



Vaipanporauskoneen värähtelyn juuri- syiden selvittäminen karalaatikon ja sen voimansiirron rakenteissa

Henri Hyvärinen

Opinnäytetyö, AMK
Marraskuu 2025
Insinööri (AMK), konetekniikka

Hyvärinen Henri

Vaipanporauskoneen värähtelyn juurisyiden selvittäminen karalaatikon ja sen voimansiirron rakenteissa

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Marraskuu 2025, 81 sivua

Konetekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Toimeksiantaja yritys Valmet technologies Oy, halusi selvittää vaipanporauskoneessa esiintyvän työstönäikaisen värähtelyn juurisyitä. Lähtökohtana oli havaittu ilmiö, jossa porauksen laatu ja tehokkuus olivat heikentyneet ajansaatossa värähtelyn seurauksena. Tavoitteena oli tunnistaa karalaatikon ja sen voimansiirron rakenteelliset sekä kunnossapitoon liittyvät tekijät, jotka aiheuttivat värähtelyä.

Tutkimus toteutettiin laadullisena tutkimuksena, jota täydennettiin mittauksilla. Aineisto koostui valmistuspiirustuksista, huolto- ja kunnossapitodokumentista, asiantuntijahaastatteluista sekä mittaus- ja visuaalisesta-analysoinnista. Mittauksia suoritettiin käsin mittaamalla mikrometreillä ja mittakelloilla. Niiden avulla tutkittiin kara- ja vaihdelaatikon sekä voimansiirron geometrisia ominaisuuksia ja mittoja. Mittaustuloksia verrattiin alkuperäisiin valmistusmittoihin ja toleransseihin. Analysoinnissa hyödynnettiin alanteoriaa ja juurisyyanalyysiä (RCA), 5 X miksi- menetelmää sekä syyseurauskaaviota.

Tuloksissa havaittiin, että merkittävin värähtelyaiheuttaja oli karalaatikon laakeripesien ja akselinkaulojen kuluminen, joka lisäsi välyksiä ja heikensi niiden tukevuutta. Kunnossapidon reaktiivinen toimintamalli on mahdollistanut kulumien ja välysten kasvamisen. Lisääntynyt värähtely nopeuttaa välysten muodostamista myös muissa komponenteissa iskukuormituksen takia. Voitelujärjestelmän epäpuhtaudet ja metallipartikkelien kertyminen kiertovoituun osoittivat, että suodatus tai tiivistys ratkaisut eivät toimi riittävällä tasolla, mikä on lisännyt laakerivaurioiden syntyä.

Lopputuloksena todettiin, että vaipanporauskoneen värähtelyn juurisyöt olivat laakeripesien kuluminen, aksiaalisen välyksen kasvu, voitelujärjestelmän epäpuhtaus sekä kunnossapitostrategian reaktiivinen luonne. Näiden tekijöiden yhteisvaikutus on johtanut karalaatikoiden ja voimansiirron elimien tasapainon heikkenemiseen ja värähtelyn voimistumiseen. Analyysin perusteella ennakoivan kunnossapidon ja kunnonvalvontajärjestelmän käyttöönotto, sekä rakenteiden korjaaminen toleranssien mukaisiksi, olisivat keskeisiä toimenpiteitä värähtelyn hallitsemiseksi.

Avainsanat (asiasanat)

Laadullinen tutkimus, kunnonvalvonta, juurisyyanalyysi, 5 x miksi, syy-seurauskaavio, värähtely

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

Hyvärinen Henri

Root cause analysis of vibration in a Gundrill machine, focusing on the spindle box and its drivetrain structure

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, November 2025, 81 pages

Degree Programme in Mechanical Engineering. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The client, Valmet technologies Oy, wanted to investigate the root causes of vibration in a Gundrill machine during the usage. The starting point was an observed phenomenon where drilling quality and efficiency had deteriorated over time because of vibration. The goal was to identify the structural and maintenance-related factors of the spindle and gearbox that were causing the vibration.

The study was conducted as a qualitative study, supplemented by measurements. The data consisted of manufacturing drawings, service and maintenance documents, expert interviews, and measurement and visual analysis. The measurements were performed manually using micrometers and dial indicators. They were used to examine the geometric properties and dimensions of the spindle and gearbox, and power transmission. The measurement results were compared with the original manufacturing dimensions and tolerances. The analysis utilized industry theory and root cause analysis (RCA), the five-whys method, and the cause-and-effect diagram.

The results found that the most significant cause of vibration was the wear of the spindle box bearing housings and axle journals, which increased clearances and weakened their stability. The reactive maintenance model has allowed wear and clearances to increase. Increased vibration also accelerates the formation of clearances in other components due to shock loading. Impurities in the lubrication system and the accumulation of metal particles in the circulating oil showed that the filtration or sealing solutions were not working at an adequate level, which has increased the occurrence of bearing damage.

Conclusion was that the root causes of the vibration of the Gundrill machine were the wear of the bearing housings, the increase in axial clearance, the contamination of the lubrication system and the reactive nature of the maintenance strategy. The combined effect of these factors has led to the deterioration of the balance of spindle boxes and transmission elements and the intensification of the vibration. Based on the analysis, the introduction of a predictive maintenance and condition monitoring system, as well as the repair of structures to comply with tolerances, would be key measures to control the vibration.

Keywords/tags (subjects)

Qualitative study, Condition monitoring, Root cause analysis (RCA), the cause-and-effect diagram, the five-whys method, Vibration

Miscellaneous (Confidential information)

-

Sisältö

1	Johdanto	8
2	Valmet Technologies	9
3	Tutkimusasetelma	10
3.1	Tutkimuskysymys ja nykytila	10
3.2	Tutkimusmenetelmä	11
3.3	Aineiston hankinta, analysointi ja käsittely.....	13
3.4	Tutkimuksen eettisyys.....	14
4	Vaipanporauskone	15
4.1	Imutela	18
4.2	Lastuava työstö ja poraaminen	21
4.3	Poraaminen ja kanuunaporaus	22
4.4	Vaipanporauskoneen karalaatikko ja sen voimansiirto	24
5	Kunnossapito	26
5.1	Kunnossapitostandardit ja soveltaminen	26
5.2	Kunnonvalvonta	28
5.3	Kunnonvalvonnan menetelmät.....	29
6	Värähtely	30
6.1	Värähtelyn syntymekanismit (epätasapaino, kuluminen, kitka, jousto)	30
6.2	Vian havaitseminen.....	31
6.2.1	Laakeri.....	31
6.2.2	Hammaspyörä.....	33
7	Mittaukset	34
7.1	Mittaukset laadullisen tutkimuksen tukena	34
7.2	Mittalaitteet	35
7.3	Kalibrointi	36
7.4	Mittausvirheet, mittausepävarmuus ja mittaustulokset	37
7.5	Geometriset mittaukset	39
8	Analysointimenetelmät	39
8.1	Arviointimenetelmät	39
8.2	Juurisyyanalyysi (RCA, Root Cause Analysis).....	43
8.3	Syy-seurauskaavio	44
8.4	5 x miksi (5 x Why)	44

9 Työn toteutus	45
9.1 Karalaatikko ja voimansiirron rakenteen kartoitus.....	45
9.2 Mittaukset ja havainnot	47
9.2.1 Jakokotelo	48
9.2.2 Teräohjaimet.....	51
9.2.3 Vaihdelaatikko	53
9.2.4 Karalaatikko nro 27.....	54
9.2.5 Käyttöakseli ja kytkimet.....	61
9.2.6 Voitelu.....	62
9.2.7 Kunnossapito ja karalaatikkohuolto	63
10 Tulokset	65
10.1 Juurisyysanalyysi RCA	65
10.2 Värähtelyn aiheuttajien tunnistaminen	67
10.3 Juurisyyn tunnistaminen	68
10.4 Mittaukset ja havainnot	69
11 Johtopäätökset	70
12 Pohdinta	71
Lähteet	73
Liitteet.....	76
Liite 1. Jakokotelon mittauspöytäkirja	76
Liite 2. Karalaatikko numero 27. Laakeripesien mittauspöytäkirja.....	77
Liite 3. Karalaatikko numero 27. Kara-akseleiden mittauspöytäkirja	78
Liite 4. Karalaatikko numero 27. Aksiaalinen heitto ja vällys	79
 Kuviot	
Kuvio 1. Valmetin paperiyksiköt maailmalla.....	10
Kuvio 2. Tutkimuksellisen kehittämistoiminnan prosessi.....	11
Kuvio 3. Tutkimuksen ja kehittämistoiminnan rajapinnat.....	12
Kuvio 4. Vaipanporauskoneen poikkileikkauskuva.....	16
Kuvio 5. Vaipanporauskoneen lay-out.....	17
Kuvio 6. Imuvaipat	18
Kuvio 7. Imutelan hoitopää.....	19
Kuvio 8. Imutelan käyttöpää	20
Kuvio 9. Formeritelan vaippa, joka on kanuuna- ja senkkausporattu sekä uritettu.	21
Kuvio 10. Kanuunaporauksen periaate (What is Gun Drilling? n.d).	23

Kuvio 11. Kunnossapidon osa-alueet.....	27
Kuvio 12. Vianmäärityksen kulku.....	29
Kuvio 13. Abrasiivinen kuluminen. Laakerin ulkorengas on pyörinyt pesässä. Ulkorengas on kiillottunut.....	32
Kuvio 14. Adhessiivinen kuluminen iskukuormituksen aiheuttamana. Ulkorengas on tahmutunut.....	32
Kuvio 15. Tahmutunut hammaspyörä	34
Kuvio 16. Reikämikrometri.....	35
Kuvio 17. Mittausprosessi.....	37
Kuvio 18. Miellekartta.....	40
Kuvio 19. Juurisyysanalyysi.....	43
Kuvio 20. Esimerkki sytseurauskaavion luomisesta	44
Kuvio 21. Esimerkki "5 x miksi" analyysin toteutuksesta.....	45
Kuvio 22. Vaipanporauskoneen kara- ja vaihdelaatikon rakenne ja niiden oheislaitteet	47
Kuvio 23. Jakokotelon kansi ja ohjainlevyjen hydraulisylinteri.	48
Kuvio 24. Jakokotelonkansi sisältä.....	49
Kuvio 25. Tahmaantunut hammaspyörän ryntöpinta.	49
Kuvio 26. Laakerien ulkokehissä kiillotuskulumaa.....	50
Kuvio 27. Laakerin ulkokehä tahmutunut.....	51
Kuvio 28. Sylinteriputki.	52
Kuvio 29. Sylinterin mäntä.....	52
Kuvio 30. Vaihdelaatikon pohjalla lastuja.....	54
Kuvio 31. Karan heiton mittaus.....	55
Kuvio 32. Kara-akseli, viistokuulalaakeripari, pidätinrenkas ja laakeripesän kansi.....	56
Kuvio 33. Kara-akselin pidätinrenkas.....	56
Kuvio 34. Laakeripinta. Pinnanlaadunvaatimus Ra 0,2.....	57
Kuvio 35. Karalaatikon sisällä olevaa metallilastua.	58
Kuvio 36. Neulalaakeri, jossa runsaasti metallihiukkasia.	58
Kuvio 37. Tiivisteen sisäpinta, jossa havaittavissa metallipartikkeleita.....	59
Kuvio 38. Aksiaalisenvälyksen mittaus.....	60
Kuvio 39. Karanheitonmittaus paranellien päällä.....	61
Kuvio 40. Käyttöakseleiden booriholkki.....	62
Kuvio 41. Likainen annostelija.....	63
Kuvio 42. Syy-seurauskaavio. Värähtelyn aiheuttajien tunnistaminen	67

Taulukot

Taulukko 1. Menetelmätaulukko	42
Taulukko 2. <i>5 x miksi</i>	68

1 Johdanto

Laadun ja kustannustehokkuuden kehittäminen on teollisuudessa välttämätöntä, sillä asiakkaiden kasvavat vaatimukset sekä kiristynyt kilpailu edellyttävät luotettavaa ja tehokasta tuotantoa. Työstökoneiden toimintahäiriöt ja laaturvirheet aiheuttavat lisäkustannuksia. Päivittäinen kunnonvalvonta on tässä kokonaisuudessa elinehto, sillä sen avulla voidaan estää laiterikot ja vähentää laaturvirheitä. Asiakkaat edellyttävät yhä nopeampia toimitusaikoja, joten kilpailukyky muodostuu erityisesti yrityksille, jotka kykenevät vastaamaan korkealaatuisiin tuotteisiin sekä luotettavaan ja tehokkaaseen tuotantoon.

Toimeksiantajayritys Valmet Technologies on kansainvälinen sellu- ja paperiteollisuuden laitevalmistaja. Yksi Valmetin keskeisistä yksiköistä sijaitsee Jyväskylässä, missä valmistetaan paperikoneen komponentteja, kuten imuteloja. Imutelassa on imuvaippa, joka on kriittinen osa tuotetta. Sen erikoisuutena on kauttaaltaan suurimäärä halkaisijaltaan pieniä reikiä, mitkä valmistetaan vaipanporauskoneella. Kyseinen vaipanporauskone on Valmetille strategisesti erittäin tärkeä, sillä vastaavaa erikoiskonetta ja osaamista kyseiseen työvaiheeseen on maailmalla vain vähän.

Vaipanporauskoneella on ajan myötä jouduttu pienentämään työstöarvoja epätaloudelliselle tasolle sekä työkalujen että tuottavuuden näkökulmasta. Syynä tähän on koneessa esiintyvä värähtely, joka korostuu erityisesti suurilla kierrosnopeuksilla ja värähtely johtaa usein työkalujen rikoontumiseen. Värähtely aiheuttaa lisäksi laaturpoikkeamaa tuotteeseen, mikä heikentää tuotteen ominaisuuksia. Vaipanporauskoneen värähtelyongelman ratkaiseminen on yritykselle tärkeää, sillä ongelman tunnistaminen ja poistaminen vähentäisi häiriöitä ja seisakkeja, parantaisi kustannustehokkuutta sekä tehostaisi porausprosessia.

Tämän tutkimustyön tavoitteena oli selvittää, mitkä karalaatikon tai sen voimansiirron rakenteelliset tai kunnossapidolliset tekijät ovat vaipanporauskoneen työstövärähtelyn juurisyytä. Värähtely heikentää koneen laaduntuottoa ja pidentää kappaleiden läpimenoaikoja. Karalaatikko on vaipanporaus koneessa oleva komponentti, joka toimii poria tukevana ja pyörittävänä elementtinä. Vaipanporauskoneessa on porausyksiköitä, jotka sisältävät karalaatikon, jakokotelon, vetoakselit, vaihdelaatikon ja sähkömoottorin.

Kyseessä on Laadullinen kehittämistyö, jossa ongelmia lähestyttiin laadullisin menetelmin. Tutkimuksessa kartoitettiin vaipanporauskoneen karalaatikon ja voimansiirron rakenne sekä tunnistettiin mahdollisia värähtelyn riskitekijöitä. Ongelmaa analysoitiin kunnonvalvonnan teorian avulla. Tietoa ja dataa kerättiin asiantuntijoiden haastatteluilla, alan kirjallisuudesta sekä koneen huoltoon ja kunnossapitoon liittyvistä dokumenteista. Lisäksi tutkittaville koneenosille suoritettiin käytännön mittauksia ja analyysseja, joilla arvioitiin osien kunto, mahdollinen kuluminen sekä niiden vaikutus värähtelyn syntyyn. Mittaustuloksia vertailtiin teoretietoon sekä laitteen suunnittelumittoihin ja toleransseihin poikkeamien tunnistamiseksi. Lopuksi havainnot analysoitiin kokonaisuutena, minkä pohjalta esitettiin konkreettiset kehitysehdotukset värähtelyongelman poistamiseksi ja vaipanporausprosessin suorituskyvyn parantamiseksi.

2 Valmet Technologies

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Valmet Technologies Oy. Valmet Technologies kehittää ja toimittaa laadukkaita sellu-, paperi- ja energiateollisuuden tuotteita sekä automaatio- ja teknologiapalveluita asiakkailleen. Yritys on kehittynyt moderniksi kokonaislaitetoimittajaksi. (Valmet Oyj n.d.)

Valmetin strategiassa keskeisiä painopisteitä vuonna 2025 ovat palveluiden ja tuotteiden laadun parantaminen sekä kustannustehokkuus. Hyvällä laadulla pyritään parantamaan asiakkaiden tuotteiden lopullista arvoa ja lisäämään yrityksen kustannustehokkuutta sekä varmistamaan toimitusaikojen pitävyys. (Valmet Oyj n.d.)

Yksi Valmetin tehtaista sijaitsee Jyväskylän Rautpohjassa (Kuvio 1), se kuuluu Valmetin kartonki- ja paperitehdasteknologiayksikköön. Tehtaassa valmistetaan paperikoneen komponentteja, jotka ovat yrityksen ydinosaamista. Näiden komponenttien valmistus halutaan pitää yrityksen omissa käsissä. Rautpohjan tehtaassa yksi merkittävimmistä valmistusosastoista on imu-, valurauta- ja putkittelavalmistukseen erikoistunut osasto. Osaston arvokkain tuote on imutela, jonka valmistuksessa keskeinen osa on imutelan vaippa. Imuvaipan erikoisuus on suuri määrä kehällä olevia tarkasti mitoitettuja reikiä, jotka valmistetaan vaipanporauskoneella.

Vaipanporauskone on Valmetille strategisesti hyvin tärkeä, sillä vastaavaa osaamista ja konekantaa tähän työvaiheeseen on maailmalla hyvin vähän. Tämän vuoksi tutkimus on tilaajayritykselle mer-

kittävä. Vaipanporauskoneen värähtelylähteiden tunnistaminen ja poistaminen tukevat laadun parantamista, vähentää häiriöitä ja seisakkeja sekä parantaa kustannustehokkuutta. Porausprosessin kehittäminen lyhentää kappaleiden läpimenoaikoja, pidentää työkalujen kestoikää sekä pienentää kunnossapidon kustannuksia. Imutelan rei'ityksen laadun ja tarkkuuden parantaminen vaikuttavat suoraan paperikoneen suorituskyvyn parantamiseen (Suction rolls for ultimate process performance 2014, 4). Tutkimus tukee Valmetin tavoitteita: Korkeaa laatua, kustannustehokkuutta ja luotettavia toimitusaikoja.



Kuvio 1. Valmetin paperiyksiköt maailmalla. (Valmet esitysmateriaalit n.d)

3 Tutkimusasetelma

3.1 Tutkimuskysymys ja nykytila

Näpärän (2017) mukaan tutkimuskysymyksen on tarkoitus rajata tarkasteltava ilmiö. Tutkimuskysymys luodaan esiin nousseesta haasteesta tai ilmiöstä, jolle halutaan löytää käytännönläheinen tai teoreettinen selitys (Näpärä 2017).

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin vastauksia seuraavaan tutkimuskysymykseen: **Mitkä karalaatikon ja sen voimansiirron rakenteelliset tai kunnossapitoon liittyvät tekijät aiheuttavat vaipanporauskoneessa työstönaikaista värähtelyä?**

Vaipanporauskoneella on huomattu, että ajan myötä työstöarvoja on jouduttu pienentämään epä-taloudelliselle tasolle niin työkalujen kestävyys kuin tuottavuudenkin kannalta. Työstöarvojen pienentämiseen taustalla on koneessa esiintyvä värähtely. Erityisesti suurilla kierrosnopeuksilla kone alkaa värähdellä, mikä johtaa työkalujen särkymiseen ja heikon laadun tuottamiseen.

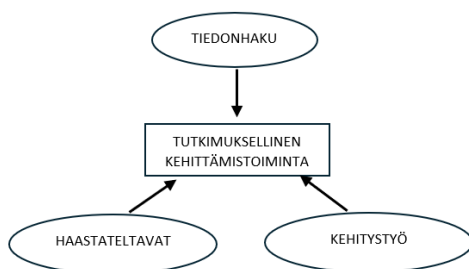
Värähtelyn seurauksena poranterien katkeaminen heikentää reiän pinnanlaatua ja aiheuttaa kapaleeseen laatueroja. Katkenneet terät joudutaan poistamaan erillisessä työvaiheessa, mikä aiheuttaa reiän seinämiin kylmämuokkausta ja johtaa pinnanlaadun heikkenemiseen.

Värähtelystä aiheutuvia kustannuksia syntyy useasta syystä kuten heikosta laadusta, ylimääräisestä työvaiheesta, työkalukustannuksista sekä alentuneesta tuottavuudesta.

Tutkimustyön tavoitteena on selvittää värähtelyn aiheutumisen juurisyitä karalaatikossa tai sen voimansiirrossa. Tutkimuksen rajaaminen näihin komponentteihin perustuu rajalliseen ajankäyttöön sekä oletukseen porayksiköiden olevan tekijä värähtelylle. Tämän oletuksen ja aiemman kokemuksen perusteella tutkimuksen rajaus on kohdistettu juuri näihin komponentteihin.

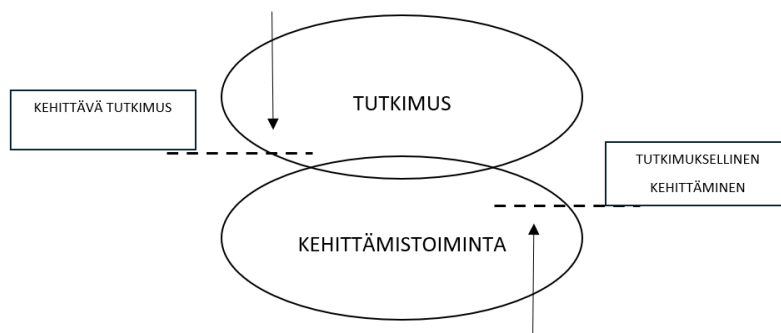
3.2 Tutkimusmenetelmä

Kehittämistoiminnalla pyritään jonkin toimintatavan tai toimintarakenteen kehittämiseen. Kehittäminen voi olla ainoastaan yhden työntekijän menetelmien kehittämistä, mutta laajimmillaan kehittäminen käsittää koko organisaation tai jonkin prosessin kehittämistä (Kuvio 2). (Toikko & Rantanen 2009, 14–15.)



Kuvio 2. Tutkimuksellisen kehittämistoiminnan prosessi (Toikko & Rantanen 2009, 10).

