



Elias Koponen

# Raitiovaunuvarikon vähähiilisten suunnitteluratkaisujen kehittäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

02.02.2022

# Tiivistelmä

Tekijä:	Elias Koponen
Otsikko:	Raitiovaunuvarikon vähähiilisten suunnitteluratkaisujen kehittäminen
Sivumäärä:	51 sivua + 8 liitettä
Aika:	2.2.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine:	Rakennetekniikka
Ohjaajat:	Projektinjohtaja Terhi Ala-Ilkka Lehtori Paula Naukkarinen

---

Insinööritöössä selvitettiin Helsingin kaupungin liikennelaitoksen (HKL) ”Raide-Jokeri” hankkeen raitiovaunuvarikon rakennesuunnittelua hiilijalanjäljen näkökulmasta, jotta tulevien varikoiden ratkaisuihin olisi tiedossa vähäpäästöisempiä rakenneratkaisuja.

Insinööritö tutkimii päästöihin vaikuttavia ratkaisuja rakenneteknisestä, sekä teoreettisesta näkökulmasta. Tuloksien selvittämisessä on hyödynnetty erilaisia laskentamenetelmiä ja -ohjelmia, asiantuntijoiden ymmärrystä, sekä lähdemateriaalia.

Työssä käsitellään raitiovaunuvarikon rungon ja kattorakenteen toteuttamista puisena, kivi- ja lasivillan toimivuutta hiilijalanjäljen näkökulmasta, vähähiilisiä betoniratkaisuja, kierrätysterästä, sekä muita tekijöitä varikkohankkeen hiilijalanjäljen pienentämiseen.

Työn tuloksena huomattiin, ettei puurakentaminen ole yksittäisten muutosten kannalta aina kannattavaa, jos sitä ei olla huomioitu jo hankkeen alussa. Kattorakenteen toteuttaminen on mahdollista puisena, joskin ratkaisu on poimulevyä painavampi, mikä on huomioitava alapuolisten rakenteiden mitoittamisessa. Puisen rungon jäykistäminen on ongelma, jota ei kyseisessä työssä selvitetty.

Kivivillaeristeen vaihtaminen lasivillaan oli hankkeessa toimiva ratkaisu. Tätä ei kuitenkaan voitu hyödyntää puukaton osalta paloteknisten haasteiden takia. Betonin vähähiilisiä ratkaisuja on olemassa, mutta ne on suunniteltava tapauskohtaisesti tuotevalmistajan kanssa.

Työssä keskityttiin pääsääntöisesti rakenneteknisiin ratkaisuihin. Selvitystä päästöjen vähentämiseksi raitiovaunuhankkeessa voisi jatkaa keskittymällä pääasiassa energiankulutukseen ja talotekniikkaan.

Avainsanat:	Elinkaari, vähähiilisyys, Helsingin kaupungin liikennelaitos (HKL), Raide-Jokeri, Ramboll, CO <sub>2</sub> -päästöt
-------------	---

## Abstract

Author: Elias Koponen  
Title: Development of Low-Carbon Solutions for the Tram Depot  
Number of Pages: 51 pages + 8 appendices  
Date: 2 February 2022

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Civil Engineering  
Professional Major: Structural Engineering  
Supervisors: Project director Terhi Ala-Ilkka  
Lecturer Paula Naukkarinen

---

The purpose of the thesis was to analyse the structural design of Helsinki City Transport's (HKL) "Jokeri Light Rail" tram depot project from the point of view of the carbon footprint so that lower-emission structural solutions are known for future depots.

The thesis studies solutions that affect emissions from a structural and theoretical point of view. Various calculation methods and programs, experts and source material have been utilized in determining the results.

The work focuses on the implementation of the tram depot frame and roof structure as wood, the functionality of stone and glass wool from the point of view of emissions, low-carbon concrete solutions, recycled steel, and other factors for reducing the carbon footprint of the depot project.

As a result of the thesis, it is apparent that wooden structures are not always profitable for individual replacements if it has not been considered from the beginning of the project. The implementation of the wooden roof structure is possible, even though the solution is heavier than the corrugated sheet, which must be considered when dimensioning the underlying structures. Stiffening the wooden frame is a problem that has not been studied in this thesis.

Replacing stone wool insulation with glass wool is a workable solution with steel and concrete details, but it cannot be utilized in the case of a wooden roof due to the limitations that fire design brings. Low-carbon solutions for concrete exist, but they must be designed on a case-by case basis with the product manufacturer.

This thesis mainly focuses on structural engineering solutions. The carbon footprint study could be continued by focusing more on energy consumption and building services engineering.

Keywords: lifecycle, low-carbon, Helsinki City Transport, Jokeri Light Rail, Ramboll, CO<sub>2</sub>-emissions

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Teoriaa rakentamisen elinkaarilaskentaan	2
2.1	Rakennuksen elinkaarilaskenta	2
2.2	Rakennuksen hiilikädenjälki	5
2.3	Materiaalien toiminta hiilidioksidin näkökulmasta	6
2.3.1	Teräs	6
2.3.2	Betoni	8
3	Opinnäytetyön toteuttaminen	9
3.1	Taustatietoa opinnäytetyöstä	9
3.2	Tutkimusmenetelmät ja tulosten luotettavuus	10
3.3	Hypoteesit ja rajaus	11
4	Raide-Jokerin varikon rakennetekniset päästövähennysmahdollisuudet	12
4.1	Raitiovaunuvarikkomalli	12
4.2	Säilytyshallin mitoituksen lähtötietoja	14
4.3	Säilytyshallin rungon mitoittaminen	16
4.3.1	Harjapalkki	18
4.3.2	Harjapalkin palomitoitus	19
4.3.3	Liimapuupilari	22
4.3.4	Säilytyshallin rungon tulokset	24
4.4	Säilytyshallin puinen kattorakenne	24
4.4.1	Kattorakenteen ilmastovaikutukset	26
4.5	Lämmöneristeiden vaikutukset CO <sub>2</sub> -päästöihin	28
5	Energiatehokkaammat ratkaisut Raide-Jokeri-hankkeessa	30
5.1	Energiankulutus lämmityksessä	30
5.2	Elinkaarilaskennan huomioiminen rakenneosissa	31
5.3	Vähähiilisempiä ratkaisuja teräkselle	33
5.4	Vähähiilisempiä ratkaisuja betonille	33
5.4.1	Vihreä betoni	34
5.4.2	Luja-Vähähiilibetoni	37



5.4.3	Pielisen betoni	38
5.4.4	Kolmossementti	39
5.4.5	Vähähiilisemmän betonin vaikutus varikon päästöihin	41
6	Johtopäätökset ja pohdintaa	43
7	Yhteenveto ja jatkoselvitykset	46
	Lähteet	48

## Liitteet

Liite 1: Raide-Jokerin Infrarakenteiden CO<sub>2</sub>-päästöt

Liite 2: Säilytyshallin kaaren kuormitus RFEM-mallilla

Liite 3: Säilytyshallin harjapalkki

Liite 4: Harjapalkin palomitoitus käsinlaskennalla

Liite 5: Säilytyshallin liimapuupilari

Liite 6: Kerto-Ripa kotelolaatta teräksiselle rungolle toteutettuna

Liite 7: Kotelolaatan palomitoitus

Liite 8: Kotelolaattaratkaisun lämmönläpäisykerroin

## Lyhenteet

CFL	Compact Fluorescent Light = kompakti loisteputkivalaisin, argonista ja elohopeasta koostuva valaisin.
CO <sub>2</sub>	Hiilen ja hapen kemiallinen yhdiste, hiilidioksidi.
FEM	Finite Element Method = numeerinen menetelmä likiarvon löytämiselle. Menetelmälle on luotu 3D-ohjelmia tukemaan rakenteiden mitoittamista.
GGBFS	Ground granulated blast-furnace slag = Shokkijäähdytetty ja jauhettu masuunikuona.
HIBE	Hiilineutraali betoni. Pielisen betonin tuotteiden nimitys.
HKL	Helsingin kaupungin liikennelaitos.
KHK	Kasvihuonekaasu.
LCA	Life Cycle Assessment = Elinkaariarviointi, eli ympäristövaikutteita arvioiva menetelmä.
LED	Light Emitting Diode = hohtodiodi, eli sähkön vaikutuksesta valoa säteilevä komponentti.
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

## 1 Johdanto

Helsingin kaupungin hiilidioksidipäästöistä noin 25 % aiheutuu liikenteestä, joista henkilöautot aiheuttavat noin puolet. Helsingin kaupungin tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Helsingin raideliikenne on hiilidioksidipäästötöntä, sillä Helsingin kaupungin liikennelaitos (HKL) siirtyi vuonna 2012 käyttämään vesivoimalla tuotettua sähköä. Helsingin kaupunki on nyt luomassa Helsingin ja Espoon välille rakennettavaa pikaraitiolinjaa, nimeltä Raide-Jokeri. Hanke on tällä hetkellä kuitenkin rakennusvaiheessa ja rakentaminen tuottaa yhä suuria päästöjä, joita voidaan vähentää hiilijalanjälki huomioimalla.

Hiilidioksidipäästöjen arvioiminen ja huomioon ottaminen laskennassa on tulossa pakolliseksi rakennusluvassa vuonna 2025. Kasvihuonekaasujen (khk) pienentämiseen vaikuttavia valintoja on tehtävissä koko elinkaaren ajan rakennuspaikan valinnasta purkuvaiheen kierrätykseen asti. Rakennusten hiilijalanjäljen pienentäminen on mahdollista joka hankkeessa, eikä sen vähentäminen ole vaativaa. On kuitenkin ensisijaisen tärkeää keskittyä suuruusluokaltaan merkittävimpiin asioihin, jotta muutoksista olisi heti mahdollisimman paljon hyötyä.

HKL on tilannut insinööriyön aiheen suunnittelu- ja konsulttialan yritykseltä, Ramboll Finland Oy:ltä, jonka tarkoituksena on löytää vähäpäästöisempiä menetelmiä, mihin rakennesuunnittelija voi vaikuttaa. Insinööriyö keskittyy HKL:n Raide-Jokeri-hankkeen raitiovaunuvarikon rakenteiden tuottamiin päästöihin ja läpikäy mahdollisia vaikutteita, joita varikossa voitaisiin muuttaa ilmastovaikutuksen pienentämiseksi.

Insinööriyön tavoitteena on läpikäydä khk-päästöihin vaikuttavia tekijöitä teoreettisemmalta kannalta, sekä tutkia kierrätysteräksen ja vähähiilisemmän betonin, kuten vihreän betonin toimivuutta hankkeessa. Tämän lisäksi työssä on tarkoitus mitoittaa hiilidioksidipäästöiltään vähäisempiä rakenteita, joita voidaan soveltaa HKL:n tulevilla varikkohankkeissa.

## 2 Teoriaa rakentamisen elinkaarilaskentaan

Suomen tavoite on, ympäristöministeriön julkaisun ”Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä” mukaan, olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Kasvihuonepäästöjä on tämän lisäksi tarkoitus vähentää 80 prosenttia vuoteen 2050 mennessä. Näihin tavoitteisiin voidaan suuresti vaikuttaa rakennushankkeissa, esimerkiksi kuljetuksissa, jätteiden käsittelyssä, materiaalivalinnoissa, sekä energiatehokkuudessa. [1, s. 11.]

Valtion teknillisen tutkimuslaitoksen (VTT) selvitystyössä mainitaan, että uudet rakennukset aiheuttavat noin 3 miljardia kilogrammaa khk-päästöjä, joista osa syntyy ulkomailta tuotujen tuotteiden ja sähkön tuonnin takia. Päästöjä syntyy pääasiassa materiaaleista ja merkittävä osa myös sähkön ja veden käytöstä. Materiaaleihin liittyen päästöjä syntyy esimerkiksi fossiilisista polttoaineista ja prosessipäästöistä. [2, s.52.]

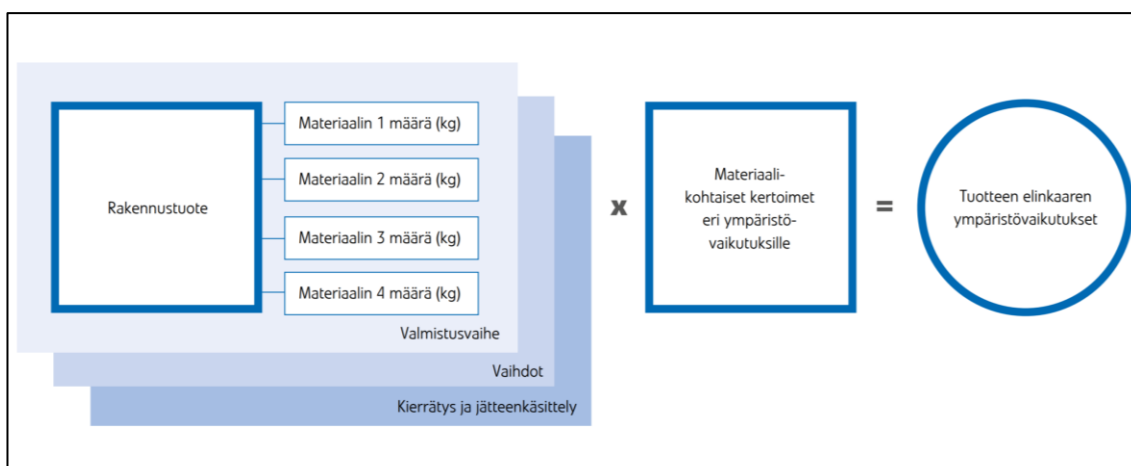
”Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä” on ensimmäinen versio yhdenmukaisesta kansallisesta järjestelmästä Suomessa, joten osa tuloksista voi mahdollisesti muuttua tulevaisuudessa kansallisten järjestelmien päivityksissä. Arviointimenetelmä tulee velvoittamaan rakennusten ilmastovaikutusten arvioimisen jo ennen rakennusluvan myöntämistä. Kyseinen työ perustuu siis tämänhetkiseen arvioon vähähiilisyydestä.

### 2.1 Rakennuksen elinkaarilaskenta

Ympäristöministeriön julkaisu ”Johdatus rakennusten elinkaariarviointiin” on rakennustuotteiden ja palveluiden ympäristövaikutteita tutkiva menetelmä, jota käytetään rakennusten ekologisen kestävyys arviointiin. Elinkaariarvioinnilla saadaan siis hyvä peruskäsitys rakennuksen elinkaaren ympäristövaikutuksista. Rakennuksen elinkaarilaskenta sisältää monia muitakin asioita kuin hiilijalanjäljen, kuten otsonikatopotentiaalin, happamoitumispotentiaalin ja rehevöitymispotenti-

aalin. Hiilijalanjälki on kuitenkin tällä hetkellä tärkein tekijä, jota pidetään merkittävänä ja tavoiteltavana asiana laskennassa ja ympäristövaikutteiden huomioimisessa. [3.]

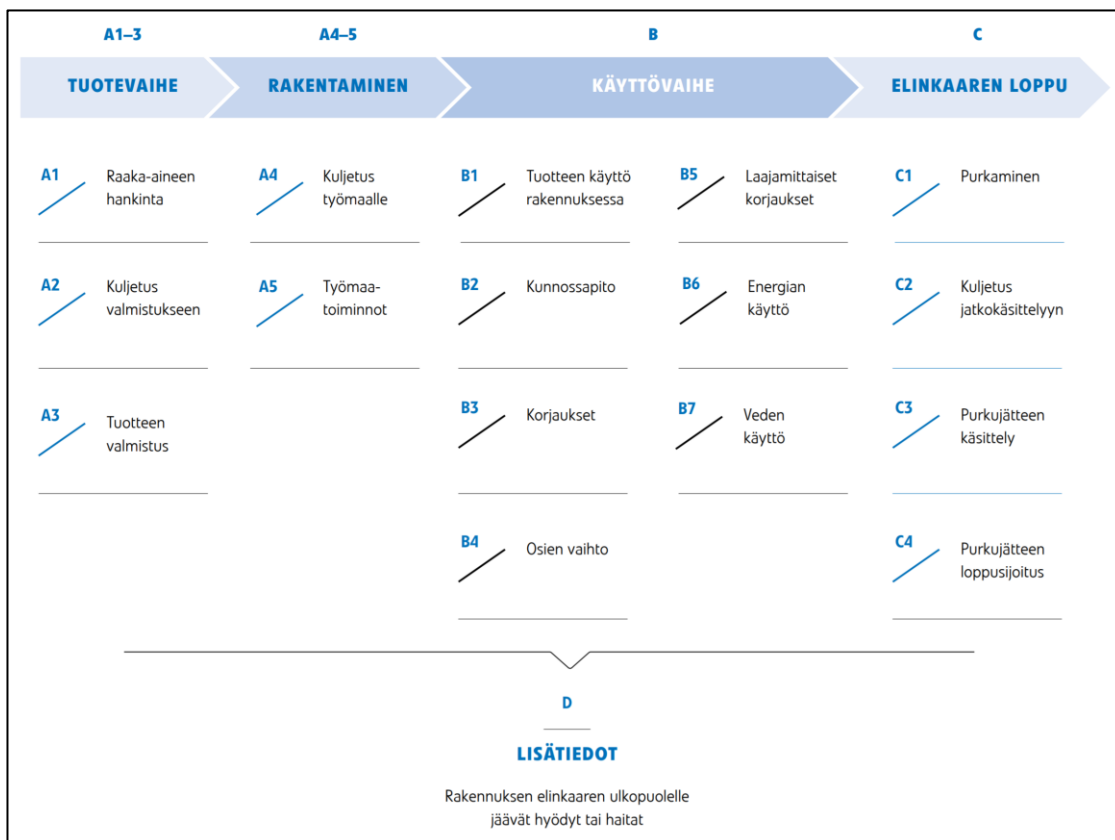
Ympäristöministeriön elinkaariarvioinnin mukainen laskentaperiaate itsessään on suhteellisen yksinkertainen. Materiaalien kilomäärät kerrotaan ympäristövaikutusten kertoimilla. Materiaalin vaihdettavuus, kierrätys ja jätteenkäsittelyn määrä sisältyvät myös rakenteen tuotteen elinkaaren ympäristövaikutuksen arvioon (kuva 1). Avoin rakennustuotteiden ja -prosessien tietokanta on vielä kehitteillä, mutta kaupallisia ja kansainvälisiä tietokantoja on tällä hetkellä olemassa. [3.]



Kuva 1. Ympäristöministeriön elinkaariarvion laskentaperiaate. [3]

Päästötietoja on mahdollista saada eri lähteistä ja eri valmistajilta, joiden tuloksissa ja laskentamenetelmissä voi olla eroja riippuen mitä standardia niissä on sovellettu. Kyseisessä työssä päästöjen materiaalikohtaisten kertoimien taulukointiin käytetään vain kansallista päästötietokantaa "co2data.fi", jotta päästötietojen tulokset olisivat keskenään verrattavissa. Tietokannasta saa selville Suomessa käytettävien rakennustuotteiden sekä rakentamisen prosessien päästötietoja, joiden avulla hiilidioksidipäästöjen arvot saadaan mitoitettua eri materiaaleille painonsa mukaan.

Materiaaleille lasketaan oma hiilidioksidi-, eli CO<sub>2</sub> -arvo, joka muodostuu eri lähteistä saatujen päästötietojen keskiarvosta. Elinkaaren vaiheet koostuvat tuotevaiheesta, rakentamisvaiheesta, käyttövaiheesta, ja purkuvaiheesta (kuva 2). [3.] Rakentamisen päästötietokannan materiaaliarvoissa huomioidaan vain tuotevaiheessa käytetyn energian kulutus. Rakentamisen aikaiset päästöt huomioidaan erillisinä kertoina elinkaaren kokonaislaskennassa.



Kuva 2. Rakennuksen elinkaaren vaiheet standardin EN 15978 mukaan. [3]

Kun rakentamisen prosessin hiilijalanjälkeä arvioidaan, täytyy huomioida mahdollinen työmaalla syntyvä ylijäämä tai hukka. Materiaalit, jotka ovat uudelleenkäytettyjä tai muilta työmailta jääneitä ylijäämiä, jätetään laskennan ulkopuolelle silloin, kun tuotteet ovat olleet osana rakennuksen suunnittelua. [1, s. 19.]

Vaihdettavien rakennustuotteiden määrä huomioidaan, jos rakenteiden käyttöikä on rakennuksen suunniteltua käyttöikää lyhyempi. Tällöin uudelleenkäytön edellytykset arvioidaan vaihtovälin kaavalla (kaava 1). [1, s. 20.] Materiaali, jolla on

lyhyt käyttöikä, joudutaan vaihtamaan rakennuksen käyttöiän aikana useita kertoja, joten joskus voi olla jopa parempi valita pitkäikäisempi CO<sub>2</sub>-päästöiltään suurempi materiaalivaihtoehto.

$$\text{Vaihtoväli} = \left[ \left( \frac{\text{Rakennuksen tavoitekäyttöikä vuosina}}{\text{Tuotteen suunnittelukäyttöikä vuosina}} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

Rakentamisvaiheen kuljetukset tuottavat merkittäviä päästöjä, joista on hyvä tehdä omat laskelmat. Kuljetuksissa on tärkeää huomioida, miten kaukaa tuotteiden tilaukset tulee toimittaa, jotta tilanne on mahdollisimman suotuista hiilidioksidipäästöjen suhteen. Kuljetusmatka lasketaan niin, että kuorman täyttöaste on menosuuntaan 80 % ja paluusuuntaan 0 %. Maamassojen laskennassa tontilta pois päin täyttöaste on 100 %. [1, s. 23.]

Työmaan hiilijalanjälki perustuu ostoenergian ja polttoaineiden päästöihin. Tähän lasketaan esimerkiksi rakennustyöt, valaistus, lämmitys ja kuivatus, rakennusylijäämä ja jätteet, sekä muut energiaa kuluttavat toimenpiteet. Nämä lasketaan polttoainepäästökertoimilla, sekä eri energiamuotojen päästökertoimilla. Rakennuksen käyttöenergian hiilijalanjälki saadaan kertomalla rakennuksen laskennallisen ostoenergian kulutus energiamuotojen päästökertoimilla. [1, s. 27.]

## 2.2 Rakennuksen hiilikädenjälki

Ympäristöministeriön määritelmä rakennuksen hiilikädenjäljelle koostuu mahdollisista ilmastohyödyistä, joita voidaan saavuttaa rakennuksen elinkaaren aikana. Näitä ovat esimerkiksi uudelleenkäytettävät ja kierrätettävät rakennusosat ja materiaalit, joilla voidaan välttää kasvihuonepäästöjä tulevilla hankkeilla. [1, s.30.]

Ylimääräinen tuotettu uusiutuva energia, rakennusmateriaaleihin varastoituva hiili, sekä rakennuksen elinkaaren aikana sitoutuva hiilidioksidi ovat myös esimerkkejä saavutettavista ilmastohyödyistä. Ylijäävä energia arvioidaan vuosittain (kWh/a). Päästökertoimet tulevat päivittymään tulevilla vuosikymmenillä (taulukko 1). [1, s.30.]

Taulukko 1. Energiamuotojen päästökertoimet (g CO<sub>2</sub>/kWh). [1]

	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100	2110	2120
Sähkö	121	57	30	18	14	7	4	2	1	1	0
Kaukolämpö	130	93	63	37	33	22	15	10	7	4	3
Kaukojäähdytys	130	93	63	37	33	22	15	10	7	4	3
Fossiiliset polttoaineet	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260
Uusiutuvat polttoaineet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Hiilivarastojen laskenta saadaan kertomalla eloperäisen materiaalin kuivapaino hiilimäärällä. Puussa hiiltä oletetaan olevan noin 50 % kuivapainosta. Sementin karbonatisoituminen voidaan laskea hiilinielun osaksi vain, jos mahdolliset karbonatisoitumisesta johtuvat korjaukset otetaan huomioon hiilijalanjäljen laskennassa. Hiilikädenjäljen aiheuttamia päästövähennyksiä ei huomioida hiilijalanjäljen laskennassa. [1, s. 32.]

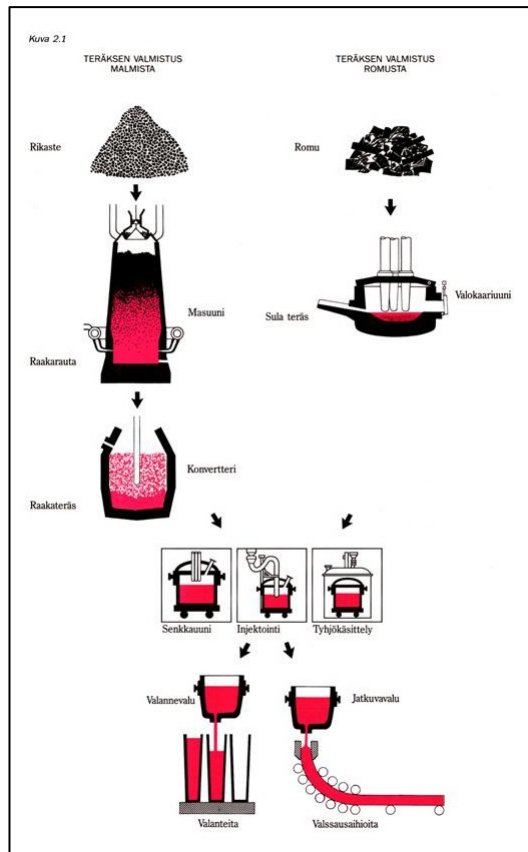
## 2.3 Materiaalien toiminta hiilidioksidin näkökulmasta

### 2.3.1 Teräs

Teräsrakenneyhdistyksen mukaan teräs on maailman kierrätetyin raaka-aine, jonka valmistaminen on suuresti energiaa kuluttava prosessi. Teräksen hyöty on sen kierrätettävyydessä, sillä sitä voidaan käyttää uudelleen lähes ikuisesti. Kierrätettävyyden avulla voidaan vähentää myös luonnonvaroja sekä hiilidioksidipäästöjä. [4.]

Metallinjalostajien teräskirjan mukaan teräksen valmistamiseen käytetään joko rautamalmia tai kierrätysterästä. Kierrätysteräksen valmistaminen luodaan jalostamalla teräs valokaariuuneissa, jotta seosaineet saadaan sulatettua (kuva 3). [5.]





Kuva 3. Teräksen valmistusprosessi ja kierrätys. [5]

Valokaariuunissa sulatuksen prosessi on energiankulutukseltaan suurempaa kuin malmipohjaisessa valmistuksessa, sillä sulatus tapahtuu seosaineiden sulattamisen takia sähkön avulla. Sähkön tuottamat päästöt eivät kuitenkaan tuota kuin noin 2 % koko teräksen päästöjen kulutuksesta. [5.] Valokaariuunituotanto aiheuttaakin kokonaisuudessaan vain alle 10 % päästöistä rautamalmipohjaiseen terästuotantoon verrattuna. [6.]

Myös malmipohjaisessa valmistuksessa kierrätysterästä voidaan hyödyntää noin 20–40 %. EU:n sisällä kierrätysterästä valmistetaan terästuotannossa jo yli 55 %. Suomessa SSAB:n teräksentuotannosta 45 % perustuu kierrätysteräkseen ja Outokummun tuotannosta 87 % on kierrätettyä terästä. [4.]

