



SUUNNITTELUMANUAALIN KEHITTÄMISTYÖ

Vesiturbiinin juoksupyörä

Antti-Jussi Vuoristo

Opinnäytetyö
Toukokuu 2015
Auto- ja kuljetustekniikka
Auto- ja työkonetekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma
Auto- ja työkonetekniikan suuntautumisvaihtoehto

ANTTI-JUSSI VUORISTO:
Suunnittelumanuaalin kehittämistyö
Vesiturbiinin juoksupyörä

Opinnäytetyö 39 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Toukokuu 2015

Opinnäytetyön aiheena oli kehittää vesiturbiinin juoksupyörän suunnittelumanuaali Andritz Hydro Oy:n tarpeisiin. Edellisen harjoittelun loppukeskustelujen pohjalta tuli ilmi, että on tarve luoda suunnitteluohjeet juoksupyörän suunnittelulle.

Projektin tavoitteena oli yhtenäistää suunnittelukäytäntöjä yrityksessä laatimalla ajantasaisia, piirustusteknillisesti oikeaoppisia sekä valmistusteknillisesti ja toiminnallisesti tarkoituksenmukaisia piirustusmalleja. Lisäksi haluttiin lisätä kustannustehokkuutta suunnittelussa tarkennetulla toleranssien asettamisella sekä valmistusmahdollisuuksien tarkastamisella ja tehostamisella. Kustannuslaskennan esimerkkien haluttiin tuoda lisänäkemystä valmistusteknillisestä ja kustannustehokkaasta näkökulmasta suunnittelutyössä. Samalla ohjekirja toimisi perehdytys- ja koulutusmateriaalina uusille työntekijöille.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli käsitellä ohjekirjan laadintaprojektiin kuuluvan asiasisällön käsittelyä. Pääpaino työssä oli ohjekirjan sisältöön kuuluvien osuuksien esittelyllä yleisellä tasolla ja varsinaisen ohjekirjan laadintaan kuuluvien vaiheiden käsittelyllä.

Suunnittelumanuaali koostuu tehtävänannon mukaan laadituista mallipiirustuksista ja niitä tukevasta tekstiosuudesta. Se käsittelee mallipiirustuksien ja ohjesivujen avulla juoksupyörän osissa huomioitavia erityispiirteitä suunnittelussa, kuten erilaisia rakenneratkaisuja, mitoituksen lähtökohtia, toleransseja, materiaaleja ja materiaalivaatimuksia sekä tarkastusvaatimuksia.

Lopulliseksi suunnittelumanuaaliksi kehittyi tehtävänannon mukainen ohjekirja, jolla luodaan linjaukset juoksupyörän suunnitteluun. Työstä tuli laaja, kaikki tärkeimmät juoksupyörän osat kattava, yleiset suunnittelun linjaukset tarkentava ohjekirja. Suunnittelumanuaalia tullaan käyttämään yrityksessä suunnittelijoiden ohjeistukseen ja sitä voidaan laajentaa ja kehittää tarpeen vaatiessa.

Projektin luottamuksellisuuden vuoksi tässä työssä ei käsitellä yritykselle laadittua suunnittelumanuaalin sisältöä kuin vain yleisellä tasolla ja luottamuksellinen aineisto on poistettu julkaistavasta raportista.

Asiasanat: vesiturbiini, juoksupyörä, suunnittelu, ohjekirja

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Automobile and Transport Engineering
Option of Automobile and Industrial Vehicle Engineering

ANTTI-JUSSI VUORISTO:
Development of Design Guideline
Water Turbine Runner

Bachelor's Thesis 39 pages, appendices 0 pages
May 2015

The subject of this thesis was to develop a design guide line for water turbine runners for Andritz Hydro Oy. The final discussions after my last internship in the company revealed that there was a need to define design instructions for runners.

The purpose of the project was standardize design practices by creating proper drawing models that would serve the needs of manufacturing process and the operation of the components. Cost efficiency would increase with setting up more suitable tolerances for components and rationalizing manufacturing processes. In addition the design guide line is aimed to be a training material for new employees.

The purpose of the thesis was to cover the matters that need to be considered in designing a runner guide line. The main focus was in the introduction of the matters that need to be considered in design process and in theory of designing a guide line.

The design guide line consists of model drawings and text documents supporting information expressed in the drawings. It covers special perspectives in designing a runner, for example different structure options, tolerances, materials, material requirements and requirements concerning inspections of the components.

The final form of the guide line developed into design guide line covering design practices concerning runners. The project was extensive and the guide line covers all main components of the runner and it defines general design instructions. It is intended to be used to instruct the designers.

The design guide line that was created in the project is left unpublished because of its confidentiality. The matters that need to be considered in design process are introduced in general level.

Key words: water turbine, runner, design, guideline

SISÄLLYS

JOHDANTO	6
1 YRITYS.....	7
1.1 Toimiala.....	7
1.2 Tuotteet	7
2 TEHTÄVÄN MÄÄRITTELY	9
2.1 Lähtökohta	9
2.2 Toteutus	10
3 VESITURBIININ JUOKSUPYÖRÄ.....	13
3.1 Rakenne	14
3.2 Toiminta.....	17
4 JUOKSUPYÖRÄN SUUNNITTELU	20
4.1 Suunnittelussa huomioitavat asiat.....	20
4.1.1 Virtauslaskenta.....	22
4.1.2 Mitoitus	22
4.1.3 Sovitteet ja toleranssit	25
4.1.4 Osien työnumerointi.....	27
4.1.5 Materiaalit	28
4.1.6 Valmistustekniikka ja kustannukset.....	29
4.1.7 Laskelmat	31
4.1.8 Liitedokumentit.....	31
4.2 Suunnittelun kehittäminen	32
5 SUUNNITTELUMANUAALI	33
5.1 Visio.....	33
5.2 Rakenteen kehittäminen.....	34
5.3 Lopputulos	35
6 POHDINTA.....	37
LÄHTEET.....	39

LYHENTEET JA TERMIT

CFD	Computational Fluid Dynamics eli numeerinen virtausdynamiikka, tietokoneavusteisen virtauslaskennan menetelmä
FEM	Finite Element Method eli elementtimenetelmä, lujuuslaskennassa käytetty numeerinen ratkaisumenetelmä
GPS	Geometric Product Specifications eli geometrinen tuotemäärittely, käytetään symbolikielenä tuotteiden geometrinen vaatimusten ilmaisemiseen
Kaplan-turbiini	säätyväsiipinen potkuriturbiini
kavitaatio	veden kiehumisilmiö paineen laskiessa
PBS	Product Breakdown Structure eli tuoterakenne, käytetään puhuttaessa tuotteen jakamisen järjestelystä eri osiin
johtosoluke	johtosiipi, vesimäärän säätölaite

JOHDANTO

Suomen merkittävin uusiutuva energiamuoto on vesivoima. Sen erityinen asema perustuu ympäristöystävällisyyteen, käyttövarmuuteen ja sen säätöominaisuuksiin. Siitä ei aiheudu päästöjä veteen, ilmaan eikä maaperään. Säilömällä vettä voimalaitosten altaisiin voidaan vesivoimalla kompensoida sähköntuottokykyä, kun tarve sille on suurimmillaan. Vesivoimalla on pitkä historia Suomessa ja sen tulevaisuudennäkymät on hyvät erityisesti pienvesivoimassa. (Energiateollisuus). Kiinnostus alan tarjoamia mahdollisuuksia kohtaan synnytti idean opinnäytetyön toteuttamisesta alan tehtävissä.

Edellisen harjoittelujakson loppukeskustelujen pohjalta tuli ilmi tarve kehittää ja tarkentaa yleiset suunnittelukäytännöt kattavan ohjekirjan laadinnalla. Tämän kehitysehdotuksen pohjalta tullaan tässä työssä perehtymään nykyaikaisen vesivoimalaitoksen Kaplan-juoksupyörän kehitystyöhön.

Työn tarkoituksena on kehittää Andritz Hydro Oy:n tarpeesta vesiturbiinin juoksupyörän suunnittelumanuaali yrityksen suunnittelijoiden käyttöön. Tavoitteena on rakentaa suunnittelijoille ohjeet, joita noudattamalla tuotetaan yhtenäinen, ajantasainen, suunnittelu-aikaa säästävä, valmistusystävällinen ja kustannustehokas lopputuote. Samalla alalle valmistelevien koulutusmahdollisuuksien uupuessa saataisiin yritykselle kattava perehdytysmateriaali uusien työntekijöiden kouluttamiseen.

Opinnäytetyön alussa kerrotaan opinnäytetyön kohdeyrityksestä ja sen valmistamista tuotteista. Sitten määritellään opinnäytetyön lähtökohta, sen tavoitteet sekä toteuttamistapa, jonka jälkeen käsitellään Kaplan-turbiinin ominaisuuksia yleisesti. Seuraavaksi tarkastellaan Kaplan-turbiinin juoksupyörän rakennetta ja sen toimintaa. Tämän jälkeen työssä siirrytään pääalueeseen eli suunnittelussa huomioitavaan asioihin, kuten mitoittamiseen, materiaalien käyttöön ja osien tarkastusvaatimuksiin. Näiden jälkeen tarkastellaan ohjekirjan laadinnan prosessia ja lopuksi kootaan yhteen projektin lopputulokset ja verrataan niitä tavoitteisiin ja niiden hyödynnettävyyteen yrityksessä.

Sopivan aineiston puuttuessa tämän projektin pohja-aineisto työn laadintaan on koostettu pääasiassa yrityksen sisäisestä tiedosta.

1 YRITYS

1.1 Toimiala

Andritz Hydro Oy on metalliteollisuuden yritys, joka keskittyy vesivoimalaitosten suunnitteluun, niiden markkinointiin ja myyntiin, rakentamiseen ja käyttöönottamiseen sekä modernisointiin ja huoltoon. Toiminta on keskittynyt suur- ja pienluokan vesivoimaan ja markkina-alue on suurimmaksi osaksi Suomessa. Yritys on osa suurta Itävallasta kotoisin olevaa Andritz-konsernia, johon sisältyy Andritz Hydron lisäksi paperialan Andritz Pulp & Paper, metallialan Andritz Metals ja materiaalien erotustoimintaan keskittyvä Andritz Separation.

Yrityksen päätoimipiste sijaitsee Tampereen keskustassa Ratinankaareissa, mihin on keskitetty yrityksen johto, markkinointi, tuotekehitys ja suunnittelu. Tuotekehityksen puoli toimii osittain päätoimipisteessä ja tuotekehitykseen kuuluva turbiinien hydraulinen testilaboratorio Tampellan alueella. Messukylän toimipisteessä hoidetaan juoksupyörien kokoonpano.

Andritz Hydro Oy työllistää yhteensä 49 henkilöä. Yrityksen liikevaihto oli vuonna 2013 arviolta 13 965 000 euroa (Kauppalehti, 2013).

1.2 Tuotteet

Yrityksen päätuotteita ovat Kaplan-turbiinien ja siihen liittyvien laitteiden suunnittelu ja valmistus vesivoimalaitoksiin. Kokonaisvaltainen toiminta alkaa vesihydraulisesta tuotekehityksestä ja mallikokeesta, joilla taataan asiakkaalle turbiinin suoritusarvot. Toimitus sisältää kaiken suunnittelun mekaniikasta, öljyhydrauliikasta ja elektronisista valvonta- ja varolaitteista sekä mekaaniset rakenteet vesiteihin, johtopyörän, juoksupyörän, säätömekanismit, akselit, laakeroinnit, säätöhydrauliset toimilaitteet ja liitännät kiinnitettäväksi generaattoriin.

Toiminta on keskittynyt olemassa olevien vesivoimalaitosten uusintoihin eli modernisointiin, jolloin vesiturbiinin pääosat, juoksupyörä, akseli, ohjauslaakeri, johtosolukkeet, johtopyörän ja juoksupyörän säätömekanismit ja säätöhydrauliikka uusitaan sekä huolletaan muut kiinteät rakenteet. Modernisoinnissa tekniikan uusinnan lisäksi vesiturbiinin maksimitehot nousevat tapauksesta riippuen 10–40 %, minkä lisäksi kokonaishyötysuhde nousee.

