

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikka

2025

Juhana Myllykoski

# Lämmityksen vaikutus höyryturbiinin jakotason pultteihin



Opinnäytetyö AMK | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka

11.03.2025 | 42 sivua

Juhana Myllykoski

## Lämmityksen vaikutus höyryturbiinin jakotason pultteihin

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia lämmityksen vaikutusta höyryturbiinin jakotason pulttien kovuuteen. Opinnäytetyön toimeksiantaja oli TGS Finland Oy. Pulttien kiristäminen lämmittämällä on yksi yleisimmistä kiristystavoista jakotason pulteille ja lämmittämisaajan määrittämisestä löytyy niukasti tietoa. Pulttien oikeaoppinen lämmittäminen varmistaa pulttien ja liitoksen kestävyuden ja näin ollen koko turbiinin luotettavan toiminnan.

Opinnäytetyön lähteinä käytettiin aiheesta kirjoitettuja teoksia ja yrityksen asiantuntijoiden ja asentajien kokemuksia ja tietopohjaa. Teoriaosuudessa tarkastellaan pulttiliitoksien eri kiristysmenetelmiä, höyryturbiineja ja niiden toimintaa ja jakotason pulttiliitosta.

Opinnäytetyön lopputuloksena saatiin tarkempaa tietoa lämmityksen vaikutuksesta ja lämmitysprosessista. Opinnäytetyössä suoritettujen tutkimusten perusteella voitiin todeta, että lämmitysnopeudella ei ole vaikutusta pultin materiaalin kovuuteen. Tuloksien perusteella ei kuitenkaan voida muuttaa nykyistä lämmityskäytäntöä, vaan lämmityksen aiheuttamaa muutosta pultin materiaalin muihin ominaisuuksiin täytyy tutkia.

Asiasanat:

Höyryturbiini, induktiolämmitin, kovuuskoe

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical engineering

11.03.2025 | 42 pages

Juhana Myllykoski

## Effects of heating on steam turbine's split line bolts

The objective of this thesis was to investigate the effect of heating on the hardness of steam turbine's split line bolts. This thesis was commissioned by TGS Finland Oy. Tightening bolts by heating them is one of the most used ways to tighten steam turbines split line bolts and there is not much information on how the heating time is determined. The correct way of heating the bolts ensures the durability of the bolts and the joint and, thus ensures the reliable operation of the turbine.

The thesis uses literature on the subject and knowledge and experiences of the fitters and specialists of the company. The theory part of the thesis covers different tightening methods of bolted joints, steam turbines and how they work and split line joint of steam turbines.

As a result of the thesis, there is better information on the effects of the heating and the heating process. The results showed that the heating time has no effect on the hardness of the bolt's material. However, the results cannot be used to change the current heating practice. Instead, the effects of heating on other features of the bolt's material must be studied.

Keywords:

Steam turbine, induction heater, hardness test

# Sisältö

<b>Käytetyt lyhenteet tai sanasto</b>	<b>7</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>8</b>
1.1 Tausta	8
1.2 TGS Finland Oy	8
<b>2 Pulttiliitokset ja kiristysmenetelmät</b>	<b>9</b>
2.1 Vääntömomenttiin perustuvat kiristysmenetelmät	11
2.2 Kääntökulmaan perustuva kiristys	12
2.3 Venytykseen perustuva kiristys	13
2.4 Myötökiristys	15
2.5 Jännityksen ilmaiseva pultti tai aluslevy	15
2.6 Lämpölaajenemiseen perustuva kiristys	16
<b>3 Höyryvoimalaitokset ja höyryturbiini</b>	<b>19</b>
3.1 Höyryvoimalaitokset	19
3.2 Höyryturbiinin toimintaperiaate	20
3.3 Materiaalivalinnat höyryturbiineissa	21
3.3.1 Viruminen	22
3.4 Höyryturbiinin pesä ja jakotaso	24
3.5 Jakotason pulttiliitos	26
<b>4 Mittaukset</b>	<b>27</b>
4.1 Mittauksien perusta	27
4.2 Käytettävät laitteet ja työkalut	27
4.2.1 Kovuusmittari	27
4.2.2 Induktiolämmitin	28
4.2.3 Lämpömittari	30
4.2.4 Mitattavat pultit	30
4.2.5 Pituusmittatyökalu	31
4.3 Mittausten suoritus	33

<b>5 Tulokset</b>	<b>36</b>
5.1 Tulokset ja analyysi	36
5.2 Pohdinta	38
<b>6 Yhteenveto</b>	<b>39</b>
<b>Lähteet</b>	<b>40</b>

## **Liitteet**

Liite 1. Mittaustulokset

## **Kuvat**

Kuva 1. Kiinnityspultti (Airila ym. 2003)	9
Kuva 2. Pulttiliitos (Blom ym. 2001, 39)	10
Kuva 3. Hytorc stealth hydraulivain (Hytorc 2024)	11
Kuva 4. Bahco momenttiavain (Bahco 2024)	12
Kuva 5. Makita iskevä mutterinväännin (Makita 2024)	12
Kuva 6. Kulmakiristys astemitta (Toolfin 2024)	13
Kuva 7. Hydraulinen pultinvenytin (Teca 2024)	14
Kuva 8. Hydraulinen pultinvenytin (SKF 2024)	14
Kuva 9. Rotabolt touch (Rotabolt 2024)	16
Kuva 10. Rotabolt Vision (Rotabolt 2024)	16
Kuva 11. Leikkauskuva lämmittämisestä (Integra Technologies 2024)	18
Kuva 12. Induktiolämmitys (Brand TS 2024)	18
Kuva 13. Höyryturbiinin toimintaperiaate. (Kauppinen. 2018, 29)	21
Kuva 14. Yleiskuva höyryturbiinista. (Huhtinen ym. 2008, 122)	21
Kuva 15. Materiaalin CrMoV5-8 Käyttöikä ja viruminen (Pitkänen 2003)	23
Kuva 16. Aineen viruminen (Koivisto ym. 2010, 11)	24
Kuva 17. Jakotason pulttiliitos. (Leyzerovich 1997, 332)	25
Kuva 18. Avattu turbiini (Fortum 2025)	25

Kuva 19. Mitech MH180 (Smaskin 2025)	28
Kuva 20. Induktiolämmitin ja jäähdytin	29
Kuva 21. Käytettävä lämmityssauva	29
Kuva 22. Lämpömittari	30
Kuva 23. Materiaalistanssaus	31
Kuva 24. Materiaalitalukko Ferrometal	31
Kuva 25. X22CrMoV koostumus (Steelnumber 2025)	31
Kuva 26. Pultinmittaustyökalusetti	32
Kuva 27. Pultinmittaustyökalu	32
Kuva 28. Pultinmittaustyökalun kalibrointivälineet	32
Kuva 29. Pulttien pituusmittaus	32
Kuva 30. Pultin pituusmittaus mittakohdasta	33
Kuva 31. Pultin pituusmittaus mittakohdasta 2	33
Kuva 32. 3 pultti sahattuna	34
Kuva 33. Pultti 5 kuumana	34
Kuva 34. Pultti 5 lämmityksen jälkeen sisältä	35
Kuva 35. 4 pultti sahattuna	35
Kuva 36. Pultit 1–4 lämmityksen jälkeen	36
Kuva 37. Pultti 5 lämmityksen jälkeen	36
Kuva 38. Kaarevat jäljet 5 pultissa	37
Kuva 39. Lämmityksen jäljet pultissa 5	37

## Taulukot

Taulukko 1. Pulttien lämmitysajat ja tehot	34
Taulukko 2. Mittaustulokset	38

## Käytetyt lyhenteet tai sanasto

Höyryturbiini	Höyrystä käyttövoimansa saava laite
Induktiolämmitin	Pulttien lämmittämiseen käytetty laite
Jakotaso	Kahden eri kappaleen välinen tiivistyspinta

