oli suurempi ominaistajuus ja pienempi taipuma. Taulukossa 29 kuvataan sitä, miten välipohjien ominaistajuudet muuttuivat eri rakennusvaiheessa. Jokaisen rakennusvaiheen myötä ominaistajuus laski. Suurimmat muutokset olivat runkovaiheen ja OSB-levytyksen välillä.

Taulukko 29. Välipohjarakenteiden ominaistajuusmittauksia kaikista rakennusvaiheista

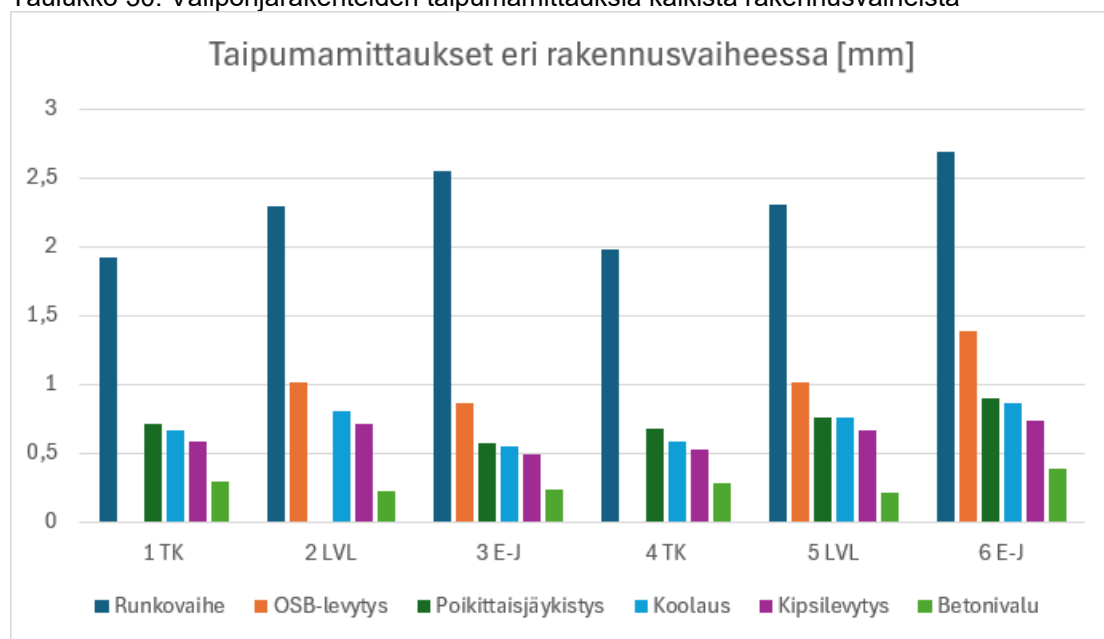


Välipohjien jäykistykseen myötä ominaistajuudessa ja taipumassa tapahtui muutoksia. Jotta puuvälipohjasta ei tule matalataajuuslattiaa, rakenteen tulee

olla riittävän kevyt. Jo runkovaiheessa tuli esille, että TK-palkki on luja ja kevyt palkki. LVL 48 P -palkki on painava, mutta luja. Easi-joist®-palkki on painoltaan näiden välistä, mutta on rakenteeltaan heikoin. Easi-joist®-palkin teräskiinnikkeillä on vaikutusta sen kestävyteen.

Taulukosta 30 nähdään taipumamittaustulokset kaikista rakennusvaiheista. Suurin muutos oli runkovaiheen ja OSB-levytyksen välillä. Pienin muutos oli poikittaisjäykistys ja koolauksen välillä.

Taulukko 30. Välipohjarakenteiden taipumamittauksia kaikista rakennusvaiheista



Tutkimuskysymys ”Miten LCA-vertailu, kustannusvertailu, laboratoriomittaukset ja ominaisuusvertailu vaikuttavat optimointiin?” on laaja kysymys, koska jokaisella vertailulla ja laboratoriomittauksilla on vaikutusta optimointiin. Nykyaikana materiaalien elinkaarella ja määrällä sekä alhaisilla kustannuksilla on suuri merkitys, koska pyritään tehokkuuteen. Välipohjat eroavat materiaaleiltaan vain palkin osuudessa. LCA-vertailussa hiilijalanjäljeltään parhaimman tuloksen sai TK-palkki. Kustannusvertailussa halvimman hinnan sai TK-palkki. Laboratoriomittauksissa LVL 48 P -välipohja sai pienimmät taipumatulokset, mutta välipohjilla jännevälit olivat erimittaiset, joten vertailua ei voi tehdä pelkkien mittaustulosten perusteella. Optimoinnissa käsitellään taipumatuloksia metriä kohden, jolloin saadaan todenmukaisia taipumatuloksia.

Excel-pohjainen optimointi

Puurakenteisten välipohjien yksi keskeinen haaste on jännevälit (Puuinfo Oy). Laboratoriomittauksissa välipohjaratkaisujen jännevälit olivat erisuuruisia. Jännevälkien erot ovat korkeintaan yhden metrin. Jännevälkien pituudet ovat välillä 5,3–6,4 m. Testatuissa välipohjissa TK-välipohjan jänneväli oli pisin ja easi-joist®-välipohjan jänneväli oli lyhyin.

Optimointia tehtiin Excelin avulla, jossa hyödynnettiin betonivalun jälkeisiä mittaustuloksia ominaistajuudesta ja taipumasta. Koska välipohjat olivat erimitaisia, tuli tulokset muuttaa pituusmetriä kohden. Jotta tämä onnistui, käytettiin laskennassa ominaistajuuden ja taipuman kaavoja, jotka ovat esitelty luvussa 6. Ratkaisimen avulla saatiin haluttuja tuloksia välipohjien jännevälkien pituuksista. Liitteessä 3 on laskentaa taipumasta ja ominaistajuudesta.

Jotta taipumatarkastelu on mahdollista puurakenteisilla välipohjilla, tulee ominaistajuuden arvon täyttyä. Mittaustulosten perusteella kaikki välipohjat olivat korkeataajuuslattialuokituksessa, joten niillä on optimoinnille varaa. Tämä tarkoittaa sitä, että jännevälkien pituuksia voidaan pidentää. Taulukossa 31 on määritetty jokaiselle välipohjalle maksimipituudet, kun ominaistajuus kohtaa raja-arvon 9 Hz.

Taulukko 31. Jännevälkien pituudet ominaistajuusehdolla 9 Hz ja 8 Hz

Ominaistaajuus [Hz]						
Ratkaisin 9 Hz						
Välipohja	TK	LVL	EJ	TK	LVL	EJ
Pituus [m]	6,69	7,01	6,80	6,46	7,11	6,02
Ominaistaajuus [Hz]	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Ratkaisin 8 Hz						
Välipohja	TK	LVL	EJ	TK	LVL	EJ
Pituus [m]	7,09	7,43	7,21	6,85	7,54	6,38
Ominaistaajuus [Hz]	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00

Kun ominaistaajuus kohtaa raja-arvon, tuloksena saadaan, että LVL 48 P -välipohjien pituudet ovat pisimmät. LVL 48 P -välipohjien pituudet olisivat 7,01 m ja 7,11 m. Poikittaisjäykistämättömässä välipohjassa pituus olisi 0,10 m lyhyempi. Laboratoriomittauksissa LVL 48 P -välipohjan jännevälkien pituus oli 5,8

m, joten jännevälin pituutta tulisi lisää 1,21 m ja 1,31 m. Seuraavaksi pisin jänneväli saadaan easi-joist®-välipohjalla, jossa on viisi palkkia rakenteessa. Tämän jännevälin pituus olisi 6,8 m ja se pitenisi alkuperäisestä pituudesta 1,5 m.

TK-välipohjien maksimipituudet ovat melko lähellä toisiaan, ne ovat 6,69 m ja 6,46 m. Välipohjat pitenisivät 0,06 m ja 0,29 m verran. Jännevälin piteneminen on pientä. Lyhyin jänneväli tulee kolmepalkkiselle easi-joist®-välipohjalle, mikä on 6,02 m. Pituuden piteneminen tälle välipohjalle on 0,72 m. Taulukossa 32 tuodaan esille jännevälien pituuden muutokset.

Taulukko 32. Jännevälien pituuden muutokset ominaistaajuusehdolla 9 Hz

Pituuden muutos välipohjien alkuperäisen jännevälin pituudesta						
Välipohja	TK	LVL	EJ	TK	LVL	EJ
Alkuperäinen jännevälin pituus [m]	6,4	5,8	5,3	6,4	5,8	5,3
Jännevälin pituus [m], 9 Hz	6,69	7,01	6,80	6,46	7,11	6,02
Jännevälin pituuden muutos [m]	0,29	1,21	1,50	0,06	1,31	0,72

Lähi vuosina tulee eurokoodiuudistus, jossa ominaistaajuuden raja-arvo laskee 8 Hz:iin (Toratti 2023). Tällä raja-arvolla laskettiin uudet maksimipituudet. Välipohjien järjestys pituuden suhteen on sama kuin raja-arvolla 9 Hz laskettuna. LVL 48 P -välipohjien pituuden muutokset olisivat 1,63 m ja 1,74 m verran. Nämä pituudet pitenisivät nykyisen raja-arvon pituuksista 0,42 m ja 0,43 m verran. Kolmepalkkisen easi-joist®-välipohjan jännevälin pituus pitenisi alkuperäisestä mitasta 1,91 m. Jännevälin muutos 9 Hz optimoituun pituuteen olisi 0,41 m.

