

Antti Ala-Luhtala

## **Ketjukuljettimen mekaaninen suunnittelu**

Opinnäytetyö

Syksy 2017

SeAMK Tekniikka

Konetekniikan tutkinto-ohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU  
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: SeAMK Tekniikka

Tutkinto-ohjelma: Konetekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Kone- ja tuotantotekniikka

Tekijä: Antti Ala-Luhtala

Työn nimi: Ketjukuljettimen mekaaninen suunnittelu

Ohjaaja: Heikki Kokkonen

Vuosi: 2017 Sivumäärä: 30 Liitteiden lukumäärä: 0

---

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi ketjukuljettimen suunnittelu- ja lujuuslaskenta-prosessi. Ketjukuljetin on osa asiakaslähtöistä projektia. Tähän opinnäytetyöhön on projektin osalta rajattu 3D-mallinnus ja mallin rakenteen pääpiirteiden lujuuslaskenta. Varsinaiseen projektiin kuuluu myös useita muita kuljettimia, ja projektin suunnitteluosuudesta on rajattu pois esimerkiksi osa- ja kokoonpanokuvat.

Projektissa suunniteltava ketjukuljetin on Lapualla toimivan Ma-Tech-nimisen kuljetinvalmistajan myymä tuote. Koska tarkoitukseen sopivaa kuljetintyyppiä ei löydy yrityksen vakiomalleista, kuljettimen suunnittelussa ei voida käyttää olemassa olevia tuotteita tai niiden rakenteita hyödyksi. Ketjukuljettimen suunnittelussa täytyi ottaa huomioon kuljettimelta vaadittu suhteellisen korkea kantavuus sekä useat asiakkaan vaatimat tehdasstandardit. Tehdasstandardeista johtuen tässä työssä jouduttiin tekemään useita normaalista käytännöstä poikkeavia ratkaisuja.

Koska aikaisemmin käytettyjä tuoterakenteita ei voitu hyödyntää ja tehdasstandardeista johtuen jouduttiin käyttämään tuotteita, joita ei ollut aikaisemmin yrityksen historiassa käytetty, jokainen yksityiskohta täytyi käydä läpi. Suurien rakenteellisten virheiden välttämiseksi rungon keskeisiä osia analysoitiin lujuuslaskennan sekä FEM-mallinnuksen avulla.

Suunnitteluohjelmiana käytetään Solidworks 2016 Professional -suunnitteluohjelmaa ja FEM-laskennassa Solidworks Simulation -ohjelmistoa. Ilman FEM-mallinnusta lasketuissa laskuissa on käytetty MathCad 3.1 -ohjelmistoa.

Avainsanat: mekaniikka, suunnittelu, laskentamenetelmät

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## **Thesis abstract**

Faculty: School of Technology

Degree programme: Mechanical Engineering

Specialisation: Mechanical and Production Engineering

Author: Antti Ala-Luhtala

Title of thesis: Mechanical designing of a chain conveyor

Supervisor: Heikki Kokkonen

Year: 2017      Number of pages: 30      Number of appendices: 0

---

The thesis studied the process of the design and strength calculations of a chain conveyor. The conveyor was a part of a customer-oriented project. The thesis was restricted to contain only 3D-modeling and structural calculations of the most crucial parts and components in the conveyors. The main project contains multiple other conveyors, whereas subjects like drawings of parts and assemblies were left out of the thesis.

The chain conveyor to be designed in the project is a product sold by a conveyor manufacturer called Ma-Tech, which resides in Lapua. Because no similar type of conveyor can be found in the company's standard products, existing products or their structures could not be used in this project. In the design, high carrying capacity required by the conveyor had to be taken into account, as well as several of the customer's factory standards. Because of the factory standards, this work had to use several solutions that differed from standard company practice.

Because the previously used product structures could not be utilized and because of the need to use products previously unknown to the company, every detail had to be examined carefully. In order to avoid major structural flaws, the main structure of the conveyor was analyzed using yield strength calculations and FEM-modeling.

The program used for designing was Solidworks 2016 Professional, and Solid-works Simulation was used for FEM-modeling. Calculations done without FEM were done with MathCad 3.1.

Keywords: mechanics, designing, methods of calculating

## SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	1
Thesis abstract.....	2
SISÄLTÖ.....	3
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluettelo.....	4
Käytetyt termit ja lyhenteet .....	5
1 YRITYS .....	6
2 TYÖN TAUSTA.....	7
3 KULJETTIMEN SUUNNITTELU .....	8
3.1 Suunnittelun määritteet .....	8
3.2 Kuljettimelta vaadittavat toiminnot ja osat .....	9
3.3 Valmistustekniset vaatimukset .....	10
3.4 Aikataulu .....	11
4 KONETURVALLISUUS .....	12
5 KETJUKULJETTIMEN VAATIMA LUJUUSLASKENTA .....	14
5.1 Moottori .....	14
5.2 Rungon nurjahdus .....	15
6 OSTO-OSAT .....	17
7 RUNGON RAKENNE .....	20
8 MUUT KOMPONENTIT.....	24
8.1 Ketjunkiristimet .....	24
8.2 Jalat .....	25
8.3 Momenttituki .....	26
8.4 Ketjupyörä .....	26
9 PÄÄKOKOONPANO .....	28
10 YHTEENVETO JA OMAT POHDINNAT .....	29
LÄHTEET.....	30

## Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

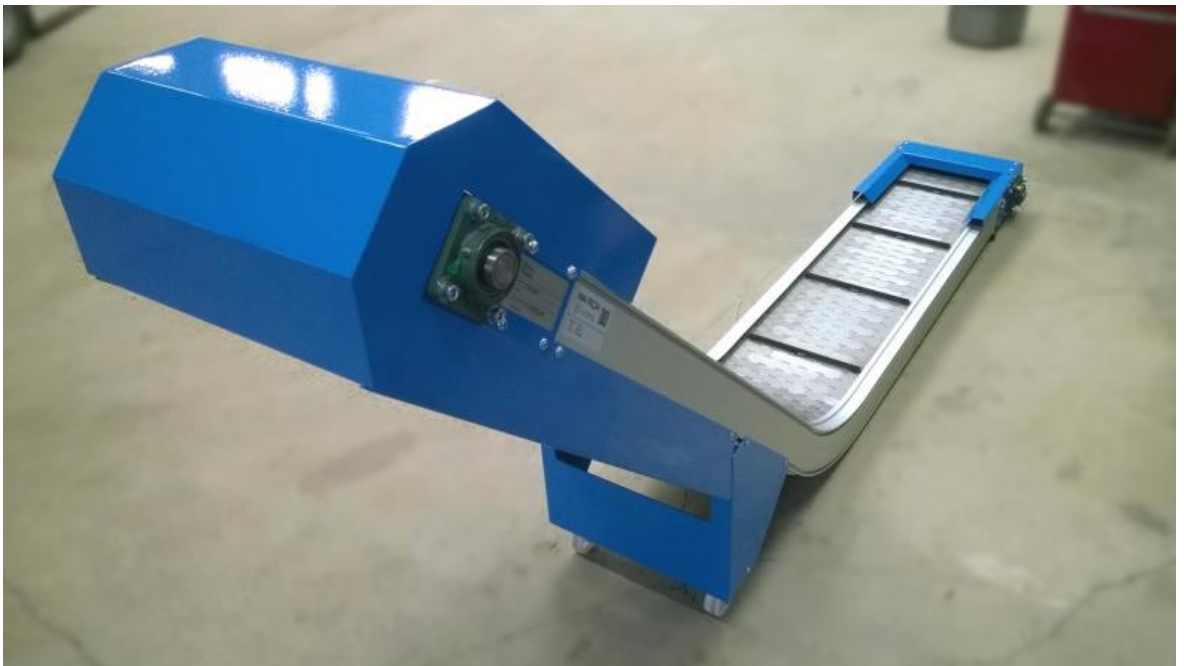
Kuvio 1. Vakiomallinen kuljetin. (Ma-Tech Oy, [viitattu 18.9.2017].) .....	6
Kuvio 2. Maker-10-sarjan lastunkuljetin. (Ma-Tech Oy, [viitattu 18.9.2017].) .....	7
Kuvio 3. Pinontatrukin piikit sovitettuna runkojen väliin. ....	9
Kuvio 4. Mathcad-ohjelmalla tarkistettu vaihdemoottorilta vaadittava vääntömomentti. ....	18
Kuvio 5. Runkolevy sekä rungon pääty pala. ....	21
Kuvio 6. Mathcad-ohjelmalla tarkastettu nurjahdusvoima. ....	23
Kuvio 7. Ketjunkturistimen toimintaperiaate. ....	24
Kuvio 8. Kuljettimen jalka. ....	25
Kuvio 9. Momenttituen FEM-analyysi. ....	26
Kuvio 10. Kuljettimen lopullinen 3D-malli. ....	28

