

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikka

2025

Sami Koivisto

# Ilmankäätölaitteen alarungon rakenteen tuotekehitys

– Valmet Technologies Oy



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka

2025 | 58 sivua

Sami Koivisto

# Ilmankäntölaitteen alarungon rakenteen tuotekehitys

- Valmet Technologies Oy

Tämän toiminnallisen opinnäytetyön tarkoitus oli kehittää Valmet Technologies Oy:n paperikoneiden ilmankäntölaitteen rakennetta paremmaksi toimeksiantajan määrittelemien kriteerien ja tavoitteiden mukaan. Kehitystyö toteutettiin 3D-mallinnuksen ja FEM-analyysien avulla, suunnittelemalla rungon rakenne Catia-ohjelman avulla ja varmentamalla uuden rakenteen riittävä lujuus FEM-laskennalla Ansys-ohjelmaa käyttäen.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin kehitettyä ilmankäntölaitteelle uusi yksinkertaisempi rakenne, jonka seurauksena valmistus-, huolto- ja materiaalikustannuksia saatiin pienennettyä. Uuden rakenteen soveltuvuus käyttötarkoitukseen ja -ympäristöön varmennettiin toimeksiantajan vaatimuslistan ja FEM-analyysin avulla. Kuitenkin työn lopuksi todettiin, että tarkemmat laskelmat ja analyysit ovat suotavia varmistamaan tuotteen soveltuvuus ja kesto, jotta varmistetaan kaikki toimeksiantajan vaatimukset.

Toimeksiantajan liikesalaisuuksien takia useimmat ilmankäntölaitteeseen liittyvät ratkaisut, 3D-mallit ja kuvat ovat liitteinä ja salattu lopullisesta julkaisusta.

Asiasanat:

Tuotekehitys, FEM, Elementtimenetelmä, Finite Element Method, paperiteollisuus, paperikoneet.

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

2025 | 58

Sami Koivisto

## Product development for improving the structure of a contactless web turning unit

- Valmet Technologies Oy

This functional thesis aimed to further develop the contactless web turning units structure for Valmet Technologies Paper machines according to the criteria defined by the product owner. Product development was implemented with 3D cad modelling and Finite Element Method analysis, by designing the structure of the frame with Catia software and using Ansys software to confirm the validity of the structure with the FEM analysis.

As a result of this thesis a new simpler structure was created for the contactless turning unit that leads to less expenses in manufacturing, maintenance and materials for construction. The suitability of the new structure was evaluated by confirming the requirement list of the product owner and using a FEM analysis.

It must be, however, acknowledged that further calculations and analysis is recommended to ensure the suitability of the product and its durability, so that it can be guaranteed to fulfill all the requirements.

Due to the product owners commercial secrets, most data related to the contactless turning unit is added as attachments and hidden from the final publication.

Keywords:

Product development, Fem, Finite Element Method, Paper technology, Paper machines.

# Sisältö

<b>Käytetyt lyhenteet tai sanasto</b>	<b>7</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>8</b>
<b>2 Valmet Technologies Oy</b>	<b>9</b>
<b>3 Paperin valmistus</b>	<b>10</b>
3.1 Paperin jälkikäsittely	11
3.2 Päällysteen kuivatus	13
3.3 Kääntölaite	16
<b>4 Tuotekehitys</b>	<b>20</b>
4.1 Tuotesuunnittelu	23
4.2 Vaatimuslista, tavoitteet ja suunnittelun lähtötilanne	25
4.3 Materiaali	26
<b>5 FEM ja lujuusoppi</b>	<b>29</b>
<b>6 Ilmankääntölaitteen tuotekehitys</b>	<b>34</b>
6.1 ilmankääntölaitteen toiminta (vaatimuslista)	36
6.2 Ilmankääntölaitteen uusi rakenne	37
6.2.1 Alarunko	37
6.2.2 Kansi	39
6.2.3 Säättölevyt	39
6.2.4 Suuttimet	40
6.2.5 Uuden rakenteen edut	41
<b>7 Lujuustarkastelu FEM</b>	<b>43</b>
7.1 Ansys Mechanical ja Spaceclaim -ohjelmien käyttö	43
7.2 Tulokset	48
<b>8 Yhteenveto</b>	<b>54</b>

## Liitteet

Liite 1. Kääntölaitteen nykyinen rakenne (Poistettu julkaisusta)

Liite 2. Kääntölaitteen uusi rakenne (Poistettu julkaisusta)

Liite 3. Kääntölaitteen FEM-analyysi (Poistettu julkaisusta)

## Kuvat

Kuva 1, Valmetin paperikone (Valmet 2024e).....	10
Kuva 2, Paperin päällystyksen ominaisuudet (Taitotalo 2025).....	12
Kuva 3, kuivatuksen vaiheet (Taitotalo 2025). ....	14
Kuva 4, Valmetin ilmakeivaimet (Taitotalo 2025). ....	15
Kuva 5, Valmetin suuttimet (Valmet 2024f).....	16
Kuva 6, ilmankäätölaitteen sijainti (Taitotalo 2025).....	17
Kuva 7, ilmankäätölaite (Taitotalo 2025).....	18
Kuva 8, ilmankäätölaite paperilinjalla (Taitotalo 2025).....	19
Kuva 9, Ulrich-Eppinger Tuotekehitysprosessin malli (mukaillen Hietikko, 2021, 47).....	20
Kuva 10, Tuotekehitysprojektin vaiheet (Hannus, 2022, 11 ja Jokinen, 2001, 16).....	22
Kuva 11, Ansys Workbench.....	44
Kuva 12, Kannen verkotus.....	46
Kuva 13, päätylevyn verkotus.....	47
Kuva 14, taipuma kannessa.....	49
Kuva 15, alarungon taipuma sisältä.....	49
Kuva 16, taipuma suuttimien kanssa (kansi piilotettu).....	50
Kuva 17, lommahdus.....	50
Kuva 18, pistehitsien jännitys.....	51
Kuva 19, akselin jännitys.....	51

Kuva 20, kanavan jännitys .....	52
---------------------------------	----

## **Taulukot**

Taulukko 1, painot	48
--------------------	----

## Käytetyt lyhenteet tai sanasto

Lyhenne	Lyhenteen selitys
3D-malli	Parametrinen malli, joka on tehty CAD ohjelmistolla ja jota voidaan käyttää valmistettavan tuotteen tarkasteluun, suunnitteluun ja valmistamiseen
Ansys	Yhdysvaltalainen ohjelmistoyhtiö, jonka tietokonesimulointiohjelmilla Ansys Spaceclaim ja Ansys Mechanical voidaan tehdä mm. FEM/FEA -laskentaa
CAD	Computer Assisted Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
Catia	Catia 3dExperience, Ranskalaisen Dassault Systèmes -yrityksen CAD ohjelmisto
DFA	Design For Assembly, kokoonpantavuuden huomioiva suunnittelu
DFM	Design For Manufacturing, valmistettavuuden huomioiva suunnittelu
FEA	Finite Element Analysis, elementtimenetelmää hyödyntävä analysointi
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
LWC	Light Weight Coated paper, paperinvalmistuksen tuotekategoria
Mesh	Verkotus, verkko joka muodostetaan analysoitavien osien pintaan elementtimenetelmässä
Raina	Vesipitoinen massa, josta paperi valmistetaan
Viira	Verkkomainen kangas joka kuljettaa paperirataa

# 1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä pyritään kehittämään ilmankääntölaitteen rakennetta yksinkertaisemmaksi, kevyemmäksi ja edullisemmaksi valmistaa. Opinnäytetyö on toteutettu toimeksiantona Valmet Technologies Oy:lle. Ilmankääntölaitteen rakenne juontaa juurensa 1960-luvulle ja sen eri osa-alueisiin on kehitetty erilaisia uudistuksia. Ilmankääntölaitteesta on jo aiemmin tehty opinnäytetöitä, joissa arvioidaan sen kustannusten muodostumista ja pyritään kehittämään kääntölaitetta. Nyt ilmankääntölaitteen alarunkoa halutaan uudistaa yksinkertaisemmaksi rakenteeksi, tavoitteena tehdä siitä edullisempi ja helpommin valmistettava, samalla tulisi kuitenkin säilyttää riittävä rakenteen jäykkyys, eikä laitteen toiminnallisuus saa heikentyä.

Ilmankääntölaitteen tehtävä paperikoneessa on mahdollistaa paperilinjan kuljetus ja kääntö kontaktittomasti ilmapatjaa hyödyntäen. Kontaktitonta kääntämistä (contactless turning) tarvitaan kun paperi pinnoitetaan ja linjan kulkusuuntaa halutaan muuttaa koskematta paperin pintaan, näin mahdollistetaan riittävän pitkä kuivumisaika paperin pinnoitukselle. Linjan kääntäminen mahdollistaa paperikoneen eri osien monipuolisemman sijoittelun ja näin paperikoneen kokonaistilaravetta saadaan pienennettyä ja tila hyödynnettyä tehokkaammin.

Yksinkertaistamalla rakennetta on mahdollista saada tuotannon kustannuksia ja tuotantoaika lyhennettyä, sekä mahdollisesti myös helpotettua tuotteen korjausta ja ylläpitoa. Käyttämällä vähemmän materiaalia valmistukseen tuemme myös kestävä kehitystä.

Rakenteen tuotekehitys toteutettiin suunnittelemalla ilmankääntölaitteen alarungosta 3D-malli joka täyttää toimeksiantajan vaatimukset mm. materiaalin, mittojen, rakenteen ja eri osien sijoittelun osalta. Valmiin, kriteerit täyttävän 3D-mallin riittävä lujuus ja jäykkyys varmistetaan FEM-analyysin avulla.

## 2 Valmet Technologies Oy

Valmetilla on yli 220 vuoden teollinen historia. Valmetin juuret ulottuvat 1750-luvulle. Vuona 1946 useita Suomen valtion metallitehtaita yhdistyivät Valtion Metallitehtäiksi ja vuoden 1951 alussa nimi muuttui Valmet Oy:ksi. (Valmet 2024a.)

Valmet aloitti paperikoneiden valmistuksen entisellä tykkitehtaallaan Rautpohjassa 1950-luvun alussa ja toimitti ensimmäisen paperikoneensa vuonna 1953. Valmet keskittyi yhä voimakkaammin paperikoneisiin ja niihin liittyvään teknologiaan 1980- ja 1990-luvuilla. (Valmet 2024a.)

Nykyään Valmetin missio on muuntaa uusiutuvat raaka-aineet kestäviksi tuloksiksi ja kehittää teollisia prosesseja paremmiksi. Valmetin tuote- ja palveluvalikoima perustuu johtavaan teknologiaan ja jatkuvaan kehittämiseen. Joka vuosi valmet tuo markkinoille noin sata uutta tuotetta. Valmetin innovointiprosessiin kuuluu kiinteästi kriteereitä, jotka varmistavat kehitystoiminnan vastuullisuuden, turvallisuuden ja lainmukaisuuden. (Valmet 2024b.)

Maailmanlaajuisesti Valmet on johtava kartonki- paperi- ja pehmopaperikoneiden valmistaja. Noin 40% maailman papereista ja kartongeista on valmistettu Valmetin koneilla. (Valmet 2024c.)

Vuosien mittaan Valmet on toimittanut yli 700 kartonkikonetta, 900 paperikonetta ja yli 300 pehmopaperikonetta asiakkailleen. (Valmet 2024d.)

### 3 Paperin valmistus

#### Paperikoneen tyypilliset ominaisuudet

##### Koko

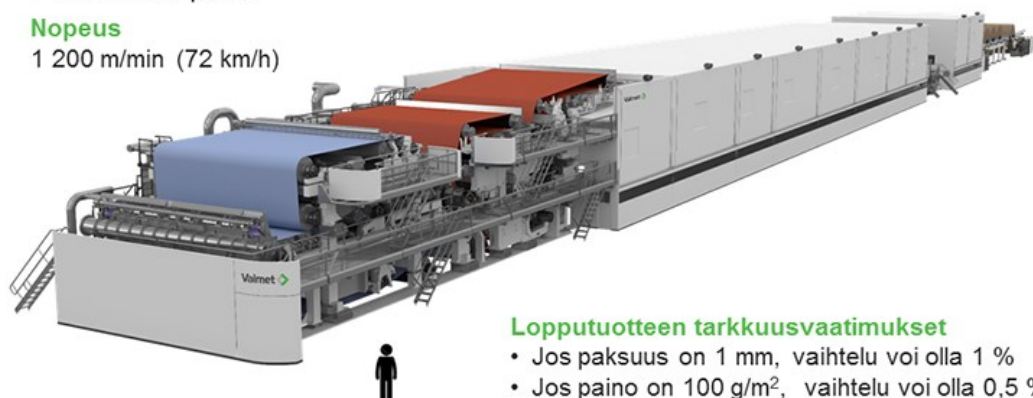
Leveys 7 m, pituus 140 m

##### Tuotanto

1 050 tonnia / päivä

##### Nopeus

1 200 m/min (72 km/h)



##### Lopputuotteen tarkkuusvaatimukset

- Jos paksuus on 1 mm, vaihtelu voi olla 1 %
- Jos paino on 100 g/m<sup>2</sup>, vaihtelu voi olla 0,5 %



Kuva 1, Valmetin paperikone (Valmet 2024e).

Paperin ja kartongin valmistusprosessi alkaa massan ja rainan muodostuksesta. Rainanmuodostusosa muuttuu paperi- ja kartonkilajin vaatimusten mukaan eri konekonsepteissa, kuvassa 1 näkyy tyypillinen Valmetin paperikone ja sen ominaisuuksia (Valmet 2024e). Paperin valmistuksessa voidaan käyttää erilaisia puukuituja, joiden rakenne ja ominaisuudet määräytyvät mm. puulajin mukaan, paperin valmistuksessa käytetään kymmeniä eri puulajeja. Eri puulajit sisältävät erilaisia kuituja ja niitä käytetään eri tarkoituksiin, esimerkiksi havupuut sisältävät pidempiä kuituja ja mahdollistavat vahvemman paperin valmistuksen. (Taitotalo 2025.)

Paperin tai kartongin valmistusprosessissa sekoitetaan raaka-ainekomponentit vesipitoiseksi massaksi ja tämä massaseos levitetään massarainaksi, jota lujitetaan poistamalla siitä vettä suotauttamalla. Kuiduista ja vedestä muostuu

yhtenäinen pitkä ja ohut matto, josta poistetaan vettä mm. puristamalla ja kuivattamalla. (Taitotalo 2025).

Rainaa puristetaan ja haihdutetaan, jolloin veden poistuessa rainasta muodostuu kuivaa tuotetta. Viiraosassa rainasta poistetaan vettä suodattamalla se viirakudoksen läpi. Rainan tulee saavuttaa riittävän korkea kuiva-ainepitoisuus, jotta se saadaan siirrettyä viiralta puristimelle ja puristinosassa saavutetaan hyvä ajettavuus. (Taitotalo 2025.)

Viiran jälkeen raina siirtyy puristimille, joissa vettä poistetaan puristamalla ja tiivistetään samalla rainaa parantaen kuitujen sitoutuimista. Puristimien avulla saavutetaan riittävä korkea kuiva-ainepitoisuus ja märkälujuus, jotta raina saadaan siirrettyä kuivausosalle ilman katkoksia. (Taitotalo 2025.)

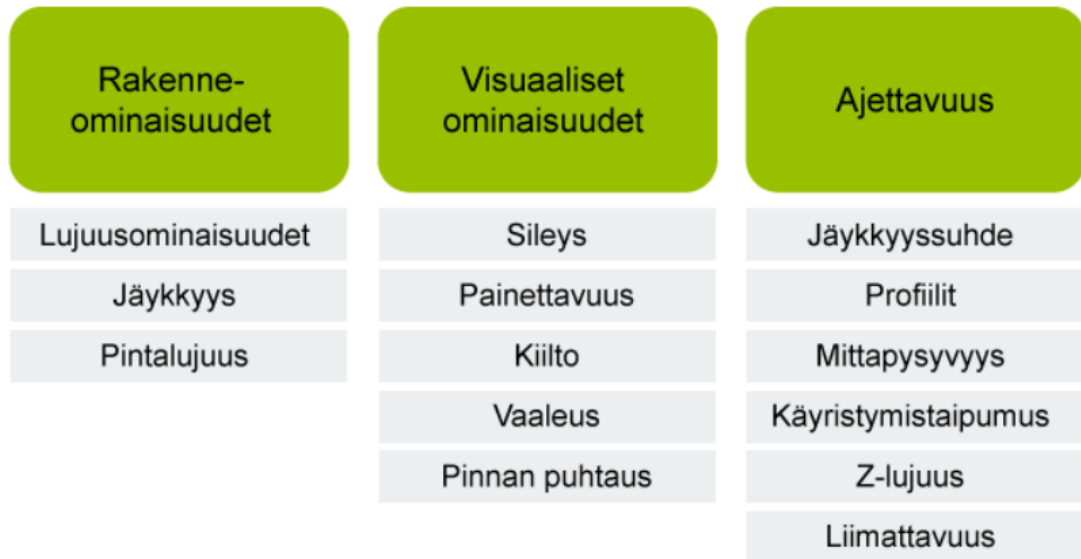
Kuivatusosalla rainasta haihdutetaan pois vesi, joka ei ole poistunut viira- ja puristinosalla. Paperin kuivatuksessa käytetään eri menetelmiä, yleisimmät ovat kontaktikuivatus, puhalluskuivatus ja säteilykuivatus. Kuivatuksessa vesi haihdutetaan pois radasta ja ilman avulla pois radan läheisyydestä. Kuivatuksen jälkeen paperi tai kartonki siirtyy jälkikäsittelyyn joka riippuu valmistettavan tuotteen lajista ja vaatimuksista. Tyypillisesti kaikille tuotteille tehdään leikkaus ja tarvittavat rullaukset, vaatimusten mukaan tuote voidaan päällystää, pintaliimata tai pigmentoida. (Taitotalo 2025.)

