



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Teppo Suojoki

Automaattisen korkeavarastojärjestelmän tuotekehitys

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

16.11.2020

Tekijä Otsikko	Teppo Suojoki Automaattisen korkeavarastojärjestelmän tuotekehitys
Sivumäärä Aika	30 sivua 24.11.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Koneensuunnittelu
Ohjaajat	Yliopettaja Jyrki Kullaa Myyntipäällikkö Jani Matikainen
<p>Tuotantolaitokset tavoittelevat lattiapinta-alan maksimaalista käyttöä, joka heijastuu erityisesti varastointitilan tehokkaaseen käyttöön. Varastointijärjestelmiä on olemassa moneen eri käyttökohteeseen riippuen toimialasta. Paperiteollisuudessa korkeavarastojärjestelmä on tehokkain tapa käyttää hyväksi lattiapinta-ala, kun materiaalivirrat kasvavat suuriksi. Opinnäytetyössä tutkittiin automaattisen hyllystöjärjestelmän optimointia laiteuudistuksen myötä.</p> <p>Aihe valittiin olemassa olevan laitemuutoksen perusteella, jota tutkimalla voitaisiin mahdollisesti hyödyntää laitemuutoksen tuomia mahdollisuuksia myös tulevilla projekteilla. Työn tavoitteena oli verrata kahden eri referenssiprojektin hyllystöjärjestelmiä keskenään ja selvittää uuden toimilaitteen tuomat kustannuserot varastointijärjestelmälle. Työssä käytettävät referenssiprojektit ovat olemassa olevia varastointijärjestelmiä, joiden ominaisuuksia yhdistelemällä ja vertaamalla tehtiin teoreettisia laskelmia uuden varastointijärjestelmän ominaisuuksista.</p> <p>Automaattisen varastointijärjestelmän toimintaa käytiin läpi ja tutkittiin järjestelmän kehitysmahdollisuuksia. Laiteuudistuksen myötä työssä mitoitettiin hyllystön ja hyllystöhissin rakenne uudelleen, jonka lisäksi mitoitettiin hyllystöhissin käyttökoneistot uudelleen. Tulosten perusteella laskettiin laiteuudistuksen kustannuserot ja pohdittiin laiteuudistuksen tuomia muutoksia.</p>	
Avainsanat	Automaattinen varastojärjestelmä, sähkömoottorikäyttö

Author Title	Teppo Suojoki Product Development of an Automated High Bay Storage System
Number of Pages Date	30 pages 24 November 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Professional Major	Machine Design
Instructors	Jyrki Kullaa, Principal Lecturer Jani Matikainen, Sales Manager
<p>Production facilities strive for maximum use of floor space, which is reflected in particular in the efficient use of storage space. Storage systems exist for many different uses depending on the industry. In the paper industry, a high bay storage system is the most efficient way to utilize floor space as material flows grow. The topic of this thesis is the optimization of an automatic storage system that has undergone an equipment reform.</p> <p>The thesis is based on an actual equipment reform. By examining the equipment reform, useful information about the benefits of the optimization could be acquired and potentially utilized in future projects as well. The goal was to compare the storage systems of two reference projects and to evaluate the cost difference brought by the equipment reform. The reference projects are actual existing storage systems. By comparing and combining the properties of these existing storage systems, theoretical calculations could be made about the properties of a new storage system.</p> <p>The operation of the storage system was studied in detail and development opportunities were explored. Based on the equipment reform, the structures of the storage and the storage crane, as well as the storage crane drive machinery, were re-sized in the thesis. The cost difference was calculated based on the results of the re-sizing. In conclusion, the changes brought by the equipment reform were examined.</p>	
Keywords	Automatic storage system, electric motor drive

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Työn kuvaus	1
1.2	Pesmel Oy	2
2	Automaattinen korkeavarastojärjestelmä	2
2.1	Hyllystö	2
2.1.1	Perustus	3
2.1.2	Hyllypilari	3
2.2	Hyllystöhissi	3
2.2.1	Satelliittivaunu	4
2.2.2	Kääntöpöytä	4
2.2.3	Nostovaunu	5
2.2.4	Käyttökoneistot	5
2.2.5	Automaattinen ohjausjärjestelmä	5
3	Lujuusoppi	6
3.1	Nurjahdus	8
3.2	Elementtimenetelmä	8
4	Ohjelmistot	8
4.1	Autodesk, Inc.	8
4.1.1	AutoCAD	9
4.1.2	Inventor	9
4.2	ANSYS Mechanical	9
4.3	Mathcad	9
5	Tuotekehitys	10
5.1	Hyllystöhissin kehittäminen	10
6	Mitoitus	11

6.1	Hyllystön lattiapinta-ala	11
6.2	Hyllypilari	12
6.3	Hyllystöhissi	12
7	Tulokset	20
7.1	Hyllystö	20
7.2	Hyllypilari	21
7.3	Hyllystöhissi	21
8	Yhteenveto	22
	Lähteet	24

Lyhenteet

SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition. Valvonnan ja tiedonkeruun ohjausjärjestelmä.
DCS	Distributed Control System. Hajautettu ohjausjärjestelmä.
IACS	Integrated Administration and Control System. Teollisuusautomaatio- ja ohjausjärjestelmä.
PLC	Programmable Logic Controller. Ohjelmoitava logiikka.

1 Johdanto

1.1 Työn kuvaus

Insinööriyön tilaajana toimiva Pesmel Oy toimittaa asiakkailleen räätälöityjä automaattisia varasto- ja pakkausjärjestelmiä ympäri maailmaa paperi-, metalli- ja rengasteollisuuteen. Yrityksen tärkeimpiä tuotteita ovat automaattiset korkeavarastojärjestelmät, joissa lattiapinta-alaa käytetään tehokkaasti hyödyksi rakentamalla syväkanavasoluisia korkeavarastoja varastointitilan maksimoimiseksi.

Varastointijärjestelmät ovat kehittyneet ajan myötä ja ihmisen osuus varastoitavan tavaran liikuttamisessa on vähentynyt merkittävästi. Automatisoinnin myötä varastointijärjestelmistä saadaan entistä tehokkaampia ja itsenäisestitoimivia. Järjestelmien ohjauksesta vastaavat hienosäädetyt ohjausjärjestelmät, joiden avulla tavaran liikuttelu saadaan viritettyä huippuunsa.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin paperiteollisuuden suunnitellun automaattisen korkeavarastojärjestelmän kustannuksia ja toimintaa, sekä hyllystön hyllypilareita ja niiden ominaisuuksia. Automaattiseen korkeavarastojärjestelmään kuuluu yleensä suorakulman muotoinen hyllystö, sekä yksi tai useampi hyllystöhissi. Hyllystöhissi liikkuu hyllystön keskelle rakennetulla hyllystökäytävällä kuljettaen liikuteltavia kappaleita hyllystön varastointikanaviin. Liikuteltavat kappaleet tuodaan automaattisilla kuljettimilla tuotantolinjalta hyllystön syöttökanavaan, josta hyllystöhissi noukkii kappaleet ja siirtää oikeaan, järjestelmän määräämään paikkaan.

Työn tarkoituksena oli selvittää, kuinka paljon korkeavaraston hyllystöhississä käytettävän satelliittivaunutyyppin uudelleensuunnittelu muuttaisi korkeavarastojärjestelmän valmistuskustannuksia. Työssä tutkittiin myös hyllystörakenteen eri hyllypilarimallien ominaisuuksia ja kustannuksia. Yrityssalaisuuksien vuoksi kaikkia työssä käytäviä vaiheita ja tuloksia ei voida esittää.

