TRUKIN MASTON JÄYKISTÄMINEN HIILIKUITUKOMPOSIITILLA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan diplomityö

2022

Samuli Ståhlstedt

Tarkastajat: Professori Timo Björk

DI Esa-Pekka Kaikko

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Samuli Ståhlstedt

Trukin maston jäykistäminen hiilikuitukomposiitilla

Konetekniikan diplomityö

2022

55 sivua, 32 kuvaa, 4 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Timo Björk ja DI Esa-Pekka Kaikko

Avainsanat: Hiilikuitukomposiitti, CFRP, jäykistäminen, trukki, masto, FE-analyysi

Tässä diplomityössä tutkitaan, voidaanko hiilikuitukomposiitti (CFRP) latoilla jäykistää trukin mastoa. Työn tavoitteena on selvittää, kuinka paljon trukin yksittäisen mastovaiheen taipumia voidaan pienentää kiinnittämällä mastovaiheeseen CFRP lattoja. Työ on suoritettu käyttäen kirjallisuuskatsausta, analyyttistä ratkaisua ja FE-analyysiä. Kirjallisuuskatsauksessa käydään läpi työlle oleellinen lujuusopillinen teoria, esitellään hiilikuitukomposiitit ja tehdään katsaus CFRP jäykistämiseen liittyviin artikkeleihin ja tutkimusraportteihin. FE-analyysit on tehty jäykistämättömälle ja jäykistetyille mastovaiheille. FE-malleissa mastovaiheet ovat jäykistetty käyttäen 3x20 mm ja 6x20 mm kokoisia IM, HM ja UHM CFRP lattoja. Kummallekin kokoluokalle materiaalin vahvuuksina on käytetty 250 GPa, 300 GPa, 360 GPa ja 450 GPa CFRP-materiaaleja. FE-analyysejä varten mastovaiheeseen vaikuttavat kuormitukset on selvitetty analyyttisesti hyödyntäen statiikan tasapainoyhtälöitä.

FE-analyysistä saatujen tulosten perusteella CFRP latoilla saatiin parannettua tutkittavan mastovaiheen jäykkyyttä 4,7 -14,4% materiaali paksuudesta ja vahvuudesta riippuen. 3x20 mm CFRP latoilla mastovaiheiden jäykkyyden parannus jäi alle 10% kaikilla CFRP vahvuuksilla ja osalla 6x20 mm latoilla päästiin yli 10%.

Vaikka 6x20mm UHM CFRP latalla saatu jäykkyyden parannus mastovaiheessa oli lupaava, ei niiden käyttö trukin mastoissa ole kannattavaa tämän hetkisten korkeiden materiaalikustannusten ja tuotannollisteknisten syiden takia.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Samuli Ståhlstedt

Forklift mast stiffening with carbon fiber reinforced polymers

Master's thesis

2022

55 pages, 32 figures, 4 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Timo Björk, M.Sc.(Tech) Esa-Pekka Kaikko

Keywords Carbon fiber reinforced polymer, CFRP, forklift, mast, stiffening, FE-analysis

This thesis is focused on investigating if carbon fiber reinforced polymers can be used to stiffen a forklift mast. The objective is to find out how much the bending of the individual mast stage can be reduced by fixing CFRP plates to the mast rails. The work has been done by literature review, analytical solving and FE-analysis. In the literature review the relevant strength of materials theories evaluated, carbon fiber reinforced polymers are introduced and research papers and articles related to CFRP reinforcing are rexamined. FE-analyses have been done to un-reinforced mast stage and to mast stages that are reinforced with 3x20 mm and 6x20 mm sixed IM, HM and UHM CFRP strips. For both sized strips, CFRP materials with modulus of elasticity of 250 GPa, 300 GPa, 360 GPa and 450 GPa are used. For FE-analyses the forces acting on the mast stage have been solved by using statics' equilibrium equations.

According to the results obtained from the FE-analyses with the use of CFRP strips the mast stage stiffness improved from 4,7 to 14,4% depending on the strip thickness and modulus of elasticity. With 3x20 mm sized strips the stiffness improvements were under 10% with all CFRP materials and with 6x20 mm strips the improvement was over 10% with some CFRP materials.

Even though the stiffness improvement with 6x20 mm UHM CFRP strip was promising, the use of CFRP materials in forklift masts is not feasible due to the high cost of the materials and due to production technical reasons.

KIITOKSET

Aluksi haluan kiittää työnantajaani MLE Oy:tä, joka on mahdollistanut minulle diplomi-insinööri opintojen suorittamisen vakituisen päivätyön ohessa. Ilman työnantajani tukea tämä ei välttämättä olisi ollut mahdollista tai ainakin se olisi ollut hitaampaa ja hankalampaa. Kiitos Esa-Pekka Kaikolle kaikesta avusta, mitä hän on minulle tarjonnut tämän työn suorittamisen aikana.

Lappeenrannan teknilliselle yliopistolle iso kiitos mielenkiintoisesta ja monipuolisesta kurssitarjonnasta. Kiitos myös työntarkastajalle Timo Björkille avusta ja ohjauksesta työn aikana.

Erittäin suuri kiitos vanhemmilleni, jotka opettivat minulle jo pienestä pitäen kovan työn merkityksen ja että haluamien asioiden eteen pitää tehdä töitä. Kiitos isälleni joka opetti ja antoi minulle hyvät eväät työelämään, kun tein töitä hänen työparina rakennuksilla. Viimeisenä haluan kiittää parasta ystävääni ja elämänkumppaniani Heidiä hänen tuestaan ja kärsivällisyydestään minua kohtaan opintojeni aikana.

Samuli Ståhlstedt

Vantaalla 23.3.2022

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Latinalaiset

E	Kimmokerroin [GPa]
$E_{\parallel}$	Komposiitin kimmokerroin pituussuunnassa [GPa]
$E_{\perp}$	Komposiitin kimmokerroin poikittaissuunnassa [GPa]
I, I_z	Jäyhyysmomentti [mm^4]
k	Jousivakio [N/m]
M	Momentti [Nm]
m	Massa [kg]
V_f	Suhteellinen kuitu tilavuus [%]
W	Taivutusvastus [m^3, mm^3)

Kreikkalaiset

γ	Liukuma/liukukulma [°]
δ	Siirtymä [mm]
ε	Venymä
σ	Normaalijännitys [Pa]
ν	Poissonin luku
τ	Leikkausjännitys [Pa]
ω_0	Ominaistaajuus [1/s]

Lyhenteet

AGV	Automatic Guided Vehicle
BR	Bonded reinforcement, liimattu vahvike
CFRP	Carbon fiber reinforced polymer, hiilikuitukomposiitti
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Element Method, Elementtimenetelmä
FRP	Fiber Reinforced Polymer, Kuitulujitettu komposiitti

HM	High Modulus
IM	Intermediate Modulus
LM	Low Modulus
ML	Mitsubishi Logisnext
MLE	Mitsubishi Logisnext Europe
NM	Normal modulus
PAN	Polyakryylinitriili
PUR	Pre-stressed un-bonded reinforcement, esijännitetty liimaamaton vahvike
RTM	Resin Transfer Molding
UD	Unidirectional, yksisuutainen
UHM	Ultra High Modulus
UR	Un-bonded reinforcement, liimaamaton vahvike

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto 9
1.1 Mitsubishi Logisnext Europe 9
1.2 Trukin mastotyypit ja toimintaperiaatteet 10
1.3 Työn tausta 11
1.4 Tutkimustavoitteet, rajaus ja tutkimuskysymykset 12
1.5 Tutkimusmenetelmät 13
2 Teoria 14
2.1 Siirtymät ja niiden syntymekanismit 15
2.2 Jännitys, venymä ja Hooken laki 17
2.3 Palkin taivutus ja taipuminen 19
2.4 Kahdesta tai useammasta aineesta yhdistettypalkki 21
2.5 Siirtymien merkitys rakenteen laadukkaalle toimivuudelle 22
2.6 Maston jäykistäminen 25
3 Kuitulujitetut komposiitit 26
3.1 Kuitulujitteisen komposiitin mekaaniset ominaisuudet 27
3.2 Hiilikuitu ja hiilikuitukomposiitit 28
4 Hiilikuitukomposiitilla vahvistaminen ja jäykistäminen 31
4.1 Jäykistäminen CFRP materiaaleilla 32
4.1.1 Kiinnityksen ja esijännittämisen vaikutus jäykistykseen 35
5 Maston jäykistäminen ja taipumien määritys 37
5.1 CFRP vahvistelatat 37
5.2 Jäykistettävä uloin mastovaihe 38
5.3 CFRP jäykisteiden paikoitus 39
5.4 FE-malli 39
6 Tulokset 45

7 Tulosten arviointi ja pohdinta 50
8 Johtopäätökset 52
Lähteet 54
Liitteet

Liite 1. Vapaakappalekuvat ja tasapainoyhtälöt

1 Johdanto

Tässä diplomityössä tutkitaan trukin maston jäykistämistä käyttäen hiilikuitukomposiitteja (CFRP). Trukkeja on monen tyyppisiä eri käyttötarkoituksiin, mutta niille kaikille on yhteistä se, että niillä käsitellään erilaisia kuormia. Trukeissa kuormankäsittelylaitteina käytetään erityyppisiä ja erikorkuisia mastoja, millä taakkaa voidaan käsitellä eri korkeuksissa aina lattiatasosta yli 10 metrin korkeuteen. Hyvin korkealle nostavissa mastoissa taakkaa käsitellessä ongelmaksi saattaa muodostua liiallinen maston taipuminen, joka voi johtaa maston huojuntaan. Tämä puolestaan johtaa pitempiin kuorman käsittelysykleihin ja huonoon käyttäjäkokemukseen. Pahimmassa tapauksessa maston liiallinen taipuminen saattaa estää trukin tarkoituksen mukaisen taakan käsittelyn.

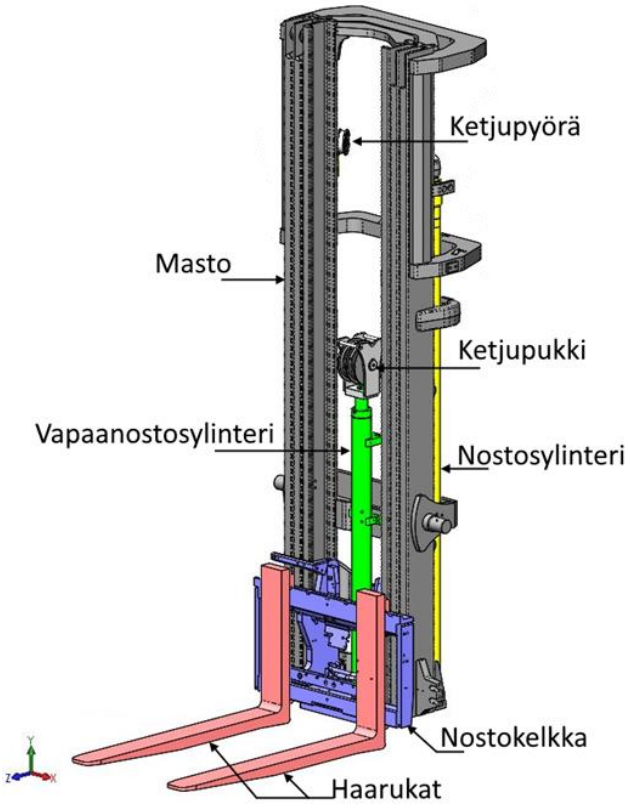
1.1 Mitsubishi Logisnext Europe

Mitsubishi Logisnext Europe Oy (MLE) suunnittelee, kehittää ja valmistaa sähköisiä varastotrukkeja, -vastapainotrukkeja ja automaattitrukkeja (AGV-Automatic Guided Vehicle), sekä tarjoaa niihin ratkaisuja ja palveluja koko koneen elinkaaren ajan. MLE Oy on alun perin perustettu 1942 nimellä Rautatyö Oy ja vuonna 1979 yrityksen nimeksi vaihdettiin Rocla Oy. Yritys kulki Rocla Oy nimellä 1.4. 2020 saakka, milloin sen nimi muutettiin Mitsubishi Logisnext Europe Oy:ksi, kun ML integroi kaikki omistamansa Euroopan toiminnot ja operaatiot saman hallinnon alle. (MLE 2022; MLE Oy 2022)

MLE Oy on osa vuonna 1937 perustettua Mitsubishi Logisnext (ML) konsernia, jonka pääkonttori sijaitsee Japanissa, Kiotossa. ML on maailman johtava logistiikka- ja materiaalin hallintaratkaisujen toimittaja ja se vaikuttaa Amerikassa, Aasiassa, Tyynen valtameren alueella, Euroopassa, Lähi-Idässä ja Afrikassa. (MLE 2022)

1.2 Trukin mastotyypit ja toimintaperiaatteet

Trukin mastoja on erityyppisiä, joista yleisimpiä ovat Simplex, Duplex ja Triplex mastot ja neljäntenä tyyppinä harvemmin käytetty Quad masto. Trukin mastot ovat käytännössä teleskooppirakenteita, joissa sisemmät osat liukuvat uloimmista ulos, kun niillä nostetaan taakkaa. Maston nostomekanismi toteutetaan hydrauliikkasylintereillä ja nostoketjuilla. Trukin masto ja sen osat esitelty kuvassa 1.

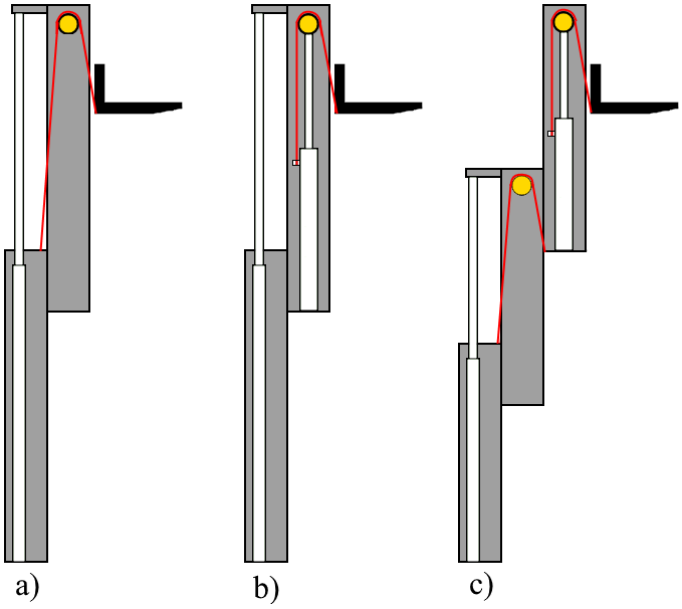


Kuva 1. Maston anatomia

Simplex on kaksivaihemasto, minkä uloimmassa vaiheessa kiinni olevat sylinterit nostavat sisempää vaihetta ja nostokelkkaa nostetaan ketjuvälityksellä.

Duplex on kaksivaiheinen vapaanostollinen masto. Vapaanoston ansiosta nostokelkkaa voidaan nostaa ilman että muut mastovaiheet purkautuvat. Duplex mastossa vapaanostosylinteri nostaa haarukkakelkkaa ketjuvälityksellä ja sisempää vaihetta nostavat sivusylinterit.

Triplex (kuva 1) on kolmivaihemasto, missä on vapaanosto. Triplex mastossa vapaanostosylinteri nostaa nostokelkkaa ketjuvälityksellä ja sivusylinterit nostavat keskimmäistä mastovaihetta ja sisintä mastovaihetta ketjuvälityksen avulla. Simplex, Duplex ja Triplex mastojen toimintaperiaatteita on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva2. Mastojen toimintaperiaate a) Simplex, b) Duplex ja c) Triplex

Quad on nelivaihemasto, missä on vapaanosto. Kuten duplex ja triplex mastossa haarukkakelkkaa nostetaan vapaanostosylinterin ja ketjuvälityksen avulla. Quad mastossa on 2 paria sivusylintereitä, ensimmäinen sylinteripari nostaa 1. välikelkkaa, toinen pari nostaa 2. välikelkkaa ja sisintä mastovaihetta nostetaan ketjuvälityksen avulla.