Teräksen parantamiseen Suomessa on puututtu niin fossiilisten polttoaineiden käytössä kuin itse masuunin metallurgien prosesseissa. Ruotsalainen teollisuus-

konserni SSAB tavoittelee fossiilisten polttoaineiden korvaamista kokonaan uusiutuviin polttoaineisiin pohjautuvaan menetelmään, sähköllä tuotettuun vetyyn, vuoteen 2045 mennessä. SSAB:n hiilidioksiditehokkuuden selvityksen mukaan arvio kierrätysteräksen tavoiteltujen tarpeiden kattamisesta vuoteen 2050 mennessä on noin 50 %. Tämä johtaa siihen, että rautamalmipohjaiselle teräkselle on yhä tarvetta. Masuunipohjainen tuotanto on Suomessa maailman hiilidioksiditehokkaimpia ja sitä kehitetään yhä jatkuvasti. Tällä hetkellä hiilidioksidipäästöt ovat noin 6 % pienempiä kuin keskimäärin muualla Euroopassa. [6.]

SSAB:n päästöistä noin 98 % johtuvat hiilen ja koksen eli kuivatislatus kivihillen käytöstä pelkistysaineena. SSAB:n Yhdysvaltojen tehtaalla teräs valmistetaan vain valokaariuuneissa kierrätysteräksestä. Tästä syystä vuonna 2020 CO<sub>2</sub>-päästöjen intensiteetti oli noin 60 % pienempi SSAB:n Yhdysvaltojen tehtaalla kuin Suomen tehtailla. [6.]

### 2.3.2 Betoni

Betoni on maailman eniten käytetty rakennusmateriaali ja se esiintyy teräksen kanssa yhtenä merkittävimmistä materiaaleista Raide-Jokerin hankkeessa. Suomessa betonin päästöt ovat alle Euroopan keskitason, mutta hyvissä lukemissa ne eivät vielä ole. Betonin suuri hiilijalanjälki johtuu kalkkikiveä sisältävän sementin polttamisesta eli kalsinoinnista, sekä fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Betonin sementin määrää on nykyisin vähennetty ja seosaineiden käyttöä on lisätty. Tämän lisäksi hiilidioksidille on luotu erilaisia talteenottomenetelmiä. [7.]

Betoni toimii myös hiilinieluna. Kalkkikivestä sementtiuunissa irtoava hiilidioksidi pyrkii sitoutumaan takaisin sementtikiveen muuttaen kalsiumhydroksidin kalsiumkarbonaatiksi. Kyseinen reaktio voi kuitenkin aiheuttaa betonin huokosveden pH-arvon laskemista, joka aiheuttaa karbonatisoitumisreaktion, ja voi olosuhteista riippuen käynnistää korroosion teräsbetonissa. Vanhoja betonirakenteita purkaessa tämä vapauttaa pintaa, johon hiili voi sitoutua. Betoni imee elinkaarensa aikana yhtä paljon hiilidioksidia kuin mitä kalsinoinnin aikana syntyy. [7.]

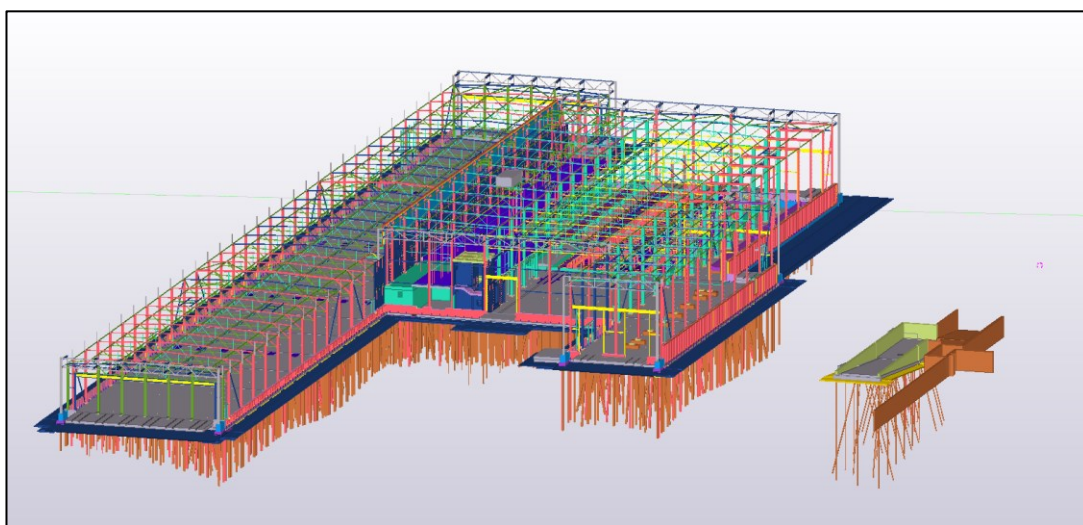
### 3 Opinnäytetyön toteuttaminen

#### 3.1 Taustatietoa opinnäytetyöstä

Kestävän liiketoiminnan konsulttiyritys Gaia Consulting Oy on tehnyt selvitystyön saadakseen luotua hiilineutraaleja ratkaisuja HKL:n Raide-Jokerin raitiovaunuvarikolle. Tästä selvitystyöstä saatua yleisluonteista näkemystä halutaan nyt viedä eteenpäin HKL:n varikkorakentamisen rakenneteknisiin ominaisuuksiin. Tähän liittyen HKL on sopinut opinnäytetyön toteuttamisesta suunnittelu- ja konsulttiyritys Ramboll Finland Oy:n kanssa.

Gaia Consulting Oy:n tekemä selvitystyö sisältää rakenneosien hiilidioksidipäästöjen laskentaa olemassa olevista materiaaleista. Laskenta on toteutettu sivuston ”co2data.fi” tarjoamalla laskentapalvelulla sekä väyläviraston olemassa olevien tietojen avulla. Gaian selvitystyö ei kuitenkaan tarkastele itse rakennusta vaan pelkästään rakennuksen infraa (liite 1). Hiilidioksidipäästöjen laskenta on tässä työssä siis tehtävä sekä vanhoille rakenteille, että uusille mitoitetuille ratkaisuille.

Referenssimallina opinnäytetyötä varten toimii Raide-Jokeri-hankkeen yhteydessä suunniteltu rakennusvaiheessa oleva raitiovaunuvarikko (kuva 4). Mallin tarkoituksena on toimia raamina etsittäessä toimivia hiilineutraaleja ratkaisuja.



Kuva 4. Tekla Structures malli Raide-Jokerin varikosta. (Kuva: Elias Koponen)

### 3.2 Tutkimusmenetelmät ja tulosten luotettavuus

Insinööriyön tavoitteena on selvittää, minkälaisilla menetelmillä Raide-Jokerin raitiovaunuvarikon hiilidioksidipäästöjä olisi voitu pienentää. Insinööriyön tulokset perustuvat asiantuntijoiden tietoon, laskentaan, ja teoriaan, joka pääsääntöisesti koostuu yritysten ja yhdistysten antamasta informaatiosta.

Ramboll Finland Oy toimii insinööriyössä ohjaavana yrityksenä. Hiilijalanjäljen laskennan tulosten tarkastamisessa toimii kestävän kehityksen päällikkö Laura Kainulainen. Puurakentamisen mitoittamisessa tarkastajana toimii puurakentamisen erikoisasiantuntija Emil Jansson. Yrityksen puoleisena ohjaajana ja hankkeen, sekä rakennesuunnittelun tulosten tarkastajana toimii projektinjohtaja ja Raide-Jokeri-hankkeen vastuullinen rakennesuunnittelija Terhi Ala-Ilkka.

Tutkimustietoa vähähiilisistä betoniratkaisuista kerätään muiden yritysten edustajilta ja asiantuntijoilta vapaamuotoisilla puhelinkeskusteluilla. Vähähiiliset betoniratkaisut ovat vielä sen verran tuoreita, että julkaistua tietoa ei ole suurissa määrin. Haastattelujen tehtävänä on selvittää vähähiilisten betoniratkaisujen toimivuutta Raide-Jokerin raitiovaunuvarikon kaltaisessa hankkeessa. Puhelinhaastatteluja ei analysoida erillisessä osiossa, vaan niistä saatua tietoa hyödynnetään teorian yhteydessä.

Laskenta on toteutettu käsinlaskennan, laskentapohjien ja mitoitusohjelmien avulla. Teoria perustuu pääsääntöisesti yhdistysten tietoon, Suomen lakeihin ja standardeihin, sekä yritysten antamaan tietoon. Yritysten jakamaa tietoa läpikäydään tarkemmin, sillä tuotekohtainen tieto voi olla liioiteltua tai markkinointia varten liian lupaavaa.

Puumateriaalien käyttö on materiaalipäästökertoimien näkökulmasta perusteltua, tosin kaikkia rakenteita ei kuitenkaan ole järkevää muuttaa puisiksi. Tämän takia osalle betoni- ja teräsrakenteista on tarkoitus löytää menetelmiä materiaalia vaihtamatta, jotka ovat hiilijalanjäljeltään pienempiä. Tähän liittyen tehdään selvitystä esimerkiksi vähähiilisen betonin toimivuudesta hankkeessa. Selvitystä tehdään

teorian ohessa työmaalla vastaavan työnjohtajan Kalle Jääskeläisen, sekä vastuullisen rakennesuunnittelijan mielipiteitä kuunnellen.

Työssä tarkastellaan lämmöneristeen valintaa, sekä julkisivun erilaisia vaihtoehtoja rakenteen hiilidioksidipäästöjen näkökulmasta. Muita tekijöitä, jotka voivat olla suorassa vaikutuksessa raitiovaunuvarikon CO<sub>2</sub>-päästöjen vähentämiseen, kirjataan myös ylös, jotta mahdollisia jatkoselvitystä vaativia asioita kyetään varikkojen rakentamisessa hyödyntämään.

### 3.3 Hypoteesit ja raja

Pääasialliseksi tutkimuskysymykseksi Gaia Consulting Oy:n työn perusteelta nostettiin teräksisen rungon mitoittaminen puurakenteisena, koska rakentamisen päästötietokannan mukaan puulla on pienet materiaalipäästökertoimet. Raitiovaunuvarikon runko on massaltaan suuri, jolloin hiilijalanjälki pienenee oleellisesti.

Rungon mitoittamisen tavoitteena on antaa suuntaa siitä, onko varikon kantavien rakenteiden toteuttaminen puumateriaaleilla mahdollista tai edes kannattavaa, ja kuinka paljon puisen varikon toteuttamisella voitaisiin vähentää CO<sub>2</sub>-päästöjä.

Rungon osalta insinöörityö on rajattu koskemaan vain säilytyshallin yhtä liikunta-saumalohkoa, mutta sen perusteella johtopäätöksiä voidaan tehdä koko rakennuksen rungolle.

Hiilijalanjälki saadaan kertomalla materiaalin määrä päästökertoimella. Rakennesuunnittelijan keinoina pienentää hiilijalanjälkeä on vähentää materiaalin määrää, muuttaa rakennetyyppejä parantamalla U-arvoa, eli päästönläpäisykerrointa, tai vaihtaa materiaali tuotteeseen, jolla on pienempi päästökerroin.

Muita keinoja hiilijalanjäljen pienentämiselle on esimerkiksi kompensoida tuotettuja hiilidioksidipäästöjä. Kompensointimenetelmät eivät kuitenkaan ole rakennesuunnittelijan päätöksessä, joten niihin vain viitataan tässä työssä. Työ rajataan koskemaan siis ratkaisuja, joihin rakennesuunnittelijat voivat vaikuttaa.

## 4 Raide-Jokerin varikon rakennetekniset päästövähennysmahdollisuudet

### 4.1 Raitiovaunuvarikkomalli

Työssä pohjana käytetty rakennusmalli on suuri noin 10 000 m<sup>2</sup> varikkorakennus, joka koostuu kahdesta pääosiosta (kuva 4); pitkästä puolilämpimästä tilasta, joka toimii raitiovaunujen säilytystilana (kuva 5), sekä lämpimästä huoltohallista, joka on korkeampaa tilaa ja koostuu reuna-alueilla kahdesta kerroksesta (kuva 6).



Kuva 5. Raitiovaunuvarikon säilytyshalli rakennusvaiheessa. (Kuva: Elias Koponen)

Yläpuolinen kerros koostuu IV-konehuoneesta, neuvottelutiloista sekä toimistotiloista ja alapuolinen kerros teknisistä tiloista, taukutiloista ja väestönsuojasta. Toisessa kerroksessa on paikoin puurakenteinen katto, jonka yläpuolelle muodostuu ullakkotila.



Kuva 6. Huoltohalli rakennusvaiheessa. (Kuva: Elias Koponen)

Katto on tehty poimulevystä, jossa on käytetty kivivillaa lämpöeristeenä. Välipohjana on käytetty ontelolaattoja, ja huoltohallin päätyovet on tehty lasista. Alapohjana toimii kerroksellinen rakenne, joka koostuu 350 mm paksusta paalulaatasta, sekä vaihtelevia korkeuksia omaavista, noin 400 mm paksuista sorakerroksista ja pääsääntöisesti 180 mm paksuista pintalaatoista.

Rakennuksen kantava runko on tehty kokonaan teräsrakenteilla (kuva 7). Teräsbetonirakenteita ovat porrashuone, väestönsuoja, välipohjan ontelolaatat, sokkelielementit, perustukset, alapohjarakenteet, palomuurin elementit ja oveneduslaatat. Säilytyshallin julkisivussa on eristeenä käytetty 175 mm Paroc kivivillaa, ja huoltohallissa 240 mm paksua kivivillaa.





Kuva 7. Raide-Jokerin säilytyshallin teräksinen runko rakennusvaiheessa.  
(Kuva: Elias Koponen)

Sokkelielementille, sekä pintalaatalle on käyttöiäksi sovittu 50 vuotta. Väestönsuoja on tehty paikallavaluna ja rakennus on kokonaan perustettu paalujen varaan. Paalulaatta sisältää siis useita vinopaaluja raitiovaunujen jarrutuksen ja tuulikuormien aiheuttamia vaakakuormia varten. Rakennuksen suunniteltu paloluokka on P1, ja palonkestovaatimus on palomuurin kohdalla R90 ja muualla R60.

#### 4.2 Säilytyshallin mitoituksen lähtötietoja

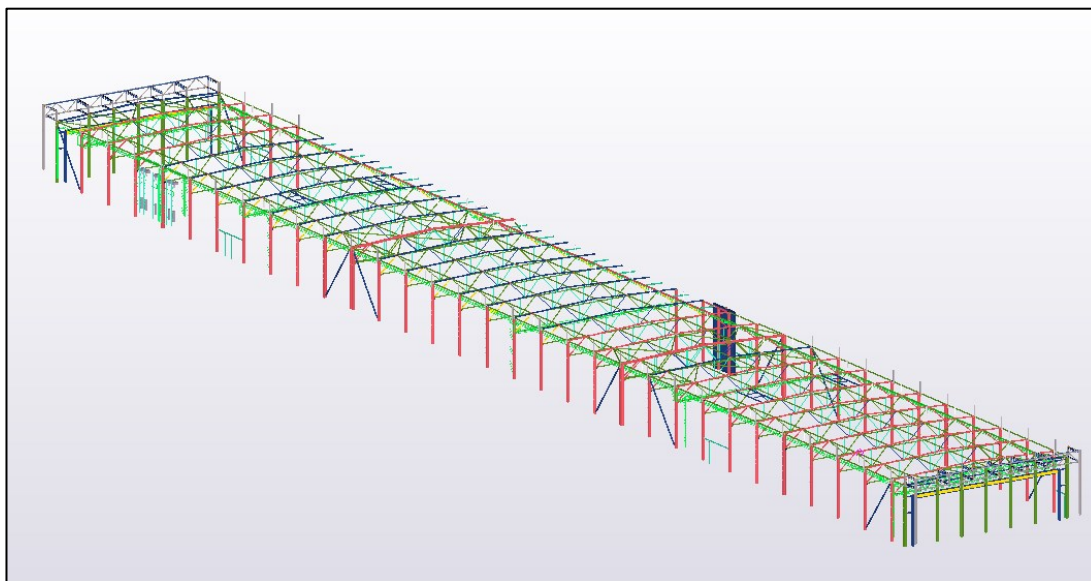
Kaikki rakenteet suunnitellaan Eurokoodien ja Suomen Rakennusinsinöörien Liiton RIL:n ohjeiden mukaan. Kappaleessa käydään läpi Roihupeltoon suunnitellun raitiovaunuvarikon päästöjen määriä ja tutkitaan puurakenteen toimivuutta varikon runkoratkaisuna.

Insinööritöön puisen mallin mitoistustarkastelu on toteutettu RFEM- ja Finnwood-laskentaohjelmilla, Puufon Excel-laskentapohjilla, sekä käsinlaskennan avulla. Onnettomuustilanteet kantaville rakenteille mitoitetaan Standardin SFS-EN 1991-1-7 onnettomuuskuormien mukaan.



Rakennuksen suunniteltu käyttöikä on 100 vuotta kaikille runkorakenteille. Puurakenteiden laskennassa käytetään Puuinfon lyhennettyä suunnitteluohjetta, joka perustuu RIL 205-1-2017 ja RIL 205-2-2019 puurakenteiden suunnitteluohjeisiin. Puurakenteiden suunnittelu perustuu standardeihin SFS-EN 1995-1-1 ja EN 1995-1-2.

Teräsrunko (kuva 8) on jäykistetty pilarien ja ristikoiden muodostamilla kehärakenteilla, pilarilinjoille sijoitetuilla vinositeillä, sekä katon jäykistysristikoilla.



Kuva 8. Tekla Structures malli säilytyshallin teräksisestä rungosta. (Kuva: Elias Koponen)

Roihupellon säilytyshallin suunniteltu paloluokka on P1 ja palonkestovaatimus R60, eli rakenteiden kantavuus palotilanteessa täyttää 60 minuutin vaatimuksen. Kantavan rungon seuraamusluokka on CC2 ja luotettavuusluokka RC2. Rakennus on siis suunniteltu keskisuuria seuraamuksia ajatellen. Insinööriyössä mitoitettun puisen rungon luokat ja vaatimukset tulevat vastaamaan Roihupellon säilytyshallin suunnitelmia.

### 4.3 Säilytyshallin rungon mitoittaminen

Roihupellon varikon teräspilarit kulkevat ulkoseinälinjalla sekä huoltohallin ja säilytyshallin välisellä linjalla 6 metrin välein. Pilarit on mitoitettu kestäämään tuuli- ja lumikuormia, sekä raitiovaunun törmäyskuormia, joita käsitellään onnettomuuskuormina. Teräksisen rungon putkiprofiileista valmistettujen teräsristikoiden kattorakenne on kantava. Ristikon ja pilarin väliset liitokset ovat jäykkiä, koska ylä- ja alapaarteet ovat kiinnitettyinä pilariin. Kattorakenteena toimiva poimulevy tukeutuu kattoristikoihin.

Työssä mitoitettu puurakenteinen runko suunnitellaan mahdollisimman samoilla äärimitoilla kuin Roihupellon runko, jotta CO<sub>2</sub>-päästöjen vähennykset olisivat mahdollisimman suoraan verrattavissa. Näin vältetään hallin tilavuuden kasvamista, mikä lisää materiaalin määrää ja näin ollen myös CO<sub>2</sub>-päästöjä. Puisen varikon pilarit ovat jakoväleiltään ja hyötykuormiltaan samat kuin Roihupellon hallissa.

Puurakenteisen rungon kuormitustilanteet on mallinnettu Dlubal RFEM -ohjelmalla. Mallissa on tarkasteltu yksittäistä säilytyshallin kehärakennetta, johon kuormitukset on mallinnettu viivakuormana 6 metrin matkalta. Ripustuskuormat, lumikuormat, tuulikuormat, sekä törmäyksien aiheuttamat onnettomuuskuormat pysyvät suuruuksiltaan samoina kuin Roihupellon varikon kehärakenteella.

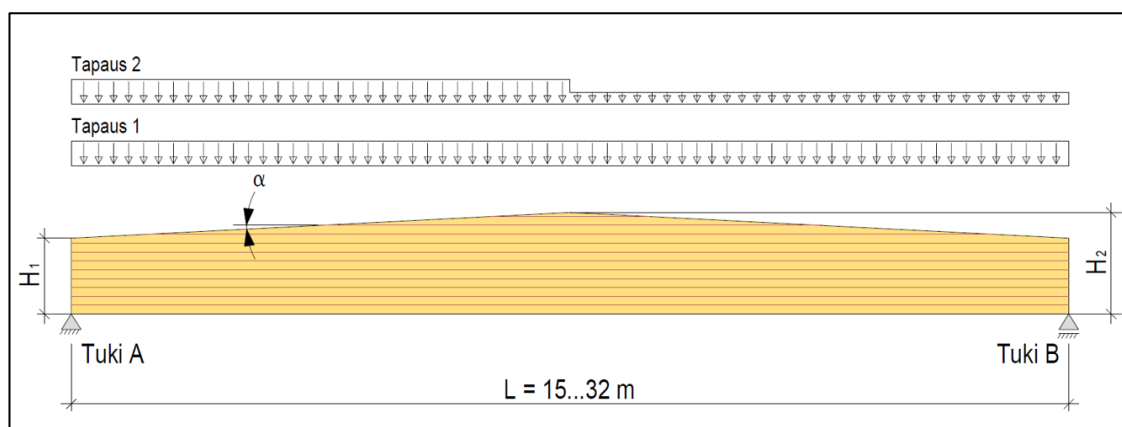
Kuormitusyhdistelmät on saatu RFEM-mallin ja mitoitusohjelmien avulla, jotka perustuvat standardien SFS-EN 1990 ja 1991 mukaisiin kuormitusyhdistelmiin (taulukko 2).



Pilarien alapäiden liitokset ovat mallissa toteutettu nivelellisinä, sillä kuormista aiheutuvan momentin siirtäminen perustuksiin ei ole kyseisessä kohteessa mahdollista ilman, että paalutuksen toiminnallisuutta ei jouduttaisi tarkastelemaan uudelleen.

#### 4.3.1 Harjapalkki

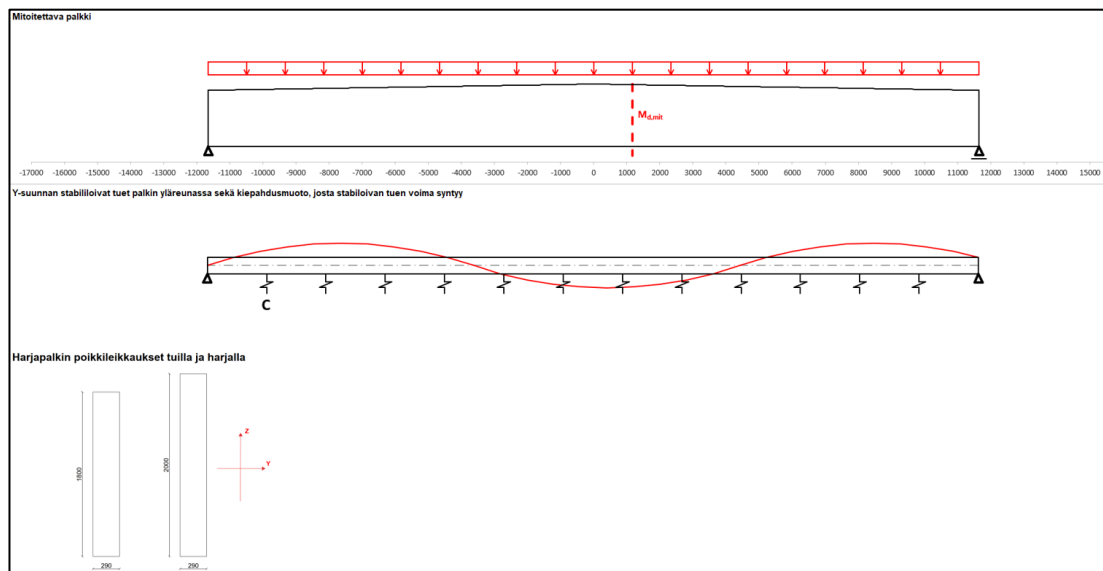
Suorakaiteisten liimapuupalkkien yleinen enimmäispituus on tavallisesti 12 m, mutta esikorotettuina tilauksesta valmistettuna palkki voidaan toteuttaa suuremmillakin jänneväleillä. [8]. Harja- tai mahapalkkeina, eli palkkeina, joiden taivutusjännitys jakauma ei ole tasainen, saadaan pituuksista jopa 30-metrisiä. Harjapalkkeille tarkastelu tehdään sekä symmetriselle, että epäsymmetriselle kuormitustilanteelle (kuva 10). [9.]



Kuva 10. Harjapalkin dimensiot ja kuormitustilanteet (liite 3).

Säilytyshallin harjapalkki on mitoitettu sekä symmetrisessä, että epäsymmetrisessä tilanteessa Puuinfon Excel-laskentapohjan avulla, joka perustuu RIL 205-1-2017 puusuunnitteluohjeeseen. Harjapalkki on toteutettu 1-aukkoisena jänneväliltään 23,3 metrisenä ja palkkijaoltaan 6 metrin pituudella (kuva 11). Liimapuulamellien paksuus on 45 mm. Palkin leveys on 290 mm, korkeus tuella on 1,8 metriä, ja harjalla 2 metriä.

Yläpuoliset Kerto S-sekundääripalkit huomioidaan harjapalkin suhteen 3-aukkoi-  
sina estäen harjapalkin kiepahduksen 1,8 metrin välein. Primäärinen harjapalkki  
toteutetaan esikorotettuna korkeuteen  $L/300$ . Materiaalin lujuusluokkana käyte-  
tään GL30h yhdistettyä liimapuuta. Rakenne lukeutuu käyttöluokkaan 2, sillä ra-  
kenne tulee olemaan puolilämpimässä, mutta katetussa ja tuuletetussa tilassa,  
sekä sivuiltaan kastumiselta suojattu. Palotilannetta tarkastellaan hetkellisenä ti-  
lanteena käsinlaskennalla.



Kuva 11. Mitoitetun liimapuuharjapalkin dimensiot ja kiepahdusmuoto (liite 3).

Materiaaliominaisuudet käsinlaskennassa valitaan standardin SFS-EN 1995-1-1 mukaan ja liimapuulle kertoimet saadaan standardista EN 14080. Suunnitteluarvot saadaan muunnoskertoimen  $k_{mod}$ , liimapuun osavarmuusluvun  $\gamma_M$ , sekä korotuskertoimen  $k_h$  avulla (kaava 2).

$$f_d = k_h \cdot k_{mod} \frac{f_k}{\gamma_M} \quad (2)$$

#### 4.3.2 Harjapalkin palomitoitus

Harjapalkille ei löydy palokuormitettua Excel-laskentapohjaa, joten toimivuus on tarkasteltava käsinlaskennalla (liite 4). Palotilanteessa dimensioita on pienen-

netty palomitoituksen ohjeiden mukaan ja kuormitustapaukset tarkastellaan onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelmillä.

Harjapalkin mitoitus lasketaan käsin Eurokoodin 5 mukaisesti. Laskentaan on hyödynnetty puuinfon Eurokoodin lyhennettyä suunnitteluohjetta. Rakenteet mitoitetaan kestämään palotilanteita kantavuudeltaan 60 minuuttia, eli luokassa R60.