1.2 Pesimal Oy

Pesimal Oy on vuonna 1978 Kauhajoella perustettu suomalainen yritys, joka toimittaa materiaalikäsittelyyn suunniteltuja täysautomaattisia logistiikka- pakkaus- ja varastojärjestelmiä maailmanlaajuisesti. Yrityksen asiakaskunta koostuu suurimmaksi osaksi paperi-, metalli- ja rengasteollisuudesta, mutta tuotteita on toimitettu myös elintarviketeollisuuteen.

2 Automaattinen korkeavarastojärjestelmä

Pesimal Oy:n suunnittelemiin ja toimittamiin automaattisiin materiaalivirtausratkaisuihin kuuluu automaattinen korkeavarastojärjestelmä, jossa kappaleita siirretään automaattisesti tuotantolinjastolta hyllystöön tai jatkokuljetukseen hyllystöhissien ja kuljettimien avulla. Korkeavarastojärjestelmät voidaan räätälöidä asiakkaiden tarpeen mukaan todella joustavasti, jolloin käyttökohteen tuottavuus saadaan mahdollisimman suureksi. Järjestelmässä kappaleet tuodaan tuotantolinjastolta kuljettimilla hyllystöön syöttökanaavaa pitkin, josta kappaleet siirretään hyllystöhissin avulla hyllystökanaaviin tai jatkokuljetukseen. Laitteet toimivat tietokoneohjausjärjestelmän avulla automaattisesti.

2.1 Hyllystö

Hyllystöjä käytetään kappaleiden varastointiin, kun varastointimäärät ovat suuria ja varastointipinta-ala on rajallinen. Hyllystöt rakennetaan käyttökohteen ja varastoitavan tavaran mukaan. Hyllystörakenne koostuu hyllystön päädyissä olevista jäykisteristikkorakenteista ja tukirakenteiden välissä olevasta varastointiosuudesta. Päätyihin sijoitetut jäykisteristikot kiinnitetään varastointiosuuteen. Jäykisteristikon tehtävä on tukea hyllystörakennetta, mutta jäykisteristikkoa ei kuitenkaan välttämättä tarvita, jos hyllystörakenne sijaitsee kantavan rakennuksen sisällä. Hyllystön keskiosa koostuu pystypila-reista, pitkittäisistä profiileista, hyllykehistä ja poikkipalkeista. Paperiteollisuuteen toimitettavien hyllystöjen kanavissa sijaitsevat satelliittivaunuille tarkoitetut ajoprofiilit ja pitkittäiset profiilit kiinnitetään hyllystörakenteeseen ruuviliitoksien avulla. Ruuviliitoskiinnitystä käytetään myös hyllykehän kiinnitykseen. Rakenteissa käytetään standardoituja profiilipalk-

keja. Palkkityypistä riippuen kiinnitykseen käytetään hitsausta tai ruuviliitosta. Paperiteollisuuden rakennettujen hyllystöjen teräksestä taivutetut ajoprofiilit toimivat myös paperirullien varastointialustana.

2.1.1 Perustus

Rakentamisen tärkein vaihe on luoda rakennukselle vankka perusta, joka välittää rakennuksen ja rakennuksen ulkoiset kuormat luotettavasti maaperään. Perustustyyppi vaihtelee rakennuksen tyyhin, koon ja maaperän kantokyvyn mukaan. Suunnittelu aloitetaan maaperätutkimuksella, jotta saadaan selville, kuinka syvä kaivanto perustukselle täytyy tehdä kiinteään maaperän saavuttamiseksi.

Perustustyypit voidaan jakaa yleisesti matala- ja syväperustukseen. Matalaperustuksessa perustuksen leveys on suurempi mitä syvyys, kun taas syväperustuksessa syvyys on suurempi mitä perustuksen leveys. Matalaperustuksessa kaivantoa ei tarvitse viedä kiinteään maaperään asti, vaan riittää, että perustuksen alapinta on vähintään 30 senttimetriä maanpinnan alapuolella. Matalaperustuksia käytetään omakotitalojen ja matalien rakennuksien perustuksina. Syväperustus toteutetaan välittämällä rakennuksesta aiheutuvat kuormat paalutuksen tai perusmuurin avulla kaivannon alapuolelle.

2.1.2 Hyllypilari

Suurien tuotantokapasiteettien omaaville tehtaille tarvitaan varastoitavan tavaran massan vuoksi suurikokoinen ja vankkarakenteinen hyllystö. Hyllystörakenteen tärkeimpiä elementtejä ovat hyllypilarit, joiden kautta hyllystön ja varastoitavan tavaran aiheuttamat kuormat välittyvät perustuksiin. Käytettäessä hitsatun rakenteen ja avoprofiilin yhdistelmää, kiinnitetään hyllypilarit toisiinsa ruuviliitoksien avulla. Hyllypilareiden materiaaleja ja profiileja kehitetään jatkuvasti, jotta pilareista saataisiin mahdollisimman kestäviä ja kompakteja.

2.2 Hyllystöhissi

Hyllystöissä tavaran siirtämiseen käytetään hyllystöhissejä, jotka ovat yksi- tai kaksimastoisia. Hyllystöhissin tyyppi ja koko vaihtelevat hyllystömallin ja taakan mukaan.

Paperiteollisuudessa käytettävät korkeavarastojärjestelmien hyllystöhissit koostuvat hissien rungosta, nostovaunusta, kääntöpöydästä sekä satelliittivaunusta. Korkeavarastojärjestelmässä hyllystöhissin nostokoneisto nostaa nostovaunun, kääntöpöydän ja satelliittivaunun oikealle korkeudelle. Kääntöpöytä kääntää satelliittivaunun oikeaan kulkusuuntaan. Satelliittivaunu siirtyy hyllystön syväkanavaan poimimaan tai jättämään liikuteltavan kappaleen. Korkeavarastojärjestelmässä käytettävillä kaksimastoisilla hyllystöhisseillä voidaan taakka nostaa yli 30 metrin korkeuteen varastoitavaksi.

Metalliteollisuuden asiakkaille toimitettavissa hyllystökokonaisuuksissa käytetään erilaista hissityyppiä ja hyllystörakennetta kuin paperiteollisuudessa. Suuremman käsiteltävän massan vuoksi metalliteollisuudessa käytettävissä hyllystöhisseissä satelliittivaunu ja kääntöpöytä ovat korvattu teleskooppihaarukkonstruktiolla. Hyllystön konstruktio on erilainen paperiteollisuuteen verrattuna ja hyllystökanaavien varastointitila onkin mitoitettu vain yhdelle metallirullalle.

2.2.1 Satelliittivaunu

Kappaleiden siirtämiseen hyllystökanaavissa käytetään satelliittivaunua, joka liikkuu hyllystökanaavissa ajokouruja pitkin. Satelliittivaunu koostuu kojekaapista, nostohaarukasta sekä nosto- ja ajokoneistosta. Vaunu liikkuu ajokouruissa ajokoneiston avulla välittäen voiman vetopyörästäihin. Nostohaarukkarakenteeseen sijoitetut pyörät jakavat laitteiston ja käsiteltävän tavaran taakan.

Rullat nostetaan hyllystökanaavien varastointikouruilta satelliittivaunun nostohaarukoilla vaunun kyytiin. Nostokoneisto välittää voiman nostohaarukoille nivelmekanismilla, jonka avulla voidaan käyttää pitkää nostohaarukkarakennetta yhdellä voimanlähteellä.

2.2.2 Kääntöpöytä

Hyllystöhissin satelliittivaunu on suunniteltu toimimaan yhdensuuntaisesti, jolloin hyllystöhissiin tarvitaan erillinen toimilaite kääntämään satelliittivaunun toimintasuuntaa hyllystöhississä. Pesmel Oy käyttää hyllystöhisseissään kääntöpöytää, joka mahdollistaa satelliittivaunun toimimisen molemmilla puolin hyllystöhissiä.

