



**LOVIISAN YDINVOIMALAITOKSEN PÄÄKIERTOPUMPUN MOOTTORIN
LINJAUSMENETELMÄN KEHITYS**

DEVELOPMENT OF THE LOVIISA NUCLEAR POWER PLANT MAIN CIRCULATION PUMP MOTOR ALIGNMENT METHOD

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

Markus Salo

Tarkastaja: TkT Kimmo Kerkkänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Markus Salo

Loviisan ydinvoimalaitoksen pääkiertopumpun moottorin linjausmenetelmän kehitys

Kandidaatintyö

2022

44 sivua, 26 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja: TkT Kimmo Kerkkänen

Ohjaaja: Ins Ville Leppänen

Avainsanat: pääkiertopumppu, akselin linjaus, laserlinjaus, Loviisan ydinvoimalaitos

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli analysoimalla ja vertailemalla nykyaikaisia linjauslaitteita ja -menetelmiä löytää pääkiertopumpun moottorin linjaamiseen soveltuvat laitteet ja menetelmät. Loviisan ydinvoimalaitoksella käytössä olevien pääkiertopumppujen rakenteen suunnitteluratkaisut ovat ainutkertaisia. Pääkiertopumppuja ei voida verrata muihin vastaaviin pystyrakenteisiin pumppuihin huollon ja linjauksen osalta. Tutkimuksessa selvitettiin ja suunniteltiin nykyaikaisia linjausmenetelmiä pääkiertopumpun moottorin linjaamiseen yhteistyössä linjauslaitteiden valmistajien ja jälleenmyyjien kanssa. Kandidaatintyöstä saatujen tulosten perusteella löytyi laserlinjauslaite, jota tulisi testata käytännössä ydinvoimalaitoksella. Työn toimeksiantajana toimi Fortum Power and Heat Oy.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Markus Salo

Development of the Loviisa nuclear power plant main circulation pump motor alignment method

Bachelor's thesis

2022

44 pages, 26 figures and 1 table

Examiner: D. Sc. (Tech.) Kimmo Kerkkänen

Supervisor: Eng. Ville Leppänen

Keywords: main circulation pump, shaft alignment, laser alignment, Loviisa nuclear power plant

The aim of this bachelor's thesis was to find suitable equipment and methods for aligning the main circulation pump motor by analyzing and comparing modern alignment equipment and methods. The design solutions for the main circulation pumps used at the Loviisa nuclear power plant are unique. Main circulation pumps cannot be compared to other similar vertical pumps in terms of maintenance and alignment. The study investigated and designed modern alignment methods for aligning the main circulation pump motor in collaboration with alignment equipment manufacturers and resellers. Based on the results of the bachelor's thesis, a laser alignment device was found that should be tested in practice at a nuclear power plant. The work was commissioned by Fortum Power and Heat Oy.

KIITOKSET

Haluan kiittää Fortum Power and Heat Oy:tä mahdollisuudesta mielenkiintoiseen kandidaattityön aiheeseen Loviisan ydinvoimalaitoksella. Kiitokset Loviisaan kaikille työhön osallistuneille henkilöille. Kiitokset myös selvitystyössä mukana olleille yrityksille. Erityiskiitokset Loviisan ydinvoimalaitoksen järjestelmävastaava Ville Leppäselle sekä Lappeenrantaan teknillisen yliopiston tekniikan tohtori Kimmo Kerkkäselle taustatuesta ja rakentavista kommentteista.

Markus Salo

Pyhtäällä 8.3.2022

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

1	Johdanto.....	7
1.1	Tausta	7
1.2	Tutkimusongelma.....	8
1.3	Työn tavoite	9
1.4	Tutkimusmenetelmät ja työn rajaus	10
2	Linjaus osana huoltoa ja kunnossapitoa	11
2.1	Linjauksen tarkoitus	13
2.2	Yleisimmät linjauslaitteet ja -menetelmät.....	14
2.3	Tyypillisimpien linjausvirheiden syyt ja seuraukset.....	15
3	Pääkiertopumput Loviisan ydinvoimalaitoksella	16
3.1	Pääkiertopumpun rakenne ja tehtävä	16
3.1.1	Pumpun ja moottorin laakerointi	18
3.1.2	Pumpun akselin tiivistys	18
3.1.3	Hydrauliset osat	19
3.1.4	Kytkin	20
3.1.5	Sähkömoottori.....	20
3.2	Kunnonvalvonta ja huolto	21
3.2.1	Huollon jaksotus ja toteutus.....	22
3.2.2	Tarkastukset ja huollon jälkeinen kunnonvalvonta	23
3.3	Moottorin linjaus mittakelloilla.....	24
3.3.1	Linjaus pumppuhuollossa	24
3.3.2	Linjaus moottorin vaihdon yhteydessä	25
4	Ratkaisuehdotukset pääkiertopumpun moottorin linjaukseen.....	27
4.1	Linjauslaitteiden valmistajat ja jälleenmyyjät.....	27
4.2	Uudet linjauslaitteet ja -menetelmät.....	28

4.2.1	Pääkiertopumppujen toimittajan näkemys.....	28
4.2.2	Prüftechnik laserlinjaus magneettialalla	30
4.2.3	Easy-Laser linjaus epäkeskeisellä kolmiolevykiinnikkeellä.....	34
4.3	Ratkaisuehdotuksien vertailu	36
5	Yhteenveto.....	40
	Lähteet	42

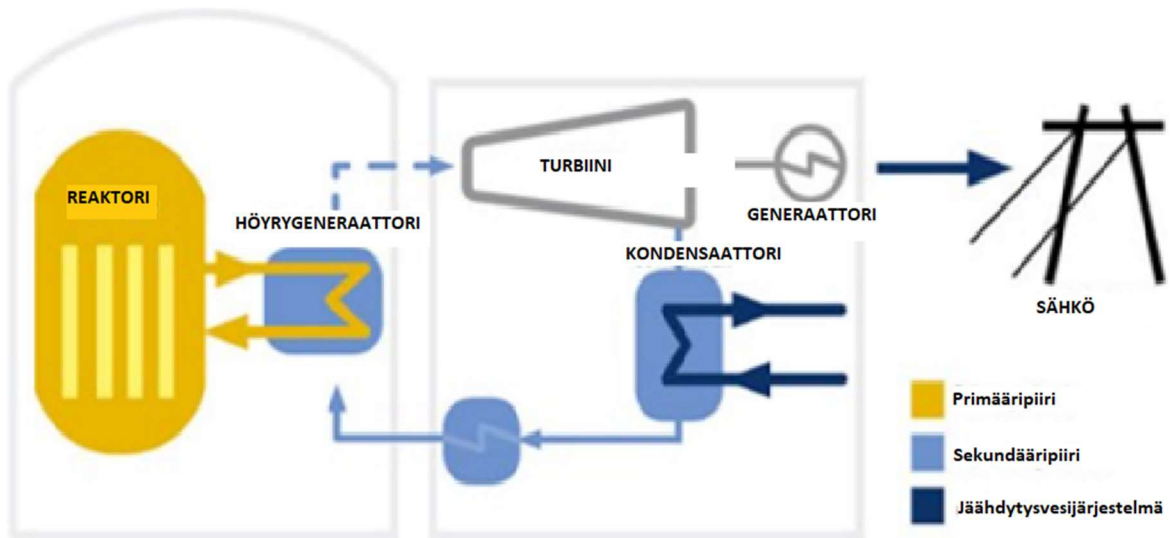
1 Johdanto

Tämä kandidaatintyö on tehty Fortum Power and Heat Oy:n kunnossapidolle liittyen Loviisan ydinvoimalaitoksen pääkiertopumpun moottorin linjausmenetelmän kehittämiseen. Työn tavoitteena on selvittää, löytyykö pääkiertopumppujen moottorin linjaamiseen soveltuvia nykyaikaisia linjauslaitteita ja -menetelmiä maailmalta. Pääkiertopumpun moottoria ei voida linjata tavanomaisin menetelmin pumpun rakenteesta johtuen.

1.1 Tausta

Fortum Power and Heat Oy:n omistama Loviisan ydinvoimalaitos tuottaa vuosittain noin kahdeksan terawattituntia (TWh) sähköä. Loviisan ydinvoimalaitoksella tuotettu sähkön määrä on yli kymmenen prosenttia Suomen sähköntuotannosta. Loviisassa tuotettu sähkö vastaa määrällisesti lähes koko Helsingin, Espoon ja Vantaan kaupunkien sähkönkulutusta. (Fortum Power and Heat Oy 2020.)

Loviisan ydinvoimalaitos koostuu kahdesta laitosesiköstä. Molemmat laitosesiköt Loviisa 1 ja Loviisa 2 käyttävät neuvostoliittolaisvalmisteisia VVER-painevesireaktoreita (STUK 2020). Painevesireaktorit ovat kapasiteetiltaan 507 MW (megawattia). Painevesireaktorit, joissa vallitsee noin 123 bar paine kumentavat reaktorisydämen läpi virtaavan veden noin 300-asteiseksi. Korkean paineen ansiosta vesi ei kiehu, vaan siirtyy nestemäisenä höyrystimille. Höyrystimissä 300 asteinen vesi lämmittää putkien seinämien läpi sekundääripiirin vettä. Sekundääripiirin höyrystynyt vesi virtaa turbiineihin, joissa höyryyn sitoutunut lämpöenergia muuttuu mekaaniseksi energiaksi. Syntynyt mekaaninen energia pyörittää turbiinin akselille kytketyn generaattorin roottoria. Primääripiirin vesi palautuu höyrystimistä pääkiertopumppujen pumppaamana takaisin reaktoriin. Kuvassa 1 primääripiiri on merkitty keltaiseksi ja sekundääripiiri vaaleansiniseksi. (Fortum 2021a.)



Kuva 1. Ydinvoimalaitoksen sähköntuotannon periaate (Fortum 2021a).

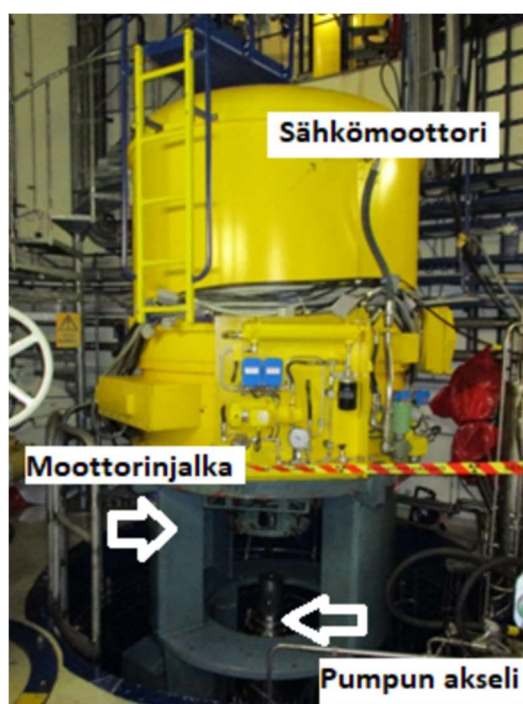
Pääkiertopumppujen huollon yhteydessä tehtävällä linjaustyöllä on suora vaikutus pumpun toimintavarmuuteen. Loviisan ydinvoimalaitoksella on käytössä yhteensä kaksitoista pääkiertopumppua. Molemmissa laitosyksiköissä on näin ollen kuusi pumppua. Pääkiertopumpun moottorin linjaukseen käytetään mittakelloja. Linjausmenetelmä on kehitetty laitoksen rakennusaikana 1970-luvulla pumppujen valmistajan toimesta Karhulan pumpputehtaalla. Uudempien laitteiden tai menetelmien mahdollisuutta tai saatavuutta ei ole aiemmin selvitetty, joten siitä ei löydy aiempia tutkimustuloksia. (Leppänen 2021a.)

