



Shearografiatarkastus-kyvyn luomiseen vaadittavat toimenpi- teet

Tiina Kunnari

OPINNÄYTETYÖ
Maaliskuu 2023

Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Lentokonetekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Lentokonetekniikka

KUNNARI, TIINA:

Shearografiatarkastus-kyvyn luomiseen tarvittavat toimenpiteet

Opinnäytetyö 28 sivua
Maaliskuu 2023

Opinnäytetyö tehtiin Patria Aviation Oy:lle, ja siinä selvitettiin, mitä toimenpiteitä tarvitaan, jotta shearografiatarkastus-kyky voidaan ottaa käyttöön vuoden 2023 aikana. Shearografiatarkastus-kyvyn käyttöönotosta on tehty selvitystyötä Patrialla sisäisesti jo vuosina 2017–2019, jonka aikana on hankittu tarvittava tarkastuslaitteisto. Tuolloin projekti jäi pelkästään laitteiston hankintaan eikä varsinaista käyttöönottoa suoritettu.

Opinnäytetyössä esitellään tarvittavat toimenpiteet, joita tarvitaan ennen kuin tarkastustekniikka voidaan virallisesti ottaa Patrialla käyttöön. Opinnäytetyössä käsitellään myös shearografiatarkastus-tekniikan periaatteet ja sovelluskohteet. Opinnäytetyössä esitellään lisäksi EN 4179 standardin kelpoisuusvaatimuksia rakennetta rikkomattomiin tarkastuksiin. EN 4179 standardi kelpoisuusvaatimuksesta on yhteiseurooppalainen ilmailuun sovellettava standardi, jolla määritetään vähimmäisvaatimukset koulutukselle sekä kokemukselle, jokaiselle rakennetta rikkomattomalle tarkastusmenetelmälle. Standardin tunteminen auttaa ymmärtämään tarvittavia koulutustuntia sekä kokemustuntien määriä, kun ollaan esimerkiksi ottamassa käyttöön uutta tarkastusmenetelmää.

Opinnäytetyön avulla voidaan käyttöönotto toimet aloittaa sekä erillisenä projektina jatkaa Patrian sisäisten ohjeistusten laatimista tarkastustekniikalle. Selvitystyön avulla pystytään järjestämään tarvittavat perus- ja jatkokoulutukset shearografiatarkastus-tekniikalle

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Aircraft Engineering

KUNNARI, TIINA:
Necessary activities to create capability for Shearography inspections

Bachelor's thesis 28 pages
March 2023

The thesis was done for Patria Aviation Oy, and it examined what measures are needed for the shearography inspection capability to be taken into use during the year 2023. The implementation of the shearography inspection capability has already been investigated internationally at Patria in 2017-2019, during which time the necessary inspection equipment has been acquired. At that time, the project was limited solely to the purchase of equipment and no actual commissioning was carried out.

The thesis presents the necessary actions that are needed before the inspection technology can be officially implemented at Patria. The thesis also discusses the principles and applications of the shearography inspection technique. The thesis also presents the eligibility requirements of the EN 4179 standard for non-destructive inspections. The EN 4179 standard on qualification requirements is a common European standard applicable to aviation, which defines the minimum requirements for training and experience, for each non-destructive inspection method. Knowledge of the standard helps to understand the required training hours and the number of experience hours, for example, when introducing a new inspection method.

With the help of the thesis, the implementation activities can be started and preparation of Patria's internal guidelines for the audit technician can be continued as a separate project. With the help of this study, it will be possible to arrange the necessary initial and further training for the shearography inspection technician.

Key words: shearography, ndt, aircraft, inspection, en4179

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	PATRIA OYJ	7
	2.1 Liiketoiminnot ja konsernirakenne	7
	2.2 Operations liiketoiminta	8
3	RAKENNETTARIKKOMATTOMAT TARKASTUSMENETELMÄT (NDT) 10	
	3.1 Tarkastusmenetelmät.....	10
	3.2 Shearografiatarkastus (ST)	11
	3.2.1 Tarkastuslaitteisto ja herätetekniikat.....	12
4	KELPUUTUSVAATIMUKSET	18
	4.1 EN 4179 standardi	18
5	SHEAROGRAFIATARKASTUSTEKNIIKAN KÄYTTÖÖNOTTO	22
	5.1 Lähtökohta	22
	5.2 Laitteiston huolto sekä kalibrointi	22
	5.3 Käyttökoulutus laitteistolle	23
	5.4 Harjoituskappaleet	23
	5.5 Tekniikan peruskoulutus	23
	5.6 Tekniikan jatkokoulutus Level 3	24
	5.7 Vaadittu ohjeistus sekä käyttöönotto.....	25
6	POHDINTA	27
	LÄHTEET	28

LYHENTEET JA TERMIT

BN	Barkhausen effect, Barkhausen kohina
ET	Eddy current testing, Pyörrevirtatarkastus
IRT	Infrared Thermography, Lämpökuvaus
MRO	Maintenance, repair and overhaul, Huolto, korjaus ja modifikaatiot
MT	Magnetic particle testing, Magneettijauhetarkastus
NDT	Nondestructive testing, rakennetta rikkomattomat tarkastukset
RT	Radiographic testing, Röntgentarkastus
Sertifikaatti	Työnantajan myöntämä lausunto siitä, että työntekijä täyttää standardin vaatimukset.
ST	Shearography testing, Shearografiatarkastus
UT	Ultrasonic testing, Ultraäänitarkastus
PT	Penetrant tensting, Tunkeumanestetarkastus

1 JOHDANTO

Shearografiatarkastustekniikka on rakennettarikkomattomien tarkastusmenetelmien yksi tekniikka. Tekniikka, jossa hyödynnetään laservalojen takaisin heijastuman avulla muodostettavaa kuvaa kappaleen sisäisistä lähellä pintaa olevista vaurioista. Shearografian avulla pystytään tarkastamaan suhteellisen nopeasti ohuita komposiittimateriaaleja tarkasti ja kustannustehokkaasti verrattuna esimerkiksi ultraäänitarkastusnopeuteen isoilla ja laajoilla kappaleilla. Nykyään lentokoneissa ja yleisesti ilmailuteollisuudessa käytetään paljon ohut levytekniikkaa sekä komposiittirakenteita. Tämän takia tarkastustekniikoiden kehitys on tärkeää niin taloudellisessa kuin laadullisessakin mielessä.

