

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

ESILÄMMITYSALTAAN PURISTUSRULLIEN KESTÄVYYDEN PARANTAMINEN

Outokumpu Stainless Oy

TEKIJÄ Henri Kupari

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Konetekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä Henri Kupari	
Työn nimi Esilämmitysaltaan puristusrullien kestävyysparantaminen	
Päiväys 23.4.2023	Sivumäärä/Liitteet 31/13
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Outokumpu Stainless Oy	
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyö tehtiin Outokumpu Stainless Oy:n RAP5-linjalle, joka on jatkuvatoiminen kylmävalssauslinja. Työn tavoitteena oli löytää ratkaisu, jolla saataisiin vähennettyä esilämmitysaltaan alueen puristusrulliin kohdistuvaa kuormitusta ja poistettua siten puristusrullien katkeamisongelma. Perusteena työn aloittamiselle oli esilämmitysaltaan suurkorjausprojekti, joka tullaan toteuttamaan vuoden 2023 tai 2024 aikana. Ennen suurkorjausta tavoitteena on ratkaista tiedetyt ongelmat, jotta ne voidaan korjata suunnitteluvaiheessa ennen uuden altaan rakentamista.</p> <p>Työssä tutustuttiin RAP5-linjan prosessiin ja tarkemmin esilämmitysaltaan alueeseen. Puristusrullien katkeamisongelmaa lähdettiin ratkaisemaan historiatietojen avulla, joihin nojaten voitiin määrittää rullalle sellainen kuormitus, jonka se tiedettävästi kestä. Työssä käsiteltiin lisäksi puristusrullan väsymismitoitusta teoriallasolla, sekä kerättiin tiedot, kuinka mitoitus tulisi tehdä ja mitä siinä pitäisi huomioida.</p> <p>Työn tuloksena saatiin ratkaisu, jonka avulla puristusrulliin kohdistuva kuormitus saadaan laskettua entiselle tasolle, jolloin ne ovat tiedetysti kestäneet. Laskenta toteutettiin hyödyntäen suorakulmaisen kolmion trigonometriaa, sekä kerättyjä lähtötietoja. Puristusrullaan kohdistuvan kuormituksen vähentäminen on toteutettu tässä opinnäytetyössä muuttamalla teräsnauhan kulkukulmaa, jolloin teräsnauhan vetoasetusarvon luoma kuormitus vähenee.</p> <p>Jatkotoimenpiteenä puristusrullalle voitaisiin suorittaa väsymismitoitus hyödyntäen tietokoneavusteista FEM-laskentaa, sekä tässä työssä hankittuja teoria- ja lähtötietoja.</p>	
Avainsanat terästeollisuus, ruostumaton teräs, lujuusoppi, kuormitus, väsyminen	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering	
Author Henri Kupari	
Title of Thesis Improving the Durability of Preheating Pool Wringer Rolls	
Date April 23, 2023	Pages/Appendices 31/13
Client Organisation /Partners Outokumpu Stainless Oy	
<p>Abstract</p> <p>This thesis was made for the RAP5 line of Outokumpu Stainless Oy. The line is a continuous cold rolling line. The aim of this thesis was to find a solution to reduce the load on the wringer rolls in the preheating pool and this way remove the problem of breaking the wringer rolls. The basis for starting the work was a major renovation project of the preheating pool, which will be carried out during 2023 or 2024. Before the major renovation project, the aim is to solve the identified problems so that they can be corrected during the planning phase before the construction of the new preheating pool.</p> <p>In the study the RAP5 line process and more specifically the area of the preheating pool were covered. The problem of breaking the wringer rolls was solved by historical data, which could be used to determine the load on the roll that it can withstand. In the work it was also dealt with the fatigue dimensioning of the wringer rolls on theoretical level, and collected information on how the dimensioning should be done and what should be taken into account in the process.</p> <p>The result of the work was a solution on how to reduce the load on the wringer rolls to the level which they were known to withstand. The calculations were carried out using trigonometers of a rectangular triangle, as well as the collected starting information. The reduction of the load on the wringer roll has achieved in this thesis by changing the angle of the steel strip, thus reducing the load generated by the steel strip tow setting value.</p> <p>As a follow-up, the wringer roll could be subjected to fatigue measurements using computer-assisted FEM calculations, as well as the theoretical and starting data acquired in this work.</p>	
<p>Keywords steel industry, stainless steel, strength of materials, load, fatigue</p>	

ESIPUHE

Tahdon kiittää haastavasta ja mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta Outokumpu Stainless Oy:tä, sekä RAP5-linjan käyttöpäällikkö Janne Rantamaulaa. Lisäksi haluan kiittää Savonia AMK:n ohjaajaani lehtori Simo Mäkistä opinnäytteeni ohjaamisesta.

Iso kiitos kuuluu myös perheelleni ja ystäväilleni, jotka tukivat ja kannustivat minua opinnäytteeni tekemisessä.

Torniossa 23.4.2023

Henri Kupari

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	TAUSTATIETOJA	8
2.1	Toimeksiantajayritys.....	8
2.2	Business Area Europe.....	8
2.3	Tornion tehtaot ja Kemin kaivos	9
2.4	RAP5-linja	11
2.5	RAP5-linjan prosessi	11
3	RAP5-LINJALLA PROSESSOITAVAT TERÄSLAJIT	14
3.1	Ruostumattomat teräkset.....	14
3.2	Austeniittiset teräslajit	14
3.3	Ferriittiset teräslajit	15
4	RAKENTEEN KUORMITUS.....	17
4.1	Lujuusoppi	17
4.2	Kuormat ja kuormitustavat.....	17
4.3	Kuormituksen luonne.....	18
5	VAURIOMEKANISMIT	19
5.1	Vaurion syntyminen.....	19
5.2	Väsyminen	19
6	LÄHTÖKOHDAT JA TAVOITTEET	21
6.1	Esilämmitysaltaan toiminnankuvaus	21
6.2	Puristusrullat	21
6.3	Ajoparametrit	21
6.4	Esilämmitysallas ja puristusrullien katkeaminen.....	21
7	PURISTUSRULLIEN KATKEAMISEN EHKÄISY	23
7.1	Teräsnauhan kulkukulman muuttaminen	23
7.2	Puristusrullan väsymismitoituksen teoria	25
8	YHTEENVETO	28
9	POHDINTA	29
	LÄHTEET	30
	LIITE 1: AJOPARAMETRIT	32
	LIITE 2: ESILÄMMITYSALTAAN KOKOONPANO	33

LIITE 3: KORKEAPAINEPESUYKSIKÖN KOKOONPANO	34
LIITE 4: KUIVAUSYKSIKÖN KOKOONPANO	35
LIITE 5: UPOTUSRULLAYKSIKÖN KOKOONPANO	36
LIITE 6: PURISTUSRULLAN PIIRUSTUS	37
LIITE 7: UPOTUSRULLAN PIIRUSTUS.....	38
LIITE 8: ESILÄMMITYSALTAAN VAURIOT	39
LIITE 9: ESILÄMMITYSALTAAN VAURIOT, TULOPUOLI	40
LIITE 10: ESILÄMMITYSALTAAN VAURIOT, JÄTTÖPUOLI	41
LIITE 11: ESILÄMMITYSALTAAN TOIMINNANKUVAUS.....	42
LIITE 12: LINJAN TEKNISET RAJOITUKSET	43
LIITE 13: PURISTUSRULLIEN VIKAANTUMISHISTORIA	44

KUVALUETTELO

KUVA 1. Outokummun toiminta-alueet (Outokumpu 2021)	8
KUVA 2. Ilmakuva Tornion tehtaista (Outokumpu 2021)	9
KUVA 3. Tornion tehtaiden ja Kemin kaivoksen materiaalivirta (Outokumpu 2021)	10
KUVA 4. Pintojen heijastavuus (Kalapudas ja Heikkinen 2011)	11
KUVA 5. RAP5 halli (Outokumpu 2017)	11
KUVA 6. RAP5-linjan prosessi (Outokumpu 2023 c)	13
KUVA 7. Ruostumattoman teräksen passiivikalvo (Euroinox julkaisuaika tuntematon).....	14
KUVA 8. Kuormat (Pennala 1998, 10)	17
KUVA 9. Kuormitustavat (Pennala 1998, 10).....	18
KUVA 10. Taivutusjännityksen jakautuminen akselilla (Lindroos ym. 1986).....	20
KUVA 11. Taivutusjännityksen amplitudi (Lindroos ym. 1986)	20
KUVA 12. Wöhlerin käyrä (Lindroos ym. 1986).....	20
KUVA 13. Teräsnauhan muodostama kulma	23
KUVA 14. Esimerkki Haighin diagrammista (Tomperi 2023).....	27

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö tehtiin Outokumpu Stainless Oy:n RAP5-linjalle. RAP5 on jatkuvatoiminen kylmävalssauslinja, johon on integroitu kylmävalssaus, hehkutus, peittäus, viimeistelyvalssaus ja venytysoikaisu. Linjan päätuotteita ovat kylmävalssatut austeniittiset ja ferriittiset teräkset.

Työssä perehdytään RAP5-linjan esilämmitysaltaan alueeseen, sekä tarkemmin alueella esiintyvään puristusrullien katkeamisongelmaan. Ongelma on saanut alkunsa, kun linjalla siirryttiin prosessoi- maan paksumpia ruostumattomia teräsnauhoja, jonka takia puristusrulliin kohdistuu aikaisempaa suurempi rasitus. Suurimmassa rasituksessa olevat puristusrullat sijaitsevat esilämmitysaltaan tulo- ja jättöpuolella, missä pelti laskeutuu ja nousee altaasta. Puristusrullan katketessa joudutaan linja pysäyttämään rullan vaihtoa varten, jolloin yritykselle syntyy taloudellisia tappioita etenkin tuotan- nonmenetyksen muodossa. Tällä hetkellä puristusrullien katkeamiseen on reagoitu ennakkohuollolla, jossa puristusrullat vaihdetaan säännöllisin väliajoin. Ennakkohuollosta huolimatta puristusrullien katkeamisia esiintyy edelleenkin vuosittain. Esilämmitysallas on tarkoitus vaihtaa suurkanjauksena lähivuosina, jolloin uuteen altaaseen voidaan tehdä tarvittavat muutokset ongelman poistamiseksi.

Työn tarkoituksena on löytää ratkaisu, jonka avulla saadaan vähennettyä puristusrulliin kohdistuvaa kuormitusta ja poistettua esilämmitysaltaan alueella esiintyvä puristusrullien katkeamisongelma. Ta- voitteenä on, että puristusrullat kestäisivät niiden käyttöiän loppuun asti eli kunnes ne on pinnoit- teen kuluneisuuden vuoksi vaihdettava. Tarvittavia muutoksia varten luotavat mittapiirustukset raja- taan tämän opinnäytetyön ulkopuolelle.

Opinnäytetyö toteutetaan tutustumalla linjan prosessiin ja tarvittaviin lähtötietoihin, kuten ajopara- metreihin, piirustuksiin ja vikaantumishistoriaan. Tämän lisäksi työssä tutustutaan erilaisiin kuormi- tustyyppeihin, sekä vaurion syntymekanismeihin. Kerätyn tiedon pohjalta tehdään laskelmat, joissa hyödynnetään puristusrullan vikaantumishistoriatietoja ja tehdään johtopäätöksiä nojaten historiasta tiedettyihin asioihin. Työssä esitetään myös teoriatasolla puristusrullan väsymismitoitus, joka on tar- kempi menetelmä tämän tyyppisten rakenteiden mitoitukseen.