1.2 Tutkimusongelma

Tällä hetkellä käytössä olevat pääkiertopumpun moottorin linjauslaitteet ja -menetelmät ovat peräisin ydinvoimalaitoksen rakennusajoilta. Kandidaatin työn toimeksiantajalla on halukkuus selvittää, löytyykö markkinoilta nykyaikaisia laitteita, jotka voisivat nopeuttaa linjaustyön vaiheita ja parantaa luotettavuutta. Pääkiertopumpun akseli on laakeroitu yhdellä liukulaakerilla, jolloin pumpun akseliin kohdistuvat radiaali- ja aksiaalivoimat siirtyvät moottorin kuormitukseksi (Väänänen 2021, 17). Tämä saattaa aiheuttaa nykyaikaisten linjauslaitteiden saatavuudelle ja soveltuvuudelle haasteita.

1.3 Työn tavoite

Kandidaatin työn tavoitteena on analysoimalla ja vertailemalla nykyaikaisia linjauslaitteita ja -menetelmiä löytää sopivat laitteet ja menetelmät pääkiertopumpun moottorin linjaukseen. Alla olevassa kuvassa 2 on esitetty yksi Loviisan ydinvoimalaitoksella käytössä oleva pääkiertopumppu ja sähkömoottori, jonka akselien linjauksessa tässä työssä saatuja tietoja tullaan mahdollisesti hyödyntämään.



Kuva 2. Pääkiertopumppu ja moottori kuvattuna asennuspaikalla Loviisan vuosihuollossa 2021.

Työn tutkimuskysymyksinä on:

- Miksi Loviisan ydinvoimalaitoksen pääkiertopumpun moottorin linjauslaite ja menetelmä halutaan modernisoida?
- Miksi tavallisimmat nykyaikaiset linjauslaitteet eivät sovellu Loviisan ydinvoimalaitoksella käytössä olevien primääripiirin pystysuuntaisten keskipakopumppujen linjaustyöhön?

- Millainen laite ja menetelmä toimisi pääkiertopumpun moottorin linjaustöissä Loviisan ydinvoimalaitoksella?

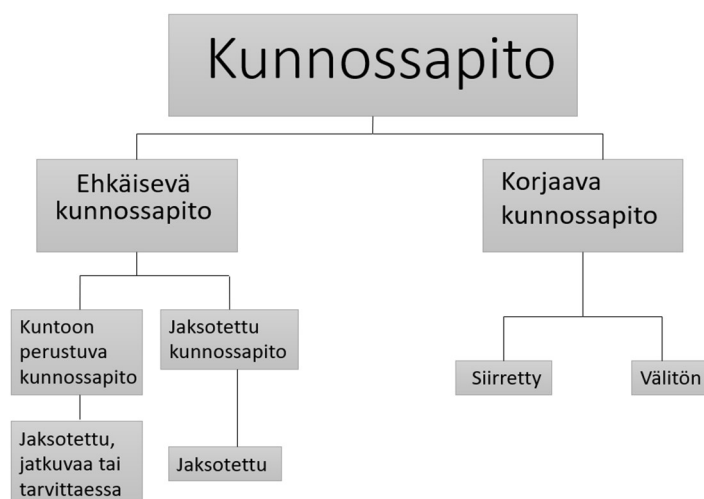
1.4 Tutkimusmenetelmät ja työn rajaus

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan nykyaikaisten linjauslaitteiden ja -menetelmien soveltuvuutta pääkiertopumpun moottorin linjaamiseen. Tutkimusmenetelminä käytetään kirjallisuusselvitystä sekä asiantuntijoiden haastatteluja. Kirjallisuusselvityksen pohjalta työssä esitellään akselien linjaus ja pääkiertopumput. Asiantuntijahaastatteluja toteutetaan linjauslaitteyritysten, pumppujen valmistajan sekä Loviisan ydinvoimalaitoksen henkilöstön kanssa sähköpostin, Microsoft Teams -sovelluksen ja puhelimen välityksellä. Nykyaikaisten laitteiden ja menetelmien kartoitus aloitetaan lähettämällä linjauslaitteita jälleenmyyville yrityksille sähköpostikysely halukkuudesta osallistua tutkimukseen. Sähköpostiin liitetään dokumentti, joka sisältää kuvauksen käyttökohteesta. Yrityksillä ei ole mahdollisuutta vieraillla Loviisan ydinvoimalaitoksella tutustumassa pääkiertopumppuihin. Pumput sijaitsevat reaktorihallin tilassa, jossa oleskelua on vältettävä laitoksen käyntijakson aikana säteilystä johtuen.

Työssä käytetään tutkimustapana tapaustutkimusta eli case-tutkimusta, jossa linjausta tarkastellaan ensisijaisesti pääkiertopumppujen linjaustöiden näkökulmasta. Pääkiertopumppujen rakenteesta johtuen linjausta ei voida suorittaa, kuten tavallisimpien pumppujen ja moottorien linjausta. Nämä on rajattu työn ulkopuolelle.

2 Linjaus osana huoltoa ja kunnossapitoa

Kunnossapidon tehtävänä on huolehtia koneiden ja laitteiden toimintakunnosta siten, että tuotanto on tehokasta, laadukasta, turvallista ja ympäristöä säästävää (Ansaharju 2009, 298). Kunnossapito on huoltoa, ennakointia ja jatkuvaa kehitystyötä. Huoltotyöt nopeutuvat ja helpottuvat asianmukaisilla työkaluilla. Ennakointia voidaan tehdä esimerkiksi resurssoinnin osalta etäluettavien kunnonvalvontaleiden avulla. Jatkuvalle kehitystyölle, kuten oikein suoritettulla laitteiden linjaamisella vähennetään laiterikkoja. (YTM-Industrial a.) Kunnossapito voidaan luokitella monella eri tavalla (Ansaharju 2009, 299). Kuvassa 3 on esitettyä kunnossapidon luokittelu standardiin SFS-EN 13306 perustuen.



Kuva 3. Kunnossapito strategioiden luokittelu (Järviö 2006, 43).

Ehkäisevää kunnossapitoa suoritetaan säännöllisin väliajoin. Ehkäisevän kunnossapidon aikana laitteet ovat poissa käytöstä huoltotyön ajan. (Kaartinen 2016, 11.) Standardin SFS-EN 13306 mukaan ehkäisevän kunnossapidon tavoitteena on vähentää laitteen rikkoutumisen mahdollisuutta huolehtimalla sen toimintakyvystä (Järviö 2006, 47). Pumppujen ennaltaehkäisevään huoltoon kuuluu muun muassa laakereiden voitelusta huolehtiminen sekä

lämpötilan, äänien ja värähtelyn tarkkailu. Ennaltaehkäisevään huoltoon kuuluu myös akseliivisteiden sekä pumpun putkistojen ja kiinnitysten seuranta. (Huhtinen 2013, 153.)

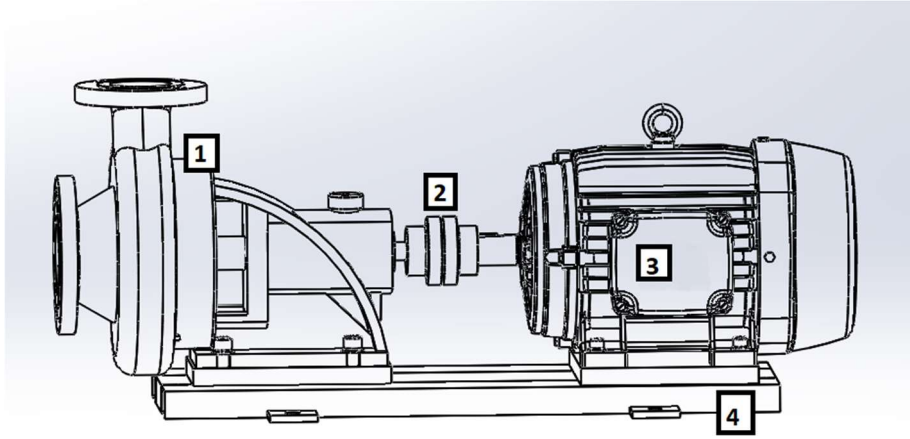
Ennakoiva kunnossapito perustuu kuntoon ja sen tarkoituksena on pitää laite koko ajan käytettävissä (Kaartinen 2016, 11). Ennakoiva huolto on tehokas tapa vähentää kunnossapidon käyttökustannuksia (Sulzer 2021). Ennakoivassa kunnossapidossa laitteen suorituskyvyn heikkenemiseen vaikuttavia tekijöitä havainnoidaan ja analysoidaan jatkuvasti kunnonvalvontamittauksilla (Järviö 2006, 47).

Kunnonvalvontamittaukset voidaan luokitella aistinvaraisiin tarkastuksiin, värähtely- ja äänimittauksiin sekä erilaisiin analyysihin ja perussuureisiin perustuviin mittauksiin. Aistihavainnot antavat laitteen kunnosta yleiskuvan. Kokenut asentaja voi esimerkiksi havaita kuuluneen laakerin tai hammaspyörän koneen poikkeavan äänen perusteella. Värähtely- ja äänimittauksilla voidaan todeta tarkemmin vaurioiden suuruus ja tyyppi. Fysikaalisia ja sähköisiä perussuureita voidaan mitata erilaisilla antureilla, joiden avulla voidaan havaita esimerkiksi lämpötilan tai tehon muutos. (Ansaharju 2009, 303.)

Korjaava kunnossapito perustuu tarpeeseen (Kaartinen 2016, 11). Toimintakunnon palauttavat huoltotoimenpiteet tehdään vian havaitsemisen seurauksena (Järviö 2016, 47). Vika voidaan havaita esimerkiksi ylimääräisinä ääminä, koneen kuumenemisena tai pysähtymisenä (ABB 2000-07).

Huollon tarkoituksena on varmistaa koneiden ja laitteiden toiminta konkreettisesti (Ansaharju 2009, 307). Huollon yhteydessä pumpun, moottorin tai muun laitteen ollessa irrotettuna tulee moottori ja käyttölaite linjata (Zener 2021). Linjauksen tavoitteena on, että pumpun, moottorin tai muun laitteen akselit ovat yhdensuuntaiset ja samankeskiset (Ansaharju 2009, 228). Linjaustyöllä voidaan välttää tai vähentää ennakoimattomia toiminnan pysäytyksiä (Zener 2021).

Yksi yleisimpiä linjaustöitä on pumpun ja moottorin linjaaminen vaakatasoon. Tällöin pumppu ja moottori ovat kiinnitetty yhteiseen tukirakenteeseen kuvan 4 mukaisesti. Kuvassa 1. keskipakopumppu, 2. kytkin, 3. sähkömoottori ja 4. runko.



Kuva 4. Vaakatasoon linjattu keskipakopumppu ja sähkömoottori. (GrabCAD 2012.)

Sähkömoottori on laite, joka muuttaa sähköenergian liike-energiaksi (Motiva 2020). Sähkömoottorin akselilta teho välittyy pumpun akselille kytkimen välityksellä (Ansaharju 2009, 11). Pumppu on laite, joka saa nesteen liikkumaan ja synnyttää linjastoon paine-eroa (Ryti 1976, 361).

2.1 Linjauksen tarkoitus

Linjauksella saavutetaan koneen parempi käytettävyys, joka lisää tuottavuutta ja tuotantovarmuutta (Easy-Laser 2020a). Lähes kaikessa mitä ympäriltämme löytyy, on jonkinlainen pyörivä koneisto, joka on linjattu. Linjaustyön ensisijainen päätavoite on pidentää pyörivien koneiden ja laitteiden käyttöikää. Tavoitteen saavuttamiseksi koneiden komponentit tulee olla asennettuna, linjattuna ja säädettyinä suunniteltuihin toiminta-arvoihin. Pyörivien koneiden ja laitteiden akselien linjaustyöllä vaikutetaan koneen tai laitteen sisällä olevien komponenttien toimintaan ja kestävyys. Oikein suoritettu linjaus vähentää muun muassa laakereihin kohdistuvia aksiaalisia sekä radiaalisia voimia mahdollistaen pidemmän käyttöiän ja vakaan toiminnan dynaamisissa käyttöolosuhteissa. (Piotrowski 2007, 1–5.)