# 1 Johdanto

## 1.1 Tausta

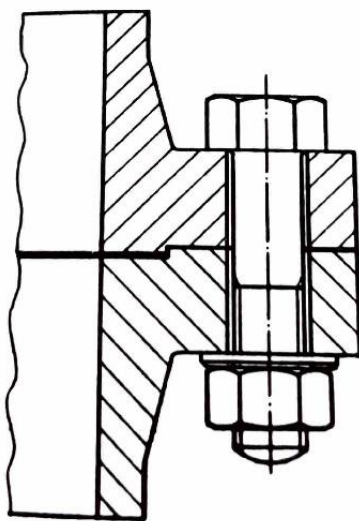
Opinnäytetyö tehtiin TGS Finland Oy:n toimeksiantona. Opinnäytetyössä selvitettiin höyryturbiinin kunnossapidossa käytettävän induktiolämmittimen lämmitysnopeuden aiheuttamia vaikutuksia höyryturbiinin jakotason pultteihin. Induktiolämmittimen avulla kiristetään ja löystytetään höyryturbiinin jakotason pultteja lämpölaajenemista hyödyntäen. Lämmittäminen on hidas prosessi, ja lämmitysnopeutta mahdollisesti kasvattamalla säästettäisiin paljon aikaa.

## 1.2 TGS Finland Oy

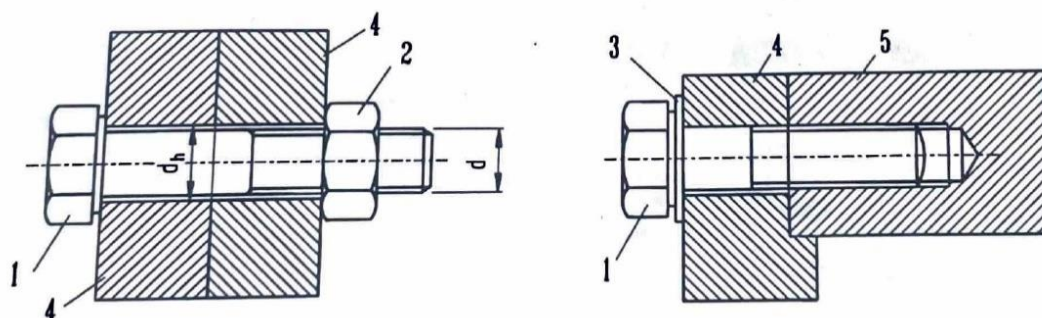
TGS Finland Oy tarjoaa turbiinien ja generaattoreiden huolto-, käyttöönotto-, kunnossapito- ja modernisointipalveluita. TGS on erikoistunut myös kyseisten laitteiden kunnonvalvonta- ja suojausjärjestelmien modernisointiin. TGS:llä työskentelee yli 170 ammattilaisen tiimi, joka toimii pääasiassa Suomessa ja Ruotsissa. TGS:n tärkeimpiä etuja on luotettavuus ja ammattitaito yli 30 vuoden kokemuksella, sekä toiminta lyhyellä varoitusaajalla. (Elcoline 2025.)

## 2 Pulttiliitokset ja kiristysmenetelmät

Pulttiliitos (Kuva 1) on yksi yleisimmistä liitoksista sen helppouden, yksinkertaisuuden, luotettavuuden ja edullisuuden takia. Pulttiliitoksen osat (Kuva 2) ovat: Pultti (1), mutteri (2), aluslaatta (3), liitososa (4), vapaareikä ja kierrereikä (=mutteri) (5). Liitoksen osat (pultit, mutterit, aluslaatat) ovat yleisesti helposti saatavilla ja halpoja. Osia saa myös mittatilaustyönä, erilaisista materiaaleista, erikokoisina ja erikokoisilla kierteillä, joka nostaa hintaa nopeasti. Liitoksen kiristäminen ja avaaminen onnistuu lähes kaikissa olosuhteissa ja melko yksinkertaisilla työvälineillä. Pulttiliitoksen luotettavuusvaatimuksen kasvaessa myös hinta nousee merkittävästi, koska osat täytyy mitoittaa ja valita sen perusteella niiden koko, materiaali, pintakäsittely, pulttien määrä liitoksessa ja kiristysarvot. Luotettavuuden lisäämiseksi aukikiertyminen voidaan estää kierreliimauksella tai erillisellä lukituselimellä. Usein pulttiliitoksen tehtävänä on myös tiivistys. Tiiviyden onnistumiseksi liitososien täytyy olla lujia, jäykkiä ja liitospintojen on oltava tasaisia, kiristykseen on tapahduttava tarkasti ja tasaisesti. Jos liitospinnat eivät ole tarpeeksi tiiviit, voidaan tiivistettävien pintojen väliin laittaa tiivistysainetta tai tiivistyslevy. (Blom ym. 2001, 39–40.)



Kuva 1. Kiinnityspultti (Airila ym. 2003)



Kuva 2. Pulttiliitos (Blom ym. 2001, 39)

Pulttiliitoksen etuja on, että tarvittaessa liitos voidaan helposti purkaa ja mutterit ja pultit voidaan uusiokäyttää. Oikein ja hyvin tehdyllä mitoituksella pulttien ja muttereiden käyttöikä on jopa kymmeniä vuosia. (Björk ym. 2014, 132.)

Pulttiliitoksen hajoamisen yleisin syy on pulttiliitoksen löystyminen. Tämä johtuu yleensä esikiristuksen ja kiristuksen epätarkkuudesta ja huonosta suunnittelusta. Tämän takia on tärkeää valita sopiva kiristysmenetelmä vaadittavan tarkkuuden saavuttamiseksi. (Boltscience 2024.)

Kiristysmenetelmien valintaan vaikuttavia keskeisimpiä tekijöitä ovat käytettävissä oleva tila, ja vaadittava kiristuksen tarkkuus. Tarkemmat kiristysmenetelmät vievät yleensä enemmän aikaa ja ovat näin kalliimpia. (Björk ym. 2014, 141.) Pulttiliitos saattaa olla sellaisessa paikassa, että kaikki työkalut eivät vain mahdu kiristämään sitä. Joillekin pulttiliitoksille riittää hyvinkin epätarkka kiristys, kuten iskevällä mutterinvääntimellä tai käsivoimin kiristys, näillä kiristäminen perustuu yleensä vain kiristäjän kokemukseen ja ammattitaitoon. Jotkut pulttiliitokset, kuten laippaliitokset, vaativat hyvinkin tarkan kiristuksen toimiakseen. (Blom ym. 2001, 72.)

Yleisesti pulttiliitoksen kiristysmenetelmiä on kuusi, jotka perustuvat: vääntömomenttiin, kääntökulmaan, venytykseen, myötölujuuteen, lämpölaajenemiseen ja jännitykseen. (Boltscience 2024.)

## 2.1 Vääntömomenttiin perustuvat kiristysmenetelmät

Yleisimpiä vääntömomenttiin perustuvia työkaluja on hydraulivaimet (Kuva 3), käsikäyttöiset vääntimet ja momenttivaimet (Kuva 4) ja erilaiset iskevät mutterivääntimet (Kuva 5). Tässä menetelmässä täytyy varmistaa, että kaikkien pulttien kitkatekijät ovat samat. Kitkahäviöiden osuus on 80–90 % ja vain 10–20 % voimasta venyttää pulttia. Jos toinen pultti on esimerkiksi rasvattu, kierteet moitteettomassa kunnossa ja toinen pultti on ruosteinen ja kierteet ovat vaurioituneet, vaikka ne kiristettäisiin samaan momenttiin, saattaa niiden tuottamat puristusvoimat poiketa merkittävästi. Kaikkiin saman liitoksen pultteihin tulee käyttää samaa rasvaa, koska eri rasvoilla on eri kitkatekijät. Myös kiristysnopeudella on vaikutus, lepokitkan vaikutus on suurin kitkatekijöistä, kitkakerroin pienenee kiristysnopeuden kasvaessa. Näitten syitten takia momenttikiristyksen tarkkuus on n. 25–30 %. Kiristäessä suurilla momenteilla, pulttiin kohdistuu sivuttaista ja kiertävää voimaa, mikä saattaa aiheuttaa pultin vaurioitumisen. Myös kiristyspinnan ja mutterin tai pultin kannan väliin syntyy suurta kitkaa, mikä voi vaurioittaa pintoja pultin ja liitoksen välillä. (Pitkänen 2003.)