2 TAUSTATIETOJA

2.1 Toimeksiantajayritys

Outokumpu lukeutuu maailman suurimpien teräksen tuottajien joukkoon, sen markkinaosuuden ollessa vuonna 2021 noin 5,5 % maailman markkinoilla. Euroopassa Outokumpu on markkinajohtaja, jossa markkinaosuus on 29 % kylmävalssatuista tuotteista. Pohjois- ja Väli-Amerikan alueella Outokummun osuus markkinoista on noin 24 %, jonka myötä Outokumpu on Amerikoissa markkinoiden toiseksi suurin tuottaja. (Outokumpu 2022 a.)

Outokumpu on jakanut toimintansa neljään liiketoiminta-alueeseen, jotka ovat Europe, Americas, Ferrochrome ja Long Products. Europe ja Americas vastaavat nauha- ja levytuotteiden tuotannosta, sekä myynnistä omilla markkina-alueillaan. Ferrochrome vastaa kromin ja ferrokromin tuotannosta, sekä myynnistä ja Long Products pitkien tuotteiden tuotannosta, sekä myynnistä. (Outokumpu 2022 b.) Vuonna 2020 Outokumpu työllisti kaikkiaan noin 10 000 työntekijää ja yrityksen liikevaihto oli noin 5,6 miljardia euroa (Outokumpu 2021). Kuvassa 1 on esitetty Outokummun toimipisteiden sijainnit kartalla.



KUVA 1. Outokummun toiminta-alueet (Outokumpu 2021)

2.2 Business Area Europe

Europe-liiketoiminta-alue on Outokummun suurin liiketoiminta-alue, johon sisältyy kaikki Euroopan, Lähi-idän, Aasian ja Afrikan nauha- ja levytoiminnot. Vuonna 2019 Outokummun Europe-liiketoiminta-alueella oli 28 % markkinaosuus Euroopassa. Liiketoiminta-alueen toimintoihin kuuluvat Tornion tehtaiden ja Kemin kaivoksen lisäksi Saksassa sijaitsevat kylmävalssauslaitokset Dillenburgissa ja Krefeldissä, sekä tarkkuusnauhan valmistus Dahlerbrückissä. Näiden lisäksi liiketoiminta-alueeseen kuuluu Ruotsissa nauhan tuotanto Avestassa, kylmävalssaus Nybyssä, kvarttolevyn valmistus Degerforsissa, sekä Alankomaissa sijaitseva viimeistelylaitos Terneuzenissa. Liiketoiminta-alueen myynnistä huolehtii kattava myynti- ja palvelukeskusverkosto ympäri maailman. (Outokumpu 2021.)

2.3 Tornion tehtaat ja Kemin kaivos

Outokummun Tornion tehtaat ja Kemin kaivos muodostavat yhdessä maailman integroiduimman teräksen tuotantoketjun ja ovat samalla Euroopan suurin materiaalin kierrättäjä. Tuotantoketju työllistää noin 2100 outokumpulaista ja arvioitu työllisyysvaikutus lähikuntien alueella on noin 8000 henkilöä. Tehdasalueen pinta-ala on vähän yli 600 hehtaaria, josta yli 56 hehtaaria on rakennusten peitossa. Tehdasalueella toimivat ferrokromitehdas, sulatto, kuumavalssaamo ja kylmävalssaamot, sekä satama mahdollistavat tuotteen kustannustehokkaan käsittelyn ja vähentävät logistiikkakuluja. (Outokumpu 2021.) Kuvassa 2 on esitetty ilmakuva Tornion tehtaista.



KUVA 2. Ilmakuva Tornion tehtaista (Outokumpu 2021)

Teräksen tuotantoketju lähtee liikkeelle maan alta Kemin kaivokselta, jossa louhitaan nikkeli-, rauta- ja kromimalmeja. Louhinnan jälkeen malmi lastataan louhoksista ja kuljetetaan esimurskaamoon. Murskattu malmi nostetaan maan pinnalle 600 metrin syvyydestä nostokuilun kautta ja maan pinnalla malmi murskataan uudestaan ja rikastetaan pala- ja hienorikasteiksi. Tämän jälkeen rikasteet lastataan ja kuljetetaan Tornion Ferrokromitehtaalle. (Outokumpu 2021.)

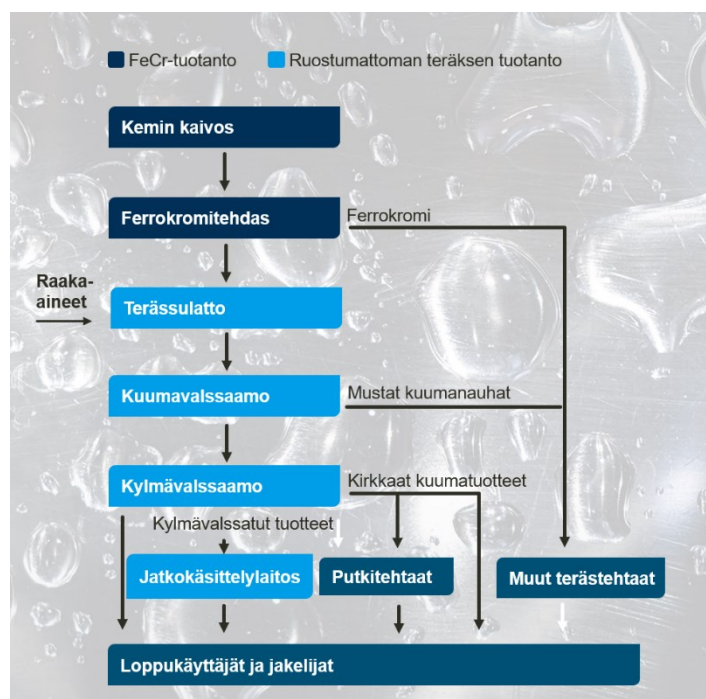
Kemin kaivokselta toimitettuun hienorikasteeseen sekoitetaan bentoniittia ja koksia, jonka jälkeen se syötetään pelletointirumpuun. Valmiit pelletit syötetään sintrausuuniin ja annostelujärjestelmä syöttää sulatusuuneihin kromipellettejä, koksia, palarikastetta ja kvartsiittia. Sulatusuunista tuleva ferrokromi lasketaan senkkaan ja siitä poistetaan kuona. Sula ferrokromi siirretään junalla senkassa vierssä sijaitsevalle terässulatolle. (Outokumpu 2021.)

Terässulatolla sula ferrokromi käsitellään ferrokromikonvertterissa, jossa sulasta poistetaan pii ja osa hiilestä. Valokaariuuni panostetaan kierrätysteräksellä ja muilla raaka-aineilla, kuten koksilla, nikkelillä, molybdeenilla ja ferrokromilla. Kun panos on sulanut valokaariuunissa ja siitä on poistettu kuona, sekoitetaan se ferrokromisulaan ja siirretään AOD-konvertteriin. AOD-konvertterissa poistetaan hiili ja rikki, sekä lisätään seosaineita, jotta saavutetaan haluttu koostumus. AOD-konvertterilta

sula siirretään senkka-asemalle, jossa tehdään sulaan lopulliset käsittelyt ennen valua. Sula siirretään senkassa jatkuvavalukoneelle, jossa valun aikana teräs jäädytetään ja katkaistaan aihiksi. Valmiit ahiot siirretään kuumavalssaamolle niiden ollessa vielä punahehkuisia, jotta niiden sisältämä energia voidaan hyödyntää. (Outokumpu 2021.)

Kuumavalssaamalla ahiot siirretään askelpalkkiuuniin, jossa teräksen lämpötila nostetaan yli 1200 asteeseen. Askelpalkkiuunista ahiio siirtyy valssaukseen, jossa sitä valssataan edestakaisin etuvalssaimessa. Etuvalssaimen avulla ahiio ohenee ja sen pituus kasvaa, jolloin siitä syntyy esinauha. Esinauhaa ohennetaan entisestään valssaamalla sitä Steckel- ja Tandem-valssaimilla. Valssauksen jäljiltä esinauhasta tulee kuumanauha, jonka paksuus ja leveys vaihtelee. Tämän jälkeen kuumanauha kelataan rullaksi ja siirretään jäähdytysaltaaseen. Haluttuun lämpötilaan jäähtynyt rulla kuljetetaan lavetilla kylmävalssaamolle tai vaihtoehtoisesti myydään mustana nauhana. (Outokumpu 2021.)

Kylmävalssaamalla kuumanauha hehkutetaan ja peitataan, jolloin teräksen mekaaniset ominaisuudet palautuvat ja saadaan poistettua musta hilse nauhasta. Käsittelyn myötä teräksen pinta muuttuu samean mustasta hopeanharmaaksi. Teräsnauha kylmävalssataan haluttuun paksuuteen, jolloin nauha voi ohentua yli 80 % lähtöpaksuudesta. Valssauksen myötä teräksen raekoko muuttuu ja nauha lujittuu. Teräksen mekaanisten ominaisuuksien palauttamiseksi kylmävalssattu nauha hehkutetaan ja peitataan uudelleen. Hehkutuksen ja peittauksen jälkeen nauha kiillotetaan viimeistelyvalssaimella pinnan parantamiseksi. Lopuksi nauha siirtyy halkaisu- ja katkaisulinjoille, jossa teräs leikataan asiakkaan haluamiin mittoihin. Lopputuotteena syntyy asiakkaan tilauksen mukaan, joko nauhaa tai levyjä. (Outokumpu 2021.) Kuvassa 3 on esitelty yksinkertaistetusti materiaalivirta Kemins kaivokselta aina loppukäyttäjälle asti.



KUVA 3. Tornion tehtaiden ja Kemins kaivoksen materiaalivirta (Outokumpu 2021)

2.4 RAP5-linja

RAP5-linja on jatkuvatoiminen linja, johon on integroitu kylmävalssausta, hehkutus, peittäys, viimeistelyvalssausta ja venytysoikaisu. Nimitys RAP5 tulee englannin kielestä: rolling, annealing and pickling line 5. Linjalla tuotetaan kuumanauhaa ja kylmänauhaa, riippuen siitä, että prosessoidaanko teräsnauha kahteen kertaan linjalla. Austeniittisten terästen kohdalla ensimmäisen kierroksen nauhaa kutsutaan kuumanauhaksi eli 2E-toimitustilaiseksi tuotteeksi ja toisen kierroksen nauhaa kylmänauhaksi eli 2B tai 2D-toimitustilaiseksi tuotteeksi. Ferriittiset tuotteet prosessoidaan linjalla yhden kerran, eli 2E-toimitustilaiseksi tuotteeksi. (Outokumpu 2023 d.) Kuvassa 4 on esitetty 2B- ja 2E-toimitustilaisten tuotteiden pinnan heijastavuuden ero.



KUVA 4. Pintojen heijastavuus (Kalapudas ja Heikkinen 2011)

RAP5-linja on rakennettu kolmikerroksiseksi ja linjaan mahtuu teräsnauhaa melkein viisi kilometriä, kun kaikki nauhavarajaajat ovat täynnä. Linja on jatkuvatoiminen ja sen mahdollistaa linjassa olevat nauhavarajaajat, jotka toimivat puskureina eri prosessien välillä. (Outokumpu 2017.) Kuvassa 5 on esitetty RAP5 hallin layout.