2.2 Yleisimmät linjauslaitteet ja -menetelmät

Linjauksessa mitataan akselien poikkeamia ja mitattujen arvojen pohjalta tehdään tarvittavat säädöt. Onnistunut linjaus edellyttää soveltuvia työkaluja ja osaavaa henkilöstöä. Akselien linjaustyötä aloittaessa pöytäkirjaan kirjataan tiedot kohdistuslaitteesta ja tehdään alustavat tarkastukset ennen varsinaisen työn aloittamista. (Piotrowski 2007, 15–19.) Linjauksessa käytettävät mittalaitteet jaetaan mekaanisiin ja elektronisiin mittalaitteisiin. Yleisimmin käytetty mekaaninen mittalaite on mittakello ja elektronisista mittalaitteista laserlinjauslaite. (Piotrowski 2007, 220–245.)

Mittakelloilla linjatessa linjattavaa akselia pyöritetään ja mittakellon antamat poikkeaman arvot luetaan mittakelloista. Mittakellon näyttämät lukemat kirjataan ylös ja tehdään tarvittavat moottorin asemoinnin muutokset, jotta päästään haluttuihin arvoihin (Zener 2021.)

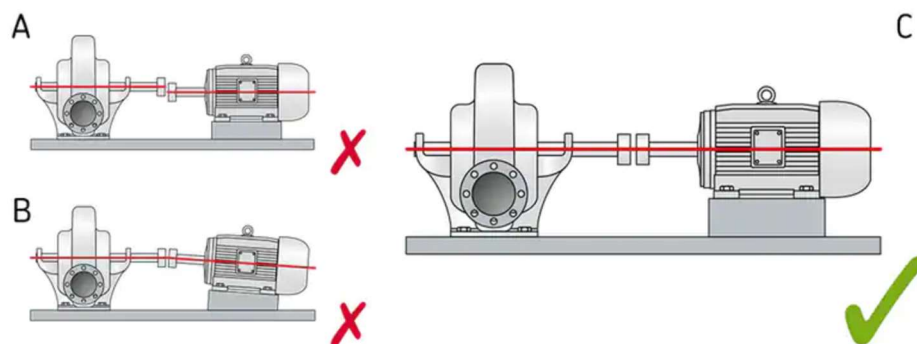
Laserlinjauslaitteet soveltuvat pysty- ja vaakatasossa olevien koneiden akselin linjaukseen, nivelakselin linjaukseen sekä usean peräkkäisen koneen linjaukseen (Zener 2021). Laserlinjauksessa käytetään kahta laserlähetintä, joista toinen asennetaan moottorin akselille ja toinen pumpun akselille (kuva 5). Laserlähettimet synkronoidaan keskenään, jolloin saadaan mitattua poikkeamien arvot. Poikkeamien ylittäessä sallitut rajat tehdään tarvittavat moottorin asemoinnin muutokset. Laserlinjaus sopii erityisesti esimerkiksi pumpun ja moottorin vaakatasoon linjaamiseen. (Easy-Laser 2020b.)



Kuva 5. Pumpun ja moottorin vaakatasoon linjaus laserlaitteella (YTM-Industrial b).

2.3 Tyypillisimpien linjausvirheiden syyt ja seuraukset

Akselien linjausvirheistä aiheutuu jopa puolet kaikista pyörievien koneiden rikkoutumiseen liittyvistä kustannuksista. Tarkan ja oikein suoritettuna akselin linjauksen merkitys korostuu nykypäivän haastavissa ympäristöissä ja olosuhteissa, joissa kustannuksia pyritään pienentämään ja resursseja optimoimaan. (SKF.) Linjausvirheet heikentävät laakereiden, tiivisteiden, kytkinten ja hihnojen toimintaa aiheuttaen kasvavia kuormituksia ja tärinää. Linjausvirheet vaikuttavat huomattavasti laitteen energiankulutukseen ja kunnossapitokustannuksiin. (Zener 2021.) Kuvassa 6. on esitetty tyypillisimpiä linjausvirheitä sekä onnistunut linjaus.



Kuva 6. Vasemmalla kuvassa A ja B on esitetty epäkeskeisyysvirhe ja kulmavirhe. Oikealla kuvassa C onnistunut linjaus. (SKF.)

Epäkeskeisyysvirhe syntyy, kun akselit ovat yhdensuuntaiset, mutta eivät kohtaa toisiaan kytkimellä. Kulmavirhe syntyy linjauksessa, kun pumpun ja moottorin akselit eivät ole yhdensuuntaiset ja akselien keskilinjat ovat eri kulmissa toisiinsa nähden. (Zener 2021.)

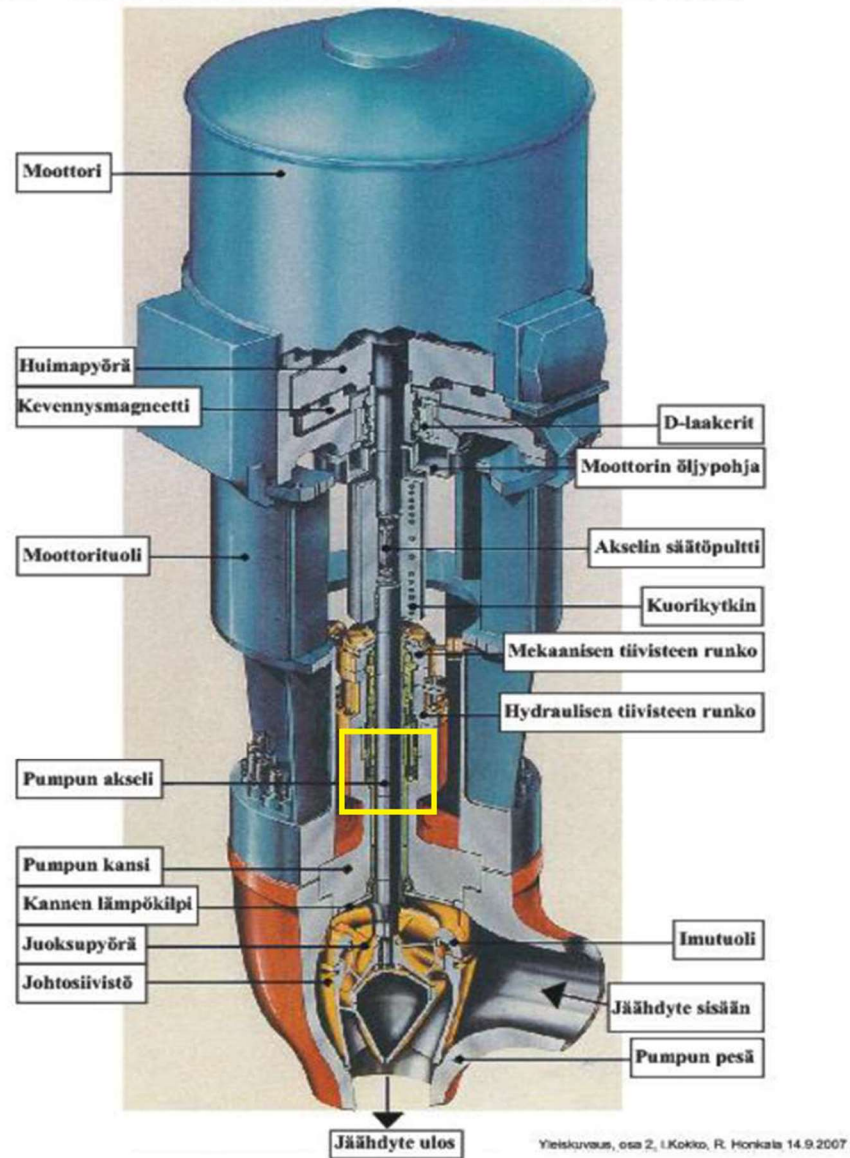
3 Pääkiertopumput Loviisan ydinvoimalaitoksella

Loviisan ydinvoimalaitoksella käytössä olevien pääkiertopumppujen suunnitteluratkaisut ovat ainutkertaisia, joten niitä ei voida verrata muihin vastaaviin pystyrakenteisiin pumppuihin huollon tai linjauksen osalta. Pumput ovat Ahlströmin (nyk. Sulzer Pumps Finland Oy) Loviisan ydinvoimalaitokselle toimittamia pystyrakenteisia keskipakopumppuja. (Nevander ym. 2003, 9.)

3.1 Pääkiertopumpun rakenne ja tehtävä

Pumppu ja moottori yhdistyvät toisiinsa moottorituolin avulla kuvan 9. mukaisesti. Sähkömoottorin pyörimisliike 1475 r/min välittyy kuorikytkimen välityksellä pumpun akselille ja pumpun pesässä olevalle juoksupyörälle. (Räisänen 2017a.) Linjaustyöhön oleellisesti vaikuttava pumpun akselin laakerituenta on merkitty keltaisella kuvaan 7.

YD PÄÄKIERTOPUMPPU JA MOOTTORI



Kuva 7. Pääkiertopumpun ja moottorin rakenne (Räisänen 2017a).

Pääkiertopumppujen tehtävä on ylläpitää kiertojärjestelmässä primäärijäähdytteen virtausta siirtämällä höyrystimeltä palaava vesi reaktoriin. Pumppujen tuottamalla paine-erolla ylläpidetään lisäksi primääripiirin veden puhdistuskiertoa sekä paineistimen ruiskutusveden syöttöä. (Räisänen 2017a.)

3.1.1 Pumpun ja moottorin laakerointi

Pääkiertopumpun akseli on laakeroitu yhdellä hydrodynaamisella vesivoidellulla liukuradiaalilaakerilla (Väänänen 2021, 17). Pumpun akselin laakeroinnista johtuen pumpun akseli pääsee liikkumaan linjausvaiheessa vapaasti. Moottorin linjaus suoritetaan pumpun laakeripesästä myöhemmin luvussa 3.3.1 kuvatulla tavalla. (Leppänen 2021a.) Pumpun akselin laakeroinnin kohdalla voidaan puhua niin sanotusta kelluvasta rakenteesta, joka tekee siitä ainutkertaisen.

Pumppuun kohdistuvat radiaali- ja aksiaalivoimat siirtyvät moottorin kannettaviksi (Honkala 2009a, 12). Pääkiertopumpun moottori on laakeroitu kolmella laakerilla. Moottorin yläosassa on yksirivinen rullalaakeri ja alaosassa kaksi viistokuulalaakeria. Yläosan yksirivisen ohjauslaakerin tehtävänä on ottaa vastaan moottoriin kohdistuvia radiaalivoimia (Honkala 2009b, 13.) Pumpun käydessä moottorin alaosan ylempi laakeri ottaa vastaan radiaalivoimat ja ylöspäin suuntautuvat aksiaalivoimat. Alempi laakeri ottaa vastaan alaspäin suuntautuvat aksiaalivoimat. (Väänänen 2021, 20.)

3.1.2 Pumpun akselin tiivistys

Pumpun akselin läpimenoaukossa tulee olla tiivistys, joka estää nesteen vuodon pumpusta ja ilman tunkeutumisen pumppuun. Pumpun pesään on jätettävä riittävä väly akselin läpimeno-alle, jotta akselin pyöriessä ei synny kiinnileikkausta tai hankausta. (Wirzenius 1978, 207.)