Tämä opinnäytetyö on laadullinen kehittämistyö, jossa toimeksiantajayrityksen tuotantoprosessissa on havaittu laaduntuoton haasteita. Haasteet heikentävät tutkimuskohteen laaduntuottoa ja valmistuskapasiteettia. Työn tavoitteena on selvittää Vaipanporauskoneen karalaatikon ja tämän voimansiirrosta syntyviä mahdollisia värähtelynlähteitä. Tutkimuksessa keskitytään rajattuun kehityskohteeseen, jonka olemassa olevista ongelmista tuotetaan analysoitavaa tietoa sopivilla kehittämismenetelmillä. Toikko & Rantasen (2009, 21–22) mukaan tutkimus- ja kehittämistoiminnan tavoitteena on saada aikaan konkreettista muutoksia. Tutkimuskysymykset johdetaan todellisista haasteista, eikä niitä voida muotoilla oletuksiksi, vaan niihin pyritään vastaamaan systemaattisesti hankitun perustellun tiedon avulla. (Toikko & Rantanen 2009, 21–22.)



Kuvio 3. Tutkimuksen ja kehittämistoiminnan rajapinnat. (Toikko & Rantanen 2009, 21.)

Tutkimusmenetelmäksi valittiin laadullinen eli kvalitatiivinen lähestymistapa, sillä tutkittava ilmiö on laaja ja siihen vaikuttavat rakenteelliset, että kunnossapidolliset tekijät. Tutkimuksessa tehtiin mittauksia, mutta niitä tarkastellaan laadullisesta näkökulmasta. Lisäksi tutkittiin koneenkäyttäjien ja kunnossapidon henkilöstön havaintoja, jotka täydentävät tuloksia ja auttavat muodostamaan kokonaiskuvan värähtelyn aiheuttajista.

Laadullista ja määrällistä tutkimusta voidaan käyttää samassa tutkimuksessa. Niiden analyysimenetelmät määräytyvät tutkimuksen lähestymistavan mukaan. Molemmilla menetelmillä voidaan saada tuloksia, mutta tulosten esittämistavat eroavat toisistaan. (Laadullinen analyysi n.d.)

Pramilan (1985) mukaan värähtelyjen analysointi ja niiden ratkaisu edellyttää kvantitatiivista tarkastelua (Pramila 1985, 332). Tässä tutkimuksessa lukuja eli mittaustuloksia käytetään kuitenkin pääasiassa laadullisen analyysin tukena. Menetelmävalinnat perustuvat tietoperustaan ja teoriaan. Myös Mikkosen (2009, 128) mukaan riskianalyysin tekoon tulisi käyttää kumpaakin tutkimusmenetelmää.

3.3 Aineiston hankinta, analysointi ja käsittely

Tutkimusaineistoa kerättiin useista lähteistä, jotta aiheesta saatiin mahdollisimman kattava kokonaiskuva. Tietoperusta muodostui asiantuntijahaastatteluista, kirjallisuudesta, mittauksista ja internet-lähteistä. Lähteiden valinnassa noudatettiin kriittisyyttä ja pyrittiin varmistamaan niiden alkuperäisyys ja luotettavuus

Asiantuntijahaastattelut toteutettiin koneenkäyttäjien ja kunnossapidon henkilöstön kanssa. Haastattelujen tavoitteena oli kerätä tietoa koneen toiminnasta, tyyppillisestä häiriöstä sekä kunnossapito- ja huoltomenetelmistä.

Haastattelu on yleinen ja tehokas tutkimusmenetelmä, jota voidaan soveltaa tehokkaasti moniin eri tarkoituksiin. Laadullisessa tutkimuksessa toteutuksessa on tärkeä määrittää tutkimuskysymykset ja tavoitteet etukäteen sekä suunnitella haastattelun rakenne ja siihen liittyvät kysymykset huolellisesti. Tulosten analysoinnissa voidaan käyttää teemoittelua, joka helpottaa aineiston tulkintaa. (Koivunen K. 2023.)

Dokumentaatio koostui koneen valmistuspiirustuksista, tutkitusta kirjallisuudesta, huolto- ja kunnossapitodokumenteista, aikaisemmista tutkimustöistä sekä laadunvalvontaraporteista. Dokumenttien avulla voitiin vertailla koneenrakennetta ja sen nykytilaa suunniteltuihin mittoihin ja toleransseihin nähden.

Mittaukset ja silmämääräinen havainnointi kohdistettiin karalaatikoihin ja voimansiirron osiin. Mittauksilla ja havainnoinnilla arviotiin laitteiden nykykuntoa ja selvitettiin mahdollisia värähtelyn lähteitä. Tuloksia verrattiin kirjallisuuteen ja siellä oleviin toleransseihin ja lähtöarvoihin.

Aineiston analysoinnissa hyödynnettiin laadullisia analyysimenetelmiä. Värähtelyn juurisyiden tunnistamisen tukena käytettiin kirjallisuutta ja ongelmanratkaisumenetelmiä.

3.4 Tutkimuksen eettisyys

Ammattikorkeakoulut vastaavat itse omista opinnäytetyöprosesseistaan ja niiden etiikasta. Ammattikorkeakoulut voivat itse täsmentää ja tarkentaa käytäntöjä omissa ohjeissaan (Arene Ry n.d). JAMKin ohjeet pohjautuvat ammattikorkeakoulujen yhteiseen ohjeeseen ja niitä on täydennetty JAMKin ja muiden toimijoiden ohjeistuksilla (eettiset periaatteet ja tutkimusetiikka Jamkissa n.d). Alla olevat suositukset ovat määritelty tutkimustöille: (Arene Ry. n.d, 5–6.)

- *Olen selvittänyt esteellisyyteni*
- *Olen perehtynyt opinnäytetyöni aiheeseen*
- *Olen yhdessä ohjaajani kanssa punninnut työn edellyttämät resurssit*
- *Olen tutustunut hyvän tieteellisen käytännön menettelytapoihin ja tutkimuseettisiin ohjeistuksiin*
- *Olen tutustunut henkilötietojen käsittelyyn ja tietosuojaan liittyviin periaatteisiin ja ammattikorkeakouluni ohjeisiin*
- *Olen yhdessä ohjaajani kanssa selvittänyt, tarvitseeko opinnäytetyöni eettisen ennakoarvioinnin ja/tai tutkimuslupia sekä tarpeen mukaan nämä hankkinut*
- *Olen solminut tarvittavat sopimukset*
- *Olen sopinut opinnäytteeseeni liittyvien julkaisujen tekijyydestä ja kirjoittajuudesta*
- *Olen tehnyt aineistonhallintasuunnitelman ja noudatan sitä*
- *Olen ilmoittanut opinnäytetyöhöni liittyvän rahoituksen ja muut merkitykselliset sidonnaisuudet*
- *Tiedän, että opinnäytetyöni tarkistetaan plagiaatintunnistuksella*
- *Ymmärrän, että opinnäytetyöni on julkinen asiakirja*
- *Ymmärrän, miten voin käyttää tekoälyä työvälineenä opinnäytetyöprosessissa*
- *Tiedän, että minulla on oikeus laadukkaaseen opinnäytetyöprosessiin.*

Hyvin toteutetussa tutkimuksessa noudatetaan hyvän tieteellisen käytännön peruseriaatteita, joihin kuuluvat arvot ja eettiset periaatteet. Tutkijan tulee toimia vastuullisesti ja luotettavasti sekä vastata omasta kirjoittamastaan. Vahinkojen, riskien ja haittojen aiheuttamista on vältettävä. Tutkimus ei saa loukata ihmisarvoja eikä henkilötietoja saa julkaista ilman lupaa. Haastatteluissa osallistujia ei saa tunnistaa sekä tutkimuksessa on aina säilytettävä kunnioitus ja itsemääräämisoikeus. Jokaisen tutkijan kunnioitettava kulttuureja, luontoa, monimuotoisuutta, yksityisyyttä ja tietosuojaa. (Eettiset periaatteet n.d.)

Tässä tutkimuksessa ei käsitellä henkilötietoja, eikä haastateltavien nimiä julkaista ilman lupaa. Haastateltaville kerrotaan etukäteen tutkimuksen aihe sekä heille annetaan tutkimus kysymykset tutustuttaviksi. Tutkimuksesta on laadittu kirjallinen sopimus toimeksiantajan kanssa, jossa on määritelty, sisältyykö työhön salassapitovelvollisuutta koskevaa materiaalia. Tässä tutkimuksessa ei käsitellä salassa pidettävää sisältöä. Toimeksiantajalla on kuitenkin oikeus tarkastaa työ ennen julkaisua ja määrittää tarvittaessa salassapito uudelleen.

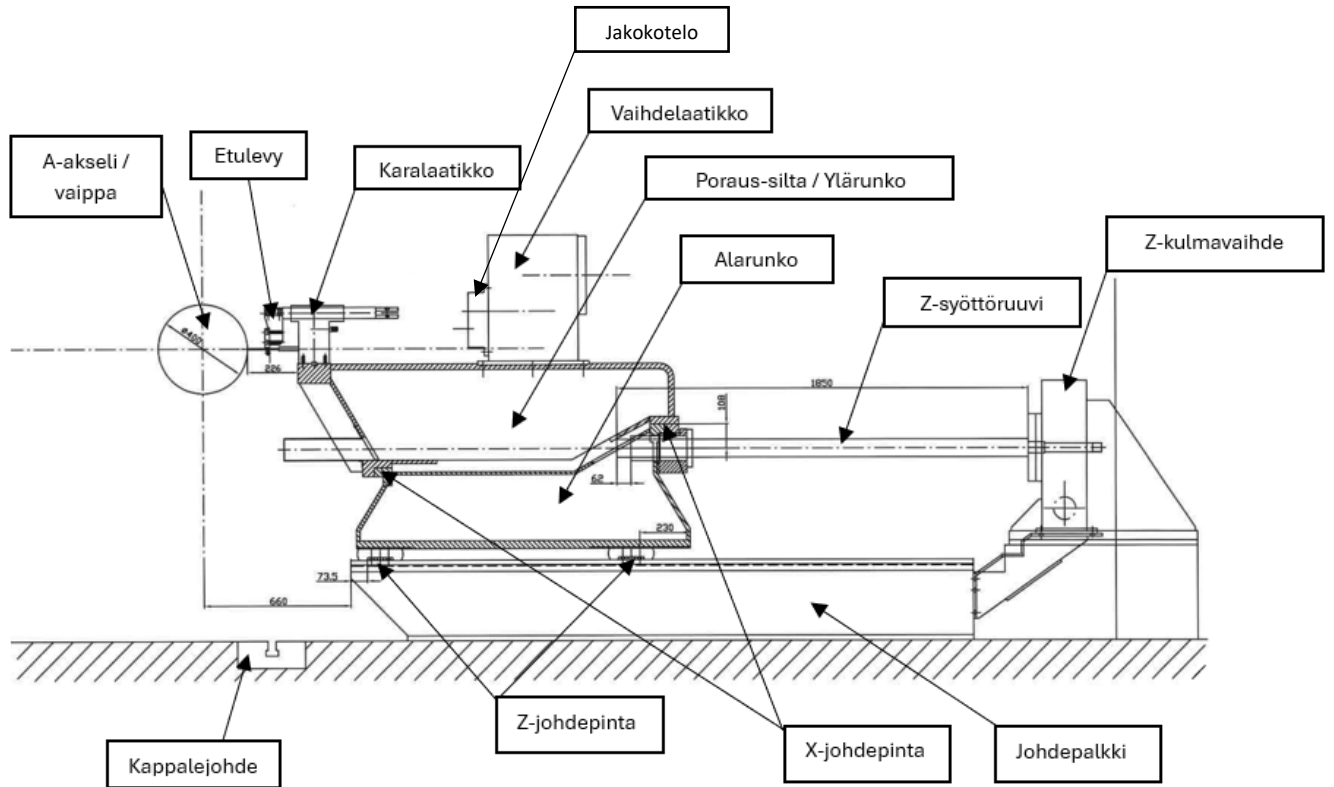
4 Vaipanporauskone

Vaipanporauskone on kanuunaporakone, jota käytetään pääasiassa paperikoneiden imutelan vaippojen rei'itykseen. Imutelanvaippa on lieriönmuotoinen putki, joka kiinnitetään koneeseen kuusi-leukapakoilla kappaleen molemmista päistä. Kiinnitystapa mahdollistaa myös pehmeäpintaisten ja pintapaineelle herkkien materiaalien turvallisen ja tehokkaan poraamisen. Koneella voidaan valmistaa muiden paperikoneen komponenttien porauksia, sillä kone on varustettu erillisillä kappalejohteilla. Kappalejohteet mahdollistavat erilaisten kappaleenpitimien kiinnityksen suoraan johdepintoihin.

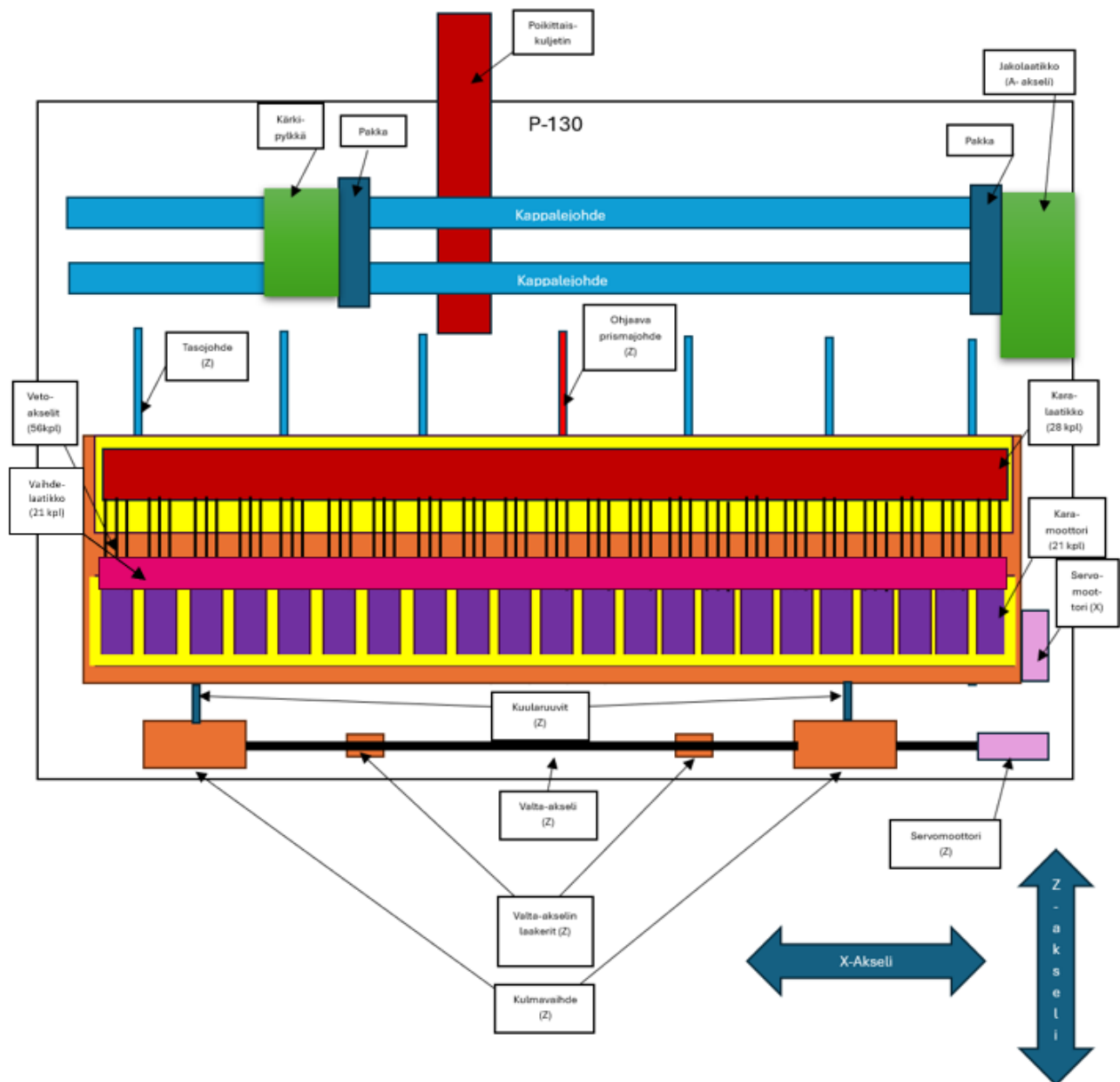
Kappaleen kiinnittäminen ja keskittäminen tapahtuu indikoimalla vaipan molemmat päät erikseen. Porauksen aikana vaippa tuetaan rullapukeilla, jotka painatetaan vaipan pintaa vasten porausta vastakkaiselta puolelta. Rullapukit vähentävät työstön aiheuttamia värähtelyjä ja joustoja. Rullapukkeja käytetään kappaleen pituuden mukaan yhdestä kolmeen kappaletta.

Vaipanporauskoneen rakenne perustuu kaksikerroksiseen kelkkarakenteeseen. Sen pääelementtejä ovat ylärunko ja alarunko. Alarunko liikkuu lineaarisesti pituus, eli syöttö suunnassa (Z-akseli), kun taas ylärunko liikkuu lineaarisesti sivusuunnassa (X-akseli).

Koneessa on kahdeksan Z- suuntaista johdetta. Keskimäinen johde on ohjainrullakisko, joka toimii ohjaavana johteena syöttösuunnassa. Loput ovat tasojohteita, jotka vakauttavat liikettä ja tukevat alarunkoa. Johteiden ja perustuspalkkien sijainti sekä niiden keskinäinen järjestely on esitetty lay-out kuviossa 4. Lisäksi kuvioista 5 voidaan havaita Z- suuntaiset johteet, perustuspalkit ja X- akselin johteet, nämä X- akselin johteet erottavat ylä- aja alarungon toisistaan ja mahdollistavat ylärunгон sivusuuntaisen liikkeen.



Kuvio 4. Vaipanporaus koneen poikkileikkauskuva.

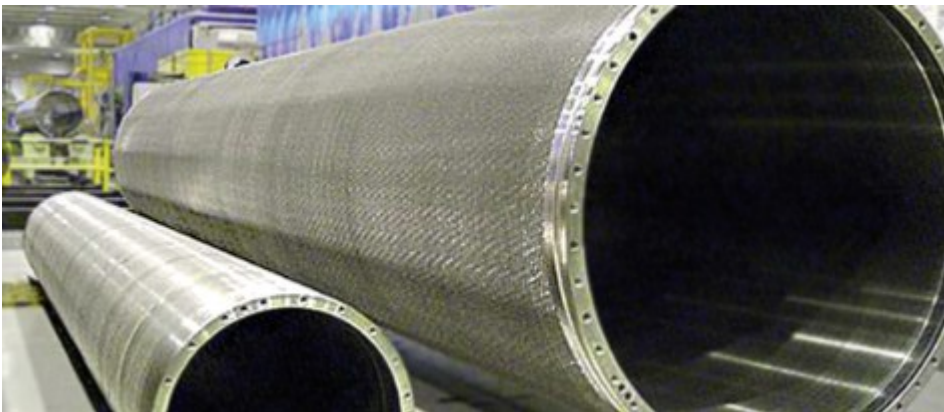


Kuvio 5. Vaipanporauskoneen lay-out.

Ylärungon päälle on sijoitettu kara- ja vaihdelaatikot, jotka voidaan havaita kuviosta 5. Karalaatikko toimii poraysikkönä, jossa on yhteensä 12 porakaraa. Karalaatikkoon on integroitu hydraulisesti liikkuvat ohjainlevyt, jotka varmistavat poran tarkan kohdistuksen. Porauksen alkuvaiheessa ohjainholkki määrittää poran suunnan ja heiton, jolloin poraus pysyy tarkkana sekä yhtenäisenä porauksen sisä- ja ulkopinnan välillä.

4.1 Imutela

Imutela on paperikoneen komponentti, jonka tehtävänä on poistaa paperiradasta vettä tehokkaasti ja varmistaa radan luotettava siirtyminen viiralta toiselle. Imutelan toimintavarmuus on elintärkeää koko paperinvalmistusprosessille. Imutelan vaippa (Kuvio 6) valmistetaan ruostumattomasta Duplex-teräksestä. Imutelat voidaan varustaa erilaisilla pinnoitteilla, pesulaitteilla, sekä imukammion tiivisteratkaisulla, joiden avulla prosessin luotettavuutta ja tehokkuutta voidaan parantaa. Valmet kehittää jatkuvasti innovatiivisia ratkaisuja asiakkaiden tarpeiden ja haasteiden pohjalta. (Your suction roll, our mission - tailored services for performance excellence 2025.) Tuotekehitys on myös olennainen osa Valmetin strategiaa, sillä yrityksen tavoitteena on olla asiakkailleen paras palveluntuottaja. Omalla tuotekehityksellä Valmet pyrkii parantamaan tuotteiden laatua ja vahvistamaan liiketoiminnan kannattavuutta sekä kasvua.

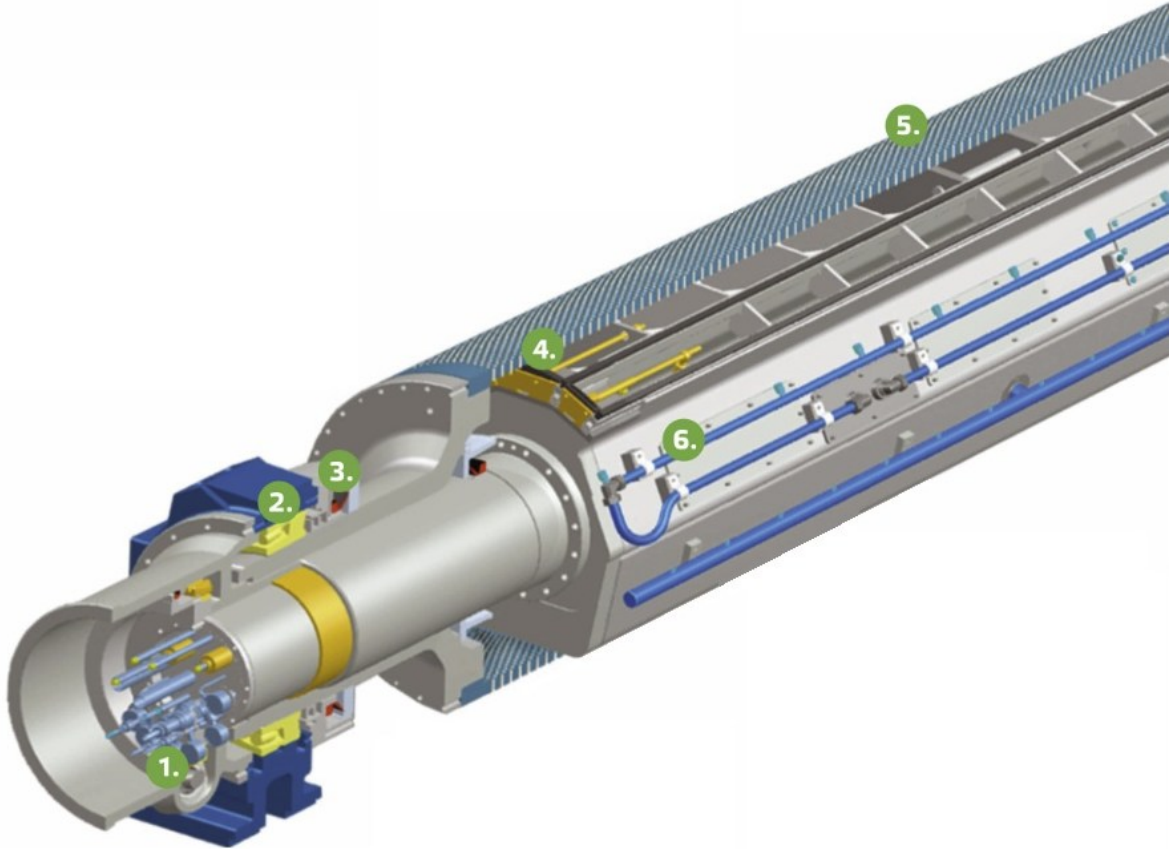


Kuvio 6. Imuvaipat (Suction rolls for ultimate process performance 2014, 4).