Koska TK-välipohjat olivat lähellä optimaalista pituutta, näille välipohjien jänneväleille tulisi helpotusta eurokoodiuudistuksen myötä. TK-välipohjien jännevälin pituus pitenisi 0,45 m ja 0,69 m verran. Nämä pituudet pitenisivät nykyisen raja-arvon pituuksista 0,39 m ja 0,41 m verran. Viisipalkkinen easi-joist®-välipohja pitenisi 1,08 m ja eroa nykyisen raja-arvon pituuksista olisi 0,37 m. Muutokset ovat välillä 0,39–0,43 m. Taulukossa 33 tuodaan esille jännevälien pituuden muutokset eurokoodiuudistuksen myötä.

Taulukko 33. Jänneväliden pituuden muutokset eurokoodiuudistuksen myötä

Pituuden muutos välipohjien alkuperäisen jänneväliden pituudesta						
Välipohja	TK	LVL	EJ	TK	LVL	EJ
Alkuperäinen jänneväliden pituus [m]	6,4	5,8	5,3	6,4	5,8	5,3
Jänneväliden pituus [m], 8 Hz	7,09	7,43	7,21	6,85	7,54	6,38
Jänneväliden pituuden muutos [m]	0,69	1,63	1,91	0,45	1,74	1,08
Jänneväliden pituus [m], 9 Hz	6,69	7,01	6,80	6,46	7,11	6,02
Jänneväliden pituuden muutos [m]	0,41	0,42	0,41	0,39	0,43	0,37

Ominaistaajuuden osalta optimointi onnistuu välipohjien jänneväliden pituuksille. Taipumatarkastelun osalta Excelliin laitettiin betonivalun jälkeiset mittaus-tulokset sekä jokaisen välipohjan jänneväliden pituus. Mittaustulosten perusteella jokaiselle välipohjalle määriteltiin taiputusjäykkyys kolmepistetaivutuksen taipumakaavan avulla. Kaava on esitetty luvussa 6. Kaavan avulla selvitettiin suurimmat jänneväliden pituudet, kun taipuman ehtona oli 0,5 mm.

Taulukko 34. Jänneväliden pituudet taipumaehdolla 0,5 mm

Taipuma [mm]						
Ratkaisin 0,5 mm						
Välipohja	TK	LVL	EJ	TK	LVL	EJ
Pituus [m]	7,67	7,51	6,77	7,76	7,74	5,76
Maksimitaipuma [mm]	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Taulukossa 34 on välipohjien optimoidut pituudet nykyisellä taipumaehdolla 0,5 mm. Taulukosta nähdään, että TK- ja LVL 48 P -välipohjilla samankaltaiset maksimipituudet. Taipumaehdon mukaan pisin jänneväliden olisi TK-välipohjalla ja pituus olisi 7,76 m. Erotus alkuperäiseen pituuteen on 1,36 m. LVL 48 P -välipohjan pituus olisi 7,74 m ja erotus alkuperäiseen pituuteen on 1,94 m. Toisen TK-välipohjan pituus olisi 7,67 m ja erotus alkuperäiseen pituuteen on 1,27 m. Poikittaisjäykistämättömän LVL 48 P -välipohjan pituus olisi 7,51 m ja erotus alkuperäiseen on 1,71 m. Easi-joist®-välipohjan pituudet olisivat lyhyimmät. 6,77 m ja 5,76 m pituuksilla erotusta alkuperäisiin pituuksiin tulee 1,47 m ja 0,46 m. Pituuksien erotukset on esitetty taulukossa 35.

Taulukko 35. Jänneväliden pituuden muutokset taipumaehdolla 0,5 mm

Pituuden muutos välipohjien alkuperäisen jänneväliden pituudesta						
Välipohja	TK	LVL	EJ	TK	LVL	EJ
Alkuperäinen jänneväliden pituus [m]	6,4	5,8	5,3	6,4	5,8	5,3
Jänneväliden pituus [m], 0,5 mm	7,67	7,51	6,77	7,76	7,74	5,76
Jänneväliden pituuden muutos [m]	1,27	1,71	1,47	1,36	1,94	0,46

Eurokoodiuudistuksen myötä taipuma-arvo tulee muuttumaan 0,5 mm:stä arvoon 1,0 mm (Toratti 2023). Taipumaehdolla 1,0 mm tehtiin ratkaisimen avulla välipohjien jänneväleille maksimipituudet (taulukko 36). Pituudet menevät samassa järjestyksessä kuin nykyisen taipumaehdon optimoidut pituudet. TK-välipohjien pituudet olisit 9,78 m ja 9,67 m. LVL 48 P -välipohjien pituudet olisivat 9,76 m ja 9,47 m. Easi-joist®-välipohjien jännevälit olisivat lyhyimpiä ja ne olisivat 8,53 m ja 7,25 m.

Taulukko 36. Jännevälän pituudet taipumaehdolla 1,0 mm

Ratkaisin 1,0 mm						
Välipohja	TK	LVL	EJ	TK	LVL	EJ
Pituus [m]	9,67	9,47	8,53	9,78	9,76	7,25
Maksimitaipuma [mm]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Eurokoodiuudistuksen myötä jännevälän TK-välipohjien pituudet muuttuisivat alkuperäisestä pituudesta 3,38 m ja 3,27 m. LVL 48 P -välipohjien pituudet muuttuisivat 3,96 m ja 3,67 m. Easi-joist®-välipohjien pituuden muutokset olisivat 1,76 m ja 1,50 m. Pituuden muutokset ovat esitetty taulukossa 37.

Taulukko 37. Jännevälän pituuden muutokset eurokoodiuudistuksen myötä

Pituuden muutos välipohjien alkuperäisen jännevälän pituudesta						
Välipohja	TK	LVL	EJ	TK	LVL	EJ
Alkuperäinen jännevälän pituus [m]	6,4	5,8	5,3	6,4	5,8	5,3
Jännevälän pituus [m], 1,0 mm	9,67	9,47	8,53	9,78	9,76	7,25
Jännevälän pituuden muutos [m]	3,27	3,67	3,23	3,38	3,96	1,95
Jännevälän pituus [m], 0,5 mm	7,67	7,51	6,77	7,76	7,74	5,76
Jännevälän pituuden muutos [m]	1,99	1,95	1,76	2,02	2,01	1,50

Tulevan taipumaehdon jännevälän pituudet on huomioitu taulukossa 37. TK-välipohjien pituudet muuttuisivat nykyisen taipumaehdon pituuksista 1,99 m ja 2,02 m verran. LVL 48 P -välipohjien pituudet muuttuisivat 2,01 m ja 1,95 m verran. Easi-joist®-välipohjan jännevälän pituudet muuttuisivat 1,76 m ja 1,5 m verran. Muutokset ovat välillä 1,76–2,02 m. Uuden taipumaehdon tarkastelussa pituuden muutokset ovat merkittäviä.

Yhteenvedon voidaan todeta, että ominaistaajuuden ja taipuman kautta tarkasteltuna optimaalisissa jännevälän pituuksissa on eroja. Ominaistaajuuden raja-arvolla tarkasteltuna jännevälän pituudet ovat lyhyempiä kuin taipumaeh-

totarkastelun jänneväliden pituudet. Ominaistaajuus ei saa laskea alle 9 Hz, joten ominaistaajuus määrää värähtelymitoitusta. Näin ollen optimaalisimmat jänneväliden pituudet ovat ominaistaajuusehtojen mukaiset.

Luvussa 4 käsiteltiin palkkien hiilijalanjälkeä. Pienin hiilijalanjälki on TK-palkilla ja suurin hiilijalanjälki on easi-joist®-palkilla. Hiilijalanjälkilaskennan myötä luotiin parametrit. Luvussa 5 käsiteltiin palkkien ja välipohjien kustannuksia materiaalin pohjalta ja palkeille luotiin parametrit. Parametrit ovat koottu taulukkoon 38. Koska ominaistaajuus määrää maksimi jänneväliden pituuksia, verrataan parametrejä ominaistaajuuden kautta saatuihin pituuksiin.

Taulukko 38. LCA- ja kustannusparametrit sekä välipohjien maksimipituudet

Välipohja	TK	LVL	E-J
LCA parametri	1	1,2	2,6
Kustannusparametri	1	2	1,5
Maksimipituudet [m]	6,46–6,69	7,01–7,11	6,02–6,8

Välipohjien värähtelymitoituksen avulla etsittiin optimoinnissa välipohjien pisimmät jännevälit. Välipohjien optimoinnissa tämä tekijä ei riitä yksinään vaan huomioidaan myös hiilijalanjälki ja kustannukset. TK-välipohjien pituudet saivat keskimäiset tulokset. Tämän välipohjan hiilijalanjälki sekä kustannukset ovat pienimmät, jotka vaikuttavat TK-välipohjan ominaisuuksiin parantavasti. LVL 48 P -välipohjien pituudet olivat pisimmät, mutta kustannuksiltaan kalleimmat ja hiilijalanjäljeltään vertailussa keskimäisenä. Easi-joist®-välipohjien toinen maksimipituus oli lyhyin vertailtavista pituuksista. Näiden välipohjien hiilijalanjälki on suurin ja kustannukset ovat vertailussa keskimäisenä.