Kääntöpöytä on kiinnitetty nostovaunuun ja toimii satelliittivaunun kuljetusalustana hyllystöhissin liikkeessä. Kääntöpöydän tehtävä on mahdollistaa satelliittivaunun toiminta molemmilla puolilla hyllystöhissiä. Kääntökoneisto pyörittää kääntöpöytää 180 astetta pystyakselinsa ympäri. Kääntöpöydän kannen yläosassa on ajoprofiili satelliittivaunun liikkumista varten. Kääntöpöydässä on myös kaapelirumpu, jolla syötetään virtaa satelliittivaunulle mahdollistaen satelliittivaunun liikkuminen syväkanavissa. Kaapelirummun koko vaihtelee riippuen satelliittivaunun toimintamatkasta ja maksimitaakasta.

2.2.3 Nostovaunu

Kaksimastoisissa hyllystöhisseissä on nostovaunu, joka toimii kääntöpöydän ja satelliittivaunun nostokehikkona. Nostovaunua nostetaan hyllystöhissin nostokoneiston ja köysirumpujen avulla. Nostovaunun köysipyörien kautta kulkeva nostoköysi on reititetty hyllystöhissin ylärakenteen kautta hyllystöhissin köysirumpuun. Nostokoneisto kelaa köyttä köysirumpuun, jolloin nostovaunu nousee ylöspäin. Nostovaunussa on myös varmuusjarru laitehäiriöistä aiheutuvien vaaratilanteiden varalta. Varmuusjarru aktivoituu hissin vertikaalisen nopeuden noustessa liian suureksi, jolloin järjestelmä suorittaa hätäjarrutuksen.

2.2.4 Käyttökoneistot

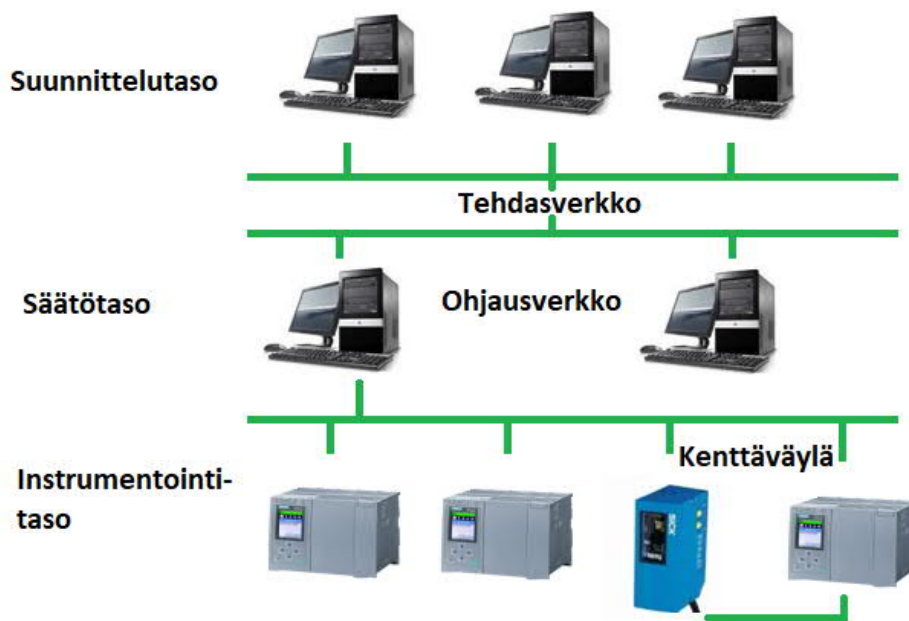
Hyllystöhissin vertikaali- ja horisontaaliliike mahdollistetaan käyttökoneistoilla. Ajokoneisto liikuttaa hyllystöhissiä horisontaalisesti ja nostokoneisto vertikaalisesti. Koneistot koostuvat sähkömoottorista ja teollisuusvaihteesta, jotka mitoitetaan käyttökohteen mukaan. Mitoituksessa otetaan huomioon liikuteltava massa yhdistettynä haluttuun hyllystöhissin kiihtyvyyteen ja nopeuteen ajo- ja nostotehtävissä.

2.2.5 Automaattinen ohjausjärjestelmä

Automaattinen ohjaus tarkoittaa prosessin ohjaamista ilman ihmisen suoraa puuttumista prosessin toimintaan. Yksinkertaisimmillaan ohjain vertaa prosessissa mitattua arvoa haluttuun asetusarvoon ja tekee muutoksia prosessiin saavuttaakseen asetusarvon.

Materiaalinkäsittelyjärjestelmät toimivat täysin tietokonelaitteistosta koostuvan ohjausjärjestelmän avulla, ohjaten automaattisesti toimivia laitteita ohjelmoitavan logiikan

avulla. Järjestelmän tavoite on ohjata oikea määrä materiaalia oikeaan osoitteeseen tavoiteajassa. Teollisuudessa käytetään valvonnan ja tiedonkeruun ohjausjärjestelmää (SCADA), hajautettujen ohjausjärjestelmien (DCS), teollisuusautomaatio- ja ohjausjärjestelmien (IACS) tai ohjelmoitavan logiikan (PLC) avulla toimivia ohjausjärjestelmiä. Automaattivaraston ohjausjärjestelmään kuuluu kenttäväylystä ja kenttälaitteista koostuva instrumentointi- ja logiikkataso, ohjaus- ja säätötaso sekä suunnittelutaso. Kuvassa 1 on havainnoitu automaattisen ohjausjärjestelmän hierarkiatasot yksinkertaisimmillaan.



Kuva 1. Automaattisen varastointijärjestelmän ohjausjärjestelmän hierarkiatasot.

3 Lujuusoppi

Materiaalin vahvuus määritellään kyvyllä kestää kuormitusta ilman murtumista tai muodonmuutosta. Lujuusoppi on mekaniikan alahaara, joka tutkii kappaleiden käyttäytymistä, kun niihin kohdistetaan ulkoista tai sisäistä kuormitusta. Jännityksellä kuvataan materiaalin sisäistä kykyä vastustaa ulkoisten voimien aiheuttamaa rasitusta. Normaali-jännitystä esiintyy, kun kappaleeseen kohdistuu puristavaa tai vetävää aksiaalista kuormitusta kohtisuoraan leikkauspintaa vasten. (1, s. 7.)

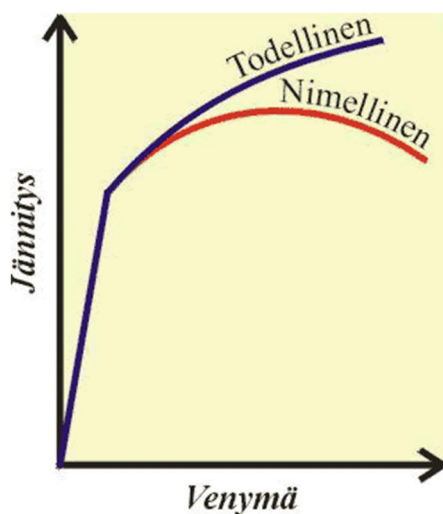
Normaalijännityksen tulos saadaan normaalivoiman ja poikkileikkauksen suhteesta. Normaalijännityksen tulos on negatiivinen, kun kappaleeseen vaikuttava voima on puristusta ja vastaavasti positiivinen kun kappaleeseen vaikuttava voima on vetoa. (1, s. 9 ja 90.)

Leikkausjännitys on pinnan suuntainen jännityskomponentti, joka aiheutuu pinnan suuntaisesti vaikuttavasta leikkausvoimasta. Leikkausjännitys saadaan laskettua leikkausvoiman ja poikkipinta-alan suhteesta. (1, s. 12.)