## Käytetyt termit ja lyhenteet

<b>FEM</b>	Finite Element Method. Laskentamalli, jolla voidaan ratkaista esimerkiksi teräsrakenteisiin kohdistuvia voimia ja niiden vaikutuksia.
<b>SolidWorks</b>	Tuoteperhe, jonka on kehittänyt Ranskassa sijaitseva Dassault Systèmes. Tuoteperheeseen kuuluu muun muassa suunnittelu- sekä lujuuslaskentaohjelmia.
<b>MathCad</b>	Nykyisin PTC:n omistama, lähinnä numeeriseen laskentaan tarkoitettu ohjelma.
<b>Nurjahdus</b>	Rakenteen pettämisen muoto. Nurjahduksessa rakenteessa tapahtuu suuri siirtymä, vaikka materiaalin myötöraja ei ylity.
<b>Runko</b>	Kuljettimen kantava osa, joka on suunniteltu kestämään kuorman aiheuttama rasitus. Runko käytetään myös eräänlaisena kiinnitysalustana muille komponenteille.

# 1 YRITYS

Tämä opinnäytetyö tehtiin Ma-Tech-nimiselle mittatilauskuljettimia valmistavalle yritykselle. Ma-Tech on vuonna 2008 perustettu yritys, jonka toiminta perustuu ketterään, nopeaan ja kustannustehokkaaseen asiakkaiden ongelmien ratkaisuun. Ma-Techin pääasiallisia tuotteita ovat kuljettimet, niin mittatilaustyönä tehdyt, kuin myös muutamat muut vakiomallit. Laajin vakiotuotteiden mallisto pitää sisällään esimerkiksi kuviossa 1 olevan PrimaPowerin levytyöstökoneen metallilamellimattaisen kappalekuljettimen.



Kuvio 1. Vakiomallinen kuljetin. (Ma-Tech Oy, [viitattu 18.9.2017].)

Ma-Tech tekee myös asiakkaan tarpeisiin soveltuvia tuotannonkehitykseen liittyviä tuotteita, kuten kokoonpanoa helpottavia nostopöytiä ja erinäisiä linjastokomponentteja. Ma-Tech voi toimittaa asiakkaalle myös kokonaisia linjastoja, mutta näissä tapauksissa esimerkiksi robottisolujen suunnittelu ja käyttöönotto ostetaan ulkopuolelta. (Ma-Tech Oy, [viitattu 18.9.2017].)

## 2 TYÖNTAUSTA

Työ on projektiluontoinen asiakastyö. Asiakkaan kanssa sovittiin reunaehdot, joiden pohjalta projektia lähdettiin suunnittelemaan. Reunaehtoja olivat esimerkiksi kuljettimien korkeudet ja pituudet sekä kuljetettavat materiaalit. Asiakkaalla oli myös tiettyjä tehdasstandardeja, joita täytyi noudattaa.

Projektiin kuului tässä opinnäytetyössä käsiteltävän raskaan ketjukuljettimen lisäksi lyhempi, mutta muuten samanlainen ketjukuljetin, Maker-10-tuoteperheen lastunkuljetin sekä kevyempi ketjukuljetin. Lastunkuljetinta (Kuvio 2) lukuun ottamatta muut kuljettimet ovat täysin mittatilaustyönä tehtäviä.



Kuvio 2. Maker-10-sarjan lastunkuljetin. (Ma-Tech Oy, [viitattu 18.9.2017].)

Projektissa varauduttiin myös siihen, että kuljettimeen tulee muutoksia vielä projektin loppuvaiheessa, kun asiakas on saanut ensimmäiset mallit. Muutettavia asioita saattavat olla esimerkiksi kuljettimen kokonaisleveys, tai kuljetin täytyy mahdollisesti voida purkaa asennuksen tai kuljetuksen helpottamiseksi. Suunnittelu tulee siis tehdä myös niin, että mallia on helppo muuttaa jälkikäteen.



### 3 KULJETTIMEN SUUNNITTELU

Ennen osien ja kokoonpanon mallinnuksen aloittamista käytiin asiakkaan kanssa läpi kuljettimen vaatimukset, rakenne ja toiminnan kannalta keskeiset osat. Hyvällä pohjatyöllä voidaan välttää esimerkiksi osto-osien saatavuudesta tai toimitusajoista johtuvat ongelmat.

Ilman hyvää pohjatyötä voi suunnittelun eri vaiheissa tulla ilmi rakenteellisia, toiminnallisia tai vaikeasti toteutettavia seikkoja, jotka saattavat pahimmillaan aiheuttaa isojenkin rakenteiden uudelleensuunnittelua. Pohjatyön yhteydessä on myös hyvä varmistaa, että kaikki asiakkaan vaatimukset ovat suunnittelun tiedossa ennen työn aloittamista.

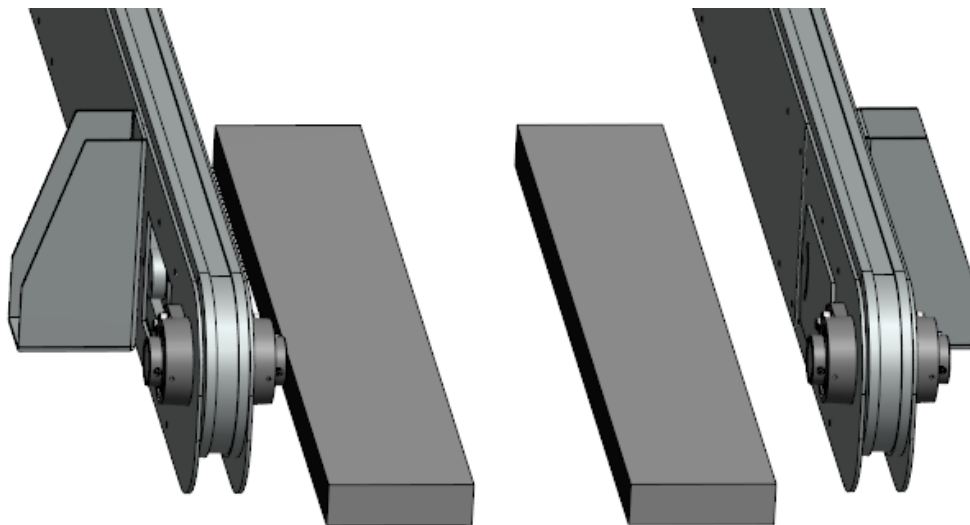
Yrityksessä on myös tapana lähettää asiakkaalle selkeät kuvat ja mallit kuljettimesta ennen sen saattamista tuotantoon. Näin toimien varmistetaan, että tuotantoon tuleva kuljetin täyttää asiakkaan toiveet, joita pyritään noudattamaan mahdollisimman hyvin. Joitakin yleisimpiä muutostoiveiden aiheita ovat laskennallisista seikoista riippumattomat, kuljettimen tukevuuteen liittyvät toiveet, kuten ainevahvuudet tai erilaisten tuentojen määrät ja sijainnit. Rakenteessa on siksi tärkeää ottaa huomioon laskennallisen tukevuuden lisäksi myös mielikuva tulevasta tuotteesta.

