

Opinnäytetyö (AMK)
Kone- ja tuotantotekniikka
Laiva- ja venetekniikka
2015

Janne Juvasmaa

POTKURILASKENNAN VALIDOINTI JA GEOMETRIAN SIIRTO CFD-LASKENNAN TARPEISIIN



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka | Laiva- ja venetekniikka

2015 | 45

Ohjaajat:

Lauri Kosomaa, Turun ammattikorkeakoulu

Joonas Kurtti, Meyer Turku

Janne Juvasmaa

POTKURILASKENNAN VALIDOINTI JA GEOMETRIAN SIIRTO CFD-LASKENNAN TARPEISIIN

Opinnäytetyön tarkoituksena oli validoida Procal-ohjelmaa, jolla voidaan laskea potkurin avovesikertoimet ja analysoida lapaan ja napaan kohdistuvia voimia, vertailemalla laskentatuloksia mallikoetuloksiin. Toisena tavoitteena oli tutkia, miten geometria voidaan siirtää taulukkomuodosta CFD-laskentaa varten. Työtä on tarkoitettu hyödyntää telakan omissa potkurilaskennoissa.

Validointiosuus aloitettiin valitsemalla potkurit ja tarkastelemalla niiden mallikoeraportteja. Kyseisten potkureiden mallikokeista saaduilla tiedoilla piirrettiin avovesikäyrästä, joita verrattiin Procalilla laskettuihin käyriin.

Geometrian siirrossa vertailtiin taulukkomuodosta saatuja potkureita valmistajilta saatuihin valmiisiin 3D-malleihin. Napalla ja Procalilla luotiin 3D-mallit taulukkomuodosta ja niitä vertailtiin Rhinoceros-ohjelmassa valmiisiin 3D-malleihin laittamalla ne mahdollisimman hyvin päällekkäin, jolloin eroavaisuudet tulevat esille.

Lopputuloksena saatiin selville, että Procal on varteenotettava vaihtoehto avovesilaskentaan sekä hyvä työkalu esimerkiksi vertaamaan potkurin geometrian muutoksien vaikutusta avovesiominaisuuksiin. Ohjelma tarvitsee kuitenkin vielä validointia, jotta nähdään tulosten luotettavuus suuremmassa mittakaavassa. Geometrian siirtoa tutkittaessa huomattiin, että Napan potkurimallintaja ei ole hyvä työkalu 3D-mallin luomiseen sen epäluotettavuuden vuoksi, kun taas Procalilla luotu 3D-malli vastasi hyvin valmistajan mallia lukuunottamatta kärjen terävyyttä.

ASIASANAT:

potkuri, CFD, laiva

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical and Production Engineering | Naval Architecture

2015 | 45

Instructors:

Lauri Kosomaa, Turku University of Applied Sciences

Joonas Kurtti, Hydrodynamics, Meyer Turku

Janne Juvasmaa

VALIDATING THE PROPELLER COMPUTATION AND TRANSFERRING THE GEOMETRY TO CFD CALCULATIONS

The purpose of this Bachelor's thesis was to validate propeller Boundary Element Computation program named PROCAL which is used to analyze for example propellers open water efficiency, torque and thrust coefficients. The second goal of the thesis was to study how to transfer propeller geometry from table format to 3D-model used in CFD-computations

The validation part started by choosing the propellers, which will be used in Procal and by familiarizing the model test reports. Open water efficiency, torque and thrust coefficients were plotted according to model test data. Model test results were then compared with PROCAL computation results.

In transferring the geometry part 3D models from manufacturers/designers were compared to Napa and Procal 3D models by using a program named Rhinoceros. The models were compared by fixing them over each other. Differences between geometries were made by visual inspection.

As an end result, it was noticed that Procal is reliable program for open water calculations and a good tool to analyze how the changes in blade geometry influence to open water features. Procal still needs a bit more validation to confirm the reliability in a larger scale. For geometry 3D-export NAPA is not a good tool because it's unreliable. 3D models created with Procal looked almost alike when comparing to manufacturer's/designer's model. The only differences were the sharpness in the blade root and tip regions.

KEYWORDS:

propeller, CFD

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Työn tavoitteet	8
1.2 Meyer Turku	9
2 POTKURI	10
2.1 Tausta	10
2.2 Geometria ja suunnittelu	10
3 POTKURIN MALLINTAMINEN	15
3.1 NAPA	15
3.2 Rhinoceros	16
3.3 Procal	16
4 LASKENNAN VALIDOINTI	18
4.1 Potkurin valinta ja Procal-laskenta	18
4.1.1 Color Fantasy	18
4.1.2 Viking Grace	18
4.1.3 Oasis of the Seas	19
4.1.4 Voyager of the Seas	20
4.2 Validointiosuus	20
5 GEOMETRIAN SIIRTO	25
5.1 Tarkoitus	25
5.2 NAPA	25
5.3 Procal	27
6 TULOKSET JA VERTAILU	29
6.1 Procalin validointi	29
6.1.1 Color Fantasyn Procal- sekä mallikoetulosten vertailu	30
6.1.2 Viking Gracen mallikoepotkuri sekä lopullinen potkuri	32
6.1.3 Voyager of the Seas	36
6.1.4 Oasis of the Seas	39
6.2 Geometrian siirto	41

7 YHTEENVETO	43
7.1 Validointi	43
7.2 Geometrian siirto	43
LÄHTEET	45

KUVAT

Kuva 1. Potkurin geometrian kuvauksessa käytettyä sanastoa (Matusiak 2005).	11
Kuva 2. Esimerkki lavan pinta-alan ja kierron vaikutuksesta kuormitukseen sekä hyötysuhteeseen (Terje Nordtun 2015).	13
Kuva 3. Kontrollitiedoston muokkaaminen onnistuu suoraan käyttöliittymässä.	17
Kuva 4. Vasemmalla lapa paneloituna ja oikealla ilman panelointia.	22
Kuva 5. Potkurin asetusvalikko, jossa määritetään laskentatiedot.	23
Kuva 6. Napan potkurimallintajan esimerkkipotkuri ja sen tarvitsemat lähtöarvot (NAPA 2015).	26
Kuva 7. Kärjen geometrian vertailua. Vasemmalla puolella Napan luoma malli ja oikealla Viking Gracen potkurimalli, joka on saatu suoraan potkurivalmistajalta.	27
Kuva 8. Validointitapauksissa käytetyt kontrollitiedoston asetukset.	29
Kuva 9. Color Fantasyn laskenta-asetukset	30
Kuva 10. Viking Gracen laskenta-asetukset.	33
Kuva 11. Voyager of the Seas:n keskipotkurin asetukset.	37
Kuva 12. Color Fantasyn 3D-mallien vertailu. Vasemmalla Napan vertailu, jossa valmistajan malli on vihreä ja Napalla luotu malli on harmaa. Oikealla Procalilla luotu malli, jossa valmistajan malli on vihreä ja Procalilla luotu malli on harmaa.	42

KUVIOT

Kuvio 1. Neljälapaisen potkurin avovesikäyrästä (Matusiak 2005, 28).	12
Kuvio 2. Color Fantasyn avovesikäyrästäjien vertailua.	31
Kuvio 3. Viking Gracen mallikoeapotkurin ja Procalin avovesikäyrästäjien vertailua.	34
Kuvio 4. Viking Gracen lopullisen potkurin ja Procalin avovesikäyrästäjien vertailua.	35
Kuvio 5. Potkurimallien Procal-tulosten vertailu.	36
Kuvio 6. Voyager of the Seas:n keskipotkurin mallikokeen ja Procalin avovesikäyrät.	38
Kuvio 7. Voyagerin mallikokeessa käytetyn sivupotkurin ja Procalin avovesikäyrästäjien vertailua.	39
Kuvio 8. Oasis of the Seas:n keskipotkurin mallikokeen ja Procalin avovesikäyrästä.	40
Kuvio 9. Oasis of the Seas:n sivupotkurin mallikokeen ja Procalin avo-vesikäyrästä.	41

TAULUKOT

Taulukko 1. Paneloinnin vaikutus avovesikertoimiin.....	32
---	----

Taulukko 2. Viking Gracen mallikoeputkuri.	34
---	----

KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

A_E/A_O	Potkurin levitetyn ja oikaistun pinta-alan suhde potkurin ympyräpinta-alaan (Matusiak 2005, VII).
CFD	Computational fluid dynamics. Numeerinen virtauslaskentamenetelmä, jolla ratkaistaan ja analysoidaan nesteiden ja kaasujen käyttäytymistä.
CRS	Cooperative Research Ships. CRS on hydrodynamiikan kehittämiseen keskittyvä tutkimus- ja tuotekehitysfoorumi, jota johtaa hollantilainen MARIN. Jäsenet koostuvat tutkimus- ja luokituslaitoksista, telakoista, potkurilaitetoimittajista, laivastoista ja varustamoista.
BEM	Boundary Element Method. Numeerinen laskentatapa lineaaristen osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseksi. Laskennassa käytetään pintaverkotusta.
Kavitaatio	Kaasu-faasin muodostumista nesteessä paineen alentumisen seurauksena. Ilmiö syövyttää potkurin lapoja. Kavitaatiota esiintyy aina, mutta lapojen syöpymistä ei juuri tapahdu nykyisillä potkureilla – etenkin matkustaja-aluksissa. Merkittävämmät ongelmat ovat kavitaation aiheuttamat vaikutukset meluun ja värähtelyyn (comfort-tasoon).
Propulsio	Laivan kulkuvastuksen kumoamiseen ja kiihdytykseen tarvittavan työntövoima.
Vanavesi	Yleisesti ottaen laivan jäljiltä jäävä vana, mutta tässä tapauksessa kyseessä on laivan liikkeessa veden ja runkopinnan sekä ulokkeiden välisestä kitkasta ja rajakerrosilmiöstä aiheutuva hidastuneen virtauksen alue potkurilla.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tavoitteet

Tämän opinnäytetyön päätavoitteena on selvittää, miten potkurin geometria saadaan määriteltyä taulukkomuodosta CFD-laskennan tarvitsemaan 3D-formaattiin.

Meyer Turun telakalla on CFD-laskentakapasiteetin lisääntyessä tarkoitus tehdä enemmän propulsiolaskentoja aidoilla potkureilla, jotta nähdään laivan rungon, ulokkeiden ja potkurin vuorovaikutus aikaisemmassa vaiheessa suunnitteluprosessia. Tällä hetkellä tehdään aktiivisesti vain paljaan- ja ulokkeellisen rungon vastuslaskentoja. Koska propulsiolaskenta on kuitenkin vielä melko uutta, puhtaasti laskennallisiin tuloksiin ei voida sokeasti luottaa. Tämän vuoksi tarvitaan validointilaskentoja, joiden avulla voidaan tarkistaa ja verrata tuloksia.

Tällä hetkellä mallikokeet ovat ainoa tapa saada luotettavia avovesituloksia. Melko luotettavia avovesituloksia on mahdollista saada myös laskennallisesti, mutta marginaalit ovat kuitenkin pieniä, jonka vuoksi mallikokeita tarvitaan varmistukseksi. Tämän vuoksi toisena tavoitteena on saada validoitua Procal-ohjelma. Procal-käytön perimmäinen idea oli analysoida telakan sisällä potkurin ominaisuuksia, ja katsoa miten pienet suunnittelumuutokset vaikuttavat potkurin hydrodynaamisiin ominaisuuksiin. Osoittautui kuitenkin, että Procal on selkeästi analysointityökalu eikä sillä voi järkevästi muokata potkurin geometriaa. Tämän vuoksi tärkeimmät odotukset kohdistuvat esimerkiksi avovesikertoimien laskentaan, joita hyödynnetään tehoennusteissa. Myös kavitaatiolaajuuden tarkastelu ja sitä kautta comfort-tason arviointi ovat tulevaisuudessa mahdollisia. Ohjelmalla ei aikaisemmin ole saatu telakan sisällä täysin luotettavia arvoja, ja tarkoituksena onkin testata ja verrata, millä asetuksilla saadaan parhaimmat laskentatulokset mallikokeisiin nähden.

1.2 Meyer Turku

Meyer Turku Oy on yksi Euroopan johtavista telakkayhtiöistä, jonka omistaa Meyer Werft. Telakka Turussa työllistää noin 1350 henkilöä. Yhtiö on erikoistunut risteilijöiden, automatkustaja-alusten sekä erikoisalusten rakentamiseen. Meyer Turun tytäryhtiöitä ovat Piikkiö Works Oy, joka rakentaa hyttejä, Shipbuilding Completion Oy, joka tarjoaa laivoihin yleisten tilojen sisustusratkaisuja, ja ENGN'D Oy, joka on laiva- ja offshore suunnittelupalveluita tarjoava yritys. (Meyer Turku 2015.)

Meyer Turku Oy rakentaa parhaillaan Mein Schiff 5 -risteilyalusta saksalaiselle TUI Cruises -varustamolle sekä LNG-käyttöistä automatkustaja-alusta Tallinkille. Mein Schiff 5 luovutetaan tilaajalleen keväällä 2016 ja Tallinkin alus vuoden 2017 alussa. Yhtiön tilauskannassa on lisäksi yksi Mein Schiff -sarjan sisaralus, Mein Schiff 6, joka valmistuu keväällä 2017. (Meyer Turku 2015.)