Palomitoituksessa tulipalon aiheuttamaa tilannetta käsitellään onnettomuustilanteena, joten kuormien tarkastelussa käytetään onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelyä (kaava 3). [10, s.10.] Kaavassa  $G_{k,j} = 13,53 \text{ kN/m}$  on pysyvien kuormien ominaisarvo,  $Q_{k,l} = 14,96 \text{ kN/m}$  on lumikuorman ominaisarvo,  $Q_{k,h}$  on hyötykuorman ominaisarvo, jota ei rakenteessa esiinny ja  $Q_{k,t} = 1,64 \text{ kN/m}$  on tuulikuorman ominaisarvo. Kuormien suuruudet saadaan kuormia varten mallinnusta RFEM-mallista. Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelystä saadaan laskettua harjapalkille mitoittava kuormitusarvo  $21,01 \text{ kN/m}$ .

$$\max \begin{cases} G_{k,j} + 0,5Q_{k,l} + 0,3Q_{k,h} \\ G_{k,j} + 0,2Q_{k,t} + 0,3Q_{k,h} + 0,2Q_{k,l} \end{cases} \quad (3)$$

Kaikissa puurakenteisissa pinnoissa, jotka ovat palolle alttiita, tulee huomioida pintojen hiiltymisen. Palkkirakenteet ovat suorakaidepoikkileikkauksia, joten ne ovat palolle alttiita monesta sivusta, näin ollen hiiltymissyvyyden laskemiseen käytetään hiiltymisnopeutta  $\beta_n$ , johon sisältyy kulmanpyöröstys ja halkeamisen vaikutus. Nimellinen hiiltymissyvyyden mitoitussarvo saadaan kaavasta 4, jossa  $t$  on palorasituksen kesto minuutteina, eli 60 minuuttia. [10, s.45.]

$$d_{char,n} = \beta_n t \quad (4)$$

Hiiltymisnopeuden arvo saadaan puuinfon lyhennetyn suunnitteluohjeen taulukosta (taulukko 3). Liimapuupalkille hiiltymisnopeuden arvoksi saadaan taulukosta hiiltymisnopeuden mitoitussarvo  $\beta_n = 0,7$ . Näin saadaan nimellisen hiiltymissyvyyden mitoitussarvo,  $d_{char,n} = 42 \text{ mm}$ . [10, s. 46.]

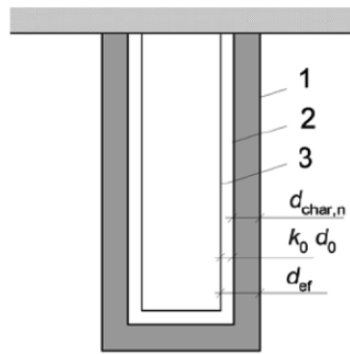
Taulukko 3. Eurokoodin hiiltymisnopeuden mitoitusarvot. [10, s. 46]

	$\beta_0$ mm/min	$\beta_n$ mm/min
<b>a) Havupuu</b>		
Liimapuu, jonka ominaistiheys $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Sahatavara, jonka ominaistiheys $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
<b>b) Lehtipuu</b>		
Sahatavara tai liimapuu, jonka ominaistiheys $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Sahatavara tai liimapuu, jonka ominaistiheys $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
<b>c) LVL</b>		
Kerto-S / Kerto-Q, jonka ominaistiheys $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Kerto-T / Kerto-L, jonka ominaistiheys on $\geq 410 \text{ kg/m}^3$	0,7	0,75
<b>d) Levyt ja laudoitukset<sup>1)</sup></b>		
Laudoitukset (lauta- ja paneeliverhoukset)	0,9	–
Vaneri	1,0	–
Lastulevy, OSB-levy, kovalevy, MDF-levy	0,9	–

Palkkien mitoittamisessa käytetään tehollista hiiltymäsyvyyttä, jossa vähennetään alkuperäisestä poikkileikkauksesta tehollisen hiiltymissyvyyden  $d_{ef}$  verran kaikilta palolle alttiilta sivuilta. Tehollinen hiiltymäsyvyys saadaan kaavasta 5, missä  $d_0 = 7 \text{ mm}$  ja  $k_0 = 1$  antavat tehollisen poikkileikkauksen arvon (kuva 12). [10, s. 46.]

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 \quad (5)$$

Kaavasta saadaan  $d_{ef} = 49 \text{ mm}$ . Tehollisen hiiltymäsyvyyden avulla voidaan määrittää rakenteiden teholliset poikkipinta-alat. Palkille palo on kolmella sivulla, joten suorakaidepoikkileikkaus saadaan palkille kaavasta 6.



Kuva 12. Jäännös- ja tehollinen poikkileikkaus. Numero 1 kuvastaa alkuperäistä poikkileikkausta, 2 kuvastaa hiiltymärajaa ja 3 kuvastaa tehollista poikkileikkausta.

Tehollinen poikkipinta-ala palkille (kaava 6).

$$A_{ef} = (h - d_{ef})(b - 2d_{ef}) \quad (6)$$

Tästä saadaan palkille tehollinen korkeus tuella  $h_{ef1} = 1751$  mm, harjalla  $h_{ef2} = 1951$  mm ja palkin leveydeksi  $b_{ef,palkki} = 192$  mm. Onnettomuustilannetta tarkastellaan hetkellisenä ja kuormitustilanne on onnettomuustilanteen kuormien mukainen.

Harjapalkin palomitoituksen käsinlaskennassa on tarkasteltu harjapalkin leikkaus- ja taivutuskestävyyttä, sekä veto- ja kiepahduskestävyyttä palkin kriittisissä kohdissa. Myös taipumaa ja Y-suunnan stabiloivan tuen voimaa on tarkasteltu. Käsinlaskennan avulla nähdään, että harjapalkki kestää mitoitettun palotilanteen (liite 4).

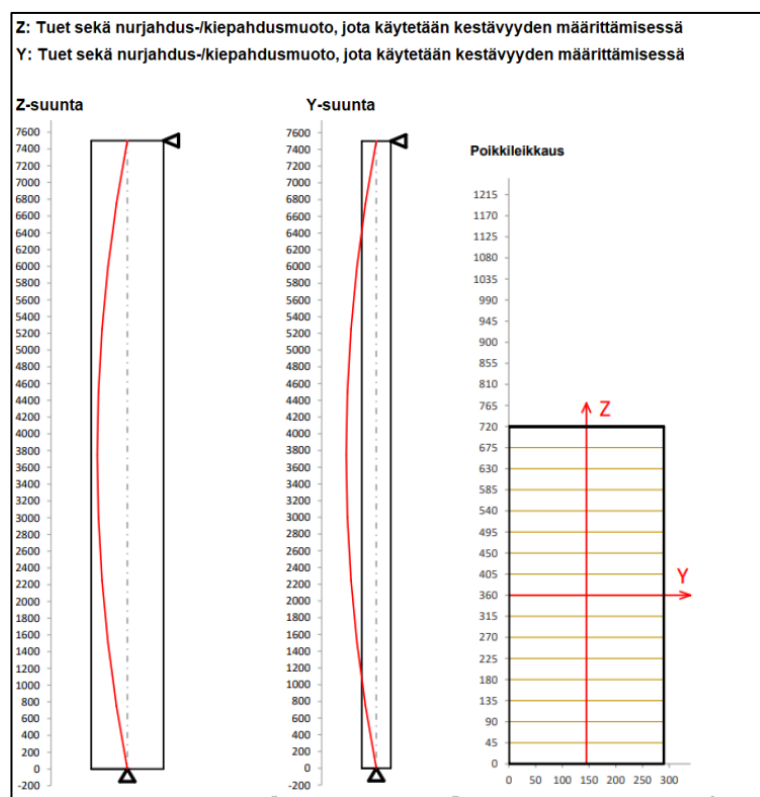
#### 4.3.3 Liimapuupilari

Liimapuupilari mitoitetaan vastaamaan Roihupellon varikon teräksisen pilarin pituutta, joka on 7,5 metriä. Poikkileikkaukseltaan lyhyempi sivumitta on 290 mm



ja pidempi on 720 mm (kuva 13). Pilarin mitoitus on toteutettu nivelellisesti päistään tuettuna ja onnettomuustilanteessa dynaamiseksi kuormaksi huomioidaan raitiovaunun 300 kN suuruiset vaakasuuntaiset törmäyskuormat.

Epäkeskisyys pilarissa tarkastellaan murtorajatilanteessa pilarin poikkileikkauksessa ja se saadaan kaavalla  $L/150$ , joka sijaitsee 50 mm poikkileikkauksen keskipisteestä. Kuormitustilanteet on tarkasteltu RFEM-mallin avulla (liite 2). Pilarin mitoitus on tarkasteltu palo- ja onnettomuustilanteessa, sekä keskipitkässä aika- luokassa Eurokoodin EN 1995-1-1 mukaan.



Kuva 13. Liimapuupilarien dimensioid ja kiepahdusmuoto Puuinfon laskentapohjalla (liite 5).

Liimapuupilarin suuren poikkileikkauksen myötä kehän toteuttaminen puisena on hankalaa, sillä leveät pilarit aiheuttavat myös kasvua hallin pinta-alassa. Tämä puolestaan lisää CO<sub>2</sub>-päästöjä ja oletettavasti vaikuttaa hallin toiminnallisuuteen.

Roihupellon säilytyshallin kehärakenne ei ole sellaisenaan toteutettavissa puurakenteisena, sillä suuret dynaamiset kuormat aiheuttavat pilarin alapäähän suuria momenttikuormituksia, joita ei voi viedä perustuksiin. Nivelellisen pilarin toteuttaminen on kyseisessä varikossa vaikeaa, koska hallin jäykistäminen koituu ongelmaksi. Näin ollen pilarin alapään liitoksen toteuttaminen jäykkänä ei ole mahdollista.

Pilarin palomitoitusta ei tarkastella, sillä liimapuupilarin toteuttamista ei koeta mahdolliseksi kyseisessä hankkeessa. Pilarien muuttaminen puupilareiksi on jo pelkästään onnettomuustilanteen vaikutuksen ja suurien taipumien vaikutuksen takia riskialtista.

#### 4.3.4 Säilytyshallin rungon tulokset

Hallin kantavan rungon toteuttaminen puisena ei ole kyseisessä tapauksessa järkevää, koska insinööriyössä tutkitun varikon suunnitelmia ei projektin suunnitteluvaiheessa tehty puumateriaalin näkökulmasta. Tässä tapauksessa runkorakenne on suunniteltu teräksisenä hallin rakentamisen alusta lähtien. Teräsristikon korvaaminen puisella harjapalkilla ei todennäköisesti ole liitosteknisistä syistä järkevästi toteutettavissa.

Säilytyshallin alkuperäinen teräsrunko on tehty kestäväksi juuri sille tarkoitettu kuormitustilanne. Näin ollen dynaamiset kuormat, liitostekniikka, kantavuus, ja muut rakennetekniset, sekä rakennusfysikaaliset tekijät on mietitty teräksisen rungon näkökulmasta. Jos rakennuksen runko halutaan toteuttaa puisena, on suunnitelma oltava tiedossa alusta alkaen, arkkitehtisuunnittelua myöten.

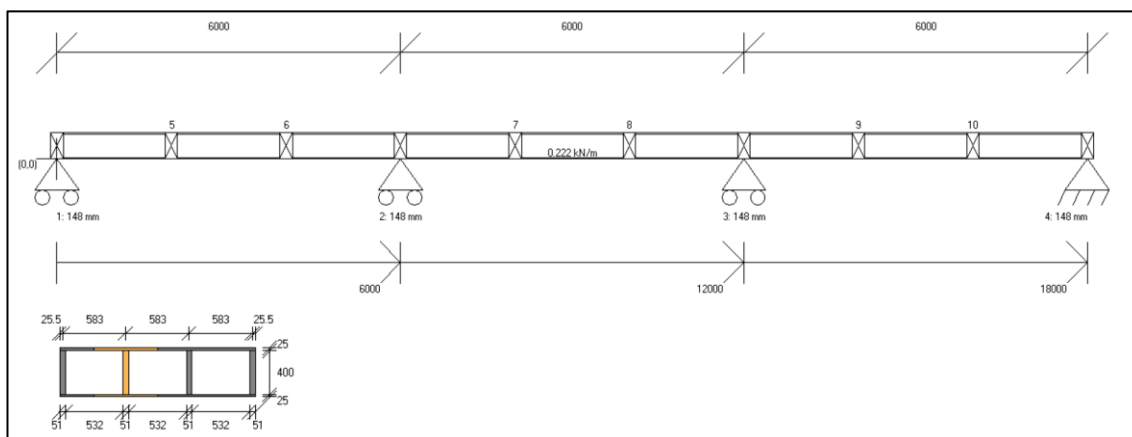
#### 4.4 Säilytyshallin puinen kattorakenne

Kerto-Ripa-elementit ovat Metsä Woodin kehittämiä pitkiä jännevälejä omaavia lattia- ja kattorakenteita, jotka voivat olla pisimmillään 24-metrisiä. Rakenne voidaan toteuttaa avoimena tai suljettuna ja siihen voidaan lisätä tarpeen mukaan

lämmöneristettä. Kattorakenteena toimiva koteloelementti liitetään pystyrakenteisiin alalaipan välityksellä. [8.]

Säilytyshalliin mitoitettu kotelolaatta on laskettu Finnwoodin laskentaohjelmalla. Kotelolaatta koostuu 400 mm korkeista LVL S-palkeista ja 25 mm paksuista LVL-Q kansista, eli viilupuusta. Kotelolaatta toteutetaan insinööriyössä 3-aukkoisena, kolmella 6 metrin jännevälillä (kuva 14).

Kotelolaatan alapinnan höyrynsulkuna toimii alapinnan vaneri. Hallirakenteen lyhyempään suuntaan kotelolaattoja on suunniteltu 13 kappaletta 24 metrin jännevälille, eli yksittäisen kotelolaatan leveys on noin 1,8 metriä. Peruskuormat määräytyvät Roihupellon säilytyshallille laskettujen kuormien mukaan.



Kuva 14. Finnwood-ohjelmalla mitoitetun Kerto-Ripa-kotelolaatan dimensiot (liite 6).

Rakenneosan omapaino on 2,47 kN/m ja tämän lisäksi rakennetta rasittaviin pysyviin kuormiin lukeutuu vesikaton kuorma, sekä ripustuskuorma. Tarvittaessa lämmöneristeet ja vesikate asennetaan tehtaalla. Palo- ja onnettomuustilanne on tarkasteltu Finnwoodin palomitoitusohjelman avulla, joka huomioi Eurokoodin EN 1995-1-2 määräykset kyseessä olevalle mitoitukselle. Palomitoitus on tarkasteltu myös puufon laskentapohjalla palonkestoluokassa R60 liitteessä 7.

Kotelolaatta voidaan toteuttaa Roihupellon teräksiselle runkoratkaisulle niin, että Roihupellon poimulevystä rakennettu katto vaihdetaan Kerto-Ripa-kotelolaattaan. Kattorakenne ei toimi säilytyshallissa jäykistävänä rakenteena, joten jäykistämistä ei tarvitse kyseiselle ratkaisulle selvittää. Kattoelementin on kuitenkin toimittava nurjahdustukena ristikon yläpaarteelle.

Kerto-Ripa-kattoelementin lämmöneristysten on vastattava lämmöneristävyydeltään Roihupellon poimulevykattorakenteen U-arvoa, jotta energiankulutus ei kasva käytön aikana ja näin lisää CO<sub>2</sub>-päästöjen kulutusta käyttövaiheessa. Säilytyshallin kohdalla U-arvo on 0,14 W/m<sup>2</sup>K ja huoltohallin kohdalla U-arvossa päästään 0,09 W/m<sup>2</sup>K arvoon. Puukattorakenteen U-arvon on siis oltava korkeintaan 0,09 W/m<sup>2</sup>K.

Kotelolaatan lämmöneristeenä toimii 400 mm paksu kerros kivivillaa. Rakenteen koolauspuina toimivat 51 mm paksut Kerto-S rivat k600 jakovälein. Rakennetyypin U-arvo on 0,092 W/m<sup>2</sup>K. U-arvo on määritetty liitteessä 8.

Kotelolaatta vaikuttaa myös urakkajakoihin, koska kotelolaatat järjestetään hankkeelle yleensä tuoteosakauppana. Elementti valmistetaan siis kokonaisuutena, eriste huomioiden.

#### 4.4.1 Kattorakenteen ilmastovaikutukset

Rakenteen CO<sub>2</sub>-päästöt lasketaan sekä Roihupellon varikon teräksiselle poimulevyille, että puiselle Kerto-kattoelementille, jotta tulokset olisivat toimivassa kattorakenteessa vertailukelpoisia. Kyseiset tulokset toimivat siis suuntaa antavina toimivan hallin tapauksessa. Laskentaan käytetään ympäristöministeriön rakentamisen päästötietokannan ”CO<sub>2</sub>data.fi” tietoja. Laskenta on toteutettu rakentamisluvan hakemiseen perustuvilla konservatiivisilla arvoilla.

Teräsrunkoisen säilytyshallin päästöt ovat suuria teräksen suuren hiilijalanjäljen takia. Teräksen hiilidioksidin arvo on 3 kg CO<sub>2</sub>e /kg, eli 3 kilogrammaa hiilidioksi-

dia, kilogrammaa materiaalia kohden ja poimulevyille se on 2,8 kg CO<sub>2</sub>e /kg. Liimapuun konservatiivinen arvo on vain 0,13 kg CO<sub>2</sub>e /kg ja viilupuulla (LVL) se on 0,36 kg CO<sub>2</sub>e /kg [11.]. Näin ollen puu on siis CO<sub>2</sub>-päästömääriltään noin 10–20 kertaa pienempi kuin teräs.

Säilytyshallin teräksisen poimulevyn paino on selvitetty Tekla Structures mallin ja tuotevalmistajan Ruukin tietojen avulla. Puisen Kerto-Ripa-kotelolaatan paino on laskettu materiaalin tiheyden ja laattojen, sekä sekundääripalkkien tilavuuksien avulla. Taulukkoon 4 on kirjattu poimulevyn ja kotelolaatan painot sekä hiilidioksidipäästöt yhden kehän pituiselta matkalta.

Taulukko 4. Säilytyshallin kattorakenteen kuormitukset 6 metrin matkalta.

Rakenne	Paino (kg)	CO <sub>2</sub> -päästöt (kg)
Poimulevy (6 m)	2115	5 652,9
Kerto-Ripa-kotelolaatta (6 m)	7100	2556,1

Pelkästään kattorakenteita vertaamalla CO<sub>2</sub>-päästöjen pienentyminen puiselle kattorakenteelle on noin 45 %. Kotelolaatta on 3 kertaa poimulevyratkaisua painavampi, joka pitää huomioida alapuolisissa rakenteissa. Tämä voi kasvattaa teräsrungon poikkileikkauksen pinta-alaa, joka lisää myös hiilidioksidipäästöjä. Teräsrungon massamäärää voidaan kasvattaa noin 50 % ennen kuin kattoratkaisu ei ole enää päästövähennyksien kannalta järkevää.

Katon vaihtaminen säilytyshallin kohdalla, eli 200 metrin alueelta vähentää hiilidioksidipäästöjä 0–115 000 kg riippuen siitä, kuinka suureksi teräsrungon poikkileikkauksen pinta-ala kasvaa. Varikon kattorakenteen poimulevyn vaihtaminen kotelolaattaan on siis suhteellisen helppo, sekä todennäköisesti kannattava ratkaisu hiilidioksidipäästöjen vähentämisen kannalta.

Tutkimustulosten perusteella kannattavin johtopäätös on toteuttaa rakennuksen runko yhä teräksisenä, mutta itse hallien katot puisella Kerto-kattoelementillä. Ky-

seisessä tilanteessa hallin jäykistäminen ja liitostekniikka pysyvät ennallaan Roihupellon varikon tavoin, ja näin dimensioiden muutokset eivät aiheuta hallin suuruudessa muutoksia.

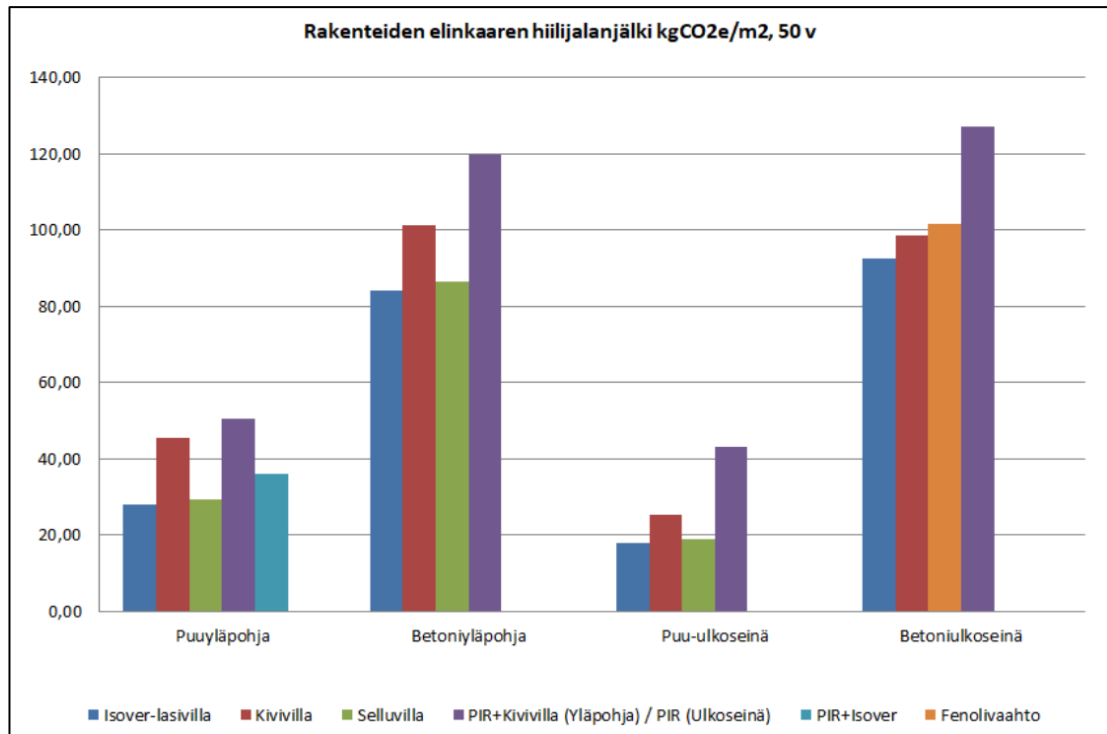
#### 4.5 Lämmöneristeiden vaikutukset CO<sub>2</sub>-päästöihin

Rakennetyypeissä on mahdollista tehdä muutoksia ilman, että koko rakenne joudutaan uusimaan. Raide-Jokerin Roihupellon kohteessa yleisenä lämmöneristeinä käytetään kivivillaeristettä. Mahdollinen vaihtoehto hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä on käyttää lämmöneristeinä kivivillan sijasta lasivillaa, joka omaa ympäristöministeriön rakentamisen päästötietokannan mukaan pienempiä hiilidioksidipäästöjä. [11.] Ekovillan puhallusvillaa ei voida hankkeessa käyttää, sillä se ei täytä vaadittuja palovaatimuksia.

Mineraalivillat ovat lämpö- sekä äänieristeinä toimivia kuitupitoisia materiaaleja. Mineraalivilloja valmistetaan pääasiassa jätelasista, sekä emäksisistä kivilajeista. Kivivilla, eli vuorivilla on mineraalivillaa, joka valmistetaan kiviainesta sulattamalla ja näin ollen kuiduttamalla. Lasivilla voidaan valmistaa joko keräyslasista tai hiekasta, kalkkikivestä ja soodasta. [12.]

Rakennustuotteiden yrityksen, Isoverin, lasivilla on 70 % kierrätyslasista valmistettua materiaalia ja keskittyy pienemmän hiilijalanjäljen omaamiseen. Hiilijalanjäljen pienentämiseen Isover puuttuu myös valmistamalla eristeet päästövapaalla sähköllä, pienentämällä pakkauskokoa ja valmistamalla tuotteet Suomessa, joka vähentää kuljetuksien aiheuttamia CO<sub>2</sub>-päästöjä. [13.]

Bionova Oy:n ja Saint-Gobainin selvityksen mukaan lasivilla on vähähiilisin lämmöneristevaihtoehto (kuva 15). Vähähiilisyyteen vaikuttaa esimerkiksi lasivillan pienempään tiheyteen pääseminen samalla eristystasolla kuin mitä esimerkiksi kivivillaeristeellä päästäisiin. [14.]



Kuva 15. Bionovan tutkimuksen tulokset lämmöneristeiden hiilijalanjäljistä. Kuvaajan päästöt on ilmoitettu vasemmalla yksikössä kg CO<sub>2</sub>e /m<sup>2</sup>. [14]

Isoverin tuotteiden päästöjä ei voida kuitenkaan suoraan ympäristöministeriön päästötietokannan kautta selvittää, mutta jo päästötietokannan avulla kivivillan ja lasivillan vertailu tuottaa huomattavia päästövähennyksiä. Lasivillan konservatiivinen arvo rakentamisluvan hakemiseen on 1,2 kilogrammaa hiilidioksidia per kilogramma materiaalia. Kivivillan arvo taas on 1,5 kg CO<sub>2</sub>e/ kg. Hiilidioksidin aiheuttamat päästöt ovat siis myös rakentamisen päästötietokannan mukaan suuremmat kivivillan tapauksessa.

Lasivillan käytön aiheuttamat päästövähennykset näkyvät taulukossa 5. Taulukossa näkyvät painot perustuvat Roihupellon mallin kivivillaa sisältävien rakennetyyppien tilavuuksiin ja 60 kg/m<sup>3</sup> kivi- sekä lasivillan tiheyteen. Hiilidioksidipäästöt ovat laskettu rakentamisen päästötietokannan kertoimien avulla. Peltivilla-peltiratkaisuja löytyy sekä lasi- että kivivillavaihtoehtoilla, joten päästövähennykset ovat mahdollisia.

Taulukko 5. Kivi- ja lasivillan hiilidioksidipäästöt ja päästövähennykset kivivillaan verrattuna.

Rakennetyyppi	Paino (kg)	Kivivilla (kg CO <sub>2</sub> e /kg)	Lasivilla (kg CO <sub>2</sub> e /kg)	Päästövähennykset (kg CO <sub>2</sub> )
US003 + US007	20 782	31 173	24 938	<b>6 235</b>
US001	4 896	7 344	5 875	<b>1 469</b>
VS010	2 405	3 608	2 886	<b>722</b>
VS009	327	491	3 92	<b>99</b>
VS007	1 980	2 970	2 376	<b>594</b>
VS016	2 007	3 011	2 408	<b>603</b>

Parhaaseen lopputulokseen päästään, kun valitaan vähiten hiilidioksidipäästöjä tuottava materiaali ja rakennetyypissä pyritään pääsemään mahdollisimman pienen lämmönläpäisykerroinvaatimukseen, eli U-arvoon. Lasivillan käyttäminen on valmistusprosessiltaan hyvä vaihtoehto, ja se on myös lämmönjohtavuudeltaan samassa luokassa kuin kivivillaeristeet. On kuitenkin huomioitava, että lasivillan käyttö puumateriaaleissa ei eristä rakennetta paloteknisesti. Tällaisessa tapauksessa kivivillan käyttö on parempi vaihtoehto.

## 5 Energiatehokkaammat ratkaisut Raide-Jokeri-hankkeessa

### 5.1 Energiankulutus lämmityksessä

Raide-Jokerin raitiovaunuvarikon halli ja muut tilat rakennuksessa ovat tilavuudeltaan suurikokoisia. Joidenkin tilojen toimivuutta voitaisiin siis tarkastella eri tilavuuksilla, kuten esimerkiksi varikon 8 metriä korkeaa aulatilaa (kuva 16).