KUVA 5. RAP5 halli (Outokumpu 2017)

2.5 RAP5-linjan prosessi

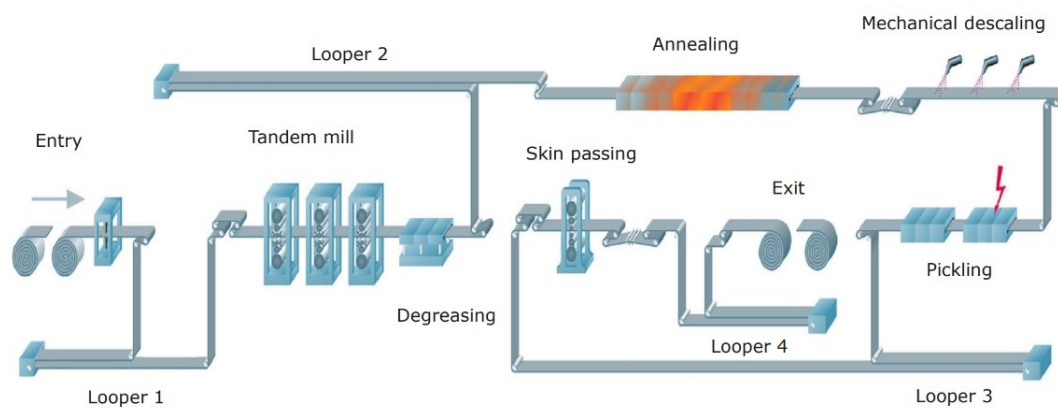
Kuumanauhat kuljetetaan lavetilla kuumavalssaamolta ja puretaan RAP:in varastorampille, josta automaattinen hissinostin kuljettaa kuumanauharullat korkeavarastoon. Korkeavarastossa on 1900 rullapaikkaa ja lavetti tuo rampille neljä rullaa kerrallaan. (Outokumpu 2017.)

Korkeavarastosta automaattinen hissinstin noutaa ajo-ohjelman mukaisen rullan ja kuljettaa sen linjan alkupään varastorampille, josta siirtovaunu kuljettaa rullan askelpalkille. Rulla liikkuu askelpalkilla kohti aukikelaimia, joita on kaksi. Tämän jälkeen rulla kelataan auki ja syötetään linjaan. Nauha oikaistaan oikaisukoneella ja sen keula leikataan suoraksi "lentävällä leikkurilla", joka leikkaa nauhan pujotusnopeudessa. Tämän jälkeen nauha laser hitsataan edellisen nauhan jatkoksi ja hitsiliitos tarkastetaan, sekä lovetaan molemmilta reunoilta. Ferriittisillä teräslajeilla käytetään lisäksi sauman hiontaa hitsin kuvun poistoon. Hitsauskoneelta nauha ajetaan ensimmäiseen nauhavarajaan, josta nauha siirtyy esilämmityksen kautta tandemvalssaimelle. Kolmetuolisella tandemvalssaimella teräs-nauha valssataan joko väli- tai loppupaksuuteen. Valssauksen jälkeen nauha puhdistetaan, sekä kuivataan valssausöljystä rasvanpoistossa ja ajetaan tämän jälkeen toiseen varajaan. (Outokumpu 2017.)

Toisesta varajasta nauha jatkaa matkaansa hehkutusuuneihin, joita on kaksi. Hehkutuksessa teräs-nauha rekristallisoituu, jonka myötä valssauksessa muokkauslujittunut rakenne pehmenee. Hehkutusuunien jälkeen nauha jäähdytetään, joko ilmalla tai vedellä. Kuumanauhan jäähdytyksessä käytetään vettä ja kylmänauhalla ilmaa. Jäähdytyksen jälkeen kuumanauhoille käytetään mekaanista hilseenpoistoa. Ensimmäisenä nauha kulkee hilseenmurtajan lävitse, jossa parannetaan nauhan tasomaisuutta ja irrotetaan epäpuhtauksia nauhan pinnasta. Seuraavaksi nauha kulkee kolmen kuulapuhallusyksikön läpi, jossa nauhan molemmille pinnoille puhalletaan teräskuulia, jotta saadaan nauhan pinnasta lisää epäpuhtauksia irrotettua. Mekaanista hilseenpoistoa käytetään ainoastaan kuumanauhoille, kylmänauhoilla laitteisto on pois käytöstä. (Outokumpu 2017.)

Mekaanisesta hilseenpoistosta nauha siirtyy peittausalueelle, joka sisältää elektrolyytti- ja sekahappopeittauksen. Peittauksessa hyödynnetään kemikaaleja puhdistamaan teräsnauha oksideista ja kromiköyhistä alueista, jolloin "ruskeasta" teräsnauhasta tulee teräksen harmaa. Peittausta ennen nauha pestään esihuuhtelussa, jotta kuulapuhalluksesta syntynyt lika saadaan pois nauhan pinnalta. Elektrolyyttipeittauksessa nauhasta poistetaan epäpuhtauksia tasavirtaa hyödyntäen. Tämän jälkeen nauha pestään välihuuhtelussa, josta se jatkaa matkaan sekahappopeittaukseen. Sekahappopeittauksessa nauhan pinnasta poistetaan lisää epäpuhtauksia happojen avulla. Peittausalueen loppupäässä on vielä loppuhuuhtelu, jossa nauhan pinnasta pestään sekahappopeittauksessa syntynyt lika ja nauha kuivataan. Kuivauksen jälkeen nauha siirtyy kolmanteen varajaan. (Outokumpu 2017.)

Kolmannesta varajasta nauha siirtyy viimeistelyvalssaimelle, jossa kuumanauhaa voidaan ohentaa vielä 10 % tai kylmänauha-ajossa parannetaan pinnanlaatua ja nauhan tasomaisuutta. Viimeistelyvalssaimen jälkeen on toinen rasvanpoisto, jossa nauha puhdistetaan ennen neljänteen varajaan ajamista. Neljännessä varajasta nauha nousee loppupään valvomon tasolle, jossa suoritetaan koneellinen ja visuaalinen pinnantarkastus. Pinnantarkastuksen jälkeen nauha leikataan hitsaus-saumasta "lentävällä leikkurilla" ja kelataan toiselle kahdesta päällekelaimesta. Kelauksen jälkeen rulla sidotaan ja kuljetetaan siirtovaunulla loppupään varastorampille, josta korkeavaraston automaattinen hissinstin noutaa sen ja kuljettaa varastoon. Varastosta rulla jatkaa matkaansa, joko toiselle prosessointikierrokselle RAP5:llä, kylmävalssaamo 1:lle tai toimitukseen asiakkaalle. (Outokumpu 2017.) Kuvassa 6 on esitetty RAP5-linjan prosessi yksinkertaistettuna.

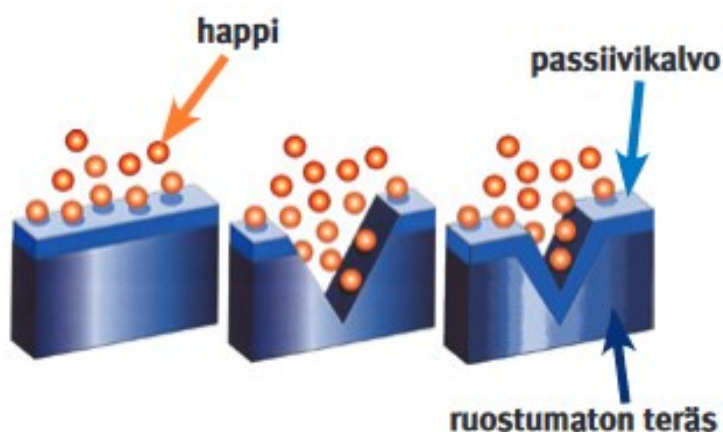


KUVA 6. RAP5-linjan prosessi (Outokumpu 2023 c)

3 RAP5-LINJALLA PROSESSOITAVAT TERÄSLAJIT

3.1 Ruostumattomat teräkset

Ruostumattomat teräkset ovat seosteräksiä, joihin on seostettu vähintään 10,5 % kromia, sekä hiilipitoisuus on alle 1,2 %. Kromiseostuksen tarkoitus on parantaa teräksen korroosionkestävyyttä, joka onkin yksi ruostumattoman teräksen tunnetuimmista ominaisuuksista. Hiilipitoisuudella voidaan vaikuttaa teräksen mekaanisiin ominaisuuksiin, sekä mikrorakennemuutoksiin eri lämpötiloissa. Enemmän hiiltä sisältävä teräksen vetomurtolujuus on korkeampi, kuin matalahiillisen, mutta matalahiillisen teräksen sitkeys on parempi. Useat ruostumattomat teräkset soveltuvat käytettäviksi prosessi- ja elintarviketeollisuuden kohteissa, koska ne kestävät esimerkiksi ilmastollista korroosiorasitusta ja täyttävät hygieniavaatimukset. Ruostumattoman teräksen pintaan muodostuvan, paljon kromioksidia sisältävän itsestään korjautuvan passiivikalvon (kuva 7.) ansiosta tuotteilla on pitkä elinkaari ja huoltokustannukset ovat matalat. Edellä mainitut seikat ja erinomainen kierrätettävyys tekevät ruostumattomasta teräksestä ekologisen ja kustannustehokkaan valinnan. (Taulavuori, Kyröläinen & Manninen 2011, 6.)



KUVA 7. Ruostumattoman teräksen passiivikalvo (Euroinox julkaisuaika tuntematon)

3.2 Austeniittiset teräslajit

Austeniittinen ruostumaton teräs on rautapohjainen seos, joka sisältää 16–26 % kromia ja 6–22 % nikkeliä, pitoisuuksien summan ollessa kuitenkin vähintään 23 %. Kromin ja nikkelin lisäksi seos voi sisältää myös monia muita seosaineita, joilla tavoitellaan tietynlaisia ominaisuuksia teräkselle. Austeniittisten teräslajien nimitys tulee sopivalla lämpökäsittelyllä saavutettavasta pysyvästä austeniittisestä rakenteesta. Kromin muodostaman passiivikalvon lisäksi nikkeli parantaa teräksen korroosionkestävyyttä, varsinkin heikosti hapettavissa olosuhteissa. Nikkelin pääasiallinen tehtävä on kuitenkin tehdä mahdolliseksi teräslajin pysyvästi austeniittinen rakenne. Austeniittisille teräslajeille on ominaista erittäin alhainen hiilipitoisuus, yleensä alle 0,1 %. (Lindroos, Sulonen & Veistinen 1986, 455–456.)

EN 1.4301 on 18 % kromia ja 8 % nikkeliä sisältävä austeniittinen ruostumaton teräslaji. Kyseinen laji sopii useisiin käyttökohteisiin, joissa vaaditaan materiaalilta korroosionkestävyyttä, muovattavuutta ja hitsattavuutta. Lajin yleisimpiä käyttökohteita ovat koti- ja keittiötarvikkeet, listat, kaiteet, säiliöt ja elintarviketeollisuuden laitteet. (Outokumpu 2023 a.)

EN 1.4404 on 17 % kromia ja 10 % nikkeliä sisältävä austeniittinen ruostumaton teräslaji, johon on seostettu 2 % molybdeeniä. Kyseinen laji soveltuu erityisesti käyttökohteisiin, joissa ollaan tekemisissä syövyttävien tai liuottavien aineiden kanssa. Lisäksi lajilla on hyvä muovattavuus ja hitsattavuus. Lajin yleisimpiä käyttökohteita ovat kemianteollisuuden laitteet ja muut teollisuuslaitteet, joissa käsitellään kemikaaleja. (Outokumpu 2023 b.)

EN 1.4541 on 17 % kromia ja 9 % nikkeliä sisältävä austeniittinen ruostumaton teräslaji, joka on stabiloitu titaanilla. Titaanistabilointi parantaa lajin lämmönkesto-ominaisuuksia ja tekee siitä muita austeniittisiä lajeja kirjavamman. Lajin yleisimpiä käyttökohteita ovat pakoputket, painesäiliöt ja muut lämmönvaihtelulle altistuvat kohteet. (Outokumpu 2023 a.)

EN 1.4571 on 17 % kromia ja 11 % nikkeliä sisältävä austeniittinen ruostumaton teräslaji, johon on seostettu 2 % molybdeeniä. Molybdeeniseostuksen lisäksi laji on stabiloitu titaanilla. Lajin yleisimmät käyttökohteet ovat korkean lämpötilan sovellukset, kuten savukaasukohteet. Lämpötila kestävyuden lisäksi laji soveltuu käytettäväksi syövyttävien ja liuottavien aineiden kanssa. (Outokumpu 2023 b.)