Opinnäytetyö tehdään Patria Aviation Oy:lle syksyn 2022 ja kevään 2023 aikana. Pääpainon olleessa toimenpiteissä, joita tarvitaan jotta, shearografiatarkastus-kyky voidaan ottaa käyttöön 2023 vuoden aikana. Patrialla on tehty tekniikan käyttöönottoa sekä laitteiston hankintaa varten tutkimustyö vuosina 2017 ja 2018, jossa mm. Dantec Oy:n tuote-esittelijä kävi laitteiston kanssa pitämässä demo päivät, joiden avulla pystyttiin vertailemaan eri herätemenetelmiä ja valitsemaan tilattava laitteisto Patrialle.

Opinnäytetyössä tullaan käymään läpi shearografiatekniikan periaatteet siten, että lukijalla on peruskäsitys kyseisen tarkastustekniikan periaatteista sekä sovelluskohteista. Lisäksi opinnäytetyössä käydään myös läpi EN 4179 standardin kelpoisuusvaatimuksia rakennetta rikkomattomiin tarkastuksiin siten, että lukijalle muodostuu EN 4179 standardin vaatimuksista peruskäyttökuva. EN 4179 standardin yleistietämys on tärkeää lukijalle, jotta hän ymmärtää paremmin ilmailupuolen NDT-tarkastusten kelpuutusvaatimuksien ja siten sen vaikutuksen myös shearografiatarkastustekniikan suorittamiseen.

2 PATRIA OYJ

2.1 Liiketoiminnot ja konsernirakenne

Patria on kansainvälinen puolustus-, turvallisuus- ja ilmailualan luotettu elinkaarren tukipalvelujen, lentokoulutuksen ja teknologiaratkaisujen tuottaja. Patria tarjoaa kaluston käytettävyyttä ja suorituskyvyn jatkuvaa kehittämistä sekä tiedustelu-, valvonta- ja johtamisjärjestelmien tuotteita ja palveluita ilmailu- ja puolustusalan toimijoille. Patrialla on toimipisteitä Suomen lisäksi muun muassa Belgiassa, Ruotsissa, Norjassa, Virossa ja Espanjassa. (Patria 2022)

Patrian verkkosivujen mukaan vuonna 2021 Patrian liikevaihto oli 547,7 miljoonaa euroa, ja konsernissa toimii yli 3 000 ammattilaista. Patrian omistavat Suomen valtio (50,1 %) ja norjalainen Kongsberg Defence & Aerospace AS (49,9 %). (Patria 2022)

Patria-konserni koostuu emoyhtiöstä, Patria Oyj:stä ja sen täysin omistamista tytäryhtiöistä. Kokonaan Patrian omistamien tytäryhtiöiden lisäksi Patria omistaa 61,8 % Millog Oy:stä ja 50 % norjalaisesta Nammo AS:stä, 60 % virolaisesta Milworks OÜ:stä sekä 49.9 % norjalaisesta Kongsberg Aviation Maintenance Services AS:stä. (Patria 2022)

Uuden kasvustrategian myötä Patria-konsernin toimintamalli ja organisaatio uudistuivat vuoden 2022 alusta. Uudessa toimintamallissa Patrian tavoitteena on hyödyntää kaikkien patrialaisten osaamista kokonaisvaltaisesti. Aiemmin käytössä ollut liiketoimintarakenne (pl. Millog) on purettu, ja tilalle on luotu yhtenäinen, vahvoista ydintoiminnoista – Finland, Global, Portfolio ja Operations – muodostuva Patria. (Patria 2022)

Millog jatkaa Patrian konserniyhtiönä nykyisellä rakenteellaan tehden jatkossakin yhteistyötä Patrian muiden liiketoimintojen kanssa. Yhteiset konsernitoiminnot tukevat näitä ydintoimintoja. Nykyinen muodollinen juridinen rakenne säilyy taustalla pääosin muuttumattomana, ja uusi organisaatio on sijoitettu sen puitteisiin. (Patria 2022)

2.2 Operations liiketoiminta

Operations vastaa tuotannosta ja toimitusketjusta koostuen neljästä linjasta:

- Airframe & Structure Operations
- Land Operations
- Engine, Component & Training Operations
- Systems & Integrations Operations

Airframe & Structure Operations -yksikkö vastaa lentokoneiden ja helikoptereiden kunnossapitopalveluista suomalaisille sotilasilmaluasiakkaille, viranomaisorganisaatioille sekä siviiliasiakkaille, mukaan lukien Patrian siviililentäjäkoulutukselle (Patria 2022).