Andritz Hydro Oy on panostanut ympäristöystävälliseen tekniikkaan, minkä ansiosta öljy- ja rasvavoitelukohteet korvataan itsevoitelevilla laakeroinneilla ja uudet vesitäytteiset juoksupyörän navat korvaavat vanhat öljytäytteiset juoksupyörät. Päämarkkina-alue on kotimaa, minkä lisäksi vahvan osaamisen ansiosta toimitetaan juoksupyöriä, öljynjakopesiä ym. sekä suunnittelua Andritzin muille yksiköille. Lisäksi yritys vastaa Kaplan-turbiinien vesihydraulisesta tuotekehityksestä ja mallikokeista Ruotsin ja Norjan yksiköille.

2 TEHTÄVÄN MÄÄRITTELY

2.1 Lähtökohta

Opinnäytetyön idea syntyi jo aiemmin edellisellä harjoittelujaksolla kesällä 2014 loppukeskusteluissa työpaikalla. Yrityksen suunnitteluosastolla oli tarve kehittää suunnittelutoimintaa yhtenäisempään suuntaan ja myöhemmin syksyllä työnantajan kanssa käydyissä loppukeskusteluissa opinnäytetyön lopulliseksi projektiaiheeksi kehitettiin suunnittelutyötä tukevan ohjekirjan laadinta.

Suunnittelutyössä piirustusten mallit vaihtelevat tekijän mukaan ja sama osa on saatettu esittää hyvin eri tavoin tekijästä riippuen. Piirustuksen voi laatia samasta osasta eri lähtökohdista mitoittamalla ja eri suunnista projektiot laatimalla. Jokaisella suunnittelijalla on oma näkemyksensä valmistusprosessin vaiheista ja osan toiminnasta ja sen perusteella hän päättää, mikä on oleellista tietoa esitettäväksi. Karkeasti lähtökohta voi olla mallin laadinta valmistajan kannalta tai vaihtoehtoisesti asentajien työn kannalta.

Vaikeuksia eri näkemykset aiheuttavat varsinkin siinä kohtaa, kun yhden suunnittelijan täytyy jatkaa toisen suunnittelijan työtä. Usein toisen työn ymmärtäminen vie aikaa ennen kuin sitä voi jatkaa, jos se on edes mahdollista. Piirustusmallien rakenne on voitu laatia poikkeavalla tavalla ja piirustuksen projektiot ja leikkaukset voivat olla erilaisia ja siihen liitetyt lisätiedot esimerkiksi materiaalivaatimuksista tai asennusohjeista saattavat olla aivan eri paikoissa piirustusta. Myös toleranssimerkinnät ja mitoituksen lähtökohdat eivät aina ole oikein, piirtämiskäytäntöjen muuttuessa uusien standardien ilmestymisen mukana.

Piirustuksen laatimistavasta riippuen samat työvaiheet voidaan pahimmillaan käsittää eri tavoin mallipiirustuksesta riippuen. Oleellista olisi että piirustuksen sisältämä tieto ymmärrettäisiin samalla tavalla lukijasta riippumatta, sillä piirustukset ovat suunnittelijoiden käyttämä tekniikan kieli (Pere 2012, 1-1). Tavoitteena on, että piirustukset ovat samalla periaatteella luotuja ja ne kuvaavat esittämänsä osan piirustuksen lukijalle yksikäsitteisesti ja selvästi.

Yhtenäistämistavoitteen lisäksi kilpailu markkinoilla kannustaa kustannustehokkuuden lisäämiseen, mitä toteutetaan suunnittelussa tarkennetulla toleranssien asettamisella sekä valmistusmahdollisuuksien tarkastamisella ja tehostamisella. Tästä laaditaan omat osiot ohjekirjaan juoksupyörän kokoluokan tuomien rakenne-erojen kustannuslaskentana. Esimerkitapauksien tarkoituksena on tuoda suunnittelijoille lisänäkemystä valmistusteknisestä ja kustannustehokkaasta näkökulmasta suunnittelutyössä. Tämä nousee tärkeäksi tavoitteeksi etenkin nuorten suunnittelijoiden kohdalla, joilla ei ole vielä samanlaista näkemystä koko tuotantoprosessista kuin vanhemmilla suunnittelijoilla.

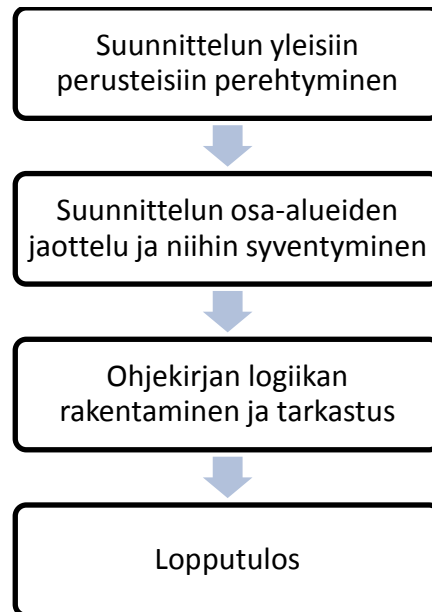
Projektin päämääräksi asetettiin ajantasaisten, piirustusteknisesti oikeoppisten ja tarkoitustenmukaisten mallien laadinta. Mallit tulisi olla sellaisia, että niistä voisi aina tarkastaa mitä asioita piirustuksissa tulee olla ja miten ne tulee esittää. Päivitettävyyden mahdollistaminen tulee huomioida otettaessa käyttöön esimerkiksi uusia standardeja. Alalle ei ole ajanmukaista koulutusmateriaalia ja osaaminen keskittyy lähinnä työntekijöille, joten keskeisenä työn sisältönä oli rakentaa tätä osaamista kirjalliseen muotoon. Lisäksi kattava opetusmateriaali säästää yrityksen työresursseja sen tulevaisuuden koulutustehtävissä.

Opinnäytetyön aiheen painottuessa juoksupyörän piirustusten laadintaan ja ohjekirjan rakentamiseen, käsitellään rakenteen ja toiminnan teoria työssä mahdollisimman tiiviisti ja ytimekkäästi. Mitoituslaskelmia ei tulla käsittelemään valmiiksi suunniteltujen osien vuoksi, kuin vain niihin liittyviin laskelmiin viittaamalla ohjekirjan sivuilla. Pääpaino tulee olemaan suunnittelun käytäntöjen tarkentamisessa ja siinä esiintyvissä erityispiirteissä juoksupyörän kohdalla sekä ohjekirjan rakenteen laadinnassa.

2.2 Toteutus

Projektin toteutustavaksi päätettiin heti keskustelujen alussa sen laatiminen työsuhteessa. Työ edellyttää yrityksen sisäisten käytäntöjen tarkkaa tuntemista sekä yhteistyötä suunnittelijoiden kanssa, joten etätyö ei ollut kannattava vaihtoehto. Tärkeää oli myös saada käyttöön tarvittavat mallinnusohjelmistot sekä tiedonhallintajärjestelmät, jotka saataisiin käyttöön kätevästi yrityksessä paikan päällä työskennellessä.

Opinnäytetyöprosessin toteuttaminen tehtävien laajuuden ja aikataulun kannalta on hyvä jaotella osiin (kuvio 1). Yksittäinen vaihe tulee saada päätökseen ennen kuin seuraavaan siirtyminen on mahdollista, jotta saadaan tehtävnmäärityksen mukainen ohjekirja laadittua. Koko projektin jaottelu muutamiin isompiin osa-alueisiin selkeyttää tehtävien jaottelua, aikataulun laadintaa ja auttaa ohjaamaan työtä eteenpäin.



KUVIO 1. Projektin osa-alueet ja etenemisjärjestys

Työ alkoi juoksupyörän toiminnan tarkastelulla ja suunnittelun perusteiden tutkimisella, mihin kuului rakenteen mekaanisten ominaisuuksien, käytettyjen materiaalien, vaadittavien suunnitelmien ja tarkastusdokumenttien sekä mitoituksen lähtökohtien tarkastelua. Tämän jälkeen alettiin kartoittaa ohjekirjaan sisällytettäviä piirustuksia, tarkastaa niiden merkintöjä ja selvittää niihin sovellettavia yrityksen laatuohjeita. Piirustuksien laadinnan työkaluna toimi NX 3D-suunnitteluohjelmisto ja mallien suunnittelutiedonhallinnassa käytettiin Teamcenter-hallintajärjestelmää.

Ideana oli, että mallipiirustusten valmistuessa rakennetaan ohjekirjaa ja kehitetään sen loogisuutta ja helppokäyttöisyyttä ja lisätään sinne tarvittavaa informaatiota sisällytettävistä dokumenteista, esimerkiksi laatuohjeista, hitsaussuunnitelmista ja vaadittavista materiaalitarkastuksista. Alustavia tietoja ohjekirjaan sisällytettävistä tiedoista laadittiin erilliseen Microsoft Word –dokumenttiin ja karkean rakenteen muodostuttua laadittiin mallipohja ohjekirjalle vastaavaan dokumenttiin. Tietojen täydentyessä ja tarkentuessa laadittiin ohjekirjalle pohja ja sen rakennetta kehitettiin sisällytettävien tietojen ohjaamaan suuntaan.

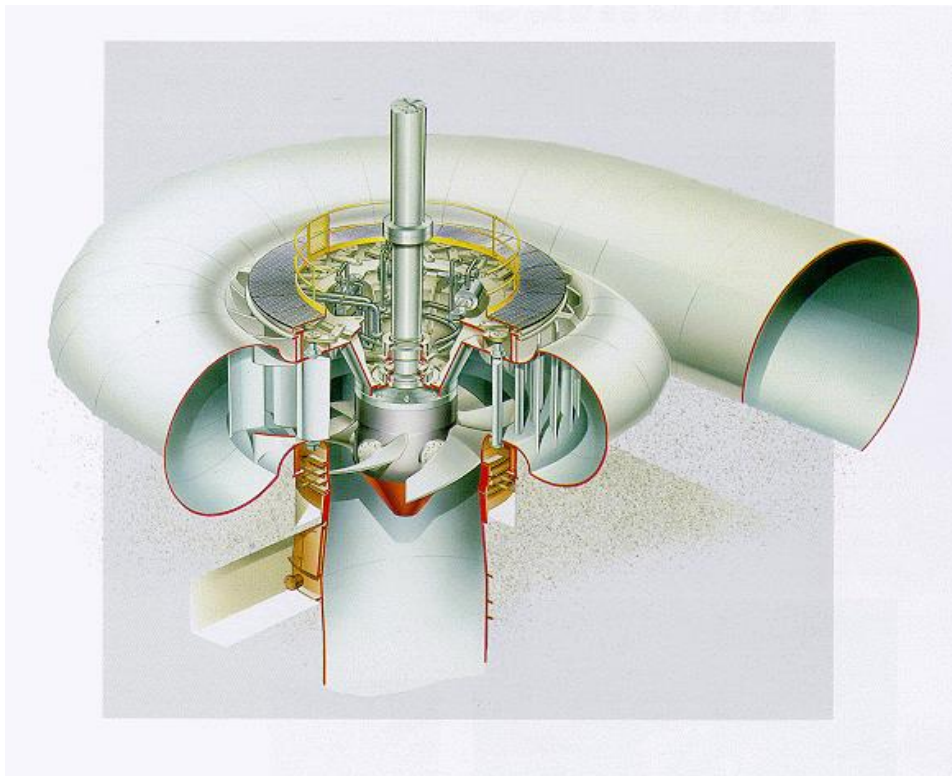
Projektissa käytetään apuna valmiiden projektien juoksupyörien osien malleja ja piirustuksia. Niihin tehdään muutoksia muun muassa toleranssien, käytettävien materiaalien, materiaalitodistuksien, pinnankarheuksien, osien työnumeroinnin, mitoituksen lähtökohtien ja tarvittavien liitedokumenttien merkintöjen tarkastamisella ja päivittämisellä. Kun kyseessä ei ole kokonaan uusien mallien laadinta, opinnäytetyössä käsitellään varsinaisten osien suunnittelun toteuttamista suppeammin. Pääpaino on piirustusten rakenteen toteuttamisella tehtävänannossa määriteltyyn suuntaan ja niiden laadintaan liittyvien suunnitteluperusteiden määrittämisellä sekä selkeällä esittämisellä suunniteltavaan ohjekirjaan.