2 POTKURI

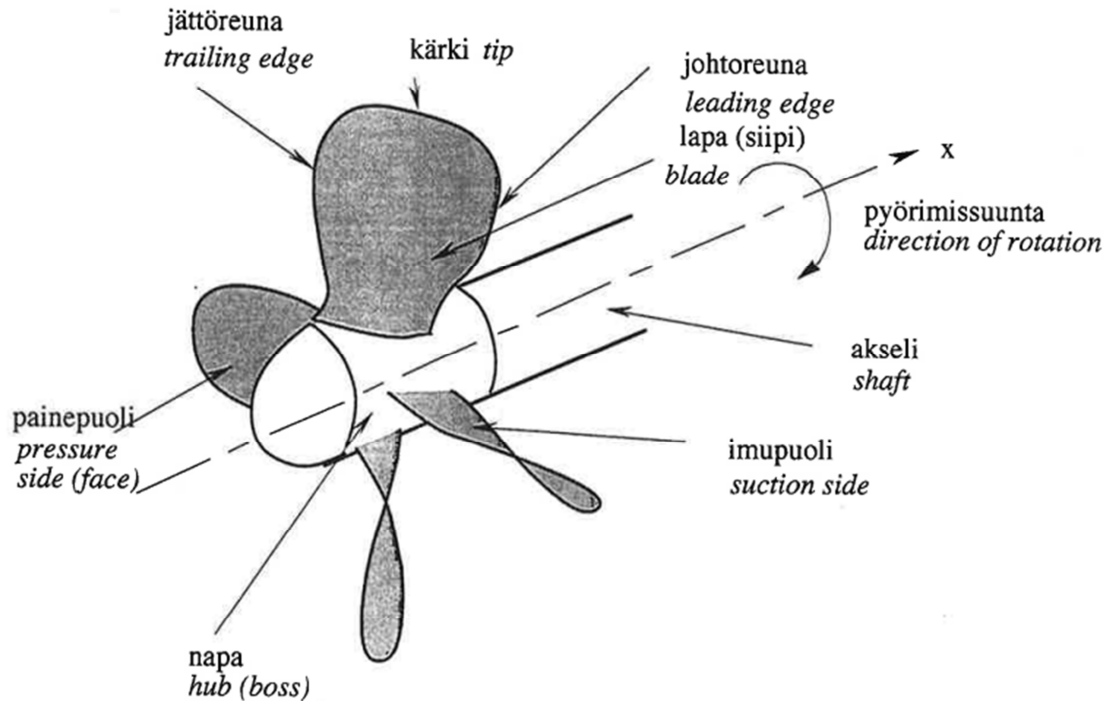
2.1 Tausta

Potkurin tarkoituksena on kiihdyttää veden massavirtaa joko eteenpäin tai taaksepäin, jolloin laiva kulkee vastakkaiseen suuntaan potkuriin kohdistuvan reaktivoiman avulla. Tätä reaktivoimaa kutsutaan työnnöksi. (Räisänen 2000, 8-1.)

Potkurin kehityksen voidaan katsoa lähteneen Arkhimedeen ruuvipumpusta ja Da Vincin ajatuksista. Yleisimmin käytössä oleva potkurityyppi on niin sanottu ruuvipotkuri, jonka esi-isänä pidetään juurikin Arkhimedeen ruuvipumppua. Nimitys johtuu siitä, että edetessään useamman nousun verran potkurin lapa jättää jälkeensä kuvion, joka muistuttaa ulkomuodoltaan ruuvin kierteitä. (Matusiak 2005, 4-5.)

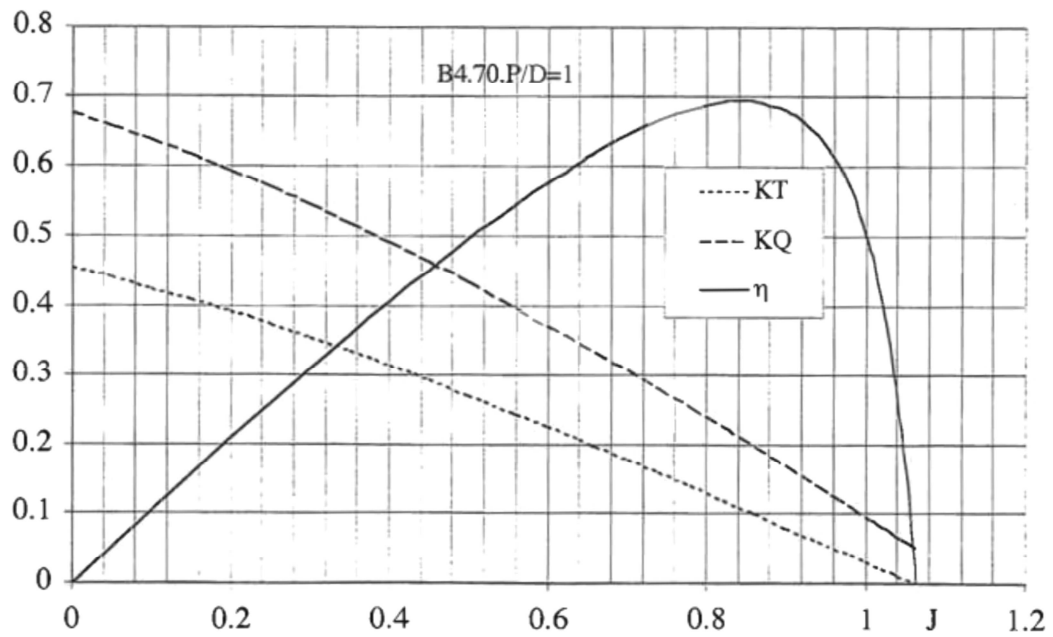
2.2 Geometria ja suunnittelu

Potkurin geometriaa varten tarvitaan säteittäisjakaumat (0-1), joihin sisältyy tiedot esimerkiksi lavan kierrosta, paksuudesta, kaltevuudesta, kaarevuudesta noususta ja kärkisuoran pituudesta. Lavalle tarvitaan myös profiili, johon tarvitaan lavan paksuus, kaarevuus ja kärkisuoran pituus. Potkuri pyritään optimoimaan halutunlaiseksi muuttamalla edellä mainittuja arvoja, ja näiden tietojen avulla luodaan potkurista malli, jolla voidaan suorittaa mallikoetestit. Kuvassa 1 on esitelty havainnollistava mutta yksinkertainen kuva potkurin geometriasta. Kuvassa näkyvä johtoreuna on se reuna, joka kohtaa virtauksen ensin, ja jättöreuna on sen vastakkainen reuna. Imupuoli on se puoli potkuria, joka imee lavan etu- ja takapuolen paine-erosta johtuvan ilmiön vuoksi veden potkurin läpi. Painepuoli on imupuolen vastakkainen puoli. (Matusiak 2005, 12.)



Kuva 1. Potkurin geometrian kuvauksessa käytettyä sanastoa (Matusiak 2005).

Uuden potkurin suunnittelu on monivaiheinen prosessi, joka vaatii useita tietoja, analysointia ja lopulta mallikokeita. Esimerkiksi potkurivalmistaja Steerprop aloittaa suunnittelun keräämällä seuraavia tietoja: jääluokka, teho, potkurin halkaisija ja lapaluku, työntö, paaluveto, laivan nopeus, painepulssit ja melu. Lisäksi tutkitaan laivan linjoja, hydrostatiikkaa ja yleisjärjestelykuvaava. Sen jälkeen tutkitaan vastusta ja vanavesikenttää joko CFD-laskennassa tai mallikokeilla. Näiden jälkeen voidaan valita alustava geometria, jonka avulla valitaan mallikokeessa käytettävä varastopotkuri, joka vastaa mahdollisimman paljon suunniteltua potkuria. Mallikokeiden avulla saadaan korjauskertoimet esimerkiksi vanavesi- sekä työnnövähennyskertoimelle, joita tarvitaan suunnittelupotkurin mallikokeissa. Viimeisenä vaiheena on optimoida lopullinen potkuri avovesikokeiden ja propulsio- sekä kavitaatiotestien avulla. (Hannu Jukola, 2013.)



Kuvio 1. Neljälapaisen potkurin avovesikäyrästä (Matusiak 2005, 28).

Kuviossa 1 näkyvät tärkeät avovesikertoimet (etenemisluku J , työntökerroin K_T , avovesihyötysuhde η_0 sekä momenttikerroin K_Q) ovat dimensiottomia suureita, jotka määritellään seuraavilla kaavoilla

$$J = \frac{V_A}{n * D}$$

$$K_T = \frac{T}{\rho * n^2 * D^4}$$

$$\eta_0 = \frac{T * V_A}{Q * n * 2\pi}$$

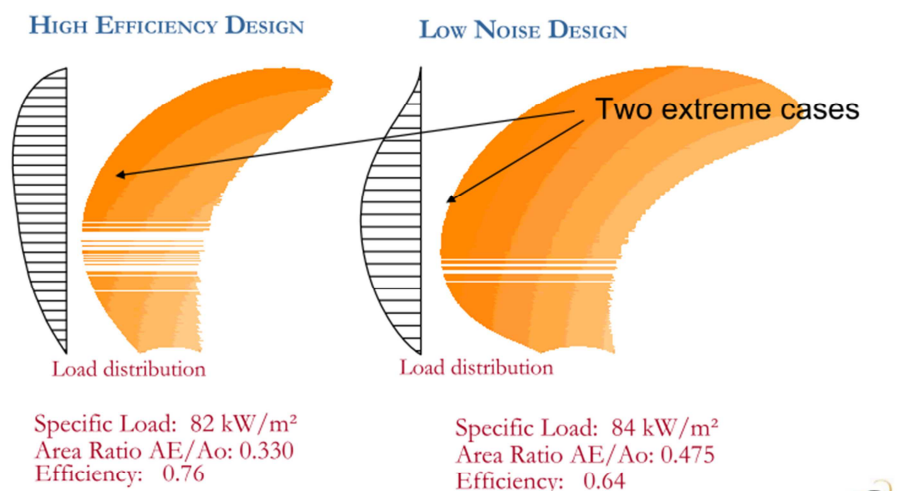
$$K_Q = \frac{Q}{\rho * n^2 * D^5}$$

joihin vaikuttavat potkurin työntö T (kN) ja vääntö Q (kNm), etenemisnopeus V_A (m/s), veden tiheys ρ (t/m³) ja potkurin kierrosnopeus n (1/s) sekä halkaisija D (m).

Käytännössä potkurin tuottamiin arvoihin voidaan vaikuttaa muuntelemalla sen geometriaa. Potkurin ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat lapojen kaltevuus, kaarevuus, nousu, kierto sekä aiemmin mainitut pinta-alat. Kasvattamalla lapaprofiilin kaarevuutta ja/tai nousun, P , suhdetta potkurin halkaisijaan saadaan suuremmat työntö- ja momenttikertoimet. Usein potkurin suunnittelussa joudutaan kuitenkin tekemään kompromissi, koska esimerkiksi halutun työntön aikaansaamiseksi potkuri voi aiheuttaa voimakkaita kärkipyörteitä, jolloin se voi aiheuttaa liian suuria paineiskuja runkoon. Etenkin matkustajalaivoissa paineiskut voivat olla erittäin haitallisia, jos esimerkiksi ravintola sijaitsee laivan peräosassa lähellä potkuria.

Havainnollistamisen vuoksi kuvassa 2 nähdään ääritapaukset siitä, kuinka potkurin lavan kierto ja pinta-alasuhde vaikuttavat niin hyötysuhteeseen kuin kuormitusjakamaan.

Propeller tip unloading - Blade area



Kuva 2. Esimerkki lavan pinta-alan ja kierron vaikutuksesta kuormitukseen sekä hyötysuhteeseen (Terje Nordtun 2015).

Suuri kuormitus lavan kärjessä parantaa hyötysuhdetta, mutta se aiheuttaa voimakkaamman kärkipyörteen kuin lapa, jossa kuorma on tasaisempi. Kärkipyörteet aiheuttavat usein meluhaittoja laivan sisätiloissa.

3 POTKURIN MALLINTAMINEN

Työn tavoitteena on saada tehtyä taulukkomuotoisesta potkurista CFD-laskentaan kelpaava potkuri. Potkurin mallintaminen pelkän taulukkomuodon avulla on haastavaa, koska eri potkurivalmistajat tarjoavat eri tavoin tehdyn Excel-tilauksen. Mallinnuksessa tarvittava tieto voi olla myös sellainen, jota ei taulukossa kerrota suoraan vaan se joudutaan laskemaan taulukon tietojen avulla, jolloin mahdollisten virheiden määrä voi kasvaa.

Mallintaminen voidaan tehdä useilla eri ohjelmilla ja tässä opinnäytetyössä keskitytään pääasiallisesti kolmeen ohjelmaan: NAPA, Rhinoceros ja Procal.

CFD-laskentaan tarvitaan Parasolid-tilavuusmalli (.x_t), joka saadaan Cadfix-ohjelman avulla. Sen puhdistaa ja muuntaa IGES-pintamallin tilavuusmalliksi. IGES-malli saadaan sekä Procalista että Napasta suoraan export-toiminnolla. Molemmat ohjelmat tarvitsevat geometrian lähtöarvot taulukkomuodossa.

Ongelmana on saada tehtyä taulukkomuodosta luotettava malli, jota voidaan käyttää laskennassa. Erityisesti lavan kärjen alue voi tuottaa ongelmia sen haastavan geometrian vuoksi. Lavan taulukkomuotoinen geometria voi poiketa valmistajasta riippuen, koska eri valmistajien taulukoissa on erilaiset geometrian arvot. Esimerkiksi Rolls Roycen taulukossa lavan kaarevuus on annettu etäisyytenä lavan kärkisuoraan nähden eikä suoraan asteina, jota tarvitaan sekä Napassa että Procalissa. Kaarevuus voidaan kuitenkin laskea edellä mainitun etäisyyden sekä nousun ja säteen avulla.

3.1 NAPA

NAPA on yksi Meyer Turun käyttämistä laivasuunnitteluohjelmista. Sen kehitystyö aloitettiin 1970-luvulla Wärtsilän Helsingin telakalla, ja vuonna 1989 siitä tuli itsenäinen yritys, Napa Oy. Ohjelma on erittäin yleisessä käytössä ja sillä voidaan laskea esimerkiksi niin vakavuuslaskuja kuin hydrostaatiikkaa ja lisäksi sillä voidaan saada reaaliaikaista tietoa laivan vakavuudesta.

Vuonna 2013 Napaan kehitettiin potkurityökalu, jota on myös tarkoitus päästä hyödyntämään geometrian siirrossa, sillä työkalu tekee potkurista IGES-mallin. Tämä mahdollistaa geometrian siirron suoraan CFD-laskentaan.

