

Elmeri Laukkanen & Ville Risunen

PROPULSIOJÄRJESTELMÄT

Merenkulun koulutusohjelma

2018

PROPULSIOJÄRJESTELMÄT

Laukkanen, Elmeri & Risunen, Ville
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Merenkulun koulutusohjelma
Marraskuu 2018
Ohjaaja: Haapanen, Toni
Sivumäärä: 61
Liitteitä: 0

Asiasanat: Propulsiojärjestelmä, potkuri, kavitaatio, potkuriakseli

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia propulsioon liittyvää kirjallisuutta ja kirjoittaa yleisesti propulsiosta, sekä propulsiolaitteista. Tavoitteena oli kirjoittaa erilaisista laivoilla käytettävistä propulsioon tuotantoon liittyvistä ratkaisuista, sekä siihen liittyvästä teoriasta ja ilmiöistä. Halusimme tuoda myös esille, miten propulsiojärjestelmät ovat kehittyneet vuosien aikana.

Työ aloitettiin perehtymällä alan kirjallisuuteen sekä keskustelemalla keskenämme paljon aiheeseen liittyen.

Tätä opinnäytetyötä voidaan käyttää opintomateriaalina alan koulutuksessa. Se soveltuu myös asiasta kiinnostuneille maallikoille, jotka haluavat oppia uusia asioita alusten työntövoiman tuottamisesta.

PROPULSION SYSTEMS

Laukkanen, Elmeri & Risunen, Ville
Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences
Degree Programme in Maritime engineering
December 2018
Supervisor: Haapanen, Toni
Number of pages: 61
Appendices: 0

Keywords: Propulsion system, propeller, cavitation, propeller shaft

The purpose of this thesis was to study about propulsion theory and write about propulsion generally and, also about propulsion systems. Our target was to write and study about different propulsion systems used in ships and about the theory of propulsion. We also wanted to bring up the evolution of propulsion systems.

The project started by familiarizing ourselves with the literature of propulsion theory. We also discussed a lot about this subject.

This thesis can be used as an education material. It can also be helpful for commoner people who are interested about marine propulsion and how it is produced.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Tutkimusmenetelmä.....	6
2	HISTORIAA	7
3	PROPULSION TEORIAA.....	14
3.1	Ideaalipropulsori	14
3.2	Kavitaatio.....	17
3.2.1	Potkurin nousu.....	19
3.2.2	Siipiprofiili	20
3.2.3	Kavitaatio ja epästationaariset ilmiöt	20
3.2.4	Potkuriherätteet.....	21
3.3	Potkurin suulake.....	22
3.3.1	Suulakepotkurin avovesiominaisuudet.....	23
3.4	Vanaveden vaikutus	24
3.4.1	Vanaveden osatekijät.....	24
3.5	Vanaveden teoriaa.....	25
3.6	Propulsiomallikoe	25
3.7	Merikoeajolla suoritettavat mittaukset.....	26
3.8	Uppouma-aluksen perän muotoilu	27
3.9	Propulsioteho	28
4	POTKURI JA AKSELISTO	30
4.1	Ruuvipotkuri	30
4.2	Potkurin materiaalit.....	34
4.3	Potkurin paino.....	35
4.4	Akselilinjan suunnittelu	36
4.5	Akselijohto.....	36
4.6	Potkuriakseli	37
4.7	Hylsä- ja kannatuslaakerit.....	38
4.8	Alennusvaihde	41
5	PROPULSIORATKAISUJA.....	42
5.1	Kiinteälapainen potkuri.....	42
5.2	Säätölapapotkuri	42
5.3	Kääntyvä potkurilaite.....	44
5.4	Vertical axis propeller.....	47
5.5	Vesisuihkupropulsio	48

5.6	RIM Propeller	52
6	AHT ZEUS OF FINLAND	53
6.1	Yleistä	53
6.2	Zeuksen potkurin lapakulmien säätö	55
7	LOPPUYHTEENVETO.....	60
	LÄHTEET.....	61
	LIITTEET	

1 JOHDANTO

Propulsio on työntövoimaa, jonka tarkoituksena on kumota kulkuvastuksen aiheuttama voima sekä tuottaa kiihdytykseen tarvittava työntövoima. Opinnäytetyössä käsitellään ja tarkastellaan propulsioon tuotantoon liittyviä laitteita. Niiden historia on merkittävässä roolissa myös laitteiden kehitykselle. Kehitys on tapahtunut erittäin pitkällä aikavälillä ja erittäin hitaasti.

Työssä on käytetty alan kirjallisuutta, sekä hyödynnetty omaa saamaamme koulutusta. Työ on jaoteltu historiaan sekä eri menetelmien kehittymiseen. Tässä opinnäytetyössä käsitellään myös mitä propulsio on teoriassa, sekä mitä ilmiöitä se aiheuttaa, kuten esimerkiksi kavitaatiota. Myös propulsioon tuotantoon liittyvien eri laitteiden ja ratkaisujen perustoimintaa käsitellään työssä.

Esimerkkialuksena on AHT Zeus of Finland, jonka perustiedoista kerromme lyhyesti, sekä millä tavalla siinä on propulsioon tuotanto ratkaistu.

1.1 Tutkimusmenetelmä

Opinnäytetyön tutkimusmenetelmänä käytettiin kvalitatiivista sisällönanalyysia. Opinnäytetyön teksti pohjautuu aikaisemmin tutkittuun tietoon, jota hyödynsimme lukemalla alan julkaisuja. Kirjoja ja tutkimusmateriaalia löytyi hyvin sekä suomen kielisenä, että englannin kielellä. Tutkimus rajattiin avovesiolosuhteisiin, eikä tässä kirjoitettu propulsiojärjestelmien jäissä kulkemiseen liittyvistä suunnittelun vaatimuksista tai jääluokituksen säädöksistä.

Opinnäytetyö aloitettiin piirtämällä miellekartta, jonka keskiöön kirjoitettiin aiheen nimi. Miellekarttaan kirjoitettiin propulsioon liittyviä asioita, jonka jälkeen siitä karstiin mielestämme epäoleellinen pois. Jäljelle jäänyttä miellekartan osuutta käytettiin tutkimuksen viitekehyksenä ja sen perusteella kirjoitettiin raakateksti, joka lopuksi kasattiin yhtenäiseksi loppuraportiksi.

2 HISTORIAA

Siitä lähtien kun ensimmäiset ihmiset tuhansia vuosia sitten alkoivat liikkua vesillä sen aikaisilla veneillä, on ollut tarve kehittää tehokkaampia tapoja liikuttaa aluksia. Aikojen alussa veneiden liikuttaminen tapahtui pitkillä kepeillä, veden pohjasta vauhtia työntäen. Veneet olivat alkeellisia, kanootin tapaisia ruuhia, joiden liikuttamiseen tarvittiin vain yksi ihminen.



Kuva 1. Pessenin ruuhi (Drentsmuseumin www-sivut 2018).

Airojen keksiminen oli merkittävä edistysaskel merenkulun historiassa, koska tämän jälkeen aluksilla voitiin kulkea syvemmissä vesissä. Aluksi airot olivat melan tapaisia. n. 3000 eaa. egyptiläiset kehittivät soudettavia aluksia, joita käytettiin pääasiassa sodankäyntiin (Graham 2016, 12.)

n. 600 eaa. kreikkalaiset kehittivät kolmisoudun, joissa kummallakin puolella alusta istui soutajat kolmessa rivissä. n. 300 eaa. kolmisoudut olivat aikakautensa parhaita sotalaivoja. (Graham 2016, 13-14.)

Kolmisoutujen nopeudeksi on arvioitu jopa 11 solmua (Landels 1985, 116).