Projektin alussa sovittiin että ohjekirjan rakentuessa kohti lopullista muotoa laajennetaan projektin kohdealuetta juoksupyöristä aikataulun puitteissa myös öljynjakopesään, turbiiniakseliin ja päälaakeriin. Tehtävien kuitenkin ollessa vaikeasti määritettävissä vaikeusasteellisesti ja aikataulullisesti, päätettiin että opinnäytetyössä keskityttäisiin vain juoksupyörään.

3 VESITURBIININ JUOKSUPYÖRÄ

Suunnittelumanuaalin kehittämistyön ehdottomana edellytyksenä oli juoksupyörän rakenteen ja toiminnan tunteminen. Ohjekirjan suunnittelijan tulee tietää komponenttien toiminnan ja valmistuksen kannalta keskeiset mitoitusperusteet piirustuksissa. Suunnittelijan tulee ymmärtää miten osat valmistetaan kokoonpanoa varten, miten juoksupyörä toimii, mitkä ovat keskeisiä asioita huomioida suunnittelutyössä ja kehittämistyön kannalta myös se, missä osin tehdään virheitä suunnittelussa. Vasta kun ne ovat tiedossa, on puitteet rakentaa kustannustehokkuutta lisäävä ja suunnittelutyötä selkeyttävä sekä nopeuttava ohjekirja.

Tässä työssä käsitellään vain pystymallista Kaplan-turbiinin juoksupyörää (kuva 1). Käytännössä Kaplan-turbiinit ovat malliltaan potkurimaisia ja sisältävät 3-7 siipeä. Tarkemman määrittelyn mukaisesti tätä nimitystä käytetään pystykoneista, joissa on säädettävä radiaalinen johtopyörä ja käynnin aikana säädettävä juoksupyörä (Vesivoimalaitokset 1978, 87) Kyseessä on reaktioturbiini, missä vain osa veden energiasta muutetaan johtopyörässä liike-energiaksi, jolloin juoksupyörään kohdistuu paine-ero.

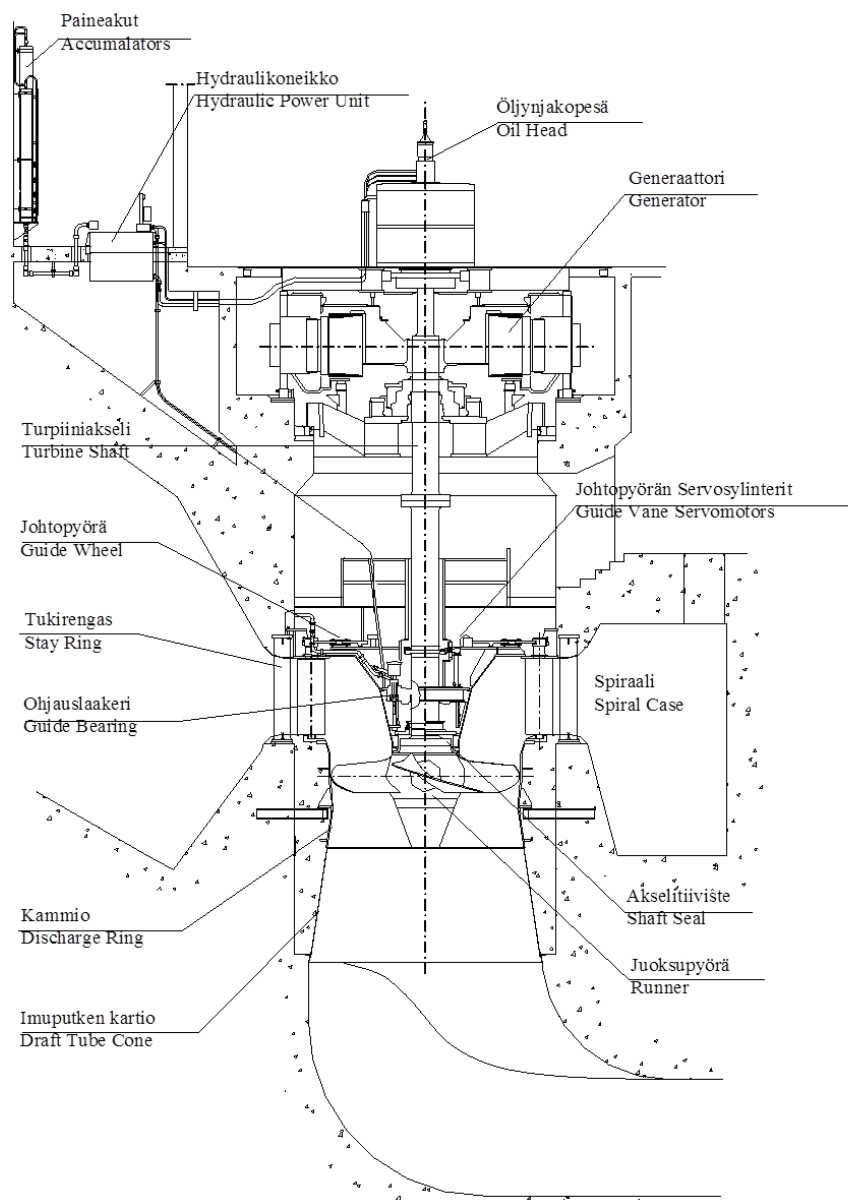


KUVA 1. Pienen kokoluokan Kaplan-turbiini (Nilsson & Davidson, 2005)

Kaplan-turbiini on yleisin ja tärkein turbiinityyppi Suomessa sen soveltuvuuden takia matalille ja vaihteleville putouskorkeuksille. Putouskorkeusalue on laaja ja vaihtelee 2 metristä jopa 70 metriin (Haapakoski 2011, 22). Virtaus voi olla suurimmillaan jopa $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.1 Rakenne

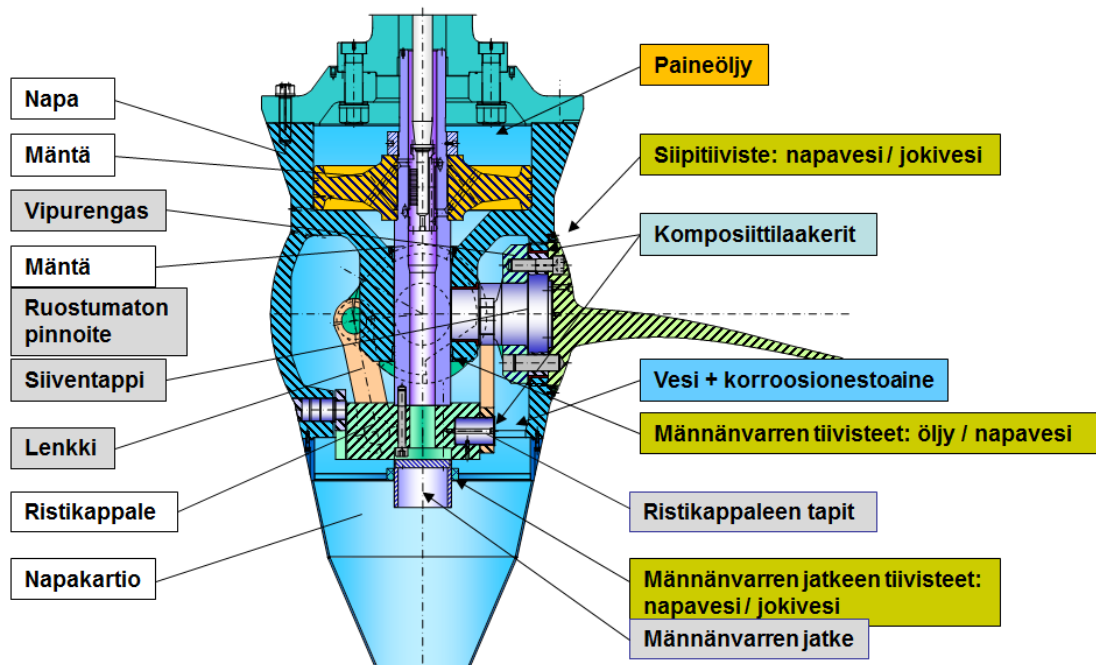
Juoksupyörä on vesivoimalaitoksen tärkeimpiä osakokonaisuuksia (kuva 2). Sen avulla veden liike- ja potentiaalienergia saadaan välitettyä pääakselin vääntömomentiksi ja siten generaattorin välityksellä energiaksi sähköverkkoon.



KUVA 2. Koneaseman poikkileikkaus

Juoksupyörä sisältää paljon erilaisia teräksistä valmistettuja komponentteja, laakereita, tiivisteitä ja hydraulisen säätöjärjestelmän. Se on teknisestä näkökulmasta vesivoimalaitoksen haastavin komponentti rakenteen valmistamisen kannalta. Tässä työssä tullaan käsittelemään juoksupyörän rakennetta vain yleisellä tasolla luottamuksellisista syistä.

Juoksupyörä voidaan jakaa muutamaiin rakenteellisiin kokonaisuuksiin. Niihin kuuluvat juoksupyörän napa, napaan kiinnitetyt siivet, siipiä toiminnan aikana kääntävä servojärjestelmä ja napakartio (kuva 3). Rakenne koostuu lukuisista erilaisista valetuista, taotuista, koneistetuista tai hitsatuista osista, ruuveista ja tiivisteistä juoksupyörän valmistamisen, kokoonpanon ja toiminnan mahdollistamiseksi.



KUVA 3. Juoksupyörän rakenne

Turbiiniakseli on kiinnitetty yläpäästään generaattoriin ja alapäästään juoksupyörään. Sen tehtävänä on kannatella juoksupyörää ja välittää momenttia juoksupyörältä generaattorille. Akseli toimii vastinpintana päälaakereille ja sen läpi kulkee juoksupyörän servojärjestelmään kuuluvan öljynjakopesän karaputket. Tässä työssä ei tarkemmin käsitellä turbiiniakselia tehtävänannon määrittelyn rajoituksessa juoksupyörän käsittelyyn.

Juoksupyörän napa toimii kiinnitysalustana turbiiniakselille, siiville ja navan sisälle rakennetulle servojärjestelmälle (kuva 4). Valmistusmenetelmänä käytetään valamista monimutkaisen muodon takia ja navan pintoja koneistetaan valun jälkeen laakeripintojen ja pieniä toleransseja sisältävien kiinnityspintojen vuoksi. Napa liittää juoksupyörän rakenteen eri osa-alueet yhdeksi toimivaksi kokonaisuudeksi ja ottaa vastaan siipien kautta tulevat rasitukset. Sen alaosaan kiinnitettävä napakartio toimii osana juoksupyörän hydrodynamiikkaa.