Tilojen suuri tilavuus aiheuttaa materiaalin määrän tarpeen kasvamista, sekä suurempaa energiankulutusta konvektion, eli lämmön siirtymisen vuoksi. Rakennuksessa esiintyviä tiloja, jotka ovat turhan korkeita, on hiilijalanjäljen näkökulmasta hyvä vähentää, jotta ilman liikettä voidaan vähentää rakennuksessa. Suuriin avariin tiloihin voidaan lisätä väliseinä- tai välipohjarakenteita, jotta ylimääräisen ilman liikettä saataisiin vähennettyä.





Kuva 16. Raide-Jokerin varikkorakennuksen aulatilaa. (Kuva: Elias Koponen)

Rakennuksessa voidaan säästää lämmityksessä jo huomioimalla se, kuinka korkeana halutaan rakennuksen keskilämpötila pitää. Jo muutama aste viileämpänä rakennus voi vähentää hiilidioksidipäästöjen määrää todella huomattavasti. Käytön aikaisista lämmityksen aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä on hyvä tietää, mitkä tilat on mahdollista toteuttaa puolilämpiminä, eli mitä tiloja voidaan pitää alle 17°C lämpötiloissa.

## 5.2 Elinkaarilaskennan huomioiminen rakenneosissa

Rakenneteknisessä suunnittelussa vaipparakenteiden lämpö- ja kosteustekninen suunnittelu on huomioitava tekijä. Suunnitteluohjeen RIL 249-2009 mukaan vaatimuksia rakenteilla ovat esimerkiksi lämmöneristävyys, ilmatiiviys, kylmäsiltojen eliminointi, vesivuodot ja rakennekosteuden poistuminen. [15.] Tämän lisäksi on tärkeää huomioida rakentamisprosessin muiden vaiheiden vaikutus rakentamisen lopputulokseen koko rakennuksen elinkaaren ajalta.

Green Building Partnersin konsultin Juhani Huuhtasen mukaan ulkoseinäratkaisuissa, mm. betonisandwich-ulkoseinää, voidaan parantaa päästöjen suhteen esimerkiksi eristerappauksilla tai puujulkisivuilla. Tiilimuuraus sen sijaan nostaa

julkisivun päästöjä betoniulkokuoreen verrattuna. [16.] Ulkoseinärakennetta valittaessa kasvihuonepäästöjen lisäksi tulisi huomioida myös rakenteen tekniset vaatimukset.

Rakenteiden päästöjen kannalta työmaan hiilijalanjälkeen voidaan vaikuttaa esimerkiksi sillä, mitkä vaiheet tehdään työmaalla ja mitkä tehtaalla. Esimerkiksi betonivalun kuivattaminen elementtitehtaalla on selvästi energiatehokkaampaa kuin mitä se on talvella työmaalla. Tästä syystä elementtitehtaalla valmistaminen kannattaa pitää mahdollisena vaihtoehtona matkat ja kustannukset huomioiden.

Energiatehokkuus on vielä tärkeämpää käyttövaiheessa, jolloin suurin osa elinkaaren energiankulutuksesta syntyy. Nollaenergiarakentamiseen tähdätessä halutaan pyrkiä energiaa kuluttavien laitteiden, kuten lämmityslaitteiden tarpeettomuuteen. Rakenteissa tähän voidaan vaikuttaa valitsemalla hyvä U-arvo, eli lämmönläpäisykerroin, ja suuria lämpömassoja omaavia rakenteita, jotka eivät sisällä kylmäsiltoja ja ovat kosteusteknisesti toimivia.

Betoni on puuta parempi lämpömassoja omaavana rakenteena, joten tämä on myös tärkeää huomioida lämpöteknisessä suunnittelussa. Näin saadaan parannettua käyttöikää, lämpötila saadaan pidettyä tasaisempana ja mekaanisten laitteiden, sekä muiden vaikutteiden tuottama lämpöenergia saadaan varastoitua.

Yksinkertaisena ratkaisuna energiatehokkuuteen on esimerkiksi valaistuksen valinta. Motivan valaistusoppaan mukaan LED-valaistuksen käyttöikä on noin 12 kertaa parempi kuin halogeenilamppujen ja 2,5 kertaa parempi kuin loisteputki-valaisimien (CFL). Tämän lisäksi LED kuluttaa noin 20 % vähemmän kuin CFL-lamput ja 70 % vähemmän kuin halogeenilamput. [17.] Vaikka ongelma ei ole sidonnainen rakenteisiin, on se energiatehokkuuden kannalta hyödyllistä huomioida.

Osa rakennuksen elinkaaren aikana sitoutuneista päästöistä vapautuu rakennuksen purkuvaiheessa. Hiilineutraali rakentaminen hankaloituu, jos esimerkiksi

käyttämättömät puurakenteet poltetaan aina purkuvaiheessa. Purettaville materiaaleille olisi siis keksittävä uusia käyttötapoja, jotka eivät johda sitoutuneen hiilen vapautumiseen.

Materiaalin määrän vähentämisellä on suora yhteys kustannustehokkuuteen. Rakenteen määrän vähentämisessä olisi hyvä pyrkiä esimerkiksi toimivien ontelorakenteiden käyttämiseen.

### 5.3 Vähähiilisempiä ratkaisuja teräkselle

Kuten teoriaosuudessa mainittiin, kierrätysteräksen käyttö olisi päästöjen kannalta huomattavasti parempi ratkaisu verrattuna malmijalostettuun teräkseen. Tähän ei kuitenkaan voida vaikuttaa, sillä tarve on suurempi kuin mitä sitä pystytään tuottamaan.

Terästä saadaan muita seosaineita lukuun ottamatta raudasta ja hiilestä silloin, kun hiiltä esiintyy teräksessä alle 2 %. Hiilitiedon mukaan suuri hiilipitoisuus nostaa teräksen lujuutta, mutta vain maksimilujuuteen asti, joka saavutetaan teräksessä noin 0,6 prosentissa. [18.] Kyseiseen lujuuteen päästään niin kierrätysterästä kuin rautamalmiakin käytettäessä.

Korkealujuusteräkseen on hyvä tähdätä, sillä metallin lujuuden noustessa voidaan joissain tilanteissa käyttää vähemmän materiaalia rakenteen samaan kestävyysasteeseen pääsemiseen. Tämä ei kuitenkaan aina päde, sillä mitoittava tekijä voi olla lujuudesta riippumaton. Suunnittelijan on kannattavaa siis pyrkiä korottamaan materiaalin lujuutta silloin, kun se esiintyy mitoittavana tekijänä.

### 5.4 Vähähiilisempiä ratkaisuja betonille

Korkealujuusbetonin käyttö on tilanteesta riippuen suositeltavaa, sillä sen avulla on mahdollista vähentää materiaalin määrää samasta syystä kuin korkealujuusteräksen käytössä. Betoniteollisuus ry:n mukaan esimerkiksi pilarin lujuuden kak-

sinkertaistaminen vähentää kustannuksia noin 25 %, sekä olisi ympäristölle edullisempaa. [19.] Tähän kuitenkin vaikuttaa esimerkiksi betonin hinnan nousu, sekä mahdollisesti betonin halkeilu. Tutkitun Raide-Jokerin hallin tapauksessa dimensioiden pienentäminen ei kyseisessä rakennuksessa onnistuisi lujuutta parantamalla.

Hiilineutraaleita betoniratkaisuja on jo olemassa. Lujabetoni, sekä Pielisen Betoni Oy tarjoavat jo hiilineutraaleita ratkaisuja kuljetuksia lukuun ottamatta. Tämän lisäksi Rudus on kehittänyt rakennustuotteen, nimeltä ”vihreä betoni”. Vihreä betoni valmistetaan Finnsementin valmistamasta Plussementistä, jolla on noin 10 % pienemmät CO<sub>2</sub>-päästöt kuin sementeillä yleensä. Vähähiilisiä betoniratkaisuja löytyy myös muilta valmistajilta.

Reseptiä säädetään aina kohteen tarkoituksen mukaan mahdollisimman päästötehokkaaksi ratkaisuksi. Suunnittelijan, rakennuttajan ja urakoitsijan on toimittava yhteistyössä betonin valmistajan kanssa, jotta toteutus vähäpäästöisemmällä betonilla on kohteessa mahdollinen lujuuden ja valettavuuden suhteen. [20.]

Ramboll Finland Oy:n suunnittelujohtajan, Tapio Ahon, mukaan Suomen Betoniyhdistys on valmistelemassa ohjetta vähähiilisen betonin luokittelemiseksi. Ohjeessa tulee olemaan neljä luokkaa hiilisisällön mukaan luokiteltuina. Luokat ovat GWP.85, GWP.70, GWP.55 ja GWP.40, joissa hiilisisältö on 15 % - 60 % pienempi kuin mitä Suomessa valmistetuissa valmisbetoneissa keskimäärin on. Ahon mukaan betoniluokat tulevat nopeasti käyttöön ohjeen julkaisun jälkeen. GWP.85 betonia, eli 15 % hiilisisällöltään vähäisempää betonia, on saatavilla jo lähes kaikilta betoniasemilta. [21.]

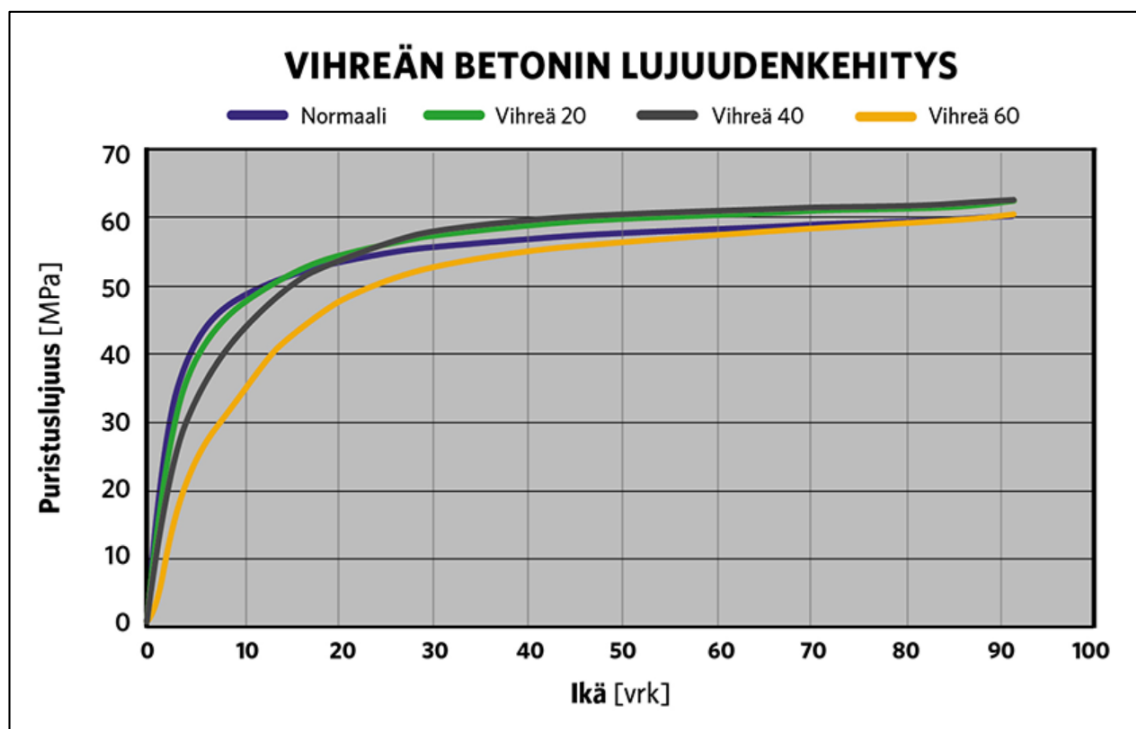
#### 5.4.1 Vihreä betoni

Ruduksen ”vihreä betoni” pyrkii pienentämään sementin aiheuttamia päästöjä korvaamalla sementtiä sideaineilla, kuten esimerkiksi masuunikuonalla. Tämä ei vaikuta betonin lopulliseen lujuuteen merkittävästi, sillä vihreää betonia on saa-

tavilla kaikissa samoissa lujuusluokissa kuin normaaliakin betonia. Ruduksen vihreä betoni tarjoaa 20, 40 tai 60 prosenttia CO<sub>2</sub>-päästöjä pienentäviä ratkaisuja normaaliin betoniin verrattuna. [22.]

Suurin haaste lujuuteen liittyen vihreän betonin käytössä esiintyy siinä, että ”Vihreä 60” betoni kehittyy normaalia betonia hitaammin lopulliseen lujuuteen. Tämä ongelma ei ilmene yhtä vahvasti lämpimissä olosuhteissa, jolloin lujuudenkehitys seuraa lähes samaa käyrää kuin normaali betoni. [22.]

Kuvasta 17 nähdään, että Vihreä 60 on vihreän betonin ratkaisuista lopullisen lujuuden saavuttamisessa hitain. Vihreä 20 ja 40 -ratkaisut voivat myös saavuttaa normaalia betonia suuremman loppulujuuden. Rudus tarjoaa nopeammin kovetuvaa vihreää betonia, jolla voidaan pienentää CO<sub>2</sub>-päästöjä ilman, että lujuudenkehitys veisi kauemmin kuin normaalilla betonilla. [22.]



Kuva 17. Vihreän betonin ja normaalin betonin lujuudenkehitystä kuvaava taulukko. [22]

Lujuudenkehitys betonin puristuslujuuteen on normaalilla betonilla 28 vuorokautta. Sekä 20 %, että 40 % vähemmän päästöjä tuottavat vihreän betonin ratkaisut saavuttavat saman lujuuden hieman nopeammin kuin normaali betoni, mutta alkulujuudeltaan ne ovat silti normaalia betonia heikompia. Ideaaliolosuhteissa Vihreä 60 betoni vaatii noin 40 vuorokautta päästökseen samaan puristuslujuuteen kuin normaali betoni 28 vuorokaudessa pääsisi. Kuivumiskutistumat ovat vihreässä betonissa pieniä. [23.]

Ruduksen betonitekniikan kehityspäällikkö Mika Aution mukaan kuivumisajoista ei ole tällä hetkellä tarpeeksi tietoa, että siitä saisi yhdenmukaista kuvaa normaaliin betoniin nähden. Tähän mennessä toteutetuissa tutkimuksissa vihreä betoni saavuttaa kuitenkin kuivumisajat yleensä yhtä nopeasti tai jopa nopeammin kuin normaalisti kovettuvat betonit. [24.]

Vihreä betoni käy Aution mukaan infrabetoneissa 15–20 % päästövähennyksillä p-lukubetonin, eli jatkuvan jäätymis-sulamisrasituksen kohteena olevan, pakkasenkestävän betonin roolista ongelmitta. Betonin pakkasenkestävyydelle vaatimuksena on hyvä vesi-sideainesuhde, sideaineen laatu, ilmahuokosmäärä, sekä betonin jälkihoito. Vihreän betonin suuremman sideainemäärän ja pienennetyn sementtimäärän vaikutuksesta myös pakkasenkestävyys voi heikentyä. Äärimmäisen vihreitä betoneita ei siis voida p-lukubetonina valmistaa. [24.]

Puolilämpimissä ja lämpimissä tiloissa betonin pakkasenkestävyyden ei pitäisi koitua ongelmaksi, mutta talvella lujuudenkehityksen hidastuessa äärimmäisillä aikatauluilla tämä saattaa Aution mukaan aiheuttaa haasteita. Vihreä betoni voidaan toteuttaa nopeasti kovettuvasta vihreästä betonista, jolla voidaan välttää talven aikatauluhidasteita. Nopeasti kovettuvien vihreiden betonien avulla päästään noin 20–30 % päästövähennyksiin, kertoo Mika Autio. [24.]

Autio mainitsee vihreän betonin käytön olevan tällä hetkellä sen verran tuoreessa roolissa, ettei vielä ole mitään hanketta tiedossa, jossa kaikki betoniset rakenteet tehtäisiin vihreästä betonista. Suurin osa rakentajista on vielä kokeiluvaiheessa, joten yksittäiset rakenteet työmaalla ovat vielä vihreän betonin suhteen yleisiä.

Autio mainitsee yhtiön ”As. Oy Helsingin Hyperion” tornitalossa olevan noin 1800 kuution vihreästä betonista tehty valulaatta, joka on tämän hetken suurin vihreästä betonista tehty rakenne. [24.]

Kasvihuonepäästöjen minimoinnin näkökulmasta Raide-Jokerin hankkeessa parhaimmaksi ratkaisuksi Ruduksen tuotteista soveltuisi Vihreä 60 -betonilaatu. Muut lämpimien tilojen betonivaluratkaisut ja teräsbetonilaatat voidaan korvata vihreällä betonilla ilman ylimääräistä lujuudenlaskentaa. Kuitenkin kuivumiseen, ja talvella lujuuteen, vaikuttavat aikatauluun liittyvät asiat on läpikäytävä erikseen, jos nopeammin kovettuvaa vihreää betonia ei käytetä.

#### 5.4.2 Luja-Vähähiilibetoni

Lujabetonin valmistama ”Luja-Vähähiilibetoni” on hiilijalanjäljeltään noin 50 % pienempi verrattuna normaaliin betoniin. Alkulujuudeltaan betonin kehitys on hitaampaa, mutta lopulliset lujuudet ovat kuitenkin normaalisti kovettuvan betonin luokissa. Toteutus on vielä kesken, joten tällä hetkellä nopearytmiseen rakentamiseen ei olla ylletty. Tämän on tarkoitus muuttua tulevaisuudessa Lujabetonin aktiivisen kehityksen myötä, sillä lujabetonilla on jo kiihdytinratkaisu kumppanuustuotekehityksessä. [25.]

Haataisen mukaan Luja-Vähähiilibetonin lujuudenkehitys riippuu hyvin paljon rakenteen ja olosuhteen lämpötilasta, joten lujuudenkehitys ei ole täysin verrattavissa normaalin betonin lujuudenkehitykseen. Suuntaa antavasti silloin, kun rakenteen lämpötila laskee alle 15 asteeseen, lujuudenkehitys hidastuu merkittävästi ja yli 20 asteen lämpötiloissa lujuudenkehityksessä päästään lähelle normaaleja rakennebetoneja. [26.]

Lujabetonin tuotteen myynti on aloitettu vuonna 2021 ja tällä hetkellä toimitusmäärät ovat noin 10 000 m<sup>3</sup> vuodessa, eli määrät ovat vielä pienissä luokissa. Lujabetoni on toteutettavissa vähähiilisenä P-lukubetonina, mutta säästö on pienempää, koska Haataisen mukaan Väylän ohjeistus ja säilyvyysohjeistus estää seostusta. [26.]

Luja-Vähähiilibetonin valmistus perustuu CO<sub>2</sub>-päästöiltään matalaan shokkijäähdytetyllä ja jauhetulla masuunikuonalla seostettuun sementtiin (GGBFS). Lujabetonin käyttämä sementti on parhaimmillaan 70 % perinteisiä sementtejä alhaisempi. Tämän avulla betonirakentamisessa on mahdollista päästä jopa puukerrostalojen CO<sub>2</sub>-päästötason alle. [25.] Menetelmää hyödyntämällä voidaan Haahtaisen mukaan luoda eri betonireseptejä, joiden CO<sub>2</sub>-päästöt lasketaan reseptikohtaisesti. [26.]

Lujabetoni tarjoaa myös hiilineutraaleja ratkaisuja CO<sub>2</sub>-kompensointimenetelmiä hyödyntäen. Päästökompensoidun valmisbetonin hiilijalanjälki on nolla. Tämä perustuu valvottujen projektien päästömäärien tai hiilinielujen lisäämisen kautta luotuihin ratkaisuihin. Päästökompensoitu betoni sisältää 6,00 €/m<sup>3</sup> kompensatiomaksun, joka perustuu Nordic Offset Oy:n Gold Standard (GS) sertifioituihin päästövähennyksiin. Päästökompensaatiot ovat ylikompensoituja noin 1,4–2,5-kertaisesti, tuotettuihin päästöihin verrattuna. [27.]

#### 5.4.3 Pielisen betoni

Pielisen betoni Oy on ensimmäinen betonitoimittaja Suomessa, joka kompensoi kaikki tuotannostaan vapautuvat päästöt. Pielisen Betoni Oy:n hiilineutraalin betonin (HIBE) toteuttaminen perustuu käytettyjen raaka-aineiden ja toiminnan hiilipäästöjen vähentämiseen, sekä hiilinieluna metsäteollisuuden kasvattamiseen, johon Pielisen Betonin toimitusjohtaja Tuija Kilpisen mukaan yritys sitoutuu hoitamaan metsiä niin, että hiiltä sitoutuu metsiin vähintään tuotettujen päästöjen verran. Hiilinielu kompensoi todellisuudessa yrityksen tuotetut päästöt yli 20-kertaisesti. [28.]

Kilpisen mukaan HIBE:n käyttö ei tuota asiakkaille lisäkustannuksia. Yritys toimittaa valmisbetonin lisäksi myös hiilineutraaleja betonielementtejä, kuten pilari- ja laattaratkaisuja. HIBE-ratkaisut ovat siis betoniratkaisuja, joiden toteuttaminen ei eroa muihin normaalisti kovettuviin betonilaatuihin. [28.]



Vaikka itse rakentamisvaiheessa huomioidussa hiilijalanjäljessä päästövähennyksiä ei näy, on päästöjen kannalta paras ratkaisu tukea yritystä, joka huolehtii, että vähintään 100 % tuotetuista päästöistä kompensoidaan, jotta myös muiden yritysten toimintamallit tekisivät samoja valintoja.

Pielisen betonin mediavastaavan, Anna-Maria Kumpulaisen mukaan hiilinielujen vuosittainen kasvatus toteutuu nettonieluna. Yritys toteuttaa hiilensidonta- sekä päästölaskentaa, joka kattaa koko toimitusketjun aiheuttamat hiilidioksidipäästöt. Hiilensidonta toteutetaan käsittelytapamuutoksilla, joissa todelliset kompensointilisäykset huomioidaan. [29.] Hiilinielut eivät ole kuitenkaan lopullinen ratkaisu, eikä kaikkia Suomen päästöjä voida vähentää vain kompensointimenetelmillä.

#### 5.4.4 Kolmossementti

Finnsementin valmistama ”Kolmossementti” (CEM III) on korkean lujuusluokan vähäpäästöinen masuunikuonasementti. Kolmossementti on osana Finnsementin strategiaa tarjota vähähiilisiä tuotteita kysynnän kasvun yhteydessä. Kolmossementin tuotanto on alkanut syyskuussa 2021 ja tuotanto on tällä hetkellä käynnissä Paraisten tehtaalla. [30.]

Tärkeimpinä ominaisuuksina kolmossementille on vähäpäästöisyys, lämmöntuoton maltillisuus, korkean loppulujuuden saavuttaminen ja hyvät säilyvyysominaisuudet. Tämän lisäksi sen työstettävyyden ja soveltuvuus ovat korkealla tasolla. [30.]

Kolmossementtiä on käytetty Vuosaarella 24-kerroksisen tornitalon pohjalaatan valuna. Kohteessa havaittiin, että kolmossementti osoittautui yhteistyön, kuljetusten, massan laadun ja halutun notkeuden kannalta odotetusti toimivaksi ratkaisuksi. [31.]

Kolmossementin lujuudenkehitys on ominaisuuksiltaan suhteellisen hyvällä tasolla vähähiiliseksi sementtiratkaisuksi (taulukko 6) [32]. Verrattuna esimerkiksi

Finnsementin normaalisti kovettuvaan ”Oiva-sementti” ratkaisuun, lujuudenkehitys on alussa noin 20 prosenttia hitaampaa, mutta ylittää Oiva-sementin puristuslujuuden jo vajaassa viikossa. Ratkaisuna myös kolmossementti on normaalisti kovettuvaa.

Taulukko 6. Kolmossementin teknisiä ominaisuuksia. [32]

Korkean 52,5 – lujuusluokan masuunikuonasementti			CEM III/A 52,5 L
Sementin ominaisuuksia	Tulokset	Vaatimukset	
Puristuslujuus 1 vrk	8...12 MPa	ei vaatimusta	
Puristuslujuus 2 vrk	19...23 MPa	≥ 10 MPa	
Puristuslujuus 7 vrk	39...44 MPa	ei vaatimusta	
Puristuslujuus 28 vrk	59...65 MPa	≥ 52,5 MPa	
Sitoutumisaika	150...250 min	≥ 45 min	
Tilavuuden pysyvyys	0...1,5 mm	≤ 10 mm	
Hienous	450...520 m <sup>2</sup> /kg	ei vaatimusta	
Hehkutushäviö	0...4 %	≤ 5,0 %	
Liukenematon jäännös	0...4 %	≤ 5,0 %	
SO <sub>3</sub>	3,0...3,5 %	≤ 4,0 %	
Kloridipitoisuus	≤ 0,08 %	≤ 0,10 %	
Cr6+	0...2 mg/kg	≤ 2 mg/kg	

Tuote on kuitenkin vasta saapunut markkinoille, eikä kokemuksia ole suuria määriä. Ongelmia, joita ei vielä olla havaittu, voi siis tulevaisuudessa syntyä.

Finnsementin tuotekehityspäällikön, Esa Heikkilän, mukaan päästövähennykset riippuvat hankkeesta, mutta keskimäärin Finnsementin yleisimmin käytettyyn sementtilaatuun, Oiva-sementtiin, verrattuna CO<sub>2</sub>-päästöt olisivat noin 30 % pienempiä. [33.]

Heikkilän mukaan kolmossementti on mahdollista toteuttaa p-lukubetonina, mutta ongelmana ovat tämänhetkiset Väyläviraston tekemät p-lukuohjeistukset, jotka eivät ole kovin edullisia. Väyläviraston P-lukuohjeet ovat kuitenkin päivittymässä lähitulevaisuudessa. Tämänhetkisen ohjeistuksen mukaan betonivalmistajista

riippuen betonimäärää voitaisiin tarvita noin 50 kg enemmän kuutiolta. P-luku-betonina tuotteen toteuttaminen ei olisi kustannus- tai edes hiilijalanjäljeltään päästötehokas ratkaisu. [33.]

Kuivumisaikoja ei olla vielä Heikkilän mukaan mitattu eri sementtilaaduilla. Kuivuminen ei ole kuitenkaan aiheuttanut ongelmia aikaisemmissa hankkeissa. Aikataulun suhteen normaalin betonin aikataulussa on pysytty kaikissa hankkeissa, joissa kolmossementtiä on käytetty. Talvella betonin suojausmenetelmät ovat samoja kuin muissakin normaalibetoneissa, joten aikatauluviiveitä ei synny vuodenojoistakaan johtuen. [33.]

Tällä hetkellä Heikkilän mukaan mitään hanketta ei olla vielä toteutettu kokonaan kolmossementistä. Tuotanto on vielä varastojen suhteen hieman kesken, joten toiminta on rajoittunut pienempiin lastaussiiloihin. Tämän ei kuitenkaan pitäisi olla ongelma enää helmikuun 2022 jälkeen. [33.]