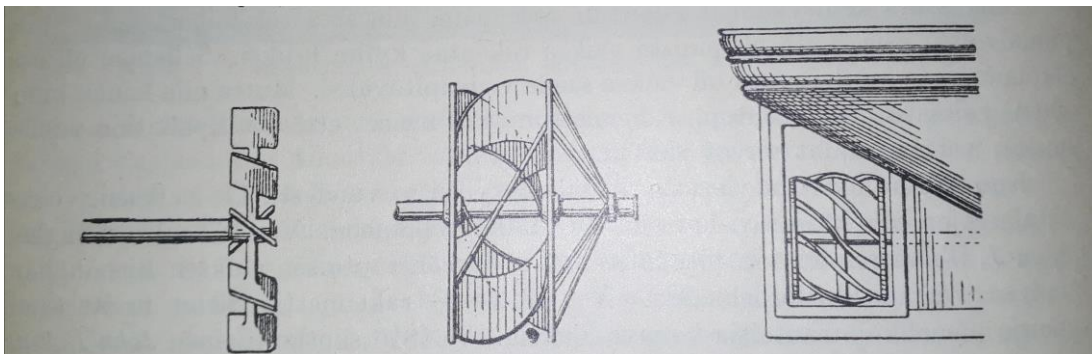
Kuva 2. Kreikkalaisen kolmisoudun pienoismalli Deutches museumissa, Münchenissa. (Deutches museumin www-sivut 2018).

Soutupropulsio oli nopein ja varmin propulsiomuoto, jota käytettiin aluksissa 1300-luvulle asti (Matusiak 2007, 4).

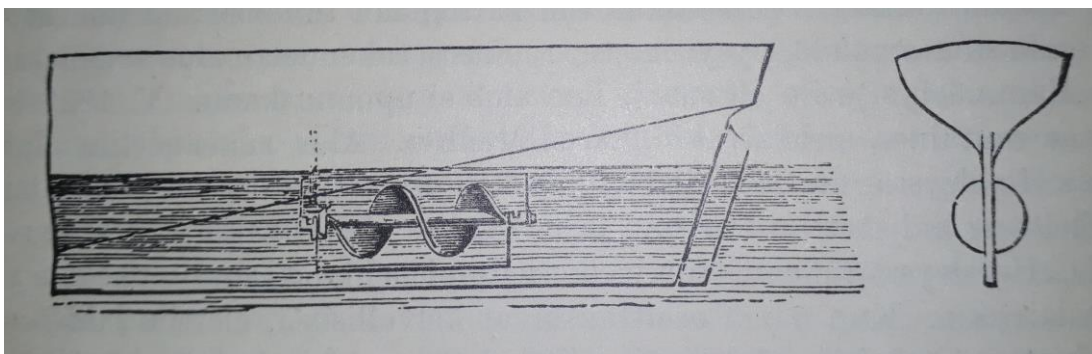
Kuitenkin jo ennen kolmisoutujen kaltaisten kehittyneiden alusten rakentamista, on ihminen osannut hyödyntää tuulen voimaa purjeiden avulla. Aluksi purjeiden mastot oli sijoitettu alusten keulaan, jolloin niillä pystyi purjehtimaan vain myötätuulella. (Landström 1961, 14-15.)

Purjelaivojen aikakausi johtavana merikuljetusmuotona kesti 1800-luvun loppupuolelle asti, jolloin höyrylaivoista tuli yleisin merikuljetusmuoto (Kujanen 1989, 166).

On kuitenkin todettava, että Arkhimedes, joka eli n. 287-212 eaa. kehitti nykyisen potkurin idean, eli ns. Arkhimedeen ruuvin. On sinänsä ironista, että maailmalla purjehdittiin yli puolitoista vuosituhatta purjeiden avulla ja nykyaikainen propulsio tuottamiseen käytettävä laite oli jo pääperiteittänsä keksitty. Koska purjeen toiminta perustuu myös alankomaalaisyntyisen Daniel Bernoullin 1700-luvulla keksimään lakiin, kuten potkurikin. Vuonna 1752 Bernoulli ehdotti, että laivoja kuljetettaisiin ns. ruuvirattaalla. Vuonna 1768 ranskalainen Paucton sai patentin samaan tarkoitukseen käytettävälle Arkhimedeen ruuville. Englantilainen J Bramah sai patentin vuonna 1785 tuulimyllyn siiven muotoiselle ruuvipotkurille. (Helle 1937, 538.)

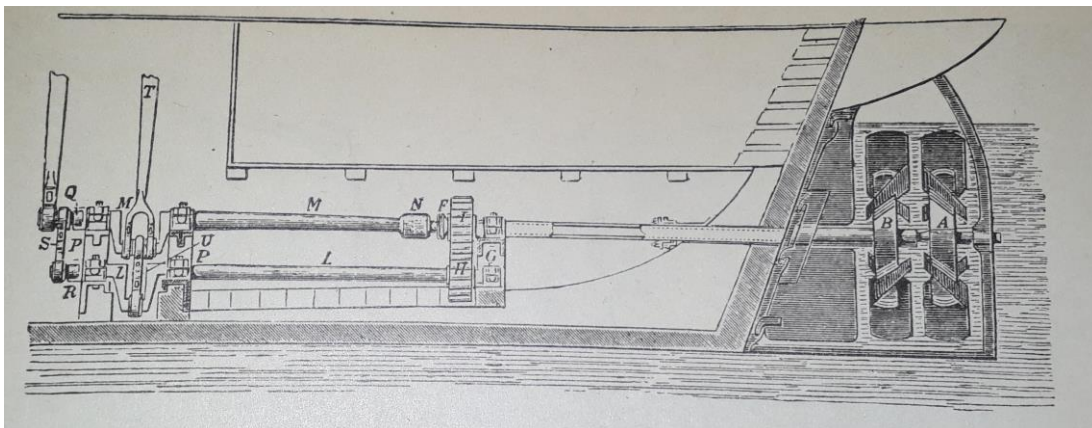


Kuva 3. Daniel Bernoullin potkuriehdotus vuonna 1752. (Helle 1937, 538).



Kuva 4. Pauctonin potkuriehdotus vuonna 1768. (Helle 1937, 538).

Näistä Perusmuodoista kehittyi vähitellen kaksi varsinaista laivapotkuria. Vuonna 1836 ruotsalainen John Ericsson sai Englannissa patentin rataspotkurille ja samanaikaisesti englantilainen Francis Petit Smith sai myös patentin Arkhimedeen ruuvista kehitetylle ruuvipotkurille. Molemmat rakensivat koelaivan. Ericssonin koelaiva oli puinen Francis B Ogden, joka oli 14 metriä pitkä, joka lastasi n. 12 tonnia. Kone kehitti 12 hevosvoimaa. Aluksessa peräsin oli sijoitettu potkurien etupuolelle. Aluksella saavutettiin n. 10 solmun nopeus, eikä se herättänyt suurempaa huomiota. (Helle 1937, 538.)



Kuva 5. John Ericssonin potkuri. (Helle 1937, 538).

Amerikkalainen Robert F. Stockton ihastui Ericssonin koealukseen. Hän ymmärsi vastoin yleistä mielipidettä, että ruuvipotkurilla on suuri merkitys laivan propulsiolaitteena. Hän tilasi pian sen jälkeen kaksi hinaajaa, joihin asennettiin Ericssonin rataspotkurit. (Helle 1937, 539.)

Siipiratas tunnettiin jo myös muinaisessa Kiinassa, ja aluksi siipirataksen pyörittämiseen käytettiin ihmisten ja eläinten lihasvoimaa (Matusiak 2007, 4).

”Robert Fultonin höyrykoneella varustettua 40 m:n pituista Cleremont-alusta voidaan pitää ensimmäisenä onnistuneena moottorilaivana. Cleremont saavutti viiden solmun nopeuden.” (Matusiak 2007, 4.)