Kun välipohjien pituuksia pidennetään, muuttuu myös niiden kustannukset sekä hiilijalanjälki. Taulukon 39 mukaan easi-joist®-välipohja on huonoin vaihtoehto hiilijalanjäljeltään, sen jälkeen LVL 48 P -välipohja ja paras on TK-välipohja. Kustannuksiltaan kallein on LVL 48 P -välipohja, seuraavaksi kallein on easi-joist®-välipohja ja halvin on TK-välipohja.

Taulukko 39. Parametrit suhteutettu pituuteen

Välipohja	TK	LVL	EJ	TK	LVL	EJ
Maksimi pituus [m]	6,69	7,01	6,80	6,46	7,11	6,02
LCA parametri	1	1,2	2,6	1	1,2	2,6
	6,69	8,41	17,68	6,46	8,53	15,65
Kustannusparametri	1,00	2,00	1,50	1,00	2,00	1,50
	6,69	14,01	10,20	6,46	14,22	9,03

Optimoinnilla on vaikutusta hiilijalanjälkeen sekä kustannuksiin. Kun pituus muuttuu, niin muuttuu myös hiilijalanjälki ja kustannukset. Optimoinnin tuloksena on, että easi-joist®-välipohja on huonoin vaihtoehto, koska sillä saa lyhyimmät jännevälit, sillä on suurin hiilijalanjälki ja kustannukset ovat keskitasoa. Easi-joist®-välipohjien mittauksista huomaa, että palkkien määrällä on väliä. Tiheämpi palkkijako antaa pidemmän jännevälän, mutta kustannukset nousevat. Toiseksi paras vaihtoehto on LVL 48 P -välipohja, koska sillä saadaan pisimmät jännevälit, kustannukset ovat suurimmat ja hiilijalanjälki on matala. Paras vaihtoehto on TK-palkki, koska sillä on matalin hiilijalanjälki, pienimmät kustannukset sekä sillä saa hyvät jännevälän pituudet 600 mm palkkijaolla.

Välipohjien kokonaiskustannuksiin vaikuttaa eniten palkkien määrä. Jokaisella rakennekerroksella on oma tehtävänsä, mutta jos tarkastellaan mikä vaikuttaa kustannusten osalta eniten, niin se on palkkien määrä. Mitä enemmän palkkeja on välipohjassa, niin se vaikuttaa taipumaan alentavasti, mutta kustannukset nousevat. Palkkijako tulee olla sellainen, että välipohja pysyy värähtelyrajoituksen raja-arvoissa sekä kustannukset eivät nouse liian korkealle, jotta sen valmistaminen on kustannustehokasta.

Tutkittavissa välipohjissa ei ole tehty vertailua, että miten palkkijako vaikuttaa jännevälien maksimipituuksiin. TK-välipohja ja LVL 48 P -välipohjat ovat parhaimmat optimoinnin perusteella, mutta TK-välipohjan palkkijako on 600 mm ja LVL 48 P -välipohjan palkkijako on 450 mm, joka on pienempi. Välipohjia tulisi tutkia samalla palkkijaolla, jotta vertailua voisi tehdä palkkijaon perusteella. TK-välipohjien pituudet kasvaisivat, jos palkkijakoa tihentäisi, mutta silloin kokonaiskustannukset nousisivat.

Optimointi laboratoriomittauksista

Luvussa 8.1 on käsitelty laboratoriomittausten vertailua. OSB-levytyksen vaikutusta on vertailtu sivuilla 58–59. Koolauksen vaikutusta on vertailtu sivuilla 60–61. Kipsilevytyksen vaikutusta on vertailtu sivuilla 62–63. Laboratoriomittauksista voidaan päätellä, että OSB-levytyksellä oli suuri vaikutus mittaustulosten muutokseen, koska välipohjan palkeista muodostui kokonainen rakenne. Alapuolisen kipsilevytyksen mittaustulokset muuttuivat taipuman osalta. Levytyskerroksia voisi laittaa enemmän, jos halutaan tutkia lisää levytyksen vaikutusta. Levyt ovat ohuita, jolloin välipohjan korkeus ei suurene liikaa. Kustannukset eivät muutu merkittävästi levytyksen lisäyksestä.

Mittaustulosten perusteella palkkien alapuolisella koolauksella oli pienin vaikutus ominaistuuksiin ja taipumaan. Molempien ominaisuuksien arvot pysyivät samoina tai muuttuivat vähän. Vain yhdessä välipohjaversiossa ei ollut poikittaisjäykistystä ja siihen alapuolinen koolaus vaikutti. Näin ollen alapuolisella koolauksella ei ole juurikaan merkitystä värähtelymitoitukseen, jos rakenteessa on jo poikittaisjäykiste. Alapuoliset koolaukset voisi jättää pois, jolloin säästetään materiaalia sekä kustannuksia, mutta kipsilevytykselle tarvitaan koolauksen vaadittujen ruuvausvälien takia, jolloin koolauksia ei voi poistaa.

Mittaustuloksista huomataan, että heikoin välipohjaratkaisu on easi-joist®-palkkeja sisältävä välipohja. Tämän palkin teräsristikot vaikuttavat siihen, että palkit kestävät huonoiten kuormitusta. Teräsristikot ovat kiinnitetty puupaarteisiin teräksisten puristuslevyjen avulla. Puristuslevyt voivat löystyä tai menettää puristusvoimaa, jolloin palkin lujuus heikkenee. Kahdessa muussa palkissa on käytetty liimaa kiinnityksessä. Liima vaikuttaa koko liitospinnan alueella, jolloin se on kestävä. Tämän tutkimuksen pohjalta analysoitaessa palkkien kiinnitysmenetelmiä voidaan todeta, että liimaa sisältävät palkit kestävät taivutusta enemmän kuin teräksisiä kiinnikkeitä sisältävät palkit.

Perusteltuja ideoita

Puurakenteisten välipohjaratkaisujen betonivalu on ohut, 40–50 mm. Jos betonivalu olisi paksumpi, betoni toisi lisää massaa puuvälipohjaan, mikä vaikut-

taisi ominaistaajuuteen alentavasti. Betonia voidaan keventää erilaisilla menetelmillä. Tarkoituksena on vähentää betonin painoa säilyttäen betonin rakenteellinen lujuus ja toiminnalliset ominaisuudet. Betonin koostumusta voidaan muokata kevytsoralla, vaahtolasilla, paisutetulla perliitillä ja kierrätetyillä materiaaleilla. Betonivaluun voidaan laittaa muovipalloja- tai kuplia sekä onttoja putkia, jotka keventävät betonia. Kun betonin määrä vähenee, samalla hiilidioksidipäästöt vähenevät. Koska betoni tuo puurakenteiseen välipohjaan ääneneristävyttä, voi se hieman heikentää kevyemmän betonin takia. (Insinööritoimisto Sulin Oy s.a.) Koska betoni vaikuttaa puurakenteisen välipohjan jäykkyyteen ja ääneneristävyyteen positiivisesti, betonin paksuus voisi olla suurempi ja betoni voisi olla kevennettyä.

Kantavuus on tärkeää, joten rakenteisiin ei tulisi tehdä ylimääräisiä läpivientejä talotekniikalle. Ristikkorakenteisessa palkistossa läpivientejä ei tarvitse tehdä, jolloin se vähentää rakenteiden heikentämistä, parantaa kokonaislaatua ja alaslaskuja ei tarvitse tehdä. Ristikkorakenteisissa palkeissa on lähtökohtaisesti vähemmän materiaalia, joten ne ovat materiaalitehokkaita palkkeja. Läpivientien osalta TK- ja easi-joist®-palkit ovat parempia vaihtoehtoja kuin LVL-palkki.

Tutkittavissa välipohjissa ei ole käytetty mitään askelääneneristettä. Todellisessa käytössä akustinen eristys tulee huomioida, koska puurakenteisissa välipohjissa ääneneristys on tärkeää, jotta runkoäänät eivät siirry eteenpäin. Välipohjien pintamateriaalina olisi hyvä käyttää massiivista materiaalia, koska silloin askelääneneristys paranee ja se vaimentaa värähtelyä. Koska betonikerros on matala, akustisessa eristyksessä voidaan käyttää akustiikkalevyjä palkkien välissä. Betonivalun alla voidaan käyttää askeläänimattoja, jolloin kävelyn aiheuttamat iskut vähenevät. (RT 83-10902: 2007, 3.)

