

Opinnäytetyö (YAMK)
Kone- ja meriteknikka
2021

Teemu Nieminen

ALUKSEN CFD-LASKENTA AALLOKOSSA

Teemu Nieminen

ALUKSEN CFD-LASKENTA AALLOKOSSA

- Täyden mittakaavan mallinnus

Opinnäytetyö toteutettiin osana Elomatic Oy:n kehityshanketta, jossa tavoitteena oli kehittää uusia teknisenlaskennan tapoja ja sovellutuksia. Opinnäytetyössä tutkittiin alle 20 m pitkän venekokoluokan aluksen simulointiin. Opinnäytetyön tavoitteena oli simuloida venekokoluokan alus aalto-olosuhteissa. Simuloinnissa keskityttiin erityisesti kuvaamaan aallon iskuista muodostuvia voimia aluksen keulassa sekä seuraamaan aluksen liikkeitä.

CFD-simuloinnissa käytettävä geometria käsiteltiin SpaceClaim ohjelmalla, jonka jälkeen se siirrettiin simulointia varten STAR CCM+ ohjelmaan. Simulointiohjelmassa rakennettiin laskentamalli, valittiin tarvittavat fysikaaliset ratkaisijat sekä luotiin laskenta-alueelle halutut olosuhteet.

Simulointi onnistui suunnitelmien mukaisesti ja työn tuloksena saatiin mallinnettua varsin luotettavasti aluksen liikkeitä sekä iskuista aiheutuvat painepiikit, jotka kuormittavat alusta. Opinnäytetyössä päästiin sille asetettuihin tavoitteisiin ja opinnäytetyön pohjalta on mahdollista jatkaa aaltolaskennan kehitystä edelleen.

ASIASANAT:

CFD, aalto, aallokko, isku, laivan liikkeet.

MASTER'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Master's Degree Programme in Mechanical and Marine Engineering

Spring 2021 | 43 pages

Teemu Nieminen

CFD MODELLING OF SHIP IN WAVES

- Full scale simulation

The present study was carried out as part of Elomatic Ltd's development project, which aims to develop new ways and applications for technical calculus. The thesis focuses on the simulation of a boat size less than 20 m long. The goal of the thesis is to simulate a boat size ship in wave conditions. The simulation focuses specifically on depicting forces forming from wave impacts on the bow of the ship, as well as monitoring the movements of the ship.

The geometry used in the CFD simulation was processed by the SpaceClaim program, then transferred to the STAR CCM+ program for simulation. In the simulation program, a calculation model was constructed, the necessary physical solvers were selected and the desired conditions for the calculation area were created.

The simulation was successful as planned and the work resulted in a relatively plausible modelling of the ship's movements as well as of the pressure spikes resulting from the impacts which load the ship. The thesis achieved its objectives and, on the basis of the thesis, it is possible to continue the development of wave calculus further.

KEYWORDS:

CFD, wave, slamming, ship movements

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	7
1 JOHDANTO	8
2 OPINNÄYTETYÖ OSANA KEHITYSPROJEKTIA	9
2.1 Elomatic Oy	9
2.2 Kehityshanke	9
3 VIRTAUSLASKENTA (CFD)	11
3.1 CFD:n historia ja kehitys	11
3.2 Navier-Stokesin yhtälöt	11
3.3 Tietokoneella suoritettava virtauslaskenta	12
3.4 CFD:ssä käytetyt koodit	14
4 KÄYTETYT OHJELMISTOT	15
4.1 Cad-ohjelmisto SpaceClaim	15
4.2 Virtauslaskentaohjelmisto STAR CCM+	15
5 LÄHTÖTIETOJEN VALINTA	16
5.1 Aluksen nopeuden valinta	16
5.2 Aallokon valinta	16
5.2.1 Aalto	17
6 VIRTAUSLASKENTAMALLIN LUONTI	19
6.1 Simuloitavan aluksen valinta.	19
6.2 Simulointimallin esikäsittely	19
6.2.1 Simuloitavan aluksen valmistelu.	19
6.2.2 Laskenta-alueen luonti	21
6.2.3 Verkotus	24
7 SIMULOINTI	27
7.1 Simulointiin käytetty laskentaklusteri	27
7.2 Simulaation asetukset	27
7.2.1 Alueasetukset	27
7.2.2 Fysikaalisten mallien valinta	28

7.2.3 Simuloinnin aaltomalli	28
7.2.4 Aluksen liike	29
7.2.5 Käytetyt väliaineet	29
7.2.6 Overset meshin käyttö	30
8 MALLIN KEHITYS	31
8.1 Adaptiivinen laskentaverkko	31
8.2 Pituussuuntainen liike	32
9 LASKENTATULOSTEN TARKASTELU	35
9.1 Aaltokuvion silmämääräinen tarkastelu	35
9.2 Aluksen kulkuvastus	36
9.3 Aluksen liikkeet aallokossa	36
9.4 Iskuilmiön havainnollistaminen painekentällä	38
9.5 Tulosten todenmukaisuuden arviointi	39
10 LOPUKSI	41
LÄHTEET	42

KUVAT

Kuva 1. Navier-Stokesin yhtälöt (National aeronautics and space administration, 2021)	12
Kuva 2. Virtaus kuvattuna laskentaverkossa (Tryggvason, 2017)	13
Kuva 3. Laskentamallin reunaehdoja	14
Kuva 4. Aallon murtumisen kuvaaja (Seismologian-instituutti, 2020)	17
Kuva 5. Kuvaaja aallon koosta	18
Kuva 6. Yksinkertaistettu laskentageometria	20
Kuva 7. Surface repair -työkalu	21
Kuva 8. Laskenta-alueet	22
Kuva 9. Vedenpinnan tihennysalue	23
Kuva 10. Veneen tilavuus poistettuna pienestä nestetilavuudesta	24
Kuva 11. Laskenta-alueiden verkotus	24
Kuva 12. Aaltotihennys	25
Kuva 13. Overset-alueet ja leikkauskohta	30
Kuva 14. Adaptiivinen verkotus	32
Kuva 15. Potkurien paikka aluksen sivulta katsottuna	33
Kuva 16. Simuloitava alus törmää aaltoon	35

Kuva 17. Aluksen painekenttä	38
Kuva 18. Iskuilmiön kehitys ajan funktiona	39

KUVIOT

Kuvio 1. Potkurikäyrä	33
Kuvio 2. Aluksen kulkuvastus kahdessa eri laskentatapauksessa	36
Kuvio 3. Aluksen kulkuasennon muutos kahdessa eri laskentatapauksessa	37
Kuvio 4. Aluksen korkeus sijainnin muutos kahdessa laskentatapauksessa	37

TAULUKOT

Taulukko 1. Potkurin suoritusarvot	34
------------------------------------	----

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

Lyhenne	Lyhenteen selitys
CFD	Virtauslaskenta (Computational Fluid Dynamics)
FEM	Rakennelaskenta (Finite Element Method)
DFBI	Dynamic Fluid Body Interaction
t	Aika
ρ	Tiheys
p	Paine
g	Painovoima
ν	Kinemaattinen viskositeetti

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö toteutettiin osana Elomatic Oy:n kehitysprosessia, jossa pyrittiin kehittämään toimiva toimintaperiaate virtauslaskennan (CFD) ja rakennelaskennan (FEM) välille. Kehitysprosessissa toimi rahoittajan Business Finland Oy, joka myönsi projektille tukea osana korona-ajan kehitystukea.

Tavoitteena kehitysprosessissa oli tutkia mahdollisuuksia, joilla CFD-laskennan avulla kyettäisiin simuloimaan mahdollisimman hyvin aluksen liikkeitä ja siihen kohdistuvia voimia aalto-olosuhteissa ja tämän jälkeen siirtää simuloinnista saadut tulokset FEM-malliin. Mikäli prosessi tuottaa todellisuutta vastaavia tuloksia, voidaan todeta kyseessä olevan digitaalinen kaksonen (Digital Twin).

Opinnäytetyö oli rajattu käsittämään pelkästään aluksen CFD-laskennan ja siihen liittyvän kehityksen. Tarkoituksena oli kehittää mallinnustapa, joka kuvaa mahdollisimman hyvin aluksen liikkeitä aallokossa, sekä tuottaa simulointituloksena aluksen rungon painekenttä ja aluksen liikkeitä kuvaavat kuvaajat.

Opinnäytetyössä päästiin tavoitteeseen ja virtauslaskennan osalta saatiin todenmukainen simulointitulokseksi. Simulointiprosessi saatiin kehitettyä niin pitkälle, että sama simulointiprosessi voidaan toistaa eri alukselle helposti. Lopputulemana voidaan todeta, että opinnäytetyössä päästiin tavoitteisiin niin simuloinnin kuin prosessin kehityksenkin osalta.

2 OPINNÄYTETYÖ OSANA KEHITYSPROJEKTIA

Opinnäytetyö toteutettiin osana Elomatic Oy:n kehityshanketta. Ennen kehityshankkeen aloittamista oli jo pitkään pohdittu, miten aaltojen mallintamista CFD-laskennan avulla pystyttäisiin kehittämään. Kehitystarpeen taustalla oli asiakkaiden kiinnostuksen lisääntyminen aaltolaskennan suhteen. Kehityshankkeeseen haettiin tukea Business Finlandilta, joka myönsi tuen osana korona ajan kehitystukea. Kehityshankkeen koko oli varsin mittava ja siinä päästiin kehittämään täysin uudenlaista laskentatapaa sekä luomaan uusia mahdollisuuksia tekniseen laskentaan.

Opinnäytetyön osuus kehityshankkeesta oli pieni, mutta merkittävä. Opinnäytetyön tulosten perusteella kyettiin kehityshanketta jatkamaan eteenpäin ja luomaan linkki CFD- ja FEM-laskennan välille. Tällaisen Digital Twin -linkin luominen mahdollistaa alukseen kohdistuvien rasiusten vaivattoman siirron aluksen lujuuslaskentamalliin. Tämä mahdollistaa aluksen lujuusominaisuuksien paremman tutkimisen, niin aluksen suunnitteluvaiheessa, kun myös koko elinkaaren aikana.

2.1 Elomatic Oy

Elomatic Oy jonka kehityshankkeen osana opinnäytetyö suoritettiin on suomalainen insinööritoimisto, joka työllistä Suomessa jo yli 1100 henkeä kuudella eri paikkakunnalla. Elomaticilla on toimistoja myös ulkomailla ja se toimii vahvana osaajana kotimaassa sekä kansainvälisillä markkinoilla. Monialaisena yrityksenä Elomatic on vahvasti kehittänyt virtaus- ja lujuuslaskenta osaamista sekä kapasiteettia viimevuosien aikana. Elomatic Oy onkin vahvan panostuksen myötä noussut yhdeksi Suomen suurimmista ja merkittävimmistä teknisen laskennan palveluita tarjoavista yrityksistä. (Elomatic, 2021)

2.2 Kehityshanke

Kehityshankkeen tavoitteena oli luoda toimiva simulointiperiaate, jolla kyetään simuloimaan aaltojen vaikutus aluksen runkoon, sekä siirtämään CFD-laskennasta saadut tulokset helposti lujuuslaskentamalliin. Tällöin kyetään tutkimaan aallokosta alukselle aiheutuvia voimia jo aluksen suunnitteluvaiheessa. Runkoon kohdistuvien voimien siirto lujuuslaskentamalliin kuormitukseksi mahdollistaa uudenlaisen rungon suunnittelun. Kun

tiedetään jo suunnittelu vaiheessa rungon tiettyyn kohtaan kohdistuvien voimien suuruus, voidaan ne ottaa huomioon aluksen suunnittelussa ja keventää tai vahvistaa runkoa tarpeen mukaan.

Kehityshanke oli kokonaisuudessaan varsin suuri, joten tämä opinnäytetyö on rajattu käsittelemään ainoastaan CFD-laskentaa. Kehityshankkeessa riittikin uusia haasteita CFD-laskennan, vaivattoman tiedonsiirron sekä lujuuslaskennan osalta, sillä lähes koko prosessi oli uutta kaikille kehitysryhmässä olleille.

3 VIRTAUSLASKENTA (CFD)

Tietokoneiden yleistyminen ja kehitys on lisännyt huomattavasti virtauslaskennan mahdollisuuksia ja nykyään tätä tietokoneella tehtävää virtauslaskentaa kutsutaan usein lyhenteellä CFD. Lyhenne CFD tulee englannin kielen sanoista Computational Fluid Dynamics ja se on osa virtausmekaniikkaa. Suomennettuna sanat tarkoittavat laskennallinen virtausmekaniikka.

3.1 CFD:n historia ja kehitys

Ensimmäiset CFD-laskennat tehtiin 1960-luvulla lentokone- ja avaruusteollisuudessa. Tällöin huomattiin, että CFD-laskennasta on apua lentokoneiden ja suihkumoottoreiden tutkimuksessa, kehittämisessä ja niiden suunnittelussa. 1990-luvulta alkaen edullisempien tietokoneiden kehityksen myötä CFD-laskenta on alkanut saamaan jalansijaa teollisuudessa. Nykyään tietokonekapasiteetin kehittyminen on mahdollistanut CFD-laskennan monipuolisemman ja tehokkaamman käytön monimutkaisissa ja suurissa virtausteknisissä ongelmassa. Nykyään CFD-laskennalla kyetään korvaamaan jopa kokonaisten laivojen mallikokeita tai ainakin osia niistä. (versteeg, et al., 2007)

3.2 Navier-Stokesin yhtälöt

Navier-Stokesin yhtälöt ovat alun perin 1800-luvun alussa itsenäisesti johdettuja yhtälöitä. Periaatteessa ilman tietokoneita Navier-Stokesin yhtälöiden avulla on mahdollista ratkaista kattavasti virtaustekniikkaan liittyviä ongelmia. Käytännössä kuitenkin yhtälöt ovat niin vaativia, ettei niiden tehokas ratkaiseminen ilman tietokoneita ole mahdollista. Yhtälöt ottavat huomioon viskositeetin vaikutuksen virtaukseen ja ovatkin siis Eulerin yhtälöiden jatkeita. Navier-Stokesin yhtälöt ovat muodoltaan osittaisia differentiaaliyhtälöitä. (National aeronautics and space administration, 2021)

Navier-Stokes yhtälöt koostuvat kolmesta momenttiyhtälöstä, energiayhtälöstä sekä massan jatkuvuusyhtälöstä. Kaikki nämä yhtälöt ovat aikariippuvaisia. Jokaisessa yhtälössä on neljä itsenäistä muuttujaa, jotka ovat avaruuskoordinaatteja x , y ja z sekä aika t . Navier-Stokesin yhtälöillä on myös kuusi riippuvaa muuttujaa, joita ovat paine, nopeus, lämpötila sekä kolme nopeusvektorin komponenttia. Riippuvien muuttujien arvot ovat

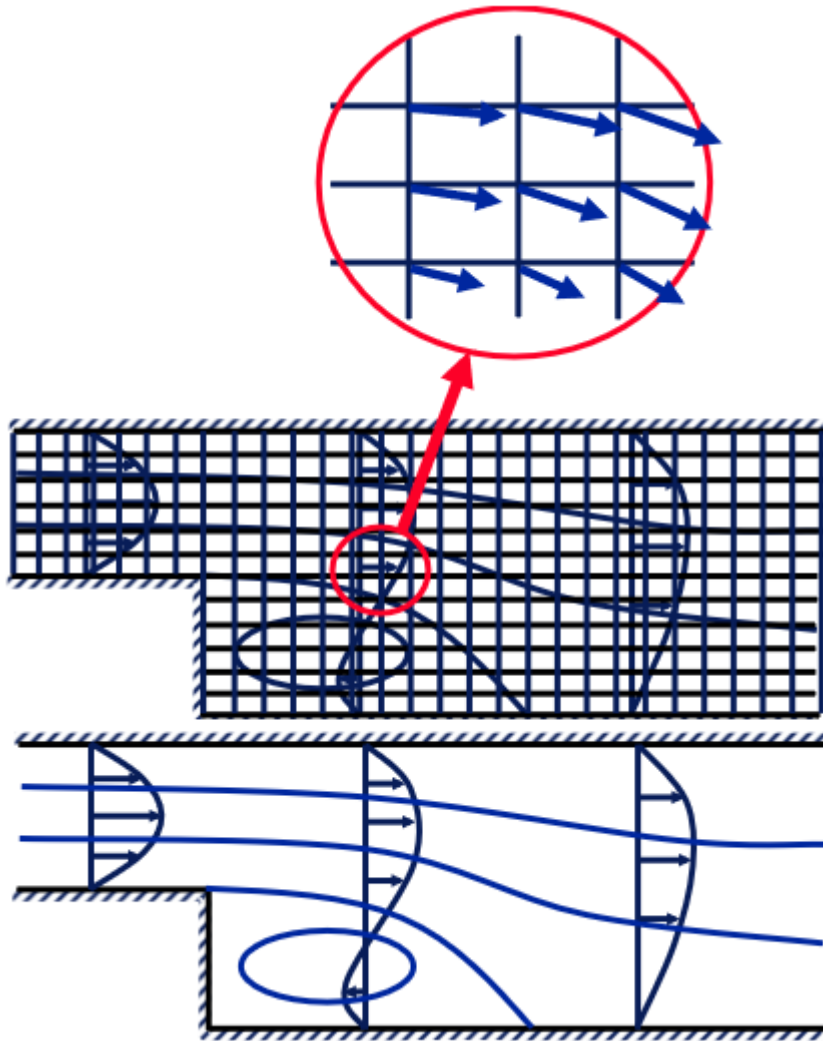
Itsenäisten muuttujien funktioita, joten niiden arvot riippuvat aina itsenäisten muuttujien laskutoimituksista. (Kuva 1.) (National aeronautics and space administration, 2021)

$$\begin{aligned}
 \text{Continuity} \quad & \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \\
 \text{X-Momentum} \quad & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] \\
 \text{Y-Momentum} \quad & \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] \\
 \text{Z-Momentum} \quad & \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \\
 \text{Energy} \quad & \frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] \\
 & + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{xz} + v \tau_{yz} + w \tau_{zz}) \right]
 \end{aligned}$$

Kuva 1. Navier-Stokesin yhtälöt (National aeronautics and space administration, 2021)

3.3 Tietokoneella suoritettava virtauslaskenta

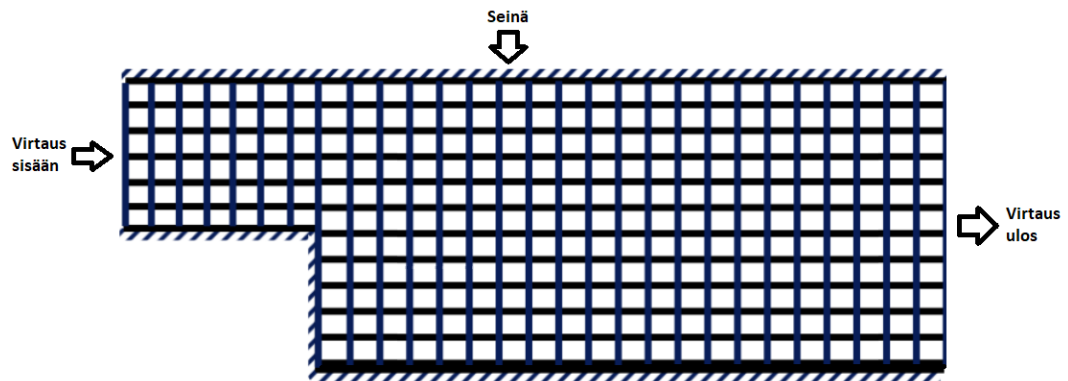
Tietokoneella suoritettavassa virtauslaskennassa laskenta-alueelle luodaan laskenta-verkko, jonka jokaisessa solussa suoritetaan laskutoimituksia. Jokaisessa laskentaso-lussa suoritettu laskutoimitus määrittää mihin suuntaa ja millä nopeudella virtaus liikkuu ulos laskentasolusta. Voidaankin siis yksinkertaistaa seuraavasti: jokaisen laskentasolun sisällä on jokaisella aika-askeleella matemaattinen pulma, joka tulee ratkaista. Kun nämä kaikki ratkaisut laitetaan yhteen, saadaan aikaiseksi laskentatulokset kyseiseltä aika-askeleelta. Tämän laskentatuloksen pohjalta lähdetään ratkaisemaan seuraavaa aika-askelta. (Kuva 2.) (Tryggvason, 2017)



Kuva 2. Virtaus kuvattuna laskentaverkossa (Tryggvason, 2017)

Laskentaverkon tulee olla tarpeeksi tiheä, jotta virtauskuviot pystytään ratkaisemaan riittävällä tarkkuudella. Käytettäessä liian suuria laskentasoluja, laskentasolujen koko alkaa vääristämään simuloinnista saatavaa virtauskuviota.

Laskentaverkon lisäksi laskenta-alueeseen tulee määrittää seinille reunaehdot. Useimmiten simuloinneissa käytettyjä reunaehtoja ovat virtauksen sisäänmeno ja ulostulo, symmetria sekä seinä. Virtauksen sisäänmeno sekä ulostulo voidaan määrittää monella eri suureella. Useimmiten käytetyt suureet ovat nopeus, massavirta tai paine. Symmetriapinta on nimensä mukaisesti symmetrinen eli reunaehto peilaa pinnan toiselle puolelle saman fysikaalisen tilan, joka on itse laskenta-alueella. Seinä reunaehdolla voidaan määrittää esimerkiksi lämpötiloja ja pinnan karheutta, jolla on vaikutusta kitkaan. (Kuva 3.) (Tryggvason, 2017)



Kuva 3. Laskentamallin reunaehdoja

3.4 CFD:ssä käytetyt koodit

CFD-mallinnuksessa jokainen ohjelma käyttää sille räätälöityä laskentakoodia. Laskentakoodit voidaan karkeasti jakaa kahteen eri ryhmään, joita ovat kaupalliset ja ei-kaupalliset koodit. Ei-kaupallisia koodeja käytetään usein yliopistojen tutkimuskäytössä, sillä niiden laskentakoodia pystytään tarvittaessa muuttamaan varsin helposti. Sen sijaan kaupalliset koodit ovat ohjelmistotalojen ohjelmiin sisäänrakennettuja laskentakoodeja, joiden käyttö on tehty mahdollisimman helpoksi. Kaupallisten koodien heikkoutena voidaan pitää niiden korkeaa hintaa, sekä hyvin suojattua laskentakoodia, jota ei pääse helposti muokkaamaan. Tunnetuimmat kaupalliset laskentakoodit ovat Siemensin omistamassa STAR CCM+ -ohjelmistossa sekä Ansysin Fluent-ohjelmistossa. Näiden lisäksi on lukematon määrä muita laskentakoodeja, joita käytetään tarkasti määriteltyjen ongelmien ratkaisemiseen. (Tryggvason, 2017)

4 KÄYTETYT OHJELMISTOT

CFD-laskennassa tarvitaan yleensä muutamaa eri ohjelmistoa, joiden tarkoitukset poikkeavat toisistaan. Työt aloitetaan tavallisesti rakentamalla alusmallin geometriaa tai siis-
timällä olemassa olevaa mallia CAD-ohjelmistolla. Laskentaohjelmalla suoritetaan las-
kentaverkon luonti, sekä simulointi. Joissakin tapauksissa laskentaverkko kannattaa
luoda siihen tarkoitettulla erillisellä ohjelmistolla.

4.1 Cad-ohjelmisto SpaceClaim

Opinnäytetyössä käytettiin geometrian esikäsittelyyn Ansysin SpaceClaim-ohjelmis-
toa, joka soveltuu erittäin hyvin cad mallien käsittelyyn. Helppokäyttöisyytensä ansiosta
se on hyvä työkalu, kun halutaan poistaa pieniä muotoja tai yksinkertaistaa isompia alu-
eita. Opinnäytetyö projektissa ainoana ongelman oli se, että CAD-ohjelmisto ja simulointi
ohjelmisto olivat eri ohjelmistotalojen kehittämiä. Tästä syystä helppokäyttöistä linkkiä
CAD-ohjelmiston ja simulointi ohjelman välillä ei ollut. Tämä ei kuitenkaan ollut ongelma
itse työn suorittamisen kannalta.

4.2 Virtauslaskentaohjelmisto STAR CCM+

Opinnäytetyössä laskentaverkon luonti ja simulointi suoritettiin Siemensin kehittämällä
STAR CCM+ -ohjelmistolla. Siemens olisi tarjonnut myös varteenotettavia geometriatyö-
kaluja, mutta SpaceClaim valittiin helppokäyttöisyytensä ja nopeutensa ansiosta. Vir-
tauslaskentaohjelmistoksi valittiin STAR CCM+, joka on erityisesti laivojen ja veneiden
simulointiin hyvin soveltuva ohjelmisto.

5 LÄHTÖTIETOJEN VALINTA

Ennen aluksen simuloinnin aloittamista tuli valita olosuhteet, joissa alusta haluttiin simuloida. Simuloitavien olosuhteiden tuli olla toden mukaisia, jotta simulointitulosten vertailu mahdollisesti saataviin mittaustuloksiin olisi teoriassa mahdollista. Erityisesti simuloinnissa kiinnostivat aluksen liikkeet, sekä aallokosta alukseen kohdistuvat iskut. Iskut kohdistavat pienelle osalle aluksen runkoa hetkellisesti merkittävän voimapiikin. Lisäksi haluttiin mallintaa aluksen rungon pinnalle muodostuva painekenttä.

5.1 Aluksen nopeuden valinta

Aluksen nopeudeksi valittiin 10 solmun nopeus, jonka oletettiin olevan aluksen todennäköinen keskinopeus aallokossa. Alkuoletuksena oli, että tällä nopeudella kohtisuoraan aaltoon ajettaessa saataisiin esille aluksen aallokosta johtuva liike ja iskukuormat. Täten päädyttiin 10 solmun nopeuteen.

5.2 Aallokon valinta

Aallokko-olosuhteeksi valittiin säännöllinen aallokko, jossa kaikki aallot ovat samanlaisia. Epäsäännöllisessä aallokossa aallot olisivat olleet keskenään eri pituisia sekä korkuisia. Tällöin kyetään varmistumaan siitä, että tuloksia tarkasteltaessa eri simulointitapaukset ovat aallokon osalta vertailukelpoiset keskenään. Mikäli aallokko olisi epäsäännöllistä, se vaikeuttaisi eri simulointitapausten vertailua keskenään. Epäsäännöllisessä aallokossa vertailu olisi mahdollista vain, jos tutkittaisiin erittäin pitkällä aikavälillä saatuja tuloksia ja niiden keskiarvoja.

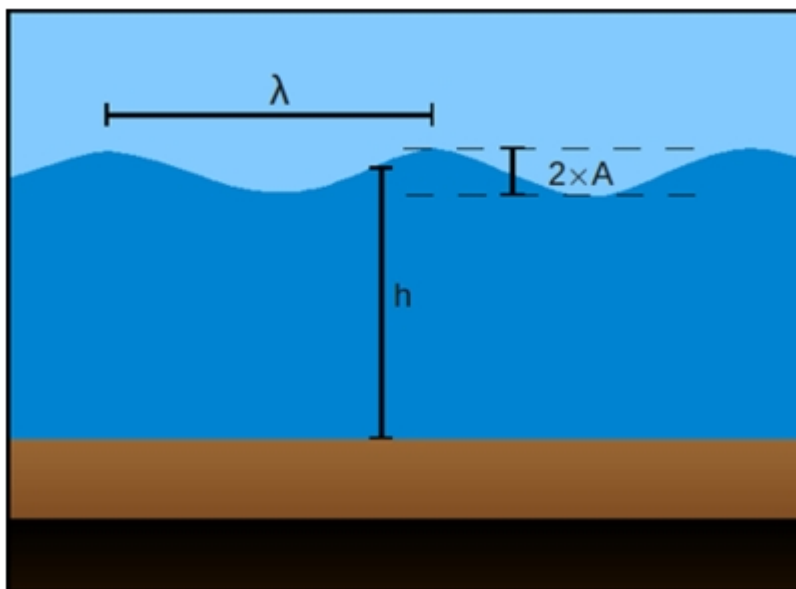
Säännöllistä aallokkoa käytettäessä voidaan havaita, että laskennan tasaantuessa aluksen liikekäyrä sekä alukseen kohdistuvien voimien käyrä alkavat toistaa itseään. Tällöin voidaan todeta simuloinnin tasoittuneen ja on mahdollista verrata tuloksia keskenään. (NPARC, 2021)

5.2.1 Aalto

Aallon korkeuden ja jakson eli amplitudin valinnassa hyväksikäytettiin ilmatieteenlaitoksen aaltopöijua. Aaltopöijuksi valittiin ilmatieteenlaitoksen aaltopöiju 134221, joka sijaitsee noin 25 km Helsingistä kaakkoon. Veden syvyys pöijun mittaustaikalla on noin 72 m. (Ilmatieteenlaitos, 2020)

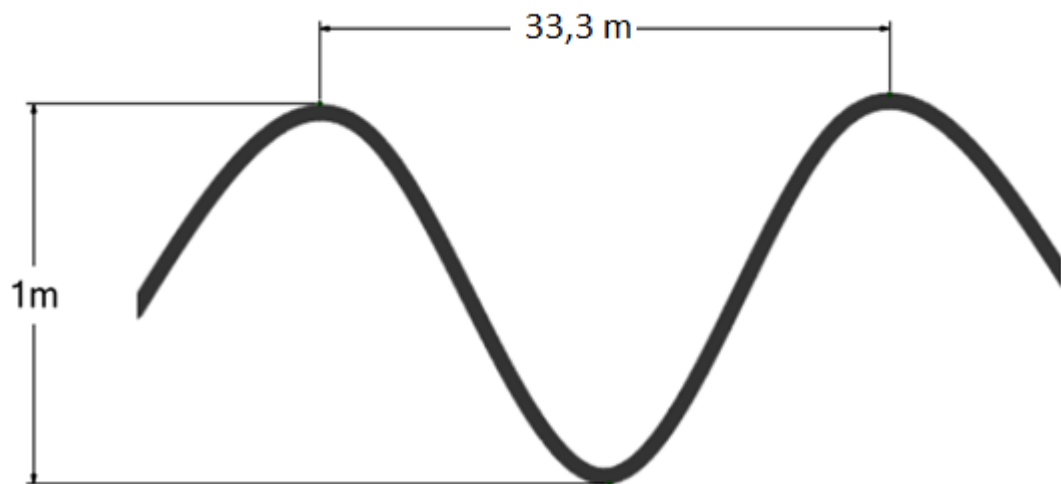
Aallokon valinnassa tuli huomioida, että tässä projektissa ei simuloida murtuvaa aaltoa. Aallon murtumiseen vaikuttaa aallon jyrkkyys eli aallon korkeuden suhde pituuteen, sekä aallon korkeuden suhde veden syvyyteen. Alkualettamuksena oli, että murtuvan aallon simulointi olisi huomattavasti haastavampaa kuin murtumattoman aallon simulointi. Aallon vaikutusta päätettiin simuloida ainoastaan syvässä vedessä, joten veden syvyydestä johtuvaa aallon murtumista ei tarvinnut huomioida. Veden syvyydestä johtuvaa aallon murtumista alkaa esiintyä kun veden syvyys alittaa 1,3 kertaisesti aallon korkeuden. Aalto valittiin siten, että aalto ei murru jyrkkyytensä takia. (Arsdale, 2021)

Aallon murtumispisteenä voidaan pitää kohtaa, jossa aallon jyrkkyys ylittää luvun $1/7$. Ylitettyään jyrkkyuden $1/7$ aalto alkaa murtua. Kuvan 4 merkinnöillä aallon jyrkkyyttä voidaan kuvata laskukaavalla $2A/\lambda$, jossa A on aallon amplitudi ja λ on aallonpituus. Toisin sanoen aallon korkeuden ($2A$) ollessa 1 m pitää aallon pituuden olla vähintään 7 metriä, jotta aalto ei murru. (Stull, 2019)



Kuva 4. Aallon murtumisen kuvaaja (Seismologian-instituutti, 2020)

Yleisin aaltoperiodin jaksoaika Itämerellä on 4-6 sekuntia ja aallon pituudet vaihtelevat normaalisti 25-60 metrin välillä. Aaltopoiijudataa tutkittaessa huomattiin 4.6 sekunnin olevan varsin yleinen periodi kyseisellä aaltopoiijulla. Tästä syystä valittiin aallon periodin jaksoksi 4,6 sekuntia ja aallon korkeudeksi valittiin 1 metrin. (Kuva 5.) (Ilmatieteenlaitos, 2020)



Kuva 5. Kuvaaja aallon koosta

6 VIRTAUSLASKENTAMALLIN LUONTI

Projektissa käytettiin laskentaohjelmana Siemensin kehittämää STAR-CCM+ ohjelmistoa. Vinkkejä simuloinnin suorittamiseen sai Siemensin Support-portaalista, mutta suoraan vastausta simuloinnin suorittamiseen ei löytynyt. Geometrian muokkauksessa päätyökaluna käytettiin Ansysin SpaceClaim CAD-ohjelmistoa. Tämän lisäksi käytettiin STAR CCM+ -ohjelmistoa pintojen ja geometrioiden korjaamiseen sekä laskentaverkon luomiseen. Haasteena laskentamallin luonnissa oli aikaan saada riittävän tarkka laskentaverkko mahdollisimman pienellä laskentasolujen määrällä.

6.1 Simuloitavan aluksen valinta.

Opinnäytetyössä käytettiin aluksena Elomatic Oy:n tarjoamaa valmiiksi suunniteltua aluksen runkoa, joka oli mitoiltaan 19,0 m pitkä, 2,7 m leveä ja 1,5 m syvä. Suunnitellulle alukselle oli määritetty massakeskipiste sekä massa. Näitä tietoja käytettiin aluksen mallinnuksessa. Alus saatiin pelkkänä pintamallina joten simuloitava alus muokattiin Ansysin SpaceClaim ohjelmalla pintamallista yhtenäiseksi kappaleeksi, joka on sopiva CFD-laskentaa varten.

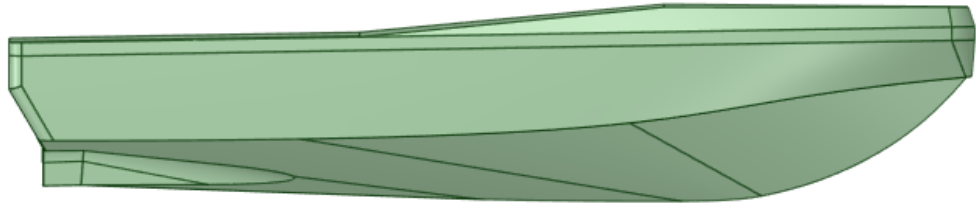
6.2 Simulointimallin esikäsittely

Ennen simulointityön aloittamista oli laskentamalli käsiteltävä sellaiseen muotoon, että laskentaverkon luominen ja laskenta onnistuvat ongelmitta. Hyvällä esikäsittelyllä kyetään ehkäisemään verkotuksen sekä laskennan aikaisia ongelmia sekä varmistamaan, ettei simulointi tai verkotus keskeydy geometriavirheiden takia. Pienet yksityiskohdat vaativat pienempiä laskentasoluja, joten mallin yksinkertaistaminen vähentää laskentasolujen määrää laskentaverkossa. (Conself, 2021)

6.2.1 Simuloitavan aluksen valmistelu.

Elomaticin tarjoama aluksen rungon ulkopinta saatiin tuotua ulos NAPA-ohjelmistosta STEP-tiedostona. Tällöin aluksen runkopinnassa on monesti epämääräistä epätasaisuutta sekä virheitä eli kappaleen pinnat eivät kosketa toisiaan tai ovat selvästi

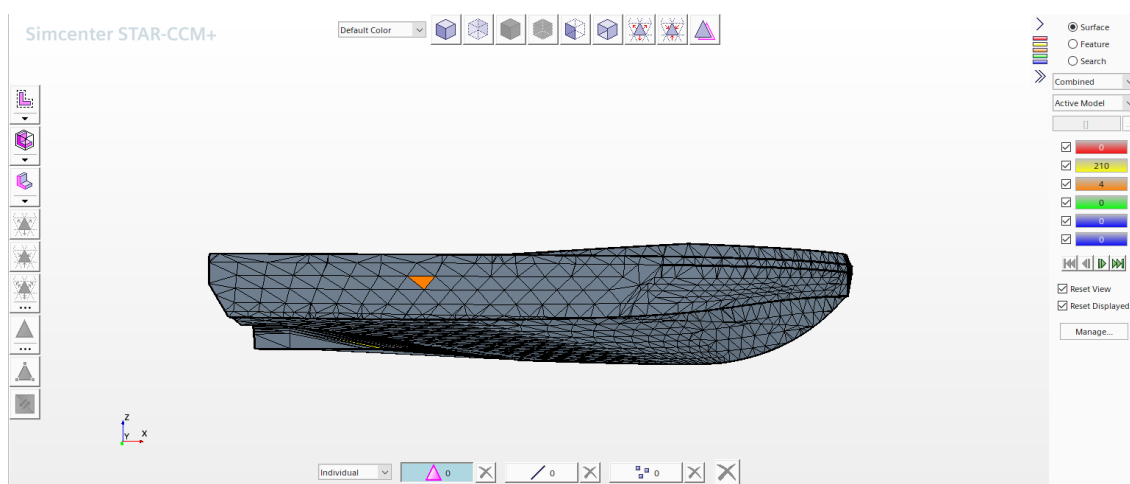
vääntyneet. Pintalaput ja epätasaisuudet korjattiin ja näin saatiin eheä laskentageometria. Aluksesta poistetaan myös kaikki CFD-laskennan kannalta epäoleelliset yksityiskohdat. Todettiin, ettei pienillä yksityiskohdilla ollut tämän tutkimuksen lopputuloksen kannalta suurta vaikutusta, mutta simuloinnista olisi tullut erittäin paljon työläämpi toteuttaa, mikäli näin ei olisi toimittu. Aluksena käytettiin siis yksinkertaistettua runkomallia Elomaticin tarjoamasta alkuperäisestä rungosta. Aluksesta poistettiin kaikki kannen yläpuoleiset rakenteet, sillä niiden muotoja ei tarvinnut ottaa huomioon simuloinnissa. Kannen yläpuolisten rakenteiden massat on kuitenkin huomioitava aluksen kokonaismassassa, massakeskipisteen sijainnissa ja simuloinnissa alukselle määriteltävissä hitausmomenteissa. (Kuva 6.)



Kuva 6 Yksinkertaistettu laskentageometria

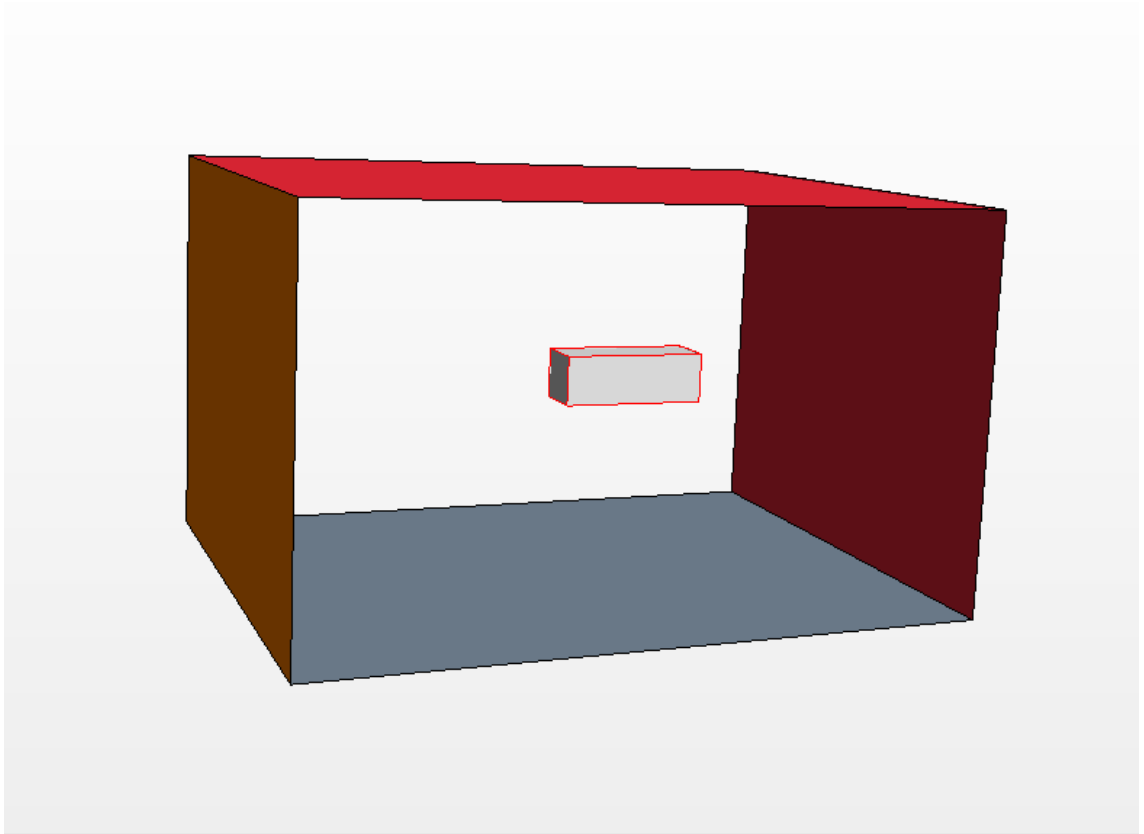
6.2.2 Laskenta-alueen luonti

Simuloinnissa käytettävä yksinkertaistettu ja siistitty aluksen runko tuotiin Parasolid-tiedostona SpaceClaim CAD-ohjelmistosta STAR CCM+ laskentaohjelmaan. Laskentaohjelmassa tarkastettiin aluksen rungon eheys ja laskentakelpoisuus surface repair -toiminnolla, joka paljastaa rungosta muodot, jotka vaikeuttavat laskenta-alueen verkotusta. Tarkastus toi esille muutamia pintoja, jotka täytyi korjata ohjelmassa. Korjausten jälkeen runko oli valmiina laskennan suorittamista varten. (Kuva 7.)



Kuva 7. Surface repair -työkalu

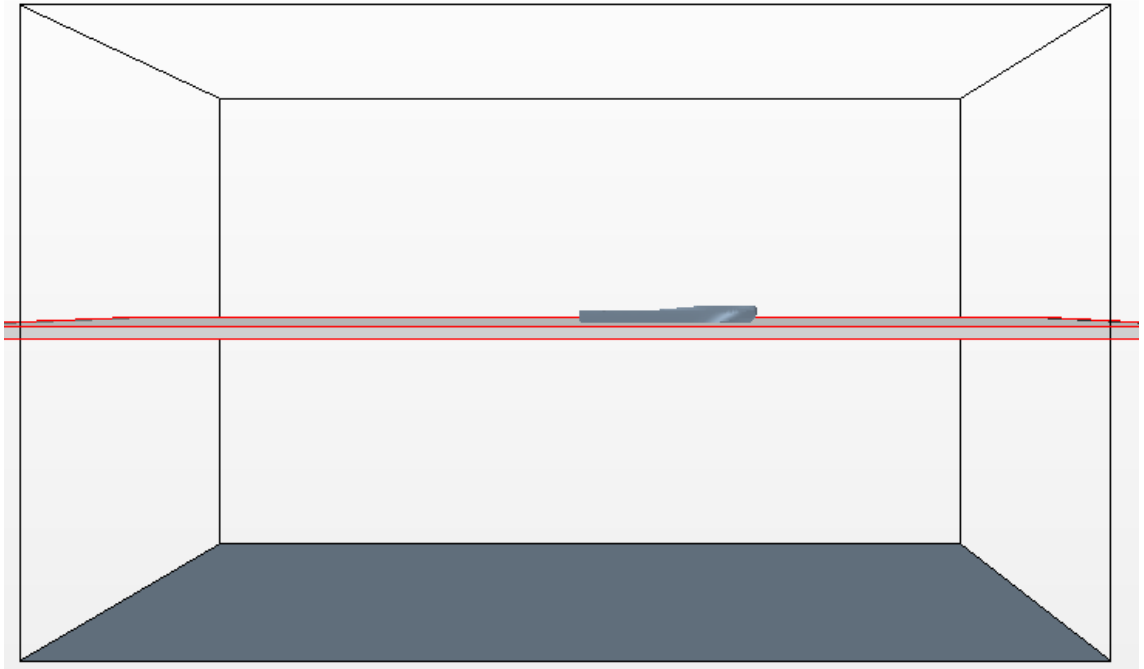
Seuraavaksi luotiin itse laskenta-alue eli fluid zone. Laskenta-alue oli pituudeltaan 150 metriä, leveydeltään 80 metriä ja korkeudeltaan 60 metriä. Vedenpinta oli sijoitettu globaalin koordinaatiston z-akselin 0-tasoon, joten laskenta-alueessa veden syvyys oli 30 metriä. Veden pinnan tason valitseminen z-akselin tasoon nolla helpotti syvyyksien hahmottamista ja jälkikäsitteilyn luontia, sillä kaikki negatiiviset z-arvot olivat aina vedenpinnan alapuolella ja positiiviset arvot olivat veden pinnan yläpuolella. (Kuva 8.)



Kuva 8. Laskenta-alueet

Laskenta-alueelle luotiin toinen pienempi laatikko, joka mitoitettiin tarkasti laskettavan aluksen ympärille. Tämä pienempi alue luotiin, jotta laskennassa pystytiin käyttämään overset mesh -toimintoa. Tämä toiminto mahdollisti suuremmat liikkeet alukselle.

Vesirajaan luotiin tihennysalue, joka ulottui metrin verran vedenpinnan kummallekin puolelle. Vesirajan tihennys oli mitoiltaan koko laskenta-alueen levyinen ja pituinen. Tämä verkotusalue oli korkeudeltaan 1 m ja sen keskikohta oli z-akselin 0 kohta, eli puolet tihennysalueesta oli vedenpinnan yläpuolella ja toinen puolikas tason alapuolella. Tätä tihennyslaatikkoa käytettiin pelkästään laskenta-alueen verkotuksessa eikä sillä ollut muuta tehtävää laskennassa kuin rajata verkotusasetuksia. (Kuva 9.)



Kuva 9. Vedenpinnan tihennysalue

Lisäksi suureen laskenta-alueeseen luotiin pienempi laatikko toisen laskenta-alueen ympärille. Tämä pienemmän laskenta-alueen ympärille tuleva tihennys tihensi isomman laskenta-alueen verkkoa pienemmän laskenta-alueen kohdalta. Tällainen tihennys on välttämätön, jotta overset mesh -toimintoa pystytään käyttämään ilman laskentasuista aiheutuvia virheitä

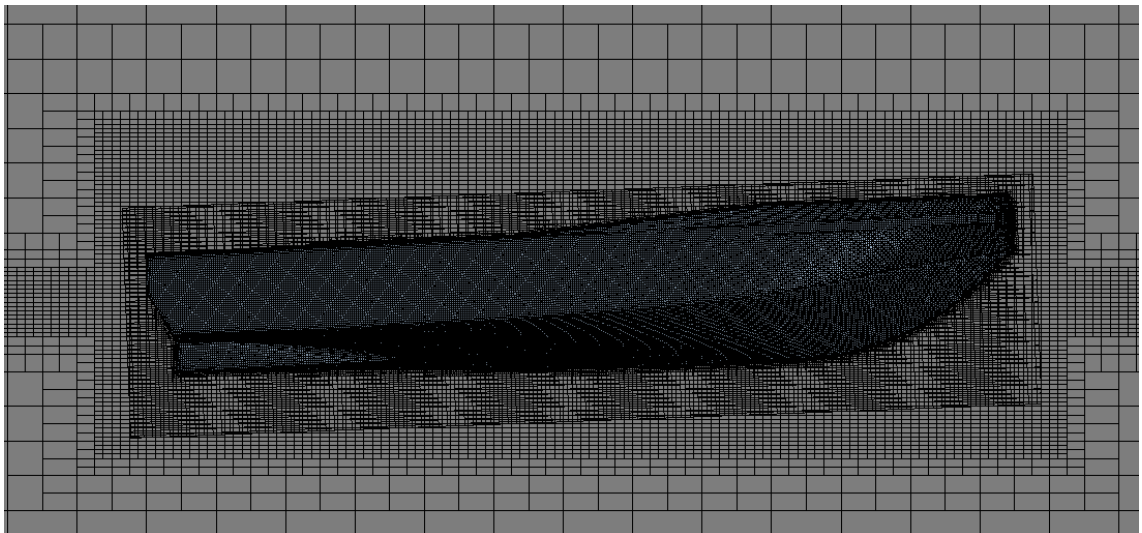
Kun laskenta-alueet oli luotu, poistettiin veneen geometria pienemmästä laskenta-alueesta käyttämällä hyväksi subtract-toimintoa. Tässä toiminnossa määritellään mistä alueesta jokin tai jotkin kappaleet halutaan poistaa. Tässä projektissa poistettiin veneen geometria pienemmän laskenta-alueen nestetilavuudesta. (Kuva 10.)



Kuva 10. Veneen tilavuus poistettuna pienestä nestetilavuudesta

6.2.3 Verkotus

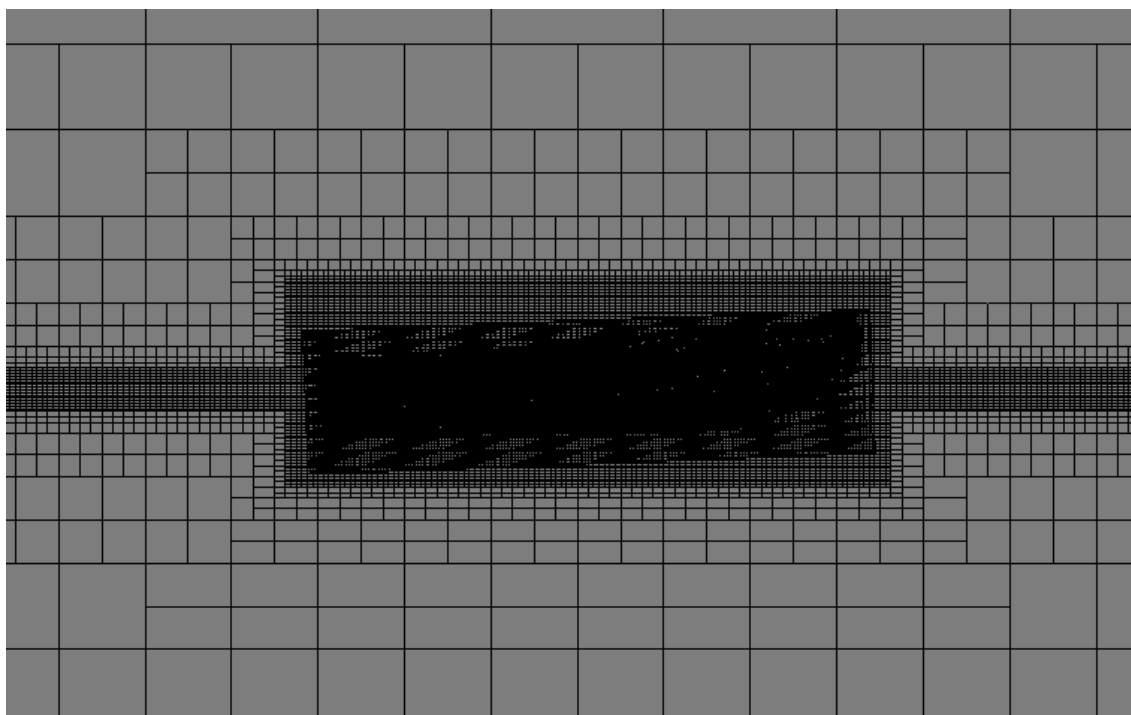
Jo mallin geometrian muokkausvaiheessa ja laskenta-alueen valmistelussa tulee huomioida verkotus. Verkotuksessa käytettävien tihennysalueiden luonti oikeille paikoille ja niiden oikea nimeäminen on tärkeää verkotuksen onnistumiselle. Verkotuksessa käytettiin kahta toisistaan erillistä verkotustoimintoa, sillä laskenta-alueita oli kaksi. Kuvassa 10 on esitetty pienempi laskenta-alue, joka erottuu taustaverkosta tiheämpinä neliöinä aluksen ympärillä. (Kuva 11.)



Kuva 11. Laskenta-alueiden verkotus

Pienemmän laskenta-alueen ulkopuolella on suuressa laskenta-alueessa myös tiheämmin verkotettu alue. Tämä tiheästi verkotettu alue kuvaa sitä aluetta, jolla aluksen oletetaan liikkuvan laskennan aikana. Overset mesh -toiminto mahdollistaa kahden erillisen verkon yhteen liittämisen. Toiminnossa pienemmän laskenta-alueen verkko leikkaa osan suuremman laskenta-alueen verkosta pois ja korvaa tämän alueen omalla laskentaverkollaan. Overset mesh -toimintoa käytettäessä on tärkeää, että leikkaava ja leikattava verkko ovat leikkausalueelta samankokoisia.

Vedenpinnan tasolla on huomattavissa selvä tihennys. Tämän huomioiminen on tärkeää simuloinnissa, sillä on tärkeää, että aallon muoto pysyy muuttumattomana simuloinnissa. Aluksen todenmukaisten liikkeiden aikaansaamiseksi on tärkeää, että alusta liikuttava aalto on mahdollisimman tarkasti kuvattu. Mikäli aallon kohdalla laskentasolut ovat liian suuria, aalto alkaa katoamaan verkkoon. Liian suuret laskentasolut eivät pysty kuvastamaan aallon muotoja, jolloin aalto monesti muuttuu porrasmaiseksi. Näin ollen aalto alkaa pikkuhiljaa pienenemään ja lopulta katoaa verkon vaikutuksesta. Voidaan todeta, että verkon laskentasolujen ollessa liian suuria, simulointi ei pysty kuvastamaan aallon muotoa tarpeeksi tarkasti ja saattaa lopulta keskeyttää simuloinnin ennen aikaisesti. (Kuva 12.)



Kuva 12. Aaltotihennys

Laskenta-alueen verkkokokoksi määriteltiin 1 metri. Tämä on laskentaverkon laskentasuolujen suuruuden oletusarvo. Verkotusasetukset määrittelevät kuitenkin laskenta-alueella olevien laskentasuolujen lopullisen koon.

Aluksen ympärillä olevien laskentasuolujen tulee olla erittäin pieniä ja rajakerroksien ohuita, jotta pystytään kuvaamaan aluksen pinnalla tapahtuvaa nesteen liikettä. Tästä syystä aluksen pinnalle luotiin rajakerrosvyöhyke, joka oli 20 laskentasuolun paksuinen. Rajakerrosten yhteispaksuus oli 33 mm ja kasvukerroin on 1.2. Kasvukertoimen avulla rajakerroksen seuraava laskentasuolu on aina 1.2 kertaa suurempi kuin edellinen laskentasuolu. Samalla aluksen pintaa asetettiin pinnan verkotus asetus, jolla määriteltiin aluksen pinnalle tulevan kopin suuruudeksi 1 mm. Pienemmän laskenta-alueen laskentasuolujen yleiskooksi määritettiin 15 mm. Tällöin aluksen lähellä tapahtuvat ilmiöt, kuten esimerkiksi aluksesta muodostuvat roiskeet, eivät katoa ilmiöinä verkon koosta johtuvaan diffuusiointumiseen.

Suuremman laskenta-alueen verkotuksessa käytettiin pääsääntöisesti yleistä verkotuskokoa, joka on 1 m. Laskentasuolujen säästämiseksi laskenta-alueen ulkoreunoille määritettiin suurempia laskentasuoluja, jopa 3 m asti. Näin saatiin pienennettyä laskenta-alueen laskentasuolujen määrää ja nopeutettua itse laskentaprosessia. Suuremman laskenta-alueen keskellä sijaitsevan pienen laskenta-alueen ympärille määriteltiin verkotusalue. Tällä verkotusalueella laskentasuolut olivat samankokoisia kuin pienellä laskenta-alueella. Veden pinnalle ja alueelle, jossa aallon tiedetään liikkuvan, määriteltiin tihennetty verkotusalue, jonka avulla saadaan aalto kuvattua mahdollisimman tarkasti. On tärkeää, että aalto ei hajoa verkossa. Aallon hajoaminen saattaa johtaa simulointiprosessin keskeytymiseen tai simulointituloksen vääristymiseen. STAR CCM+ -ohjelmiston ohjeissa kehoitetaan käyttämään aallon suuntaisesti 10-20 laskentasuolua. Testit osoittivat, että kymmenen laskentasuolun aallontiheys ei kyennyt kuvaamaan aallon käyttäytymistä riittävän tarkasti, sillä aallosta muodostui porrasmainen. Tämä tarkoitti, että aallon alueelle pitää saada lisää laskentasuoluja. Lisättäessä korkeussuuntaisten laskentasuolujen määrää 15 laskentasuoluun saatiin aalto kuvattua riittävän tarkasti. Tihennettyä laskentaverkkoa käytettiin myös aluksen perässä peräaallon riittävän tarkkaan kuvaamiseen. (Siemens, 2019)

7 SIMULOINTI

CFD-laskenta suoritettiin STAR CCM+ -ohjelmistolla ja laskentakoneena käytettiin Elomatic Oy:n laskentaklusteria, jonka laskentakapasiteetti mahdollistaa suurien CFD-mallien vaivattoman simuloinnin. Simuloinnissa esikäsittely eli mallin rakennus sekä toimivuuden testaaminen tehtiin normaalilla tietokoneella. Kun mallin toimivuus oli varmistettu, suoritettiin simulointi laskentaklusterilla. Laskentatulosten tarkastelu ja analysointi suoritettiin tavallisella tietokoneella, näin mahdollistettiin tehokas simulointi minimoimalla laskentaklusterin käyttöaika.

7.1 Simulointiin käytetty laskentaklusteri

Simuloinnissa käytettiin Elomatic Oy:n laskentaklusteria, joka mahdollistaa isojen mallien vaivattoman laskemisen. Laskentaverkon ollessa varsin massiivinen on käytännössä pakko käyttää simuloinnin suorittamiseen eritoten laskentaan tarkoitettua klusteria, jolloin laskenta rinnakaistuu usealle eri koneelle ja sadoille laskentaytimille. Käytännössä tällaista laskentaa ei olisi mahdollista suorittaa järkevästi ilman tehokasta laskenta klusteria. Laskennan suorittamiseen käytettiin 4 laskentakonetta, joissa kaikissa oli 64 laskentaydintä. Laskenta suoritettiin siis 256 laskentaytimellä.

7.2 Simulaation asetukset

Simulointiohjelmassa valittiin sopivat fysikaaliset mallit ja laskentaan sopivat reunaehdot. Haluttujen fysikaalisten mallien ja reunaehtoien avulla saatiin simulointiin luotua alukselle oikeat olosuhteet. Mahdollisimman tarkat lähtöarvot mahdollistavat hyvän ja oikean simulointi tuloksen.

7.2.1 Alueasetukset

Laskenta-alueelle luotiin kaksi erillistä laskenta-aluetta, josta ulompi pysyi koko ajan paikallaan ja sisempi laskenta-alue liikkui pienemmän laskenta-alueen mukana.

Suuremman laskenta-alueen etuseinä sekä katto asetettiin samaan reunaehtoon ja niiden reunaehdoiksi valittiin virtauksen sisääntulo. Tällöin ohjelmisto poisti automaattisesti reunoilta rajakerrosverkot, joita ei näin ollen tarvinnut poistaa verkotusasetusten avulla.

Suuremman laskenta-alueen takaseinän reunaehdoksi asetettiin paineen ulostulo, jolloin virtaus liikkuu ulos laskenta-alueelta. Tästäkään reunaehdosta ei tarvinnut erikseen poistaa rajakerros verkkoa sillä, tässäkin reunaehdossa rajakerros verkko poistui automaattisesti. Lähelle laskenta-alueen takaseinää asetettiin aallon vaimennustoiminto, joka mataldasi aaltoa ennen aallon liikkumista ulos laskenta-alueelta. Näin saadaan laskenta pysymään vakaampana.

Laskenta-alueen sivuseinien ja pohjan reunaehdoiksi valittiin seinä, jolloin vesi tai ilma eivät pääse läpäisemään niitä. Seinän asetuksista valittiin kitkaton seinä, jolloin seinä ei hidasta veden virtausta mallissa.

Pienemmälle laskenta-alueelle luotiin oma region-alue ja omat reunaehdot. Pienemmän laskenta-alueen ulkoreunat määriteltiin overset interface -reunaehdolla. Tällöin overset mesh -toiminto mahdollistaa sisemmän ja ulomman verkon yhdistämisen. Aluksen rungolle määritettiin oma reunaehto, jonka reunaehdoksi asetettiin seinä. Tähän seinä reunaehtoon kohdistuvat voimat liikuttivat koko sisempää laskenta-aluetta ja loivat aluksen liikkeen.

7.2.2 Fysikaalisten mallien valinta

STAR CCM+ -ohjelmistossa on sisäänrakennettuja, laskentaan tarvittavia fysikaalisia malleja. Näitä malleja on varsin kattavasti, joten normaalisti nämä mallit ovat tarpeeksi tarkkoja hyvien laskentatulosten aikaan saamiseksi. Tässä projektissa valmiita fysikaalisia malleja haluttiin muuttaa esimerkiksi veden tiheyden osalta vastaamaan Itämeren tiheyttä.

7.2.3 Simuloinnin aaltomalli

Simuloinnissa käytettiin STAR CCM+ -ohjelmiston "fifth order vof wave" -toimintoa, jolla luotiin jatkuva aallokko simulointiin. Fifth order vof waven avulla on mahdollista luoda simuloinnissa halutut olosuhteet. Mallissa on mahdollista määrittää veden virtaus, tuulen nopeus, aallonkorkeus, aallon amplitudi sekä simuloitavan kappaleen nopeus ja suunta.

Aallon määrittelyä käytettiin aallon korkeutta sekä aallon amplitudia. Aallon murtumiseen vaikuttaa veden syvyys. Veden syvyys asetettiin niin suureksi, ettei aallon murtumista tapahdu ja näin ollen sitä ei tarvitse ottaa huomioon.

Aaltomallissa simuloitiin myös aluksen eteenpäin kulkeva liike, sillä todellisuudessa aluksella oli vain kaksi vapausastetta, pystysuuntainen liike sekä poikittaisakselin ympäri tapahtuva pyörimisliike. Aluksen nopeus huomioitiin asettamalla vedelle ja ilmalle oikeat virtausnopeudet.

7.2.4 Aluksen liike

Aluksen liikettä aallokossa määrittelemään on käytetty DFBI-mallia. DFBI-mallissa laskenta-alueen sisältämä sisempi laskenta-alue liikkuu aluksen runkoon kohdistuvien voimien johdosta. Tällöin aluksen runko liikkuu normaalisti aaltojen mukana ja sisempi laskenta-alue myötäilee aluksen liikettä ja leikkaa jokaisella aika-askeleella overset mesh-toimintoa käyttämällä uuden palasen taustaverkosta. Simuloinnissa aluksen nopeus on määritetty mukaan aaltoon, joten aluksen eteenpäin menevää nopeutta ei tarvitse DFBI-mallissa ottaa huomioon.

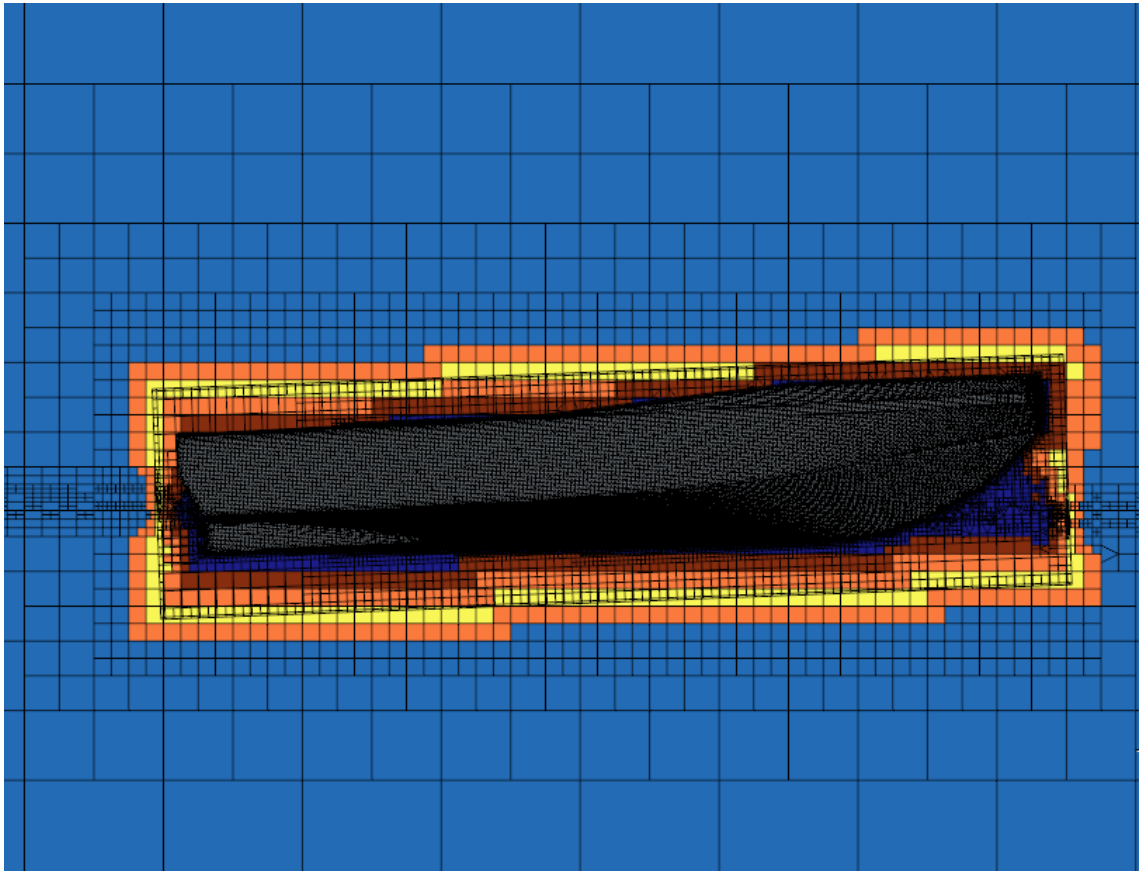
DFBI mallissa on mahdollista määrittää erikseen alukselle eri vapausasteita. Tässä simuloinnissa valittiin vapausasteiksi ylöspäin menevä eli z-suuntainen liike sekä y-akselin ympäri tapahtuva pyörimisliike. Kaikki liikkeet tapahtuvat massakeskipisteen ympäri, joten massakeskipisteen määrittäminen on erittäin tärkeä oikeiden liikkeiden saavuttamiseksi.

7.2.5 Käytetyt väliaineet

Simuloinnissa käytettiin Eulerian multiphase -mallia väliaineiden määrittelyyn. Molemmille väliaineille, eli ilmalle ja vedelle, määritettiin oma malli, jossa ensimmäisenä määriteltiin väliaineen olomuoto. Ilma määriteltiin kaasuksi ja vesi nesteeksi, joilla on muuttumaton tiheys eli ne ovat kokoonpuristumattomia. Veden tiheydeksi määritettiin 1012 kg/m^3 ja ilman tiheys tuli suoraan STAR CCM+ -ohjelmasta.

7.2.6 Overset meshin käyttö

Overset meshissä sisempi eli pienempi laskenta-alue, jossa myös itse alus sijaitsee, leikkaa isomman laskenta-alueen verkosta osan pois ja korvaa tämän verkon omalla verkollaan. Kun simulointia on suoritettu muutama aika-askel DFBI mallin ratkaisija liikuttaa sisempää laskenta-aluetta runkoon kohdistuvien voimien mukaisesti, jolloin sisempi laskenta-alue leikkaa uudestaan ulommasta laskenta-alueesta osan ja korvaa sen omalla laskentaverkollaan. (kuva 13.)



Kuva 13. Overset-alueet ja leikkauskohta

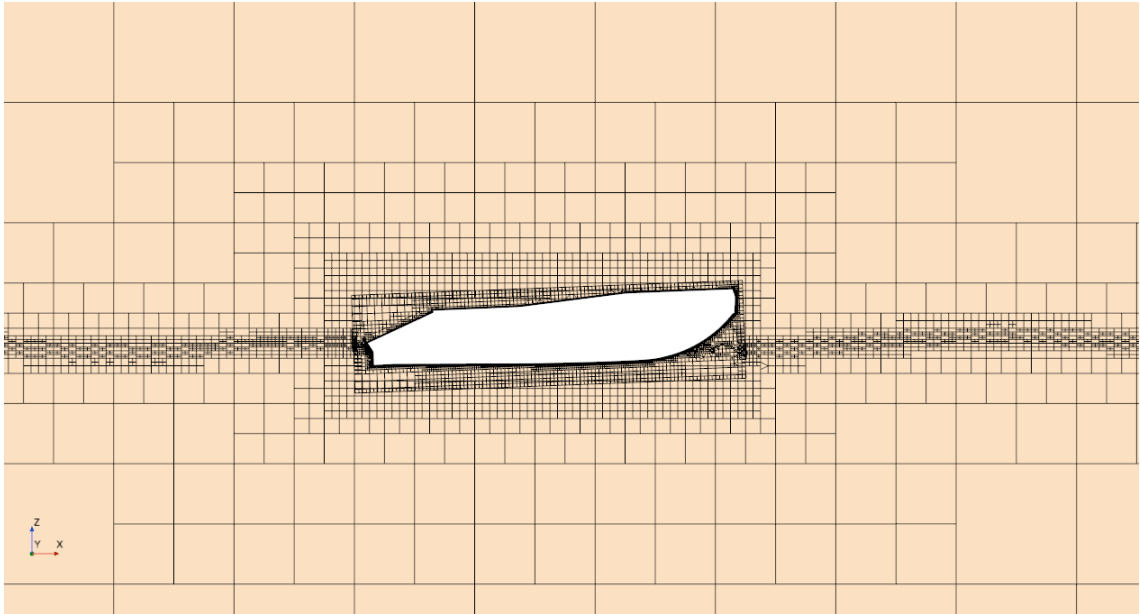
8 MALLIN KEHITYS

Ensimmäisten tulosten jälkeen alettiin pohtia, voiko laskentamallia tehdä kevyemmäksi ja nopeammaksi laskea, sillä alkuperäisellä mallilla simuloinnin suorittaminen oli suhteellisen raskasta eli vaati huomattavan paljon laskentatehoa ja aikaa. Pohdinnan tuloksena päätettiin kokeilla adaptiivista laskentaverkkoa.

8.1 Adaptiivinen laskentaverkko

Adaptiivinen verkko mahdollisti laskentasolujen kokonaismäärän huomattavan pienentämisen suhteessa alkuperäiseen laskentaverkkoon. Vähäisempi laskentasolujen määrä pienentää simulointiin tarvittavaa konetehoa sekä lyhentää simuloinnin laskenta-aikaa. Adaptiivista verkkoa hyväksikäyttämällä laskentasolujen määrä onnistuttiin laskemaan 4.9 miljoonasta laskentasolusta 3.7 miljoonaan laskentasoluun. Laskentasolujen kokonaismäärä on siis laskenut noin 25 prosenttia alkuperäisestä. Verkkoa tarkasteltaessa huomattiin, että adaptiivisessa verkossa esimerkiksi vedenpinnan tihennysalueen laskentasolut tulee verkotuksessa jättää huomattavasti suuremmiksi kuin alkuperäisessä laskentaverkossa. Ennen ensimmäistä adaptiivisen tihennyksen käyttöä laskenta-alueessa oli vain 0,9 miljoonaa laskentasolua.

Adaptiivisessa verkossa on määritelty tihennettävät alueet sekä määreet, joilla aluetta tihennetään. Tässä simuloinnissa adaptiivisen verkon tihennystä käytettiin vedenpinnan tihentämiseen. Tällöin adaptiivinen verkotus verkottaa laskenta-alueen aina välillä uudestaan ja vedenpinnan eli tässä tapauksessa aaltojen tihennys on aina juuri oikealla kohdalla ja seuraa aaltoja. Tällöin tarvittaviin verkotus kohteisiin saadaan helpommin tarvittava määrä laskentasoluja kuitenkin äärettömästi kohottamalla koko laskenta-alueen laskentasolujen määrää. (kuva 14.)



Kuva 14. Adaptiivinen verkotus

8.2 Pituussuuntainen liike

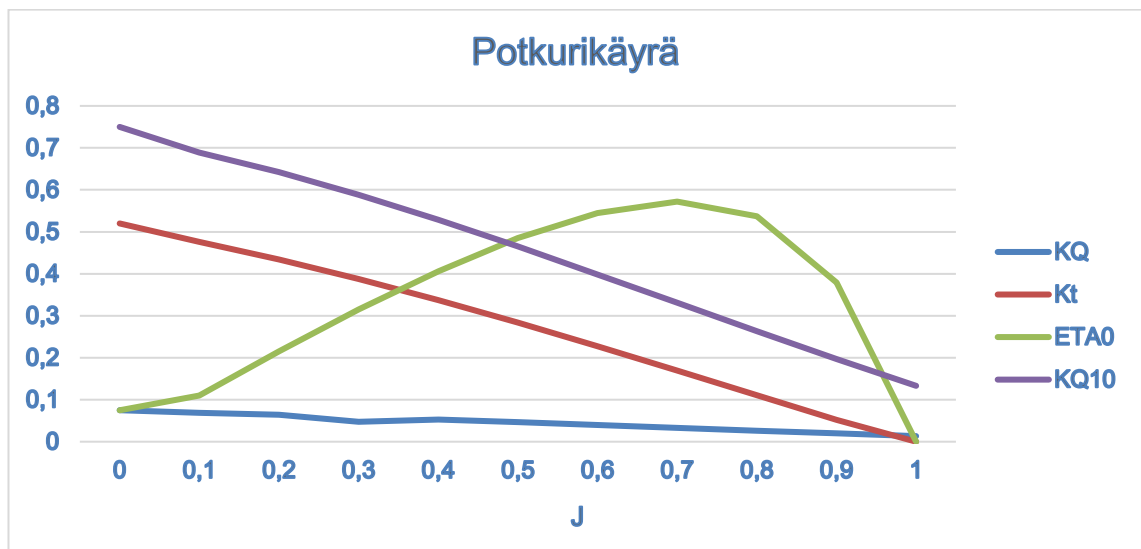
Mallia kehitettäessä haluttiin myös varmistaa, ettei aikaisemmin käytetty vapausasteiden rajoittaminen varsinkin eteen- ja taaksepäin menevässä liikkeessä muodosta suurta eroa painekenttään iskun aikana. Toinen mielenkiinnon kohde oli aluksen liikkeiden muutos, jos x-akselin suuntainen pituusliike sallitaan.

Alukseen lisättiin kaksi virtuaalisesti työntövoimaa tuottavaa potkuria ("virtual disk"). Potkureiden asema ja kulma oli määritetty jo rungon mukana valmiiksi. Kummallekin potkurille luotiin oma koordinaatisto, joka liikkuu aluksen massakeskipisteen mukana ja on näin ollen aina samassa asemassa alukseen nähden. (Kuva 15.)



Kuva 15. Potkurien paikka aluksen sivulta katsottuna

Potkureille annettiin potkurivalmistajan esitteen mukainen potkurikäyrä. (Kuvio 1.) Potkurikäyrät piti syöttää laskentaohjemaan taulukkomuodossa. (Taulukko 1.) Potkurien työntövoimaa monitoroitiin pituussuuntaisen liikkeen ja kiihtyvyyden avulla, jotta löydettiin tasapaino tilanne, jossa alus kulki keskimäärin 10 solmua. Nopeus ei ollut tasaista, sillä jokainen aalto vaikutti aluksen käyttäytymiseen ja nopeuteen. Potkurien tuottamaa tehoa muutettiin muuttamalla potkurin pyörimisnopeutta. Pyörimisnopeuden muutos vaikutti potkurikäyrän mukaisesti potkurilta saatuun työntövoimaan ja siten kiihdytti tai hidasti aluksen keskinopeutta.



Kuvio 1. Potkurikäyrä

Taulukko 1. Potkurin suoritusarvot

J	Kt	KQ	ETA0
0	0,520	0,075	0,075
0,1	0,476	0,069	0,110
0,2	0,434	0,064	0,215
0,3	0,388	0,048	0,315
0,4	0,337	0,053	0,406
0,5	0,284	0,047	0,485
0,6	0,228	0,040	0,545
0,7	0,170	0,033	0,572
0,8	0,111	0,026	0,537
0,9	0,052	0,020	0,379
1	0	0,013	0

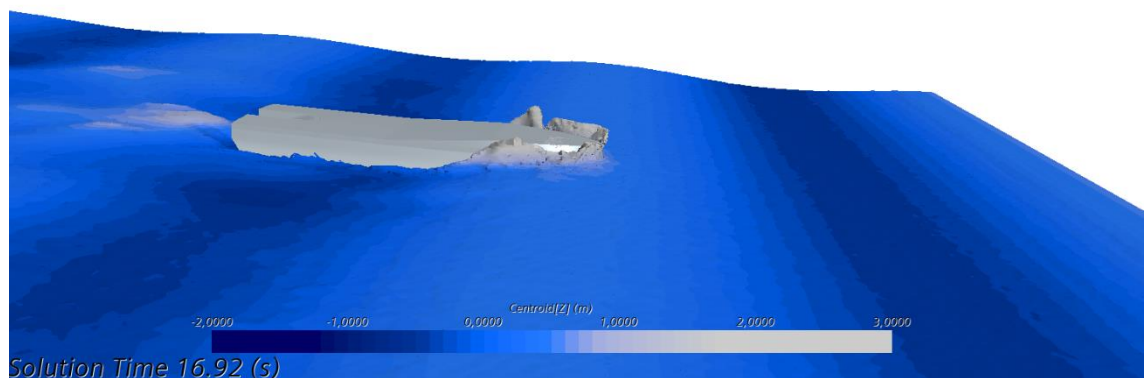
9 LASKENTATULOSTEN TARKASTELU

Tärkeä osa simulointia on simulointitulosten tarkastelu ja tulosten vertailu erilaisten simulointitapausten välillä. On määriteltävä mitä tuloksia, millaisia kuvaajia ja suureita simulointituloksista esitetään, jotta ne olisivat mahdollisimman havainnollisia ja helposti ymmärrettäviä. Kaikista muuttujista tai jokaisesta ajanhetkestä ei ole perusteltua esittää kuvaajia. Esitettyjä tuloksia ja kuvaajia määriteltäessä on huomioitava, että olennaiset ja tärkeät asiat tulee havaituiksi.

9.1 Aaltokuvion silmämääräinen tarkastelu

Tulosten tarkastelu aloitettiin katsomalla silmämääräisesti se, että simuloinnin aaltokuvio on odotusten mukainen. Jokainen alus jättää peräänsä peräaallot ja aaltokuvion, joten aaltokuvion ja roiskeiden tarkastelusta on hyvä aloittaa. Aaltokuvion ollessa visuaalisesti hyvän näköinen ja vedenpinnan odotusten mukainen voidaan siirtyä tarkastelemaan muita suureita.

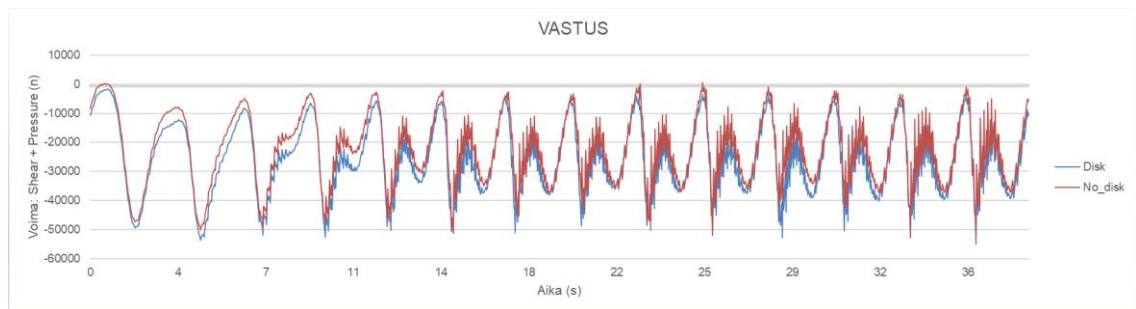
Tuloksia tarkasteltaessa tulee kiinnittää huomiota keulan roiskeisiin. Keulan roiskeiden muodostuminen vaikuttaa esimerkiksi kannen kastumiseen. Tässä tutkimuksessa simuloinnin pääpaino ei ollut roiskeiden selvittämisessä, mutta visualisesti tarkasteltaessa tuloksia saadaan hyvä käsitys roiskeiden määrästä ja kannen kastumisesta. (Kuva 16.)



Kuva 16. Simuloitava alus törmää aaltoon

9.2 Aluksen kulkuvastus

Aluksen tehonkulutusta tietyllä nopeudella voidaan seurata tutkimalla aluksen runkoon muodostuvaa kulkuvastusta. Kulkuvastus on suoraan verrannollinen aluksen tarvitsemaan työntövoimaan tietyllä nopeudella. Vastuskuvaajassa on kuvattu molemmat laskentatapaukset. Vastuskuvaajassa erottuu selvästi jokainen osuma aaltoon, joka hetkellisesti kasvattaa aluksen alukseen kohdistuvaa vastusta huomattavasti. Aallon läpi päästyään aluksen vastus pienenee merkittävästi. Potkureista johtuva aluksen keulan painuminen alaspäin selittää osaltaan sinisen vastuskäyrän isompia vastusarvoja, sillä keulan ollessa alempana ajoasennosta muodostuu suurempi vastus. Laskemalla kuvaajasta keskiarvo saadaan selville aluksen tarvitsema keskimääräinen työntövoima. Tätä voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi mitoitettaessa aluksen moottoritehoa, jotta aluksen on mahdollista saavuttaa sille suunnittelussa asetetut vaatimukset nopeuden suhteen. (Kuvio 2)

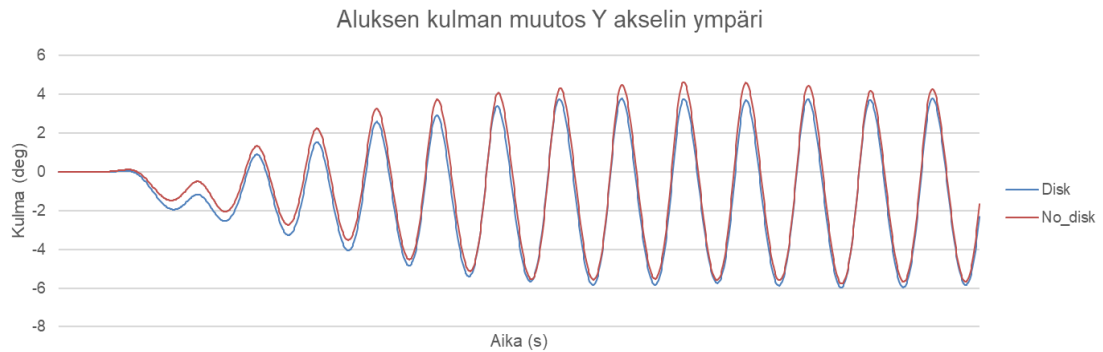


Kuvio 2. Aluksen kulkuvastus kahdessa eri laskentatapauksessa

9.3 Aluksen liikkeet aallokossa

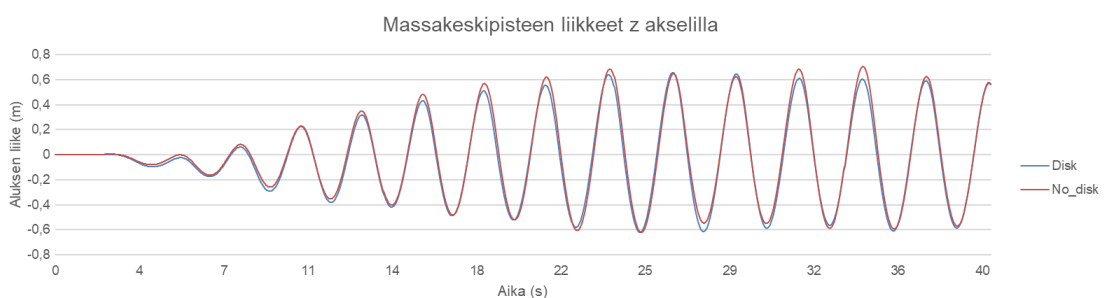
Simuloinnissa aluksen liikkeitä seurattiin tarkkailemalla massakeskipisteen liikkeitä. Massakeskipisteen liikkeistä seurattiin erityisesti nyökintää. Tätä tarkkailtiin nyökintäkulman muutosta hyväksikäyttämällä siten, että aloitus tilanne oli nolлатaso. Kuvaajassa on esitetty sekä omien potkureiden avulla liikkuvat, että lukitulla liikkeellä olevat simulointitapaukset. Omien potkureiden avulla liikkuvassa aluksessa aluksen eteenpäin vievä työntövoima tulee aluksen potkureista, kun taas lukitulla liikkeellä oleva alus ei käytä potkureiden työntövoimaa vaan etenee kokoajan tasaisella 10 solmun vauhdilla. Kuvaajaa tarkasteltaessa havaitaan, että potkureiltaan työntövoiman saava simulointitapaus, eli sininen kuvaaja on koko ajan vähän punaisen kuvaajan alapuolella. Tämä tarkoittaa,

että aluksen keula on jatkuvasti alempana kuin ilman potkureita olevalla laskennalla. Tämä johtuu potkureiden asennuskulmasta. Potkurin työntösuunnan ollessa 9 astetta vaakatasosta alaviistoon nostaa alus hieman peräänsä ylöspäin ja samalla painaa keula alas. (Kuvio 3)



Kuvio 3. Aluksen kulkuasennon muutos kahdessa eri laskentatapauksessa

Aluksen pystysuuntaista liikettä monitoroitiin myös massakeskipisteen liikkeiden perusteella. Diagrammissa on esitetty kummatkin simulointitapaukset ja näistä voidaankin päätellä että, potkurien käyttäminen ei merkittävästi vaikuta simulointituloksiin. Pitempää aikaa tarkasteltaessa tosin huomataan, että liikkeen maksimi- ja minimiarvot ovat potkurillisessa simulointitapauksessa jatkuvasti vähän pienempiä. Huomattavaa eroa näissä liikkeissä ei kuitenkaan ole. (Kuvio 4)



Kuvio 4. Aluksen korkeus sijainnin muutos kahdessa laskentatapauksessa

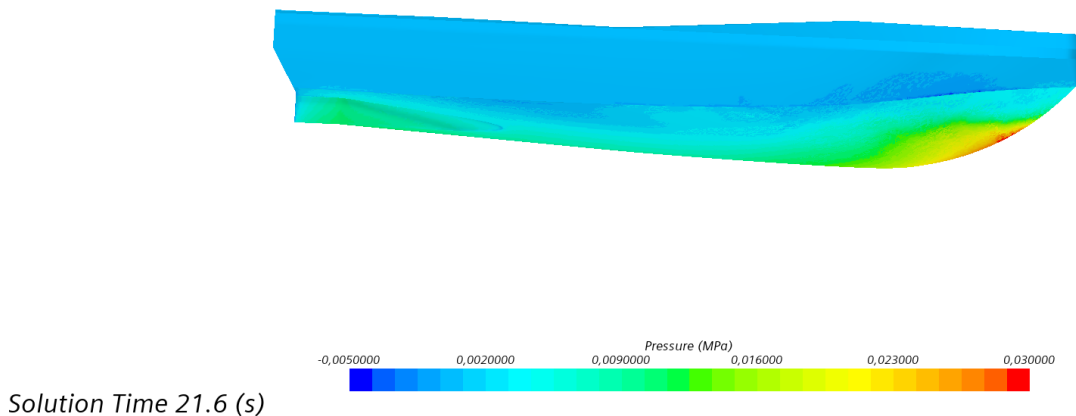
Ensimmäisessä simuloinnissa ei ollut muita vapausasteita kuin pystysuuntainen liike sekä keulan nyökintä. Toisessa simuloinnissa X suuntainen liike vapautettiin ja pidettiin

monitoroinnin avulla mahdollisimman lähellä nollassa, jotta aluksen nopeus pysyy vakiona ja tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia.

9.4 Iskuilmiön havainnollistaminen painekentällä

Iskuilmiön (engl. slamming) kuvastamiseen kiinnitettiin erityisesti huomiota simuloinnissa, sillä Elomatic Oy:n kehitysprojektissa haluttiin siirtää iskuilmiön muodostamat voimat mahdollisimman tarkkaan lujuuslaskentamalliin ja näin luoda aluksesta virtuaalinen kaksonen.

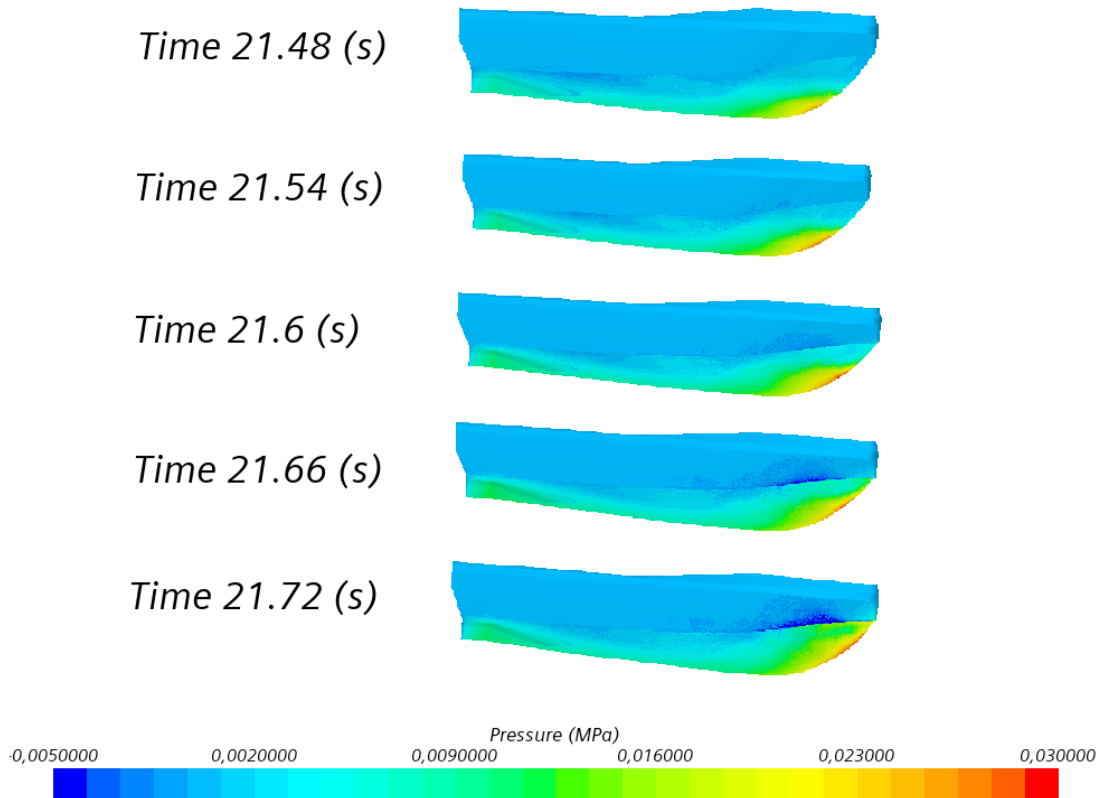
Aluksen runkoon aallokosta kohdistuvia voimia voidaan helpoiten simuloinnissa tutkia aluksen runkoon muodostuvan painekentän kuvaajan avulla. PaineKenttä on yhden ajanhetken tilanne rungon pinnalle muodostuvasta paineesta. (Kuva 17.)



Kuva 17. Aluksen painekenttä

Jotta saadaan kokonaiskäsitys paineen vaihtelusta rungon pinnalla ja pahimmista tilanteista, tulee painekenttiä tarkastella joskus jopa koko aallokon amplitudiväliltä. Kuvasta voidaan havaita painepiikin liikkuvan pitkin keulan pintaa alhaalta ylöspäin. Tällaisessa tilanteessa ei riitä vain yhden ajanhetken tutkiminen, vaan tutkiminen täytyy suorittaa pidempää ajanjaksoa tarkastellen. (Kuva 18.)

Paineentän muutos slamming ilmiössä



Kuva 18. Iskuilmiön kehitys ajan funktiona

9.5 Tulosten todenmukaisuuden arviointi

Silmämääräisesti arvioituna aluksen liikkeet vaikuttavat varsin totuuden mukaisilta, eikä epäjohdonmukaisia liikkeitä simuloinnin aikana tapahdu. Aluksen iskuista aiheutuvat roiskeet ovat todenmukaisen näköisiä. Aluksen iskuista aiheutuvat veden/aallokon roiskeet ovat johdonmukaisia ja havainnollisia

Simulointitulosten arviointi todellisiin aluksen liikkeisiin ja aluksen runkoon muodostuviin rasituksiin on erittäin vaikeaa, sillä aluksesta ei ole saatavilla mittaustuloksia tai mallikoikeista saatavaa dataa. Käytännössä oikeiden mittaustulosten ja simulointitapauksen välisten liikkeiden ja voimien arviointi olisi mahdollista vain simuloinnissa, jossa käytettäisiin epäsäännöllistä aallokkoa ja simulointiaika olisi huomattavasti pitempi.

Vertailu mallikokeisiin olisi varmin tapa arvioida tulosten todenmukaisuutta. Mallikokeiden luotettavuus perustuu siihen, että mallikokeita on tehty, kehitetty ja niiden todenmukaisuuksia on arvioitu vuosikymmenien ajan. Mallikoedataa voidaan pitää varsin luotettavana, kun halutaan vertailla simulointituloksia todellisuuteen.

Simuloinnin luotettavuudesta on tehty tutkimuksia, joissa on todettu simulointitulosten olevan erittäin lähellä mallikokeista saatuja tuloksia. Joissain tapauksissa simulointitulokset ovat jopa kyenneet kuvastamaan paremmin alukselle tapahtuvia fysikaalisia ilmiöitä kuin mallikokeet. (Kukkane, 2012)

Timo Kukkasen (2012) väitöstyössä on tutkittu laivakokoluokan aluksen mallikokeita sekä simulointituloksia. Tulosten tarkka tutkimus ja analysointi johtaa loppupäätelmiin, joissa todettiin laskentamenetelmien soveltuvan hyvin nesterakenne-vuorovaikutus ongelmien ennustettavuuteen. Laskentamenetelmillä kyetään kuvastamaan erityisen hyvin aaltokuormien vaikutusta aluksiin.

Tutkimus on tehty validoimalla laskentamenetelmä mallikokeiden kanssa. Validoinnissa todetaan laskentamenetelmällä saatavien tulosten pitävän paikkansa ja näin ollen olevan luotettava tapa tutkia aluksia.

Väitöstyössä on simuloitu varsin samankaltainen tilanne, jossa alus liikkuu kohtisuoraan säännöllistä aallokkoa kohti. Työssä todettiin simulointitulosten vastaavan mallikokeista saatuja arvoja. Tämän perusteella voidaan opinnäytetyössä toteutetun simuloinnin tuloksia pitää luotettavina, vaikka niitä ei pystytä vertailemaan kyseisen aluksen mallikoetuloksiin tai mittausdataan.

10 LOPUKSI

Opinnäytetyön alussa oli tarkkaan määritelty mitä asioita simuloinnissa haluttiin tutkia ja mitä asioita simulointituloksen tulisi kuvantaa. Lopputulemana voidaankin todeta, että opinnäytetyössä onnistuttiin pääsemään sille asetettuihin vaatimuksiin.

Laskentaperiaatteen kehityksen ja tutkimisen osalta onnistuttiin kehittämään ja luomaan laskentaperiaatteet, joilla simulointi on helposti toistettavissa, jopa erikokoisilla aluksilla. Laskenta-alueet tulee kuitenkin aina sovittaa aluksen kokoon sopiviksi.

Iskuilmion kuvastaminen onnistui varsin hyvin ja siitä tuloksena saatiin luotua mielenkiintoinen video, jossa voidaan havaita iskuhetken paineen kehitys aluksen keulassa. Tämän videon perusteella kyetään tutkimaan pahimpien ajanhetkien painekenttiä ja löytämään niistä pahimmat painepiikit.

Aluksen liikkeiden ja niiden simuloinnin osalta onnistuttiin simuloimaan aluksen liike aallokossa. Aluksen pieni koko loi alukselle suuria liikkeitä, joka vaikeutti simulointia, mutta aluksen aaltokäyttäytyminen vaikutti silmämääräisesti oikealta. Aluksen liikkeistä kerättiin dataa ja videoita. Näiden vertailu samanaikaisesti vahvisti käsitystä onnistuneesta simuloinnista.

Opinnäytetyötä voidaan pitää erittäin onnistuneena ja kehitetystä prosessista on varmasti jatkossa hyötyä. Jääkin siis mielenkiinnolla odottamaan CFD-laskennan jatkokehitystä ja sen mukanaan tuomia mahdollisuuksia. Se minkälaisista simulointi tuloksista nyt haaveillaan voi olla mahdollista 10 vuoden kuluttua.

LÄHTEET

Arsdale, Van. 2021. Chapter 6: Waves. [Online] 2021. [Cited: 5 27, 2021.] <https://mrvanarsdale.com/marine-science/online-textbook/chapter-6-waves/>.

Conself. 2021. 5 tips to improve your CFD simulation accuracy. [Online] Conself, 1 4, 2021. [Cited: 5 19, 2021.] <https://conself.com/blog/5-tips-to-improve-your-cfd-simulation-accuracy/>.

Elomatic. 2021. *isions of Tomorrow – Engineered Today*. [Online] Elomatic Oy, 5 2021. [Cited: 5 5, 2021.] <https://www.elomatic.com/fi/>.

Ilmatieteenlaitos. 2020. Aallokko Itämerellä. [Online] Ilmatieteenlaitos, 8 2020. www.ilmatieteenlaitos.fi/aallokko.

— . 2020. Ilmatieteen laitoksen havaintoasemat. [Online] Ilmatieteenlaitos, 8 2020. [Cited: 8 10, 2020.] <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintoasemat?filterKey=groups&filterQuery=poiju>.

Kukkane, Timo. 2012. *Numerical and experimental studies of nonlinear wave loads of ships*. Espoo : VTT, 2012. ISBN 978-951-38-7933-4.

National aeronautics and space administration. 2021. Navier-Stokes Equations. [Online] National aeronautics and space administration, 2 3, 2021. [Cited: 5 5, 2021.] <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.html>.

NPARC. 2021. Glossary of Verification and Validation Terms. [Online] NPARC Alliance, 2 10, 2021. [Cited: 5 19, 2021.] <https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/glossary.html#iterative%20convergence>.

Seismologian-instituutti. 2020. [Online] 8 2020. [Cited: 8 10, 2020.] <https://www.helsinki.fi/fi/seismologian-instituutti/tsunamit>.

Siemens. 2019. Simcenter STAR-ccm+. [Online] Siemens, 6 27, 2019. [Cited: 8 10, 2020.] https://support.sw.siemens.com/en-US/product/226870983/knowledge-base/KB000038256_EN_US?pid=sc%3Asearch&pid_context=fivft%20vof%20wave&index=content-external&audience=external.

Stull, Samantha James. Roland. 2019. Breaking Waves. [Online] The university of british columbia, 3 2019. [Cited: 5 10, 2021.] https://www.eoas.ubc.ca/courses/atasc113/sailing/met_concepts/08-met-waves/8c-breaking-waves/index.html.

Tryggvason, Gretar. 2017. CFD intro. [Online] University of Notra Dame, 1 18, 2017. [Cited: 5 27, 2021.] <https://www3.nd.edu/~gtryggva/CFD-Course2017/Lecture-1-2017.pdf>.

versteeg, H K and Malalasekera, W. 2007. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2.painos. s.l. : Pearson Education, 2007.