Pääkiertopumpuilla primääripiirin veden virtaus pumpusta huonetilaan on estetty sekä hydraulisella tiivisteellä että mekaanisella tiivisteellä. Pääkiertopumpussa on kaksi hydraulista tiivistettä peräkkäin ja niiden välillä on jatkuvan tiivisteveden virtauksen ansiosta tiivistävä vesifilmi. Hydraulisten tiivisteiden tehtävänä on pudottaa veden painetta. Mekaaninen tiiviste on hiilirengastiiviste, jonka tehtävänä on ohjata hydraulisten tiivisteiden läpi virrannut tiivistevesi vuotolinjaan. (Väänänen 2021, 14–16.)

3.1.3 Hydrauliset osat

Pääkiertopumpun pesä on sylinterinmuotoinen ja pallopohjainen. Pesä on valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Pesä tiivistetään kannella, joka kiristetään pesän ylätasoon tiiviste-pintaa vasten. Pumpun kansi toimii pumpun laakeripesänä sekä tiivisteyksikön kiinnitys- ja tukirakennelmana. Kansi kiristetään pesään moottorituolin välityksellä käyttäen kahta grafiittimetallitiivistettä. Tiivisteiden välissä on kannen ylätasolle johtava vuodonvalvontaporaus, joka saa vuotolinjassa sijaitsevan painekytkimen hälyttämään tarvittaessa korkeasta paineesta. Kannen alla pesässä vallitsee primääripiirin lämpötila ja paine. Kannen alapintaan kiinnitetty lämpökilpi suojaa kantta primäärijäähdytteen nopeissa lämpötilan muutoksissa.

Pumpun akselin alapäähän on kiinnitetty juoksupyörä ja yläpää on kytkimen välityksellä yhdistetty moottorin akseliin. Akselin suurin halkaisija on 200 mm ja pituus 2190 mm. Se on taottu yhtenä kappaleena ja materiaalina on martensiittinen ruostumaton teräs. Akseli on varustettu tarpeellisilla kiilaurilla, ulokkeilla ja kierteillä, jotta laakerit ja tiivisteet voidaan kiinnittää ja irrottaa avaamatta pumpun kantta.

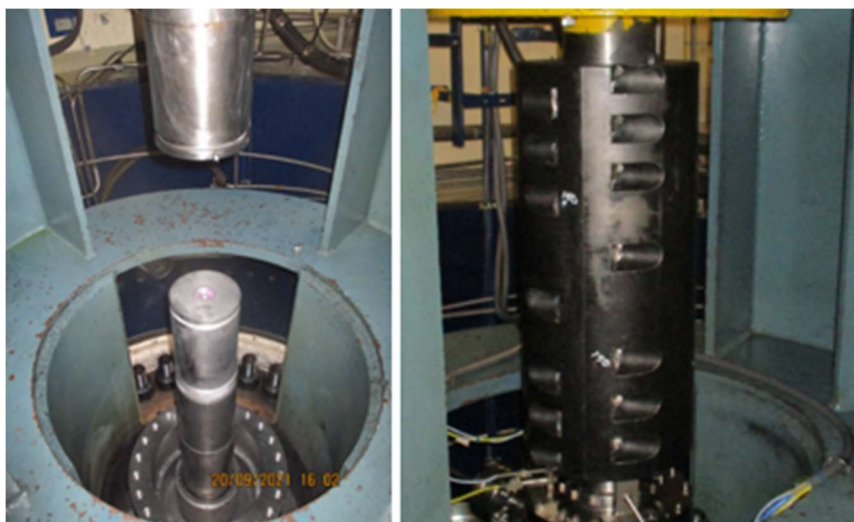
Pääkiertopumpun juoksupyörä on yksivaiheinen ja neljä siipinen diagonaalityyppinen juoksupyörä. Johtosiivistö on diagonaalityyppinen siivistö, jossa on seitsemän siipeä. Hyvän hyötysuhteen saavuttamiseksi sisäiset vuotovirtaukset on minimoitu tiivistyksen ja mahdollisimman pienten välysten avulla. (Väänänen 2021, 12–14.)

Pystysuuntaisessa keskipakopumpussa nesteen virtaus kulkee pääsääntöisesti akselinsuuntaisesti alhaalta ylöspäin (Wirzenius 1978, 47–55). Pääkiertopumpussa primääripiirin jäähdytteen virtaus tulee höyrystimiltä pumpun pesään radiaalisuunnassa imupaineen ollessa noin 120 bar. Imutuoli ohjaa jäähdytteen poistumaan pesän pohjasta akselinsuuntaisesti juoksupyörälle. Juoksupyörä muuttaa sähkömoottorin pyörimisenergian jäähdytteen liike-energiaksi, jolloin jäähdyte virtaa johtosiivistölle. (Räisänen 2017a.) Johtosiivistön tehtävänä on muuttaa juoksupyörän tuottama liike-energia paine-energiaksi, jonka avulla jäähdyte saadaan kiertämään primääripiirissä (Väänänen 2021, 12–14). Jäähdyte poistuu

pumpusta kiertopiiriin noin 4,3 bar imupainetta korkeammassa paineessa synnyttäen noin 1400 kg/s virtauksen (Räisänen 2017a).

3.1.4 Kytkin

Pumpun ja moottorin akselit yhdistetään toisiinsa kuorikytkimen välityksellä kuvan 8 mukaisesti. Kuorikytkimen kytkinpuolikkaissa olevat ulokerenkaat vastaavat akselin uriin. Akselien päiden välinen etäisyys säädetään säätöruuvilla. Moottorin linjausta ei voida suorittaa kuorikytkimen asennuksen jälkeen. Kuorikytkin huolehtii itsessään linjauksen säilymisestä pumpun käynnin aikana. (Honkala 2009a, 32.)

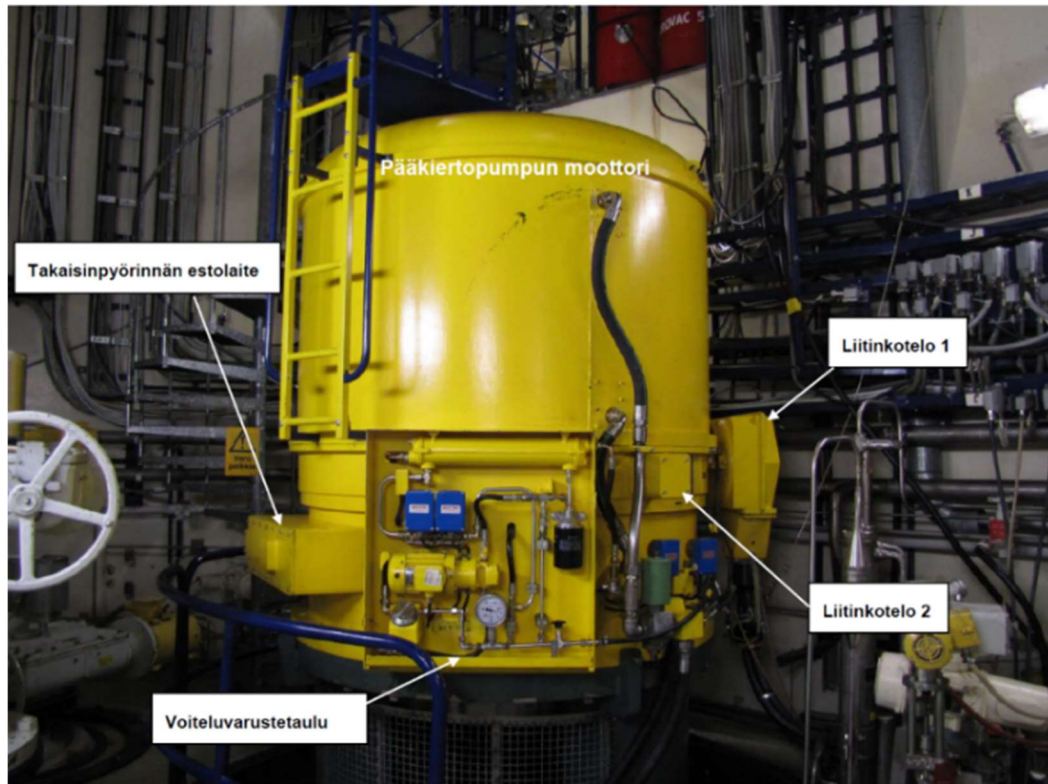


Kuva 8. Kuorikytkin yhdistää moottorin ja pumpun akselit yhdeksi kiinteäksi kokonaisuudeksi. Kuvat on otettu Loviisan vuosihuollossa 2021.

3.1.5 Sähkömoottori

Pääkiertopumpun moottorin tehtävänä on muuttaa sähköenergia pumpun mekaaniseksi pyörimisenergiaksi. Kuvan 9 mukaiset moottorit ovat suunniteltu yksilöllisesti Loviisan voimalaitokselle vaativiin ja luotettavuutta edellyttäviin käyttöolosuhteisiin. (Honkala 2009b, 1.) Pääkiertopumpun moottori on pystysuora kolmivaiheinen oikosulkumoottori, joka rakentuu

seuraavista komponenteista: staattori, roottori, vauhtipyörä, jäähdytysjärjestelmä, laakerit, voitelujärjestelmä, kevennysmagneetti ja takaisinpyörinnän estolaite (Väänänen 2021, 19).



Kuva 9. Pääkiertopumpun sähkömoottori (Räisänen 2017b).

Oikosulkumoottori toimii vaihtovirralla, jolloin staattoriin muodostuu roottorin ympärillä pyörivä magneettikenttä. Magneettikenttä muodostaa roottorin käämeihin virran, jolloin magnetoitunut roottori seuraa staattorin pyörivää magneettivuota. (Motiva 2020.)

3.2 Kunnonvalvonta ja huolto

Kunnonvalvontajärjestelmän avulla seurataan laitteiden käynnin aikaista toimintaa ja pyritään ehkäisemään laitteiden ja apujärjestelmien vikaantuminen. Laitteille voidaan asettaa raja-arvot, joiden ylittyessä järjestelmä aiheuttaa automaattisen hälytyksen poikkeavasta arvosta. Toimivan kunnonvalvonnan pohjalta voidaan ennakoida ja jaksottaa tulevia huolto-toimenpiteitä. (Ansaharju 2009, 302–304.)

Loviisan ydinvoimalaitoksella huoltotoimenpiteet, joita ei voida suorittaa käyntijakson aikana suoritetaan, kun reaktorit pysäytetään kerran vuodessa vuosihuollon ajaksi. Laitosyksiköt huolletaan vuorotellen, jolloin toisen yksikön sähkön tuotanto pysyy käynnissä. Jokaisen vuosihuollon aikana suoritetaan lataus, jolloin noin neljäsosa polttoainepuista vaihdetaan. Kahdeksan vuoden välein suoritetaan laaja vuosihuolto, jolloin tarkistetaan muun muassa reaktorin paineastian kokonaisuus. (Fortum 2021b.)

Säteilyturvakeskus STUK valvoo Suomessa ydinenergilakiin (990/87) perustuen ydinvoimalaitoksia, ydinmateriaaleja ja ydinjätteitä (STUK 2021). Yksityiskohtaiset tarkastusvaatimukset ja ajan tasalla olevan säännösten mukainen tarkastustoiminta näkyvät Loviisan voimalaitoksella myös pääkiertopumppujen huollossa.

3.2.1 Huollon jaksotus ja toteutus

Vuosihuollon yhteydessä huolletaan kaksi pääkiertopumppua laitosyksikköä kohden eli yhteensä neljä pumppua. Huoltotoimenpiteet perustuvat pumppujen valmistajan laatimaan alkuperäisohjeeseen. Pumppujen huoltoväli on kolme vuotta. Huoltojaksoa voidaan muuttaa tarvittaessa kunnostuksien ja vikakorjausten osalta. (Leppänen 2019, 5.)