KUVA 4. Juoksupyörän napa- ja siipimalleja (Andritz Group, 2012)

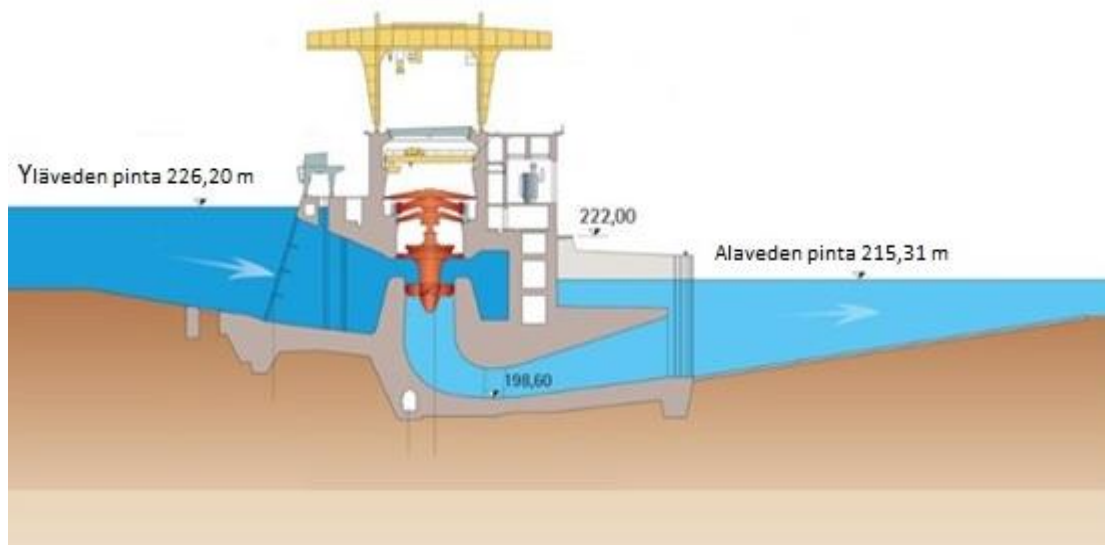
Siipien tehtävänä on hyödyntää veden liike-energiaa ja muuttaa se navan välityksellä akselin pyörimisliikkeeksi. Ne valmistetaan ruostumattomasta teräksestä ja suunnitellaan optimoimaan vääntömomentin kehitys eri virtaustilanteissa. Siipien lukumäärä vaihtelee laitokselle ominaisen putouskorkeuden, käytössä olevan vesimäärän ja vesiteiden mittojen mukaan. Siipien määrä kasvaa putouskorkeuden kasvaessa lujuus- ja kavitaatiosyistä.

Servojärjestelmän rakenne sisältää sylinterin, männän, ristikappaleen ja lenkit vipurenkaineen. Jotta vesiturbiini toimisi mahdollisimman tehokkaasti eri toimintatilanteissa, tulee sen siipien kääntyä veden virtauksen mukaan. Ajamalla männän toiselle puolelle öljyä suurella paineella, saadaan mäntä ja ristikappale liikkumaan, jolloin lenkit ja vipurenkaat kääntävät yksittäisiä siipiä. Rakenne sisältää radiaali- ja aksiaalilaakereita liikkeiden mahdollistamiseksi sekä rakenteen stabiliteetin säilyttämiseksi.

3.2 Toiminta

Vesiturbiinin toiminta on rakenteen näöllisestä yksinkertaisuudesta huolimatta monimutkaista ja tarkkaa säätöä vaativaa. Tavoitteena on kaiken veden energian hyödyntäminen sen kulkeutuessa laitoksen läpi ja siten parhaan mahdollisen hyötysuhteen tavoittelu.

Voimalaitoksen turbiinin tuottama teho riippuu vesimäärästä ja putouskorkeudesta (Haapakoski 2011, 3). Putouskorkeus tarkoittaa turbiinin ylä- ja alavedenpinnan välistä korkeuseroa (kuva 5). Turbiinin sijainti ylä- ja alavedenpintaan nähden korkeussuunnassa vaikuttaa turbiinin kavitaatioon. Hyötysuhde maksimoidaan kussakin toimintapisteessä oikealla johtosoluke- ja siipikulmayhdistelmällä, missä huomioidaan veden tilavuusvirta ja putouskorkeus.



KUVA 5. Juoksupyörän sijoitus voimalaitoksessa (Schewere für die Kaplan-Turbine 2011, muokattu)

Juoksupyörän päätehtävänä on vääntömomentin kehittäminen virtauksen avulla. Pyörimisnopeus on vakio, sillä kytkettäessä turbiini synkronigeneraattoriin tulee pyörimisnopeus sovittaa synkronisiin pyörimisnopeuksiin (Vesivoimalaitokset 1978, 70). Jotta juoksupyörä saataisiin pyörimään vakionopeudella ja parhaalla mahdollisella hyötysuhteella vesimäärän ja putouksen vaihdella, tarvitaan säätötekniikkaa.

Säätöä turbiinissa suorittavat johtopyörän johtosolukkeet, säätäen veden virtausta juoksupyörälle sekä juoksupyörän servo, joka säätää siipien kulmaa. Johtosolukkeet on suunniteltu tilavuusvirran säätämisen lisäksi myös tuomaan vesi juoksupyörälle oikeassa kulmassa parhaan momentin aiheuttamiseksi siiville. Niiden kääntymistä säädetään vipujen ja lenkkien mekanismilla, joka on kiinnitetty servosylinterillä käännettävään säätörenkaaseen.

Juoksupyörän tulee olla virtausdynamiikan kannalta mahdollisimman hyvin muotoiltu siipien ja navan sekä sen ylä- ja alakartion osalta. Siipien tulee ottaa vastaan veden virtauksen voima oikeassa kulmassa välittääkseen vääntömomentin navan ja pääakselin kautta tehokkaasti generaattorille.

Rakennetta suunnitellessa pyritään välttämään kavitaatiota eli veden höyrystymistä alhaisen paineen johdosta, mistä seuraa hyötysuhteen aleneminen ja kuplien kokooniskeytymisen aiheuttama eroosio (Vesivoimalaitokset 1978, 75). Veden virratessa turbiinin läpi se pyrkii höyrystymään juoksupyörän paine-eron vuoksi. Juoksupyörän kavitoidessa vesi alkaa kiehua äkillisesti ja höyrykuplat muodostuvat paineen alentuessa nopeasti. Kun paine kasvaa uudelleen, ilmakuplat painuvat kasaan ja aiheuttavat suuria tuhansien barien paine-iskuja siipiin, mikä syövyttää metallia kammiossa ja siivissä ja alentaa hyötysuhdetta.

Navan koolla, sen muotoilulla ja käytetyillä pinnankarheuksilla on vaikutusta siihen kuinka paljon vettä voi virrata sen ohi ja millä virtaushäviöillä, ja siten myös vaikutus vesiturbiinin hyötysuhteeseen.

Siipien tulee kestää kiinnityksineen keskipakoisvoiman aiheuttamaa momenttia ja kiinnityspisteidensä kautta voimat rasittavat myös navan rakennetta. Rasitus on suurin turbiinin rynnäessä, jolloin pyörimisnopeus saattaa moninkertaistua. Siipien laakeroinnin tulee kestää nämä voimavaikutukset ja samalla navan tulee pysyä mahdollisimman tiiviinä.

Keskeisinä asioina juoksupyörän toiminnan kannalta on siis ymmärtää Kaplan-turbiinin perustoimintaperiaate ja juoksupyörään vaikuttavia voimia, käytettyjen materiaalien tarkoituksenmukaisuutta, sovitteiden merkityksiä osien välillä sekä valmistus- ja kokoonpanoteknillisiä näkökulmia juoksupyörän rakenteessa.

Suunnittelijat saavat yleensä tietyt arvot suunnittelun rajoiksi tuotekehityksen tekemän virtauslaskennan kautta. Tärkein tieto suunnitteluosaston työn kannalta on juoksupyörään kohdistuvat kuormat. Vanhaa laitosta uudistaessa valmiiksi rakennetut vesitiet ja laitoksen mitat rajaavat suunnittelun toteuttamista määrättyyn suuntaan.

Projektin aikana juoksupyörän rakenteen toimintaan perehdyttiin yksityiskohtaisemmin erilaisten rakenneratkaisujen kautta, mutta tässä työssä ei käsitellä rakenteen toimintaa kuin yleisellä tasolla työn luottamuksellisuuden vuoksi.

4 JUOKSUPYÖRÄN SUUNNITTELU

4.1 Suunnittelussa huomioitavat asiat

Juoksupyörä on yksinkertaiselta näyttävästä rakenteestaan huolimatta monimutkainen ja haastavasti valmistettava tuote. Se sisältää paljon valmistuksen kannalta haastavia muotoja, vaativasti toteutettavaa tarkkuutta eri liitospinnoilla, hydraulikkaa, raskaita liikkuvia osia, suuren rasituksen alueita, erilaisia teräslaatuja, ruuviliitoksia, tiivisteitä ja laakereita.

Laitoksien huoltovälit pitkäaikaishuolloissa ovat usein vuosien mittaisia ja tänä aikana pyritään välttämään ylimääräisiä purkutöitä. Suunnittelutyö on haastavaa ja keskeistä on tarkastella vaihtoehtoisia ratkaisuja huolellisesti ja niiden toimivuutta pitkällä aikavälillä. Rakennerratkaisuille varmistetaan riittävä kestävyys väsymistä vastaan staattisilta ja dynaamisilta kuormilta.

Keskeisessä osassa suunnittelussa on juoksupyörän muodon kautta tulevan hyötysuhteen maksimointi virtausten kannalta. Tuotekehitysosastolla saadaan selville halutun mallinen muoto navalle ja siiville ja tämän tavoitteen suunnitteluosaston tulee toteuttaa. Nykyaikaisen juoksupyörän siipien geometria on monimutkainen (kuva 6).



KUVA 6. Merikosken voimalaitoksen uuden juoksupyörän asennus (Sarviaho, 2008)

Sopivaa rakennetta suunniteltaessa tarkastellaan tavoitellun toiminnan lisäksi sen valmistettavuutta ja onko rakenne kokoonpanon kannalta järkevä toteuttaa. Valmistusmateriaalit tulee olla lujuustarkastelun ohella soveltuvia tarvittavien valmistustekniikoiden ja liitosmenetelmien käyttöön ja mahdolliseen pintakäsittelyyn.

Yleensä saman tehtävän ajava rakenne on eri tavoin toteutettavissa valmistuksen ja kokoonpanon kannalta. Suunnitteluvaiheessa päätetään, mikä on soveltuvin vaihtoehto rakenteelle kustannuksia tarkastelemalla. Usein rakennetyyppi on sidoksissa tiettyyn kokoluokkaan. Tämä johtuu osan kohdalla saatavilla olevista materiaali- ja osien materiaali- ja valmistuskustannuksista. Selkeää rajaa ei voi silti vetää valmistuksen toteuttamistavalle, sillä saatavilla olevat materiaali-aihiot määrätyn aikataulun puitteissa vaihtelevat kuten myös niiden kustannukset taloustilanteen mukaan.

Laskennan toteuttamisessa käytetään apuna nykyaikaisia tietokonelaskentamenetelmiä. Siipien muodon virtauslaskentaa toteutetaan CFD-laskennalla ja osien materiaalien lujuuksia varten apuna käytetään FEM-laskentaa. Niiden avulla on mahdollista arvioida suunnitellun rakenteen soveltuvuutta sen virtausominaisuuksilta ja siihen arvioituihin mekaanisiin rasituksiin nähden jo suunnitteluvaiheessa. Osa laskennasta toteutetaan osittain käsin käyttämällä valmiita laskentapohjia ja yleisimpien ruuviliitosten laskentaa toteuttavat suunnittelijat laskennan peruskaavojen mukaisesti.

Suunnittelutyössä kulkee projektien mukana alalla sovellettavat yleiset kansalliset tai kansainväliset standardit. Niihin kuuluu Suomen kansallinen SFS, eurooppalainen EN, kansainvälinen ISO, saksalainen DIN ja amerikkalaiset ASTM, ASME ja SAE -standardit. Lisäksi IEC eli kansainvälinen sähköalan standardisointiorganisaatio on määrittänyt vesivoima-alaa koskevia standardeja. Standardeilla lisätään tuotteiden yhteensopivuutta ja turvallisuutta, suojellaan kuluttajaa ja ympäristöä sekä helpotetaan kaupankäyntiä (Suomen Standardisointiliitto SFS Ry.). Juoksupyörän kohdalla standardit rajaavat ja täsmentävät materiaalien ominaisuuksia, niille toteutettavia hitsaustöiden järjestelyitä, lämpökäsittelyprosesseja ja tarkastusvaatimuksia.

Yleisten standardien lisäksi on ollut tarpeellista ottaa käyttöön konsernin sisäisiä laatustandardeja, jotka tuovat tarkennuksia yrityksen toimintakäytäntöihin yleisten standardien pariin. Näitä ovat Andritz Hydro Groupin ja Andritz Hydro Oy:n laatuohjeet.