#### 3.1 Suunnittelun määritteet

Kuljetin suunniteltiin asiakkaan vaatimusten ympärille. Tässä projektissa merkittävä määrite oli asiakkaan vaatima SFS 2380 -standardin mukainen kuljetinketju. Kyseinen standardi pitää sisällään useita erilaisia ketjutyyppisiä, mutta kyseessä olevaan kuljettimeen riittää kevyin malli M80, jolla on 80 kN:n murtolujuus. Kun tiedetään, että kuljettimen päälle tulee tasainen alle 8000 kg:n massa, voidaan todeta, että ketjua voisi teoriassa käyttää taakan nostamiseen. Lisäksi yrityksessä olevan yleisen tavan mukaan ketjukuljettimet tehdään kahdella, toisistaan erillään olevalla ketjulla. Lujuuslaskennallisesti tämä tarkoittaa sitä, että voidaan huoletta luottaa ketjun kestoan tässä tarkoituksessa.

Toinen suunnittelun kannalta tärkeä asia oli asiakkaan toive moottorivalmistajista. Asiakkaan toiveiden mukaisesti vaihtoehtoina oli kolme valmistajaa, ABB, SEW ja Bauer. Moottorin lisävaatimuksena asiakkaalla oli standardin IEC 60034 mukainen hyötysuhdeluokka IE3.

Kolmas ja viimeinen työn kannalta merkittävä vaatimus oli se, että levyrippuja täytyi kyetä lastaamaan pinontatrukilla. Pinontatrukki on kevyt, lavojen nostamiseen ja siirtämiseen tarkoitettu kone. Rakenteessa täytyi siis huomioida esimerkiksi rungon sisäleveys niin, että pinontatrukilla voidaan nopeasti ja turvallisesti laskea levyripino kuljetinketjujen päälle. Pinontatrukin piikit on havainnollistettu kuviossa 3.



Kuvio 3. Pinontatrukin piikit sovitettuna runkojen väliin.

### 3.2 Kuljettimelta vaadittavat toiminnot ja osat

Ketjukuljetin on sinällään hyvin yksinkertainen tuote. Kuljettimen tehtävänä tässä tapauksessa on kuljettaa 700 kg painoinen levyripino kuljettimen toisesta päästä toiseen. Asiakkaan toiveena oli, että kuljettimen rakenne kestäisi yhtä aikaa vähintään 5 kpl kyseisiä levyripinoja, ja mikäli mahdollista 11 levyripinoä yhtäaikaaisesti.

Kuljettimen toiminnan kannalta tärkeitä kokonaisuuksia ovat voimansiirto, ketjun liukupinnat sekä ketjunkiristin. Voimansiirto pitää sisällään kaikki tarvittavat komponentit, joilla moottorin vääntövoima saadaan välitettyä ketjulle, eli yleisimmin moottorin momenttituki, vetävä akseli sekä vetorattaat.

Kuljetin pitää myös kiinnittää lattiaan tukevasti. Kuljetin ei saa painonkaan alla huojuja tai kaatua, ja rakenteessa täytyy ottaa huomioon mahdolliset väärinkäyttö- ja vahinkotilanteet, kuten törmäys kuljettimen runkoon esimerkiksi trukilla. Asiakkaan täytyy kyetä asentamaan kuljetin paikalleen, eikä asennus saa olla ammattitaidollisesti vaativa. Yrityksessä yleisesti käytetty kiinnitystapa on esimerkiksi betonilattiaan porattavat ja kiinnitettävät ankkuriruuvit.

Suunnittelussa täytyy ennakoida ketjun venyminen ja sitä kautta se, että asiakkaan täytyy kyetä helposti kiristämään ketjua. Arviona on, että ketjua täytyy kiristää korkeintaan esimerkiksi normaalin vuosihuollon yhteydessä, joten kiristyksessä ei tarvitse miettiä kiristämiseen kulunutta aikaa tai vaadittavia työkaluja. Hyvänä tapana kuitenkin on, että kuljettimen käyttäjä tai huoltohenkilö osaa kiristää ketjun ilman erillistä koulutusta tai aikaisempaa kokemusta ketjukuljettimista.

Lisäksi kuljettimen kuluvat osat täytyy kyetä vaihtamaan suhteellisen helposti. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kuluvat osat ovat helposti irrotettavissa kuljettimen muusta rungosta, eivätkä kuluviin osien hankintakustannukset saa nousta kovin korkeaksi. Tärkeimmät kuljettimen kuluvat osat ovat ketju, ketjupyörät sekä ketjun liukupinnat. Myös moottorin mahdollinen hajoaminen ja vaihtaminen on hyvä ottaa huomioon ketjun kiinnityksessä. Suunnittelussa tämä tarkoittaa sitä, että asiakas kykenisi ilman erillistä koulutusta vaihtamaan kaikki edellä mainitut osat.

### **3.3 Valmistustekniset vaatimukset**

Kuljettimen suunnittelussa täytyy ottaa huomioon valmistukseen varatut resurssit. Lähtökohtana yrityksessä on käyttää pääasiassa itse suunniteltuja ja alihankkijalla teetettyjä levyosia. Yrityksessä tehdään itse kokoonpano sekä kappalemäärällisesti pienet hitsaustyöt. Levyosissa tulee huomioida yleinen levykoko 3 m x 1,5 m. Ää-

rimitoiltaan suurempiakin levyosia voidaan käyttää, mutta osien valmistuskustannusten kilpailuttamisen kannalta on järkevää käyttää mahdollisimman yleistä levykokoa. Koska kyseessä on yksittäinen tuote, ei automatisointia tai sarjatuotannossa usein käytettyjä työmenetelmiä, kuten valamista tai robotisointia, tarvitse ottaa huomioon.

Koska kuljetin maalataan, täytyy suunnittelussa ottaa huomioon myös hyvä maalattavuus. Yrityksen vakiintuneilla pintakäsittely-alan alihankkijoilla kuivatusuunin pituudet ovat maksimissaan 6 m. Tämä tarkoittaa sitä, että hitsattavien ja maalattavien rakenteiden pituus ei saa ylittää kuutta metriä.

### **3.4 Aikataulu**

Kokonaisprojektille oli varattu suunnitteluresursseja 7 päivää. Tässä opinnäytetyössä käsiteltävälle kuljettimelle on kokonaisajasta varattu kolme päivää. Aikaa ei siis ole hukattavaksi, joten päätökset piti tehdä nopeasti eikä päätettyjä asioita saanut muuttaa turhaan. Tiukasta aikataulusta johtuen projektissa käytettiin paljon aikaisemmin kokeiltuja ja hyväksi todettuja, tuttuja menetelmiä sekä materiaaleja.

## 4 KONETURVALLISUUS

Tässä työssä käsiteltävä kuljetin tulee olla CE-hyväksytty. Suunnittelun kannalta tämä tarkoittaa sitä, että kuljettimen tulee täyttää tietyt koneturvallisuuden standardit.

Tästä johtuen suunnittelussa käytettiin apuna Suomen Standardisoimisliitto SFS Oy:n julkaisemia käsikirjaa 29-1, joka käsittelee massa- ja kappaletavarakuljettimien turvallisuutta, sekä käsikirjaa 29-2, joka käsittelee kuljettimien komponentteja, kuljetushihnoja, kuljetinketjuja sekä ketjupyöriä. Nämä käsikirjat ovat tarkoitettu erityisesti kuljettimien suunnittelijoille ja valmistajille (SFS-Käsikirja 29-1 2008, 3.)

Käsikirjoissa on esimerkkejä ja neuvoja turvalliseen ja toimivaan koneensuunnitteluun. Käsikirjat ovat kopiosuojattuja ja niiden osittainenkin julkaiseminen tai kopiointi on sallittua vain SFS:n luvalla. Tästä johtuen käsikirjan antamia ohjeita ei käydy tässä työssä yksityiskohtaisesti läpi.

Kun koneeseen liittyvät riskit ja vaaratekijät mietitään ja tiedostetaan ennen suunnittelun aloitusta, voidaan niihin varautua ja ne voidaan ottaa huomioon heti suunnittelun alkuvaiheesta alkaen.