Patria on johtava lentokoneiden elinkaaren tukipalvelujen tarjoaja. Patrian historia lentokonevalmistajana on auttanut kehittymään ammattitaitoiseksi ja laajalti tunnetuksi ilma-alusten elinkaaren tukiorganisaatioksi. Tänä päivänä Patrian vastuulla ovat Hornet F/A-18-torjuntahävittäjien, Hawk Mk51/51A- ja Mk66-suihkuharjoituskoneiden ja CASA C-295M-kuljetuskoneiden MRO-toiminnot. (Patria 2022)

Land Operations -yksikkö vastaa Panssaroitujen pyöräajoneuvojen (Patria AM-VXP 8x8 ja Patria 6x6) sekä tornillisten kranaatinheitinten (Patria Nemo) toimitusprojektien toteuttamisesta ja elinkaaripalveluiden tuottamisesta globaalisti. Land Operations yksikkö toimii Hämeenlinnassa. (Patria 2022)

Engines, Components & Training - yksikkö vastaa korkealaatuisista mekaanisten, avioniikka- sekä moottorilaitteiden huolloista Suomen Linnavuoren ja Hallin, sekä Belgian Liegen ja Hollannin Zevenarin toimipisteissä. Engines, Components & Training huolehtii, että asiakkaat saavat pidennettyä laajempien kokonaisuuksien käytettävyyttä huolehtimalla ja varmistamalla, että moottorit, komponentit ja laitteet toimivat parhaalla mahdollisella tavalla. Näin voidaan esimerkiksi varmistaa asiakkaiden kaluston käytettävyyttä laadukkaasti huolletuilla moottoreilla

sekä mekaanisilla ja avioniikkalaitteilla, tai parantaa ydinvoimaloiden varavoimakoneiden käytettävyyttä. (Patria 2022)

Yksikkö vastaa myös Patrian lentäjäkoulutuksen tarjonnasta siviili- ja sotilasilmailun asiakkaille. Sotilaslentokoulutuksessa toteutetaan alkeislentokoulutusta Suomen puolustusvoimien tarpeisiin. Siviili-ilmailun liikennelentäjäkoulutusta annetaan sekä koti- että ulkomaisille lentoyhtiöille, lentokouluille ja yksityisille oppilaille. Lentokoulutustoimintaa on Suomessa Pirkkalassa ja Tikkakoskella sekä Espanjan Córdobaassa. (Patria 2022)

Systems & Integrations, Operations tarjoaa vaativia järjestelmä- ja laitetoimituksia sekä puolustusvoimille että muille turvallisuusviranomaisille. Erikoisosaamisalueita ovat tiedustelu-, valvonta- ja johtamisjärjestelmät sekä niiden integrointi ja elinkaaren tuki. (Patria 2022)

3 RAKENNETTARIKKOMATTOMAT TARKASTUSMENETELMÄT (NDT)

3.1 Tarkastusmenetelmät

Rakennetta rikkomattomista tarkastuksista (NDT) puhutaan yleisesti sellaisista tarkastuksista, joissa tarkastellaan materiaalin sisäisiä rakenteita ja etsitään niistä epäjatkuvuuksia rikkomatta tai muutoin vahingoittamatta kappaleen/tarkastettavan osan jatkokäyttöä. Tarkastuksissa pyritään paljastamaan rakenteessa olevat piilevät viat sekä epäjatkuvuudet. (ASNT Industry Handbook. 2014, 1.2)

Ilmailussa osien uudelleen/jatkokäytettävyyks on erittäin tärkeää, koska moni rakenne on sellainen, ettei sitä voida vaihtaa tai sen vaihtaminen olisi taloudellisesti ja/tai ajallisesti kannattamatonta. Tästä syystä on erittäin tärkeää pystyä todentamaan osien kunto ilman, että vaarannetaan niiden käytettävyyttä tarkastusmenetelmällä. Lentokoneiden sekä helikoptereiden rakenteet suunnitellaan yleisesti kestämään tietyn lentotuntimäärän tai tietyn kuormituskertymän, jotta tämän elinajan aikana operointi olisi turvallista osia sekä rakenteita NDT-tarkastetaan määräjain.

NDT-tarkastukset eivät rajoitu pelkästään rakenteen säröjen etsintään, vaan sitä käytetään myös tarkastuksissa, joissa pyritään selvittämään rakenteen seinämäpaksuuksia, korroosiota, delaminaatioita sekä erilaisia dispondeja liima- saumoista. Lisäksi sitä käytetään materiaalin ja mikrorakenteiden tunnistamiseen. (ASNT Industry Handbook. 2014, 1.2)

EN 4179 (2022, 5) standardin mukaan rakennetta rikkomattomien tarkastusmenetelmien viisi päämenetelmää ovat

- a) pyörrevirtatarkastus (ET)
- b) ultraäänitarkastus (UT)
- c) magneettijauhetarkastus (MT)
- d) tunkeumanestetarkastus (PT)
- e) röntgentarkastus (RT)

EN 4179 mukaan mm. shearografiatarkastustekniikka ei kuulu päämenetelmiin vaan siitä käytetään nimitystä kehittyvät tekniikat (SFS-EN 4179:2021). Kehittyvillä tekniikoilla tarkoitetaan sellaisia tekniikoita, joille ei EN 4179:n mukaan ole vielä määritelty yhtä tiukkoja määriytyksiä kuin yllä luetelluille viidelle menetelmälle.

3.2 Shearografiatarkastus (ST)

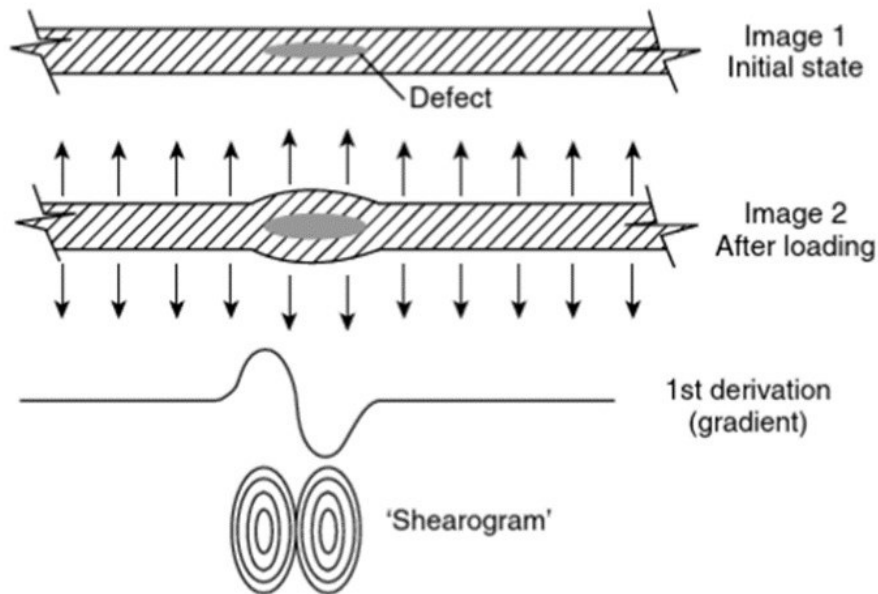
Shearografia on interferometrinen testimenetelmä, jossa havaitaan kappaleessa olevat viat mittaamalla heijastuneen valon määrää tarkastettavan kappaleen pinnalta (Sterkenburg & Wang 2021, 56). Viat voidaan havaita herätteen avulla kuormitetuista kappaleista. Tarkastettava kohde valaistetaan laservalolla ja shearografia-kameran avulla havaitaan pinnanmuodonmuutokset tietokoneen näytöltä. (Karbhari & Lee 2011, 204–205)