3.2 Rhinoceros

Rhinoceros on amerikkalaisen McNeel-nimisen yrityksen kehittämä 3D-mallinnusohjelma, joka on yksi käytetyimmistä mallinnusohjelmista. Siinä ei ole minkäänlaisia rajoituksia koskien esimerkiksi muotoa tai kokoa ja malli voidaan tuoda tai luoda 3D-skannauksen avulla. Lisäksi ohjelmalla on mahdollista viedä tehty malli suoraan laserleikkaukseen, 3D-tulostimeen tai sorvaukseen. (Rhino 3D, 2015.)

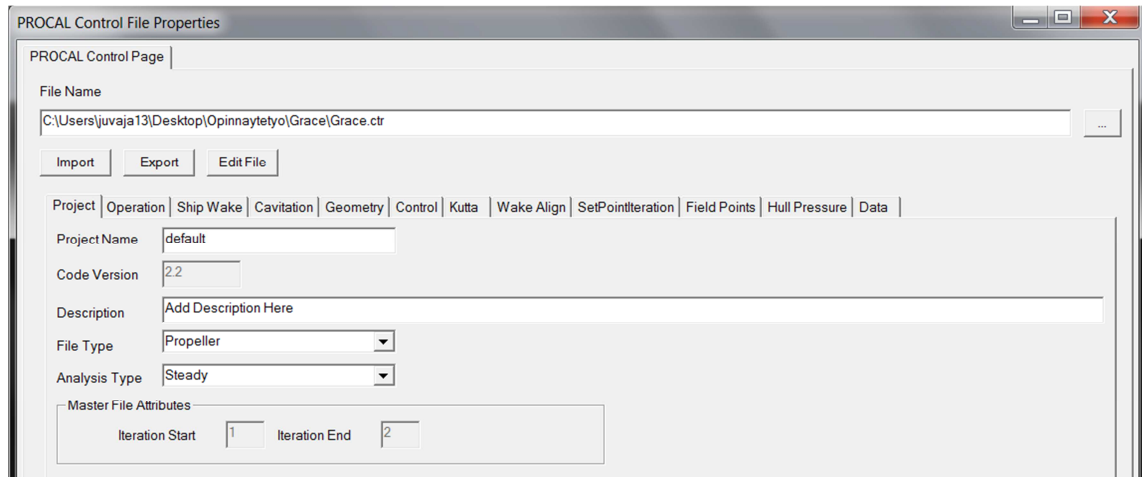
Opinnäytetyössä ohjelmalla on tarkoitus vertailla potkureiden geometriaa valmistajilta saatuihin malleihin. Tarpeen vaatiessa myös kärjen geometrian muokkaaminen voi olla mahdollisena käyttötarkoituksena.

3.3 Procal

Yli kymmenen vuotta sitten CRS:n Procal-ryhmä alkoi kehittää Procal-ohjelmaa, jolla voidaan analysoida virtauksia potkurin ympärillä BEM-laskennan avulla. Ohjelman käyttö tapahtuu Provice-käyttöliittymän (PROcal VISualization Environment) kautta, jonka kehittäjänä toimii DRDC Atlantic. Provice mallintaa paneelit (gridin) lavan ja navan pintaan, jolloin ohjelma luo syöttötiedostot (input files) Procalia varten. Ohjelmalla voidaan laskea voimia lavassa ja navassa, määrittää avovesikertoimet sekä tutkia kavitaatio-ominaisuuksia. (J.Bosschers, 2013.)

Käyttöliittymän avulla luodaan projekti, johon lisätään uusi tai jo olemassa oleva potkurin kontrollitiedosto (control file, .ctr). Avovesilaskennassa tiedostoon määritetään samoja lähtöarvoja kuin mallikokeessa ja täsmennetään laskennan lähtötietoja. Esimerkiksi potkurin nopeus, kinemaattinen viskositeetti ja veden tiheys määritetään samoiksi kuin mallikoetilanteessa. Mikäli luodaan laskenta,

jolla ei ole mallikoevertailua, voidaan ohjelmaan syöttää itse määritetyt arvot edellä mainittuihin kohtiin. Kontrollitiedostoa voidaan muokata joko suoraan tekstiohjelmalla tai vaihtoehtoisesti kuvan 3 mukaisella valikolla. (J. Bosschers, 2013.)



Kuva 3. Kontrollitiedoston muokkaaminen onnistuu suoraan käyttöliittymässä.

Ennen laskennan aloitusta on erityisen tärkeää määrittää tiedostotyyppi (File type), jolloin ohjelma tietää minkälainen laskentatilanne on kyseessä. Tiedostotyypin lisäksi analyysityyppi (Analysis Type) tulee valita halutuksi, koska edellä mainittujen valintojen jälkeen ohjelma osaa rajoittaa oikeasta paikasta käyttäjän muokkaamisoikeuksia, jolloin mahdolliset virhetilanteet poistuvat. (Bosschers, J. 2013.)

Uusimpaan versioon on lisätty export-toiminto, jolla saadaan tehtyä IGES-malli Procalin luomasta potkurista.

4 LASKENNAN VALIDOINTI

4.1 Potkurin valinta ja Procal-laskenta

Alun perin tarkoituksena oli valita useampi potkuri validointia varten, mutta ongelmaksi muodostui potkurimallien (3D tai .ppg) ja mallikokeessa käytettyjen potkurien liian suuret eroavaisuudet. Tästä ongelmasta johtuen validointiin voitiin valita lopulta vain kuusi potkuria: Color Fantasyn, Viking Gracen, Oasis of the Seas:n sekä Voyager of the Seas:n keskipotkurit. Lisäksi Oasiksesta ja Voyagerista valittiin myös sivupotkurit. Näiden potkureiden mallikokeessa käytetyt potkurit olivat geometrialtaan lähes identtiset verrattuna taulukkomuotoon. Oasiksen tuloksia verrattaessa täytyy huomioida, että avovesimallikokeet on tehty potkurilla, joka on yhdistetty pod-runkoon. Procal-laskennat tehtiin potkurilla ilman runkoa, joten kyseisten potkureiden laskentatulokset voivat poiketa huomattavasti mallikoetuloksista.

4.1.1 Color Fantasy

Color Fantasyssa on kaksi nelilapaista säätölapapotkuria, joiden halkaisijat ovat 5,2 m ja $A_E/A_O=0,663$. Potkurin teoreettinen etenemä yhden kierroksen aikana on noususuhte 1,295 kertaa halkaisija 5,2 m (= 6,734 m), joka on potkurin nousu 0,7R:n kohdalla. Potkurin valmistaja on Rolls Royce. (Marin 2003, T1.)

Potkurin mallikokeet suoritettiin Marin mallikoelaitoksella Hollannissa ja niissä käytettiin kahta Rolls Roycen suunnittelemaa potkuria. Potkurit eroavat toisistaan noususuhteessa sekä levitetyn pinta-alan suhteessa. Molempien potkurimallien mittakaava on 1:22,713. (Marin 2003, T1.)

4.1.2 Viking Grace

Viking Gracessa on kaksi potkuria, ja ne on valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Yhden potkurin lapojen lukumäärä on viisi, halkaisija 5,2 m ja

$A_E/A_O=0,588$. Yhden kierroksen aikana potkurin teoreettinen etenemä on noususuhte 1,271 kertaa halkaisija 5,2 m (= 6,609 m), joka on potkurin nousu $0,7R$:n kohdalla. Potkurin valmistaja on Wärtsilä. (Marin 2012, T2.)

Mallikokeet suoritettiin Marin mallikoelaitoksella ja niissä käytettiin kahta eri potkuriä, joista ensimmäinen on niin kutsuttu varastopotkuri. Tämä tarkoittaa sitä, että valitaan (yleensä mallikoelaitoksen varastosta) jonkin aikaisemman laivaprojektin potkuri, joka muistuttaa mitoiltaan ja ominaisuuksiltaan mahdollisimman paljon uudisrakennusprojektiin tulevaa potkuriä. Tällä varastopotkurilla haetaan alustavat propulsiokertoimet. Varsinainen projektia varten suunniteltu "suunnittelupotkuri" hyödyntää varastopotkurilla saatuja tuloksia. Joskus ero varasto- ja suunnittelupotkurin välillä on niin merkittävä, että laivan lopullinen tehontarve varastopotkurikokeiden jälkeen muuttuu jopa 10 %. Toinen mallipotkureista on valmistettu suoraan Wärtsilän suunnitelmien mukaan. Molempien potkureiden mittakaava on 1:22,712. (Marin 2012, 4.)

Validointiin valittiin Wärtsilän suunnittelema potkuri, josta on olemassa valmis ppg-tiedosto. Validointiosuudessa täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että tämä tiedosto on konvertoitu Marin mallikoelaitoksen INGES-tiedostosta. Laskentatuloksissa voi täten ilmetä suuriakin eroavaisuuksia.

4.1.3 Oasis of the Seas

Oasis of the Seas on varusteltu kolmella ABB:n Azipodilla, joista kaksi on sivuilla ja yksi keskellä ja niiden halkaisijat ovat 6,1 m. Keskipotkurin lapojen lukumäärä on viisi ja $A_E/A_O=0,619$. Sivupotkureiden lapojen lukumäärä on myös viisi ja $A_E/A_O=0,604$. Yhden kierroksen aikana sekä sivupotkuri että keskipotkuri etenevät teoreettisesti noususuhteen 1,2 kertaa halkaisijan 6,1 m:n (= 7,32 m) matkan, joka on potkurin nousu $0,7R$:n kohdalla. (Marin 2007, T1.)

Mallikokeet suoritettiin Gracen tapaan Marin mallikoelaitoksella, ja niissä käytettiin yhteensä kuutta eri potkurimallia: kolme keskipotkuriä ja kolme sivupotkuriä. Kaikkien mallien materiaalina on pronssi ja mittakaava 1:27,432.

Potkurin halkaisijat, nousut ja pinta-alasuhteet eivät olleet kaikissa malleissa samat. (Marin 2007, T1.)

Validointiin valittiin laivaan tulleet viisilapaiset keski- ja sivupotkurit, joista on olemassa ABB:ltä saadut ppg-tiedostot.

4.1.4 Voyager of the Seas

Voyager of the Seas:ssa on Oasiksen tapaan kolme Azipodia. Sivupotkureiden halkaisijat ovat 5,6m ja $A_E/A_O=0,568$. Keskipotkurin halkaisija on 5,4m ja $A_E/A_O=0,613$. Yhden sivupotkurin noususuhte on 1,087 ja nousu 6,093m. Keskipotkurin teoreettinen nousu on 6,099m noususuhteen ollessa 1,128. (Marin 1998, T2.)

Mallikokeet suoritettiin myös Marinilla ja avovesikokeissa käytettiin Krylov Shipbuilding Research Institutun suunnittelemaa potkureita. Kokeet tehtiin ainoastaan suunnitelluilla potkureilla, sekä ilman podia että podin kanssa, joiden mittakaava on 1:24,8 ja materiaalina pronssi. (Marin 1998, T2.)

Validointiin valittiin sekä sivupotkuri että keskipotkuri, joista on olemassa valmiit ppg-tiedostot.

4.2 Validointiosuus

Validointiosuudessa keskitytään ainoastaan avovesilaskentaan, eikä niissä oteta huomioon kavitaatiota. Työ aloitettiin tarkastelemalla valittujen laivojen mallikoeraportteja, jotta Procalin kontrollitiedostoon voitaisiin syöttää oikeat lähtöarvot. Raportista selviää mallikoealtaan veden lämpötila, potkurin kierrosnopeus sekä etenemisluku. Näiden arvojen lisäksi kontrollitiedostoon lisätään veden kinemaattinen viskositeetti ja tiheys, jotka saadaan altaan veden lämpötilan avulla esimerkiksi netistä löytyvistä taulukosta tai taulukkokirjasta. Käytännössä muita lähtötietoja ei tarvita mallikokeesta vaan loput tiedot täytetään joko kokemusperäisesti, kokeilemalla tai ohjeiden avulla.

Mikäli kyseessä olisi kavitoiva laskenta, tarvitaan enemmän lähtötietoja esimerkiksi ilmanpaineesta ja vanavedestä.

Ohjelmalla voidaan analysoida ainakin seuraavia tilanteita:

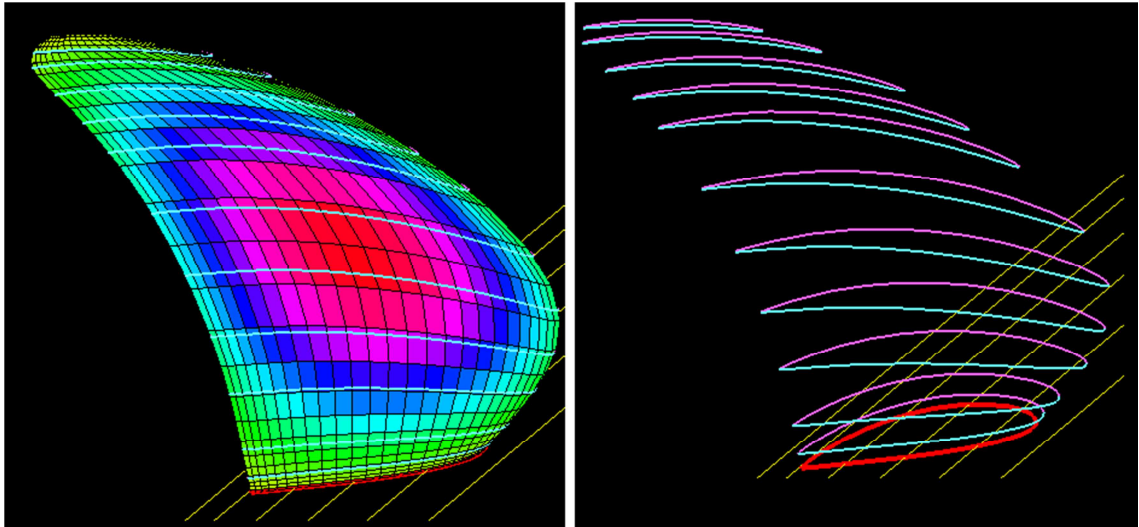
- Propeller: avovesipotkuri
- Rudder: peräsin
- PropellerAndRudder: peräsin sekä potkuri
- Duct: suulakepotkuri
- PodMaster: pod-potkuri (esimerkiksi Azipod)

Mahdollisuuksien mukaan myös vanavesikenttä on mahdollista lisätä analyysiin mukaan, mutta avovesilaskennassa se ei ole tarpeen.