Kuva 3. Hytorc stealth hydraulivaimin (Hytorc 2024)



Kuva 4. Bahco momenttiavain (Bahco 2024)



Kuva 5. Makita iskevä mutterinväännin (Makita 2024)

## 2.2 Kääntökulmaan perustuva kiristys

Kääntökulmaan perustuvassa kiristyksessä tehdään ensin alkukiristys esimerkiksi valmistajalta saatuun momenttiin. Alkukiristuksen jälkeen mutteria tai pulttia pyöritetään valmistajan ohjeissa ilmoitettu astemäärä tai lasketaan se halutun kireyden saavuttamiseksi. Kiristys voidaan toteuttaa kääntökulman ilmaisevan työkalun avulla (Kuva 6). Esikiristuksen tarkkuus on noin 25–30 %, mutta pulttien välinen kireysero on vain noin 15 %. Kääntökulma saadaan kaavasta 1:

$$dL = \frac{\alpha * P}{360} \rightarrow \alpha = \left( dL * \frac{360}{P} \right)$$

Kaava 1. Kääntökulman kaava

Missä

$dL$  = tarvittava mutterin siirtymä

$\alpha$  = mutterin kiertokulma

$P$  = kierteen nousu

(Pitkänen 2003.)



Kuva 6. Kulmakiristys astemitta (Toolfin 2024)

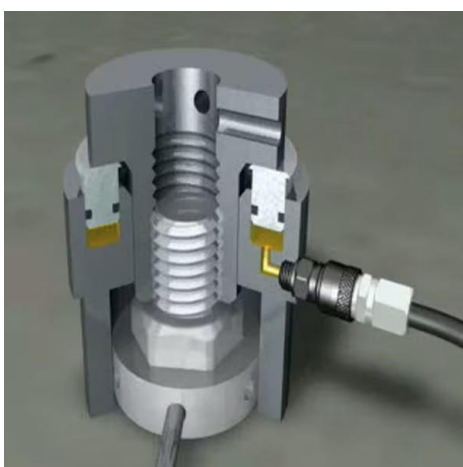
### 2.3 Venytykseen perustuva kiristys

Venytykseen perustuvassa kiristyksessä pulttiin kierretään kiinni hydraulinen tunkki. Mutteri kierretään ensin käsikireyteen, jonka jälkeen pulttiin kierretään kiinni tunkki (Kuva 7 ja 8), tunkilla venytetään pultti haluttuun jännitteeseen eli haluttuun liitoksen kireyteen, mutteri kiristetään jälleen käsikireyteen, tämän jälkeen tunkki vapautetaan, tällöin pultti jää haluttuun jännitteeseen. Tämä

kiristysmenetelmä on todella tarkka ja tällöin voidaan hyödyntää pultin lujuus tarkemmin. Tämä tarkoittaa, että pultteja ei tarvitse ylimitoittaa eli käyttää turhan isoa pulttikokoa tai pultteja voidaan laittaa liitokseen vähemmän, silti säilyttäen liitoksen luotettavuuden. Etuja on myös, että kiristäessä pulttiin ei kohdistu vääntö- tai taivutusrasitusta. Kiristysmenetelmää voi käyttää kaikkiin pulttikokoihin. Huonoja puolia on työkalujen kallis hinta ja eri pulttikoille ja kierteelle täytyy olla oma työkalu. (SKF 2024.) Esimerkiksi Enerpac myy tunkkeja kokoluokissa M16-M30, M30-M39, M39-M52, M52-M68, M68-M80, M80-M95 ja M100-M105. Pienimmän maksaessa n. 1175 € ja isoimman maksaessa n. 4030 €. Tämän lisäksi vielä tarvitsee pumpun ja hydrauliletkut tunkin käyttämiseen. (Enerpac 2024.)



Kuva 7. Hydraulinen pultinvenytin (Teca 2024)



Kuva 8. Hydraulinen pultinvenytin (SKF 2024)

## 2.4 Myötökiristys

Myötökiristyksessä pultti kiristetään yli myötörajan, jolloin pultin koko potentiaali saadaan käytettyä. Tämä mahdollistaa pienempien pulttien käytön tai niitä voidaan käyttää vähemmän. Kiristys tapahtuu työkalulla, joka mittaa momenttia ja kiertokulmaa ja laskee näistä momentin kulmaderivaatan hetkellisarvoja. Myötörajan ylittyessä momentin suurentuminen pysähtyy nopeasti, jolloin kiristys lopetetaan. Kun myötöraja ylittyy, kappaleen venymä kasvaa, mutta saatava kiristysjännitys ei. Pultti venyy vain kierteettömästä osasta. (Blom ym. 2001, 71–72.)

## 2.5 Jännityksen ilmaiseva pultti tai aluslevy

Pultissa tai aluslevyissä on itsessään mekanismi, joka ilmaisee, kun haluttu jännitys on saavutettu. Esimerkiksi Rotaboltilta on saatavilla pultteja ja vaarvoja jännityksen ilmaisemilla. Pultteja on saatavilla M12 ja vaarvoja M14 koosta ylöspäin. Niitä on saatavilla myös eri jännityksillä. Haluttu jännitys saadaan  $\pm 5$  % tarkkuudella. Pulttiin on porattu reikä, jonka sisälle laitetaan tappi, joka lukitaan kierteellä pulttiin, tappin toisessa päässä on pyörítettävä hattu, josta tappia voi pyörittää sormin. Pultin ollessa alle halutun jännityksen hatun ja pultin välissä on pieni ilmarako, jännityksen kasvaessa pultti venyy, mutta tappi pysyy samanmittaisena. Tällöin hatun ja pultin välissä oleva väli menee umpeen ja hattua ei pysty enää pyörittämään (Kuva 9). Jos pultti jostain syystä löystyy, pystyy hattua taas pyörittämään ja täten tiedetään, että pultti tarvitsee kiristystä.



Kuva 9. Rotabolt touch (Rotabolt 2024)

Tästä on myös jatkojalostettu Rotabolt Vision (Kuva 10), joka toimii muutoin samoin, mutta hatussa ja pultissa on viiva. Hattu käännetään kiristettäessä niin, että hatun ja pultin viiva kohtaavat. Jos pultti löystyy, hattu pyörähtää 90 astetta ja viivat eivät enää kohtaa, jolloin pultin löystymisen huomaa jo katsomalla. (Rotabolt 2024.)