Kappaleesta tallennetaan videokuva ennen herätteellä kuormitusta ja toinen kuva, kun tarkastuskohdetta kuormitetaan herätteellä. Herätteenä voidaan käyttää alipainekehystä, lämpöä, pietsosähköistä värähtelijää tai mekaanista kuormitusta. Tarkastettavan kappaleen kuormittaminen herätteellä aiheuttaa pieniä pinnan muodonmuutoksia, joita verrataan ei kuormitettuun videokuvaan. Nämä pinnan muodonmuutokset (delaminaatiot, disbondit yms.) näkyvät kirkkaina ja tummina samankeskisinä ympyröinä, perhosjälkinä. (Karbhari & Lee 2011, 204–205)

Kuvasta 1 voidaan nähdä shearografia-tarkastusmenetelmän yksinkertaistettu perusperiaate vikakohdan havainnoimisesta. Shearografia-tarkastustekniikka ei ole niin häiriöherkkä ympäristön vaikutuksille. Tästä syystä shearografia-tekniikka soveltuu hyvin esim. teollisuuden sovelluksiin. (Karbhari & Karbhari 2013, 5.2.1) Ilmailun sovelluksissa ympäristön muodostamat häiriöt (esim. värinä, lika, valaistus) eivät ole niin vaikeita pois sulkea kuin teollisuudessa, ilmailun tarkastuskohteissa on yleisesti ottaen hyvin stabiilit ympäristöolosuhteet.

Kuvassa 1 on esitettyä ylimpänä tarkastettava kappale ilman herätettä, seuraavassa tarkastettavaa kappaletta kuormitetaan lämpöherätteellä, joka saa vika-

kohdalla pinnat hieman pullistumaan. Alimpana on nähtävissä shearografia-tekniikan muodostama perhosjälki, joka nähdään tarkastuslaitteiston näytöltä. (Karbhari & Karbhari 2013, 5.2.1)



Kuva 1. Shearografiatarkastus tulosten muodostuminen. (Karbhari & Karbhari 2013, 5.2.1)

3.2.1 Tarkastuslaitteisto ja herätetekniikat

Shearografiatarkastuslaitteisto koostuu laservalosta, shearografia-kamerasta, interferometristä, tietokoneesta sekä näytöstä, jolta tuloksia voidaan tarkastella (ASNT Industry Handbook. 2014, 12.2). Kuvassa 2 on esitettyä shearografiatarkastuslaitteisto.



Kuva 2. Shearografiatarkastuslaitteisto alipaine herätekehyksellä (Dantec. 2022).

Shearografia-tarkastuksessa voidaan herätetekniikkana käyttää lämpöä, alipainetta tai akustista värähtelyä (Sterkenburg & Wang, 2021, 56). Herätetekniikka valitaan sen perusteella, millaista rakennetta halutaan tarkastaa (ASNT Industry Handbook. 2014, 12.7). Ilman herätettä (kuormitusta) tarkastettavasta kappaleesta ei pystytä havaitsemaan vaurioita. Kuormittamalla tarkastettavan kappaleen pintalevyä vaurioitunut kohta kuormittuu eri tavalla kuin ehjä. Tämä muutos havaitaan shearografiatarkastuslaitteiston näytöllä. Taulukossa 1 on lueteltu tarkemmin eri herätetekniikoiden eroavaisuuksista.

Taulukko 1. Taulukossa on koostettuna herätetekniikat ja niiden sovelluskohteet. (ASNT Industry Handbook. 2014, 12.7)

Herätetekniikka	Yksikkö	Alue	Sovelluskohteet
Lämpö	°C	-272,65– 225,15	<ul style="list-style-type: none"> a) Laminaatti levyt b) Hunajakennopaneelit, vaahtoydin. c) Hartsiruiskupuristettu komposiitti. d) Moottoreiden statorit, siivet, komposiitti roottorit. e) Teräs, alumiini, keramiikka ja komposiitit
Alipaine	kPa	-0,14 – (-49)	<ul style="list-style-type: none"> a) Elastomeerit b) Kerroslevyt sekä hunajakkeno, vaahto ydin. c) Komposiittipäällysteiset paineastiat
Paine	kPa	0,07–35 000	<ul style="list-style-type: none"> a) Komposiittipäällysteiset paineastiat sekä rakettimoottorit b) Paineastiat ja lämmönvaihtimen rakenteet
Värähtely	Ilmakytkentä 0,5–20 kHz Mekaaninen kytkentä 4,0– 250 kHz	90–125 dB	<ul style="list-style-type: none"> a) Kevyt rakenteiset hunajakennot b) Metallihunajakennot c) Metallipinnoitetut ja plasma ruiskutetut moottorin ahtimen tiivisteet

