



samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

JUSSI LINDGREN

Höyryturbiinien kunnossapito

Revisioiden aikaisten NDT- ja materiaalitek-
nisten tarkastuksien suunnittelu ja toteutus

ENERGIATEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA
2021

Tekijä Lindgren, Jussi	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Joulukuu 2021
	Sivumäärä 40	Julkaisun kieli suomi
Julkaisun nimi Höyryturbiinien kunnossapito – Revisioiden aikaisten NDT- ja materiaalitekniesten tarkastuksien suunnittelu ja toteutus		
Tutkinto-ohjelma Energia- ja ympäristötekniikka		
Tiivistelmä <p>Projektissa perehdyttiin höyryturbiinirevisioiden aikaisten NDT- ja materiaalitekniesten tarkastuksien suunnitteluun ja toteutukseen. Turbiineille sopivat tarkastusmenetelmät käytiin komponenttikohtaisesti läpi. Eri NDT-menetelmien lisäksi käsiteltiin materiaaliteknisistä tarkastusmenetelmistä jäljennetarkastus ja kenttäkovuusmittaus.</p> <p>Tavoitteena oli kerätä tietoa revisioiden aikaisista höyryturbiineille suoritettavista aineita rikkomattomista (NDT, non-destructive testing) ja materiaaliteknisistä tarkastuksista. Tarkoitus oli luoda dokumentti, jonka avulla turbiinien omistajat, tarkastuksia tekevä henkilöstö, vakuutusyhtiöt ja turbiinihuoltojen toimittajat pääsevät parempaan yhteisymmärrykseen tarkoituksenmukaisista turbiinitarkastuksista. Kokemuksen perusteella edellä mainittujen tahojen käsitykset voivat poiketa toisistaan. Tämä dokumentti antaa valmiuksia parempaan ja tehokkaampaan ennakkosuunnitteluun ja kommunikointiin, niin yritysten, kuin henkilöidenkin välillä.</p> <p>Dokumenttia varten haastateltiin turbiiniasiantuntijoita, NDT-tarkastajia ja materiaalitekniesten tarkastusten asiantuntijoita. Lisäksi perehdyttiin alan kirjallisuuteen ja lukuihin standardeihin.</p> <p>Tuloksena syntyi opinnäytetyömuodossa oleva dokumentti, jota voi käyttää apuna turbiinirevisioiden ennakkosuunnittelussa, aikataulutamisessa, tarkastustöiden suorittamisessa ja dokumentoinnissa. Dokumenttia tehdessä käytetty oma muistilista osoittautui niin toimivaksi, että se lisättiin liitteeksi. Dokumenttia voidaan soveltaa myös varauksin kaasuturbiinien tarkastuksiin.</p>		
Avainsanat Turbiini, höyryturbiini, rikkomaton aineenkoetus, voimalaitos, voimala, revisio		

Author(s) Lindgren, Jussi	Type of Publication Bachelor's thesis	Date December 2021
	Number of pages 40	Language of publication: Finnish
Title of publication Turbine maintenance – Planning and performing NDT-testing and material inspections during turbine revisions		
Degree programme Energy- and environmental engineering		
Abstract <p>The project focused on NDT and material inspections during steam turbine revisions. Appropriate inspection methods for the turbines were reviewed on a component-by-component basis. In addition to various NDT methods, replica inspection and field hardness testing were analyzed.</p> <p>The aim was to collect information on non-destructive testing (NDT) and material inspections of steam turbines during the revisions. The intention was to create a document that would allow turbine owners, inspection staff, insurance companies and turbine maintenance suppliers to better understand appropriate turbine inspections. Often, perceptions of the parties differ. This document enables better and more efficient communication between companies.</p> <p>Turbine experts, NDT inspectors and material inspection experts were interviewed for the study. Moreover, a literature review was conducted on turbines and numerous standards.</p> <p>The result was a document in the form of a thesis, which can be used as an aid in pre-planning, scheduling, performing and documenting turbine revisions. The document can also be applied with reservations to inspections of gas turbines.</p>		
Keywords Turbine, steam turbine, non-destructive testing, power plant		

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	5
2 VAATIMUKSET TARKASTUSHENKILÖSTÖLTÄ JA -LAITTEISTOILTA	7
2.1 Vaatimukset henkilöstöltä.....	7
2.2 Vaatimukset laitteistoilta.....	8
3 TURBIINITARKASTUKSISSA KÄYTETTÄVÄT NDT- JA MATERIAALITEKNISET TARKASTUSMENETELMÄT	9
3.1 Magneettijauh tarkastus.....	9
3.2 Tunkeumanestetarkastus	10
3.3 Ultraäänitarkastus.....	12
3.4 Pyörrevirtatarkastus.....	13
3.5 Visuaalinen tarkastus	15
3.6 Endoskopia.....	17
3.7 Höyryturbiinin jäljennetarkastus	19
3.8 Kovuusmittaus.....	21
4 HÖYRYTURBIINIEN REVISIOIDEN AIKANA TARKASTETTAVAT KOMONENTIT	22
4.1 Jakotason pultit ja mutterit sekä niiden tarkastaminen	22
4.2 Turbiinin liukulaakerit ja niiden valkometallipinnoitteen tarkastaminen	25
4.3 Pikasulku- ja säätöventtiilit sekä niiden tarkastaminen	29
4.4 Turbiinin sisä- ja ulkopesät sekä niiden tarkastaminen.....	33
4.5 Roottori, juoksu- ja johtosiivistö sekä niiden tarkastaminen	35
5 ESIMERKKI NDT-MENETELMÄN VALINNASTA – HÖYRYTURBIININ ROOTTORIN TARKASTUS	38
6 YHTEENVETO	39
LÄHTEET	
LIITEET	

1 JOHDANTO

Energian tuotannossa liikkuu merkittäviä summia rahaa ja yhteiskunnan toiminta on yhä enemmän riippuvainen energian tuotannosta. Höyryturbiinien rooli sähkön ja lämmön tuotannossa on merkittävä. Vaikka höyryturbiinit eivät varsinaisesti kuulu painelaitelain piiriin, niin suurten taloudellisten riskien takia turbiinien omistajat ja vakuutusyhtiöt vaativat turbiinitarkastuksia tekeviltä henkilöiltä lähes aina standardien mukaista tarkastuspätevyyttä. (Kauppinen 2018, s. 5; Valtioneuvoston asetus painelaitteista 1548/2016, 2 §.)

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kerätä tietoa revisioiden aikaisista höyryturbiineille suoritettavista ainetta rikkomattomista (NDT, non-destructive testing) ja materiaaliteknisistä tarkastuksista. Tarkoituksena oli luoda dokumentti, jonka avulla turbiinien omistajat, tarkastuksia tekevä henkilöstö, vakuutusyhtiöt ja turbiinihuoltojen toimittajat pääsevät parempaan yhteisymmärrykseen tarkoituksenmukaisista turbiinitarkastuksista. Edellä mainittujen tahojen käsitykset saattavat poiketa toisistaan johtuen muutoksista energiantuotannossa ja vähenevästä turbiiniosaamisesta (Fortum, 2021). Tämä dokumentti antaa valmiuksia parempaan ja tehokkaampaan kommunikointiin, niin yritysten, kuin henkilöidenkin välillä.

NDT- ja materiaalitekniikan tarkastusten tarkoituksena on löytää materiaaliin kohdistuneet kulumiset, väsymiset, iskemät, säröt ja halkeamat. Toisin sanoen, kaikki suunnitellusta poikkeavat materiaaliominaisuudet, jotka vaikuttavat höyryturbiinin käytettävyyteen, pyritään havaitsemaan NDT-menetelmiä apuna käyttäen.

Tässä dokumentissa esiteltäviä höyryturbiineille sopivia NDT- ja materiaalitekniisiä tarkastusmenetelmiä ovat:

- magneettijauhetaulukastus (magnetic particle testing, MT)
- tunkeumanestetaulukastus (liquid penetrant testing, PT)
- ultraäänitarkastus (ultrasonic testing, UT)

- pyörrevirtatarkastus (eddy current testing, ET)
- visuaalinen tarkastus (visual testing, VT)
- endoskopia (endoscopy)
- jäljennetarkastus (replica testing)
- kenttäkovuusmittaus UCI-menetelmällä (portable hardness testing).

Tarkastuksissa voidaan käyttää useita eri NDT-menetelmiä laadun varmistamiseksi. Menetelmän valintaan vaikuttavat etsittävä vikatyyppe, kohteen materiaali ja muoto sekä vaaditut laatuvaatimukset. Eri tarkastusmenetelmät tukevat ja täydentävät toisi-
aan.

Dokumenttia varten haastateltiin turbiiniasiantuntijoita, NDT-tarkastajia ja materiaa-
liteknisten tarkastusten asiantuntijoita. Lisäksi perehdyttiin alan kirjallisuuteen ja lu-
kuisiin standardeihin. Dokumentin valokuvat ovat tekijän itse ottamia, ellei toisin mai-
nita. Havainnot, joissa ei ole erikseen mainittu lähdettä, perustuvat tekijän työkoke-
mukseen lukuisissa turbiinirevisioissa. Toimintatavat ovat käytännössä opittuja, hy-
väksi havaittuja ja yleisesti vakiintuneita. Tarkastuksia suorittavan henkilöstön kor-
kean ammattitaidon avulla toimintatavat ovat kehittyneet käytännössä pidemmälle
kuin mitä julkisesti on dokumentoitu. Dokumenttia laadittaessa käytettiin omaa muis-
tilistia, joka osoittautui niin käytännölliseksi, että se lisättiin liitteeksi 1.

2 VAATIMUKSET TARKASTUSHENKILÖSTÖLTÄ JA -LAITTEIS- TOILTA

2.1 Vaatimukset henkilöstöltä

Euroopassa ainetta rikkomatonta testausta (NDT-testauksia) suorittavilta henkilöiltä vaaditaan kansainvälisen standardin SFS-EN ISO 9712 mukaista tason 2 tai 3 pätevyyttä. Standardissa määritellään testauksia tekevien henkilöiden vaatimuksista seuraavaa:

”Koska rikkomattoman aineenkoetuksen (NDT) sovellusten tehokkuus riippuu henkilön, joka suorittaa tai vastaa testistä, suorituskyvystä, on kehitetty menetelmä huolehtia henkilöstön pätevyyden arvioinnista ja dokumentoinnista. Henkilöstön tehtävät vaativat asianmukaista teoreettista ja käytännön tietoa rikkomattomasta aineenkoetuksesta, joita he tekevät, valvovat, seuraavat ja arvioivat. Lisäkannusteena on ollut myös maailmanlaajuinen menetelmien vertailun yhteensopivuus, erityyppisten teollisten sovellusten välillä, joka vaatii yhteisiä NDT-tarkastustulkintoja ja lähestymistapoja.” (SFS-EN ISO 9712:2012, 2012.)

Standardi SFS-EN ISO 9712 määrittää pätevyydet seuraaville tarkastusmenetelmille:

- akustinen emissio
- pyörrevirtatarkastus
- infrapunalämpökameratarkastus
- vuototarkastus (hydraulista testausta lukuun ottamatta)
- magneettijauhetarkastus
- tunkeumanestetarkastus
- radiografinen kuvaus
- venymäliuskatarkastus
- ultraäänitarkastus
- silmämääräinen tarkastus, lukuun ottamatta apuvälineittä suoritettavaa silmämääräistä tarkastusta tai toisen NDT-menetelmän suoritukseen liittyvää silmämääräistä tarkastusta. (SFS-EN ISO 9712:2012, 2012.)

Jäljennetarkastus ja kenttäkovuusmittaus eivät sisälly SFS-EN ISO 9712 -standardiin. Molempiin on kuitenkin olemassa ohjeistusta ja standardeja, jotka tarkastajan on hallittava luotettavien tarkastustulosten saamiseksi. NDT-testauksia ja materiaalitekniisiä tarkastuksia suorittavien yritysten on valvottava henkilöstönsä osaamista oman laatu-järjestelmänsä mukaisesti. Yleisesti käytössä on standardin ISO 9001 mukainen osaamismatriisi, jossa kunkin tarkastusmenetelmän nimetty vastuhenkilö vastaa oman alueensa henkilöiden osaamisesta ja laadukkaasta toiminnasta.

2.2 Vaatimukset laitteistoilta

Kaikki tarkastuksissa käytettävät tarkastuslaitteet, -laitteistot, -kemikaalit ja muut apuvälineet pitää olla hyväksytyjä ja kalibroituja niille standardeissa ja/tai tarkastuslaitoksen laatu-järjestelmässä osoitettujen vaatimusten mukaisesti.