Venymällä kuvataan materiaalin muodonmuutosta tai siirtymää kohteeseen kohdistetun rasituksen vaikutuksesta. Suhteellinen venymä saadaan pituuden muutoksen ja alkuperäisen pituuden suhteesta. Kappaleen pidentyessä venymän arvo on positiivinen ja lyhentyessä negatiivinen. (1, s. 15.)

Lujuuslaskennan avulla voidaan mitoittaa kappaleelle tarvittavat ominaisuudet, jotta voidaan taata kappaleen turvallisuus käyttökohteessa. Lujuusanalyyysien avulla saadaan myös luotua suorituskykyisiä ratkaisuja, kun rakenteen koko ja massa saadaan optimoituja käyttökohteen mukaisiksi.

Useilla materiaaleilla on jännityksen ja venymän välinen suhde vakio tiettyyn pisteeseen asti, jota kutsutaan suhteellisuusrajaksi. Tätä suhdetta kutsutaan materiaalivakioksi eli kimmokertoimeksi E . Jännitys-venymä-käyrän jännityksen ja venymän välisestä suhteesta (Kuva 2) nähdään, että Hooken laki on voimassa myötörajan R_e tai venymisrajan $R_{p0,2}$ asti. (1, s. 22.)



Kuva 2. Jännitys-venymä-käyrä (http://www.tut.fi/vmv/2005/vmv_2_1_1.php).

3.1 Nurjahdus

Nurjahduksella tarkoitetaan hoikan sauvan puristuksen johdosta esiintyvää taipumista ennen myötörajan saavuttamista. Nurjahduksen aikana pylvääseen kohdistuu suurta poikittaisliikettä kuormituksen suuntaan nähden. Sauvan nurjahduksen aiheuttama voima voidaan laskea käyttäen Eulerin nurjahduskerrointa. Eulerin nurjahdustapauksia käytetään määrittämään nurjahdusvoima hoikissa pylväissä. (1, s. 421-422.)

3.2 Elementtimenetelmä

Elementtimenetelmää käytetään useilla tieteen alueilla ja se on mahdollisesti eniten käytetty ratkaisumenetelmä osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisuun. FEM-ohjelman avulla monimutkaiset rakenteet ja laitteet voidaan jakaa yksinkertaisimpiin osiin. Näitä osia kutsutaan elementeiksi, joista ohjelma kokoaa koko rakenteen elementtiverkon solmupisteiden avulla. Solmupisteet sijaitsevat elementtien reunoilla ja yhdistävät vierekkäiset elementit toisiinsa. Ratkaisun tarkkuutta voidaan edesauttaa elementtiverkon määrityksellä. Tarkkuuteen vaikuttaa elementtien tyyppi, tiheys, koko ja määrä.

4 Ohjelmistot

4.1 Autodesk, Inc.

Autodesk, Inc. on yhdysvaltalainen yritys, joka on erikoistunut tietokoneohjelmistoihin muun muassa arkkitehtuurin, rakentamisen, teollisuuden, median ja viihdeteollisuuden aloilla. Autodesk, Inc. tarjoaakin laajan valikoiman suunnitteluohjelmistoja rakennesuunnittelun lisäksi 3D-animaatioelokuville ja peleille, sekä sovelluksia valmistukseen ja maaja vesirakentamiseen. Yhtiö kehittää koko ajan palvelujaan ja onkin luonut jo pilvipohjaisia palveluita ohjelmistoillensa sekä kehittänyt CAD-ohjelmia mobiililaitteille. Yritys on perustettu vuonna 1982 Kaliforniassa, Yhdysvalloissa ja vuonna 2020 yrityksen alaisuudessa työskenteli yli 10000 ihmistä maailmanlaajuisesti. (<https://www.autodesk.com/company>.)

4.1.1 AutoCAD

AutoCAD on Autodesk -yrityksen ensimmäinen ja suosituin tietokoneavusteinen suunnitteluohjelmisto. Ohjelmalla voidaan luoda ja editoida 2D- ja 3D-piirroksia, kuten pohjapiirroksia ja koneenosia. Ohjelma saavutti suuren suosion yritysmaailmassa 1980-luvun lopussa tuoden tietokoneavusteisen suunnittelun ohjelmistot ja hyödyt myös pienyritysten ulottuville. (www.autodesk.fi/products/autocad.)

4.1.2 Inventor

Mekaniikkasuunnitteluun kehitetty Autodesk Inventor on 3D-mallinnukseen käytettävä CAD -ohjelmisto, jonka avulla voidaan luoda tarkkoja 3D-malleja tuotteista ennen niiden rakentamista. Ohjelmalla voidaan suorittaa myös tuotesimulaatiota ja parametrista mallinnusta. Tuotesimulaatiolla voidaan simuloida kappaleen toimintaa aidoissa olosuhteissa, jolloin tuotteen toimivuuden voi todeta konkreettisesti. Tuotekokoonpanolle voidaan luoda jännitysanalyysi ja tarkastella rakenteen fysikaalisia ominaisuuksia. (<http://www.autodesk.fi/inventor>.)

4.2 ANSYS Mechanical

ANSYS Mechanical -ohjelmisto on suunnittelijoiden käyttöön kehitetty lujuuslaskentatyökalu, jossa mallinnetun kappaleen lujuusominaisuuksia testataan simulaation avulla. Ohjelma perustuu projektikaaviomalliin, jonka avulla saadaan yhdistettyä koko simulointiprosessi. Ansys Mechanical -ohjelmaan voidaan tuoda useiden suunnitteluohjelmien 3D-malleja analysoitavaksi. Ohjelmaa voidaan käyttää myös lämpö, neste ja sähkömagneettisen analyysin suorittamiseen. (<https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical>.)

4.3 Mathcad

Mathcad on laskentatyökalu tekniikan ja tieteen aloille, jolla voidaan selvittää monimutkaisia ongelmia. Ohjelma perustuu laskentataulukkomalliin, jota luetaan ja kirjoitetaan ylhäältä alaspäin. Muutettaessa jo aikaisemmin määritettyä arvoa ohjelma laskee automaattisesti arvon vaikutuksen alaiset yhtälöt uudelleen mahdollistaen helpon muokkauk-

sen muuttujien ja lausekkeiden välillä. Ohjelmalla voidaan luoda yksittäisiä muuttujia ohjelman muistiin käyttäen erilaisia symboleita. Ohjelmaa käytetään laajasti tieteellisillä aloilla laskelmien tarkistamiseen ja dokumentointiin tiedostojen helpon muokkaamismahdollisuuden vuoksi.

5 Tuotekehitys

Tuotekehitys tarkoittaa uuden tuotteen luomista tai olemassa olevan laitteen uudelleen suunnittelua, jolla saavutetaan esimerkiksi laitteen toimivuuden paranemista tai käyttökustannuksien alenemista. Tuotekehityksen avulla saadaan tuotua markkinoille kustannustehokkaampia ja kompaktimpia laitteita parantamaan tuottavuutta ja kilpailukykyä. Tuotekehitystarve vaihtelee yhtiöstä ja toimialasta riippuen. Tavoite voi olla esimerkiksi vastata markkinatarpeita, luoda asiakkaan toiveiden mukainen ratkaisu, vähentää kustannuksia tai parantaa käyttömukavuutta.

5.1 Hyllystöhissin kehittäminen

Automaattisen korkeavarastohyllystöjärjestelmän tuotekehitykseen kuuluu olennaisesti hyllystöhissin toiminnan tarkastelu ja kehitys. Hyllystöhissin tuotekehityksellä voidaan hyllystöhissin rakennetta saada optimoidummaksi kokonaisuudeksi, joka mahdollistaa myös hyllystön konstruktion muuttamista.