Moottorikäyttöisiä siipiratasaluksia käytettiin yleisesti Cleremontin ajoista eli 1807, 1860-luvulle asti. Siipiratasaluksilla on hyvät matalan veden ominaisuudet, mutta huonoina puolina voidaan pitää herkkyyttä merenkäynnissä ja syväyksen muutoksissa. (Matusiak 2007, 4.)

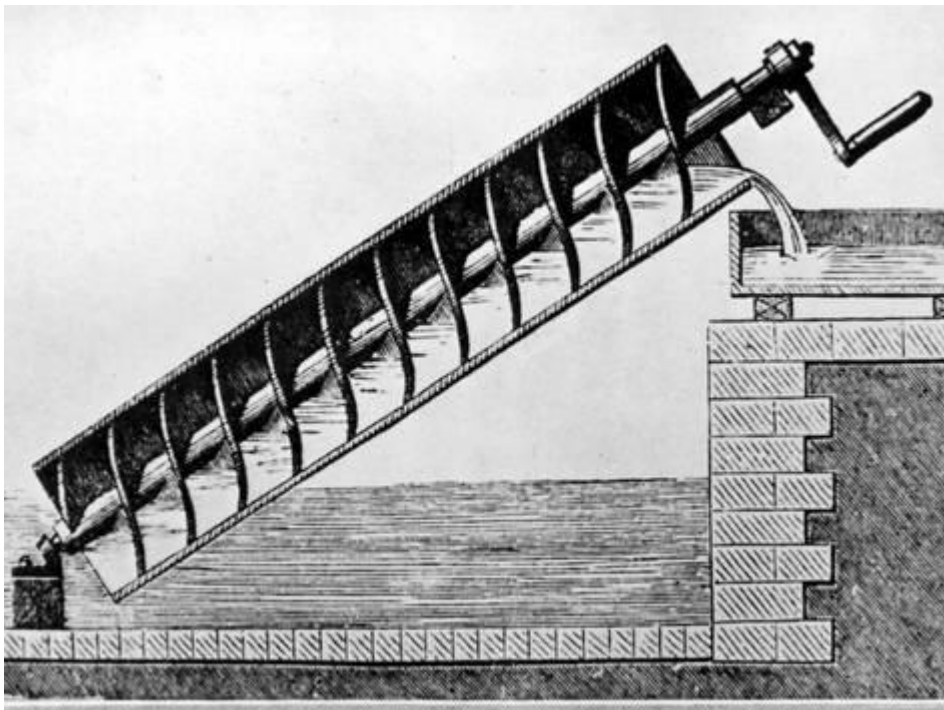


Kuva 6. Siipiratasalus (Eliaksen risteilyjen www-sivut 2018)

Ensimmäiset varsinaiset potkurit muistuttivat Arkhimedeen ruuvipumppua. 1840-luvulla alettiin yleisesti käyttää ruuvipotkureita sekä sota- että siviilialuksissa. Ruuvipotkureiden käyttöä rajoitti silloisten höyrykoneiden hidas käyntinopeus. Vaikka potkurin lapojen projisoitu pinta muistuttaa paljon nykyisiä potkureita, niin tuohon aikaan ei osattu kiinnittää tarpeeksi huomiota potkurin lapojen poikkileikkausmuotoon. Vuonna 1897 Sir Charles Parsonin suorittama höyryturbiinin ensiesittely Iso-Britannian laivaston paraatikatselmuksessa vauhditti ruuvipotkureiden kehitystä ja nopeutti sen käyttöönottoa. Sir Parsonin kehittämä Turbinia-alus saavutti 34 solmun nopeuden kolmen höyryturbiinin ja yhdeksän kolmilapaisen potkurin avulla. (Matu-siak 2007, 5.)



Kuva 7. s/s Turbinia. (Tw museumsin www-sivut 2018)



Kuva 8. Arkhimedeen ruuvi. (Allpostersin www-sivut 2018).

”Arkhimedeen ruuvi nosti vettä joista ja muista vesistöistä kasteluojiin, joista sitä johdettiin viljelyksille, mutta ruuvilla voitiin myös pumpata vettä laivan pohjalta. Ruuvin periaatetta hyödynnettiin antiikin aikana myös viinin ja oliiviöljyn valmistamisessa. Puisella ruuvilla puristusvoima oli lähes satakertainen pelkkiin käsivoimiin verrattuna, joten ruuvipuristimen avulla kallisarvoinen oliiviöljy saatiin talteen ilman hikeä ja kyyneleitä.” (Vettä ei tarvitse kantaa, jos sitä pumpppaa 2015, 25.)

”Vuonna 1936 Ludwig Kort patentoi USA:ssa suulakepotkurin, jolla saadaan pienellä nopeudella liikkuvaan alukseen enemmän työntövoimaa kuin avopotkurilla” (Matusiak 2007, 5).

Vesisuihkupropulsio on myös vanha keksintö, sillä Alexandre Hediard patentoi vuonna 1852 propulsiolaitteen, jossa imu tapahtui aluksen pohjan alta pumpun avulla ja kiihdytetty vesisuihku työnnettiin aluksen perästä. (Matusiak 2007, 6.)

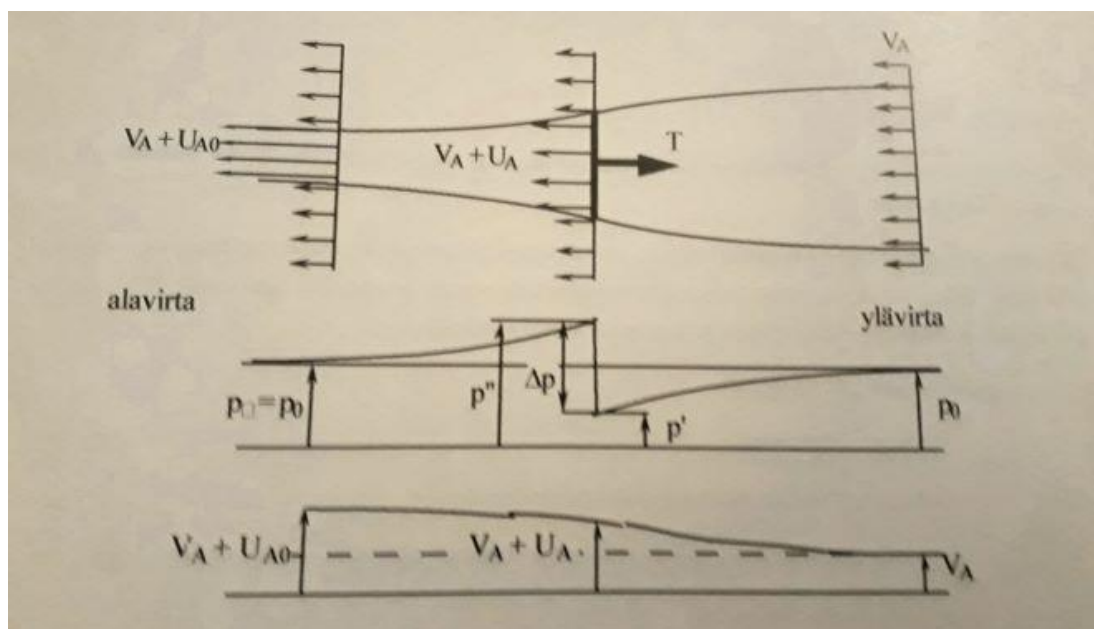
3 PROPULSION TEORIAA

Propulsio on työntövoimaa, jonka tarkoituksena on kumota kulkuvastuksen aiheuttama voima sekä tuottaa kiihdytykseen tarvittava työntövoima.