Laitteistojen ja käytettävien tarkastuskemikaalien toimivuudentarkastus- ja kalibrointiohjeet on esitetty tarkastusmenetelmäkohtaisesti EN-standardeissa. Esimerkiksi ulträänilaitteistojen ominaisuuksien todentaminen on esitetty standardissa SFS-EN 12668-3. Muidenkin tarkastusmenetelmien laitteistoille ja kemikaaleille löytyy vastaava standardin mukainen ohjeistus.

3 TURBIINITARKASTUKSISSA KÄYTETTÄVÄT NDT- JA MATERIAALITEKNISET TARKASTUSMENETELMÄT

3.1 Magneettijauhetarkastus

Magneettijauhetarkastuksen avulla voidaan havaita pintaan aukeavat tai heti pinnan alla olevat vikaindikaatiot ferromagneettisissa materiaaleissa. Magneettijauhetarkastus perustuu siihen, että sopivalla magnetoitavalla tarkastettavaan pintaan aikaansaadaan riittävän voimakas magneettivuo, jotta mahdolliset epäjatkuvuuskohdat voidaan havaita voimakkaan paikallisen vuotokentän muodossa (Åström, 1990, s. 20). Tarkastuskemikaalin sisältämät ferromagneettiset rautahiukkaset kasautuvat vuotokentän aiheuttaman voimakkaamman magneetikentän kohdalle. Tämä kasautuma on havaittavissa visuaalisesti UV-valon (fluoresoivamenetelmä) tai tarkastuskemikaalien (musta-valko -menetelmä) avulla aikaansaadun kontrastieron avulla.

Höyryturbiinien komponentit ovat pääosin ferromagneettisia, mutta kohteen magneettisuus tulee aina varmistaa ennen tarkastuksen aloittamista. Esimerkiksi suutinsegmentit ovat joskus heikosti magnetoituvia, joten niiden tarkastamisessa tulee käyttää tunkeumaneste- tai pyörrevirtamenetelmää.

Varsinainen magneettijauhetarkastus suoritetaan standardin SFS-EN ISO 17638 mukaisesti. Tämä standardi määrittelee tekniset ohjeet tarkastukselle. Hyväksymisrajat esitetään normaalisti omissa standardeissaan tarkastuskohteesta riippuen. Turbiinitarkastuksissa käytetään tilaajan tai muun osapuolen, esimerkiksi vakuutusyhtiön, määrittämiä hyväksymisrajoja. Tapauskohtaisesti päätetään vikaantuneen komponentin jatkokäytöstä. Esimerkiksi säröytynyt juoksusiipi hylätään poikkeuksetta aina, vaikka standardin mukainen vikakoko ei ylittyisikään.

Turbiinin komponenttien magneettijauhetarkastuksessa tulee huomioida tarkastuskohteen geometria, sillä se vaikuttaa vikaindikaatioiden havaitsemiseen. Erityisesti juoksu- ja johtosiivistö voivat olla haastavia magnetoida ja näkyvyys tarkastettavaan pintaan voi olla estynyt. Erilaisia magnetoitimenetelmiä kuten suora-, ies- (kuva 1) ja kelamagnetoitimenetelmiä (kuva 13) käytetään parhaan lopputuloksen saamiseksi. Magneetikentän riittävyys, suunta ja käytettävien tarkastuskemikaalien toimivuus

tarkistetaan aina ennen tarkastuksen aloittamista, esimerkiksi Bertholdin ristillä (kuva 1), magneettivuomittarilla tai vertailukappaleen avulla. Vertailukappale on tarkastettavaa kohdetta vastaava kappale, jonka vikaindikaatiot ovat tiedossa.



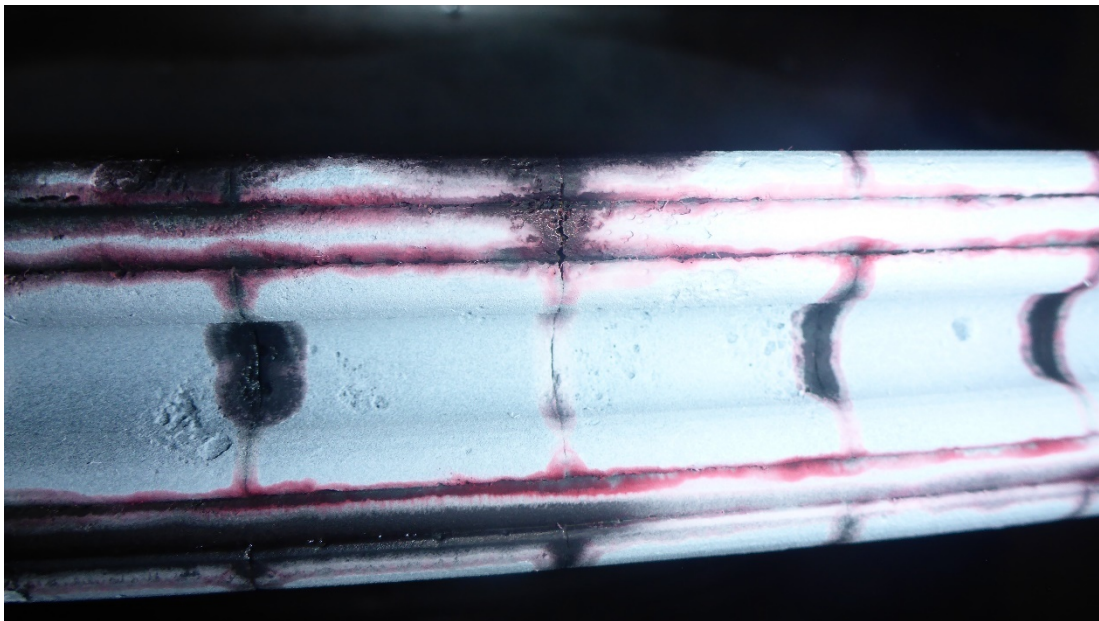
Kuva 1. Bertholdin ristiä käytetään magneettijauhetarkastuksessa magneettikentän riittävyyden toteamiseen (Lindgren, V-P., 2020)

3.2 Tunkeumanestetarkastus

Tunkeumanestetarkastus suoritetaan yleensä värillisellä tekniikalla, käyttäen vedellä poistettavia tunkeumanesteitä. Menetelmä soveltuu pintaan avautuvien epäjatkuvuuskohtien havaitsemiseen materiaaleille, jotka eivät ole luonnostaan huokoisia. Tunkeumanestetarkastuksessa liuottimella puhdistettuun pintaan levitetään värillistä tai fluoresoivaa tunkeumanestettä. Tunkeumanesteen pintajännitys on kemiallisesti saatu erittäin pieneksi. Tunkeutumisajan kuluessa (yleensä 20-30 minuuttia) tunkeumaneste tunkeutuu pintaan avautuviin epäjatkuvuuskohtiin. Sen jälkeen tarkastettavalta pinnalta poistetaan ylimääräinen tunkeumaneste. Pinta pyyhitään lopuksi nukkaamattomalla ja puhtaalla kankaalla. Välittömästi tämän jälkeen pinnalle levitetään, yleensä suihkuttamalla, kehite, joka imee itseensä epäjatkuvuuskohtiin imeytyneen tunkeumanesteen. Indikaatiot havaitaan visuaalisesti UV-valon (fluoresoivamenetelmä) tai kontrastieron (värillinen, puna-valko -menetelmä) avulla. (Åström, 1990, s. 27.)

Yleensä turbiinitarkastuksissa tunkeumanestemenetelmällä tarkastettavia osia ovat laakerit, venttiilien tiivistepinnat ja karat (mikäli ne eivät magnetoidu). Tunkeumanestetarkastuksen avulla voidaan myös arvioida magneettijauhemenetelmällä löydetyn indikaation tilavuutta. Tunkeumanestetarkastusta käytetään myös tarkastettaessa turbiinissa olevia ei-ferromagneettisia osia, esimerkiksi suutinsegmentin kiinnityshitsejä.

Varsinainen tunkeumanestetarkastus suoritetaan standardin SFS-EN ISO 3452-1 mukaisesti. Tämä standardi määrittelee tekniset ohjeet tunkeumanestetarkastukselle. Hyväksymisrajat esitetään normaalisti tarkastuskohdekohtaisissa standardeissaan, mutta turbiinitarkastusten yhteydessä käytetään tilaajan tai muun osapuolen, esimerkiksi vakuutusyhtiön, määrittämiä hyväksymisrajoja. Tapauskohtaisesti päätetään vikaantuneen komponentin jatkokäytöstä. Esimerkiksi juoksusiipien sidelangassa oleva alle 2 mm särö johtaa aina sidelangan uusimiseen, vaikka hyväksymisrajastandardin SFS-EN ISO 23277 taulukko 1 antaisi mahdollisuuden hyväksyä kyseessä olevan kohteen.



Kuva 2. Sidelangan vikaindikaatio tunkeumanestetarkastuksessa (Lindgren, V-P., 2020)

3.3 Ultraäänitarkastus

Ultraääniluotain lähettää ääniaaltopulsseja tarkastettavaan kappaleeseen. Kun nämä pulssit osuvat johonkin kohteeseen, kuten onteloon, säröön tai muuhun epäjatkuvuuskohtaan, ne heijastuvat takaisin luotaimeen. Ultraäänilaite mittaa sitä, miten kauan ääniaalloilta kestää, kun se kulkee kappaleessa, osuu kohteeseen ja pongahtaa sitten takaisin luotaimeen. Ultraääni ei etene ilmassa, joten se palaa takaisin luotaimeen läpäistyään tarkastettavan kappaleen. Tässä tapauksessa vikaindikaatioita ei kappaleessa ole. (Åström, 1990, s. 38-54.)

Ultraäänitarkastuksen avulla voidaan havaita materiaalin sisäiset epäjatkuvuuskohdat ja epätäydelliset sidokset eri materiaalien välillä. Höyryturbiinien komponenteista yleisimmin ultraäänimenetelmällä tarkastettavia kohteita ovat:

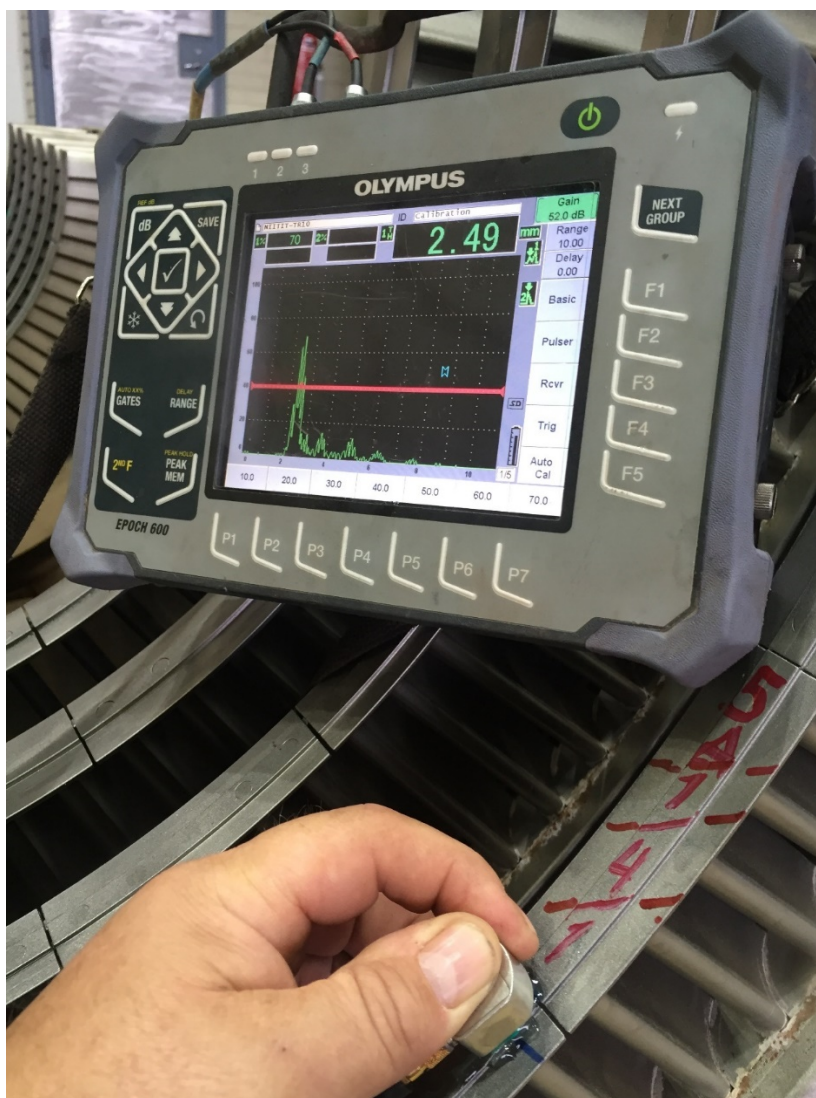
- valkometallipinnoitetut aksiaali- ja radiaalilaakerit
- johto- ja juoksusiipien niittaukset (kuva 3)
- akselit
- mahdolliset hitsit
- pultit.