Uudessa satelliittivaunun versiossa vaunun rakennetta on pelkistetty ja vaunun kaikki komponentit on sijoitettu nostohaarukkarakenteen alapuoliseen osaan, jolloin satelliittivaunun kojekaappia ei tarvita. Satelliittivaunun uuden konstruktion myötä vaunu voi kulkea hissikäytävän molemmille puolille ilman kääntymistä, jolloin kääntöpöydän käytöstä voidaan luopua. Kääntöpöydättömässä hyllystöhissirakenteessa myös nostovaunun rakennetta voidaan optimoida. Hyllystöhissin rakenteellisen muutoksen myötä hyllystön rakenteelle voidaan tehdä muutoksia kaventamalla hissikäytävää. Käytävän kaventuessa hyllystön viemä lattiapinta-ala pienenee, jolloin varastojärjestelmän kokonaispinta-ala pienenee.

Rakentamisen lopulliset kustannukset voivat vaihdella merkittävästi vertailtaessa eri projektikohteita. Kustannukset riippuvat esimerkiksi maaperästä, suhdanteista, sekä siitä

missä maassa rakentaminen tapahtuu. Hyllystön rakentaminen koostuu itse hyllystörakenteesta, johon kuuluvat hyllystön keskiosa ja päädyt, sekä perustuksesta. Hyllystön perustuksien tekoon voi kuulua paalutus, maanrakennus, kivijalan rakennus, jälkivalut, pohjalaatan asennus ja lattian pölynsidontapinnoitus. Laskennan perusteena käytettiin toimittajalta saatujen projektin hyllystön perustuksen toteutuneita kustannuksia. Uudesta hyllystörakenteesta tehtiin kustannuslaskelma perustuksien osalta käyttäen referenssi-projekti 2:ssa käytettyä hyllypilaria. Opinnäytetyössä tarkasteltiin myös kahden eri hyllyprofiilin nurjahduksia.

6 Mitoitus

Tässä opinnäytetyössä ei keskitytä hyllystörakenteen kustannuksien arviointiin vähäisten muutoksien vuoksi. Hyllystörakenteen kustannukset koostuvat pääosin käytettävän materiaalin määrästä ja näin ollen koostuvat suurimmilta osin hyllystökanavien ja hyllypilarien kustannuksista. Muutokset eivät vaikuta hyllystökanavien määrään tai syvyyteen, eikä näin ollen myöskään hyllypilarien määrään tai kokoon.

Referenssiprojekti 1:nä toimii hyllystöjärjestelmä, jonka tietoja verrattiin uuden hyllystöjärjestelmän muutoksiin. Referenssiprojekti 2:nä toimii hyllystöjärjestelmä, jossa on otettu käyttöön satelliittivaunun uusi versio.

6.1 Hyllystön lattiapinta-ala

Uuden hyllystörakenteen jäykisteristikoiden leveys otettiin referenssiprojekti 2:n hyllystörakenteen leveydestä. Satelliittivaunun konstruktio muutoksen ja jäykisteristikoiden muutokset laskettiin yhtälöllä 1, jossa uuden hyllystörakenteen pinta-ala vähennetään referenssiprojekti 1:n pinta-alasta.

$$A_{erotus} = l_1 * w_1 - l_2 * w_2 \quad (1)$$

A_{erotus} on hyllystöpinta-alojen erotus

l_1 on referenssiprojekti 1:n hyllystörakenteen pituus

l_2 on referenssiprojekti 2:n hyllystörakenteen pituus

w_1 on referenssiprojekti 1:n hyllystörakenteen leveys

w_2 on referenssiprojekti 2:n hyllystörakenteen leveys.

6.2 Hyllypilari

Hyllypilareista luotiin 3D-mallit Autodesk Inventor -suunnitteluohjelmalla, joita käytettiin myös rakenneanalyysissa. Kuormavaikutuksia tutkittiin ANSYS Mechanical -ohjelman rakenneanalyysillä, jolla selvitettiin hyllypilarien nurjahduksien kriittisiä raja-arvoja. Nurjahduksien tulokset laskettiin Mathcad -laskentasovelluksella ja tuloksia verrattiin keskenään.

Rakenneanalyysissa käytettiin kahta eri Eulerin nurjahduskerrointa. Nurjahduskertoimina käytettiin arvoa 0,25, jossa palkki on tuettu kiinteästi alaosasta (Eulerin tapaus 1), mutta yläosa on vapaa, sekä arvoa 2,047 (Eulerin tapaus 3), jossa palkin alaosa on tuettu kiinteästi ja yläosa nivelletty. Vapaalla yläosan kiinnityksellä haluttiin verrata palkkien ominaisuuksia, jotta nähtäisiin suurempia eroa palkkityyppien välillä. Nivelletyn yläosan mallinnus vastaa hyllystörakenteen normaalia tuentatapaa, koska hyllystöä ei yleensä kiinnitetä jäykästi yläosastaan. Nurjahdus saatiin laskettua käyttämällä yhtälöä 2. (1, s. 422.)

$$F_n = \mu \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2)$$

μ on nurjahduskerroin
 E on materiaalin kimmokerroin
 F_n on kappaleen nurjahduksen kriittinen voima
 I on poikkileikkauksen jäyhyysmomentti
 L on kappaleen pituus.

6.3 Hyllystöhissi

Hyllystöhissin rakenteen ja laitteiden muuttuessa hyllystöhissin kokonaismassa ja nostettava massa muuttuvat, jolloin voidaan käyttää pienempiä toimilaitteita hyllystöhissin nosto- ja ajoliikkeiden toteuttamiseen. Nostoliike toteutetaan yleensä yhdellä nostoyksiköllä, joka koostuu sähkömoottorista, teollisuusvaihteesta ja kahdesta köysirummusta. Köysi kelautuu rumpujen välillä kiertäen hyllystöhissin mastojen yläosassa sijaitsevien köysipyörien sekä nostovaunun köysipyörien kautta nosto- tai laskuliikkeen aikaan saamiseksi. Suuremmissa hisseissä voi olla käytössä useampi käyttökoneisto ajo- tai nostoliikkeelle.

Teoreettiset mitat saatiin vertaamalla referenssiprojektien hyllystöhissien rakenteita, joista uudet mitat määritettiin toimintavaatimuksen mukaan. Uuden hyllystöhissin rungon pituutena käytettiin referenssiprojekti 2:n hyllystöhissin rungon pituutta ja referenssiprojekti 1:n hyllystöhissin rungon leveyttä ja korkeutta. Nostovaunun geometriana käytettiin referenssiprojekti 2:n leveyttä ja korkeutta lisäämällä mittoihin referenssiprojektien käsiteltävien rullien maksimihalkaisijoiden erotus. Satelliittivaunun geometria säilytettiin referenssiprojekti 2:n kanssa samanlaisena paitsi pituuteen lisättiin referenssiprojekteissa käsiteltävien rullasettien maksimipituuksien erotus.

Hyllystöhissin rakenteen muutoksessa käytettiin massakerrointa x , joka laskettiin yhtälöllä 3. Yhtälön arvo $m_{rullasetti1}$ on referenssiprojekti 1:n hyllystöhissin käsittelemän maksimirullasetin massa, $l_{rullasetti1}$ referenssiprojekti 1:n hyllystöhissin käsittelemän maksimisetin pituus, $m_{rullasetti2}$ on referenssiprojekti 2:n hyllystöhissin käsittelemän maksimisetin massa ja $l_{rullasetti2}$ referenssiprojekti 2:n hyllystöhissin käsittelemän maksimisetin pituus.

$$x = \sqrt{\frac{m_{rullasetti1} * l_{rullasetti2}}{m_{rullasetti2} * l_{rullasetti1}}} \quad (3)$$

$l_{rullasetti1}$ on referenssiprojekti 1:n rullasetin pituus
 $l_{rullasetti2}$ on referenssiprojekti 2:n rullasetin pituus
 $m_{rullasetti1}$ on referenssiprojekti 1:n rullasetin massa
 $m_{rullasetti2}$ on referenssiprojekti 2:n rullasetin massa
 x on massakerroin.