Loviisan ydinvoimalaitoksella on käytössä kunnossapito-ohjelma, jonka tarkoituksena on ylläpitää laitteiden käytettävyyttä sekä tunnistaa laitteiden alkavia vaurioita ennen kuin ne kehittyvät toiminnallisesti kriittiselle tasolle. Kunnossapito-ohjelma sisältää luokittelun eri kunnossapitostrategioille. Loviisan ydinvoimalaitoksella laitteet on jaoteltu neljään eri kriittisyysluokkaan. Kriittisimmät laitteet kuten muun muassa pääkiertopumput kuuluvat luokkaan yksi (Lomax). Luokkaan yksi kuuluvia laitteita on laitoksella noin 0,5 % kaikista laitteista. Tällaiset laitteet ovat turvallisuuden ja tuotannon näkökulmasta kaikkein kriittisimpiä laitteita, joiden vikaantuminen voi johtaa merkittäviin tuotannollisiin menetyksiin. Kriittisyysluokittelun pohjalta valitaan kullekin laitteelle optimaalinen kunnossapitostrategia ja kunnossapitotehtävät. (Kaartinen 2016, 6–8.)

3.2.2 Tarkastukset ja huollon jälkeinen kunnonvalvonta

Pääkiertopumpuille on laadittu tarkastusohjelmat, joiden mukaan tehdään tarkastukset huolto- ja korjaustöiden yhteydessä. Tarkastettavat komponentit riippuvat tehdäänkö hydraulisen yksikön asennus, vuotavan kansitiivisteen vaihto, akselitiivisteen vaihto vai moottorin irrotus ja uudelleen asennus. Pääkiertopumpun huollon yhteydessä STUK:n tarkastajalle esitetään pumpun hydraulinen yksikkö purettuna sekä pumppu asennettuna pesään. (Tuomi 2020, 4–6.)

Pumpun, moottorin tai muun laitteen huollon tai asennuksen jälkeen on suoritettava koekäyttö ennen varsinaista käyttöönottoa. Koekäytöllä tarkistetaan laitteen toimivuus halutulla tavalla. Koekäytössä voi tulla esille poikkeavia ääniä ja värinöitä. (Ansaharju 2009, 309–310.) Voidaankin sanoa koekäytön olevan laitteen asennuksen jälkeinen vaihe, jossa esimerkiksi mahdollinen akselien linjausvirhe voi paljastua. Laitoksen ylös ajossa pääkiertopumppujen toiminnan varmistamiseksi analysoidaan tiivisteparametrit ja pumppujen värähtelyt Online mittauksina. Käyttöönoton jälkeen suoritetaan yhden kuukauden pituinen seuranta-jakso värähtelyistä, jonka tulokset toimitetaan STUK:lle muun vuosihuoltoreportoinnin yhteydessä. (Tuomi 2020, 6.)

Pääkiertopumppujen prosessiparametrien seuranta suoritetaan jatkuvina online mittauksina paineiden, lämpötilojen ja virtauksien osalta. Prosessiparametrien poiketessa sallituista raja-arvoista syntyy hälytys valvomon prosessitietokonejärjestelmässä. Kriittisimpien parametrien poiketessa raja-arvoista tapahtuu automatisoitu pumpun pysäytys laitteiden suojaamiseksi. (Holmsten & Taberman 2019, 21.)

Pääkiertopumppujen värähtelyjä seurataan päivittäin kiinteän kunnonvalvontajärjestelmän avulla. Kunnonvalvontajärjestelmän hälytysten lisäksi seurataan akselin aseman trendejä ja värähtelyn kokonaistasoa. Järjestelmä koostuu kiihtyvyy- ja akselivärähtelyantureista, siirtymä- ja venymämittausantureista, valvontakaapista ja tiedonkeruuyksiköstä sekä serveleistä ja päätteistä, joiden avulla kerättyä dataa voidaan tarkastella tietokoneohjelman avulla.

Kunnonvalvontajärjestelmän ilmoittamat mahdolliset hälytykset selvitetään ja raportoidaan kunnossapidon vastuuhenkilöille. Jatkuvan seurannan lisäksi värähtelyjä analysoidaan tarkemmin muutaman kerran vuodessa. (Varis 2019a, 7.) Pääkiertopumpulle on asetettu akseli- ja laakerivärähtelyjen mukaan hälytys- ja pysäyttämismääräykset. Pumpussa sekä moottorissa on sijoitettuna x-, y- ja z-suuntien akseli- ja laakerivärähtelyjä mittaavat anturit. (Varis 2019b.)

3.3 Moottorin linjaus mittakelloilla

Pääkiertopumpun moottorin linjaukseen käytetään tällä hetkellä kahta erilaista laitetta ja menetelmää. Laitteen ja menetelmän valintaan vaikuttaa suoritetaanko moottorin linjaus pumppuhuollon yhteydessä vai moottorin vaihdon yhteydessä. (Leppänen 2021a.)

3.3.1 Linjaus pumppuhuollossa

Pumppuhuollossa moottori linjataan aksiaali- ja säteissuunnassa puretun pumpun avoimesta laakeripesästä. Moottorin linjaus aloitetaan laskemalla moottori pumpulle nosturin avulla (kuva 10). Tämän jälkeen moottorin akselille kiinnitetään mittalaite.



Kuva 10. Pumppuhuollossa suoritettava linjaus nykymenetelmällä. Kuvat on otettu Loviisan vuosihuollossa 2021.

Moottorin asemointi tarkistetaan pumpun kannen keskireiästä moottorin akselia pyörittämällä. Säteis- ja aksiaalipoikkeamien lukemat kirjataan mittauspöytäkirjaan 45 asteen välein. Laitevalmistajan ilmoittamien toleranssien mukaan sallituille poikkeamille on määritetty maksimiarvot. Poikkeamat minimoidaan siirtämällä moottoria tarvittaessa siirtoruuvien avulla. Pumpun akseli asemoituu tiivistepesän keskiöön tiivisteiden ja kytkimen asennuksen yhteydessä. (Leppänen 2019, 14–21.)

3.3.2 Linjaus moottorin vaihdon yhteydessä

Vuosihuollossa suoritetaan moottorin vaihto, kun moottorissa havaitaan vika käyntijakson aikana. Moottorin vaihto tehdään myös, kun moottorin määräaikaishuolto ei ole ajoittunut samaan huoltoajankohtaan pumpun huoltojaksotuksen kanssa. Pääkiertopumpun moottorin huoltoväli on yhdeksän vuotta. (Leppänen 2021b.) Tällöin pumppuun ei suoriteta huoltotoimenpiteitä, joten moottorin linjaus suoritetaan STENMÜLLER suuntauslaitteen avulla. Irrotettavan moottorin akselin asemointi määritellään kahdeksalla mittakellolla ennen sen irrotusta. Käytettävä linjauslaite on esitetty kuvassa 11. (Leppänen 2019, 21.)



Kuva 11. STENMULLER moottorin linjauslaite. Kuva on otettu Loviisan vuosihuollossa 2021.

Moottorin akselia pyöritetään pyörityslaitteen avulla pyörimissuuntaan ja merkitään mittakellojen lukemat pöytäkirjaan 90 asteen välein. Säteis- ja aksiaalipoikkeamien maksimi-arvot on määritetty laitevalmistajan ilmoittamien toleranssien mukaan. Uusi moottori pyritään asettamaan samaan kohtaan kuin irrotettu moottori. (Leppänen 2019, 21.)

4 Ratkaisuehdotukset pääkiertopumpun moottorin linjaukseen

Kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, löytyykö Loviisan ydinvoimalaitoksen pääkiertopumppujen moottorin linjaamiseen nykyaikaisia linjauslaitteita ja -menetelmiä maailmalta. Nykyaikaisten linjauslaitteiden ja -menetelmien oletetaan parantavan pääkiertopumpun moottorin linjaustyön luotettavuutta ja sujuvuutta. Lisäksi nykyaikaisemmilla linjauslaitteilla toivotaan linjaustyön toistettavuuden ja poikkeamien dokumentoinnin helpottuvan. Linjauslaitteiden valmistajien ja -jälleenmyyjien verkkosivujen mukaan laserlinjauslaitteet ovat helppokäyttöisiä, linjaustyötä nopeuttavia ja luotettavuutta lisääviä. Perinteisen mittakellojärjestelmän linjaustarkkuus on laitteen valmistajasta riippumatta 0,01 mm ja nykyaikaisilla laserlinjauslaitteilla päästään 0,001 mm tarkkuuteen (Nome 2021). Pääkiertopumpun moottorin linjauksessa perinteisen mittakellojärjestelmän tarkkuus on riittävä, mutta laserlinjaus mahdollisesti lisää linjauksen luotettavuutta ja sujuvuutta.

4.1 Linjauslaitteiden valmistajat ja jälleenmyyjät

Laserlinjauslaitteita valmistavat muun muassa Easy-Laser ja Prüftechnik. Easy-Laser toimii Ruotsin Mölndalissa ja heillä on yli 25 vuoden kokemus lasermittaustekniikoista. (Easy-Laser 2022.) Prüftechnik on saksalainen 1972 perustettu yritys, joka kehitti maailman ensimmäisen laserlinjauslaitteen 80-luvulla. Prüftechnik tarjoaa asiakkailleen innovatiivisia ratkaisuja koneiden linjaukseen sekä kunnonvalvontaan. (Prüftechnik 2020.)

Easy-Laserin yhtenä jälleenmyyjänä Suomessa toimii YTM-Industrial. Loviisan ydinvoimalaitoksella on käytössä Easy-Laserin laserlinjauslaitteita hihnapyörien linjaukseen sekä yleisempiin akselinlinjauksiin (Lihtari 2021). Ydinvoimalaitoksella olevat Easy-Laserin linjauslaitteet eivät kuitenkaan sovellu pääkiertopumpun moottorin linjaamiseen (Hirvasniemi 2021).

Saksalaisen Prüftechnik AG:n tuotteita ja palveluja on Suomessa edustanut jyvaskyläläinen MLT-Finland 30 vuoden ajan. MLT-Finland on teollisuuden mittauksiin ja 3D-skannauksiin erikoistunut mittatalo, joka lisäksi edustaa ja jälleenmyy tunnettuja mittalaite-brändejä. (Ritvanen.)

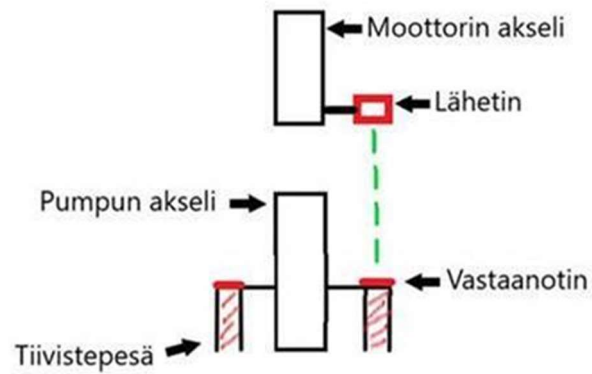
4.2 Uudet linjauslaitteet ja -menetelmät

Ratkaisuehdotukset uudeksi linjausmenetelmäksi on suunniteltu yhteistyössä linjauslaitteiden valmistajien ja jälleenmyyjien kanssa. Työhön saatiin myös pumppujen toimittajan näkemys uudesta mahdollisesta linjaustavasta.