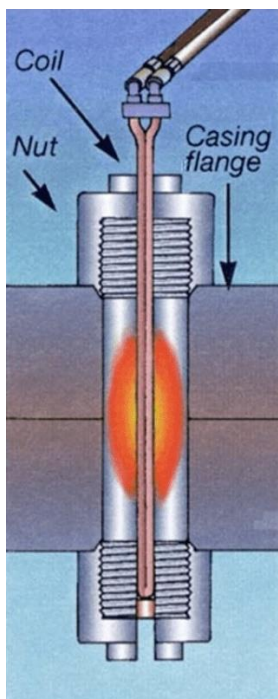


Kuva 10. Rotabolt Vision (Rotabolt 2024)

## 2.6 Lämpölaajenemiseen perustuva kiristys

Lämpölaajenemiseen perustuvassa kiristyksessä hyödynnetään pultin materiaalin lämpölaajenemista ja kääntökulmakiristystä. Aluksi pultti

esikiristetään, tämän jälkeen pulttia kuumennetaan induktiivisesti, sähkövastuksella tai kaasupolttimella pultin sisäpuolelta pultissa olevan reiän kautta (Kuva 11), pultti lämpölaajenee kuumentuessaan ja pitenee. Mutteria kierretään haluttu astemäärä, joka on laskettu materiaalin lämpölaajenemisen ja kierteen nousun mukaan. Pultin jäähtyessä se lyhenee ja näin liitoksesta tulee kireä. Tämä kiristysmenetelmä on laajasti käytössä eri variaatioina höyryturbiinitekniikassa (Kuva 12), esimerkiksi turbiinin jakotason ja höyryventtiilien pulttiliitoksissa. Nykyään lämmitys tapahtuu pääsääntöisesti induktiolämmittimellä sen hyvän lämmitysnopeuden, -turvallisuuden ja -tarkkuuden takia. Lämmittäminen on myös mahdollista suorittaa sähkövastuksella tai kaasupolttimella. Sähkövastuksen huonopuoli on sen hitaus, tämä aiheuttaa sen, että lämpö ehtii johtua pultista esimerkiksi höyryturbiinin jakotasoon. Tällöin myös jakotaso alkaa laajentua ja kiristys ei onnistu. Kaasupolttimella lämmittämisen huonoja puolia on lämmittämisen turvallisuus ja myös lämmittämisen hitaus ja epätarkkuus. Kaasupolttimella lämmittäessä käytetään avotulta, mikä on lähestulkoon aina vaarallista ja saattaa sytyttää turbiinissa ja sen lähellä olevat eristeet ja voiteluöljyt palamaan. Pulttia lämmittäessä polttimen liekki saattaa useasti sammua, tällöin poltin täyttää pultissa olevan reiän kaasulla ja hapella, lämmitystä jatkettaessa kaasu ja happi syttyvät nopeasti saaden aikaan kovaäänisen pamahduksen. Kaasupolttimella lämmittäessä lämpö saattaa käyttäjän ammattitaidon puuttuessa kohdistua liian kauan yhteen kohtaan, jolloin lämpötila nousee pultin lämpökäsittelyalueelle vaurioittaen pulttia. (Haastattelu EW Tech asiantuntijan kanssa.)



Kuva 11. Leikkauskuva lämmittämisestä (Integra Technologies 2024)



Kuva 12. Induktiolämmitys (Brand TS 2024)

### 3 Höyryvoimalaitokset ja höyryturbiini

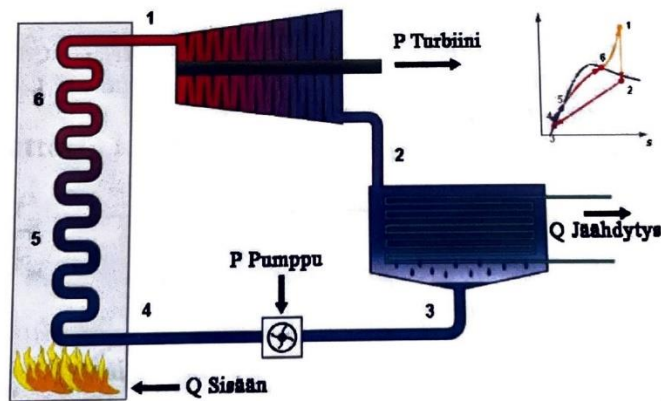
Höyryturbiini on yksi tärkeimpiä sähköntuotannon työkaluista. Yli puolet maailmalla käytetystä sähköstä tuotetaan höyryturbiinilla. Höyryturbiini ei ole uusi keksintö, sähköntuotannossa isommassa mittakaavassa höyryturbiinia hyödynnettiin ensimmäisen kerran vuonna 1890. Tällöin Newcastle and District Electric Lighting Company käynnisti Forth Banksin voimalaitoksen, jossa tuotettiin sähköä höyryturbiinin ja generaattorin avulla. Jo tätä ennen höyryturbiinia oli käytetty pyörittämään erilaisia työkoneita. Vuonna 1883 ruotsalainen insinööri Gustaf De Laval kehitti ensimmäisen höyryturbiinin, turbiini oli aktiotyyppinen ja sitä käytettiin meijerissä voimanlähteenä kerman erotukseen. Höyryturbiineja valmistetaan alle 1 MW:n turbiineista jopa yli 1800 MW:n tehoisiin. (Kauppinen 2018, 43–45.)

#### 3.1 Höyryvoimalaitokset

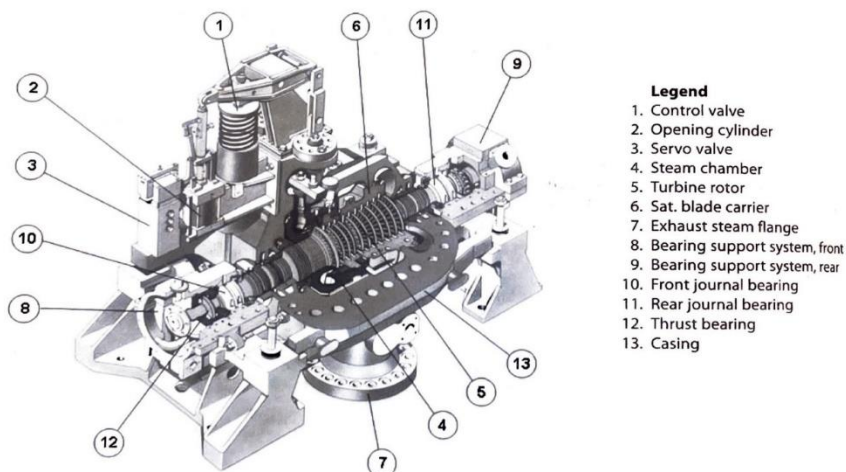
Höyryvoimalaitoksia on kahdenlaisia, vastapainevoimalaitoksia ja lauhdutusvoimalaitoksia. Ne eritellään toisistaan niistä ulostulevan höyrynpaineen perusteella. Vastapainevoimalaitoksista ulos tulevan höyrynpaine ja lämpötila on korkeita ja laitokset onkin yleensä rakennettu tuottamaan painehöyryä teollisuuden tarpeisiin ja kaukolämpöä, sähköntuotto ei ole pääasiallinen tarkoitus. Lämpöenergian tarve määrää laitoksen käyttöasteen. Vastapainelaitokset ovat energiatehokkaampia ja ympäristöystävällisempiä, kuin lauhdevoimalaitokset, koska kokonaishyötysuhde on parempi. Kokonaishyötysuhde on 85–93 %. Lauhdutusvoimalaitoksista tulevan höyrynpaine ja lämpötila on alhaista, jolloin siitä saatavaa lämpötilaa ei voida hyödyntää lämmittämiseen. Höyrynpaineenergia käytetään sähkön tuottamiseen. Lauhdutusvoimalaitoksien kokonaishyötysuhde on korkeintaan 46 %. (Huhtinen ym. 2008, 12, 109–110; Kauppinen 2018, 37–41.)