Kaikki potkurilaskennat suoritettiin käyttämällä Propeller-vaihtoehtoa. Oasis of the Seas:n keskipotkuri sekä sivupotkurit ovat podeja ja niiden avovesimallikokeet suoritettiin ainoastaan podin kanssa (ks. luku 4.1) toisin kuin Voyager of the Seas:n mallikokeet, jossa avovesikokeet tehtiin myös ilman podeja. Jotta laskenta olisi onnistunut podin kanssa, sitä varten olisi pitänyt luoda oma pod-tiedosto, joka sisältää vain podin geometrian. Tällaisia koordinaatteja ei ollut saatavilla valmistajalta, joten tästä syystä johtuen validoinnissa jouduttiin käyttämään Propeller-vaihtoehtoa myös Oasiksen potkureille.

Sen jälkeen, kun kontrollitiedosto vastasi mallikokeen lähtöarvoja, projektiin tuotiin potkurin ppg-tiedosto. Tämä tiedosto sisältää tiedot potkurin sekä navan halkaisijasta, lapojen määrän ja yhden lavan koordinaatit mukaan lukien lavan profiiliin.

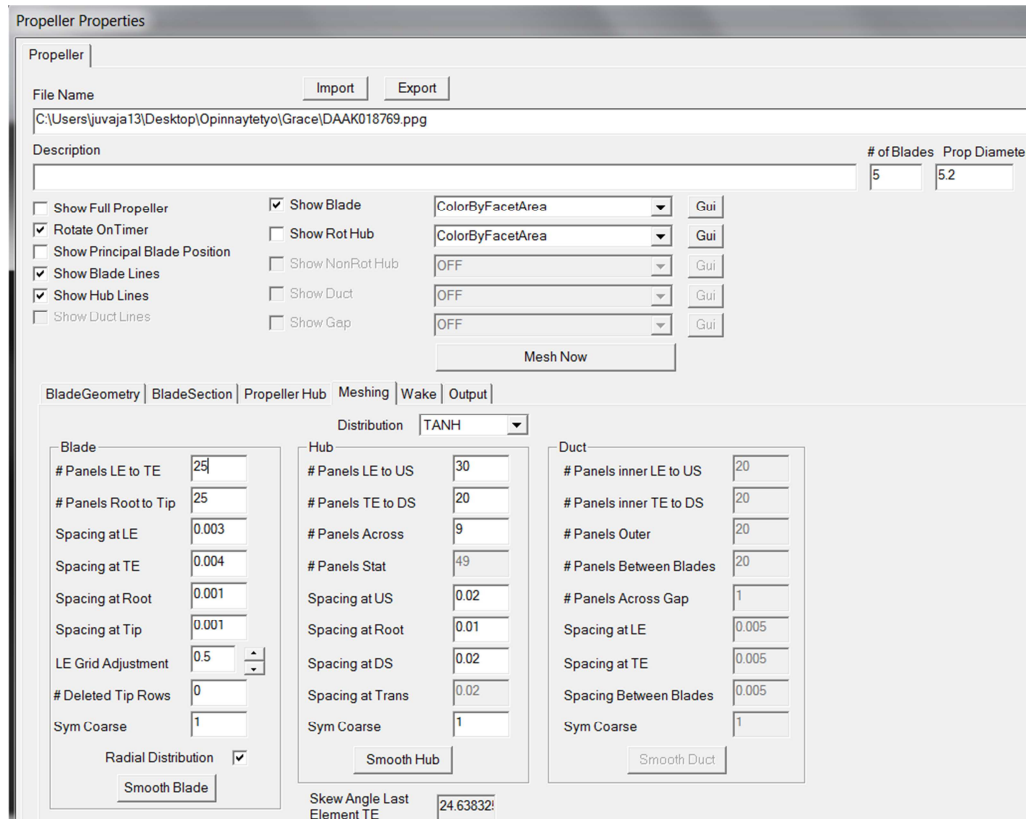
Lapa piirtyy potkuritiedostossa määriteltyjen r/R :n (säteittäisjakauman) mukaan kuvan 4 mukaisesti, johon ohjelma luo siihen sisällytettyjen kaavojen avulla käyttäjän määrittämän laskentaverkon.



Kuva 4. Vasemmalla lapa paneloituna ja oikealla ilman panelointia.

Ohjelma luo myös potkurin navan, jonka positiivisen x-akselin pituus määritetään vastaamaan mallikoetta (tyypillisesti $>1 D_{\text{potkuri}}$, oletuksena 1,05) ja vastakkaisen puolen pituus on oletuksena 0,5. Ohjelma tekee oletuksena pallomaiset päädyt navan molempiin päihin. CFD-laskennassa navan päädyt ovat kuitenkin useimmiten avonaisia.

Laskentatietojen määrittäminen tapahtuu kuvassa 5 näkyvässä potkurin asetusvalikosta (Propeller Properties). Paneloinnin (meshing) luonti tapahtuu antamalla halutut paneloinnin lukuarvot lavalle ja navalle.



Kuva 5. Potkurin asetusvalikko, jossa määritetään laskentatiedot.

Procalin ohjeissa ei kerrota tarkasti miten kyseiset lukuarvot tulisi määrittää, jotta laskentatulokset olisi mahdollisimman tarkka vaan niissä kerrotaan vain yleisellä tasolla, miten ongelmatilanteissa tulisi toimia ja miten niitä voitaisiin välttää. Ohjeissa kuitenkin mainitaan, että avovesilaskentaa varten kontrollitiedostossa voidaan käyttää perusasetuksia, joihin lisätään mallikokeen data (veden lämpötila, kinemaattinen viskositeetti, laivan nopeus).

Potkureiden validoinnissa käytettiin useita eri panelointivaihtoehtoja sekä kontrollitiedostojen asetuksia. Lloyd's Register (LR) on tehnyt vuonna 2005 laskentaa varten oman ohjeen paneloinnin määrittämiseksi, jota käytettiin myös apuna validoinnissa. Paneeliverkostoa tihentämällä osa tuloksista muuttui joko paremmaksi tai huonommaksi.

Saatuja tuloksia verrattiin mallikokeiden tuloksiin ja parhaimmat tulokset on esitetty kappaleessa 6.

5 GEOMETRIAN SIIRTO

5.1 Tarkoitus

Potkurin geometria on tarkoitus siirtää CFD-laskentaan. Tämän avulla voidaan laskea esimerkiksi potkurin tuottamat arvot vanavesikentässä sekä painepulssien suuruudet. Myös potkurin ja rungon sekä ulokkeiden vuorovaikutusta on tarkoitus laskea. Käytännössä tämä tarkoittaa niin sanottua propulsiolaskentaa, jossa otetaan huomioon niin potkuri kuin laiva ulokkeineen. Propulsiolaskennasta saatuja tuloksia käytetään hyväksi, kun halutaan esimerkiksi saada selville täysmittakaavaisen laivan nopeudet potkurin eri kierrosnopeuksilla/työnöllä.

CFD-laskennassa on erittäin tärkeää, että käytettävä geometria on mahdollisimman tarkka eikä se sisällä minkäänlaisia epäjatkuvuuksia (esimerkiksi kärjen geometriassa). Tämä voi aiheuttaa sen, ettei Cadfix pysty paikkaamaan kärkeä, eikä pintamallia saada siten muutettua tilavuusmalliksi. Toinen ongelma on se, että laadukasta laskentagridiä ei saada välttämättä tehtyä CFD-ohjelmassa, koska laskentatilavuudet eli ”kopit” eivät pääse kiertämään lavan geometriaa.

Tarkan geometrian luonti ilman valmiita IGES-generaattoreita vaatii suunnittelijalta suunnilleen yhden työpäivän verran (Veikonheimo, T. Haastattelu. 26.03.2015).

5.2 NAPA

Napassa potkurin geometria annetaan taulukkomuodossa kuvan 6 mukaisesti, jossa

- R Dimensioton säteittäisjakauma
- THI Lavan paksuus (m)
- PITCH Nousu (m)

- RAKE Lavan kaltevuus (m)
- SKEW Lavan kierto (asteina)
- CAMBER Kaarevuus (m)
- CHORD Kärkisuoran pituus (m)

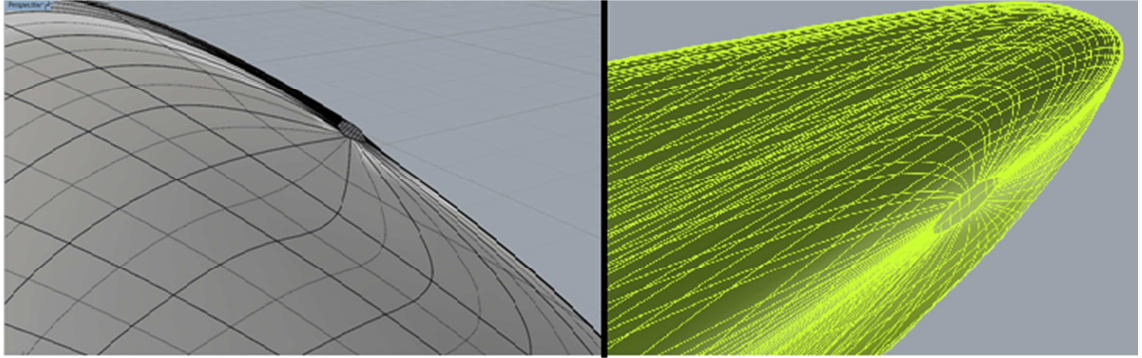
	A	B	C	D
1	R,THI,PITCH,RAKE,SKEW,CAMBER,CHORD			
2	0.18,0.362215,6.59413,0,-4.72,0.051982177,1.82727			
3	0.25,0.321609,7.04048,0,-6.98,0.061304109,2.06822			
4	0.3,0.293248,7.32251,0,-7.82,0.065412705,2.21911			
5	0.4,0.240713,7.72857,0,-7.74,0.066360886,2.47902			
6	0.5,0.194261,7.96241,0,-5.56,0.059171024,2.68837			
7	0.6,0.153813,8.0027,0,-1.5,0.048899935,2.82267			
8	0.7,0.117868,7.87393,0,4.11,0.039816008,2.8361			
9	0.8,0.084767,7.55714,0,10.48,0.031993812,2.66704			
10	0.9,0.054747,7.11474,0,17.17,0.023068537,2.20963			
11	0.95,0.041712,6.85957,0,20.63,0.017695269,1.75775			
12	1,0.029151,6.58149,0,24.18,0,0.057			

Kuva 6. Napan potkurimallintajan esimerkkipotkuri ja sen tarvitsemat lähtöarvot (NAPA 2015).

Taulukko on tallennettava csv-muotoon Napan omaan kansioon, jotta mallintaja löytää tiedoston ja ymmärtää syötetyt lähtöarvot. Lisäksi tietojen on oltava vain A-sarakkeella.

Napan geometriatyökalussa määritetään erikseen lapojen lukumäärä, navan halkaisija ja pituus sekä potkurin koordinaatit, jos potkuri halutaan liittää suoraan laivaan oikealla paikalleen.

Mallintajan haasteena on potkurin lavan kärjen geometria, sillä taulukkomuodossa annettu potkurigeometria ei osaa luoda yhteen pisteeseen päättyvää kärkeä, jolloin kärkeen tulee kuvan 7 mukainen ”katkaistu” kohta. Kuvasta nähdään myös Viking Gracen potkurista saatu valmis 3D-malli, jota ei ole mallinnettu Napan avulla. Molemmissa kuvissa nähdään, että kärki päättyy tasaiseksi.



Kuva 7. Kärjen geometrian vertailua. Vasemmalla puolella Napan luoma malli ja oikealla Viking Gracen potkurimalli, joka on saatu suoraan potkurivalmistajalta.

Potkurin geometrian lisäksi sille voidaan myös määrittää profiili yhden säteittäisjakauman mukaan. Napassa on oletuksena kaksi profiilia: NACA66A08 ja NACA66A10, mutta omien profiilien luonti on myös mahdollista.

Napan tuen kanssa käydyssä sähköpostikeskustelussa ilmeni, että oman profiilin luontia varten tarvitaan seuraavat tiedot:

- x/c : Etäisyys johtoreunasta kärkisuuraa c pitkin, tehty dimensiottomaksi kärkisuoran kokonaispituudella c
- $y_c(x)/f$: kaarevuus x/c :n funktiona, tehty dimensiottomaksi poikkileikkauksen kaarevuudella f
- $y_t(x)/t$: paksuus x/c :n funktiona, tehty dimensiottomaksi poikkileikkauksen paksuudella t

Lisäksi selvisi, että ei ole mahdollista lopettaa lavan profiilia yhteen pisteeseen, eli täysin teräväksi. Sen sijaan pienentämällä lavan profiilin pituuden erittäin pieneksi (kuitenkin >0), saadaan lavan kärjestä melko terävä. (Napa, 2015.)

5.3 Procal

Uusimpaan ohjelmistoversioon sisällytetty IGES-generaattori luo 3D-mallin ppg-tiedoston pohjalta ja sen lopulliseen geometriaan voidaan vaikuttaa Blade Geometry –välilehdellä olevalla Fraction of Outermost Section's Chord:n avulla. Tällä toiminnolla säädetään kärjen aluetta jouhevammaksi.

Paneloinnilla ei ole vaikutusta IGES-mallin geometriaan, sillä potkurin geometria muodostuu samanlaiseksi erilaisesta paneloinnista huolimatta, koska geometria luodaan ohjelman sisäisillä kaavoilla, joihin panelointi ei vaikuta.