4.1.1 Virtauslaskenta

Juoksupyörän suunnitteluun kuuluvaa virtauslaskentaa toteuttaa yrityksessä tuotekehitysosasto. Vanhaa voimalaitosta uusittaessa vanhat vesitiet ja laitoksen yleiset mitat antavat rajat virtauslaskennan toteuttamiselle ja siten kokonaan uuden juoksupyörän ja niiden siipien laskennalle. Tavoitellun muodon ja siihen kohdistuvien arvioitujen rasitusten mukaan suunnittelupuolella työn lähtökohtana on halutun rakenteen toteuttaminen.

Projektissa ei käsitelty virtauslaskelmia, sillä käytettiin valmiiden projektien juoksupyörämalleja eri kokoluokissa ja se ei ollut tehtävänannon mukaisesti oleellista ohjeiden laadinnassa.

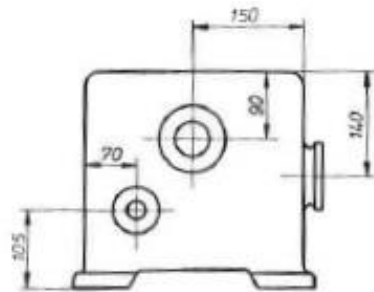
4.1.2 Mitoitus

Mitoitus muodostaa koneenpiirustusopissa sen vaativimman osan ja on siten keskeinen osa piirustusta. Se määrittää lähtökohdat kappaleen tarkastelulle, kuten miten kappale halutaan valmistaa, mitkä ovat sen toiminnan kannalta keskeisiä asioita ja miten kappaleen valmistuksen onnistuminen tulee tarkastaa. (Pere 2012, 7-1).

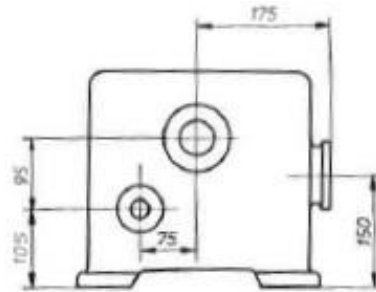
Mitoitus on terminä laaja ja siihen kuuluu monia osa-alueita, joten tarkastellaan yleistä juoksupyörän komponentteihin sovellettavaa teoriaa konealalla käytettävien kappaleiden avulla (kuva 7). Kuvassa esitetyistä osakuvista ilmenee kuinka mitoitus kertoo siitä mikä on oleellista kappaleessa.

Ylemmässä kappaleessa painotetaan oletetun asennusalustan olevan peruste mitoittamiselle ja siitä mitoitetaan muiden piirteiden sijainnit. Oikein tehdyssä kuvassa on selkeästi kappaleen pohja ja reikien sijainnit toisiinsa ja alustaan nähden lähtökohtina. Mitoituksessa on painotettu alemman reiän sijaintia alustaan nähden sekä ylemmän reiän kohdalla sen sijaintia päädyn reikään nähden. Väärin tehdyssä kuvassa reikien sijainnit on mitoitettu toisiinsa ja alustaan nähden irrallisesti, mikä tekee kuvasta epäselvän.

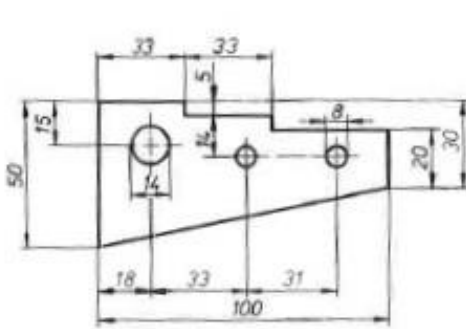
Alemmassa kappaleessa näytetään esimerkein kuinka mitoitus voidaan sitoa valmistustapaan lähtökohtien erilaisella asettamisella. Valmistustavan ja kappaleelle suunnitellun toimintaperusteen mukaan mitoitus laaditaan tilanteen mukaan tarkoituksenmukaisella tavalla.



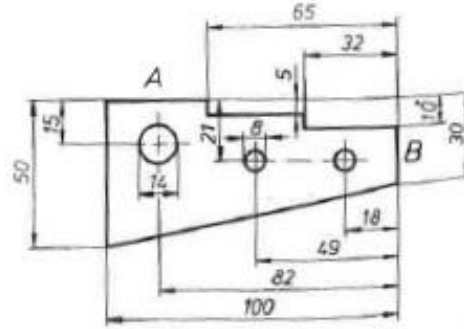
Kuva 7.88 Mitoituslähtökohdat valittu väärin



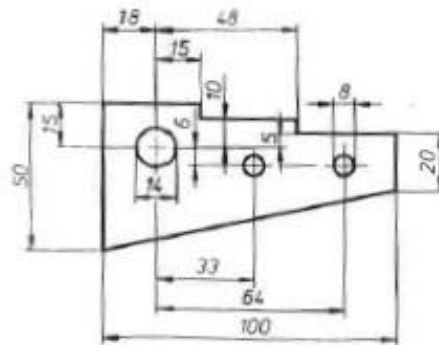
Kuva 7.89 Mitoituslähtökohdat valittu oikein



Kuva 7.90 Mitoitus ilman erityisiä mitoituslähtökohtia



Kuva 7.91 Pinnat A ja B mitoituksen lähtökohdat



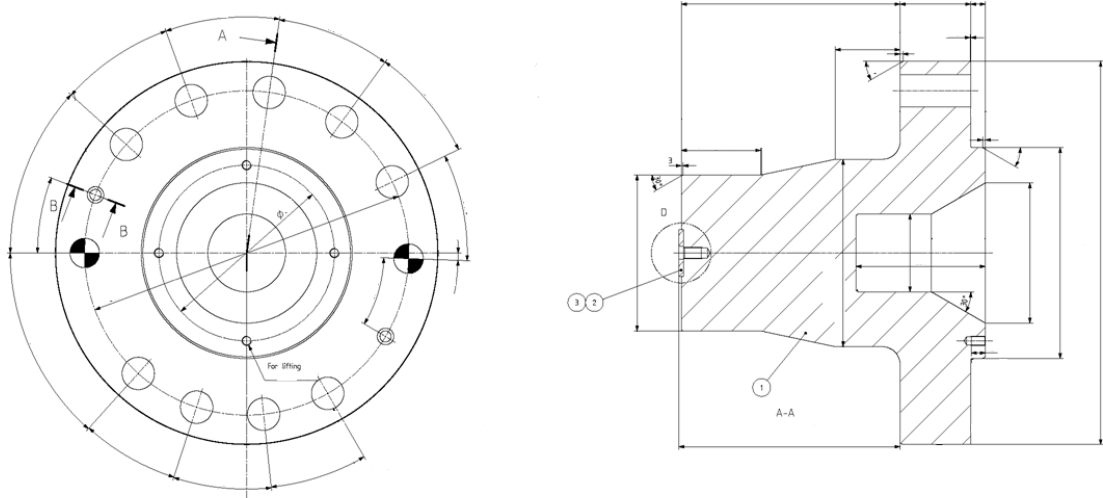
Kuva 7.92 Reiän 14 keskipiste mitoituksen lähtökohdana

KUVA 7. Esimerkki mitoituslähtökohdista (Pere 2012, 7-19)

Esimerkkien mitoitus havainnollistaa mitoittamisen lähtökohtien asettamista, mitä sovelletaan myös juoksupyörän rakenteen sisältämiin osiin. Mitoituksen tulee tuoda esille oleelliset asiat kappaleesta, kuten mitkä mitat ovat toiminnan tai valmistuksen kannalta tärkeimpiä. Esimerkiksi työstökoneella valmistettavaan ristikappaleeseen voidaan valita jokin koordinaattipiste kiinnityspisteen avulla, mistä mitoitetaan kappaleen muut muodot.

Oleellista on ymmärtää keskeiset piirteet kappaleessa, mitä voidaan käyttää mitoittamisessa lähtökohtina ja mistä muut kappaleen piirteet mitoitetaan. Esimerkkinä tällaisesta piirteestä on kappaleen keskireikä tai selkeä pinta mille on asetettu toiminnallisia vaatimuksia. Näin piirustus palvelee suoraan valmistuksessa toimivan henkilön tarpeita ilman ylimääräisten laskujen tekemistä.

Otetaan esimerkiksi tarkasteluun, yksi juoksupyörän osa, siiventappi. Siiventappi kiinnittää siiven juoksupyörän napaan. Esimerkkipiirustuksesta on poistettu oikeat mitat ja mittaviivat ovat havainnollistamassa mittauspisteitä ja -pintoja (kuva 8). Mitoituksesta on nähtävissä että oleellisia mittoja ovat leikkausprojektion mukaan muun muassa siiventapin laipan pituus ja etäisyys navan keskiön puoleisesta siiventapin päädyistä laipalle. Tämän selittää osan toiminta, sillä laipan pituus vaikuttaa sovitteisiin siiven ja vipurenkaan välillä sekä etäisyys siiventapin päädyistä laipalle on tärkeä välyksien pitämiseksi suunnitelluissa rajoissa turbiinin käynnin aikana.



KUVA 8. Siiventapin mitoitus

Siiventapin päädyistä otetussa projektiossa on mitoituksen lähtökohdaksi otettu toinen leikkaustapin reikä, mistä on mitoitettu muut vapaareiät. Selkeä lähtökohta auttaa ymmärtämään mitoituksen objektiivisesti ja kerryttää mahdolliset valmistuksen epätarkkuudet haluttuihin paikkoihin.

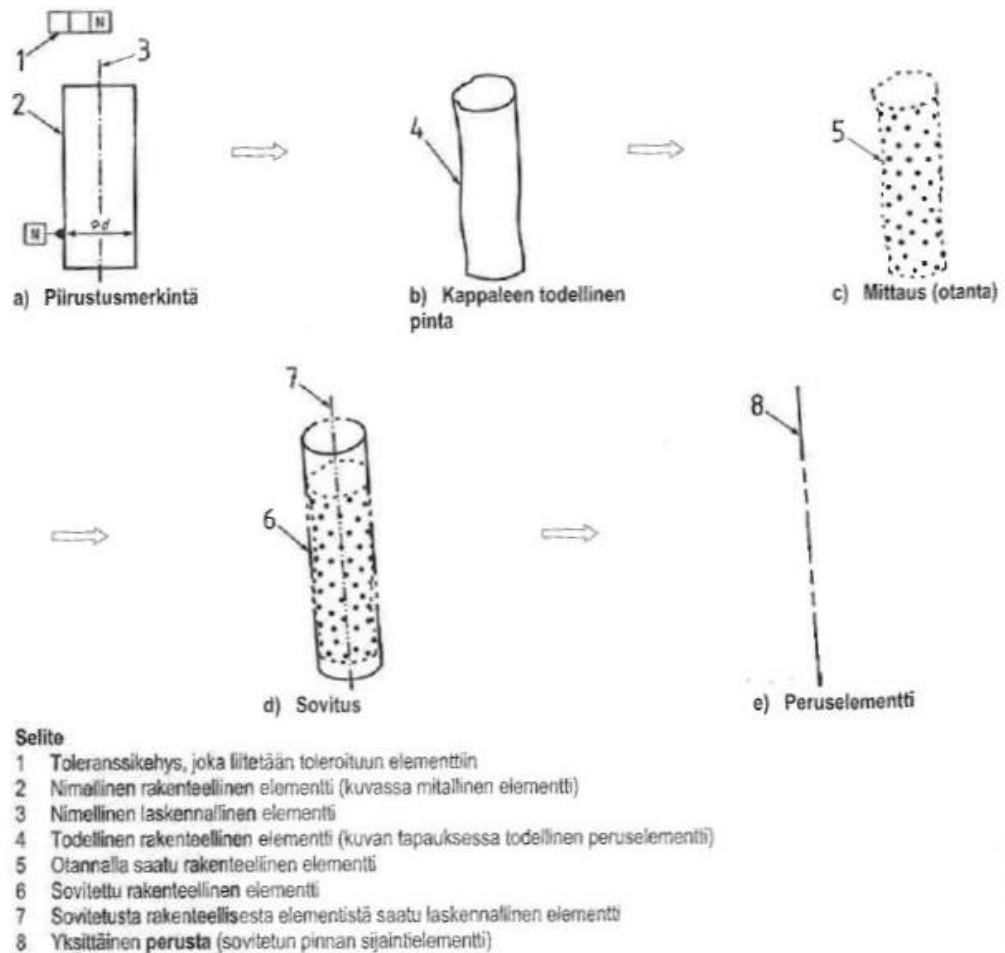
Valmistuksen jälkeen toleroidut mitat tarkastetaan mittatarkastuksessa. Mitoitus tulee olla laadittu siten, että mittojen varmentaminen on käytössä olevilla laitteilla mahdollista. Epätarkoista pinnoista, kuten kaarevien pintojen lakipisteistä mitoittamista tulee välttää epätarkkuuksien välttämiseksi. Kustannussyistä mittauksen suorittaminen pyritään pitämään silti mahdollisimman yksinkertaisena laadun varmistamisen rajoissa.