1.3 Työn tausta

Työn taustalla on trukkien jälleenmyyjiltä, vuokraajilta ja kuskeilta tulleet palautteet, että korkealle nostavien mastojen tulisi olla vakaampia. Jäykemmällä mastolla tarkoitetaan sitä, että maston taipuminen ja heiluminen yläasennossa tulisi olla pienempää ja että maston kiertojäykkyyden tulisi olla parempi. Trukilla kuormaa nostettaessa tai kuormaa noudettaessa

korkealta hyllystä ongelmaksi saattaa muodostua maston liiallinen taipuminen kuorman vaikutuksesta. Pahimmassa tapauksessa maston liiallinen taipuminen saattaa estää taakan hyllyttämisen tai sen noutamisen hyllystä.

1.4 Tutkimustavoitteet, rajaus ja tutkimuskysymykset

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää, voidaanko trukin maston taivutusjäykkyyttä kuorman suuntaan parantaa käyttämällä CFRP-lattoja. Työn tarkastelun kohteena on MLE Oy:n olemassa olevan tuotteen Triplex masto. Triplex masto koostuu kolmesta mastovaiheesta ja maston kokonaistaivutusjäykkyys koostuu yksittäisten mastovaiheen jäykkyyksistä ja mastolaakereidenvälyksistä. Maston kokonaistaipuma puolestaan muodostuu yksittäisten mastovaiheiden taipumista, palkkien lokaaleista joustoista, laakerivälyksistä ja laakerien joustoista. Työ rajataan siten, että jäykistys tehdään ainoastaan Triplex maston uloimmalle vaiheelle, eikä laskentamallissa oteta huomioon mastopalkin ja CFRP-latan väliin tulevaa liimauksen leikkausjoustoa huomioon. Lisäksi työssä tarkastellaan vain mastovaiheen taipumia, eikä mastopalkkien lokaaleja joustoja oteta huomioon. Tässä työssä ei tulla tekemään fyysisiä kokeita oikealle mastolle, vaan ne jäävät tehtäväksi tulevaisuuteen, mikäli työstä saadut tulokset antavat lupaavia tuloksia siten, että ne puoltavat hiilikuidun käyttöä jäykistävinä elementteinä mastoissa.

Tutkimustavoitteen ja työn rajauksen pohjalta tutkimuskysymyksiksi muodostuivat seuraavat kysymykset:

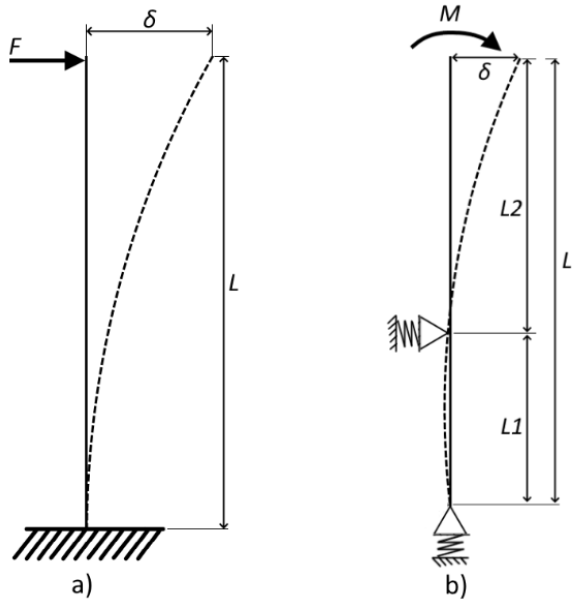
- Kuinka paljon CFRP latoilla voidaan pienentää mastovaiheen taipumia?
- Miten eri CFRP vahvuudet vaikuttavat taipumiin.?
- Miten CFRP latan paksuuden muutos vaikuttaa taipumiin?

1.5 Tutkimusmenetelmät

Työn tutkimusmenetelminä käytetään kirjallisuuskatsausta ja FE-analyysiä (FEA). Kirjallisuuskatsauksessa käydään läpi teräsrakenteiden vahvistamiseen liittyvä lujuusopillista teoriaa, tutustutaan kuitulujitteisiin komposiitteihin ja käydään läpi tutkimuksia, jotka käsittelevät teräsrakenteiden vahvistamista hiilikuitukomposiiteilla. FEM-laskenta tehdään ABAQUS 2021 FEA ohjelmaa käyttäen. Laskentamallia varten uloimmassa mastovaiheessa vaikuttavat voimat on laskettu analyyttisesti statiikkaa hyväksi käyttäen. Laskentamallissa käytettävät materiaalit ja jäykistystavat on valittu kirjallisuuskatsauksen perusteella tehtyjen löydösten perusteella.

2 Teoria

Trukin masto koostuu mastovaiheista ja maistovaiheet koostuvat mastopalkeista, johdepyörä akseleista, poikkituista ja muista metalliosista. Mastorakenteen jäykistäminen lähtee yksittäisen mastovaiheen jäykistämisestä ja tässä työssä jäykistämisellä tarkoitetaan mastovaiheeseen kohdistuvien voimien aiheuttaman taipuman pienentämistä. Havainnollistamisen ja yksinkertaistamisen vuoksi yksittäinen mastovaihe voidaan ajatella jäykästi tuettuna ulokepalkkina. Kun ulokepalkin päässä vaikuttaa voima *F*, niin se aiheuttaa palkin pään siirtymän *δ*, jota kutsutaan palkin taipumaksi. Todellisuudessa uloin mastovaihe muistuttaa enemmän yksinkertaisesti tuettua ulokepalkkia, jonka päässä vaikuttaa momentti *M*. Jäykästi tuettu ulokepalkki ja yksinkertaisesti tuettu ulokepalkki on havainnollistettu kuvassa 3



Kuva 3. a) Jäykästi tuetun ulokepalkin taipuma ja b) yksinkertaisesti tuetun ulokepalkin taipuma

Jäykästi tuetun ulokepalkin siirtymä *δ* on suurin voiman *F* vaikutuspisteessä palkin päässä ja se voidaan laskea seuraavasti (Karhunen, et al. 1992, s. 545).

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} \tag{1}$$

Yksinkertaisesti tuetun momenttikuormitetun ulokepalkin siirtymä on myös suurin palkin päässä ja se lasketaan seuraavasti.

$$\delta = \frac{ML_2{}^2}{2EI} \tag{2}$$

Kaavasta 1 ja 2 näemme, että mikäli taipumaa δ halutaan pienentää niin silloin palkin pituutta L ja L_2 pitää lyhentää tai palkkiin kohdistuvaa voimaa F ja momenttia M tulee pienentää. Muita vaihtoehtoja taipuman pienentämiseksi ovat palkin materiaalin vaihtaminen korkeamman kimmokertoimen E omaavaan materiaaliin tai palkin vahvistaminen kasvattamalla sen jäyhyysmomenttia I. Todellisuudessa yksittäisen maston reunaehdot ja kuormitukset eivät vastaa yksityiskohdiltaan ulokepalkkia, mutta maston taipuman pienentämisen periaatteet ovat samat. Taipuman lisäksi rakenteen jäykkyys k vaikuttaa maston huojumisen ominaistaajuuteen ω_0.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{3}$$

$$k = \frac{F}{x} \tag{4}$$

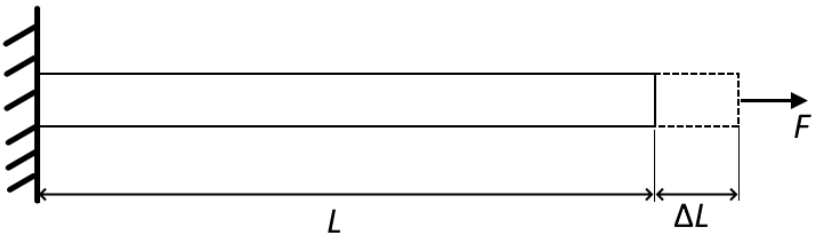
Kaavassa 3 m on nostettavan taakan ja maston yhteenlaskettu massa ja jäykkyys k on rakenteeseen vaikuttavan yksikkövoiman aiheuttama taipuma.

2.1 Siirtymät ja niiden syntymekanismit

Kappaleeseen kohdistuva ulkopuolinen kuormitus aiheuttaa kappaleessa muodonmuutoksia. Materiaalin lujuusteknisiä muodonmuutostiloja on venymä ε, puristuma -ε ja liukuma γ. Kun palkin päähän kohdistuu normaali voima F, niin silloin palkki pitenee voiman aiheuttaman

normaalijännityksen σ seurauksena kuten kuvassa 4 on esitetty. Kappaleen venymä ε on sen alkuperäisen pituuden L ja pituuden muutoksen ΔL suhdeluku. (Pennala 2000, s. 19)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \tag{5}$$



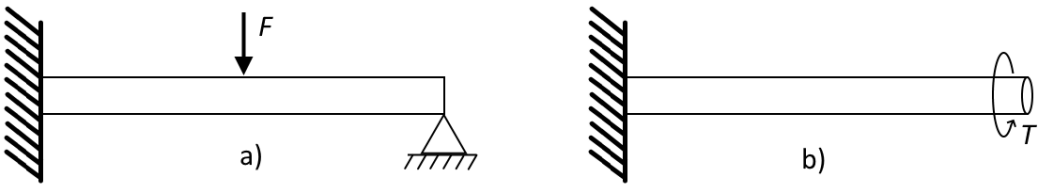
Kuva 4. Palkin pituuden muutos

Puristuma on päinvastainen tilanne kuin venyminen, eli kun kappaleeseen esimerkiksi palkin päähän kohdistuu puristava voima niin, silloin palkki lyhenee negatiivisen normaalijännityksen σ seurauksena. Venymän kohdalla puristumaa kuvaava suhdeluku ε on negatiivinen. (Pennala 2000, s. 19)

Lisäksi, että aksiaalisesti kuormitettu palkki venyy tai lyhenee kuormitettaessa, tapahtuu siinä myös muodonmuutoksia pituusakselia vastaan kohtisuorassa suunnassa. Kun palkki venyy, niin sitä vastaan kohtiosuorassa olevien pintojen venymä on negatiivinen, eli ne kutistuvat. Pituussuuntaisten ja poikittaissuuntaisten venymien välistä suhdetta kuvataan Poissonin luvulla ν. (Karhunen, et al. 1992, s. 15)

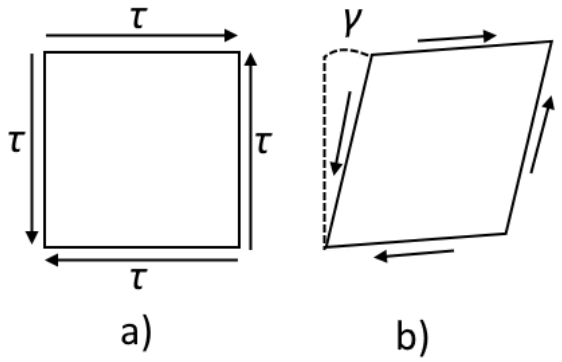
$$\nu = -\frac{Poikittaissuuntainen\ venymä}{Pituussuuntainen\ venymä} \tag{6}$$

Liukuma γ muodonmuutosta kappaleessa aiheuttaa kappaleeseen vaikuttavat leikkausjännitykset τ. Leikkausjännitystä kappaleeseen aiheuttaa kuvan 5 mukaiset a) leikkausvoima ja b) vääntö.



Kuva 5. a) leikkausvoima ja b) vääntö

Kun tarkastellaan kuvan 5 b) tapausta, missä toisesta päästä jäykästi kiinnitettyyn sauvaan kohdistuu vääntöä, niin voidaan kuvitella, että sauvan eri materiaalikerrokset pyrkivät liukumaan toisiinsa nähden ja tämä aiheuttaa kuviteltujen kerrosten väliin leikkausjännitystä τ. Jos kuvitteellisesta materiaalikerroksesta leikataan kuvan 6 mukainen pienen neliön muotoinen pala ja tarkastellaan sitä vääntökuormituksen alaisena niin huomattaisiin miten leikkausjännitys a) aiheuttaa kappaleessa muodonmuutosta b). (Karhunen, et al. 1992, s. 25)

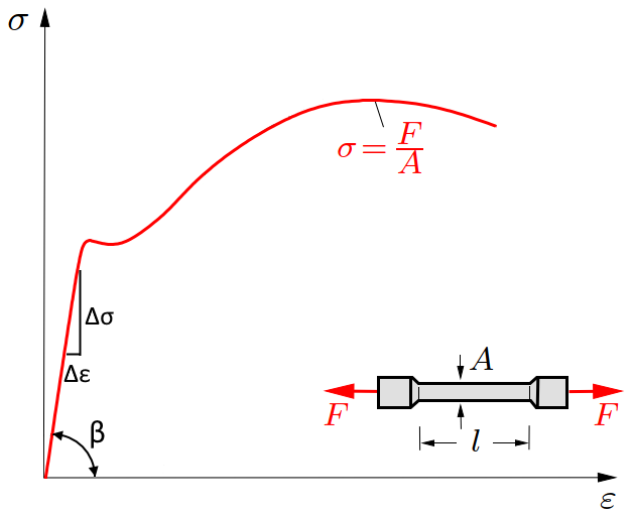


Kuva 6. Leikkausjännityksen ja sen aiheuttama liukuma

2.2 Jännitys, venymä ja Hooken laki

Eri materiaaleilla on erilaisia ominaisuuksia ja yksi materiaalin ominaisuuksista kertova vakio on kimmokerroin *E*. Kimmokerroin vaihtelee materiaalikohtaisesti ja se saadaan määritettyä kokeellisesti veto- tai puristuskokeella. Vetokokeessa tutkittavasta materiaalista valmistettua sauvaa kuormitetaan vetämällä ja samalla mitataan sauvan pituuden muutosta eli

venymää. Vetokokeen tulokset voidaan esittää graafisesti kuten kuvassa 7, mistä käy ilmi jännityksen ja venymän välinen yhteys. (Pennala 2000, s. 22-23)



Kuva 7. Niukkahiilisen teräksen jännitys-venymä piirros (mukaillen Gross et al. 2017, s. 15)

Kimmokerroin saadaan määritettyä jännitys-venymäpiirroksen lineaarisen osan kulmakertoimen kautta. Teräksen kimmokerroin on noin 210 GPa.

$$E = tan\beta = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \tag{7}$$

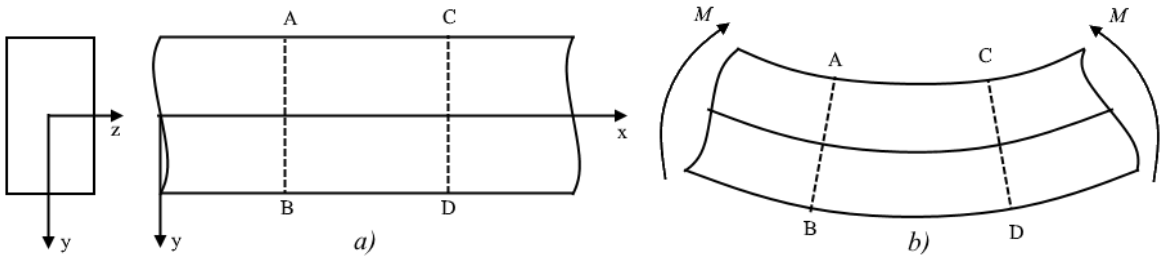
Kun kimmokerroin on tunnettu voidaan jännityksen ja venymän välinen yhteys kirjoittaa toiseen muotoon, joka tunnetaan nimellä Hooken laki. (Pennala 2000, s. 25)

$$\sigma = E\varepsilon \tag{8}$$

Hooken laki on voimassa aksiaalisessa jännitystilassa olevissa materiaaleissa, ei taso-jännitys, eikä tasovenymätilassa olevissa materiaaleissa.