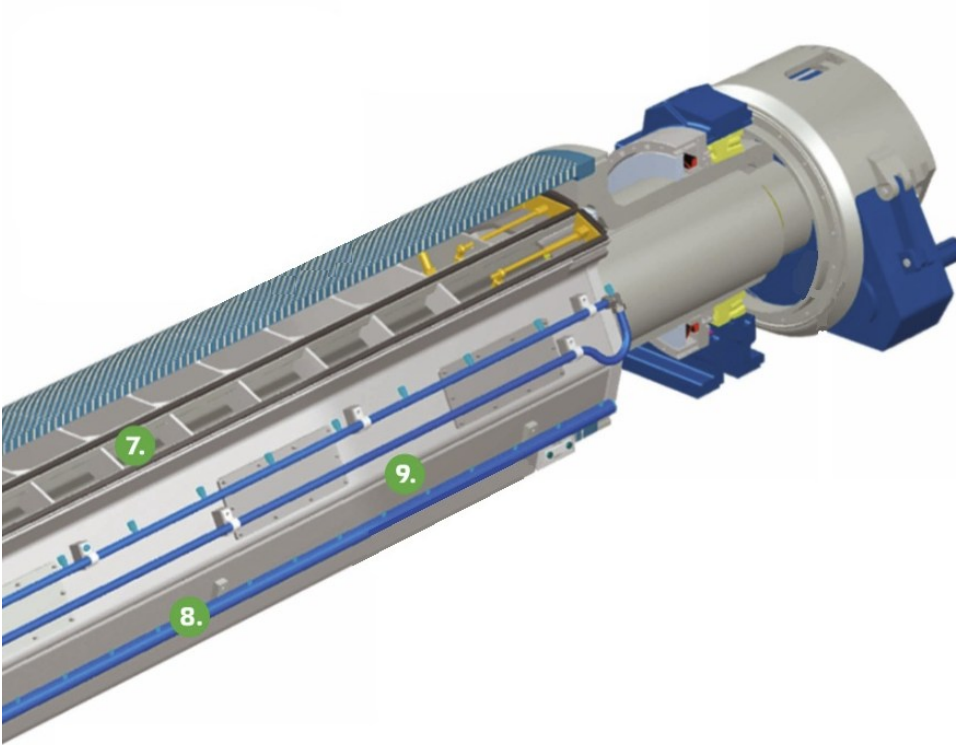
Kuvioissa 7 ja 8 imutelan pääosat eriteltynä:

1. Ruuvivaihde
2. Laakeripukki, jossa rullalaakerit
3. Tiivistejärjestelmä
4. Päätytiivisteet (imuleveyden säätö)
5. Imutelan vaippa
6. Tiivisteiden voiteluvesi putkisto
7. Aksiaalitiivisteet
8. Vaipan pesulaite
9. Imulaatikko

Imutelan pääkomponentit ovat Imutelan vaippa, imulaatikko ja laakeripukit. Kuten kuviosta 5 ja 6 voidaan havaita, että vaippa pyörii laakeroitujen laippa-aseleiden varassa, kun taas imulaatikko ei pyöri vaan se pysyy lukittuna vaipan sisällä oikeassa kulmassa paperirataan nähden.



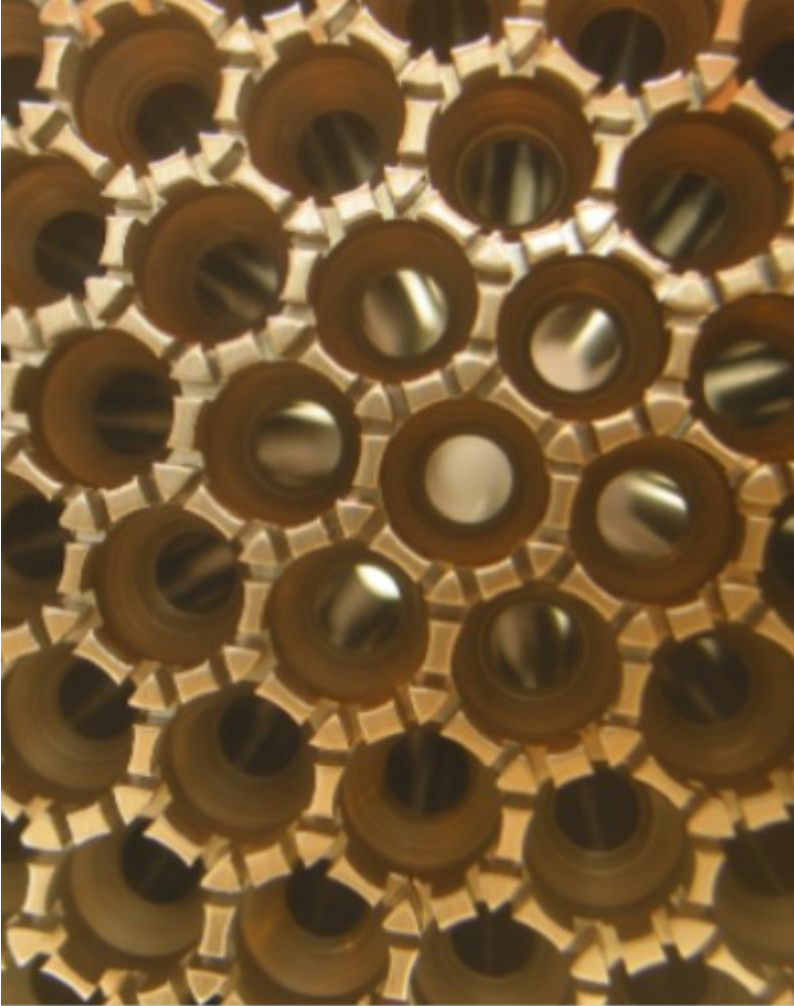
Kuvio 7. Imutelan hoitopää (Suction rolls for ultimate process performance 2014, 6).



Kuvio 8. Imutelan käyttöpää (Suction rolls for ultimate process performance 2014, 7).

Imutelan vaippojen kokonaismitat vaihtelevat tyypillisesti halkaisijaltaan noin 500–2000 mm ja pituudeltaan 1–12 metriä. Imutelan vaippa suunnitellaan aina käyttökohteen erityisvaatimusten mukaan, jotta prosessin kannalta keskeiset hyödyt, kuten vedenpoistokyky ja rakenteellinen kestävyys, saadaan optimoitua. Vaipan porauskuviolla voidaan merkittävästi vaikuttaa sen vedenpoito ominaisuuksiin sekä mekaaniseen kestävyteen. (Suction rolls for ultimate process performance 2014.)

Kuviossa 9 on esitetty Valmetin patentoima imutelan pintakuviointi. Erityisen pintarakenteen ansiosta formeri- tai vastateloja ei tarvitse varustaa niin sanotuilla kutistesukilla, mikä vähentää huollontarvetta ja alentaa käyttökustannuksia (Suction rolls for ultimate process performance 2014).



Kuvio 9. Formeritelan vaippa, joka on kanuuna- ja senkkasporattu sekä uritettu. (Suction rolls for ultimate process performance 2014, 8).

4.2 Lastuava työstö ja poraaminen

Lastuaminen perustuu kovemman materiaalin tunkeutumiseen, jonka tarkoitus on siten poistaa materiaali työstettävästä kappaleesta. Lastuamisessa on oltava syöttöliikettä, jolla terälle saadaan luotua paine tunkeutumiseen. Lisäksi tunkeutumiseen vaikuttaa terän geometria ja materiaali. (Ihalainen 2011, 140.)

Lastuaminen on tehokas menetelmä poistaa työstettävästä kappaleesta ainemääriä tehokkaasti. Taloudellisesti lastuaminen on kallista ja se kannattaa korvata silloin, jos mittavaatimukset eivät ole tarkkoja. Lastuaminen on menetelmänä konepajoissa yleinen, sillä korvaavaa menetelmää sille ei ole. (Ihalainen 2011, 140.)

Lastuamisessa on käytettävissä useita menetelmiä. On tärkeää selvittää mikä näistä on taloudellisin menetelmä, että valmistettavalle kappaleelle sopivin vaihtoehto. Menetelmän taloudellisuudella voidaan saavuttaa huomattavia kustannussäästöjä, työkalujen ja ajankäytön osalta. Lisäksi Tarkkuus- ja pinnanlaatuvaatimukset vaikuttavat merkittävästi valittavaan menetelmään.

Lastuavat valmistusmenetelmät:

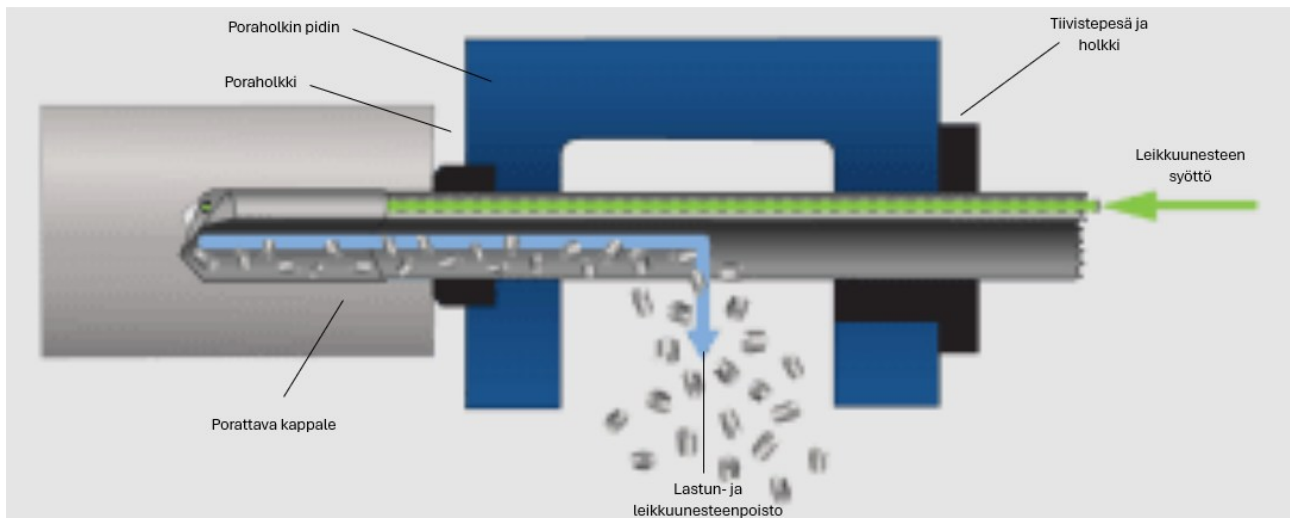
- Sorvaaminen
- Jyrsiminen
- Poraaminen
- Avartaminen
- Höylääminen ja pistäminen
- Aventaminen
- Sahaaminen
- Hiominen
- Hienotyöstö
- Hammaspyörien valmistus. (Ihalainen 2011, 139–140.)

4.3 Poraaminen ja kanuunaporaus

Poraaminen on lastuavista menetelmistä yleisin. Porauksen osuus noin 20 % kaikesta lastuamismenetelmistä. Porauksia valmistetaan perinteisillä porakoneilla, kuten pylväs-, vaaka-, säteis- ja magneettiporakoneilla. Nämä perinteiset porakonetyypit ovat syrjäytyneet NC- sorvien- ja jyrsin koneiden myötä. NC- koneiden nopeus ja tarkkuus ovat toista luokkaa perinteisiin koneisiin verrattuna. (Ihalainen 2011, 174.)

Kanuunaporaus on valmistusmenetelmä (Kuvio 10), jota käytetään erityisesti syvien ja tarkkojen reikien poraukseen. Menetelmä kehitettiin alun perin aseiteollisuuden tarpeisiin aseiden piippujen porausta varten, mistä sen nimikin juontuu. Kanuunaporaus on taloudellinen vaihtoehto silloin,

kun tarvitaan syviä reikiä, joiden halkaisijan tarkkuus sekä pinnanlaatu ovat vaativia (Sterling Gun Drills Inc n.d).



Kuvio 10. Kanuunaporauksen periaate (What is Gun Drilling? n.d).

Kanuunaporauksen prosessissa yksi keskeisimmistä osa-alueista on leikkuuneste. Sen tehtävänä on voidella ja jäähdyttää kanuunaporanterää, sekä poistaa lastua poran varrelta. Paineistettu leikkuuneste tukevoittaa myös poran rakennetta. (Gundrills n.d.)

Kanuunapora on rakenteeltaan ontto ja siinä on V- muotoinen lastu-ura, jota pitkin leikkuuneste kuljettaa työstössä syntyvää lastua pois poranvartta pitkin. (Gundrills n.d.) Imutelojen porauksessa käytettävien porien halkaisijat ovat hyvin pieniä, tyypillisesti 3–10 millimetriä, minkä vuoksi poran varsi on ohut ja altis taipumiselle.

Työstön aikana käytettävä leikkuunesteen paine jäykistää poraa ja parantaa sen vakautta. Pienemmillä porilla käytettävä paine on tyypillisesti noin 100 baaria. Leikkuunesteen puhtaus on kriittinen tekijä, sillä se vaikuttaa suoraan sekä työkalujen että oheislaitteiden elinkaareen. Puhdas leikkuuneste ehkäisee kulumista ja pinnanlaadun heikkenemistä.

Leikkuunesteen laadulla ja koostumuksella on lisäksi merkittävä vaikutus porauksen pinnanlaatuun ja voiteluominaisuuksiin. Kanuunaporalla päästään tyypillisesti pinnanlaatuun Ra 0,4–1,6 ja toleranssiluokkiin IT7-IT9 (Gundrills n.d). Vaipanporauskoneessa käytetään leikkuuöljyä, joka tarjoaa

erinomaiset voiteluominaisuudet erityisesti austeniittisen teräksen porauksessa. Öljy soveltuu ja voitelee erittäin hyvin korkeapainetta tuottavia ruuvipumppuja, joita hyödynnetään porauksessa tarvittavan paineen saavuttamisessa.

4.4 Vaipanporauskoneen karalaatikko ja sen voimansiirto

Tehonsiirtoelimet ovat koneenosia mitkä osallistuvat tehonsiirtämiseen käyttävästä koneesta käytettävään koneeseen. Käyttävä kone on yleensä sähkömoottori tai muu voimaa tuottava elementti. Tehonsiirtojärjestelmä voi lisäksi sisältää erilaisia vaihdelaatikoita, akseleita ja kytkimiä. (Blom ym., 2006, 275.)

Vaihdelaatikko välittää voiman karamoottorilta porayksiköille vetoakselien välityksellä. Vaihdelaatikossa on kaksi nopeusaluetta. Hidas-alue on raskasleikkuisille porille, kuten kierukkaporille, jotka tarvitsevat enemmän vääntöä ja nopea-alue on kanuunaporauksille. Tyypillisesti käytettävät kierrosalueet ovat kierrukkaporilla 400 r/min ja kanuunaporilla 3000 r/min.

Vaihdelaatikko on tiivis hitsattu levyrakenteinen, jota ei voi irrottaa rungosta huollon ajaksi. Vaihdelaatikkoon tehtävät huollot on toteutettava on-site tyyppisesti, sillä ne ovat valmistettu runkoon hitsatuista levyrakenteista.

Karalaatikot voidaan tarvittaessa irrottaa rungosta huoltoa varten. Viallisen tilalle vaihdetaan huollettu karalaatikko, jotta tuotanto ei keskeydy. Viallinen karalaatikko toimitetaan alihankkijalle huoltoon.

Karalaatikko on porauksessa keskeisessä roolissa ja sen säännöllinen huoltaminen on tärkeää. Välyksetön ja ehjä karalaatikko takaa kovametalliselle terälle parhaat mahdolliset toimintaolosuhteet. Sen sijaan huonokuntoinen karalaatikko voi aiheuttaa tarpeetonta terien särkymistä, sekä laatupoikkeamaa työstettävässä kappaleessa.

Karalaatikkoon on vuosien varrella tehty useita muokkauksia, jotta sen toimintavarmuus ja huoltamisen helppous paranisivat. Esimerkkinä tästä on leikkuuöljyn syöttöjärjestelmän muutos. Aiem-

min leikkuuöljy johdettiin karoille monimutkaisen rakenteen kautta. Karalaatikon runkorakenteessa olevasta kiinteästä jakotukista. Jakotukissa oli paljon tiivisteitä, se oli hankala ja kallis huoltaa. Myöhemmin jakotukki on purettu pois ja karalaatikkoa on muokattu pyörivälleliittimelle sopivaksi.

Pyörivänliittimen tarkoitus on yhdistää porakarakalle syötettävä leikkuuöljy korkeapainejärjestelmästä. Porakara on karalaatikossa sijaitseva akseli, jossa on vapaareikä, tästä reiästä leikkuuöljy pääsee poralle. Liittimen on oltava tiivis ja kestävä noin, 150 baarin painetta sekä sen on pyörittävä porakaran mukana. Pyöriväliitin on yksinkertaistanut rakennetta, helpottanut huoltamista ja parantanut toimintavarmuutta verrattuna aiempaan ratkaisuun.

Kara- ja vaihdelaatikko on varustettu kiertovoitelujärjestelmällä, joka takaa tehokkaan voitelun kaikille kara- ja vaihdelaatikoille. Voiteluöljy pumpataan voiteluputkistoa pitkin kara- ja vaihdelaatikoille. Voiteluöljy linjassa on jokaiselle laatikolle oma erillinen annostelija, joka varmistaa oikean öljymäärän.

Voitelun periaate on roiskevoitelu, jossa voitelu putket ovat johdettu rattaiden päälle. Öljy lentää pyörivästä rattaasta ympäri laatikkoa ja siten se roiskuu sen ympäröiville komponenteille. Kiertovoiteluöljyn paluulinja on osa koneen ylärunkoa. Laatikoiden pohjassa on reiät, joiden kautta voiteluöljy pääsee palaamaan rungon sisällä olevassa kanavassa, takaisin öljysäiliöön.

Viistokuulalaakeri

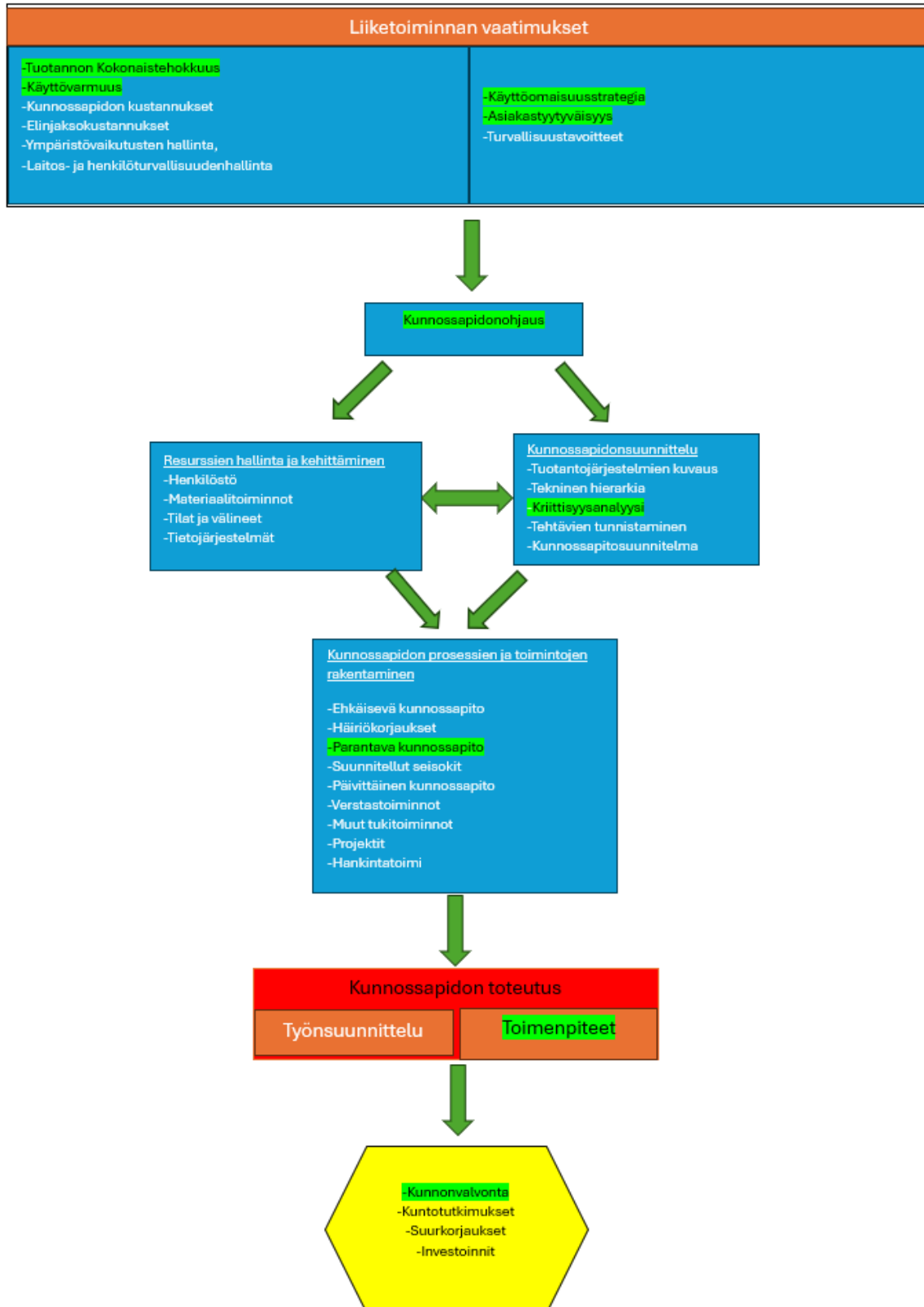
Karalaatikossa karojen laakerointi on toteutettu pareittain asennettavalla viistokuulalaakeri parilla. Tämän laakerityypin toiminta perustuu määriteltyyn sisäiseen välykseen ja esijännitykseen, joiden avulla saavutetaan tasainen kuormitus ja vakaa pyörimisliike (SKF-laakerien kunnossapito 2016, 12, 76). Mikäli esijännitys ei ole oikea, laakerin kuormitus jakautuu epätasaisesti, mikä voi lisätä värähtelyn riskiä.