#### 5.4.5 Vähähiilisemmän betonin vaikutus varikon päästöihin

Roihupeltoon suunnitellun Raide-Jokerin varikon alapohjarakenteen pintalaatat ovat valmistettu kuitubetonista. Betonin lujuusluokat toteutetaan luokissa C30/35 tai C35/45 ja betonilaadut ovat rasitusluokiltaan XC2, XC3, XD1, XD3, ja XF4. Välipohjien pintabetonit, sekä väestönsuojan teräsbetonilaatat toteutetaan rasitusluokassa XC1 ja lujuusluokassa C30/37. Seinärakenteiden betoniratkaisut toteutetaan eri lujuuksia sisältävistä teräsbetoniratkaisuista.

Betonirakenteiden päästövähennykset on selvitetty eri vihreän betonin luokissa. Betonimäärät on selvitetty Roihupellon Tekla Structures -mallin ja Suomen rakentamisen päästötietokannan avulla. Betonin pintalaatan valun paino on laskettu tilavuudella ja  $2500 \text{ kg/m}^3$  tiheydellä. Betonin konservatiivinen arvo on valittu betonilaadulle C30/37. Pintalaattojen valujen painot ja hiilidioksidin eri päästövähennyksien suuruudet näkyvät taulukossa 7.

Taulukko 7. Pintalaattojen painot ja hiilidioksidin päästövähennykset.

	Paino (kg)	20 % (kg CO <sub>2</sub> )	40 % (kg CO <sub>2</sub> )	50 % (kg CO <sub>2</sub> )	60 % (kg CO <sub>2</sub> )
<b>Pintalaatat 1.krs</b>	3 891 672	140 100	280 200	350 250	420 301
<b>Pintalaatat 2.krs</b>	185 860	6 691	13 381	16 727	20 073

Pintalaattojen valmistaminen voi siis tuoda noin 140 000 kg hiilidioksidipäästövähennyksiä 20 % vähähiilisemmällä betoniratkaisulla. Parhaimmillaan betoniratkaisu voidaan toteuttaa 100 % kompensointimenetelmillä, jolloin hiilidioksidin päästövähennyksiä syntyisi noin 730 000 kg. Paalulaattaa ei kyseisessä tilanteessa olla tarkasteltu, joten päästönvähennykset voivat kohteessa olla vielä laskettujakin huomattavasti suuremmat.

Betonivalujen lisäksi betonielementit voidaan korvata päästökompensoiduilla betoniratkaisulla. On kuitenkin huomioitavaa, että kaikki elementtitoimittajat eivät voi toimittaa kompensoituja ratkaisuja. Tällä on vaikutusta kilpailuttamiseen ja sitä kautta kustannuksiin.

Roihupellon raitiovaunuvarikon vastaavan työnjohtajan, Kalle Jääskeläisen mukaan Raide-Jokerin varikon kaltaisessa kohteessa aikatauluviiveet valubetonin näkökulmasta ovat vähäisempiä, koska kantava runko on pääosin teräs- tai puurakenteinen ja muut kantavat pystyrakenteet ovat elementtejä. [34.]

Vähähiilisempiä betoniratkaisuja voidaan käyttää laatta- ja lattiarakenteissa, mutta aikatauluviiveitä voi syntyä, sillä niitä pääsisi kuormittamaan nykyistä myöhemmin. Tämä ei kuitenkaan Jääskeläisen mukaan ole aikataulun näkökulmasta välttämättä ongelma, sillä varikon tämänhetkistä aikataulua on mahdollista järjestellä huomioiden vähähiilisten betoniratkaisujen pidemmät kuivumisajat. [34.]

Muita betoniratkaisuja löytyy esimerkiksi Betolar Oy:ltä ja VTT:ltä. Geoprime on Betolar Oy:n valmistama geopolymeeriratkaisu, joka tarjoaa raaka-aineita kaiken rakentamiseen, elementeistä stabilointiin. Betolarin Geoprime on hiilijalanjäljeltään parhaimmillaan 80 % pienempi kuin sementtipohjaisilla tuotteilla. Tähän

päästään Geoprimerin sideaineratkaisulla, jonka avulla päästään sementittömiin lopputuloksiin. [35.]

VTT:n ”Decarbonate” hanke perustuu kalkista vapautuvan hiilidioksidin talteenottamiseen lähes 100-prosenttisesti. Projekti on ollut käynnissä lähes 30 kuukautta ja kaupalliseen käyttöön pääsemisen tavoite on maaliskuussa 2022. [36.]

## **6 Johtopäätökset ja pohdintaa**

Rakennuksen materiaalien vaihtaminen ei ole yksinkertaista, jos rakennus on jo ennestään suunniteltu erilaisella materiaaliratkaisulla. Jos puurunkoinen rakennus halutaan toteuttaa, tulisi materiaalin valinta huomioida jo suunnittelun alussa.

Ratkaisut on mietittävä niin, ettei puupilareihin kohdistu törmäyskuormia. Törmäyskuormiin voitaisiin vaikuttaa esimerkiksi törmäysesteillä, jotka vaikuttavat hallin pinta-alan kasvamiseen. Toinen vaihtoehto olisi käyttää teräsbetonirakenteista peruspilaria, jonka päältä puupilari lähtee. Mastopilarin käyttäminen voisi olla mahdollista, jos pilarilta voidaan viedä kuormia perustuksille. Tämä tosin kasvattaa paalujen määrää, joita Roihupellon hankkeessa esiintyy jo runsaasti.

Jos puista harjapalkkia halutaan käyttää teräspilarin kanssa, teräspilari täytyy saada toimimaan mastona, jotta palkin ja pilarin liitos voi olla nivelellinen. Tämän toteutus on haastavaa. Maanvaraisella perustustavalla puisen palkin käyttäminen voisi olla helpompaa, vaikkakin silti perustuksiltaan hankalaa.

Jos puinen runko päätetään toteuttaa, on huomioitava, ettei talotekniikkaa saa kuljetettua samalla tavalla ristikon läpi kuin Roihupellon varikon tapauksessa. Tämä olisi huomioitava rakennuksen korkeuden kasvussa.

Rakennuksessa sijaitsevia pesemiseen tarvittavia tiloja voi olla todella hankalaa, tai jopa mahdotonta, toteuttaa puisista rakenneratkaisuista. Puun kosteuskäyttäytyminen on siis huomioitava esimerkiksi huoltohallin suunnittelussa.

Koteloelementtiratkaisulla on vaikutusta kohteen hankintamuotoihin, sillä kotelolaatat valmistetaan tuoteosakauppana. Näin ollen rakenne sisältää jo esimerkiksi villoitukseen liittyvät työt. Tämä vaikuttaisi myös työmaatoimintaan, sillä katon lämmöneristystyötä ei tehtäisi yhtä paljon kuin poimulevyn tapauksessa.

Kotelolaatan liittymät ja tekninen laatu ovat erilaisia poimulevyyn nähden. Esimerkiksi kattoelementin saumat on saatava työmaalla höyrytiiviksi. Tämä ei välttämättä onnistu yhtä hyvin kuin bitumikermillä tehty höyrynsulku. Koteloriipalaatta voitaisiin myös asentaa niin, ettei villoja laitettaisi ripalaatan sisään, vaan sen päälle. Tilanteessa höyrynsulku luotaisiin ylemmän vanerin päälle tehtynä kerminä. Kyseinen ratkaisu olisi rakennusfysiikan ja huollon näkökulmasta mahdollisesti parempi ratkaisu.

Palotilanteessa puu on materiaalina heikompaa kuin betoni. Jotta varikkorakennuksen palovaatimusluokkaan B1 päästään, täytyy puurakenteet palosuojata. Kohteen teräsrakenteet ovat myös palosuojattuja palosuojamaalilla.

Rakennus on suunniteltu kestäämään 100 vuotta, mutta on kuitenkin mahdollista, ettei rakennus ole tarkoituksen mukainen toiminnan näkökulmasta käyttöiän loppuvaiheessa. On siis mahdollista, että hiilidioksidipäästöjen määrää suurennetaan, kun rakennus mitoitetaan kestäämään pidempään kuin miten pitkään sitä loppujen lopuksi tulee käytettyä.

Puinen runkoratkaisu on hankalampi toteuttaa 100 vuoden käyttöiällä, joka Raide-Jokerin varikon tapauksessa on ollut edellytys. Toteutus voi tuoda lisää haasteita teräksiseen runkoon verrattuna.

Tällä hetkellä kuormitustilanteet on määritetty siten, että rakenteet kestävät täysien raitiovaunujen painoja. Suunnittelun lähtöarvoilla on yhteys materiaalmääriin ja sitä kautta hiilidioksidipäästöihin, joten valittujen kuormitusten täytyy olla tarkoituksenmukaisia. Käyttöiän, suunniteltujen kuormien, sekä sallittujen taipumien muuttaminen voivat olla helppoja menetelmiä luoda vähähiilisempiä ratkaisuja rakenteille. Näitä ei kuitenkaan opinnäytetyössä selvitetty.

Vähähiilisempi betoniratkaisu voi olla CO<sub>2</sub>-päästöjen kannalta kannattavaa, mutta pidempien lujuudenkehitysten takia lähtötiedot on saatava selville aikaisemmin, jotta elementtikuvat saadaan nopeammin tehtaalte kuin normaalisti kovettuvan betonin tapauksessa. Aikatauluttaminen on tehtävä työmaalla hitaampi lujuudenkehitys huomioiden.

Lämpötilalla on vaikutusta vähähiilisen betonin kuivumiseen ja lujuudenkehitykseen. Kuivumisajaksi betoni on suojattava kosteudelta ja lämmityslaitteiden käyttö on tärkeämpää kuin normaalisti kovettuvan betonin tapauksessa, jotta toivottuun lopputulokseen voidaan päästä.

Vähähiilisiä betonituotteita ei tällä hetkellä ole tarjolla jokaisella valmistajalla. Tällä on vaikutusta urakkakilpailuun, jolla taas on vaikutusta hintaan. Normaalisti kovettuvaan betoniin verrattuna on todennäköisempää, ettei ratkaisu ole kustannustehokas.

Lämpöeristeen vaihtaminen kivivillasta lasivillaksi on helposti toimiva ratkaisu, joka ei käytännössä vaadi suuria muutoksia. Lasivilla on kivivillan kanssa samassa paloluokassa, mutta se on silti kivivillaa huonompi materiaali palotilanteessa. Lasivilla sulaa noin 600°C:ssa, kun taas kivivilla vaatii yli 1000 °C:n lämpötilan, eli se ei käytännössä tule sulamaan palon aikana. Tästä syystä puurakenteiden paloeristeenä ei voida lasivillaa käyttää, vaikka teknisiltä vaatimuksiltaan tuote toimisikin.

Rakennuksen sisätilojen lämpötilat ja ilman liike vaikuttavat lämmityslaitteiden tarpeeseen. Ilman liikkeen vähentymiseen voidaan vaikuttaa esimerkiksi väliseiniä lisäämällä ja muilla tilavuutta pienentävillä menetelmillä. Rakennetyypin alhaisemmalla lämmönläpäisykertoimella voidaan vähentää lämmityslaitteiden tarvetta ja näin käyttöajan CO<sub>2</sub>-päästöjä.

Hiilijalanjäljen suhteen mahdollisimman monien työtehtävien siirtäminen elementtitehtaille olisi päästötehokkaampaa, sillä elementtitehtailta koneisto, tuotanto, aikataulu ja sääolosuhteet ovat huomattavasti energiatehokkaampia kuin työmaalla.

Työmaalla olisi hyvä pyrkiä vähentämään myös materiaalipakkauksia. Roihupelion varikolla käytettiin esimerkiksi kiskojen kiinnitykseen purkkeihin pakattua massaa. Kyseisiä purkkeja kului työmaalla satoja kappaleita. Ongelmaksi koituu purkkeihin jäävän materiaalin hukka, sekä ylimääräinen muovin käyttö, johon voitaisiin vaikuttaa esimerkiksi vaatimalla yrityksiltä suurempia pakkauksia satojen erillisten pakkausten sijasta.

## **7 Yhteenveto ja jatkoselvitykset**

Insinööritö läpikäy Raide-Jokeri-hankkeen raitiovaunuvarikon rakennesuunnittelua kasvihuonekaasujen näkökulmasta. Työ pyrkii selvittämään, minkälaisia vähäpäästöisiä rakenneteknisiä ratkaisuja suunnittelija voi vastaavanlaisessa hankkeessa tehdä.

Insinööritö tutkii pääsääntöisesti mitoittamiseen, rakennetyyppeihin, teoreettiseen, ja arkkitehtoniseen suunnitteluun liittyviä ratkaisuja. Mitoittamisessa huomattiin, että rakenteen rungon materiaalin vaihtaminen ei onnistu yksinkertaisesti, sillä se sisältää monta muuta huomioitavaa tekijää, kuten hallin dimensiot, paalutukset, ja jäykistämisen. Puinen kattorakenne on kohteessa kuitenkin helpommin toimiva ratkaisu, sillä se ei toimi jäykistävänä rakenteena, eikä dimensioiden suureneminen koidu ongelmaksi.

Varikkorakennuksen toteuttaminen puisella kattoelementillä tuo lisää painoa, joka vaikuttaa alapuolisten rakenteiden kantavuuteen. Alapuolinen teräsrunko on mitoitettava huomioiden yläpuolisen kattorakenteen paino. Puinen koteloelementti on kuitenkin suhteellisen helppo ratkaisu työmaan näkökulmasta, sillä puuelementti on yleensä valmiiksi villoitettu ja vaatii siis vain asennuksen työmaalla.

Hankkeen lämmöneristys on tehty kivivillalla. Insinööritöössä kuitenkin huomattiin, että kivivilla on lämmöneristävyydeltään samassa luokassa kuin lasivilla sil-



loin, kun palotilannetta ei huomioida. Lasivilla on kuitenkin vähäpäästöisempi ratkaisu kuin kivivilla. Lasivillan käyttö on siis kasvihuonepäästöjen kannalta toimivampi ratkaisu kuin kivivilla silloin, kun puurakenteita ei huomioida.

Työn aikana tutkittiin myös eri tuotevalmistajien betoniratkaisuja, joiden avulla voitaisiin pyrkiä vähäpäästöisempiin ratkaisuihin. Vähähiilisempiä ratkaisuja tarjoaa esimerkiksi Rudus, Luja-Betoni, Pielisen Betoni, Finnsementti, ja Betolar. Vähäpäästöisen betonin tarve kasvaa jatkuvasti, joten tarjonta tulee todennäköisesti kasvamaan nopeasti.

Hallin seinät ovat toteutettu pelti-villa-pelti-ratkaisuina (PVP). Julkisivun PVP-elementit eivät toimi rakennuksessa kantavina, joten ne ovat todennäköisesti vaihdettavissa vähäpäästöisempiin rakenneratkaisuihin. Selvitettävä vaihtoehto julkisivulle voisi olla massiivipuisten CLT-levyjen, eli ristiinliimattujen tuotteiden, käyttäminen julkisivuratkaisuissa.

Rakennuksen kantavuus on laskettu täysikuormaisille raitiovaunuille. Raitiovaunujen kuormia voisi tutkia siten, että vertailisi standardisoituja oletuskuormia realistisiin kuormitustapauksiin, jolla saisi kuvaa standardisoitujen kuormien tarkkuudesta.

Työssä on tutkittu vähähiilisempiä menetelmiä yleiseltä rakennetekniseltä näkökulmalta ja sivuttu puisen rungon toteuttamista, jonka johtopäätöksenä saatiin, että toteutus vaatisi puusuunnittelun jo lähtötiedoksi suunnitteluvaihetta. Mahdollinen jatkoselvitys tähän liittyen olisi se, miten raitiovaunuvarikko voitaisiin alusta alkaen suunnitella ja toteuttaa puisena.

Työ keskittyy rakennesuunnittelijan näkökulmaan päästöjä vähentävien ratkaisujen luomisessa. Kuitenkin käyttövaiheen energiatehokkuus on suurimassa merkityksessä CO<sub>2</sub>-päästöjen kulutuksessa rakennuksen elinkaaren aikana. Jatkoselvityksenä voisi olla selvittää LVIA- ja sähkösuunnittelijoiden näkökulmasta CO<sub>2</sub>-päästöjä vähentäviä menetelmiä.

## Lähteet

- 1 Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. 2019. Ympäristöministeriö. <[https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM\\_2019\\_22\\_Rakennuksen\\_vahahiilisyyden\\_arviointimenetelma.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyyden_arviointimenetelma.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Luettu 20.7.2021
- 2 Häkkinen, Tarja. Vares, Sirje. 2017. Rakennusten khk-päästöjen ohjauksen vaikutusten arviointi. VTT. <<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2018/T324.pdf>>. Luettu 20.07.2021
- 3 Johdatus rakennusten elinkaariarviointiin. 2019. Ympäristöministeriö. <[https://elinkaarilaskenta.fi/wp-content/uploads/sites/6/2019/08/johdatus\\_rakennusten\\_elinkaariarviointiin.pdf](https://elinkaarilaskenta.fi/wp-content/uploads/sites/6/2019/08/johdatus_rakennusten_elinkaariarviointiin.pdf)>. Luettu 22.07.2021
- 4 CO2 ja kiertotalous – kierrätys. 2021. Verkkoaineisto. Teräsrakenneyhdistys. <<https://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/teras/co2-ja-kiertotalous/kierratys/>>. Luettu 20.08.2021
- 5 Teräs – silta tulevaisuuteen. 2009. Metallinjalostajat. Luettu 20.08.2021
- 6 Hiilidioksiditehokkuus SSAB:lla. 2020. SSAB-konserni. Verkkoaineisto. <<https://www.ssab.fi/ssab-konserni/kestava-kehitys/kestavat-toiminnot/hiilidioksiditehokkuus-ssablla>>. Luettu 25.08.2021
- 7 Pitkälä, Eeva. 2020. Betonin hiilijalanjälki kutistuu. Kemia-lehti. <<https://www.kemia-lehti.fi/wp-content/uploads/2020/02/1-2020-Betonin-hiilijalanj%C3%A4lki-kutistuu.pdf>>. Luettu 26.08.2021
- 8 Timola, Ninni. 2021. Puusuunnittelun käsikirja. E-kirja. Ramboll Finland Oy. Luettu 08.09.2021
- 9 Liimapuukäsikirja osa 2. 2015. E-kirja. Suomen Liimapuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy. Luettu 09.09.2021
- 10 Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje viides painos. 2020. E-kirja. Puuinfo. <<https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Eurokoodi-5-Lyhennetty-suunnitteluohje-5.-PAINOS-2020-P%C3%84IVITYS-22.7.-web.pdf>>. Luettu 12.09.2021
- 11 Rakentamisen päästötietokanta. 2021. SYKE. <<https://co2data.fi/>>. Luettu 16.12.2021

- 12 Tuomi, Tapani. Wallenius, Kaisa. Mahiout, Selma. Rautiala, Sirpa. Lappalainen, Sanna. 2020. Teolliset mineraalikuidut toimistotyypisissä työtiloissa. Työterveyslaitos. <[https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/139149/TTL\\_978-952-261-916-7.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/139149/TTL_978-952-261-916-7.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Luettu 18.09.2021
- 13 Kierrätyslasista valmistettu ISOVER on ekologinen valinta. 2021. Saint Gobain Finland Oy. Verkkoaineisto. <<https://www.isover.fi/artikkeli/hiilijalanjalki>>. Luettu 18.10.2021
- 14 Rakenteiden hiilipäästövertailu auttaa päätöksenteossa. 2020. Saint Gobain Finland Oy. Verkkoaineisto. <<https://www.saint-gobain.fi/tarinat/artikkelit/rakenteiden-hiilipaastovertailu-auttaa-paatoksenteossa>>. Luettu 04.10.2021
- 15 RIL 249-2009. 2009. Matalaenergiarakentaminen, asuinrakennukset. Rakennusinsinööriliitto. Luettu 08.08.2021
- 16 Huuhtanen, Juhani. 2021. Rakentamisen ilmastovaikutusten vähentäminen on mahdollista nykykeinoin. Raksystems Insinööritoimisto Oy. <<https://figbc.fi/rakentamisen-ilmastovaikutusten-vahentaminen-on-mahdollista-nykykeinoin/>>. Luettu 15.08.2021
- 17 Jokakodin valaistusopas 12/2021. 2021. E-kirja. Motiva. <[https://lampputieto.fi/wp-content/uploads/joka\\_kodin\\_valaistusopas\\_2010.pdf](https://lampputieto.fi/wp-content/uploads/joka_kodin_valaistusopas_2010.pdf)>. Luettu 15.08.2021
- 18 Hiili terästeollisuudessa. 2021. Verkkoaineisto. Hiilitieto. <<https://hiilitieto.fi/hiilitietoa/perustietoa-hiilesta/hiili-terasteollisuudessa/>>. Luettu 20.08.2021
- 19 Betonin lujuus. 2021. Verkkoaineisto. Betoniteollisuus ry. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/betonin-lujuus/>>. Luettu 26.08.2021
- 20 Vihreä betoni voi puolittaa betonin hiilidioksidipäästöt. 2012. Betoniteollisuus ry. <[https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1204\\_54-55.pdf](https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1204_54-55.pdf)>. Luettu 02.09.2021
- 21 Aho, Tapio. 2021. Talonrakennustekniikan suunnittelujohtaja, Ramboll Finland Oy. Espoo. Keskustelu 23.11.2021
- 22 Pienempi hiilijalanjälki isoon rakentamiseen. 2021. Esite. Rudus Oy. Luettu 02.09.2021

- 23 Betoni on luja rakennusmateriaali, mutta mikä on betonin lujuus? 2021. Verkkoaineisto. Finnsementti. <<https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-betonista/betonin-lujuus/>>. Luettu 04.09.2021
- 24 Autio, Mika. 2021. Kehityspäällikkö, Rudus Oy. Puhelinkeskustelu 12.10.2021
- 25 Luja-Vähähiilibetoni. 2020. Lujabetoni. Verkkoaineisto. <<https://lujabetoni.fi/vahahiilibetoni/>>. Luettu 27.11.2021
- 26 Haatainen, Markus. 2021. Varapresidentti, Lujabetoni. Puhelinkeskustelu 29.11.2021
- 27 Lujabetonin hiilineutraali valmisbetoni. 2020. Lujabetoni. Verkkoaineisto. <<https://lujabetoni.fi/tuotteet/valmisbetonit/kompensoitubetoni/>>. Luettu 27.11.2021
- 28 Ensimmäiset hiilineutraalit betonituotteet markkinoille. 2019. Verkkoaineisto. STT-info. <<https://www.sttinfo.fi/tiedote/ensimmaiset-hiilineutraalit-betonituotteet-markkinoille?publisherId=69817745&releaseId=69869828>>. Luettu 27.11.2021
- 29 Kumpulainen, Anna-Maria. 2022. Pielisenbetoni. Haastattelu 21.1.2022
- 30 Uusi vähäpäästöinen CEM III -sementti saatavilla syyskuusta alkaen. 2021. Finnsementti. <<https://finnsementti.fi/nosto/uusi-vahapaastoinen-cem-iii-sementti-saatavilla-syyskuusta-alkaen/>>. Luettu 20.12.2021.
- 31 Vuosaaren valussa käytettiin onnistuneesti uutta Kolmossementtiä. 2021. Finnsementti. <<https://finnsementti.fi/ajankohtaista/vuosaaren-valussa-kaytettiin-onnistuneesti-uutta-kolmossementtia/>>. Luettu 20.12.2021
- 32 Kolmossementti – Korkean 52,5 – lujuusluokan masuunikuonasementti. 2021. Finnsementti. <<https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Kolmossementti-tuote-esite-1.pdf>>. Luettu 20.12.2021
- 33 Heikkilä, Esa. 2021. Tuotekehityspäällikkö, Finnsementti. Puhelinkeskustelu 23.12.2021
- 34 Jääskeläinen, Kalle. Vastaava työnjohtaja, YIT. Keskustelu 5.10.2021
- 35 Tutustu Betolarin vähähiilisiin rakennusteollisuuden ratkaisuihin. 2021. Betolar Oy. Verkkoaineisto. <<https://www.betolar.com/geoprime-fi>>. Luettu 29.12.2021

- 36 Decarbonate. 2021. VTT. Verkkoaineisto. <<https://www.decarbonate.fi/>>. Luettu 3.1.2022

Gaia Consulting Oy:n laskemat hiilidioksidipäästöjen tulokset infrarakenteille.