Uuden hyllystöhissin ja laitteiden rakenteiden massat määritettiin kertomalla massakerroin laitekohtaisilla massoilla ja laitteiden runkojen geometrioiden suhteella. Laskettiin hyllystöhissin, nostovaunun ja satelliittivaunun runkojen massat ottaen huomioon hyllystöhissin, nostovaunun ja satelliittivaunun kokonaismassojen lisäksi lisäämällä laitteiden muiden komponenttien ja toimilaitteiden massat.

Hyllystöhissin runko koostuu yläpalkista, alapalkista ja kahdesta mastosta. Uuden hyllystöhissin massa saatiin laskettua yhtälöstä 4, jossa geometriasuhteena käytettiin referenssiprojekti 1:n hyllystöhissin geometrian ja uuden hyllystöhissin geometrian suhdetta.

$$m_{uusi\ hh} = x m_{hhrunko2} \frac{2w_{hhrunko1} * 2h_{hhrunko1} * l_{hhrunko1}}{2w_{uusi\ hhrunko} * 2h_{uusi\ hhrunko} * l_{uusi\ hhrunko}} + m_{hhmassa1} \quad (4)$$

$h_{hhrunko1}$ on referenssiprojekti 1:n hyllystöhissin rungon korkeus

$h_{uusi\ hhrunko}$ on uuden hyllystöhissin rungon korkeus
 $l_{hhrunko1}$ on referenssiprojekti 1:n hyllystöhissin rungon pituus
 $l_{uusi\ hhrunko}$ on uuden hyllystöhissin rungon pituus
 $m_{hhmassa1}$ on uuden referenssiprojektin hyllystöhissin muu massa
 $m_{hhrunko2}$ on referenssiprojekti 2:n hyllystöhissin rungon massa
 $m_{uusi\ hh}$ on uuden hyllystöhissin kokonaismassa
 $W_{hhrunko1}$ on referenssiprojekti 1:n hyllystöhissin rungon leveys
 $W_{uusi\ hhrunko}$ on uuden hyllystöhissin rungon leveys
 x on massakerroin.

Nostovaunun runko koostuu myös yläpalkista, alapalkista ja kahdesta pystypalkista. Uuden nostovaunun massa saatiin laskettua yhtälöstä 8, jossa nostovaunun geometriasuhteena käytettiin uuden hyllystöhissin geometrian ja referenssiprojekti 2:n nostovaunun geometrian suhdetta. Uuden hyllystöhissin nostovaunun geometriaan (yhtälö 6 ja 7) lisättiin suuremman rullasetin tuoma muutos, joka saatiin vähentämällä referenssiprojekti 2:n rullasetin halkaisija referenssiprojekti 1:n rullasetin halkaisijasta (yhtälö 5).

$$d_{rullasetti\ erotus} = d_{rullasetti1} - d_{rullasetti2} \quad (5)$$

$d_{rullasetti\ erotus}$ on referenssiprojektien rullien halkaisijoiden erotus
 $d_{rullasetti1}$ on referenssiprojekti 1 rullan halkaisija
 $d_{rullasetti2}$ on referenssiprojekti 2 rullan halkaisija.

$$h_{uusi\ nvaunu} = h_{nvaunu2} + d_{rullasetti\ erotus} \quad (6)$$

$h_{uusi\ nvaunu}$ on uuden nostovaunun rungon korkeus
 $h_{nvaunu2}$ on referenssiprojekti 2:n nostovaunun rungon korkeus.

$$l_{uusi\ nvaunu} = l_{nvaunu2} + d_{rullasetti\ erotus} \quad (7)$$

$l_{uusi\ nvaunu}$ on uuden nostovaunun rungon pituus
 $l_{nvaunu2}$ on referenssiprojekti 2:n nostovaunun rungon pituus.

$$m_{uusi\ nvaunu} = x m_{nvaunu2} \frac{2W_{uusi\ nvaunu} * 2h_{uusi\ nvaunu} * l_{uusi\ nvaunu}}{2W_{nvaunu2} * 2h_{nvaunu2} * l_{nvaunu2}} + m_{nvaunumassa2} \quad (8)$$

$m_{nvaunu2}$ on referenssiprojekti 2:n nostovaunun rungon massa
 $m_{nvaunumassa2}$ on referenssiprojekti 2:n nostovaunun muu massa
 $m_{uusi\ nvaunu}$ on uuden nostovaunun massa
 $h_{nvaunu2}$ on referenssiprojekti 2:n hyllystöhissin rungon korkeus
 $h_{uusi\ nvaunu}$ on uuden nostovaunun rungon korkeus
 $l_{nvaunu2}$ on referenssiprojekti 2:n rungon pituus
 $l_{uusi\ nvaunu}$ on uuden nostovaunun rungon pituus
 $W_{nvaunu2}$ on referenssiprojekti 2:n rungon leveys
 $W_{uusi\ nvaunu}$ on uuden nostovaunun leveys

x on massakerroin.

Referenssiprojektien satelliittivaunujen konstruktioiden eroavaisuuden vuoksi skaalattiin referenssiprojekti 2:n satelliittivaunun massa massakertoimen avulla (yhtälö 9).

$$m_{uusi\ svaunu} = x m_{svaunu2} + m_{svaunumassa2} \quad (9)$$

$m_{svaunu2}$ on referenssiprojekti 2:n satelliittivaunun rungon massa
 $m_{svaunumassa2}$ on referenssiprojekti 2:n satelliittivaunun muu massa
 $m_{uusi\ svaunu}$ on uuden satelliittivaunun massa
 x on massakerroin.

Uuden hyllystöhissin kokonaismassa saatiin laskettua yhtälöstä 10.

$$m_{koko} = m_{uusi\ hh} + m_{uusi\ nvaunu} + m_{uusi\ svaunu} \quad (10)$$

m_{koko} on uuden hyllystöhissin kokonaismassa
 $m_{uusi\ nvaunu}$ on uuden nostovaunun massa
 $m_{uusi\ svaunu}$ on uuden satelliittivaunun massa
 $m_{uusi\ hh}$ on uuden hyllystöhissin kokonaismassa
 x on massakerroin.

Uuden hyllystöhissin laitteiden massojen muutoksen myötä hyllystöhissin nosto- ja ajokoneistot mitoitettiin uudelleen. Hyllystöhissin nostettava massa (yhtälö 11) koostuu nostovaunusta, satelliittivaunusta ja rullasetin massasta. Rullasetin massana käytettiin rullasetin maksimimassaa.

$$m_{kuorma} = m_{uusi\ nvaunu} + m_{uusi\ svaunu} + m_{rullasetti1} \quad (11)$$

m_{kuorma} on uuden hyllystöhissin nostama kokonaismassa
 $m_{rullasetti1}$ on uuden hyllystöhissin nostama rullasetin massa
 $m_{uusi\ nvaunu}$ on uuden nostovaunun massa
 $m_{uusi\ svaunu}$ on uuden satelliittivaunun massa.

Nostokoneiston laskennassa käytettiin arvoja, joita nostokoneistolta vaadittiin. Näitä arvoja ovat v_{kuorma} , joka on nostovaunun nopeus nostoliikkeessä ja a_{kuorma} , joka on nostovaunun kiihtyvyyden nostoliikkeessä. Lisäksi annettiin arvot käytön välitykselle i ja maksiminostokorkeudelle h .