### 3.2 Höyryturbiinin toimintaperiaate

Höyryturbiini voidaan luokitella lämpövoimakoneeksi, missä höyry toimii väliaineena, höyryn paine- ja lämpöenergia muutetaan kineettiseksi energiaksi ja sitä kautta mekaaniseksi pyörimisenergiaksi. Pyörimisenergia voidaan käyttää esimerkiksi pyörittämään laivan potkuria, pyörittämään generaattoria sähkön tuottamiseksi, isojen keskipakopumppujen ja -puhaltimien tai jonkun muun työkoneneen voimanlähteenä. Prosessin pääkomponentteja (Kuva 13) ovat kattila, höyryturbiini, lauhdutin ja pumppu. Vesi kuumennetaan kattilassa höyryksi, kuumentamiseen tarvittava energia saatetaan tuottaa polttamalla fossiilisia polttoaineita kuten kivihiihtä, öljyä tai maakaasua, tai erilaisia biopolttoaineita kuten turvetta, puuta tai biokaasua, myös ydinpolttoaineet ovat yleisiä. Kuumentamiseen vaadittava energian määrä riippuu kattilaan menevän veden mukaan. Mitä korkeampi paine, sitä pienempi on höyrystymislämpö, eli lämpötila missä vesi höyrystyy. Lämmönlähteenä voidaan käyttää myös geotermistä energiaa tai aurinkoa. Kuuma ja paineistettu höyry johdetaan turbiinille, turbiinissa noin 15–45 % höyryn paine- ja lämpöenergiasta saadaan muutettua turbiiniakselia pyörittäväksi mekaaniseksi energiaksi. Turbiinilta ulos tuleva höyry lauhdutetaan takaisin vedeksi. Vesi pumpataan takaisin kattilaan, jossa se taas muutetaan höyryksi. Näin saadaan aikaan kiertoprosessi. Lauhdutus tapahtuu yleensä vesijäähdytteisissä lämmönsiirtimissä, lauhtumisesta vapautuva lämpö vapautuu lämmönsiirtimessä olevaan veteen ja lämmitettyä vettä voidaan käyttää lämmittämiseen. Turbiineja (Kuva 14) on aksiaali- ja radiaaliturbiineja. Aksiaaliturbiinissa höyry virtaa turbiinin läpi akselin suuntaisesti ja radiaaliturbiinissa höyry virtaa kohtisuorasti akselia vastaan. (Huhtinen ym. 2008, 22, 109; Kauppinen. 2018, 44–45.)



Kuva 13. Höyryturbiinin toimintaperiaate. (Kauppinen. 2018, 29)



Kuva 14. Yleiskuva höyryturbiinista. (Huhtinen ym. 2008, 122)

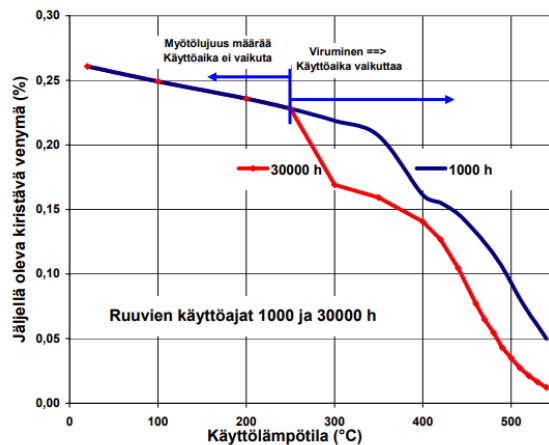
### 3.3 Materiaalivalinnat höyryturbiineissa

Materiaalin lämpölaajeneminen ja lämmönkestävyys ovat keskeisessä osassa turbiinia suunnitellessa ja materiaaleja valittaessa. Turbiiniakselin välykset ovat vain muutamia millemillejä ja joissain kohdissa millin sadasosia. Joten on erityisen tarkkaa, että materiaalien lämpölaajenemiskertoimet on otettu tarkasti

huomioon. Höyryturbiinin ollessa käynnissä riskit lämpölaajenemisen ja -jännityksen aiheuttamiin vaurioihin on pienet, koska lämpötilat pysyvät samoina. Riskit ovat ajankohtaisia tehon muutoksissa, turbiinin pysäytyksessä ja käynnistyksessä, jolloin syntyy lämpötilaeroja. Lämpötilaerot aiheuttavat osien eriaikaista lämpölaajenemista, joka voi aiheuttaa kiinteiden ja liikkuvien osien välyksien pienemisen niin paljon, että osat koskettavat toisiaan aiheuttaen kiinnileikkaamisen. Lämpöjännitykset syntyvät, jos lämpölaajeneminen estyy, esimerkiksi eri osien koskettaessa toisiaan. Tämä jännitys voi aiheuttaa pysyviä muodonmuutoksia, laippavuotoja tai rungon halkeamisen. (Huhtinen ym. 2008, 129–130). On ollut esimerkiksi tapaus, missä huollon yhteydessä turbiinin tulohöyryputken laipan pultit oli vaihdettu väärästä materiaalista tehtyihin pultteihin. Laipan ja pulttien lämpölaajenemiskerroin oli eri ja ajan saatossa pultit löystyivät ja laippa alkoi vuotamaan. (Haastattelu TGS asiantuntijan kanssa 2024.)

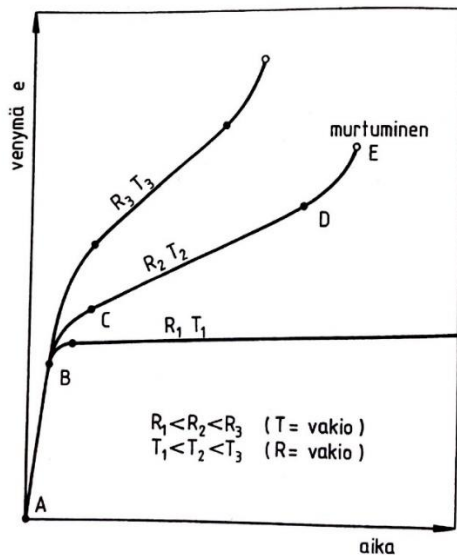
### 3.3.1 Viruminen

Lämpötilan noustessa metallin luontaiset ominaisuudet huononevat, myötö- ja murtolujuus heikkenevät ja sulamislämpötilan kohdalla häviävät kokonaan. Mutta yleensä murtovenymä kasvaa lämpötilan noustessa. Materiaalin ollessa satoja ja tuhansia tunteja korkeassa lämpötilassa (Kuva 15), siinä saattaa tapahtua pysyvää venymistä eli virumista.



Kuva 15. Materiaalin CrMoV5-8 Käyttöikä ja viruminen (Pitkänen 2003)

Viruminen aiheuttaa materiaaliin pieniä raekoloja. Raekoloista muodostuu mikrosäröjä ja mikrosäröt kasvaessaan laajenevat makrosäröiksi. Viruminen tapahtuu sitä nopeammin, mitä korkeampi lämpötila tai jännitys on. Kuvassa 16 on esitetty pultin virumista ”Aluksi tapahtuu kimmainen muodonmuutos A-B. Sen jälkeinen virumistapahtuma voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen: 1. Ohimenevä eli primaarinen vaihe, jossa välillä B-C muodonmuutosnopeus pienenee kohti vakioarvoa. 2. Vakaantuneessa eli sekundaarisessa vaiheessa C-D edellisessä vaiheessa saavutettu virumisnopeus säilyy lähes muuttumattomana. 3. Viimeisessä eli tertiaarisessa vaiheessa D-E virumisnopeus kasvaa ja viruminen johtaa lopulta aineen murtumiseen.”



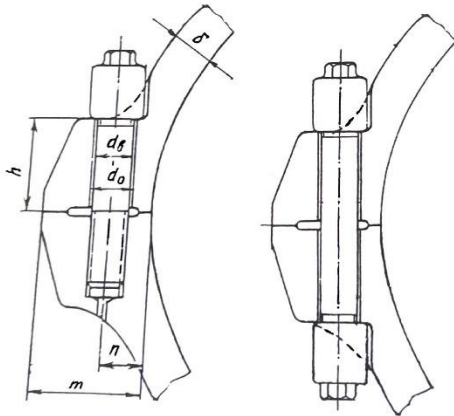
Kuva 16. Aineen viruminen (Koivisto ym. 2010, 11)

Jotta voidaan varmistua, että materiaali on sopivaa suunniteltua tarvetta varten, voidaan materiaalille suorittaa virumiskoe. Virumiskokeessa tutkittavasta aineesta tehdään koesauva. Sauva laitetaan vakio­lämpötilassa pidettävään uniiniin, jossa siihen kohdistetaan jännitettä. Sauvaan tehdään tarvittavat mittaukset, joiden mukaan piirretään virumisaikakäyrä, jonka avulla saadaan määritettyä sekundaarisen vaiheen virumisnopeus. Jotta kokeiden tulokset olisivat luotettavat, kestävät kokeet yleensä 1000–100 000 tuntia. Kokeiden tuloksien avulla voidaan materiaalille määrittää virumisraja. Virumisrajalla tarkoitetaan sitä jännitystä ja lämpötilaa, joka aiheuttaa sekundaarisen vaiheen virumisnopeuden. (Koivisto ym. 2010, 10–12 26.)