Värähtelyn vähenemiseen voidaan vaikuttaa liitoksilla, joten liitokset tulee tarkistaa, että ne ovat jämekästi valmistettu. Mekaanisia kiinnikkeitä käytettäessä tulee käyttää riittävä määrä ja oikean kokoisia kiinnikkeitä sekä huomioida riittävä kiinnitystiheys. Naulauslevyt, kulmaraudat ja liittimet varmistavat liitosten kestävyden. Tiiviisti tehdyt liitokset parantavat puurakenteisen välipohjan paloturvallisuutta. Paloturvallisuuden kannalta välipohjarakenteissa on jo hyvät

materiaalit ylä- ja alapinnassa, koska päällimmäinen kerros on betonia ja alin kerros on kipsilevyä.

Opinnäytetyön tutkimuskysymykseen ”Mitkä ovat parhaimmat optimointiehdotukset?” vastaaminen optimoinnin perusteella on, että tämänhetkisten värähtelymitoituksen raja-arvojen osalta pisimmät välipohjien jännevälit saadaan LVL 48 P -välipohjilla. TK-välipohja pärjää LCA-vertailussa parhaiten sekä sillä on pienimmät kustannukset neliometriä kohden. Materiaalimäärältään TK-palkki pärjasi parhaiten, koska se on ristikkorakenteinen palkki.

Yhteenvedona voidaan todeta, että puurakenteisen välipohjan tulisi olla riittävän kevyt, jotta se ei ole matalataajuuslattia, mutta toisaalta välipohja ei saa olla liian kevyt, että se ei taivu liikaa. Jotta vaakakuormat siirtyvät, on tärkeää jäykistää välipohja. Tutkittavana olleet palkit kestivät taivutusta testeissä. Välipohjien optimoinnissa on vaihtoehtoja. Yhdellä vaihtoehdolla ei välttämättä saavuteta kaikista näkökulmista katsottuna parasta tulosta.

10 POHDINTA

Tässä opinnäytetyössä oli tarkoituksena tehdä vertailua kahden eri erän välipohjaratkaisuista. Työn edetessä selvisi pian, että toisen erän laboratoriomitaukset rajautuvat pois opinnäytetyöstä aikataulun ja työmäärän takia. Opinnäytetyön aihe oli laaja ja työssä käsiteltiin useampaa aihetta samoista puurakenteisista välipohjista.

Johdanto-osuudessa tuotiin esille kolme tutkimuskysymystä: ”Mikä on laskennallisten ja todellisten mittausten eroavaisuus?”, ”Mitkä ovat parhaimmat optimointiehdotukset?” ja ”Miten LCA-vertailu, kustannusvertailu, laboratoriomitaukset ja ominaisuusvertailu vaikuttavat optimointiin?”. Tutkimuskysymykset painottuvat työn päämäärään. Työssä saatiin kaikkiin kysymyksiin vastaukset, joten opinnäytetyön lopputulos saavutettiin.

Opinnäytetyössä käytetyt lähteet ovat suunnitellun mukaiset. Kirjallisuutena hyödynnettiin kirjoja, julkaisuja, tutkimuksia, tieteellisiä artikkeleita, internetsivuja, RT-kortistoa, standardeja, asetuksia ja englanninkielistä kirjallisuutta. Lähteitä on käytetty monipuolisesti, mutta opinnäytetyössä olisi voitu käyttää

enemmän ulkomaisia lähteitä, kuten tutkimuksia. Opinnäytetyössä käytettiin standardeja, jotka eivät varsinaisesti ole lainsäädäntöä vaan teknisiä ohjeita.

LCA-vertailussa käytiin läpi materiaalien elinkaarta ja palkeista tehtiin hiilijalanjälkilaskentaa Ympäristöministeriön päästötietokannan pohjalta. Opinnäytetyön pääpaino ei ollut LCA-vertailussa, joten työssä ei laskettu kaikkien materiaalien hiilijalanjälkeä. Välipohjat erosivat rakenteellisesti vain palkkien osalta, joten laajamittainen LCA-vertailu ei ollut tarpeen. Jatkokehitysideana toinen opiskelija voisi tehdä seuraavan erän välipohjaratkaisuista LCA-vertailua ohjelmalla.

Opinnäytetyössä kustannuslaskenta on toteutettu neliometriä kohden. Tämä ei ole täysin luotettava laskutapa, koska tekniset ratkaisut voivat vaihdella, vaikka pinta-ala olisi sama. Tässä laskutavassa kustannuslaskenta ei kerro koko totuutta, koska materiaalin määrä voi vaihdella. Neliömetrihinnoittelutapa ei ota huomioon rakenteen monimutkaisuutta ja toteutustavan eroja. Jos palkkijako muuttuu, niin kustannusten pitää muuttua.

Kustannuslaskenta oli haastavaa, koska kaikkien palkkien kustannustietoja ei saatu. Kustannus selvitykseen hyödynnettiin materiaalien hintoja. Kaikkia hintoja ei löytynyt samasta paikasta, joten hintoja on etsitty eri paikoista. Kustannukset ovat osittain arvioituja ja siten eivät ole totuudenmukaisia. Kustannukset muuttuvat koko ajan, joten vertailussa tärkeää oli saada tuotua esille kustannuseroja ja optimointiin tarvittavaa vertailua.

Laboratoriomittauksissa pyrittiin toimimaan standardin mukaisesti. Ominais-
taajuusmittauksissa ulkoa tulevat äänet saattoivat vaikuttaa mittaustuloksiin sekä mittarina käytettiin uutta värähtelymittaria, joka on uudempi mittari kuin standardissa mainittu mittari. Taipumamittauksissa käytetty paino oli 5 kg painavampi kuin standardin mukainen paino. Mittaustuloksia ei ole suhteutettu tasan 1 kN pistekuormalle, koska 1000 N ja 1030 N pistekuormat eivät poikkea merkittävästi toisistaan. Koko työssä on käytetty samalla pistekuormalla tehtyjä mittaustuloksia, joten niitä pystytään vertailemaan keskenään. Ominaisuusvertailussa laskennallisten ja todellisten arvojen vertailu oli osittain puutteellista, koska kaikista ratkaisuista ei ollut laskennallisia mitoitusarvoja.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä vertailun avulla optimointia ja tämä tavoite toteutui. Excelin avulla tehty optimointi oli selkeää numeerista tietoa, jossa hyödynnettiin tehtyjä laboratoriomittauksia. Välipohjien optimointia tehtiin ominaistuuksien ja taipumien mittaustulosten pohjalta hyödyntäen nykyisiä ja tulevia Eurokoodi 5:n mukaisia raja-arvoja. Optimointia toimeksiantaja voi hyödyntää jatkotutkimuksissa.

Koska opinnäytetyöllä on tarkoitus mahdollistaa jatkotutkimuksia, tämän opinnäytetyön pohjalta toinen opiskelija voi tehdä opinnäytetyön seuraavan erän välipohjaratkaisujen laboratoriomittauksista ja keskittyä Eurokoodi 5:ssä muuttuviin raja-arvoihin. Näitä tuloksia voisi vertailla ensimmäisen erän mittaustuloksiin. Hanke saisi lisää optimointiehdotuksia, joita lähteä tutkimaan. Tässä opinnäytetyössä sivuttiin uusia raja-arvoja, että miten ne muuttaisivat optimointia.

Vaikeinta opinnäytetyössä oli pohtia optimointia, koska tällaisia rakenteellisia pohdintoja on tullut tehtyä vähän opintojen aikana. Opinnäytetyön tekeminen oli opettavaista. Vaikka koulussa käytiin läpi välipohjien värähtelymitoitusta, jää se mieleen ihan eri tavalla, kun siihen paneutuu enemmän ja perusteellisemmin. Opinnäytetyöllä on merkitystä tekijälle sekä toimeksiantajalle.

LÄHTEET

Akustiikan käsitteitä. 2021. Puuinfo Oy. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2021/05/Aanikirja_006-012.pdf [viitattu 19.9.2025].

Amiri, A. & Junnila, S. 2025. How much upfront-embodied GHG emissions can wooden buildings save—displacement factors for wooden buildings. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability* 2. Verkkolehti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1088/2634-4505/addc16> [viitattu 2.10.2025].

Betonin kierrätys ja uudelleenkäyttö. s.a. Betoni. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/betoni-ja-ymparisto/kiertotalous/> [viitattu 6.10.2025].

Cronvall Oy. 2025. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://cronvall.fi/> [viitattu 18.11.2025].

EPD Kerto® LVL. 2022. Metsä Wood. PDF-dokumentti. Päivitetty 21.1.2022. Saatavissa: <https://www.environdec.com/library/epd2802> [viitattu 11.11.2025].

EPD LVL by Stora Enso. 2023. Stora Enso Oyj. PDF-dokumentti. Päivitetty 6.10.2023. Saatavissa: <https://www.environdec.com/library/epd9942> [viitattu 11.11.2025].

Hiilidioksidipäästöjä vähennetään. s.a. Betoni. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-rakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/> [viitattu 6.10.2025].

Isolastulevyt. s.a. Puuproffa. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://puuproffa.fi/puutieto/puun-jalostaminen/isolastulevyt/> [viitattu 6.10.2025].