Erilaisten löydöksiä mitoitukseen käytetään ultraäänimenetelmää, esimerkiksi särön tarkka syvyys voidaan määrittää ultraäänen avulla. Seinämävahvuuksien määrittäminen tehdään myös usein ultraäänen avulla, esimerkiksi hionnan pohjalta mitattu seinämävahvuus määrittää kohteesta riippuen korjaushitsauksen tarpeen.

Varsinainen ultraäänitarkastus suoritetaan tapauskohtaisesti. Suuntaa antavana toimintaohjeena voidaan käyttää standardia SFS-EN ISO 16810, joka määrittää ultraäänitarkastuksen yleisperiaatteet. Mikään dokumentin laatimishetkellä voimassa oleva standardi ei suoranaisesti sovellu turbiinin ultraäänitarkastukseen. Hyväksytyjä standardeja voidaan käyttää tarkastuksien tukena. Ainoana poikkeuksena voidaan pitää standardia ISO 4386-1, joka määrittelee pinnoitettujen liukulaakereiden tarkastusta.

Höyryturbiinien ultraäänitarkastuksissa käytetään tilaajan tai muun osapuolen, esimerkiksi vakuutusyhtiön, määrittämiä hyväksymisrajoja. Tapauskohtaisesti päätetään

vikaantuneen komponentin jatkokäytöstä, esimerkiksi jakotason painetta kantamattomassa osassa oleva ei-lineaarinen heijastaja ei yleensä aiheuta toimenpiteitä.



Kuva 3. Johtosiipien niittien ultraäänitarkastus. Kuvan tarkastettava niitti on vaurioitunut 2,49 mm syvyydestä (Lindgren, V-P., 2016)

3.4 Pyörrevirtatarkastus

Pyörrevirtatarkastuksessa pyritään havaitsemaan pintaan aukeavat ja pinnan lähellä olevat epäjatkuvuuskohdat. Pyörrevirtalaitteen ja -anturin avulla aikaansaadaan tarkastettavaan sähköä johtavaan pintaan pyörrevirtoja. Epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat tarkastusanturin käämiin impedanssin muutoksia, joista tulkitaan amplitudi ja vaihekulma pyörrevirtalaitteen näytöltä. Toisin sanoen, pyörrevirtamenetelmässä tulkitaan

tarkastusanturin ja tarkastettavan materiaalin välisiä sähkömagneettisia muutoksia. (Åström, 1990.)

Pyörrevirtatarkastus soveltuu erityisen hyvin kohteille, joista etsitään erityisen pieniä epäjatkuvuuskohtia, joihin luokse päästävyys on rajoitettu ja/tai jotka ovat arkoja muissa NDT-menetelmissä käytettäville tarkastuskemikaaleille. Esimerkiksi rautajauhoa sisältävä magneettijauhe voi vaurioittaa kuula- ja rullalaakereita, pyörrevirtamenetelmässä ei käytetä kontaktiainetta, vaan kontakti tarkastettavaan pintaan on sähkömagneettinen. Menetelmässä riittää kun, tarkastusanturi on kontaktissa tarkastettavaan pintaa, indikaatiot tulkitaan erilliseltä näytöltä.

Rajoituksena pyörrevirtatarkastukselle ovat vaadittava hyvä pinnanlaatu ja menetelmän hitaus kohteesta riippuen. Yleisimmin pyörrevirtatarkastusta käytetään johto- ja juoksusiipien jättöreunojen tarkastukseen, erilaisten vikaindikaatioiden analysointiin ja pulttien sekä muttereiden tarkastamiseen.

Pyörrevirtatarkastuksena etuna on sen riippumattomuus tarkastettavan kohteen magneettisista ominaisuuksista. Myöskään kohteen pinnoitus ei haittaa tarkastusta, mikäli pinnoitteen paksuus on alle 2 mm ja se on sähköä johtamaton. Sähköä johtavat pinnoitteet vaikeuttavat tarkastuksen luotettavaa suorittamista, sillä ne muodostavat sähköä johtavan sillan pintaan aukeavien vikojen yli.

Turbiinien pyörrevirtatarkastuksen tukena voidaan käyttää standardia SFS-EN ISO 17643. Tämä standardi määrittää hitsien pyörrevirtatarkastuksen, mutta standardia soveltamalla voidaan pyörrevirtatarkastus suorittaa muillekin turbiinin pinnoille.

Kun pyörrevirtatarkastusta suunnitellaan turbiinille, olisi hyvä tietää, mitä raportoitavia vikatyyppejä kohteessa voi mahdollisesti olla. On myös selvitettävä minkä kokoiset viat ovat kriittisiä turbiinin käytettävyyden kannalta. Kun vikatyypit ja haluttu löydettävä pienin vikakoko ovat selvillä, voidaan valmistaa niille sopivat vertailukappaleet ja tarkastusanturit. (Saariaho, 1995.)

Turbiinin siipien jättöreunojen särötarkastuksessa voidaan käyttää vertailukappaleena siipeä, jonka jättöreunaan on kipinätyöstetty 0,5; 1,0 ja 2,5 mm urat, kuten kuvassa 4.

Tarkastuskohteesta saatuja vikaindikaatioita voidaan tällöin verrata tunnettuihin vikoihin ja vikakoko saadaan määritettyä. Pienin luotettavasti löydettävä vikakoko on aina puolet tarkastusanturin kelan halkaisijasta.



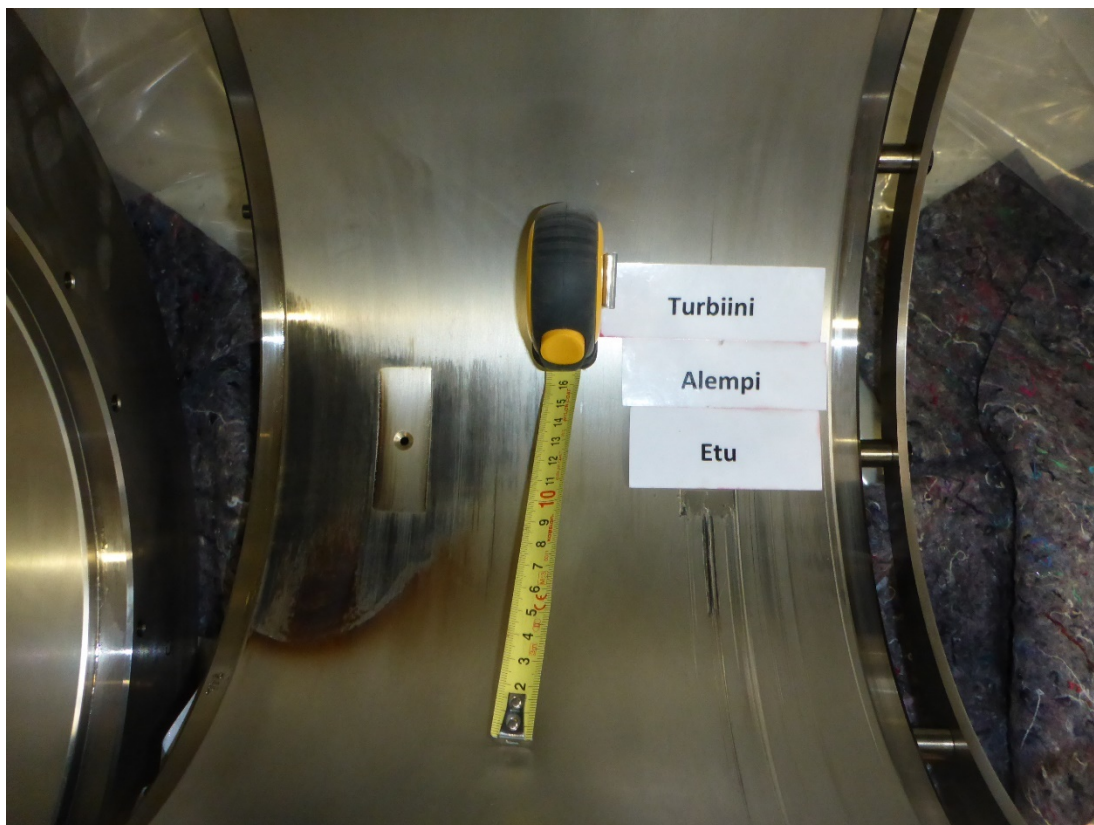
Kuva 4. Jättöreunojen pyörrevirtatarkastuksessa käytettävä vertailukappale

Vertailukappaleen puuttuessa voidaan tarkastus suorittaa käyttäen yleismallista vertailukappaletta. Tässä tapauksessa vikakoon määrittäminen on kuitenkin vaikeampaa.

3.5 Visuaalinen tarkastus

Silmämääräinen eli visuaalinen tarkastus on vanhin ja käytetyin NDT-menetelmä. Ihmissilmä pystyy havaitsemaan jo noin 50 μm leveän viivamaisen näyttämän ja 100 μm halkaisijaltaan olevan pyöreän näyttämän. Tätä pienempien vikojen luotettavaan tarkastamiseen on käytettävä muita NDT-menetelmiä. (Åström, 1990.)

Ennen varsinaisen NDT- tai materiaalitarkastuksen aloittamista, on erittäin tärkeää suorittaa kohteelle visuaalinen tarkastus. Monesti visuaalinen tarkastus kertoo hyvin tarkasti kohteen yleiskunnosta. Erilaiset pinnanlaadut, kerrostumat, vääntymät, värierot (kuva 5) ja iskemät (kuva 6) antavat korvaamatonta tietoa kohteen kunnosta. On erittäin tärkeää dokumentoida tarkastettavan kohteen poikkeamat, esimerkiksi valokuvilla, piirustuksilla ja mittaamalla. Vasta visuaalisen tarkastuksen ja dokumentoinnin jälkeen voidaan suorittaa kohteen puhdistus.



Kuva 5. Visuaalisessa tarkastuksessa havaittu radiaalilaakerin alalohkon valkometallin vaurio (Lindgren, VP., 2016)



Kuva 6. Visuaalisessa tarkastuksessa havaittuja iskemiä juoksusiivissä (Lindgren, V-P., 2019)

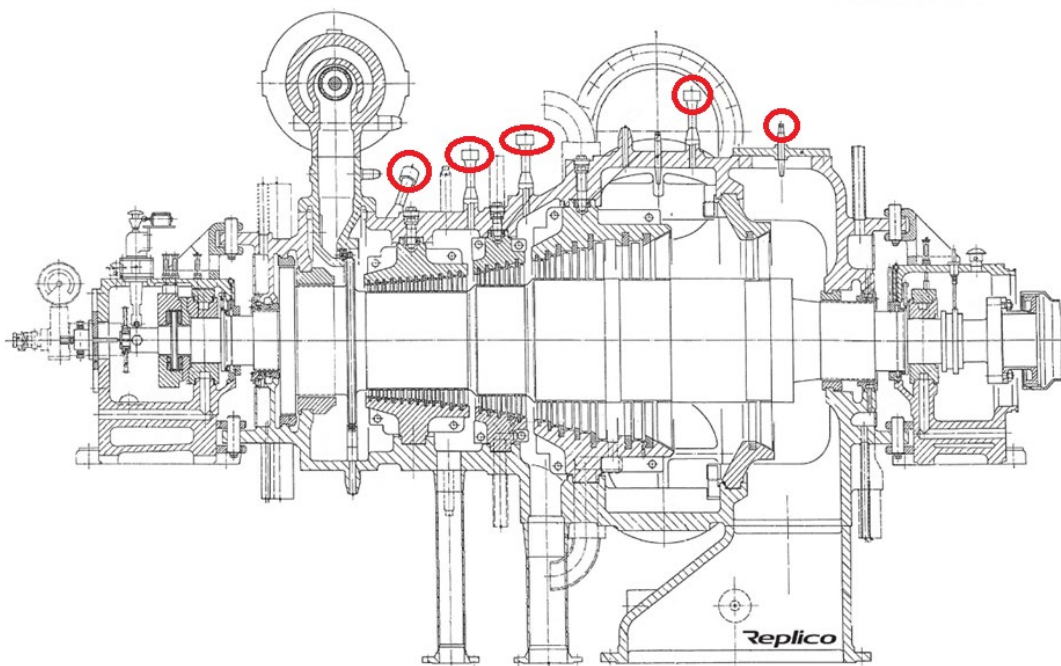
Apuvälineenä visuaalisessa tarkastuksessa käytetään:

- käsivalaisin
- pituusmitta
- työntömitta
- varsipeili
- muotokampa
- kulmamitta
- paksuusmittari
- a-mitta ym. hitsin mittavälineet
- suurennuslasi
- endoskooppi.