Nostomoottorin tehoarvio P laskettiin yhtälöllä 12.

$$P = \frac{m_{kuorma} * g * v_{kuorma}}{\eta} \quad (12)$$

g on painovoima

m_{kuorma} on uuden hyllystöhissin nostama kokonaismassa

P on nostomoottorin tehoarvio

v_{kuorma} on uuden hyllystöhissin nostoliikkeen vaadittu nopeus

η on hyötysuhde.

Köysirummun hitausmomenttia laskettaessa tarvittiin arvot köysirumpujen ja köysipyörien massoille (yhtälö 13), sekä ulkopintojen ja sisäpintojen etäisyydet massakeskipisteestä. Laskennassa käytettiin referenssiprojekti 1:n köysirumpuja, joten köysirumpuja ei tarvinnut mitoittaa uudestaan.

$$m_r = 2m_{rumpu} \quad (13)$$

m_r on köysirumpujen massa

m_{rumpu} on köysirummun massa.

Köysirummun hitausmomentti laskettiin yhtälöllä 14.

$$J_r = \left(\frac{1}{i}\right)^2 \frac{1}{2} m_r (R_r^2 + r_r^2) \quad (14)$$

i on käytön välitys

J_r on köysirummun hitausmomentti

m_r on köysirumpujen massa

r_r on rummun sisäpinnan etäisyys massakeskipisteestä

R_r on rummun ulkopinnan etäisyys massakeskipisteestä.

Köysipyörän välityssuhde laskettiin yhtälöllä 16, jonka laskemiseen tarvittiin köysipyörien massaa (yhtälö 15).

$$m_{kp} = n_{köysipyörä} m_{köysipyörä} \quad (15)$$

m_{kp} on köysipyörien yhteenlaskettu massa

$m_{köysipyörä}$ on köysipyörän massa

$n_{köysipyörä}$ on köysipyörien lukumäärä.

$$i_{kp} = \frac{5R_{kp}}{[(0,25 + 2 * 0,5 + 0,75 + 1)r_{jako}]} \quad (16)$$

i_{kp} on köysipyörän välityssuhde
 r_{jako} on jakosäde
 R_{kp} on köysipyörän ulkopinnan etäisyys massakeskipisteestä.

Seuraavaksi laskettiin köysipyörän hitausmomentti (yhtälö 17) käyttäen referenssiprojekti 1:n köysipyörien arvoja, käytön välitystä ja köysipyörän välityssuhdetta.

$$J_{kp} = \frac{1}{(i_{kp}i)^2} \frac{1}{2} m_{kp} R_{kp}^2 \quad (17)$$

i on käytön välitys
 i_{kp} on köysipyörän välityssuhde
 J_{kp} on köysipyörän hitausmomentti
 m_{kp} on köysipyörien yhteenlaskettu massa
 R_{kp} on köysipyörän ulkopinnan etäisyys massakeskipisteestä.

Jarrun ulkopinnan etäisyys massakeskipisteestä laskettiin yhtälöllä 18, jonka avulla pystyttiin laskemaan jarrun hitausmomentti (yhtälö 19).

$$R_j = \frac{d_{jarru}}{2} \quad (18)$$

d_{jarru} on jarrun halkaisija
 R_j on jarrun ulkopinnan etäisyys massakeskipisteestä.

$$J_j = \frac{1}{2} m_{jarru} R_j^2 \quad (19)$$

J_j on jarrun hitausmomentti
 m_{jarru} on jarrun massa
 R_j on jarrun ulkopinnan etäisyys massakeskipisteestä.

Nostettavan massan hitausmomentti laskettiin yhtälöllä 20.

$$J_{ma} = \left(\frac{1}{i_k i}\right)^2 m_{kuorma} r_{jako}^2 \quad (20)$$

i on käytön välitys
 i_{kp} on köysipyörän välityssuhde
 J_{ma} on nostettavan massan hitausmomentti
 m_{kuorma} on uuden hyllystöhissin nostama kokonaismassa

r_{jako} on jakosäde.

Hyötysuhde saatiin laskettua yhtälöiden 21, 22 ja 23 avulla.

$$\eta_G = 0,95 \quad (21)$$

$$\eta_L = \frac{1}{1,1} \eta_G \quad (22)$$

$$\eta_1 = \eta_G \eta_L \quad (23)$$

η_1 on hyötysuhde
 η_G on vaihteen hyötysuhde
 η_L on kuorman hyötysuhde.

Staattinen vääntömomentti ja tehontarve laskettiin yhtälöillä 24 ja 25.

$$M_{stat} = m_{kuorma} g \frac{r_{jako}}{i_k i \eta} \quad (24)$$

g on painovoima
 i on käytön välitys
 i_k on köysivälitys
 m_{kuorma} on uuden hyllystöhissin nostama kokonaismassa
 M_{stat} on staattinen vääntömomentti nostoliikkeelle
 r_{jako} on jakosäde
 η_1 on hyötysuhde.

$$P_{stat} = 2\pi M_{stat} n_N \quad (25)$$

M_{stat} on staattinen vääntömomentti nostoliikkeelle
 n_N on nostomoottorin pyörimisnopeus
 P_{stat} on staattinen teho nostoliikkeelle.

Seuraavaksi laskettiin hitausmomentti komponentit yhteen yhtälöllä 26, jonka jälkeen pystyttiin laskemaan dynaaminen vääntömomentti ja tehontarve yhtälöillä 27 ja 28.

$$J_t = J_j + J_{kp} + J_M + J_r + J_{ma} \quad (26)$$

J_j on jarrun hitausmomentti
 J_{kp} on köysipyörän hitausmomentti
 J_M on nostomoottorin hitausmomentti

J_{ma} on nostettavan massan hitausmomentti
 J_r on rummun hitausmomentti
 J_t on koko hitausmomentti.

$$M_D = \left[J_M + J_j + \frac{(J_{kp} + J_r + J_{ma})}{\eta} \right] 2\pi \frac{n_N}{t_a} \quad (27)$$

J_j on jarrun hitausmomentti
 J_{kp} on köysipyörän hitausmomentti
 J_M on nostomoottorin hitausmomentti
 J_{ma} on nostettavan massan hitausmomentti
 J_r on rummun hitausmomentti
 J_t on koko hitausmomentti.
 M_D on dynaaminen vääntömomentti
 n_N on nostomoottorin pyörimisnopeus
 t_a on kiihdytykseen tarvittava aika nostoliikkeessä.

$$P_D = 2\pi M_D n_N \quad (28)$$

M_D on dynaaminen vääntömomentti
 n_N on nostomoottorin pyörimisnopeus
 P_D on dynaaminen tehontarve.

Todellinen vääntömomentti kiihdyttäessä saatiin summaamalla staattinen ja dynaaminen vääntömomentti (yhtälö 29).

$$M_t = M_{stat} + M_D \quad (29)$$

M_D on dynaaminen vääntömomentti
 M_{stat} on staattinen vääntömomentti nostoliikkeelle
 M_t on vääntömomentti kiihdyttäessä.

Tehontarve kiihdyttäessä saatiin summaamalla staattinen ja dynaaminen tehontarve (yhtälö 30).

$$P_t = P_{stat} + P_D \quad (30)$$

P_D on dynaaminen tehontarve
 P_{stat} on staattinen teho
 P_t on tehontarve kiihdyttäessä.