Kuvassa 3 on nähtävillä lämpöherätteinen tarkastuslaitteisto Dantec Q-800 Flaw Expoler ja kaksi kappaletta 750 W halogeenilamppuja. Q-800 Flaw Expoler:issa on kahdeksan kappaletta laserdiodia ja shearografia-kamera keskellä. (Dantec dynamics. 2022)

Tarkastusalue yhdellä otoksella voi olla min. 10x10 cm ja max. 2 m². Lämpöherätteen altistusaikaa pystytään kontrolloimaan shearografian-tarkastusohjelmistolla. Lämpöherätteen käyttö on nopeaa, kuvausnopeuden ollessa 5–10 sekuntia per kuva. (Dantec dynamics. 2022)



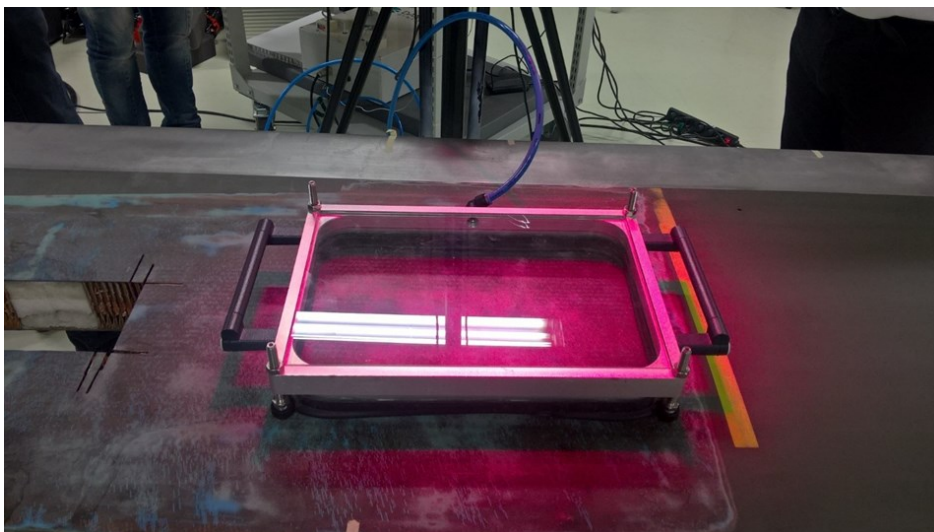
Kuva 3. Dantec Q-800 Flaw Expoler ja 2 kpl 750 W halogeenilamppuja. (Patria)

Kuvassa 4 on esitettyä pietsosähköinen värähtelijäheräte. Pietsosähköinen värähtelijä asetetaan tarkastettavan kappaleen päälle. Pietsosähköisen värähtelijän avulla tarkastettavan kappaleen pintaa täristetään, jolloin saadaan vikakohtat heijastumaan shearografia-laitteiston näytölle. Kuvassa oleva värähtelijä toimii 10 Hz - 10 kHz alueella. (Dantec dynamics. 2022)



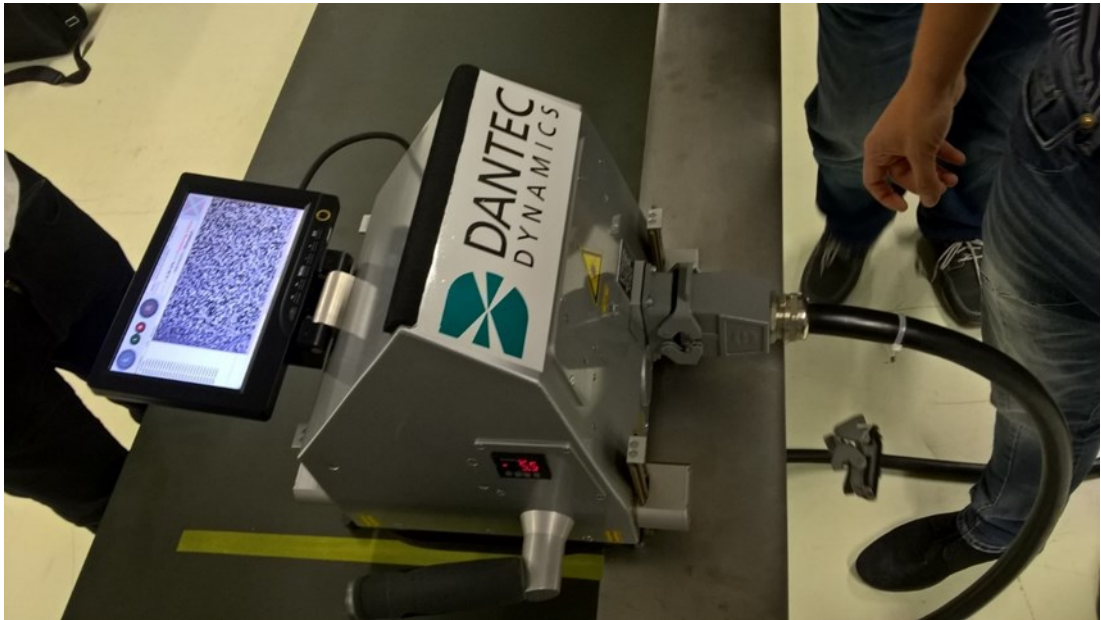
Kuva 4. Dantec Q-800 Flaw Expoler ja pietsosähköinen värähtelijä (Patria)

Kuvassa 5 alipainekehysheräte asetettuna tarkastettavalla pinnalla. Alipainekehys voidaan myös valmistaa tarkastettavan kappaleen koon mukaisesti, joten tämä herätemuoto on myös käytettävissä monen kokoisille kappaleille. Tämän laitteiston kanssa voidaan myös käyttää muita herätteitä johtuen erillisestä shearografia-kamerasta. (Dantec dynamics. 2022)



Kuva 5. Alipainekehys heräte (Patria)

Kuvassa 6 Q-810 Vacuum hood. Tällä laitteistolla pystytään tarkastamaan 180 mm x 230 mm kokoinen alue kerrallaan. Shearografia-kamera on rakennettuna laitteiston sisään, joten muita herätemenetelmiä ei voida tällä laitteistolla käyttää. (Dantec dynamics. 2022)



Kuva 6. Q-810 Vacuum hood (Patria)

4 KELPUUTUSVAATIMUKSET

4.1 EN 4179 standardi

"Aerospace series. Qualification and approval of personnel for non-destructive testing" on englanninkielinen eurooppalainen standardi, jossa määritellään minimaatimukset NDT-tarkastajien kelpuuksille, koulutuksille sekä NDT-tarkastuksille ilmailuteollisuuden, huollon sekä peruskorjauksen parissa (SFS-EN 4179:2021).