Visuaalisessa tarkastuksessa käytetään tukena standardeja SFS-EN ISO 17637 ja SFS-EN 13018. Nämä standardit määrittelevät visuaalisen tarkastuksen yleisperiaatteet ja hitsien silmämääräisen tarkastuksen. Turbiinitarkastuksissa käytetään tilaajan tai muun osapuolen, esimerkiksi vakuutusyhtiön, määrittämiä hyväksymisrajoja. Tapauskohtaisesti päätetään vikaantuneen komponentin jatkokäytöstä.

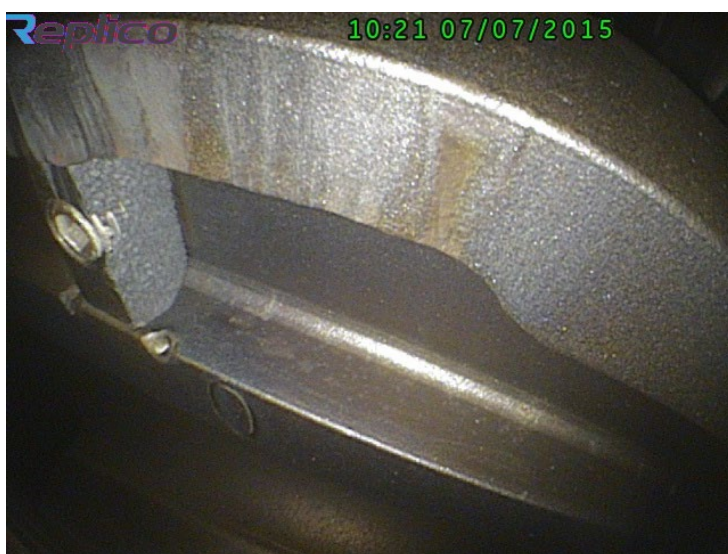
3.6 Endoskopia

Höyryturbiinien tarkastukset suoritetaan pääsääntöisesti aina erityisistä endoskooppi-tarkastusyhteistä. Kuvassa 7 on esitetty esimerkki höyryturbiinin tarkastusyhteiden sijainneista. Tarkastusyhteet mahdollistavat pääsyn suoraan tiettyihin turbiinin siipijaksoihin ja niiden väliin. Näistä tarkastusyhteistä on mahdollista tarkastaa turbiinin siipien kunto turbiinin roottoria käsin pyörittäen. (Tuomisto, 2021.)



Kuva 7. Esimerkki höyryturbiinin tarkastusyhteiden sijainneista (Replico, 2016)

Endoskooppitarkastuksessa pyritään saamaan mahdollisimman kattava kuva turbiinin sisäpuolisesta kunnosta. Tarkastuksessa pystytään havaitsemaan esimerkiksi happi-korroosio, eroosio (kuva 8), murtumat, vieraan esineen aiheuttamat iskemät/taipumat, pinnoitettujen siipien pinnoitevauriot ja mahdolliset hapettumat (kaasuturbiinit), nauha- ja hunajakennotiivisteiden kunto, muodonmuutokset sekä muut vauriot/poikkeamat. (Tuomisto, 2021.)



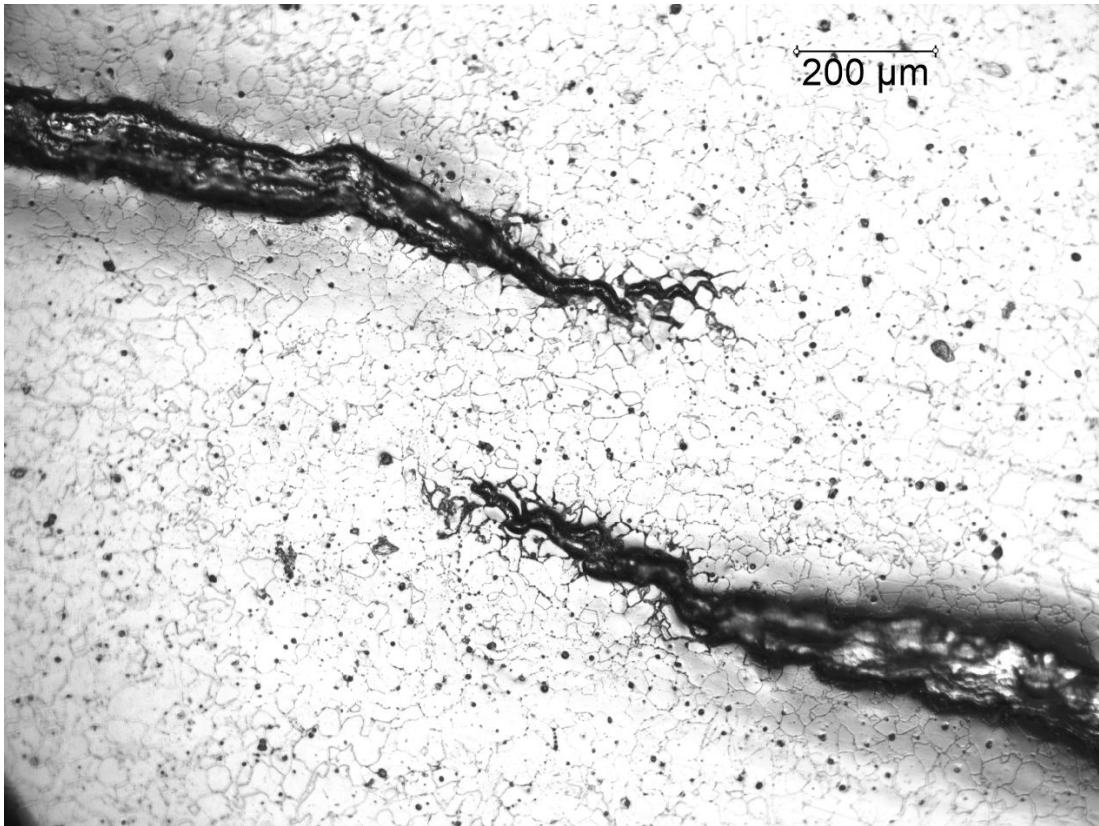
Kuva 8. Höyryeroosio on syönyt tasapainotuspalan materiaalia niin paljon, että kiinnitysruuvin kierre näkyy (Tuomisto, 2015)

Juoksu- ja johtosiivistä tarkastetaan aina luokse päästävin osin koko siiven pituus alla olevan esimerkkierittelyn mukaisesti:

- juoksusiiven kärki/panta ja sen niitit (jos niittejä on) / johtosiiven ulkokehän alue (kiinnitys johtosiipikannattimeen) sekä nauha- ja hunajakennotiivisteiden kunto
- juoksu- ja johtosiiven lavan alue (imu- ja painepuoli)
- juoksusiiven juuri, kiinnitys roottoriin ja ns. viimeisen siiven lukituspala
- johtosiiven sisäkehän alue (siipien pannat) ja nauha- ja hunajakennotiivisteiden kunto
- roottorin akselin kunto korroosion ja eroosion varalta ko. tarkastusyhteen alueella
- tasapainotusruuvit ja -palat. (Tuomisto, 2021.)

3.7 Höyryturbiinin jäljennetarkastus

Jäljennetarkastuksen avulla voidaan tarkastella kohteen mikrorakennetta ja sen muutoksia. Mikrorakenteessa yleisimmät vauriot tai muutokset liittyvät materiaalin virumiseen, hajaantumiseen sekä säröytymiseen (kuva 9). Virumisalueella (nyrkkisääntönä lämpötila yli ~ 450 °C) toimivien komponenttien säröt ovat usein pitkälle edenneen virumisen synnyttämiä virumissäröjä. Viruminen ja useista eri syistä tapahtuva mahdollinen säröytyminen ovat yleisiä käytön aikana tapahtuvia muutoksia, joita on hyvä seurata turbiinirevisioiden yhteydessä. Jäljennemenetelmä sopii hyvin myös muidenkin kuin virumissäröjen tutkimiseen. Jäljenteellä päästään tutkimaan särön etenemistä ja muita ominaisuuksia mikrotasolla. Tämä antaa usein viitteitä siitä, mikä on säröytymisen syynä sekä myös tiedon siitä, onko särö aktiivinen ja tarvitaanko välitömiä toimenpiteitä. (Väänänen, 2021.)



Kuva 9. Mikrorakennekuva pikasulkuventtiilin laipan hitsin mikrorakenteesta ja säröistä, suurennus 250x (Replico, 2018)

Turbiinitarkastuksissa virumisilmiöön perustuva jäljennetarkastus rajoittuu yleensä Curtis-pyörään, korkeapainesuuttimeen sekä säätö- ja pikasulkuventtiilien hitsaus-saumoihin. Pikasulkuventtiili ja siitä kattilalle päin oleva höyryputkisto kuuluvat painelaitelainsäädännön piiriin, tässä dokumentissa käsitellään ainoastaan painelaitelainsäädännön ulkopuolisia turbiinin komponentteja, pois lukien pikasulkuventtiili.

Laadukkaan jäljenteen ottaminen ja arvostelu vaatii suurta ammatillista tietoa ja taitoa. Jäljenteen ottamiseen ei tämän dokumentin laatimishetkellä ole olemassa ulkopuolista henkilöpäteväintä.

Jäljenteiden ottamisessa ja arvostelussa voidaan käyttää tukena VGB-standardia, VGB-S-517-00-2014-11-DE-EN, Guidelines for rating the microstructural composition and creep rupture damage of creep-resistant steel for high pressure pipelines and boiler components and their weld connections.

Höyryturbiinin komponenteille suoritettavien jäljennetarkastusten määrää ja aikaväliä käsitellään komponenttikohtaisesti luvussa 4. Yhteenvedona voidaan todeta, että jäljennetarkastusten tarpeellisuus on monien muuttujien summa. Kustannustehokkaan jäljennetarkastussuunnitelman laadintaan vaaditaan jäljennetarkastuksen ammattilainen ja voimalaitostekninen osaaja.

3.8 Kovuusmittaus

Kovuusmittauksella pyritään löytämään mahdolliset kovuuden muutokset materiaaleissa. Kovuusmittauksia tehdään myös ennakkosuunnitelman mukaisesti, mutta yleensä kovuusmittausta käytetään muilla menetelmillä löydettyjen poikkeamien lisätutkimuksiin.

Materiaalin kovuus määrittää monet sen ominaisuudet, kuten kulumisen kestävyuden, pysyvien muodonmuutoksien vastustamisen, vetolujuuden ja kimmokertoimen. Yleisesti kovuus ymmärretään materiaalin kykyä vastustaa siihen tunkeutuvaa kovempaa materiaalia.

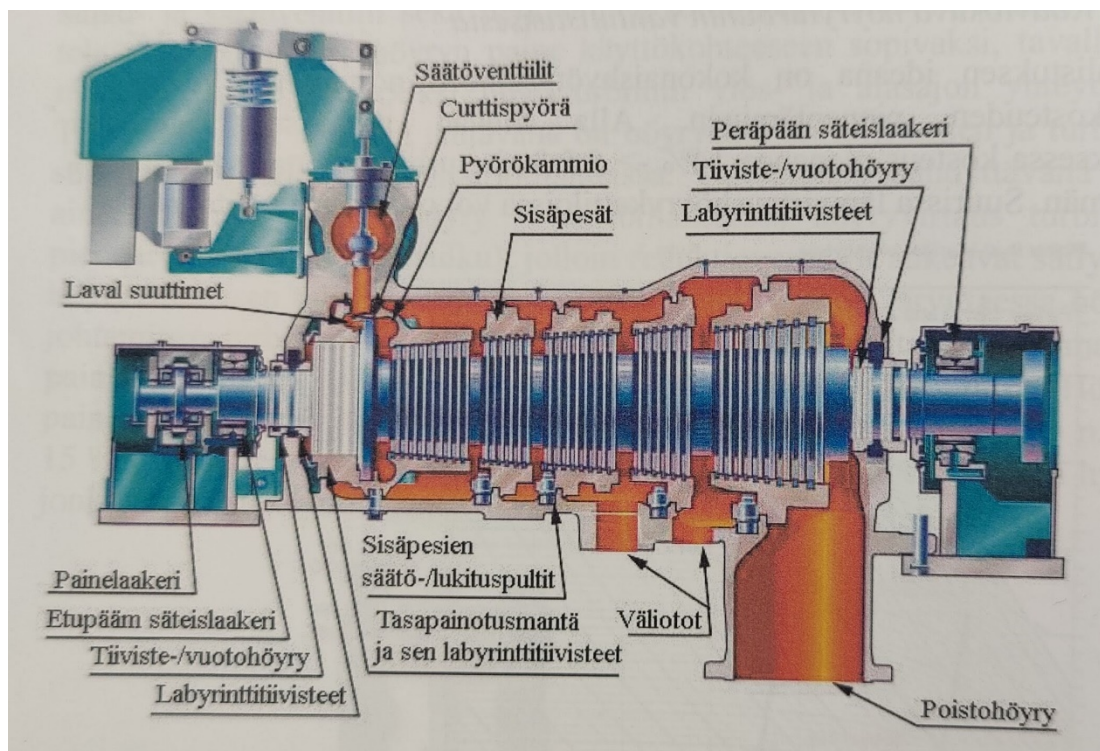
Höyryturbiineille tehtävät kovuusmittaukset ovat pääsääntöisesti UCI-menetelmällä (ultrasonic contact impedance) suoritettavia kenttäkovuusmittauksia. Tarvittaessa lisätutkimuksia varten voidaan tutkittavasta materiaalista irrottaa koepala laboratoriokovuusmittausta varten.