4.1.3 Sovitteet ja toleranssit

Juoksupyöristä puhuttaessa usein kyse on laitteista, jotka pyörivät 100–150 kierrosta minuutissa, ovat halkaisijaltaan 6–7 metriä leveitä, painavat jopa yli 60 tonnia ja siipien ja kammion vällys on vain muutamien millien luokkaa. Tällöin on ymmärrettävää, että valmistuksessa on kyse erittäin pienistä toleransseista monien osien kohdalla. Yksittäisten osien suunnittelun kohdalla on tärkeää ymmärtää kokoonpanossa osien toleranssien summautuminen ja maksimirajamitat kokoonpanon tärkeillä päämitoilla.

Osien perusmitta- ja toleranssimerkintöjen lisäksi juoksupyörän osissa käytetään GPS-järjestelmään kuuluvia muoto- ja sijaintitoleransseja. Niitä käytetään tuotteiden geometrinen vaatimusten ilmaisemiseen teknisissä piirustuksissa (Pere 2012, 20-2). Tarkoituksena on ilmaista tarkemmin kappaleen muotoa tai siihen tehtävien reikien sijaintia mitoittamisen lähtöpisteeseen nähden. Muototoleranssit ovat oleellisia varsinkin pyörähdysymmetrisissä osissa, joilla on sen suhteen toiminnallisia vaatimuksia esimerkiksi laakerit, mäntä ja turbiiniakseli. Pelkkä mittatoleranssi ei takaa tarkasteltavalta osalta vaadittavaa muotoa ja käyttämällä muototoleransseja apuna saadaan kappaleen muotoa määriteltyä selkeämmin teoreettisella muodolla ja samalla tarkennettua siihen kohdistettavia mittojen tarkastusta.

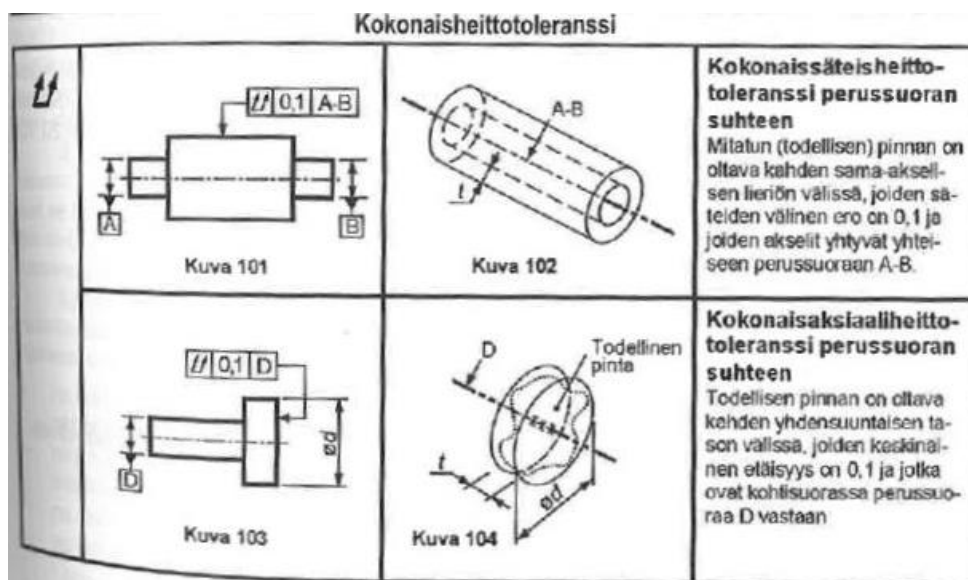
Geometrisen toleranssin määrittäminen perustuu teoreettisesti täydelliseen muotoon, johon valmistettava muoto verrataan ja toleranssilla päätetään, kuinka paljon oikea muoto saa teoreettisesti muodosta poiketa. Esimerkiksi lieriön tapauksessa pelkän lieriön pituudelle ja halkaisijalle asetettavat toleranssit eivät takaa lieriön pinnan suoruutta. Vertaamalla todellista lieriöpintaa teoreettiseen muotoon kertoo paljon enemmän muodon valmistuksen onnistumisesta (kuva 9).



KUVA 9. Geometrisen elementin määräytyminen (Pere 2012, 20-44)

Muototoleranssien käyttö projektissa painottui pitkälti heittotoleransseihin. Juoksupyörä sisältää paljon pyörähdyssymmetrisiä osia, jolloin yksinkertaisin tapa mitata muotoja on heittotoleranssi ja mittakellon käyttäminen mittauksissa. Käsitellään seuraavaksi kokonaisheittotoleranssin käsitettä esimerkin avulla (kuva 10).

Esimerkin ylemmässä kuvassa on pyörähdyssymmetrinen kappale, jolle on luultavasti asetettu valmistuksessa paksuimman osuuden lieriön kohdalle toleroitu mitta. Tätä osan muotoa selkeyttämään on asetettu kokonaisheiton muototoleranssi ja arvojen suuruuden määrittelyllä voidaan painottaa lieriön pyöreyttä. Asettamalla halkaisijan toleranssialue suuremmaksi kuin kokonaisheiton painotetaan että halkaisijan suuruus ei tarvitse olla niin tarkka, mutta lieriön tulee olla riittävän pyöreä muodoltaan.



KUVA 10. Kokonaisheitto- ja aksiaalihiliteeranssin määrittäminen (Pere 2012, 20-97)

4.1.4 Osien työnumerointi

Työnumeroinnin laatimisen yhteydessä käytetty termi on PBS eli Product Breakdown Structure. Kyse on siitä, miten valmis tuote jaetaan erilaisiin osiin. Juoksupyörän kohdalla kyse on käytännössä erilaisten kokoonpanojen laatimisesta ja siitä miten juoksupyörän asennus on toteutettava. Hyvin mietitty jako selkeyttää projektinhallintaa, kustannusseurantaa ja aikataulun laadintaa, kun on tiedossa kaikki valmistettavat komponentit ja niiden suhteet muihin komponentteihin toiminnan kannalta.

Osakokoonpanoissa osat tulee numeroida siten, että ne muodostavat loogisen järjestyksen, kuten vaikka osien tärkeys- tai asennusjärjestyksen. Esimerkiksi liitoksiin kuuluvat liimat ja ruuvit numeroidaan peräkkäin ja siten yhdistetään oikeisiin liitoksiin. Sama osa merkitään vain kerran johonkin muuhun piirustukseen, joten osa voi olla kokoonpanokuvassa vain kerran. Huomiota tulee kiinnittää osien oikeaan lukumäärään.

Osaluetteloon merkityistä osista tulee helposti saada selville millainen aihio on kyseessä, mitä materiaalia käytetään ja kuinka paljon sekä montako vastaavaa osaa tarvitaan. Massojen ilmoittaminen osaluettelossa on suotavaa asennustyötä varten ja silloin tarvittavat nostovälineet voidaan miettiä helpommin etukäteen kun tiedetään kuinka painavia osia käsitellään.

Vanhoja osia käytettäessä vanha komponentti tulee tulla ilmi luettelossa, jotta välttyttäisiin turhilta väärinkäsityksiltä. Huomiomerkinnöillä yksittäisissä osissa esitetään mahdolliset varaosat käsitelleyille osille tai vaihtoehtoiset valmistusmateriaalit. Standardiosia käytettäessä osaluetteloon merkitään standardi, jolloin erillisiä kuvia ei käsiteltävistä osista tarvita.

4.1.5 Materiaalit

Käytetyt materiaalit ovat laakereita ja muutamia tiivistepesiä lukuun ottamatta lähes poikkeuksetta terästä. Erilaisten seosaineiden ja valmistusprosessien vuoksi osilla on erilaiset ominaisuudet teräksen kovuuden, lujuuden, työstettävyyden ja pintakäsittelyn mahdollisuuksien suhteen. Suunnitteluun kuuluu materiaalien valinta komponentteihin tarkoituksenmukaisesti. Niiden aineominaisuudet tulee olla sopivat käyttökohteeseen sekä osat tulee olla hyvin valmistettavissa ja kokoonpantavissa suunnitellulla tavalla. Jälkikäsittelyn ollessa tarpeellinen on tärkeää ottaa huomioon materiaalin lastuttavuus ja mahdollisen lämpökäsittelyn suorittaminen teräksissä lopullisten lujuusarvojen aikaansaamiseksi.

Juoksupyörän rakenteessa on siirrytty öljytäytteisistä navoista vesitäytteisiin. Vesitäytteisellä navalla on poistettu öljyvuodon riski saastuttaa ympäristöä ja tämä on noussut tärkeäksi perusteeksi vanhojen juoksupyörien päivittämiselle (Taivalkoski 2014, 21). Vesitäytteisestä navasta on tullut standardirakenne pohjoismaissa. Tämä on asettanut uusia vaatimuksia juoksupyörän komponenteille veden korroosiovaikutuksen vuoksi siitä huolimatta, että napavedessä on korroosionestoaineita. Rakenteessa on siirrytty monien osien kohdalla ruostumattomaan teräkseen käyttömahdollisuuksien mukaan kustannukset huomioiden, mutta joidenkin osien kohdalla on kannattavampaa käyttää seostamatonta rakenneterästä ja sopivaa pintakäsittelyä osan suojaamiseksi ruostumiselta.

Navat ja siivet valmistetaan valamalla rakenteen monimutkaisuuden vuoksi, mutta materiaalivalinnassa tulee huomioida työstettävyysominaisuudet jälkikoneistuksen vuoksi. Lopulliset mitat pinnoille ja pinnankarheusarvot saavutetaan valun jälkeisellä koneistuksella ja teräksen tulee olla tällöin olla riittävän hyvin lastuttavaa.

Laakerivälkykset ovat pieniä ja toleranssiin pyrittäessä on helpompaa koneistaa laakerien pinnat vasta asennuksen jälkeen. Siipeen aiheutuvat rasiukset välittyvät suoraan laakereihin ja aiheuttavat laakereihin epätasaista kuormaa. Materiaaliominaisuudet tulee olla riittävät ja laakeri mitoitettu oikein, jotta laakeri kestää siihen kohdistuvat kuormat. Liian suurien ainepaksuuksien kohdalla laakerimateriaalin kokoonpainuminen saattaa aiheuttaa liian suuria välyksiä rakenteeseen.

Juoksupyörän toimintaa tarkastellessa keskeiset arvot laakereille ovat niiden kulumiskestävyys, toimintakitka ja pintapaineen kesto. Laakerien tulee kestää kulumista vuosikymmeniä. Kitka ei saa kasvaa liian suureksi pahimmissa rasiustilanteissa ja se ei saa aiheuttaa ennenäikaista kulumista laakereissa. Pintapaineen kesto on tärkeä ominaisuus juoksupyörän pitkän iän varmistamiseksi.

Terästen ja valittujen laakerimateriaalien lisäksi tarvitaan tiivisteitä varten omat materiaalit sekä jossain sovelluksissa tiivistepesät, mitkä perinteisesti valmistetaan alumiinipronssista.