Paperin ja kartongin valmistus on jatkuva prosessi, josta saatava lopputuote on valmis jälkikäsittelyprosesseja varten (Taitotalo 2025).

### 3.1 Paperin jälkikäsittely

Paperin jälkikäsittelyllä on suuri merkitys paperin lopulliseen laatuun ja ominaisuuksiin.

## Keskeiset päällystyksellä vaikutettavat paperin ominaisuudet



Kuva 2, Paperin päällystyksen ominaisuudet (Taitotalo 2025).

Paperin ja kartongin pintakäsittelymenetelmät voidaan jakaa kolmeen eri menetelmään: pintaliimaus, pigmentointi ja päällystys. Pigmenttipäällystyksen tarkoitus on parantaa tuotteen painettavuutta ja ulkonäköä. Tärkeimmät ominaisuudet joihin päällystäminen vaikuttaa, ovat yllä kuvassa (kuva 2) mainitut visuaaliset ominaisuudet, kuten sileys, painettavuus ja kiilto. (Taitotalo 2025.)

Päällystettäessä paperin tai kartongin pintaan levitetään päällystyspasta, joka voidaan levittää vain toiselle puolelle tai molemmille puolille. Pasta sisältää pigmenttiä, sekä sideainetta ja sitä levitetään paperin tai kartongin päälle ylimäärin. Päällystemäärä säädetään sopivaksi poistamalla ylimääräinen pasta. Päällysteen säädön jälkeen päällyste vielä kuivataan. (Taitotalo 2025.)

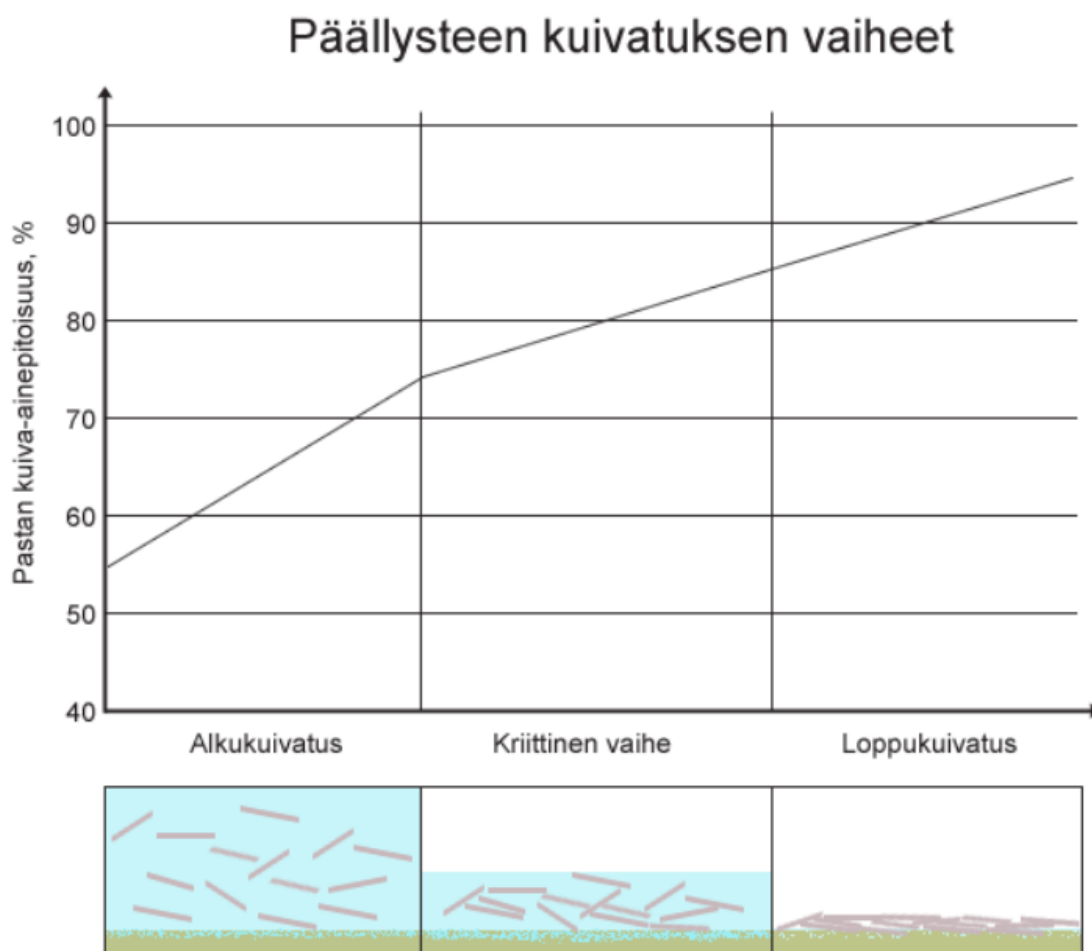
Pintaliima ei sisällä lainkaan pigmenttiä ja pigmentoinnissa pintaan siirtyvä päällystemäärä on hyvin pieni. Päällystyksen jälkeen paperi siirtyy kuivaukseen. (Taitotalo 2025.)

### 3.2 Päällysteen kuivatus

Päällystyspastan kuiva-aine pitoisuus vaihtelee välillä 40-70%, tämän seurauksen rainan kosteus nousee aina päällystysasemalla, joten rainasta täytyy taas poistaa ylimääräinen vesi. (Taitotalo 2025.)

Kuivatus on yksi tärkeimmistä päällistykseen osaprosesseista, ja vaikuttaa suoraan tuotannon taloudellisuuteen ja lopputuotteen laatuun. Yleisimmät päällysteen kuivauslaitteet ovat: ilmakeivaimet, infrapunakeivaimet ja sylinterikeivaimet. (Taitotalo 2025.)

Märän päällystekerroksen siirtyessä päällistyksestä kuivausosastolle, alkaa päällystekerroksen lopullinen rakenne ja paperin ominaisuudet muodostua. Useissa tutkimuksissa on todettu, että paperin päällysteen kuivausstrategialla on vaikutusta päällysteen ominaisuuksiin. Päällysteen kuivaus voidaan jakaa eri vaiheisiin, sen mukaan miten se vaikuttaa lopulliseen rakenteeseen. Kuvassa 3 esitetään nämä 3 eri vaihetta: alkukeivatus, kriittinen vaihe ja loppukeivatus. (Taitotalo 2025.)



Kuva 3, kuivatuksen vaiheet (Taitotalo 2025).

Mahdollisimman nopea alkukuivatus vähentää monia negatiivisia laatuvaikutuksia. Ilmakuivaimet ovat helpoin tapa toteuttaa alkukuivatus, sillä ne tarjoavat tehokkaan ja kontaktittoman kuivauksen päällysteelle. (Taitotalo 2025.)

Kontaktittomat leijukuivattimet puhaltavat kuumaa ilmasuihkua suurella nopeudella ja tämä ilmapuhallus kannattaa ja stabiloi rataa niin, että kuivattimen osat eivät kosketa rataa. (Taitotalo 2025.)

Alipaineella toimivat kuivattimet puhaltavat foilin pinnan suuntaisesti ilmaa, jolloin paperin ja suuttimen välinen ilmanpaine laskee ja paperi asettuu stabiilista lähelle suuttimien pintaa. Ylipaineella toimivat kuivattimet muodostavat puhalluksella ilmatyynyn, eli staattisen ylipaineen suuttimien ja

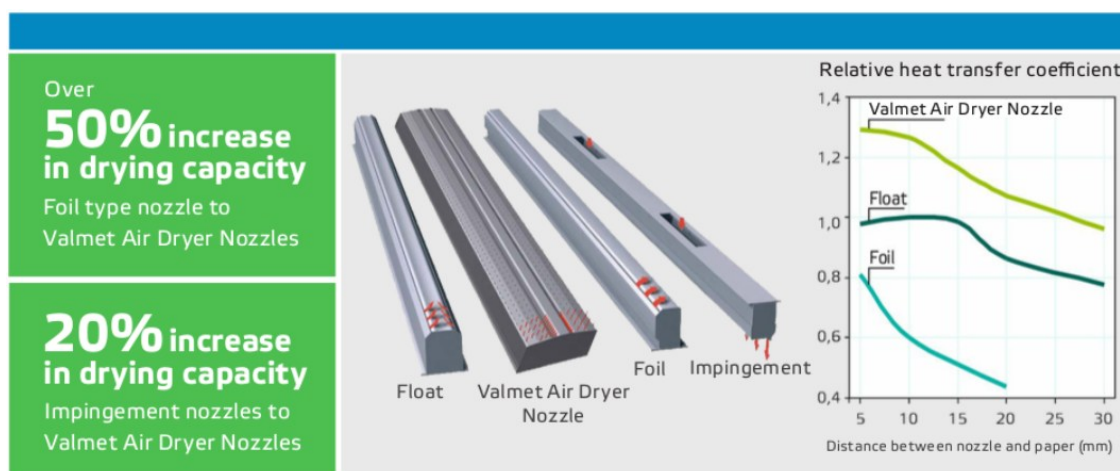
radan välille. Kuvassa 4 näkyy erilaisia Valmetin ilmakeivaimia ja niiden ominaisuuksia, erilaisia kuivaimia käytetään eri paperityypeille tarpeen mukaan. Kuivaintyyppien lisäksi ilmakeivaimissa käytetään kolmea eri suutinta: Float-, Foil- ja päällepuhallussuuttimia. Päällepuhallussuuttimia käytetään yksipuolisissa kuivaimissa, joissa kuuma ilma kohdistetaan vain yhteen paperin pintaan, kun taas Float- ja Foil -suuttimia käytetään kaksipuolisissa ilmakeivaimissa, joissa paperin molemmat puolet kuivataan yhtä aikaa. (Taitotalo 2025.)

### Valmetin ilmakeivaintuoteperehe päällysteen kuivatukseen



Kuva 4, Valmetin ilmakeivaimet (Taitotalo 2025).

Kuvassa 5 kuvataan valmetin eri ilmakeivaimien suuttimia ja niiden ominaisuuksia. Valmetin ilmakeivaimissa käytetään patentoituja ilmakeivaussuuttimia, jotka on suunniteltu erityisen korkeaan kuivauskapasiteettiin. Valmet on tehnyt useita suutinpäivityksiä olemassaoleviin kuivaimiin, ei pelkästään vain Valmetin omiin, vaan myös muiden valmistajien kuivaimiin. (valmet 2024f.)



\*earlier known as PowerFloat Plus Nozzles

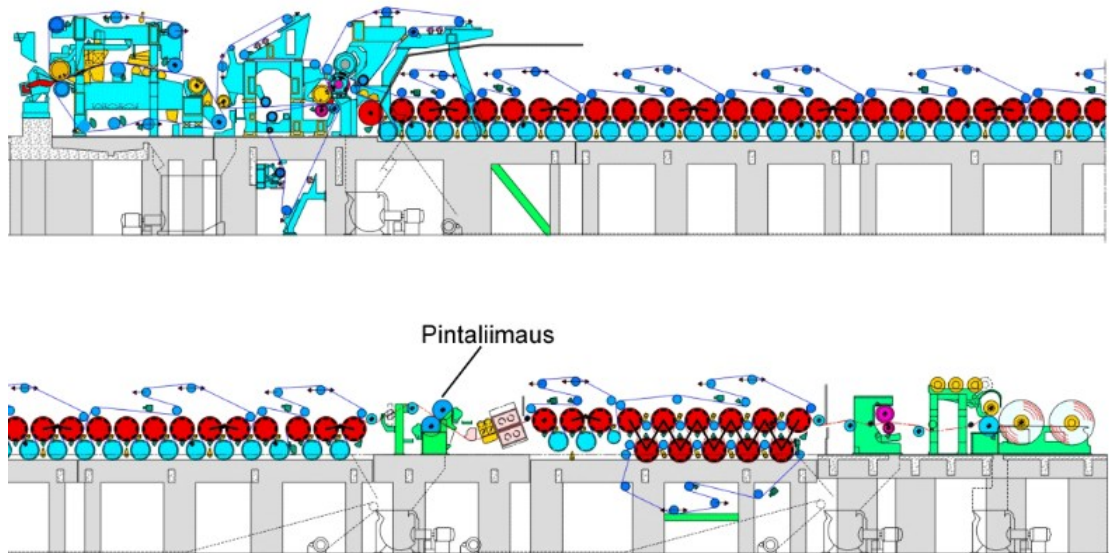
Kuva 5, Valmetin suuttimet (Valmet 2024f).

### 3.3 Kääntölaite

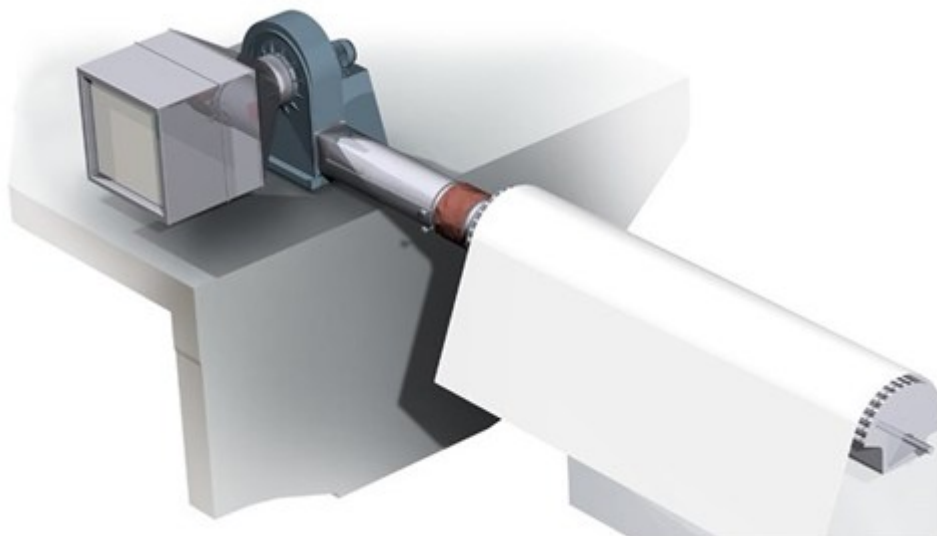
Kääntölaitteita on käytetty 1980-luvulta lähtien. Kääntölaitetta käytetään erilaisissa kosketuksettomissa rainankääntösovelluksissa aina ohuista papereista päällystettyihin kartonkilaatuihin. Valmet ilmankääntölaite käyttää ylipaineen muodostamaa ilmatyynyä, joka kehitetään kääntölaitteiston ja rainan väliin. Raina pystytään kääntämään ilman kosketusta tämän ilmatyynyn avulla. (Taitotalo 2025.)

Vaikka kääntölaitteella on hyvin samankaltainen rakenne ja käyttää samoja suuttimia kuin kuivaimet, ei kääntölaite varsinaisesti ole kuivain, vaan sen toiminta perustuu radan ja laitteen väliseen ilmapatjaan, joka muodostetaan puhaltamalla laitteen kammioihin ilmaa luoden näin staattisen ylipaineen radan

ja suuttimien välille. Kuvassa 6 on tyypillinen sijainti ilmankäätölaitteelle paperikoneessa, jossa pintaliimauksen jälkeen paperia tulee alkukuivata kosketuksettomasti. (Taitotalo 2025.)



Kuva 6, ilmankäätölaitteen sijainti (Taitotalo 2025).

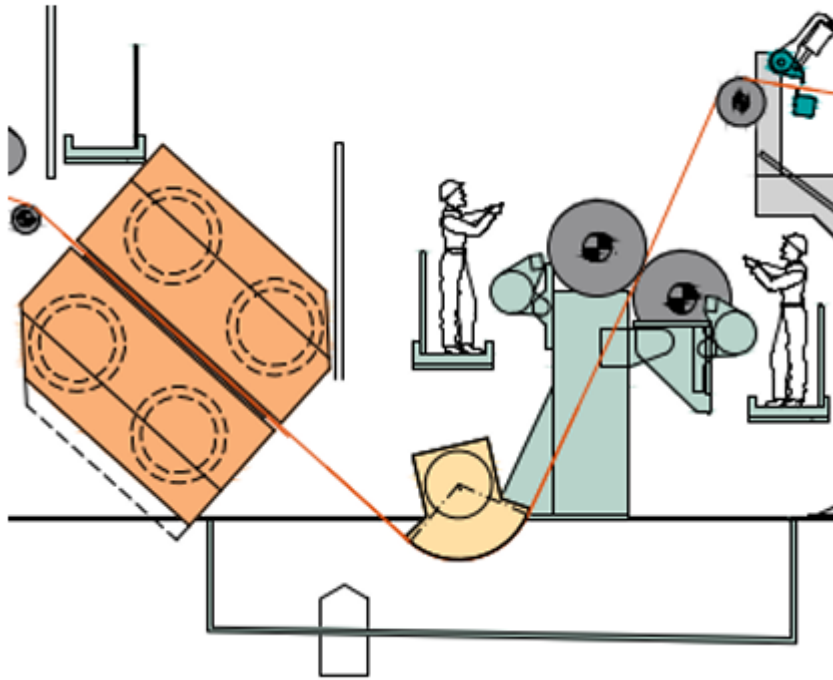


Kuva 7, ilmankäätölaite (Taitotalo 2025).