5 Kunnossapito

5.1 Kunnossapitostandardit ja soveltaminen

Kunnossapitolajeilla määritellään ne toimenpiteet, joiden avulla laitteen kunto voidaan todeta ja ylläpitää halutulla tasolla. Standardit PSK 6201 ja SFS-EN 13306 määrittelevät kunnossapitolajien oikeat termit, joita voidaan soveltaa eri kunnossapitolajien kuvaukseen. Mikkosen (2009, 96) mukaan kunnossapitolajit ja niistä puhuttavat termit ymmärretään usein väärin. PSK-standardi jakaa kunnossapidon kahteen pääluokkaan: suunniteltuun kunnossapitoon ja häiriönkorjaukseen. SFS-standardi erottelee toimenpiteet vianhavaitsemiseen ja ehkäisevään kunnossapitoon. (Mikkonen 2009, 95–100.)

Kuviossa 11 on havainnollistettu, kuinka yrityksen vaatimukset kytkeytyvät kunnossapidon tavoitteisiin ja toiminnan edellytyksiin. Vihreällä rajatut osa-alueet korostavat niitä vaatimuksia, jotka kunnossapidon menetelmät ovat olennaisimpia tämän tutkimuksen näkökulmasta. Rajauksen avulla voidaan jäsentää tutkimuksen kokonaisuutta sekä tunnistaa tutkimukselle keskeiset alueet.



Kuvio 11. Kunnossapidon osa-alueet (Mikkonen 2009, 100, muokattu).

5.2 Kunnonvalvonta

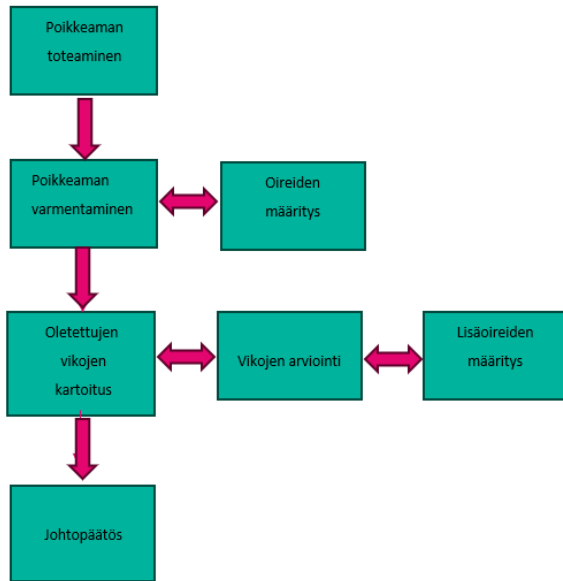
Tämä tutkimus ei perustunut yksinomaan kunnonvalvontaan, sen vianmäärityksen menetelmiä kuitenkin käytettiin toteutuksessa. Kunnonvalvonnan ja vianmäärityksen avulla voidaan arvioida karalaatikon ja voimansiirron nykytilaa ja havaita kulumisesta, voitelunpuutteesta tai rakenteellisista virheistä johtuvia värähtelynaiheuttajia. Erilaiset mittaukset, huoltodokumentit ja havainnot tukevat juurisyiden tunnistamista.

Kunnonvalvonta ja kuntoon perustuva kunnossapito perustuvat laitetason kunnossapidon strategiaan, joka määrittelee kullekin laitteelle sopivat toimintatavat. Parantavan kunnossapidon menetelmiä suositellaan erityisesti kohteisiin, joita on kunnossapidollisesti hankala seurata ja joiden keskiarvon hajonta on pientä. Strategian valinta ei riipu siitä, onko kyseinen laite tuotannollisesti tärkeä vai ei. (Järviö 2017, 73). Mikkosen (2009, 101) mukaan kunnonvalvonnan käsitteeseen liittyy usein väärin ymmärryksiä. Standardi PSK 6201 määrittelee kunnonvalvonnan seuraavasti: *”Kunnonvalvonnalla määritellään kohteen toimintakunnon nykytila sekä arvioidaan sen kehittymistä mahdollisen vikaantumisen, huolto- ja korjausajankohdan määrittämiseksi* (Mikkonen 2009, 101).

Tuotannollisesti tärkeille laitteille tehdään tyypillisesti ennakkohuoltoa kaikkiin seurattaviin kohteisiin sekä kunnonvalvontaa niihin kohteisiin, joita voidaan seurata. Niille kohteille, joita ei voida seurata tehdään ennakkohuoltoja.

Vikaantumista voidaan luokitella useiden standardien perusteella. Suomessa käytetyimpiä ovat SFS-13306:2010 ja PSK 6201:2011, jotka tarjoavat yhtenäiset periaatteet vikaantumisen ja erilaisien vikojen määrittelyyn. PSK-standardi yhdistää nämä luokittelut ja määrittelee lisäksi, että vikaantumiselle on tunnistettava juurisyys. (Järviö 2017, 73).

Vianmääritys alkaa, kun havaitaan jossain poikkeama (Kuvio 12). Se on usein monivaiheinen prosessi, johon voi liittyä monia syitä. Tilannetta vaikeuttaa yleensä, että eri viat voivat aiheuttaa samankaltaisia tai päällekkäisiä oireita. Siitä syystä oireiden perusteella vian paikantaminen on usein hankalaa. (Kunnonvalvonnan värähtelymittaus 2024, 75.)



Kuvio 12. Vianmäärityksen kulku (Kunnonvalvonnan värähtelymittaus 2024, 75)

5.3 Kunnonvalvonnan menetelmät

PSK 5705 -standardi määrittelee ohjeavot, joiden perusteella voidaan arvioida koneiden kuntoa, jotka sisältävät pyöriviä laitteita. Valvonta perustuu mitattuihin arvoihin tai niistä johdettuihin tunnuslukuihin. Näille arvoille on olemassa hälytysrajat ja niiden ylittyessä on syytä olettaa, että kone on vikaantunut. Vikaantuminen voidaan havaita järjestelmä hälytyksenä, aistinvaraisesti tai suorituskyvyn heikkenemisenä. (Kunnonvalvonnan värähtelymittaus 2024, 76.)

Työstökoneen tarkkuuden ominaisuuksia on tärkeää seurata kohdennetuilla tarkkuusmittauksilla, joita toteutetaan suunniteltuihin koneenosiin ja suunnitelman mukaan. Tarkkuusmittaukset voidaan kohdistaa koneen vastaanottotarkastuksessa tehtyihin kohteisiin tai muihin määriteltyihin kohteisiin, niitä voidaan seurata tietyin ajanjaksoin tai silloin kun työstökoneen tarkkuudessa tapahtuu poikkeamaa. Kunnonmittauksien edellytyksenä on aikaisemmin kerätty tarkkuusmittausdata, jota voidaan käyttää vertauskohteena analysoinnissa. (Andersson & Tikka 1997.)

Kunnonvalvonnassa on käytössä useita mittausmenetelmiä. Taloudellisuus on kuitenkin tärkeää ottaa huomioon. Valvontamenetelmä saattaa olla kustannuksiltaan niin kallis, ettei sen toteuttaminen ole järkevää, eikä siitä saada kuluihin nähden vastaavaa hyötyä. Mittausmenetelmä saattaa vaatia laitteiston lisäksi henkilöstön koulutus tarpeita (Nokynek & Lumme 1997).

Nohynekin & Lumpeen (1997) mukaan mittausmenetelmiä, joita kunnonvalvonnassa tyypillisesti käytetään ovat värähtelymittaus, lämpötilamittaus, virta-analyysi, kulumishiukkasanalyysi taloudellisuusmittaukset (Nokynek & Lumme 1997, 17.) Mikkonen (2009) täydentää listaa aistien, voiteluanalyysien, NDT-menetelmien sekä ääni- ja ultraäänimittauksien käytöllä. (Mikkonen 2009.)

6 Värähtely

Ei-toivottu värähtely on yleinen ilmiö pyörivien laitteiden vikaantumisessa. Vikojen tunnistaminen on haastavaa, sillä värähtely on usein usean tekijän yhteisvaikutuksen tulos. Vian tunnistaminen on kuitenkin tärkeää, koska sen avulla voidaan arvioida vian kriittisyys ja määrittää taloudellisesti paras ajankohta korjaustoimenpiteille. Korjaus ei ole aina välttämätöntä ja siksi kunnon arvioinnin perusteella voidaan päättää sopivin hetki huolto- tai korjaustöiden toteuttamiselle. (Mikkonen 2009, 297)

6.1 Värähtelyn syntymekanismit (epätasapaino, kuluminen, kitka, jousto)

Värähtely on mekaaninen ilmiö, joka syntyy kappaleiden jaksollisista, aaltomaisista heilahduksista. Sen taustalla voivat olla esimerkiksi epätasapaino, kitka tai kuluminen. Värähtely on useimmiten ei-toivottu ilmiö, jonka hallintaan pyritään jo tuotteiden suunnitteluvaiheessa. Hallitsematon värähtely voi aiheuttaa rakenteiden ennen aikaista kulumista, lisätä energiankulutusta, synnyttää muodonmuutoksia sekä tuottaa melua. (Seco Tools Oy n.d.)

Epätasapaino on yleisin värähtelyn aiheuttaja pyörivissä laitteissa. Sitä voi syntyä monista syistä, kuten materiaalien ominaisuuksista, valmistustoleransseista, kulumisesta tai mistä tahansa tekijästä, joka aiheuttaa pyörivän kappaleen massakeskipisteen siirtymisen pois sen pyörimiskeskipisteestä. (Mikkonen 2009, 297.)

Mikkosen (2009) mukaan pyörivissä koneissa esiintyviä värinän aiheuttajia voivat olla muun muassa epätasapaino, linjausvirheet, mekaaninen väljyys, koneen virheellinen kiinnitys, vierintä- ja liukulaakeriviat, akselin epäsymmetrinen lämpölaajeneminen tai siinä esiintyvä särö, hydrauliset ja aerodynaamiset häiriöt, hammasvälityksen epätarkkuudet sekä sähkökoneiden viat. (Mikkonen 2009, 303–339.)

Mikkosen (2019) ja Kunnonvalvonnan värähtelymittauksen (2024) mukaisesti värähtelyjä aiheuttavia tekijöitä ovat:

- Epätasapaino
- Epäkeskeisyys
- Resonanssi
- Taipunut akseli
- Akselin linjausvirheet
- Mekaaninen väljyys
- Vierintälaakeriviat
- Liukulaakerit
- Moottorinhankaus ja roottoriviat
- Roottorin poikittainen särö
- Akselin epäsymmetrinen lämpiäminen
- Hydrauliset ja aerodynaamiset herätteet
- Vaihteet
- Huojunta
- Resonanssitaajuudet
- Tukirakenteiden joustavuus tai liikkuvuus

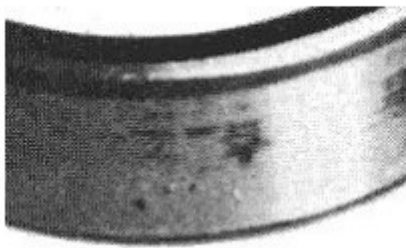
6.2 Vian havaitseminen

6.2.1 Laakeri

Laakerivaurio voidaan jakaa kuuteen eriluokkaan. Vaurioluokituksen määritelmiä ovat materiaalin väsyminen, kuluminen, korroosio, sähköeroosio, plastinen muodonmuutos ja murtuma. Kulumisesta ilmenee ISO-luokituksen mukaisesti abrasiivisena- (Kuvio 13) tai adhesiivisena kulumisena (Kuvio 14). Nämä voidaan havaita laakerin ulkorenkkaalta, joko kiillottumisena tai tahmautumisena. (SKF-laakerien kunnossapito 2016, 299–301.)



Kuvio 13. Abrasiivinen kuluminen. Laakerin ulkorengas on pyörinyt pesässä. Ulkorengas on kiillottunut (SKF-laakerien kunnossapito 2016, 300).



Kuvio 14. Adhessiivinen kuluminen iskukuormituksen aiheuttamana. Ulkorengas on tahmautunut. (Laakerivaurioiden tunnistus ja ehkäisy n.d).

Abrasiivinen kuluminen eli hiontakuluminen laakerissa ilmenee renkaan pyörimisenä pesässä tai akselilla, joka aiheuttaa nopeuseroja kontaktipintojen välillä. Tämän vuoksi oikea sovite on laakerin eliniän ja toiminnan kannalta erittäin tärkeää. Kun laakeriin kohdistuu paljon värähtelyä tai iskuja, tulee sovitteen olla tiukempi laakerirenkaalla, joka pyörii ja ottaa suurimman kuormituksen vastaan. (SKF-laakerien kunnossapito 2016, 300–301.) Liian väljä sovite ja vällys puolestaan aiheuttavat värähtelyitä (Laakerivaurioiden tunnistus ja ehkäisy n.d).

Adhesiivinen kuluminen, eli hankauskuluminen, syntyy kappaleiden välisestä liukumisesta. Tätä voi aiheuttaa esimerkiksi, väljästä sovitteesta johtuva värähtely, joka aiheuttaa metallimolekyylejä tarttumisen pinnasta toiseen. (Kuinka materiaalin ominaisuudet vaikuttavat kulutuskestävyyteen? 2025.)

Suurelle värähtelylle mahdollisia aiheuttajia laakereissa voivat olla:

- Metallimetallikontakti, jolloin vierintäelimet kuluvat.
- Epäpuhtaudet, jolloin vierintäpinnoissa tai elimissä on havaittavissa painaumuksia.
- Liianlöysät laakerin sovitteet, jolloin sisärenkas pyörii akselin sovitteella tai ulkorenkas pyörii laakeripesässä. (SKF-laakerien kunnossapito 2016, 234.)

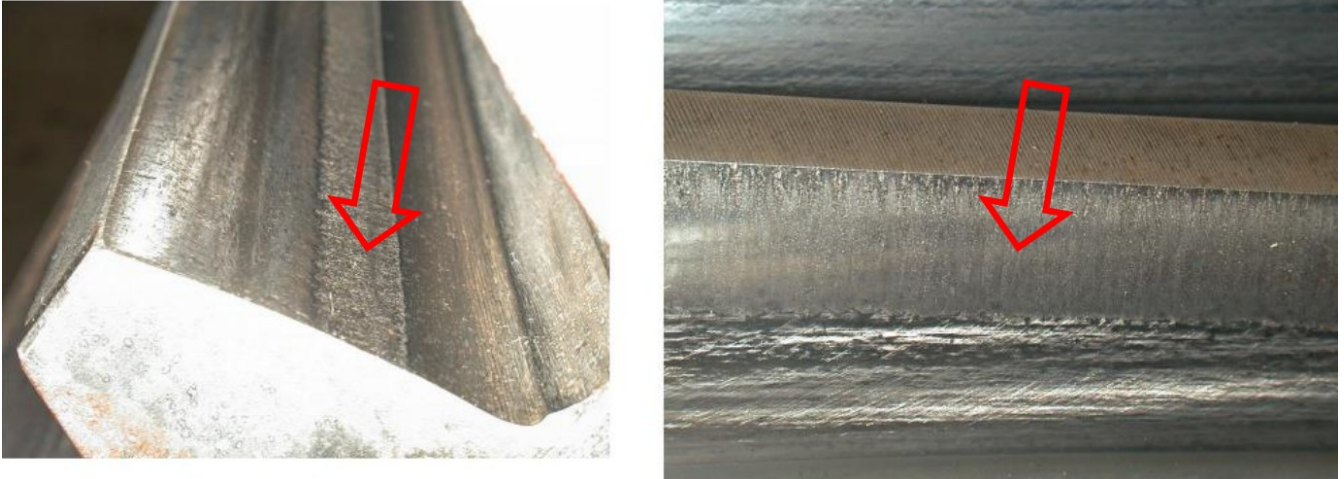
Laakeriin voi myös syntyä pintavaurio, joka saattaa johtua puutteellisesta voitelusta tai vierintäelien liukumisesta aiheutuneesta tahmautumisvauriosta. Kiinteistä epäpuhtauspartikkeleista aiheutuu myös kulumaa, joka johtaa vierintäpintojen vaurioitumiseen. (SKF-laakerien kunnossapito 2016, 299.)

Voidaan todeta, että väljät sovitteet akselilla tai laakeripesässä voivat aiheuttaa värähtelyä sekä adhesiivista että abrasiivista kulumista. Nämä kulumat voidaan havaita laakerin sisä- ja ulkorenkaasta, mutta tarkempi analysointi edellyttää usein mikroskooppista tarkastelua. Mikroskooppilla voidaan arvioida kulumisen aiheuttajan syy, onko se esimerkiksi iskukuormituksesta johtuvaa kulumista, joka näkyy tahmautumisenä laakeri renkaan ulkopinnalla (Laakerivaurioiden tunnistus ja ehkäisy n.d). Ulkopuolelta syntyneet värähtelyvauriot voidaan havaita tasaisena jaksoina esiintyvänä painanteina, joka vastaa laakerin vierintäelinä. (SKF-laakerien kunnossapito 2016, 299.)

6.2.2 Hammaspyörä

Hammaspyörän tahmaantuminen (kuviokuva 15) on pintavauriomuoto, jossa voiteluainekalvon pettäessä hammaspyörän vastinpinnat hitsaantuvat hetkellisesti kiinni toisiinsa kiinni ja leikkautuvat sen irti. Tämän seurauksena hammaspinnoille syntyy paikallista tarttumista ja pinnan repeämistä. Tahmautumisen merkittävimmät syyt liittyvät puuteeteelliseen voiteluun tai voiteluaineessa esiin-

tyviin epäpuhtauksiin. Lisäksi lämpötilojen kohoaminen, huono pinnanlaatu tai väärä kovuus materiaalissa sekä ylikuormitustekijä lisäävät tahmautumisen riskiä hammaspyörässä. Tahmautuminen aiheuttaa suurta värähtelyä ja käyntimelua vaihteessa. (Rinne 2024, 2–17.)



Kuvio 15. Tahmautunut hammaspyörä (Rinne 2024, 10).

7 Mittaukset

7.1 Mittaukset laadullisen tutkimuksen tukena

Mittauksia päätettiin toteuttaa, jotta laadullisen tutkimuksen tueksi saataisiin konkreettista tietoa kara- ja vaihdelaatikon kunnosta. Laadullinen lähestymistapa yksin ei olisi riittänyt osoittamaan värinän mahdollisia aiheuttajia, minkä vuoksi mittaukset toimivat tärkeänä menetelmänä.

Mittauksilla pyrittiin vahvistamaan ja todentamaan esiin nousseita havaintoja. Tuloksia ei tarkasteltu määrällisen tutkimuksen tavoin numeerisina tuloksina, vaan ne toimivat laadullisen analyysin tukena. Mittaustulosten perusteella voitiin vertailla välyksien ja mittojen poikkeamia alkuperäisiin suunnitteluarvoihin.

Tavoitteena oli tunnistaa ne tekijät, jotka voivat aiheuttaa värähtelyä ja heikentää porausprosessin laatua. Mittaukset antoivat perustan juurisyyden arvioinneille ja loivat yhteyden teorian sekä käytännön havaintojen välille. Mittauksien avulla pystyttiin vahvistamaan kara- ja vaihdelaatikkojen kunnan vaikutus värähtelyiden syntyyn.

7.2 Mittalaitteet

Laakeripesien ja akselinkaulojen mittauksissa käytettiin reikämikrometriä (Kuvio 16) ja kaarimikrometri, joiden mittaustarkkuus on 0,005 millimetriä. Mittausten avulla varmistettiin laakeripesien ja akselinkaulojen mittojen oikeellisuus.

Toleranssivaatimukset olisivat kuitenkin edellyttäneet tarkempia mittauksia, sillä valmistusmitat vaatisivat 0,001 millimetrin tarkkuutta. Mikrometrimittauksilla saatiin vain suuntaan antavia tuloksia.



Kuvio 16. Reikämikrometri

Laakeripesien ja akselinkaulojen mittaustuloksena oli varmistaa, että laakeripesien ja akseleiden sovitus ja pinnanlaatu on valmistustoleranssissa ja valmistuskuvan mukainen. Pienetkin poikkeamat mitoissa voivat aiheuttaa laakereiden virheasentoja, jotka johtavat epätasaiseen kuormitukseen ja lisäävät värähtelyn riskiä. (Järvinen 2009, 309–316.)

Karan heiton mittauksissa käytettiin mitta- ja heittokelloa, joiden mittatarkkuus on 0,01 millimetriä. Mittakelloa käytettiin karan aksiaalisen suuntaisen välyksen mittaamisessa sekä heittokellolla mitattiin karan heittoa.