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. 2023. Hankesuunnitelma. PDF-dokumentti. Intranet.

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. 2025. Mittaustulokset. Excel-taulukko. Intranet.

Kerto® LVL S-beam. 2024. Metsä Wood. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.metsagroup.com/contentassets/e39dfa793cc343918376a4166feda0c4/kerto_lvl_s-beam_product_datasheet_fi.pdf [viitattu 22.9.2025].

Kevarinmäki, A. 2017. Puurakenteiden suunnitteluohje: Eurokoodi EN 1995-1-1. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

Kipsilevyn elinkaari ja ympäristö. s.a. Gyproc. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.gyproc.fi/kipsilevyn-elinkaari-ja-ymparisto#kierratys_ja_kestavyys [viitattu 28.10.2025].

Kovalainen, V., Kylliäinen, M., Lahtela, T., Lietzén, J. & Talus L. 2021. Ääneristys puutalossa. Helsinki: Puuinfo Oy.

K-rauta. 2025. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.k-rauta.fi/> [viitattu 18.11.2025].

Lahtela, T. 2018. Puuvälipohjan värähtelymitoitus. Puuinfo Oy. PDF-dokumentti. Päivitetty s.a. Saatavissa: https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/43_Puuv%C3%A4lipohjan-v%C3%A4r%C3%A4htelymitoitus.pdf [viitattu 19.9.2025].

Lahtela, T. 2021. Kantavat rankarakenteiset tasoelementit asuin- ja toimitilarakentaminen. Puuinfo Oy. Powerpoint-diaesitys. Päivitetty 1.7.2021. Saatavissa: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fpuuinfo.fi%2Fwp-content%2Fuploads%2F2022%2F06%2FtPUUr_2.5-Kantavat-massiivipuulevyrakenteiset-tasoelementit.pptx&wdOrigin=BROWSELINK [viitattu 6.11.2025].

Liljeström, M. 2024. Mikä on LCA eli elinkaariarviointi? EcoOnline. Päivitetty 22.7.2024. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ecoonline.com/fi/blogi/mika-on-lca/> [viitattu 20.9.2025].

Lindberg, R., Heinolainen, P. & Kivimäki, C. 2025. Rakennusosien kustannuksia 2025. E-kirja. Helsinki: Rakennustieto Oy. Saatavissa: [https://verkkojulkaisut.rakennustieto.fi/teos/ROK2025#RAKENNUSOSIEN\(20\)KUSTANNUK-SIA\(20\)2025](https://verkkojulkaisut.rakennustieto.fi/teos/ROK2025#RAKENNUSOSIEN(20)KUSTANNUK-SIA(20)2025) [viitattu 18.11.2025].

Luja, avoin välipohjapalkki. s.a. TK-Palkki. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://tk-palkki.fi/> [viitattu 22.9.2025].

LVL by Stora Enso. s.a. Stora Enso Oyj. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/documents/product-brochures/wood-products/lvl-by-stora-enso-technical-brochure-en.pdf> [viitattu 11.11.2025].

Manninen, K., Judl, J. & Myllymaa, T. 2015. Rakentamisen puujätteiden ja puupakkausjätteiden käsittelyvaihtoehtojen elinkaarenaikaiset ympäristövaikutukset. Ympäristöministeriön raportteja 2015: 29. E-kirja. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <http://www.urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4473-8> [viitattu 6.10.2025].

Metsäsertifiointi. s.a. Metsäkeskus. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/fi/metsan-kaytto-ja-omistus/oikeudet-ja-velvollisuudet/metsasertifiointi> [viitattu 6.11.2025].

Mikä on betonirakenteen kevennysteknologia? s.a. Insinööritoimisto Sulin Oy. Saatavissa: <https://sulinoy.fi/mika-on-betonirakenteen-kevennysteknologia/> [viitattu 20.11.2025].

Punched Metal Plate Fasteners (PMPF) and easi-joist® metal webs. 2024. Wolf Systems Ltd. PDF-dokumentti. Päivitetty 28.7.2024. Saatavissa: <https://manage.epdhub.com/declarations/metal-based-products/wolf-systems-ltd/1962/punched-metal-plate-fasteners-pmpf-and-easi-joist-metal-webs/> [viitattu 11.11.2025].

Puun kosteuskäyttäytyminen. 2020. Puuinfo Oy. WWW-dokumentti. Päivitetty 1.7.2020. Saatavissa: <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/tekniset-tiedotteet/puun-kosteuskayttaytyminen/> [viitattu 30.10.2025].

Puurakennusten välipohjien optimointi. S.a. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.xamk.fi/hanke/puuhyva-puu-ja-hybridirakenteisen-valipohjatuotteiden-optimoinnin-innovaatioverkosto/> [viitattu 13.9.2025].

Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje. 2020. Puuinfo Oy. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Eurokoodi-5-Lyhennetty-suunnitteluohje-5.-PAINOS-2020-P%C3%84IVITYS-22.7.-web.pdf> [viitattu 19.9.2025].

Puuvälipohjilla saavutettavia jännemittoja. 2020. Puuinfo Oy. WWW-dokumentti. Päivitetty 14.7.2020. Saatavissa: <https://puuinfo.fi/rakenteet/yhdistelmarakenteet/puuvälipohjilla-saavutettavia-jännemittoja/> [viitattu 19.9.2025].

Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL ry. 2022. Rakentajain kalenteri 2022–2023. Helsinki: Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL ry.

RT 32-10633. 1997. Rakennustieto. Kartonkipintaiset kipsilevyt.

RT 83-10902. 2007. Rakennustieto. Välipohjarakenteita.

Sepa välipohjapalkki – järkevä ratkaisu. s.a. Sepa Group oy. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sepa.fi/valipohjapalkit/> [viitattu 16.10.2025].

SFS-EN 1995-1-1:en. 2014. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.

SFS-EN 16929:2018:en. 2018. Test methods. Timber floors. Determination of vibration properties.

Siikanen, U. 2016. Puurakentaminen. 2. uudistettu painos. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Talja, A., Toratti, T. & Järvinen, E. 2002. Lattioiden värähtely: Suunnittelu ja kokeellinen arviointi. Valtion tieteellinen tutkimuskeskus. Tiedote. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2002/T2124.pdf> [viitattu 2.10.2025].

Talonrakentamisen päästötietokanta. 2025. Ympäristöministeriö. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://co2data.fi/rakentaminen/#fi> [viitattu 19.11.2025].

Toratti, T. 2023. Puuinfo Oy. Puurakenteiden eurokoodiuudistus lausuntovaiheessa. WWW-dokumentti. Päivitetty 11.10.2023. Saatavissa: <https://puuinfo.fi/2023/10/11/puurakenteiden-eurokoodiuudistus-lausuntovaiheessa/> [viitattu 3.10.2025].

Välipohjien suunnittelu ja toteutus puurakentamisessa. 2025. Karelia ammattikorkeakoulu. WWW-dokumentti. Päivitetty 2.4.2025. Saatavissa:

<https://www.karelia.fi/2025/04/valipohjien-suunnittelu-ja-toteutus-puurakentamisessa/> [viitattu 21.9.2025].

What is easi-joist?. 2019. Wolf Systems Ltd. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.easijoist.com/> [viitattu 22.9.2025].

KUVALUETTELO

Kuva 1. Valmiit välipohjat. Malmstedt, F. 28.10.2025.

Kuva 2. Esimerkkikuva puurakenteisesta palkkivälipohjasta. Kovalainen, V., Kylliäinen, M., Lahtela, T., Lietzén, J. & Talus L. 2021. Ääneneristys puutalossa. Helsinki: Puuinfo Oy.

Kuva 3. Välipohjan rakennetta ja jäykistystä. Lahtinen, E. 13.11.2025.

Kuva 4. Hankkeen välipohjaratkaisussa LVL-palkin jännevälän pituus on 6 m. Lahtinen, E. 9.9.2025.

Kuva 5. Resonanssi-ilmiö. Kovalainen, V., Kylliäinen, M., Lahtela, T., Lietzén, J. & Talus L. 2021. Ääneneristys puutalossa. Helsinki: Puuinfo Oy.

Kuva 6. Värähtelyn malli matala- ja korkeataajuuslattioissa. Lahtela, T. 2021. Kantavat rankarakenteiset tasoelementit asuin- ja toimitilarakentaminen. Puuinfo Oy. Powerpoint-diaesitys. Saatavissa: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fpuuinfo.fi%2Fwp-content%2Fuploads%2F2022%2F06%2FPUUr_2.5-Kantavat-massiivipuulevyrakenteiset-tasoelementit.pptx&wdOrigin=BROWSELINK [viitattu 6.11.2025].

Kuva 7. Ensimmäisen erän välipohjat runkovaiheessa. Lahtinen, E. 9.10.2025.

Kuva 8. TK-palkki. Lahtinen, E. 9.9.2025.

Kuva 9. TK-palkin kiinnitys yläpaarteesta. Lahtinen, E. 9.9.2025.

Kuva 10. TK-palkin kiinnitys alapaarteesta. Lahtinen, E. 9.9.2025.