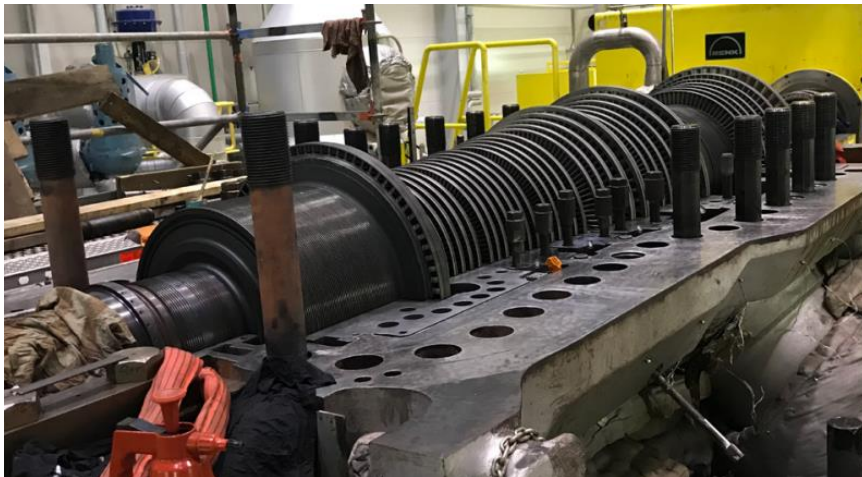
### 3.4 Höyryturbiinin pesä ja jakotaso

Turbiinissa on ulko- ja sisäpesä. Pesät muodostuvat ylä- ja alapesästä, jotka ovat jaettu kahteen osaan vaakasuoralla laipalla. Laipat (Kuva 17) on kiinnitetty toisiinsa pulttikiinnityksellä, jonka välissä ei ole tiivistettä. Tämä tarkoittaa, että

laippaliitoksen pintojen eli jakotasojen täytyy olla, tiivisti toisiaan vasten. Tämä saadaan aikaiseksi pulttien suurella kireydellä ja tarkasti koneistetuilla jakotasolla. Pesien ylä- ja alapuoliskot ovat mahdollisimman symmetrisiä. Pesät ovat erittäin paksuseinäisiä (Kuva 18) ja tavallisesti valettuja ja valmistettu seostetusta teräksestä. Paksuseinäisellä rakenteella pyritään pitämään jännitykset pieninä. Käytön aikana ylä- ja alapesän lämpötila ero saa olla vain 30–50 astetta. (Kauppinen 2018, 85–86.)



Kuva 17. Jakotason pulttiliitos. (Leyzerovich 1997, 332)



Kuva 18. Avattu turbiini (Fortum 2025)

### 3.5 Jakotason pulttiliitos

Jakotasojen pultit ovat suuria esimerkiksi M90 kierteellä ja puoli metriä pitkiä. Yleensä pultit ovat lämpölaajentamalla kiristettäviä ja löystytettäviä. Eli pultteja lämmitetään, yleensä induktiivisesti, että ne saadaan auki ja kiinni. Jotta pulttiliitos pysyisi yhtä kireänä, vaikka turbiinin tehoa säädettäisiin eli lämpötila muuttuisi, täytyy niiden omat samat lämpölaajenemiskertoimet kuin pesäkin. Jotta tämä onnistuu, pultit ja pesät valmistetaan yleensä samasta materiaalista, eli seostetuista teräksistä. Jos lämpölaajenemiskertoimet eroavat, saattaa pulttiliitos käytön aikana löystyä tai kiristyä, aiheuttaen höyryvuotoja, pulttien rikkoutumisen tai pesän halkeamisen. Turbiinin tehonmuutosten aikana lämpötilaeroja syntyy. Lämpötilaerojen estämiseksi jakotasoon on jyrskitty urat, joiden avulla voidaan johtaa höyryä pulteille. Ollessaan kireällä pultin venymä on n. 1,5–2,0 promillea venyvistä pituudesta. Pultti venyy vain sileäpintaisesta keskiosasta, kierteinen osa ei veny. Pultit ovat kriittisessä paikassa ja niiden täytyy kestää revisioiden eli huoltojen välisen ajan, yleensä 50000–60000 tuntia, joten jokainen pultti ja sen paikka on numeroitu ja pulttien kuntoa seurataan jokaisen revision yhteydessä. Jokainen uusi pultti mitataan ja pituus stanssataan pultin päähän ennen asennusta. Revisiossa jokaisen pultin pituus mitataan. Pituutta verrataan alkuperäiseen pituuteen ja jos pysyvä venymä on yli 1 % täytyy pultti vaihtaa uuteen. (Pitkänen 2003, Kauppinen 2018, 85–86.)

## 4 Mittaukset

### 4.1 Mittauksien perusta

Pulttien lämmittämiseen ei ole varsinaisia ohjeita, vaan lämmitysaika riippuu usein asentajan kokemuksesta. Yleensä lämmitysaika on pultin koosta riippuen 5–10 minuuttia pulttia kohden. Yleinen nyrkkisääntö on 7 minuuttia pulttia kohden. Yhdessä turbiinissa pultteja saattaa olla useita kymmeniä, jolloin pulttien kiristys/löystyttäminen kestää yhden työpäivän ja lämmittäminen vaatii 2 työntekijää. Pultteja avataan ja kiristetään yhden revision aikana useamman kerran. Lämmitysaajan lyhentäminen esimerkiksi puoleen säästäisi paljon aikaa. Lämmitysaajan määrittämisestä löytyy niukasti tietoa, joten aihetta päätettiin tutkia. Epäiltiin, että pulttia lämmittäessä nopeasti voisi pultin sisälle syntyä lämpöjännitteitä. Tätä ei pystytty itse mittaamaan, joten materiaalin kovuuden muutos valittiin tutkittavaksi ominaisuudeksi. Kovuuskoe oli helppo suorittaa saatavilla olevilla välineillä ja epäiltiin, että lämmitettäessä pulttia sen sisäpinnan lämpötila saattaisi nousta lämpökäsittelylämpötiloihin, jolloin kovuuteen tulisi muutoksia.

### 4.2 Käytettävät laitteet ja työkalut

#### 4.2.1 Kovuusmittari

Kovuusmittaukset tehtiin Mitechin valmistamalla MH180 kovuusmittarilla (Kuva 19). Kyseinen kovuusmittari käyttää Leebin mittausmenetelmää. Kovuusmittari on pieni ja helppokäyttöinen, mutta ei anna täysin tarkkaa tulosta. Tulokset muutettiin kovuusmittarin avulla suoraan Leebin tuloksesta Brinelliin vertailun helpottamiseksi.



Kuva 19. Mitech MH180 (Smaskin 2025)

Leebin mittausmenetelmässä mitattavaan kappaleeseen pudotetaan metallikuula, jonka nopeus mitataan ennen ja jälkeen osuman. Tästä erotuksesta saadaan selville kappaleen kovuus. Lasku tapahtuu kaavalla 2.

$$HL = \frac{v_R}{v_A} * 1000$$

Kaava 2. Leebin kovuuskaava

Missä

$v_R$  = nopeus ennen osumaa

$v_A$  = nopeus osuman jälkeen

(ISO-16859-1-2015)

#### 4.2.2 Induktiolämmitin

Lämmitykset tehtiin samalla lämmittimellä, mikä on käytössä työmaillakin. Käytettävä lämmitin (Kuva 20) on EFD Inductionin valmistama MINAC 25/40 SM TWIN liitettynä erilliseen jäähdytysveden jäähdyttäjään. Kyseisen laitteen maksimiteho on jatkuvassa käytössä 25 kW ja jaksottaisessa käytössä 40 kW. Käytettävän lämmityssauva valittiin pultin pituuden ja reiän halkaisijan mukaan

sopivaksi (Kuva 21). Sauva on sopiva, kun sauvan pää on noin pultin toisen pään kierteisiin asti ja reikään sopivasti mahtuva.