Kuvassa 7 näkyy ilmankäätölaite ja sen toiminta, käytännössä paperin ja suuttimien välillä on ilmapatja, ja tyypillisesti ilmankäätölaitteen asento paperikoneessa päinvastainen, kuten kuvassa 8 näkyy: suuttimet ovat tyypillisesti alaspäin.

Suurimmat hyödyt ilmankäätölaitteen käyttämisessä ovat jatkuva tasainen etäisyys suuttimien ja paperilinjan välillä, sekä ilmanpaineen säätömahdollisuus. Lisäksi järjestelmä tarjoaa automaattisen tasaisen välyksen hallinnan ja helpottaa kireyden ja juoksevuuden optimointia. (Valmet 2024c.)

Anttalaisen (2022) mukaan (ks. Valmet 2022) käntölaitetta käytetään tyypillisesti pintaliimauksen jälkeen, esimerkiksi molemminpuolisessa filminsiirtopäällystyksessä radan kulkusuunta täytyy pystyä kääntämään ja alkukuivaus täytyy suorittaa kokonaan kosketuksettomasti. Kuvassa 8 esitetään käntölaitteen tavanomainen sijainti paperikoneessa, tässä rata kulkee oikealta vasemmalle: päällystyksestä kontaktittomasti pintakuivaukseen.



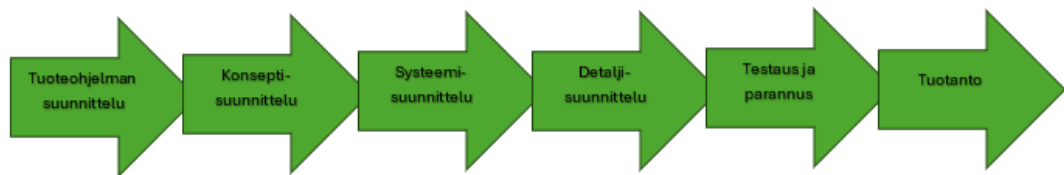
Kuva 8, ilmankäätölaite paperilinjalla (Taitotalo 2025).

Ilmankäätölaitteesta on tehty aiempia opinnäytetöitä mm. Anttalaisen (2022) ja Ollikaisen (2024) toimesta. Osa tämän opinnäytetyön tavoitteista pohjautuu aiempiin tuloksiin ja tutkimuksiin. Anttalanen (2022, 55-56) on todennut että käätölaitteen kustannuksista noin 60% kohdistuu runkoon ja näin ollen selkeimmät säästöt saadaan rungon rakenteen yksinkertaistamisesta. Ollikainen (2024) on omassa opinnäytetyössään jo kehittänyt ja tutkinut käätölaitteen ylärungon rakenteen yksinkertaistamista, jonka takia tämä opinnäytetyö keskittyy loppurakenteen (tässä alarunko) kehittämiseen ja yksinkertaistamiseen. Koska ilmankäätölaite on kuitenkin yksi laitekokonaisuus joka on tuettu molemmista päistä, tuli lujuustarkastelua varten 3D-mallinnuksessa huomioida ja muokata muuta rakennetta yhteensopivaksi kokonaisuudeksi joka täyttää toimeksiantajan laitteelle asetetut vaatimukset. Ilmankäätölaitteen rakennetta käsitellään tarkemmin kappaleissa 6 ja 7.

## 4 Tuotekehitys

Jokisen (2001, 14) mukaan tuotekehityshanke voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen: käynnistäminen, luonnostelu, kehittäminen ja viimeistely.

Vastaavasti Ulrich-Eppingerin tuotekehitysprosessin malli jakautuu kuuteen eri vaiheeseen, kuten kuva 9 näyttää.



Kuva 9, Ulrich-Eppinger Tuotekehitysprosessin malli (mukaiillen Hietikko, 2021, 47).

Hietikko (2021, 45) toteaa, että tuotekehitysprosessin sijasta voidaan nykyään myös puhua tuotekehitysprojektista, silloin kun kyseessä on selkeästi projektimainen toteutus tavoitteineen, resursseineen ja aikatauluineen.

Hietikko (2021, 47-48) avaa Ulrich-Eppingerin tuotekehitysprosessin vaiheita seuraavasti:

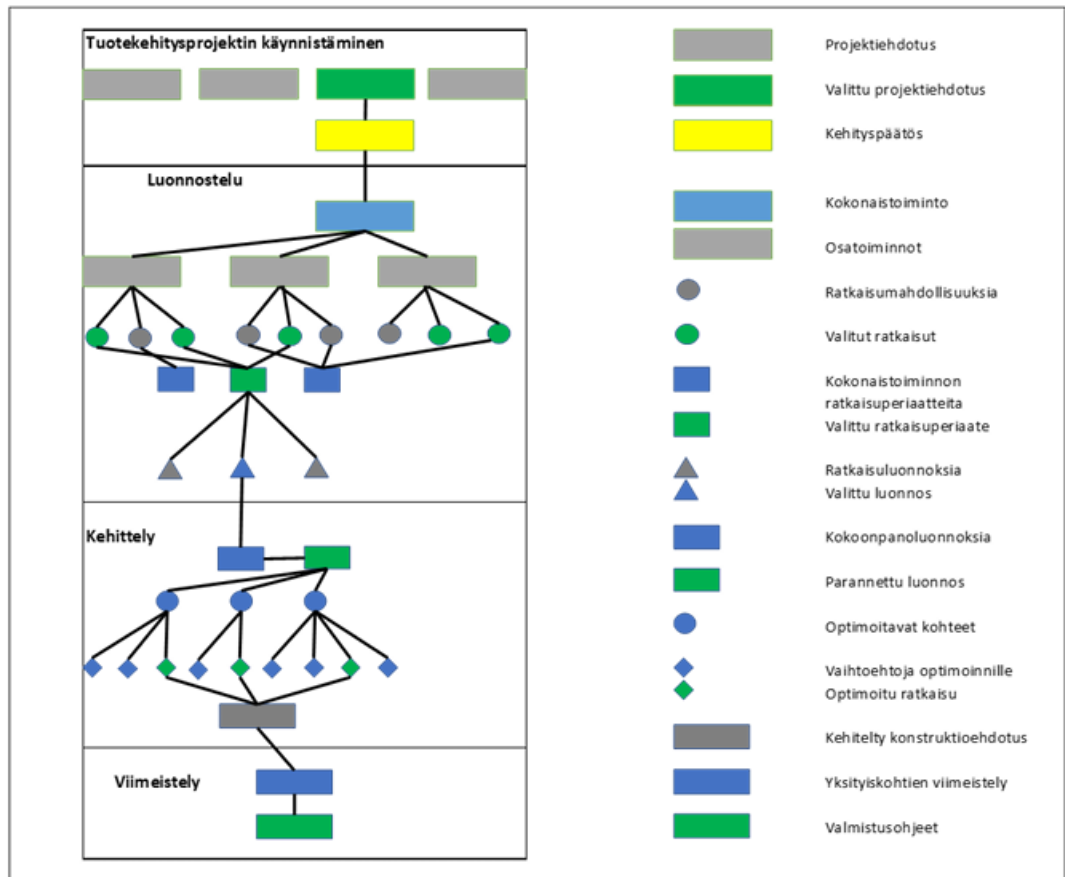
1. Tuoteohjelman suunnittelu: tuotekehitysprojekti asetetaan niin, että se on linjassa yrityksen tuotestrategian kanssa, samalla asetetaan reunaehdot ja tavoitteet projektille.
2. Konseptisuunnittelu: selvitetään asiakkaan tarpeet ja toivotut tuuteominaisuudet, lisäksi suoritetaan mahdollinen benchmarkkaus, eli kilpailijoiden arviointi.
3. Systeemis suunnittelu: pohditaan mallin arkkitehtuuria, tuoterakennetta ja modulointia, niin että saadaan täytettyä mahdollisimman hyvin aiemmin määritellyt asiakkaan tarpeet.
4. Detaljis suunnittelu: suunnitellaan osat ja kokoonpanot, sekä määritellään materiaalit ja valmistustavat.

5. Testaus: tässä vaiheessa tuotteesta tulee olla jo prototyyppi, mutta se voi olla myös esimerkiksi pienoismalli tai tietokonemalli. Tarkoitus on testata, että tuote toimii halutulla tavalla ja on riittävän edullinen valmistaa.
6. Tuotteen lanseeraus ja tuotannon käynnistäminen: koe-, eli 0-sarjan valmistamien, jolla testataan tuotantoa ja koulutetaan työntekijöitä.

Hannus (2022, 19) toteaa, kuten Hietikkokin yllä, että Ulrich-Eppingerin tuotekehitysprosessin mallissa detaljisuunnittelussa tuotteen osat ja kokoonpano saatetaan loppuliseen muotoon ja samalla selvitetään materiaalit ja valmistusvaiheet, sekä mahdolliset valmistusmenetelmät. Parannus- ja testausvaiheeseen siirryttäessä on tuotteesta jo oltava jonkinlainen prototyyppi, kuten yllä mainittiin, se voi olla myös tietokonemalli, pienoismalli tai joku muu vastaava.

Nämä vaiheet 4 ja 5, eli Detaljisuunnittelu ja Testaus, kuvaavat hyvin pitkälti sitä tuotekehityksen vaihetta, jota tässä opinnäytetyössä toteutetaan. Monet ilmankäätölaitteelle asetetut tuoteominaisuudet ja vaatimukset on jo määritelty toimeksiantajan puolesta, tai ne on jo rajattu aiemmissä opinnäytetyöissä Anttalaisen (2022) ja Ollikaisen (2024) toimesta.

Kuvassa 10 esitetään Jokisen (2001) näkemys tuotekehityksen eri vaiheista. Kuvasta ja eri vaiheiden sisällöstä voidaan todeta että tämä neljän vaiheen malli mukailee hyvin pitkälti Ulrich-Eppingerin mallia, jaottelu on vain toteutettu eri vaiheisiin.



Kuvio 1. Tuotekehitysprojektin toimintavaiheet (mukaillen Jokinen 2001, s. 16).

Kuva 10, Tuotekehitysprojektin vaiheet (Hannus, 2022, 11 ja Jokinen, 2001, 16).

Kuten Hietikon ja Ulrich-Eppingerin tuotekehityksen mallissa, myös Jokisen mallissa kehityskohteen ja ominaisuuksien rajausta on tehty pitkin tuotekehitysprojektia, ennen varsinaista kehittely tai detaljivaihetta. Valmetin työntekijöiden kanssa käytyjen keskusteluiden ja aiempien opinnäytetöiden perusteella ilmankäntölaitteen tuotekehitysprojektin ensimmäiset toimintavaiheet on jo käyty läpi: Benchmarkkausta on tehty kilpailijoiden vastaaviin laitteisiin, Valmetin omien laitteiden ominaisuuksia ja vahvuuksia, sekä kehityskohteita on pohdittu ja mm. opinnäytetöissä on selvitetty tuotteen valmistuskustannusten muodostumista (Anttalainen 2022) ja tuotteen kehitysmahdollisuuksia (Anttalainen 2022 ja Ollikainen 2024).

Jokisen mallissa (2001, 90-92) kehittelyn työvaiheet alkavat konstruktion tekemisellä, jonka lähtökohdaksi otetaan ratkaisuluonnos ja vaatimuslista. Tämän konstruktion suunnittelun tulos arvostellaan teknisten ja taloudellisten kriteerien mukaan ja tässä esiintulleita heikkoja kohtia ja ongelmia poistetaan suunnittelemalla kyseiset kohdat uudestaan. Näin päädytään paranneltuun konstruktoioon, jota tarkastellaan uudelleen ja tarkastelun tulosten mukaan joko kehitetään yhä pidemmälle, hyväksytään tai jopa hylätään kokonaan ja lähdetään etsimään uutta ratkaisua eri luonnoksen pohjalta.

Tämän opinnäytetyön tuotekehitysprosessi mukailee yllämainittuja detaljisuunnitteluvaihetta ja Jokisen (2001) kehittälyvaihetta, jossa tuote (konstruktio) käy läpi revisioita, joissa esiintulleita ongelmia pyritään poistamaan.

#### 4.1 Tuotesuunnittelu

Peren (2021, 25 – 1) mukaan tuotesuunnitteluprosessi koostuu perinteisesti seuraavista vaiheista:

- Tekninen vaatimusmäärittely
- Toimitorakenteen kuvaus
- Ratkaisuvaihtoehtojen hakeminen ja arviointi
- Toteutettavan ratkaisun valinta ja kehittäminen
- Tuotteen viimeistely

Pere (2021, 25 – 1) toteaa, että tekninen tuotesuunnittelu pyrkii tuottamaan teknisen ratkaisun joka täyttää asetetun vaatimuksen. Tämän lisäksi tuotekehityksessä tulisi ottaa huomioon myös seuraavia asioita:

- Valmistettavuus
- Kokoonpantavuus

- Muotoilu
- Palvelumuotoilu
- Asiakaskokemus
- Brändinhallinta
- Laatu
- Yhteensopivuus
- Standardinmukaisuus
- Ympäristö- ja eettiset ominaisuudet
- Immateriaalioikeudet, patentit
- Direktiivit esim. EU-konedirektiivi ja CE-merkintä
- Kustannustehokkuus
- Tuotetiedon hallinta

(Pere 2021, 25-1).

Peren (2021, 25-1) luettelo kuvaa hyvin kuinka tekninen suunnittelu on nykyään hyvin verkostoitunutta ja integroitunutta useaa eri asiantuntijaa ja eri alan toimijoita yhdistävää rinnakkaissuunnittelua. Perinteistä vuokaaviota suunnittelun etenemisestä eri osa-alueiden ja kautta on vaikeampi esittää.

Pere (2021, 25-1) myös totetaa, että tuotekehityksen kannalta on tärkeää, että konseptisuunnittelu tehdään huolellisesti: konseptisuunnittelu määrittää lähtökohdat tuotteen tekniselle suunnittelulle. Konseptisuunnittelussa tehdään kauaskantoisia päätöksiä, jotka voivat määrittää jopa 90% tuotteen loppukustannuksista.

Tuotekehitysprosessin helpottamiseksi ja erityispainotusten huomioon ottamiseksi on kehitetty niinkutsuttuja DFX-lähestymistapoja (Design for X). Tällaisia ovat muunmuassa:

- DFM – Design for Manufacturing – Valmistettavuuden huomioiminen suunnittelussa
- DFA – Design for Assembly – Kokoonpantavuuden huomioiminen suunnittelussa
- DFE – Design for Environment – Ympäristömyötäinen suunnittelu

Nämä DFX menetelmät eivät yleensä anna suoraan tarkkoja suunnitteluratkaisuja, vaan ovat ohjeita, jotka auttavat havaitsemaan suunnittelun kannalta oleellisia asioita. (Pere 2021, 25 – 2).

DFM:llä pyritään varmistamaan suunniteltavan tuotteen sujuva ja tehokas valmistettavuus. Detaljisuunnittelussa kukin valmistusmenetelmä aiheuttaa omat vaatimukset ja rajoitukset. DFM pyrkii huomioimaan nämä vaatimukset ja ohjeistaa esimerkiksi hitsausliitoksissa hitsien sijoittelua ja lämpöenergian vaikutusta materiaaleihin, tai tarjoaa muita ohjeita osien suunnitteluun. (Pere 2021, 25 – 2.)

DFA:lla tavoitellaan tuotteen kustannustehokasta kokoonpantavuutta. Tyypillisesti DFA:ssa tavoitellaan esimerkiksi itsensä paikoittavia rakenteita ja yhdenmukaisia osia, jotta kokoonpano on yksiselitteistä, nopeaa ja mahdollisimman helppoa. (Pere 2021, 25 – 3.)

DFM:llä ja DFA:lla pyritään aina mahdollisimman tuottaviin ratkaisuihin, mutta ei kuitenkaan tuotteen laatuvaatimusten kustannuksella (Pere 2021, 25 – 3).

#### 4.2 Vaatimuslista, tavoitteet ja suunnittelun lähtötilanne

Ilmankäntölaitteen uudelle rakenteelle, eli sen tuotekehitykselle asetettiin useita vaatimuksia, jotka pyrkivät osaltaan varmistamaan, että uusi rakenne soveltuu nykyiseen ympäristöön paperikoneessa, sekä materiaalin, että fyysisten mittojen ja toiminnallisuuden puolesta.