Kuva 11. TK-palkin kiinnitys yläpaarteesta. Lahtinen, E. 9.9.2025.

Kuva 12. TK-välipohjan rakenteita. Lahtinen, E. 13.11.2025.

Kuva 13. LVL 48 P -palkki. Lahtinen, E. 9.10.2025.

Kuva 14. Käytetään kahta poikittaisjäykistettä B:n suunnassa, kun jänneväli L > 4 m. Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje. 2020. Puuinfo Oy. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Eurokoodi-5-Lyhennetty-suunnitteluohje-5.-PAINOS-2020-P%C3%84IVITYS-22.7.-web.pdf> [viitattu 19.9.2025].

Kuva 15. Kaksi poikittaisjäykistettä pitkien palkkien välissä. Kinnunen, N. 16.10.2025.

Kuva 16. LVL 48 P -palkit asennettuna. Lahtinen, E. 9.10.2025.

Kuva 17. Easi-joist®-palkki. Lahtinen, E. 9.10.2025.

Kuva 18. Ensimmäisessä ratkaisussa on viisi kappaletta easi-joist®-palkkeja. Lahtinen, E. 9.10.2025.

Kuva 19. Easi-joist®-palkit 600 mm välein. Lahtinen, E. 9.10.2025.

Kuva 20. Easi-joist®-palkin kiinnitys alapaarteesta vinoruuviliitoksella. Lahtinen, E. 9.10.2025.

Kuva 21. Easi-joist®-välipohjan materiaaleja ja rakenteita. Lahtinen, E. 13.11.2025.

Kuva 22. Puurakenteisen välipohjan puumateriaaleja. Lahtinen, E. 13.11.2025.

Kuva 23. Päällimmäinen kerros välipohjissa on betonia. Lahtinen, E. 13.11.2025.

Kuva 24. Välipohjan alin kerros on kipsilevyä. Lahtinen, E. 13.11.2025.

Kuva 25. TK-palkin materiaalit ja liimaus. Lahtinen, E. 9.10.2025.

Kuva 26. LVL 48 P -palkki. Lahtinen, E. 9.9.2025.

Kuva 27. Easi-joist®-palkki. Lahtinen, E. 13.11.2025.

Kuva 28. Välipohjan värähtelymitoitus määräytyy ominaistaajuuden mukaan. Lahtela, T. 2021. Kantavat rankarakenteiset tasoelementit asuin- ja toimitilarakentaminen. Puuinfo Oy. Powerpoint-diaesitys. Saatavissa: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fpuuinfo.fi%2Fwp-content%2Fuploads%2F2022%2F06%2FtPUUr_2.5-Kantavat-massiivipuulevyrakenteiset-tasoelementit.pptx&wdOrigin=BROWSELINK [viitattu 6.11.2025].

Kuva 29. Välipohjan hetkellisen taipuman raja-arvo. Lahtela, T. 2021. Kantavat rankarakenteiset tasoelementit asuin- ja toimitilarakentaminen. Puuinfo Oy. Powerpoint-diaesitys. Saatavissa: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fpuuinfo.fi%2Fwp-content%2Fuploads%2F2022%2F06%2FtPUUr_2.5-Kantavat-massiivipuulevyrakenteiset-tasoelementit.pptx&wdOrigin=BROWSELINK [viitattu 6.11.2025].

Kuva 30. Taipumatarkastelu 1 kN pistekuormalla. Lahtela, T. 2021. Kantavat rankarakenteiset tasoelementit asuin- ja toimitilarakentaminen. Puuinfo Oy. Powerpoint-diaesitys. Saatavissa: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fpuuinfo.fi%2Fwp-content%2Fuploads%2F2022%2F06%2FtPUUr_2.5-Kantavat-massiivipuulevyrakenteiset-tasoelementit.pptx&wdOrigin=BROWSELINK [viitattu 6.11.2025].

Kuva 31. Puinen vasara toimi herätteenä palkille. Lahtinen, E. 9.10.2025.

Kuva 32. Langaton värähtelymittalaite. Lahtinen, E. 9.10.2025.

Kuva 33. Ominaistaajuuden mittaaminen heel-drop-menetelmällä. Rinkinen, K. 13.10.2025.

Kuva 34. Taipuman mittaaminen mittakellolla. Lahtinen, E. 9.10.2025.

Kuva 35. Palkin kuormitus. Lahtinen, E. 9.10.2025.

Kuva 36. Betonivalun kuivumisen aikainen taipuman mittaaminen. Lahtinen, E. 13.11.2025.

Kuva 37. Betonin kuivuminen. Luukkainen, J. 25.11.2025.

Kuva 38. Levytyksen huolellinen kiinnittäminen liimalla. Kinnunen, N. 14.10.2025.

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Välipohjaratkaisu A:n materiaalikerrokset. Lahtinen, E. 25.9.2025.

Taulukko 2. Poikittaisjäykistämättömän välipohjaratkaisu B:n materiaalikerrokset. Lahtinen, E. 25.9.2025.

Taulukko 3. Poikittaisjäykistetyin välipohjaratkaisu B:n materiaalikerrokset. Lahtinen, E. 25.9.2025.

Taulukko 4. Välipohjaratkaisu C:n materiaalikerrokset. Lahtinen, E. 25.9.2025.

Taulukko 5. Palkkien elinkaaren aikaiset päästöt. Lahtinen, E. 19.11.2025.

Taulukko 6. Palkkien kustannukset. Lahtinen, E. 21.11.2025.

Taulukko 7. Runkovaiheen mittaustulokset ominaistaaajuudesta. Mukailen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. 2025. Mittaustulokset. Excel-tilukko. Intranet. 10.10.2025.

Taulukko 8. Runkovaiheen mittaustulokset taipumasta. Mukailen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. 2025. Mittaustulokset. Excel-tilukko. Intranet. 10.10.2025.

Taulukko 9. Ominaistaajuuden mittaustulokset OSB-levytyksen ja poikittaisjäykistuksen jälkeen. Mukailen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. 2025. Mittaustulokset. Excel-tilukko. Intranet. 22.10.2025.

Taulukko 10. Taipuman mittaustulokset OSB-levytyksen ja poikittaisjäykistuksen jälkeen. Mukailen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. 2025. Mittaustulokset. Excel-tilukko. Intranet. 22.10.2025.

Taulukko 11. Ominaistaajuuden mittaustulokset alapuolisen koolauksen jälkeen. Mukailen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. 2025. Mittaustulokset. Excel-tilukko. Intranet. 24.10.2025.

Taulukko 12. Taipuman mittaustulokset alapuolisen koolauksen jälkeen. Mukailen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. 2025. Mittaustulokset. Excel-tilukko. Intranet. 24.10.2025.

Taulukko 13. Ominaistaajuuden mittaustulokset kipsilevytyksen jälkeen. Mukailen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. 2025. Mittaustulokset. Excel-tilukko. Intranet. 28.10.2025.

Taulukko 14. Taipuman mittaustulokset kipsilevytyksen jälkeen. Mukailen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. 2025. Mittaustulokset. Excel-tilukko. Intranet. 28.10.2025.

Taulukko 15. Ominaistaajuuden mittaustulokset betonivalun jälkeen. Mukailen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. 2025. Mittaustulokset. Excel-taulukko. Intranet. 28.11.2025.

Taulukko 16. Betonivalun jälkeiset taipuman mittaustulokset. Mukailen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. 2025. Mittaustulokset. Excel-taulukko. Intranet. 28.11.2025.

Taulukko 17. Runkovaiheen vertailtavat ominaistaajuudet. Lahtinen, E. 14.10.2025.

Taulukko 18. Runkovaiheen vertailtavat taipuma-arvot. Lahtinen, E. 14.10.2025.

Taulukko 19. OSB-levytyksen ja poikittaisjäykistyksen ominaistaajuusarvoja verrataan runkovaiheen ominaistaajuusarvoihin. Lahtinen, E. 23.10.2025.

Taulukko 20. OSB-levytyksen ja poikittaisjäykistyksen taipuma-arvoja verrataan runkovaiheen taipuma-arvoihin. Lahtinen, E. 23.10.2025.

Taulukko 21. Koolauksen ominaistaajuuksia verrataan OSB-levytyksen ja poikittaisjäykistyksen ominaistaajuuksiin. Lahtinen, E. 25.10.2025.

Taulukko 22. Koolauksen taipuma-arvoja verrataan OSB-levytyksen ja poikittaisjäykistyksen taipuma-arvoihin. Lahtinen, E. 25.10.2025.

Taulukko 23. Kipsilevytyksen ominaistaajuusarvoja verrataan koolauksen ominaistaajuusarvoihin. Lahtinen, E. 30.10.2025.

Taulukko 24. Kipsilevytyksen taipuma-arvoja verrataan koolauksen taipuma-arvoihin. Lahtinen, E. 30.10.2025.

Taulukko 25. Betonivalun aiheuttama taipuma. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. 2025. Mittaustulokset. Excel-taulukko. Intranet. 28.11.2025.

Taulukko 26. Betonivalun ominaistaajuusarvoja verrataan kipsilevytyksen ominaistaajuusarvoihin. Lahtinen, E. 28.11.2025.