3.3 Ferriittiset teräslajit

Ferriittinen ruostumaton teräs on rautapohjainen seos, joka sisältää 10,5–30 % kromia. Seos voi sisältää myös muita seosaineita, kuten molybdeeniä, piitä, alumiinia, titaania, nikkeliä ja niobiumia. Tyypillisesti ferriittisiin teräslajeihin ei seosteta nikkeliä. (Outokumpu 2011.)

Ferriittiset ruostumattomat teräslajit voidaan jakaa viiteen ryhmään kromipitoisuuden mukaan:

- Ruostumattomat rakenneteräkset, EN 1.4003 ja EN 1.4512
- Tavallinen 17-krominen laji, EN 1.4016
- Stabiloidut lajit, EN 1.4509
- Molybdeeniseostetut lajit, EN 1.4521
- Superferriittiset lajit, kromipitoisuus yli 18 %

Outokummun RAP5-linjalla tuotetaan kaikkia edellä mainittuja lajeja, pois lukien superferriittisiä lajeja. (Outokumpu 2011.)

EN 1.4003 on 12 % kromia sisältävä ferriittinen ruostumaton teräslaji, johon on seostettu myös mangaania ja nikkeliä. Lajilla on hyvä hitsattavuus, koska jäähtyessään se muodostaa matalahiilistä martensiittia. Lisäksi laji on raekooltaan hieno ja sillä on erinomainen sitkeys myös matalissa lämpötiloissa. Lajin korroosionkestävyys on yli 100-kertainen hiiliteräksiin verrattuna, mutta työstettävyyttä

ja muokattavuus on S355 hiiliteräksen luokkaa. Ferriittisen mikrorakenteen myötä lajin lämmönjohtavuus on erinomainen ja lämpölaajenemiskerroin alhainen. Laji soveltuu erityisesti runkorakenteisiin ja maalattaviin kohteisiin, joilta odotetaan yli 10 vuoden korroosionkestoa. (Outokumpu 2011.)

EN 1.4512 on 12 % kromia sisältävä ferriittinen ruostumaton teräslaji, joka on stabiloitu titaanilla. Lajilla on hyvä hitsattavuus stabiloinnin ansiosta, koska se ehkäisee herkistymistä. Lisäksi lajilla on hyvä muovattavuus ja työstettävyys. Korroosiokestävyys lajilla on yli 100-kertainen verrattuna hiiliteräksiin. Ferriittisen mikrorakenteen myötä lajin lämmönjohtavuus on erinomainen ja lämpölaajenemiskerroin alhainen. Laji soveltuu parhaiten putkien ja pakokaasulaitteiden valmistukseen, mutta ei rakennekäyttöön sen kylmäaurauden vuoksi. (Outokumpu 2011.)

EN 1.4016 on 17 % kromia sisältävä ferriittinen ruostumaton teräslaji, jonka keskeisimmät seosaineet ovat rauta ja kromi. Kyseinen laji käsittää lähes puolet kylmävalssattujen ferriittisten maailmanmarkkinoista. Laji on stabiloimaton, joka tekee siitä edullisen, mutta heikentää tiettyjä ominaisuuksia. Lajin hitsattavuus on heikohko, koska hitsiliitos herkistyy raerajakorroosiolle. Muovattavuus on kohtalainen ja kiillottuminen on erinomaista, joten laji soveltuu erinomaisesti kiiltovalssaukseen. Lajin korroosionkestävyys on riittävä tavanomaisimpiin käyttökohteisiin sisätiloissa, kuten kodinkoneisiin, aterimiin ja sisäarkkitehtuuriin. (Outokumpu 2011.)

EN 1.4509 on tuplastabiloitu, 18 % kromia sisältävä ferriittinen ruostumaton teräslaji. Laji on stabiloitu niobiumilla ja titaanilla. Niobiumilla, hiilellä ja tyrellä on suoraan lujittava vaikutus. Lisäksi titaanikin lujittaa, mutta ei niin lineaarisesti. Lajilla on erittäin hyvä korroosionkesto sen korkean kromipitoisuuden ansiosta, mutta ei kuitenkaan yhtä hyvä kuin austeniittisilla vakiolaaduilla lähes samasta kromipitoisuudesta huolimatta. Lajille ominaista on kylmäaurauden esiintyminen ainepaksuuden kasvaessa. Lajin tyypillisimmät käyttökohteet ovat keittiötasot, ravintolakalusteet ja autojen pakokaasujärjestelmät. (Outokumpu 2011.)

EN 1.4521 on 18 % kromia ja 2 % molybdeenia sisältävä ferriittinen ruostumaton teräslaji, joka on tuplastabiloitu niobiumilla ja titaanilla. Tuplastabiloinnin ansiosta lajilla on hyvä hitsattavuus ja muokattavuus. Korroosionkestävyydeltään laji vastaa useissa sovelluksissa austeniittista haponkestävää lajia EN 1.4404. Lajin edut verrattuna austeniittisiin lajeihin ovat tunteettomuus jännityskorroosiolle kloridiympäristöissä, sekä alhaisempi ja vakaampi hinta. Ferriittinen mikrorakenne luo lajille erinomaisen lämmönjohtavuuden ja alhaisen lämpölaajenemiskertoimen. Lajin tyypillisiä käyttökohteita ovat kuumavesikohteet, lämmönvaihtimet, käymisastiat ja juomavesiputket. (Outokumpu 2011.)

4 RAKENTEEN KUORMITUS

4.1 Lujuusoppi

Lujuusopin avulla tutkitaan, millainen rakenne tarvitaan, jotta se kykenee hallitsemaan sille asetetun kuorman. Mikäli kuorma ja rakenteen mitat on annettu, niin lujuusopilla voidaan selvittää rakenteen kyky suorittaa kuorman siirtotehtävän tukipisteisiin. (Pennala 1998, 9.)

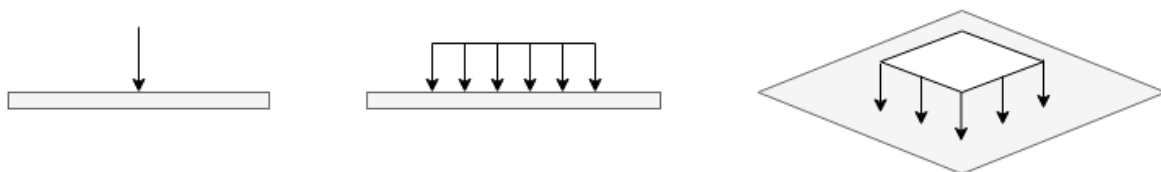
Jäykkien rakenteiden statiikassa käsitellään rakenteita täysin jäykinä, mutta todellisuudessa, kun rakenteen eri pisteisiin kohdistuu kuormia, niin muuttuvat pisteiden keskinäiset etäisyydet ja rakenteen sisään syntyy sisäisiä voimia eli jännityksiä. Kaikki rakenteet ovat käytännössä jossain määrin kimmoisia, minkä vuoksi rakenteeseen, johon kohdistuu kuormitusta, syntyy erinäisiä muodonmuutoksia. (Pennala 1998, 9.)

Lujuusopin avulla pyritään selvittämään kuormien rakenteeseen aiheuttamat muodonmuutokset, sekä jännitysten jakautumat. Tämän lisäksi voidaan selvittää jännitysten ja muodonmuutosten väliset yhteydet, sekä rakenteen kestävät kuormitukset. Muodonmuutoksiin, jännityksiin ja rakenteen kestämaan kuormitukseen vaikuttavat rakenteen mitat, muoto ja materiaali. (Pennala 1998, 9.)

Lujuusopin tietoja sovelletaan yleensä rakenteiden ja koneiden osien laskennassa, kun halutaan selvittää edellä mainittuja seikkoja. Laskenta suoritetaan yleensä hyödyntämällä yksinkertaistavia matemaattisia malleja. Analysointitehtävän tapauksessa rakenne, mitat ja materiaali ovat tiedettyjä, jolloin voidaan selvittää rakenteen muodonmuutokset ja jännitykset tietyn kuormituksen alaisena. Lisäksi analysointitehtävässä voidaan selvittää rakenteeseen vaikuttavien kuormavoimien maksimiarvot, joilla ei ylitetä missään rakenteen kohdassa materiaalille määritettyjä jännityksiä tai muodonmuutoksia. Mitoitustehtävissä rakenteeseen vaikuttava kuorma, jännitykset ja muodonmuutokset ovat annettuja, jolloin voidaan selvittää rakenteen mitat tietyllä materiaalilla. (Pennala 1998, 9.)

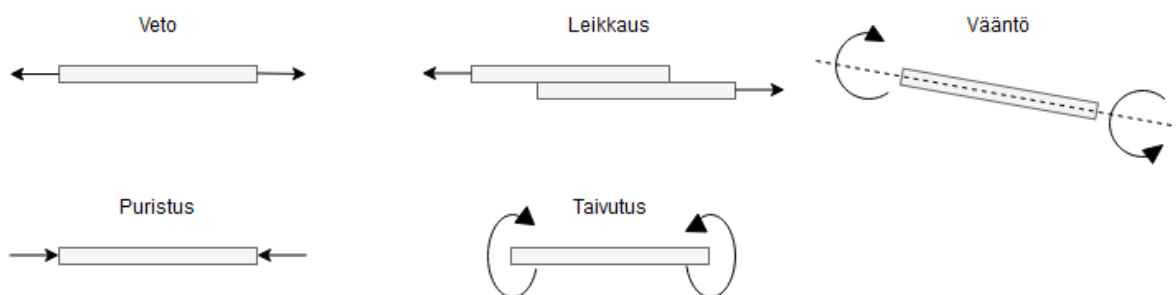
4.2 Kuormat ja kuormitustavat

Kuormat voidaan jakaa neljään ryhmään, riippuen siitä miten ne kohdistuvat rakenteeseen. Kuvassa 8 on esitetty vasemmalta lukien pistekuorma, viivakuorma ja painekuorma. Neljäs kuormatyyppi on tilavuuskuorma, johon vaikuttaa rakenteen oma massa ja rakenteeseen kohdistuva kiihtyvyyys. (Pennala 1998, 10.)



KUVA 8. Kuormat (Pennala 1998, 10)

Kuormitustavat voidaan jakaa viiteen ryhmään sen mukaan, miten kuormitus vaikuttaa kappaleeseen. Kuvassa 9 vasemmalta luettuna ensimmäisenä on vetokuormitus, jossa rakenteeseen vaikuttaa pituusakselin suuntainen, poikkileikkauksen painopisteen kautta kulkeva vetävä voima. Veto-kuormitusta vastaava kuormitus on puristuskuormitus, joka on kuin vetokuormitus, mutta voiman suunta on kohti rakennetta, jolloin se luo rakenteeseen puristavan voiman. Kolmas kuormitustapa on leikkaus, jossa rakenteeseen vaikuttava voima kulkee leikkaustasossa tason suuntaisesti. Neljäs kuormitustapa on taivutus, jossa rakenteeseen vaikuttaa voimapari, joka on tässä tapauksessa momentti. Taivutuskuorma syntyy voimaparista, jotka vaikuttavat rakenteen pituusakselin tasolla. Viides ja viimeinen kuormitustapa on vääntö, jossa rakenteeseen vaikuttaa voimapari, joka on tässä tapauksessa vääntömomentti. Vääntökuormitus syntyy, kun rakenteen pituusakseliin verraten kohtisuorassa olevilla tasoilla vaikuttaa toisiaan vastustavat vääntövoimat. (Pennala 1998, 10.)



KUVA 9. Kuormitustavat (Pennala 1998, 10)

4.3 Kuormituksen luonne

Lujuusopissa tutkittavat kuormitukset voidaan jakaa luonteensa mukaan kahteen luokkaan, joita ovat:

- Dynaaminen kuormitus, jossa kuormituksen suuruus vaihtelee ajan mukana. Kuormitus voidaan jakaa vielä kolmeen eri alaluokkaan, joita ovat jatkuvasti muuttuva kuorma, pulssikuorma ja iskukuorma. Jatkuvasti muuttuvassa kuormassa voiman suuruus ja suunta muuttuvat säännöllisesti. Pulssikuormassa voiman suuruus ja suunta muuttuvat epäsäännöllisesti. Iskukuorman tapauksessa voiman suuruus ja suunta muuttuvat täysin sattumanvaraisesti. Lujuusopissa väsymislujuutta käytetään dynaamisten kuormitusten laskuperustana. (EJOT Sormat julkaisuaika tuntematon; Pennala 1998, 11.)
- Staattinen kuormitus, jossa aika ei vaikuta kuormitukseen tai se muuttuu erittäin hitaasti. Kuormituksessa voimaan suuruus ja suunta pysyvät vakioina. Staattiset kuormat voidaan jakaa kahteen ryhmään kuorman vaikutusajan mukaan, jolloin puhutaan pitkä- ja lyhytaikaiskuormista. Lujuusopissa staattista lujuutta käytetään staattisen kuormituksen laskuperustana. (EJOT Sormat julkaisuaika tuntematon; Pennala 1998, 11.)

5 VAURIOMEKANISMIT

5.1 Vaurion syntyminen

Metallirakenteiden vaurioitumisen yksi perusedellytyksistä on, että rakenteeseen vaikuttaa jokin jännitystilä, jonka seurauksena rakenne voi vaurioitua. Vaikuttava jännitys voi olla sisäinen tai ulkoinen ja erittäin paikallinen. Metallirakenteiden vaurioita ovat esimerkiksi ylikuorman ja sisäisten jännitysten vaikutuksesta syntyneet vauriot, kuten muodonmuutokset. Tämän lisäksi vauriotyyppeihin voidaan lukea murtumat, sekä korroosion tai kulumisen aiheuttamat vauriot. (Kauppi 2021, 4–5.)

Vaurion syntymiseen vaikuttaa aina jokin syy ja ne voidaan jaotella seuraavanlaisesti:

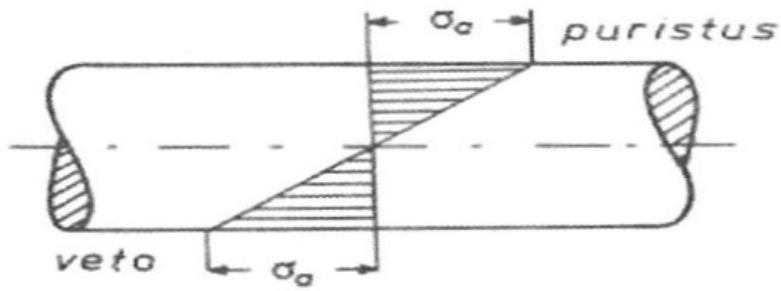
- Materiaalin käsittelyvirheet, kuten sisäiset jännitykset, virheellinen pinnanlaatu tai hitsausvirheet.
- Puutteellinen muotoilu, kuten epäjatkuvuuskohdat.
- Virheellinen materiaalivalinta, kuten väärät valintakriteerit tai raja-arvot
- Epäsuotuisat toimintaolosuhteet, kuten väärät prosessiparametrit tai huollon laiminlyönti.
- Virheet materiaalissa, kuten muokkaus-, valu- tai liitosvirheet.
- Asentaessa syntyneet virheet, kuten virheellisen sovituksen pakottaminen paikoilleen. (Kauppi 2021, 4.)

Rakenteessa esiintyvien vaurioiden syntymiseen voi vaikuttaa useamman tekijän summa. Teollisuudessa yleisin vauriomekanismi on korroosio, joka kattaa noin 29 % teollisuudessa esiintyvistä vaurioista. Toiseksi yleisin vauriomekanismi teollisuudessa on väsyminen 25 % osuudella. Yhdessä edellä mainitut vauriomekanismit kattavat siis yli puolet teollisuudessa esiintyvistä rakennevaurioista. (Kauppi 2021, 4–5.)

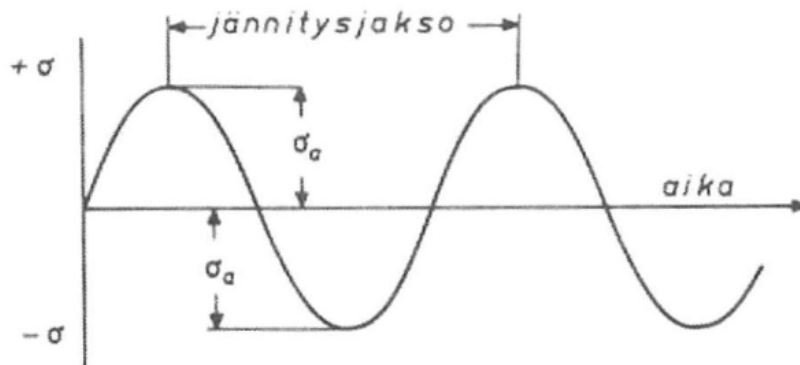
5.2 Väsyminen

Rakenteen murtuminen voi tapahtua alle sille määritellyn murtolujuuden ja usein jopa myötölujuutta matalimmilla nimellisillä jännityksillä. Kun näin tapahtuu, niin puhutaan väsymisestä. Väsymisessä rakenteeseen vaikuttaa vaihteleva jännitys ja kun jännitysvaihteluiden lukumäärä kasvaa riittävän suureksi rakenne lopulta murtuu. Väsymismurtuma on useasti ennalta arvaamaton, koska se kehittyy huomaamattomasti ja sen edellä ei synny havaittavaa plastista muodonmuutosta. Väsymismurtuma syntyy rakenteessa yleisesti sellaiseen kohtaan, jossa on muusta rakenteesta eroava muoto. Yleisimpiä väsymismurtumakohtia rakenteessa ovat hitsausliitokset, olakkeet, kiilaurat, porareiat, säröt ja muut mahdolliset lovet. (Lindroos ym. 1986, 765–767.)

Väsymismurtumia rakenteeseen aiheuttaa yleisesti ottaen useimmin taivutusjännitykset. Esimerkiksi, kun laakereiden varassa olevaa akselia kuormitetaan tasaisella poikittaisvoimalla, aiheuttaa se akseliin taivutusjännitystä. Kun valitaan akselilta tietty piste ja akseli pyörii, niin jakaantuu taivutusjännitys tietyillä kohdilla akselia puristukseksi ja vastakkaisella puolella vedoksi (kuva 10). Aikajanalle asetettuna puristus ja veto muodostavat positiiviseen ja negatiiviseen suuntaan vaihtelevia jännitysamplitudeja, jotka muodostavat jännitysjakson. (Lindroos ym. 1986, 765.) Kuvassa 11 on esitetty esimerkki taivutusjännityksen muodostamasta amplitudista.

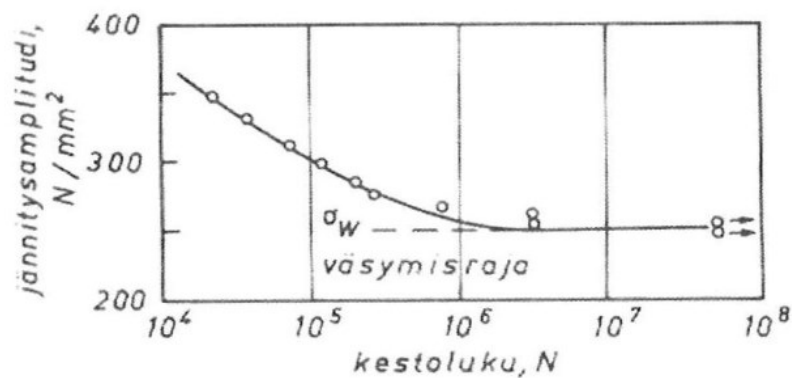


KUVA 10. Taivutusjännityksen jakautuminen akselilla (Lindroos ym. 1986)



KUVA 11. Taivutusjännityksen amplitudi (Lindroos ym. 1986)

Väsymistä tutkittaessa hyödynnetään usein logaritmista käyrää, jota kutsutaan myös nimellä Wöhlerin käyrä (kuva 12). Wöhlerin käyrä muodostuu tietyille materiaalille eri jännitysamplitudeilla tehdyistä väsytykskokeista, joiden pohjalta saadaan kerättyä informaatiota siitä, kuinka monta jännitysjaksoa materiaali kestää ennen murtumista. Materiaalin kestämiä jännitysjaksojen lukumäärää kutsutaan kestopuvuksi. (Lindroos ym. 1986, 766)



KUVA 12. Wöhlerin käyrä (Lindroos ym. 1986)

6 LÄHTÖKOHDAT JA TAVOITTEET

6.1 Esilämmitysaltaan toiminnankuvaus

Esilämmitysaltaan toiminnankuvaus on esitetty liitteessä 11.

6.2 Puristusrollat

Esilämmitysaltaassa on yhteensä neljä puristusrollaparia, eli yhteensä kahdeksan puristusrollaa. Puristusrollia varten on vaihtovaunu, jonka avulla kuluneet, mutta ehjät puristusrollat voidaan vaihtaa tehokkaasti. Puristusrollien tehtävänä on pitää vesi tietyn yksikön sisäpuolella ja vastaavasti estää veden pääsy yksikköön edellisestä yksiköstä. Puristusrollan runko koostuu rollan vaipasta, eli teräsputkesta, jonka pinnassa on kumiointi. Kumioidun teräsvaipan molemmissa päissä on teräsakselit, joista toinen on koneistettu moottoripääksi ja toinen vapaapääksi. Runko, sekä akselit on valmistettu rakenneteräksestä. (Outokumpu 2001 d.) Liitteessä 6 on esitetty puristusrollan mittapiirustus.

6.3 Ajoparametrit

RAP5 linjalla prosessoidaan useilla eri mitoilla olevia teräsnauhoja, jonka myötä myös nauhojen poikkipinta-ala vaihtelee paljon. Poikkipinta-ala on yksi muuttujista, joka määrittää tietyn prosessivaiheen ajoparametrit. Karkeasti ottaen teräsnauhat jaotellaan kapeisiin, keskileveisiin ja täysleveisiin nauhoihin. Kapeat nauhat ovat keskimäärin 1000 mm leveitä, keskileveät 1300 mm leveitä ja täysleveät 1500 mm leveitä. Teräsnauhojen paksuus vaihtelee noin 1,0 mm ja 6,5 mm välillä. Linjan tekniset rajoitukset on esitetty liitteessä 12.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan ajoparametrien osalta esilämmitysaltaan alueen vetoasetuksia. Vetoasetuksilla tarkoitetaan nauhaan kohdistuvaa pituussuuntaista voimaa, jota mitataan SI-järjestelmän mukaisella yksiköllä, Newton. Prosessivaiheille on määritetty omat vetoasetuksensa, joihin vaikuttaa ensisijaisesti 2-tasolta tuleva asetusarvo, sekä nauhan poikkipinta-ala. Automaatio laskee muuttujien mukaan käytettävän vetoasetuksen tietylle prosessivaiheelle. (Ahola 2023.) Liitteessä 1 on esitetty esilämmitysaltaan alueella vaikuttavat vetoasetukset eri nauhan leveyksillä ja maksimipaksuuksilla.

6.4 Esilämmitysaltaan ja puristusrollien katkeaminen

Esilämmitysaltaan on yli 20 vuotta vanha, eli alkuperäinen linjan valmistumisen ajalta. Ajansaatossa allas on kärsinyt mittavia korroosiovaurioita, joita joudutaan paikkaamaan säännöllisesti kevään ja syksyn pidemmissä huoltoseisakeissa. Liitteissä 8, 9 ja 10 on esitetty esimerkkejä altaan nykykunnosta. Suunnitelmissa on ollut esilämmitysaltaan vaihto suurkorjauksena vuonna 2023 tai 2024, koska nykyisen altaan vauriot alkavat olemaan todella laajoja.

Esilämmitysaltaan vaihdon yhteydessä on tarkoitus tehdä muutoksia uuteen altaaseen siten, että esilämmitysaltaan toimintavarmuutta saadaan parannettua. Yksi suurimmista ongelmista esilämmitysaltaan alueella on ollut puristusrullien katkeaminen korkeapainepesu- ja kuivausyksikössä. Katkenneet puristusrullat ovat sijainneet joko korkeapainepesuyksikön jättöpuolella tai kuivausyksikön tulo- puolella. Rikkoutuneet puristusrullat ovat olleet puristusrullaparien alarullia, joihin teräsnauhan aiheuttama kuormitus enimmäkseen kohdistuu. (Outokumpu 2023 e.) Suurin osa puristusrullien katkeamisista on kohdistunut rullan askelin kaulalle ja muutama yksittäinen tapaus rullan vaipalle (Outokumpu 2022 d.) Taulukossa 1 on esitetty esilämmitysaltaan alueella tapahtuneet puristusrullakatkot, sekä niiden sijainti, ajankohta ja korjauksen kesto.

Taulukko 1 on esitetty liitteessä 13.

TAULUKKO 1. Vikaantumishistoria (Outokumpu 2023 e)

Taulukon 1 tiedot on kerätty Outokummun kunnossapidon tietojärjestelmästä ja siitä voidaan huomata, että puristusrullia katkeaa keskimäärin yksi vuosittain. Kunnossapidon tietojärjestelmästä haetun tiedon mukaan puristusrullia on alkanut katkeamaan vuodesta 2016 eteenpäin. Katkeamisten alkamisajankohta viittaa muutokseen prosessoitavassa materiaalissa, koska vuonna 2014 on aloitettu testi, jossa materiaalin maksimipaksuutta on nostettu. Testin aloituksen jälkeen paksumman materiaalin prosessointi on hiljalleen vakiintunut nykyiseen paksuuteen. (Outokumpu 2022 d.)

Tällä hetkellä puristusrullien katkeiluun on reagoitu toistuvalla ennakkohuollolla. Ennakkohuolto-työssä on määritetty taulukossa 1 esiintyville puristusrullille vaihtoväli, joka on kerran vuodessa. Korkeapainepesuyksikö toisen puristusrullaparin alarulla vaihdetaan keväthuoltoseisakissa ja vastaavasti kuivausyksikön ensimmäisen puristusrullaparin alarulla vaihdetaan syyshuoltoseisakissa. (Outokumpu 2023 e.)

Puristusrullien vaihtaminen vuosittain ei kuitenkaan takaa niiden kestoa vaihtovälin ajalle, koska rullia ei ole mitoitettu nykyiselle tuotannolle. Rullien vaihtovälin tulisi optimitalanteessa määräytyä niiden pinnoitteen, eli kumioinnin kulumisen perusteella. Mikäli puristusrulla katkeaa ennen seuraavaa suunniteltua vaihtoa, niin koituu siitä tuotannonmenetystä ja sen myötä huomattavia kustannuksia. Tässä opinnäytetyössä on tavoitteena hakea mahdollisia ratkaisuja puristusrullien katkeamisongelmaan, jotta esilämmitysaltaan suurkorjauksen yhteydessä voidaan suorittaa tarvittavat muutokset.

7 PURISTUSRULLIEN KATKEAMISEN EHKÄISY

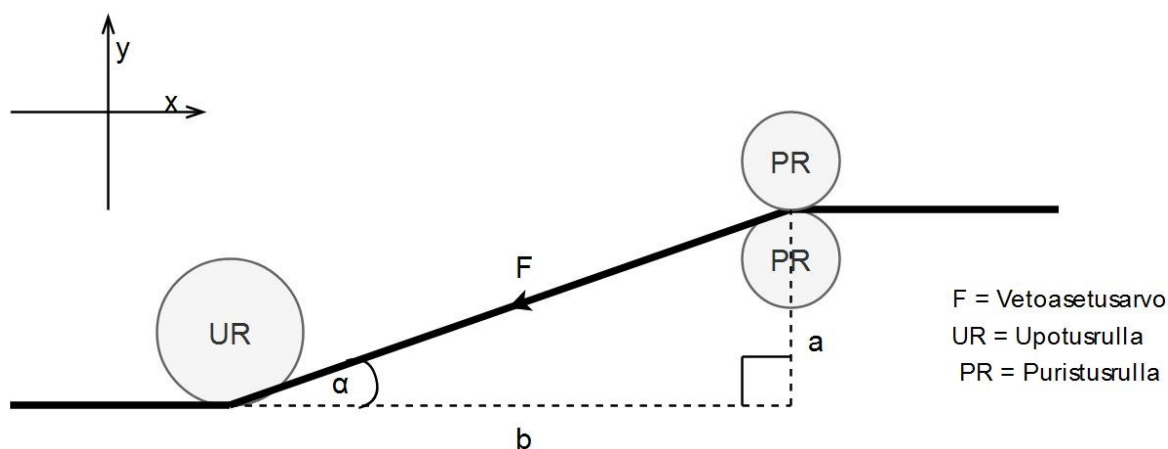
7.1 Teräsnauhan kulkukulman muuttaminen

Teräsnauha taivuttaa tietyssä kulmassa korkeapainepesuyksikön viimeiseltä puristusrullaparilta kuumavesialtaaseen upotusrullan alle ja vastaavasti nousee kuumavesialtaan jättöpuolella kuivausyksikön ensimmäiselle puristusrullaparille. Nauhan kulkukulman muutoksella voidaan vaikuttaa puristusrullan kohdistuvaan rasitukseen, jonka myötä rullaan vaikuttava taivutusjännitys pienenee.

Kappaleessa 6.4 on kerrottu, että puristusrullien katkeamiset ovat alkaneet prosessoitavan materiaalin paksuuden muutoksen myötä. Saatavilla olevan tiedon mukaan ennen teräsnauhan paksuuden muutosta puristusrullat kestivät niiden tavoitekäyttöään loppuun asti. Esilämmitysaltaan alueelle ei ole tehty sellaisia muutoksia, jotka voisivat vaikuttaa puristusrullien katkeamiseen. Näin ollen voidaan olettaa, että puristusrullien katkeamisen aiheuttaa muutos prosessoitavan materiaalin paksuudessa, joka kasvattaa puristusrullaan kohdistuvan rasituksen määrää. Tämän tiedon perusteella voidaan ratkaista teräsnauhalle uusi kulkukulma, jossa puristusrullaan kohdistuu samansuuruinen voima, kuin ennen prosessoitavan materiaalin paksuuden kasvattamista.

Seuraavaksi esitettävissä laskelmissa on tehty tiettyjä oletuksia ja yksinkertaistuksia, jotka on lueteltu alla:

- Puristusrullan moottorikäytön vuoksi rullan kehänopeus vastaa teräsnauhan kulkunopeutta, jolloin niiden välillä ei esiinny liukumaa tai merkittäviä kitkavoimia.
- Laskelmissa on otettu huomioon ainoastaan teräsnauhan kulkukulman muutoksen vaikutus puristusrullaan kohdistuvaan kuormitukseen.
- Laskelmissa tarkasteltava kulman muutos ei vaikuta merkittävästi teräsnauhassa esiintyvään vetokuormitukseen.
- Teräsnauhan paksuuden kasvattamisesta syntyvää mahdollista vaikutusta puristusrullassa esiintyvään radiaalikuormaan ei ole otettu huomioon.



KUVA 13. Teräsnauhan muodostama kulma

Ensimmäisenä tulee ratkaista nykyinen teräsnauhan kulkukulma muodostamalla puristusrullan ja upotusrullan välille kuvan 13 mukainen suorakulmainen kolmio. Kolmion sivujen mitat saadaan liitteiden 2, 3, 4, 5, 6 ja 7 piirustuksista. Suorakulmaisen kolmion trigonometriaa hyödyntämällä voidaan ratkaista nykyinen teräsnauhan kulkukulma seuraavasti:

$$\tan\alpha = \frac{a}{b} \quad (1)$$

$$\rightarrow \alpha = \tan^{-1} \frac{a}{b} \quad (2)$$

$$\rightarrow \alpha = 22,83^\circ \quad (3)$$

a = y-suuntainen mitta (mm)

b = x-suuntainen mitta (mm)

α = Nykyinen teräsnauhan kulkukulma

Kun tiedetään teräsnauhan nykyinen kulkukulma ja liitteen 1 taulukosta saadaan laskettua vetoarvo teräsnauhalle ennen paksuudenmuutosta, niin voidaan ratkaista puristusrullaan kohdistunut voima, jonka puristusrulla on tiedettävästi kestänyt. Puristusrullaan kohdistunut voima ratkaistaan x- ja y-suuntaisten tukireaktioiden resultantin avulla seuraavasti:

$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (4)$$

missä

$$F_x = -\cos(\alpha) * F_v + F_v \quad (5)$$

$$F_y = \sin(\alpha) * F_v \quad (6)$$

jolloin

$$F_r \approx 78,37 \text{ kN} \quad (7)$$

F_v = Teräsnauhan maksimi vetoasetusarvo ennen paksuudenmuutosta (kN)

F_r = Puristusrullaan kohdistunut voima ennen paksuudenmuutosta (kN)

Kun puristusrullaan kohdistuva voima ennen paksuudenmuutosta on saatu ratkaistua, niin voidaan ratkaista saman yhtälön avulla myös uusi teräsnauhan kulkukulma. Yhtälöön sijoitetaan F_v :n tilalle F_{\max} :n arvo, sekä asetetaan yhtälön arvoksi edellä ratkaistu puristusrullaan kohdistunut voima ennen paksuuden muutosta eli F_r . Liitteen 1 taulukosta saadaan vetoasetusarvo nykyiselle nauhan maksimipaksuudelle. Näillä tiedoilla voidaan ratkaista kulkukulma, jossa puristusrullaan kohdistuu sellainen voima, jonka se tiedettävästi kestää. Teräsnauhan uusi kulkukulma ratkaistaan seuraavasti:

$$F_r = \sqrt{(-\cos(\alpha_n) * F_{max} + F_{max})^2 + (\sin(\alpha_n) * F_{max})^2} \quad (8)$$

$$\rightarrow \alpha_n = 2 * \sin^{-1}\left(\frac{F_r}{2 * F_{max}}\right) \quad (9)$$

$$\rightarrow \alpha_n \approx 20,89^\circ \quad (10)$$

F_{max} = Teräsnauhan maksimi vetoasetusarvo (kN)

F_r = Puristusrullaan kohdistunut voima ennen paksuudenmuutosta (kN)

α_n = Uusi teräsnauhan kulkukulma

Soveltamalla suorakulmaisen kolmion trigonometriaa, voidaan ratkaista liitteistä 2, 3, 4, 5, 6 ja 7 saatavien mittojen ja uuden teräsnauhan kulkukulman avulla tarvittava x- tai y-suuntainen mittojen muutos seuraavasti:

$$\tan\alpha_n = \frac{a}{b} \quad (11)$$

$$\rightarrow a = b * \tan\alpha_n \quad (12)$$

$$\rightarrow a \approx 725 \text{ mm} \quad (13)$$

tai

$$b = \frac{a}{\tan\alpha_n} \quad (14)$$

$$\rightarrow b \approx 2096 \text{ mm} \quad (15)$$

Edellä esitetyt laskelmat pätevät korkeapainepesuyksikön jättöpuolen alapuristusrullan ja kuumavesialtaan tulopuolen upotusrullan väliseen kulmaan, sekä vastaavasti myös kuivausyksikön tulopuolen alapuristusrullan ja kuumavesialtaan jättöpuolen upotusrullan väliseen kulmaan. Samaa laskelmaa voidaan soveltaa molempiin kohteisiin, koska mitat ja vetoarvo ovat molemmissa identtiset.

7.2 Puristusrullan väsymismitoituksen teoria

Puristusrullan tarkempaa mitoitusta varten tulisi sille suorittaa väsymismitoitus, jossa huomioitaisiin rakenteen ja ympäristön luomat erikoisvaatimukset. Puristusrullaa käsiteltäisiin laskelmissa akselina, jonka kuormitukset muuttuvat ajan mukana eli siihen vaikuttaa dynaaminen kuormitus.

Puristusrullan katkeamiset syntyvät väsymisen myötä, koska materiaalissa esiintyy aina epäjatkuvuuksia, jotka ydintyvät muuttuvan kuormituksen seurauksena säröiksi. Säröt kasvavat niin kauan, kunnes ne saavuttavat kriittisten pituutensa ja sen seurauksena puristusrulla murtuu. Väsymismitoituksen tarkoituksena olisi selvittää sellainen kuormitus ja kuormitusmäärä, jolla särön koko ei saa-

vuta kriittistä pituutta ja aiheuta puristusrullan murtumista. Väsymisvaurio syntyy tyypillisesti kohtaan, jossa jännitysvaihtelu on suurinta. Akselien tapauksessa suurimmat vaihtelut esiintyvät olakkeiden, kiilaurien ja muiden lovien kohdalla. Mitoituksen tehtävänä olisi selvittää ne kohdat puristusrullasta, johon suurimmat jännitysvaihtelut kohdistuvat ja sen perusteella selvittää rullan väsymiskestävyys. (Tomperi 2023.)

Puristusrullan väsymismitoitusta varten tulee hankkia tiettyjä lähtötietoja, joita ovat:

- Tarvittavat asennus- ja kokoonpanopiirustukset, sekä alueen prosessinkuvaus.
- Puristusrullan valmistuspiirustus, josta selviää ainakin mitat, massa, materiaali, pinnanlaatu ja pintakäsittelyt.
- Tiedot puristusrullan tuennasta, eli laakeroinnista. Akselien mitoituksessa laakerointi oletetaan yleensä nivelelliseksi.
- Puristusrullaan kohdistuvien poikittaiskuormitusten suuruus ja vaihtelu. Puristusrullaan kohdistuu poikittaisvoimia teräsnauhan vetoarvon ja puristussyliinterien kautta.
- Puristusrullaan kohdistuvien vääntökuormitusten suuruus ja vaihtelu. Puristusrullaan kohdistuu vääntökuormitusta sähkömoottorikäytön kautta.
- Puristusrullan pyörimisnopeus ja tavoitekestoikä. Pyörimisnopeuden arviointiin tarvitaan linjan vuotuinen keskinopeus.
- Puristusrullaan vaikuttavat olosuhteet, eli lämpötilanvaihtelu ja korrosio. (Tomperi 2023.)

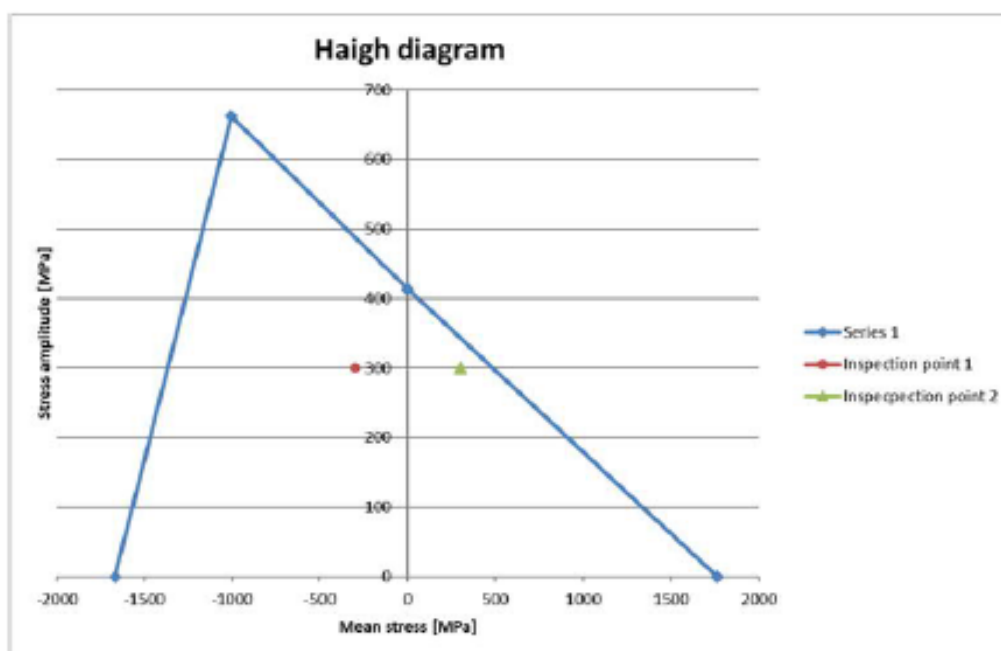
Puristusrullan kuormituksia määrittäessä vetoarvon aiheuttama poikittaiskuorma on riippuvainen teräsnauhan kulman muutoksesta rullan kohdalla, kuten kappaleessa 7.1 on esitetty. Kulmanmuutoksen aiheuttama poikittaiskuormitus voidaan ratkaista statiikan tasapainoyhtälöiden avulla. Poikittaiskuormituksen yhteisvaikutuksen määrittäessä tulee myös huomioida, että kuormitukset eivät ole välttämättä samansuuntaisia. Vääntökuormitusta määrittäessä tulee huomioida sähkömoottorikäytön teho, sekä mahdollinen vaihde. Kuormitusten määrittäminen tarkoituksena on luoda puristusrullalle vapaakappalekuva, jonka perusteella voidaan rullalle muodostaa taivutus- ja vääntömomenttikuviot. Momenttikuviot tulee määrittää erikseen vakiokuormituksille, sekä muuttuville kuormituksille. (Tomperi 2023.)

Puristusrullan jännitysten määrittämiseksi rullan normaali- ja leikkausjännitykset lasketaan taivutus- ja vääntökuormitusten avulla, jossa vakio- ja muuttuvien kuormien aiheuttamat jännitykset tulee määrittää erikseen. Nimellisiä jännityksiä tulee vielä korottaa kertoimilla, jotka ottavat huomioon lovenvaikutuksen taivutukselle ja väännölle puristusrullassa. Lovenvaikutusluku riippuu loviherkkyysluvusta, joka voidaan määrittää pyöristyssäteen ja materiaalin raekoon avulla, sekä lovenmuotoluvusta, joita on taulukoitu eri loven muodoille ja kuormitustyypeille. Kun puristusrullaan vaikuttavat normaali- ja leikkausjännitykset on ratkaistu, niin voidaan ne yhdistää von Mises-vertailujännitykseksi ja määrittää siten keski- ja amplitudijännitys. (Tomperi 2023; Lähteenmäki 2012.)

Puristusrullan kestoikää määrittäessä tulee huomioida, että pyörimisnopeuden seurauksena syntyvät jännityssyklimäärät ovat erittäin suuria, jonka vuoksi rulla tulee mitoittaa äärettömälle kestoille. Puristusrullalle voidaan määrittää nykyisiä mittoja vastaava äärettömän syklimäärän kuormitus, jolloin kuormitukseen voidaan vaikuttaa muuttamalla teräsnauhan kulkukulmaa puristusrullan kohdalla,

kuten kappaleessa 7.1 on tehty olettamalla rullan kestävä teräsnauhan vetoasetusten aiheuttama kuormitus. Toinen tapa on määrittää tiettyä kuormitusta vastaava äärettömän kestoian halkaisija puristusrullalle. Molemmissa tapauksissa tulee määrittää puristusrullassa käytetyn materiaalin väsymislujuus, joka on riippuvainen materiaalin murtolujuudesta, sekä alennuskertoimista. Alennuskertoimilla tarkoitetaan esimerkiksi puristusrullaan kohdistuvia kuormitustyyppisiä, pinnanlaatua ja käyttöolosuhteita. (Tomperi 2023.)

Kuvan 12 mukaista Wöhlerin-käyrää ei voida soveltaa puristusrullan väsymismitoitukseen, koska se ei sovellu lovellisten kappaleiden väsymisiän arviointiin. Syynä Wöhlerin-käyrän soveltumattomuuteen on loven kohdan jyrkkä jännitysgradientti, jota se ei huomioi. (Makkonen 2011, 15.) Puristusrullan elinikä voidaan määrittää hyödyntämällä esimerkiksi kuvan 14 mukaista Haighin diagrammia, joka saadaan muodostettua materiaalin murto-, myötö- ja väsymisrajan avulla. Diagrammiin sijoitetaan määritetty keski- ja amplitudijännityspari ja niiden ollessa diagrammin kuvion sisällä on puristusrullan elinikä ääretön, jolloin sen ei pitäisi murtua enää käyttöiän aikana. (Tomperi 2023.)



KUVA 14. Esimerkki Haighin diagrammista (Tomperi 2023)

8 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä pyrittiin löytämään ratkaisu esilämmitysaltaan alueella esiintyvään puristusrullien katkeamisongelmaan. Työn aihe oli ajankohtainen, koska esilämmitysaltaan suurkorjaus on toteutussa vuoden 2023 tai 2024 aikana. Esilämmitysaltaan suurkorjaus mahdollistaa tarvittavien muutosten tekemisen uuteen altaaseen jo suunnitteluvaiheessa.

Ongelmaa lähdettiin lähestymään kerättyjen lähtötietojen pohjalta ensin käytännönläheisesti. Tiedossa oli, että puristusrullien katkeamisia ei ollut esiintynyt ennen prosessoitavan materiaalin paksuuden kasvattamista. Tämän tiedon pohjalta voitiin tehdä johtopäätös, että mikäli puristusrullaan kohdistuva rasitus saadaan palautettua entiselle tasolle, niin ongelmasta päästään eroon. Johtopäätös voitiin todeta luotettavaksi, koska prosessoitavan materiaalin paksuuden muutos on ainoa puristusrulliin vaikuttava asia, jota alueella on muutettu. Tehdyissä laskelmissa sovellettiin suorakulmaisen kolmion trigonometriaa, jonka avulla ratkaistiin teräsnauhalle sellainen kulkukulma, joka mahdollistaa puristusrullaan kohdistuvan rasituksen vähentämisen alkuperäiselle tasolle. Saatua tulosta voidaan pitää työn tavoitteet täyttävänä ja luotettavana, koska kulman muutoksella saavutetaan sellainen kuormitus, joka on todettu toimivaksi yli 10 vuoden kokemusten perusteella.

Puristusrullien katkeamisongelmaa lähestyttiin työssä myös väsymismitoituksen näkökulmasta, joka huomioi kaikki rullaan kohdistuvat rasitukset. Puristusrullan väsymismitoitus käytiin työssä läpi teoriatasolla, eli kuinka se tulisi tehdä ja mitä pitäisi huomioida. Väsymismitoituksen avulla voidaan selvittää esimerkiksi sellainen kuormitus, jonka rulla kestää äärettömän kauan tai vaihtoehtoisesti määrittää rullan akselille sellainen halkaisija, joka kestää nykyisen kuormituksen. Opinnäytetyössä kerätyn teoria-aineiston ja selvitettyjen lähtötietojen avulla rullalle voidaan tulevaisuudessa tarpeen vaatiessa suorittaa tarkempi mitoitus.