Kuva 20. Induktiolämmitin ja jäähdytin



Kuva 21. Käytettävä lämmityssauva

Induktiokuumennus perustuu lämmityssauvan läpi johdettavaan vaihtovirtaan, joka muodostaa virran taajuuden mukaan vaihtelevan magneettikentän. Magneettikentän voimakkuus eli lämmitysteho riippuu virran voimakkuudesta ja kelan kierrosten määrästä. Magneettikenttä indusoi lämmitettävään kappaleeseen pyörrevirtoja, jotka metallin sähkövastuksen takia muuttuu lämmöksi. (EFD Induction 2010.)

### 4.2.3 Lämpömittari

Lämpömittaukset suoritettiin Trifitekin valmistamalla infrapunalämpömittarilla (Kuva 22), johon oli liitetty erillinen pintalämpömittari.



Kuva 22. Lämpömittari

### 4.2.4 Mitattavat pultit

Mittauksia varten varastosta otettiin 5 kappaletta samanlaista pulttia. Pultit olivat käyttämättömiä varaosia. Pulttien koko oli M90 ja pituus 430 mm, kierteen nousu 6 mm ja kierteettömän osan pituus 260 mm. Materiaali oli stanssattuna pulttien päihin (Kuva 23), joten materiaalitunnistus oli helppoa. Tunnuksena oli V eli materiaali on X22CrMoV (Kuva 24). X22CrMoV on martensiittinen terässeos, joka kestää hyvin virumista. Seos sisältää (Kuva 25) pääosiltaan

kromia, molybdeenia ja vanadiinia. Materiaalia käytetään paljon höyryturbiineissa ja sen eri komponenteissa



Kuva 23. Materiaalistanssaus

**Ferrometal oy**

Kiinnikeraaka-ainesten kuumen- ja kylmänkestävyys  
Ruuvit ja mutterit kuumen- ja kylmänkestävistä teräsaaka-ainesta (DIN 267 / oss 13).

Lämpötila °C	Raaka-aineen lyhytnimi	Tunnus	Raaka-aineen numero
	C 35 N	Y	1.0501
+350 °C saakka	Cq 35	YQ	1.1172
	Cl 35	YK	1.1181
+400 °C saakka	24 CrMo 5	G	1.7258
+540 °C saakka	21 CrMoV 57	GA	1.7709
+540 °C saakka	40 CrMoV 47	GB	1.7711
+580 °C saakka	X 22 CrMoV	V	1.4923
+580 °C saakka	X 19 CrMoVNbN	VW	1.4913
+650 °C saakka	X 8 CrNiMoNbV 16 16	S	1.4986
+700 °C saakka	X 5 NiCrTi 26 15	SD	1.4980
+700 °C saakka	NiCr 20 TiAl	SB	2.4952
+65 °C	26 CrMo 4	KA	1.7219

Kuva 24. Materiaalitalulukko Ferrometal

C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	V
0.18 - 0.24	max 0.5	0.4 - 0.9	0.3 - 0.8	max 0.025	max 0.015	11 - 12.5	0.8 - 1.2	0.25 - 0.35

Kuva 25. X22CrMoV koostumus (Steelnumber 2025)

#### 4.2.5 Pituusmittatyökalu

Pituusmittaus tehtiin (Kuva 26) TGS:n teettämällä pultinmittaustyökalulla, joka koostuu (Kuva 27) tankoon kiinnitetystä mikrometrinä. Mittatyökalu kalibroitiin mittaustyökalua varten tehdyillä kappaleilla (Kuva 28) pultin pituuden mukaan (Kuva 29). Pituus mitattiin pulttiin koneistetuista mittauskohdista (Kuva 30 ja 31).



Kuva 26. Pultinmittaustyökalusetti



Kuva 27. Pultinmittaustyökalu



Kuva 28. Pultinmittaustyökalun kalibrointivälineet



Kuva 29. Pulttien pituusmittaus



Kuva 30. Pultin pituusmittaus mittakohdasta



Kuva 31. Pultin pituusmittaus mittakohdasta 2

#### 4.3 Mittausten suoritus

Mittaukset suoritettiin Naantalissa TGS:n omassa workshopissa. Mittaukset aloitettiin valmistelemalla käytettävät työvälineet ja laitteet, sekä etsimällä varastosta sopivat pultit mittauksia varten. Pultit numeroitiin ja niiden pituus mitattiin, jonka jälkeen pultteja alettiin lämmittämään. Tavoitelluksi lämpötilaksi valittiin 300 °C, joka arvioitiin asentajien kokemusten perusteella olevan sopiva lämmityslämpötila. Tällöin pulttiin ei pitäisi normaalilla lämmitysnopeudella syntyä muuta lämpövärejä, kuin vähän keltaista. Taulukossa 1 on pulttikohtaiset lämmitysajat ja tehot.

Taulukko 1. Pulttien lämmitysajat ja tehot

	Pultti 1	Pultti 2	Pultti 3	Pultti 4
Lämmitysaika	6min	4min 20s	3min 20s	1min 25s
Lämmitysteho (kW)	4,4	6,5	9,7	20

Pulttien annettiin jäähtyä, jonka jälkeen pulttien pituus mitattiin uudestaan mahdollisten muutosten varalta. Pultit sahattiin metallivannesahalla poikki lämmityskohdasta (Kuva 32), sahausjälki hiottiin tasaiseksi, että pinnasta on mahdollista ottaa kovuusmittaus. Mittausten jälkeen tutkittiin vielä yhtä pulttia, jota lämmitettiin täydellä teholla 5 minuuttia. Aloitus lämmitysteho oli 40 kW, josta se laski automaattisesti alaspäin ja 5 minuutin kohdalla se oli 26 kW. Viimeisen pultin lämpötilaa ei voitu mitata käytössä olevilla mittareilla, mutta lämmityskohdan lämpötilan arvioitiin olevan värin perusteella jopa 800 °C (Kuvat 33 ja 34). Neljäs ja viides pultti sahattiin myös pitkittäin (Kuva 35) halki lämmityskohdasta.



Kuva 32. 3 pultti sahattuna



Kuva 33. Pultti 5 kuumana



Kuva 34. Pultti 5 lämmityksen jälkeen sisältä



Kuva 35. 4 pultti sahattuna

## 5 Tulokset

### 5.1 Tulokset ja analyysi

Kuten kuvista 36 ja 37 näkee, pultteihin muodostui odotetut lämpövärit. 1–2 pultteihin, jotka lämmitettiin hitaasti, ei juuri syntynyt lämpöväriä. 3–4 pultteihin syntyi kellertävää lämpöväriä ja 5 pulttiin lämpövärit keltaisesta siniseen. Pulttiin numero 5 syntyi myös kaarevanmuotoisia jälkiä (Kuva 38). Todennäköisesti jäljet syntyivät sahauksen aikana värinän aiheuttamana. Mutta muissa pulteissa samanlaisia jälkiä ei ollut, kaaret olivat lämmityksen suuntaiset, joten varmaa syytä ei tiedetä. Kuvasta 39 voidaan havaita lämmityksen kohdistuneen hyvin pienelle alueelle.



Kuva 36. Pultit 1–4 lämmityksen jälkeen



Kuva 37. Pultti 5 lämmityksen jälkeen



Kuva 38. Kaarevat jäljet 5 pultissa



Kuva 39. Lämmityksen jäljet pultissa 5

Materiaalin kovuus on TGS:n käyttämän TotalMateria:n tietopankin ja tehtyjen kovuustestien mukaan on 270HB. Yllättäen kovuuteen (Taulukko 2) ei tullut muutoksia edes lämmittäessä suurilla tehoilla. Tulokset sopivat kovuusmittarin valmistajan antamaan  $\pm 10$  tulosyksikön tarkkuuteen. Pulttien pituuteen ei muodostunut eroja, joten pultteihin ei syntynyt pysyviä muutoksia. Mittalaitteen tarkkuus vaikuttaa pituusmittausten tuloksiin.