4.2.1 Pääkiertopumppujen toimittajan näkemys

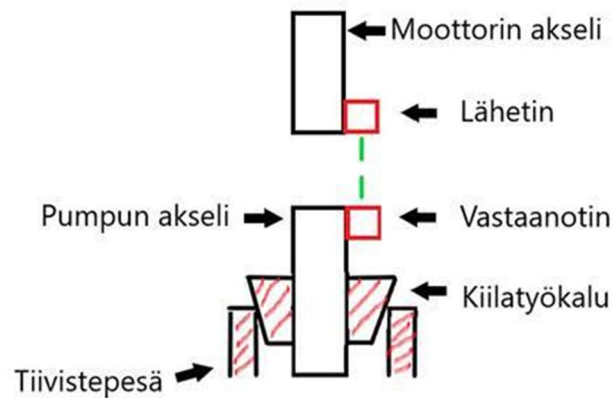
Pumppujen toimittajan nyk. Sulzer Pumps Finlandin mukaan linjausmenetelmän päivitys nykyaikaan on tulevaisuuden kannalta hyödyllistä. Esitetyt laserlinjausmenetelmät vaativat suunnittelua ja yhteistyötä linjauslaitteiden valmistajien kanssa. (Baulin 2021.)

Pääkiertopumppujen toimittajan mukaan pumppuhuollon yhteydessä tehtävässä linjauksessa voitaisiin käyttää mahdollisesti moottorin akselilla laserlähetintä ja pumpun tiivistepesän pinnalle kiinnitettyä laservastaanotinta. Moottorin akselia pyörittämällä laserlähetin havaittisi vastaanottimesta linjauksen poikkeamat. (Baulin 2021.) Menetelmä havainnollistettu kuvassa 12.



Kuva 12. Moottorin linjaus mitattuna pääkiertopumpun tiivistepesästä (Baulin 2021).

Toisena vaihtoehtona olisi keskittää pumpun akseli tiivistepesään kiilatyökalun avulla. Tämän jälkeen pyöritettävissä olevaan moottorin akseliin kiinnitettäisiin laserlinjauslaite ja paikallaan pysyväälle pumpun akselille vastaanotin. (Baulin 2021.) Menetelmä yksinkertaistettuna kuvassa 13.



Kuva 13. Pumpun akseli keskitetään keskelle tiivistepesää kiilatyökalun avulla (Baulin 2021).

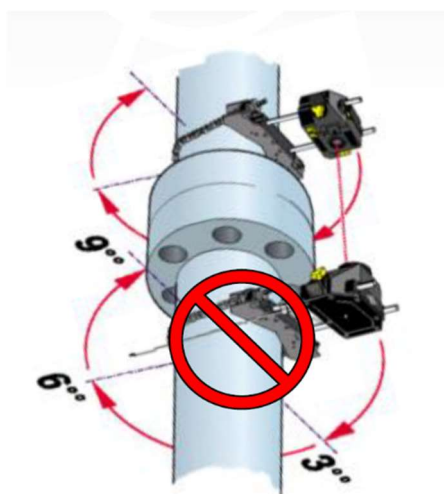
4.2.2 Prüftechnik laserlinjaus magneettijalalla

MLT-Finlandin mukaan pääkiertopumpun moottorin linjaus voidaan suorittaa pumppuhuollossa sekä moottorin vaihdon yhteydessä käyttäen Prüftechnik Rotalign touch linjauslaitetta (kuva 14). Laserlinjauksen suurin etu verrattuna mittakelloilla tehtävään linjaukseen on mittauksen helppokäyttöisyys, nopeus ja luotettavuus.

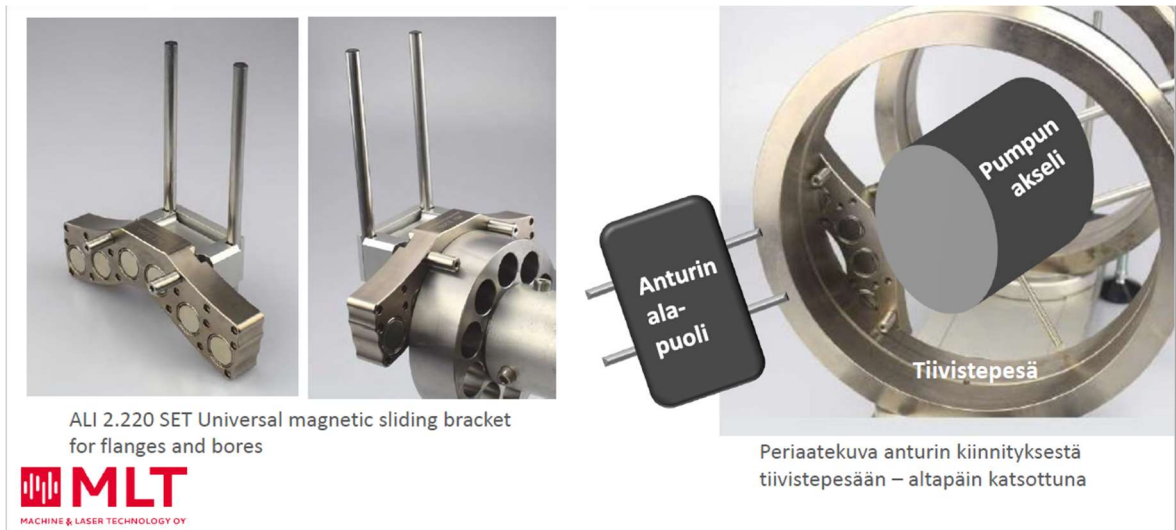


Kuva 14. Prüftechnikin Rotalign touch laserlinjauslaite (MLT).

Pumppuhuollon yhteydessä tehtävässä linjauksessa moottorin akseliin kiinnitetään lasermittausanturi ketjukiinnikkeellä (kuva 15). Toinen mittausanturi asennetaan pumpun tiivisteeseen kuvan 16 mukaisella magneettikiinnikkeellä. Pääkiertopumpun moottorin linjausarvot mitataan pumpun tiivisteeseen sisä- ja otsapinnasta. (Ritvanen 2022, 3–5.)



Kuva 15. Sähkömoottorin akselille kiinnitetään ketjukiinnikkeellä mittausanturi. Kuvassa alempi mittausanturi on rajattu pois käyttökohteen erikoisuuden vuoksi. (Ritvanen 2022, 4.)



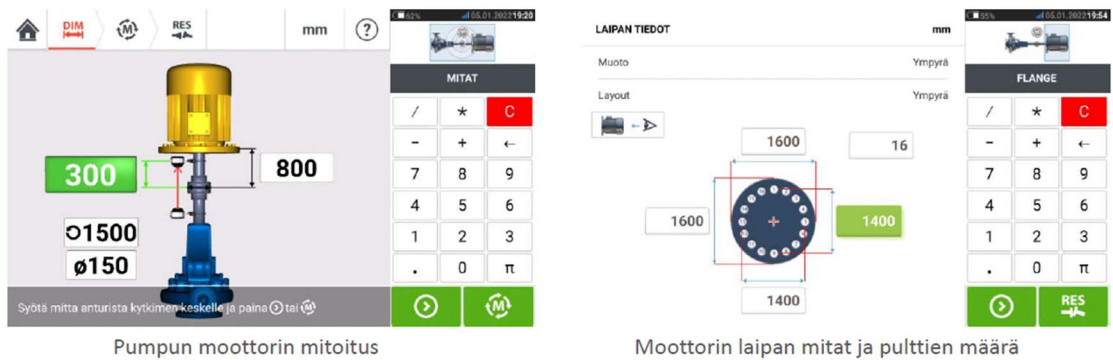
Kuva. 16 Mittausanturin kiinnike ja mittauskohta pumppuhuollon yhteydessä (Ritvanen 2022, 5).

Moottorin vaihdon yhteydessä suoritettavassa linjauksessa moottorin akselille kiinnitetään ketjukiinnitteinen mittausanturi. Tämän vastakappaleeksi asennetaan toinen mittausanturi pumpun tiivistepesän ulkopinnalle kuvan 17 mukaisella kiinnikkeellä. (Ritvanen 2022, 6–7.)



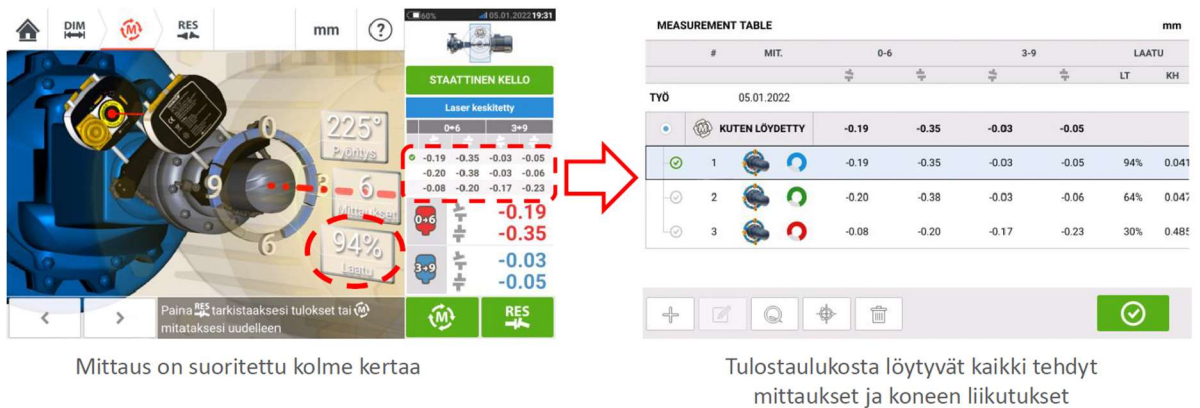
Kuva 17. Mittausanturin kiinnike ja mittakohta moottorinvaihdon yhteydessä (Ritvanen 2022, 7).

Prüftechnik Rotalign touch – linjauslaiteella voidaan määrittää moottorin ja mittausanturin sijainnit sekä moottorin laipan mitoitus ja pulttien määrä kuvan 18 mukaisesti (Ritvanen 2022, 8).



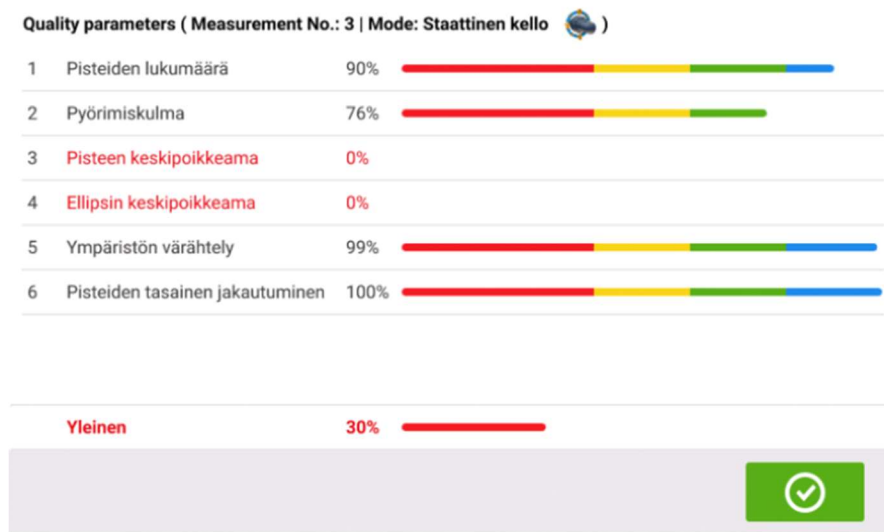
Kuva 18. Prüftechnikin linjauslaitteeseen saadaan syötettyä käyttökohteen mitat (Ritvanen 2022, 8).

Prüftechnik Rotalign touchilla linjatessa valitaan mittaustavaksi staattinen kello. Mittaukset suoritetaan kellotaulun (0-3-6-9) mukaan (kuva 19). Vastaavat mittapisteet merkitään moottoriin sekä pumpun tiivistepesään. Jokaisesta mittauksesta saadaan laatuprosentti, joka kuvaa linjauksen luotettavuutta ja toistettavuutta. (Ritvanen 2022, 9.)