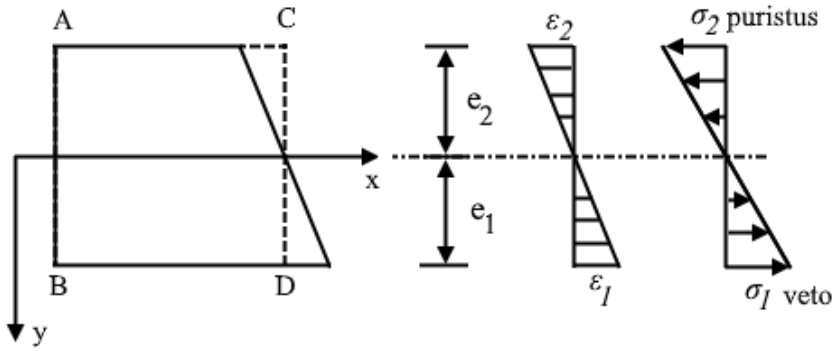
2.3 Palkin taivutus ja taipuminen

Normaalivoiman, leikkausvoiman ja väännön lisäksi palkkiin voi kohistua taivutusta. Palkki taipuu, kun siihen kohdistuu sen pituusakselia vastaan kohtisuorassa oleva voima tai taivutusmomentti, kuten kuvassa 3 a) ja b) on esitetty. Kumpikin kuormitustapaus aiheuttaa palkkiin taivutusjännityksiä. Tarkastellaan palkin jännityksiä ja muodonmuutoksia, kun siihen kohdistuu pelkästään pudasta taivutusta. Puhtaassa taivutuksessa palkkiin ei kohdistu normaalivoimaa eikä leikkausvoimaa. Kuvassa 8 on esitetty palkista leikattua osaa, missä a) kohdassa palkissa ei ole kuormitusta ja b) kohdassa palkkiin kohdistuu puhdas taivutus.



Kuva 8. a) Kuormittamattoman palkin osa, b) palkin osa puhtaan taivutuksen alaisena

Oletetaan että kuvan 8 palkki on valmistettu isotrooppisesta materiaalista eli Hooken laki on voimassa ja siinä olevat poikkileikkaustasot A-B ja C-D säilyvät tasoina muodonmuutoksessa Bernoulin olettamuksen mukaisesti. Jotta poikkileikkaukset säilyvät tasoina tarkoittaa se sitä, että palkin yläpinta lyhenee ja alapinta venyy ja pituuden muutoksen tulee olla lineaarista y-akselin suhteen. Tämä tarkoittaa sitä, että Hooken lain mukaan (kaava 6) palkin yläosaan muodostuu puristusjännitystä ja alaosaan vetojännitystä kuvan 9 mukaisesti. (Pennala 2000, s. 48-49)



Kuva 9. Puhtaan taivutuksen aiheuttama normaalijännitys jakauma

Kuvassa 9 näemme miten venymä ε ja jännitys σ jakautuu palkin poikkipinnan yli. Taivutuksen aiheuttamat normaalijännitykset ovat suurimmillaan palkin ylä- ja alapinnassa ja ne saadaan määritettyä seuraavasti.

$$\sigma_1 = \frac{M}{I_z} e_1 \tag{9}$$

$$\sigma_2 = \frac{M}{I_z} (-e_{2)} \tag{10}$$

Kaavoissa 9 ja10 *M* on momentti z-akselin ympäri, I_z on jäyhyysmomentti z-akselin suhteen ja e_1 ja e_1 ovat reunaetäisyydet neutraaliakselista. Taivutuksen aiheuttama normaalijännitys voidaan laskea millä tahansa kohtaa palkissa korvaamalla kaavan 7 tai 8 termi *e* sen kohdan y-koordinaatilla, missä jännitys halutaan tietää. Mikäli palkki on z-akselin suhteen symmetrinen, niin silloin reunaetäisyydet ovat yhtä suuria. Palkin reunajännitykset voidaan laskea myös käyttäen palkin poikkipinnan taivutusvastausta *W*. (Pennala 2000, s. 52) Palkin taivutusvastukset ja reunajännitykset taivutusvastusten avulla voidaan laskea seuraavasti.

$$W_1 = \frac{I_z}{e_1} \tag{11}$$

$$W_2 = \frac{I_z}{e_2} \tag{12}$$

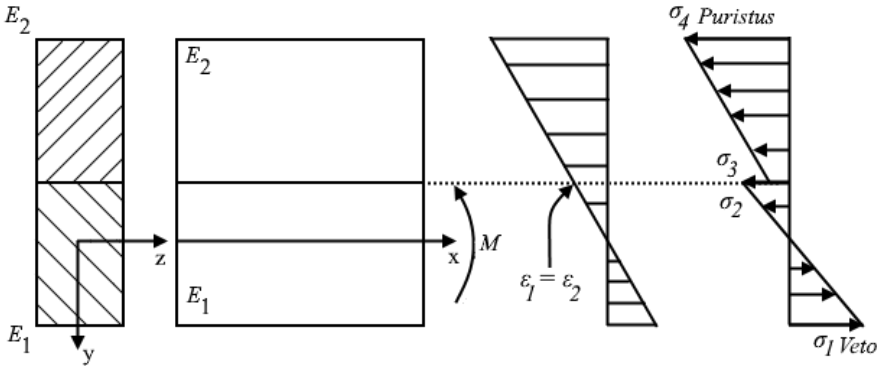
$$\sigma_n = \frac{M}{W_n} \tag{13}$$

Palkille mikä ei ole z-akselin suhteen symmetrinen ovat taivutusvastukset eri suuruiset palkin ylä- ja alaosalle.

2.4 Kahdesta tai useammasta aineesta yhdistettypalkki

Kahdesta tai useammasta materiaalista muodostettua palkkia voidaan kutsua komposiittipalkiksi. Tällaisia palkkeja ovat esimerkiksi silloissa ja rakennuksissa käytettävät teräsbetoni palkit, teräksellä vahvistetut puupalkit tai työn kannalta oleelliset CFRP-materiaaleilla vahvistetut teräspalkit.

Oletetaan, että useammasta materiaalista valmistetun palkin materiaalit noudattavat Hooken lakia ja taivutustilanteessa Bernoulin olettamus on voimassa. Tämä tarkoittaa, että myös kahdesta tai useammasta materiaalista valmistetussa palkissa venymä on lineaarinen palkin poikkipinnan yli. Vaikka venymä on lineaarinen ja jatkuvaa niin jännitysjakauma on epäjatkuva kimmokertoimen epäjatkuvuuden takia. Kuvassa 10 on esitetty taivutettavan kahdesta eri materiaalista olevan palkin normaalijännitysjakauma.



Kuva 10. Venymä ja normaalijännitysjakauma kahdesta materiaalista valmistetussa palkissa

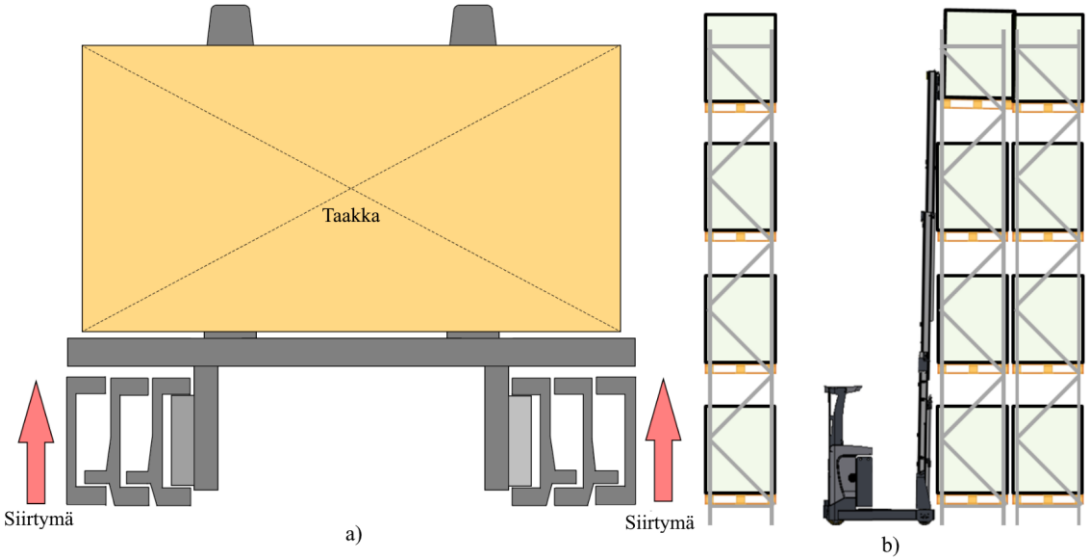
Oletetaan että kuvan 10 materiaalin 1 kimmokerroin E_1 on suurempi kuin materiaalin 2 kimmokerroin E_2. Palkin siinä kohdassa, missä materiaali vaihtuu toiseen venymä kummallekin materiaalille sama. Koska materiaaleilla on eri kimmokertoimet ja Hooken laki (kaava 6) on voimassa, niin se tarkoittaa, että tässä kohtaa normaalijännitysjakaumaa on epäjatkuvuuskohta. (Pennala 2000, s. 79-81)

Kahdesta tai useammasta materiaalista valmistettujen palkkien etuna on esimerkiksi se, että pienemmällä ja kevyemmällä palkilla voidaan saavuttaa sama jäykkyys kun isommalla yhdestä materiaalista valmistetulla palkilla.

2.5 Siirtymien merkitys rakenteen laadukkaalle toimivuudelle

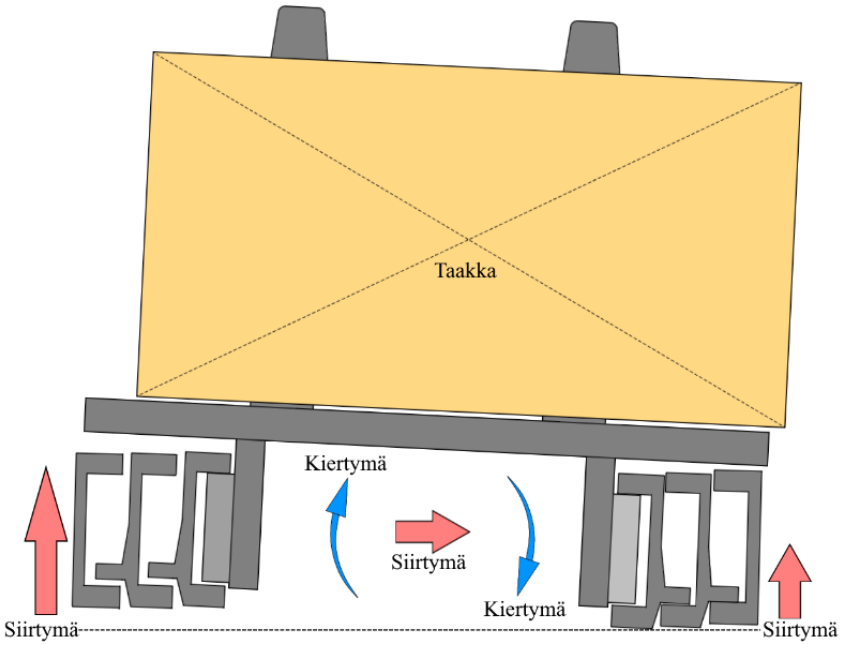
Trukilla erilaiset taakan käsittelytilanteet aiheuttavat mastorakenteisiin erilaisia kuormituksia, jotka aiheuttavat mastoon erilaisia siirtymiä ja muodonmuutostiloja. Tässä asiayhteydessä taakan käsittelyllä tarkoitetaan tilannetta, missä taakkaa käsitellään korkeissa nostoulottuvuuksissa, kun mastovaiheet ovat purkautuneet auki. Erilaisia taakan käsittelytilanteita ovat taakan keskeinen käsittely, taakan epäkeskeinen käsittely ja taakan sivusiirto.

Taakan keskeisellä käsittelyllä tarkoitetaan tilannetta, missä nostettava kuorma on haarukoilla keskeisesti sivuttaissuunnassa mastovaiheisiin nähden. Keskeinen taakan käsittely aiheuttaa pelkästään mastovaiheiden eteenpäin taipumisen. Mikäli masto taipuu liikaa, niin sillä käsiteltävä kuorma saattaa osua takaseinään tai hyllyn toisella puolella olevaan taakkaan ja tällöin estää taakan halutunlaisen hyllyttämisen. Lisäksi maston taipuman suuruus vaikuttaa suoraan maston huojumisen voimakkuuteen. Taakan keskeinen käsittely on esitetty kuvassa 11.



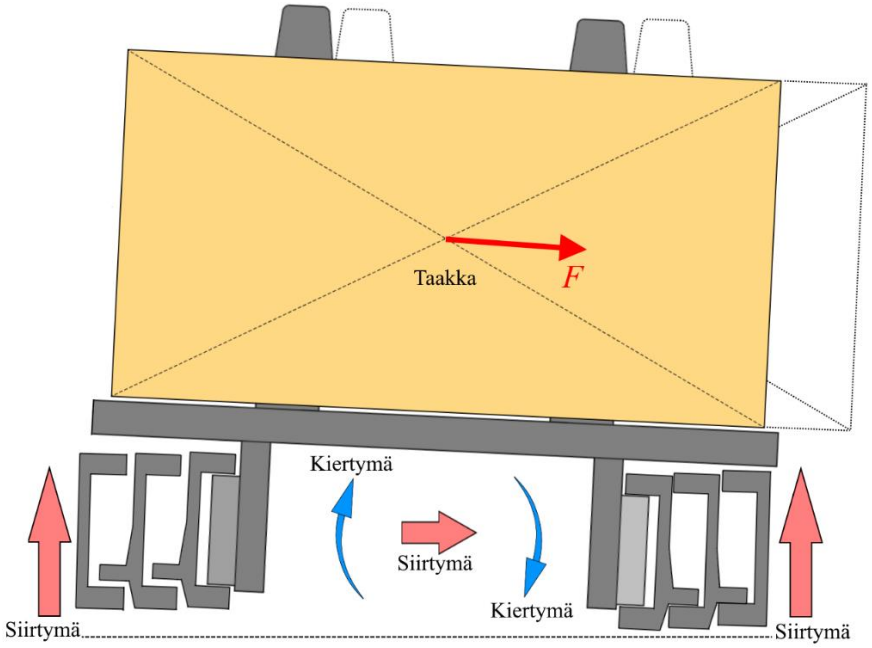
Kuva 11. Keskeinen kuorman käsittely. a) masto ylhäältä, b) liiallinen taipuma.

Taakan epäkeskeisellä käsittelyllä tarkoitetaan tilannetta, missä nostettava kuorma on haarukoilla epäkeskeisesti sivuttaissuunnassa mastovaiheisiin nähden. Epäkeskeisen taakan käsittelyn seurauksena mastovaiheet taipuvat eteenpäin, kiertyvät pituusakselinsa ympäri ja taipuvat sivulle. Tilannetta on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Epäkeskeinen taakan käsittely.

Taakan sivusiirrolla tarkoitetaan tilannetta, missä trukin haarukoita siirretään sivuttaissuunnassa nostokelkassa olevan hydraulisen toiminnon avulla. Sivusiirtoa käytetään tilanteessa, missä trukin paikoitus sivuttaissunnassa hyllytettävään hyllyväliin nähden ei ole osunut kohdalleen ja taakkaa siirretään sivuttaissuunnassa, jotta se saadaan hyllytettyä. Sivusiirto aiheuttaa maston taipumista ja kiertymistä sekä sivusiirron käyttö antaa herätteen maston taipuman ja kiertymän värähtelylle. Sivusiirron vaikutukset mastoon on esitetty kuvassa 13.



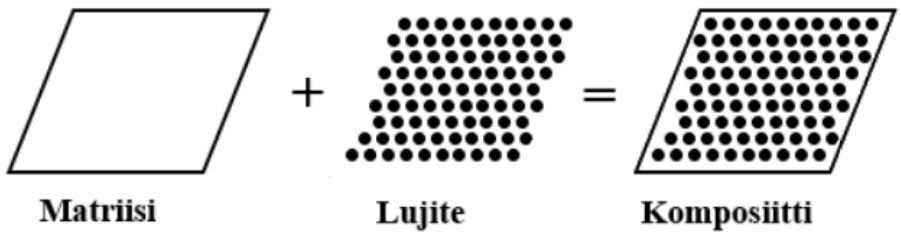
Kuva 13. Taakan sivusiirto.