Ensisijaisesti tämä tarkoittaa, että tuote tulee valmistaa kosteuden ja korroosion kestävästä materiaalista, kuten nykyinenkin ilmankäntölaite, joka on

valmistettu AISI 304 ruostumattomasta teräksestä. Kaikki rakenteen kiinteät liitokset tulee olla ensisijaisesti hitsausliitoksia.

Näiden lisäksi ilmankäntölaitteelle määriteltiin useita fyysisiä ominaisuuksia ja mittoja, kuten laitteen ulkogeometria, joka ei saanut juurikaan muuttua nykyisestä mallista. Näitä 3D-malliin liittyviä rajoituksia ja vaatimuksia käsitellään tarkemmin kappaleissa 6 ja 7.

### 4.3 Materiaali

Käytettävä materiaali on toimeksiantajan taholta rajattu AISI 304:ään. Tämä on perusteltavissa mm. käyttöympäristön kosteuden ja lämpötilojen vuoksi (Taitotalo 2025 ja Anttalainen 2022, 26).

Yleisimät käytössä olevat ruostumattomat teräkset ovat austeniittisia ruostumattomia teräksiä, jotka sisältävät 17-18% kromia ja 8-11% nikkeliä, näillä teräksillä on pintakeskinen atomihila ja siitä johtuen ne ovat korroosion keston lisäksi hyvin hitsattavia ja sitkeitä. Hiiliteräksiin verrattuna austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä on parempi iskutietoisuus laajalla lämpötila-alueella. Rakenteissa ylivoimaisesti käytetyimpiä ruostumattomia teräksiä ovat austeniittiset ruostumattomat teräkset 1.4301/1.4307 ja 1.4404. (Teräsrakenneyhdistys, 2024, 2.)

Teräslaji 1.4301 tunnetaan myös nimellä AISI 304, se sopii hyvin vähäisen korroosiorasituksen teollisuusympäristöihin (Teräsrakenneyhdistys, 2024,4). Hitsattaviin osiin on yleensä syytä määrittää vähänhiilinen austeniittinen ruostumaton teräslaji. Tällainen matala hiilipitoisuus tarkoittaa pienempää riskiä herkistymiselle, eli kromikarbidiinien erkautumiselle ja raerajakorroosiolle hitsin lämmölle altistuneilla alueilla. Nykyaikaisilla tuotantomenetelmillä tuotettu teräs on usein vähähiilistä ja se voidaan merkitä ns. kaksoislajiksi, esimerkiksi 1.4301/1.4307, joka vastaa lujuudeltaan 1.4301:stä ja hiilipitoisuudeltaan 1.4307:aa. Aina ei voida kuitenkaan olettaa että käytetään kehittyntä

tuotantoteknologiaa ja siksi matala hiilipitoisuus vaaditaan erikseen kokoonpanoeritelmässä, varsinkin jos projekti vaatii hitsausta.

(Teräsrakenneyhdistys, 2024, 4-5.)

Ruostumattoman teräksen jännitys-venymäkäyttäytyminen eroaa hiiliteräksestä monella tavalla. Tärkein ero on jännitys-venymä kuvaajan muodossa. Hiiliteräs käyttäytyy tyypillisesti lineaarisesti myötörajaan asti ja sen jälkeen tasainen muokkauslujittumiseen asti on ruostumattoman teräksen käyttäytyminen epälinearisempi, eikä siinä ole selvästi määritettävää myötörajaa.

Ruostumattoman teräksen myötörajaksi määritellään yleensä tiettyä pysyvää venymää vastaava arvo, tyypillisesti tämä on 0,2% venymää vastaava jännityksen arvo. (Teräsrakenneyhdistys ry, 2024, 11.)

Ruostumattoman teräksen epälineaarinen jännitys-venymä-yhteys tarkoittaa, että poikkileikkauksessa ja sauvan pituussuunnassa kimmomoduulin arvo vaihtelee. Tämän takia ruostumattomasta teräksestä valmistettujen palkkien taipuman määrittämiseksi tarkasti tarvitaan vaativia epälineaarisia laskentamenetelmiä. (Teräsrakenneyhdistys, 2024, 84-85.)

Teräsrakenteiden ja hitsausliitosten kestävyys perustuu kokemukseen, testauksiin ja laskelmiin, eli lujuuslaskentaan. Suunnittelussa tulee selvittää erilaiset rakennetta rasittavat kuormat ja niiden suunnat, sekä selvittää ovatko kuormat liikkuvia vai paikallaan pysyviä. Hitsausliitosten osalta tulee miettiä minkälaisia hitsausliitoksia käytetään ja minkä kokoisia hitsejä tarvitaan, sekä tuleeko rakennetta muokata kestävämmäksi tai helpommaksi valmistaa. (Lepola ym. 2016, 361.)

Kääntölaitteen rakenteeseen muodostuu suljettu poikkileikkaus, jonka edut ovat samat kuin putkipalkeissakin todetut: suljettu poikkileikkaus kestää hyvin erisuuntaisia taivutuskuormia ja vääntölujuus on hyvä. Lepola (2016, 380) toteaa, että suljetulla poikkileikkauksella saavutetaan monimutkaisissa kuormitustilanteissa suurempi jäykkyys ja vaakasidonnan tarve on vähäinen avoimiin poikkileikkauksiin verrattuna. Suljettu poikkileikkaus auttaa kestävämmään vääntömomentin aiheuttamaan rasitusta. Suljetun poikkileikkauksen kulmat

pystyvät muokkauslujittumisen ansiosta ottamaan vastaan suuriakin vääntökuormituksia ennen pysyvää muodonmuutosta. (Lepola ym. 2016, 380.)

Teräsrakenteiden suunnittelussa on käytettävissä myös omat standardit, joissa määritellään näiden suunnittelussa käytettävät asiat. Lepolan (2016, 361) mukaan suunnittelussa voidaan pitää hyvänä lähtökohtana kolmea standardia: SFS 2373, SFS-EN 1993-1-9/AC ja SFS-EN5817.

Yllämainitut standardit keskittyvät hitsien mitoitukseen, ja niistä SFS 2373 on jo vanhentunut. Koska valmistus ja kokoonpanopiirustukset eivät kuuluneet tämän projektin laajuuteen, ei hitsien mittoja ole kovin tarkasti määritelty tässä vaiheessa. Hitsausliitoksia ja -menetelmiä on kuitenkin huomioitu suunnittelun yhteydessä kun osien kokoonpanoa ja liitoksia on pohdittu.

## 5 FEM ja lujuusoppi

Lujuusopissa analysoinnin ja suunnittelun kohdetta kuvataan niin sanottujen mekaniikan mallien avulla. Mekaniikan malleissa ongelmaa yksinkertaistetaan niin että se pystytään laskemaan, kuitenkin niin, että malli vastaa edelleen todellista tehtävää riittävän hyvin. Mekaniikan mallista johdetaan ongelman matemaattinen malli, joka sisältää matemaattisia yhtälöitä. (Salmi ym. 2010, 16.)

Periaatteessa rakenteen siirtymä-, jännitys- ja muodonmuutostila voidaan määrittää, jos rakenteen materiaalit, mitat ja materiaalivakioiden arvot, sekä kuormitus tunnetaan. Yleensä ratkaisut ovat niin monimutkaisia, ettei niille voi johtaa analyyttistä ratkaisua – vaikka tekisi oletuksia ja yksinkertaistuksia helpottamaan laskentaa. Yleensä rakenteen mitoittamista varten tarvittava kuormitustieto löytyy standardeista, nämä kuormituksen suunnittelukaavat ovat hyvin konservatiivisia ja johtavat ”turhan lujiin” ratkaisuihin. Tällainen turhan luja rakenne on yleensä painava ja kallis, näin ollen jos rakennetta haluaa keventää, tulee tuntee kuormitukset, joka puolestaan voi vaatia kokeita ja kuormien mittaamista. (Santaoja 2023, 379.)

Usein ongelman lujuusopillinen mekaniikan malli on niin monimutkainen, että sen matemaattisen mallin tarkka ratkaiseminen ei ole mahdollista tai tarkoituksenmukaista. Tällöin matemaattisesta mallista muodostetaan laskentamalli, jossa ongelma kuvataan valitun numeerisen algoritmin vaatimalla tavalla ja ratkaistaan tietokoneen avulla. (Salmi ym. 2010, 16.)

Lujuusopin tavoitteet ovat sovelluksissa ja ne ovat ohjanneet lujuusopin kehitystä. Alunperin lujuusoppia sovellettiin pääasiassa rakennustekniikassa, mutta teollisen kehityksen seurauksena lujuusoppia tarvittiin myös koneiden ja laitteiden suunnittelussa yhä enemmän. Lujuusoppi on seurannut paljon teollisuuden kehitystä ja 1800-luvulla lujuusoppi kytkeytyi paljon rautateiden tarpeisiin, 1900-luvulla kuljetusvälineisiin ja lentokoneisiin. Lentokone-, avaruus- ja ydinvoimatekniikassa mahdollisimman tarkkojen lujuuslaskelmien

tarve on korostanut erityisesti numeeristen menetelmien kehittämistä. (Salmi ym 2010, 22.)

Tietotekniikan valtava kehitys on antanut uusia mahdollisuuksia vaativien lujuusopillisten ongelmien ratkaisemiseen. Viime vuosikymmeninä on kehitetty tehokas numeerinen menetelmä, niinkutsuttu elementti menetelmä (FEM, Finite Element Method), joka hyödyntää tietotekniikan laskentakapasiteetin kasvua. Menetelmän myötä on syntynyt valtava määrä ohjelmistoja ja menetelmää sovelletaan kaikilla tekniikan aloilla, lujuusopin rinnalle on tulleet myös mm. lämmönsiirto ja virtausoppi joita pystytään laskemaan ja simuloimaan tietotekniikan avulla. (Salmi ym 2010, 22.)

Muodostaakseen lujuusopin ongelman mallin, tulee suunnittelijalla olla erittäin hyvä lujuusopillinen osaaminen. Mallien muodostamiseen löytyy erilaisia suunnitteluohjeita ja standardeja (SFS-standardit), sekä asetuksia. Koko Euroopan kattava lujuusopillinen ohjeistus perustuu niisanottuihin Euronormeihin. (Salmi ym. 2010, 16.)

Lujuusopillisessa mitoituksessa rakenteesta muodostetaan aina mekaniikan malli, joka sisältää lukuisia yksinkertaistuksia materiaalin, geometrian ja kuormitusten osalta. Näihin yksinkertaistuksiin liittyy epävarmuustekijöitä, jotka suunnittelijan on otettava huomioon. Lisäksi on muitakin epävarmuustekijöitä, kuten kulumisen vaikutus, valmistuksen tarkkuus ja ympäristöolosuhteet. Jotta kaikki yksinkertaistukset ja epävarmuustekijät kyetään ottamaan riittävästi huomioon, käytetään lujuuslaskuissa varmuuslukua ( $n$ , factor of safety). Varmuusluvun avulla voidaan määritellä rakenneosan sallittu kuormitus.

$$F_{sall} = \frac{F_{Kr}}{n}$$

(Salmi ym. 2010, 59.)

Ensimmäiset elementtimenetelmän sovellukset rakenteiden lujuusanalyysiin liittyivät lentokoneteollisuuteen 1950-luvun alkupuolella. Termi

elementtimenetelmä (finite element method, FEM) puolestaan esiintyi ensimmäisen kerran suunnilleen vuonna 1960, jolloin menetelmää, jossa sauvarakenteiden osia jaettiin pienempiin tarkasteltaviin osiin, pyrittiin soveltamaan myös muihin rakenteisiin. Tämänäyttypiset laskumenetelmät tulivat mahdollisiksi samaan aikaan tapahtuneen tietokoneiden kehittymisen vuoksi. 1960-luvulla ymmärrettiin elementtimenetelmän ja Ritzin likimääräismenetelmän samankaltaisuus, tämä loi matemaattisen pohjan elementtimenetelmälle. Elementtimenetelmässä valitaan tuntematonta suuretta kuvaamaan sopivat likimääräisfunktiot ja tarkasteltava alue jaetaan osa-alueisiin, eli elementteihin: yksi funktio kuvaa ratkaisua vain tiettyjen elementtien alueella. Lisäksi elementtimenetelmässä valitaan approksimaatiot niin, että funktion tuntemattomat kertoimet ovat samalla tutkittavan suureen arvoja elementtien tietyissä pisteissä, eli solmupisteissä. (Hakala. 1982, 13-14.)

FEM-menetelmässä rakenne esitetään pienempinä osina eli elementteinä, jotka on yhdistetty toisiinsa solmupisteissä. Elementtien muoto on yleensä sidottu, mutta niitä yhdistelemällä ja muuttamalla verkkoa tiheämmäksi tai harvemmaksi, voidaan mallintaa lähes millaisia osia tahansa. Rakenteen jokaista elementtiä kohden voidaan kirjoittaa tasapainoyhtälöt, jotka yhdistyvät solmupisteissä yhteensopivuusehtojen avulla. Solmupisteiden koordinaattien ja materiaalin ominaisuuksien avulla voidaan muodostaa jäykkyyssmatriisi, joka yhdistetään kuormitukseen ja näin saadaan selville jokaisen solmupisteen siirtymä. Näiden siirtymien avulla voidaan laskea kappaleessa vaikuttavat jännitykset. (Hietikko. 2021, 170-171.)

Hietikko (2021, 171-174) yksinkertaistaa FEM analyysin kulun seuraavalla tavalla kuuteen eri vaiheeseen:

1. Rakenteen idealisointi
2. Elementtiverkon muodostaminen
3. Reunaehtojen muodostaminen
4. Kuormitusten muodostaminen
5. Laskenta
6. Tulosten tulkinta ja tarkastelu

Rakenteen idealisoinnin avulla voidaan usein rajoittaa analyysin vaatimaa laskentatehoa ja aikaa huomattavasti. Käytännössä tämä tarkoittaa, että rakenteesta yksinkertaistetaan sellaisia yksityiskohtia, joiden mallintaminen olisi työlästä, mutta joiden tuloksilla ei olisi suurta merkitystä analyysin tuloksiin. (Hietikko. 2021. 171-174.)

Elementtiverkon muodostuksessa tulee valita sopiva elementtityyppi ja pohtia millä tavalla rakenne jaetaan elementteihin. Analyysin tulokset saadaan yleensä vain kunkin elementin keskipisteessä tai korkeintaan muutamassa pisteessä elementin alueella. Elementtiverkkoa on siksi syytä tihentää alueilla, joissa on odotettavissa suuria muutoksia. (Hietikko. 2021. 172.)

Reunaehdot muodostetaan rakenteen tuennan mukaan. Kappale on aina tuettava niin, että se ei lähtisi liikkumaan. Tuet on myös kuvattava elementtimallissa reunaehdoilla, jotka kuvaavat mahdollisimman tarkasti todellisia tuentoja. Tukien kohdalla oleville solmupisteille määritetään kiinnitykset, jotka estävät kyseisen solmupisteen siirtymän tiettyyn suuntaan. (Hietikko. 2021. 172.)

Puutteelliset tai väärät reunaehdot ovat yleensä syynä FEM-laskennalla saatuihin virheellisiin tuloksiin. Sen vuoksi niiden määrittämiseen onkin kiinnitettävä erityisen suurta huomiota. (Hietikko. 2021. 173.)

Kuormitukset voidaan yleensä syöttää pinta-, viiva- tai pistekuormina joko solmupisteisiin tai elementeille. Myös tilavuus- ja lämpökuormat voidaan huomioida analyysissä. Tyypillisiä tilavuuskuormia ovat kappaleen oma paino tai erilaisista kiihtyvyyksistä aiheutuvat kuormat. (Hietikko. 2021. 171-174.)

Laskentaa varten täytyy myös määrittää materiaalin ominaisuudet, tyypillisesti ainakin kimmokerroin ja poissonin vakion arvot. Analyysi itsessään on tavallisesti luonteeltaan staattinen ja lineaarinen, mikä tarkoittaa, että jännitysten on pysyttävä materiaalin suhteellisuusrajan alapuolella. Tällöin kimmokerroin pysyy vakiona ja kuormitukset ovat staattisia. (Hietikko. 2021. 171-174.)

Yhä useammin suoritetaan nykyisin myös epälineaarisia analysointeja, jolloin siirrytään alueelle, jossa kimmokerroin tai jokin osa mallista ei enää käyttäydy lineaarisesti. Myös dynaamiset analyysit ovat nykyään mahdollisia, joissa voidaan tarkastella vaihtuvien kuormien vaikutusta. (Hietikko. 2021. 171-174.)

Analyysin jälkeen tuloksia tarkastellaan ns. jälkikäsitteijällä. Yleisimmin huomio kiinnitetään rakenteen muodonmuutoksiin ja jännityksiin. Solmupistesiiirtymien avulla voidaan erottaa siirtymät ja kiertymät eri akseleiden suuntaan.

Jännitykset yleensä esitetään nykyisin joko korkeuskäyrinä tai väripintoina. Jännitykset lasketaan analyysissä solmupisteissä tai elementin alueella olevissa pisteissä, mutta tarkastelua varten jännitykset tasoitetaan koko rakenteen alueella kokonaiskuvan saamiseksi. (Hietikko. 2021. 171-174.)