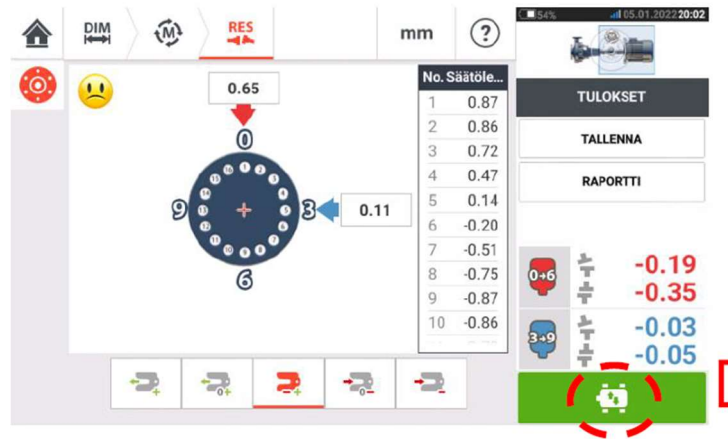
Kuva 19. Rotalign touchin avulla voidaan seurata linjaustulosta sekä laatua reaaliajassa (Ritvanen 2022, 9).

Mittauspisteissä saattaa esiintyä pinnanlaadun eroavaisuuksia esimerkiksi kolhuja ja naarmuja. Rotalign touchin avulla mittaustuloksia saadaan tarkasteltua yksityiskohtaisesti laatu-parametrien avulla kuvan 20 mukaisesti. Yksittäisen mittauksen ollessa poikkeava muista mittauksista linjauksen kokonaislaatu heikkenee. Käyttäjän tulee selvittää syy ja tarvittaessa vaihtaa mittauspistettä. Mittapisteiden määrä on suoraan verrannollinen linjauksen luotettavuuteen ja tarkkaan mittaustulokseen. (Ritvanen 2022, 10.)



Kuva 20. Linjauksen laatu perustuu kuuteen eri laatuparametriin (Ritvanen 2022, 10).

Mittaustulosten pohjalta tehdään tarvittaessa moottorin asemoinnin muutoksia. Moottorin asemoinnin muutokset nähdään reaaliaikaisesti linjauslaitteelta (kuva 21). Muutosten jälkeen suoritetaan uusinta mittaukset lopullisen linjaustuloksen todentamiseksi. Linjauksen jälkeen laitteesta saadaan sähköisesti raportti linjaustuloksista ennen ja jälkeen. (Ritvanen 2022, 11–12.)



Kuva 21. Laitteen Live Move -siirto toiminnon avulla moottorin siirron vaikutukset linjausarvoihin nähdään reaaliaikaisesti (Ritvanen 2022, 11).

4.2.3 Easy-Laser linjaus epäkeskeisellä kolmiolevykiinnikkeellä

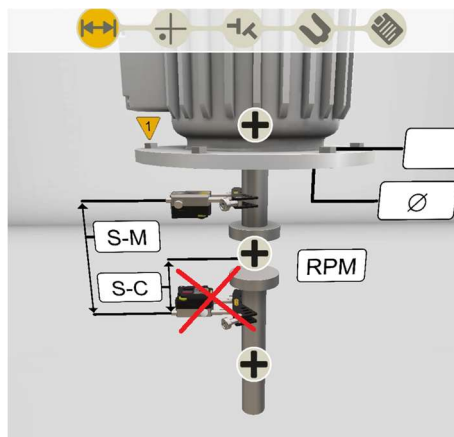
Easy-Laserin ja YTM-Industrialin mukaan kyseinen linjaustyö ei ole helppo, mutta heidän asiantuntijoidensa mukaan toteutettavissa. Linjaus voitaisiin mahdollisesti suorittaa käyttäen Easy-Laserin XT770 laserlinjauslaitetta (kuva 22) ja pystysuorien akselien kohdistusohjelmaa. (Hirvasniemi 2022.)



Kuva 22. Easy-Laserin XT770 laserlinjauslaite (YTM 2020).

Pääkiertopumpun moottorin linjauksessa moottorin akselille kiinnitettäisiin ketjukiinnitteisesti lasermittaustaite kuvan 23 mukaisesti. Pumpun akselin kelluvasta rakenteesta johtuen

pumpulle tulisi valmistaa oma erikoiskiinnike mittausanturille pumpun tiivistepesään. (Hirvasniemi 2022.) Pumppuhuollossa voidaan hyödyntää mittausanturin kiinnityksessä avointa tiivistepesää (kuva 24). Moottorin vaihdon yhteydessä pumppua ei ole purettu, joten tiivistepesästä voidaan hyödyntää vain sen ulkopintaa (kuva 25). (Leppänen 2021a.) Easy-Laserilta ei löydy soveltuvia erikoiskiinnikkeitä valmiina. Easy-Laserin suunnittelema malli soveltuvan kaltaisesta erikoiskiinnikkeestä on esitetty kuvassa 26. Kuvan mukainen mittausanturin kiinnike tulisi valmistaa tai tilata erikseen muualta. (Hirvasniemi 2022.)



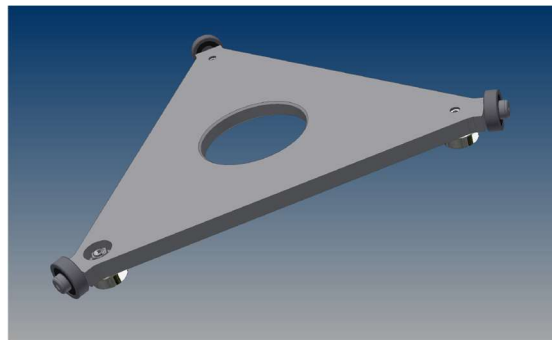
Kuva 23. Easy-Laser XT770 mittauslaite kiinnitettynä ketjukiinnikkeellä moottorin akselille. Alempi mittauslaite rajattu pois, koska sitä ei voida kiinnittää pääkiertopumpun tapauksessa kuten kuvassa. (Hirvasniemi 2022.)



Kuva 24. Näkymä pääkiertopumpun avoimesta tiivistepesästä, johon alempi mittausanturi tulisi kiinnittää erikoiskiinnikkeen avulla pumppuhuollossa tehtävässä linjauksessa (Leppänen 2022).



Kuva 25. Näkymä tiivistepesästä kasattuna moottorinvaihdon yhteydessä tehtävässä linjauksessa (Leppänen 2022).



Kuva 26. Easy-Laserin suunnittelema epäkeskeinen kolmiolevykiinnike pumpun tiivistepe-
sän mittausanturille (Hirvasniemi 2022).



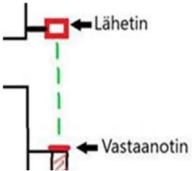

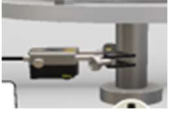
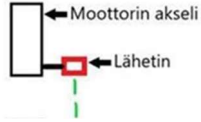
4.3 Ratkaisuehdotuksien vertailu


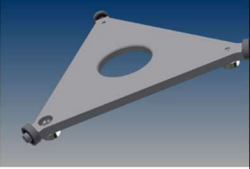
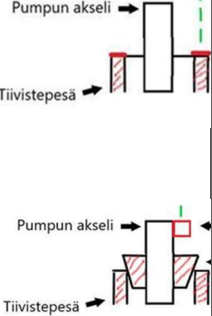

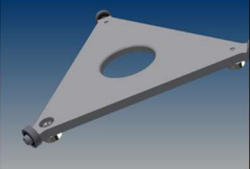
Loviisan ydinvoimalaitoksen pääkiertopumpun moottorin linjauslaite ja -menetelmä halutaan modernisoida, koska nykyisin käytössä oleva mittakelloja hyödyntävä linjausmenetelmä on kehitetty 70-luvulla. Maailmalla käytetään nykyään pääsääntöisesti laserlinjausmenetelmiä, joissa laserlinjauslaitteen mittausanturit kiinnitetään vastakkaisille akseleille. Pääkiertopumpun tapauksessa pumpun akselille ei voida kiinnittää mittalaitetta. Nykyaikaiset laserlinjauslaitteet soveltuvat kuitenkin erilaisten säätö- ja kiinnitysmahdollisuuksien ansiosta myös pääkiertopumpun moottorin linjaamiseen. Soveltuvuuden varmistamiseksi laitetta tulisi testata käytännössä.

Laserlinjauslaitteet ovat käyttäjäystävällisempiä kuin perinteiset mittakellot. Mittakelloilla tapahtuva linjaus edellyttää vankkaa kokemusta työn suorittamisesta. Laserlinjauksesta järjestetään käyttökoulutuksia, jonka pohjalta linjaustyön suorittajalla on valmiudet yleisimpiin linjauksiin. (Ritvanen 2021.)

Työhön saatiin ratkaisuehdotukset MLT-Finlandilta ja YTM-Industrialilta. Lisäksi työhön saatiin näkemys mahdollisesta uudesta linjausmenetelmästä Sulzer Pumps Finlandilta. Kaikissa ratkaisuehdotuksissa käytettiin laserlinjauslaitetta. Mittauspisteinä eri ratkaisuehdotuksissa käytettiin yhdenmukaisesti moottorin akselia sekä pumpun tiivistepesää. Sulzerin näkemyksessä ei selvitetty mittausanturien kiinnikkeitä yksityiskohtaisemmin. MLT- Finlandin ja YTM-Industrialin ratkaisuehdotuksissa moottorin mittausanturi kiinnitettiin ketjukiinnitteisesti moottorin akselille. Pääkiertopumpun mittausanturin kiinnityksessä käytettäisiin erikoiskiinnikkeitä pumpun tiivistepesässä. MLT-Finlandilta löytyi soveltuvat erikoiskiinnikkeet pumpun tiivistepesän mittausanturille pumppuhuollon ja moottorinvaihdon yhteydessä tehtävään linjaukseen. YTM-Industrialilta saatiin mallinnos erikseen valmistettavasta mittausanturin kiinnikkeestä. Taulukossa 1. yhdistettiin linjauslaitevalmistajien ja -jälleenmyyjien ratkaisuehdotukset sekä pumppujen valmistajan näkemykset nykyaikaisesta linjausmenetelmästä. Johtopäätöksinä saatiin yhtäläisiä havaintoja, poikkeuksena linjauslaitteen mittausanturien kiinnikkeet.

Taulukko 1. Ratkaisuehdotuksien vertailu

Yritys	MLT-Finland	YTM-Industrial	Sulzer Pumps Finland Oy	Johtopäätökset
Linjauslaitteen valmistaja	Prüftechnik	Easy-Laser	Yhteistyössä linjauslaitevalmistajien kanssa	Prüftechnik ja Easy-Laser mahdollisia valmistajia
Linjausmenetelmä	Laser 	Laser 	Laser 	Nykyaikaiset linjausmenetelmät hyödyntävät lasertekniikkaa.
Kiinnitys moottorin mittauspisteeseen	Ketjukiinnitteisesti akselille 	Ketjukiinnitteisesti akselille 	Akselille 	Moottorin mittausanturi kiinnitetään akselille ketjukiinnitteisesti.