Taulukko 2. Mittaustulokset

	<b>Pultti 1</b>	<b>Pultti 2</b>	<b>Pultti 3</b>	<b>Pultti 4</b>	<b>Pultti 5</b>
<b>Lämmitysaika</b>	6min	4min 20s	3min 20s	1min 25s	5min
<b>Lämmitysteho (kW)</b>	4,4	6,5	9,7	20	40–26
<b>Mittauskohta 1 kovuus (HB)</b>	265	280	268	267	266
<b>Mittauskohta 2 kovuus (HB)</b>	275	272	278	278	265
<b>Mittauskohta 3 kovuus (HB)</b>	273	277	282	278	272
<b>Mittauskohta 4 kovuus (HB)</b>	264	277	274	275	262
<b>Mittauskohta 5 kovuus (HB)</b>	271	278	275	273	265
<b>Mittauskohta 6 kovuus (HB)</b>	263	278	276	273	267
<b>Mittauskohta 7 kovuus (HB)</b>	285	277	280	270	270
<b>Mittauskohta 8 kovuus (HB)</b>	276	277	276	268	268
<b>Pituus ennen (mm)</b>	418,26	418,13	418,10	418,14	418,68
<b>Pituus jälkeen (mm)</b>	418,18	418,16	418,18	418,12	418,70

## 5.2 Pohdinta

Saatujen tulosten perusteella lämmitysaikaa voisi lyhentää. Mutta varmistuakseen, että pultteihin ei synny vaurioita nopeasta lämmityksestä täytyisi tehdä jatkotutkimuksia esimerkiksi NDT tarkastuksia, kiderakennemuutostutkimuksia ja iskutitkeys-kokeita pulteille. Vaikka pelkkä lämmitys ei aiheuttaisi vaurioita, turbiinin käynnissä ollessa pulttiin kohdistuva lämmönvaihtelu, jännitys ja värinä yhdistettynä useasti toistettuun nopeaan lämmitykseen saattaisi aiheuttaa vaurioita. Kokeet täytyisi suorittaa myös erikokoisille ja eri materiaalista tehdyille pulteille. Pulttiin 5 syntyneiden jälkien alkuperä täytyisi myös selvittää.

## 6 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia lämmitysnopeuden vaikutusta höyryturbiinin jakotason pultin materiaalin kovuuteen. Tutkimukset suoritettiin viidelle samanlaiselle pultille, jotka olivat samaa materiaalia. Tutkimus suoritettiin kuumentamalla 4 pulttia induktiolämmittimellä yksitellen 300°C lämpötilaan eri nopeuksilla. Lisäksi yhtä pulttia kuumennettiin induktiolämmittimen täydellä teholla 5 minuuttia. Jäähdytymisen jälkeen pultteihin suoritettiin kovuuskokeet. Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan todeta, että lämmitysnopeudella ei ole vaikutusta pulttien materiaalin kovuuteen. Opinnäytetyössä ei tutkittu lämmitysnopeuden vaikutusta pultin materiaalin muihin ominaisuuksiin.

## Lähteet

Björk, T.; Hautala, P.; Huhtala, K.; Kivioja, S.; Kleimola, M.; Lavi, M.; Martikka, H.; Miettinen, J.; Ranta, A.; Rinkinen, J.; Salonen, P. 2014 Koneenosien suunnittelu, Helsinki: Sanoma Pro.

Blom, S.; Lahtinen, P.; Nuutio, E.; Pekkola, K.; Pyy, S.; Rautiainen, H.; Sampo, A.; Seppänen, P.; Suosara, E. 2001. Koneenelimet ja mekanismit. Helsinki: Edita Oyj.

Boltscience – Methods of Tightening Threaded Fasteners Viitattu 10.11.2024  
<https://www.boltscience.com/pages/tighten.htm>

Brand TS – Helios 35 Induction bolt heating system to rent and buy. Viitattu 20.10.2024. <https://brand-ts.com/en/bolting/induction-bolt-heating-system.html>

EFD Induction – MINAC 25/40 Käyttöohjeet. 2010.

Enerpac - Torque and Tension Tools Viitattu 19.1.2025  
<https://www.enerpac.com/en-us/products/USTorqueandTensionTools>

Fortum - Fast reaction to findings prolonged turbine major overhaul by only four weeks Viitattu 6.2.2025  
<https://www.fortum.com/files/enextumea-energi-customer-reference>

Huhtinen, M.; Korhonen, R.; Pimiä, T.; Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka, Keuruu: Opetushallitus.

Integra Technologies – Induction Bolt & Nut Heating. Viitattu 15.11.2024.  
[https://www.integratechnologies.com/induction-bolt-heating/#iLightbox\[gallery\\_image\\_1\]/1](https://www.integratechnologies.com/induction-bolt-heating/#iLightbox[gallery_image_1]/1)

ISO-16859-1. 2015. Metallic materials – Leeb hardness test – Part 1: Test method.

James Walker - Load indicating fasteners: Rotabolt. Viitattu 12.11.2024.  
<https://www.jameswalker.biz/our-solutions/our-products/load-indicating-fasteners/rotabolt>

Kauppinen, J. 2018. Turbiinitekniikka. Tampere: Tammertekniikka.

Koivisto, K.; Laitinen, E.; Niinimäki, M.; Tiainen, T.;Tiilikka, P.;Tuomikoski,J.  
2010. Konetekniikan Materiaalioppi. Helsinki: Edita Oyj.

Leyzerovich, A. 1997 Large Power Steam Turbines, Tulsa: PennWell publishing  
company.

SKF – Hydraulic tension Tightening. Viitattu 27.10.2024.

<https://www.skf.com/group/products/power-transmission/bolts-and-tightening-systems/hydraulic-tension-tightening>

Teca – Hydrauliset ruuvinvenyttimet. Viitattu 12.11.2024.

<https://www.teca.fi/tuotteet/hydrauliikkatyokalut/pulttaustyokalut/14785/hydrauliset-ruuvinvenyttimet>

Toolfin - Momentti astelevy. Viitattu 15.11.2024

<https://toolfin.com/kulmakiristys-astemitta-3-4-1.html>

## Mittaustulokset

	Pultti 1	Pultti 2	Pultti 3	Pultti 4	Pultti 5
Lämmitysaika	6min	4min 20s	3min 20s	1min 25s	5min
Lämmitysteho (kW)	4,4	6,5	9,7	20	40–26
Mittauskohta 1 kovuus (HB)	265	280	268	267	266
Mittauskohta 2 kovuus (HB)	275	272	278	278	265
Mittauskohta 3 kovuus (HB)	273	277	282	278	272
Mittauskohta 4 kovuus (HB)	264	277	274	275	262
Mittauskohta 5 kovuus (HB)	271	278	275	273	265
Mittauskohta 6 kovuus (HB)	263	278	276	273	267
Mittauskohta 7 kovuus (HB)	285	277	280	270	270
Mittauskohta 8 kovuus (HB)	276	277	276	268	268
Pituus ennen (mm)	418,26	418,13	418,10	418,14	418,68
Pituus jälkeen (mm)	418,18	418,16	418,18	418,12	418,70

	Pultti 4		Pultti 5	
	Pala 1	Pala 2	Pala 1	Pala 2
Mittauskohta 1 kovuus (HB)	245	250	256	258
Mittauskohta 2 kovuus (HB)	256	259	255	262
Mittauskohta 3 kovuus (HB)	252	250	259	256
Mittauskohta 4 kovuus (HB)	257	246	235	253
Mittauskohta 5 kovuus (HB)	251	250	240	256
Mittauskohta 6 kovuus (HB)	252	255	255	257

## Mittauskohdat