FEM laskennalla on helppo suorittaa lujuusanalyysi, mutta sillä on myös helppo tehdä virheitä, pienetkin virheet voivat johtaa aivan väärin tuloksiin. Siksi FEM-laskennan antamat tulokset on aina pyrittävä varmistamaan jolloin muulla menetelmällä. (Hietikko. 2021. 171-174.)

## 6 Ilmankääntölaitteen tuotekehitys

Ilmankääntölaitteen alarungon rakenteen tuotekehitys aloitettiin tutustumalla nykyiseen ilmankääntölaitteeseen ja sen 3D-malliin. Nykyisestä rakenteesta selvitettiin ongelmakohdat ja kehityskohteet, osat ja ominaisuudet jotka haluttiin poistaa tai korvata, ja pohdittiin millaisilla ratkaisuilla niitä pyritään korvaamaan, jotta laitteen toiminnallisuus pysyy ennallaan tai muuttuu paremmaksi. Uuden ilmankääntölaitteen konsepti oli jo osittain olemassa, sillä laitteen toimintaa ei ollut tarkoitus muuttaa, vaan enemmän kyse oli rakenteen optimoinnista, jolla pyrittiin saamaan laitteen kustannuksia edullisemmaksi. Tämä tuotekehitys on jatkoa Ollikaisen (2024) opinnäytetyönä tehtyyn ilmankääntölaitteen ylärungon suunnitteluun.

Ilmankääntölaitteen nykyisen rakenteen 3D-malli näkyy liitteen 1 kuvissa, toimeksiantajan toiveesta kaikki kääntölaitteen rakenteeseen liittyvät 3D-mallin kuvat on esitetty vain liitteissä, ja liitteet on piilotettu loppullisesta julkaisusta. Anttalainen (2022, 36) kuvaa hyvin kääntölaitteen sisäistä rakennetta ja ilmanohjausta rakenteessa: kääntölaitteen kammio jaetaan kolmeen eri lohkokoon poikkisuuntaisesti, reunimmaisista kutsutaan reunalohkoiksi. Ilmalohkot puolestaan on jaettu painekanaviin, joiden kautta ilma ohjautuu suuttimille. Painekanaavien jakoväli on yleensä yksi metri ja reunimmaisissa lohkoissa on korkeintaan kaksi kanavaa.

Valmistusmenetelmät ja käytettävä materiaali rajattiin jo testattuihin ja käytössäoleviin materiaaleihin ja ratkaisuihin, eli ruostumattomaan teräkseen AISI 304 ja hitsausliitoksiin, jolloin tuotekehitystyö voitiin kohdentaa tuotteen rakenteeseen ja sen yksinkertaistamiseen.

Materiaalivahvuus pyritään pitämään mahdollisimman ohuena, ja ensisijaisesti alarunkoa lähdettiin suunnittelemaan 2mm materiaalipaksuudella, jolloin valmistuskustannuksia saatiin alas ja laitteen painoa vähennettyä. Rungon sisällä olevat kammiot ja osat pyrittiin poistamaan ja korvaamaan uudella alarungon rakenteella (Liite 2), joka valmistetaan yhtenäisistä ohutlevyosista,

joilla saadaan rakenteeseen lisää jäykkyyttä ja valmistuskustannuksia edullisemmiksi, kun liitoksia ja työvaiheita tarvitaan vähemmän.

Paperikoneita valmistaan erilaisilla rataleveyksillä, mutta kääntölaitetta lähdettiin suunnittelemaan suurimmalle ratalevyelle, jossa ilmankääntölaitteen pituus on noin 11 metriä. Suunnittelu oli ajatuksella ”proof of concept”, sillä jos ilmankääntölaite toimisi suurimmalla pituudella, niin kääntölaite varmasti kestää myös lyhyemmillä mitoilla, jolloin jänneväli jää pienemmäksi. Ilmankääntölaite on tuettu vain molemmista päistä, jolloin ohuen materiaalivahvuuden ja pitkän jännevälin yhteisvaikutus saattaa osoittautua haastavaksi ja vaatii luujuustarkastelua taipumien, jännitysten ja lommahduksen osalta.

Ilmankääntölaitteen ulkoinen geometria ja poikkileikkauksen muoto olivat myös hyvin pitkälti rajattu, sillä alareunan linjan tuli olla täysin sama kuin nykyinen versio, sillä siihen kiinnittyvät suuttimet tulee olla täysin samassa paikassa ja asennossa kuin nykyiselläänkin, jotta radan linja ja ilmapatjan sijainti, sekä sen toimivuus pystytään varmistamaan. Ilmankääntölaitteen poikkileikkauksen profiilin yläreunaa oli mahdollista muokata, mutta käytettävä alue oli hyvin pieni, sillä ilmanakanavan tuloputki ja akselin polviot rajoittivat yläreunan muotoa ja mahdollisia linjoja. Liitteen 1 kuvissa näkyy ilmankääntölaitteen nykyinen geometria eri suunnista tarkasteltuna.

Nykyään ilmankääntölaitteen ilmavirtauksia ja virtausmääriä säädetään ilmavirran tuloaukon yhteydessä olevilla profilointilevyillä, jotka näkyvät liitteen 1 kuvissa. Näillä profilointilevyillä pyritään ohjaamaan ilmavirta eri kammioihin (3kpl). Pääsääntöisesti limamäärien ja virtausten säätö tehdään vain kerran, jonka jälkeen konetta ajetaan samoilla asetuksilla eikä lisäsäätöjä tarvita. Tämä ratkaisu on kuitenkin todettu varsin huonoksi ilmavirtojen säätämiseen ja sen vaikutus on varsin pieni, yrityksen referensseistä löytyy jopa projekteja, joissa profilointilevyt ovat poistettu kokonaan (Anttalainen 2022, 49).

Uuden rakenteen mukana kammioiden rakenne muuttuu, samalla tulee myös ilmansäätöä varten tehdä uusi ratkaisu. Uudessa ilmansäätömenetelmässä ilma jakaantuu tasaisesti ylempään kammioon, josta se vapautetaan alempiin

kammioihin erillisten reikälevyjen läpi joissa on lohko-kohtaisesti (3kpl) omat peitelevyt, joilla voidaan säätää jokaiseen lohkoon pääsevää ilmamäärää ja näin myös ilmanpainetta.

Suunnittelussa tuli kuitenkin miettiä myös eri osien yhteensopivuutta, sopivia liitosmenetelmiä ja huomioida laitteen muu ympäröivä rakenne. Suunnitelun tavoitteena oli saada kriteerit täyttävä 3D-malli joka sopii rakenteeseen ja sen jälkeen testata tämän kestävyyttä FEM-analyysin avulla. Analyysistä mahdollisesti esiin nousevat ongelmakohdat yritetään korjata muokkaamalla rakennetta tarpeen mukaan.

Ensisijaisesti suunnittelu kohdistui toimeksiannon mukaisesti ilmankäntölaitteen alarunkoon ja paineentasauskammioon, mutta koska eri osat liittyvät toisiinsa ja ilmankäntölaite kokonaisuudessaan on tuettu vai molemmista päistä, tuli myös muita osia muokata ja lisätä 3D-malliin, jotta FEM-analyysia varten saatiin totuutta vastaava malli.

#### 6.1 ilmankäntölaitteen toiminta (vaatimuslista)

Suunnittelun reunaehtoina olivat ilmankäntölaitteen rakenteen muut osat: päädyt, ylärunko, ilmananava, käntöakseli ja alarunkoon kiinnittyvät suuttimet, joiden etäisyys ja asento olivat tiukasti määritelty. Tämän lisäksi ilmananavien sijainti ja koko oli ennalta määrätty, jotta suuttimien oikeanlainen toiminta pystytään varmistamaan. Myös ilmanpaineelle ja virtausmäärille oli asetettu tietyt raja-arvot, nämä pystytään simuloimaan virtausanalyysillä, joka ei kuitenkaan sisältynyt tämän opinnäytetyön rajaukseen.

Muita vaatimuksia uudelle rakenteelle oli sama toiminnallisuus kuin nykyisessäkin laitteessa, tämä edellytti rajoitinlevyjen muokkaamista ja lisäämistä käntölaitteen ulkoreunoille, sekä paineensäätölevyjen lisäämistä käntölaitteen sisälle ilmavirran- ja paineenhallintaa varten, tämä korvasi aiemmin mainitut profiloitilevyt.

Muita vaatimuksia kehitystyölle oli laitteen valmistettavuus ja kustannukset, joita pyrittiin parantamaan rakennemuutosten ja ratkaisujen kautta, eli korvaamalla monimutkaiset rakenteet yksinkertaisemmilla ja helpommin valmistettavilla vaihtoehdoilla. Mahdollisimman paljon osista pyritään valmistamaan laserleikatuista ohutlevyosista, jotka mahdollisen taivutuksen jälkeen hitsataan kiinni muuhun rakenteeseen.

Suunnittelun yhteydessä vanhan mallin suuttimet vaihdettiin uusiin, joissa rakenne on hieman muuttunut, uudet suuttimet ovat vielä osin konseptivaiheessa, mutta niiden alustava malli sisällytettiin rakenteeseen lujuuslaskentaa varten.

## 6.2 Ilmankäätölaitteen uusi rakenne

Vanhaan malliin verrattuna, ei uudessa rakenteessa ole mitään muuta täysin samaa kuin kääntöakseli ja tulokanava. Päätylevyt ovat muuten alkuperäiset, mutta alarungon paikoituspinnien vastaavat paikoitusreiät on lisätty päätylevyihin. Ylärunгон kansi, jonka Ollikainen (2024) suunnitteli uudelleen koki pieniä muutoksia pääasiassa sivujen mittojen ja leikkausten suhteen, jotta se saatiin sopimaan uuteen alarunkoon ja uusiin suuttimiin. Kääntölaitteen sisältä poistettiin kaikki osat ja nämä korvattiin uudella alarungon kammiorakenteella.

### 6.2.1 Alarunko

Varsinainen suunnittelutyö aloitettiin tästä alarungon kammioista jonka alareunan muoto määräytyi suuttimien mukaan. Suunnittelun yhteydessä tuli ilmi, että kammion rakenteen tuli olla symmetrinen keskimmäisen suuttimen suhteen, jotta suuttimiin jakautuva ilmamäärä ja -paine olisi tasainen. Alarungon sisälle muodostuvien kammioiden tuli olla samoilla kohdilla kuin nykyisessäkin mallissa, kammiot toteutettiin valmistamalla 2mm paksusta levystä laserleikattuja polvioita, jotka pistehitsataan alarungon ylä- ja alalevyihin kiinni.

Tätä hitsausta varten tuli pohtia valmistuksen asennus- ja hitsausjärjestystä ja lisäksi hitsausta varten osiin suunniteltiin pistehitsiä varten paikoituspinnit ja -reiät helpottamaan valmistusta ja asennusta.

Koska alarungon rakenne muuttui, tuli sen seurauksena pohtia myös osien yhteen liitettävyyttä ja valmistuksen toteuttamista ja sen helpottamista. Tämän seurauksena myös päätylevyihin päädyttiin lisäämään paikoitusta varten reiät pistehitsiä varten ja alarungon levyjen päätyihin lisättiin paikoitusta varten ulokkeet. Tämän seurauksena kokoonpano helpottuu ja osien oikea keskinäinen asento pystytään paremmin varmistamaan, mutta osien asennusjärjestyksessä tulee olla tarkka ja tämä tulee merkitä kokoonpanopiirustuksiin. Uudessa rakenteessa polviot kiinnitetään ensin alalevyyn paikoituspinnien mukaan, jonka jälkeen ylälevy kiinnitetään muuhun rakenteeseen paikoitusreikien avulla. Kun alarunko on kasassa, kiinnitetään päätylevyt alarungon ylä- ja alalevyissä oleviin paikoituspinneihin ja hitsataan kiinni. Viimeisenä rakenteeseen kiinnitetään kansilevy hitsaamalla se päätylevyihin ja alarunkoon.

Liitteessä 2 kuvan poikkileikkauksessa näkyy ilmankäntölaitteen alarungon uusi rakenne: rakenne seuraa hyvin pitkälti nykyisen ilmankäntölaitteen muotoja, muutamissa kohdissa on toimeksiantajan toivomuksesta suurennettu pinnan leveyttä ja jätetty tilaa mahdollisten liitoskohtien ja ilmakanavien rei'ille, joita tietyssä paperikoneiden laitekokoonpanoissa saatetaan tarvita.

Alarungon kanavien jakolevyt, polviot on sijoitettu täsmälleen samoihin kohtiin kuin nykyisessä mallissa, tämä mahdollistaa nykyisten osien ja suuttimien käytön ja osaltaan auttaa varmistamaan että toimivaksi todetut ilmavirtaukset pystytään toteuttamaan myös tällä uudella rakenteella.

## 6.2.2 Kansi

Vanhaa kannen rakennetta (edellisen opinnäytetyön tuloksena saatu ylärunko) muokattiin hieman, sillä yläreunan säätölistat jäävät pois uudessa rakenteessa ja näin rakenne muuttui tietyiltä osin hieman ja leikkauksia jouduttiin siirtämään. Ulkomitat ja geometria pysyivät hyvin pitkälti samoina, mutta alarungon ja kannen liittymäpintaa muokattiin niin, että siihen saatiin riittävän iso yhtenäinen pinta ja tukeva hitsiliitos, lisäksi siihen jätettiin ylimääräistä tilaa mahdollisille ilmantasausrei'ille, joita joissakin paperikonekoonpanojen optioissa tarvitaan.

Ylärunгон muutosten jälkeen, kun rakenteeseen vaihdettiin uudet suuttimet, huomattiin että suuttimien pohjalevyn liitoskohta, joka kiinnitetään pistehitseillä, tulee muun rakenteen yli. Tämän seurauksena ylärunгон ja alarungon rakennetta jouduttiin muuttamaan vielä uudelleen, niin että suuttimien kiinnityksille jää riittävästi tilaa. Tämän lisäksi suutinpakan ulkoreunoilla sijaitsevien säätölistojen kiinnitysratkaisuja pohdittaessa, todettiin että kannen reunoja tulee vielä muuttaa pidemmiksi, jotta säätölista on helpompi kohdistaa suuttimien ulkopintojen tasolle. Näinollen kansilevyyt tehtiin lopulta useita eri muutoksia sitä mukaa kun ympäröivän muun kokoonpanon ratkaisuja saatiin lukittua valmiiksi.

## 6.2.3 Säätölevyt

Koska profilointilevyt poistettiin vanhasta rakenteesta, tuli uuteen rakenteeseen korvaava ratkaisu ilman- ja paineenohjausta varten. Ilmamäärien ohjausmenetelmä koki suuren muutoksen, aiemmin tulokanavan yhteydessä olevat profilointilevyt ohjasivat ilmaa kolmeen eri kammioon korkeus suunnassa, josta kanavat ohjasivat ilmaa eri kammioihin ja niistä yhä suuttimiin. Nyt nämä vertikaali- ja horisontaalikammiot on ylärakenteesta poistettu kokonaan ja korvattu ohjauslevyillä: reikälevyillä joita voidaan siirrellä ja näin supistaa tai laajentaa ilma-aukkojen pinta-alaa ja ohjata alakammioihin saapuvaa ilmamäärää.

Ilmansäätöä varten tehtiin alarunkoon lukuisia limittäisiä pyöreitä reikiä, jotka päästävät ilman kammioista suuttimiin polvioiden väliin muodostuvaa kanavaa pitkin. Vastaavat reiät tehtiin myös säätölevyihin, jotka noudattavat alarungon ylälevyn profiilia ja jotka on kiinnitetty pulttiliitoksella allaolevaan rakenteeseen. Jotta pulttiliitos mahdollistaa säätölevyjen pitkittäisliikkeen ja ilmansäädön, tuli pultit hitsata alarungon ylälevyyn kiinni ja säätölevyn kiinnitykseen käytettiin kahta priikkaa ja lukkomutteria, joilla priikkojen ja säätölevyn väliin jäävän 0,5mm välyksen ansiosta mahdollistettiin liukuva liike läpimenoareikien säätöä varten. Säätölevyn materiaalivahvuus on 1,5mm, kun taas sen pitkittäisessä reiässä olevan priikan paksuus on 2mm, tämän seurauksena saadaan muodostettua liitos joka sitoo säätölevyn paikoilleen, mutta mahdollistaa halutut liikeradat. (Liite 2).

Liitoksessa käytetty standardi m10 pultti on 3D-mallissa 25mm pitkä, mutta kuten liitteen 2 kuvista näkyy, nämä on todennäköisesti mahdollista vaihtaa myös lyhyempiin pultteihin. Koska liikutusmekanismi on vielä suunnitteluvaiheessa, ei näitä ohjureita ja kiinnitysmekanismejä kehitetty tämän pidemmälle – kun liikutusmekanismi saadaan suunniteltua tai konseptoitua voidaan näitä ohjureita muokata tai kehittää tarpeen mukaan pidemmälle vastaamaan vaadittua toiminnallisuutta, jota säätölevyjen liikutusmekanismi edellyttää.