Materiaali	Määrä	Pk	Ambio	270m	Rakennuksen tyyppi	Talouden nimi	Lähde
2.12.1 Puu							
212.1P001 Teräspalkkipaikat							
212.1P0011 Teräspalkki 195x110 32 kg/m	1875,54 m³	56305 kpl			3 kg CO <sub>2</sub> /kg	Steel structure, load bearing truss, beam, column, pile, made of structural tube and section, coated or COR-TEN surface	<a href="#">https://co2data.fi</a>
212.1P0012 Teräspalkki 195x110 32 kg/m	393,26 m³	11755 kpl			3 kg CO <sub>2</sub> /kg	Steel structure, load bearing truss, beam, column, pile, made of structural tube and section, coated or COR-TEN surface	<a href="#">https://co2data.fi</a>
212.1P0013 Teräspalkki 195x110 rengastettu	359,92 m³	2393 kpl			3 kg CO <sub>2</sub> /kg	Steel structure, load bearing truss, beam, column, pile, made of structural tube and section, coated or COR-TEN surface	<a href="#">https://co2data.fi</a>
212.1P0017 Pölköt 100x140mm pilven	1,41 kpl				3 kg CO <sub>2</sub> /kg	Steel structure, load bearing truss, beam, column, pile, made of structural tube and section, coated or COR-TEN surface	<a href="#">https://co2data.fi</a>
212.1P0018 Pölköt Ylösen Tiesmanin R350	6,74 m³				3 kg CO <sub>2</sub> /kg	Steel structure, load bearing truss, beam, column, pile, made of structural tube and section, coated or COR-TEN surface	<a href="#">https://co2data.fi</a>
212.1P0019 Meren vaaran koivut naulat	1607 kg	8435 kpl			3 kg CO <sub>2</sub> /kg	Steel structure, load bearing truss, beam, column, pile, made of structural tube and section, coated or COR-TEN surface	<a href="#">https://co2data.fi</a>
122.kp_0016 Puuhallitiloja 410x206x2025	367,54 kpl	4508 kpl			3 kg CO <sub>2</sub> /kg	Steel structure, load bearing truss, beam, column, pile, made of structural tube and section, coated or COR-TEN surface	<a href="#">https://co2data.fi</a>
2.12.2 Keraaminen lauteet ja lattiat							
125.PV1201 Teräspalkki PV-ar=1200, 108kg/m²	249480 kg	249480 kg			3 kg CO <sub>2</sub> /kg	Steel structure, load bearing truss, beam, column, pile, made of structural tube and section, coated or COR-TEN surface	<a href="#">https://co2data.fi</a>
2.12.3 Maanrakennus							
1262_IPV0031 Betonirakenteita Vuoksi 15 x 7,0 mm	5454,41 m³	1091 kpl			1,9 kgCO <sub>2</sub> /kg	GEOtextile, PP-based	<a href="#">https://co2data.fi</a>
1262_IPV0033 Betonirakenteita Vuoksi 15 x 7,0 mm	610,08 kg	610 kg			1,9 kgCO <sub>2</sub> /kg	GEOtextile, PP-based	<a href="#">https://co2data.fi</a>
1262_IPV0034 Palvelus työkammarin	1073,75 m³						<a href="#">https://co2data.fi</a>
1263_IPV0010 Rakennusmaati	504,9 m³	301 kpl			1,9 kgCO <sub>2</sub> /kg	GEOtextile, PP-based	<a href="#">https://co2data.fi</a>
1263IPV0000 Suodattimen kangas käyttöhuolto N3	21705,77 m²	4341 kpl			1,9 kgCO <sub>2</sub> /kg	GEOtextile, PP-based	<a href="#">https://co2data.fi</a>
1273_IPV0100 Salvojenmuutto	386,6 m³	76 kg			1,9 kgCO <sub>2</sub> /kg	GEOtextile, PP-based	<a href="#">https://co2data.fi</a>
2.12.4 Maa-ainekset							
1322_IPV0001 Kiviluota Ø4-6 mm	1720,85 m³	1720850 kg			0 kg CO <sub>2</sub> /kg	Ree kuultia kuohemurska, päästöjä mukana tiloissa	<a href="#">https://co2data.fi</a>
1322_IPV0002 Kalliomurska, KAM, Ø4-16 mm	1212 m³	1212000 kg			0 kg CO <sub>2</sub> /kg	Ree kuultia kuohemurska, päästöjä mukana tiloissa	<a href="#">https://co2data.fi</a>
1322_IPV0003 Kalliomurska, KAM, Ø4-35 mm	3376,45 m³	3376450 kg			0 kg CO <sub>2</sub> /kg	Ree kuultia kuohemurska, päästöjä mukana tiloissa	<a href="#">https://co2data.fi</a>
1322_IPV0024 Kalliomurska, KAM, Ø4-35 mm, 11,5	76,84 m³	76840 kg			0 kg CO <sub>2</sub> /kg	Ree kuultia kuohemurska, päästöjä mukana tiloissa	<a href="#">https://co2data.fi</a>
1322_IPV0040 Kalliomurska, KAM, Ø4-55 mm	25057,61 m³	25057610 kg			0 kg CO <sub>2</sub> /kg	Ree kuultia kuohemurska, päästöjä mukana tiloissa	<a href="#">https://co2data.fi</a>
1322_IPV0050 Kalliomurska, KAM, Ø4-64 mm	9501,79 m³	9501790 kg			0 kg CO <sub>2</sub> /kg	Ree kuultia kuohemurska, päästöjä mukana tiloissa	<a href="#">https://co2data.fi</a>
1322_IPV0060 Kalliomurska, KAM, Ø4-80 mm	43922,25 m³	43922250 kg			0 kg CO <sub>2</sub> /kg	Ree kuultia kuohemurska, päästöjä mukana tiloissa	<a href="#">https://co2data.fi</a>
1322_IPV0080 Kalliomurska, KAM, Ø4-150 mm	821,9 m³	821900 kg			0 kg CO <sub>2</sub> /kg	Ree kuultia kuohemurska, päästöjä mukana tiloissa	<a href="#">https://co2data.fi</a>
1322_IPV0062 Septti Ø6-32	9638,95 m³	9638950 kg			0,007 kgCO <sub>2</sub> /kg	Crushed rock	<a href="#">https://co2data.fi</a>
1322_IPV0064 Kalliomurska, KAM, Ø4-32 mm, painotuottua	15322,33 m³	153097330 kg			0 kg CO <sub>2</sub> /kg	Crushed rock/murke, päästöjä mukana tiloissa	<a href="#">https://co2data.fi</a>
13225_IPV0020 Kalliomurska, KAM, Ø4-32 mm, painotuottua	15564 m³	15564000 kg			0,007 kgCO <sub>2</sub> /kg	Crushed rock	<a href="#">https://co2data.fi</a>
2.12.5 Kevytsäätävät							
1332_IPV0020 Painotuottua 1510 kg/m³3rd	297,99 m³	297322,1			0,016666667 kgCO <sub>2</sub> /kg	Boston Musta Muuta	<a href="#">https://www.opencor2.net/paastokarttojen/tietoa/boston-musta-muuta-24/219</a>
1332_IPV0080 Nylttymusta 1200 kg/m³3rd	4518 m³	3765001			0,016666667 kgCO <sub>2</sub> /kg	Boston Musta Muuta	<a href="#">https://www.opencor2.net/paastokarttojen/tietoa/boston-musta-muuta-24/219</a>
2.12.6 Kiviä maahan asennus							
13900001000 Kalliomurska Ø4-5 mm 1,43 ton/m³3rd	7979,71 m³	2979710 kg			0 kg CO <sub>2</sub> /kg	Ree tuotettu luota/murke, päästöjä mukana tiloissa	<a href="#">https://co2data.fi</a>
2.14.1 JPE Puut							
1412_IPV010 Tadelnalaajapalkki 110/95, S/N8	3511,2 m	1228,9 kpl			4,3 kg CO <sub>2</sub> /kg	Drinking water pipe, PE-X	<a href="#">https://co2data.fi</a>
1412_IPV0100 Tadelnalaajapalkki 200/231, S/N8	224,7 m	224,7 kpl			2,57 kg CO <sub>2</sub> /kg	Kalusteputket 100/90mm, kappiä	<a href="#">https://co2data.fi</a>
14121_IPV010 Sadeputkissa, PP Ø110, S/N8	477,85 m	147,2 kpl			3,8 kg CO <sub>2</sub> /kg	Drinking water pipe, PE-X	<a href="#">https://co2data.fi</a>
14121_IPV020 Sadeputkissa, PP Ø160, S/N8	755,7 m	244,5 kpl			3,8 kg CO <sub>2</sub> /kg	Drinking water pipe, PE-X	<a href="#">https://co2data.fi</a>
14121_IPV050 Sadeputkissa, PP Ø165, S/N8	2060,1 m	714,2 kpl			3,8 kg CO <sub>2</sub> /kg	Drinking water pipe, PE-X	<a href="#">https://co2data.fi</a>
14121_IPV010 PVC-puik. Ø110, S/N8	695,15 m	243,3 kpl			3,8 kg CO <sub>2</sub> /kg	Drinking water pipe, PE-X	<a href="#">https://co2data.fi</a>
14122_IPV020 PVC-puik. Ø160, S/N8	309,1 m	108,2 kpl			3,8 kg CO <sub>2</sub> /kg	Drinking water pipe, PE-X	<a href="#">https://co2data.fi</a>
14122_IPV010 PVC-puik. Ø160, S/N8	286 m	98,6 kpl			3,8 kg CO <sub>2</sub> /kg	PVC, 200 mm, Ø16, lauseiden mukaisesti	<a href="#">https://co2data.fi</a>
14122_IPV050 PVC-puik. Ø115, S/N8	407 m	142,5 kpl			3,8 kg CO <sub>2</sub> /kg	Drinking water pipe, PE-X	<a href="#">https://co2data.fi</a>
14122_IPV050 PVC-puik. Ø115, S/N8	107,8 m	37,7 kpl			3,8 kg CO <sub>2</sub> /kg	Drinking water pipe, PE-X	<a href="#">https://co2data.fi</a>
141213_IPV040 FK-puik. 60/4 x 23/0, Dr	482,9 m	169,5 kpl			3,8 kg CO <sub>2</sub> /kg	Drinking water pipe, PE-X	<a href="#">https://co2data.fi</a>
14121_IPV020 PEH-painputk. Ø16mm, PN 10	86,25 m	30,2 kpl			3,8 kg CO <sub>2</sub> /kg	Drinking water pipe, PE-X	<a href="#">https://co2data.fi</a>
141213_IPV050 PEH-painputk. Ø16mm, PN 10	407 m	142,5 kpl			3,8 kg CO <sub>2</sub> /kg	Drinking water pipe, PE-X	<a href="#">https://co2data.fi</a>
2.14.2 JPE Kevyt							
14112_IPV020 Kevytlaatu 400/1515, tekniikkopö	451 kg	451 kpl			112,33 kg CO <sub>2</sub> /kg	Sisäkanavakäyttö 400/151510	<a href="#">https://rakennus-vaihtelu.fi/2014-18_painopohjainen_co2_laskennan_web.pdf</a>
141113_IPV003 Kevytlaatu 400/151510/20/							

## Liite 2: Säilytyshallin kaaren kuormitus RFEM-mallilla

RFEM-mallilla laskettuja kuormia on käytetty rakenteiden mitoittamisessa.

LC1  
Omapaino

### 3.2 MEMBER LOADS

LC1: Omapaino

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Symbol	Load Parameters	
								Value	Unit
14	Members	219	Force	Uniform	z	True Length	p	5.540	kN/m

### 3.2/1 MEMBER LOADS - LOAD ECCENTRICITY

LC1: Omapaino

No.	Reference to	On Members No.	Absolute Offset		Absolute Offset		Relative Offset		Relative Offset	
			Mbr. Start	Mbr. Start	Mbr. End	Mbr. End	Mbr. Start	Mbr. Start	Mbr. End	Mbr. End
			e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	y-Axis	z-Axis	y-Axis	z-Axis
14	Members	219	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle

LC2  
Lumikuorma

### 3.2 MEMBER LOADS

LC2: Lumikuorma

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Symbol	Load Parameters	
								Value	Unit
5	List of members	219	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-14.960	kN/m

### 3.2/1 MEMBER LOADS - LOAD ECCENTRICITY

LC2: Lumikuorma

No.	Reference to	On Members No.	Absolute Offset		Absolute Offset		Relative Offset		Relative Offset	
			Mbr. Start	Mbr. Start	Mbr. End	Mbr. End	Mbr. Start	Mbr. Start	Mbr. End	Mbr. End
			e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	y-Axis	z-Axis	y-Axis	z-Axis
5	List of members	219	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle

LC3  
Ripustus

### 3.2 MEMBER LOADS

LC3: Ripustus

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Symbol	Load Parameters	
								Value	Unit
2	Members	219	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-6.190	kN/m
3	Members	219	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-1.800	kN/m

### 3.2/1 MEMBER LOADS - LOAD ECCENTRICITY

LC3: Ripustus

No.	Reference to	On Members No.	Absolute Offset		Absolute Offset		Relative Offset		Relative Offset	
			Mbr. Start	Mbr. Start	Mbr. End	Mbr. End	Mbr. Start	Mbr. Start	Mbr. End	Mbr. End
			e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	y-Axis	z-Axis	y-Axis	z-Axis
2	Members	219	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle
3	Members	219	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle

LC4  
W + x

### 3.2 MEMBER LOADS

LC4: W + x

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Symbol	Load Parameters	
								Value	Unit
8	Members	219	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-1.130	kN/m
9	Members	218	Force	Uniform	XL	True Length	p	1.640	kN/m
11	List of members	217	Force	Uniform	XL	True Length	p	3.830	kN/m
12	List of members	219	Force	Uniform	ZL	True Length	p	4.850	kN/m

### 3.2/1 MEMBER LOADS - LOAD ECCENTRICITY

LC4: W + x

No.	Reference to	On Members No.	Absolute Offset		Absolute Offset		Relative Offset		Relative Offset	
			Mbr. Start	Mbr. Start	Mbr. End	Mbr. End	Mbr. Start	Mbr. Start	Mbr. End	Mbr. End
			e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	y-Axis	z-Axis	y-Axis	z-Axis
8	Members	219	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle
9	Members	218	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle
11	List of members	217	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle
12	List of members	219	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle

LC5  
W - x

### 3.2 MEMBER LOADS

LC5: W - x

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Symbol	Load Parameters	
								Value	Unit
3	Members	219	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-1.130	kN/m
4	Members	217	Force	Uniform	XL	True Length	p	-1.640	kN/m
5	Members	218	Force	Uniform	XL	True Length	p	-3.830	kN/m
6	Members	219	Force	Uniform	ZL	True Length	p	4.850	kN/m

### 3.2/1 MEMBER LOADS - LOAD ECCENTRICITY

LC5: W - x

No.	Reference to	On Members No.	Absolute Offset		Absolute Offset		Relative Offset		Relative Offset	
			Mbr. Start	Mbr. Start	Mbr. End	Mbr. End	Mbr. Start	Mbr. Start	Mbr. End	Mbr. End
			e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	y-Axis	z-Axis	y-Axis	z-Axis
3	Members	219	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle
4	Members	217	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle
5	Members	218	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle
6	Members	219	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle

LC6  
W y

### 3.2 MEMBER LOADS

LC6: W y

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Symbol	Load Parameters Value	Unit
3	Members	217	Force	Uniform	XL	True Length	p	-4.380	kN/m
4	Members	219	Force	Uniform	ZL	True Length	p	3.950	kN/m
5	Members	218	Force	Uniform	XL	True Length	p	4.380	kN/m

### 3.2/1 MEMBER LOADS - LOAD ECCENTRICITY

LC6: W y

No.	Reference to	On Members No.	Absolute Offset		Absolute Offset		Relative Offset		Relative Offset	
			Mbr. Start	Mbr. Start	Mbr. End	Mbr. End	Mbr. Start	Mbr. Start	Mbr. End	Mbr. End
			e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	y-Axis	z-Axis	y-Axis	z-Axis
3	Members	217	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle
4	Members	219	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle
5	Members	218	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle

LC7  
ylipaine

### 3.2 MEMBER LOADS

LC7: ylipaine

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Symbol	Load Parameters Value	Unit
3	Members	219	Force	Uniform	ZL	True Length	p	1.100	kN/m
4	Members	217	Force	Uniform	XL	True Length	p	-1.100	kN/m

### 3.2/1 MEMBER LOADS - LOAD ECCENTRICITY

LC7: ylipaine

No.	Reference to	On Members No.	Absolute Offset		Absolute Offset		Relative Offset		Relative Offset	
			Mbr. Start	Mbr. Start	Mbr. End	Mbr. End	Mbr. Start	Mbr. Start	Mbr. End	Mbr. End
			e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	y-Axis	z-Axis	y-Axis	z-Axis
3	Members	219	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle
4	Members	217	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle

LC8  
alipaine

### 3.2 MEMBER LOADS

LC8: alipaine

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Symbol	Load Parameters Value	Unit
3	Members	217	Force	Uniform	XL	True Length	p	1.640	kN/m
4	Members	219	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-1.640	kN/m

### 3.2/1 MEMBER LOADS - LOAD ECCENTRICITY

LC8: alipaine

No.	Reference to	On Members No.	Absolute Offset		Absolute Offset		Relative Offset		Relative Offset	
			Mbr. Start	Mbr. Start	Mbr. End	Mbr. End	Mbr. Start	Mbr. Start	Mbr. End	Mbr. End
			e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	y-Axis	z-Axis	y-Axis	z-Axis
3	Members	217	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle
4	Members	219	0.0	0.0	0.0	0.0	Middle	Middle	Middle	Middle

LC9  
törmäys 1

### 3.2 MEMBER LOADS

LC9: törmäys 1

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Symbol	Load Parameters Value	Unit
2	Members	217	Force	Concentr.	XL	True Length	P	-300.000	kN
							A	1.700	m

### 3.2/2 MEMBER LOADS - LOAD ECCENTRICITY - CONCENTRATED FORCE

LC9: törmäys 1

No.	Reference to	On Members No.	Absolute Offset		Relative Offset	
			e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	y-Axis	z-Axis
2	Members	217	0.0	0.0	Middle	Middle

LC10  
törmäys 2

### 3.2 MEMBER LOADS

LC10: törmäys 2

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Symbol	Load Parameters Value	Unit
2	Members	217	Force	Concentr.	YL	True Length	P	-300.000	kN
							A	1.700	m

### 3.2/2 MEMBER LOADS - LOAD ECCENTRICITY - CONCENTRATED FORCE

LC10: törmäys 2

No.	Reference to	On Members No.	Absolute Offset		Relative Offset	
			e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	y-Axis	z-Axis
2	Members	217	0.0	0.0	Middle	Middle

LC11  
törmäys 3

### 3.2 MEMBER LOADS

LC11: törmäys 3

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Symbol	Load Parameters Value	Unit
2	Members	218	Force	Concentr.	XL	True Length	P	300.000	kN
							A	1.700	m

### 3.2/2 MEMBER LOADS - LOAD ECCENTRICITY - CONCENTRATED FORCE

LC11: törmäys 3

No.	Reference to	On Members No.	Absolute Offset		Relative Offset	
			e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	y-Axis	z-Axis
2	Members	218	0.0	0.0	Middle	Middle

LC12  
törmäys 4

### 3.2 MEMBER LOADS

LC12: törmäys 4

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Symbol	Load Parameters Value	Unit
2	Members	218	Force	Concentr.	YL	True Length	P	-300.000	kN
							A	1.700	m

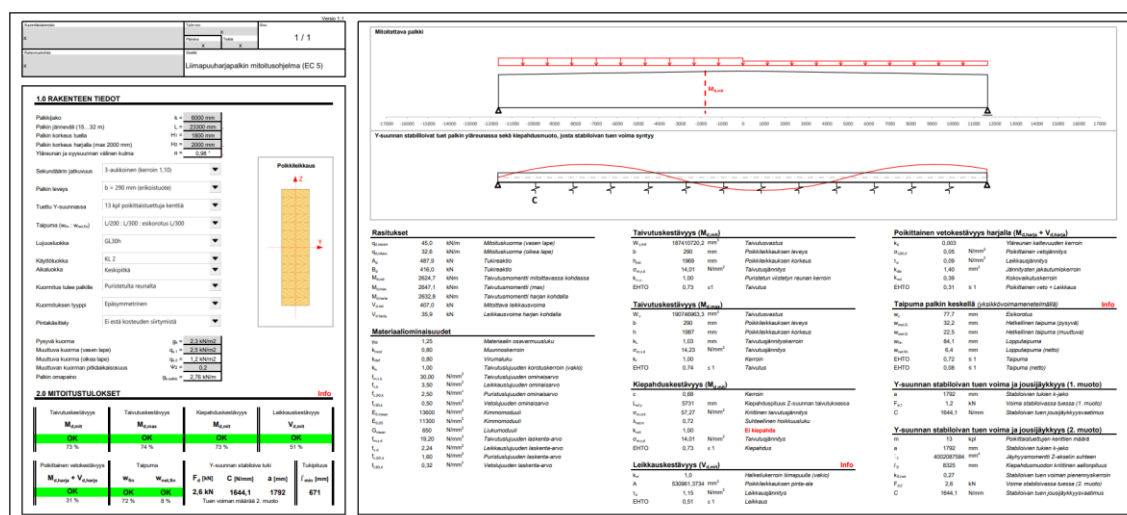
### 3.2/2 MEMBER LOADS - LOAD ECCENTRICITY - CONCENTRATED FORCE

LC12: törmäys 4

No.	Reference to	On Members No.	Absolute Offset		Relative Offset	
			e <sub>y</sub> [mm]	e <sub>z</sub> [mm]	y-Axis	z-Axis
2	Members	218	0.0	0.0	Middle	Middle



## Puufinon laskentapohjan tulokset harjapalkin mitoitukselle murtorajatilassa



## Liite 4: Harjapalkin palomitoitus käsinlaskennalla

### Harjapalkin palomitoitus käsin laskennalla (RIL 205-1-2017 mukaan)

#### 1. Lähtötiedot

Palkin jänneväli:  $L = 23\,300\text{ mm}$

Palkin leveys:  $b = 192\text{ mm}$

Palkkijako:  $k = 6000\text{ mm}$

Kattoruotojen jatkuvuus: 3-aukkoinen (kerroin 1,1)

Kattoruodejako k1792

Esikorotus:  $L/300$

Lujuusluokka: GL30h

Käyttöluokka: 2

Kuormitus palkin yläreunalla sekundääripalkkien kohdalla

Pintakäsittely ei estä kosteuden siirtymistä

Yläpohjarakenteen omapaino:  $g_k = 2,255\text{ kN/m}^2$

Lumikuorma katolla:  $q_{k\text{lumi}} = 2,493\text{ kN/m}^2$

Palkin omapaino:  $g_{k\text{palkki}} = 2,76\text{ kN/m}$

Lamellipaksuus: 45 mm

Harjapalkin poikkileikkaus:  $(b=290\text{ mm}) \times (H_1 = 1751\text{ mm} - H_2 = 1951\text{ mm} - H_1 = 1751\text{ mm})$

Yläreunan kaltevuus:  $0.92^\circ$

#### 2. Kuormat

##### Kuormitustapaus 1 (KT1): Onnettomuustilanne 1

$$\sum p_1 = 1,1 \cdot \left( 6,0\text{m} \cdot 2,26 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) + 1,76 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 16,64 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

##### Kuormitustapaus 2 (KT2): Omapaino + symmetrinen lumikuorma 100 %

Onnettomuustilanne

$$\sum p_2 = 1,1 \cdot \left( 6,0\text{m} \cdot \left( 2,26 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) \right) + 1,76 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 1,1 \cdot 0,5 \cdot 6,0\text{m} \cdot 2,49 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 24,87 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

**Kuormitustapaus 3 (KT3): Omapaino + vasen lape 100 %/oikea lape 50 %**

Onnettomuustilanne

$$\sum p_{3,vasen} = 1.1 \cdot \left( 6,0m \cdot \left( 2,26 \frac{kN}{m^2} \right) \right) + 1,76 \frac{kN}{m} + 1.1 \cdot 0,5 \cdot 6,0m \cdot 2,49 \frac{kN}{m^2} = 24,87 \frac{kN}{m}$$

$$\sum p_{3,oikea} = 1.1 \cdot \left( 6,0m \cdot \left( 2,26 \frac{kN}{m^2} \right) \right) + 1,76 \frac{kN}{m} + 1.1 \cdot 0,5 \cdot 6,0m \cdot 2,49 \frac{kN}{m^2} \cdot 0.5 = 20,76 \frac{kN}{m}$$

**KT 2 on onnettomuustilanteessa määräävä****3. Materiaali****Liimapuupalkki GL30c 290 x 1751–1951–1751**

$$k_h = \left( \frac{600}{h} \right)^{0.1} = \left( \frac{600}{1751} \right)^{0.1} 0.898 \leq 1.1$$

Taivutuslujuuden ominaisarvon korotuskerroin  $k_h = 1,0$  (palkin korkeus yli 600 mm)Käyttöluokka: 2 (EN 14080)Muunnoskerroin:  $k_{mod} = 1.1$ Virumaluku:  $k_{def} = 0.8$ Lujuus- ja jäykkyysominaisuudet (SFS-EN 1995-1-1 mukaan):Materiaalin osavarmuusluku,  $\gamma_M = 1,25$ 

Taivutuslujuus:	$f_{m,y,k} = 30,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,y,d} = 26,4 \text{ N/mm}^2$
Leikkauslujuus:	$f_{v,k} = 3,50 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,d} = 3,08 \text{ N/mm}^2$
Puristuslujuus (90°):	$f_{c,90,k} = 2,50 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,90,d} = 2,2 \text{ N/mm}^2$
Vetolujuus (90°):	$f_{t,90,k} = 0,5 \text{ N/mm}^2$	$f_{t,90,d} = 0,44 \text{ N/mm}^2$
Kimmomoduuli:	$E_{0,mean} = 13\,600 \text{ N/mm}^2$	$E_{0,05} = 11\,300 \text{ N/mm}^2$
Liukumoduuli:	$G_{0,mean} = 650 \text{ N/mm}^2$	$G_{0,05} = 540 \text{ N/mm}^2$

#### 4. Alustava mitoitus

##### 4.1 Leikkauskestävyys tuella

Kuormitustapaus 2:ssa käyttöluokka on 2. Saadaan tehollinen leveys:

$$b_{eff} = k_{cr} \cdot b = 1,0 \cdot 290 \text{ mm} = 290 \text{ mm}$$

$$\text{Tukireaktio: } V_d = \frac{p_d \cdot L}{2} \rightarrow V_d = \frac{24,87 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 23,3 \text{ m}}{2} = 289,7 \text{ kN}$$

$$\text{Palkin korkeus tuella: } \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{eff} \cdot f_{v,d}} \leq h_1$$

$$\rightarrow h_1 \geq \frac{3}{2} \cdot \frac{289734 \text{ N}}{290 \text{ mm} \cdot 3,08 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \approx 324,38 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \underline{h_1 = 1751 \text{ mm käy}}$$

Lamellien kerrannaiskorkeus  $\rightarrow \frac{325}{45} \approx 7,2 \rightarrow 8$  lamellia, minimikorkeus tuella on siis  $h_1 \geq 360 \text{ mm}$ .

##### 4.1 Taivutuskestävyys palkin keskellä

$$\text{Taivutusmomentti: } M_{d,max} = \frac{p_d \cdot L^2}{8} \rightarrow M_{d,max} = \frac{24,87 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot (23,3 \text{ m})^2}{8} = 1687,7 \text{ kNm}$$

$$\text{Palkin korkeus keskellä, } \sigma_{m,d} = \frac{M_{d,max}}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot h_2^2} \leq f_{m,d}$$

$$\rightarrow h_2 \geq \sqrt[3]{\frac{1688 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1}{6} \cdot 290 \text{ mm} \cdot 27,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}} \approx 1127 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \underline{h_2 = 1951 \text{ mm käy}}$$

Tarkistetaan, täyttyykö yläpinnan kaltevuus ( $\alpha = 0,98^\circ / 0,017$ )

$$h_2 - h_1 = x \rightarrow 0,017167 = \frac{x}{\frac{23300 \text{ mm}}{2}} \rightarrow x = 200 \text{ mm}$$

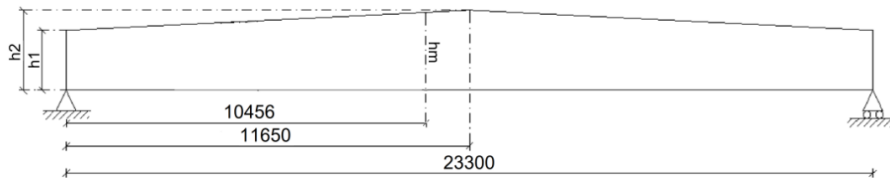
$$h_2 - h_1 = 1951 \text{ mm} - 1751 \text{ mm} = 200 \text{ mm}$$

**Palkin mitat 1751–1951–1751 ovat ok.**

## 5. Lopullinen mitoitus

Kyseessä symmetrinen tasainen kuorma. Lasketaan taivutuksen kriittinen kohta:

$$x_m = \frac{h_1}{h_2} \cdot \frac{L}{2} \rightarrow x_m = \frac{1751 \text{ mm}}{1951 \text{ mm}} \cdot \frac{23300 \text{ mm}}{2} \rightarrow x_m = 10456 \text{ mm}$$



**Puufon ohjelman laskentajako (FEM) pituus / 300 antaa arvon  $x_m = 10477 \text{ mm}$ .**

Palkin korkeus mitoittavassa kohdassa  $\left(\frac{1}{58,25}\right)$ :

$$h_m = h_1 + x_m \cdot 0,01717 \rightarrow h_m = 1751 \text{ mm} + \frac{10456 \text{ mm}}{58,25} \rightarrow h_m \approx 1931 \text{ mm}$$

### 5.1 Taivutuskestävyys mitoittavassa poikkileikkauksessa (KT:2)

Taivutusmomentti mitoittavan poikkileikkauksen kohdassa:

$$M_d(x_m) = \frac{p_d \cdot L \cdot x_m}{2} \cdot \left(1 - \frac{x_m}{L}\right) \rightarrow M_d(x_m) = \frac{24,87 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 23,3\text{m} \cdot 10,456\text{m}}{2} \cdot \left(1 - \frac{10,456\text{m}}{23,3\text{m}}\right)$$

$$\rightarrow M_d(x_m) = 1670.0 \text{ kNm}$$

Taivutusjännitys mitoittavan poikkileikkauksen kohdassa:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d(x_m)}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot h_m^2} \rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{1670 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1}{6} \cdot 290\text{mm} \cdot (1931\text{mm})^2} = 9,27 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Keroin  $k_{m,\alpha}$ , kun viistetty reuna on puristettu:

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{1,5 \cdot f_{v,d}} \cdot \tan \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \tan^2 \alpha\right)^2}}$$

$$\rightarrow k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{26,4 \frac{N}{mm^2}}{1,5 \cdot 3,08 \frac{N}{mm^2}} \cdot \tan(0,98^\circ) \right)^2 + \left( \frac{26,4 \frac{N}{mm^2}}{2,2 \frac{N}{mm^2}} \cdot \tan(0,98^\circ)^2 \right)^2}} = 0.995$$

Mitoitusehto:  $\frac{\sigma_{m,d}}{k_{m,\alpha} \cdot f_{m,d}} = \frac{9,27 \frac{N}{mm^2}}{0.995 \cdot 27,5 \frac{N}{mm^2}} = 0,34 < 1 \quad \text{OK}$

---

## 5.2 Taivutuskestävyys harjalla (KT:2)

Taivutusmomentti palkin keskellä,

$$M_{d,max} = \frac{p_d \cdot L^2}{8} = \frac{24,87 \frac{kN}{m} \cdot (23,3m)^2}{8} = 1687,7 \text{ kNm}$$

$k_l$  -kerroin mitoitustapauksessa (harjapalkeilla):

$$k_l = 1 + 1.4 \cdot \tan(0,98) + 5.4 \cdot \tan^2(0,98) = 1.026$$

Taivutusjännitys harjan kohdassa:

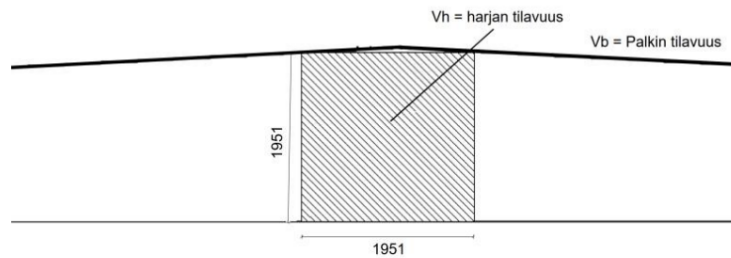
$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{d,max}}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot h_2^2} \rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{1687,7 \cdot 10^6 Nmm}{\frac{1}{6} \cdot 290mm \cdot (1951mm)^2} = 9,17 \frac{N}{mm^2}$$

$k_r$ -kerroin:

Harjapalkilla  $k_r = 1,0$

Mitoitusehto:  $\frac{k_l \cdot \sigma_{m,d}}{k_r \cdot f_{m,d}} = \frac{1,03 \cdot 9,2 \frac{N}{mm^2}}{1,0 \cdot 26,4 \frac{N}{mm^2}} = 0.36 < 1 \quad \text{OK}$

### 5.3 Poikittainen vetokestävyys harjalla (KT:2)



$$V_h = 1,951m \cdot 1,951m \cdot 0,29m + 0,049m = 1,15 m^3$$

$$V_b = 1,751m \cdot 23,3m \cdot 0,29 + 0,2m \cdot 11,65m \cdot 0,29m = 4,11 m^3$$

Lasketaan mitoittava tilavuus ( $V_h$  = harja-alue ja  $V_b$  = koko palkki).