Taulukko 27. Betonivalun taipuma-arvoja verrataan kipsilevytyksen taipuma-arvoihin. Lahtinen, E. 28.11.2025.

Taulukko 28. Laskennallisten ja todellisten mittaustulosten vertailu Lahtinen, E. 28.11.2025.

Taulukko 29. Välipohjarakenteiden ominaistaajuusmittauksia kaikista rakennusvaiheista. Lahtinen, E. 28.11.2025.

Taulukko 30. Välipohjarakenteiden taipumamittauksia kaikista rakennusvaiheista. Lahtinen, E. 28.11.2025.

Taulukko 31. Jännevälin pituudet ominaistaajuusehdolla 9 Hz ja 8 Hz.
Lahtinen, E. 1.12.2025.

Taulukko 32. Jännevälien pituuden muutokset ominaistaajuusehdolla 9 Hz.
Lahtinen, E. 1.12.2025.

Taulukko 33. Jännevälien pituuden muutokset eurokoodiuudistuksen myötä.
Lahtinen, E. 1.12.2025.

Taulukko 34. Jännevälin pituudet taipumaehdolla 0,5 mm. Lahtinen, E.
1.12.2025.

Taulukko 35. Jännevälien pituuden muutokset taipumaehdolla 0,5 mm.
Lahtinen, E. 1.12.2025.

Taulukko 36. Jännevälin pituudet taipumaehdolla 1,0 mm. Lahtinen, E.
1.12.2025.

Taulukko 37. Jännevälien pituuden muutokset eurokoodiuudistuksen myötä.
Lahtinen, E. 1.12.2025.

Taulukko 38. LCA- ja kustannusparametrit sekä välipohjien maksimipituudet.
Lahtinen, E. 1.12.2025.

Taulukko 39. Parametrit suhteutettu pituuteen. Lahtinen, E. 1.12.2025.

Kustannuslaskelmat

Väliohjaratkaisu A							
Väliohjaratkaisun pinta-ala	6,553 m	x	2,404 m	=	15,753412	m ²	18.11.2025
Materiaali	Koko	Materiaalimenekki		Hankintakustannus		Yhteensä	Hintatieto
	[mm]	Kappale	Yksikkö	€/yksikkö	€/m ²	€ (Alv 25,5%)	
Betoni c30/37 #8 s4 + mikrokuitu 12 mm	50	0,788	m ³	310,613		244,66	PuuHyVä-hanke
OSB-levy ponteilla	18x1200x2700			53,02	16,37	257,81	Cronvall
OSB-levyn kiinnitys Hobau-ruuveilla	4,2x55	25	kpl/m ²	0,03		11,82	K-rauta
OSB-levyn pontteihin puuliimaa		0,02	l/m ²		0,21	3,31	ROK 2025
TK-palkki	98x400	20	jm	15,4		308,00	Cronvall
TK-palkin kiinnitys päistä 2xR/pääty	6x100	12	kpl	0,3		3,60	K-rauta
Mitallistettu puutavara, koolaukset	48x48, k400	44	jm	1,45		63,84	K-rauta
Kiinnitys ruuveilla	6x100	51	kpl	0,3		15,30	K-rauta
Erikoiskova kipsilevy	13x1200x3000			30,55	9,79	154,21	Cronvall
Kipsilevyruuvit	3,5x25	0,2	kg/m ²	0,01	0,3	4,73	ROK 2025
KOKONAISKUSTANNUS € =						1067,26	€ (Alv 25,5%)
						850,41	€ (Alv 0%)
KUSTANNUS €/m ² =						67,75	€ (Alv 25,5%)
						53,98	€ (Alv 0%)
Väliohjaratkaisu B - ilman poikittaisjäykistystä							
Väliohjaratkaisun pinta-ala	6,0 m	x	1,604 m	=	9,624	m ²	18.11.2025
Materiaali	Koko	Materiaalimenekki		Hankintakustannus		Yhteensä	Hintatieto
	[mm]	Kappale	Yksikkö	€/yksikkö	€/m ²	€ (Alv 25,5%)	
Betoni c30/37 #8 s4 + mikrokuitu 12 mm	50	0,48	m ³	310,61		149,47	PuuHyVä-hanke
OSB-levy ponteilla	18x1200x2700			53,02	16,37	157,50	Cronvall
OSB-levyn kiinnitys Hobau-ruuveilla	4,2x55	25	kpl/m ²	0,03		7,22	K-rauta
OSB-levyn pontteihin puuliimaa		0,02	l/m ²		0,21	2,02	ROK 2025
LVL-palkki	63x300	18	jm	22,63		407,34	Cronvall
LVL-palkin kiinnitys kulmarauoilla	90x90x65	12	kpl	1,19		14,28	K-rauta
Kulmarautojen kiinnitys ankkuriruuveilla	5x40	192			0,07	13,44	K-rauta
Mitallistettu puutavara, koolaukset	48x48, k400	44	jm	1,45		63,84	K-rauta
Kiinnitys ruuveilla	6x100	51	kpl	0,3		15,30	K-rauta
Erikoiskova kipsilevy	13x1200x3000			30,55	9,79	94,21	Cronvall
Kipsilevyruuvit	3,5x25	0,2	kg/m ²	0,01	0,3	2,89	ROK 2025
KOKONAISKUSTANNUS € =						927,50	€ (Alv 25,5%)
						739,04	€ (Alv 0%)
KUSTANNUS €/m ² =						96,37	€ (Alv 25,5%)
						76,79	€ (Alv 0%)
Väliohjaratkaisu B - poikittaisjäykistyksellä							
Väliohjaratkaisun pinta-ala	6,0 m	x	1,604 m	=	9,624	m ²	18.11.2025
Materiaali	Koko	Materiaalimenekki		Hankintakustannus		Yhteensä	Hintatieto
	[mm]	Kappale	Yksikkö	€/yksikkö	€/m ²	€ (Alv 25,5%)	
Betoni c30/37 #8 s4 + mikrokuitu 12 mm	50	0,48	m ³	310,61		149,47	PuuHyVä-hanke
OSB-levy ponteilla	18x1200x2700			53,02	16,37	157,50	Cronvall
OSB-levyn kiinnitys Hobau-ruuveilla	4,2x55	25	kpl/m ²	0,03		7,22	K-rauta
OSB-levyn pontteihin puuliimaa		0,02	l/m ²		0,21	2,02	ROK 2025
LVL 48 P-palkki	63x300	18	jm	22,63		407,34	Cronvall
LVL-palkin kiinnitys kulmarauoilla	90x90x65	12	kpl	1,19		14,28	K-rauta
Kulmarautojen kiinnitys ankkuriruuveilla	5x40	192			0,07	13,44	K-rauta
Poikittaisjäykistys LVL	63x300	1,6	jm	22,63		36,21	Cronvall
Poikittaisjäykistys sahatavara	22x100	2	jm	1,2		2,40	K-rauta
Poikittaisjäykistyksen kiinnitykset nauiloilla	125x4	30	kpl	0,1		3,00	K-rauta
Mitallistettu puutavara, koolaukset	48x48, k400	44	jm	1,45		63,84	K-rauta
Kiinnitys ruuveilla	6x100	51	kpl	0,3		15,30	K-rauta
Erikoiskova kipsilevy	13x1200x3000			30,55	9,79	94,21	Cronvall
Kipsilevyruuvit	3,5x25	0,2	kg/m ²	0,01	0,3	2,89	ROK 2025
KOKONAISKUSTANNUS € =						969,10	€ (Alv 25,5%)
						772,20	€ (Alv 0%)
KUSTANNUS €/m ² =						100,70	€ (Alv 25,5%)
						80,24	€ (Alv 0%)