<p>Kiinnitys pumpun mitauspisteeseen pumppuhuollossa</p>	<p>Tiivistepesään magneettikiinnikkeellä</p> 	<p>Tiivistepesään epäkeskeisellä kolmiolevykiinnikkeellä (mallinos)</p> 	<p>Tiivistepesän pintaan (kaksi vaihtoehtoa)</p> 	<p>Pumppuhuollossa pumpun mittausanturi kiinnitetään erikoiskiinnikkeillä pumpun tiivistepesään.</p>
<p>Kiinnitys pumpun mitauspisteeseen moottorinvaihdossa</p>	<p>Tiivistepesään magneettikiinnikkeellä</p> 	<p>Tiivistepesään epäkeskeisellä kolmiolevykiinnikkeellä (mallinos)</p> 		<p>Moottorinvaihdossa mittausanturi kiinnitetään tiivistepesän ulkopintaan erikoiskiinnikkeillä.</p>

Jatkotutkimuksena nykyaikaisia laserlinjauslaitteita ja -menetelmiä tulisi verrata käytössä olevaan mittakellomenetelmään, jotta voitaisiin arvioida vaikutuksia luotettavuuden, toistettavuuden ja sujuvuuden näkökulmista. Jatkotutkimus edellyttäisi erikoisjärjestelyjä Loviisan vuosihuollon aikataulutuksen osalta, jotta ylimääräiseen työhön olisi varattu aikaa. Linjauksen luotettavuutta ja toistettavuutta voitaisiin arvioida linjaustulosten poikkeamien sekä linjaustulosten dokumentoinnin osalta. Sujuvuutta voitaisiin arvioida mittaamalla suoritukseen kuluva aika. Lisäksi sujuvuutta voitaisiin arvioida kunnossapidon asentajien palautteen pohjalta.

5 Yhteenveto

Kandidaatintyössä selvitettiin pääkiertopumpun moottorin linjaamiseen soveltuvia nykyaikaisia menetelmiä ja laitteita Loviisan ydinvoimalaitokselle. Tutkimus tehtiin case-tarkasteluna, jolloin linjauslaitteiden käyttökohteeksi oli rajattu pääkiertopumput. Kandidaatintyössä analysoitiin ja vertailtiin nykyaikaisia linjauslaitteita ja -menetelmiä soveltuvuuden ja saatavuuden näkökulmasta. Ratkaisuehdotukset uusista laitteista ja menetelmistä suunniteltiin yhteistyössä MLT-Finlandin, YTM-Industrialin ja Sulzer Pumps Finland Oy:n kanssa.

Pääkiertopumpun rakenteesta johtuen linjauksessa ei voida käyttää pumpun akselia. Moottoria ja pumpun akselia ei voida myöskään linjata kuorikytkimen kiinnityksen jälkeen. Ratkaisuehdotuksien mukaan pääkiertopumpun moottorin linjauksessa moottorin mittauspisteenä tulee käyttää moottorin akselia ja pumpun mittauspisteenä tiivistepesää. Ongelmakohdaksi suunnittelussa nousi linjauslaitteen mittausanturin kiinnitys pumpun mittauspisteeseen. Mittausanturin kiinnitys pumpun tiivistepesään edellyttää erikoiskiinnikkeitä. Työssä saatuja tuloksia ei voida yleistää muihin tapauksiin pääkiertopumppujen ainutkertaisen rakenteen vuoksi.

Kandidaatintyö muodostaa kokonaiskuvan uuden linjausmenetelmän ja -laitteen tarpeesta sekä ratkaisuehdotuksista. Ratkaisuehdotuksien pohjalta voidaan valita laite ja menetelmä, jota tulisi testata käytännössä esimerkiksi seuraavassa vuosihuollossa. Laitteen soveltuvuutta voisi testata esimerkiksi siten, että yksi pääkiertopumppu linjattaisiin käytössä olevalla mittakellomenetelmällä ja uudella laitteella suoritettaisiin tarkastusmittaukset. Näin ol- len saataisiin konkreettista näyttöä laitteen soveltuvuudesta. Testikäytön perusteella olisi mahdollista arvioida uuden laitteen hankinnan kannattavuutta.

Kandidaatintyön aikana saatiin Prüftechnikin linjauslaitetta edustavalla MLT-Finlandilla kattava selvitys laitteen soveltuvuudesta sekä mittausanturien kiinnikkeistä ja kiinnitystavoista. Yritykseltä löytyy valmis kokonaisuus laitteineen ja kiinnikkeineen kokeiltavaksi.

Prüftechnikin Rotalign touch laitetta tulisi testata laitoksella esimerkiksi seuraavassa vuosi-huollossa. Alustavien keskustelujen mukaan heillä olisi mahdollisuus testata ja kouluttaa laitteen käyttöä paikan päällä Loviisassa.

Lähteet

- ABB Oy. TTT-käsikirja 2000-07. Luku 23. - Kunnonvalvonta ja huolto. Helsinki: ABB Oy Verkkodokumentti. Saatavilla: <http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/> [Viitattu 4.12.2021].
- Ansaharju, T. 2009. Koneenasennus ja kunnossapito. 1.painos. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit Oy.
- Baulin, I. 2021. Chief Engineer, PC Pumps. Sähköpostiviesti 30.12.2021. Sulzer Pumps Finland Oy, Karhulan pumpputehdas.
- Easy-Laser. 2022. The company. About Easy-Laser. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://easylaser.com/en-us/about-easy-laser/the-company> [Viitattu 7.2.2022].
- Easy-Laser. 2020a. Koneen linjaus ja asennus. E710. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://easylaser.com/en-us/support/catalogues> [Viitattu 7.11.2021].
- Easy-Laser. 2020b. Akselinlinjaus. XT770. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ytm.fi/tuotteet/mittaus-testaus-ja-tyoturvallisuus/easy-laser-mittaus-ja-linjaus/akselin-laserlinjaus-xt-sarja/> [Viitattu 17.11.2021].
- Fortum. 2021a. Voimalaitoksen toiminta. Tietoa Fortumista. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/yhtiomme/energiantuotantomme/voimalaitoksemme/loviisan-voimalaitos/voimalaitoksen-toiminta> [Viitattu 7.2.2022].
- Fortum, 2021b. Vuosihuollot. Tietoa Fortumista. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/yhtiomme/energiantuotantomme/voimalaitoksemme/loviisan-voimalaitos/voimalaitoksen-toiminta/vuosihuollot> [Viitattu 7.2.2022].
- Fortum Power and Heat Oy. 2020. Naapurina ydinvoimala. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/yhtiomme/energiantuotantomme/voimalaitoksemme/loviisan-voimalaitos/julkaisut> [Viitattu 23.2.2022].
- GrabCAD. 2012. Water centrifugal Pump. Solidworks-tiedosto. Saatavissa: <https://grabcad.com/library/water-centrifugal-pump-ksb-eta-80-20> [Viitattu 1.2.2022].
- Hirvasniemi, H. 2021. Tuotepäällikkö. Sähköpostiviesti 20.10.2021. YTM-Industrial.
- Holmsten, T. & Taberman, T. 2019. LO1 YD, pääkiertopumppu ja tiivistevesijärjestelmä. K1-03-00062. Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.
- Honkala, R. 2009a. Käyttäjän käsikirja Osa 5. Pääkiertopumppu. Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.
- Honkala, R. 2009b. Käyttäjän käsikirja Osa 6. Pääkiertopumpun moottori. Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.
- Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen S. 2013. Voimalaitostekniikka. 2.painos. Helsinki: Opetushallitus.
- Järviö, J. 2006. Kunnossapito. 3.painos. Helsinki: KPMedia Oy.

- Kaartinen, S. 2016. Kunnossapito Loviisan voimalaitoksella. Tekniikka ja ylläpito. Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.
- Leppänen, V. 2022. Järjestelmävastaava. Sähköpostiviesti 3.1.2022. Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.
- Leppänen, V. 2021a. Järjestelmävastaava. Sähköpostiviesti 6.9.2021. Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.
- Leppänen, V. 2021b. Järjestelmävastaava. Sähköpostiviesti 27.12.2021. Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.
- Leppänen, V. 2019. Pääkiertopumppujen konetekniset asennukset, tarkastukset ja huollot. Y-02-00026. Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.
- Lihtari, N. 2021. Varastonhoitaja. Sähköpostiviesti 20.10.2021. Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.
- Lomax. YD Pääkiertopumppu. Kunnossapitotiedot, laiteluokka. Loviisa: Fortum Power and Heat Oy. [Viitattu 1.2.2022].
- MLT. Julkaisuaika tuntematon. Rotalign touch – Linjauksen kovin kärki. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.mltfinland.fi/rotaling-touch/> [Viitattu 9.2.2022].
- Motiva. 2020. Sähkömoottorityypit. Kestävä liikenne ja liikkuminen. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/va-litse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot/sahkomoottorityypit [Viitattu 18.11.2021].
- Nevander, O. & Raitanen, R. 2003. Ydinvoimalaitoksen käyttöiän hallinta. Teoksessa Nevander, O. (toim.) ATS Ydintekniikka. Verkkoartikkeli. Saatavissa: https://www.ats-fns.fi/images/files/ydintekniikka/atsyt_2003_1.pdf [Viitattu: 9.11.2021].
- Piotrowski, J. 2007. Shaft alignment handbook. 3.painos. Boca Raton, CRC Press.
- Prüftechnik. 2020. Company profile. About us. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.pruftechnik.com/en-US/About-us/Company/Company-profile/> [Viitattu 7.2.2022].
- Ritvanen, T. 2022. Toimitusjohtaja. Sähköpostiviesti 5.1.2022. MLT Machine & Laser Technology Oy.
- Ritvanen, T. 2021. Toimitusjohtaja. Microsoft Teams -palaveri 28.12.2021. MLT Machine & Laser Technology Oy.
- Ritvanen, T. Julkaisuaika tuntematon. Meistä. MLT-Finland. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.mltfinland.fi/mlt/> [Viitattu 7.2.2022].
- Ryti, H. 1976. Koneoppi Osa 1. Staattiset koneet. Espoo: Otakustantamo.
- Räisänen, S. 2017a. Yleiskuvaus osa 2. YD pääkiertopumppu. Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.
- Räisänen, S. 2017b. Yleiskuvaus osa 2. YD pääkiertopumpun moottori. Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.

- SKF. Julkaisuaika tuntematon. About shaft alignment. Products. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.skf.com/group/products/maintenance-products/alignment-tools/shaft-alignment/about-shaft-alignment> [Viitattu 11.11.2021].
- STUK. 2021. Ydinturvallisuus. STUK valvoo. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.stuk.fi/stuk-valvoo/ydinturvallisuus> [Viitattu 5.12.2021].
- STUK. 2020. Ydinvoimalaitostyypit. Miten ydinvoimalaitos toimii. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/ydinvoimalaitokset/miten-ydinvoimalaitos-toimii/ydinvoimalaitostyypit> [Viitattu 13.12.2021].
- Sulzer. 2021. Contract and predictive maintenance. Services. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sulzer.com/en/shared/services/contract-and-predictive-maintenance> [Viitattu 30.11.2021].
- Tuomi, I. 2020. LO1, LO2 Pääkiertopumppujen tarkastukset. T-03-00013. Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.
- Varis, M. 2019a. Koneiden ja rakenteiden värähtelyvalvonta. Y-09-00001. Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.
- Varis, M. 2019b. Pääkiertopumpun ja moottorin värähtely- ja siirtymämittausten instrumentointi. Y-09-00001(liite1). Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.
- Väänänen, M. 2021. E&P, Pääkiertopumput YD. LO1-K852-00456. Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.
- Wirzenius, A. 1978. Keskipakopumput. 3. painos. Tampere: Kustannusyhtymä Tampere.
- YTM-Industrial a. Julkaisuaika tuntematon. Kunnossapidon kolme kivijalkaa: ennakoi, huolla ja paranna. Käyttökohteita ja sovelluksia. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ytm.fi/sovellukset/kunnossapito> [Viitattu 19.11.2022].
- YTM-Industrial b. Julkaisuaika tuntematon. Lasermittaus ja -linjaus (Easy-Laser). Mittaus ja testaus. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ytm.fi/tuotteet/mittaus-testaus-ja-tyoturvallisuus/easy-laser-mittaus-ja-linjaus> [Viitattu 26.1.2022].
- Zener. 2021. Moottorin linjaus – säästää energiaa. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.zener.fi/moottorin-linjaus> [Viitattu 10.1.2022].