Saa olla enintään  $\frac{2}{3}$  palkin kokonaistilavuudesta.

$$V = \min \left\{ \begin{array}{l} V_h = 1,15 \\ \frac{2}{3} V_b = 2,74 \end{array} \right. \rightarrow V = 1,15 m^3$$

Lasketaan  $k_p$  -kerroin:

$$\text{Harjapalkille saadaan } k_p = 0,2 \cdot \tan(0,98^\circ) = 0,0034$$

Lasketaan poikittainen vetojännitys (kun pintakäsittely ei estä kosteuden siirtymistä):

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{M_{d,max}}{\frac{1}{6} b \cdot h_2^2} = 0,003 \cdot \frac{1688 \cdot 10^6 Nmm}{\frac{1}{6} 290mm \cdot (1951mm)^2} = 0,03 \frac{N}{mm^2}$$

Lasketaan tilavuuskerroin (liimapuulle vertailutilavuus  $V_0 = 0,01m^3$ )

$$k_{vol} = \left( \frac{V_0}{V} \right)^{0,2} = \left( \frac{0,01m^3}{1,15m^3} \right)^{0,2} = 0,387$$

Jännitys jakauman kerroin saadaan taulukosta (EC5 luku 6.4.3):  $k_{dis} = 1,4$

Mitoitusehto:

$$\frac{\sigma_{m,d}}{k_{vol} \cdot k_{dis} \cdot f_{t,90,d}} = \frac{0,03 \frac{N}{mm^2}}{0,387 \cdot 1,4 \cdot 0,46 \frac{N}{mm^2}} = 0,12 < 1 \quad \text{OK}$$

## 5.4 Yhdistetty poikittainen veto- ja leikkauskestävyys harjalla (KT:3)

Mitoitusta ei tarkisteta symmetrisellä kuormalla, koska harjan leikkausvoima on nolla.  
Epäsymmetrisessä kuormitustapaus 3:ssa maksimimomentti ja leikkausvoima:

$$M_{d,harja} = 1567 \text{ kNm}$$

$$V_{d,harja} = 12,0 \text{ kN}$$

Leikkausjännitys harjan kohdalla, poikkileikkauksen keskellä:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{eff} \cdot h_2} \rightarrow \frac{3}{2} \cdot \frac{12000 \text{ N}}{290 \text{ mm} \cdot 1951 \text{ mm}} = 0,032 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Lasketaan poikittainen vetojännitys harjan kohdalla:

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{M_{d,max}}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot h_2^2} = 0,03 \cdot \frac{1567 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1}{6} \cdot 290 \text{ mm} \cdot (1951 \text{ mm})^2} = 0,26 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

**Mitoitusehto:**

$$\frac{\tau_d}{f_{vd}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} + k_{vol} + f_{t,90,d}} \leq 1,0$$

$$\rightarrow \frac{0,032 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{3,21 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} + \frac{0,27 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,4 + 0,387 + 0,44 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \leq 1,0 \rightarrow 0,13 \leq 1,0$$

## 5.5 Leikkauskestävyys palkin mitoittavassa poikkileikkauksessa (KT:2)

Halkeilukerroin liimapuulla  $k_{cr} = 1,0$

Mitoittava leikkausvoima  $V_{d,mit} = 442,9 \text{ kN}$

Leikkauskestävyys:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{d,mit}}{k_{cr} \cdot b_{eff} \cdot h_m} = \frac{3}{2} \cdot \frac{442900 \text{ N}}{1,0 \cdot 290 \text{ mm} \cdot 1931 \text{ mm}} = 1,19 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{v,d} = 3,21 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

**Mitoitusehto:**

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1,0 \rightarrow 0,37 \leq 1,0$$



## 5.6 Taipuma-arvio palkin keskellä (KT:2)

Käyttörajoitilatarkastelu ei ole välttämätöntä palotilanteessa (tarkastelu varmuudeksi)

Taipuma-arvio:

$$h_e = h_1 + 0.33 \cdot L \cdot \tan \alpha \rightarrow h_e = 1951 \text{ mm} + 0.33 \cdot 23300 \text{ mm} \cdot \tan 0.98^\circ = 2082.5 \text{ mm}$$

Jäyhyysmomentti määräävän poikkileikkauksen mukaan:

$$I_y = \frac{b \cdot h_e^3}{12} \rightarrow I_y = \frac{290 \text{ mm} \cdot (2083 \text{ mm})^3}{12} = 21.83 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$\text{Pysyvän kuorman paino: } 1.1 \cdot 6 \text{ m} \cdot 2.26 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 1.76 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 16.68 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Hyötykuorman paino: } 1.1 \cdot 6 \text{ m} \cdot 2.49 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 16.45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Hetkellinen taipuma pysyvästä kuormasta (taivutus + leikkaus):

$$w_{inst,G} = \frac{5}{384} \cdot \frac{p_{g,k} \cdot L^4}{E_{0,mean} \cdot I_y} + 0.35 \cdot \frac{p_{g,k} \cdot L^2}{G_{0,mean} \cdot b \cdot (h_1 + h_2)}$$

$$w_{inst,G} = \frac{5}{384} \cdot \frac{16.68 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot (23300 \text{ mm})^4}{13000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 21.83 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4} + 0.35 \cdot \frac{16.68 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot (23300 \text{ mm})^2}{650 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 290 \text{ mm} \cdot (1751 \text{ mm} + 1951 \text{ mm})}$$

$$w_{inst,G} = 27,10 \text{ mm}$$

Hetkellinen taipuma hyötykuormasta (taivutus + leikkaus):

$$w_{inst,Q} = \frac{5}{384} \cdot \frac{p_{q,s,k} \cdot L^4}{E_{0,mean} \cdot I_y} + 0.35 \cdot \frac{p_{q,s,k} \cdot L^2}{G_{0,mean} \cdot b \cdot (h_1 + h_2)}$$

$$w_{inst,Q} = \frac{5}{384} \cdot \frac{16.45 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot (23300 \text{ mm})^4}{13000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 21.83 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4} + 0.35 \cdot \frac{16.45 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot (23300 \text{ mm})^2}{650 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 290 \text{ mm} \cdot (1751 \text{ mm} + 1951 \text{ mm})}$$

$$w_{inst,Q} = 26,73 \text{ mm}$$

Lopputaipuma:

$$w_{fin} = (1 + k_{def}) \cdot w_{inst,G} + (1 + 0.2 \cdot k_{def}) \cdot w_{inst,Q}$$

$$w_{fin} = (1 + 0.6) \cdot 27,10 \text{ mm} + (1 + 0.2 \cdot 0.6) \cdot 26,73 \text{ mm} = 73,29 \text{ mm}$$

**Mitoitusehto ilman esikoroitusta (L/200):**

$$\frac{73,29 \text{ mm}}{116,5 \text{ mm}} = 0,63 \leq 1,0$$

Harjapalkkiin tehdään esikoroitus L/400, jolloin maksimitaipuma saa olla L/300:

$$w_c = 58,25 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 73,3 \text{ mm} - 58,25 \text{ mm} = 15,05 \text{ mm} < 60 \text{ mm} \left( \frac{L}{300} \right) (25\%)$$

**Mitoitusehto esikoroitettuna (L/400):**

$$\frac{27,86 \text{ mm}}{60 \text{ mm}} = 0,25 \leq 1,0$$

## 5.7 Kiepahduskestävyys (1. muoto) (KT:2)

Kiepahdus mitoitetaan määräävän poikkileikkauksen mukaan. Kiepahdusväliksi valitaan  $a = 1792 \text{ mm}$  (k1792 Y-suunnassa)

Tehollinen kiepahdusväli  $l_{ef} = a$ , koska palkin kuormitus tulee yläpinnan orsien kautta.

Liimapuu GL30h:lle kerroin  $c = 0,68$

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \cdot b^2}{h_m \cdot L_{ef}} \cdot E_{0.05} \rightarrow \sigma_{m,crit} = \frac{0,68 \cdot (290 \text{ mm})^2}{1931 \text{ mm} \cdot 1792 \text{ mm}} \cdot 10800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 178,49 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \rightarrow \sqrt{\frac{30,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{178,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}} = 0,41$$

$$k_{crit} = 1, \text{ koska } \lambda_{rel,m} \leq 0,75$$

**Mitoitusehto:**

$$\frac{\sigma_m}{k_{crit} f_{md}} \leq 1 \rightarrow \frac{9,27 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1 \cdot 27,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,34 \leq 1$$

## 5.8 Y-suunnan stabiloivan tuen voima ja jousijäykkyys (1. muoto, KT:2)

$$M_{d,mit} = 1670.0 \text{ kNm}$$

$$L = 23300 \text{ mm}$$

Tasainen kuorma puristetulla reunalla

$$c = 0,68$$

$$L_{ef,y} = L \cdot 0,9 + 2 \cdot h_m = 23300 \text{ mm} \cdot 0,9 + 2 \cdot 1931 \text{ mm} = 24832 \text{ mm}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \cdot b^2}{h_m \cdot L_{ef,y}} \cdot E_{0,05} = \frac{0,68 \cdot (290 \text{ mm})^2}{1931 \text{ mm} \cdot 24832 \text{ mm}} \cdot 10800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 12,88 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{30,00 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{12,88 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}} = 1,53$$

$$k_{crit} = \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} = 0,43$$

$$N_d = (1 - k_{crit}) \cdot \frac{M_{d,mit}}{h_m} = (1 - 0,51) \cdot \frac{1670,0 \text{ kNm}}{1,93 \text{ m}} = 493,53 \text{ kN}$$

Stabiloivien tukien k-jako: a = 1792 mm

Poikittaistuettujen kenttien määrä: m = 13 kpl

$$C \geq \left(2 + 2 \cdot \cos\left(\frac{180^\circ}{m}\right)\right) \cdot \frac{N_d}{a} = \left(2 + 2 \cdot \cos\left(\frac{180^\circ}{13}\right)\right) \cdot \frac{493530 \text{ N}}{1792 \text{ mm}} = 1085,63 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

$$F_{d,1} = \frac{N_d}{50 \cdot L} \cdot a = \frac{493,53 \text{ kN}}{50 \cdot 23,3 \text{ m}} \cdot 1,79 \text{ m} = 0,76 \text{ kN}$$

### 5.9 Y-suunnan stabiloivan tuen voima ja jousijäykkyys (2. muoto, KT:2)

$$I_{z,mit} = \frac{h_{mit} \cdot b_{mit}^3}{12} = \frac{1931mm \cdot (290mm)^3}{12} = 1,35 \cdot 10^7 mm^4$$

$$l_s = \max \left\{ \frac{\pi}{\sqrt[4]{\frac{C}{a \cdot E_{0,05} \cdot I_{z,mit}}}}} = \frac{\pi}{\sqrt[4]{\frac{1085 \frac{N}{mm}}{1792mm \cdot 10800 \frac{N}{mm^2} \cdot 1,35 \cdot 10^7 mm^4}}} = 2200,73 mm \right.$$

$$2 \cdot a = 2 \cdot 1792mm = 3584 mm$$

$$l_s > \frac{l}{2} \text{ Ei päde} \rightarrow 3584 mm < 11650mm$$

Tukeen vaikuttavan voiman muoto

$$k_{s,red} = \frac{a}{l_s - a} = 1,0$$

$$N_d \cdot k_{s,red} = 493,53 kN \cdot 1,0 = 493,53 kN$$

2. muodon stabiloivaan tukeen vaikuttava voima

$$F_d = \frac{N_d}{80} = \frac{493,53kN}{80} = 6,17 kN \quad \rightarrow \quad \text{Kiepahduksen 2. muoto, eli s-muoto on määräävä.}$$

**Harjapalkki kestää palotilanteen**

## Liite 5: Säilytyshallin liimapuupilari

Puuinforon laskentapohjan liimapuupilari keskipitkässä aikaluokassa

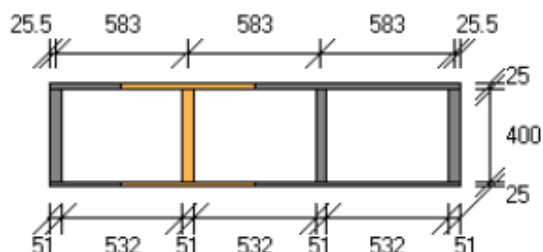
1.0 RAKENTEEN TIEDOT		Info
Pilarin tyyppi	Nivelpäinen pilari Z-suunnassa ja Y-suunnassa	▼
Rasitus suunnat	Puristettu X-suunnassa - Taivutettu Z-suunnassa	▼
Tuettu Z-suunnassa	Tuet päissä	▼
Tuettu Y-suunnassa	Tuet päissä	▼
Kuormituksen tyyppi Z-suunnassa	Tasainen kuorma	▼
Kuormitus tulee pilarille Z-suunnassa	Puristetulta reunalta	▼
Kuormituksen tyyppi Y-suunnassa	Ei kuormitusta Y-suunnassa	▼
Kuormitus tulee pilarille Y-suunnassa	Ei kuormitusta Y-suunnassa	▼
Poikkileikkauksen leveys	b = 290 mm (erikoistuote)	▼
Poikkileikkauksen korkeus	h = 720 mm	▼
Lujuusluokka	GL30c	▼
Käyttöluokka	KL 2	▼
Aikaluokka	Keskipitkä	▼
Pilarin pituus	L = 7525 mm	▼
Pilarin omapaino (MRT)	$g_{d,pilari} = 9,03 \text{ kN}$	▼
Normaalivoima (puristus) X-suunnassa (MRT)	$N_{d,x} = 550,0 \text{ kN}$	▼
Momentti Z-suunnassa (MRT)	$M_{d,y} = 269,1 \text{ kNm}$	▼
Leikkausvoima Z-suunnassa (MRT)	$V_{d,y} = 3,1 \text{ kN}$	▼
Momentti epäkeskisyydestä Y-suunnassa (MRT)	$M_{d,z} = 23,4 \text{ kNm}$	▼
Leikkausvoima epäkeskisyydestä Y-suunnassa (MRT)	$V_{d,z} = 151,0 \text{ kN}$	▼
2.0 MITOITUSTULOKSET		Info
Puristuskestävyys Nurjahdus- ja kiepahduskestävyys [ Z ]		Leikkauskestävyys [ Z ]
$N_{d,x}$ <b>OK</b> 18 %	$N_{d,x} + M_{d,y} + k_m \cdot M_{d,z}$ <b>OK</b> 82 %	$V_{d,y}$ <b>OK</b> 1 %
Puristuskestävyys Nurjahdus- ja kiepahduskestävyys [ Y ]		Leikkauskestävyys [ Y ]
$N_{d,x}$ <b>OK</b> 35 %	$N_{d,x} + k_m \cdot M_{d,y} + M_{d,z}$ <b>OK</b> 86 %	$V_{d,z}$ <b>OK</b> 48 %
Z-suunnan stabiiloiva tuki $F_d \text{ [kN]}$ $C \text{ [N/mm]}$ $a \text{ [mm]}$ <b>0,0 kN</b> <b>0,0</b> <b>-</b> Tuet vain pilarin päissä (kiertymän estävä tuki)		
Y-suunnan stabiiloiva tuki $F_d \text{ [kN]}$ $C \text{ [N/mm]}$ $a \text{ [mm]}$ <b>0,0 kN</b> <b>0,0</b> <b>-</b> Tuet vain pilarin päissä (kiertymän estävä tuki)		

Liimapuupilari raitiovaunun törmäystilanteessa.

1.0 RAKENTEEN TIEDOT		Info
Pilarin tyyppi	Nivelpäinen pilari Z-suunnassa ja Y-suunnassa	▼
Rasitus suunnat	Puristettu X-suunnassa - Taivutettu Z-suunnassa	▼
Tuettu Z-suunnassa	Tuet päissä	▼
Tuettu Y-suunnassa	Tuet päissä	▼
Kuormituksen tyyppi Z-suunnassa	Tasainen kuorma	▼
Kuormitus tulee pilarille Z-suunnassa	Puristetulta reunalta	▼
Kuormituksen tyyppi Y-suunnassa	Ei kuormitusta Y-suunnassa	▼
Kuormitus tulee pilarille Y-suunnassa	Ei kuormitusta Y-suunnassa	▼
Poikkileikkauksen leveys	b = 290 mm (erikoistuote)	▼
Poikkileikkauksen korkeus	h = 720 mm	▼
Lujuusluokka	GL30c	▼
Käyttöluokka	KL 2	▼
Aikaluokka	Hetkellinen	▼
Pilarin pituus	L = 7500 mm	.
Pilarin omapaino (MRT)	$G_{d,pilari} = 9,00 \text{ kN}$	
Normaalivoima (puristus) X-suunnassa (MRT)	$N_{d,x} = 550,0 \text{ kN}$	
Momentti Z-suunnassa (MRT)	$M_{d,y} = 270,0 \text{ kNm}$	
Leikkausvoima Z-suunnassa (MRT)	$V_{d,y} = 3,1 \text{ kN}$	
Momentti epäkeskisyydestä Y-suunnassa (MRT)	$M_{d,z} = 23,4 \text{ kNm}$	
Leikkausvoima epäkeskisyydestä Y-suunnassa (MRT)	$V_{d,z} = 403,0 \text{ kN}$	
2.0 MITOITUSTULOKSET		Info
Puristuskestävyys Nurjahdus- ja kiepahduskestävyys [ Z ] $N_{d,x}$ $N_{d,x} + M_{d,y} + k_m \cdot M_{d,z}$ <b>OK</b> <b>OK</b> 13 %      60 %		Leikkauskestävyys [ Z ] $V_{d,y}$ <b>OK</b> 1 %
Puristuskestävyys Nurjahdus- ja kiepahduskestävyys [ Y ] $N_{d,x}$ $N_{d,x} + k_m \cdot M_{d,y} + M_{d,z}$ <b>OK</b> <b>OK</b> 25 %      63 %		Y-suunnan stabiiloiva tuki $F_d$ [kN] $C$ [N/mm] $a$ [mm] <b>0,0 kN</b> <b>0,0</b> - Tuet vain pilarin päissä (kiertymän estävä tuki)

## Liite 6: Kerto-Ripa kotelolaatta teräksiselle rungolle toteutetuna

Finnwood- ohjelman tulokset kotelolaatalle teräsrungon tapauksessa.



### RAKENNETIEDOT:

Rakennetyyppi:	Harjan suuntainen kattopalkki
Poikkileikkaus:	H450-1800x25-4(2)x51x400-1800x25
Käyttöluokka:	2
Seuraamusluokka:	CC2 (KFI=1.0)
Kattokulma:	0.0 astetta
Jako/kuormituslev.:	583 mm (pintakuormille)

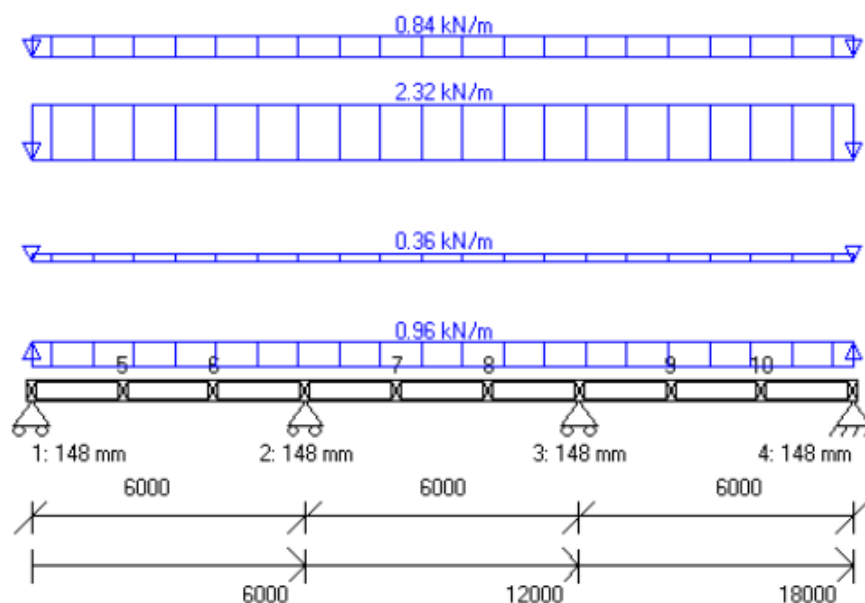
### Uloke-/jännevälipituudet:

Uloke/jänneväli:	Vaakamitta [mm]:
Jänneväli 1	6000.0
Jänneväli 2	6000.0
Jänneväli 3	6000.0
Yhteensä:	18000.0

Tuki:	Sijainti x [mm]:	Leveys [mm]:	Tyyppi:
1:	0	148	Liukutuki (Z)
2:	6000	148	Liukutuki (Z)
3:	12000	148	Liukutuki (Z)
4:	18000	148	Kiinteä niveltuki (X,Z)
5:	2000	--	Välissä oleva sivuttaistuki
6:	4000	--	Välissä oleva sivuttaistuki
7:	8000	--	Välissä oleva sivuttaistuki
8:	10000	--	Välissä oleva sivuttaistuki
9:	14000	--	Välissä oleva sivuttaistuki
10:	16000	--	Välissä oleva sivuttaistuki

Laatan osat:			
Ylälevy:	1800x25	0.025 m3/m2	KERTO-Q (27-69)
Rivat:	4x51x400	0.045 m3/m2	KERTO-S
Alalevy:	1800x25	0.025 m3/m2	KERTO-Q (27-69)
Mitoitettu ripa:	Ripa 2	(= 51.0x400.0)	
Kokonaispaino:	53 kg/m2	sisältää levyt, rivat ja poikittaiset rakenneosat	
-----			
Teholliset jäykkyydet:			
Uloke-/jänneväli:	El,ef,MRT:	El,ef,KRT:	
Jänneväli 1	17590.7 kNm2	17590.7 kNm2	
Jänneväli 2	17590.7 kNm2	17590.7 kNm2	
Jänneväli 3	17590.7 kNm2	17590.7 kNm2	
-----			
	Ylälevy:	Ripa:	Alalevy:
fm,k (My):	36.00 N/mm2	42.51 N/mm2	36.00 N/mm2
fc,0,k:	26.00 N/mm2	35.00 N/mm2	26.00 N/mm2
fc,90,k:	2.20 N/mm2	6.00 N/mm2	2.20 N/mm2
ft,0,k:	24.94 N/mm2	33.57 N/mm2	24.94 N/mm2
fv,k (Vz):	1.30 N/mm2	4.10 N/mm2	1.30 N/mm2
E,mean:	10500 N/mm2	13800 N/mm2	10500 N/mm2
G,mean:	120 N/mm2	600 N/mm2	120 N/mm2
E 0.05:	8800 N/mm2	11600 N/mm2	8800 N/mm2
fv,k(sauma):	1.30 N/mm2	4.10 N/mm2	1.30 N/mm2
-----			
Varmuuskertoimet:			
Ylälevy:	1.20		
Ripa:	1.20		
Alalevy:	1.20		
-----			
Kmod kerroin:			
Aikaluokka:	Ylälevy:	Ripa:	Alalevy:
Pysyvä:	0.600	0.600	0.600
Pitkäaikainen:	0.700	0.700	0.700
Keskipitkä:	0.800	0.800	0.800
Lyhytaikainen:	0.900	0.900	0.900
Hetkellinen:	1.100	1.100	1.100
-----			
	Ylälevy:	Ripa:	Alalevy:
Kdef kerroin:	0.800	0.800	0.800





### KUORMITUSTIEDOT:

Omapaino (Omapaino, Pysyvä):

Rakenneosan paino:  $Q_Z = 0.253 \text{ kN/m}$   $x = 0 - 18000 \text{ mm}$

viivakuorma: 1:  $Q_Z = 0.840 \text{ kN/m}$   $x = 0 - 18000 \text{ mm}$

Lumikuorma (Lumikuorma  $S_k < 2.75 \text{ kN/m}^2$ , Keskipitkä):

viivakuorma: 1:  $Q_Z = 2.323 \text{ kN/m}$   $x = 0 - 18000 \text{ mm}$

Tuulikuorma (alas) (Tuulikuorma, Hetkellinen):

viivakuorma: 1:  $Q_Z = 0.360 \text{ kN/m}$   $x = 0 - 18000 \text{ mm}$

Tuulikuorma (ylös) (Tuulikuorma, Hetkellinen):

viivakuorma: 1:  $Q_Z = -0.960 \text{ kN/m}$   $x = 0 - 18000 \text{ mm}$

### MITOITUS:

ÄÄRIARVOJEN KUORMITUSYHDISTELMÄT

Yhdistelmä 2/1 (Keskipitkä):