Mitattaessa kovuutta UCI-menetelmällä voidaan tukena käyttää ASTM-standardia, ASTM A1038 – 19, Standard test method for portable hardness testing by the ultrasonic contact impedance method.

4 HÖYRYTURBIINIEN REVISIOIDEN AIKANA TARKASTETTAVAT KOMPONENTIT

Tässä osiossa käsitellään höyryturbiinien NDT- ja materiaaliteknisesti tarkastettavat komponentit. Alaotsikointi on tehty komponenttikohtaisesti. Jokaisesta mainitusta komponentista on kirjoitettu lyhyt kuvaus sen toiminnasta ja merkityksestä osana höyryturbiinikonaisuutta.

Kuvassa 10 on esitetty läpileikkaus höyryturbiinin rakenteesta. Turbiinin eri komponenteista käytetään kirjoitetussa ja puhekielessä monia eri nimityksiä, joka saattaa olla haastavaa turbiineihin perehtyvälle. Lukija voi käyttää läpileikkauskuvaa tekstin tukena.



Kuva 10. Höyryturbiinin rakenne (Kauppinen, 2018)

4.1 Jakotason pultit ja mutterit sekä niiden tarkastaminen

Höyryturbiinin ala- ja yläpesä liitetään toisiinsa laippaliitoksella. Osa laippaliitoksessa käytettävistä pulteista lämmitetään kiristyksen ajaksi. Jäähtyessään pultit lyhenevät ja

tekevät liitoksesta erittäin tiiviin, mitään erillistä tiivistettä ei jakotasojen välissä käytetä.

Lämmitettävistä pulteista lämmitetään kierteetön keskiosuus ja pultti pitenee noin 1,8 %, kohteesta riippuen pituuden muutos voi vaihdella muutamilla promillen kymmenyksillä. Pultit lämmitetään nykyään useimmiten induktiolla, mutta myös sähkövastuksia käytetään. Isommissa turbiineissa jakotaso ja pultteja lämmitetään käynnistyksen aikana höyryllä, jotta turbiinin komponenttien lämpölaajeneminen pysyy tasaisena ja lämpötilaeroista johtuvat jännitykset pysyvät hallinnassa, pienemmissä turbiineissa ei tätä mahdollisuutta ole. (Mäkelä, 2021.)

Jakotason pultti vaurioituu useimmin kierteen loppupäästä eli kohdasta, joka on lähimpänä jakotaso. Tämä havainto perustuu kokemukseen ja laboratoriossa suoritettuihin ainetta rikkoviin kokeisiin. Kierteiden loppupäät tarkastetaan tästä syystä erityisellä tarkkuudella. (Nikkarila, 2021.)

Pultit vaihdetaan, jos ne ovat viallisia tai venymä ylittää 1 % alkuperäisestä mitasta. Jakotason lämmitettävillä pulteilla on myös määrätty rajallinen käyttökertarajoitus, jonka jälkeen pultit uusitaan automaattisesti.

Jakotason pultit ja mutterit voidaan tarkastaa pyörrevirta- tai magneettijauhemenetelmällä. Pulttien ja muttereiden kierreosuuden tarkastamiseen pyörrevirtamenetelmällä käytetään erikoisvalmisteisia pyörrevirta-antureita. Esimerkki tällaisista antureista on kuvassa 11. Muttereiden kierteet voidaan tarkastaa satulamallisella anturilla, jonka muoto vastaa pulttiin sopivan mutterin segmenttiä. Muttereiden kierteet voidaan tarkastaa samalla periaatteella pultin mallisella anturilla. (Ether NDE, 2017.)



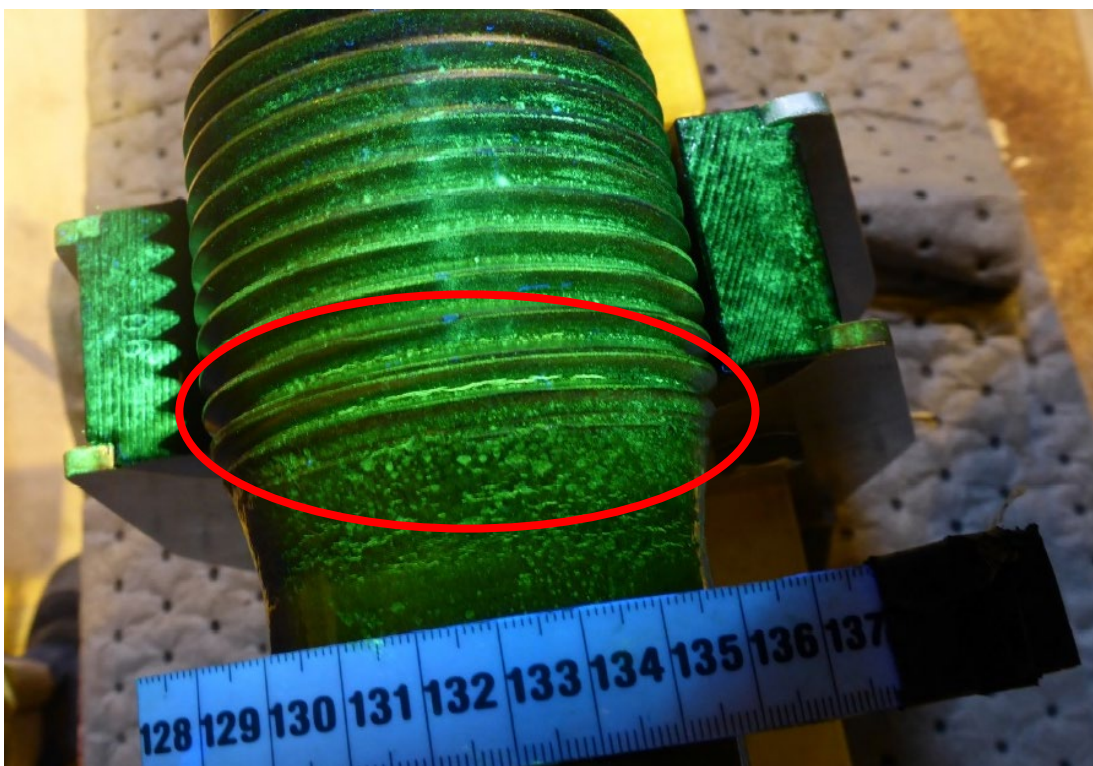
External Thread Probe



Internal Thread Plug Probe

Kuva 11. Muotoiltuja pyörrevirta-antureita pulttien ja muttereiden tarkastamiseen (Ether NDE, 2017)

Pulttien ja muttereiden magneettijauhetarkastuksessa tulee käyttää fluoresoivaa menetelmää. Kierteen pohjalle syntynyt särö voi olla hyvin tiivis, kuten kuvasta 12 käy ilmi. Säröindikaatioiden lisäksi raportoidaan kolhut ja naarmut, vaikka tilaaja ei sitä osaisi erikseen vaatia.



Kuva 12. Jakotason pultin kierteen pohjalla noin 30 mm pitkä poikittainen särönäyttämä (Pylkkänen, 2018)

Pulttien magnetoinnissa tulee käyttää kahta magnetointisuuntaa 90° ristiin. Magnetointi voidaan tehdä käyttämällä magnetointimuuntajaa ja ympäröivää kelaa, kuten kuvassa 13, tai ies-magnetointia (kuva 1). Myös suoramagnetointi on mahdollista, jos etsitään vain pituussuuntaisia indikaatioita.



Kuva 13. Pulttien tarkastamista fluoresoivalla magneettijauhemenetelmällä, NDT-tarkastajana Jukka Pylkkänen (Pylkkänen, 2016)

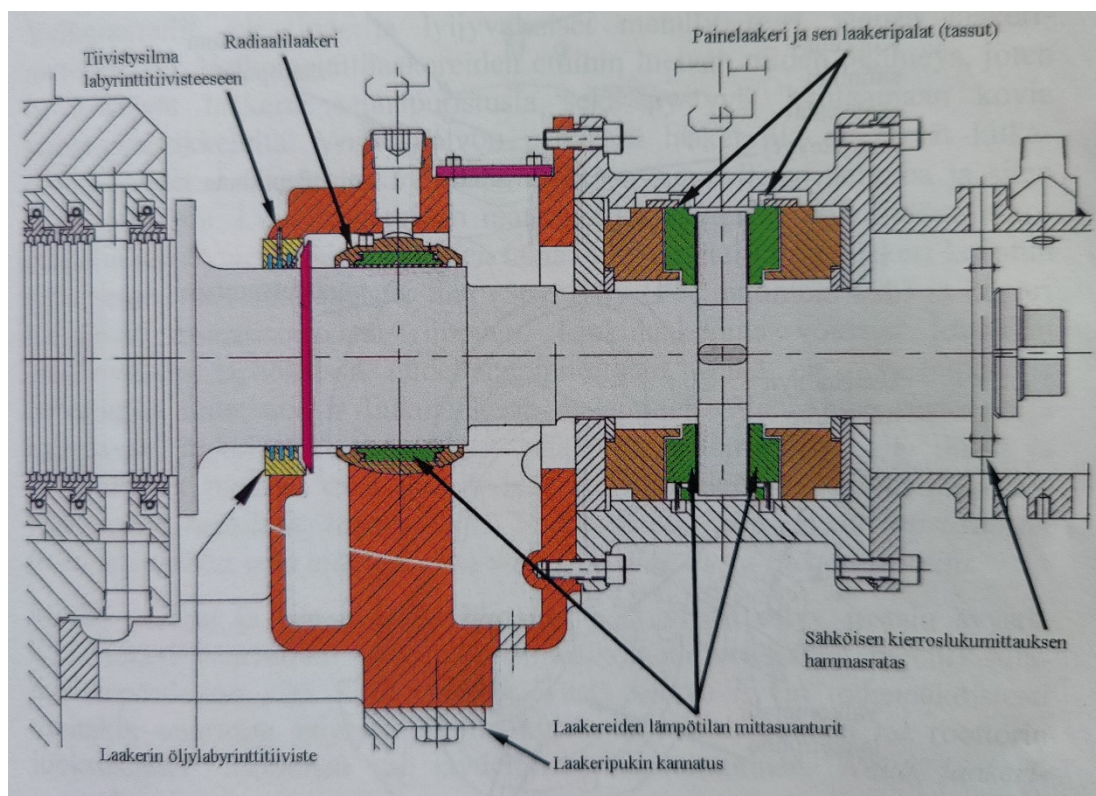
4.2 Turbiinin liukulaakerit ja niiden valkometallipinnoitteen tarkastaminen

Turbiinin laakerit kannattelevat ja asemoivat roottorin oikeaan kohtaan turbiinipesässä. Höyryturbiineissa on kahden tyyppisiä laakereita, kannatuslaakerit (radiaalilaakerit) ja painelaakerit (aksiaalilaakerit). (Kauppinen, 2018, s. 101-106.)

Radiaalilaakereiden tärkein tehtävä on kannatella roottoria. Höyryturbiinin roottori on kannatettu molemmista päistä radiaalilaakerilla. Aksiaalilaakerit (painelaakerit) vastustavat roottoriin kohdistuvia aksiaalivoimia. (Boyce, 2011, s. 557.)