Rakenne suunniteltiin niin, että se mahdollistaa peitelevyjen siirtelyn, siirrettävä matka ei käytännössä ylitä reikälevyn reikien halkaisijaa (20mm) ja todennäköisesti toteutuva liike on merkittävästi tätä pienempi. Varsinainen reikälevyjen siirtomekanismin suunnittelu ja toteutus jää tämän opinnäytetyön ulkopuolelle. Myös mahdolliset ilmapvirtausten simuloinnit ja näihin liittyvät laskut on rajattu tämän työn ulkopuolelle.

#### 6.2.4 Suuttimet

Nykyisessä mallissa suuttimet on kiinnitetty sekä ilmankäntölaitteen runkoon, että päätylevyihin. Päätylevykiinnitys on kuitenkin uudessa mallissa turha ja siitä

yritetään päästä eroon. Uudet suuttimet ovat vielä toistaiseksi suunnittelussa, mutta niistä saatiin käytettäväksi layout -tyyppinen malli, jota muokattiin ilmankäntölaitteen mittoihin sopivaksi. Vaikka käytetty suuttimien 3D-malli ei täysin vastaa todellisuutta, edesauttaa se kuitenkin lujuusanalyysien todenmukaisuutta lisäämällä rakenteen lujuutta ja painoa. Suuttimien paino on yläkanttiin, sillä suuttimiin ei ole mallinnettu reikiä, mikä pienentää painoa jonkin verran, toisaalta ylimääräinen paino toimii tietynlaisena varmuuskertoimena kun laitteen jäykkyys mitoitetaan todellisuutta suuremmalle kuormalle. Suuttimien reiät eivät todennäköisesti vaikuta merkittävästi laitteen jäykkyyteen. Suuttimien osista suurin vaikutus laskentaan on pohjalevyillä, jotka on mallinnettu kokonaan ja jotka hitsataan alarungon alapintaan kiinni.

#### 6.2.5 Uuden rakenteen edut

Kuten aiemmin mainittiin, on valtaosa ilmankäntölaitteen rakenteesta peräisin 70-80 -luvulta. Ilmankäntölaitteen alarungon vanha rakenne koostui useista erillisistä ohutlevyosista. Pelkkä Alarungon “ylälevy” joka nyt uudessa mallissa koostui yhdestä pitkästä ohutlevyosasta, koostui vanhassa mallissa 46:sta osasta. Vastaavasti alalevyn kohdalla 32 osaa korvattiin yhdellä pitkällä taivutetulla ohutlevyosalla. Suuttimien ja niiden kiinnitysten osalta tarkkaa määrää ei voida laskea, sillä uutta korvaava mallia ei ole saatavilla, mutta nykyiset suuttimet ja niiden kiinnikkeet koostuvat lukuisista osista – yhtä ilmankäntölaitetta kohti suuttimien ja niiden kiinnikkeiden osien lukumäärä on yli 500 (488 + kiinnitysosia).

Jo osien lukumäärästä voidaan päätellä että yksinkertaistamalla rakennetta säästetään merkittävästi aikaa ja materiaalia tuotteen valmistuksen osalta, ja on hyvin todennäköistä että nämä rakenteen yksinkertaistuksen tuomat edut heijastuvat edelleen myös tuotteen huolto ja ylläpitokustannuksiin: vähemmän huollettavia ja korvattavia osia, vähemmän “liikkuvia” kappaleita ja vähemmän potentiaalisia ongelmakohtia. Toki mikäli joku osa tulee vaihtaa, muodostuu tästä korkeita kertakustannuksia isojen osien ja osakokonaisuuksien, sekä liitosmenetelmien takia.

Ilmankäntölaitteen uudella rakenteella tavoiteltiin myös säästöjä pienemmän ainevahvuuden ja kevyemmän rakenteen kautta. Osien ainevahvuutta pienennettiin muutostyön yhteydessä, lisäksi poistamalla ja muokkaamalla rakennetta saatiin laitteen painoa pienennettyä entisestään. Alkuperäinen ilmankäntölaite painoi piirustusten mukaan 3200kg, ja uuden rakenteen paino on arviolta 1700-1900kg, paino on arvio, koska 3D-mallista saatu paino oli 1785kg, mutta malli ei sisällä kaikkia suuttimien reikiä ja rakenteesta puuttuu suuttimien välissä sijaitsevat päätylevyt, jonka lisäksi mm. reunojen paineensäätölevyjen rakenne tulee vielä muuttumaan.

Uusi rakenne mukailee vanhaa käntölaitea ja esimerkiksi kammiot on jaettu samoin kuin nykyisessä mallissa kolmeen eri osaan, jonka on todettu olevan riittävä ilmapatjan ja virtausten ohjaamiseen. Hyödyntämällä samoja rakenteita ja ratkaisuja voidaan osaltaan varmistaa että päästää lähelle nykyistä toimivuutta, suotavaa olisi kuitenkin simuloida ilmavirtauksia tai muulla tavoin tutkia miten ilmavirtaukset käyttäytyvät ennen kuin laite otetaan käyttöön.

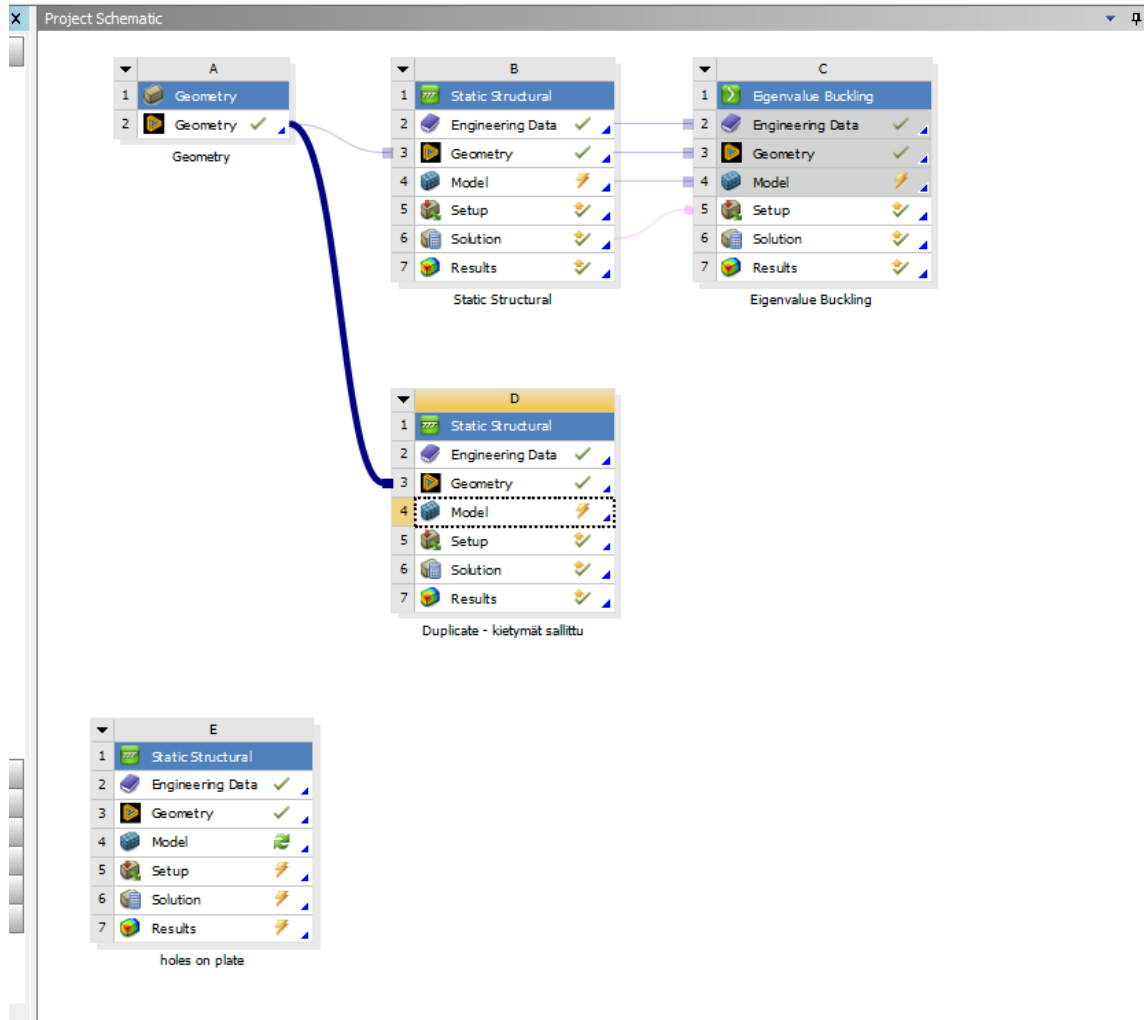
## 7 Lujuustarkastelu FEM

Kääntölaitteelle suoritettiin useampi staattinen rakenneanalyysi Ansys-ohjelmiston avulla, jotta rakenteeseen kohdistuvat muodonmuutokset ja jännitykset, sekä lommahdukset pystyttiin tutkimaan. Analyysillä pyritään varmistamaan laitteen toiminta turvallisesti ja luotettavasti suunnitelluissa olosuhteissa.

Kaikki kappaleessa 6 mainitut rakenteen muutokset tehtiin Catia 3dExperience ohjelmassa, jonka jälkeen malli siirrettiin Ansys Mechanical ja Ansys Spaceclaim ohjelmiin lujuuslaskentaa varten.

### 7.1 Ansys Mechanical ja Spaceclaim -ohjelmien käyttö

Kun haluttu 3D-malli ja rakenne saatiin valmiiksi Catiassa, siirrettiin siitä export toiminnolla \*.step -malli ulos, joka avattiin Ansysin Spaceclaim ohjelmassa, jossa kappaleen geometriaa pystyttiin muokkaamaan lujuuslaskentaan sopivaksi. Tämä tarkoitti kappaleen yksinkertaistamista mm. reikien ja pyöristysten poistamista, sekä pintojen yhtenäistämistä. Lisäksi kappaleen pinnoista muodostettiin ns. Keskipintamalli joka yksinkertaisti geometriaa ja helpotti pintojen verkottamista, pintamallin yhteydessä materiaaleille määriteltiin vahvuus – tämä tieto tuli suoraan alkuperäisestä mallista. Muutoksia tehdessä tuli pohtia mitkä rakennemuutokset vaikuttavat lujuusanalyysiin ja minkälaisia yleistyksiä ja yksinkertaistuksia voidaan tehdä, jotta laskennan tulokset ovat riittävän luotettavat ja malli laskentaa varten on riittävän kevyt, jotta laskenta voidaan suorittaa. Teoriassa kaikille kappaleille pystytään laskenta tekemään, mutta niiden verkottaminen voi olla erittäin haastavaa ja laskenta voi vaatia paljon resursseja ja kestää kauan, myös tulokset voivat vääristyä liiallisen verkon tiheyden vuoksi.



Kuva 11, Ansys Workbench

Kuvassa 11 näkyy Ansys Workbench jossa Spaceclaimissä muokattu geometria siirretään Ansys Mechanicalin puolelle lujuusanalyysijä varten.

Ansys Mechanicalissa kappaleelle määriteltiin materiaali. Vaikka kappale tullaan oikeasti valmistamaan AISI 304 ruostumattomasta teräksestä, käytettiin simulaatiossa rakenneterästä (s235), käytännössä terästen kimmomoduuli ja myötöraja ovat samat molemmilla teräksillä kun tehdään lineaarista lujuuslaskentaa, eikä ruostumattoman teräksen epälineaarisia ominaisuuksia tarvitse tässä kuormitustilanteessa erikseen huomioida, koska laitteeseen kohdistuu vain staattinen kuormitus joka on laitteen oma massa.

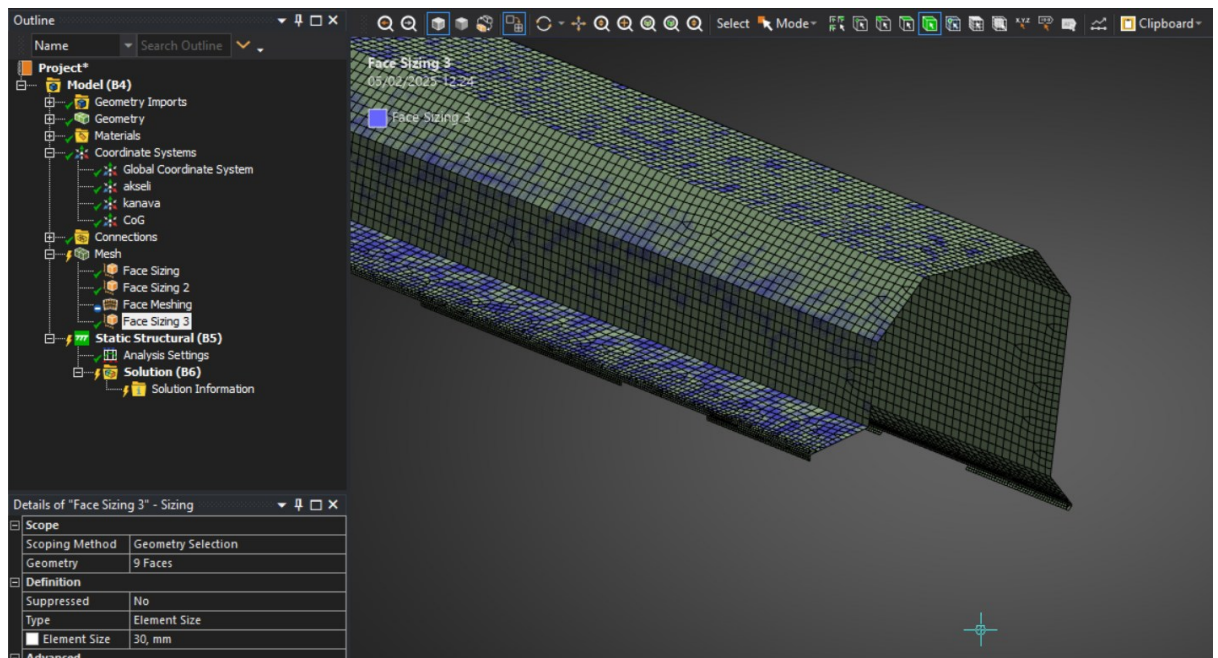
Käytännössä FEM laskentaa varten jouduttiin tekemään paljon yksinkertaistuksia ja oletuksia, jotta mallista saatiin sopiva analyysia varten. Muotoja ja pyöristyyksiä jouduttiin muokkaamaan ja reikiä poistamaan, jotta verkotus onnistuu ja analyysin laskuaika pysyy järkevänä ja koneiden kapasiteetti riittää, ilman että ohjelma kaatuu. Näin ollen on hyvä tiedostaa että tulokset eivät ole absoluuttisia vaan niiden tarkastelussa tulee olla kriittinen ja huomioida lähtökohdat ja tiedostaa tehdyt muutokset.

Analyysi antaa kuitenkin hyvän kuvan kappaleen käyttäytymisestä ja määrittää suurimmat rasituskohdat ja taipumat, joita voidaan verrata kappaleen geometriaan ja arvioida kappaleen kestävyys ja rakenteen soveltuvuus käyttötarkoitukseen, sekä käyttää näitä tietoja rakenteen kehittämiseen ja tukemiseen mikäli tähän todetaan tarvetta.