Tässä työssä ennalta tiedostettuja riskejä olivat

- ketjun aiheuttama sormien puristumis- ja viiltovaara
- ketjupyörien aiheuttama nielu ketjupyörän ja lattian välillä
- huollon aikana mahdollisesti aiheutuvat vaaratilanteet.

Kun riskit oli tiedostettu, lähdettiin etsimään kyseisiä vaaratilanteita koskevia turvallisuusstandardeja. Puristumisvaara on tilanne, jossa kaksi liikkuvaa osaa liikkuu toisiaan kohti tai liikkuva osa liikkuu kiinteää osaa kohti (SFS-EN 349, kohta 3.)

Pienin standardin käsittelemä turvaetäisyys on sormen puristumisvaara. Standardin mukaan sormen puristumisen välttämiseksi täytyy huolehtia siitä, että puristumiskohdan vähimmäisetäisyys on 25 millimetriä (SFS-EN 349, taulukko 1). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että mikäli kuljettimeen tulee puristumista aiheuttavia komponentteja, ei puristava pinta saa mennä 25 millimetriä lähemmäksi kiinteää pintaa.

Toinen viilto- ja puristumisvaaraan liittyvä tekijä oli raajojen, erityisesti sormien, ulottuminen erilaisista aukoista vaaravyöhykkeelle. Näitä tilanteita käsittelee standardi SFS-EN ISO 13857.

Tässäkin standardissa pienin turvaetäisyys oli määritetty sormelle:

- Sormen päälle aukon koko tulee olla pienempi kuin 4 millimetriä.
- Koko sormelle aukon koko tulee olla pienempi kuin 6 millimetriä.
- Kädelle, ilman käsivartta, aukon koko tulee olla pienempi kuin 20 millimetriä.

(SFS-EN ISO 13857, taulukko 4)

Laitetta ei välttämättä saada täysin turvalliseksi. Esimerkiksi tahallista, itselleen aiheutettua vahinkoa on lähes mahdoton välttää. Tärkeää on kuitenkin miettiä, kuinka todennäköisesti jokin vahinko tapahtuu. Esimerkiksi tähän kyseiseen kuljettimeen ei huoltoa lukuunottamatta tarvitse koskea käsin.

Tärkeää on kuitenkin huolehtia, ettei kuljettimen lähistöllä liikkuva henkilö voi vahingossa vahingoittaa itseään. Tällaisen tilanteen voisi aiheuttaa esimerkiksi ketjupyörän ja lattian välinen nielu. Suunnittelussa täytyy siis huolehtia siitä, että joko nielua ei synny, tai vetopyörän ulkokehän ja kiinteän pinnan väliin jää korkeintaan 5 millimetriä (SFS-EN 619, kuva D.7.)

## 5 KETJUKULJETTIMEN VAATIMALUJUUSLASKENTA

Kuljettimelta vaaditun lujan runkorakenteen ansiosta kuljettimen rungon keskeisten osien lujuutta on syytä tarkastella lujuuslaskennan ja FEM-simuloinnin avulla. Tässä kappaleessa käsitellään lujuuslaskennassa käytetyt matemaattiset kaavat.

### 5.1 Moottori

Moottorin tärkein ominaisuus tässä projektissa on vääntömomentti. Vääntömomentilla tarkoitetaan moottorin akselille välittämää vääntövoimaa. Vääntömomentin tarpeeseen vaikuttavat tässä tapauksessa ketjun päällä oleva massa, ketjun ja liukupinnan välinen kitka sekä ketjupyörän halkaisija.

Moottorin vääntömomentin tarpeeseen vaikuttava ketjupyörän halkaisija lasketaan vipuvartena kaavalla

$$r = \frac{p \cdot n}{\pi} / 2, \quad (1)$$

missä

$p$	on ketjun nousu
$n$	on ketjupyörän hammasluku

Toinen vääntömomenttiin vaikuttava suure on liukupintojen välinen kitka, joka lasketaan kaavalla (Tammertekniikka 2012, 102)

$$F = m * g * \mu, \quad (2)$$

Missä

$m$	on ketjulla oleva massa
$g$	on painovoima
$\mu$	on liukupintojen välinen kitkakerroin

Vääntömomentti saadaan kaavasta (Tammertekniikka 2012, 93)

$$F_{Nm} = F * L, \quad (3)$$

missä

$F$  on ketjuun massan ja kitkakertoimen vaikutuksesta kohdistuva voima

$L$  on voiman varsi

## 5.2 Rungon nurjahdus

Kuljettimen rungon nurjahdus on tärkein lujuuslaskennan kohde sekä ensimmäinen asia, joka kuljettimen rakenteesta mahdollisesti peittää kuorman alla. Siitä syystä kuljettimen rungon laskentaan täytyy kiinnittää erityistä huomiota, ja tehdä laskenta huolellisesti. Nurjahduksen laskennassa käytetään Eulerin kaavaa (5) .

Ensimmäinen vaihe nurjahduksen laskennassa on jäyhyysmomentin laskenta, joka tapahtuu kaavalla (Tammertekniikka 2012, 144)

$$I = \frac{h*b^2}{12}, \quad (4)$$

missä

$h$  on mitattavan kohdan poikkileikkauksen pituus

$b$  on mitattavan kohdan poikkileikkauksen leveys

Seuraavaksi lasketaan runkoon kohdistuva nurjahdusvoima, jonka runko kestää. Nurjahdusvoima lasketaan molemmista päistä tuetun kappaleen nurjahduksen kaavalla (Tammertekniikka 2012, 142)

$$F_n = \frac{\pi^2 * E * I}{l_n^2}, \quad (5)$$

missä

$E$  on kimmokerroin

$I$  on jäyhyysmomentti

$l_n$  on nurjahduspituus



Laskennan aikana täytyy myös tarkistaa, että Eulerin kaavaa voidaan käyttää. Se tehdään laskemalla hoikkuusluku, ja varmistamalla, että se on suurempi kuin tässä tapauksessa teräkselle annettu vakioarvo 85. Laskenta aloitetaan laskemalla jäyhyysäde kaavalla (Lähteenmäki 2012, 5)

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}, \quad (6)$$

missä

$I$  on jäyhyysmomentti  
 $A$  on pinta-ala

seuraavaksi voidaan laskea hoikkuusluku kaavalla (Lähteenmäki 2012, 5)

$$\Lambda = \frac{l_n}{i}, \quad (7)$$

missä

$l_n$  on nurjahduspituus  
 $i$  on jäyhyysäde

Tarvittava moottorin toisionopeus saadaan jakamalla haluttu kuljetusnopeus ketjupyörän kehän mitalla. Ketjupyörän kehämitta saadaan kertomalla ketjunpyörän halkaisija piillä. Toisionopeus lasketaan kaavalla

$$n = \frac{v}{D * \pi} \quad (8)$$

missä

$V$  on haluttu kuljetusnopeus  
 $D$  on ketjupyörän halkaisija

## 6 OSTO-OSAT

Toimittajilta valmiina ostettavat osat, kuten tässä työssä esimerkiksi moottori ja ketjut, rajoittavat useiden komponenttien geometriaa. Tässä työssä suunnittelu aloitettiin mallintamalla edellä mainitut valmistajilta suoraan tilattavat tuotteet. Suunnitelmalla kuljetin näiden osien ympärille varmistutaan siitä, että osien yhteensovittamisesta myöhemmässä vaiheessa ei aiheudu ylimääräistä työtä, vaan kuljetin on koko ajan yhteensopiva ostettavien osien kanssa.

Ketjun mittojen määrittely oli helppoa, sillä kyseessä oli standardin mukainen tuote, jonka mitat oli mahdollista saada useidenkin eri valmistajien sivuilta. Ketjua ei lähdetty mallintamaan yksityiskohtaisesti, sillä yksityiskohtainen malli tekee kuljettimen 3D-mallista tarpeettoman raskaan. Tässä työssä ketju mallinnettiin vain tilanvaraus-tyyppisesti, jolla pystyttiin varmistamaan ketjun sopivuus muuhun runkoon jo aikaisessa vaiheessa.