4.1.6 Valmistustekniikka ja kustannukset

Yksi projektiin kuuluvista tehtävistä oli kustannuslaskennan esimerkit ja sitä kautta kustannustehokkaan näkemyksen lisääminen suunnittelussa ratkaisujen optimoimiseksi. Eri osien kohdilla osia verrattaessa huomataan, että usein vastaavan kaltaisilla kappaleilla saattaa olla suuri hintaero. Kappaleesta riippuen kyseessä voi olla moninkertainen ero kustannuksissa. Tähän on monia eri syitä kuten valmistustapa, aihio ja valmistettavan kappaleen muoto. Käsitellään seuraavaksi tekijät mitkä muodostavat kappaleen valmistuskustannukset.

Ensimmäiseksi valmistustavalla on merkitys. Työvaiheet vaihtelevat paljon riippuen siitä valmistetaanko kappale sorvaamalla, työstökeskuksessa koneistamalla, erillisistä osista hitsaamalla vai rakentamalla valumalli ja sitten valamalla. Eri valmistusprosessit vaativat lisäksi erilaisia materiaalivaatimuksia, tarkastustodistuksia ja mahdollisesti suunnitelmia hitsauksesta ja niiden pöytäkirjat.

Toiseksi tuotantoajankohta vaikuttaa kustannuksiin, kun osat on voitu valmistaa eri ajankohtina siten, että kohdeosa on voinut olla ensimmäinen laatuaan kyseisellä valmistajalla. Hinta yleensä nousee uusien vastaavien kappaleiden tullessa tarjouskyselyyn, kun valmistaja tekee vertailua aiempiin tuotoksiin. Hinta usein nousee, kun valmistaja on huomannut että edellisen vastaavan osan kustannusten arviointi ei ole osunut kohdalleen ja osa on myyty liian edullisesti.

Kolmanneksi valitulla aihioilla on merkitystä. Aihio voi olla erilainen mitä piirustukseen on alun perin merkitty. Joskus aihio voi olla esimerkiksi työstön kannalta liian suuri ja tulee tarpeetonta materiaalihukkaa, mutta se voi olla rajallisen projektiaikataulun puitteissa ainoa saatavilla oleva vaihtoehto.

Valmistettavan osan monimutkaisuus nostaa kustannuksia, sillä esimerkiksi ylimääräisten reikien valmistaminen akselin laippoihin vaikuttaa lopulliseen hintaan enemmän kuin aihiovalinnoista johtuvat kustannukset. Työstämistä on enemmän, aikaa kuluu enemmän ja kustannukset nousevat.

Osien tilauksiin myös yleensä lisätään erilaisia merkintöjä tehtävistä tarkastuksista ja niiden suorittajasta. Jos esimerkiksi pelkän ultraäänitarkastuksen ja toleroitujen mittojen tarkastamisen lisäksi tehdään pinnanlaadun tarkastus ja 3D-mittaus, nousee hinta merkittävästi, riippuen vielä valmistajan päätöksestä ulkoistaa työ muualle.

Lopuksi koko prosessissa tulee huomioida suunnittelun tuomat kustannukset. Itse suunnittelutyö ja siihen käytettävä aika tuo omat kulunsa, mutta epätäydellisistä piirustuksista aiheutuvat kulut ilmenevät esimerkiksi virheellisten kappaleiden valmistus- ja toimituskustannuksina. Tarpeettoman tiukat toleranssit nostavat valmistuskustannuksia samoin kuin tarpeettoman hyvät materiaalivalinnat.

Tarkoituksenmukaisilla piirustuksilla ja hyvin laadituilla toleransseilla saadaan kustannussäästöjä aikaiseksi, rajaamalla tarkkuusvalmistaminen tiettyihin kohtiin kappaletta ja tiukentamalla toleransseja vain paikoissa missä se on tarpeellista.

4.1.7 Laskelmat

Useimpien laskelmien pohjana juoksupyörässä on siihen mallikoetulosten perusteella kohdistuvat kuormitusmittaukset, mukaan lukien siipeen kohdistuvat momentit, voimat ja värähtelytaajuudet eri osille. Lisäksi tulee laskea tarvittava servosylinterin tuottama voima siipien kääntämiseksi. Yleisimmät suunnittelussa esiintyvät laskelmat liittyvät laakerien pintapaineisiin, puristussovitteisiin ja ruuvien lujuuksiin. Tärkeimmistä sovellusalueista on laadittu pitkälti suunnittelijalle valmiit MathCad-laskentapohjat.

Siipiin kohdistuvat rasitukset aiheuttavat momenttia ja voimia napaan, mikä rasittaa navan perusrakennetta sekä laakereita. Siipien ruuvien tulee kestää momentin aiheuttamat aksiaalivoimat ruuviin ja kuormitusten ollessa erilaiset eri ruuveissa mitoitus tehdään luonnollisesti suurimpien kuormien mukaan.

Joissain kohdin törmätään myös sellaiseen tilanteeseen, että rasitusten tarkka arviointi on vaikeasti ennakoitavissa laskennalla, jolloin käytetään apuna aiempien kokemusten tuomia tuloksia.

Suunnitteluohjekirjan laadintaprojektin ideana oli suunnittelutyön toteuttamiseen liittyvien yhtenäisten ohjeiden rakentaminen ja siksi projektissa käsiteltiin lujuuslaskelmien toteuttamista vain viittauksina yrityksen MathCad-laskentapohjiin.

4.1.8 Liitedokumentit

Laadunvarmistusta toteutetaan ennalta jo piirustusten laadinnassa. Osaan sovellettavat tarvittavat standardit tai laatuohjeet merkitään osan piirustukseen, jolloin standardin tai ohjeen sisältämä informaatio kulkeutuu piirustuksen mukana hankintaan ja valmistukseen.

Liitettäviä standardeja ja laatuohjeita ovat erilaisiin valmistustapoihin liittyvät konsernin sisäiset standardit sekä materiaalivalintoihin kohdistuvat kansainväliset yleiset standardit. Muita liitedokumentteja ovat suunnitelmat hitsauksesta ja lämpökäsittelystä, tehtävät mitta- ja materiaalitarkastukset ja ohjeet asennuksen suorittamisesta.

4.2 Suunnittelun kehittäminen

Projektin päämääränä oli koulutusmateriaalin laatimisen lisäksi optimoida tuotteiden laatua ja kustannuksia. Tätä päätettiin toteuttaa piirustuksien selkeyttämisellä ja niiden merkintöjen tarkastamisella ajanmukaisiksi. Pääosassa oli tarkentaa yrityksen sisällä yhtenäisiä suunnittelumenetelmiä.

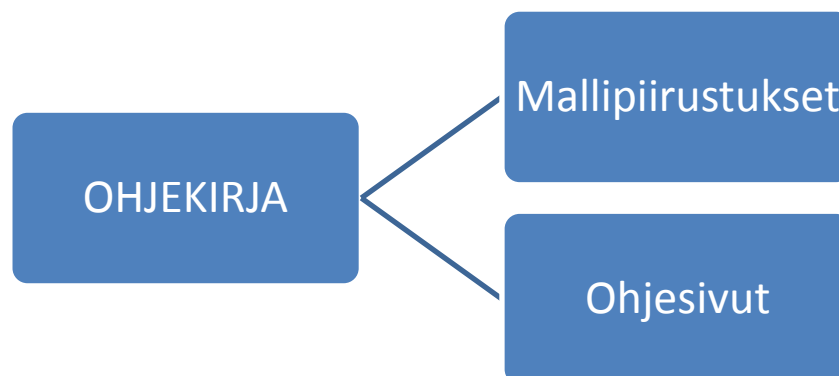
Suunnittelun yhtenäistämistä toteutettiin määrittämällä juoksupyörän osille niiden työnumerointi, mitoituksen lähtökohdat, tärkeimpien osien väliset sovitteet, pinnankarheudet, maalausohjeet, materiaalivalinnat, materiaalitodistusvaatimukset sekä tarkastusvaatimukset. Laaditun ohjeistuksen mukaan tehdyt piirustukset tuovat koko tuotantoprosessiin luotettavuutta kun valmistuksen kannalta keskeiset mitat, toleranssimerkinnät ja piirustukseen liitettävät dokumentit on yhtenäisellä tavalla esitetty. Yhtenäisten ohjeiden noudattaminen tuo yhdenmukaisuutta eri suunnittelijoiden tekemiin piirustuksiin ja vähentää virheitä suunnittelussa muistuttaessa kaikista tarvittavista piirustukseen merkittävistä asioista. Tämä takaa, että tuote on laadukkaasti ja kustannustehokkaasti valmistettavissa.

5 SUUNNITTELUMANUAALI

5.1 Visio

Työn alkuvaiheessa tuli muodostaa jonkinlainen näkemys siitä, miten tehtävänannossa kuvailtu suunnittelun ohjekirja tulisi rakentaa. Ohjekirjan tuli sisältää tehtävänannossa mainitut asiat ja perusideana oli, että se olisi malliesimerkki tyypillisempien juoksupyörän osien piirustusten laadinnasta.

Piirustukset toimisivat konkreettisina malliesimerkkeinä ja niiden liitteenä toimivat ohjesivut olisivat ohjekirjan selittävää osuutta, missä kerrottaisiin miksi piirustukset on laadittu esimerkin mukaisella tavalla. Selostuksiin kuuluvat asiat olivat syyt ratkaisuiden takana ja piirustuksen laadinnassa sovellettavien dokumenttien käyttö. Lähtökohta ohjekirjan laadinnalle oli piirustuksista ja ohjesivuista muodostettu visio (kuvio 2).



KUVIO 2. Lähtökohdan visio

Työn alkuvaiheessa visio ohjekirjasta ja erityisesti ohjesivuista oli liian avoin, joten projekti käynnistettiin juoksupyörän perustoimintaan perehtymisellä sekä siihen sovellettavien standardien, laatuohjeiden ja muiden ohjeiden tutkimisella. Ohjekirja olisi mahdoton laatia ilman perustavanlaista ymmärrystä siihen sisällytettävistä asioista.

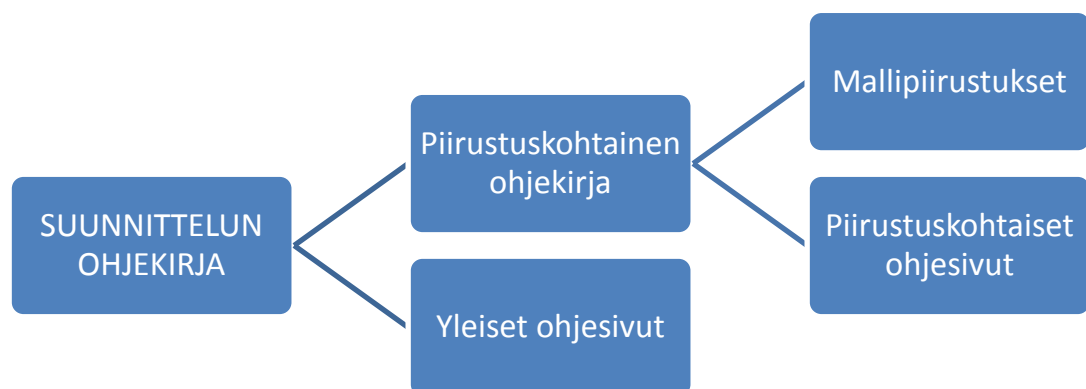
Ideana oli kuitenkin toimia yrityksessä vallitsevan tiedon koostajana, jolloin varsinaisia uusia ratkaisuja ei tarvitsisi kehittää vaan työ painottuisi tarvittavan tiedon laadukkaaseen esittämiseen ja ohjekirjan logiikan kehittämiseen.

5.2 Rakenteen kehittäminen

Työn alussa ennakko-oletuksena oli, että ohjekirjan rakennetta tulnaisiin kehittämään hyvin nopeasti jo sen rakenteen laatimisen alkuvaiheessa. Aikaisempaa kokemusta ei vastaavan ohjekirjan laatimisesta ollut ja oli odotettavissa, että rakenne muotoutuisi jatkuvasti projektin aikana. Tarvittavat tiedot lisääntyisivät ja sisältö tarkentuisi kohti lopullista muotoaan projektin edetessä.