Procal luo potkurista mallin, jonka halkaisija on aina kaksi metriä riippumatta sen oikeasta halkaisijasta. Tämän vuoksi malli täytyy skaalata 3D-mallinnusohjelmassa oikeaan halkaisijaan.

Toisin kuin Napan potkurityökalussa, Procal tarvitsee koko potkurin tiedot ppg-tiedostossa. Ensimmäiseksi määritetään potkurin ja navan halkaisijat, lapojen lukumäärä sekä säteittäisjakaumien ja lavan leikkausprofiilien lukumäärä. Tiedostossa annetaan seuraavat tiedot jokaisella säteittäisjakaumalla:

- r/R Säteittäisjakaumat ($0 < r/R \leq 1$)
- c/D Lavan kärkisuoran pituus halkaisijan suhteen
- skew[deg] Lavan kierto asteina
- rake/D Lavan kaltevuus halkaisijan suhteen
- P/D Nousu halkaisijan suhteen
- t/C Lavan suurin paksuus jaettuna kärkisuoralla
- f/C Lavan suurin kaarevuus jaettuna kärkisuoralla

Näiden jälkeen määritetään lavan leikkausprofiilit jokaisella säteittäisjakaumalla, jotka voidaan antaa kahdella eri tavalla. Ensimmäinen tapa on antaa leikkausprofiili koordinaattimuodossa, jossa tarvitaan paine- sekä imupuolen koordinaatit kärkisuorasta katsottuna. Koordinaatit tulee lisäksi jakaa kyseessä olevan säteittäisjakauman kärkisuoran pituudella. Toinen tapa on antaa tiedot lähestulkoon samoin kuin Napassa.

6 TULOKSET JA VERTAILU

6.1 Procalin validointi

Procalin validoinnissa kaikissa tapauksissa käytettiin samoja kontrollitiedoston asetuksia pois lukien mallikokeesta tarvittavat tiedot (kuva 8). Nämä asetukset poikkeavat numeroarvojen osalta oletusasetuksista, jotka löytyvät Procalin käyttöoppaasta. Lisäksi Geometry-välilehdeltä määritettiin radius smoothing - arvoksi 0,95.

The image shows two screenshots of the Procal software interface. The top screenshot displays the 'Wake Align' tab with the following settings:

- Alignment Mode: Fully Prescribed Wake
- Prescribed Pitch: Smooth trailing edge flow and tip vortex pitch near tip
- Prescribed Contraction: Min Contraction model
- Convergence Metric: RMS of wake corner point displacement is used to check convergence.
- Convergence Criterion: 0.01
- Relaxation: 0.2
- Number of Steps: 15
- X_RfarWake: 2
- Viscous Core: 0.0025

The bottom screenshot shows the 'SetPointIteration' tab with the following settings:

- Iteration:
- Iteration for cavitating flow:
- Convergence Criterion: 0.001
- Number Of Steps: 25
- Epsilon Jacobian: 0.01
- IPKC Model: All lifting surfaces are considered sequentially and are

Kuva 8. Validointitapauksissa käytetyt kontrollitiedoston asetukset.

Vertailun vuoksi laskennat suoritettiin sekä malli- että täysmittakaavassa, jotta tuloksista saataisiin mahdollisimmat tarkat. Kaikki esitetyt kuvaajat on tehty mallimittakaavassa.

6.1.1 Color Fantasyn Procal- sekä mallikoetulosten vertailu

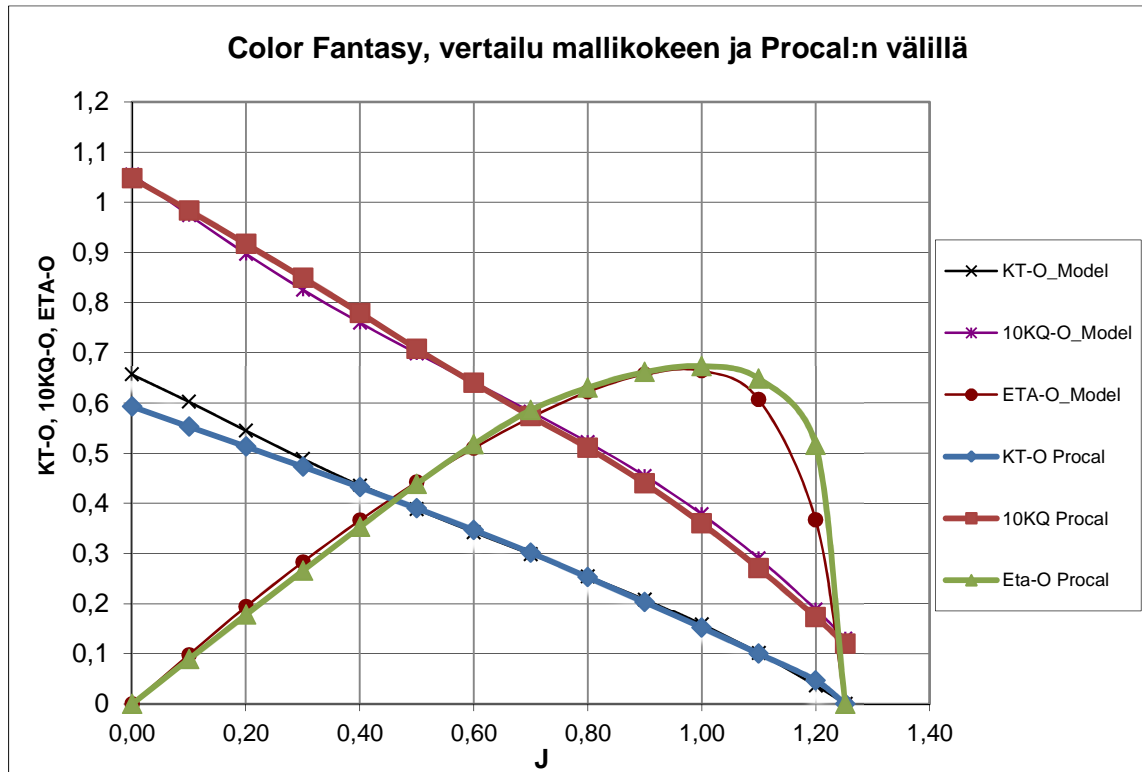
Color Fantasyn lopullisissa avovesilaskelmissa käytettiin kuvan 9 mukaisia asetuksia, joissa vaihdettiin panelointia 25x25:stä 45x45 ja 60x60.

The image shows the Procal software interface with the following settings:

- BladeSection Tab:**
 - Close Trailing Edge Method: Quad Adjustment
 - Finite Tip Check:
 - Fraction of Outermost Section's Chord: 0.4
 - Rotated Diameter: 2
 - Pitch Adjustment (Deg): 0
 - Rotated Pitch Angle (Deg): 30.495
 - Rotated Pitch Radius: 0.7
 - Rotated Pitch P/D: 1.295
- BladeSection Tab (Expanded):**
 - Distribution: TANH
 - Blade:**
 - # Panels LE to TE: 25
 - # Panels Root to Tip: 25
 - Spacing at LE: 0.001
 - Spacing at TE: 0.001
 - Spacing at Root: 0.002
 - Spacing at Tip: 0.001
 - LE Grid Adjustment: 0.5
 - # Deleted Tip Rows: 0
 - Sym Coarse: 1
 - Radial Distribution:
 - Smooth Blade: [Button]
 - Hub:**
 - # Panels LE to US: 25
 - # Panels TE to DS: 25
 - # Panels Across: 10
 - # Panels Stat: 49
 - Spacing at US: 0.01
 - Spacing at Root: 0.007
 - Spacing at DS: 0.01
 - Spacing at Trans: 0.02
 - Sym Coarse: 1
 - Smooth Hub: [Button]
 - Skew Angle Last Element TE: 38.58692
 - Smoothing Panel:**
 - Smoothing [Help]
 - Use Parametric Smoothing
 - Type: Thomas Middleccff
 - Max Iteration: 500
 - Tolerance: 0.01
 - Relax Factor: 0.18
 - Constraint: xi
 - Up Decay: 0.3
 - Down Decay: 0.3
 - Roct0 Decay: 0.3
 - Roct1 Decay: 0.3
 - Total Smooth: 2500
 - Smooth More: [Button]
 - Smooth Reset: [Button]

Kuva 9. Color Fantasyn laskenta-asetukset

Käytetyillä asetuksilla saatiin hyvät ja vertailukelpoiset avovesikäyrät, jotka ovat esitetty kuviossa 2.



Kuvio 2. Color Fantasyn avovesikäyrästöjen vertailua.

Kuviosta voidaan havaita, että alussa erot KT-käyrissä ovat selviä, mutta erot pienenevät todella pieniksi, kun $J > 0,4$. Hyötysuhteen käyrät menevät melko hyvin päällekkäin, mutta huipun jälkeen Procal yliennustaa hyötysuhteen arvon. Tämä selittyy 10KQ-käyrän eroilla kyseisillä etenemisluvuilla.

Vertailun vuoksi laskennat suoritettiin myös 45x45 ja 25x25 – paneloinnilla. Näiden laskenta-ajat poikkesivat huomattavasti kuvaajassa käytetystä 60x60-paneloinnista, jonka laskenta-aika oli 44 minuuttia. 45x45-paneelin laskenta-aika oli kymmenen minuuttia ja 25x25-paneelin laskenta-aika noin minuutin. Tiheämmällä paneloinnilla voisi olla mahdollista saada hieman tarkempia tuloksia, mutta tällöin laskenta-aika kasvaa suuremmaksi. Täytyy kuitenkin huomioida, että laskenta-aika on täysin riippuvainen käytetyn koneen tehoista/muistista, joten paremmalla tietokoneella tiheämmän paneloinnin laskenta-aika voisi olla huomattavasti vähemmän kuin nyt.

Taulukossa 1 on esitetty avovesikertoimien ero mallikokeeseen verrattuna vähentämällä laskennasta saatu arvo mallikokeen arvolla.

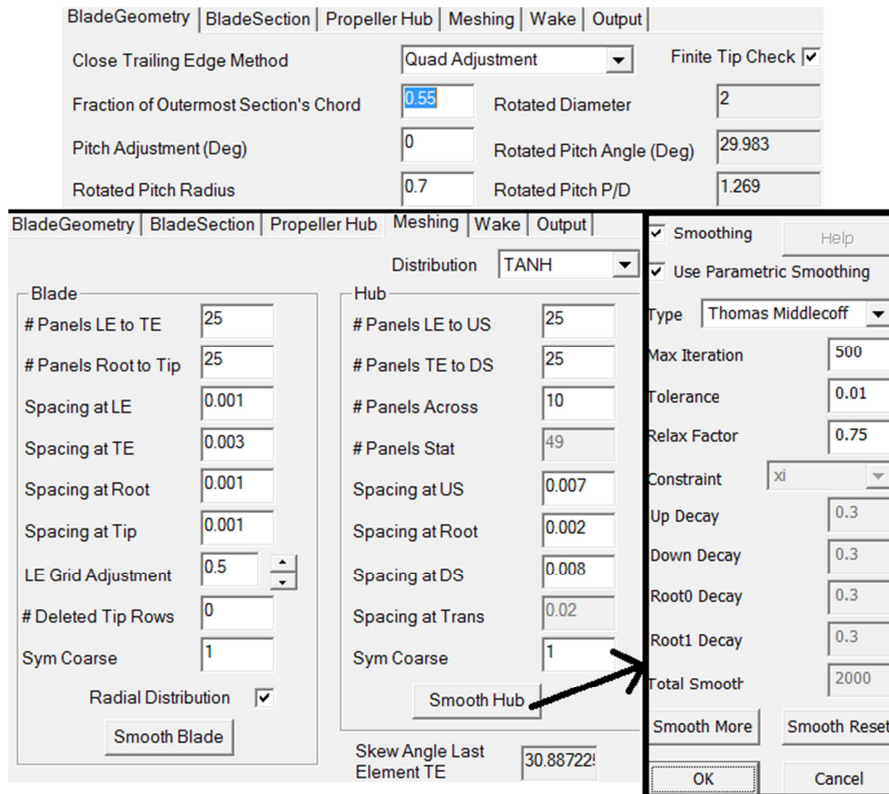
Taulukko 1. Paneloinnin vaikutus avovesikertoimiin.

J	25x25			45x45			60x60		
	Kt	10Kq	Eta	Kt	10Kq	Eta	Kt	10Kq	Eta
0,0	-0,0798	-0,0452	0,0000	-0,0673	-0,0132	0,0000	-0,0644	-0,0072	0,0000
0,1	-0,0622	-0,0210	-0,0078	-0,0522	0,0034	-0,0084	-0,0499	0,0089	-0,0085
0,2	-0,0422	-0,0036	-0,0147	-0,0344	0,0154	-0,0157	-0,0326	0,0197	-0,0159
0,3	-0,0240	0,0056	-0,0156	-0,0181	0,0201	-0,0169	-0,0167	0,0235	-0,0172
0,4	-0,0102	0,0057	-0,0113	-0,0059	0,0169	-0,0129	-0,0049	0,0196	-0,0133
0,5	-0,0018	-0,0023	-0,0008	0,0013	0,0065	-0,0028	0,0021	0,0087	-0,0033
0,6	0,0016	-0,0131	0,0133	0,0038	-0,0032	0,0085	0,0044	-0,0009	0,0075
0,7	0,0005	-0,0212	0,0228	0,0023	-0,0115	0,0160	0,0027	-0,0092	0,0146
0,8	-0,0045	-0,0223	0,0163	-0,0026	-0,0132	0,0097	-0,0021	-0,0112	0,0083
0,9	-0,0090	-0,0261	0,0103	-0,0063	-0,0171	0,0055	-0,0056	-0,0150	0,0045
1,0	-0,0105	-0,0318	0,0128	-0,0065	-0,0211	0,0101	-0,0056	-0,0186	0,0094
1,1	-0,0073	-0,0374	0,0393	-0,0017	-0,0231	0,0416	-0,0005	-0,0198	0,0415
1,2	0,0012	-0,0385	0,1088	0,0089	-0,0197	0,1436	0,0107	-0,0153	0,1494
1,3	0,0000	-0,0370	0,0000	0,0000	-0,0154	0,0000	0,0000	-0,0103	0,0000

Kuten taulukosta voidaan havaita, suuremmalla paneelimäärällä saatiin hieman tarkempia tuloksia. Laskenta-ajat kuitenkin kasvavat kuitenkin jopa 44-kertaiseksi verrattuna harvempaan panelointiin.