Kuvassa 14. esitetyt radiaali- ja aksiaalilaakerit ovat liukulaakereita. Liukulaakereissa on pehmeä valkometallipinnoite. Valkometallit koostuvat tinasta, lyijystä, antimonista ja kuparista. Liukulaakerin valkometallipinnoitteen ja roottorin välissä on voiteluöljykalvo. (Kauppinen, 2018, s. 101-106.)

Liukulaakereiden käytettävyyden kannalta tärkeintä on tarkastaa valkometallipinnoitteen kiinnittyvyys, huokoisuus ja säröily. Laakerirunkojen vauriot ovat harvinaisia. (Lindgren, V-P., 2021.)



Kuva 14. Höyryturbiinin laakerit (Kauppinen, 2018)

Erilaisten liukulaakerityyppien valkometallipinnoitteiden kiinnittyvyys testataan ultraäänimenetelmällä, kun taas pinnoitteen huokoisuus ja säröindikaatiot testataan tunkeumanestemenetelmällä. Tunkeumanesteellä voidaan tosin myös havaita pinnoitteen irtonaisuus reuna-alueilla.

Ensin suoritetaan tunkeumanestetarkastus (kuvat 15 ja 16) ja vasta sitten ultraäänitarkastus (kuva 17). Ultraäänitarkastuksessa käytettävän väliaineen poistaminen tunkeumanestetarkastuksen vaatimalla tavalla voi olla vaikeaa.

Ennen tunkeumanestetarkastusta laakerin pinta on puhdistettava liottimella ja kuivatava. Sen jälkeen tarkoitukseen sopiva tunkeumaneste levitetään koko alueelle, myös laakerin reunat on käsiteltävä huolellisesti. Tunkeumanesteen annetaan tunkeutua mahdollisiin epäjatkuvuuskohtiin, minimi tunkeutumisaika on 30 min. Tunkeumaneste ei saa kuivua. Tunkeutumisaajan jälkeen ylimääräinen tunkeumaneste poistetaan pinnalta ja levitetään kehite. Valkoinen kehite imee sisäänsä punaista tunkeumanestettä, joka on tunkeutunut ja jäänyt epäjatkuvuuskohtiin ja antaa epäjatkuvuuskohdasta selvästi havaittavan, suurentuneen näyttämän. (ISO 4386-3:2018, 2018).



Kuva 15. Turbiinin roottorin aksiaalilaakereiden segmenttien tunkeumanestetarkastus. Takapään laakerissa vikaindikaatioita (Lindgren, V-P., 2015)



Kuva 16. Roottorin, vaihdelaatikon ja generaattorin radiaalilaakereiden tunkeumanestetarkastus (Lindgren, V-P., 2015)

Ultraäänitarkastuksessa, luodattaessa valkometallin puolelta, jos valkometalli on irti teräsrunosta, heijastuu äänenpaine rajapinnasta takaisin kokonaan tai suurimmalta osin. Irtonainen valkometallipinnoite havaitaan ultraäänilaitteessa sarjana kerrannaiskaikuja, joiden välit vastaavat laakerin valkometallipinnoitteen paksuutta. Vikaindiakaatiot merkitään laakeriin ja raportoidaan.

Ruiskupinnoitettujen laakereiden kohdalla pitää varmistua siitä, että laakerimetalli ja puskurikerros läpäisevät ultraääntä riittävän hyvin. Valkometalli-teräs-rajapinnasta saatavan kaiun on oltava huomattavasti pienempi kuin laakerin rungosta saatava takaseinäkaiku -12 dB / -75 %. (Lindgren, V-P., 2021.)

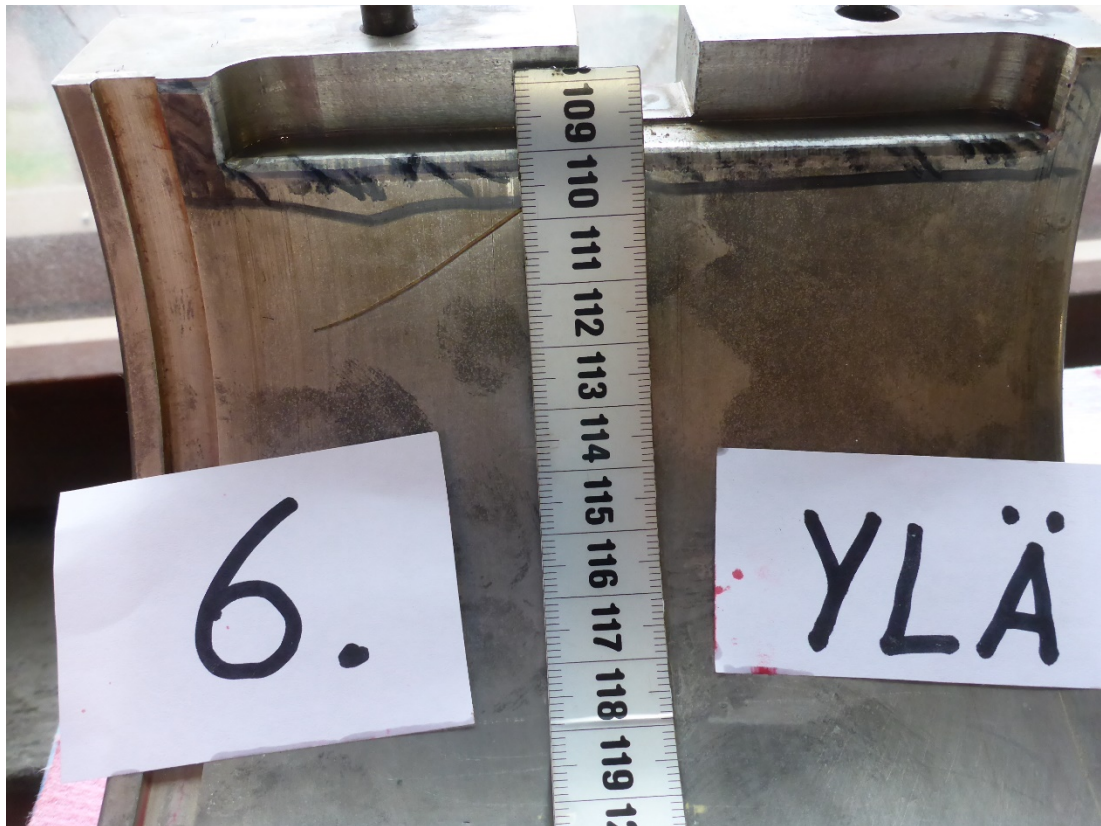
Standardin ISO 4386-1 mukaisesti liukulaakerit sijoitetaan laatuluokkiin A, B1, B2, C ja D. Tarkastuksen perusteella liukulaakerit luokitellaan parhaaseen mahdolliseen standardin laatuluokkaan. Laakerin käytettävyydestä päätöksen tekee aina joku muu kuin tarkastaja. Varsinaisia hyväksymisrajoja ei ole. Raportissa otetaan kantaa laakerin hyväksymiseen/hylkäämiseen vain, jos hyväksymisrajat ovat selvillä. Yleensä hyväksymisrajat eivät ole selvillä tarkastusta suoritettaessa.

Tarkastuksessa käytetään digitaalista ultraäänilaitetta. Käytettävien luotaimien taajuuden pitää olla välillä 2-10 MHz värähtelijän koon on oltava välillä 6-24 mm, luotaimet voivat olla 1- tai 2-kiteisiä. Luotainpinta tulee olla suojattu muovi- tai kumikalvolla laakerimetallin naarmuuntumisen estämiseksi. (ISO 4386-1:2019, 2019.)

Kytkeäaineena käytetään ohutta öljyä tai ultraäänitarkastukseen tarkoitettua geeliä. Vesipitoisten liisterien tms. käyttö on kielletty.

Laakerit luodataan öljytyltä laakeripinnalta ohjeen mukaisella luotaimella siten, että koko laakeripinta tulee katetuksi. Luotaimen kuljetusratojen päällekkäisyys pitää olla noin 1/3 edellisestä kuljetusradasta standardin ISO 4386-1 tarkastusluokan 3 mukaan. Mikäli tarkastuksessa havaitaan irtonaisia alueita tai muuta raportoitavaa, merkitään ne laakeriin rasvaliidulla tai tussilla, kuten kuvassa 17. Huomioitavaa on, että takaseinäkaiku voi kadota kohdissa, joissa laakerinrunгон geometriasta johtuen äänikeila siroaa pois päin luotaimesta. Mikäli kyseessä olevasta kohdasta ei kuitenkaan saada viikakua valkometalli-teräs-rajapinnasta, on oletettavaa, ettei valkometalli ole irti

rungosta. Yleensä irtonaiset alueet ovat laakerin reunoilla tai lähellä epäjatkuvuuskoh-
tia, kuten porausten tai öljytaskujen reunoilla.

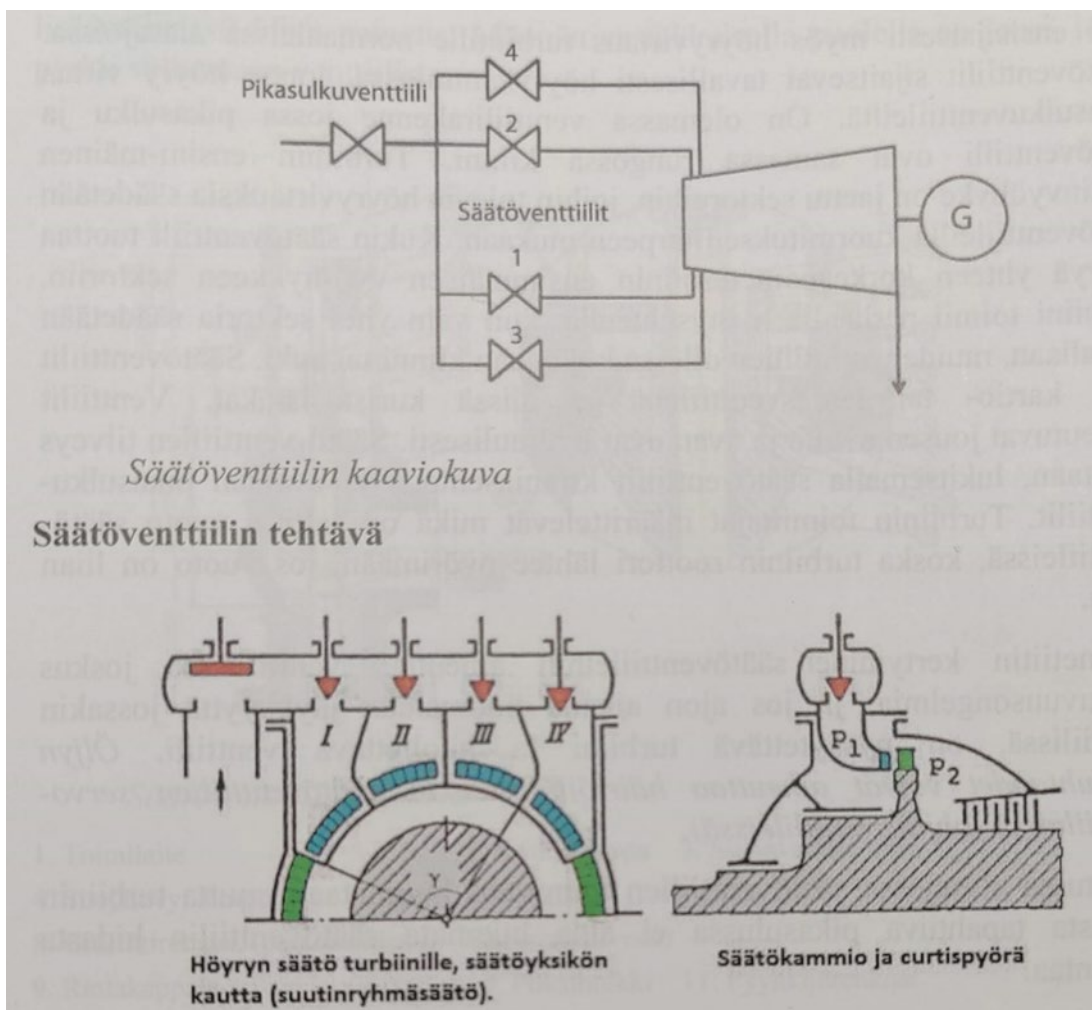


Kuva 17. Valkometallipinnoitteen ultraäänitarkastuksessa havaittu irtonainen alue merkittynä laakeriin (Lindgren, V-P., 2015)

4.3 Pikasulku- ja säätöventtiilit sekä niiden tarkastamien

Pikasulkuventtiili on turbiinin suojauksen tärkein komponentti, sen avulla voidaan katkaista höyryn tulo turbiinille hallitusti alle sekunnissa. Pikasulkuventtiilin sulkeutumisella voidaan estää turbiinin vaurioituminen. Höyryn tulon katkaisemisen syitä voivat olla erilaiset häiriötilanteet. Yleisin pikasulun syy on kuorman häviäminen generaattorista, jolloin turbiini lähtee ns. ryntäämään eli kierrosnopeus kasvaa hallitsemattomasti liian suureksi. Automaattisen pikasulun voi laukaista öljy- ja höyryvuodot, myöskin säätöventtiilien toiminnan häiriö on usein syy pikasululle. Säätöventtiilien avulla tahdistetaan turbiinin kierrosnopeus sähköverkkoon sopivaksi ja tahdistuksen

jälkeen säätöventtiileillä säädetään turbiinin tehoa (kuva 18). (Kauppinen, 2018, s. 65-70).