Vaihdemoottorin valinta oli hieman työläämpi. Moottoritoimittajille täytyy antaa riittävät lähtötiedot, että he kykenevät antamaan tarjouksen tarpeisiin sopivasta vaihdemoottorista. Tärkeimmät lähtötiedot ovat moottorin toisionopeus, vaadittava vääntömomentti sekä vaihdemoottorin kiinnitysasento ja -tapa. Vaihdemoottorin valinta oli siis aloitettava laskemalla vaadittu toisionopeus sekä vääntömomentin tarve.

Lähtöarvoina käytettiin asiakkaan vaatimaa 200-300 mm kuljettimen korkeutta, sekä haluttua kuljetusnopeutta 2 m/min. Ketjupyöräksi valittiin 8-hampainen ketjupyörä. Kun ketjun nousu on 80 mm, ketjupyörän halkaisija on noin 200 millimetriä. Tavoitteena oli, että ketjupyörä ketjuineen ja tukirakenteineen saataisiin mahtumaan asiakkaan haluamaan alle 300 mm runkokorkeuteen.

Moottorin vääntömomentin tarve täytyy laskea, eikä moottorin valintaa voi suorittaa ilman vahvaa tietopohjaa. Moottorin vääntömomentin laskenta aloitetaan laskemalla vääntövarren pituus, joka lasketaan kaavalla (1). Tarvittava vääntövarren pituus

$$r = \frac{\frac{80 \text{ mm} \cdot 8}{\pi}}{2} = 0,204 \text{ m}.$$

Kun voiman varsi on laskettu, voidaan laskea toinen vääntömomentin laskentaan tarvittava suure, eli ketjuun kohdistuva voima kaavalla (2). Kitkakertoimena on käytetty kahden öljytyn teräspinnan välistä kitkakerrointa.

$$F = 11000 \text{ kg} * \frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2} * 0.1 = 10.787 \text{ kN}$$

Viimeinen vaihe on laskea varsinainen vääntömomentti kaavalla (3). Tarvittava vääntömomentti

$$F_{Nm} = 10.787 \text{ kN} * 0.204 \text{ m} = 1100 \text{ Nm}$$

Moottorin valintaa varten täytyy laskea myös moottorin toisionopeus kaavalla (8).

$$n = \frac{0.033 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.204 \text{ m} * \pi} = 3.13 \frac{1}{\text{min}}$$

LÄHTÖARVOT	
Ketjupyörän halkaisija	Ketjulla oleva massa
$D = \frac{(80 \text{ mm} \cdot 8)}{\pi} = 0.204 \text{ m}$	$m = 11000 \text{ kg}$
Arvioitu kitkakerroin	Painovoima
$\mu = 0.1$	$g = 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Kuljetusnopeus	
$V = 2 \frac{\text{m}}{\text{min}} = 0.033 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	
VÄÄNTÖMOMENTIN LASKENTA	
Voiman varsi	Ketjuun kohdistuva voima
$L = \frac{D}{2} = 0.102 \text{ m}$	$F = m \cdot g \cdot \mu = 10.787 \text{ kN}$
Moottorilta vaadittava vääntö	
$F_{Nm} = F \cdot L = 1098.787 \text{ N} \cdot \text{m}$	
TOISIONOPEUDEN LASKENTA	
Toisionopeus	
$n = \frac{V}{D \cdot \pi} = 3.125 \frac{1}{\text{min}}$	

Kuvio 4. Mathcad-ohjelmalla tarkistettu vaihde-moottorilta vaadittava vääntömomentti.

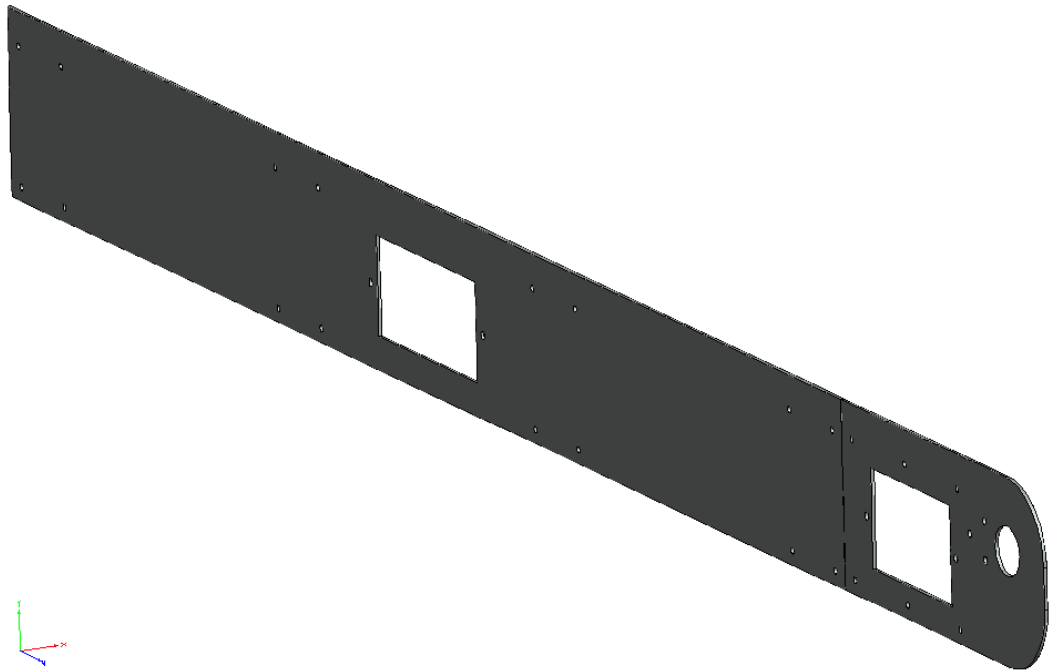
Kuviossa 4 tehdyissä laskutoimituksissa käytettiin kaavoja (1), (2) ja (3). Laskettujen arvojen perusteella moottoritoimittajille annetut vaatimukset olivat vähintään 1100 Nm vääntöä. Lujuuslaskennan ulkopuolisena arvona toisionopeus piti olla vähintään 3,5 kierrosta minuutissa. Lisäksi vaihteen ja moottorin valinnassa tulisi kiinnittää huomiota siihen, että kuljetin pysähtyy ja lähtee liikkeelle toistuvasti suuren taakan vaikutuksen alla. Kiinnitystavaksi haluttiin yrityksessä paljon käytetty kulmavaihde-moottori.

## 7 RUNGON RAKENNE

Kuljettimen rungon rakenne on suunnittelun näkökulmasta kuljettimen merkittävin osa. Hyvällä rungon suunnittelulla saadaan kokoonpanosta nopeaa, ja materiaalissa voidaan säästää merkittäviäkin määriä. Vastaavasti huono suunnittelutyö saattaa aiheuttaa merkittäviä vaikeuksia kokoonpanossa, ja huonoimmassa tapauksessa suunnittelu voidaan joutua aloittamaan kokonaan alusta.

Rungon rakenteen suunnittelussa edettiin eräänlaisen hierarkian mukaisesti. Tärkeintä oli, että asiakkaan mielikuva kuljettimen rakenteesta oli hyvä. Asiakas voi kohtuuden rajoissa päättää rungon rakenteesta, ja laskennallisesti kestävää runkoa voidaan joutua asiakkaan toiveesta vahvistamaan. Tästä johtuen onkin järkevää tehdä ensisijaisesti mielikuvallisesti tukeva runko, ja vasta sen jälkeen tarkistaa, että runko on laskennallisesti kestävä ja toimii käytännössä. Kolmanneksi tärkein seikka on mahdollisimman edullinen hinta, ja neljänneksi tärkein on hyvä valmistettavuus.