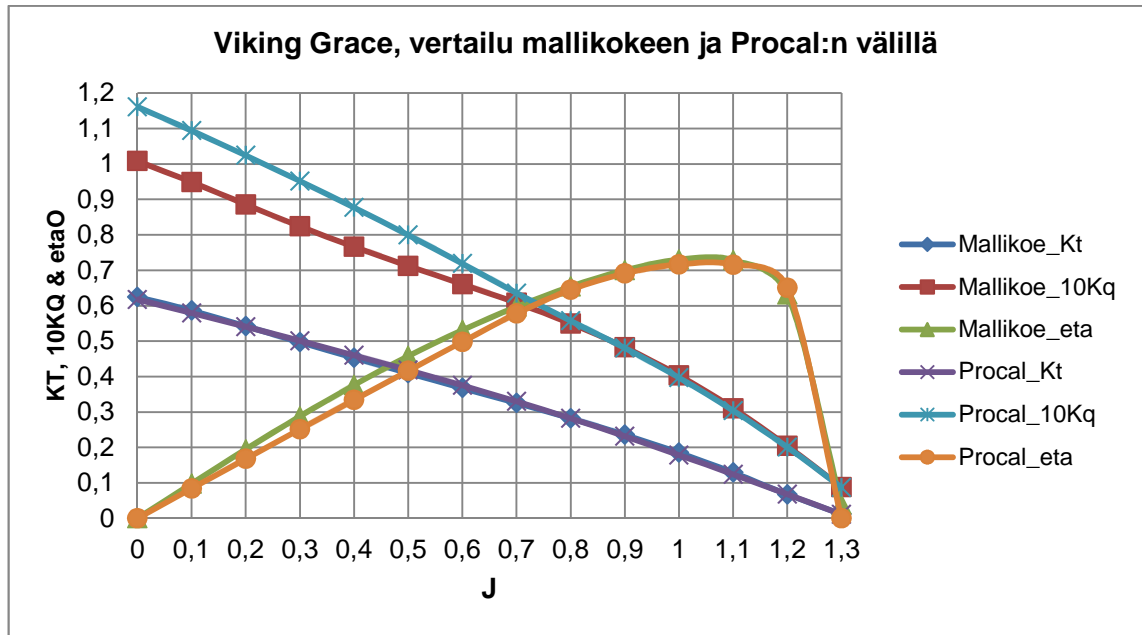
6.1.2 Viking Gracen mallikoepotkuri sekä lopullinen potkuri

Viking Gracen potkurilaskennassa käytettiin kuvan 10 mukaisia asetuksia, jonka paneloinnin arvot ovat lähes samoja kuin Color Fantasyn tapauksessa. Kuten aiemmin, tässäkin tapauksessa käytettiin 25x25, 45x45 sekä 60x60-panelointia.



Kuva 10. Viking Gracen laskenta-asetukset.

Verrattaessa avovesikäyrästäjä (kuvio 3) voidaan huomata, että Procalilla päästään lähestulkoon samoihin tuloksiin kuin mallikokeessa, kun $J > 0,8$. Pienemmillä etenemisluvuilla KT-käyrät menevät päällekkäin, mutta 10KQ-käyrissä on suuria eroavaisuuksia, joka vaikuttaa suoraan myös hyötysuhteen käyrien pieniin eroavaisuuksiin. Nämä erot voivat selittyä sillä, että ppg-tiedosto ei välttämättä ole täysin oikein, koska se on muunnettu 3D-mallista Marin mallikoelaitoksen ohjelmalla.



Kuvio 3. Viking Gracen mallikoeputkurin ja Procalin avovesikäyrästäjien vertailua.

Taulukossa 2 on esitetty avovesikertoimien ero mallikokeeseen verrattuna vähentämällä laskennasta saatu arvo mallikokeen arvolla.

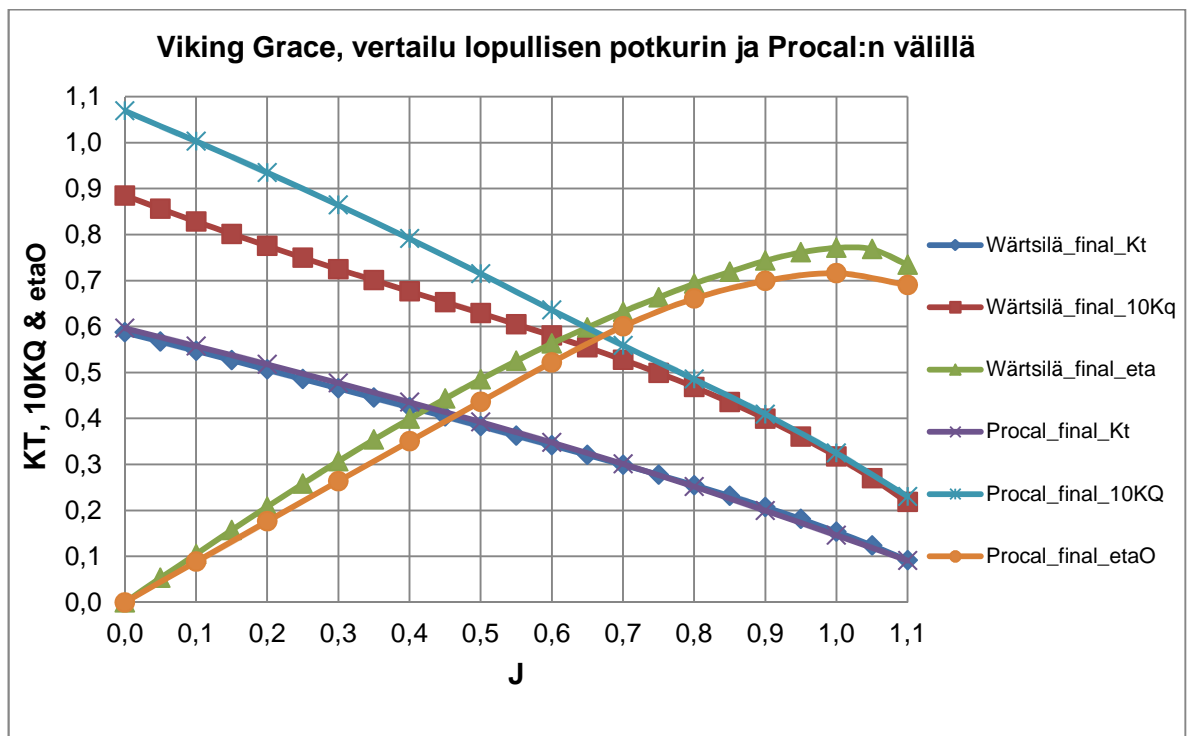
Taulukko 2. Viking Gracen mallikoeputkuri.

J	25x25			45x45			60x60		
	Kt	10Kq	Eta	Kt	10Kq	Eta	Kt	10Kq	Eta
0	-0,0072	0,1511	0,0000	-0,0078	0,1511	0,0000	-0,0072	0,1531	0,0000
0,1	-0,0064	0,1430	-0,0135	-0,0072	0,1430	-0,0136	-0,0068	0,1450	-0,0137
0,2	-0,0012	0,1374	-0,0265	-0,0021	0,1364	-0,0267	-0,0018	0,1384	-0,0269
0,3	0,0046	0,1277	-0,0361	0,0035	0,1266	-0,0364	0,0037	0,1279	-0,0366
0,4	0,0086	0,1113	-0,0413	0,0074	0,1100	-0,0416	0,0076	0,1111	-0,0419
0,5	0,0097	0,0875	-0,0409	0,0086	0,0863	-0,0413	0,0087	0,0871	-0,0417
0,6	0,0082	0,0584	-0,0321	0,0073	0,0573	-0,0326	0,0074	0,0581	-0,0330
0,7	0,0050	0,0269	-0,0170	0,0042	0,0269	-0,0183	0,0044	0,0277	-0,0188
0,8	0,0005	0,0052	-0,0055	0,0000	0,0066	-0,0082	0,0002	0,0077	-0,0091
0,9	-0,0042	-0,0058	-0,0039	-0,0044	-0,0035	-0,0079	-0,0042	-0,0022	-0,0090
1	-0,0071	-0,0106	-0,0086	-0,0068	-0,0078	-0,0126	-0,0064	-0,0064	-0,0134
1,1	-0,0064	-0,0125	-0,0070	-0,0054	-0,0082	-0,0115	-0,0048	-0,0065	-0,0120
1,2	-0,0017	-0,0121	0,0233	0,0000	-0,0056	0,0184	0,0008	-0,0034	0,0189
1,3	-0,0041	-0,0131	-0,0390	-0,0016	-0,0038	-0,0390	-0,0006	-0,0009	-0,0390

Taulukosta voidaan havaita, että tiheämmällä paneloinnilla ei aina saada tarkempia tuloksia. Erot eri panelointien välillä ovat kuitenkin verrattain pieniä. Hyötysuhteen erot näyttävät sen, että Procal laskee hieman alakanttiin hyötysuhteen. Kokonaisuudessaan erot mallikoe- ja laskentatulosten välillä ovat kuitenkin todella pieniä.

Taulukon luvut ovat esitetty desimaalimuodossa ja prosenttiyksikölliset erot saadaan kertomalla lukuarvo 100:lla.

Lopulliselle potkurille ei ole tehty mallikoetta, vaan sen avovesikäyrä on laskettu Wärtsilän toimesta, jolle on lisäksi tehty Marin mallikoelaitoksen 3D-ekstrapolointi. Ainoa muutos, joka potkuriin on tehty, on nousun vähennys noin 5 %, jolloin saadaan lisättyä potkurin kierrosnopeutta. Kuviosta 4 voidaan todeta, että 10KQ- sekä hyötysuhdekäyrät poikkeavat toisistaan todella selvästi.

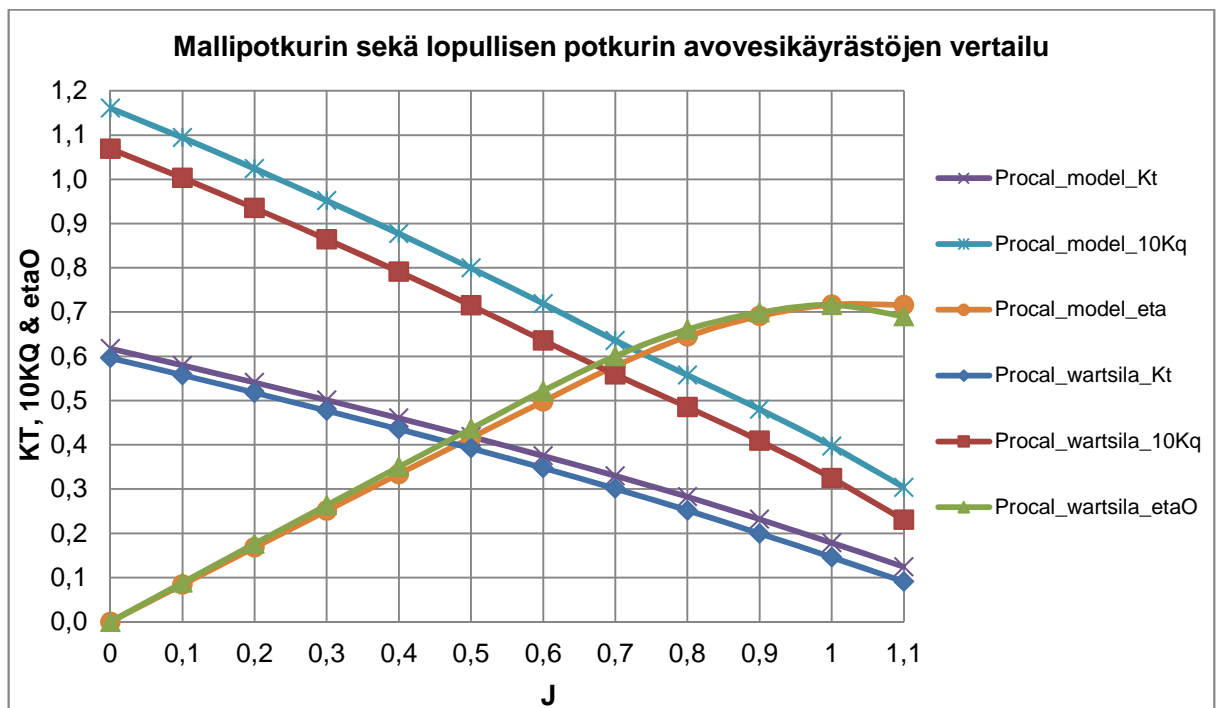


Kuvio 4. Viking Gracen lopullisen potkurin ja Procalin avovesikäyrästöjen vertailua.

Tulokset kertovat kuitenkin sen, että suuremmilla (>0,9) etenemisluvuilla 10KQ-käyrät vastaavat hyvin toisiaan. Hyötysuhdekäyrät eivät mene kuitenkaan tällöin

päällekkäin, koska KT-käyrissä on pientä eroavaisuutta. Tämän tapauksen validointia ei voida pitää täysin luotettavana, koska potkurin avovesikäyrästä on saatu laskennallisesti, eikä mallikokeen avulla.

Verratessa molempien potkurimallien Procalista saatuja tuloksia voidaan havaita, että 5 % nousun vähennyksellä näyttäisi siltä, että Procalin mukaan nousun vähennys ei vaikuta 10KQ-käyrään pienillä etenemisluvuilla niin suuresti kuin Wärtsilän laskujen mukaan (kuvio 5).