Pätevöinti eri menetelmille jaetaan yleisesti neljään eri tasoon, jotka ovat

- a) Taso I, rajoitettu
- b) Taso I
- c) Taso II
- d) Taso III

NDT-tarkastaja saa tehdä tarkastuksia ainoastaan oman kelpuutuksensa puitteissa. Sertifikaattitodistuksessa tulee olla maininta mille tasolle, menetelmälle sekä voimassaolo kyseiselle menetelmälle. (SFS-EN 4179:2021)

Tason I, rajoitettu kelpuutuksen omaava NDT-tarkastaja saa tehdä vain erikseen määriteltyihin kohteisiin tarkastuksia. Hänellä tulee olla kirjalliset työhjeet sekä Tason II tai/ja Tason III tuki sekä ohjaus käytettävissä. (SFS-EN 4179:2021)

Tason I NDT-tarkastaja saa tehdä tarkastuksia, kun kyseiseen tarkastukseen on olemassa oleva työhje sekä Tason II tai/ja Tason III tuki sekä ohjaus käytettävissä. Hänen tulee osata kelpuutuksen mukaiset menetelmänsä perusperiaatteet sekä osata tehdä suorituskykytarkastukset laitteistolle kyseisen menetelmän standardin mukaisesti. Rajatuissa tarkastuksissa Tason I tarkastaja voi myös tehdä ohjeistuksen mukaisesti hyväksyntä tai hylkäämispäätökset. (SFS-EN 4179:2021)

Tason II NDT-tarkastaja saa tehdä itsenäisesti tarkastuksia sekä päätöksiä hylkää/hyväksyntä tuloksia tarkastuksista. Hänen tulee olla perehtynyt kelpuutuksensa mukaisesti tarkastusmenetelmiin perusteellisesti niin teorian kuin käytännön osalta sekä osata soveltaa menetelmää standardien sekä menetelmän rajoitusten rajoissa. Lisäksi laatii työ-/tarkastusohjeita sekä toimia ohjaajana/valvojana Tason I tarkastajille. Sekä hänellä tulee olla perustietämys ilma-aluksien sekä lentokoneiden huollosta. (SFS-EN 4179:2021)

Tason III NDT-asiantuntijalla tulee olla kyky ja tietämys standardeista, dokumentaatioista, jotka valvovat NDT-menetelmiä. Hänellä tulee olla kyky toimia vastavana NDT-kyvyistä sekä NDT-henkilöstöstä. Sekä kykyä ohjata harjoittelua, vastaanottaa päteväintitenttejä, kouluttaa sekä suorittaa henkilöstön sertifiointi. Hänen tulee osata valita oikea tarkastusmenetelmä ja tekniikka eri tarkastuksiin, tuottaa sekä varmentaa riittävät menetelmä- sekä työohjeistukset. Lisäksi hän hyväksyy NDT-prosesseihin ja työohjeisiin liittyvät ohjeistukset teknisestä näkökulmasta. Hänellä tulee olla lisäksi myös yleistietämys käytössä olevista NDT-menetelmistä, valmistus-, tarkastusmenetelmistä ja ilma-aluksien sekä lentokoneiden huollosta. (SFS-EN 4179:2021)

EN4179 standardi tunnistaa viisi päämenetelmää, joihin jokaiselle on määriteltynä erikseen omat kelpuutusvaatimuksensa niin kokemustuntien kuin teoriakoulutuksen osalta. Taulukoissa 2, 3 ja 4 on esitetty nämä menetelmät sekä niiden vaatimukset. (SFS-EN 4179:2021)

Taulukko 2. Vähimmäiskoulutustunnit, tasolle I ja II (SFS-EN 4179:2021)

	Taso I	Taso II	Suoraan Taso II, ei aikaisemmin Taso I
PT	16	16	32
MT	16	16	32
IRT	20	40	60
ET	40	40	80
UT	40	40	80
RT filmi tai digitaalinen	40	40	80
RT filmi ja digitaalinen	60	60	120

Taulukko 3. Vähimmäiskokemustunnit tasolle I ja II (SFS-EN 4179:2021)

	Kokemusajat tunteina		
	Taso I (Harjoitteli- lija)	Taso II	Suoraan Taso II, ei aikaisemmin Taso I
PT	130	270	400
MT	130	400	530
IRT	200	400	600
ET	200	600	800
UT	200	600	800
RT filmi tai digitaalinen	200	600	800
RT filmi ja digitaalinen	220	780	1000

Taulukko 4. Tason III koulutus- ja kokemusvaatimukset päämenetelmissä (SFS-EN 4179:2021)

Koulutustausta	Vaadittu tason II NDT-kokemus
Ei opintoja teknillisessä korkeakoulussa	4 vuotta
2 vuoden opinnot teknisessä ammattikorkeakoulussa tai yliopistossa	2 vuotta
3–4 vuoden opinnot teknisessä ammattikorkeakoulussa tai yliopistossa	1 vuosi

5 SHEAROGRAFIATARKASTUSTEKNIIKAN KÄYTTÖÖNOTTO

5.1 Lähtökohta

Tässä kappaleessa käydään läpi shearografiatekniikan käyttöönottoon liittyviä sekä huomioon otettavia asioita Patrialla ennen käyttöönottoa vuonna 2023. Shearografiatarkastustekniikan käyttöönottoon siirrytään, koska se tuo merkittävää etua tarkastusnopeuteen isoilla ja pinta-alaltaan suurilla kappaleilla. Shearografiatarkastustekniikka voidaan soveltaa useille eri komposiittirakenteille, tekniikka soveltuu parhaiten ohuen pintalevyn omaaville komposiittimateriaaleille. Shearografiatekniikalla ei voida korvata kaikkia tarkastuksia, mutta sitä voidaan käyttää esim. koputustarkastuksien tilalla/rinnalla koptereiden lapatarkastuksissa. Shearografiatarkastustekniikkaa tullaan ottamaan käyttöön eri kone tyypeillä porrastetusti vuosien 2023–2026 aikana.