Yhtälöllä 31 saatiin laskettua vaihdetta rasittava vääntömomentti kiihdyttäessä.

$$M_G = \frac{(J_{kp} + J_r + J_{ma})2\pi \frac{n_N}{\eta_1}}{t_a} + M_{stat} \quad (31)$$

J_{kp} on köysipyörän hitausmomentti
 J_{ma} on nostettavan massan hitausmomentti
 J_r on rummun hitausmomentti
 M_G on vääntömomentti kiihdyttäessä
 M_{stat} on staattinen vääntömomentti nostoliikkeelle
 n_N on nostomoottorin pyörimisnopeus
 t_a on kiihdytykseen tarvittava aika
 η_1 on hyötysuhde.

Lineaariliikkeelle laskettiin tehon tarve ja vääntömomentti yhtälöillä 32 ja 33.

$$P_x = \frac{m_{koko} a_{xhissi} v_{xhissi}}{\eta} \quad (32)$$

a_{xhissi} on hissien kiihtyvyys ajoliikkeessä
 P_x on teho ajoliikkeelle
 v_{xhissi} on hissien nopeus ajoliikkeessä.

$$M_x = \frac{P_x 9550}{n_{Nx}} \quad (33)$$

M_x on vääntömomentti ajoliikkeelle
 n_{Nx} on ajomoottorin kierrosnopeus minuutissa
 P_x on tarvittava teho ajoliikkeelle.

7 Tulokset

Satelliittivaunun korvaaminen uudelleensuunnitellulla kompaktimmalla mallilla vaikuttaa hyllystön lattiapinta-alaan, sekä hyllystöhissin ja laitteiden rakenteeseen ja käyttökoneistoihin. Teoreettisten laskelmien jälkeen prosentuaaliseksi kokonaissäästöksi saatiin 1,67 prosenttia.

7.1 Hyllystö

Hyllystörakenteen muutosta ei huomioitu tässä opinnäytetyössä muutoksen pienen vaikutuksen vuoksi. Hissikäytävän kavennus vaikuttaa ainoastaan kattotuolin leveyteen.

Hyllystön päätyjen leveyden muutos vaikuttaa ainoastaan hyllystörakenteen jäykisteristikoihin.

Referenssiprojekti 2:n hyllystöhississä käsiteltävän rullasetin ja satelliittivaunun pituutta verrattiin referenssiprojekti 1:n satelliittivaunun ja rullasetin pituuteen. Vertaamalla referenssiprojektien satelliittivaunujen ja rullasettien pituuksia saatiin uuden satelliittivaunun pituus referenssiprojekti 1:n rullasetin ja referenssiprojekti 2:n satelliittivaunun välisestä suhteesta laskemalla kuinka paljon referenssiprojekti 2:n satelliittivaunu tarvitsee tilaa rullasetin pituuden lisäksi.

Uuden hyllystörakenteen hyllystökanavien rakennetta ei muutettu, joten hyllystörakenteen leveyttä saatiin muutettua kaventamalla ainoastaan päätyjen leveyttä. Päätyjen leveydeksi päädyttiin valitsemaan referenssiprojekti 2:n päätyjen leveys. Päädyissä sijaitsevien jäykisteristikoiden leveyden oletettiin olevan riittävä käytettäväksi myös uudessa hyllystörakenteessa. Muutoksien jälkeen hyllystön lattiapinta-alasta säästetään 3,9 prosenttia.

7.2 Hyllypilari

Kahden eri hyllypilarimallin nurjahduksen eroksi saatiin 25,67 prosenttia vaihtoehtoisen profiilin ollessa kestävämpi. Hyllypilarin kustannukset puoltavat kuitenkin alkuperäisen hyllypilarin käyttöä.

7.3 Hyllystöhissi

Hyllystöhissin rungon rakennetta saadaan kevennettyä 24,72 prosenttia. Rungon koostuessa rakenneteräksestä voidaan prosentuaalista kevennyksen tulosta käyttää suoraan myös rungon kustannuksien säästöön, jotka ovat näin ollen 24,72 prosenttia. Nostovauunun rungon rakenteen laskemiseen voidaan käyttää samaa periaatetta. Vaikka uuden satelliittivaunun rakennetta pelkistetään, asettaa satelliittivaunu uusia vaatimuksia nostovauunun rakenteeseen. Rungon massa nouseekin erilaisen runkogeometrian, laitteiden ja rakennevaatimusten myötä 18,77 prosenttia. Uuden satelliittivaunun rakenne kevenee 15,13 prosenttia alkuperäiseen satelliittivaunuun verrattuna. Kokonaisuudessaan hyllystöhissin rakennetta saadaan kevennettyä 25,43 prosenttia.

Nostokoneisto on kustannuksiltaan kallein hyllystöhissin ostokomponentti. Rakennemuutoksien myötä nostokoneiston suoritusvaatimus pienenee 20 prosenttia. Nostokoneistoksi voidaan valita pienemmän kokoluokan sähkömoottori ja teollisuusvaihde. Muutoksen kautta saadaan säästettyä nostokoneiston hankinnassa 22,03 prosenttia. Ajokoneiston suoritusvaatimukset pienenevät myös hyllystöhissin rakennemuutoksien myötä. Prosentuaalinen muutos on 24,04 prosenttia. Ajokoneistoiksi voidaan valita pienemmän kokoluokan vaihdemoottorit, joista kertyy säästöä 8,7 prosenttia. Muutoksien jälkeen hyllystöhissin kokonaissäästöksi saadaan yhteensä 24,59 prosenttia.

8 Yhteenveto

Aiheen laajuuden ja yrityssalaisuuksien suojelemisen vuoksi satelliittivaunun muutoksien laskelmia ja kustannuksien eroja ei voida esittää tässä opinnäytetyössä tarkasti. Tästä johtuen kaikki tulokset esitetään konkreettisten lukujen sijaan prosentuaalisesti.

Lattiapinta-alan säästöllä saadaan tehostettua korkeavaraston jo ennestään tehokasta tilankäyttöä. Teollisuudessa tämä tarkoittaa kallisarvoista tonttipinta-alaa, joka voidaan kohdentaa muuhun toimintaan. Automaattinen varastointijärjestelmä on kokonaisuus, jonka valmistusta ja toimintaa optimoimalla voidaan saada merkittäviä hyötyjä myös kustannuksissa.

Hyllystörakenteen muutoksen vaikutuksia on vaikea määrittää, koska jäykisteristikon ja kattotuolien muutos täytyisi varmistaa hyllystörakenteen laajamittaisten laskelmien avulla. Hyllypilarin profiilin pienentämisellä saataisiin aikaiseksi hieman lisää säästöjä, mutta myös profiilin muutoksen laskentaan täytyisi sisältää koko hyllystörakenteen laskennan kantavuuden lisäksi muun muassa ulkoisten voimien, kuten esimerkiksi lumi- ja tuulikuormien, vaikutukset.

Satelliittivaunumuutoksen vaikutus koko järjestelmän kustannuksiin on vähäinen. Rahallisesti suurin säästö muutoksien jälkeen saadaan perustuksien kustannuksista, johtuen pienemmästä rakennuspinta-alasta.

Opinnäytetyössä käsiteltävien tuloksien perusteella automaatiojärjestelmän satelliitti-vaunun muutoksella saadaan aikaan säästöä hyllystöjärjestelmän kustannuksissa. Prosentuaalisesti säästö ei ole merkittävä, mutta suuremmissa järjestelmissä absoluuttisesti huomionarvoinen.

Lähteet

- 1 Karhunen, Jouko; Lassila, Veikko; Pyy, Seppo; Ranta, Aarno; Räsänen, Satu; Saikkonen, Matti & Suosara, Eero. 2002. Helsinki: Otatieto Oy.
- 2 Verkkoaineisto. Pesimal Oy. <<https://pesimal.com>>. Luettu 16.11.2020.