Kuva 18. Säätöventtiilien toimintaperiaate (Kauppinen, 2018)

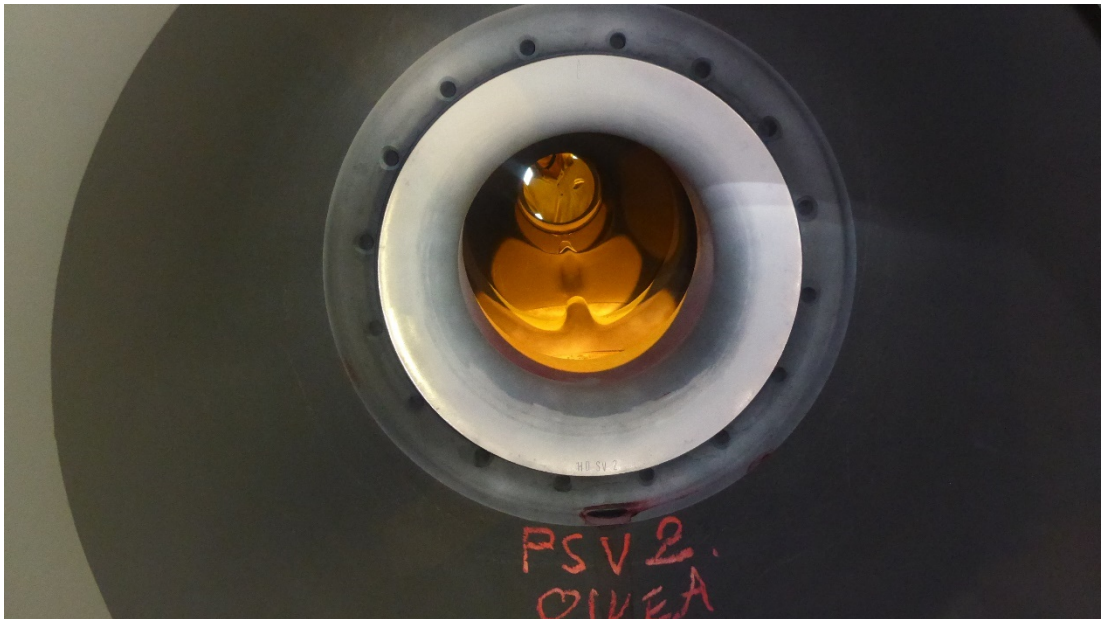
Yleensä turbiinirevisioissa tarkastetaan säätö- ja pikasulkuventtiilien osia seuraavasti:

- venttiilien rungot/pesät tarkastetaan magneettijauhemenetelmällä puhdistuksen jälkeen. Päähuomio tarkastuksissa on venttiilirunkojen ja liitosputkistojen hitsaus- saumoissa. Tarvittaessa virumisalueella oleville hitsausaumoille tehdään jäljennetarkastus ja kovuusmittaus
- sisäosista tarkastetaan tunkeumaneste- / magneettijauhemenetelmällä venttiilin keila ja kara (kuvat 19 ja 21)

- venttiilin pesässä olevat pitopinnat tarkastetaan puhdistuksen jälkeen tunkeumanestemenetelmällä (kuvat 20 ja 22). Tarkastus uusitaan keilan ja pitopintojen osalta venttiilin hionnan jälkeen. (Lindgren, V-P., 2021.)



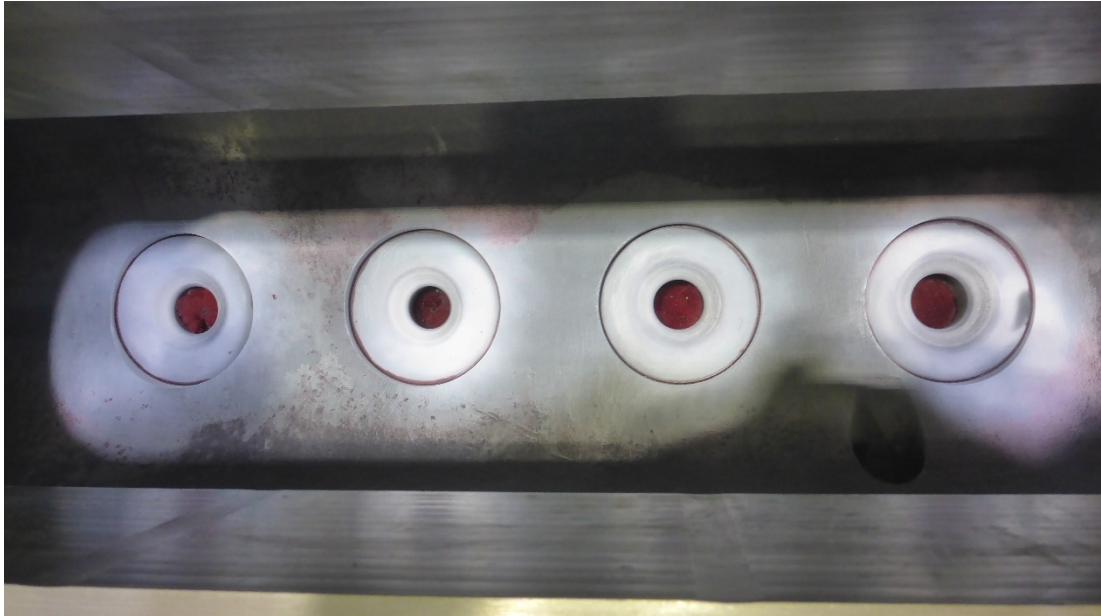
Kuva 19. Pikasulkuventtiilin keila ja kara tunkeumanestetarkastuksessa. (Lindgren, V-P., 2020)



Kuva 20. Pikasulku venttiilin diffuusori tunkeumanestetarkastuksessa (Lindgren, V-P., 2020)



Kuva 21. Säätoventtiilien keilat ja karat tunkeumanestetarkastuksessa (Lindgren, V-P., 2020)



Kuva 22. Säätoventtiilien diffuusorit tunkeumanestetarkastuksessa (Lindgren, V-P., 2020)

4.4 Turbiinin sisä- ja ulkopesät sekä niiden tarkastaminen

Turbiinin ulkopesä estää höyryn pääsyn turbiinisaliin ja sulkee sisäänsä turbiinin sisäpuoliset komponentit. Ulkopesässä kiertää paisunut höyry tai väliottoihin menevä höyry, jos välitulistusta käytetään. Korkeapaineturbiinin ulkopesät ovat massiivisia valukappaleita korkean lämpötilan ja paineen takia. Matalapainepesät voivat olla hitsattuja levyrakenteita. (Ivaska, 2016.)

Turbiinin sisäpesät altistuvat korkealle paineelle ja lämpötilalle, joten ne suunnitellaan vahvoiksi valukappaleiksi. Sisäpesään on kiinnitetty höyrysuuttimet. Sisäpesällä on oma tiivistepoksinsa, jolla estetään korkea paineisen ja lämpötilaisen höyryn purkautuminen ulkopesään. (Ivaska, 2016.)

Ulkopesä koostuu ylä- ja alapuoliskosta, jotka kiinnitetään toisiinsa laippaliitoksella. Ulkopesään kiinnitetään sisäpesät, johtosiipikannakkeet ja tiivistepoksit. Ylä- ja alapuoliskon välistä tiivistepintaa kutsutaan jakotasoksi. Ulkopesän alapuolen jakotaso näkyy kuvassa 23.



Kuva 23. Turbiinin ulkokopesät ja niiden takana korkeapainesisäpesät (Replico Oy, 2019)

Pesistä löytyy joskus säröindikaatioita, jotka eivät vaikuta käytettävyyteen, koska ne ovat valmistuksen aikaisia valuvirheitä, jotka eivät ole aktiivisia. Särön aktiivisuus voidaan todeta jäljenteellä. Eroosiokulumat välipaine- ja matalapaineturbiinin pesissä sekä tukitangoissa ovat mahdollisia.

Pesien tarkastamisessa kiinnitetään erityisesti huomiota kuumimpiin ja virumisalueella oleviin kohtiin eli suutinsegmenttiin ja sen ympäristöön. Korkeapainesuuttimet voivat olla tosin myös kiinnitettynä säätöventtiilitukkiin. Jakotaso tarkastetaan muodonmuutosten ja säröjen varalta. Jakotason särötarkastus suoritetaan fluoresoivalla magneettijauhemenetelmällä.

Hyvänä nyrkkisääntönä pesien tarkastamisessa voidaan käyttää jakotasojen ja epäjatkuvuuskohtien 100 % fluoresoivaa magneettijauhetarkastusta, jos tarkastuslaajuudesta ei ole tarkempaa tietoa.

4.5 Roottori, juoksu- ja johtosiivistö sekä niiden tarkastaminen

Roottori on nimensä mukaisesti pyörivä komponentti. Liike-energian höyryturbiinin roottori saa korkeapainehöyrystä, joka syötetään roottorin juoksusiivistöön. Roottori koostuu akselistasta ja siihen kiinnitetyistä juoksusiipivyöhykkeistä. Curtis-pyörän juoksusiivistö on roottorin rasitetuin osa. Curtis-pyörä sijaitsee virumisalueella, joten on suositeltavaa seurata myös sen perusaineen materiaalitekniisiä ominaisuuksia jäljentein. Referenssijäljenne otetaan roottorin kylmästä päästä, jos se on mahdollista.

Roottoreille aiheutuu rasitusta keskipakovoimista ja lämpöjännityksestä. Höyryturbiinien korkeapaineroottorit toimivat virumisalueella ja välitulistusta käytettäessä myös välipaineroottorit. (Ivaska, 2016.)

Kuvassa 24 näkyvässä roottorissa höyryn tulosuunta on vasemmalta oikealle eli Curtis-vyöhykkeeltä korkeapainepäähän ja kohti matalapainepäätä.



Kuva 24. Höyryturbiinirevisio. Valmistusvuosi 1976, teho 51,8 MW, 3000 rpm, höyryn paine 60 bar ja lämpötila 510 °C

Roottorista tarkastetaan akseli, laakereiden kaula-alueet, kytkinlaippa, juoksusiivistö ja mahdolliset pannat ja niitit. Tarkastusmenetelmänä käytetään fluoresoivaa magneettijauhetaarkastusta. Mahdolliset niittaukset siivistössä tarkastetaan ultraäänimenetelmällä. Jos siivistön pannoissa on käytetty sidelankaa, on sidelanka yleensä austeniittista terästä ja sen tarkastuksessa käytetään tunkeumanestemenetelmää.

Juoksu- ja johtosiipien jättöreunat tarkastetaan fluoresoivalla magneettijauhemenetelmällä tai pyörrevirtamenetelmällä (kuva 26). Juoksusiivistön rakenteesta riippuen ei aina voida varmistua tarkastettavan pinnan magnetoitumisesta. Tällaiset pinnat on tarkastettava pyörrevirtamenetelmällä. Magneettijauhemenetelmän etuna on sen nopeus ja pyörrevirtamentelmän etuna luokse päästävyys ahtaisiin rakenteisiin (kuva 25). NDT-menetelmiä yhdistämällä saadaan roottorit tarkastettua luotettavasti ja nopeasti.