Runko päätettiin rakentaa siten, että kummallakin sivulla on 5 millimetrin vahvuinen levy, johon on leikattu valmiiksi läpimeno- ja kiinnitysreiät akseleille ja tarvittaville komponenteille. Sivuilla menevät levyt tehdään kahdesta päätyalasta sekä kolmesta keskialasta. Näin tehtynä jokainen osa on alle 3 metriä pitkä, joten ne voidaan tehdä yleisimmästä levykoosta 3 m x 1,5 m. Runkolevyjen välillä menee kaksi 60x40x4 putkipalkkia, jotka kasvattavat rungon kuormansietokykyä sekä muodostavat runkolevyjen kanssa rungon perusrakenteen. Runkolevyt ja putkipalkit kiinnitetään toisiinsa pulteilla, sillä rakenne on hankala hitsata ja pulttikiinnityksellä saadaan rungon rakenteesta tehtyä sellainen, että näkyvät osat saadaan maalattua normaalissa noin 6 metriä pitkässä uunissa. Runkolevyihin tehdään myös aukot, joihin saadaan helposti asennettavat ketjunkiristimet. Runkolevyjä on kuvattu kuviossa 5.



Kuvio 5. Runkolevy sekä rungon päätypala.

Toisin kuin runkolevyt, putkipalkki on koko kuljettimen mittainen, sillä putkipalkki liittää runkolevyn osat yhteen. Putkipalkki ei jää näkyviin, joten se voidaan jättää maalamatta, eikä pituus täten ole ongelma. Putkipalkkiin kiinnitetään hitsaamalla kiilateräkset, jotka toimivat kuljetinketjun liukupintana sekä ohjaavat ketjua niin, ettei se hankaudu runkolevyn sisäpintaa vasten. Kuluvana osana kiilateräkset voidaan vaihtaa esimerkiksi poistamalla hitsaussaumot kulmaleikkurilla ja hitsaamalla uudet kiilateräkset vanhojen tilalle, tai vaihtoehtoisesti voidaan vaihtaa sekä putkipalkki että siihen hitsattu kiilateräs.

Koska käytettyyn suunnitteluohjelmaan sisällytetty FEM-laskenta ei laske kappaleen nurjahdusta, rungolle tämä ominaisuus täytyy laskea käsin. Oman arvion mukaan nurjahdus on suurin mahdollinen syy rungon rakenteen pettämiseen. Nurjahduksen laskennassa ei oteta huomioon jalkojen tai muun rakenteen tuomaa tukevuutta, vaan ne jätetään varmuuskertoimeksi.

Nurjahduksen laskeminen kappaleelle on pitkäkö laskentaprosessi. Ajan säästämiseksi laskentaprosessia yksinkertaistetaan laskemalla nurjahdusvoima jokaiselle yksittäiselle runkolevyille. Kun kuljettimelta vaadittu kuormansietokyky on hieman alle 10 tonnia, ja runkolevyjä on yhteensä 12 kappaletta, voidaan laskennassa yhden runkokappaleen nurjahdusvoima laskea 850 kilogramman kuormalla. Näin saamme edelleen yksinkertaistettua ja nopeutettua laskentaprosessia.

Nurjahduksen laskenta aloitetaan laskemalla runkolevyn jäyhyysmomentti kaavalla (4), jonka mukaan

$$I = \frac{1800 \text{ mm} * 5 \text{ mm}^2}{12} = 18750 \text{ mm}^4.$$

Varsinaisen nurjahdusvoiman laskenta tapahtui kaavalla (5). Kaavassa nurjahduspituus on rungon maksimikorkeus jaettuna kahdella. Nurjahdusvoima on

$$F_n = \frac{\pi^2 * 210 \text{ GPa} * 18750 \text{ mm}^4}{\left(\frac{450 \text{ mm}}{2}\right)^2} = 768 \text{ kN}.$$

Kun nurjahdusvoima on saatu laskettua, täytyy laskea Eulerin kaavan mukainen hoikkuusluku ja varmistaa, että Eulerin kaavaa voidaan käyttää. Hoikkuusluvun kaava aloitetaan laskemalla jäyhyyssäde kaavalla (6), jonka mukaan jäyhyyssäde on

$$i = \sqrt{\frac{18750 \text{ mm}^4}{5 \text{ mm} * 1800 \text{ mm}}} = 1.443 \text{ mm}.$$

Hoikkuusluvuksi saadaan kaavan (7) mukaisesti

$$\lambda = \frac{\frac{450 \text{ mm}}{2}}{1.443 \text{ mm}} = 155.85.$$

Laskennan jälkeen voidaan todeta, että hoikkuusluku on suurempi kuin teräkselle annettu arvo 85. Voidaan siis todeta että Eulerin kaavaa voidaan käyttää.

**NURJAHDUKSEN LASKENTA**

LÄHTÖARVOT:

$$b = 5 \text{ mm} \quad h = 1800 \text{ mm} \quad l = 450 \text{ mm}$$

$$E = 210 \text{ GPa} \quad A = b \cdot h = (9 \cdot 10^3) \text{ mm}^2 \quad \lambda_{\min} = 85$$

$$l_n = \frac{l}{2} = 225 \text{ mm}$$

JÄYHYYSMOMENTTI

$$I = \frac{h \cdot b^3}{12} = (1,875 \cdot 10^4) \text{ mm}^4$$

NURJAHDUSVOIMA

$$F_n = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_n^2} = (7,676 \cdot 10^5) \text{ N}$$

$$\frac{F_n}{g} = (7,828 \cdot 10^4) \text{ kg}$$

JÄYHYSSÄDE

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = 1,443 \text{ mm}$$

HOIKKUUSLUKU

$$\lambda = \frac{l_n}{i} = 155,885$$

KOSKA  $\lambda > \lambda_{\min}$  EULERIN KAAVAA VOIDAAN KÄYTTÄÄ

Kuvio 6. Mathcad-ohjelmalla tarkastettu nurjahdusvoima.

Kuvion 6 laskelmissa on käytetty laskukaavoja (4), (5), (6) ja (7). Laskettujen arvojen perusteella rungon rakenne kestää vaaditun kuorman, eikä nurjahduksen vaaraa ole. Laskettu maksiminurjahdusvoima  $F_n$  on noin 768 kN, joka vastaa 78,3 tonnin kuormankestoaa. Kun kesto vaatimus yhdellä runkoelementillä on 850 kiloa, voidaan todeta, ettei nurjahduksen vaaraa ole.

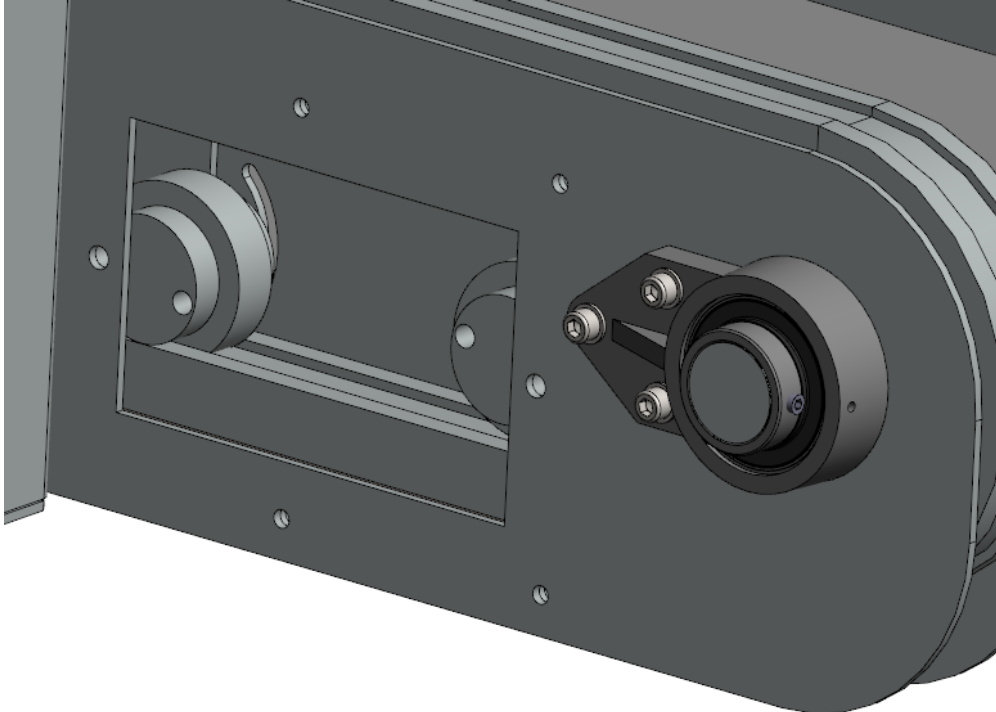


## 8 MUUT KOMPONENTIT

Varsinaisen rungon sekä toimittajilta tulevien osien lisäksi kuljettimeen tulee monia muita toiminnan kannalta keskeisiä osia. Usein nämä komponentit ovat sellaisia, joita on saatavissa myös valmiina osto-osina, mutta korkean hinnan takia on järkevämpää suunnitella vastaava systeemi itse.