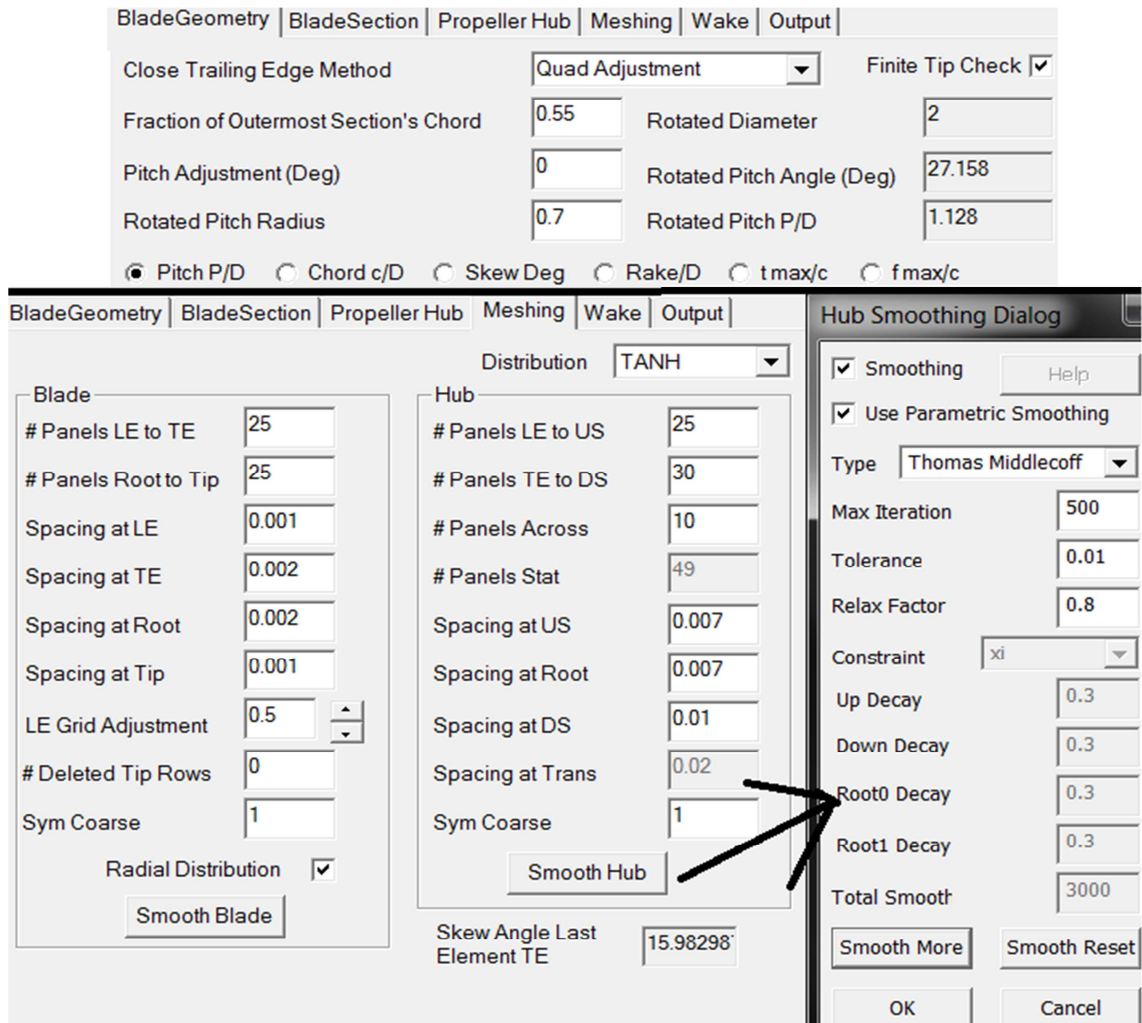
Kuvio 5. Potkurimallien Procal-tulosten vertailu.

Myös hyötysuhteen käyrissä havaitaan selviä eroavaisuuksia Wärtsilän laskuissa sekä Procal-vertailussa, jonka mukaan hyötysuhde pysyy lähes samana.

6.1.3 Voyager of the Seas

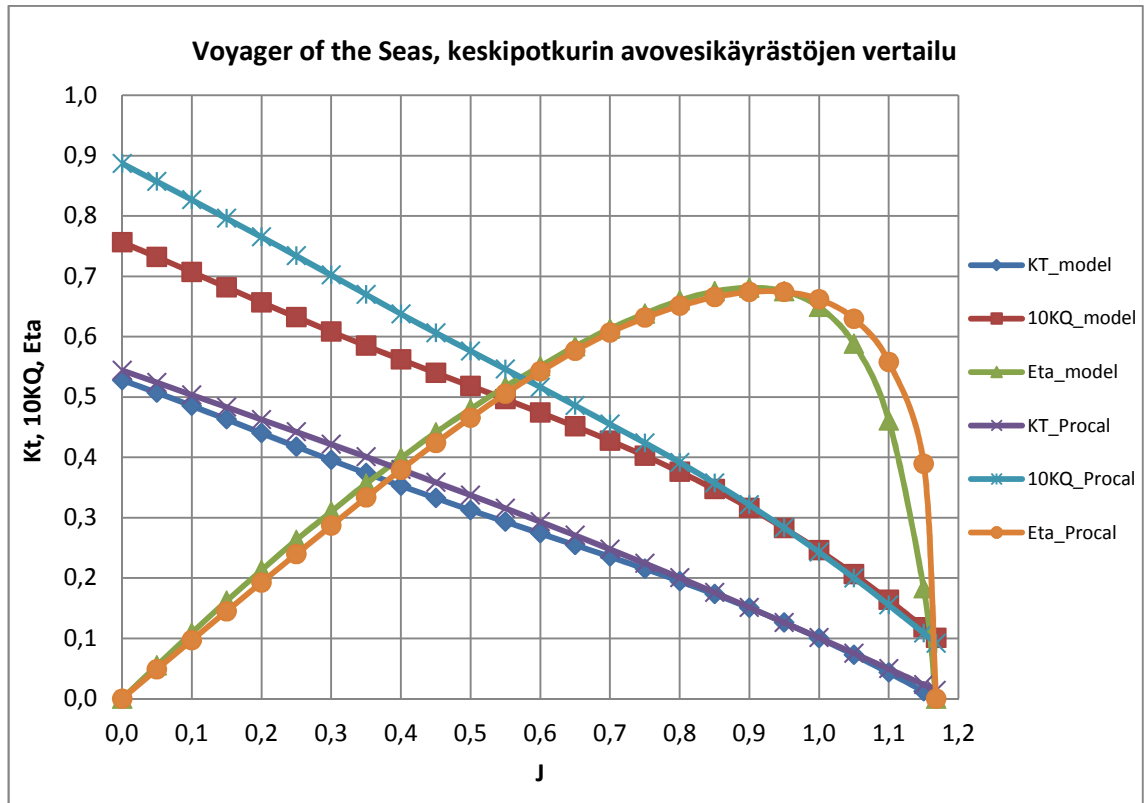
Molempien potkureiden vovesilaskennat suoritettiin 25x25, 45x45 sekä 60x60 paneloinnilla. Kuvassa 11 on esitetty keskipotkurin asetukset. Laskenta-asetukset poikkeavat hieman toisistaan navan paneloinnin sekä Fraction of

Outermost Section's Chord:n, jonka avulla voidaan muokata kärjen geometriaa, suhteen. Muuten asetukset ovat samanlaiset.



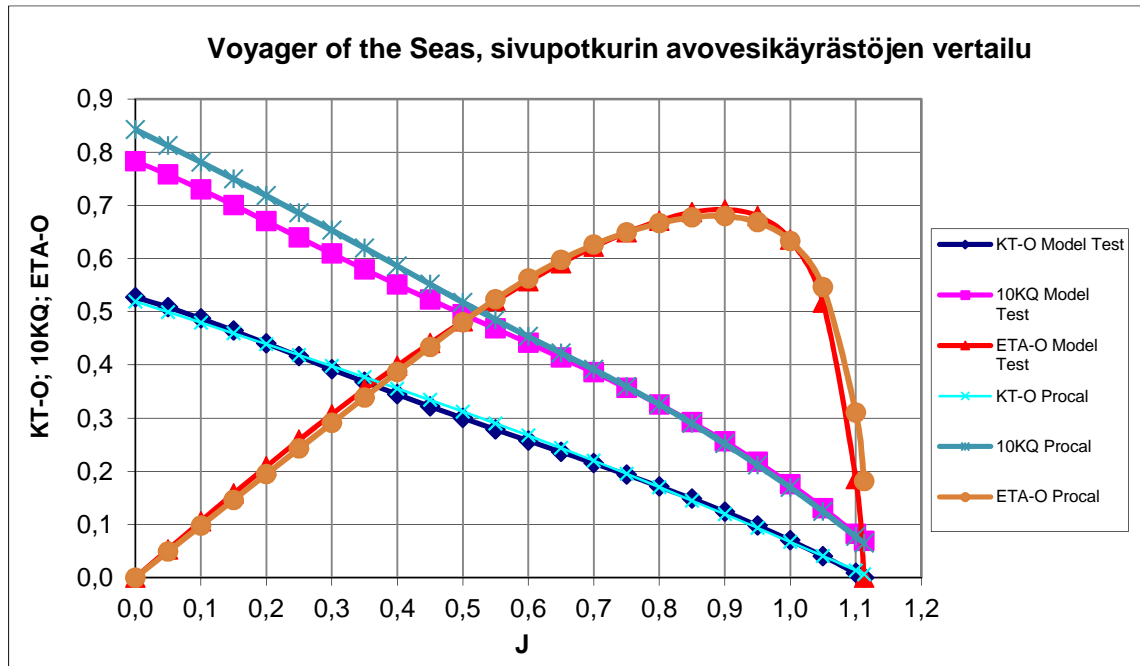
Kuva 11. Voyager of the Seas:n keskipotkurin asetukset.

Kuten kuviosta 6 voidaan havaita, keskipotkurin KT-käyrät eroavat selvästi toisistaan etenemisluvun ollessa alle 0,8. Lisäksi 10KQ-käyrässä on todella suuria eroja alussa, mutta ne menevät todella pieniksi, kun $J > 0,9$. Hyötysuhdekäyrät menevät myös lähestulkoon päällekkäin alun eroista huolimatta, kun $J < 1$, mutta tämän jälkeen Procal yliarvioi hyötysuhteen. Laskennasta saatu hyötysuhteen huippu vastaa mallikokeen arvoa todella hyvin.



Kuvio 6. Voyager of the Seas:n keskipotkurin mallikokeen ja Procalin avovesikäyrät.

Sivupotkurin avovesikäyröjen laskenta (kuvio 7) onnistui selvästi paremmin kuin keskipotkurin, sillä tässä tapauksessa erot ovat todella pieniä kaikilla käyrillä lukuunottamatta 10KQ-käyrän selviä eroja, kun $J < 0,6$. Laskettu hyötysuhteen käyrä menee huipun kohdalla hieman alempana kuin mallikokeen ja kyseessä on noin kahden prosenttiyksikön heitto mallikokeen arvoon nähden.



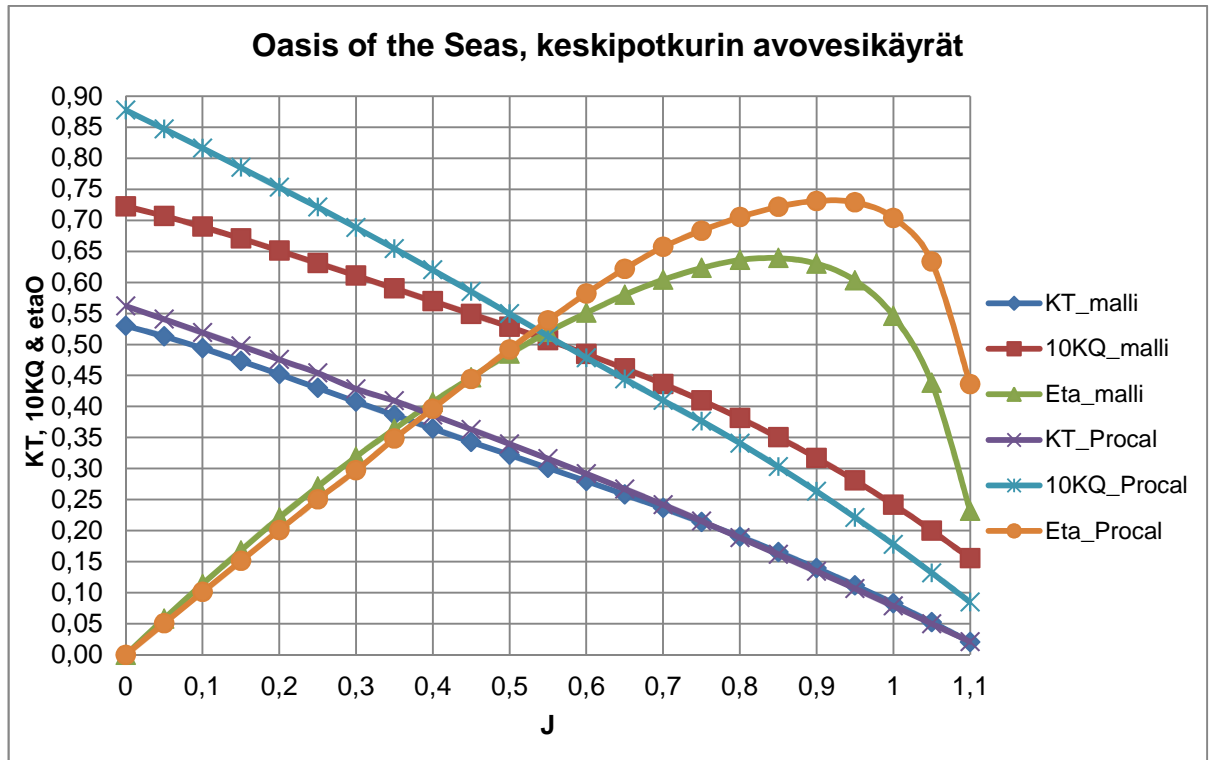
Kuvio 7. Voyagerin mallikokeessa käytetyn sivupotkurin ja Procalin avovesikäyrästöjen vertailua.