Useampien propulsiolaitteiden toiminta voidaan selittää liikemääräteorian avulla. Propulsio-laite saa väliaineen kuten esimerkiksi veden tai ilman massavirran kiihtymään taaksepäin. Tämän seurauksena propulsorin pintaan syntyy reaktiovoima, joka työntää alusta eteenpäin. (Matusiak & Kanerva 2000, 8-1.)

3.1 Ideaalipropulsori

Ideaalipropulsori-käsitteen ja teorian avulla on mahdollista ymmärtää ja arvioida potkurin toimintaa ja erityisesti sen hyötysuhteen riippuvuutta propulsorin kuormituksesta. Ideaalipropulsorin teoriasta käytetään myös Rankinen teoria nimeä. (Matusiak 2007, 8.)



Kuva 9. Ideaalipropulsorin aiheuttama virtaus. (Matusiak & Kanerva 2000, 8-2)

”Ideaalipropulsorilla tarkoitetaan virtauksen läpäisevää tasoa, joka on suunnattu kohtisuoraan virtaukseen nähden. Tämän tason nopeus on V_A . Etäällä propulsorista valitsee paine p_0 . Tähän tasoon nähden kohtisuoraan suunnattu ja tasaisesti jakaantunut ulkoinen kuormitus aiheuttaa askelmuotoisen paineen muutoksen ja virtausnopeuden tasaisen kasvun virtausputkessa. Tasaisen ulkoisen kuormituksen ansiosta myös virtaus virtaputken sisällä on tasaista. Lisäksi virtauksen oletetaan olevan kitkatonta ja pyörteetöntä.” (Matusiak & Kanerva 2000, 8-1.)

Hyvälle propulsiolaitteelle ominaista on:

- Tasainen työntövoima.
- Korkea hyötysuhde normaaleissa käyttöolosuhteissa.
- Työnnön suuruus ja suunta on helposti ja nopeasti säädettävissä (tällä tarkoitetaan hyviä pysäytys- ja peruutusominaisuuksia).
- Propulsiolaite ja sen koneisto on yhteensopivia aluksen rungon kanssa.
- Kestävyys ja toiminnan luotettavuus.
- Pienet investointi- ja ylläpitokustannukset.
- Vähäinen melu ja värähtely.
- Varma toiminta kaikissa olosuhteissa (merenkäynti, matalat vedet, jäät).

Jatkuvuus-, liikemäärän ja Bernoullin yhtälöistä voidaan johtaa sekä ideaalipropulsorin työntövoima, että indusoidut nopeudet propulsorin tasossa (U_A) että etäällä alavirrassa (U_{A0})

Rankinen teoria ei edellytä, että propulsiolaitteen tulisi olla ruuvipotkuri.

(Matusiak & Kanerva 2000, 8-2.)

Ideaalipropulsorin työntövoima on:

$$T = \Delta p A_0 = \rho U_{A0} (V_A + \frac{1}{2} U_{A0}) A_0$$

Jossa:

A_0 = Propulsoritason pinta.

ρ = Veden tiheys.

V_A = Potkurin etenemisnopeus.

U_A = Indusoitu nopeus.

Indusoitu virtausnopeus propulsorin tasossa on puolet indusoidusta nopeudesta etäällä alavirrassa:

$$U_A = \frac{1}{2} U_{A0}$$

Ideaalipropulsorin hyötysuhde saadaan laskemalla ensin työntövoiman tekemä työ aikayksikössä $P_T = T V_A$ ja sen jälkeen propulsorin vaatima teho P_D .

Tuloksena:

$$\eta_I = P_T / P_D = \frac{V_A}{V_A + \frac{1}{2} U_{A0}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{U_{A0}}{V_A}}$$

Jossa:

η_I = Ideaali hyötysuhde.

P_T = Työntöteho.

P_D = Potkuriteho.

V_A = Potkurin etenemisnopeus.

U_{A0} = Indusoitu nopeus (etäällä).

Kaavasta ilmenee, että ideaalipropulsorin hyötysuhde on aina pienempi kuin yksi. Lisäksi hyötysuhde on sitä suurempi mitä pienempi propulsorin indusoitu nopeus on suhteutettuna potkurin tason nopeuteen. Toisaalta jos propulsorin indusoitu nopeus on pieni, on myös työntövoima pieni. Jotta voidaan saavuttaa tarpeeksi suuri sekä työntövoima, että hyötysuhde, pitää propulsorin hydraulinen poikkileikkaus (A_0) olla riittävän iso. Tämän vuoksi laivoissa pyritään käyttämään mahdollisimman suuria potkureita. Se selittää myös, minkä vuoksi nopeakulkuisissa aluksissa käytetään yleensä monipotkurijärjestelmää. (Matusiak 2007, 11.)

3.2 Kavitaatio

”Kavitaatiolla tarkoitetaan kaasufaasin muodostumista nesteessä paineen alentumisen seurauksena. Jos paine alenee paikallisesti kriittisen arvonsa p_{kr} eli pienimmän mahdollisen nesteessä esiintyvän paineensa, muodostuu nesteen tilalle vesihöyryn ja kaasun seos, jota kutsutaan kavitaatiokuplaksi tai kavitaatioksi. Kavitaatio-sanalla tarkoitetaan sekä ilmiötä, jonka seurauksena on kaasufaasin syntyminen, että prosessissa syntyviä kavitaatiokuplia. Kavitaatio liittyy nesteen virtauksiin suurilla nopeuksilla.” (Matusiak 2007, 79.)



Kuva 10. (University of Tasmania www-sivut 2018)

Yksinkertaisesti todettuna kavitaatio syntyy, kun potkurin imupuolelle syntyy alipaine, jolloin vesi alkaa kiehua alemmassa lämpötilassa. Höyrystynyt vesi alkaa muodostamaan runsasta kuplimista potkurin pinnoille, ja irrotessaan ne muodostavat aluksen perässä nähtävän kuohuvan potkurivirran.

Väärin suunniteltu potkuri voi aiheuttaa voimakasta kavitaatiota, ja tästä johtuen on myös äänekäs. Liiallinen kavitaatio kuluttaa potkurin pintaa, lyhentää niiden käyttöikää ja aiheuttaa kustannuksia. Potkurin lapojen pinnalta irtoavat kuplat aiheuttavat myös metallin molekyylien irtoamista ja pitkällä aikavälillä potkurin lavoissa alkaa näkyä selkeät kulumisjäljet.



Kuva 11. Kavitaation jälkiä potkurissa. (pes-solutionsin www-sivut 2018).

Äänensä vuoksi potkurin kavitaatio on haitallista myös aluksille, jotka eivät halua tulla kuulluksi, kuten sukellusveneet ja muut sota-alukset. Monissa maissa pyritään jatkuvasti kehittämään vähemmän kavitoivia potkuriratkaisuja.

Kavitaatiolajit

Potkurikavitaatio voidaan jakaa kolmeen lajiin:

- Levykavitaatio
- Kuplakavitaatio
- Kärkipyörrekavitaatio

Levykavitaatiossa potkurin lavan pintaan syntyy höyryn, veden ja kaasun seoksesta ohut lasimainen kerros. Se on suhteellisen vaaraton kavitaatiolaji, jos sen tilavuus ei muutu nopeasti lavan kulman mukaan. Sen tilavuuden muutokset saattavat aiheuttaa hydrodynaamisia muutoksia, jotka synnyttävät alukselle värähtelyongelmia. Levykavitaatio alkaa yleensä lavan profiilin etureunasta, jossa dynaaminen paine tavanomaisissa potkureissa saavuttaa minimiarvonsa. Imupuolen levykavitaation ulottuessa siipiprofiilin jättöreunaa pidemmälle, tällöin puhutaan, että potkurin profiili ylikavitoi. (Matusiak 2007, 82.)