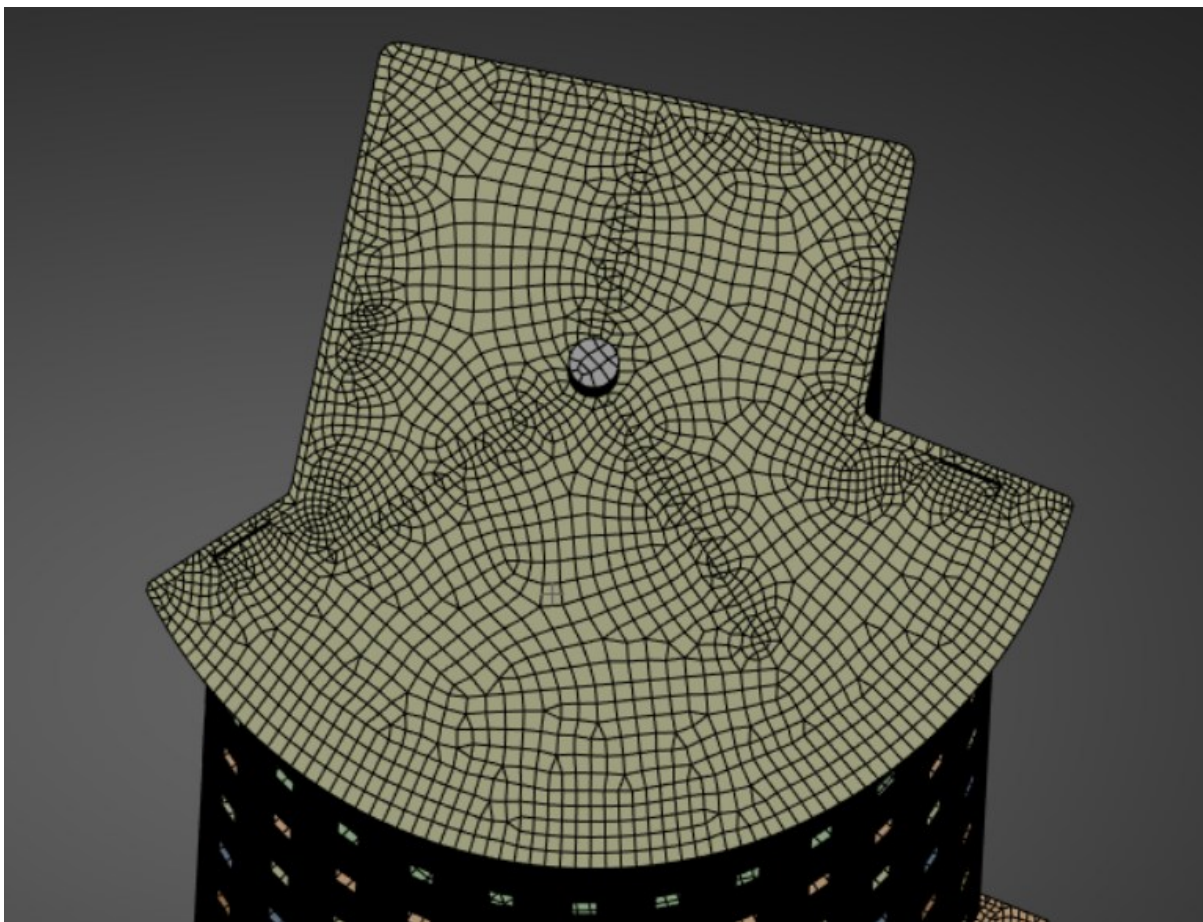
Ennen varsinaista analyysiä ja lujuuslaskentaa, kaikista muista laitteen osista tehtiin keskipintamallit, paitsi kääntöakselista joka määriteltiin kiinteäksi osaksi (solid). Keskipintamallit ovat tyypillinen tapa käsitellä pelti- ja ohutlevyosia joissa simulointia varten kappaleen geometria muutetaan kaksiulotteiseksi ja osan ominaisuuksissa määritellään kappaleen paksuus. Keskipintamalleissa ohutlevyosien pyöristykset ovat haastavia, koska niihin muodostuu helposti liian tiheä verkotus joka tekee laskennasta raskaamman ja vääristää tuloksia, tehden taitoksista liian vahvoja. Tästä johtuen lähes kaikki pyöristykset poistettiin kappaleista, jonka jälkeen keskipinnat yhdistettiin toisiinsa, jotta niihin pystyttiin muodostamaan yhtenäinen verkotus.

Ennen verkotusta tuli myös määrittää miten osat ovat liittyneenä toisiinsa, hitsiliitoksia ei oltu erikseen mallinnettu 3D-malliin Catiassa, joten liitokset tuli määrittää Ansysin puolella. Alarungon ylä- ja alalevyjen liitosta varten määriteltiin pistehitsi 40mm jaolla koko matkalta, ja vastaavasti kansi kiinnitettiin alarunkoon samalla jaolla ja menetelmällä, kuten liitteen 3 kuvista voidaan havaita. Niiltä osin kun 3D-mallissa eri osat yhtyivät toisiinsa, muodosti ohjelma automaattisesti hitsiliitoksen, joita pystyi tarpeen mukaan muokkaamaan tai poistamaan. Nämä automaattiset liitokset jätettiin alarungon polvioihin, akselin polvioihin ja päätylevyihin.

Kun 3D-malli oli siistitty ja yksinkertaistettu sopivasti, sekä korjattu mahdollisten keskipintamallien epäjatkuvuuskohtien osalta ja kaikki liitokset oli määritelty, voitiin siirtyä verkottamaan eri osia. Kaikki osat tuli verkottaa erikseen ja verkotuksen ominaisuuksia, mm. verkon kokoa ja toleransseja tuli muokata aina osakohtaisesti sopivaksi, jotta jokaisen osan verkotus onnistuu ja verkotus vastaa osan todellista rakennetta mahdollisimman hyvin. Kuvasta 13 ja liitteen 3 kuvista näkyy rakenteen verkotusta, koska rakenne on suuri muodostuu verkkoa paljon, mutta verkon koko tulee pitää silti suhteellisen pienenä, jotta se mukautuu kaikkien osissa olevien taitosten mukaan.



Kuva 12, Kannen verkotus



Kuva 13, pätylevyn verkotus

Osan verkotus (mesh) pyrittiin muodostamaan niin, että verkon koko olisi mahdollisimman suuri, mutta liitoskohdissa riittävän pieni, jotta se huomioisi hitsaukset ja liitokset mahdollisimman hyvin ja tarjoaisi analyysistä mahdollisimman todenmukaisia tuloksia. Kuten kuvasta 13 huomaa, tihentyy verkko akselin polvioiden ja hitsausliitosten kohdalla, näin liitoskohtiin pystytään kohdentamaan mahdollisimman realistinen kuormitus.

Kappaleen tuentaa simuloitiin muutamalla eri tavalla, pyrkien jättämään sopivat vapausasteet niin että voimien analysoinnissa kappale pääsee reagoimaan – liian jäykkä tuenta estää kappaleen liikkeitä analysoinnissa ja johtaa virheellisiin tuloksiin.

Ilmankäntölaite tuettiin kanavan pannasta, sekä kääntöakselista (Liite 3), ensimmäisessä simulaatiossa ei huomioitu tuennan muita kiinnikkeitä, mutta

kiinnikkeiden rakenteesta johtuen voidaan todeta, että kiinnikkeet ovat varsin jäykkiä. Vapausasteiden osalta X-akselin suuntainen liike jätettiin vapaaksi ja kiertymä sallittiin Y-akselin ympäri.

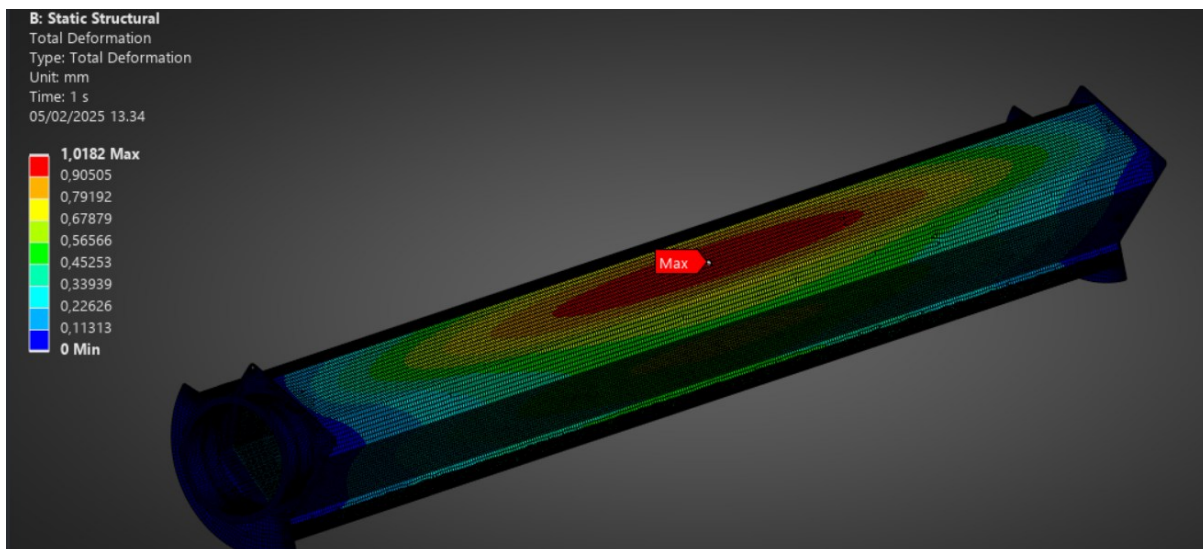
## 7.2 Tulokset

Verkotuksen ja laskentatehon haasteiden takia, erilaisia FEM-analyysejä tehtiin yhteensä 9 kappaletta, tällä laajemmalla otannalla pyrittiin huomioimaan mahdolliset virheet, joita analyysissä voi tulla mm. liian jäykkien liitosten ja osien välisen verkotuksen takia. Simulointeja tehtiin kahdella eri verkotuksella, ilman rakenteen reikiä ja reikien kanssa, sekä suuttimilla ja suuttimet korvaavalla lisäpainolla, joka oli jaettu alapinnan suhteen tasan.

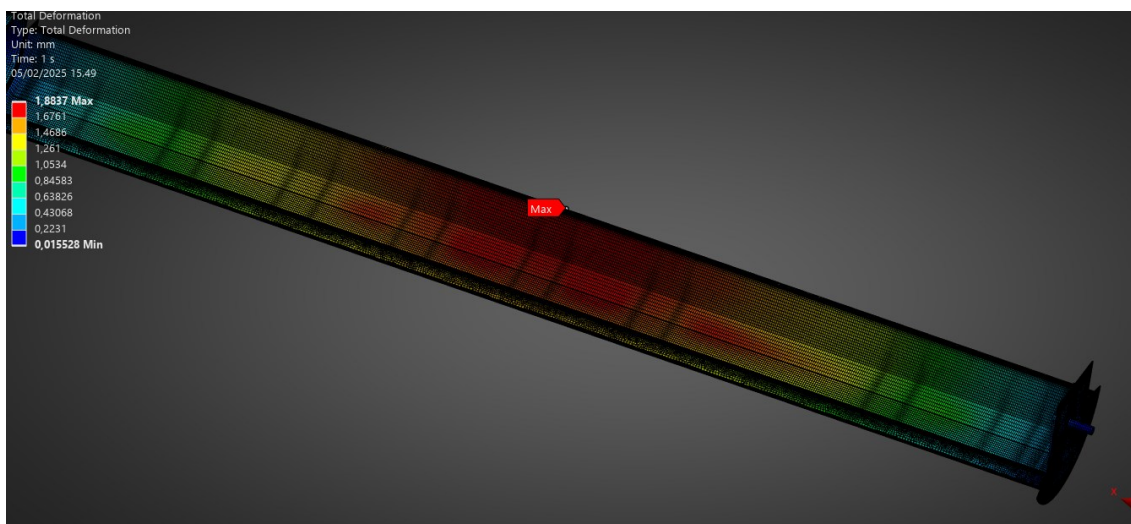
Allaolevaan taulukkoon on eritelty osassa simuloinneista puuttuvaa rakennetta ja sen yhteispainoa, jota osassa analyyseissä on käytetty lisäpainona. Koska suuttimien tarkka rakenne ja paino ei ole tiedossa ja kääntölaitteesta puuttuu osa ilmansäätöosista, vaihdettiin osaan analyyseistä lisäpainoksi 1300kg, jolla pyritään huomioimaan puuttuvat osat.

	n	kg	yht.
Säätölevyt			114
Välilevyt			117
Suutin 12 x 23kg	12	23	276
Suutinpohja 12 x 54,7kg	12	54,7	656,4
			1163,4

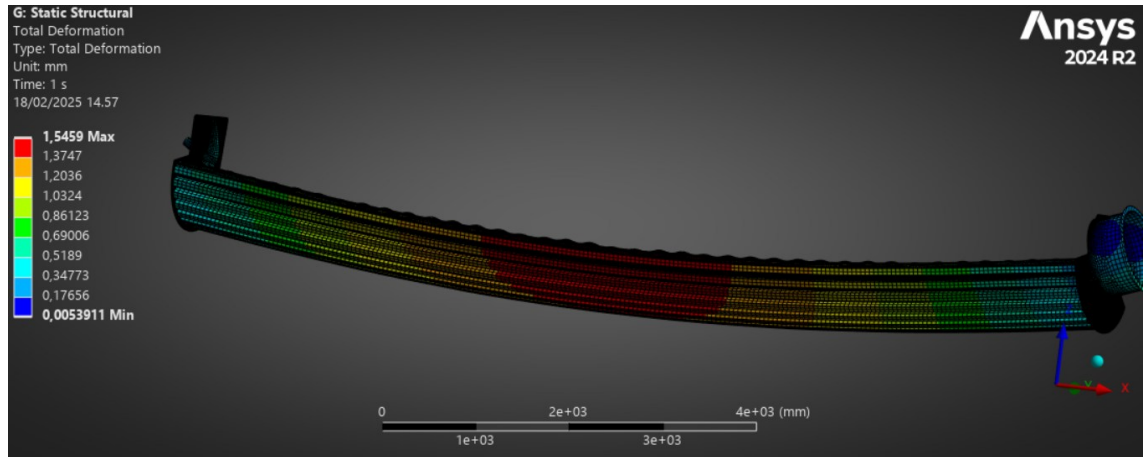
Taulukko 1, painot



Kuva 14, taipuma kannessa

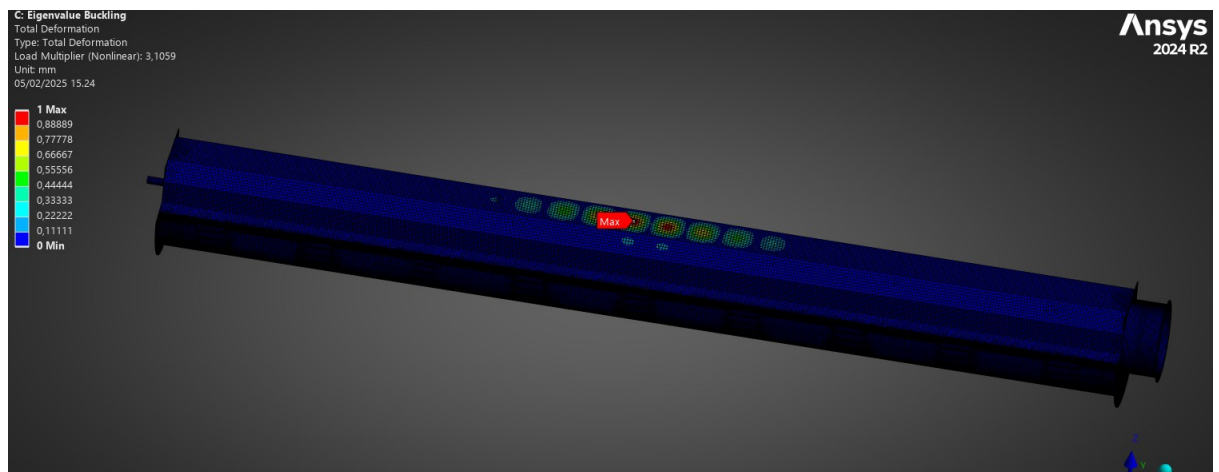


Kuva 15, alarungon taipuma sisältä



Kuva 16, taipuma suuttimien kanssa (kansi piilotettu)

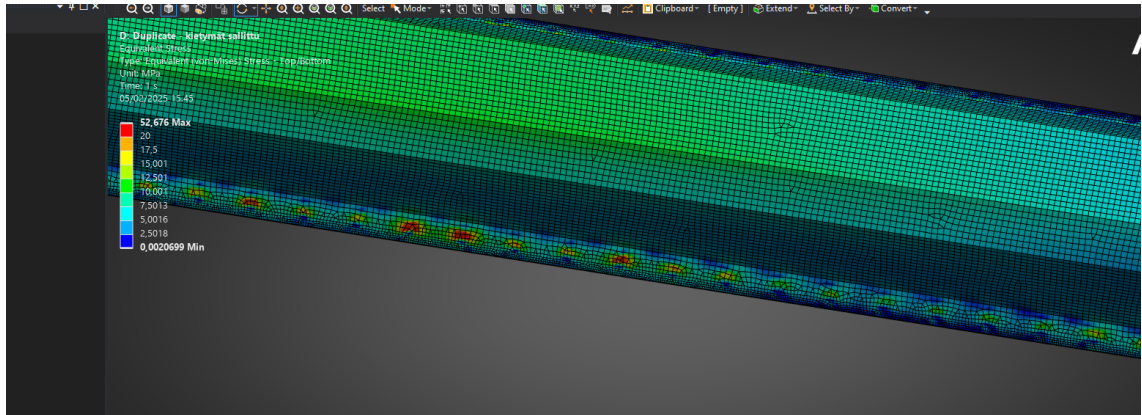
Kuvat 14-16 (osa kuvista siirretty liitteeseen 3) kuvaavat kohtia joissa taipuma on kaikissa analyyseissä suurin: keskellä rakennetta, sekä kannen puolella, että suuttimien ja alarungon kyljessä, kohdassa jossa etäisyys keskiakselista on suurin.