Työn perustana oli ajatus ohjekirjasta, jossa piirustukset esitettäisiin omina sivuinaan ja niiden liitteenä käytettäisiin piirustuskohtaisia ohjesivuja. Ohjekirjan rakennetta laadittaessa tuli kuitenkin ilmi, että piirustuskohtaiset ohjesivut tulisivat sisältämään monien osien kohdalla sellaista tietoa, mikä tulisi toistumaan useampien osien kohdalla. Muun muassa pintakäsittelyn ohjeet olisivat hyvin samankaltaisia ja olisi tarpeetonta esittää samat asiat useaan kertaan.

Tuloksena päädyttiin siis laajentamaan lähtökohdan visiota ja luomaan ohjekirjaan yleisohjeiden osio (kuvio 3). Tällä pyrittiin parantamaan luettavuutta ja tiivistämään ohjekirjan rakennetta.



KUVIO 3. Kehitelty rakenne

5.3 Lopputulos

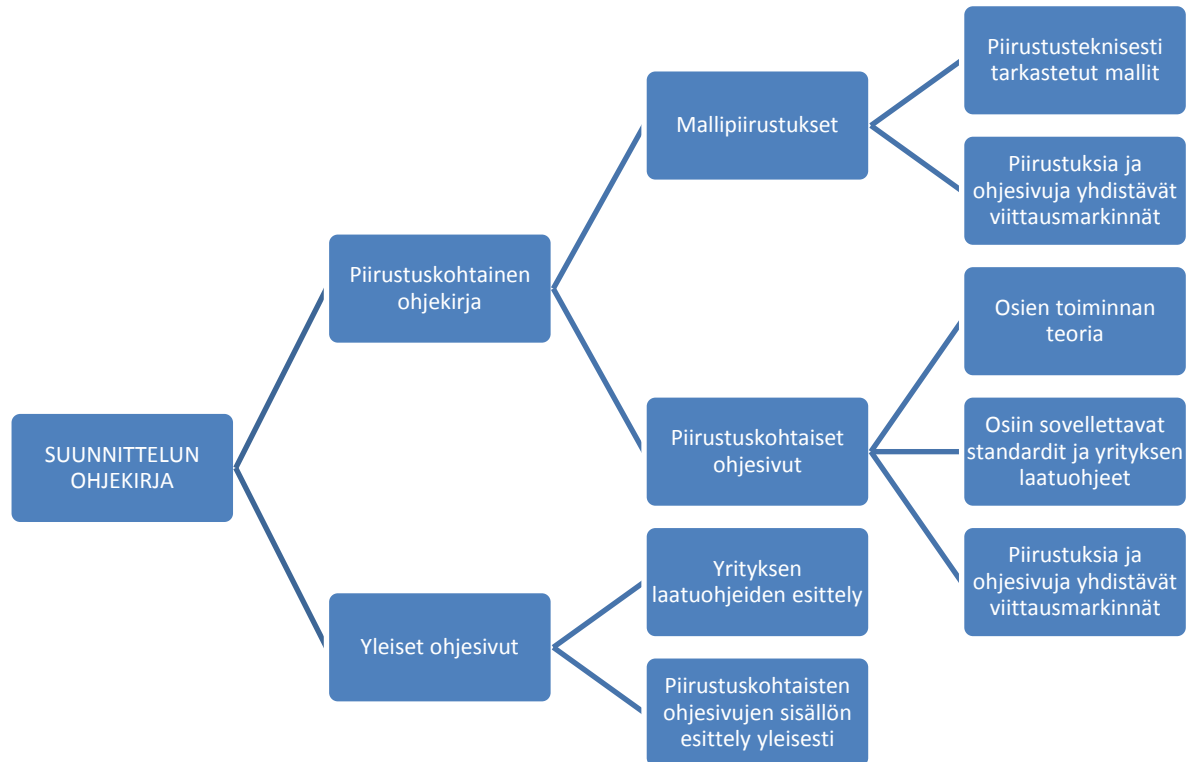
Yleisten ohjesivujen sisältöjen pääpainoa tarkennettiin koskemaan yrityksen omien laatustandardien esittelyä ja niiden käyttöä koskevaan ohjeistukseen. Lisäksi usein toistuva yleispätevä tieto osakohtaisten ohjesivujen sisällöstä päätettiin esittää yleisohjeissa. Näin saataisiin ohjekirjasta ytimekkäämpi ja helpompi käyttää.

Oma käsitys laadukkaasta ohjekirjasta vaati, että oikean asiasisällön lisäksi luettavuus olisi mahdollisimman selkeää ja siksi ohjesivujen ja mallipiirustuksien välille päätettiin kehittää omat viittausmerkinnät. Näiden avulla suunnittelija voisi katsoa mitä erityistä huomioitavaa piirustuksen osa sisältää ja niiden kohtien erikoismerkinnät viittaisivat ohjesivuihin, missä kerrottaisiin mitä kohdassa tulee huomioida ja miksi. Lisäksi osakohtaisten ohjesivujen välille luotaisiin viittauksia toisiin ohjesivuihin tarpeen mukaan. Mitä nopeammin kirjaa käyttävä suunnittelija löytää tarvittavan tiedon, sitä kustannustehokkaampaa toiminta on.

Mallipiirustuksien laadinnan päämääränä oli viittausmerkintöjen laadinnan lisäksi niiden piirustustekniikan tarkastaminen. Piirustukset tulisi olla selkeästi laadittuja, mitoitus tarkoituksenmukaista valmistusta ja asennusta varten sekä toleranssit laadun ja kustannuksien kannalta optimoituja.

Osakohtaisille ohjesivuille päätettiin lisätä osia koskevien laatuohjeiden määrittämisen ja mallipiirustuksiin viittaavien merkintöjen lisäksi osien toiminnan teoriaa tarvittaessa. Tarkoituksena oli tuoda uusille suunnittelijoille tarkempaa näkemystä siitä, miksi osissa päädytään piirustusten mukaisiin rakenne- ja valmistusratkaisuihin.

Muutoksien myötä päädyttiin ohjekirjan lopulliseen rakennemuotoon (kuvio 4). Suunnittelupäällikön avustuksella saatiin ohjekirjan lopullinen muoto varmistettua ja päästiin tarkentamaan siihen sisällytettyä tietoa. Ohjekirjasta luotaisiin myös omat ohjeet sen perusrakenteen laadinnasta, jotta se olisi myös ohjekirjan laatijan työjakson päätyttyä yrityksen työntekijöiden muokattavissa ja kehitettävissä.



KUVIO 4. Ohjekirjan lopullinen rakenne

6 POHDINTA

Ohjekirjan laadinta jäi tämän opinnäytetyön palautuksen kohdalla vielä kesken, joten keskitytään pohdinnassa opinnäytetyön palautuksen aikaisen ohjekirjan version saavuttamiin tavoitteisiin. Lisäksi arvioidaan mahdollisuuksia kehittää ohjekirja tehtävänannon mukaiseen lopulliseen muotoon.

Juoksupyörän suunnittelu on pitkäaikainen prosessi ja koko projektin kattavaa palautetta ohjekirjan sisältämisestä tiedoista ei ole mahdollista saada työn päättyessä. Mallipiirustuksiin laaditut muutokset niiden alkuperäisiin versioihin verrattuna sisältävät paljon informaatiota valmistusprosessiin tuoduista muutoksista, joten projektin arviointia on mahdollista toteuttaa täydellisenä vasta uusien ohjeistuksien ollessa käytössä.

Nykyisessä muodossa olevassa ohjekirjassa laadittuja mallipiirustuksia on kehitetty pääasiassa uusilla muototoleransseilla, puutteellisten toleranssien asettamisella sekä materiaalitodistusten ja tarkastusvaatimusten määrittelyllä. Piirustuksien sisältämien infokenttien tietoja, koskien kappaleiden tarkastusvaatimuksia ja niihin liitettäviä ohjeita, on tarkennettu ja niiden määrää lisätty. Osista tehtyjä projektioita ei juuri ole muutettu, johtuen niiden hyvästä toteutuksesta useimpien osien kohdalla. Ohjesivujen tietoihin on rakennettu viittaukset tärkeimpiin suunnittelua tukeviin ohjeisiin ja laskelmiin sekä laadittu selittävää tekstiä piirustukseen liittyvästä ohjeistuksesta ja avattu mallipiirustuksien sisältämää informaatiota.

Opinnäytetyönä laadittua suunnittelumanuaalia voidaan käyttää jatkossa koulutuksen apumateriaalina uusille työntekijöille. Sen lisäksi se toimii suunnittelussa huomioon otettavien ohjeistuksien soveltamisen täsmennyksenä suunnittelijoille. Suunnittelun ohjekirja tullaan ottamaan käyttöön projektin päättyttyä, joten työn onnistumista arvioidaan tavoitteiden täyttymisen suhteen ohjekirjan opinnäytetyön valmistumisen aikaisessa muodossa.

Projektin tilannetta verrattaessa asetettuihin lähtökohtiin on projektin eteneminen toteutunut melko kattavasti tehtävänannon mukaisesti. Päivitetyillä toleransseilla, osiin tehtävillä tarkastuksilla sekä piirustuksiin liitettävillä ohjeilla on laadittu yleinen linjaus yrityksen suunnittelukäytäntöihin juoksupyörässä.

Kustannuslaskennan osio ei tule muotoutumaan alussa arvioituun muotoon johtuen valmistuskustannuksien hankalasta erottelusta. Osien ostotilausten kustannukset ilmoitetaan valmistuksen kokonaissummana ja eri työvaiheet on kustannuksellisesti mahdoton erottaa toisistaan. Kustannusvertailu painotetaan erilaisten rakenteiden kustannusten esittämiseen.

Ohjekirjan täsmentävät suunnittelun linjaukset tulevat varmasti jakamaan mielipiteitä eri tavoin malleja laativien suunnittelijoiden parissa, ja ohjekirjan jatkokehittely yrityksessä on todennäköistä. Juoksupyörän suunnitteluohjekirjan laadintaprojektia voisi tulevaisuudessa kehittää kattamaan myös suunnitteluun toteuttamista tarkemmalla tasolla, esimerkiksi lujuuslaskelmien laadinnassa. Lisäksi projektia voisi laajentaa koskemaan myös muita turbiinin tärkeitä osia, kuten öljynjakopesää, turbiiniakselia ja laakeria alkuperäisen kehitysehdotuksen mukaisesti.

LÄHTEET

Andritz Group. Manufacturing in Ravensburg. Kuva. Luettu 23.2.2015
<http://www.andritz.com/locations/hy-andritz-hydro-gmbh-ravensburg-germany/hy-manufacturing-at-andritz-hydro-gmbh-ravensburg-germany.htm>

Energiateollisuus. Vesivoima. Luettu 7.3.2015
<http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet/vesivoima>

Haapakoski, P. 2011. Vesivoimalaitosten rakenneratkaisut. Sähkö- ja energiatekniikan koulutusohjelma. Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Kauppalehti. 2013. Andriz Hydro Oy. Luettu 5.3.2015
<http://www.kauppalehti.fi/yritykset/yritys/andritz+hydro+oy/21525308>

Nilsson H., Davidson L. 2005. Numerical investigations of turbulent flow in water turbines. Thesis. Päivitetty 14.1.2005. Luettu 18.2.2015
<http://www.tfd.chalmers.se/~hani/phdproject/proright.html>

Pere, A. 2012. Koneenpiirustus 1 & 2. 11. painos. Espoo: Kirpe Oy.

Sarviaho H. 2008. Kolmen miljoonan koneremontti. Valokuva. Päivitetty 16.8.2008. Luettu 5.3.2015.

Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry. n.d. Standardi on yhteinen ratkaisu yleiseen ongelmaan. Luettu 8.4.2015
http://www.sfs.fi/julkaisut_ja_palvelut/standardi_tutuksi

Taivalkoski. 2014. New projects. Hydronews 4 (2), 21.

Verbund. 2011. Schewere für die Kaplan-Turbine. Luettu 14.4.2015
<http://www.verbund.com/bg/de/blog/2011/11/27/kaplan-turbine-wasserkraft>

Vesivoimalaitokset. 1978. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskuksen julkaisu. Helsinki: Insinööritieto Oy