2.6 Maston jäykistäminen

Maston jäykistämisellä tarkoitetaan mastoon kohdistuvien voimien aiheuttaman maston kokonaistaipuman pienentämistä. Maston kokonaisjäykkyys muodostuu yksittäisten mastovaiheiden jäykkyyksistä ja maston kokonaisjäykkyyttä voidaan parantaa parantamalla yksittäisten mastovaiheiden jäykkyyksiä. Mastovaiheen jäykkyyteen voidaan vaikuttaa mastopalkkien profiilivalinnalla. Korkeisiin nostokorkeuksiin mentäessä mastopalkin jäykkyys ei välttämättä enää yksin riitä ja tällaisissa tapauksissa mastopalkkeja tulisi jäykistää. Kuten jo tämän aiemmin pääluvun alussa mainittiin, niin yksi tapa jäykistää mastoa on kasvattaa maston jäyhyysmomenttia I hitsaamalla lisää materiaalia mastopalkkeihin tai vaihtaa mastopalkkien materiaali suuremman kimmokertoimen E omaavaan materiaaliin. Koska ei ole realistista lähteä vaihtamaan mastopalkin materiaalia teräksestä toiseen materiaaliin, niin voimme käyttää jäykistämiseen CFRP lattoja, joiden kimmokerroin voi olla jopa yli 3 kertainen teräkseen verrattuna.

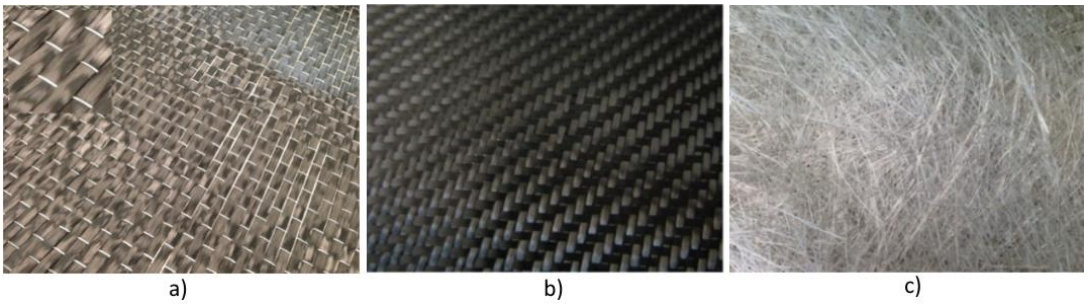
3 Kuitulujitetut komposiitit

Komposiitti on materiaali, joka muodostuu kahdesta tai useammasta ainesosasta. Komposiiteissa yhdistyvät siinä käytettyjen ainesosien ominaisuudet, mitkä eroavat sen yksittäisen ainesosan ominaisuuksista. Yleensä komposiitit koostuvat kahdesta aineesta, lujitteesta ja matriisista, tätä on havainnollistettu kuvassa 14. Kuitulujitteisissa komposiiteissa yleisimmin käytetyt kuidut ovat lasikuidut, hiilikuidut ja aramidkuidut. On olemassa myös luonnonkuitukomposiitteja, mutta niitä ei käsitellä tässä työssä enempää. (Hall & Javanbakht 2020, s. 1)



Kuva 14. Komposiitin rakenne

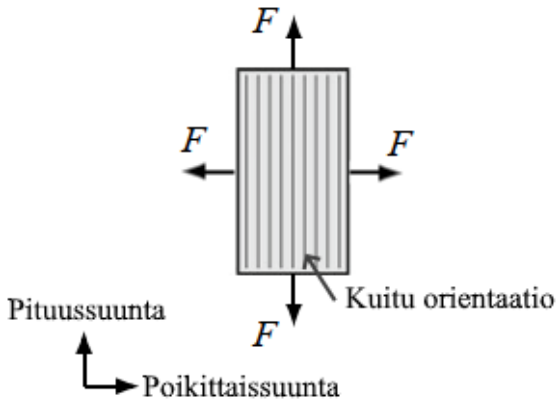
Hiilikuituja voidaan toimittaa keloissa tai erilaisina valmiina mattoina ja kankaina. Hiilikuitukankaita on kahta eri tyyppiä, yksisuuntaisia (UD-Unidirectional) kankaita, missä kuitujen orientaatio on sama ja punottuja kankaita, jossa kuidut ovat punottu kohtisuoraan toisiaan nähden. UD kankaista saadaan valmistettua UD komposiitteja, joilla on yleisesti ottaen parhaat jäykkyys- ja lujuusominaisuudet kuitujen suunnassa. Tämä johtuu siitä, että kuidut saadaan ladottua tiiviimmin UD suunnassa, verrattuna komposiittiin missä kuituja on kahdessa tai useammassa suunnassa. Hiilikuitumatot eroavat kankaista siten, että niissä kuidut ovat sattumanvaraisessa järjestyksessä ja niitä valmistetaan pitkistä kuiduista sekä lyhyistä pilkotuista kuiduista. Hiilikuitu kankaita ja mattoja on esitetty kuvassa 15 (Hall & Javanbakht 2020, s. 5-9)



Kuva 15. a) UD kangas, b) punottu kangas & c) kuitumatto (mukaillen Hall & Javanbakht 2020, s. 5-9)

3.1 Kuitulujitteisen komposiitin mekaaniset ominaisuudet

Kuitulujitteisten komposiittien (FRP) mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavat kuitujen suhteellinen määrä komposiitti rakenteessa, kuitujenpituus ja -orientaatio, sekä matriisi materiaalin ominaisuudet. UD komposiitti on materiaalina anisotrooppinen, mikä tarkoittaa, että sillä on erilaiset mekaaniset ominaisuudet eri suuntiin. UD komposiitilla on hyvät lujuusominaisuudet ja suuri kimmokerroin kuitujen suunnassa, mutta poikittaissunnassa ne ovat huomattavasti huonommat. Kuvassa 16 on esitetty UD komposiittia, mikä on vedonalaisena pituus- ja poikittaissuunnassa. (Hall & Javanbakht 2020, s. 2)



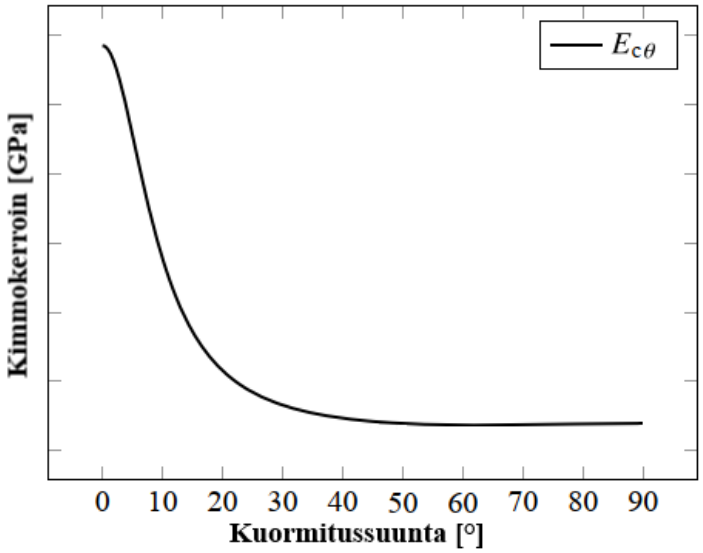
Kuva 16. Kuituorientaatio kuormitukseen nähden (mukaillen Hall & Javanbakht 2020)

UD komposiitille voidaan määrittää kimmokertoimet pituussuunnassa $E_{c\parallel}$ ja poikittaissuunnassa $E_{c\perp}$.komposiittien sekoitussäännön avulla.

$$E_{c\parallel} = E_m(1 - V_f) + E_f V_f) \tag{14}$$

$$E_{c\perp} = \left(\frac{V_f}{E_f} + \frac{1 - V_f}{E_m}\right) \tag{15}$$

Missä E_m on matriisin kimmokerroin, V_f on kuitujen suhteellinen osuus komposiitin tilavuudesta ja E_f on kuidun kimmokerroin. UD komposiitin kimmokertoimen muutosta eri kuormitussuuntiin nähden on esitetty kuvassa 17, missä 0° on kuormitus pituussuuntaisesti ja 90° on poikittaissuuntaisesti. (Hall & Javanbakht 2020, s. 20)



Kuva 17. UD komposiitin kimmokerroin kuormitussuunnan mukaan (mukaillen Hall & Javanbakht 2020, s. 21)

3.2 Hiilikuitu ja hiilikuitukomposiitit

Hiilikuitua valmistetaan polyakryylinitriilistä (PAN), piestä ja viskoosista. PAN menetelmällä valmistettu hiilikuitu kattaa yli 90% maailmalla käytetystä hiilikuidusta ja loput alle

10% valmistetaan joko piestä tai viskoosista (Parvez, 2021, pp. 3-2). Hiilikuitujen valmistuksessa kuituja vedetään yli 2000 °C asteen lämpötiloissa, milloin niihin muodostuu kuitujen suuntaisia kiderakenteita, jotka antavat hiilikuiduille niiden hyvät mekaaniset ominaisuudet. Hiilikuitujen mekaanisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa valmistusprosessissa käytettävällä voimalla millä kuituja vedetään, sekä lämpötilalla, missä niitä vedetään. Valmistuksessa käytettävää vetovoimaa ja lämpötilaa nostamalla kuitujen orientaatio paranee ja kiderakenteet suurenevat, minkä seurauksena kuidun kimmomoduuli kasvaa. Kimmomoduulin kasvattaminen taas laskee hiilikuidun lujuutta johtuen kasvaneesta kiderakenteesta. (Brigante 2014, S. 6)

Hiilikuitukomposiittien valmistuksessa matriisimateriaalina käytetään epoksihartsia, polyimidihartsia, polyesterihartsia, polysulfonea ja vinyyliesterihartsia, joista yleisimmin käytetty on epoksihartsi. Epoksihartsilla on muihin matriisimateriaaleihin verrattuna paremmat mekaaniset- ja lämpöominaisuudet, sekä parempi sietokyky kemikaaleja ja vettä vastaan. Epoksin huonoja puolia ovat sen korkeampi hinta muihin matriisi materiaaleihin verrattuna, sekä epoksin huono kestävyys UV-säteilyä vastaan. Epoksin kestävyyttä UV-säteilyä vastaan voidaan parantaa kovettumisen jälkeisellä jälkikäsittelyllä. (Brigante, 2014 s. 15; Chawla 2012, s. 154)

Hiilikuitukomposiiteilla, kuten yleisesti kaikilla komposiiteilla on paljon hyviä ominaisuuksia muihin materiaaleihin verrattuna. Näitä ominaisuuksia ovat niiden korkea lujuus-paino suhde sekä hyvä korroosio- ja kemiallisten rasitusten kestävyys. Hiilikuitukomposiittien hyviin puoliin lukeutuu myös se, että niiden mekaaniset ominaisuudet voidaan räätälöidä käyttökohteen ja rasitusten mukaan, sekä se, että niistä voidaan valmistaa paljon erilaisia tuotteita ja monimutkaisia muotoja. (Puoskari & Bordi 2022)

Erilaisten hiilikuitutuotteiden valmistuksessa käytetään monia eri valmistusmenetelmiä kuten käsinladonta, prepreg-laminointi, pultruusio, puristusmuovaus, kuitukelaus, laminointi, ruiskuvalu ja RTM (Resin Transfer Moulding). Käsinladonnalla, prepreg-lamoinoinnilla, ruiskuvalulla ja RTM valmistustekniikoilla voidaan valmistaa monimutkaisia kaksoiskaare-

via osia, kuten esimerkiksi autonosia tai siipirakenteita. Pulturuusiolla, puristusmuovauksella ja kuitukelauksella voidaan valmistaa erilaisia lattoja, putkia ja profiileita ja laminoinnilla voidaan valmistaa levyjä. (Puoskari & Bordi 2022)

Hiilikuitukomposiittituotteiden mekaaniset ominaisuudet voidaan räätälöidä käyttökohteen ja sitä rasittavien kuormitusten mukaan. Hiilikuitukomposiittien mekaanisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa siinä käytettävän kuidun lujuudella, kuitujen suunnan orientaatiolla ja valmistusolosuhteilla (Puoskari & Bordi, 2022). CFRP materiaalit luokitellaan niiden kimmomoduulin mukaan LM (low modulus), IM/NM (intermediate modulus/normal modulus), HM (high modulus ja UHM (ultra high modulus). Hiilikuitujen jaottelu kimmokertoimen perusteella suhteessa teräkseen on esitelty taulukossa 1. (Peiris 2011, s. 2)

Taulukko 1. CFRP luokitus (mukaillen Peiris 2011, S. 2)

CFRP luokka	**Kimmokerroin suhteessa teräkseen**	**Kimmokerroin [GPa]**
LM	$E_{CFRP} \leq 0{,}5E_{teräs}$	<100
IM/NM	$0{,}5E_{teräs} \leq E_{CFRP} \leq E_{teräs}$	100-200
HM	$E_{teräs} \leq E_{CFRP} \leq 2E_{teräs}$	200-400
UHM	$E_{CFRP} \geq 2E_{teräs}$	>400

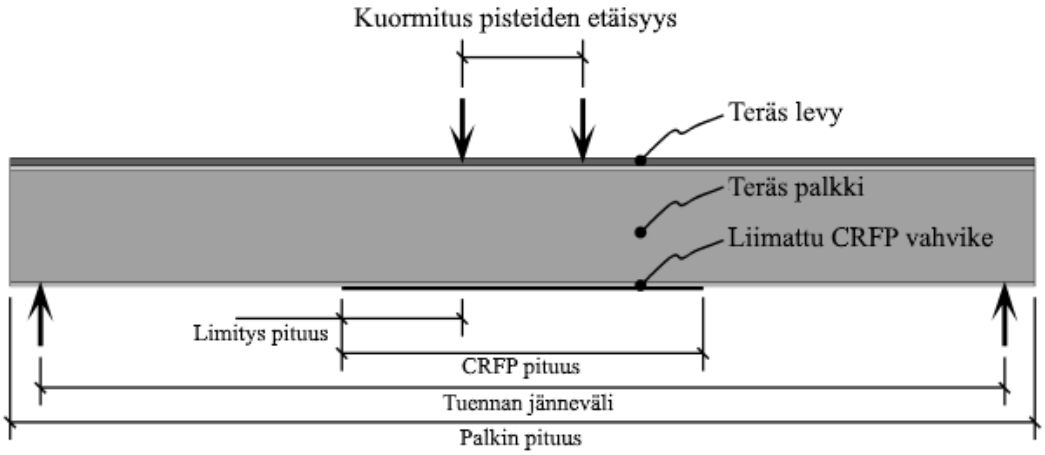
Eri hiilikuidut luokitellaan myös taulukossa 5 esitetyn luokituksen mukaan.

4 Hiilikuitukomposiitilla vahvistaminen ja jäykistäminen

Nykyään CFRP materiaalien käyttö on yleistä betonirakenteiden vahvistamisessa ja korjaamisessa ja näihin tarkoituksiin löytyy valmiita kaupallisia sovelluksia esimerkiksi Sika AG groupilta. Tyypillisiä kohteita, missä CFRP materiaaleja käytetään ovat erilaisten siltojen ja rakennusten korjaaminen ja vahvistaminen. Siltojen ja rakennusten korjaamisessa käytetään monia erilaisia CFRP tuotteita, kuten valmiita CFRP profiileita, nauhoja ja lattoja ja kankaita. CFRP lattoja ja nauhoja voidaan liimata rakenteisiin sellaisinaan tai esijännitettyinä kun taas kankaat kyllästetään ja märkä ladotaan käyttökohteessa.