Kuva 17, lommahdus

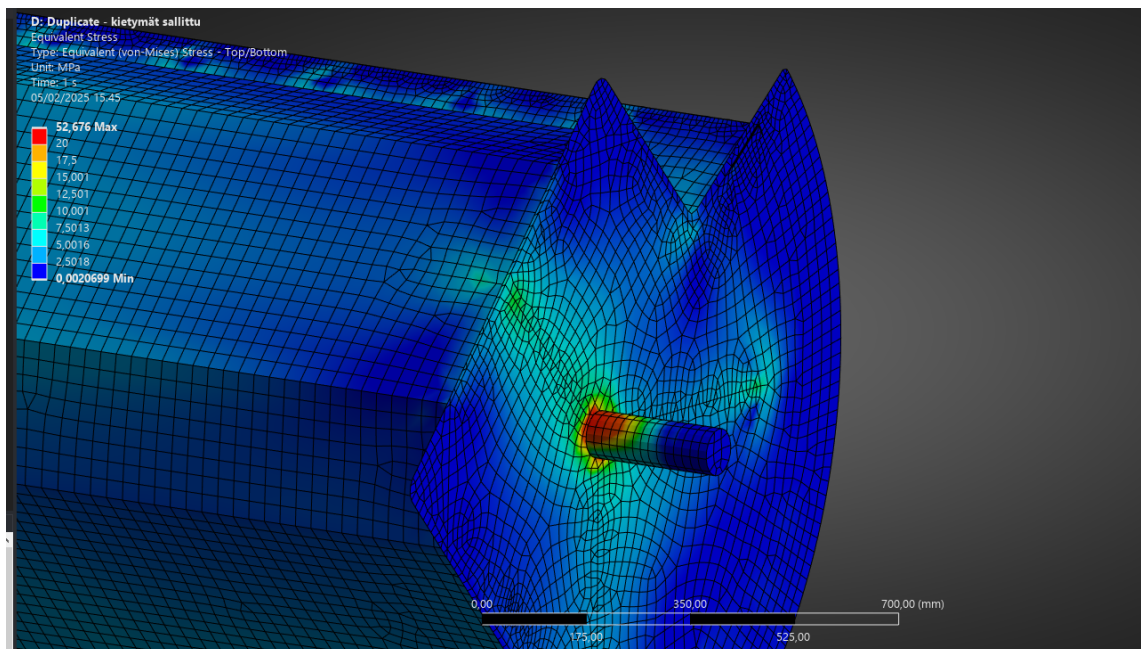
Kuten taipumassa, myös lommahdus kohdistui kaikissa analyyseissä suunnilleen samalle alueelle keskelle kääntölaitetta, kuten kuva 17 näyttää. Lommahduksen kuormituksen kertoimissa oli eroja eri analyyseiden välillä, mutta käytännössä kertoimet seurasivat analyyseissä käytettyjä kuormia käänteisesti, eli mitä suurempi kuormitus rakenteessa, sitä pienempi kerroin vaaditaan

lommahdukseen. Kertoimet kuvaavat kuinka suuri varmuuskerroin rakenteessa on sen nykyiseen kuormitukseen nähden.

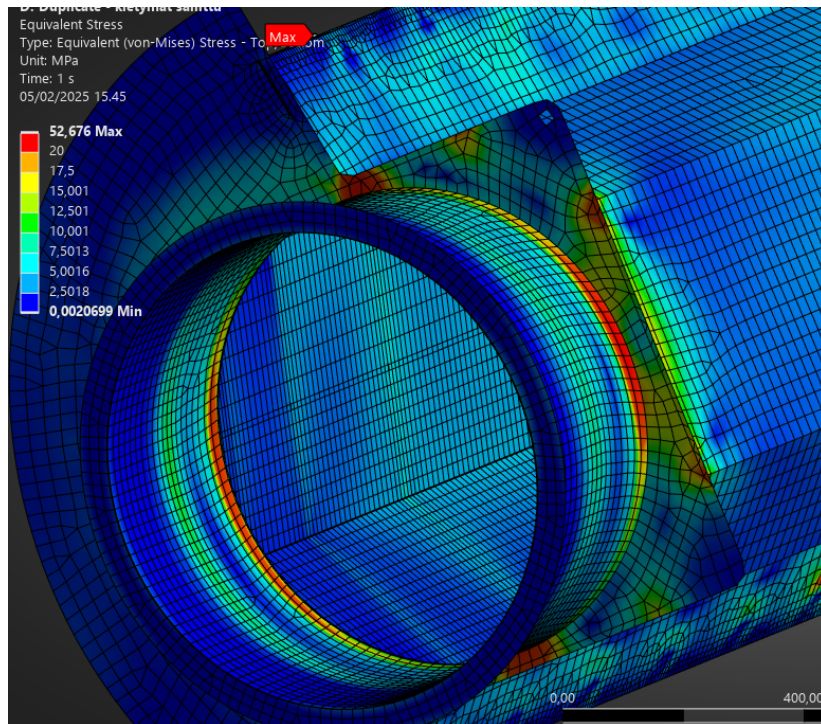


Kuva 18, pistehitsien jännitys

Rakenteeseen muodostuvat jännitykset kohdistuvat pienille alueille kuten pistehitseihin, akseliin ja akselin polvioiden läheisyyteen sekä kanavan reunoille hitsien yhteyteen kuten kuvat 18-20 esittävät. Voimakkuudeltaan jännitykset ovat hyvin maltillisia asettuen 50 ja 100:n Mega Pascalin (MPa) välimaastoon.



Kuva 19, akselin jännitys



Kuva 20, kanavan jännitys

Suuttimet on liitetty rakenteeseen bonded-liitoksella, joka olettaa että koko yhteinen pinta on liimattu tai hitsattu kiinni toisiinsa, tämä saattaa muodostaa liian vahvan liitoksen ja johtaa liian jäykkään rakenteeseen joka osaltaan vääristää lopputuloksia. Tästä johtuen on syytä verrata saatuja tuloksia aiempiin tuloksiin, joissa suuttimet eivät ole mukana kuin painona, jotta saadaan arvio todellisesta jäykkyydestä ja taipumasta.

Taulukko 2, FEM yhteenveto

Ilmankäntölaite FEM		max				ominaisuudet			
variaatio	Jännitys (Mpa)	taipuma (mm)	lomm	load multiplier	kuorma (k)	suuttimet	reiät	rotaatio	
1 runko, kuorma	50,407	1,6284	1	3,1059	1164	ei	ei	ei	
2 runko, rotaatio, kuorma	52,676	1,8837	1	2,7663	1164	ei	ei	kyllä	
3 runko, rotaatio, ei suuttimia		1,1755	1	7	0	ei	ei	kyllä	
4 runko, rotaatio, ei suuttimia, sisäreiät		1,1677	1		0	ei	kyllä	kyllä	
5 runko, rotaatio, suuttimet	57,105	1,0787	1		0	kyllä	kyllä	kyllä	
6 runko, rotaatio, suuttimet, kuorma		1,3433	1		1000	kyllä	kyllä	kyllä	
7 runko, rotaatio, pl, kuorma	87,782	1,5138	1		1300	pl	kyllä	kyllä	
8 runko, rotaatio, suuttimet, kuo	94,958	1,5459	1		1300	kyllä	kyllä	kyllä	
9 runko, rotaatio, kuorma, reiät	80,024	3,7155	1		1300	ei	kyllä	kyllä	

Taulukkoon 2 on kerätty tehtyjen FEM analyysien yhteenveto, josta on helppo verrata saatuja tuloksia ja tehdä johtopäätöksiä tulosten oikeellisuudesta. Eri verkotuksilla ja geometrisilla kokoonpanoilla tulokset eroavat hieman toisistaan, mutta näistä voidaan muodostaa johtopäätöksiä mm. reikien ja suuttimien vaikutuksesta rakenteen jäykkyyteen ja saadaan haarukoitua todennäköinen taipuma rakenteelle, jossa on suuttimet ja reiät mukana.

Sisärakenteen reiät eivät vaikuta merkittävästi rakenteen jäykkyyteen, vaan niistä muodostuva painon keveneminen jopa pienentää taipumaa (taulukon rivit 3 ja 4).

Kokonaisuutena analyysistä saatuja taipumia verratessa voidaan todeta, että todennäköisesti lopullisessa rakenteessa jossa reiät, suuttimet ja muut lisäpainoa tuovat osat on huomioitu, jää taipuma 1,5mm ja 3,7mm välille, todennäköisesti taipuma on jossain 2 ja 3:n millimetrin välillä.

Toimeksiantajalta tiedusteltaessa viitearvoa vanhasta ilmankäntölaitteen taipumasta tai raja-arvoa jota ei saa ylittää, todettiin että käntölaiteen ja paperilinjan väliin jäävä etäisyys on noin 10mm, jolloin varsinaisen taipuman tulisi olla mahdollisimman pieni, arviolta maksimissaan noin 3mm. Näiden tulosten perusteella uuden rakenteen taipuma todennäköisesti jää annettujen raja-arvojen sisälle.

## 8 Yhteenveto

Opinnäytetyön tuotekehityksen tuloksena suunniteltiin uusi ilmankäntölaitteen alarungon rakenne kuten työn tavoitteena olikin. Ilmankäntölaitteen rakenteesta johtuen opinnäytetyössä päädyttiin myös muokkaamaan alarungon lisäksi muita ilmankäntölaitteen osia, monessa näissä varsinainen tuotekehitystyö oli jo tehty tai toteutui keskustelun kautta suunnittelu ja mallinnustyön edetessä – monita osin työ olikin enemmän suunnittelutyötä kuin tuotekehitystyötä, joskin näiden raja on monesti hyvin häilyvä.

Kappaleessa 6 ja liitteessä 2 on esitely ilmankäntölaitteen uusi rakenne joka on suunniteltu tämän opinnäytetyön tuotoksena, kappaleessa 7 käsitellään tälle uudelle ilmankäntölaitteen rakenteelle tehtyjä lujuustarkasteluita joilla pyrittiin varmistamaan laitteen riittävät lujuustekniset ominaisuudet, jotta laite soveltuu sen tarkoitettuun käyttöön.

Laitteen suunnittelu toteutettiin niin, että laitteen päämitat ja ulkoinen geometria eivät juurikaan muuttuneet ja näin osaltaan varmistettiin että laite sopii ympäröivään paperikoneen laiteympäristöön. Esimerkiksi käntölaitteen kiinnityspisteet ja suuttimien sijainti suhteessa rataan pysyivät täysin ennallaan – näin pystyttiin varmistamaan laitteen toimivuus. Liitteiden kuvista voidaan havaita, että kaikki muutokset joita laitteelta toivottiin on toteutettu uuteen 3D-malliin, osa muutoksista vaati useamman revision ja paljon keskustelua toimeksiantajan kanssa, että päästiin haluttuun lopputulokseen.

Yksi selkeimmistä tavoitteista tälle tuotekehitystyölle oli rakenteen yksinkertaistaminen ja keventäminen suhteessa vanhaan rakenteeseen – tämä tavoite voidaan todeta saavutetuksi, sillä osien määrää saatiin vähennettyä useilla sadoilla, kun kaikki kiinnikkeet ja suuttimet ja niiden muutokset lasketaan mukaan.

Painon osalta muutos on myöskin erittäin merkittävä, alkuperäisen ilmankäntölaitteen painoksi oli ilmoitettu 3200kg ja nyt arvio uuden rakenteen painosta on noin 1700-1900kg, eli painoa on saatu pudotettua yli 40% - nämä

muutokset heijastuvat suoraan laitteen valmistuskustannuksiin työn ja raaka-aineiden osalta.

Lujuuslaskennan tulokset ovat hyvin lupaavia, tulosten perusteella vaikuttaa siltä että uusi rakenne täyttää annetut kriteerit – eli kestää käytössä ilman merkittäviä rakenteen muutoksia, taipumia tai lommahduksia. Lujuuslaskenna tuloksia tarkastellessa tulee kuitenkin muistaa, että analyysissä on tehty olettamuksia ja yksinkertaistuksia joilla voi olla vaikutus saatuihin tuloksiin. Analyysit on kuitenkin tehty koko laitteen rakenteelle, ja kaikki osat ja geometriset muodot on pyritty huomioimaan, etenkin lukuisten reikien vaikutus rakenteen kestävyteen kiinnosti toimeksiantajaa ja tämä on huomioitu analyyseissä.

Lujuustarkastelun yhteydessä todettiin myös, että suuttimien kiinnitystä tulee pohtia tarkasti, koska suuttimet sijaitsevat kaukana keskiakselista ja näin niiden massa ja kiinnitys vaikuttavat merkittävästi rakenteen jäykkyyteen. Mahdollisuuksien mukaan suuttimet tulee kiinnittää mahdollisimman tukevasti sekä päätylevyihin, että alarungon rakenteeseen, näin rakenteen jäykkyyttä saadaan parannettua ja varmistettua että taipuma pysyy pienenä.

Uusi ilmankäntölaite ei kuitenkaan tullut valmiiksi tämän opinnäytetyön myötä, vaan tämän tuotekehitysprojektin myötä uuden rakenteen konsepti on todettu toteutuskelpoiseksi. Tehtyjen analyysien perusteella on syytä olettaa että uudet ratkaisut ilmankäntölaitteen rakenteelle ovat toteutuskelpoisia ja mahdollistavat uuden rakenteen käytön oikeassa käytössä.

Ilmanohjauksen osalta rakenne muuttui merkittävästi ja sen toimivuuden arvioimiseksi suositellaan tehtävän omat analyysit ja simulaatiot ennen laitteen käyttöönottoa. Lisäksi lujuusteknisesti suositellaan pohtimaan riittävätkö tämän analyysin tulokset vai halutaan laitteen kestävyydelle korkeammat varmuuskertoimet tai tarkempia laskelmia, mm. valmistuksessa tehtävät hitsaukset saattavat vaikuttaa laitteen lujuusteknisiin ominaisuuksiin.

Jos uuden laitteen käyttöönottoon päädytään ja tämä halutaan siirtää valmistukseen, tulee prosessissa edetä tuotekehityksen mukaiseen

viimeistelyosioon, jossa varmistetaan tuotteen valmistettavuus ja luodaan laitteelle valmistus- ja kokoonpanopiirustukset, jotka tällä hetkellä puuttuvat kokonaan.

## Lähteet

Anttalainen, N. 2022. Kääntölaitteen kustannuskilpailukuvyn parantaminen. Luettavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/787499>

Björk, T., Hautala, P., Huhtala, K., Kivioja, S., Kleimola, M., Lavi, M., Martikka, H., Miettinen, J., Ranta, A., Rinkinen, J., Salonen, P. 2014. Koneenosien suunnittelu. 6., painos. Helsinki: Sanoma Pro oy.

Hakala, M., 1982. Lujuusopin elementtimenelmä. 1., painos. Espoo: Otakustatantamo.

Hannus, J., 2022. Tuotekehitysprosessin kuvaus ja kehittäminen. Luettavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/746179>

Hietikko, E., 2021. Tuotekehitystoiminta. 4., painos. Helsinki: Books on Demand.

Hietikko, E., 2021. Palkki, Lujuuslaskennan perusteet. 4., painos. Helsinki: Books on Demand.

Lepola, P., Ylikangas, R. 2016. Hitsaustekniikka ja teräsrakenteet. 1., painos. Helsinki: Sanoma Pro oy.

Ollikainen, N. 2024. Kääntölaitteen runkorakenteen keventäminen. Luettavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/867815>

Pere, A. 2012. Koneenpiirustus 1&2. Espoo: Kirpe Oy

Salmi, T., Pajunen, S. 2010. Lujuusoppi. 1., painos. Tampere: Pressus Oy.

Santaoja, K. 2023. Rasitusopin käsikirja. Taras

Teräsrakenneyhdistys 2017. Käsikirja – Ruostumattomien terästen käyttö kantavissa rakenteissa. 4., painos. Luettavissa: <https://steel-sci.com/assets/fi-kaesikirja-ruostumattomien-teraesten-kaeyttoa-rakenteissa-4painos.pdf>

Ihalainen, E., Aaltonen, E., Aromäki, M., Sihvonen, P. 2007. Valmistustekniikka. 12., painos. Helsinki: Hakapaino Oy.

Taitotalo. Knowpap, Paperinvalmistuksen oppimisympäristö. 2025. viitattu 16.12.2024

[https://www.knowpap.com/www/suomi/paper\\_technology/general/5\\_papermaking/frame.htm](https://www.knowpap.com/www/suomi/paper_technology/general/5_papermaking/frame.htm) Vaatii käyttöoikeuden.

Valmet. Valmetin historia. 2024a. Viitattu 13.12.2024.

<https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/yritys/historia/>

Valmet. Tutkimus ja kehitys. 2024b. Viitattu 13.12.2024.

<https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/yritys/tutkimus-ja-kehitys/>

Valmet. Web turning. 2024c. Viitattu 13.11.2024.

<https://www.valmet.com/board-and-paper/board-and-paper-machines/coating-drying/web-turning/>

Valmet. Valmetin liiketoimintalinjat. 2024d. Viitattu 3.11.2024.

<https://www.valmet.com/fi/sijoittajat/valmetsijoituskohteena/liiketoimintalinjat/paperit>

Valmet. Valmetin paperiliiketoiminta pyörii kovilla kierroksilla. 2024e. Viitattu 12.11.2024

<https://www.valmet.com/fi/sijoittajat/sijoittajasuhteet/sijoittajasuhdejohtajan-blogi/Valmetin-paperiliiketoiminta-pyorii-kovilla-kierroksilla/>

Valmet. Valmet air dryer nozzles. 2024f. Viitattu 30.12.2024

<https://valmet.my.site.com/solutionfinder/file-preview?contentDocumentId=06958000000bPI7AAM>