Kustannuslaskelmat

Välipohjaratkaisu C - 3 palkilla							
Välipohjaratkaisun pinta-ala	5,5 m	x	1,604 m	=	8,822	m ²	18.11.2025
Materiaali	Koko	Materiaalimenekki		Hankintakustannus		Yhteensä	Hintatieto
	[mm]	Kappale	Yksikkö	€/yksikkö	€/m ²	€ (Alv 25,5%)	
Betoni c30/37 #8 s4 + mikrokuitu 12 mm	40	0,35	m ³	310,613		109,61	PuuHyVä-hanke
OSB-levy ponteilla	18x1200x2700			53,02	16,37	144,37	Cronvall
OSB-levyn kiinnitys Hobau-ruuveilla	4,2x55	25	kp/m ²	0,03		6,62	K-rauta
OSB-levyn pontteihin puuliimaa		0,02	l/m ²		0,21	1,85	ROK 2025
Easi-joist®-palkki WS300	306	16,5	jm	19,1		315,15	Cronvall
WS300 kiinnitys päistä 2xR/pääty	6x100	12	kpl	0,3		3,60	K-rauta
Mitallistettu puutavara, koolaukset	48x48, k400	44	jm	1,45		63,84	K-rauta
Kiinnitys ruuveilla	6x100	51	kpl	0,3		15,30	K-rauta
Erikoiskova kipsilevy	13x1200x3000			30,55	9,79	86,36	Cronvall
Kipsilevyruuvit	3,5x25	0,2	kg/m ²	0,01	0,3	2,65	ROK 2025
KOKONAISKUSTANNUS € =						749,34	€ (Alv 25,5%)
						597,09	€ (Alv 0%)
KUSTANNUS €/m ² =						84,94	€ (Alv 25,5%)
						67,68	€ (Alv 0%)
Välipohjaratkaisu C - 5 palkilla							
Välipohjaratkaisun pinta-ala	5,5 m	x	1,604 m	=	8,822	m ²	18.11.2025
Materiaali	Koko	Materiaalimenekki		Hankintakustannus		Yhteensä	Hintatieto
	[mm]	Kappale	Yksikkö	€/yksikkö	€/m ²	€ (Alv 25,5%)	
Betoni c30/37 #8 s4 + mikrokuitu 12 mm	40	0,35	m ³	310,613		109,61	PuuHyVä-hanke
OSB-levy ponteilla	18x1200x2700			53,02	16,37	144,37	Cronvall
OSB-levyn kiinnitys Hobau-ruuveilla	4,2x55	25	kp/m ²	0,03		6,62	K-rauta
OSB-levyn pontteihin puuliimaa		0,02	l/m ²		0,21	1,85	ROK 2025
Easi-joist®-palkki WS300	306	27,5	jm	19,1		525,25	Cronvall
WS300 kiinnitys päistä 2xR/pääty	6x100	12	kpl	0,3		3,60	K-rauta
Mitallistettu puutavara, koolaukset	48x48, k400	44	jm	1,45		63,84	K-rauta
Kiinnitys ruuveilla	6x100	51	kpl	0,3		15,30	K-rauta
Erikoiskova kipsilevy	13x1200x3000			30,55	9,79	86,36	Cronvall
Kipsilevyruuvit	3,5x25	0,2	kg/m ²	0,01	0,3	2,65	ROK 2025
KOKONAISKUSTANNUS € =						959,44	€ (Alv 25,5%)
						764,50	€ (Alv 0%)
KUSTANNUS €/m ² =						108,76	€ (Alv 25,5%)
						86,66	€ (Alv 0%)

Betonivalun aikaiset taipumatulokset

	TK	LVL	EJ	TK	LVL	EJ
Aika	Taipuma	Taipuma	Taipuma	Taipuma	Taipuma	Taipuma
28.10.2025 9.17	3,96	2,63	2,33	4,94	2,32	4,38
28.10.2025 14.05	4,01	2,7	2,34	5,13	2,36	4,39
29.10.2025 10.45	5,22	3,95	3,09	6,33	3,41	5,19
29.10.2025 14.45	5,21	4,05	3,16	6,33	3,48	5,27
30.10.2025 8.15	5,21	4,38	3,44	6,45	3,75	5,56
30.10.2025 14.45	5,27	4,54	3,57	6,59	3,87	5,68
31.10.2025 7.40	5,56	4,95	3,91	6,86	4,15	6,01
31.10.2025 15.55	5,72	5,13	4,09	6,99	4,31	6,23
1.11.2025 10.35	5,98	5,6	4,48	7,24	4,62	6,69
2.11.2025 11.10	6,27	6,12	4,95	7,48	4,99	7,28
3.11.2025 7.30	6,47	6,5	5,3	7,65	5,26	7,68
3.11.2025 13.30	6,51	6,6	5,4	7,7	5,32	7,88
4.11.2025 7.30	6,61	6,91	5,7	7,81	5,58	8,23
4.11.2025 15.10	6,66	7,01	5,81	7,86	5,66	8,34
5.11.2025 7.20	6,72	7,24	6,04	7,93	5,81	8,61
5.11.2025 14.50	6,75	7,32	6,11	7,93	5,85	8,69
6.11.2025 7.50	6,84	7,58	6,38	8	6,04	8,97
6.11.2025 14.40	6,9	7,63	6,44	8,1	6,07	9,08
7.11.2025 7.40	6,91	7,91	6,76	8,19	6,28	9,39
7.11.2025 13.48	6,92	7,97	6,83	8,24	6,32	9,46
8.11.2025 9.28	6,94	8,22	7,09	8,24	6,49	9,73
9.11.2025 10.38	6,98	8,48	7,38	8,26	6,64	10,07
10.11.2025 7.58	6,99	8,68	7,66	8,27	6,79	10,35
10.11.2025 15.50	6,99	8,72	7,72	8,29	6,84	10,41
11.11.2025 7.10	6,99	8,9	7,93	8,33	6,95	10,63
11.11.2025 15.40	6,99	8,98	8	8,34	6,99	10,76
12.11.2025 7.10	7,02	9,12	8,16	8,34	6,99	10,76
12.11.2025 15.40	7,03	9,18	8,21	8,34	7,12	10,96
13.11.2025 7.20	7,06	9,33	8,36	8,36	7,21	11,13
13.11.2025 13.30	7,06	9,36	8,4	8,36	7,23	11,17
14.11.2025 8.10	7,06	9,52	8,6	8,37	7,32	11,38
14.11.2025 13.15	7,06	9,53	8,6	8,36	7,32	11,42
15.11.2025 11.20	7,06	9,68	8,83	8,36	7,42	11,66
16.11.2025 10.30	7,06	9,83	9	8,36	7,49	11,83
17.11.2025 7.50	7,06	9,93	9,16	8,36	7,54	12
17.11.2025 15.00	7,06	9,98	9,19	8,37	7,58	12,05
18.11.2025 7.50	7,06	10,09	9,33	8,38	7,63	12,2
18.11.2025 14.00	7,06	10,1	9,35	8,37	7,67	12,28
19.11.2025 7.20	7,06	10,2	9,49	8,37	7,72	12,39
19.11.2025 15.40	7,06	10,22	9,54	8,37	7,73	12,46
20.11.2025 7.15	7,06	10,3	9,65	8,37	7,77	12,56
20.11.2025 15.00	7,06	10,32	9,68	8,37	7,77	12,58
21.11.2025 7.30	7,06	10,41	9,79	8,37	7,81	12,69
21.11.2025 14.20	7,06	10,42	9,8	8,37	7,81	12,7
23.11.2025 10.20	7,06	10,59	9,98	8,37	7,87	12,95
24.11.2025 9.40	7,06	10,68	10,07	8,37	7,92	13,09
25.11.2025	7,6	12,78	10,3	8,98	10,95	13,54

Optimointi-Excelin laskenta

TAIVUTUSJÄYKKYYS

TK-välipohja 1			
Taipuma	f	0,29	mm
Kuorma	F	1030	N
Jänneväli	L	6400	mm
Taivutusjäykkyys	EI	19397149425287,40	Nmm ²

LVL-välipohja 2			
Taipuma	f	0,23	mm
Kuorma	F	1030	N
Jänneväli	L	5800	mm
Taivutusjäykkyys	EI	18203384057971,00	Nmm ²

EJ-välipohja 3			
Taipuma	f	0,24	mm
Kuorma	F	1030	N
Jänneväli	L	5300	mm
Taivutusjäykkyys	EI	13311051215277,80	Nmm ²

TK-välipohja 4			
Taipuma	f	0,28	mm
Kuorma	F	1030	N
Jänneväli	L	6400	mm
Taivutusjäykkyys	EI	20089904761904,80	Nmm ²

LVL-välipohja 5			
Taipuma	f	0,21	mm
Kuorma	F	1030	N
Jänneväli	L	5800	mm
Taivutusjäykkyys	EI	19937039682539,70	Nmm ²

EJ-välipohja 6			
Taipuma	f	0,39	mm
Kuorma	F	1030	N
Jänneväli	L	5300	mm
Taivutusjäykkyys	EI	8191416132478,63	Nmm ²

OMINAISTAAJUUS

TK-välipohja 1		
Ominaistaajuus	9,82	Hz
Massa	493,042	kg/m ²
Jänneväli	6,4	m
EI	19397149,43	Nm ²
Palkkien etäisyys	0,6	m

LVL-välipohja 2		
Ominaistaajuus	13,13	Hz
Massa	511,609	kg/m ²
Jänneväli	5,8	m
EI	18203384,06	Nm ²
Palkkien etäisyys	0,45	m

EJ-välipohja 3		
Ominaistaajuus	14,81	Hz
Massa	632,583	kg/m ²
Jänneväli	5,3	m
EI	13311051,22	Nm ²
Palkkien etäisyys	0,3	m

TK-välipohja 4		
Ominaistaajuus	9,16	Hz
Massa	586,888	kg/m ²
Jänneväli	6,4	m
EI	20089904,76	Nm ²
Palkkien etäisyys	0,6	m

LVL-välipohja 5		
Ominaistaajuus	13,53	Hz
Massa	527,692	kg/m ²
Jänneväli	5,8	m
EI	19937039,68	Nm ²
Palkkien etäisyys	0,45	m

EJ-välipohja 6		
Ominaistaajuus	11,61	Hz
Massa	316,723	kg/m ²
Jänneväli	5,3	m
EI	8191416,132	Nm ²
Palkkien etäisyys	0,6	m