### 8.1 Ketjunkiristimet

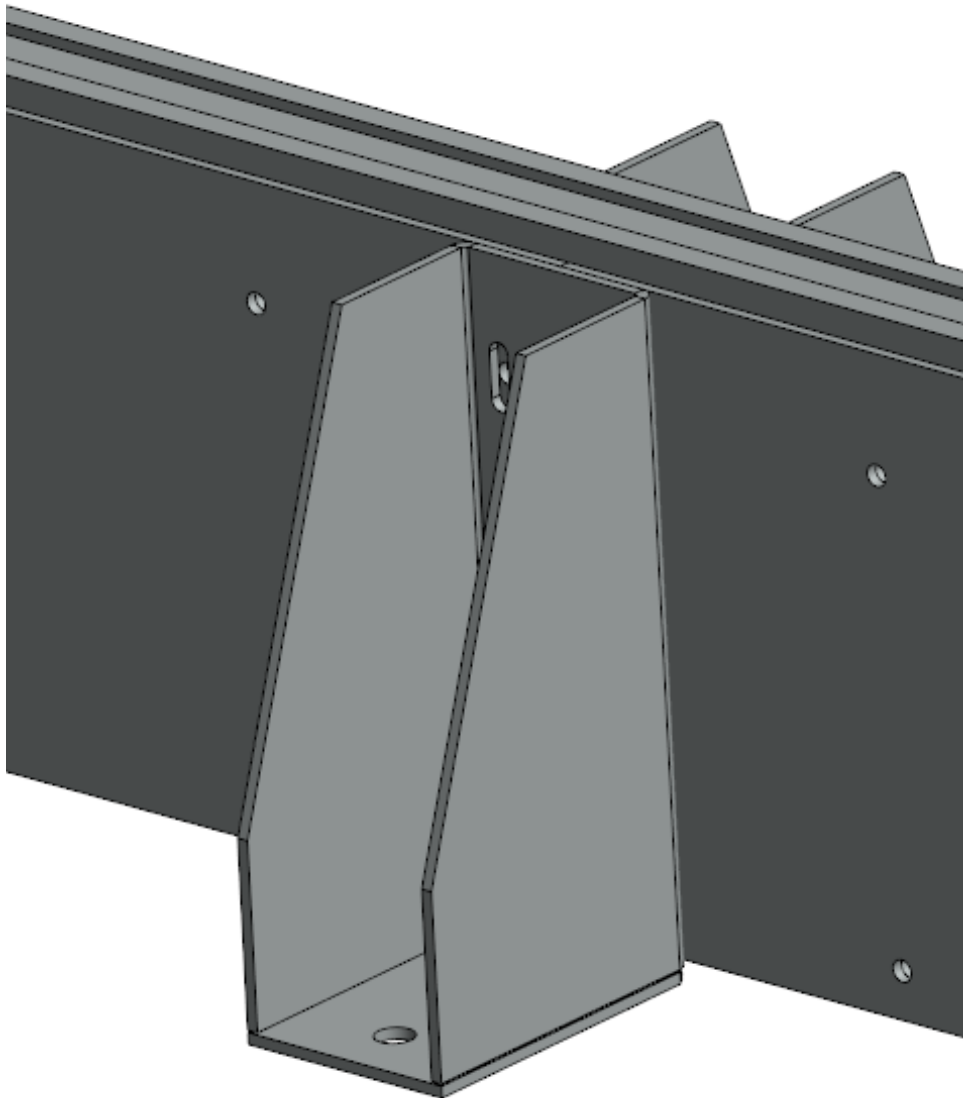
Ketjunkiristimet (kuvio 7) sijoitettiin runkolevyjen kyljissä oleviin aukkoihin. Ketjunkiristimet itsessään koostuvat kahdesta levystä sekä kolmesta holkista. Holkit ovat yksinkertaisia akseleita, joiden läpi menee reikä, joka on ulkokehän kanssa erikeskeinen. Niinpä holkkia pyöryttämällä saadaan kasvatettua ketjun kulkemaa matkaa ja näin kiristettyä ketjua. Holkkien kiinnityspultit menevät koko rungon läpi. Läpipulteilla saadaan estettyä runkolevyjen taipuminen sisään- tai ulospäin, mikä estää rungon nurjahduksen.



Kuvio 7. Ketjunkiristimen toimintaperiaate.

## 8.2 Jalat

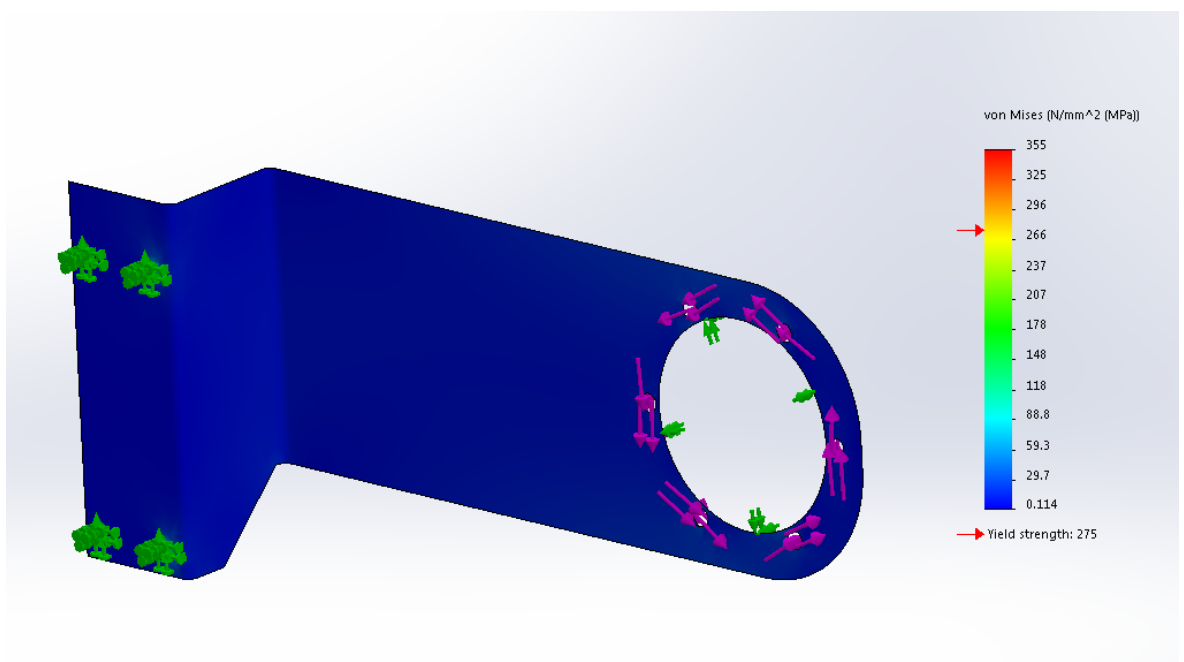
Kuljettimen rungon pohja on teoriassa lattiaa vasten, joten jalkojen tehtävä on tukea runkoa ja toimia kuljettimen ja lattian välisinä kiinnityspisteinä. Jalat laitetaan runkolevyjen sauman kohtaan, jolloin jalka peittää näkyvistä epämiellyttävän näköisen levyjen päittäissauman. Tähän sijoitettuna jalka myös vahvistaa levyjen liitoskohtaa ja jäykistää runkoa. Kuviossa 8 näkyy jalan paikka kahden runkolevyn sauman kohdalla.