Molempien tapausten kohdalla käytettiin lähes samoja asetuksia, joten mahdolliset erot voivat selittyä esimerkiksi ppg-tiedoston mahdollisista virheistä. Myös potkurin geometria saattaa vaikuttaa tuloksiin, koska se voi vaatia täysin erilaiset asetukset niin kontrollitiedostoon kuin panelointiin.

6.1.4 Oasis of the Seas

Oasis of the Seas:n potkureissa käytettiin samoja asetuksia kuin Voyagerin tapauksessa.

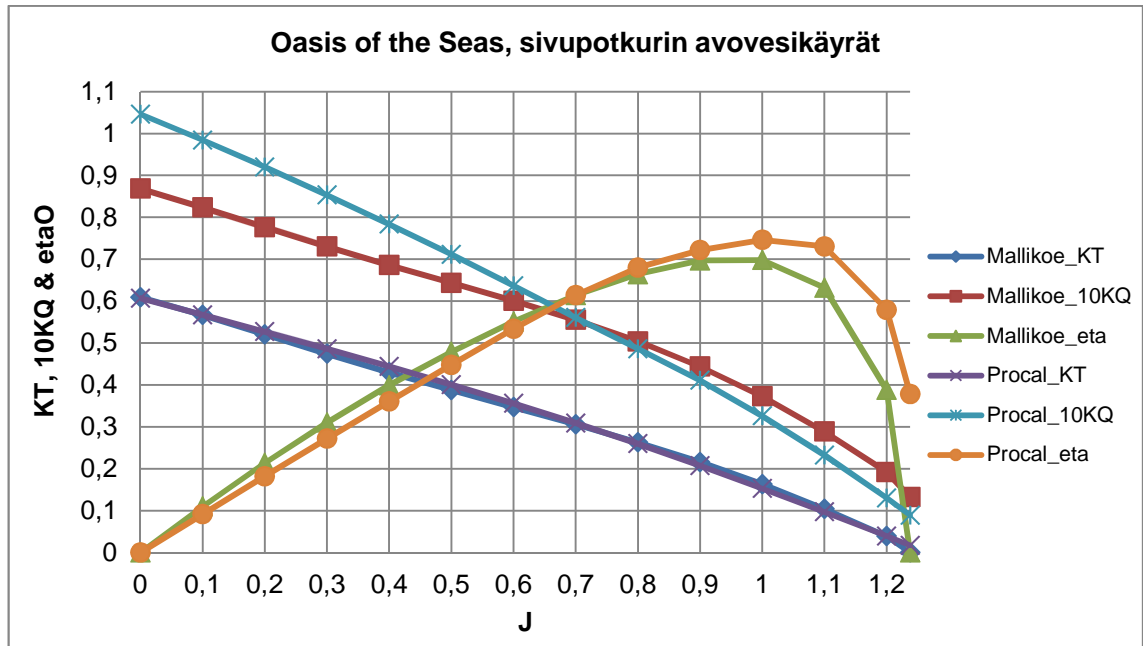
Potkureiden mallikoetuloksia ei voida täysin verrata laskentatuloksiin, koska laskennassa ei käytetty podia (kuviot 8 ja 9). Ainoastaan KT-käyrät näyttävät menevän lähes päällekkäin pieniä poikkeuksia lukuun ottamatta. Aiempiin tuloksiin verrattuna tämän potkurin tulokset eivät ole millään tavalla luotettavia. Kuvioista voitaneen kuitenkin havaita podimallin ja avopotkurin vaikutus avovesikäyrästöön.



Kuvio 8. Oasis of the Seas:n keskipotkurin mallikokeen ja Procalin avovesikäyrästä.

Molempien kuvioden laskennassa saadut 10KQ-käyrät menevät pienemmillä etenemislukuilla reilusti yläkanttiin. Leikkauskohdan jälkeen käyrät menevät hieman alakanttiin.

Hyötysuhdekäyrät ovat keskivaiheille saakka lähes päällekkäin, mutta sen jälkeen ne menevät reilusti yläkanttiin mallikoetuloksiin verrattuna. Tämä selittyy 10KQ-käyrien eroilla. Pienempi 10KQ-käyrä tarkoittaa suurempaa hyötysuhdetta.

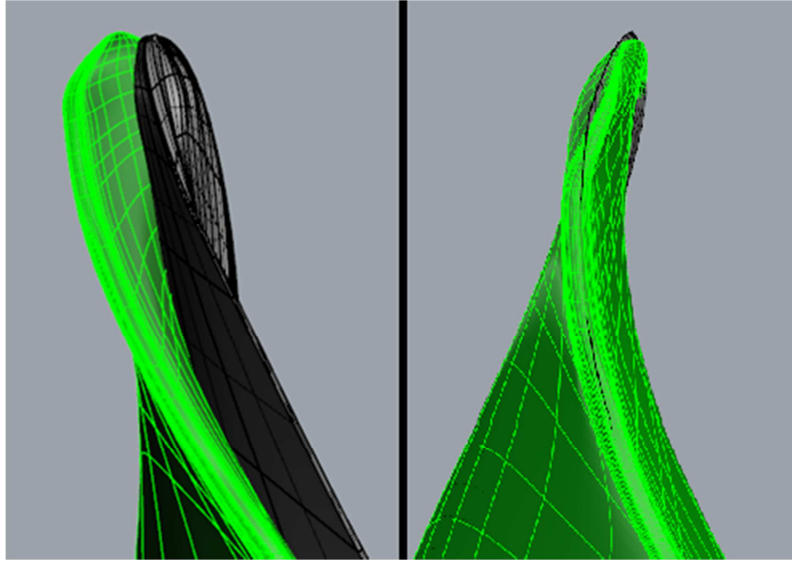


Kuvio 9. Oasis of the Seas:n sivupotkurin mallikokeen ja Procalin avovesikäyrästä.

Tuloksista voidaan tehdä selvä johtopäätelmä siitä, että ilman podia laskettu tulos ei ole luotettava, koska erot ovat osittain todella suuria. Mikäli potkurista olisi ollut pod-tiedosto saatavilla, validointi olisi voinut onnistua huomattavasti paremmin.

6.2 Geometrian siirto

Color Fantasystä luotiin 3D-mallit sekä Procalilla että Napalla. Napan mallissa käytettiin ppg-tiedostoa, jonka avulla luotiin Napaan sopiva taulukkomuoto. Mallit laitettiin Rhinoceros-ohjelmassa mahdollisimman hyvin päällekkäin, jotta mahdolliset erot tulevat esille. Kuten kuvasta 12 voidaan nähdä, Napalla luodulla mallilla on eri kaltevuus kärjen alueella kuin valmistajan mallissa kun taas Procal luo kärjen terävyyttä lukuun ottamatta vastaavan mallin kuin valmistajakin. Napan mallissa näkyvä kaltevuuden ero tarkoittaa suoraan sitä, että kyseisellä mallilla ei voida saada CFD-laskennoissa samoja tuloksia kuin mallikokeessa, koska geometriat ovat erilaiset.



Kuva 12. Color Fantasyn 3D-mallien vertailu. Vasemmalla Napan vertailu, jossa valmistajan malli on vihreä ja Napalla luotu malli on harmaa. Oikealla Procalilla luotu malli, jossa valmistajan malli on vihreä ja Procalilla luotu malli on harmaa.

Vertailun vuoksi myös Viking Gracen potkurin lapa laitettiin päällekkäin Procal-mallin kanssa ja tulos oli samanlainen kuin Color Fantasyn tapauksessa: kärki terävöityy aiemmin kuin mallissa. Lisäksi Gracen lavan juuressa oli pieni ero paksuudessa (Procal-mallin lavan paksuus oli pienempi kuin valmiin mallin). Kuten validointiosuudessaakin, ero voi johtua Gracen potkurin ppg-tiedostosta, joka on muunnettu suoraan 3D-mallista Marin mallikoelaitoksen ohjelmalla.

Procalin mallin kärjen terävyys voi osoittautua ongelmaksi Cadfix-ohjelmassa sen terävyyden vuoksi. Terävyys johtuu Procalin sisäisistä laskenta-algoritmeista, jotka sulkevat kärjen automaattisesti, kun paksuus, kärjen pituus ja kaarevuus on nolla (kohdassa $R=1$, ellei kärjen geometria ole tarkemmin tiedossa). Ohjeissa suositellaan käyttämään nolla-arvoa, kun kyseiset arvot ovat lähellä nollaa. Terävöityminen alkaa suurimmasta säteittäsjakaumasta, joka on kuitenkin alle yksi. Useimmiten se alkaa siis kohdasta $R=0,975$ tai $R=0,99$.

7 YHTEENVETO

7.1 Validointi

Procalilla saadaan verrattain hyviä ja mallikoetta vastaavia tuloksia, mutta ilman mallikokeiden vertailuarvoja ei voida tarkasti ja luotettavasti todeta, millä paneloinnin arvoilla ja/tai kontrollitiedoston laskentavalinnoilla saatu tulos on luotettava.

Saadut tulokset näiden potkureiden (poislukien Oasis, jonka mallikokeessa käytettiin podia) osalta osoittavat, että ohjelmalla saadaan laskettua mallikoetta vastaavia tuloksia pienin poikkeuksin, kuten 10KQ-käyrän yliarvioiminen pienemmillä etenemisluvuilla. Procalin kehittäjän Johan Bosschersin mukaan 10KQ-käyrän yliarvioiminen on Procalille tyypillistä pienillä etenemisluvuilla. Lisäksi täytyy huomioida, että ppg-tiedosto ei aina ole valmistajan laatima. Esimerkiksi Gracen tapauksessa ppg-tiedosto ei ollut valmistajan laatima. Tämä voi osaltaan aiheuttaa epätarkkuutta tuloksissa.

Laskennasta saatuja tuloksia voisi olla mahdollista käyttää esimerkiksi suunnitteluvaiheessa sekä potkuriin tehtäviin geometrian muutosten vaikutusten analysointiin.

Vielä paremman luotettavuuden vuoksi validoinnin pitäisi kuitenkin sisältää useampia potkureita ja lisäksi olla vielä enemmän systemaattista ja jokainen tilanne tulisi arkistoida siten, että käytetyt laskenta-asetukset voi yhdistää saatuihin tuloksiin. Tämä yhdistettynä useisiin tapauksiin/erityyppisiin potkureihin antaa tarkemman käsityksen ohjelman toiminnasta.

7.2 Geometrian siirto

Napan potkurimallintajan ongelmaksi muodostui kärjen geometria sekä profiili, joka sisältää vain yhden säteittäisjakauman. Yhden säteittäisjakauman mukaan

määritetty profiili aiheuttaa epätarkkuuksia geometriassa, koska tällöin oikea profiili jollain muulla säteittäisjakaumalla voi todellisuudessa olla erilainen.

Potkurivalmistajien tarjoamat taulukot ovat pääasiallisesti helppo muuntaa ppg-muotoon, elleivät ne ole jo suoraan sellaisessa muodossa, jolloin Napan mallintajan käyttö voi jäädä Procalin varjoon. Napan ohjeista voi myös saada sellaisen käsityksen, että työkalu onkin tarkoitettu lähinnä mittojen tarkistamiseen eikä esimerkiksi CFD-laskentaan.

Procalilla luotu 3D-malli vastaa todella hyvin valmista mallia, joten tämän ohjelman käyttö geometrian siirrossa on Napaan verrattuna suositeltava vaihtoehto. Kärjen terävyyden ongelmat voivat olla haaste Cadfixille, mutta mikäli ongelmia ei ilmene, on ohjelmalla saatu malli käypä vaihtoehto CFD-laskentaan. Täytyy kuitenkin huomioida, että kärjen suuri terävyys voi vaikuttaa laskentatuloksiin ja esimerkiksi kavitointiin ja/tai kärkipyörteisiin mikäli suoritetaan kavitointilaskentaa.

Alun perin tarkoituksena oli tehdä CFD-laskennalla vertailevaa laskentaa potkureilla, jotka oli luotu Procalilla ja joilla olisi voinut verrata Procalin ja CFD-laskennan tuloksia samoilla potkurimalleilla. Rajallisen ajan sekä laskentakapasiteetin vuoksi ei ollut mahdollista suorittaa kyseisiä laskentoja.

Telakalla CFD-laskennasta vastaava Pekka Eivola kuitenkin uskoo, että Procalilla luoduista 3D-malleista on mahdollista saada luotua Parasolid-tilavuusmalli Cadfixin avulla, jolloin laskenta on mahdollista (Eivola, P. Haastattelu 01.06.2015).

LÄHTEET

Bosschers, J. 2013. Procal User Guide. Wageningen: Marin.

Jukola, H. 2013. Esitelmä potkurin suunnittelusta Steerpropilla. Steerprop Oy.

Marin 1998. Calm water model tests for RCCL passenger cruiser Eagle. Wageningen: Marin.

Marin 2004. Calm water tests with designed propellers for a Color Line cruise ferry. Wageningen: Marin.

Marin 2007. Calm water model tests for a large cruise liner. Wageningen: Marin.

Marin 2012. Medium speed Baltic ferry for Viking Line; calm water model tests with stock and designed propellers. Wageningen: Marin.

Marin 2013. User's guide Procal baseline code version 2.213.

Matusiak, J. 2005. Laivan propulsio. Helsinki: Picaset Oy.

Meyer Turku 2015. Yritysprofili Meyer Turku. Viitattu 01.06.2015. Intranet.

Rhinoceros www-sivut 2015. New. Viitattu 11.3.2015. <https://www.rhino3d.com/new/>.

Räisänen, P. (toimittanut) 2000. Laivatekniikka, Modernin laivarakennuksen käsikirja. Turku: Turun ammattikorkeakoulu.