Opinnäytetyössä esiteltiin siis kaksi erilaista vaihtoehtoa puristusrullien katkeamisen estämiseksi, joista toinen suoritettiin laskennallisesti ja toinen vaihtoehto käsiteltiin teoriatasolla. Työn tuloksena saatiin aikaan näkemys siitä, kuinka puristusrullaan kohdistuvaa kuormitusta saadaan vähennettyä ja sen myötä estettyä puristusrullien katkeaminen.

9 POHDINTA

Opinnäytetyöni aihe oli opettava ja mielenkiintoinen. Työn tekeminen tarjosi minulle kattavasti lisää tietoa lujuusopista ja varsinkin rakenteen väsymisestä. Työn aikana pääsin hyödyntämään koulussa opittuja asioita ja etenkin RAP5:lla harjoitteluissa kerryttämäni osaamista. Aloitin työn syksyllä, kun työskentelin vielä linjalla vuoromestariharjoittelijana ja jatkoin työtä vasta keväällä työtilanteeni taasaannuttua. Työn tekeminen vaati melko paljon ponnisteluja, kun talvella opettelini uutta työtehtävääni ensin kylmävalssaamalla pinnantarkastuksen työnjohtajana ja keväällä nykyistä työtäni teräsulatolla aluetyönjohtajana. Sain kuitenkin vietyä opinnäytetyön maaliin asti ja mielestäni hyvin tuloksin. Työn tekeminen edisti ammatillista kasvua, koska pääsin selvittämään tosielämän ongelmaa ja työskentelemään eri sidosryhmien kanssa.

Työn alkuperäinen suunnitelma oli toteuttaa puristusrullalle laskennallinen väsymismitoitus, mutta jouduin luopumaan tästä ajatuksesta aikataulullisista syistä. Konsultoin väsymismitoituksen tiimoilta suunnittelutoimisto Etteplania ja sainkin sieltä todella paljon apua esittämiini kysymyksiin, mutta olin aliarvioinut laskelmien laajuuden ja sen myötä aikatauluttanut ne väärin suunnitelmassani. Suunnittelijan mukaan väsymismitoitus olisi vaatinut ammattilaiseltakin noin viisi työpäivää, koska puristusrullan rakenne sisältää paljon erilaisia muotoja ja siihen vaikuttaa monenlaisia vaihtelevia kuormia. Esitin työssäni lopulta puristusrullan väsymismitoituksen teoriatasolla, josta selviää mitä mitoituksessa tulee ottaa huomioon ja kuinka se pääpiirteissään etenee. Vaikka en päässyt väsymismitoituksen osalta asettamaani tavoitteeseen, niin tarjoaa hankitut teoria- ja lähtötiedot hyvän pohjan mitoituksen suorittamiseen tulevaisuudessa.

Molemmat työssä esitetyt ratkaisutavat ovat mielestäni toimivia, mutta väsymismitoitus olisi kuitenkin tarkempi tapa määrittää sellainen kuormitus ja/tai rullan mitat, jolla se ei pääsisi väsymään murtumiseen asti. Historiatietoihin nojaavat laskelmani työssä ovat kuitenkin mielestäni päteviä, koska teräsnauhan paksuuden kasvattaminen on selvästi ollut kriittinen muutos puristusrullien kannalta ja se on vaikuttanut merkittävästi rullaan kohdistuviin rasituksiin. Työssä päästiin toimeksiantajan määrittämään tavoitteeseen, joka oli kuormituksen vähentäminen puristusrullilta. Esitin työssä oman ratkaisun ongelmaan ja toimeksiantaja saa päättää hyödyntääkö saatua ratkaisua vai jatkokehittääkö sitä vielä.

Jatkotoimenpiteenä puristusrullalle voitaisiin suorittaa väsymismitoitus hyödyntämällä esitettyä teoriaa ja tietokoneavusteista FEM-laskentaa. FEM-laskennan avulla voitaisiin määrittää puristusrullasta se kohta, johon kohdistuu suurimmat rasitukset ja tämän tiedon avulla suorittaa tarkka väsymismitoitus. Väsymismitoituksen lisäksi tulee puristusrullalle suoritettavaa särötarkastusta jatkaa myös tulevaisuudessa muutosten jälkeen, koska ainoastaan sen avulla voidaan varmistua rullan laadusta ja kestosta.

LÄHTEET

Ahola, Timo 2023. Systems Engineer. Outokumpu Stainless Oy. Haastattelu 28.3.2023.

EJOT Sormat julkaisuaika tuntematon. Kuormitustyytit. Verkkojulkaisu. <https://fi.sormat.com/article/kiinnittamisen-pikakurssi/osa-4-kuormitustyytit/>. Viitattu 31.3.2023.

Euroinox julkaisuaika tuntematon. Mikä on ruostumaton teräs. Pdf-tiedosto. https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/What_is_Stainless_Steel_FI.pdf. Viitattu 23.3.2023

Kalapudas, Antti & Heikkinen, Hannu-Pekka 2011. Ruostumattomat teräslajit ja materiaalivalinta. Outokumpu. Outokummun sisäinen Notes-tietokanta.

Kauppi, Timo 2021. Teräsrakenteiden vauriot ja niiden analysointi. Hitsaustekniikka 73 (5).

Lähteenmäki, Matti 2012. Väsyminen. Pdf-tiedosto. https://mlahteen.fi/arkistot/luj2_pdf/vasy_k.pdf. Viitattu 16.4.2023.

Lindroos, Veikko, Sulonen, Matti & Veistinen, Mauri 1986. Uudistettu Miekk-ojan Metallioppi. Helsinki: Otava.

Makkonen, Matti 2011. Väsymislujuuden mitoitukset. Pdf-tiedosto. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/122537/978-952-5784-11-4.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Viitattu 16.4.2023.

Outokumpu 2001 a. Esilämmitysjärjestelmä, Rak.tehtävä B-C/18-21 +4.500. Webdoha www-pohjainen dokumenttien hallinta. Piirustusnumero 1086002.

Outokumpu 2001 b. Korkeapainepesuyksikkö kokoonpano. Webdoha www-pohjainen dokumenttien hallinta. Piirustusnumero 1084765.

Outokumpu 2001 c. Esilämmitysjärjestelmä kuivausyksikkö. Webdoha www-pohjainen dokumenttien hallinta. Piirustusnumero 1084767.

Outokumpu 2001 d. Esilämmitysjärjestelmä upotusrullayksikkö. Webdoha www-pohjainen dokumenttien hallinta. Piirustusnumero 1086005.

Outokumpu 2001 e. Esilämmitysjärjestelmä puristusrulla. Webdoha www-pohjainen dokumenttien hallinta. Piirustusnumero 1086000.

Outokumpu 2001 f. Esilämmitysjärjestelmä upotusrulla. Webdoha www-pohjainen dokumenttien hallinta. Piirustusnumero 1086006.

Outokumpu 2011. Ferriittisen koulutus RAP 2011. Outokummun sisäinen Notes-tietokanta.

Outokumpu 2017. RAP5 esittely. Outokummun sisäinen K-asema.

Outokumpu 2021. Tornion yleisesittely. Outokummun sisäinen O'net.

Outokumpu 2022 a. Outokummun toimintaympäristö. Verkkojulkaisu. <https://www.outokumpu.com/fi-fi/sijoittajat/outokumpu-as-an-investment/operating-environment>. Viitattu 9.11.2022.

Outokumpu 2022 b. Outokummun organisaatio ja johto. Verkkojulkaisu. <https://www.outokumpu.com/about-outokumpu/organization>. Viitattu 9.11.2022.

Outokumpu 2022 c. V RAP5 001 PELISÄÄNNÖT 06, linjan tekniset rajoitukset rullille. Outokummun sisäinen Notes-tietokanta.

Outokumpu 2022 d. Juurisyyanalyysi 914361. Outokummun sisäinen W-asema.

Outokumpu 2023 a. Core. Verkkajulkaisu. <https://www.outokumpu.com/products/product-ranges/core>. Viitattu 27.3.2023.

Outokumpu 2023 b. Supra. Verkkajulkaisu. <https://www.outokumpu.com/products/product-ranges/supra>. Viitattu 27.3.2023.

Outokumpu 2023 c. Cold Rolling Plant Presentation 2023. Outokummun sisäinen O'net.

Outokumpu 2023 d. RAP5. Outokummun sisäinen O'net.

Outokumpu 2023 e. Kylmävalssaamo 2. Outokummun kunnossapidon tietojärjestelmä.

Pennala, Erkki 1998. Lujuusopin perusteet. 8.painos. Helsinki: Otatieto.

Taulavuori, Tero, Kyröläinen, Antero & Manninen, Timo 2011. Ruostumattomat teräkset. 5.painos. Helsinki: Teknologiainfo Teknova.

Tikkanen, Seppo 2002. Esilämmitysyksikkö. Outokummun sisäinen arkisto.

Tomperi, Harri 2023. Structural Analysis Specialist. Etteplan Oy. Akselin väsymismitoituksen perusteet. Yksityinen sähköpostiviesti 13.4.2023. Viestin saaja: Henri Kupari.

LIITE 1: AJOPARAMETRIT

Liite 1 sisältää yrityskohtaista tietoa ja on siten jätetty pois opinnäytetyön julkisesta versiosta.

LIITE 2: ESILÄMMITYSALTAAN KOKOONPANO

Liite 2 sisältää yrityskohtaista tietoa ja on siten jätetty pois opinnäytetyön julkisesta versiosta.

LIITE 3: KORKEAPAINEPESUYKSIKÖN KOKOONPANO

Liite 3 sisältää yrityskohtaista tietoa ja on siten jätetty pois opinnäytetyön julkisesta versiosta.

LIITE 4: KUIVAUSYKSIKÖN KOKOONPANO

Liite 4 sisältää yrityskohtaista tietoa ja on siten jätetty pois opinnäytetyön julkisesta versiosta.

LIITE 5: UPOTUSRULLAYKSIKÖN KOKOONPANO

Liite 5 sisältää yrityskohtaista tietoa ja on siten jätetty pois opinnäytetyön julkisesta versiosta.

LIITE 6: PURISTUSRULLAN PIIRUSTUS

Liite 6 sisältää yrityskohtaista tietoa ja on siten jätetty pois opinnäytetyön julkisesta versiosta.

LIITE 7: UPOTUSRULLAN PIIRUSTUS

Liite 7 sisältää yrityskohtaista tietoa ja on siten jätetty pois opinnäytetyön julkisesta versiosta.

LIITE 8: ESILÄMMITYSALTAAN VAURIOT

Liite 8 sisältää yrityskohtaista tietoa ja on siten jätetty pois opinnäytetyön julkisesta versiosta.

LIITE 9: ESILÄMMITYSALTAAN VAURIOT, TULOPUOLI

Liite 9 sisältää yrityskohtaista tietoa ja on siten jätetty pois opinnäytetyön julkisesta versiosta.

LIITE 10: ESILÄMMITYSALTAAN VAURIOT, JÄTTÖPUOLI

Liite 10 sisältää yrityskohtaista tietoa ja on siten jätetty pois opinnäytetyön julkisesta versiosta.

LIITE 11: ESILÄMMITYSALTAAN TOIMINNANKUVAUS

Liite 11 sisältää yrityskohtaista tietoa ja on siten jätetty pois opinnäytetyön julkisesta versiosta.

LIITE 12: LINJAN TEKNISET RAJOITUKSET

Liite 12 sisältää yrityskohtaista tietoa ja on siten jätetty pois opinnäytetyön julkisesta versiosta.

LIITE 13: PURISTUSRULLIEN VIKAANTUMISHISTORIA

Liite 13 sisältää yrityskohtaista tietoa ja on siten jätetty pois opinnäytetyön julkisesta versiosta.