Kuplakavitaatio syntyy levykavitaation epästabiilisuuden ja virtauksen turbulentsuuden seurauksena. Kavitaatiokuplat ajautuvat korkean paineen alueelle ja hajoavat nopeasti, joka aiheuttaa lyhyitä ja voimakkaita painepulsseja, josta seuraa meluhaittaa sekä potkurilapojen kulumista.

Lavan kärjessä ja juuressa syntyvät kärki- ja juuripyörteet. Nämä ovat verrattavissa lentokoneen siivissä syntyviin, välillä paljaalla silmälläkin nähtäviin kärkipyörteisiin. Mikäli nämä pyörteet ovat riittävän voimakkaita, alkavat ne kavitoida. Juurikavitaatio on melko harvinainen, koska navan syvyydessä hydrostaattinen paine ja sen johdosta myös kavitaatioluku on korkea. Mikäli juurikavitaatiota syntyy, aiheuttaa se pahempaa kulumista potkurin navalle ja lavoille, kuin kärkipyörrekavitaatio. (Matusiak 2007, 83.)

3.2.1 Potkurin nousu

Potkurin nousu määritellään potkurin alkusuunnittelussa yleensä mallikokeisiin perustuvan käyrästön avulla, joilla tavoitellaan maksimihyötysuhdetta avovedessä ilman kavitaatiota. Tämä tavoite johti potkureihin, joiden nousu on vakio. Käytännössä vain veneiden potkureina käytetään vakionousupotkureita. Laivojen potkureissa nousua pienennetään 15 % navan läheisyydessä eli alueella, jossa virtaus on hidastunut. Aluksilta, joilta vaaditaan pientä värähtelytasoa ja meluttomuutta, voidaan niiden potkurin lapojen kärkiä keventää nousua pienentämällä. Liiallinen nousun vähentäminen aiheuttaa kuitenkin potkurin hyötysuhteen alenemista. (Matusiak 2007, 87.)

3.2.2 Siipiprofiili

Aiemmin laivojen potkurien siipiprofiilin muoto muistutti pitkälti lentokoneen siiven profiilia. ”Tyypillinen ja aikaisemmin hyvin yleisesti käytetty ns. NACA-four digit-profiili osoittautui melko sopimattomaksi potkurilapojen profiiliksi. Syynä siihen oli voimakas, etureunasta alkanut ja pitkin imupuolta jatkunut virtauksen kiihdytys ja sitä seurannut syvä alipaineen alue. Tämän seurauksena levykavitaatio syntyy jo varsin korkeilla kavitaatioluvun arvoilla. Huomattavasti sopivammaksi potkurilapojen profiiliksi on osoittautunut ns. NACA $a = 0,8$ mean line (modified) profiilimuoto. Tälle profiilille ovat ominaisia tasainen kuormitus (dynaamisen paineen ero paine- ja imupuolella) ja paremmat kavitaatio-ominaisuudet.

(Matusiak 2007, 87.)

Kavitaation alkaminen potkurin lavoissa ei heikennä sen avovesiominaisuuksia, mutta kun huomattava osa lapojen pinnasta on levykavitaation peitossa, alkaa työntövoima- ja momenttikertoimen arvo pudota alas. työntövoiman alentuminen on nopeampaa, joka aiheuttaa potkurin hyötysuhteen pienenemistä. Voimakas kavitaatio voi aiheuttaa sen, että potkurin kierrosnopeutta lisäämällä, potkurin työntövoima ja teho heikkenee. (Matusiak 2007, 89.)

3.2.3 Kavitaatio ja epästationaariset ilmiöt

Potkuri, joka on sijoitettu aluksen perään, toimii rungon vanavedessä. Vanavesi on aluksen rungon aiheuttama virtauksen epähomogeeninen hidastuma, jonka potkuri kohtaa. Sillä on potkurin toiminnalle haittaa aiheuttavia vaikutuksia. Vakiotyöntövoiman lisäksi runkoon ja potkuriin vaikuttavat ei-toivotut harmoniset voima- ja momenttikomponentit. Näitä kutsutaan epästationaarisiksi potkurivoimiksi (bearing forces). Epästationaaristen potkurivoimien amplitudien suuruus riippuu vanaveden epätasaisuudesta, joka normaalisti on enintään 5% vakiotyöntövoiman- ja momentin arvosta. Potkuri synnyttää myös aluksen vedenalaiseen peräosaan harmonisen painekentän, joka aiheuttaa runkoon vaikuttavia harmonisia voimia (surface forces).

Yleisesti pinta-aluksien potkureiden kuormitus on tasolla, että potkurin kavitaatiolta ei voida välttyä. Harmonisesti muuttuva kavitaatio aiheuttaa aluksen runkoon monta kertaa potkuvoimaa suurempia pystysuoria runkovoimia. Nämä epästationääriset voimat aiheuttavat alukselle värähtelyongelmia. Huomionarvoista on myös se, että potkurikavitaation aiheuttama paine vaimenee vedessä paljon hitaammin kuin kavitomattoman potkurin indusoima paine. Tällainen epästationaarisen kavitaation paine sisältää komponentteja, joiden taajuus ylittää kymmeniin kilohertzeihin, joka puolestaan synnyttää melua ja aiheuttaa haittaa aluksessa oleville. Myös sota-aluksille tällainen melu olisi kohtalokasta, jonka vuoksi maailmalla tutkitaan paljon ratkaisuja, joilla kavitointia voidaan vähentää. (Matusiak 2007, 89-90.)

Potkurista aiheutuva melu syntyy, kun potkurin lavan pinnalle kasvaa alipaineesta ja vedessä olevista mikroskooppisen pienistä kaasukuplista levykavitaatiota. Kun levykavitaatio alkaa hajoamaan, syntyy siitä näkyviä kuplia, jotka ajautuessaan korkeamman paineen alueelle puristuvat kasaan. Kokoonpuristuminen aiheuttaa lyhyitä paineiskuja, jotka puolestaan muodostavat laajakaistaisen paineherätteen. Melun lisäksi tämä aiheuttaa potkurin lavoille kulumista. (Matusiak 2007, 93.)

3.2.4 Potkuriherätteet

Potkurin aiheuttamaa epästationaarista painetta voidaan arvioida kolmella tavalla. Luotettavin potkuriherätteiden arviointimenetelmä on mallikokeet. Niitä voidaan suorittaa joko kavitaatiotunnelissa tai hinausaltaassa, jossa ilmakehän painetta voidaan alentaa. Paineen ensimmäisten komponenttien arviointitarkkuus on luokkaa 30- 50 % mallikoelaitoksilla, joilla on pitkä kokemus. Melun arviointi parhaimmassa tapauksessa onnistuu 5 desibelin tarkkuudella. Kavitaatiomallikokeet ovat hitaita ja kalliita, ja paineita mitataan ainoastaan muutamissa pisteissä, jolloin värähtelyanalyysistä ei saada luotettavaa.

Potkuriherätteiden matemaattinen ennustaminen on hyvin vaikeaa, koska matemaattisen mallin luominen epästationaariselle ja erimuotoiselle potkurin kavitaatiolle on vaikeaa. Vaikeudesta huolimatta laskennallisen ennusteen tarkkuus on usein riittävä. Parhaiden menetelmien tarkkuus paineen ensimmäisten komponenttien osalta on

luokkaa 30-100 %. Melun laskennallisen ennusteen ja harvojen mittauksien välinen ero on noin 10 desibeliä. Teoreettisen laskennan etuna on halpa hinta ja lyhyempi kesto sekä mahdollisuus tutkia useita tilanteita ja alusvaihtoehtoja.

(Matusiak 2007, 97.)