$1.15 \cdot \text{Omapaino} + 1.50 \cdot \text{Lumikuorma}$

Yhdistelmä 13/1 :

$1.00 \cdot \text{Omapaino} + 1.00 \cdot \text{Lumikuorma}$

VOIMASUUREIDEN ÄÄRIARVOT:

Tulos:	Maksimi-arvo:	Sijainti x:
$V_{z,\max}$	18.11 kN	6000 mm
$M_{y,\max}$	18.11 kNm	6000 mm

**MITOITUS:**

Mitoitusstandardi: EN 1995-1-1:2004 + A1:2008 + A2:2014 + RIL 205-1:2017  
 Kokonaiskäyttöaste: 78.3 %

**MITOITUSPARAMETRIT:**

Taipumaraja  $W_{net,fin}$ : L/200  
 Korotuserroin, vasen uloke: 2.00  
 Korotuserroin, oikea uloke: 2.00  
 Nurjahdus on estetty molempiin suuntiin (y ja z)  
 Kiepahdus on estetty

**MITOITUKSEN ÄÄRIARVOT:**

Tarkastelu:	Mitoitusarvo:	Raja-arvo:	Käyttöaste *):	Sijainti x:	
V, yläsauma, leikkaus:	0.32 N/mm <sup>2</sup>	0.87 N/mm <sup>2</sup>	37.5 %	12434 mm	Yhdistelmä 2/1, Keskipitkä
V, uuma, leikkaus:	0.78 N/mm <sup>2</sup>	2.73 N/mm <sup>2</sup>	28.5 %	12434 mm	Yhdistelmä 2/1, Keskipitkä
V, alasauma, leikkaus:	0.32 N/mm <sup>2</sup>	0.87 N/mm <sup>2</sup>	37.5 %	12434 mm	Yhdistelmä 2/1, Keskipitkä
M, ylälevy, kesk. puristus:	1.73 N/mm <sup>2</sup>	17.33 N/mm <sup>2</sup>	10.0 %	15750 mm	Yhdistelmä 2/1, Keskipitkä
M, ylälevy, kesk. veto:	2.17 N/mm <sup>2</sup>	16.63 N/mm <sup>2</sup>	13.0 %	12000 mm	Yhdistelmä 2/1, Keskipitkä
M, uuma, reunataivutus:	2.68 N/mm <sup>2</sup>	28.34 N/mm <sup>2</sup>	9.5 %	12000 mm	Yhdistelmä 2/1, Keskipitkä
M, alalevy, kesk. puristus:	2.17 N/mm <sup>2</sup>	17.33 N/mm <sup>2</sup>	12.5 %	12000 mm	Yhdistelmä 2/1, Keskipitkä
M, alalevy, kesk. veto:	1.73 N/mm <sup>2</sup>	16.63 N/mm <sup>2</sup>	10.4 %	15750 mm	Yhdistelmä 2/1, Keskipitkä
Tukipaine, tuki 1:	11.38 kN	36.58 kN	31.1 %	0 mm	Yhdistelmä 2/1, Keskipitkä
Tukipaine, tuki 2:	31.29 kN	39.94 kN	78.3 %	6000 mm	Yhdistelmä 2/1, Keskipitkä
Tukipaine, tuki 3:	31.29 kN	39.94 kN	78.3 %	12000 mm	Yhdistelmä 2/1, Keskipitkä
Tukipaine, tuki 4:	11.38 kN	36.58 kN	31.1 %	18000 mm	Yhdistelmä 2/1, Keskipitkä
jänneväli 1, $W_z,inst$ :	3.3 mm	— mm	— %	2700 mm	Yhdistelmä 13/1
jänneväli 1, $W_z,net,fin$ :	4.5 mm	30.0 mm	15.0 %	2700 mm	Yhdistelmä 13/1
jänneväli 2, $W_z,inst$ :	1.8 mm	— mm	— %	9000 mm	Yhdistelmä 13/1
jänneväli 2, $W_z,net,fin$ :	2.5 mm	30.0 mm	8.2 %	9000 mm	Yhdistelmä 13/1
jänneväli 3, $W_z,inst$ :	3.3 mm	— mm	— %	15300 mm	Yhdistelmä 13/1
jänneväli 3, $W_z,net,fin$ :	4.5 mm	30.0 mm	15.0 %	15300 mm	Yhdistelmä 13/1

**ÄÄRIARVOJEN KUORMITUSYHDISTELMÄT**

Yhdistelmä 2/1 (Keskipitkä):

1.15\*Omapaino + 1.50\*Lumikuorma

Yhdistelmä 13/1 :

1.00\*Omapaino + 1.00\*Lumikuorma

**VOIMASUUREIDEN ÄÄRIARVOT:**

Tulos:	Maksimiarvo:	Sijainti x:
$V_z,max$	18.24 kN	12000 mm
$M_y,max$	18.24 kNm	12000 mm

**TUKIREAKTIOT:**

Tuki:	MRTmax:	MRTmin:	KRTmax:	KRTmin:
1:	12.16 kN	-1.10 kN	8.20 kN	0.32 kN

2:	33.43 kN	-3.01 kN	22.55 kN	0.88 kN
3:	33.43 kN	-3.01 kN	22.55 kN	0.88 kN
4:	12.16 kN	-1.10 kN	8.20 kN	0.32 kN

- Tukipisteisiin syntyy nostetta, varmista ankkurointi

- KRT tukireaktiot ovat vain vertailua varten

#### TUKIREAKTIOT KUORMITUSTAPAUKSITTAIN (OMINAISARVOT):

Kuormitustapaus:	Omapaino
Tuki:	FZ [kN]:
1:	2.62
2:	7.21
3:	7.21
4:	2.62
Kuormitustapaus:	Lumikuorma
Tuki:	FZ [kN]:
1:	5.58
2:	15.33
3:	15.33
4:	5.58
Kuormitustapaus:	Tuulikuorma (alas)
Tuki:	FZ [kN]:
1:	0.86
2:	2.38
3:	2.38
4:	0.86
Kuormitustapaus:	Tuulikuorma (ylös)
Tuki:	FZ [kN]:
1:	-2.30
2:	-6.34
3:	-6.34
4:	-2.30

**MITOITUS:**

Mitoitusstandardi: EN 1995-1-1:2004 + A1:2008 + A2:2014 + RIL 205-1-2017  
 Kokonaiskäyttöaste: 56.7 %

**MITOITUSPARAMETRIT:**

Korotuskerroin, vasen uloke: 2.00  
 Korotuskerroin, oikea uloke: 2.00  
 Nurjahdus on estetty molempiin suuntiin (y ja z)  
 Kiepahdus on estetty

**MITOITUKSEN ÄÄRIARVOT:**

Tarkastelu:	Mitoitusarvo:	Raja-arvo:	Käyttöaste *):	Sijainti x:	
V, yläsauma, leikkaus:	0.54 N/mm <sup>2</sup>	1.30 N/mm <sup>2</sup>	41.9 %	5614 mm	Yhdistelmä 19/1, Keskipitkä
V, uuma, leikkaus:	1.35 N/mm <sup>2</sup>	4.51 N/mm <sup>2</sup>	30.0 %	5614 mm	Yhdistelmä 19/1, Keskipitkä
M, ylälevy, kesk. puristus:	4.58 N/mm <sup>2</sup>	20.05 N/mm <sup>2</sup>	22.8 %	2250 mm	Yhdistelmä 19/1, Keskipitkä
M, ylälevy, kesk. veto:	5.75 N/mm <sup>2</sup>	21.96 N/mm <sup>2</sup>	26.2 %	6000 mm	Yhdistelmä 19/1, Keskipitkä
M, uuma, reunataivutus:	13.43 N/mm <sup>2</sup>	36.69 N/mm <sup>2</sup>	36.6 %	6000 mm	Yhdistelmä 19/1, Keskipitkä
M, uuma, kesk. puristus:	3.11 N/mm <sup>2</sup>	29.69 N/mm <sup>2</sup>	10.5 %	6000 mm	Yhdistelmä 19/1, Keskipitkä
M, uuma, kesk. veto:	2.48 N/mm <sup>2</sup>	32.52 N/mm <sup>2</sup>	7.6 %	2250 mm	Yhdistelmä 19/1, Keskipitkä
Tukipaine, tuki 1:	4.85 kN	21.54 kN	22.5 %	0 mm	Yhdistelmä 19/1, Keskipitkä
Tukipaine, tuki 2:	13.35 kN	23.52 kN	56.7 %	6000 mm	Yhdistelmä 19/1, Keskipitkä
Tukipaine, tuki 3:	13.35 kN	23.52 kN	56.7 %	12000 mm	Yhdistelmä 19/1, Keskipitkä
Tukipaine, tuki 4:	4.85 kN	21.54 kN	22.5 %	18000 mm	Yhdistelmä 19/1, Keskipitkä
jänneväli 1, Wz, inst:	11.4 mm	– mm	– %	2700 mm	Yhdistelmä 24/1
jänneväli 2, Wz, inst:	3.9 mm	– mm	– %	9000 mm	Yhdistelmä 24/1
jänneväli 3, Wz, inst:	11.4 mm	– mm	– %	15300 mm	Yhdistelmä 24/1

**ÄÄRIARVOJEN KUORMITUSYHDISTELMÄT**

Yhdistelmä 19/1 (Keskipitkä):

1.00\*Omapaino + 0.40\*Lumikuorma

Yhdistelmä 24/1 :

1.00\*Omapaino + 0.40\*Lumikuorma

**VOIMASUUREIDEN ÄÄRIARVOT:**

Tulos:	Maksimi-arvo:	Sijainti x:
Vz,max	7.28 kN	6000 mm
My,max	7.28 kNm	6000 mm

**HUOMIOT:**

- 
- EN 1995-1-1-standardin, sen täydennysosien A1:2008, A2:2014 ja Suomen kansallisten liitteiden sekä RIL 205-1-2017 -suunnitteluohjeen mukainen laskenta
  - VTT on tehnyt kolmannen osapuolen tarkistuksen ohjelmalle (VTT-S-03665-17 ja VTT-S-05393-17)
  - MRT = Murtorajatila, KRT = Käyttörajatila
  - \*) Yhteisvaikutustarkasteluissa %-luku tarkoittaa mitoitusarvon ja raja-arvon suhdetta, ei todellista käyttöastetta
  - Liittyvän alapuolisen rakenteen tukipainekestävyys tulee tarkistaa erikseen
  - Mitoituksessa ei huomioida ulokkeiden alle 20 mm taipumaa ylöspäin
  - Värähtely- ja taipumatarkastelua ei tehdä alle 200 mm pituisille ulokkeille
  - Leikkausmuodonmuutos on mukana käyttöraja-tilamitoituksessa
  - Leikkausmuodonmuutos ei ole mukana voimasuureiden laskennassa
  - Leikkausvoiman pienentäminen on otettu huomioon Kerto-Ripa -elementin keski- tai välituilla ja lisäksi on oletettu, että kuormat vaikuttavat tukipintaan nähden elementin vastakkaisella puolella
  - Kerto-Ripa -laatan mitoitus noudattaa ETA-07/0029 mukaista suunnitteluohjetta
  - Kerto-Ripa -laatalla rakenneosien koon vaikutus lujuuteen on otettu huomioon ominaisarvoissa kertoimilla kh ja kl
  - Yllä esitetty mitoitus koskee vain valittua ripaa, muut rivat on tarkasteltava erikseen
  - Aksiaalisesti puristetun Kerto-Ripa -elementin nurjahdus laatan tasosta poispäin tulee tarkistaa erikseen
  - Kerto-Ripa -laatan mitoitus ei sisällä pintalevyn taivutuskestävyys-, leikkauskestävyys- ja taipumatarkastelua poikittain ripoihin nähden
  - Kerto-Ripa -elementin päissä ja välituilla on aina oltava joko yhtenäiset päätypalkit tai välipuut
  - Kerto-Ripa -elementissä on poikittaishapuloita myös nostopisteiden kohdalla ja jäykistyksen takia
  - Kerto-Ripa -elementin poikittaisosien painoksi on oletettu 10% ylä- ja alalevyjen sekä ripojen painosta
- 

Laskelmissa ei ole huomioitu rakennusaikaisia kuormia eikä kosteusolosuhteita. Mahdolliset rakennusaikaiset lisätuennat on mitoitettava erikseen. Rakennuksen kokonaisjäykistystä ja siitä johtuvia vaakavoimia ei ole huomioitu. Rakenneosan (palkki, pilari, laatta) soveltuvuus kokonaisuuteen on pääarakennesuunnittelijan tarkistettava erikseen.

Finnwood-ohjelmistolla tehdyt laskelmat ja tulosteet ovat voimassa vain ohjelmistoon tallennettujen Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Woodin tuotteiden kanssa. Nämä tuotteet on tarvittaessa osoitettava rakennuspaikalla hankkeen osapuolille sekä viranomaisille. Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Wood tai sen tytäryhtiöt eivät vastaa käyttäjälle tai kolmannelle osapuolelle muiden valmistajien tuotteista tai niiden käytöstä Finnwood-ohjelmistossa, ohjelmiston perusteella näin tehdyistä laskelmista ja tulosteista tai kolmansien valmistajien tuotteista tai niiden käytöstä aiheutuneista virheistä, menetyksistä tai vahingoista. Näitä ehtoja ei saa poistaa tulosteesta.

---

## Liite 7: Kotelolaatan palomitoitus

1.0 RAKENTEEN TIEDOT

Info

Palosuojaus

Kerto-Q-levy 27 ( $\rho \geq 480$  kg/m<sup>3</sup>)

▼

Poikkileikkauksen leveys

b = 51 mm

▼

Poikkileikkauksen korkeus

h = 400 mm

▼

Palkkijako

k600

▼

Alakaton koolaus

Puurangat 38x98 k400 + Jousirangat k400

▼

Palkin lujuusluokka

Kerto-S ( $\rho \geq 480$  kg/m<sup>3</sup>)

▼

Ontelon täyte

Kivillä ( $\rho \geq 28$  kg/m<sup>3</sup>)

▼

Täytteen paksuus

400 mm

▼

Palon sijainti

Vedetyllä reunalla

▼

Palonkestoaika

60 minuuttia

▼

Tuenta Y-suunnassa

Kiepahdustuet k2000 palkiston päällä

▼

Palkin jänneväli (1-aukkoinen)

L = 6000 mm

▼

Momentti palkin kuormituksesta Z-suunnassa (ORT)

$M_{d,y,fi} = 18,0$  kNm

(+ = alapinta vedetty)

0 Minuuttia 10 20 30 40 50 60 70 80 90

■ = Palosuojaus suojaa palkkia  
■ = Palkki hiihtyy palosuojauksen takana  
■ = Palkki hiihtyy suurella nopeudella (palosuojaus on murtunut)  
■ = Palkki hiihtyy normaalilla nopeudella (hiilimisyvyys on  $\geq 25$  mm)

2.0 MITOITUSTULOKSET

Info

Taivutuskestävyys [ Z ]	Kiepahduskestävyys [ Z ]	Taivutuskestävyys [ Z ]	Rakenteen luokka
$M_{d,y}$ (palkki)	$M_{d,y}$ (palkki)	$M_{d,y}$ (alakaton puuranka)	
OK	OK	OK	R 60
38 %	94 %	38 %	

Liittimien vähimmäispituus	Liittimien vähimmäispituus	Liittimien vähimmäispituus
Alakaton puuranka	Jousiranka	Levytys
$l_t = 85$ mm	$l_t =$ Vakio	$l_{t,1} =$ Vakio
		$l_{t,2} = -$

**Mitoitettava rakenne**

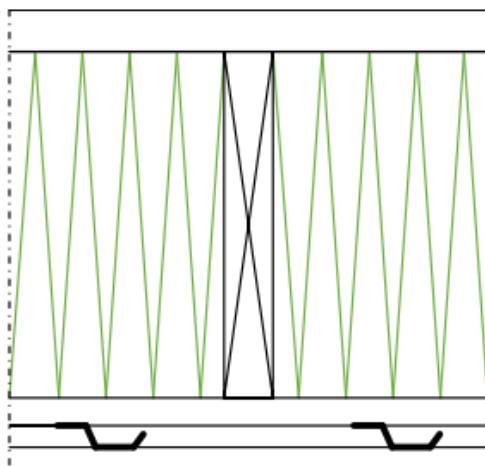
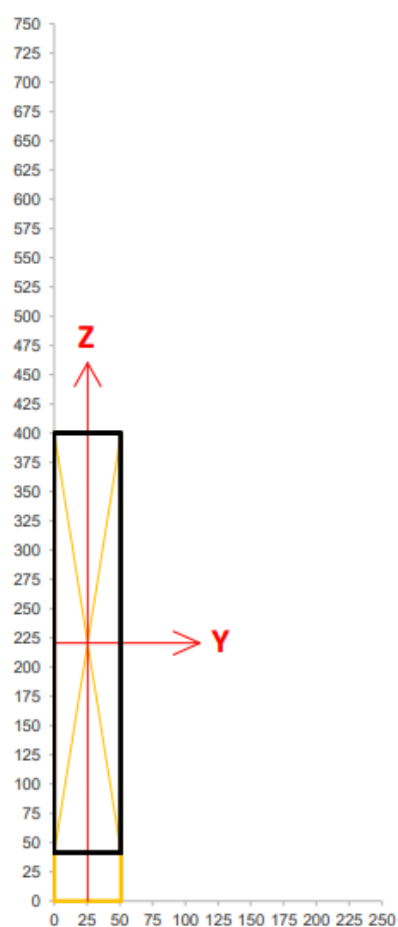
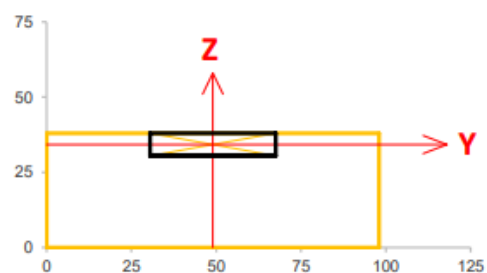
Palo palkin alapuolella (vedetyllä reunalla)

Ontelossa kivivilla ( $\rho \geq 28 \text{ kg/m}^3$ )

Kiepahdustuet palkiston päällä

-

-


**Palkin hiiltyminen**

**Alakaton puurangan hiiltyminen**


**Palkin hiiltyminen**

$k_s$	1,22		Poikkileikkauskerroin
$k_2$	0,00		Hiiltymisnopeuskerroin ennen palosuojauksen murtumista
$k_3$	2,35		Hiiltymisnopeuskerroin palosuojauksen murtumisen jälkeen
$k_3$	1,00		Hiiltymisnopeuskerroin hiiltymissyvyyden 25 mm jälkeen
$k_n$	1,50		Jäännöspoikkileikkauksen muuntokerroin
$\beta_{n2}$	0,00	mm / min	Nimellinen hiiltymisnopeus ennen palosuojauksen murtumista
$\beta_{n3}$	2,80	mm / min	Nimellinen hiiltymisnopeus palosuojauksen murtumisen jälkeen
$\beta_{n3}$	1,19	mm / min	Nimellinen hiiltymisnopeus hiiltymissyvyyden 25 mm jälkeen
$t_{ch}$	37,54	minuuttia	Hiiltymisen alkamishetki
$t_f$	37,54	minuuttia	Palosuojauksen murtumishetki
$t_a$	46,48	minuuttia	Aika, jolloin nimellinen hiiltymissyvyyden mitoitusarvo on 25 mm
$k_0$	-		Pyrolyysivyöhykkeen paksuuteen vaikuttava kerroin
$d_0$	-	mm	Vakio (pyrolyysivyöhykkeen paksuus)
$d_{char,n}$	41,09	mm	Nimellisen hiiltymissyvyyden mitoitusarvo
$d_{ef}$	-	mm	Tehollisen hiiltymissyvyyden mitoitusarvo

**Materiaaliominaisuudet**

$\gamma_M$	1,00		Materiaalin osavarmuusluku
$k_{fi}$	1,10		Kerroin lujuusominaisuuden 20 % fraktiilin määrittämiseen
$f_{m,y,k}$	44,00	N/mm <sup>2</sup>	Taivutuslujuuden ominaisarvo Z-suunnassa
$k_{mod,lm,fi}$	0,89		Taivutuslujuuden muuntokerroin
$f_{m,y,d,fi}$	43,01	N/mm <sup>2</sup>	Taivutuslujuuden mitoitusarvo palotilanteessa Z-suunnassa
$E_{0,05}$	11600	N/mm <sup>2</sup>	Kimmomoduulin ominaisarvo

**Nimellinen jäännöspoikkileikkaus**

$b_{fi}$	51,00	mm	Poikkileikkauksen leveys
$h_{fi}$	358,91	mm	Poikkileikkauksen korkeus
$A_{fi}$	18304,62	mm <sup>2</sup>	Poikkileikkauksen pinta-ala
$W_{y,fi}$	1094963,91	mm <sup>3</sup>	Poikkileikkauksen taivutusvastus Z-suunnassa
$I_{y,fi}$	196498957	mm <sup>4</sup>	Poikkileikkauksen jäyhyysmomentti Z-suunnassa

**Rasitukset**

$M_{d,y,fi}$	17,97	kNm	Taivutusmomentti Z-suunnassa
--------------	-------	-----	------------------------------

**Taivutuskestävyys Z-suunnassa**

$L$	6000	mm	Palkin jänneväli
$\sigma_{m,y,d,fi}$	16,41	N/mm <sup>2</sup>	Taivutusjännitys
EHTO	0,38	≤ 1	Taivutuskestävyys



**Kiepahduskestävyys Z-suunnan taivutuksessa****Info**

c	0,58		Kerroin
L <sub>ef,y</sub>	2718	mm	Kiepahduspituus
σ <sub>m,crit,fi</sub>	17,94	N/mm <sup>2</sup>	Kriittinen taivutusjännitys
λ <sub>rel,m,fi</sub>	1,57		Suhteellinen hoikkuusluku
k <sub>crit,fi</sub>	0,41		Kiepahduserroin
σ <sub>m,y,d,fi</sub>	16,41	N/mm <sup>2</sup>	Taivutusjännitys
EHTO	0,94	≤ 1	Kiepahdus

**Alakaton puurangan taivutuskestävyys Z-suunnassa****Info**

b <sub>fi</sub>	37,06	mm	Poikkileikkauksen leveys Y-suunnassa
h <sub>fi</sub>	7,53	mm	Poikkileikkauksen korkeus Z-suunnassa
k <sub>2</sub>	0,00		Hiilittymisnopeuserroin ennen palosuojauksen murtumista
k <sub>3</sub>	2,00		Hiilittymisnopeuserroin palosuojauksen murtumisen jälkeen
k <sub>3</sub>	1,00		Hiilittymisnopeuserroin hiilittymissyvyyden 25 mm jälkeen
β <sub>n</sub>	0,80	mm / min	Nimellinen hiilittymisnopeus
β <sub>n2</sub>	0,00	mm / min	Nimellinen hiilittymisnopeus ennen palosuojauksen murtumista
β <sub>n3</sub>	1,60	mm / min	Nimellinen hiilittymisnopeus palosuojauksen murtumisen jälkeen
β <sub>n3</sub>	0,80	mm / min	Nimellinen hiilittymisnopeus hiilittymissyvyyden 25 mm jälkeen
t <sub>ch</sub>	37,54	minuuttia	Hiilittymisen alkamishetki
t <sub>f</sub>	37,54	minuuttia	Palosuojauksen murtumishetki
t <sub>a</sub>	53,16	minuuttia	Aika, jolloin nimellinen hiilittymissyvyyden mitoitusarvo on 25 mm
k <sub>0</sub>	1,00		Pyrolyysivyöhykkeen paksuuteen vaikuttava kerroin
d <sub>0</sub>	0,00	mm	Vakio (pyrolyysivyöhykkeen paksuus)
d <sub>char,n</sub>	30,47	mm	Nimellisen hiilittymissyvyyden mitoitusarvo
d <sub>ef</sub>	30,47	mm	Tehollisen hiilittymissyvyyden mitoitusarvo
L	600	mm	Rangan jänneväli
k	400	mm	Rankajako
g <sub>k,ranka</sub>	0,0186	kN/m	Rangan omapaino
g <sub>k,villa</sub>	0,0471	kN/m	Villan omapaino
g <sub>k,yht.</sub>	0,0657	kN/m	Omapaino yhteensä
M <sub>d,y,fi</sub>	0,0030	kNm	Taivutusmomentti
W <sub>y,fi</sub>	350,31	mm <sup>3</sup>	Poikkileikkauksen taivutusvastus Z-suunnassa
σ <sub>m,y,d,fi</sub>	8,44	N/mm <sup>2</sup>	Taivutusjännitys
f <sub>m,y,d,fi</sub>	22,50	N/mm <sup>2</sup>	Taivutuslujuuden mitoitusarvo palotilanteessa Z-suunnassa (C18)
EHTO	0,38	≤ 1	Taivutuskestävyys

**Alakaton puurankojen kiinnitys palkkeihin**

ℓ <sub>t</sub>	85	mm	Liittimien vähimmäispituus
----------------	----	----	----------------------------

**Jousirankojen kiinnitys alakaton puurankoihin****Info**

ℓ <sub>t</sub>	Vakio	mm	Liittimien vähimmäispituus
----------------	-------	----	----------------------------

**Levytyksen kiinnitys jousirankoihin**

ℓ <sub>t,1</sub>	Vakio	mm	Liittimien vähimmäispituus ensimmäisessä levykerroksessa
ℓ <sub>t,2</sub>	-	mm	Liittimien vähimmäispituus toisessa levykerroksessa

## Liite 8: Kotelolaattaratkaisun lämmönläpäisykerroin

### RAKENTEEN TIEDOT

**Info**

TARKASTELTAVA RAKENNE: Puurakenteinen yläpohja (lämpövirran suunta ylöspäin)

#### RAKENNEKERROKSET

*Sisäpinta*

1 Kerto-Q
▼

Kerroksen paksuus [d]	25,0 mm
Lämmönjohtavuus [ $\lambda$ ]	0,110 W/mK

2 Ilman- ja höyrinsulku
▼

3 Lämmöneriste (sisältää koolauksen)
▼

Kerroksen paksuus [d]	400,0 mm
Lämmönjohtavuus [ $\lambda$ ]	0,033 W/mK
Koolausuunta (p / v)	p

4 Kerto-Q
▼

Kerroksen paksuus [d]	25,0 mm
Lämmönjohtavuus [ $\lambda$ ]	0,110 W/mK

5 Ei rakennekerrosta
▼

6 Ei rakennekerrosta
▼

7 Ei rakennekerrosta
▼

8 Ei rakennekerrosta
▼

#### ILMARAKOJEN TIEDOT

Ulkopuolen tuuletusrako
Hyvin tuulettuva ▼

Ilmarakojen korjaustekijä
Korjaustaso 0 ▼

#### METALLISTEN MUURAUSSITEIDEN TIEDOT

Muuraussiteiden tyyppi
Ei muuraussiteitä ▼

#### KOOLAUKSEN TIEDOT

Koolauspuun leveys [b]
51 mm ▼

Koolauspuun lämmönjohtavuus [ $\lambda$ ]
0,110 W/mK

Pystykoolauksen k-jako [s]
600 mm

**RAKENNE / LÄMPÖVIRTA**

*Ulkopinta*