5.2 Laitteiston huolto sekä kalibrointi

Tarkastuslaitteiston kalibrointi tulee tehdä aina ennen tarkastuksen aloittamista, jos laitteistoa on siirretty pitkiä matkoja esim. huoltohallista toiseen. Laitteisto tekee itse ohjelmoidusti tarkastuksen, jonka kesto on noin 5 minuuttia.

Dantek Oy on toimittanut laitteiston vuonna 2019 jonka jälkeen laitetta on käytetty vähän. Vähäisen käytön takia laitteisto tulee kalibroida vielä ennen varsinaista käytönaloitusta vuonna 2023 sekä tarkastaa laitteiston päivitystarve ohjelmiston osalta. Patrialle hankittu laitteisto on vastaava kuin kuvassa 2 esitetty shearografia-tarkastuslaitteisto. Lisäksi Patrialle on hankittu halogeenivalaisimet toiseksi herätetekniikaksi. Patrialle valittu herätetekniikka on siis alipainekehys erillisellä shearografiakameralla, koska näin voidaan lisäksi käyttää myös lämpöherätettä. Eri herätetekniikoiden testaamisessa tämä yhdistelmä oli herkin havaitsemaan alumiinipintalevyssä painaumuksia sekä kennovikoja.

5.3 Käyttökoulutus laitteistolle

Jotta päästään hyvään alkuun laitteiston käytön kanssa vuonna 2023 tulee järjestää käyttökoulutus Patrialla laitteistolle. Tähän koulutukseen osallistuvat henkilöt Patrialta, jotka ovat valittuina keväällä 2023 järjestettävälle shearografian peruskurssille. Jotta kokemustuntien kerryttäminen olisi mahdollisimman tehokasta ja siten tekniikan käyttöönotto tuotannossa olisi mahdollista jo vuoden 2023 lopulla. Jos käyttökoulutusta ei saada järjestettyä toimittajan toimesta ennen shearografian-peruskurssia keväällä 2023, tulee shearografian käyttö Patrialla silti aloittaa itsenäisesti jo olemassa olevien käyttöohjeiden avulla. Kokemustuntien kerryttäminen on tärkeää, koska käyttökohteita on vielä vähän ja näin ollen kokemustuntien kertyminen on hidasta.

5.4 Harjoituskappaleet

Patrialla on ennen laitteiston hankintapäätöstä suoritettu tutkimus, jonka tuloksena käytettävissä ovat NH-90 ja HH helikopterien pääroottoreiden lavat. Lapoihin on tehty keinotekoisesti useita vikoja, joiden avulla pystytään laitteiston käyttö aloittamaan. Näitä kappaleita voidaan käyttää harjoituskappaleina sekä oikeiden vikojen vertailuun. (Juha Lähteenmäki. 2017)

Muihin menetelmiin on myös vuosien saatossa valmistettu useita erilaisia kappaleita, joista komposiittirakenteisia harjoituskappaleita voidaan myös käyttää shearografiatekniikan käyttöönotossa. Tulevaisuudessa harjoitus-/tenttikappaleiden lisä valmistusta, jotta tekniikan käyttöä voidaan laajentaa monipuolisemmaksi.

5.5 Tekniikan peruskoulutus

Shearografia ei voimassa olevan standardin mukaan ole päämenetelmä vaan kehittyvä menetelmä, joten sitä tarkastellaan hieman eri tavalla kuin päämenetelmiä. Organisaation vastuullinen tason III NDT-asiantuntija määrittää vähimmäiskoulutus-/kokemustunnit. Apuna tässä tulee käyttää vaikeudeltaan samaa tasoa

olevaa päämenetelmää ja sen koulutus-/kokemustunti vaatimuksia. (SFS-EN 4179:2021) Taulukoissa 5 ja 6 on esitetty Patrian vaatimukset tason I ja II kehittyville menetelmille.

Taulukko 5. Vähimmäiskoulutustunnit kehittyvät menetelmät taso I ja II (Patria Oy)

	Taso I	Taso II	Suoraan Taso II, ei aikaisemmin Taso I
ST	20	40	60
BN	-	6	6

Taulukko 6. Vähimmäisvaatimukset kokemukselle kehittyvät menetelmät taso I ja II (Patria Oy)

	Taso I	Taso II	Suoraan Taso II, ei aikaisemmin Taso I
ST	-	200	200

Koska kyseessä on kehittyvä menetelmä ei tätä ole myöskään laajasti vielä Suomessa käytössä. Shearografiatekniikka onkin tarkoitus ottaa ensimmäisenä Suomessa käyttöön Patrialla sekä Puolustusvoimissa. Teoriakoulutus sekä tentit tullaan järjestämään tähän tekniikkaan keväällä vuonna 2023 The South West School of NDT järjestämänä Patrialla.

5.6 Tekniikan jatkokoulutus Level 3

Koska shearografia ei voimassa olevan standardin mukaan ole päämenetelmä vaan kehittyvä menetelmä, myös tason III koulutus vaatimukset ovat hieman poikkeavat kuin päämenetelmillä. (SFS-EN 4179:2021) Taulukossa 7 on esitetty Patrian omat vaatimukset tason III kehittyville menetelmille.