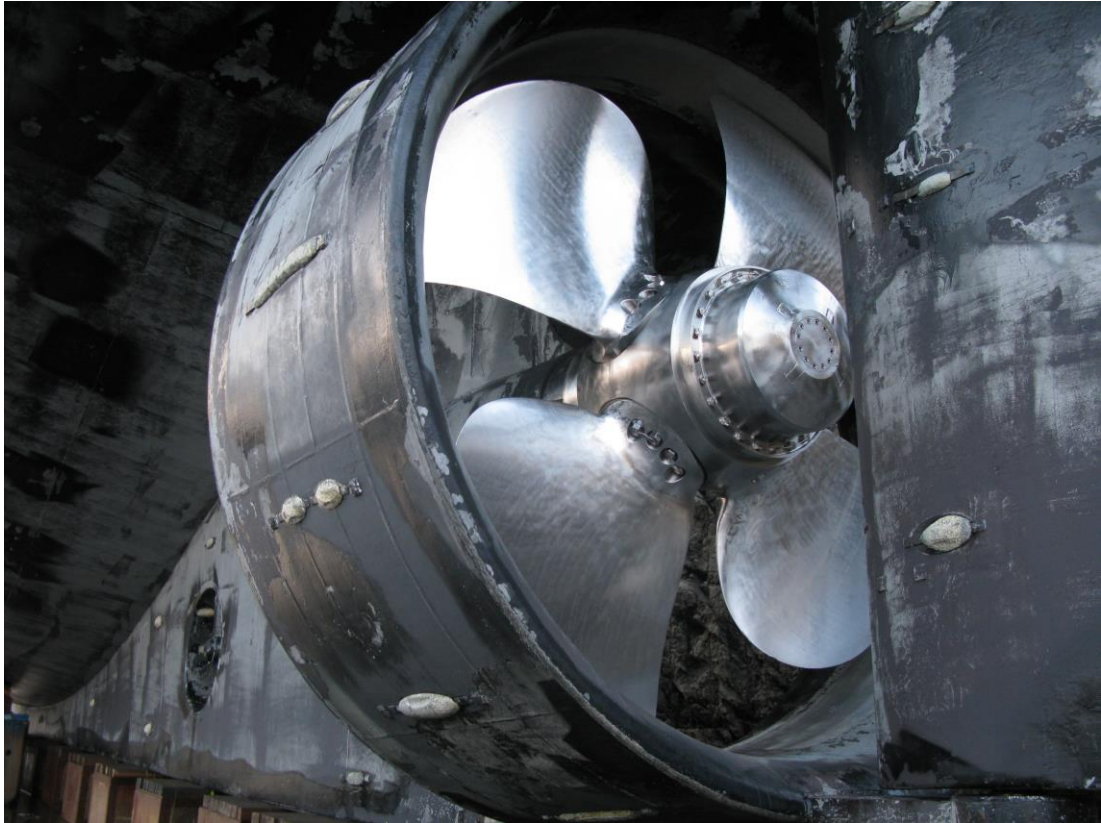
”Likimääräiset ”pika-analyysit perustuvat regressioanalyysiin, joka perustuu laiva- ja mallikokeiden tuloksiin. Menetelmät ovat samaa sukua kuin esimerkiksi Holtropin vastuslaskentamenetelmä. Likimääräiset menetelmät ovat valitettavasti hyvin epätarkkoja. Pahimmassa tapauksessa saattaa lapataajuskomponentin arvioinnin epätarkkuus olla noin 500%:n luokkaa. Menetelmien hyvinä puolina ovat helppokäyttöisyys ja nopeus. Eräs tapa nostaa likimääräisen menetelmän luotettavuutta, on omiin (telakan) aikaisempiin kokemuksiin perustuvien korjauskertoimien käyttö.” (Matusiak 2007, 97.)

3.3 Potkurin suulake

Suulakkeen päätehtävä on ohjata potkurin ympärille syntyvä virtauskenttä määrättyyn muotoon. Tähän virtauskentän muutokseen liittyy työntövoimaa, jonka suulake kehittää. Suulakkeet voidaan jaotella kiihdyttäviin ja hidastaviin suulakkeisiin.

Kiihdyttävä suulake aiheuttaa kiihtyvää virtausta potkuritason edessä, jolloin se keventää potkurin kuormitusta ja lisää työntövoimaa potkurin etenemisluvun arvon ollessa pieni. Kiihdyttävää suulaketta käytetään tyypillisesti aluksissa, joilta vaaditaan hyvä paaluveto, kuten hinaajat. Mikäli kiihdyttävällä suulakkeella varustetun aluksen nopeus kasvaa riittävän suureksi, muuttuu työntö negatiiviseksi eli suulake alkaa pienentämään yhdistelmän kokonaistyöntöä.

Hidastavaa suulaketta käytetään sota-aluksissa kavitaatio-ongelmien vähentämiseen avovesihyötysuhteen kustannuksella ja jatkossa tässä opinnäytetyössä puhutaan vain kiihdyttävästä suulakkeesta. (Matusiak 2007, 105.)



Kuva 12. AHT Zeuksen potkuri ja suulake. (Zeuksen henkilökunta 2010)

3.3.1 Suulakepotkurin avovesiominaisuudet

“Suulake kiihdyttää potkuria kohtaavaa virtausta. Sen seurauksena potkurin etenemisluku kasvaa näennäisesti ja työntö pienenee. Etenemisluvun kasvuun liittyy potkurin kuormituksen pieneneminen, jota seuraa hyötysuhteen kasvu.” (Matusiak 2007, 107.)

Edellistä lausetta voi verrata ideaalipropulsorin hyötysuhteen kaavaan (sivu 16).

”Suulake pienentää lavan kärkivirtauksen häviöitä, minkä seurauksena suulakepotkurin kehittämä työntö ja momentti ovat suurempia arvoltaan kuin suulakepotkurin näennäisen etenemisluvun arvolla toimivan avopotkurin.” (Matusiak 2007, 107.)

3.4 Vanaveden vaikutus

Kulkiessaan alus vetää mukanaan vettä, jota kutsutaan vanavedeksi, tästä johtuen aluksen perässä oleva potkuri kohtaa veden virtauksen eri nopeudella kuin itse alus. Virtauksen nopeus vanavedessä on vektorisuure, johon sisältyy myös pyörteilyä. Käytännön elämässä pyörteilyä on hyvin hankalaa huomata, ja varsinaisissa potkurin laskelmissa pyörteettömästä osasta käytetään vain vanaveden aksiaalista komponenttia. Tarkemmissa potkurilaskelmissa huomioidaan myös poikittaiset komponentit. (Matusiak 2007, 42.)

3.4.1 Vanaveden osatekijät

- Potentiaalivanavesi on potentiaalivirtauksesta johtuva virtauksen hidastuma aluksen perässä. Potentiaalivanaveden vaikutuksen suuruus riippuu potkurin sijainnista aluksen runkoon nähden.
- Kitkavanavesi on aluksen rungossa olevan rajakerroksen synnyttämä hidastava vaikutus aluksen perää ympäröivään virtaukseen.
- Irtaantumisanavedessä rajakerroksen hidastettu virtaus irtaantuu aluksen rungosta, josta seuraa pyörteinen turbulenttivirtaus.
- Aaltovanavesi. Aallon harjalla veden virtaus hidastuu ja aallon pohjalla puolestaan kiihtyy. Virtausnopeutta, joka liittyy aaltokuvioon, kutsutaan aaltovanavedeksi.
- Potkurin indusoimassa vanavedessä, potkuri kiihdyttää veden virtausta ja sillä on vanavettä pienentävä vaikutus. Potkurin imu voi jopa torjua virtauksen irtaantumista aluksen perässä.

(Matusiak 2007, 42-44.)

3.5 Vanaveden teoriaa

Aluksen todellinen rajakerros on ohuempi kuin mallissa, kun se suhteutetaan aluksen mittoihin, tästä johtuen laivan kitkavanavesi on paljon pienempi kuin mallilla. Siitä puolestaan seuraa se, että virtauksen irtoamisesta johtuva vanavesi on mallissa laivan vanavettä suurempi. Alustavassa potkurin suunnittelussa käytetään yleensä mallin vanavesiarvoja. (Matusiak 2007, 45.)

3.6 Propulsiomallikoe

Propulsiokokeissa pyritään määrittämään tarvittava koneteho järjestelmälle. Käytännössä aluksesta tehdään malli, johon asennetaan mittakaavan suhteessa pienennetyt potkurit, joita pyöritetään oman koneiston avulla. Potkuriakseleilta mitataan dyna- metrillä potkurin työntö TM , momentti QM ja kierrosluku nM joilla malli saadaan kulkemaan tietyllä nopeudella, koneistonsa avulla.

Mallin kitkavastus on aina liian suuri suhteessa oikeaan laivaan. Eli mallin propulsiokokeessa potkuri olisi ylikuormitettu suhteessa laivan potkuriin. Jotta mallin potkurin kuormitus saadaan vastaamaan laivan potkurin arvoja, on sitä kokeessa vedettävä voimalla, joka vastaa laivan ja mallin välisten kitkavoimien erotusta. Mallia hinataan mallikoealtaassa korjausvoimalla tietyllä nopeudella ja mitataan potkurien työntö, momentti ja kierrosluku, tätä mitattavaa tilannetta kutsutaan propulsiopisteeksi. Ennen mallikoetta on akselin ja laakerien välinen kitka mitattu, asennamalle potkurin tilalle samanpainoinen virtaviivakappale, jota on pyöritetty vedessä kokeiltavalla kierroslukualueella.

Kahdella potkurilla varustetun aluksen työntö TM on molempien potkurien työntön summa. Monipotkuristen alusten työntön vähennyskerrointa ei voida käyttää kuin jokinlaisena keskiarvona potkuria kohden, koska kaikissa potkureissa työntö ei ole samansuuruinen. Täyteläisillä aluksilla kuten esimerkiksi öljytankkereilla, saattaa virtaus irrota laivan peräosasta normaalissa vastuskokeessa. Tällöin propulsiokokeessa saattaa käydä niin, että potkurin imu estää virtausta irtoamasta aluksen rungosta, jolloin on vaara, että työntönvähennyskerroimelle saadaan hyvin pieni tai jopa negatiivinen arvo. Propulsiomallikokeessa malli liikkuu jatkuvasti kokeen aikana, jolloin mitaaminen on hankalaa. (Matusiak 2007, 48.)

3.7 Merikoeajolla suoritettavat mittaukset

Valmistuvalle alukselle suoritetaan rakentavan telakan toimesta merikoeajo. Tämän koeajon päätarkoituksena on määritellä aluksen nopeuden riippuvuutta akselitehosta ja potkureiden pyörimisnopeudesta tietyllä uppouman painolla ja viippauksella. Tällä mitatulla ja analysoidulla tuloksella halutaan varmistua, että laivasuunnittelijan sekä telakan kauppasopimuksen ehdot laivan omistajalle täyttyvät. Koeajolta saatava tieto on tärkeää, että mallikokeista ja niistä aluksen mittakaavaan suoritettujen ekstrapolointien toteutus on onnistunut. Näissä kokeissa saadaan myös kattavaa kokemuseräistä tietoa tulevia suunnitelmia varten. Laivoille suoritettava koeajo poikkeaa suuresti laajuudeltaan uusille auto- ja lentokonemalleille tehdyistä kokeista. Sarjatuotantoon tarkoitettujen kulkuneuvojen tuotekehittelyyn käytetään useita prototyyppisiä, ja koeajon ja testien kesto vaihtelee muutamista kuukausista vuosiin. Tyypillinen laivan merikoeajo kestää noin 2-7 vuorokautta, jolloin testataan tehon tarve ja nopeus sekä lukuisten laitteistojen toimivuus. Tämän jälkeen alus luovutetaan tilaajalle. Maantieteellisistä rajoituksista johtuen koeajoa ei yleensä pystytä suorittamaan riittävän syvässä vedessä, eikä näin voida välttyä matalan veden vaikutuksesta aluksen nopeuteen. (Matusiak 2007, 132.)

Koeajoa suoritettaessa tulisi seuraaviin asioihin kiinnittää huomiota:

- Kokeet tulisi suorittaa noin 2 viikon sisällä pohjan maalauksesta, jotta se on mahdollisimman sileä.
- Pinnan karkeus mitattava.
- Potkurien pinnan tulisi myös olla sileä.
- Tuuli ja aallokko.
- Kokeet tehtävä aina myötä- ja vasta-aallokossa sekä tuulessa.
- Laivakoosta riippuen, tulisi koeajon tuuliolosuhteet vastata beaufortin arvo 2-3
- Aallokon korkeus laivakoosta riippuen noin 0,5 metriä.
- Riittävä veden syvyys.

3.8 Uppouma-aluksen perän muotoilu

Propulsion kannalta on oleellista, että potkuri saa aluksen rungon aiheuttaman virtauksen hidastuman eli vanaveden kiihtymään mahdollisimman lähelle aluksen nopeutta. Tästä syystä ratkaisu, jossa on yksi isokokoinen ja hitaasti pyörivä potkuri, joka on sijoitettu vanaveteen, on hyötysuhteeltaan yleensä monipotkuriratkaisua parempi. Potkurin halkaisijan tulisi olla lähellä optimiarvoa, eikä se saa kavitoida liian hitaille ja täyteläisille aluksille suositellaan usein U-muotoista perää. Laivan nopeuden sekä potkurin pyörimisnopeuden kasvaessa suositellaan V-perän käyttöä. Ratkaisu, jossa potkuri on tuettu peräbulbilla, on osoittautunut toimivaksi nopeakulkuisissa Ro-Ro aluksissa. Tällaisesta käytetään nimeä alavirtausperä. Alavirtausperällä on hyvien propulsio-ominaisuuksien lisäksi suhteellisen tasainen vanavesi, joka mahdollistaa suuritehoisen potkurin käytön, ilman vakavia kavitaatio- ja värähtely-ongelmia. Leveän alavirtausperän huonona ominaisuutena voidaan pitää perän pohjan kohdistuvien aaltoiskujen riskiä.

Mikäli suuren leveys-syväyssuhteen vuoksi tai jostakin muusta syystä alukseen joudutaan asentamaan kaksi potkurilinjaa, voidaan uppouma-aluksen perävaihtoehdot jakaa kolmeen ryhmään. V-perä, kaksiköliperä ja avoin alavirtausperä.

V-perä soveltuu hyvin valtamerialuksille sekä aluksille, joilla on suuret merikelpoisuusvaatimukset. Hitaille aluksille V-perän suunnittelussa voidaan hyödyntää levitettyjä pintoja. Ro-Ro-aluksissa peräportti ja konttilaivoissa vaadittava kansitila voi estää V-perän käytön. Tällaisessa tapauksessa voidaan hyödyntää kaksiköliperää, joka on osoittautunut edulliseksi ratkaisuksi. Lisäetuna tässä ratkaisussa on kölien keinuntaa vaimentava ominaisuus. Virtauksen irtoamisen estämiseksi kölien välinen puolitunneli tulisi suunnitella lievästi suppenevaksi. Kaksipotkurisessa aluksessa köliperän epäkohtana voidaan pitää kölin taakse syntyvää kapeaa ja syvää vanavesipiikkiä. Tavanomaisen V-perällä varustetun aluksen perän kohdalla alkava täyteläisyyden kasvu voi johtaa usein vesiviivojen ja vertikaalien kaltevuuksien liialliseen kasvuun. Tästä seuraa virtauksen irtoamista, epätasaista vanavesikenttää ja usein myös huonoja vastus- ja propulsio-ominaisuuksia. Alavirtausperillä nämä seikat ovat paremmin hallittavissa. Alavirtausperät voidaan jakaa seuraavasti:

- Avoimet alavirtausperät, joissa potkurit tuetaan erillisillä potkuripukeilla. Käytetään tyypillisesti matkustaja-autolautoissa.
- Köliperät. Yksi- ja kaksipotkuriratkaisuissa.