Hyvät tulokset betonirakenteiden korjaamisessa ja vahvistamisessa sekä vanhojen teräsrakenteiden, kuten siltojen ja telemastojen korjaustarve on johtanut siihen, että myös teräspalkkien vahvistamista CFRP-materiaaleilla on alettu tutkia. CFRP:n käyttöä teräsrakenteiden vahvistamisessa ja korjaamisessa on tutkittu monesta eri suunnasta. Tutkimuksia on tehty ylikuormitettujen siltojen teräspalkkien korjaamisesta ja vahvistamisesta, luonnollisesti rapistuneiden ja tahallisesti heikennettyjen palkkien korjaamisesta ja vahvistamisesta, sekä vahingoittumattomien palkkien vahvistamisesta. (Rizkalla & Dawood 2006)

Tätä työtä varten läpikäydyissä tutkimuksissa suurimmassa osassa oli tarkastelun kohteena poikkileikkaukseltaan symmetriset teräksiset I-palkit, joita käytetään siltarakenteissa. Tutkimuksissa CFRP materiaaleilla vahvistettuja palkkeja on kuormitettu 4-piste taivutuksessa, minkä avulla vahvistamisen ja jäykistämisen vaikutuksia on päästy analysoimaan. Tyypillinen tutkimuksissa käytetty testaustilanne on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. 4-piste taivutus vahvistetulle palkille (mukaillen Schnerch 2005, s 90)

4.1 Jäykistäminen CFRP materiaaleilla

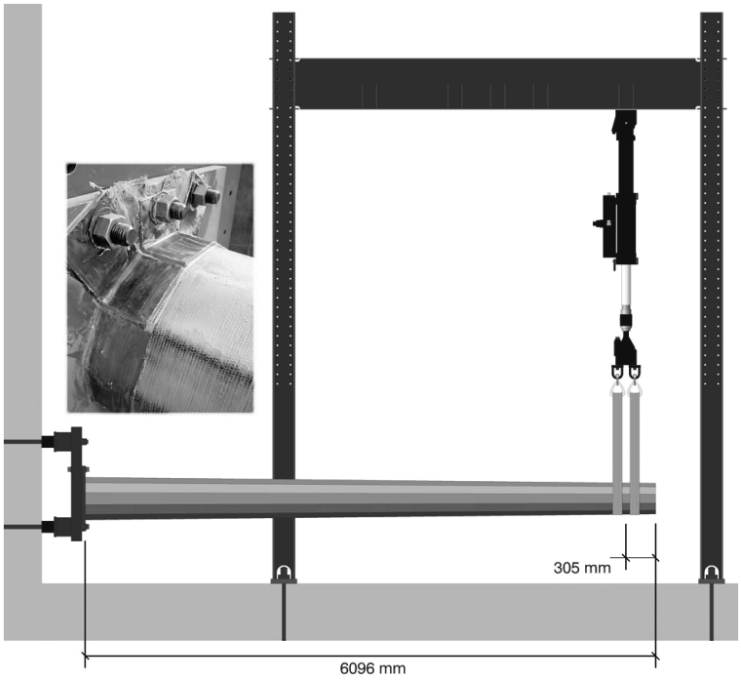
Ennen HM ja UHM CFRP-materiaalien kehittämistä teräsrakenteiden vahvistamista on tutkittu käyttäen IM CFRP-materiaaleja, joilla on terästä paremmat lujuusominaisuudet, mutta pienemmät kimmokertoimet.

Vuonna 2001 julkaistussa tutkimuksessa tutkittiin myötörajan yli kuormitettujen I-palkkien vahvistamista palkkien levyisillä 2 mm ja 5 mm vahvoilla IM CFRP latoilla. Tutkimuksen tuloksena oli, että ylikuormitettuja palkkeja saatiin vahvistettua merkittävästi. Tutkimuksessa myös todettiin, että 2 mm paksuilla CFRP latoilla oli erittäin pieni vaikutus palkkien jäykkyyteen. Jäykkyys kuitenkin parani 5 mm latoilla verrattuna 2 mm paksuihin lattoihin, mutta silti 5mm latan jäykistys parannus oli erittäin pieni. IM CFRP lattojen melkein olematon jäykkyyden paraneminen johtuu vahvistaman materiaalin pienestä kimmokertoimesta. (Sen, et al. 2001)

Vuonna 2003 julkaistussa tutkimuksessa tutkittiin teräs-betoni komposiittipalkkien vahvistamista IM CFRP latoilla, jossa todettiin, että vahvistaminen kasvatti parhaimmillaan palkin kuormituskapasiteettia 76%. Vahvistamisella ei ollut juurikaan vaikutusta palkin jäykkyyteen. (Tavakkolizadeh & Saadatmanesh 2003)

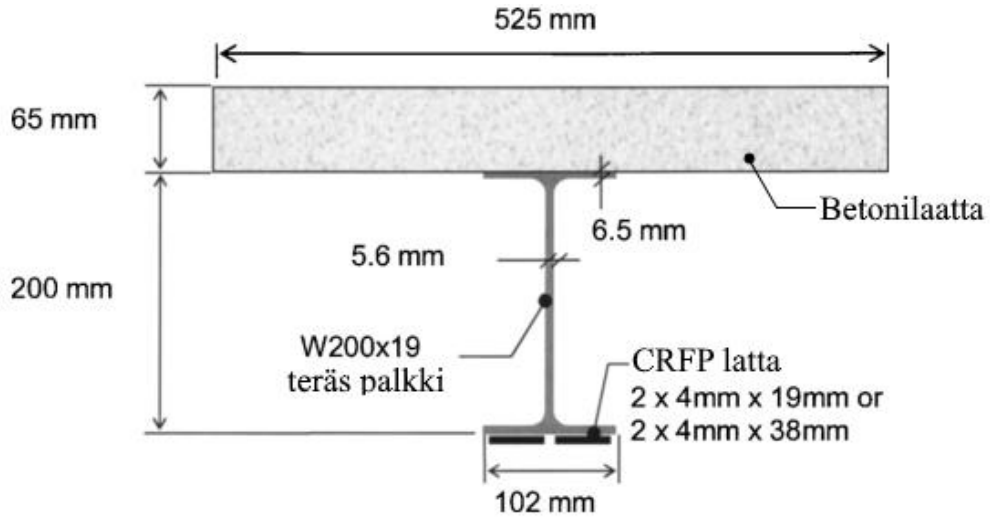
Vuonna 2005 julkaistussa väitöskirjassa ja vuonna 2007 julkaistussa artikkelissa David Schnerch toteaakin, että perinteisillä IM CFRP voidaan parantaa teräs ja teräs-betoni komposiittipalkkien kuormankanto kapasiteettia, mutta mikäli niillä halutaan saavuttaa jäykistäviä vaikutuksia, niin silloin IM CFRP materiaalin määrää pitää huomattavasti lisätä. Jotta IM CFRP latoilla voitaisiin saavuttaa sama jäykistävä vaikutus teräspalkeissa, kun mitä 4 mm paksu HM CFRP latta jäykistää betonirakenteissa, pitäisi latan paksuuden olla noin 20 mm. (Schnerch 2005; Schnerch, et al. 2006)

Schnerch, Stanford, Sumner ja Rizkalla tutki vuonna 2004 julkaistussa artikkelissa monopoliantenni maston vahvistamista HM CFRP-materiaaleilla. Tutkimukset suoritettiin laboratorio-olosuhteissa, missä vahvistettuja 6096 mm pitkiä mastoja kuormitettiin mastojen päästä nostamalla (kuva 19). Tutkimuksen mastot vahvistettiin märkälatomalla UD-hiilikuitukankaita kerroksittain mastojen alaosaan, kunnes tarvittava vahvistus oli saavutettu. Tutkimuksessa vahvistamattomien ja vahvistettujen antennimastojen kuormituksen suuruus oli 60% vahvistamattoman maston myötörajasta. Tutkimuksessa mastoantennin siirtymiä mitattiin 4:stä eri kohdasta, joiden perusteella vahvistuksen jäykistys vaikutus saatiin määritettyä. Mittausten perusteella mastoantennin jäykistäminen vähensi siirtymiä 25%. (Schnerch, et al. 2004)



Kuva 19. Antennimaston testitilanne (Schnerch, et al. 2004, s. 243)

Hyviä tuloksia HM CFRP jäykistämisestä on myös saatu tutkimuksessa, missä HM CFRP latoilla vahvistettuja teräs-betoni palkkeja altistettiin ylikuormitukselle ja väsyttävälle kuormitukselle. Tutkimuksen ylikuormitustarkastelut tehtiin kolmelle teräs-betoni palkille 4-piste taivutuksella, joista ensimmäinen palkeista oli vahvistamaton, toinen palkki oli vahvistettu kahdella 4x19 mm HM CFRP latalla ja kolmas palkki oli vahvistettu kahdella 4x38 mm HM CFRP latalla. Tutkimuksen väsymiskuormitus tarkastelu tehtiin myös kolmelle teräsbetoni palkille, missä yksi palkeista oli vahvistamaton ja molemmissa vahvistetuissa palkeissa käytettiin samaa 4x19 CFRP lattoja. Väsymistarkastelun kohteena olevissa vahvistetuissa palkeissa CFRP latan ja teräspalkin välisen liimakerroksen paksuus oli toisessa 0,1 mm ja toisessa 1 mm. Testattavien palkkien poikkileikkaus on esitetty kuvassa 20. Tutkimuksen mukaan teräs-betoni palkin jäykkyys parani ylikuormitus tilanteessa 27% 4x19 CFRP latoilla ja 46 % 4x38 CFRP latoilla. Väsymiskuormituksella testattujen palkkien jäykkyys parani 40% ja 35%. (Daewood, et al. 2007)

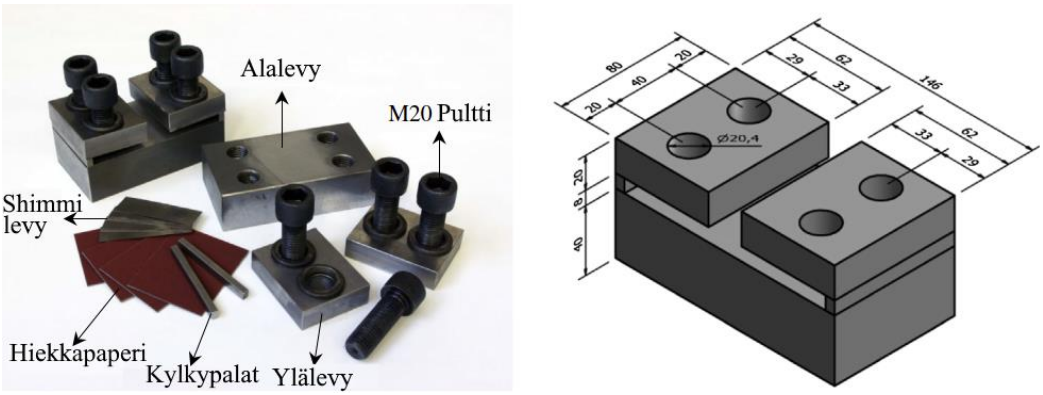


Kuva 20. Testattavan palkin poikkileikkaus (mukaillen Daewood et al. 2007, s.660)

Teräsrakenteiden vahvistamista HM CFRP materiaaleilla kehittänyt ja tutkinut Schnerch on myös tutkimuksissaan todennut niiden tehokkuuden teräsrakenteiden jäykistämisessä. Schnerch suositteleekin teräsrakenteiden vahvistamiseen käytettäväksi pultruusiolla valmistettuja HM CFRP lattoja, joiden kimmokerroin on ainakin kaksinkertainen teräkseen verrattuna (Schnerch 2005, s. 254).

4.1.1 Kiinnityksen ja esijännittämisen vaikutus jäykistykseen

CFRP latat voidaan kiinnittää teräspalkkiin joko liimaamalla (BR, bonded reinforcement) tai mekaanisesti puristimella (UB, un-bonded). Esimerkki IPE palkissa käytettävästä mekaanisesta puristimesta on esitetty kuvassa 21. Mekaanisen kiinnityksen etuna on, ettei kiinnitettävä pinta tarvitse esivalmistelua ja se on nopea asentaa. (Ghafoori & Motavalli 2015, s. 195)



Kuva 21. CFRP puristin IPE palkille (mukaillen Ghafoori & Motavalli 2015, s.197)

Teräspalkkien vahvistamisessa ja jäykistymisessä CFRP lattojen mittojen ja materiaaliominaisuuksien lisäksi kiinnitys tavalla ja CFRP lattojen esijännityksellä on myös vaikutusta lopputulokseen. Kiinnitystavan ja esijännityksen vaikutuksesta teräspalkin vahvistamisessa on tehty joitain tutkimuksia, joiden tulokset ovat olleet yhteneväisiä.

Ghafoorin ja Motavallin vuonna 2013 julkaisemassaan artikkelissa tutkittiin esijännitettyjen CFRP lattojen vaikutusta teräspalkkien vahvistamisessa. Tutkimuksessaan Motavalli ja Ghafoori loivat analyyttisen mallin, millä CFRP latan esijännityksen vaikutusta palkin vahvuuteen ja jäykkyyteen voidaan arvioida. Analyyttistä malliaan he vertasivat laboratoriossa suorittamiensa fyysisten kokeiden tuloksiin. Molempien, sekä analyyttisen menetelmän että fyysisten kokeiden tulokset olivat linjassa toisiinsa nähden. Tulosten perusteella todettiin, että esijännittämällä CFRP lattaa, palkin kuormituskapasiteettia voidaan nostaa, mutta esijännittämisellä ei ole vaikutusta palkin jäykkyyteen. (Ghafoori & Motavalli 2013)

Toisessa Ghafoorin ja Motavallin tekemässä tutkimuksessa tutkittiin esijännitettyjen liimattujen ja mekaanisesti kiinnitettyjen CFRP lattojen vaikutusta I-palkin kiepahdukseen. Asiaa tutkittiin numeerisesti sekä fyysisinä kokeina. Tutkimuksessa käytetty vahvike oli NM CRPF lattaa ja tutkimus tehtiin molemmilla kiinnitystavoilla 0%, 20% ja 40% esijännityksellä. Fyysisten kokeiden tulokset osoittavat, että esijännityksellä ei ollut vaikutusta palkin kokonaisjäykkyyteen ja eri kiinnitystapojen väliset jäykkyyserot olivat vähäisiä. Tutkimuksessa saadut FEA tulokset olivat linjassa kokeista saatujen tulosten kanssa. (Ghafoori & Motavalli 2015)

Kolmannessa Ghafoorin ja Motavallin tekemässä tutkimuksessa he vertailivat liimattujen ja mekaanisesti kiinnitettyjen NM, HM ja UHM CFRP lattojen vaikutusta teräspalkin vahvuuteen. Tämän tutkimuksen tulokset olivat linjassa aiempien tässä työssä käytyjen tutkimustulosten kanssa. Suurin jäykkyyteen vaikuttava tekijä on CFRP materiaalin kimmokerroin ja että liimauksen ja mekaanisen kiinnityksen väliset erot jäykkyyteen suhteen ovat vähäiset. (Ghafoori & Motavalli 2015)

5 Maston jäykistäminen ja taipumien määritys

Tässä luvussa käydään läpi laskennassa käytetty mastomalli ja jäykistämisessä käytetyt CFRP-materiaalit. FE-analyysissä käytetystä mallista esitellään siinä käytettävät elementit, kuormitukset ja reunaehdot. Maston tai sen osien tarkempia mitoituksia työssä ei esitellä vaan ainoastaan työn kannalta oleelliset mitat ovat esiteltynä. FE-analyysillä simuloidaan uloimman mastovaiheen taipumia maston normaalissa kuormitustilanteessa. Työn FE-analyysi on suoritettu käyttäen Dassault Systemsin ABAQUS FEA 2021 HF9 versiota.

5.1 CFRP vahvistelatat

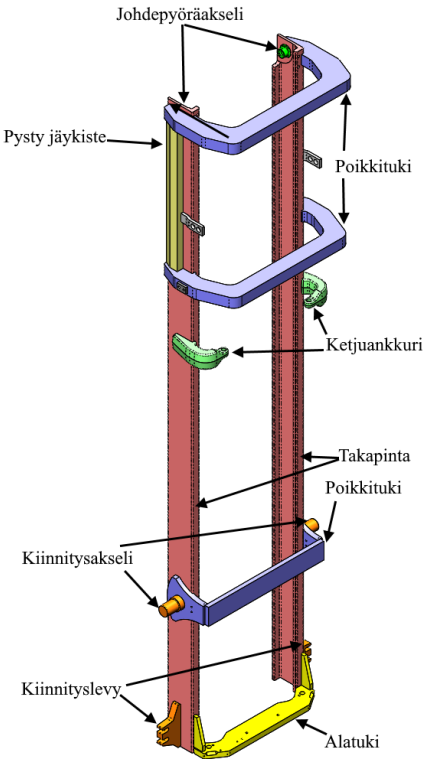
Maston jäykistämisessä käytettäville CFRP latoille asetettiin kaksi valintakriteeriä. Ensimmäisenä kriteerinä oli, että vahvistettava latta on pystyttävä sovittamaan olemassa olevaan mastorakenteeseen siten, ettei maston rakenteeseen jouduta tekemään muutoksia. Toisena kriteerinä oli, että CFRP materiaalin kimmokerroin tulee olla yli teräksen 210 GPa. Näiden kriteereiden perusteella vahvistus materiaaleiksi valittiin 2 eri latta kokoa ja 4 eri vahvuutta, jotka on esitelty taulukossa 2.

Taulukko 2. CFRP materiaali tiedot

Materiaali	**Kimmokerroin *E* [GPa]**	**Paksuus [mm]**	**Leveys [mm]**	**Poikkipinta-ala [mm^2]**
HM 250 3x20	250	3	20	60
HM 300 3x20	300			
HM 360 3x20	360			
UHM 450 3x20	450			
HM 250 6x20	250	6	20	120
HM 300 6x20	300			
HM 360 6x20	360			
UHM 450 6x20	450			

5.2 Jäykistettävä uloin mastovaihe

Työn tarkastelun kohteena on Triplex maston uloin mastovaihe, joka on esitelty kuvassa 22. Tarkasteltavaa ulointa mastovaihetta käytetään mastossa, jonka nostokorkeus on noin 7500 mm. Mastovaiheen korkeus ja palkin pituus on 3030 mm ja maston leveys on palkkien kohdalta 610 mm.

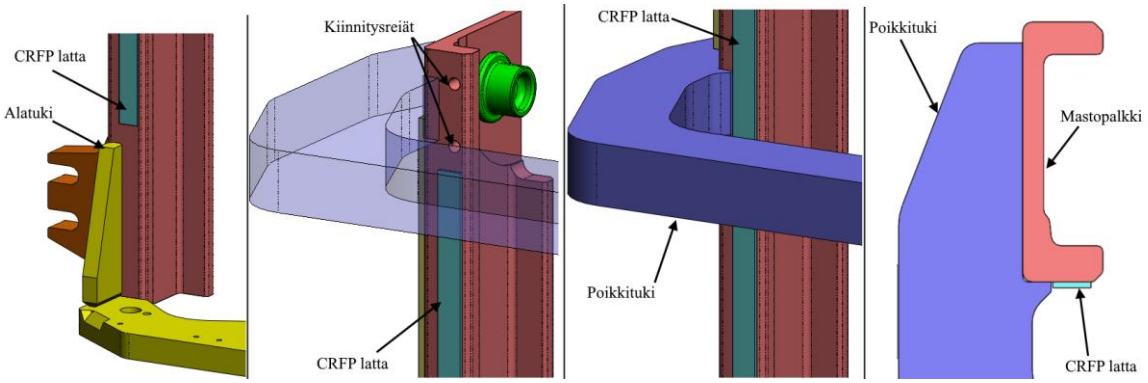


Kuva 22. Uloimman mastovaiheen osat

Trukin mastoa käytettäessä vapaanostoalueella, kohdistuu uloimpaan mastovaiheeseen kuormituksia sen kiinnitysakseleihin ja -levyihin, alatukeen ja ketjuankkureihin. Kun mastoa käytetään vapaanostoalueen yläpuolella, keskimmäinen mastovaihe alkaa kuormittaa uloimman mastovaiheen johdepyöräakseleita ja mastopalkkeja. FEM mallia varten uloimpaan mastoon kohdistuvien kuormitusten suuruus maksiminosto tilanteessa tuli selvittää. Kuormitukset selvitettiin piirtämällä maston eri osista vapaakappale kuvat, joiden perusteella kirjoitettiin tasapainoyhtälöt, mistä uloimman mastovaiheen kuormitukset ratkaistiin. Vapaakappalekuvat ja tasapainoyhtälöt on esitetty liitteessä I.

5.3 CFRP jäykisteiden paikoitus

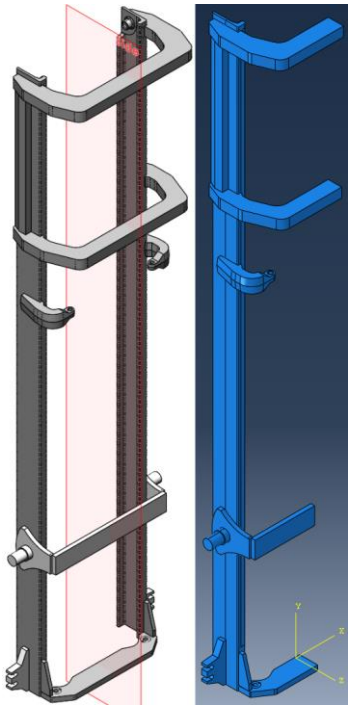
Uloin mastovaihe jäykistetään FEM laskentaa varten asettamalla mastopalkkien takapinnalle yksi CFRP latta. Lisätyt osat ovat lähes mastopalkkien pituiset. FEM laskennassa käytettävien CFRP lattojen pituus 2740 mm ja leveys on 20 mm. CFRP lattojen pituudet ovat määräytyneet mastorakenteiden rajoitteiden mukaan. Maston yläpäässä rajoittavana tekijänä on liukupalojen kiinnitysreiät ja alapäässä mastovaiheen alatuki. CFRP lattojen leveys rajoittui 20 mm maston poikittaistukien ja ketjuankkureiden geometrian takia. CFRP latan paikoitusta ja maston asettamia rajoitteita latoille on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23 CFRP lattojen paikoitus

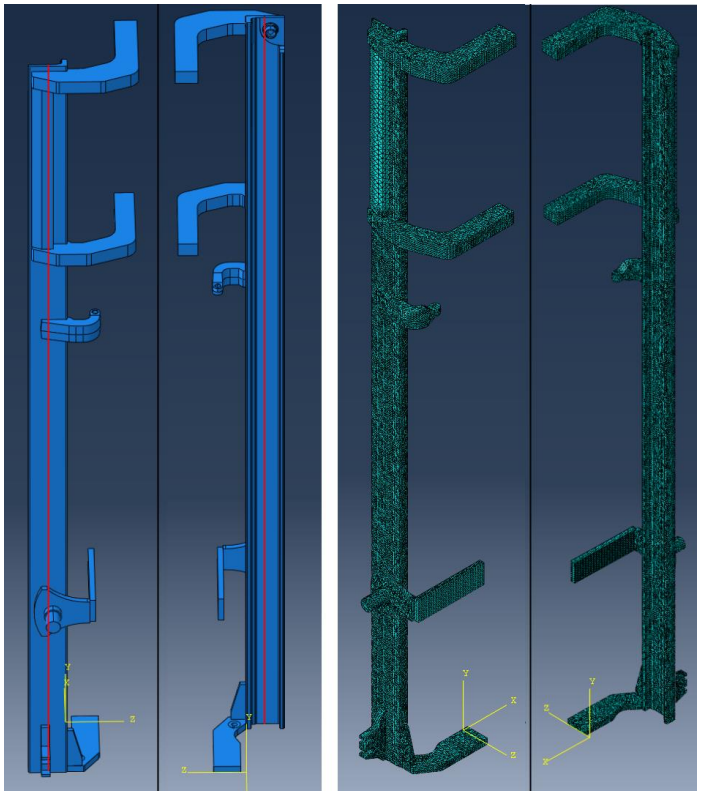
5.4 FE-malli

FE-analyysiä varten uloimman mastovaiheen 3D-mallia jatkokäsiteltiin laskentamallin keventämiseksi. Jatkokäsittelyssä maston osien 3D-malleista poistettiin ylimääräiset osat, kuten maston varusteluun liittyvät peltikannakkeet sekä ylimääräiset reiät, viisteet ja pyöristykset. Koska työssä tarkastellaan vain maston tasotaipumaa, ei vääntöä eikä sivuttaistaipumaa, voitiin laskennassa hyödyntää maston symmetriaa ja mallintaa siitä vain puolet. Jatkokäsitelty 3D-malli ja FE-malli on esitetty kuvassa 24. Uloimmasta mastovaiheesta tehtiin 3 eri FE-mallia, joista yksi oli vahvistamaton masto, toinen oli 3x20 mm CFRP vahvistettu masto ja kolmas oli 6x20 mm CFRP vahvistettu masto. FE-analyysistä saatuja vahvistettujen mastojen tuloksia verrataan lopussa vahvistamattoman maston tuloksiin.



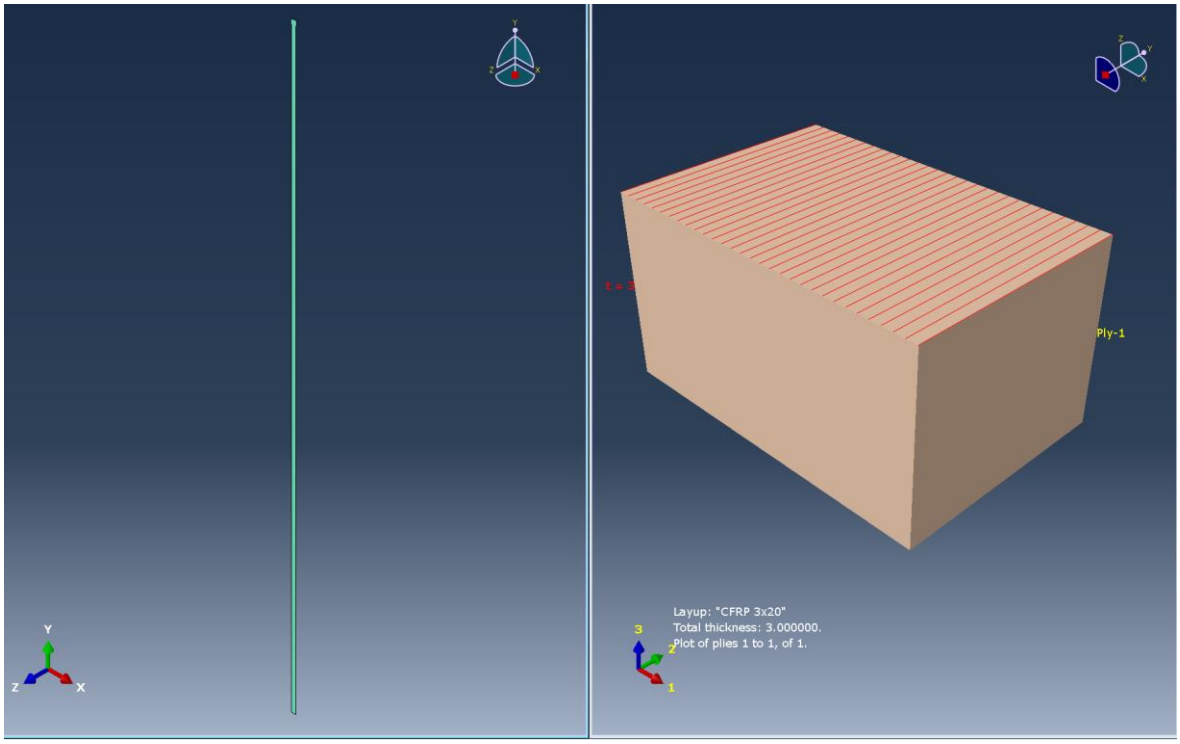
Kuva 24. Jatkokäsitelty malli ja FE-malli

FE-mallissa kaikki uloimman mastovaiheen osat ovat verkotettu käyttäen 10-solmuisia tetrahedron- ja 8-solmuisia heksadron solid elementtejä. Uloimmassa mastovaiheessa mastopalkin verkotuksessa elementin koko on 5 mm ja mastovaiheen muissa osissa verkon koko on 5 mm tai 10 mm riippuen osan ainevahvuudesta. CFRP jäykiste lattojen mallintamisessa on käytetty 4 solmuista kuorielementtiä ja verkotuksessa elementin koko on mastopalkin tapaan 5 mm. Ennen mastonosien verkottamista mastopalkki on jaettu kahteen osaan sen koko pituudelta palkin neutraaliakselin kohdalta. Mastopalkin jakamisen ansiosta palkin neutraaliakselilla olevalle jakoviivalle tulee verkottamisen yhteydessä solmupisteet koko palkin pituudelle, mistä palkin tarkat siirtymät ja maksimi taipuma voidaan mitata. Mastopalkin jakoviiva ja verkotettu mastomalli on esitetty kuvassa 25.



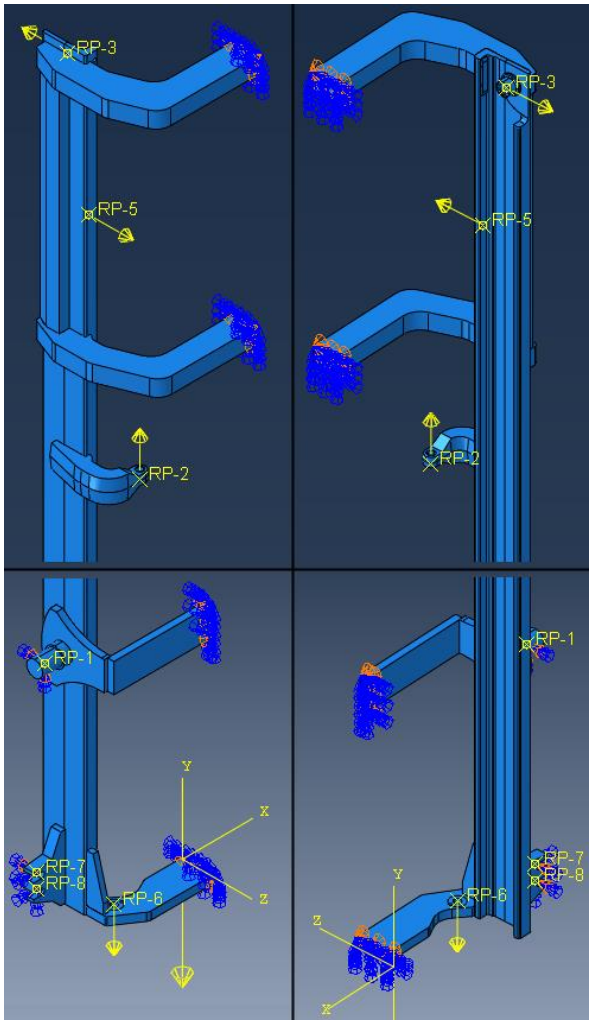
Kuva 25. Mastopalkin jakoviiva ja verkotettu malli

FE-mallissa CFRP latat ovat määritelty 1 kerroksisiksi UD komposiiteiksi Abaqusin composite layups työkalua käyttäen. Composite layups työkalulla voidaan määrittää komposiittikerroksien määrät, paksuudet ja orientaatiot sekä jokaiselle kerrokselle voidaan määrittää omat materiaaliominaisuudet luotujen materiaalikorttien perusteella. Kuvassa 26 on esitetty 1-kerroksisen 3x20 mm UD CFRP latan kuitujen orientaatio globaaliin koordinaatistoon nähden.



Kuva 26. 2x30 CFRP latan kuituorientaatio, vasemmalla CFRP latta ja oikealla kuitu orientaatio

Maston FE-mallin kuormitukset ja reunaehdot ovat määritetty siten, että ne vastaavat maston todellisia kiinnityksiä ja kuormituksia yhdessä päätasossa. Masto on kiinnitetty sen alapäässä olevasta kiinnityslevystä ja ylempänä olevasta kiinnitysakselista. Maston alapään kiinnityslevy on kiinnitetty rigid-elementteihin siten, että sen reunaehdot vastaavat todellista pulttikiinnitystä. Maston kiinnitysakseli on myös kiinnitetty rigid-elementtiin siten että sen reunaehdot vastaavat todellista kiinnitystä. Maston kiinnitysten lisäksi mastolle on asetettu sen symmetriatason leikkauspintoihin reunaehdot vastaamaan mastomallista poisleikattua puoliskoa. Kuormituksia varten maston osiin luotiin rigid-elementtejä, joiden referenssipisteisiin kuormitukset asetettiin vaikuttamaan. Kuvassa 27 on esitetty reunaehtojen ja kuormitusten paikat, missä RP-1, -7 ja -8 ovat maston kiinnitykset, RP-3 ja -5 ovat keskimmäisen mastovaiheen aiheuttamat kuormitukset, RP-2 on ketjukuorma, RP-6 on nostosylinterin aiheuttama kuorma ja lisäksi koko malliin vaikuttaa painovoima. Reunaehdot ja kuormitukset on esitetty tarkemmin taulukossa 3 ja taulukossa 4.