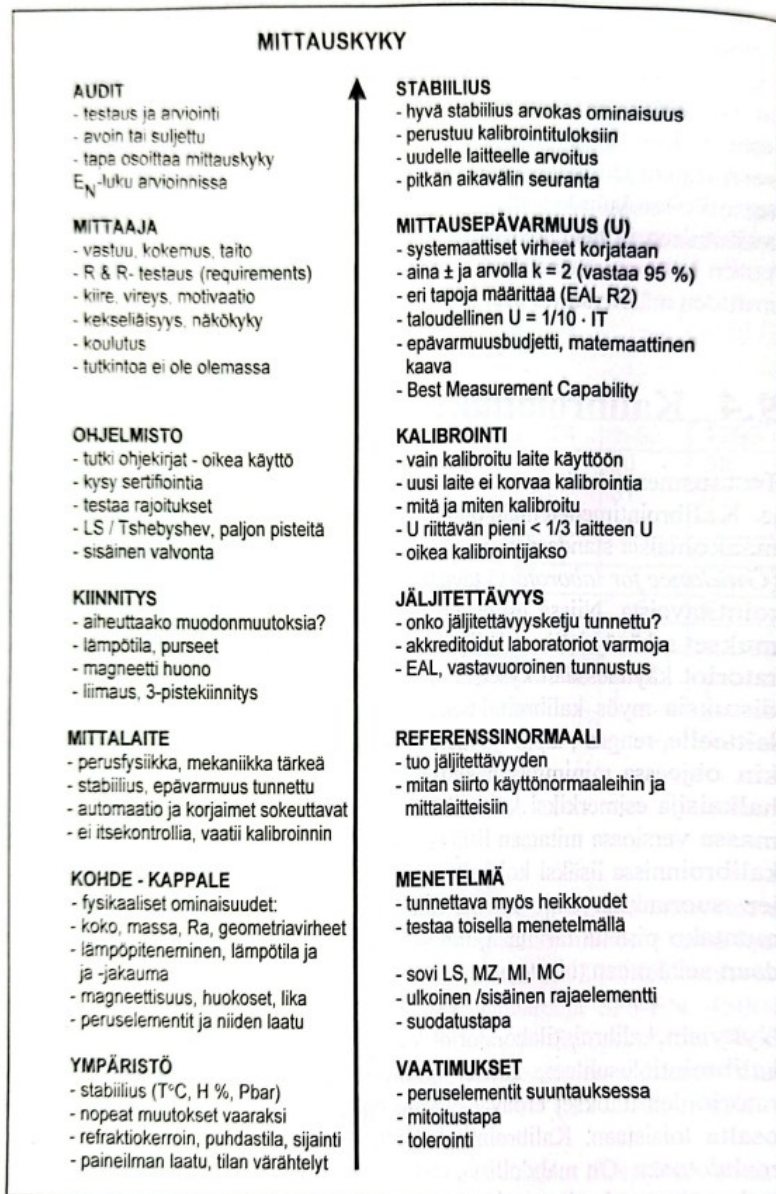
Karan heiton mittaaminen on yksi tärkeimmistä tarkastuksista työstökoneessa, sillä sen avulla voidaan arvioida karalaakerien kuntoa ja mahdollisia kulumia. Poikkeamat heittomittauksissa voivat viitata laakerivaurioihin, välysten kasvuun tai kararakenteen epätarkkuuksiin, jotka vaikuttavat suoraan porauksen tarkkuuteen ja pinnanlaatuun. (Andersson & Tikka 1997, 230–291.)

7.3 Kalibrointi

Kalibrointi on teollisuudessa elintärkeä toimenpide, sillä sen avulla varmistetaan tuotteiden ja palveluiden tarkkuus sekä laatu. Kalibroinnin varmistetaan, että mittauslaitteet tuottavat luotettavia tuloksia ja mittaustulokset ovat jäljitettävissä SI-järjestelmän mukaisiin suureisiin. (Andersson & Tikka 1997, 167–170.)

Kalibrointi on osa yrityksen mittauskyvyn hallintaa, joka on esitetty kuviossa 17. Se määrittelee laatujärjestelmän vaatimukset mittausten tarkkuudelle ja luotettavuudelle. Mittauskykyprosessin tavoitteena on ylläpitää mittalaitteiden toimintakuntoa, tunnistaa mahdolliset poikkeamat ja varmistaa mittaustulosten jäljitettävyyttä. (Andersson & Tikka 1997, 168.)

Ennen mittausten aloittamista mittalaitteiden kalibroinnin voimassaolo tarkastettiin, jotta voitiin varmistaa mittaustulosten luotettavuus ja jäljitettävyyttä.



Kuvio 17. Mittausprosessi (Andersson & Tikka 1997, 168).

7.4 Mittausvirheet, mittausepävarmuus ja mittaustulokset

Mittaukset eivät koskaan ole täysin virheettömiä. Mittaustapahtumiin liittyy useita tekijöitä, jotka voivat aiheuttaa tuloksiin vääristymiä. Tällaisia tekijöitä ovat muun muassa mittauskohde, perus-

mitta, mittalaite, mittaustapa, ulkoiset olosuhteet sekä mittaaja. Lisäksi mittauksen aikana tapahtuvat muutokset näissä tekijöissä voivat vaikuttaa tulosten luotettavuuteen. (Andersson & Tikka 1997, 127)

Mittausvirheet jaotellaan yleensä kahteen pääluokkaan: systemaattisiin ja satunnaisiin

- Systemaattiset virheet johtuvat toistuvasta virheellisestä tekijästä, kuten mittalaitteen kalibrointivirheestä tai väärästä mittaustavasta.
- Satunnaiset virheet aiheutuvat mittaustilanteen luonnollisesta vaihtelusta ja voidaan pienentää toistamalla mittauksia useita kertoja ja laskemalla niiden keskiarvo. (Andersson & Tikka 1997, 127)

Mittausvirheiden tunnistamisen jälkeen on huomioitava, että mittauksiin liittyy aina mittausepävarmuus, sillä mittauksesta saatava tulos on ainoastaan arvio mitattavan kohteen todellisesta arvosta. Mittausepävarmuus muodostuu useista eri tekijöistä, kuten mittalaitteen tarkkuudesta, mittausten menetelmästä, ympäristöstä tai mittaajan toiminnasta. Nämä virhelähteet ovat joko satunnaisia tai systemaattisia virheitä. (Andersson & Tikka 1997, 147–148.)

Epävarmuustekijöiden avulla mittausepävarmuus voidaan arvioida ja tunnistaa. Tarvittaessa epävarmuutta voidaan myös kompensoida laskennallisesti, jolloin mittaustuloksen luotettavuus paranee ja sen vaihteluväli voidaan määrittää tarkemmin. (Andersson & Tikka 1997, 147–148.)

Epävarmuuslaskennan tuloksena saadaan mittauksesta arvio, joka sisältää mitatun arvon, että siihen liittyvän epävarmuusalueen. Tämän avulla mittaustulosten luotettavuutta voidaan arvioida ja tuloksia verrata kriittisesti teoreettisiin arvoihin sekä suunniteltuihin mittoihin ja niiden toleransseihin. (Andersson & Tikka 1997, 147–148)

Mittaukset suoritettiin toistettavasti useaan kertaan, jotta satunnaisten virheiden vaikutus voitiin minimoida ja tuloksista voitiin laskea keskiarvot.

7.5 Geometriset mittaukset

Työstökoneen toiminnankannalta geometrinen tarkkuus on keskeinen tekijä. Mittaukset tehdään yleensä soveltamalla sopivaa standardia tai työstökoneen valmistajan ohjeita. Geometriset mittaukset varmistavat, että koneen liikkeet ja rakenteelliset osat toimivat suunnittelulla

Keskeisempiä mitattavia geometrisia tekijöitä, jotka vaikuttavat työstökoneen toimintaa ovat:

- Heitot
- Johteiden liikkeiden suoruudet
- Kohtisuoruudet
- Kiertymät
- Vaakitus

Järvisen (2009) mukaan pyörivissä koneissa värähtelyä voivat aiheuttaa useat tekijät, kuten: Epätasapaino, linjausvirheet, mekaaninen väljyys, koneen virheellinen kiinnitys, vierintä- ja liukulaakeriviat, huojunta, akselin epäsymmetrinen lämpölaajeneminen tai siinä esiintyvä särö, hydrauliset ja aerodynaamiset häiriöt, hammasvälitysviat sekä sähkökoneiden viat. (Järvinen 2009, 303–344.)

8 Analysointimenetelmät

8.1 Arviointimenetelmät

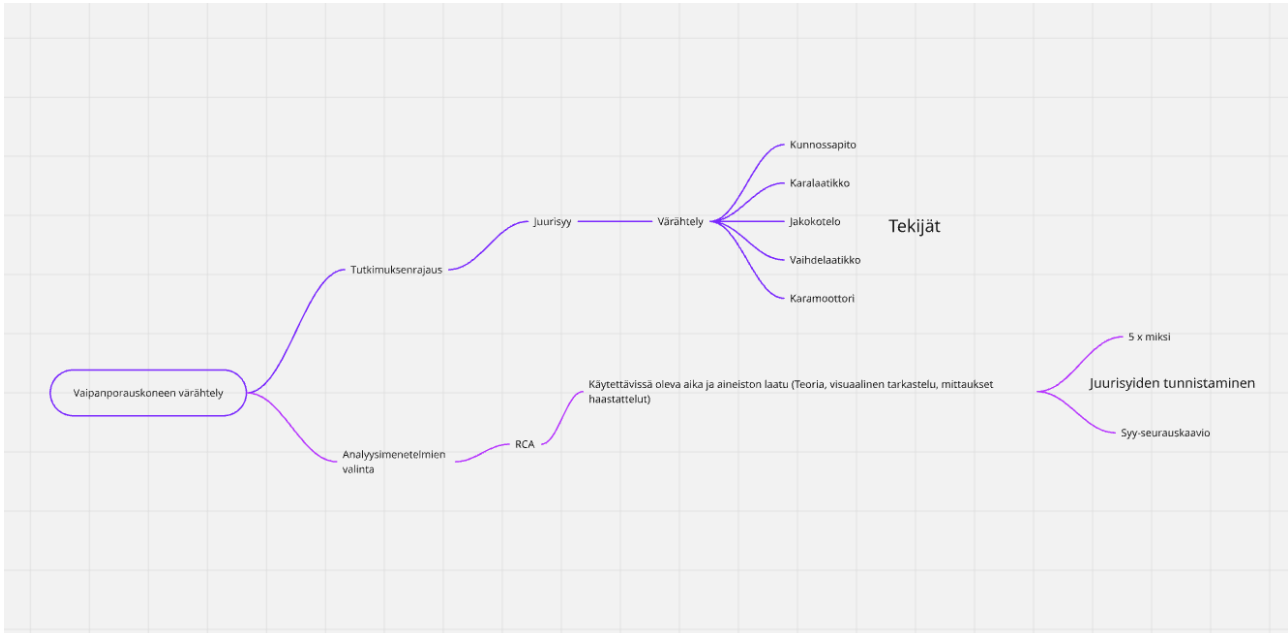
Riskien arviointimenetelmät tarjoavat systemaattisen tavan tunnistaa kriittisiä vikakomponentteja, vikamekanismeja ja vikamuotoja sekä varmistaa laitteiden käytettävyyttä ja toimintavarmuutta. Menetelmiä ei käytetä ainoastaan kriittisten kohteiden ja tapahtumien arviointiin, vaan ne tukevat myös päätöksentekoa sen suhteen, millaisia toimenpiteitä riskien hallinta edellyttää. (Mikkonen 2019, 128.)

Mikkosen (2019, 128) mukaan riskianalyysia voidaan kohdistaa kokonaiselle laitteelle tai sen yksittäisille osille. Analyysin toteuttamisessa on suositeltavaa hyödyntää sekä kvalitatiivisia että kvantitatiivisia menetelmiä. Kvalitatiivisella menetelmien avulla voidaan tunnistaa häiriöitä ja mallintaa tapahtumaketjuja, jotka toimivat lähtökohtana kvantitatiiviselle tarkastelulle.

Riskianalyysiä laadittaessa on lisäksi otettava huomioon analyysin kohteen laajuus, henkilöstön osaaminen, käytettävissä olevat taloudelliset resurssit sekä sidosryhmien valmius tukea prosessia. Näiden tekijöiden osallistuminen parantaa analyysin onnistumista ja luotettavuutta. (Mikkonen 2019, 128.)

Mikkosen (2019, 128) mukaan soveltamalla ja yhdistämällä erilaisia luotettavuustekniikan riskien analysointimenetelmiä käyttökohteeseen voidaan kokonaisuutena parantaa laitteiston tehokkuutta, turvallisuutta, toimintavarmuutta sekä käytettävyyttä. (Mikkonen 2019, 128.)

Analyysimenetelmien valinnan tukena tässä tutkimuksessa käytettiin miellekarttaa (Kuvio 18), sen avulla voitiin arvioida, mikä menetelmä soveltui parhaiten juurisyiden selvittämiseen. Miellekartan avulla tunnistettiin, että juurisyyanalyysi (RCA) soveltuu erityisen hyvin taustasyiden avaamiseen ja ymmärtämiseen. Koko analyysiprosessia ei keretty toteuttamaan, sillä ajankäyttö ja työn tilaajan rajaukset rajoittivat tutkimuksen ainoastaan juurisyiden tunnistamiseen. Juurisyiden ratkaisemiseen työkaluna apuna käytettiin syyseurauskaaviota ja 5 x miksi- menetelmää.



Kuvio 18. Miellekartta.

Alla olevassa menetelmätaulukossa (Taulukko 1) on esitetty perinteisempiä luotettavuustekniikan analyysimenetelmiä, joita arvioitiin soveltuvaksi tähän tutkimukseen. (Mikkonen 2019, 129–130.)

Miellekartan listattiin niiden vahvuudet, soveltuvuudet ja rajoitteet. Näiden perusteella arvoitiin menetelmien soveltuvuutta tutkimukseen. Arvio esitettiin värikoodeilla: Punainen = ei sovellu, Keltainen = soveltuu osittain tai vaatii liikaa resursseja, Vihreä = soveltuu parhaiten.

Taulukko 1. Menetelmätaulukko

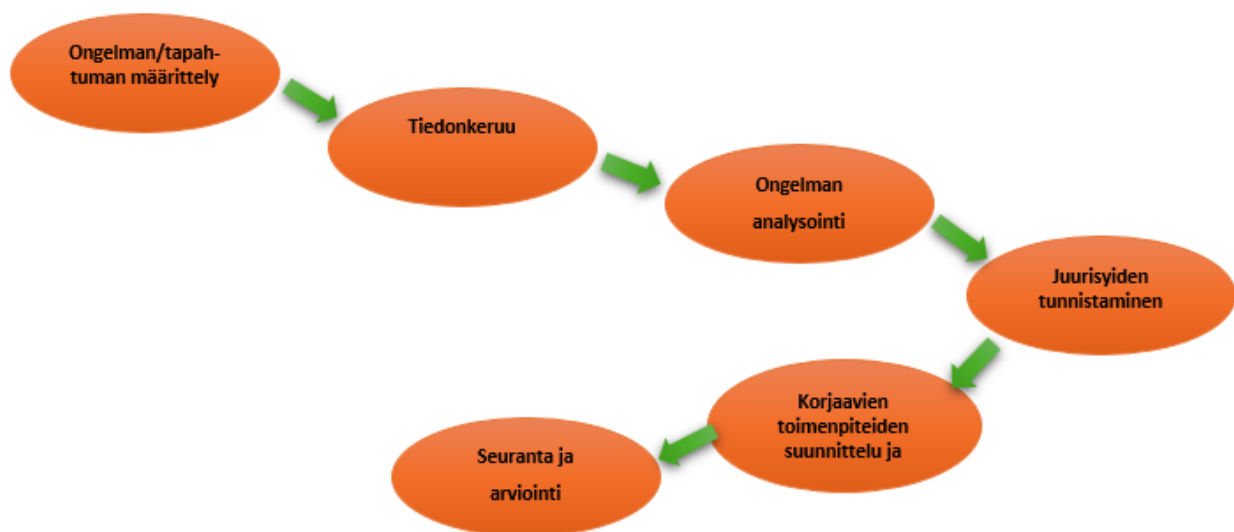
Menetelmä	Vahvuudet	Soveltuvuus / Rajoitteet
Vika- ja vaikutusanalyysi (FMEA, failure mode and effect analysis)	Huomio useiden tekijöiden yhteisvaikutukset	Tunnistetaan yksittäiset laiteviat ja niiden vaikutus järjestelmään. Parempi vaihtoehto kokonaisuun järjestelmiin. Vaatii paljon resursseja.
Vika, vaikutus- ja kriittisyysanalyysi (FMECA, failure mode and effect and criticality)	Huomio useiden tekijöiden yhteisvaikutukset, Laajempi analyysitulokset kuin FMEA:lla. Muodostaa riskiluvun.	Tunnistetaan yksittäiset laiteviat ja niiden vaikutus järjestelmään sekä vioittumistapojen kriittisyyden ja esiintymistodennäköisyyden arviointi.
Juurisyysanalyysi (RCA, root cause analysis)	Tiedossa olevien ongelmien ratkaisuun ja poistamiseen sopiva työkalu.	Menetelmällä etsitään ongelman juurisyitä.
Luotettavuuslohkokaavio (RBD, reliability block diagram)	Muodostaa Graafisesti esitettävän luotettavuus kaavion. Pitää sisällään järjestelmän kaikki halutut komponentit.	Analyysi menetelmä, joka soveltuu järjestelmien kokonaisluotettavuuden arviointiin.
Syysyyskaavio (SSK)	Ongelmien syiden ratkaisuun, yksinkertainen, visuaalinen ja nopea työkalu. Havainnollistaa visuaalisesti kaikki potentiaaliset syyt ja tekee monimutkaisesta ilmiöstä helposti ymmärrettävän.	Voidaan käyttää tukimenetelmänä muiden analyysi menetelmien kanssa. Ei itsessään osoita juurisyitä, vaatii lisäanalyysia (esim. 5 x miksi).
Paretoanalyysi	Visuaalinen analytiikka	Laatutyökalu, mutta soveltuu hyvin käyttövarmuusongelmien analysointiin
5 x miksi (5 x why)	Yksinkertainen ja käytännönläheinen. Tuloksien tulkinnassa hyvä apuväline	Käytetään työkaluna juurisyiden tunnistamiseen. Hyvä yksittäisten ongelmien ratkaisussa. Ei huomioi useiden tekijöiden yhteisvaikutuksia.

8.2 Juurisyyanalyysi (RCA, Root Cause Analysis)

Juurisyyanalyysi on kuusivaiheinen prosessi (kuvio 19), jonka tavoitteena on tunnistaa vikaantumisen todellinen syy. Sitä käytetään kunnossapidon työkaluna, jotta voidaan löytää ja poistaa mekaanisten vikaantumisten taustalla olevat perimmäiset syyt pelkkien oireiden korjaamisen sijaan. (Goncalves 2022.) Myös O'Brienin (2023) mukaan juurisyyanalyysia käytetään perussyiden havaitsemiseen ja poistamiseen, pelkästään vian korjaamisen sijaan (O'Brien 2023).

Goncalvesin (2022) mukaan juurisyyanalyysin avulla tunnistetut viat voidaan jakaa eri luokkiin:

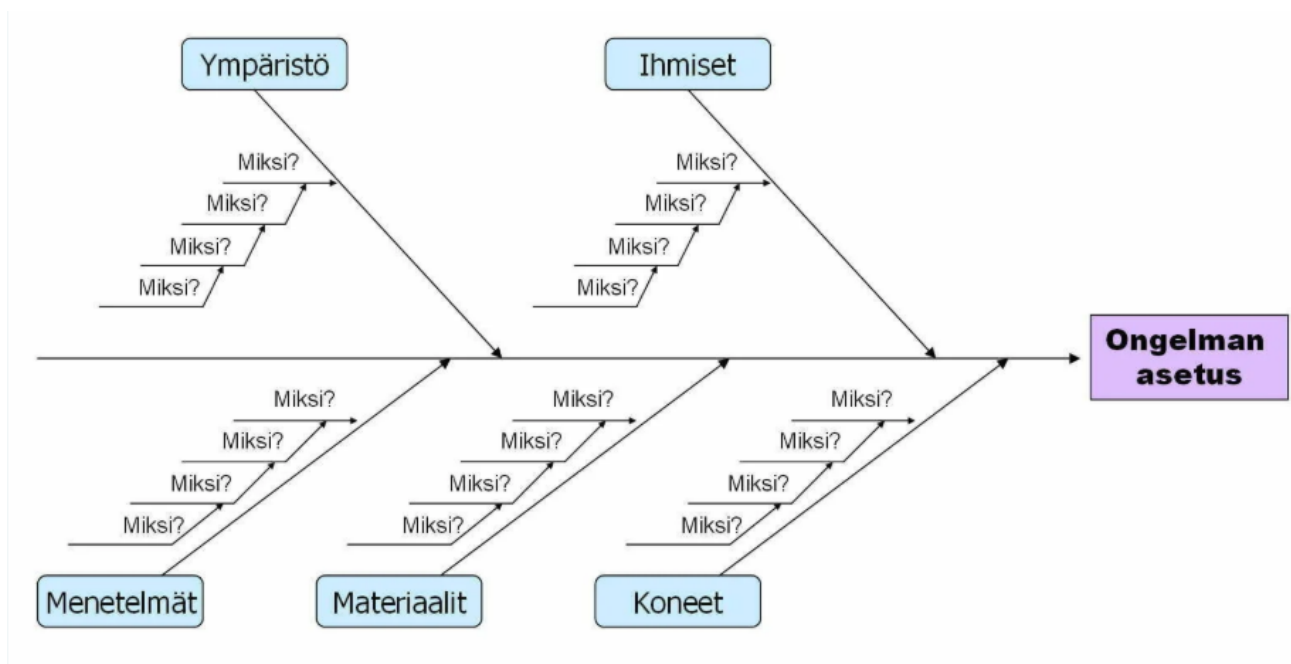
- Tekniset syyt
- Ihmisen aiheuttamat syyt
- Järjestelmästä tai prosessista aiheutuneet syyt. (Goncalves 2022.)



Kuvio 19. Juurisyyanalyysi (RCA) prosessi (Mikä on juurisyyanalyysi? n.d).

8.3 Syy-seurauskaavio

Syy-seurauskaavio, eli kalanruotokaavio (Kuvio 20) on prosessinkehittämisen työkalu, jonka avulla on helppoa tunnistaa olemassa olevan ongelman keskeiset tai mahdolliset syyt. Kaavion avulla voidaan visuaalisesti analysoida ja jäsentää ongelmaan vaikuttavat tekijät sekä etsiä sen taustalla olevia juurisyytä. (Karjalainen 2007.) On kuitenkin tärkeää huomata, että löydetty juurisyyt tulee analysoida tarkemmin erillisellä menetelmällä, kuten esimerkiksi 5 x miksi -analyysillä.



Kuvio 20. Esimerkki syyseurauskaavion luomisesta (Karjalainen 2007).

8.4 5 x miksi (5 x Why)

Osana laajempaa juurisyyprosessia on juurisyyntunnistamiselle käytössä useita menetelmiä. Yksi näistä on 5 x miksi analyysi (Kuvio 21), jota käytetään syy-seurausvian tunnistamiseen. Menetelmä soveltuu kunnossapidon analysointiin ja sen avulla voidaan laatia tarkoituksenmukaiset korjaavat toimenpiteet. (O'Brien 2023.)