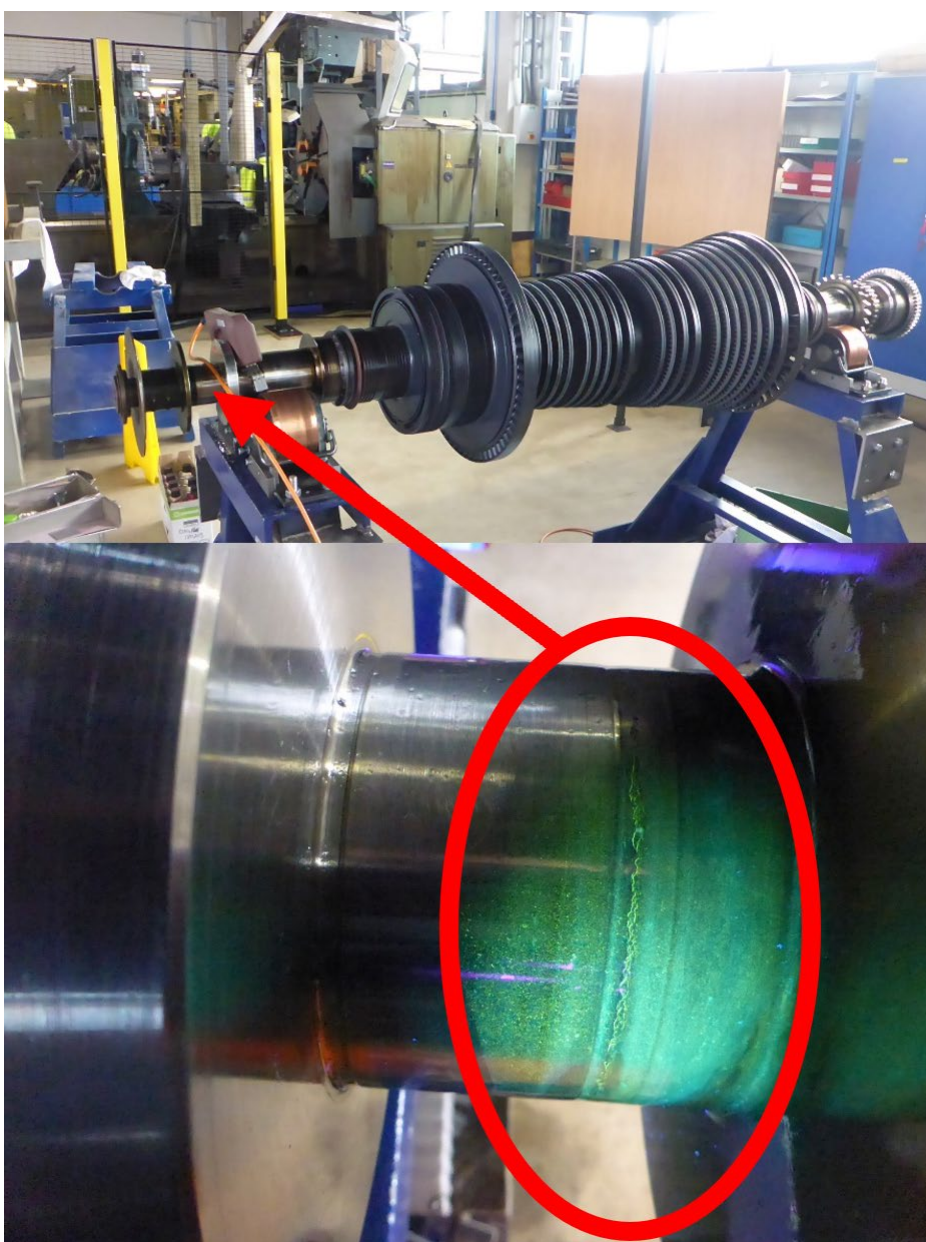
Kuva 25. Vaikeapääsyisten jättöreunojen tarkastamisessa käytetään erikoisvalmistusta pyörrevirta-anturia.



Kuva 26. Johtosiipikannakkeita/sisäpesiä irrotettuna pesistä turbiinialissa pyörrevirtatarkastusta varten.

5 ESIMERKKI NDT-MENETELMÄN VALINNASTA – HÖYRYTURBIININ ROOTTORIN TARKASTUS

Magneettijauhetaarkastuksessa havaittiin 360° indikaatio höyryturbiinin roottorin laakerikaulalla. Pyörrevirralla määritettiin nopeasti indikaation tilavuus. Tilavuutta ei tässä tapauksessa ollut, vaan kyseessä oli permeabiliteetin vaihtelu hitsin muutosvyöhykkeellä. Indikaation tilavuudesta olisi voitu varmistua myös tunkeumanestemenetelmää käyttämällä, mutta pyörrevirtaa käyttämällä ajankäyttö jäi murto-osaan. Indikaatio ei aiheuttanut toimenpiteitä.



Kuva 27. Magneettijauhetaarkastuksen indikaatio

6 YHTEENVETO

Höyryturbiinirevisioiden aikaisista tarkastustöistä ei ollut olemassa julkista dokumenttia, jota yksiselitteisesti olisi voinut käyttää revision aikaisten tarkastusten suunnitteluun ja aikatauluttamiseen. Tieto asiasta on kyllä olemassa, mutta tiedon pirstaleisuus ja erikoislaatuisuus aiheuttavat suuria hankaluuksia asiaan syvällisesti perehtymättömälle. Tämä dokumentti keräsi käytännönläheisesti yhteen kirjallisuudesta, standardeista ja henkilöhaastatteluista saatuja tietoja.

Suuressa roolissa olivat asiantuntijoilta saadut valokuvat ja ehdotukset aihesisällöstä. Näiden valokuvien tuella käsiteltyjä asioita on helpompi ymmärtää ja ne havainnollistavat mittasuhteita. Kirjallisuus ja standardit loivat tietoperustan, jota täydennettiin asiantuntijahaastatteluilla.

Opinnäytetyön aikana tehtyjen haastattelujen perusteella turbiinirevisioiden ongelmana on joskus varautumattomuus tarkastuksissa mahdollisesti havaittaviin vikalöydöksiin ja poikkeamiin. Varaosien saatavuus voi olla vaikeaa ja korjaustöihin pystyvillä konepajoilla on yleensä huoltokapasiteetin resurssit varattu kuukausiksi, joskus jopa vuosiksi, eteenpäin. Tilanteeseen varautuminen ei ole yleensä mahdollista varaosien erikoislaatuisuuden ja korkean hinnan takia. Yleinen mielipide oli kuitenkin se, että Suomessa turbiinirevisioiden toteuttaminen on hyvissä kantimissa ja suomalaiselle turbiiniosaamiselle löytyy kysyntää maailmanlaajuisestikin.

Haastattelujen perusteella revisiossa ilmeneviin vikalöydöksiin voidaan varautua endoskoopitarkastuksella, käynninaikaisilla värähtelymittauksilla, turbiinin käyttöhistorian täsmällisellä dokumentoinnilla ja tarkastussykliä tiivistämällä. Tärkeää on myös turbiinikohtaisten tyyppivikojen tiedostaminen ja niiden seuranta. Konepajalta ja roottorin tasapainotuksen tarjoajalta tulisi varata aika jo etukäteen, jos mahdollista. Suurien, yli 40 MW turbiinien roottorien tasapainotusta ei Suomessa pystytä tekemään, lähin tasapainotustyöhön soveltuva laitteisto sijaitsee Ruotsissa (Fortum Västerås).

Revision aikaisten tarkastusten aikatauluun vaikuttavat myös tarkastettavien komponenttien puhdistukset ja puhallukset. Turbiinialissa ei voida puhaltaa komponentteja puhtaaksi toimenpiteen pölyn ja melun vuoksi. Tästä syystä puhallettavat komponentit tulee nostaa ulos puhallusteltaan. Omistajan on hyvä palkata tehtävään ammattitaitoinen puhalluksia suorittava yritys, joka hallitsee asianmukaisen komponenttien suojauksen ja puhallusmateriaalin valinnan. Nostotyöt ja logistiikka voivat olla haastavia, joten niihin on varauduttava etukäteen.

Tätä opinnäytetyön muodossa olevaa dokumenttia voidaan käyttää apuna turbiinirevisioiden ennakkosuunnittelussa, aikatauluttamisessa, tarkastustöiden suorittamisessa ja dokumentoinnissa. Dokumenttia voidaan soveltaa myös varauksin kaasuturbiinien tarkastuksiin. Dokumentin yhteenvetona luotiin ”Turbiinirevision NDT-tarkastuksien suunnittelun muistilista”, joka on liitteenä 1. Liitteen tarkoitus on toimia yksinkertaisena muistilistana turbiinirevision ennakkosuunnittelussa.

LÄHTEET

Boyce Meherwan P. (2011). Gas turbine engineering handbook fourth edition. Elsevier.

Ether NDE. (2017). The Eddy Current Probe & Accesories Catalogue version 7.2.

Fortum. (2021). Palvelut turbiineille ja generaattoreille. Haettu 30.11.2021 osoitteesta <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisoille/palvelut-voimalaitoksille/enext-turbiini-ja-generaattoripalvelut>

ISO 4386-1:2019. (2019). Plain bearings — Metallic multilayer plain bearings — Part 1: Non-destructive ultrasonic testing of bond of thickness greater than or equal to 0,5 mm. <https://www.iso.org/standard/77223.html>

ISO 4386-3:2018. (2018). Metallic multilayer plain bearings — Part 3: Non-destructive penetrant testing. <https://www.iso.org/standard/68679.html>

ISO 9712:2012. (2012). Rikkomaton aineenkoetus. NDT-henkilöiden pätevänti ja sertifiointi. Yleisperiaatteet. <https://sfs.fi/>

Ivaska, J. (6-7.4.2016). Turbiinien kriittiset komponentit [luentomateriaali]. Ammattien edistämislaitoksen seminaari, Tampere, Suomi.

Kauppinen, J. (2018). Turbiinitekniikka – käyttö, huolto ja kunnossapito. Tammer-teknikka.

Lindgren, V-P. (15.11.2021). Henkilökohtainen keskustelu NDT-asiantuntija Veli-Pekka Lindgrenin kanssa (Q-Test Oy).

Mäkelä, J. (13.10.2021). Turbiiniasiantuntija Jaakko Mäkelän puhelinhaastattelu (Fortum Oy).

Nikkarila, R. (17.11.2021). Elinikäasiantuntija Reino Nikkarilan puhelinhaastattelu (Replico Oy).

Pylkkänen, J. (18.11.2021). NDT-tarkastaja Jukka Pylkkäsen puhelinhaastattelu (Otavan Teräsmies).

Saariaho, P. (1995). Ammatinedistämislaitos AEL, Pyörrevirtatarkastustasojille 1 ja 2. Editoitu Dolk, H. 20.3.2017.

Tuomisto, R. (17.11.2021). Henkilökohtainen sähköpostikeskustelu turbiiniendoskopian asiantuntija Rami Tuomiston kanssa (Replico Oy).

Valtioneuvoston asetus painelaitteista 1548/2016. Haettu 30.11.2021 osoitteesta <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2016/20161548>.

Väänänen, V. (17.11.2021). Henkilökohtainen sähköpostikeskustelu elinikäntarkastusten asiantuntija Ville Väänänenin kanssa (Replico Oy).

Åström, T. (1990). NDT-menetelmien kehitysnäkymät hitsausliitosten tarkastuksessa. Suomen Metallin, Kone- ja Sähköteknisen Teollisuuden Keskusliitto, MET ry.

Turbiinirevisioiden NDT-tarkastuksien suunnittelun muistilista

	VT, visuaalinen tarkastus	PT, tunkeumanestettarkastus	MT, magneettijauhettarkastus	UT, ultraääni-tarkastus	ET, pyörrevirta-tarkastus	Jäljenne	Kovuusmittaus	Endoskopia / turbiinia ei pureta
Ulkopesä	jakotaso, epäjatkuvuuskohdat, laakeripedit, suutinsegmentti	suutinsegmentti (1)	jakotasot (2), epäjatkuvuuskohdat, laakeripedit, suutinsegmentti (1)					suutinsegmentti
Sisäpesä	jakotaso, koneistukset	ei magneettiset	jakotaso, koneistukset					
Roottori + juoksusiivet	siivistö, akseli ja laipat, pannat	ei magneettiset	siivistö (2), akseli, laipat, pannat	niitit	siipien jättöreunat (2)	Curtis-pyörä (4)	Curtis-pyörä (4)	siivistö
Johtosiivet + kannakkeet	siivet ja liitokset, runko ja jakotaso	ei magneettiset	siivet (2), liitokset, runko, jakotaso	kuusiliitos	siipien jättöreunat (2), kuusiliitos			siivistö
Säätö- ja pikasulkuventtiili	keilat, karat, diffuusori	karat (1), diffuusori ja keilat (2)	keilat (2), karat (1), hitsit (2/3), runko			hitsit (4)	hitsit (4)	karat ja keilat
Pultit ja mutterit	ennen puhdistusta	ei magneettiset	kela/ies		kierteet (2)		tarvittaessa (4)	
Laakerit	pinnoite, runko	Pinnoite Kiinnitys		kiinnitys				

1) PT/MT

2) Vaatii puhdistuksen / puhalluksen

3) Hionta 120-240 Grit

4) Hionta 400 Grit / elektrolyyttinen tai mekaaninen kiillotus