Kuva 27. Maston FE-mallin reunaehdot ja kuormitukset

Taulukko 3. Mastovaiheen reunaehdot

	Siirtymät			**Kiertymät**		
	U1	**U2**	**U3**	**UR1**	**UR2**	**UR3**
RP1	X	X	X	o	X	X
RP7	X	X	X	X	X	X
RP8	X	X	X	X	X	X
Symmetria taso	X	o	o	o	X	X
X= sidottu o= vapaa						

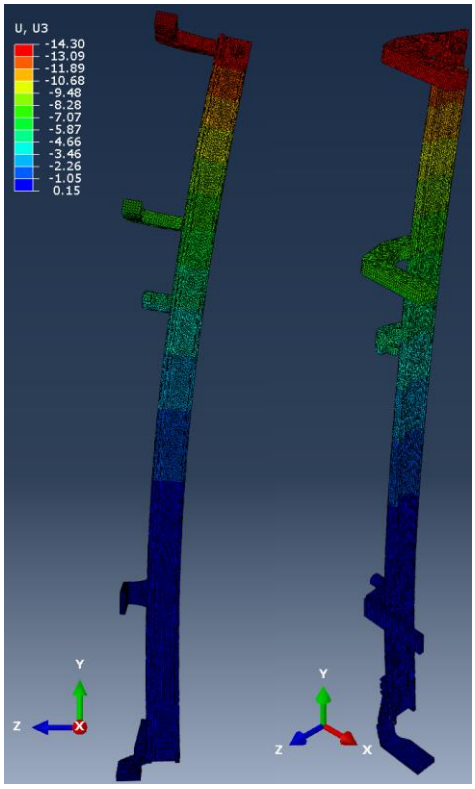
Taulukko 4. Mastovaiheen kuormitukset

Kuormitukset [N]			
	CF1	**CF2**	**CF3**
RP2	0	9118,8	0
RP3	0	0	-1401,6
RP5	0	0	1401,6
RP6	0	-19075,7	0

Taulukon 3 ja 4 U, UR ja CF merkintöjen perässä oleva numero merkitsee koordinaatiston akseleita, joista 1 on x-akseli, 2 on y-akseli ja 3 on z-akseli.

6 Tulokset

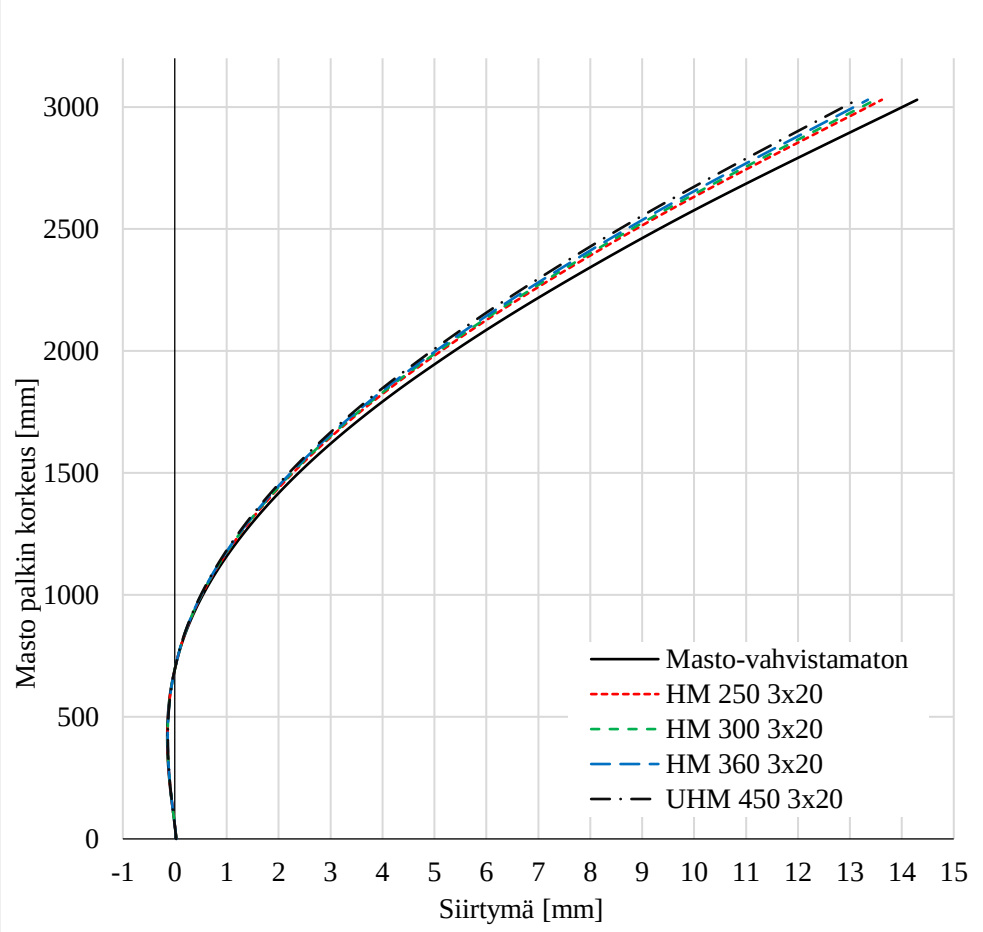
Tässä kappaleessa tarkastelemme mastovaiheen jäykistämisestä tehtyjen FE-analyysien tuloksia. FE-analyysejä tehtiin yhteensä yhdeksän kappaletta, yksi vahvistamattomalle mastovaiheelle ja kahdeksan kappaletta vahvistetuille mastovaiheille. Vahvistetut mastovaiheet olivat vahvistettu 4:llä eri vahvuisilla 3x20 mm ja 6x20 mm CFRP latoilla. Vahvistuksessa käytetyt CFRP latat on esitelty aiemmin ***Virhe. Viitteen lähdettä ei löytynyt.***. FE-analyysin tuloksia tarkastellaan vain mastovaiheen siirtymien osalta, eikä mahdollisiin jännityksiin CFRP lattojen päissä ja palkin rajapinnassa oteta kantaa. FE-analyysin tuloksena saatu taipunut vahvistamaton masto on esitetty kuvassa 28.



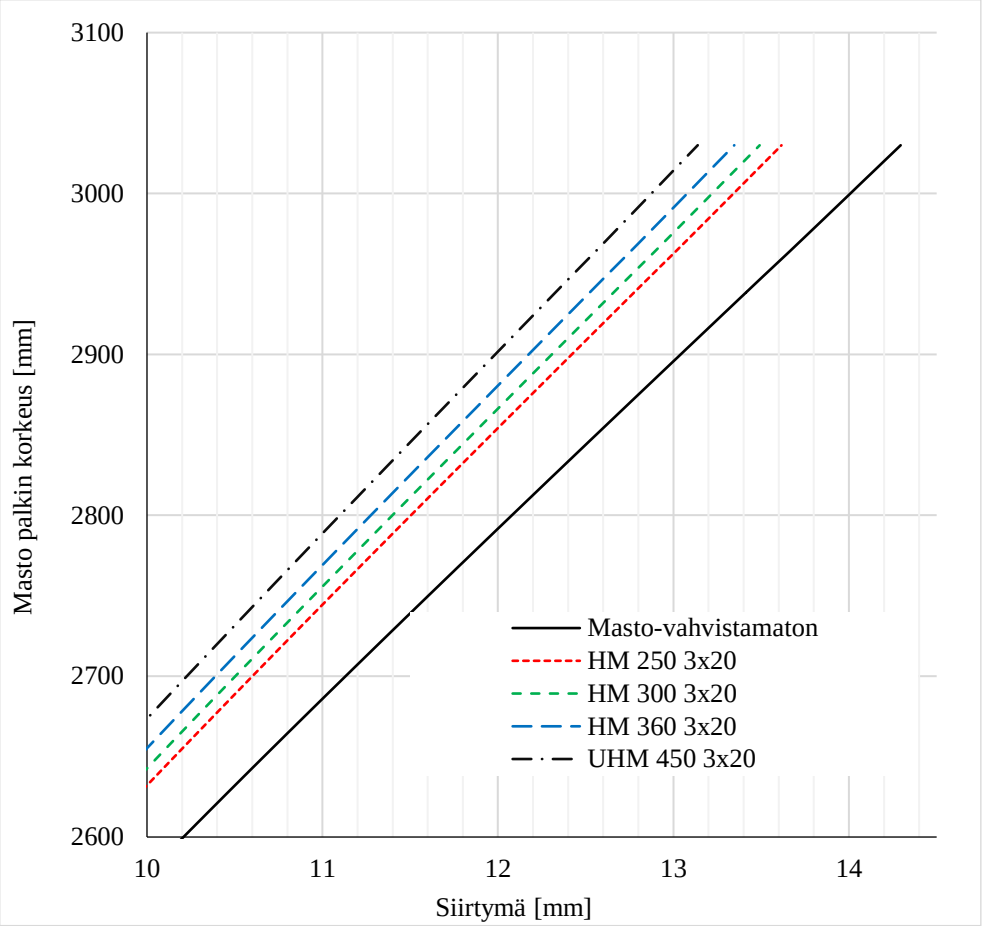
Kuva 28. Taipunut vahvistamaton mastovaihe

Jokaisen FE-analyysin siirtymä tulokset on luettu mastopalkin neutraaliakselille luodulta jakoviivalta sijaitsevista solmupisteistä. Tulokset on esitetty taipumakuvaajina CFRP latta

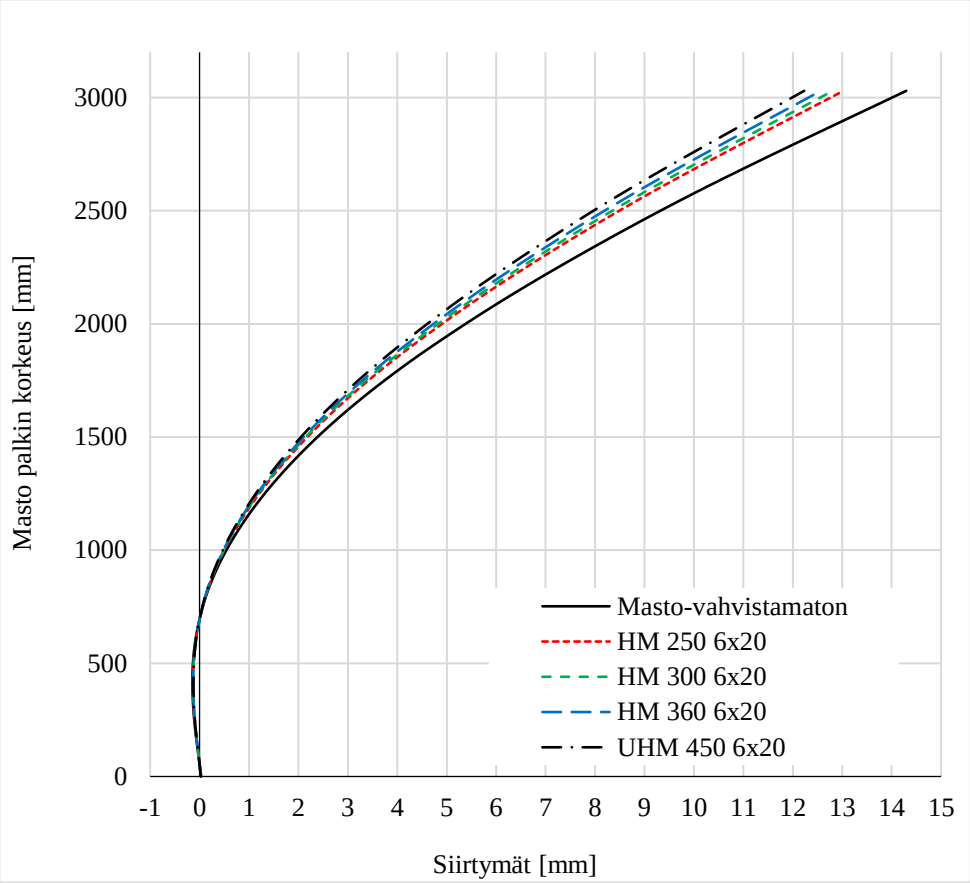
paksuuksien mukaan, missä molempia sekä 3x20 mm että 6x20 mm lattoja verrataan keskenään. Kummassakin tapauksessa tuloksia verrataan vahvistamattomaan mastovaiheeseen. Tulokset esitetty 2 kuvaajalla, joista toisessa esitetään siirtymät koko mastovaiheen matkalta ja toisessa kuvaajassa esitetään mastovaiheiden maksimi siirtymät mastovaiheen yläpäässä. 3x20 mm CFRP latoilla vahvistettujen mastovaiheiden siirtymät on esitetty kuvassa 29 ja kuvassa 30 ja 6x20 mm CFRP latoilla vahvistettujen mastovaiheiden siirtymät on esitetty kuvassa 31 ja kuvassa 32.



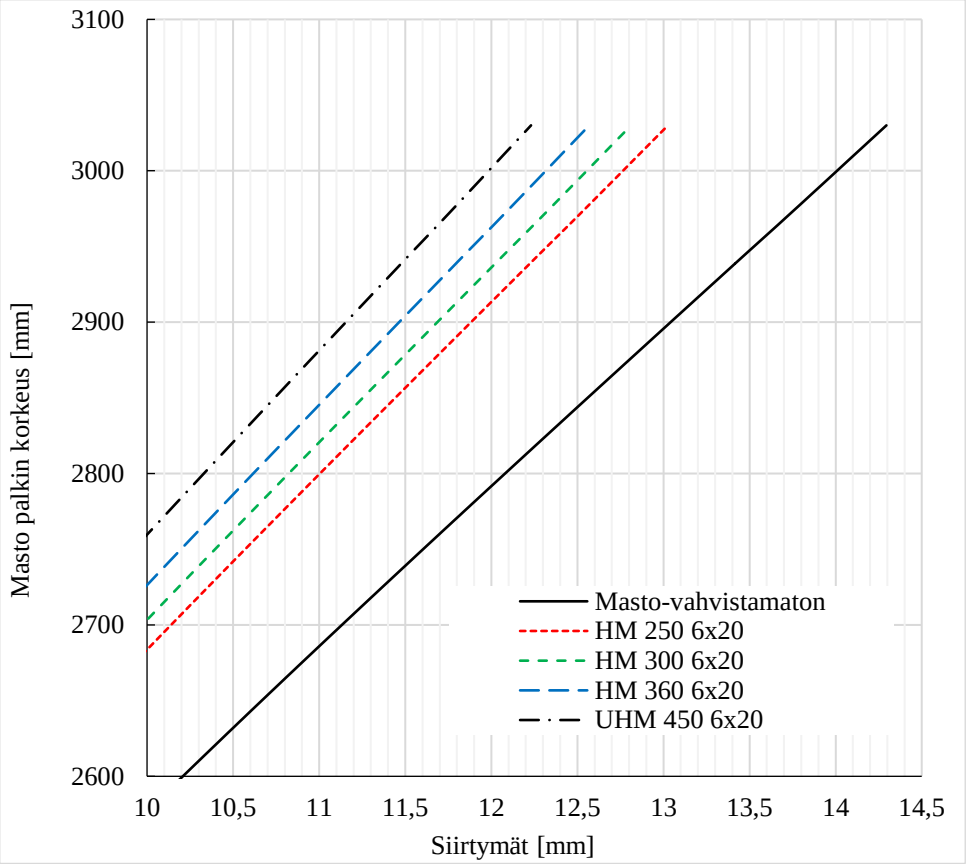
Kuva 29. 3x20 CFRP vahvistetun koko mastovaiheen taipumat.



Kuva 30. 3x20 CFRP vahvistetun mastovaiheen yläpään siirtymät



Kuva 31. 6x20 CFRP vahvistetun koko mastovaiheen taipumat



Kuva 32. 6x20 CFRP vahvistetun mastovaiheen yläpään siirtymät

CFRP lattojen vaikutusta mastovaiheen jäykkyyteen on hyvä tarkastella mastovaiheen yläpään maksimi siirtymän kautta. Yllä olevista kuvaajista voi huomata, että CFRP vahvikkeilla saadaan pienennettyä mastovaiheen maksimi siirtymiä. CFRP lattojen tuomaa suhteellista jäykkyyden muutosta on esitetty ***Virhe. Viitteen lähdettä ei löytynyt.***.