Problem	Auto ei käynnisty.
Why	Miksi auto ei käynnisty? Akku on tyhjä.
Why	Miksi akku on tyhjä? Valot jäivät päälle yön yli.
Why	Miksi valot jäivät päälle? Varoitusääni ei toiminut
Why	Miksi varoitusääni ei toiminut? Sulake oli palanut.
Why	Miksi sulake oli palanut? Sitä ei vaihdettu vuosihuollossa.
Root cause	Vuosihuollon prosessissa on vika. Tämä tulee korjata.

Kuvio 21. Esimerkki "5 x miksi" analyysin toteutuksesta (Mikä on juurisyyanalyysi? n.d).

9 Työn toteutus

9.1 Karalaatikko ja voimansiirron rakenteen kartoitus

Lähtökohtana oli tutustua karalaatikon- ja voimansiirronrakenteeseen (Kuvio 22) valmistuspiirustuksien avulla. Vaipanporauskone on Valmetin suunnittelema ja valmistama, joten tutkimusta varten oli saatavilla piirustuksia ja muita lähteitä hyvin.

Aiemmissa selvityksissä oli havaittu, että karalaatikon rakennetta jouduttu muuttamaan liiallisen värähtelyn vuoksi. Ohjainlevyjä oli vahvistettu, karan laakerointia ja -rakennetta oli kehitetty tukevammaksi sekä aksiaalista heittoa aiheuttavia tekijöitä poistettu. Myöhemmin, 2000 luvulla karalaatikon rakennetta on muokattu huoltovapaammaksi ja toimintavarmemmaksi leikkuuöljyn syötön osalta sekä ohjainlevyjen pituutta on muutettu pidemmäksi.

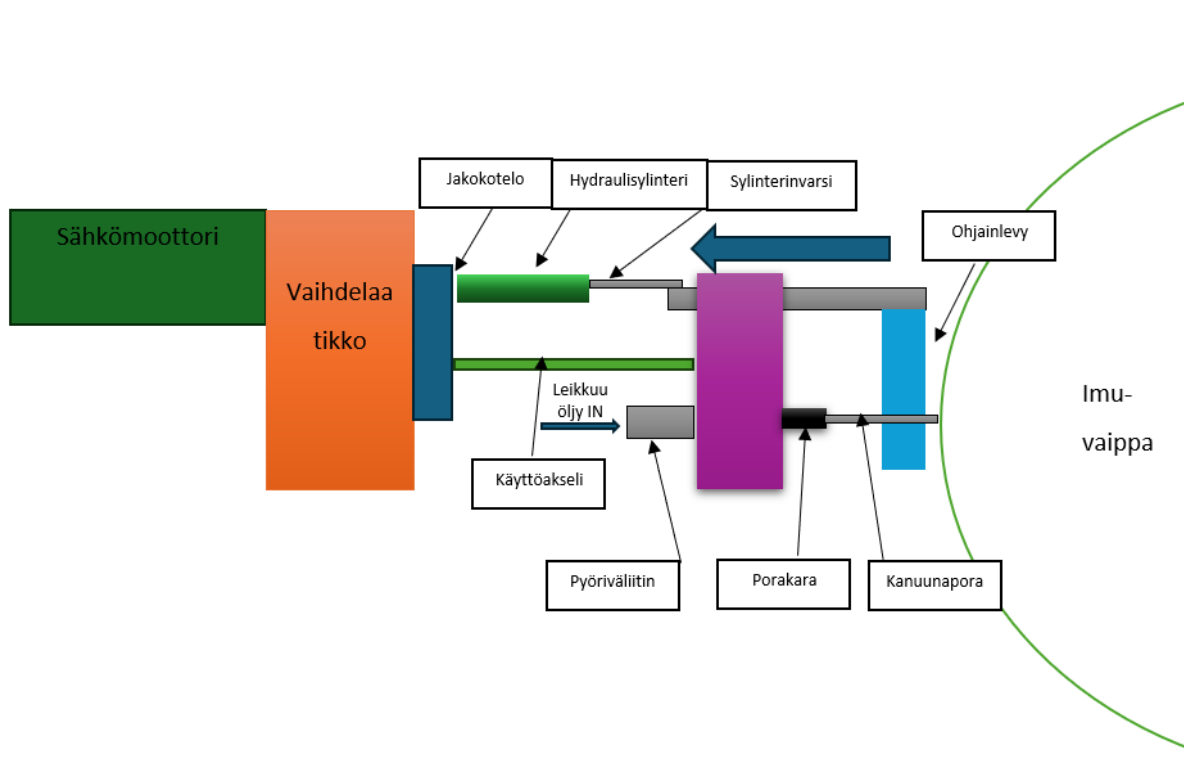
Muut tehonsiirtoelimet kuten vaihdelaatikko, jakokotelo, akselit, kytkimet ja sähkömoottori ovat edelleen alkuperäisten piirustusten mukaiset, eikä niihin ole tehty rakenteellisia muutoksia.

Työkalujen materiaalit ovat sen sijaan muuttuneet ajansaatossa ja niissä on tapahtunut kehitystä, pehmeävarisista porista on siirrytty täyskovametalliin kanuunaporiin. Lisäksi porien pituus on kasvanut 140 millimetristä nykyisin käytettävään 185 millimetriin, mikä voi myös vaikuttaa värähtelyn syntyyn.

Vaipanporauskoneessa käytetään ohjainlevyjä, joihin asetetaan poranhalkaisijan mukainen ohjausholkki. Ohjainholkin tehtävänä on tukea ja ohjata kanuunaporausta porauksen aikana. Ohjainlevy painautuu porattavaa kappaletta vasten koko porauksen ajaksi ja varmistaa lastun ohjautumisen leikkuuöljyn mukana poranvartta pitkin. Ohjainlevyt toimivat hydraulisesti, joissa käytetään tällä hetkellä noin 15 baarin painetta. Paine muodostaa työstöliikkeeseen kohdistuvia voimia, jotka voivat aiheuttaa joustoja porattavaan kappaleeseen tai koneen runkoon. Lisäksi hydraulisen järjestelmän aiheuttama hydrostaattinen paine voi tietyissä olosuhteissa synnyttää työstökoneessa värähtelyjä.

Kanuunaporausprosessin yksi keskeisistä elementeistä on leikkuuöljy, joka johdetaan poranvartta pitkin poralle yli 100 baarin paineella. Leikkuuöljyn paine tuotetaan neljällä ruuvipumpulla. Käytössä olevien pumppujen määrää säädetään sen mukaisesti, että haluttu öljynpaine saavutetaan porauksen aikana. Leikkuuöljy muodostaa myös hydrostaattista painetta, joka voi tietyissä olosuhteissa aiheuttaa värähtelyä koneessa esimerkiksi kavitaation tai paineenvaihteluiden seurauksena.

Voimansiirtoelimet sisältävät useita pyöriviä komponentteja, kuten hammaspyöriä, akseleita ja roottoreita, jotka ovat usein värähtelyn syntymisen taustalla. Näiden osien tasapainotus, voitelun tasalaatuisuus, linjaukset sekä värähtelytaajuuksien yhteisvaikutukset muodostavat yleisimmät riskitekijät värähtelyn kehittymiselle.



Kuvio 22. Vaipanporauskoneen kara- ja vaihdelaatikon rakenne ja niiden oheislaiteet

9.2 Mittaukset ja havainnot

Mittaus- ja havainnointikohteet tunnistettiin kartoitusvaiheessa syntyneen kokonaiskuvan perusteella koneen rakenteesta. Mittaustuloksia ja muita havaintoja verrattiin kirjallisuuteen sekä valmistus kuviin. Mittauskohteet rajattiin sen mukaisesti, mitä oli mahdollista toteuttaa tutkimuksen puitteissa. Kartoituksessa kiinnitettiin erityistä huomiota tietoperustassa esiin nousseisiin värähtelyä aiheuttaviin komponentteihin, jotka liittyivät pääasiassa pyöriviin elementteihin.

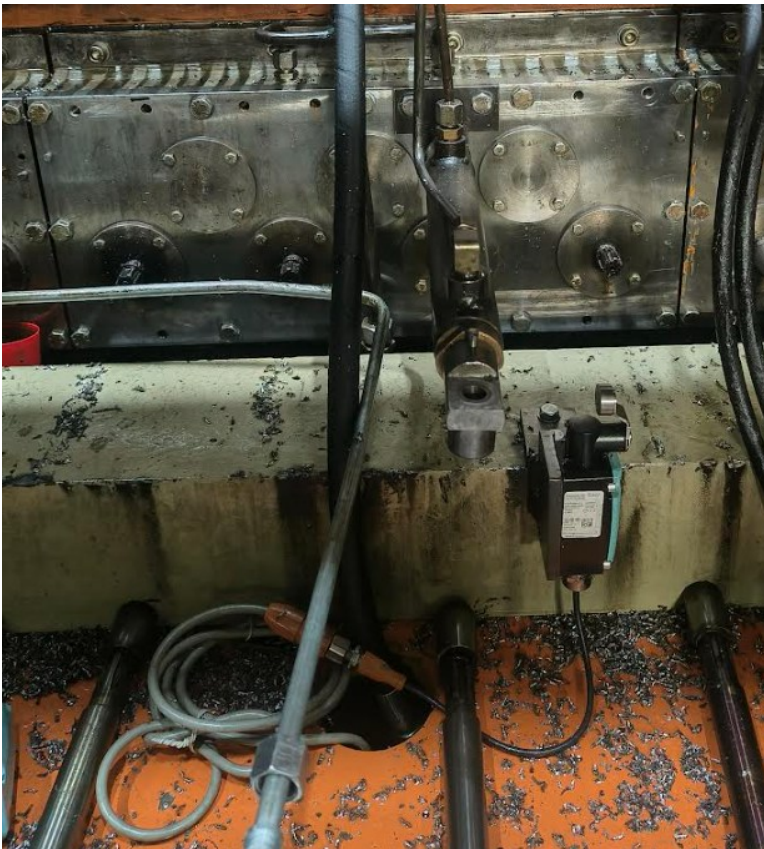
Mittaukset toteutettiin käsin mittaamalla. Käytettyjä mittavälineitä olivat kaari- ja reikämikrometriä sekä mitta- ja heittokello. Mittavälineiden kalibrointitiedot tarkastettiin enne mittausten aloittamista ja todettiin ajan tasalla oleviksi.

Käsin suoritetuissa mittauksissa huomioitiin mahdolliset mittausvirheet ja epävarmuustekijät siltä osin kuin se oli mahdollista. Mittaustoleranssit olivat sadasosamillin tarkkuudella. Mittauksien toistaminen sekä niiden keskiarvojen laskeminen paransivat tulosten luotettavuutta.

Mittauksilla pyrittiin havaitsemaan kulumista sekä valmistuksesta tai suunnittelusta johtuvia virheitä, joiden tekijät saattavat aiheuttaa värähtelyjä. Mittausten toteuttamiseksi kara- ja vaihdelaatikon rakennetta purettiin niin paljon kuin se oli mahdollista.

9.2.1 Jakokotelo

Rakenteiden purkaminen aloitettiin jakokotelosta (Kuvio 23), joka osoittautui rakenteeltaan hyvin yksinkertaiseksi purkaa. Jakokotelon kansi oli kiinnitetty kahdella toista ruuvilla, minkä jälkeen kansi voitiin nostaa pois paikoiltaan. Kannen mukana irtosivat vaihteiston ensiö- ja toisiopuolen akselit (Kuvio 24).

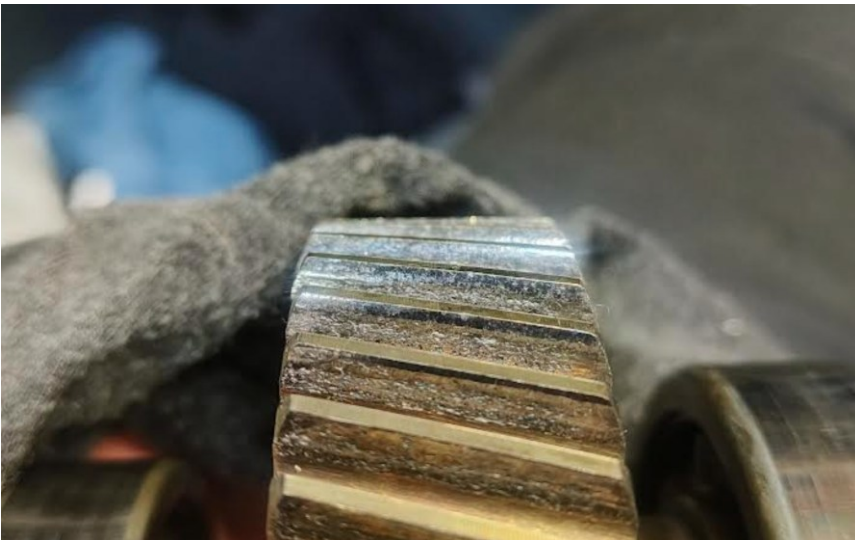


Kuvio 23. Jakokotelon kansi ja ohjainlevyjen hydraulisylinteri.



Kuvio 24. Jakokotelonkansi sisältä.

Jakokotelon laakeripesät ja muut komponentit tarkasteltiin sekä mitattiin. Laakeripesien mitat olivat toleranssialueella (Liite 3), mutta kulumista laakereissa ja hammaspyörissä havaittiin selvästi. Hammaspyörien ryntöpinnat olivat tahmautuneet (Kuvio 25) sekä laakereiden ulkopinnoissa näkyi tahmautumisen ja kiillotuskulumisen jälkiä.

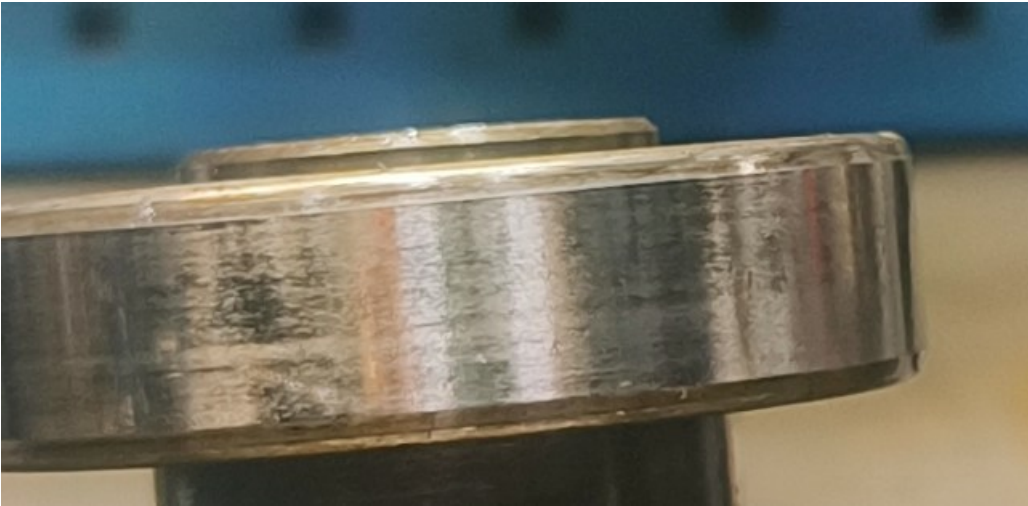


Kuvio 25. Tahmaantunut hammaspyörän ryntöpinta.

Havainnot viittaavat siihen, että hammaspyörissä esiintyvät vauriot johtuvat voitelun puutteesta tai voiteluaineen epäpuhtauksista. Laakereissa havaitut vauriot viittaavat värinästä aiheutuneeseen iskukuormitukseen ja laakerin pyörintäelinten nopeuseroihin, jotka voivat aiheuttaa laakerin ulkokehän pyörimistä laakeripesässä. Pahin kiillotuskuluminen havaittiin ensiöakselissa (Kuvio 26). Tahmautumista, eli iskukuormituksesta johtuvaa kulumaa esiintyi lähes kaikissa laakereissa (Kuvio 27).



Kuvio 26. Laakerien ulkokehissä kiillotuskulumaa.



Kuvio 27. Laakerin ulkokehä tahmutunut.

9.2.2 Teräsohjaimet

Ohjainlevyjä siirtävä hydraulisyylinteri irrotettiin ja purettiin tarkastusta varten. Sylinteri on tiivisteiden malli, jonka toiminta perustuu erittäin pieneen sylinteriputken ja männän halkaisijaeroon. Tämän rakenteen vuoksi sylinteri on erittäin herkkätoiminen ja reagoi tarkasti pieniin muutoksiin tilavuusvirassa.

Tarkastuksessa havaittiin, että sylinteriputki ja mäntä olivat todella kuluneet (Kuvio 27 ja 28). Silmä määräisen tarkastelun perusteella voitiin todeta, että sylinterin sisällä tapahtuu huomattavaa sisäistä ohivirtausta ja adhesiivista kulumista. Tällainen sisäinen vuoto voi aiheuttaa paineenlaskua ja synnyttää kavitaatiota, joka puolestaan voi toimia värähtelyä laukaisevana tekijänä.



Kuvio 28. Sylinteriputki.



Kuvio 29. Sylinterin mäntä.

Teräohjaimien rakennetta on myös muutettu alkuperäisestä suunnitelmasta siten, että nykyisin yksi ohjainlevy käsittää kolme karalaatikkoa. Aiemmin jokaisella karalaatikolla oli oma ohjainlevy, jolloin ohjaimien liikuttaminen onnistui käsivoimin. Rakennemuutoksen seurauksena ohjaimien liikkuvuus on heikentynyt merkittävästi ja hydrauliiikkapainetta on jouduttu nostamaan, jotta ohjaimet liikkuisivat eteen- ja taaksepäin. Hydrauliikkapaineen korotukseen tulee kuitenkin suhtautua kriittisesti, sillä se lisää huomattavasti työstövoimia. Kasvaneet työstövoimat aiheuttaa kappalessa tai koneessa joustoja, mikä puolestaan kasvattaa värähtelyn riskiä.

9.2.3 Vaihdelaatikko

Vaihdelaatikko on hitsattu levyrakenne, jonka purkaminen ei ollut mahdollista tämän tutkimuksen puitteissa. Vaihdelaatikon analyysi perustuu siten ainoastaan visuaaliseen tarkasteluun. Tarkastuksessa havaittiin, että vaihdelaatikon hammaspyörät olivat selvästi paremmassa kunnossa, kuin jakokotelon. Hammaspyörien ryntöpinnoilla ei esiintynyt tahmautumista.

Vaihdelaatikon rakenne on yksinkertainen, jossa on kaksi ensiö- ja toisiopuolen hammaspyörää, joista toisiopuolen hammaspyörää siirretään valitun nopeusalueen mukaan. Nopeusalueen vaihto tapahtuu pneumaattisen sylinterin avulla, joka liikuttaa haarukkaa, jonka välissä toisiopuolen ratas on. Vaihdelaatikon pohjalla havaittiin metallilastuja (Kuvio 30). Lastujen sijainnin perusteella voitiin päätellä, että ne olivat hammaspyörän heittämiä, sillä lastut sijaitsivat suorassa linjassa hammaspyörän kanssa.



Kuvio 30. Vaihdelaatikon pohjalla lastuja.

9.2.4 Karalaatikko nro 27.

Karalaatikko numero 27 irrotettiin koneesta ja toimitettiin huoltoon analysoitavaksi. Karalaatikoiden huolto on ulkoistettu ja se toimii samassa maakunnaassa, mutta eri paikkakunnalla. Karalaatikko mitattiin ja purettiin yhteistyössä laatikkohuoltajan kanssa. Ennen purkamista suoritettiin säteisheiton ja aksiaalisen välyksen mittaukset (Kuvio 31) sekä tehtiin visuaalisia tarkastuksia laakeripinnoille ja -pesille. Huoltodokumenttien mukaan karalaatikko oli huollettu edellisen kerran vuonna 2014, joten laatikko oli ollut käytössä yli kymmenen vuotta ilman huoltotoimenpiteitä.



Kuvio 31. Karan heiton mittaus

Vuoden 2014 huollossa karalaatikkoon tehtiin rakenteellisia muutoksia. Leikkuuöljyn syöttö muutettiin pyörivienliittimien kautta toteuttavaksi ja vanha jakotukkirakenne on poistettu käytöstä. Rakennemuutosten jälkeen laakereiden aksiaalisuunnan tuentaan olisi tullut kiinnittää erityistä huomioita. Toteutuksessa akselin lukitus tehtiin lukkorengaalla kara-akselilta, joka vastaa laakerin sisärenkaaseen. Ratkaisun tavoitteena oli estää kara-akselin liukuminen laakerin sisäkehällä, mutta lukkorengaan ja laakerin väliin jäävä pieni välys aiheuttaa sen, että karalla esiintyy aina aksiaalista välystä.

Välyksen hallinnan parantamiseksi kehitettiin lukkorengaan tilalle pidätinrengastyypinen ratkaisu (Kuvio 32 ja 33), jossa pidätinrennas kiristetään ensin ruuveilla akseliin, minkä jälkeen renkaan ot-sapinnasta painatetaan kolmella pidätinruuvilla laakerin sisärenkasta vasten. Näin välys voidaan poistaa tarkemmin.



Kuvio 32. Kara-akseli, viistokuulalaakeripari, pidätinrennas ja laakeripesän kansi



Kuvio 33. Kara-akselin pidätinrennas

Mittaukset osoittivat, että kaikki laakeripesät olivat toleranssialueen ulkopuolella. Kara on laakeroitu sekä etu- ja takapästä. Etupäässä käytetään neulalaakerityyppistä ratkaisua ja takapäessä on viistokuulalaakeriparia. Etummaisen laakeripesän valmistusmitta oli 28J7 (+0,012/-0,009). Suurimmat poikkeamat havaittiin laakeripesissä numerot 2 ja 8, joissa mitat ylittivät toleranssialueen

ylärajan 0,018 millimetrillä. Neulalaakerin laakeripinta on hiottu kara-akselille, jonka halkaisijalle annettu valmistusmitta oli 20 (+0,015 / +0,006). Akselin mitta ylittyi akselilla numero 10. 0,005 millimetriä ja alittui akselilla numero 12. -0,016 millimetriä.

Pinnalaadun vaatimus neulalaakerin laakeripinnalle oli Ra 0,2, mutta puretussa karalaatikossa akselien laakeripinnat olivat kuitenkin selvästi tätä heikompia (Kuvio 34). Pinnanlaatu oli todella huono ja todennäköisin syy tähän oli karalaatikon ulkopuolelta päässyt lika, joka on ajan myötä kulluttanut pintoja. Neulalaakerissa ja karalaatikon pohjalla havaittiin selvästi työstöstä peräisin olevaa metallilastua (Kuvio 35 ja 36), mikä lisää akselinkaulan kulumista ja laakerivaurioiden syntyä.