Taulukko 7. Tason III koulutus- ja kokemusvaatimukset kehittyvissä menetelmissä (Patria Oy)

Koulutustausta	Koulutus	Kokemus	Muut NDT-sertifi- kaatit
Tekniikan kandidaatti (>180 op)	40 h	200 h	Vähintään 1 aiempi Tason II sertifiikaatti
Opinnot teknisessä korkeakoulussa (>120 op)	60 h	200 h	Vähintään 1 aiempi Tason III tai 2 kpl Tason II sertifiikaattia
Ei opintoja teknillisessä korkeakoulussa	80 h	300 h	Vähintään 1 aiempi Tason III tai 2 kpl Tason II sertifiikaattia

Alkuvaiheessa vuodet 2023–2024 tullaan tarvitsemaan ulkopuolisen toimijan, tässä tapauksessa The South West School of NDT tarjoamaa Tason III tukea ostopalveluna. Siirtymävaiheen jälkeen arviolta vuonna 2025 tason III asiantuntijuus tullaan ottamaan myös Patrialla haltuun.

5.7 Vaadittu ohjeistus sekä käyttöönotto

Laitteiston käyttöohjeistus on toimitettu laitteiston mukana, joten laitetta pystytään operoimaan laitevalmistajan toimittaman käyttöohjekirjan avulla. Käyttöohjeet ovat tällä hetkellä ainoastaan englanninkielisinä, joten suomenkielisen version tarpeellisuutta täytyy vielä tarkastella, kun käyttökokemusta saadaan riittävästi kerättyä.

Yleisohje shearografiatekniikan käytöstä on tekeillä, ja tullaan julkaisemaan Patrian omana sisäisenä ohjeistuksenaan vuoden 2023–2024 aikana. Yksittäisille tarkastuksille tullaan myös vuoden 2023–2025 aikana julkaisemaan osakohtaiset tarkastusohjeensa. Kuvassa 7 on havainnollistettu aikajanalla tarvittavat askeleet käyttöönoton polulla.



Kuva 7. Käyttöönoton aikajana

6 POHDINTA

Tähän opinnäytetyöhön on shearografiatekniikan käyttöönottoa varten kerätty koulutuksen sekä pätevöinnin vaatimukset yhteen ja laaja lähdeluettelo, jollaista suomen kielellä ei ole vielä aikaisemmin julkaistu. Varsinainen käyttöönotto voidaan aloittaa tämän selvitystyön avulla vuoden 2023 aikana.

Selvityksen aikana huomattiin perusasioiden olevan hyvin kohdallaan, ainoastaan vallitsevan maailmantilanteen takia on projekti jäänyt aloittamatta. Sisäisiä ohjeita koulutuksen vaatimuksista sekä pätevöintiä varten oli jo kirjoitettuna, laitteisto hankittuna sekä koulutusta suunniteltu. Pandemian estäessä matkustamisen koulutus on ollut pakotetusti pysähdyksissä sekä henkilöstön tehtävien vaihto on hidastanut shearografiatekniikan kokemustuntien kerryttämisen aloitusta.

Opinnäytetyötä oli haastavaa kirjoittaa, koska saatavilla oleva materiaali oli pääsääntöisesti englannin kielistä ja sitä oli vaikea löytää. Standardeja löytyy tällä hetkellä ainoastaan kaksi ja painettuja kirjoja muutamia. Tieteellisiä artikkeleita tekniikasta on kirjoitettu puolestaan verrattain paljon. Shearografiatekniikka oli myös itselleni täysin uusi ja vieras, mutta tämän työn jälkeen uskallan sanoa olevan aiheesta hieman enemmän perillä kuin aloittaessani.

Ohjeistuksen kirjoittaminen rajattiin tämän opinnäytetyön ulkopuolelle. Ohjeistusta tehdään omana projektinaan vuosien 2023–2024 aikana.

LÄHTEET

ASNT Industry Handbook. 2014. Aerospace NDT. The American Society for Non-destructive testing.

Dantec Dynamics. Kotisivut. Luettu 17.11.2022. <https://www.dantecdynamics.com/solutions/laser-shearography-ndt/measurement-principles-of-shearography/>

Gros, Xavier E. (1997). NDT Data Fusion - 3.5 Eddy Current Testing. Hanser Publishers. Luettu 5.10.2022. <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0038S32K/ndt-data-fusion/eddy-current-testing>

Juha Lähteenmäki. 2017. NH90 ja HH lappojen shearography demo Utissa 19.-20.4.2017. Patria Aviation Oy. Sisäiset muistiot. Luettu 13.10.2022.

Karbhari, Vistas M, & Lee, Luke S. 2011. Service Life Estimation and Extension of Civil Engineering Structures. Woodhead Publishing. Luettu 5.10.2022. <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009271H6/service-life-estimation/laser-shearography>

Karbhari, VM, & Karbhari, VM. 2013. Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites. Elsevier Science & Technology, Cambridge. Luettu 5.10.2022. ProQuest Ebook Central.

Patria Aviation Oy. Sisäiset ohjeet. Luettu 30.09.2022. M-PR-020-0090.

Patria Aviation Oy. Sisäiset raportit. Luettu 13.10.2022. Shearography Power-Point-esitys.

Patria Oyj. Patrian kotisivut. Luettu 27.6.2022. <https://www.patriagroup.com/fi>

Sterkenburg, Ronald, and Peng Hao Wang. 2021. "Nondestructive Testing (NDT) or Nondestructive Inspection (NDI)." Standard Aircraft Handbook for Mechanics and Technicians. 8 edition. New York: McGraw Hill. Luettu 5.10.2022. <https://www-accessengineeringlibrary-com.libproxy.tuni.fi/content/book/9781260468922/chapter/chapter12>