Taulukko 5.Vahvistettujen mastovaiheiden suhteellinen jäykkyyden muutos

Suhteellinen jäykkyyden muutos		
	3x20mm	**6x20mm**
HM 250	4,75 %	8,87 %
HM 300	5,62 %	10,37 %
HM 360	6,63 %	12,07 %
UHM 450	8,09 %	14,44 %

Taulukosta 5. huomataan, että tuplaamalla CFRP latan paksuus maston jäykkyys parannuskin tuplaantui.

7 Tulosten arviointi ja pohdinta

Työn tavoitteena oli selvittää voidaanko trukin maston taivutusjäykkyyttä parantaa kuorman suuntaan käyttämällä CFRP lattoja. Työn tavoitteen perusteella asetettiin työlle seuraavat tutkimuskysymykset:

- Kuinka paljon CFRP latoilla voidaan pienentää mastovaiheen taipumia?
- Miten eri CFRP vahvuudet vaikuttavat taipumiin?
- Miten CFRP latan paksuuden muutos vaikuttaa taipumiin?

Työn tutkimuksilla saatiin näihin kysymyksiin riittävät vastaukset. Vaikka mastovaiheen kuormitukset ja tuennat ovat hyvin erilaiset verrattuna tapauksiin, mitä kirjallisuuskatsaus osiossa käytiin läpi ovat tulokset silti hyvin saman suuntaisia. Mastovaiheen taipumat pienenivät oletetusti sitä mukaan, kun CFRP latan kimmokerrointa kasvatettiin. Tuplatessa CFRP latan paksuus kolmesta kuuteen millimetriin siirtymätkin pienenivät melkein puolella. Katsottaessa vahvistamattoman maston absoluuttista maksimisiirtymää, voidaan todeta, ettei se ole lähtökohtaisesti suuri, joten vahvistettujen mastojen siirtymien absoluuttiset siirtymien muutoksetkaan eivät ole suuria. 3x20 mm kokoisilla CFRP latoilla mastovaiheiden jäykkyydet paranivat alle 10%, mikä on melko vähän CFRP lattojen hintaan nähden ja siihen, millaisen työn niiden kiinnittäminen oikeaan mastovaiheeseen vaatisi. Paksummalla 6x20 mm päästään jo ihan hyviin jäykkyys parannuksiin jäykkyyden kasvaessa yli 10 % ja UHM 450 latalla melkein 15%. FE-analyysin tulokset puoltavat David Schnerchin suositusta käyttää metallirakenteen jäykistämiseen CFRP-materiaalia jonka kimmokerroin on vähintään 2 kertainen teräkseen verrattuna.

Tutkimuksissa käytetty vahvistustapa ei pelkästään paranna maston taivutusjäykkyyttä kuorman suuntaan, vaan se parantaa myös maston kiertojäykkyyttä. Näiden lisäksi maston huojumiskäyttäytymisen muutokset yhtyvät taivutusjäykkyyksissä saatuihin muutoksiin. Sivuttaistaivutukseen vahvistustavalla ei ole suurta merkitystä.

Koska CFRP-materiaaleilla saavutettu jäykkyysparannus on melko pieni suhteessa hintaan ja työmäärään nähden, kannattaa tulevaisuudessa mastosuunnittelussa panostaa mastojäykisteiden sijoitteluun ja niiden määrään. Mastovaiheiden jäykkyyksiä voidaan todennäköisesti parantaa huomattavasti ja pienemmällä vaivalla, kun teräksiset lisäjäykisteet ja niiden sijoittelut suunnitellaan fiksusti.

8 Johtopäätökset

Kun puhutaan trukeista ja trukkien suunnittelusta, niin tietyissä osissa ja paikoissa painoa on hyvä olla ja tietyissä osissa ja paikoissa sitä on hyvä olla vähemmän. Trukin mastojen suunnittelu on tasapainoilua ja kompromissien tekemistä tiettyjen lain alaisuuksien suhteen. Trukin mastossa tulisi olla hyvä taivutus- ja kiertojäykkyys, trukin maston läpi ja ohi tulisi olla mahdollisimman hyvä näkyvyys ja trukin masto ei saisi olla liian syvä, jottei kuorma ole liian kaukana trukin painopisteestä. Trukin maston kokonaistaivutus- ja kiertojäykkyys muodostuu useammasta asiasta, kuten laakerivälyksistä, laakereiden ja mastopalkkien lokaaleista joustoista ja muodonmuutoksista, sekä yksittäisten mastovaiheiden jäykkyysominaisuuksista. Perinteinen tapa vaikuttaa yksittäisen mastovaiheen jäykkyyksiin on mastopalkin profiilivalinta ja metallijäykisteiden sekä tukien hitsaaminen mastovaiheeseen. Jäykisteiden hitsaaminen mastovaiheeseen kasvattaa mastovaiheen painoa, lisäksi se mahdollisesti kasvattaa maston syvyyttä ja se voi myös vaikuttaa näkyvyyteen maston läpi ja ohi. Tässä työssä tutkittiin onko mahdollista jäykistää yksittäistä mastovaihetta CFRP latoilla. CFRP lattojen etuna on tietenkin se, että ne ovat terästä kevyempiä ja vahvempia. eli ne veisivät vähemmän tilaa mastossa. Tällä olisi suora vaikutus näkyvyyteen ja maston syvyyteen.

Vaikka tutkimuksessa saatiin lupaavia tuloksia UHM CFRP latalla ei niiden käyttö trukin mastojen jäykistämisessä ole kannattavaa. Yksi syy tähän on UHM CFRP-materiaalien korkea hinta. Erilaisia trukkeja valmistetaan sarjatuotannolla, joten niiden kustannusrakenne on kannattavuuden kannalta erittäin tärkeä. Toinen syy liittyy tuotannollisteknisiin asioihin kuten uusien työvaiheiden lisäämiseen trukin maston valmistusprosessiin. CFRP lattojen käyttö tarkoittaisi sitä, että maston valmistusprosessiin pitäisi lisätä työvaihe liimattavan pinnan puhdistamiseen, CFRP latan liimaamiseen ja lisäksi liiman kuivumiseen pitäisi myös varata aikaa. Vaihtoehtoisesti jos CFRP latta kiinnitettäisiin mekaanisesti ankkureilla niin se vaatisi myös tässä tilanteessa omat asennus- ja laadunvarmistus prosessinsa. Kolmantena syynä ovat ekologiset syyt, mitkä liittyvät hiilikuitujen valmistamiseen ja kierrättämiseen.

Jos UHM hiilikuidut saataisiin valmistettua ekologisemmin ja hinnat laskisivat merkittävästi siten että niiden käyttö sarjatuotantotuotteissa olisi järkevää niin silloin niiden käyttöä trukin maston jäykistämisessä voisi pohtia uudelleen. Tämä kuitenkin tarkoittaisi sitä, että mikäli niiden käyttöön voitaisiin siirtyä, niin silloin trukkien mastot tulisi suunnitella siten että CFRP-materiaalien käyttö huomioitaisiin jo maston suunnitteluvaiheessa, koska niiden. jälkiasentaminen mastoihin ei välttämättä ole kannattavaa, saati sitten edes mahdollista.

Lähteet

Brigante D. 2014. New composite materials: selection, design and application. Springer, New York. 179 s.

Chawla, K. K. 2012. Composite Materials Science and Engineering. 3rd ed. 2012. 542 s.

Dawood, M. et al. 2007. Fatigue and Overloading Behavior of Steel–Concrete Composite Flexural Members Strengthened with High Modulus CFRP Materials. Journal of composites for construction. Volume 11 (6). 659–669 s.

Ghafoori, E. & Motavalli, M. 2013. Flexural and interfacial behavior of metallic beams strengthened by prestressed bonded plates. Composite structures. Volume 101. 22-34 s.

Ghafoori, E. & Motavalli, M. 2015. Lateral-torsional buckling of steel I-beams retrofitted by bonded and un-bonded CFRP laminates with different pre-stress levels: Experimental and numerical study. Construction & building materials. Volume 76. 194-206 s.

Ghafoori, E. & Motavalli, M. 2015. Normal, high and ultra-high modulus carbon fiber-reinforced polymer laminates for bonded and un-bonded strengthening of steel beams. Materials & Design. Volume 67. 232-243 s.

Hall, W. & Javanbakht, Z. 2021. Design and Manufacture of Fibre-Reinforced Composites. 1st ed. 2021. Cham: Springer International Publishing. 137 s.

Karhunen, J.;Lassila, V.;Pyy, S.;Ranta, A.;Räsänen, S.;Saikkonen, M.;& Suosara, E. 1992. Lujuusoppi. Helsinki: Otatieto Oy. 571 s.

MLE. 2022. Logisnext Europe. Noudettu osoitteesta https://logisnext.eu/about.html

MLE Oy. 2022. Company presentation. Järvenpää: MLE Oy.

Peiris, N. A. 2011. Steel Beams Strengthened With Ulta High Modulus CFRP Laminates. University of Kentucky. 284 s. Saatavilla: https://uknowledge.uky.edu/gradschool_diss/204

Pennala, E. 2000. Lujuusopin perusteet (10 p.). Helsinki: Otatieto Oy. 400 s.

Puoskari, K. & Bordi, M. 2022. R&D johtaja ja Myyntiedustaja Exel Composites Oyj. Järvenpää. Haastattelu 2. helmikuu 2022. Haastattelijana Samuli Ståhlstedt.

Rizkalla, S.;& Dawood, M. 2006. High modulus carbon fiber materials for retrofit of steel structures and bridges. 11 s. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/240029857_High_modulus_carbon_fiber_materials_for_retrofit_of_steel_structures_and_bridges

Schnerch, D. A. 2005. Strengthening of Steel Structures With High Modulus Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Materials. Raleigh, North Carolina. 265 s. Saatavilla: http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/4113

Schnerch, D. et al. 2007. Proposed design guidelines for strengthening of steel bridges with FRP materials. Construction & building materials. Volume 21 (5). 1001–1010 s.

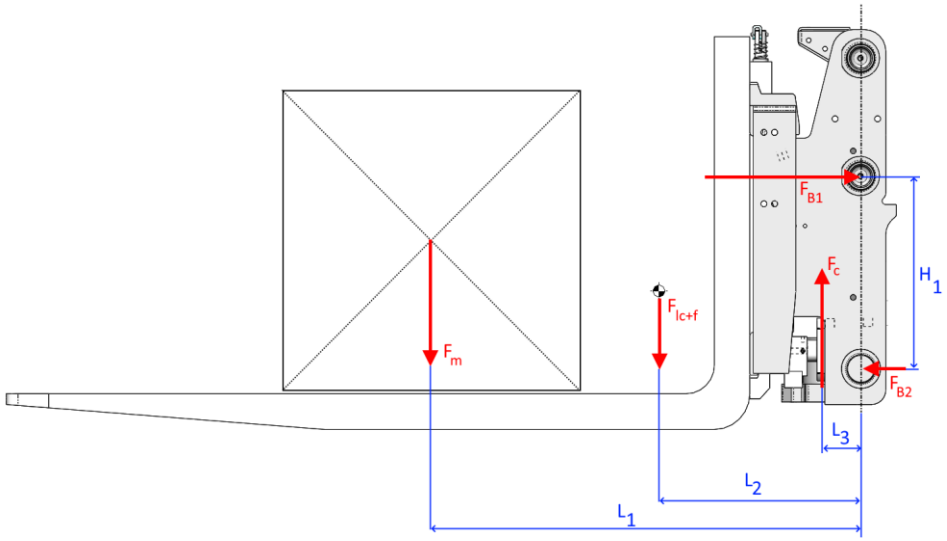
Schnerch, D. et al. 2004. Strengthening Steel Structures and Bridges with High-Modulus Carbon Fiber-Reinforced Polymers Resin Selection and Scaled Monopole Behavior. Transportation Research Record. Volume 1892(1). 237–245 s.

Sen, R. et al. 2001. Strengthening steel bridge sections using CFRP laminates. Composites. Part B, Engineering. Volume 32 (4). 309–322 s.

Tavakkolizadeh, M. & Saadatmanesh, H. 2003. Strengthening of Steel-Concrete Composite Girders Using Carbon Fiber Reinforced Polymers Sheets. Journal of structural engineering, Vol 129, 30-40 s.

Ālam, P. 2021. Composites engineering : an A–Z guide. Bristol: IOP Publishing. 207 s.

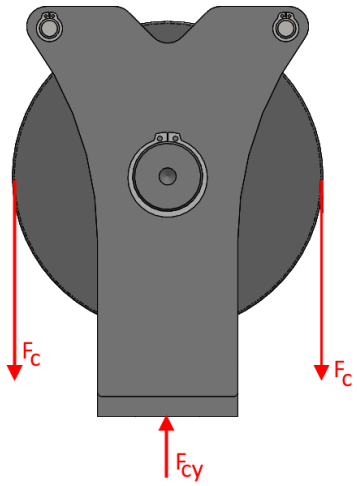
Liite 1. Tasapainoyhtälöt ja vapaakappalekuvat



$$\Sigma Fx = F_{B1} - F_{B2} = 0$$

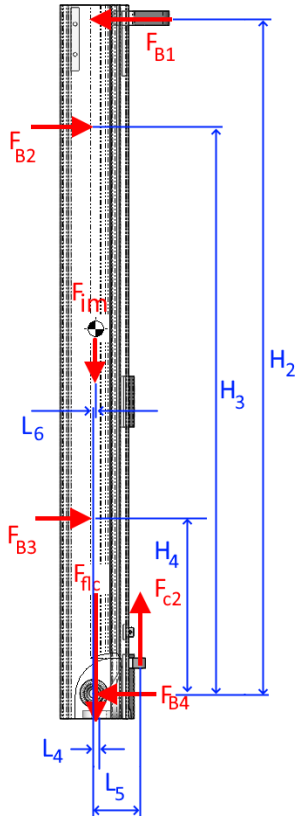
$$\Sigma Fy = -F_m - F_{lcf} + F_c = 0$$

$$M_{B2} = F_m \cdot L_1 + L_{lcf} \cdot L_2 - F_{B1} \cdot H_1 - F_c \cdot L_3 = 0$$



$$\Sigma Fy = F_{cy} - 2\ F_c = 0$$

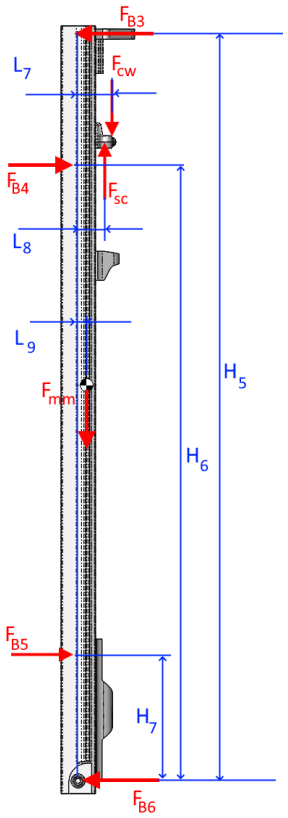
$$\Sigma Fy = F_{flc} - F_{cy} + F_c = 0$$



$$\Sigma Fx = -F_{B1} + F_{B2} + F_{B3} - F_{B4} = 0$$

$$\Sigma Fy = -F_{im} + F_{c2} - F_{flc} = 0$$

$$M_{B3} = -F_{im} \cdot L_6 - F_{flc} \cdot L_4 + F_{c2} \cdot L_5 + F_{B1} \cdot H_2 - F_{B2} \cdot H_3 - F_{B3} \cdot H_4 = 0$$



$$\Sigma Fx = -F_{B3} + F_{B4} - F_{B5} + F_{B6} = 0$$

$$\Sigma Fy = -F_{cw} + F_{sc} - F_{mm} = 0$$

$$M_{B6} = -F_{mm} \cdot L_9 - F_{cw} \cdot L_7 + F_{sc} \cdot L_8 + F_{B3} \cdot H_5 - F_{B4} \cdot H_6 - F_{B5} \cdot H_7 = 0$$