Kuvio 34. Laakeripinta. Pinnanlaadunvaatimus Ra 0,2.



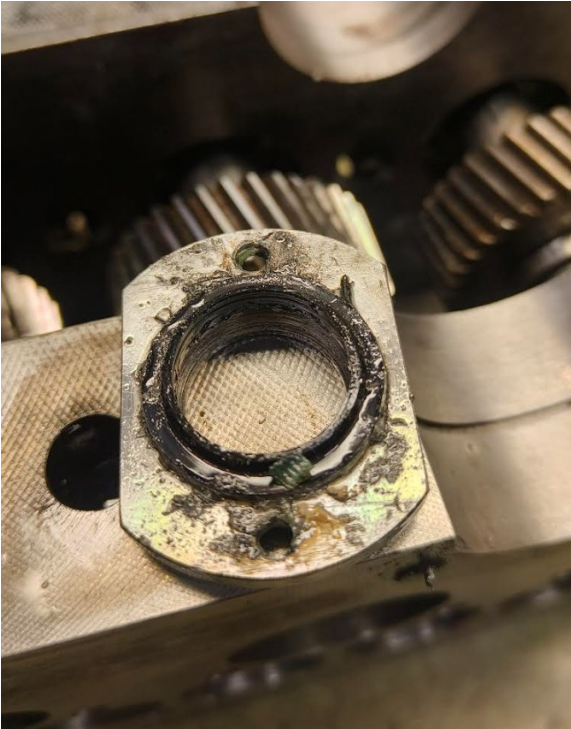
Kuvio 35. Karalaatikon sisällä olevaa metallilastua.



Kuvio 36. Neulalaakeri, jossa runsaasti metallihiukkasia.

Akselien tiivistyspintaa oli aiemmin korjattu SKF Speedi-Sleeve korjausholkeilla, mutta akselin heitto ja epäpuhtaudet ovat todennäköisesti kuluttaneet tiivistyspintaa ja tiivisteitä edelleen.

Huoltajan mukaan kara-akselin läpiviennin tiiviste on haastava asentaa ja se vaurioituu herkästi asennuksen aikana. Rikkoontunut tiiviste (Kuvio 37) lisää vuotoriskiä ja mahdollistaa epäpuhtauksien pääsyn laatikon sisäpuolelle, mikä heikentää laakeroinnin ja voitelujärjestelmän toimintaa.



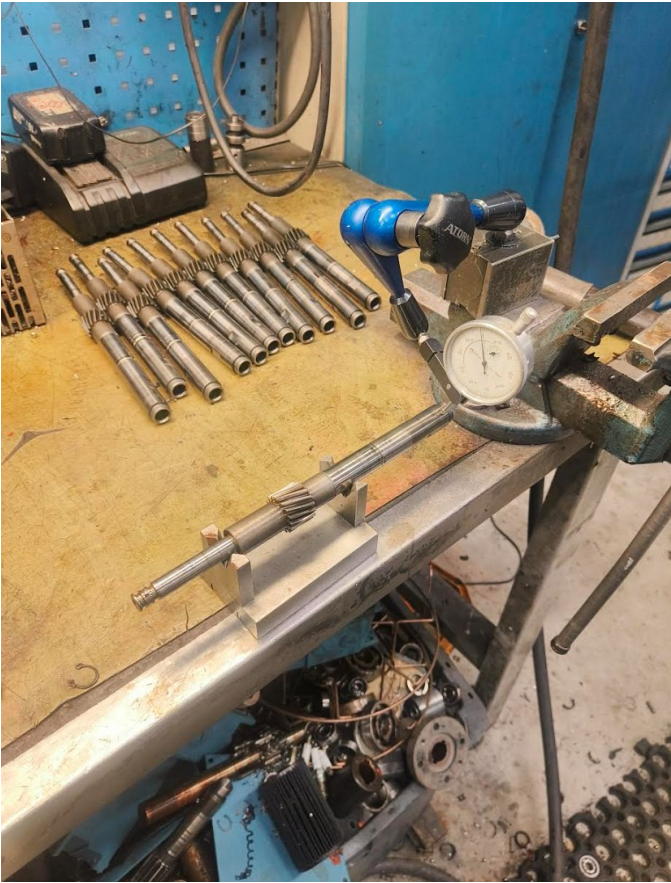
Kuvio 37. Tiivisteen sisäpinta, jossa havaittavissa metallipartikkeleita.

Karan sallittu aksiaalinen liike on enintään 0,005 millimetriä. Tässä tutkimuksessa tehtyjen mitaustulosten perusteella tämä arvo ylittyi (Liite 6), mikä viittaa laakerin toiminnan kannalta virheelliseen tilanteeseen. Liiallinen aksiaalinen välys kasvattaa iskuvoimia, joka saattavat lisätä värähtelyä karalaatikossa. Kuviossa 38 heittokellolla aksiaalisen välyksen mittausta.



Kuvio 38. Aksiaalisenvälyksen mittaaminen.

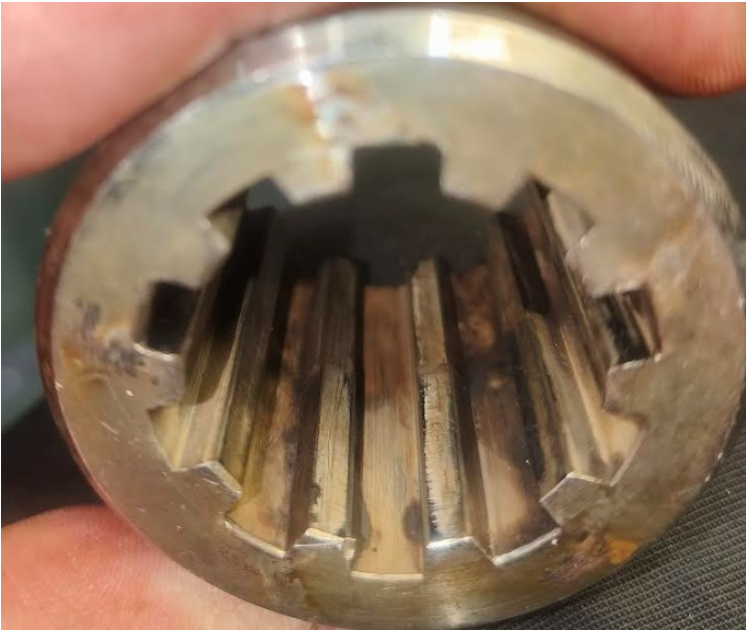
Karojen heiton mittaaminen toteutettiin akseli laakeroituna paikoillaan, että akseli irrallisena V- muotoisten paranelien päällä (Kuvio 39). Mittaus tuloksissa heittoa ei esiintynyt kovin monessa akselissa (Liite 6). Paranelien päällä mitattuna karoissa ei ollut heittoa, mutta laakeroituna heitto ylitti sallitun arvon kolmessa akselissa. Karan heittomittaus antaa suoran viitteitä karalaakeroinnin kunnosta. Poikkeamat viittaavat laakerivaurioon, välyksen kasvuun tai geometrisiin epätarkkuuksiin karassa tai pesissä. Yhdessä aksiaalisenvälyksen kanssa heitto muodostaa resonanssille otolliset olosuhteet, erityisesti suurilla pyörimisnopeuksilla.



Kuvio 39. Karanheitonmittaus paranellien päällä.

9.2.5 Käyttöakseli ja kytkimet

Käyttöakselien kytkimissä havaittiin välystä, joka voi aiheuttaa värähtelyä koneessa (Kuvio 40). Välyksen seurauksena linjaus saattaa muuttua siten, että akselin massakeskipiste ja tasapaino häiriintyy ja se voi laukaista värähtelyä. Haastattelujen ja tarkastusten perusteella booriholkkien todettiin olevan huonossa kunnossa.



Kuvio 40. Käyttöakseleiden booriholkki.

9.2.6 Voitelu

Kara ja vaihdelaatikoiden voitelu perustuu kiertovoitelujärjestelmään, jossa järjestelmän pääkomponentteja ovat voitelupumppu, laatikkokohtainen annostelija, öljysäiliö sekä suodatuslaite. Kiertovoiteluvoitelu on toteutettu roiskevoitelu periaatteella, jossa voiteluöljyä johdetaan hammaspyörän päälle. Öljy roiskuu pyörivien osien kautta voideltaville komponenteille ja valuu lopulta laatikoiden pohjalle. Laatikoiden pohjalla on paluukanava, josta se kulkeutuu koneen runkorakenteeseen suunniteltua öljykanavaa pitkin takaisin öljysäiliöön.

Öljysäiliössä on erillinen pumppu, joka on varustettu suodattimella ja virtausvahdilla. Järjestelmä varmistaa, että öljyn kierto on jatkuvaa ja voiteluöljyn epäpuhtaudet voidaan suodattaa pois ennen sen palaamista takaisin kierto.

Kara- ja vaihdelaatikoiden pohjalta kuitenkin havaittiin merkittävä määrä metallipartikkeleita. Partikkelien alkuperää ei voitu tässä tutkimuksessa varmuudella todentaa, mutta todennäköisin selitys on, että ne ovat kulkeutuneet karalaatikon sisään porakaroilta rikkoutuneen tiivistyksen seurauksena. Sieltä ne ovat sekoittuneet kiertovoiteluöljyyn ja kiertäneet edelleen järjestelmässä. Tämän seurauksena metallihiukkasia havaittiin myös vaihdelaatikon sisällä.

Havainto osoittaa, että tiivistyksen ja öljynsuodatuksen tehokkuutta tulisi tarkastella kriittisesti. Mikäli epäpuhtaudet pääsevät kiertoon, ne lisäävät merkittävästi laakerien, hammaspyörien ja muiden kosketuspintojen kulumista sekä voivat nopeuttaa värähtelyä aiheuttavien mekaanisten vikojen syntymistä.

Annostelijan ulkoinen epäpuhtaus herättivät huomiota tutkimuksen aikana, sillä mitta-asteikko oli todella vaikeasti havaittavissa ilman lisävalaistusta (Kuvio 41). Tämän vuoksi haastateltiin kunnossapidon henkilöstöä ja tarkasteltiin vuosihuolto-ohjelmaa, josta ilmeni, ettei annostelijan tarkastuksia ei ole suoritettu. Tämän seurauksena on epäselvää, että toimiiko voitelujärjestelmä vaaditulla tavalla kaikille kara- ja vaihdelaatikoille.



Kuvio 41. Likainen annostelija.

9.2.7 Kunnossapito ja karalaatikkohuolto

Kunnossapito ja karalaatikkohuolto ovat keskeisessä asemassa vaipanporauskoneen värähtelyilmiöiden hallinnassa. Havaintojen perusteella karalaatikoiden huoltovälit ovat olleet poikkeuksellisen

pitkiä, mikä on mahdollistanut kulumien ja välysten kasvun. Vaikka kulumisia ja välyksiä on havaittu, niihin ei ole silti reagoitu. Tutkimuksessa tarkasteltu Karalaatikko numero 27 oli ollut käytössä yli kymmenen vuotta ilman huoltotoimenpiteitä.

Vaihdelaatikoille tai jakokoteloille ei ole tehty huoltoja tai kuntoanalyyskejä koskaan. Myöskään dokumentaatiota tai tietoa ennakkohuolloista ei ollut saatavilla, joten on oletettavaa, että suurin osa mekaanisista komponenteista on edelleen alkuperäistä.

Karalaatikoiden vaihtotarpeelle ei ole tehty erillistä ohjeistusta, vaan koneenkäyttäjät lähettävät karalaatikon huoltoon oman analyysinsä mukaisesti. Myöskään karalaatikoiden huolloille ei ole laadittu erillistä ohjeistusta, vaan huoltaja suorittaa toimenpiteet oman arvionsa ja kokemuksensa perusteella. Tilaaja ei ole määrittänyt selkeitä vaatimuksia huollon ajankohdalle tai sisällölle, minkä vuoksi havaittuihin virheisiin, kuten välyksiin tai metallipartikkelien esiintymiseen laatikon sisällä ei ole reagoitu riittävästi. Myöskään kuluneiden ja kriittisten komponenttien, kuten kara-akselien vaihtotarpeita ei ole otettu tarpeeksi vakavasti. Osan korkea hinta on muodostunut ensisijaiseksi päätöksentekijäksi, mikä on johtanut siihen, että osien kulumisen vaikutusta värähtelyyn ei ole huomioitu kunnossapitopäätöksissä.

Rakenteelliset virheet ja kunnossapidon laiminlyönti ovat johtaneet laakeripesien ja akseleiden kulumiseen. Näiden seurauksena karalaatikon mekaaninen tukevuus on heikentynyt ja värähtelyalttius kasvanut. Lisäksi virheelliset akselien lukitusratkaisut ovat pahentaneet tilannetta. Tällaisia virkoja ei voida havaita ilman säännöllistä mittaus- ja kunnonvalvontaohjelmaa, minkä puuttuminen on yksi merkittävä syy värähtelyn hallitsemattomaan lisääntymiseen.

Voitelujärjestelmän osalta havaittiin metallipartikkeleiden kertymistä öljyyn sekä tiivisteiden vuotoja, jotka ovat todennäköisesti seurausta pitkistä huoltoväleistä ja huollon laiminlyönnistä. Nämä epäpuhtaudet kiertävät öljyn mukana ja kuluttavat laakereiden ja hammaspyörien pintoja, mikä edelleen nopeuttaa välyksen kasvua ja lisää epätasapainon todennäköisyyttä.

Hydraulisylintereiden kunto on myös olennainen osa koneen kokonaisvaltaista kunnossapitoa. Tutkimuksessa havaittiin, että sylinterin sisäpinnoissa todettiin huomattavaa kulumista ja merkittävää

ohivirtausta, joka voi aiheuttaa paineen laskua ja kavitaatiota. Kavitaatio puolestaan voi synnyttää paikallisia värähtelyjä ja heikentää porausprosessin vakautta.

Hydraulisyylinterin kunnonvalvontaa ei ole tällä hetkellä järjestetty, mutta se olisi suositeltavaa sisällyttää osaksi kunnossapito ohjelmaa. Sylinterien kuntoa voitaisiin valvoa esimerkiksi virtausmittareiden avulla. Näin olisi mahdollista havaita poikkeamat, kuten ohivuodot tai paineen vaihtelut, jo varhaisessa vaiheessa ennen kuin ne alkavat aiheuttaa mahdollista värähtelyä.

Kunnossapidon näkökulmasta voidaan todeta, että nykyinen huoltokäytäntö on luonteeltaan reaktiivinen. Vikoja havaitaan vasta, kun ne ovat jo aiheuttaneet laatupoikkeamia tai tuotannon keskeytyksiä. Ennakoivan kunnossapidon ja kunnonvalvonnan käyttöönotto olisi perusteltua, sillä se mahdollistaisi värähtelyn ja öljynlaadun jatkuvan seurannan. Näin vikaantumiskehitys voitaisiin havaita varhaisessa vaiheessa ja huoltotoimenpiteet kohdistua tarkasti vain niihin komponentteihin, joissa todellista kulumaa on tapahtunut.

Huoltoprosessissa tulisi hyödyntää mittausdatan systemaattista dokumentointia ja vertaamista lähtöarvoihin. Tällä estettäisiin karalaatikoiden rakenteellisten muutosten vaikutusta värähtelyn syntyyn. Kunnossapidon ja huollon yhdistäminen kunnonvalvontaan muodostaisi kokonaisuuden, joka parantaisi koneen luotettavuutta ja vähentäisi värähtelyyn liittyviä ongelmia merkittävästi.

10 Tulokset

10.1 Juurisyyanalyysi RCA

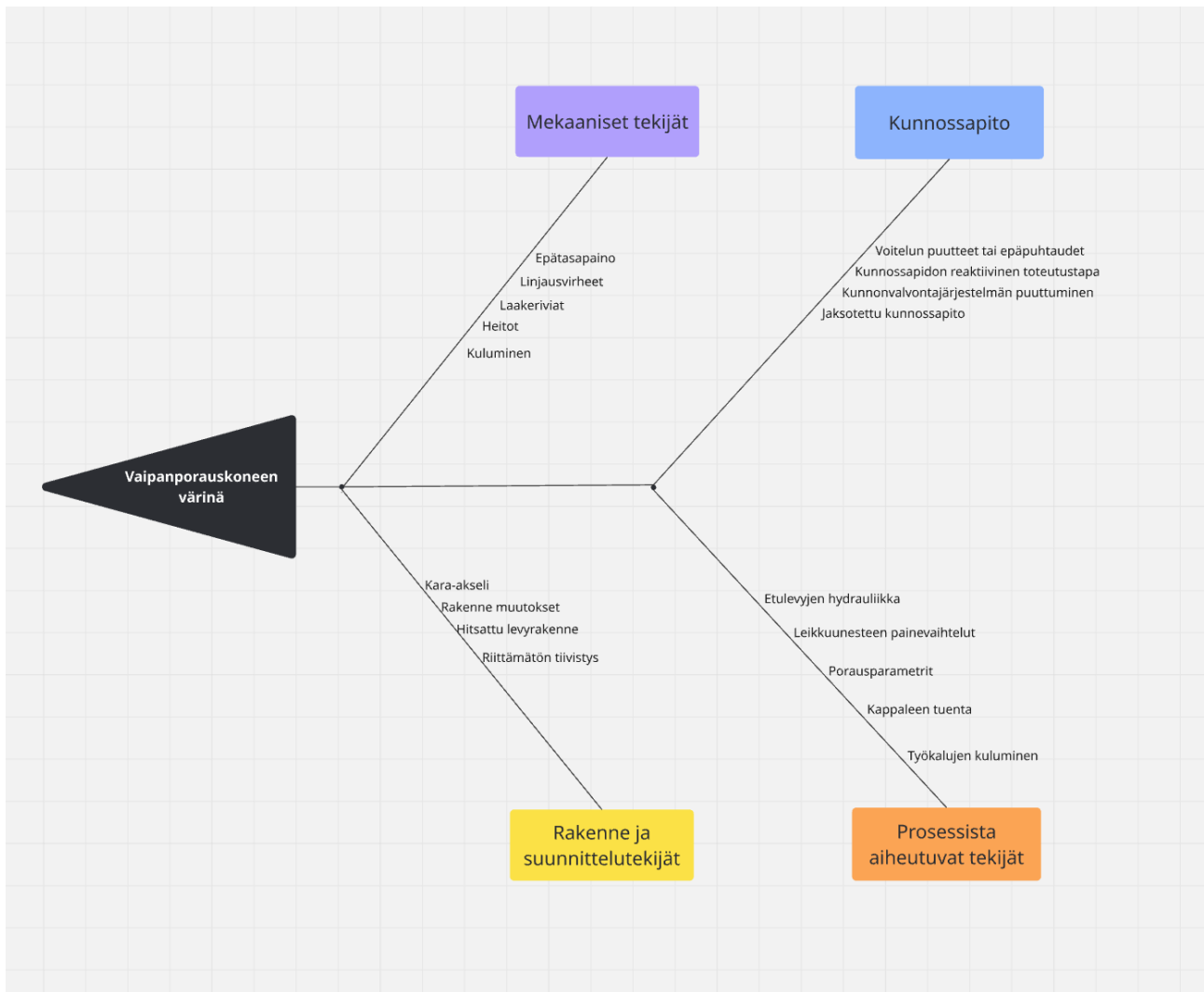
Juurisyyanalyysi toteutettiin vaiheittain, jotta vaipanporauskoneessa havaittujen värähtelyilmiöiden taustalla vaikuttavat tekijät voitiin tunnistaa ja arvioida systemaattisesti. Menetelmän tavoitteena oli löytää värähtelyn perimmäinen syy eikä ainoastaan sen näkyvä ilmenemismuoto.

1. **Havaittu ongelma:** Vaipanporauskoneen värähtely
2. **Värähtelyn aiheuttajien kartoitus, eli tiedonkeruu, joka toteutettiin kirjallisuuden, mittausten ja koneen purkuhavaintojen avulla. Havaintoja ryhmiteltiin neljän pääluokan mukaisesti:**
 - **Mekaaniset tekijät:** Epätasapaino, laakeriviat, linjausvirheet ja heitot
 - **Kunnossapidolliset tekijät:** Huoltovälit, voiteluongelmat
 - **Prosessista aiheutuvat tekijät:** Leikkuuöljyn painevaihtelut, hydraulikka, työkalujen kuluminen ja virheelliset työstöarvot
 - **Rakenne- ja suunnittelutekijät:** Riittämätön tiiveys, hitsatut rakenteet, kara-akseli, rakenne-muutokset.
3. **Syy-seurauskaavio**

Kerätty tieto jäsennettiin syyseurauskaavioon, jonka avulla voitiin hahmottaa eri tekijöiden väliset yhteydet ja vaikutukset värähtelyn syntyyn. Kaavio auttoi erottamaan todennäköisimmät juurisyyt sekä niiden väliset riippuvuudet.
4. **Juurisyyntunnistaminen "5 x miksi":**

Syyseurauskaaviossa tunnistetut keskeiset tekijät analysoitiin tarkemmin 5 x miksi -menetelmällä. Menetelmässä esitettiin toistuvasti kysymys "miksi", jotta löydettiin ongelman todellinen perimmäinen syy. Analyysin perusteella pääjuurisyyksi määritettiin kunnossapitostrategian laiminlyönti.
5. **Korjaavien toimenpiteiden suunnittelu ja toteutus**
6. **Seuranta ja arviointi**

10.2 Värähtelyn aiheuttajien tunnistaminen



Kuvio 42. Syy-seurauskaavio. Värähtelyn aiheuttajien tunnistaminen

10.3 Juurisyyn tunnistaminen

Taulukko 2. 5 x miksi

Vaipanporauskoneessa esiintyy värähtelyä porauksen aikana	Vastaus
1. Miksi vaipanporauskoneessa esiintyy työstönaikaista värähtelyä?	Karalaatikossa ja voimansiirrossa on havaittu kulumista ja suuria välyksiä. Nämä aiheuttavat värähtelyä työstöprosessin.
2. Miksi karalaatikon ja voimansiirron rakenteissa esiintyy välyksiä ja epävakautta?	Laakeroinnit ovat kuluneet. Laakereissa ja hammaspyörissä on havaittu kiillotuskulumista, tahmautumista sekä merkkejä ulkokehän pyörimisestä laakeripesässä. Nämä ilmiöt viittaavat pitkäaikaiseen dynaamiseen kuormitukseen ja epätasapainoon.
3. Miksi laakereihin ja akseleihin on syntynyt välyksiä?	Laakerien ja akselien kuntoa ei ole seurattu säännöllisesti, eikä karalaatikon tai vaihdelaatikon ole määritetty huolto-ohjetta tai ennakoivia huoltovälejä. Kulumista ei ole havaittu tai siihen ei ole reagoitu.
4. Miksi kunnossapitoa ei ole toteutettu järjestelmällisesti?	Kunnossapito on perustunut vikojen korjaamiseen, ei niiden ehkäisyyn, jossa toimenpiteet tehdään vasta vian ilmetessä.
5. Miksi kunnossapito on reaktiivista eikä ole ennakoivaa?	Kunnossapidon reaktiivisuus johtuu käytössä olevasta kunnossapitostrategiasta, joka perustuu vikojen korjaamiseen niiden ilmettyä eikä ennakoivaan kunnonvalvontaan.