Kuvio 8. Kuljettimen jalka.

### 8.3 Momenttituki

Momenttituen tehtävä on toimia vaihdemoottorin runkoon kiinnittävänä elementtinä. Momenttituki vaatii myös erityisen tarkkaa lujuuslaskennallista tarkastelua, sillä siihen kohdistuu usein odottamattoman suuria voimia, ja momenttituen rakenne saattaa helposti lähteä repeytymään esimerkiksi reikien kohdista tai terävistä nurkista. Momenttituessa tulee myös kiinnittää erityistä huomiota taipumaan, sillä momenttituen ja sitä kautta moottorin heilahtelu liikkeellelähdön ja pysäytysten yhteydessä ei anna asiakkaalle hyvää mielikuvaa kuljettimen tukevuudesta.



Kuvio 9. Momenttituen FEM-analyysi.

Kuviossa 9 olevasta momenttituen FEM-analysistä näkyy momenttitukeen kohdistuvat rasitukset, sinisen ollessa käytännössä olematon rasitus ja punaisen ollessa materiaalin myötöraja 355 MPa. Kuten kuvion 9 värityksestä näkee, momenttituki kestää rasituksen hyvin. Momenttituen pitkänomainen rakenne toimii vipuvartena, ja siksi momenttituen rungon jännitykset ovat pieniä.

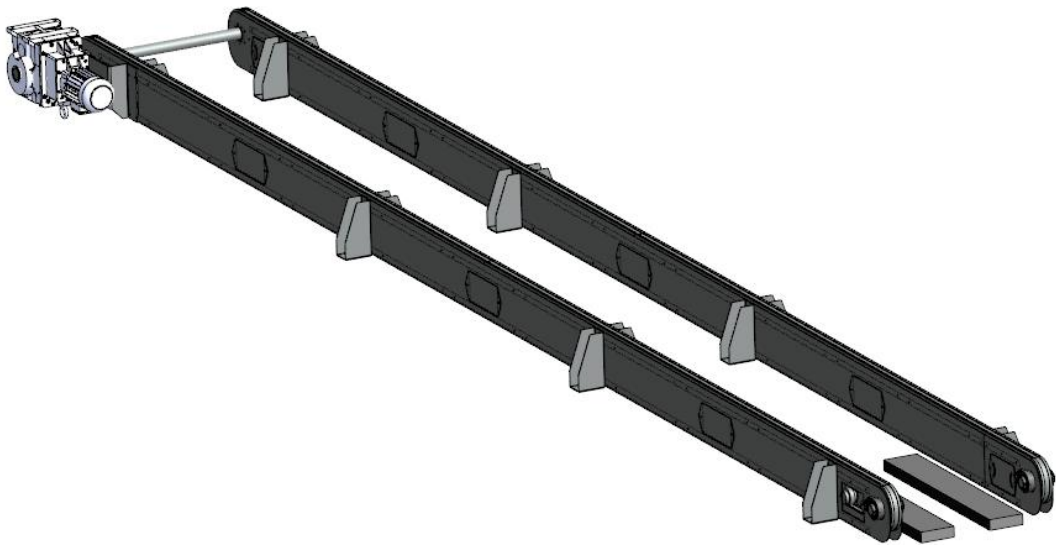
### 8.4 Ketjupyörä

Huolimatta siitä, että ketjupyörä olisi ollut mahdollista tilata valmiina komponenttina, se päätettiin tehdä itse. Näin saatiin kuljettimen muuhun rakenteeseen sopiva pyörä.

Ketjupyörä koostui leikkeestä, joka oli varsinainen ketjupyörän runko, sekä kahdesta koneistetusta holkista, joilla saatiin tarkka sovite sekä kiilaurat akselille. Ketjupyörän leveys mitoitettiin sijoittamalla holkkien ja rungon väliin PTFE-liukualuslevyt. Näin saatiin runkolevyjen väliin tiiviisti istuva sovite. Liukualuslevyjen ansiosta holkit eivät hanganneet runkolevyjen sisäpintaa eikä rattaita varten tarvittu varsinaisia pidätinruuveja.

## 9 PÄÄKOKOONPANO

Komponenttien viimeinen yhteensovittaminen mallinnettiin pääkokoönpanossa. Samalla luotiin myös geometriat, jotka olivat tarpeettoman hankalia mitoittaa irrallaan muusta kokoönpanosta. Tällaisia geometrioita olivat esimerkiksi laakeripesien kiinnitysreiät. Pääkokoönpanossa lisättiin myös ahtaisiin paikkoihin pultit ja mutterit. Näin voitiin tarkistaa, että ne sopivat varmasti paikalleen eikä asennuksessa tule sen suhteen ongelmia.



Kuvio 10. Kuljettimen lopullinen 3D-malli.

Kuviossa 10 on mallinnettu kuljetin kokonaisuudessaan. Kaikkia kiinnitysosia ei mallinnettu paikalleen, sillä se on työlästä ja tekee 3D-mallista tarpeettoman raskaan. Kaikkien kiinnitysosien mallintaminen ei myöskään tuo suunnitteluun tai kokoönpanoon lisäarvoa, sillä rungot kootaan Ma-Techin ruuvistandardien mukaisesti.

## 10 YHTEENVETO JA OMAT POHDINNAT

Kuljettimen suunnittelun aloitus ja lopetus tapahtuivat ajallaan. Kuljettimen rakenne käytiin asiakkaan kanssa läpi ennen osien tilausta ja kokoonpanon aloitusta. Asiakkaan kanssa varmistettiin, että kuljetin vastaa haluttua tuotetta, ja tehtiin muistio mahdollisista muutos- ja korjaustoimenpiteistä.

Kuljettimen rakenteesta tuli lujuuslaskelmien mukaan onnistunut. Lisäksi kaikki osat ovat melko yksinkertaisia, jolloin kuljettimen valmistuskustannukset pysyvät kohtuullisina. Kuljettimessa on myös hyvin vähän hitsattuja rakenteita, joten osien vaihto ja sitä kautta testauksen yhteydessä ilmenneiden ongelmien korjaus on suhteellisen helppoa.

Käyttämällä suunnittelussa lujuuslaskentaa välttyttiin myös tarpeettoman paksuilta seinämävahvuuksilta, mikä teki rungosta kevyen ja helpomman käsitellä. Pienemmällä seinämävahvuudella saatiin myös laskettua osien kustannuksia.

Suurimmaksi ongelmaksi suunnittelussa osoittautuivat ketjunkiristimet. Koska kuljetinketjun yhden lenkin pituus on 80 mm, voidaan ketjua pidentämällä tai lyhentämällä muuttaa ketjun pituutta 160 mm suuntaan tai toiseen. Rajoitetun runkokorkeuden vuoksi ketjun kiristämisessä voi tilanpuute tulla vastaan.

## LÄHTEET

Lähteenmäki, M. 2012. Nurjahdus. [Verkojulkaisu]. [Viitattu 7.12.2017]. Saatavana: [http://personal.inet.fi/koti/mlahteen/arkistot/luj2\\_pdf/nurja\\_k.pdf](http://personal.inet.fi/koti/mlahteen/arkistot/luj2_pdf/nurja_k.pdf)

Ma-Tech Oy. Ei päiväystä. [Verkkosivu]. [Viitattu 18.9.2017]. Saatavana: [www.ma-tech.fi](http://www.ma-tech.fi)

SFS-Käsikirja 29-1. 2008. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS Ry.

SFS-EN 349. 1993. Koneturvallisuus: Vähimmäisetaisyydet kehonosien puristumisvaaran välttämiseksi. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN ISO 13857. 2008. Koneturvallisuus: Turvaetaisyydet yläraajojen ja alaraajojen ulottumisen estämiseksi vaaravyöhykkeelle. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 619. 2002. Kuljetinlaitteen ja järjestelmät: Turvallisuusvaatimukset ja sähkömagneettista yhteensopivuutta koskevat vaatimukset: Kappaletavarakuljettimet ja -laitteistot. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

Tammertekniikka. 2012. Tekniikan kaavasto. 10. Painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy.