

Joel Viitala

ALUKSEN KEULAMUOTOILUN KEHITYS

Merenkulun koulutusohjelma
Merikapteenin suuntautumisvaihtoehto
2019

ALUKSEN KEULAMUOTOILUN KEHITYS

Viitala, Joel
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Merenkulun koulutusohjelma
Elokuu 2019
Sivumäärä: 33

Asiasanat: Merenkulku, keulapaksunnos, bulbi, hydrodynamiikka

Tämän opinnäytetyön aiheena oli keulamuotoilun kehitys ja tehokkuus aluksissa. Opinnäytetyössä käsiteltiin lyhyesti laivan hydrodynamiikkaa, selvitettiin miten keulapaksunnos muuttaa sitä ja mitä hyötyjä keulapaksunnoksesta on. Työssä esiteltiin erilaisia keularakenteita ja innovaatioita aluksen tehokkuuden parantamiseksi.

Ekologisuus ja tehokkuus ovat olleet merenkulussa puheenaiheena pitkään, joten jo laivan rungon suunnittelussa pyritään minimoimaan veden aiheuttama vastus. Siksi aluksen hydrodynaamisten ominaisuuksien ymmärtäminen ja käsitteleminen on yksi tärkeimmistä osa-alueista laivanrakennuksessa.

Aineistoa laivan hydrodynamiikasta ja keulan muodon merkityksestä on hankittu pääosin internetlähteistä.

Opinnäytetyössä on myös katsaus tulevaisuuteen ja pohdintaa siitä, miten laivojen rungon muodoilla ja erilaisilla järjestelmillä vähennetään virtausvastusta pyrkien entistä ilmastoystävällisempään ja tehokkaampaan kauppamerenkulkuun.

DEVELOPEMENT OF BOW DESIGN

Viitala, Joel

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in maritime management

August 2019

Number of pages: 33

Keywords: Maritime, bulbous bow, hydrodynamics

The subject of this thesis was the development and effectiveness of bow design on ships. The thesis dealt briefly with the hydrodynamics of the ship, how the bow thickening changes it and what are the benefits of bulbous bow. The work presented various bow structures and innovations to improve the efficiency of the ship.

Ecology and efficiency have been a topic of discussion in shipping for a long time, so the design of the ship's hull is already designed to minimize water resistance. Therefore, understanding and handling the hydrodynamic properties of a ship is one of the most important aspects of shipbuilding.

Material on the hydrodynamics of the ship and the importance of bow shape have been obtained mainly from internet sources.

The thesis also provides an insight into the future and considers how ship hull shapes and various systems reduce flow resistance in a bid to achieve a more climate-friendly and efficient shipping industry.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	HISTORIA	8
3	LAIVAN HYDRODYNAMIIKKA LYHYESTI.....	9
3.1	Laivan hydrodynamiikka	9
3.2	Veden vastus	9
3.3	Veden ja laivan välinen vastus.....	10
4	KEULAPAKSUNNOS LAIVASSA.....	13
4.1	Keulapaksunnos yleisesti	13
4.2	Erilaisia keularakenteita.....	17
4.2.1	Keularakenteet ilman keulapaksunnosta	18
4.2.2	Eriytyypisiä keulapaksunnoksia	19
4.2.3	Muita keularakenteita	20
4.3	Keulapaksunnoksen hyödyt ja haitat	21
5	TULEVAISUUS JA INNOVAATIOT	24
5.1	Pulputusjärjestelmä.....	24
5.2	Hi-Fin.....	25
5.3	Onboard DC Grid.....	25
5.4	Low Loss Hybrid Energy System (LLH).....	26
5.5	Fuel Oil Emulsion (FOE).....	26
5.6	Tuuli- ja aurinkovoima	26
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	29
	LÄHTEET.....	31

TERMILUETTELO

Bulbi	Keulapaksunnos, laivan keulassa veden pinnan alle jäävä pyöreä uloke.
Korsteeni	Laivan pakoputki.
Plaani	Kulussa oleva vene nousee keula-aaltonsa päälle.
CFD	Computational fluid dynamics. Numeerinen virtauslaskentamenetelmä, jolla ratkaistaan ja analysoidaan nesteiden ja kaasujen käyttäytymistä.
Propulsio	Laivan kulkuvastuksen kumoamiseen ja kiihdytykseen tarvittava työntövoima.
VTT	Teknologian tutkimuslaitos (ent. Valtion teknillinen tutkimuslaitos).
Märkäpinta	Laivan pinnat, jotka koskettavat vettä.

1 JOHDANTO

Nykypäivän merenkulussa ja uusien laivojen suunnittelussa kiinnitetään entistä enemmän huomiota ekologisuuteen ja energiatehokkuuteen. Laivojen rikkipäästöjä on rajattu kansainvälisesti ja niitä valvotaan alati. Monet varustamot ovat asennuttaneet aluksiinsa pakokaasupesureita, jotka suodattavat pakokaasusta epäpuhtauksia ennen kuin ne päästetään korsteenia pitkin ilmaan. Päästöongelma poistuu myös silloin, kun käytetään nesteytettyä maakaasua (LNG), tällöin päästöt ovat käytännössä nollan tuntumassa. LNG:n käyttö on kuitenkin hyvin rajallista, koska tankkausasemia ei vielä juurikaan ole. Käyttökustannusten kasvaminen raakaöljyn hinnannousun ja päästörajoitusten takia asettaa uudisrakenteisiin painetta suunnittelun puolella. Ekologisuuden ja tehokkuuden parantamiseen kehitellään jatkuvasti erilaisia polttoainetta säästäviä järjestelmiä ja rungon muotoja, jotka edistäisivät laivan kulkua vedessä ja näin ollen vähentäisivät laivan ja veden välistä vastusta. Yksi yksinkertaisimmista vedenvastuksen vähentämiseen kehitetyistä laitteistoista on pulputusjärjestelmä, jossa laivan rungon ja veden väliin puhalletaan rungossa olevien pienten reikien kautta ilmaa kovalla paineella. Ilmakuplat laivan rungon ja veden välissä vähentävät kitkaa, jolloin laivan kulku helpottuu. Pienikin vastuksen vähennys johtaa positiivisiin tuloksiin pitkällä aikavälillä. Polttoainetta säästyy, päästöt pienentyvät ja liikennöintikustannukset laskevat.

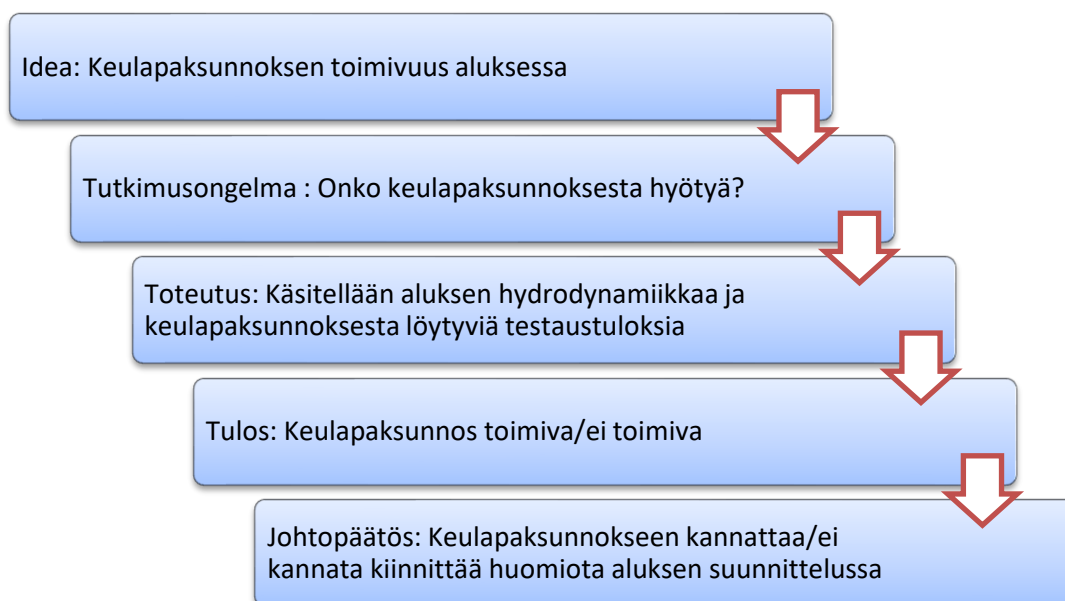
Laivan hydrodynamiikka ei kuulu suoranaisesti merikapteenin koulutusohjelmaan, joten opinnäytetyön tarkoitus on tehdä katsaus ja avartaa tietoa keulapaksunnoksen vaikutuksesta laivan kulkuun ja siitä syntyviin muutoksiin sekä verrata sen hyötyjä laivaan, jossa ei ole keulapaksunnosta. Tavoitteena on selventää ja tuoda esille ehkä vähemmälle huomiolle jäänyttä seikkaa, vedenvastusta, joka kuitenkin on suurin voima, mitä laiva pyrkii kumoamaan liikkuaan. Työssä on käytetty apuna myös kuvia, jotka havainnollistavat erilaisia ilmiöitä ja vaikutuksia mitä keulapaksunnokseen liittyy. Nykyajan ympäristöystävällisemmän ajattelun takia pidän aihetta ajankohtaisena.

Suurilla konetehoilla voidaan helposti halkoa vettä, kumota vedenvastus, ajaa vaadittua nopeutta ja kuluttaa suuria määriä polttoainetta, mutta nykypäivän merenkulussa

pyritään nimenomaan optimoimaan nopeus ja kulutus kustannustehokkaaksi. Ekologisuuden ja tehokkuuden ajattelu aloitetaan jo laivan rungon hyvällä suunnittelulla.

Opinnäytetyö on kvalitatiivinen, eli laadullinen tutkimus, jossa tutkimusmenetelmänä on perustutkimus. Kvalitatiivisessa tutkimuksessa tutkittavaa kohdetta katsotaan kokonaisvaltaisesti pyrkien ymmärtämään sen ominaisuuksia ja merkityksiä (Jyväskylän Yliopisto, 2015). Opinnäytetyön tietoperusta syntyy merenkulun ammattilaisten ja eri yritysten kokemuksista, testituloksista ja laskennallisista faktoista, joita keulapaksunnoksen kehittämisen on tuonut esille. Aineistoa on hankittu pääosin internet-lähteistä, joita tarkastelemalla analysoidaan keulapaksunnokseen liittyviä tekijöitä ja muuttujia mitä keulapaksunnoksen suunnitteluun, asentamiseen ja käyttöön liittyä sekä miten ne kaikki yhdessä vaikuttavat valmiiseen tuotteeseen.

Opinnäytetyön teoreettista viitekehystä, eli näkökulmaa, voidaan kuvata kuviolla 1. Työhön liittyvä keulapaksunnoksen toimivuus aluksessa on työn idea, jolloin tutkimusongelmaksi muodostui keulapaksunnoksen hyödyllisyys. Toteutukseen hankitaan tietoa eri lähteistä testien, tutkimusten ja hydrodynamiikan osalta, jotta saadaan moniulotteisia näkökulmia keulapaksunnoksen toimivuudesta, hyödyistä ja haitoista. Jos tulokset ovat positiivisia, on keulapaksunnoksen asennuttaminen ja siihen panostaminen kannattavaa. Jos taas tulokset ovat negatiivisia, on keulapaksunnoksen hyötyjä ja suunnittelua tutkittava uudestaan ja asennuttamista harkittava tarkkaan.



Kuvio 1. Teoreettinen viitekehys

2 HISTORIA

Laivan suunnittelussa yksi tärkeä osa-alue on rungon muoto ja sen vaikutus muun muassa aluksen kulkuun ja erityisesti polttoainetalouteen, mikä on ajansaatossa kehittynyt huomasti. Rungon hyvällä suunnittelulla varmistetaan aluksen optimaalinen toiminta.

Keulapaksunnoksen vaikutusta laivan vedenvastukseen ryhdyttiin tutkimaan 1950-luvulla isojen kauppa-alusten vedenvastuksen pienentämiseksi. Monia eri vaihtoehtoja testattiin ja kehitystyö jatkuu vielä tänäkin päivänä. Mallinnuksilla ja lisääntyneellä tiedolla laivan hydrodynamiikasta keulapaksunnos saatiin muotoiltua niin, että se vähensi laivan polttoaineenkulutusta tyypillisesti 5%, mutta vain hyvin kapealla alueella ja tietyllä aluksen nopeussyväys suhteella. Tämä oli erittäin positiivinen asia valtamerillä seilaaville suuremmille kauppa-aluksille. Öljyn hinta oli nousussa ja 5% säästö polttoaineenkulutuksessa oli todella merkittävä niin suurilla määrillä, mitä alukset kuluttivat polttoainetta. Kaikille laivatyypeille se ei kuitenkaan ollut hyödyllinen. Pienemmissä aluksissa keulapaksunnoksen asentaminen ei ollut kannattavaa, koska säästöön vaadittava aluksen nopeus oli liian alhainen ja kilpailu kovaa. Myöhemmin innovatiivisimmat laivanrakentajat halusivat etsiä ratkaisuja asiakkaidensa toiveisiin nopeudesta ja polttoainetaloudellisuudesta. Keulapaksunnos erottui ensisijaiseksi ratkaisuksi ongelmaan. (Bray, 2004)

Kun suurten alusten polttoainetaloudellisuutta ja vedenvastusta onnistuttiin pienentämään keulapaksunnoksella, entistä pienemmät ja pienemmät alukset kiinnostuivat todetuista tuloksista ja halusivat omiin aluksiinsa samanlaisia ominaisuuksia. Keulapaksunnoksia ryhdyttiin asentamaan Amerikan länsirannikon kalastusaluksiin, jotka seilasivat pitkiä matkoja avomerellä Kalifornian ja Alaskan välillä. Troolarit olivat ensimmäisiä keulapaksunnollisia kalastusaluksia, niiden jälkeen tulivat muut kalastuslaivaston alukset. (Bray, 2004)

1980-luvun lopulla Brittiläisen Kolumbian Yliopisto teki testejä 60-jalkaisiin kalastusaluksiin ja siitä muodostui keulapaksunnoksen kehityskeskus. He tekivät mallikoikeita jahtivalmistajille, kaupallisille telakoille sekä suunnittelijoille että tutkijoille. (Bray, 2004).

3 LAIVAN HYDRODYNAMIIKKA LYHYESTI

3.1 Laivan hydrodynamiikka

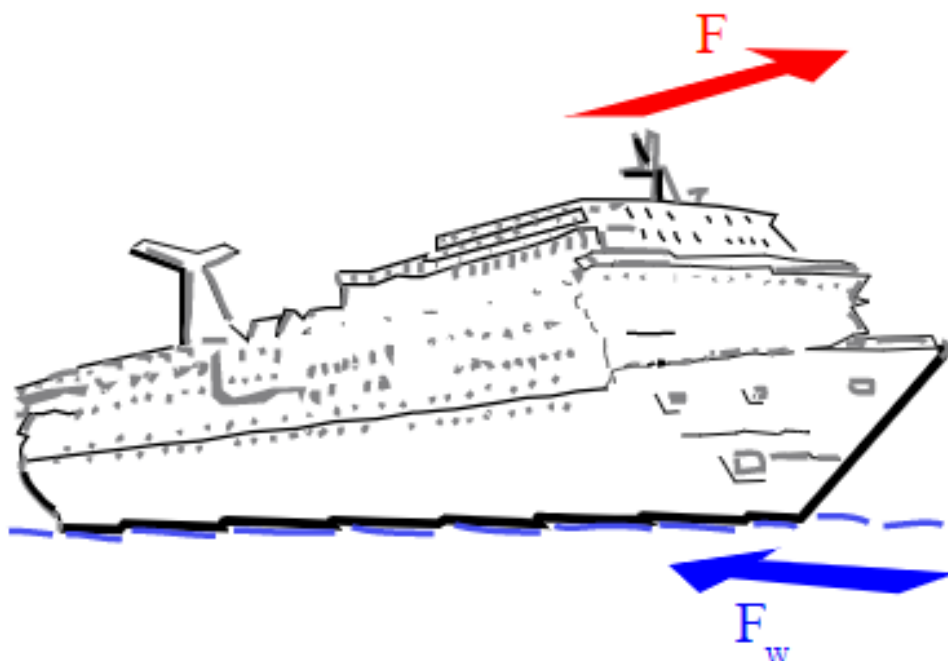
Laivan hydrodynamiikkaa suunniteltaessa huomioidaan laivan runkoon kohdistuvia veden virtauksia ja niiden käyttäytymistä. Laivan märkäpinta on mutkikas kokonaisuus erilaisia muotoja kaarevista pinnoista ulokkeisiin ja aukkoihin. Koska hydrodynamiikan suunnittelun tavoitteena on mahdollisimman energiatehokas rungon ja potkureiden yhdistelmä, on otettava myös huomioon kaikkien rakenneosien yhteisvaikutus. Hyvä hydrodynamiikan suunnittelu takaa pienemmän polttoainekulutuksen, toimintavarmuuden erilaisissa operointiympäristöissä sekä turvallisemman että matkustajaystävällisemmän laivan. Jotta uuden laivan kaikki osat saadaan optimoitua käyttötarkoituksen mukaisia operointiolosuhteita vastaaviksi, on laivan rungolle tehtävä laajoja laskelmia, mallinnuksia ja kokeita sekä sovitettava ne yhteen laivan koon ja muiden pienempien yksityiskohtien kanssa. Esimerkiksi aluksen potkurin suulakkeet sovitetaan laivan operointinopeuteen. Laivan liikuttamiseen kuluu peräti 60 % sen tuottamasta energiasta, joten jo pienetkin muunnokset laivan rungon muodossa saavat aikaan merkittävän muutoksen laivan energiankulutuksessa. Hyvällä laivan hydrodynaamisella suunnittelulla runko myös minimoi aaltojen muodostumisen ja sitä kautta vähentää edelleen laivan energiankulutusta. (Meyer Turku Oy, 2017)

Nopean ja pienen kulkuvastuksen omaavan rahtilaivan tulisi olla muodoiltaan piikkimäinen tai veitsimäinen, jotta kitkan ja aallonvastuksen vaikutus laivaan olisi minimaalinen. Käytännössä veitsen muotinen laiva olisi todella kiikkerä eikä ollenkaan sen käyttötarkoitukseen sopiva.

3.2 Veden vastus

Veden vastus syntyy, kun kappale, tässä tapauksessa laiva, on vuorovaikutuksessa veden kanssa. Vedenvastukselle on ominaista, että nopeuden kasvaessa vastus kasvaa. (J. Karkkulainen, O. Karkkulainen & Kinnunen, 2014)

Vedessä kahlaaminen mallintaa vedenvastusta hyvin. Kahlatessa vyötäröä myöten vedessä kävelykin tuntuu jo vaivalloiselta. Kun vauhtia kasvattaa ja yrittää juosta, niin veden vastus tuntuukin jo todella suurelta. Kahlatessa taas vain nilkkoihin asti ulottuvassa vedessä, veden vastus ei ole juurikaan kummoinen kävellessä tai juostessa. Tässä huomataan, että myös veden alla olevan osan koko vaikuttaa veden vastukseen. Kahlaus-esimerkki auttaa hahmottamaan miten ison veden vastuksen laiva kohtaa kulkiesaan vedessä suurella tai pienellä syvyyksellä ja kuinka paljon voimaa se tarvitsee kumotakseen veden vastuksen tarvittavan nopeuden saavuttamiseksi.



Kuva 1. Laivan työntövoima F ja vedenvastus F_w (Lehan, 2016)

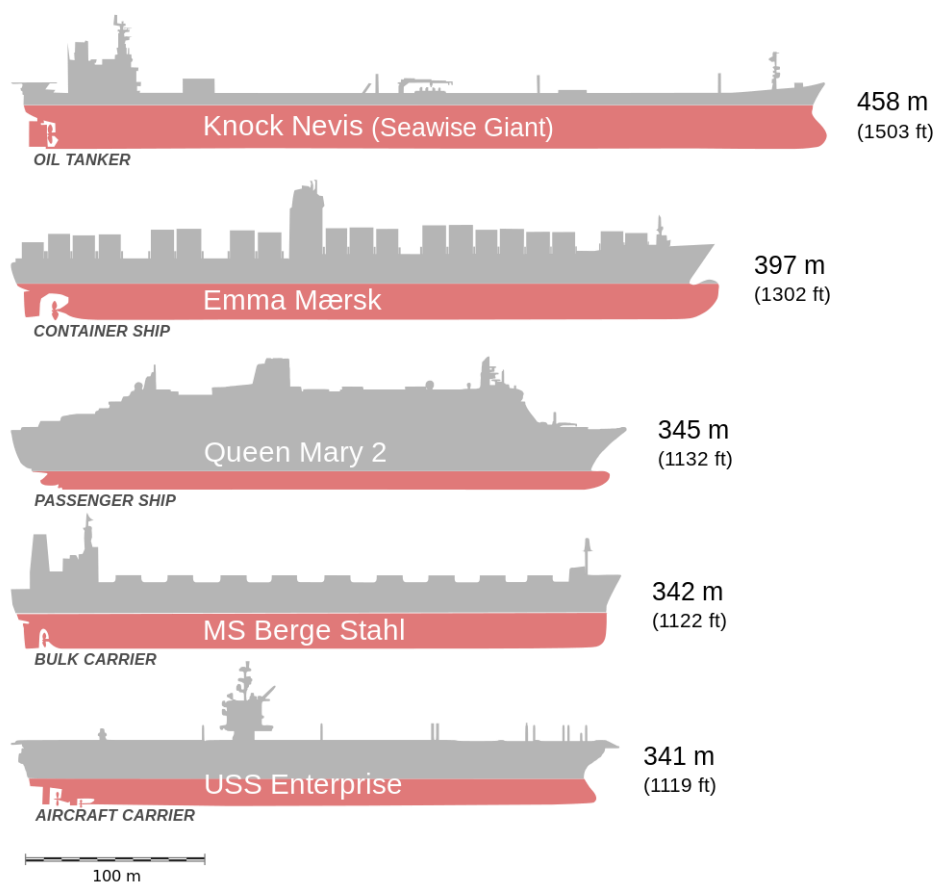
3.3 Veden ja laivan välinen vastus

Veden kitka syntyy vesimolekyylien virratessa laivan kylkiä pitkin samalla hangaten laivan vedenalaisia osia. Kitkan suuruuteen vaikuttavat hankaavien pintojen materiaalit ja muodot. Kitkan pienentämiseksi vedenalaisista osista yritetään tehdä mahdollisimman sileäpintaisia esimerkiksi pinnoittamalla tai maalaamalla. Alukseen kohdistuva veden kitka on melkein suorassa suhteessa veden alla olevan pinnan kokoon ja laivan nopeuteen. (Tieteen Kuvalehti, 2009) Kitkaa pyritään vähentämään ensisijaisesti jo suunnitteluvaiheessa, jolloin tehdään monimutkaisia ja laajoja testejä

erityyppisille rungonmuodoille ja potkureille. Laivasta pyritään tekemään yhtenäinen laitos, jonka kaikki elementit tukevat toisiaan aikaansaaden toimivan ja hyötysuhteitaan tavoitteiden mukaisen kokonaisuuden.

Arkhimedeen lain mukaan vedessä oleva laiva syrjäyttää painonsa verran vettä, joten liikkuaakseen laivan on syrjäytettävä painonsa verran vettä. Mitä enemmän laiva syrjäyttää vettä, sen enemmän se tekee aaltoja, jolloin muodostuu aallonvastusta. Laiva ikään kuin kaivaa kuoppaa itselleen edetessään vedessä eikä pääse sieltä ylös. (Antrim Associates, 2014)

Pienillä ja nopeilla huviveneillä tätä ongelmaa ei ole. Vene nousee tehopaino -suhteensa ja rungon muotonsa ansiosta oman keula-aaltonsa päälle ja pääsee kuopastaan ylös, eli plaanaa. Plaanissa veneeseen kohdistuu vain pieni osa vedenvastuksesta verrattaessa sen kulkiessa hitaammalla vauhdilla kaivaessaan kuoppaa. Isoilla kauppamerenkulun laivoilla plaanaaminen ei ole mahdollista niiden tehopaino -suhteensa takia.



Kuva 2. Muutamien laivojen syvyyksiä merkattu punaisella (Ménard, 2007)



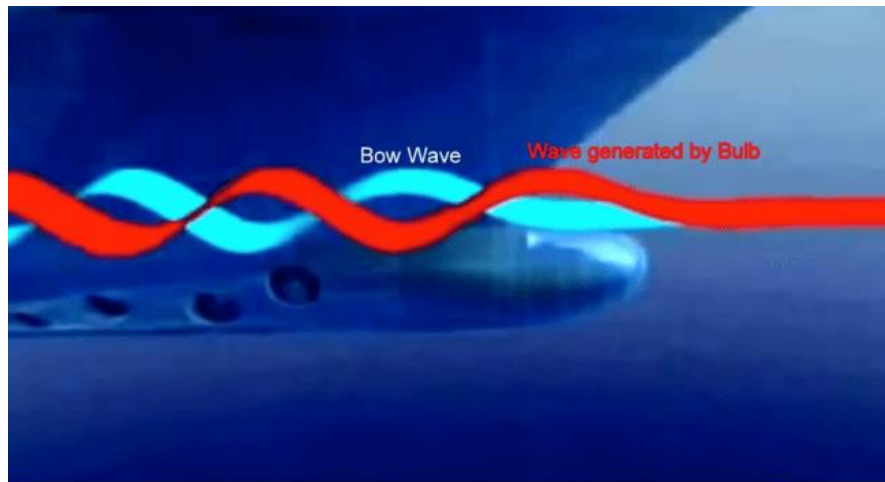
Kuva 3. Vene plaanissa. (Venealan Keskusliitto Finnboat ry, 2017)

4 KEULAPAKSUNNOS LAIVASSA

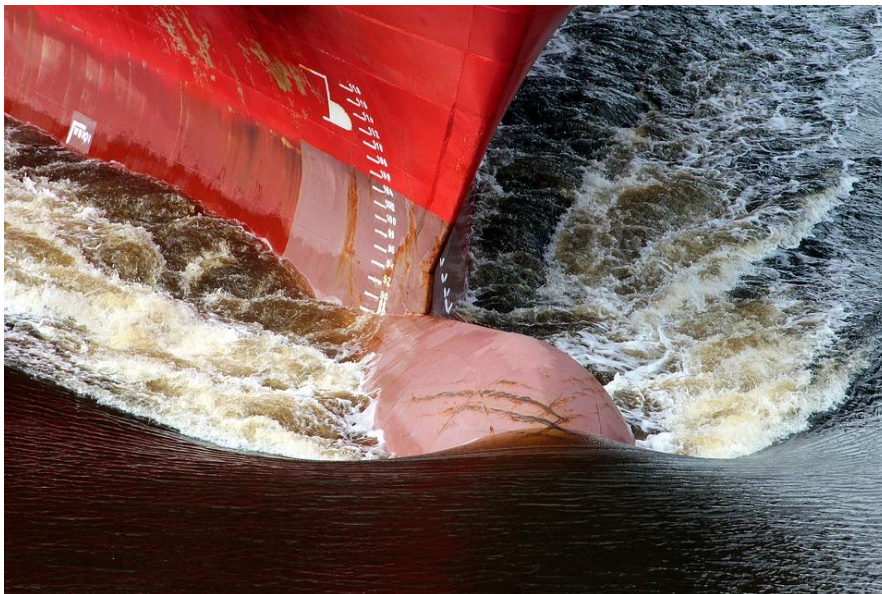
4.1 Keulapaksunnos yleisesti

Keulapaksunnos, eli bulbi, on laivan keulassa sijaitseva yleensä suhteellisen pyöreä uloke, jolla pyritään pienentämään aluksen liikkeeseen liittyvää kitkaa ja aaltojen muodostumisesta aiheutuvaa vastusta. Jos keulabulbi suunnitellaan väärän muotoiseksi laivan muuhun runkoon nähden, voi se pahimmassa tapauksessa lisätä laivan liikekitkaa ja aallonmuodostusta. Vaikka kitka on melkein suorassa suhteessa laivan märkäpinnan pinnan kokoon, ei keulabulbi kuulosta kovin järkevältä ratkaisulta, koska se ymmärrettävästi lisää laivan vedenalaisten osien pinta-alaa. Keulabulbi vähentää kuitenkin aaltojen muodostumisesta aiheutuvaa vastusta. (Tieteen Kuvalehti, 2009)

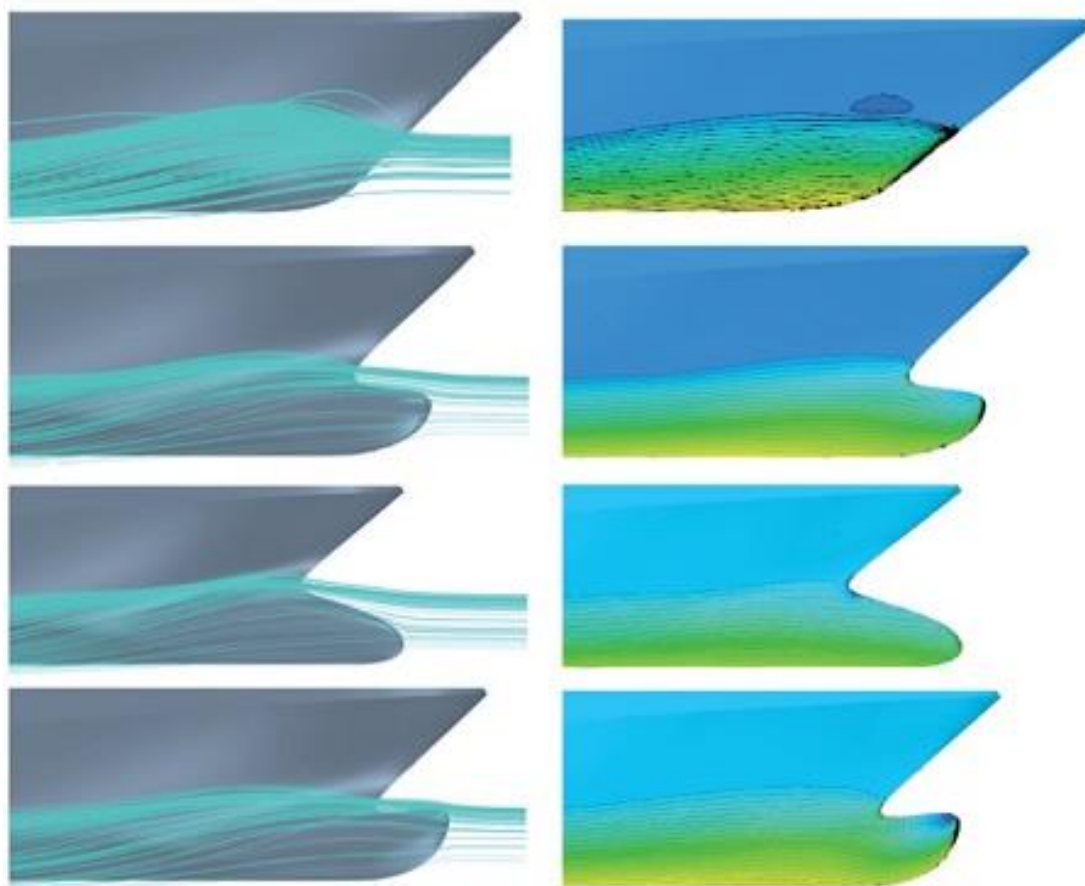
Nykyään suurimmassa osassa laivoista on keulabulbi ja etenkin uudisrakenteisiin se suunnitellaan jo automaattisesti. Nykyään keulabulbi löytyy melkein kaikista merenkulun alustyypeistä, isoista konttilaivoista ja tankkereista aina huviveneisiin asti. Miksi? Mietitään vaikka ehkä maailman kuuluisinta suorakeulaista alusta, *Titanicia*. Kun alus etenee vedessä, vesipartikkelit liikkuvat kohti perää aluksen koko rungon mitalla. Suoraan aluksen alla olevien vesipartikkelien hetkellinen nopeus on nolla, tätä kutsutaan pysähtymispisteeksi. Bernoullin yhtälön mukaan paine on pysähtymispisteessä korkeampi, joten veden paine on keulassa suurempi, mikä saa aikaan aallon harjan. Keulassa olevaa aaltoa kutsutaan keula-aalloksi, koska se muodostuu keulaan keulan liikkuaessa veden lävitse. Suorakeulaisessa laivassa sen keulaan muodostuu aina keula-aalto ja jonka aallon harja on keulassa. Näin ollen osaa moottoritehosta tuhlataan tämän aallon muodostamiseen ja siitä syntyvään aallonvastukseen. Keulabulbilla kumotaan haitallinen keula-aalto, jolloin laivan keulan aallonmuodostus vähenee. Keula-aalto ikään kuin siirtyy ja muuttuu pelkistetyimmäksi (kuvat 4 ja 5). (Chakraborty, 2017)



Kuva 4. Sininen keula-aalto suorakeulaisessa laivassa ja punainen aalto keulapaksunnollisessa laivassa. Aallot kumoavat toisensa. (Chakraborty, 2017)



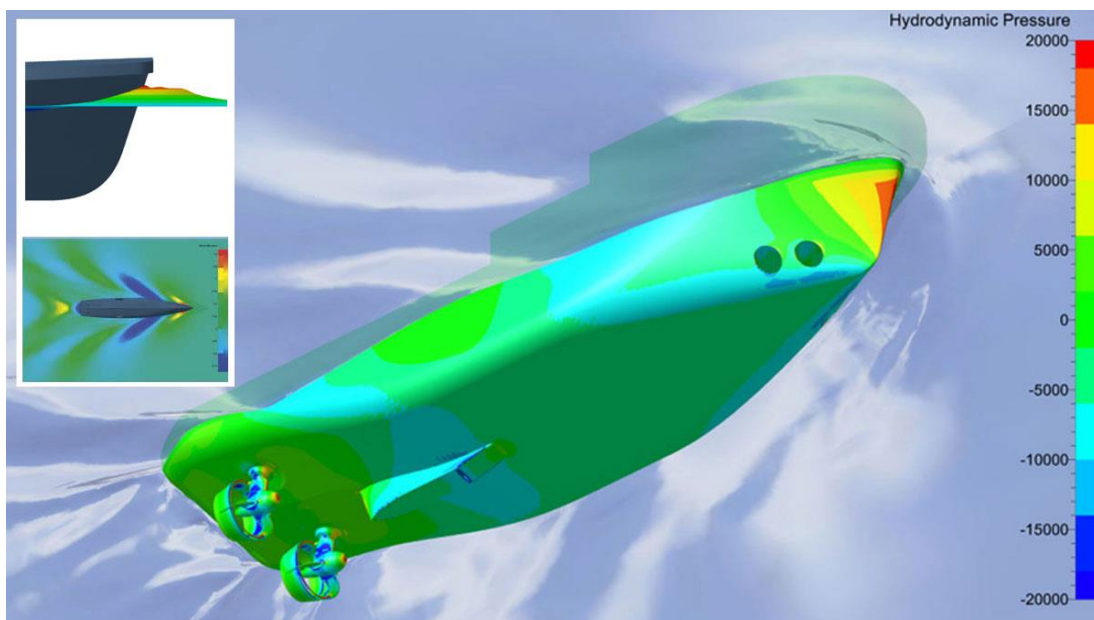
Kuva 5. Keula-aallon kumonnut keulabulbi. (PixaBay, 2016)



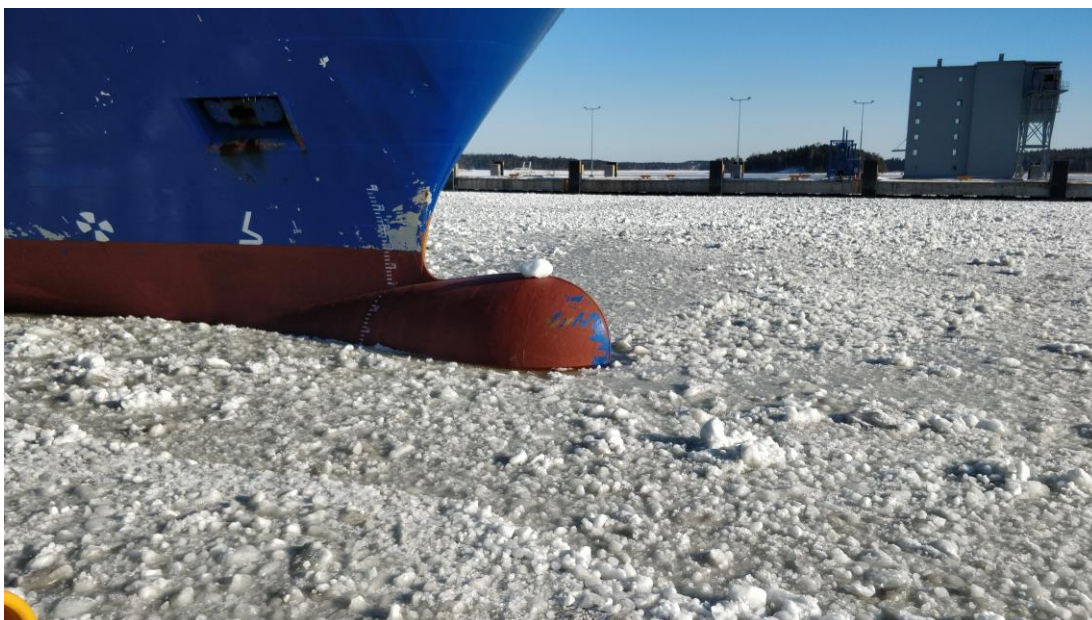
Kuva 6. Virtaus- ja paineviivat erilaisissa keularakenteissa. Huomaa keula-aallon muodostuminen ilman kaulapaksunnosta. (Leal, Flores, Fuentes & Verma, 2017)

Keulabulbeja on monen muotoisia, koska suunnittelijoita, laivoja ja niiden käyttötarkoituksia on erilaisia. Bulbin muodot määräytyvät laivan muun rungon ja potkureiden muotojen mukaan. Nykyään bulbin toimivuutta erilaisissa rungoissa ja potkuriyhdistelmissä voidaan testata digitaalisesti muun muassa CFD-testauksessa (Computational Fluid Dynamics). CFD-testaus antaa suunnittelijoille tarkan kuvan laivan hydrodynamikasta ja virtaviivaisuudesta. CFD:llä parannetaan laivojen rungon hydrodynamista suorituskykyä ja propulsiolaitteiden tehokkuutta. Lisäksi laivoille tehdään pienoismallikokeita erikoisrakenteisissa altaissa, joissa saadaan reaaliaikaista dataa laivan ympärillä olevista virtauksista ja niiden vaikutuksista. Suomessa luotettavien ja keveiden rakenneratkaisujen kehittämiseksi laivoja ja merirakenteita varten VTT tutkii nesteiden ja rakenteiden välistä vuorovaikutusta, aaltokuormia jääkuormia sekä dynaamisia kuormia. (Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2019)

Keulabulbi siis auttaa kumoamaan laivan keula-aallon, jonka muodostamiseen laiva käyttää turhaa energiaa eli propulsiota. Luomalla bulbilla toisen keula-aallon hieman ennen laivan varsinaista keula-aaltoa, ne kumoavat toisensa ja vastus pienenee sekä taloudellisuus ja tehokkuus kasvavat.



Kuva 7. Erään laivan CFD-analyysi (SIP Marine, 2017)



Kuva 8. Jääpala keulabulbin päällä. (Joel Viitala, 2018)

4.2 Erilaisia keularakenteita

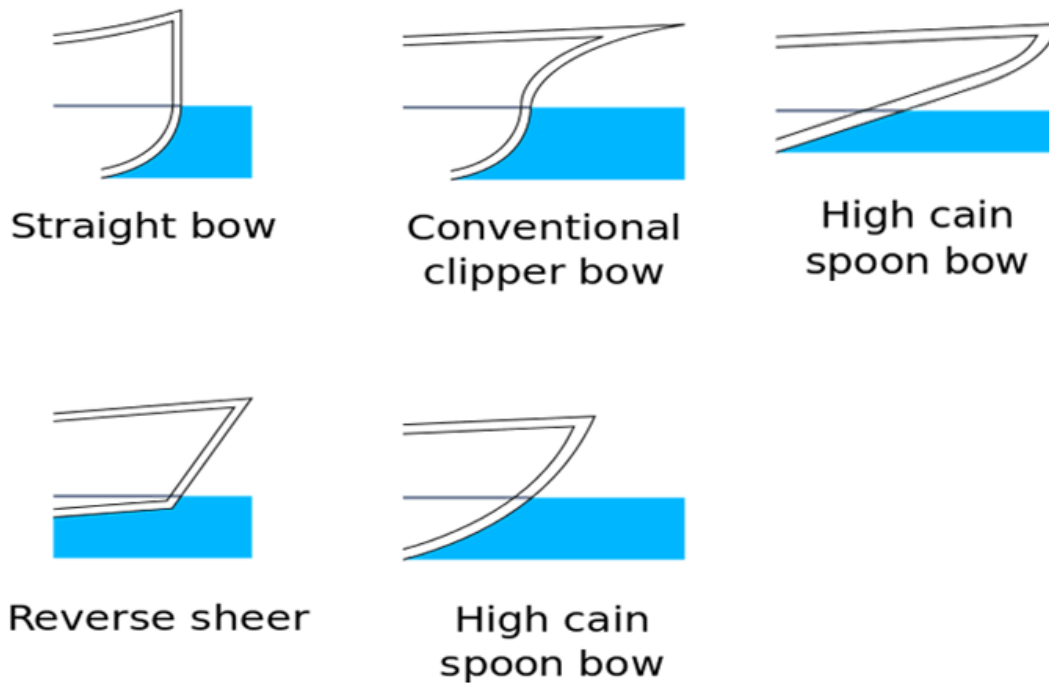
Mitä tulee laivan hydrodynamiikkaan, on sen tärkein osa keula, joka on osittain esteetiikka ja osittain hyvin hienoa tiedettä. Kun laiva kulkee väliaineessa, eli vedessä, se saa aikaan huomattavan vastuksen verrattuna toiseen laivaan kohdistuvaan vastukseen, ilmaan. Koska vesi tuottaa niin suuren vastuksen laivan kululle, on keula suunniteltava rakenteeltaan sellaiseksi, että se vastaa laivan käyttötarkoitusta ja pääasiallisesti pienentää muodostunutta veden vastusta. Erityisesti keulapaksunnoksella pystytään kontrolloimaan veden virtauksia ja aallonmuodostusta. Maailmassa on suunniteltu ja testattu jo monenlaisia keulapaksunnoksia ja niiden kombinaatioita, mutta edelleen tutkijat ja suunnittelijat kehittävät uusia muotoja, koska niiden testaus ja analysointi on paljon helpompaa ja jo pienetkin muutokset positiiviseen suuntaan ovat merkittävä askel ympäristöystävällisessä merenkulussa. (Sudripto Khasnabis, 2019)

Ennen kuin laivan vedenvastukseen ja sitä kautta taloudellisuuteen alettiin kiinnittämään erityistä huomiota, laivojen keularakenteet olivat hyvin yksinkertaisia. Pääajatuksena oli, että muoto oli virtaviivainen, sulava ja ainakin näytti, että se halkoo vettä oikein.

Laivojen koon kasvaessa veden vastus nousi isompaan rooliin laivan suunnittelussa. Uudisrakennustelakoiden asiakkailta on nykyään halu ja tarve kehittää aluksiensa energiatehokkuutta. Asiakkaiden vaatimukset kannustavat telakoita tekemään täysin uusia teknisiä ratkaisuja rungon ja etenkin keulan suunnittelussa, jotta uudet laivat olisivat ympäristöystävällisempiä operoita. Esimerkiksi Meyer Turku haluaa olla edelläkävijä laivanrakennuksessa ja pyrkii tekemään uudisrakenteistaan edellisiä parempia ja tehokkaampia. Nykyisin energiatehokkuusnäkökulmat ovat esillä entistä vahvemmin ja niihin liittyvät innovaatiot sekä tuotekehitys vaatii jatkuvaa työtä ja uuden teknologian käyttöönottoa. (Meyer Turku Oy, 2017)

Keulapaksunnokset ovat ainutlaatuisia jokaisessa aluksessa. Niiden muoto on suunniteltu toimimaan juuri kyseisessä laivassa optimaalisesti. Tämän takia keulapaksunnoksien muotoja on kirjava määrä ja nykyään valtaosaan laivoista suunnitellaan ja rakennetaan keulapaksunnos sen hyötyjen ansiosta.

4.2.1 Keularakenteet ilman keulapaksunnosta

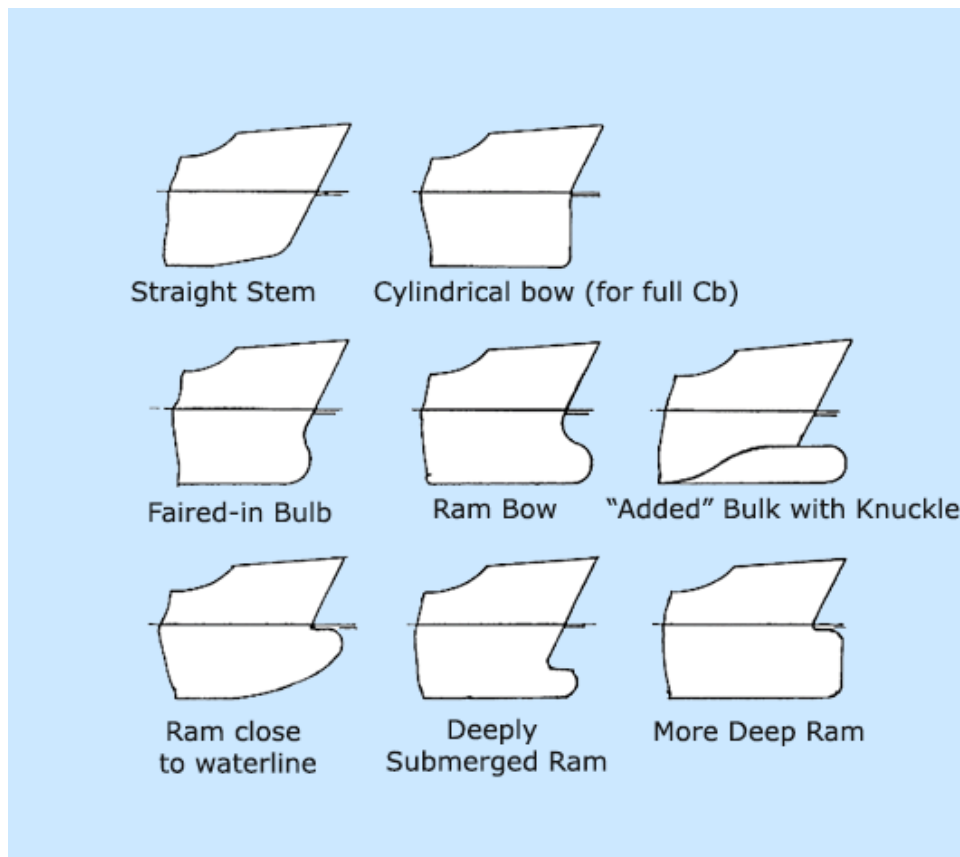


Kuva 9. Erilaisia keulanmuotoja ennen keulapaksunnoksen yleistymistä. (Yan Nasonov, 2010)

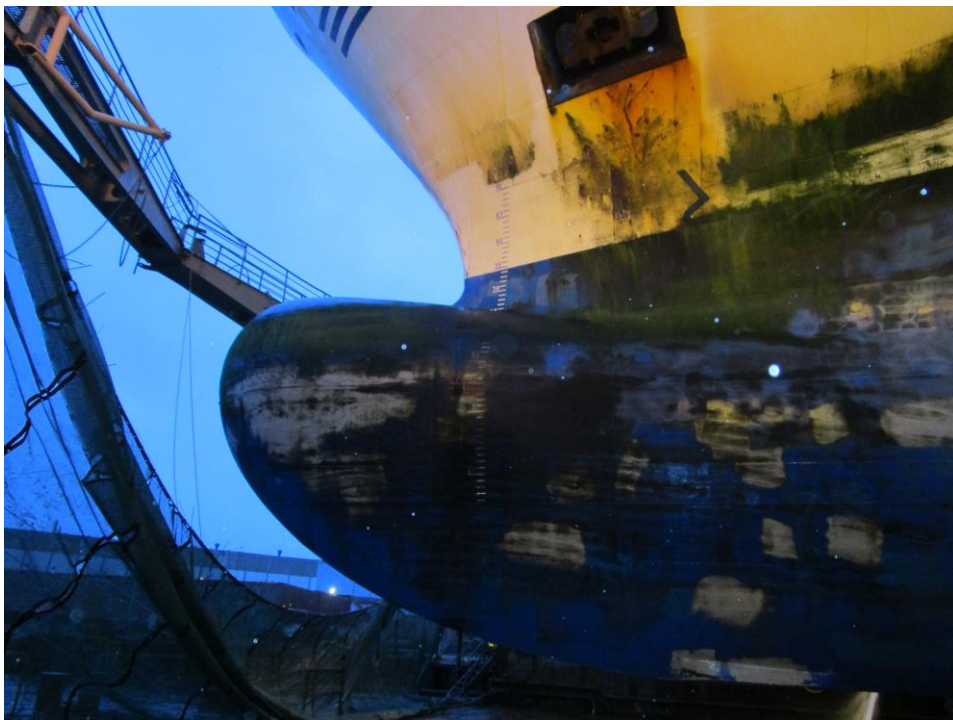


Kuva 10. Vuonna 1628 uponneen Vasa -laivan keulanmuoto. (Jorge Láscar, 2014)

4.2.2 Erityyppisiä keulapaksumuksia



Kuva 11. Erilaisia keulanmuotoja. (D. G. M. Watson, 2017)



Kuva 12. Finncarrier keulapaksumnos. (Joel Viitala, 2018)

4.2.3 Muita keularakenteita



Kuva 13. ULSTEIN X-Bow keularatkaisu Offshore -alukseen. (Ulstein Group ASA, 2019)



Kuva 14. ”Sea Axe Bow”. (Damen Shipyards Group, 2017)

4.3 Keulapaksunnoksen hyödyt ja haitat

Keulapaksunnoksen etuja ja sen vaikutusta laivan kulkuun on tutkittu erilaisilla testausmenetelmillä muun muassa laskennallisesti ja käytännön kokeilla koealtaissa, joiden tulokset toimivat hyvänä pohjana ja apuvälineenä keulapaksunnoksen suunnittelussa. Keulapaksunnoksen hyötyjä tarkasteltaessa on otettava kuitenkin huomioon monta asiaa, sillä hyvinkin suunniteltu keulapaksunnos yhdistettynä vääränlaiseen käyttötarkoitukseen ja operointiolosuhteisiin voi aikaansaada keulabulbille nollavaiikutuksen tai pahimmassa tapauksessa siitä saattaa olla pelkää haittaa laivalle ja sen kululle. Optimitilanteessa keulapaksunnoksen hyödyt ovat kuitenkin kiistattomia.

Päähyöty on suurempi nopeus samalla koneteholla verraten keularakenteeseen ilman keulapaksunnosta, koska keulapaksunnos auttaa pienentämään keula-aaltoa. Lastissa olevan laivan nopeus kasvaa $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ solmua ja painolastissa olevan laivan nopeus kasvaa $\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{3}$ solmua. Lisäksi se kasvattaa keulaosan lujuutta sekä vähentää tärinää. (Dr. C. B. Barrass, 2004, s. 210)

Keulapaksunnoksen käytössä ei juuri ole haittoja, mutta muutamia tekijöitä pitää ottaa aina huomioon ennen keulapaksunnoksen asennusta. Se on sopivin pitkän matkan aluksiin, etenkin kauppa-aluksiin, ja sen täysi toimivuus on todettu olevan vain hyvin kapealla nopeusalueella, joten esimerkiksi partio- tai kalastusaluksiin se saattaa olla hyödytön niiden käyttötarkoituksen takia. Lisäksi keulapaksunnos ei saa koskaan olla täysin veden alla, jotta se ei voimistaisi keula-aaltoa, jota se yrittää kumota. (Tanumoy Sinha, 2014)

Nykypäivän merenkulussa nopeus ei aina ole valttia. Hidasajo strategiana on käytössä jo monessa varustamossa ympäri maailmaa polttoaineenkulutuksen vähentämiseksi. Hidasajon peruseriaatteena on, että alukset käyttävät vain osan nimellistehostaan, jolloin nopeus pysyy pienenä suhteessa maksimivauhtiin. Tällä tavoin saavutetaan säästöjä polttoaineenkulutuksessa. Nämä säästöt pystytään täten kohdentamaan propulsiotehokkuuteen, joita ovat muun muassa potkureiden uudelleensuunnittelu, laivan optimointi hidasajoon sekä keularakenteen, bulbin, asennuttaminen. Joskus myös keulapaksunnoksen poistaminen on mahdollinen toimenpide propulsiotehokkuuden muuttamisessa parempaan suuntaan. Nyt kun keulapaksunnoksen asennuttaminen on

muodostunut kannattavaksi vaihtoehdoksi, siihen alettiin kiinnittämään entistä enemmän huomiota etenkin konttialuksissa. Esimerkiksi Maersk Line -varustamo on asennuttanut kymmenkunta uutta keulapaksunnosta omistamiinsa aluksiin (Retrofitting). Varustamo on ilmoittanut säästäneensä polttoainekustannuksissa 5% keulapaksunnoksien asennuttamisen myötä, joka on valtava säästö suhteutettuna varustamon aluksien kokoon. Kustannuksien takaisinmaksuajaksikin on arvioitu vain alle vuosi. Polttoainesäästöjen lisäksi keulapaksunnoksella on muitakin etuja, niiden on katsottu myös pienentävän aluksien CO₂ -päästöjä kuuden kuukauden testijaksolla noin 23 % (NYK Group). (Sudripto Khasnabis, 2019)



Kuva 15. ”Retrofitting”. Keulapaksunnoksen vaihto vanhaan laivaan. (Tetsuo Yanagida, 2018)

Keulapaksunnokseen suhtaudutaan myös hyvin kriittiseksi. Kuten Barczak (2017) toteaa kirjoituksessaan, että vaikka keulapaksunnoksen hyödyt ovat todistettuja ja sillä saavutetaan säästöjä, niin ne toimivat oikein vain hyvin suunniteltuina ja oikein asennettuina. Aluksen keulaan ei kannata vain asennuttaa keulapaksunnoksen näköistä uloketta, vaan se on kalibroitava sopimaan juuri sen laivan runkoon mihin se on tarkoitus asentaa. Ilman tarkkaa insinööriyöskentelyä ja sovittamista on olemassa korkea riski, että keulapaksunnos tuottaa enemmän harmia kuin hyötyä. Barczak muistuttaa myös, että perinteisiä keulapaksunnoksia ei ole suunniteltu toimimaan kovassa aallokossa. Isot aallot eivät anna keulapaksunnokselle mahdollisuutta muodostaa vakiinnutettua

aallokkoa laivan keulaan, jolloin laivan keulassa on koko ajan vastusta aiheuttava keula-aalto.

Yleisesti keulapaksunnos;

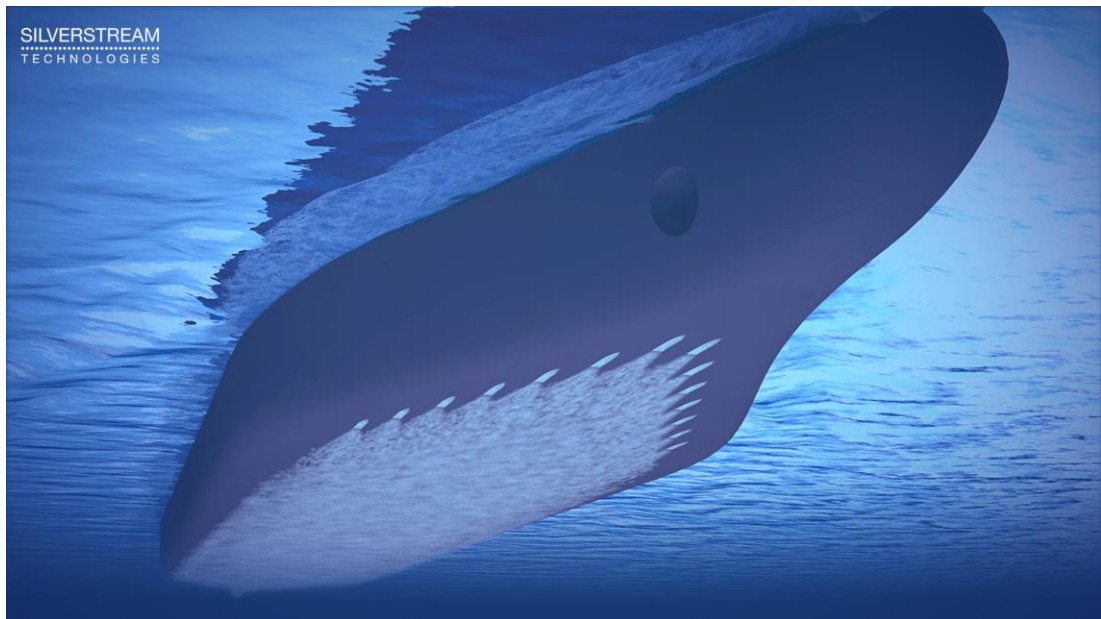
- vähentää keula-aallon muodostumista kumoamalla keula-aallon itse muodostamallaan aallolla tehden laivasta energiatehokkaamman.
- kasvattaa laivan märkäpinnan pituutta, jolloin laivan nopeus hieman kasvaa pienentäen laivan kulkuun tarvittavan energian määrää ja niin ikään polttoaineen kulutusta.
- toimii tukevana puskurina törmäyksen sattuessa.
- mahdollistaa keulapotkurien asennuksen etäämmälle, jolloin keulapotkurien vaikutus tehostuu pidemmän vipuvarren ansiosta.
- mahdollistaa suuremman painolastitankin laivan keulaosassa.
- vähentää laivan pituuskallistumista. (Tanumoy Sinha, 2014)

5 TULEVAISUUS JA INNOVAATIOT

Laivanvarustajien haasteet nykypäivän merenkulussa kohdistuvat erilaisiin säännöksiin ja taloudellisiin paineisiin. Säännöksiin on tosin vaikea vaikuttaa, mutta taloudellisiin haasteisiin voidaan etsiä ratkaisuja. Tavallisesti yhden kauppamerenkulun aluksen polttoainekustannukset liikkuvat 30 % - 70 % välillä, joten polttoainekustannusten pienentäminen tuo huomattavan säästön varustamolle. (Tolstrup, 2014) Raaka-öljyn hinnannousun myötä varustamot ja laivanrakentajat etsivät yhä aktiivisemmin erilaisia ratkaisuja ja innovaatioita pienentääkseen aluksien polttoaineenkulutusta ja kasvihuonepäästöjä. Seuraavassa on esitelty muutamia, keulapaksunnoksen tapaan, polttoainetta säästäviä järjestelmiä ja tapoja.

5.1 Pulputusjärjestelmä

Pulputusjärjestelmän tarkoituksena on pienentää laivan ja veden välistä kitkaa puhaltamalla korkealla paineella ilmakuplia laivan pohjaan. Ilmakuplat liikkuvat veden ja laivan välissä muodostaen ”ilmamaton” ja näin vähentävät laivan runkoon kohdistuvaa veden kitkaa. (Wärtsilä, 2019) Pulputusmenetelmässä on myös tärkeää, että aluksen runko on optimoitu järjestelmälle. Järjestelmän käytöllä pystytään pienentämään CO₂-päästöjä noin 5% - 10%, sekä pienentämään polttoaineenkulutusta. Silverstream Technologies -yritys on asennuttanut oman pulputusjärjestelmänsä erääseen Norwegian Cruise Line -varustamon alukseen, joka parantaa laivan tehokkuutta vähentäen päästöjä ja polttoainekustannuksia. Järjestelmä voidaan rakentaa uuteen alukseen tai lisätä se vanhaan vain 14 päivän aikana ja se vaatii vain hyvin pieniä muutoksia laivan runkoon. (Silverstream Technologies, 2018)



Kuva 16. Havainnekuva pulputusjärjestelmän muodostamasta ilmamatoista laivan keulaosassa. (Silverstream Technologies, Gallery, 2018)

5.2 Hi-Fin

Aluksen potkurin perään asennettava pienempi potkuri, joka vähentää potkurin kaviitaatiota ja parantaa propulsiotehokkuutta kumoamalla haitallisia virtauksia potkurissa. Hi-Fin:in on raportoitu pienentävän polttoaineenkulutusta 3%-5%. (Hyundai Global Service Co. Ltd, 2016)



Kuva 17. Hi-Fin laivan potkurissa. (Hyundai Global Service Co. Ltd, 2016)

5.3 Onboard DC Grid

ABB:n kehittämä järjestelmä vähentää dieselmootoreiden polttoaineenkulutusta optimoimalla niiden käyntinopeuden kuormituksen mukaan. Järjestelmä on pääosin

ohjelmointia sellaisissa aluksissa, joissa dieselmoottorit tuottavat sähköä laivan propulsiojärjestelmälle, esimerkiksi Offshore-alukset. Kun tehoa ei tarvita, moottoreiden käyntinopeutta pienennetään ja energiaa varastoidaan mahdollisia äkkinäisiä tehontarpeita varten. Dieselmoottorit optimoidaan tuottamaan vain tarvittava sähkö, jolloin niin sanottu hukkakäynti pienenee selvästi. (ABB, 2019)

5.4 Low Loss Hybrid Energy System (LLH)

Wärtsilän kehittämä hybridiohjausjärjestelmä ohjaa ja vakaannuttaa koko aluksen sähkö- ja energiavirtoja. Se sisältää erilaisia ohjausyksiköitä sekä virranhallintajärjestelmiä, jotka yhdessä kokonaisenergian varastointijärjestelmän kanssa säästävät energiaa ja se sopii asennettavaksi melkein kaikkiin laivoihin. Järjestelmää on testattu eräällä Offshore-aluksella, joka toimii erilaisissa sääolosuhteissa, kriittisissä tilanteissa ja valmiusaluksena öljynporauslautalle. Varmistetut säästöt alukselle järjestelmän myötä olivat 15% ja takaisinmaksuaika alle neljä vuotta. (Wärtsilä, Wärtsilä launches Low Loss Hybrid energy system offering fuel savings and reduced emissions, 2019)

5.5 Fuel Oil Emulsion (FOE)

Blended Fuel Solutions -yritys on kehittänyt polttoaineseokituksen, joka palaa paljon puhtaammin kuin tavallinen polttoaine ja täten kuluttaa vähemmän polttoainetta. Päästöt ovat pienemmät ja moottorit käyvät viileämpinä, jolloin niiden huollontarve pienenee. (MI News Network, 2017)

5.6 Tuuli- ja aurinkovoima

Alati kiristyvät kasvihuonepäästörajoitukset, ilmastomääräykset ja raakaöljyn hinta ajavat varustamoita ja merenkulun parissa työskenteleviä yhtiötä etsimään ahkerasti uusia vaihtoehtoisia vihreän merenkulun tekniikkaa, joka edelleen suoriutuisi tuottamaan laivan tarvitseman energian, mutta olisi samalla ilmastoystävällinen ratkaisu. Siksi tuuli- ja aurinkovoiman valjastamista laivan propulsiovoimana suorasti tai

välillisesti on ryhdytty tutkimaan entistä tarkemmin. Muutamia virstanpylväitä on jo saavutettu, mutta uusia testataan ja etsitään yhä kiivaammin.

Suomalainen startup-yritys Norsepower on kehittänyt uudentyypisiä roottoripurjeita ja tuulipropulsiojärjestelmää merenkulun tarpeisiin. Sähkömoottorin pyörittämä putkimainen roottoripurje työntää alusta eteenpäin Magnus-voimalla, joka muodostuu ilmanpaine-eroilmästä. Ilmanpaine-ero pyörivän roottoripurjeen etu- ja takapuolella tuottaa voimaa, joka vetää alusta eteenpäin. (Norsepower Oy Ltd, 2019)



Kuva 18. Norsepowerin roottoripurjeen asennus Viking Grace -alukseen. (Viking Line Abp, 2019)

Tuulivoiman tapaan myös aurinkovoima on todettu toimivaksi vaihtoehtoiseksi energianlähteeksi laivoihin. Grimaldi Group, joka omistaa suomessa toimivan Finnlines Oy:n, on rakennuttamassa uusia hybridialuksia, joissa voidaan hyödyntää nesteytettyä maakaasua, aurinkovoimaa ja ennen kaikkea suuria akustoja, joilla satamapäästöt pyritään saamaan nolnaan. Akustot ladataan merellä hyödyntäen 600 neliön alan peittäviä aurinkopaneeleja sekä sähkögeneraattoreita.



Kuva 19. Grimaldi Group 5th Generation (GG5G). (Knud E. Hansen, 2019)

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

On selvää, että tulevaisuudessa fossiilisten polttoaineiden tilalle on keksittävä ja kehitettävä uusia energiamuotoja, jotka olisivat riittävän tehokkaita merenkulun tarpeisiin sekä lisäksi ympäristöystävällisiä, kansainvälisten määräysten mukaisia, taloudellisia ja niiden tuottama hiilijalanjälki olisi siedettävä, jopa minimaalinen. Energianlähteitä on rajallinen määrä, vaikkakin monenlaisia ja erityyppisiä. Vaikka voimanlähde on vaihtunutkin, laivan runko on säilyttänyt perusmuotonsa jo pitkän aikaa.

Nykyteknologian avulla on pystytty huimiin harppauksiin alusten kehittämisessä monella eri osa-alueella. Rungon optimoiminen laivojen erilaisiin käyttötarkoituksiin on hyvä esimerkki tekniikan kehittymisestä. Etenkin keulapaksunnosta koskevat suunnittelu-, toteutus- ja testimenetelmät ovat saaneet aikaan sen, että vanhojakin laivoja pyritään muokkaamaan kustannustehokkaimmiksi ja sitä kautta ilmastoystävällisemmiksi. Alusten elinkaarta pidennetään ja niitä ennemmin päivitetään vastaamaan nykypäivän vaatimuksia ja haasteita kuin romutetaan uusiokäyttöön.

Keulapaksunnoksen testaustuloksista ja konkreettisista käyttötesteistä huomataan, että jo verraten pienellä muutoksella voidaan vaikuttaa aluksen tehokkuuteen ja kustannuksiin, etenkin pitkällä aikavälillä ja isoissa aluksissa. Polttoaineesta puhuttaessa säästöt voivat parhaimmillaan olla todella suuria verrattaessa optimoimattomaan alukseen. Keulapaksunnoksessa piilee myös epäonnistumisen riski. Jos suunnittelussa tapahtuu virhe tai aluksen käyttötarkoitus muuttuu, on vaarana, että toivotut säästöt jäävät saavuttamatta.

On myös mielenkiintoista ajatella kuinka pitkälle alusten kehitystyötä voidaan vielä viedä. Nyt jo on nähtävissä hienon tekniikan hyödyntämistä erilaisissa laskelmissa esimerkiksi alusten runkojen ja keulapaksunnoksien virtausdynamiikan tutkimisessa ja suunnittelussa. Rajuja muutoksia tuskin pystytään tekemään loputtomiin, mutta optimoimalla jo olemassa olevaa tekniikkaa ja laitteistoa, saadaan niistä puristettua kaikki teho irti ja sen seurauksena aluksia taloudellisemmiksi. Merenkulussa tullaan varmasti näkemään tulevaisuudessa entistä enemmän ”vihreitä” hybridilaivoja, jotka

hyödyntävät montaa eri energialähdettä ja joissa esimerkiksi hukkaenergian talteenotto ja luonnosta saatava päästötön ja uusiutuva energia on avainasemassa aluksen tehokkuudessa.

LÄHTEET

- ABB. (2019). *Onboard DC Grid*. Haettu 5. 6. 2019 osoitteesta <https://new.abb.com/marine/marine/systems-and-solutions/power-generation-and-distribution/onboard-dc-grid>
- Antrim Associates. (2014). *Heavy Boats, Light Boats and Hull Speed*. Haettu 21. 5. 2019 osoitteesta <http://antrimdesign.com/heavy-boats-light-boats-and-hull-speed.html>
- Bray, P. J. (2004). *The Bulbous Bow*. Haettu 20. 5. 2019 osoitteesta http://www.dieselduck.info/library/01%20articles/bulbous_bows.htm
- Chakraborty, S. (2017). *What's The Importance Of Bulbous Bow Of Ships?* Haettu 20. 5. 2019 osoitteesta <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/why-do-ships-have-bulbous-bow/>
- D. G. M. Watson. (2017). *"Nose Jobs" For Ships – Reason Behind Retrofitting Bulbous Bow*. Haettu 24. 5. 2019 osoitteesta <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/nose-jobs-for-ships-reasons-behind-retrofitting-bulbous-bow/>
- Damen Shipyards Group. (2017). *NAVIERA INTEGRAL 'S FAST MOVES IN MEXICO*. Haettu 27. 5. 2019 osoitteesta <https://magazine.damen.com/markets/offshore-wind/naviera-integrals-fast-moves-in-mexico/>
- Dr. C. B. Barrass. (2004). *Ship Desing And Performance For Masters And Mates*.
- Hyundai Global Service Co. Ltd. (2016). *Technical Service - Energy Saving Device - Hi-Fin*. Haettu 5. 6. 2019 osoitteesta https://www.hyundai-gs.com/Eng/Division/biz02_2.aspx
- J. Karkkulainen, O. Karkkulainen & Kinnunen. (2014). *eFysiikka* 8. Haettu 22. 5. 2019 osoitteesta <https://peda.net/oppimateriaalit/e-oppi/verkkokauppa/yl%C3%A4koulu/poistuneet-tuotteet/efysiikka-82/1lvv>
- Joel Viitala. (2018). *Henkilökohtainen kuva-albumi*.
- Jorge Láscar. (2014). *Panorama of "Vasa"*. Haettu 3. 6. 2019 osoitteesta <https://www.flickr.com/photos/jlascar/24562372260>
- Jyväskylän Yliopisto. (2015). *Laadullinen tutkimus*. Haettu 10. 6. 2019 osoitteesta <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/laadullinen-tutkimus>
- Knud E. Hansen. (2019). *Grimaldi Group signed contract with CSC Jinling for six GG5G Class short-sea ro-ros*. Haettu 5. 6. 2019 osoitteesta <https://www.knudehansen.com/news/grimaldi-group-signed-contract-csc-jinling-six-gg5g-class-short-sea-ro-ros/>

- Leal, Flores, Fuentes & Verma. (2017). *Hydrodynamic study of the influence of bulbous bow design for an Offshore Patrol Vessel using Computational Fluid Dynamics*. Haettu 4. 6. 2019 osoitteesta <https://www.shipjournal.co/index.php/sst/article/view/161/456>
- Lehan, D. (2016). *Contact Forces*. Haettu 23. 5. 2019 osoitteesta http://physics-schooluk.com/ks3_contact_forces.html
- Ménard, D. (2007). *Comparision of some longest ships*. Haettu 21. 5. 2019 osoitteesta https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Notafish#/media/File:Bateaux_comparais on2.svg
- Meyer Turku Oy. (2017). *Kestävää Laivanrakentamista*. Haettu 20. 5. 2019 osoitteesta https://www.meyerturku.fi/media/pdfs/pdf/meyer_turku_vastuullisuusraportti..pdf
- MI News Network. (2017). *Technologies To Reduce Fuel Consumption Of Ships*. Haettu 5. 6. 2019 osoitteesta <https://www.marineinsight.com/tech/7-technologies-to-reduce-fuel-consumption-of-ships/>
- Nicholas Barczak. (2017). *The Limits Of Bulbous Bow*. Haettu 4. 6. 2019 osoitteesta <https://dmsonline.us/limits-bulbous-bows/>
- Norsepower Oy Ltd. (2019). *Key Advantages*. Haettu 5. 6. 2019 osoitteesta <https://www.norsepower.com/key-advantages>
- PixaBay. (2016). Haettu 22. 5. 2019 osoitteesta <https://pixabay.com/fi/photos/laiva-merenkulku-keulabulbi-vika-1531979/>
- Silverstream Technologies. (2018). *About the Silverstream® System?* Haettu 5. 6. 2019 osoitteesta <https://www.silverstream-tech.com/the-technology/>
- Silverstream Technologies. (2018). *Gallery*. Haettu 5. 6. 2019 osoitteesta <https://www.silverstream-tech.com/about-us/gallery/>
- SIP Marine. (2017). *CFD Analysis*. Haettu 21. 5. 2019 osoitteesta <https://www.sipmarine.nl/cfd-analysis/?lang=en>
- Sudripto Khasnabis. (2019). *Types of Bow Desings Used For Ships*. Haettu 24. 5. 2019 osoitteesta <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/types-of-bow-designs-used-for-ships/>
- Tanumoy Sinha. (2014). *What's with the Bulb? - Part Three*. Haettu 4. 6. 2019 osoitteesta <https://lshipdesign.blogspot.com/2014/03/whats-with-bulb-part-three.html>
- Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. (2019). *Laivat ja merirakenteet*. Haettu 24. 5. 2019 osoitteesta <https://www.vtt.fi/palvelut/%C3%A4lyk%C3%A4s-teollisuus/k%C3%A4ytt%C3%B6i%C3%A4n-optimointi/koneiden-ja-kulkuv%C3%A4lineiden-kuntoon-perustuva-kunnossapito/laivat-ja-merirakenteet>

Tetsuo Yanagida. (2018). *Challenge for Hull-Form Optimization Tailored to Actual Operation Environments*. Haettu 5. 6. 2019 osoitteesta <https://www.monohakobi.com/en/news/mtijournal/yanagida/>

Tieteen Kuvalehti. (2009). *Laivan menoa jarruttava veden vastus*. Haettu 20. 5. 2019 osoitteesta <https://tieku.fi/liikenne/laivat/laivan-menoa-jarruttava-veden-vastus>

Tolstrup, M. M. (2014). *Retrofitting a new bulbous bow*. Haettu 5. 6. 2019 osoitteesta <https://forcetechnology.com/da/cases/retrofitting-af-en-ny-bulb>

Ulstein Group ASA. (2019). *X-BOW*. Haettu 27. 5. 2019 osoitteesta <https://ulstein.com/innovations/x-bow>

Venealan Keskusliitto Finnboat ry. (2017). *Suomalainen perusvene on viisimetrinen perämoottorivene*. Haettu 20. 5. 2019 osoitteesta <http://www.suomiveneilee.fi/uutiset/suomalainen-perusvene-viisimetrinen-per%C3%A4moottorivene>

Viking Line Abp. (2019). *Uusi roottoripurje tekee Viking Gracesta edelläkävijän*. Haettu 5. 6. 2019 osoitteesta <https://www.vikingline.fi/valitse-matka/laivat/ms-viking-grace/roottoripurje/>

Wärtsilä. (2019). *Wärtsilä Encyclopedia of Marine Technology*. Haettu 5. 6. 2019 osoitteesta <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/air-lubrication>

Wärtsilä. (2019). *Wärtsilä launches Low Loss Hybrid energy system offering fuel savings and reduced emissions*. Haettu 5. 6. 2019 osoitteesta <https://www.wartsila.com/media/news/25-08-2014-wartsila-launches-low-loss-hybrid-energy-system-offering-fuel-savings-and-reduced-emissions>

Yan Nasonov. (2010). *Types of Bow Designs Used For Ships*. Haettu 21. 5. 2019 osoitteesta <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/types-of-bow-designs-used-for-ships/>