10.4 Mittaukset ja havainnot

Mittauksissa ja vianetsinnässä havaittiin poikkeamia hammaspyörissä, laakeripesien ja akselien välyksissä sekä kulumisesta johtuvia eroavaisuuksia kara-akseleiden kauloissa. Poikkeamat olivat pääosin toleranssirajojen ulkopuolella ja ne aiheuttavat värähtelyn lisääntymistä. Mittaustulokset tukevat oletusta siitä, että karalaatikon kunto ja sen osien välykset ovat keskeisiä tekijöitä vaipanporauskoneen värähtelyyn.

Mekaanisten rakenteiden osalta merkittävimmät löydökset liittyivät karalaatikon ja vaihdelaatikon välyksiin sekä laakereiden kulumiseen. Mittaustulosten perusteella karalaatikon kaikki laakeripesät olivat toleranssialueen ulkopuolella. Suurin poikkeama ylitti sallitut rajat jopa 0,023 millimetrillä. Lisäksi huoltodokumentista löytyi karalaatikko, jossa laakeripesän halkaisijan toleranssi ylittyi 0,06 millimetriä. Karan aksiaalisenvälyksen sallittu arvo on 0,005 millimetriä, joka ylittyi useissa tapauksissa, mikä viittaa laakeroinnin virheelliseen toimintaan. Myös kara-akselilla olevan pinnan laadun vaatimus Ra 0,2. ylittyi silmin havaittavasti jokaisella kara-akselilla.

Voimansiirron laakereissa havaittiin kiillotus- ja tahmautumiskulumia, jotka osoittavat pitkäaikaista epätasapainoista kuormitusta. Vaihdelaatikon ja jakokotelon pohjalta löytyi metallilastuja, mikä viittaa työstöstä syntyneiden lastujen pääsemisen kiertovoiteluöljyn sekaan. Jakokotelon hammaspyörissä havaittiin tahmautumista, se viittaa voitelujärjestelmän virheelliseen toimintaan. Voitelujärjestelmän toimintaa tulisi tutkia kriittisesti. Yhdessä nämä tekijät heikentävät rakenteiden tukevuutta ja lisäävät laakereiden ja muiden komponenttien kulumista.

Hydrauliikkajärjestelmän tarkasteluissa havaittiin, että ohjainlevyjen liikkeestä vastaava hydraulisyylinteri oli kulunut ja sen sisällä on tapahtunut adhesiivista kulumista ja ohivirtausta. Sylinterin männän ja sylinteriputken välinen kuluma aiheuttavat paineenlaskua, joka voi lisätä kavitaation riskiä. Kavitaatiosta syntyvät painevaihtelut välittyvät rakenteisiin ja voivat toimia värähtelyä laukaisevana tekijänä. Lisäksi ohjainlevyjen rakennemuutoksen seurauksena hydraulista painetta on jouduttu nostamaan, jotta ohjainten edestakainen liike saadaan aikaan. Kohonnut paine kasvattaa työstövoimia, mikä lisää rungon ja kappaleen joustoja ja siten värähtelyherkkyyttä porausprosessin aikana.

Kunnossapidon osalta havaittiin, että karalaatikkojen ja voimansiirron huoltokäytännöt ovat olleet pääosin reaktiivisia. Tutkittava karalaatikko numero 27 oli ollut käytössä yli kymmenen vuotta ilman huoltotoimenpiteitä. Vaihdelaatikolle sekä jakokoteloille ei ollut tehty koskaan dokumentoituja huoltoja tai kuntotarkastuksia. Huoltotoimenpiteet on toteutettu pääasiassa vasta vian ilmetessä, eikä kulumien tai välysten kehitystä ole seurattu järjestelmällisesti. Tämä on johtanut siihen, että mekaaninen kuluminen ja välysten kasvu ovat päässeet kehittymään huomaamatta, kunnes ne ovat alkaneet vaikuttaa suoraan porauslaatuun ja koneen toimintaan.

Voitelujärjestelmässä havaittiin metallipartikkeleita, jotka viittaavat epäpuhtauksien kiertoon öljyn mukana. Tämä kertoo riittämättömästä kunnonvalvonnasta, tiivistevuodoista sekä mahdollisesti riittämättömästä suodatuksesta. Epäpuhtaudet kuluttavat akseleiden, laakereiden ja rattaiden pintoja, mikä edelleen lisää välyksiä ja epätasapainoa. Voiteluöljyn kiertojärjestelmä olisi hyvä varustaa öljynlaadun tai metallipitoisuuden seurannalla, mikä olisi mahdollistaisi vikaantumisen havaitsemisen ennen sen etenemistä kriittiseksi.

Havaintoja täydennettiin asiantuntijahaastatteluiden ja tietoperustan avulla, mikä mahdollisti havaittujen kulumismuotojen ja välysten arvioinnin. Näiden tulosten perusteella voitiin valita sopiva menetelmä juurisyyden analysoimiseksi ja arvioida mitkä tekijät vaikuttavat merkittävimmissä määrin värähtelyn syntyyn.

Analyysin perusteella voidaan todeta, että vaipanporauskoneen värähtelyn todellinen juurisyy on kunnossapitostrategia ja ennakoivan kunnonvalvonnan puuttuminen. Tämä on mahdollistanut laakerien kulumisen, välysten kasvun ja rakenteellisen tasapainon heikkenemisen ilman, että ongelmat on havaittu ajoissa. Yhdessä nämä tekijät muodostavat olosuhteet, joissa pienetkin epätasapainot ja painevaihtelut voivat kehittyä hallitsemattomaksi värähtelyksi.

11 Johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää karalaatikon ja sen voimansiirron rakenteelliset sekä kunnossapitoon liittyvät juurisyyt, jotka aiheuttavat vaipanporauskoneessa työstöaikaista värähtelyä. Tulokset osoittivat, että merkittävimmät ongelmat liittyvät laakerien kulumiseen aksiaaliseen välykseen sekä voitelujärjestelmän toimintaan. Jakokotelon laakeripesien mitat olivat vielä toleranssialueella, mutta laakereiden ulkokehillä näkyi selviä kiillotuskulumisen ja tahmautumisen

merkkejä. Nämä viittaavat pitkäaikaksiin iskukuormituksiin ja laakerin ulkokehän pyörimiseen laakeripesässä. Suurinta kulumista havaittiin karalaatikon laakeroinnissa, mikä johtui epäpuhtauksista karalaatikon sisällä, kun taas voimakkaimmat iskukuormitukset ilmenivät jakokotelon laakeroinnissa.

Juurisyyt liittyivät rakenteellisiin, kunnossapidollisiin, mekaanisiin ja prosessista johtuviin tekijöihin. Yhdessä nämä tekijät aiheuttavat hallitsematonta värähtelyä. Pääjuurisyiksi osoittautui kunnossapidon reaktiivinen toimintatapa. Järjestelmällisen kunnonvalvonnan, ennakoivien huoltokohteiden määrittäminen ja selkeän huolto-ohjeistuksen puute on vaikuttanut merkittävästi koneen toimintakyvyn heikkenemiseen.

12 Pohdinta

Tutkimuksessa selvisi, että vaipanporauskoneen karalaatikon ja sen voimansiirron aiheuttamat värähtelyongelmat johtuivat ennen kaikkea mekaanisten komponenttien kulumisesta, puutteellisesta voitelusta sekä kunnossapidon laiminlyönnistä ja tavoitteiden puuttumisesta. Voimansiirron komponenttien kuluneisuus, hydraulikkajärjestelmän ohivirtaus ja metallipartikkelien esiintyminen voiteluöljyssä osoittivat, että värähtely syntyy useiden toisiinsa kytkeytyvien tekijöiden seurauksena.

Kunnossapito osoittautui pääasiassa reaktiiviseksi, eikä huoltotoimenpiteitä ole suoritettu ennen vian ilmenemistä. Karalaatikkohuolto on perustunut koneenkäyttäjän ja huoltajan omaan arvioon ilman yhtenäisiä ohjeita tai tilaajan määrittämiä vaatimuksia.

Juurisyytanalyysissa tunnistettiin keskeisimmät tekijät ja värähtelyn aiheuttajat, kuten laakeripesien kuluminen, aksiaalisen välyksen kasvu, voitelujärjestelmän epäpuhtaus sekä kunnossapidon reaktiivinen toimintatapa. Näiden tekijöiden yhteisvaikutus on johtanut koneen työstönaikaiseen värähtelyyn. Tutkimuksessa käytetyt analyysimenetelmät, kuten juurisyytanalyysi (RCA), syy-seurauskaavio ja 5 × miksi menetelmä osoittautuivat toimiviksi työkaluiksi ongelman kokonaisvaltaiseen tarkasteluun ja juurisyiden tunnistamiseen.

Värähtelyn aiheuttajia pyrittiin tunnistamaan geometrisillä mittausmenetelmillä, mutta käytettyjen mittalaitteiden tarkkuus rajoitti mittaustulosten luotettavuutta. Tutkimuksessa havaittiin, että useat rakenteelliset kohteet eivät vastanneet niille asetettuja toleranssivaatimuksia. Poikkeamien havaitseminen edellyttää koneenosien tarkempia mittauksia sekä tarkempia mittausmenetelmiä kuten Lasermittauksia, joita voitaisiin suorittaa Jyväskylän ammattikorkeakoulun mittalaitteistolla.

Tutkimuksessa ei päästy toteuttamaan laser- tai värähtelymittauksia, jotka olisivat voineet tarjota tarkempaa tietoa värähtelyn syistä ja syntymekanismista. Ominaistaajuuksien selvittäminen ja niiden vertaaminen porausprosessin taajuuksiin olisi tärkeää, jotta voidaan varmistaa, etteivät koneen omat taajuudet aiheuta tai voimista värähtelyä.

Jatkotoimenpiteenä voidaan suositella kunnonvalvonnan kehittämistä erityisesti värähtelyn ja voiteluöljyn laadun seurannan ja hydraulikkajärjestelmän ohivirtauksen osalta. Värähtelyanalyysin käyttö karalaatikkohuollossa tarjoaisi keinon varmistaa huollon onnistumisen jo ennen karalaatikon asentamista koneeseen. Lisäksi tulee laatia selkeät huolto-ohjeet ja vastuunjaot, jotta oikeat huoltovälit ja kunnossapito kohteet määritellään ja niihin osataan reagoida ajoissa.

Lähteet

Airila, M., Hovi, K. Nurmi, M. Eino, P & Parmila, A. 1985. Koneenosien suunnittelu 4. Porvoo: WSOY. Viitattu 25.9.2025

Andersson, P & Tikka, H. 1997. Mittaus- ja laatutekniikat. Helsinki: WSOY. Viitattu 6.10.2025.

Arene Ry. N.d. Ammattikorkeakoulujen opinnäytetöiden eettiset suositukset. Ammattikorkeakoulujen rehtorineuvosto ry. Viitattu 29.9.2025. <https://arene.fi/wp-content/uploads/Raportit/2025/AMMATTIKORKEAKOULUJEN%20OPINN%C3%84YTET%C3%96IDEN%20EETTISET%20SUOSITUKSET%202025.pdf?t=1739803988>

Blom, S., Lahtinen, P., Nuutio, E., Pekkola, K., Pyy, S., Rautiainen, H., Sampo, A., Seppänen, P. & Suosara, E. 1999. 2006. Koneenelimet ja mekanismit. Helsinki: Edita Prima Oy. Viitattu 8.10.2025.

Eettiset periaatteet N.d. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Viitattu 29.9.2025. <https://www.jamk.fi/fi/media/41520>

Goncalves, T. 2022. What is root cause analysis (RCA)?. Artikkele Rockwell Automationin sivulta. Viitattu 29.9.2025. <https://fiixsoftware.com/glossary/root-cause-analysis/>

Gundrills, N.d. Yksileikkuinen kanuunapora. Iscar LTD. Viitattu 10.10.2025. <https://www.iscar-dobrasil.com.br/fi-fi/products/hole-making/deep-drilling/gundrills>

Ihalainen, E. Aaltonen, K. Aromäki, M. Sihvonen, P. 2011. Valmistustekniikka. Helsinki: Hakapaino Oy. Viitattu 20.10.2025

Järviö, J & Lehtiö, T. 2017. Kunnossapito Tuotanto-omaisuuden hoitaminen. Helsinki: Promaint Oy. Karjalainen, T. 2007. Aivoriihi, ryhmittelykaavio sekä kalanruokaavio. Aivoriihellä luovuutta ryhmätyöskentelyyn. Artikkelele quality knowhow karjalainen internet sivustolla. Viitattu 10.10.2025. <https://qkk.fi/luova-ajattelu/>

Koivunen, K. 2023. Kuinka toteuttaa laadullinen haastattelututkimus? Viitattu 11.10.2025

Kuinka materiaalin ominaisuudet vaikuttavat kulutuskestävyyteen?. 2025. Sysi Boosting uptime. Viitattu 2.10.2025. <https://sysi.fi/kuinka-materiaalin-ominaisuudet-vaikuttavat-kulutuskestavyyteen>

Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. 2024. PSK-käsikirja 3. Helsinki: PSK standardisointiyhdistys Ry. Viitattu 28.9.2025.

Laadullinen analyysi. N.d. Menetelmäpolku. Jyväskylän yliopisto. Viitattu 25.9.2025. <https://sites.app.jyu.fi/mehu/fi/metelmapolku/aineiston-analyysimetelmat/laadullinen-analyysi>

laakerivaurioiden tunnistus ja ehkäisy. n.d. Laakerikeskus. Viitattu 2.10.2025. <https://www.laakerikeskus.fi/wp-content/uploads/2017/04/Laakerikeskus-Laakerivaurioiden-tunnistus-2017.pdf>

Mikkonen, H. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. Helsinki: KP-media Oy. Viitattu. 27.9.2025

Mikä on juurisyysanalyysi?. N.d. Artikkele Flovion internetsivuilla. Flovio Oy. Viitattu 29.9.2025. <http://flovio.fi/juurisyysanalyysi/>.

Nohynek, P & Lumme, V. 1996. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. Rajamäki: KP-tieto Oy. Viitattu. 30.9.2025

Näpäri, L. 2017. Tutkimuskysymyksen muodostaminen. Spoken. Viitattu 24.9.2025. <https://spoken.fi/tutkimuskysymyksen-muodostaminen/>

O'Brien, J. 2023. Root cause analysis using the 5 whys method. Artikkele Rockwell Automationin sivulta. Viitattu 29.9.2025. <https://fiixsoftware.com/blog/5-whys-simple-root-cause-analysis/>

Pramila, A. 1985. Värähtelymekaniikka. Oulu: Oulun Yliopisto. Viitattu 19.9.2025

Rinne, T. 2024. Tahmautumisvaurion syntyyn vaikuttavat tekijät teollisuusvaihteissa. Kandidaatintyö. Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta. Konetekniikka. Tampereen Yliopisto. Viitattu 20.10.2025. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/158957/RinneTaneli.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Seco Tools Oy. N.d. Mitä on värinä koneistuksessa ja kuinka sitä vähennetään?. Viitattu 16.9.2025. <https://www.secotools.se/article/120669?language=fi>

SKF-laakerien kunnossapito. 2016. SKF yhtymä 2016. Viitattu 2.10.2025.

Sterling Gun Drills Inc. N.d. Categories: Deep Hole Gun Drilling. Viitattu 17.9.2025. <https://www.sterlinggundrills.com/deep-hole-gundrills.php>

Suction rolls for ultimate process performance. 2014. Valmet corporation. Viitattu 24.9.2025. <https://valmet.my.site.com/solutionfinder/file-preview?contentDocumentId=06958000000bQ75AAE>

Toikko, T. & Rantanen, T. 2009. Tutkimuksellinen kehittämistoiminta. Näkökulmia kehittämisssessiin, osallistamiseen ja tiedontuotantoon. Tampere: Tampereen Yliopistopaino Oy. Viitattu 29.9.2025. https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/100802/Toikko_Rantanen_Tutkimuksellinen_kehittamistoiminta.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Valmet Oyj. N.d. Valmet yrityksenä. Viitattu 17.9.2025. <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/>

Valmet Oyj. N.d. Valmetin strategia Lead the Way. Viitattu 17.9.2025. <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/yritys/strategia/>

What is Gun Drilling?. N.d. Artikkelel UNISIGin internet sivustolla. Viitattu 25.9.2025.

<https://unisig.com/information-and-resources/what-is-deep-hole-drilling/what-is-gun-drilling/>

Your suction roll, our mission - tailored services for performance excellence. 9.9.2025. Artikkelel Valmetin internetisivustolla. Viitattu 25.9.2025.

<https://www.valmet.com/insights/articles/services/your-suction-roll-our-mission---tailored-services-for-performance-excellence/>

Liitteet

Liite 1. Jakokotelon mittauspöytäkirja

Jakolaatikon kotelo:						Jakolaatikon kansi:					
Mittauspöytäkirja:											
Pesä nro:	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Keskiarvo	Huomioitavaa	Pesä nro:	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Keskiarvo	Huomioitavaa
1	62,015	62,015	62,015	62,015	ISO luokitus Adhesiivinenkuluminen, eli hankaava kuluminen	1	62,015	62,005	62,005	62,008	ISO luokitus Adhesiivinenkuluminen, eli hankaava kuluminen
2	62,010	62,010	62,007	62,009	ISO luokitus Adhesiivinenkuluminen, eli hankaava kuluminen	2	62,000	62,000	62,005	62,002	ISO luokitus Adhesiivinenkuluminen, eli hankaava kuluminen
3	62,010	62,010	62,010	62,010	ISO luokitus Adhesiivinenkuluminen, eli hankaava kuluminen	3	62,007	62,010	62,005	62,007	-
4	62,010	62,010	62,010	62,010	ISO luokitus Adhesiivinenkuluminen, eli hankaava kuluminen	4	62,005	62,005	62,005	62,005	ISO luokitus Adhesiivinenkuluminen, eli hankaava kuluminen
5	62,015	62,016	62,014	62,015	ISO luokitus Adhesiivinenkuluminen, eli hankaava kuluminen	5	62,008	62,012	62,015	62,012	ISO luokitus abrassiivinen kuluminen, eli hiontakuluminen ulko-, ja otsapinnoilla
6	62,010	62,016	62,014	62,013	ISO luokitus Adhesiivinenkuluminen, eli hankaava kuluminen	6	62,010	62,010	62,005	62,008	ISO luokitus Adhesiivinenkuluminen, eli hankaava kuluminen
7	80,020	80,020	80,019	80,020	abrassiivinen kuluminen, eli hiontakuluminen ulko-, ja otsapinnoilla	7	62,010	62,010	62,007	62,009	ISO luokitus Adhesiivinenkuluminen, eli hankaava kuluminen
toleranssissa ei toleranssissa						toleranssissa ei toleranssissa					
Valmistuspiirrustuksen mitta ja toleranssi:						Valmistuspiirrustuksen mitta ja toleranssi:					
Pesä:	Laakeri:					Pesä:	Laakeri:				
Pesät 1-6	62H/ (0/+0,030)		6206			Pesät 1-7	62H/ (0/+0,030)		6206		
Pesä 7	80H7 (0/+0,030)		6208								

Liite 2. Karalaatikko numero 27. Laakeripesien mittauspöytäkirja

Karalaatikko etu:

Mittauspöytäkirja:

Pesä nro:	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Keskiarvo	Huomioitavaa
1	28,030	28,030	28,030	28,030	
2	28,035	28,035	28,035	28,035	
3	28,030	28,030	28,030	28,030	
4	28,030	28,030	28,030	28,030	
5	28,020	28,020	28,020	28,020	
6	28,030	28,030	28,030	28,030	
7	28,030	28,030	28,030	28,030	
8	28,035	28,035	28,035	28,035	
9	28,030	28,030	28,030	28,030	
10	28,030	28,030	28,030	28,030	
11	28,030	28,030	28,030	28,030	
12	28,030	28,030	28,030	28,030	

toleranssissa ei toleranssissa

Valmistuspiirrus-
tuksen mitta ja
toleranssi:

Laakeri:

Pesä:
pesät 1-12 28J7/(+0,012/-0,009) NK20/20-XL neulalaakeri

Karalaatikko taka:

Pesä nro:	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Keskiarvo	Huomioitavaa
1	32,020	32,020	32,020	32,020	
2	32,020	32,020	32,020	32,020	
3	32,020	32,020	32,020	32,020	
4	32,020	32,020	32,020	32,020	
5	32,020	32,020	32,020	32,020	
6	32,015	32,015	32,015	32,015	
7	32,020	32,020	32,020	32,020	
8	32,015	32,015	32,015	32,015	
9	32,020	32,020	32,020	32,020	
10	32,025	32,025	32,025	32,025	
11	32,020	32,020	32,020	32,020	
12	32,020	32,020	32,020	32,020	

toleranssissa ei toleranssissa

Valmistuspiirrus-
tuksen mitta ja
toleranssi:

Laakeri:

Pesä:
Pesät 1-12 32J6(+0,010/-0,006) 7201 viistokuulalaakeri

Liite 4. Karalaatikko numero 27. Aksiaalinen heitto ja vällys

Heitonmittaus:				Aksiaalivällys:		
Akseli nro:	Mittaus 1. irtokara	Mittaus 2. laakereiden varassa	Huomioitavaa	Akseli nro:	Mittaus 1	Huomioitavaa
1	0,000	0,020		1	0,030	
2	0,000	0,030		2	0,020	
3	0,010	0,000		3	0,030	
4	0,000	0,010		4	0,030	
5	0,000	0,020		5	0,100	
6	0,000	0,050		6	0,050	
7	0,000	0,010		7	0,100	
8	0,010	0,060		8	0,040	
9	0,000	0,010		9	0,030	
10	0,010	0,010		10	0,010	
11	0,000	0,010		11	0,080	
12	0,000	0,010		12	0,200	
toleranssissa	ei toleranssissa			toleranssissa	ei toleranssissa	
Sallittu heitto:	0,03			Sallittu vällys:	0,005	