- Peräpaksunnosperät. Vain yksipotkurisissa.

Propulsiohyötysuhteen kannalta kaksiköliperä on avointa alavirtausperää parempi. Sillä on kuitenkin suurempi vastus kasvaneen märkäpinnan seurauksena.

(Matusiak 2007, 128.)

3.9 Propulsioteho

Aluksen propulsiojärjestelmästä saatava teho voidaan laskea seuraavasti:

$$P_D = \frac{P_B}{\eta_D}$$

P_D = potkuriteho

P_B = koneteho

η_D = propulsiohyötysuhde = $\eta_H \eta_B$

η_H = rungon hyötysuhde

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w}$$

t = työnnön vähennyskerroin

w = vanavesikerroin

η_B = potkurin hyötysuhde laivassa = $\eta_O \eta_R$

η_O = potkurin avovesihyötysuhde (hyötysuhde vapaassa virtauksessa)

η_R = suhteellinen pyörimishyötysuhde

eli $\eta_D = \eta_O \eta_R \eta_H$

Työnnön vähennyskerroin (t). Potkurin mitattu työntövoima mallikokeessa ei ole sama kuin laivamallin vastus. Virtauskentän saa aikaan alipaineen laivan perässä, josta syntyy voima, joka vaikuttaa aluksen kulkusuuntaa vastaan.

(Kanerva 2000, 9-3.)

Työnnön vähennys on rungon vastareaktio potkurin toiminnalle. Potkurin kiihdyttäessä virtausta aluksen perässä, minkä seurauksena aluksen vastus kasvaa. Potkurin synnyttämä virtaus on voimakkainta hyvin lähellä potkuria, kun taas etäisyyden ollessa yli kaksi kertaa potkurin halkaisijaa suurempi, silloin potkuri ei enää merkittävästi vaikuta virtaukseen. Peräsimen sijainnilla suhteessa potkuriin on iso merkitys, mitä lähempänä peräsin on potkuria, sen suurempi on työnnön vähennys. Nopeuden kasvu suurentaa myös kitkaa rungossa. Työnnön vähennyskerroimeen vaikuttaa aluksen perän muotoilu, peräsimen ja potkurin koko sekä sijoitus, kun taas vanavesikerroimeen vaikuttaa koko aluksen runko.

$$t = \frac{T - R_T}{T}$$

T = potkurin työntövoima

R_T = kokonaisvastus

Vanavesikerroin (w). Määräytyy, kun potkurin kohtaama veden virtausnopeus (V_A) on pienempi kuin laivan nopeus (V_S). Tämä johtuu laivan muodosta, nesteen viskositeettistä ja aallonmuodostuksesta. (Kanerva 2000, 9-3.)

$$w = \frac{V_S - V_A}{V_S} = 1 - \frac{V_A}{V_S}$$

Alukset, jotka on varustettu yhdellä potkurilla voi työnnönvähennyskerroin (t) olla luokkaa 0,05-0,35 ja vanavesikerroin (w) 0,15-0,60. Hoikemmat alukset saavat alemman kertoimen ja täyteläisemmät, kuten tankkerit omaavat korkeamman kertoimen. Kaksipotkurisissa avoimilla akselilinjoilla varustetuissa aluksissa työnnönvähennyskerroin on 0,02-0,25 ja vanavesikerroin 0,05-0,25.

Tyypillisessä matkustaja-autolautassa $t = 0,13$ ja $w = 0,10$.

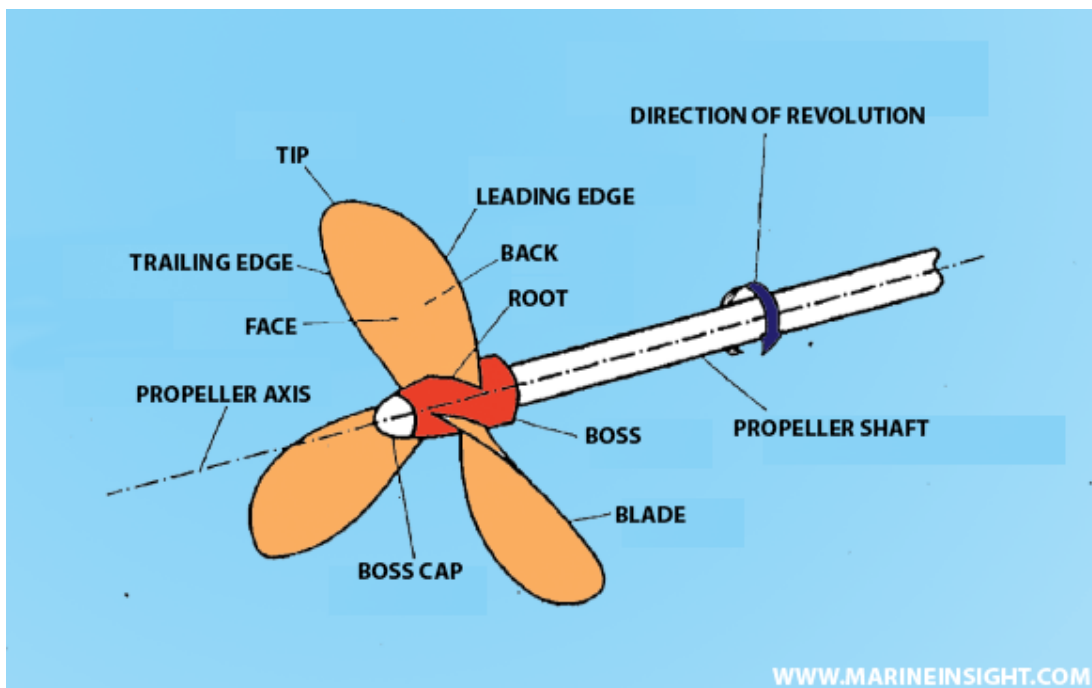
(Kanerva 2000, 9-3.)

4 POTKURI JA AKSELISTO

4.1 Ruuvipotkuri

Ruuvipotkurissa potkurin lavat on asennettu potkurin napaan, joka saa voimansa potkuriakselin päästä. Tässä kohtaa voimavaikutus nykyaikaisessa aluksessa tulee alenusvaihteen kautta voimakoneelta, joka yleisesti on dieselmoottori. Pyörimisliikkestä johtuen potkurin lavat saavat vastaanansa virtausta, joka on ollut laskennallisena tekijänä propulsiojärjestelmän suunnittelijalle.

”Potkuri pyörii akselinsa ympäri ja sen lavat kohtaavat virtausta, joka koostuu pyörimisliikkeen komponentista eli kehänopeudesta ja aluksen perässä vallitsevasta virtauksesta.” (Matusiak 2007, 12.)



Kuva 13. Ruuvipotkuri. (Marine insightin www-sivut 2018)

Potkurin nousu (P) on x -suuntainen etäisyys, jonka potkuri siirtyisi yhden pyörähdyksen aikana jossakin kiinteässä aineessa. Usein potkurin nousu muuttuu säteen (r) funktiona. Nousu on mahdollista ilmoittaa myös kulmana seuraavasti:

$$\tan \phi = \frac{P/D}{\pi r/R} = \frac{P}{2\pi r}$$

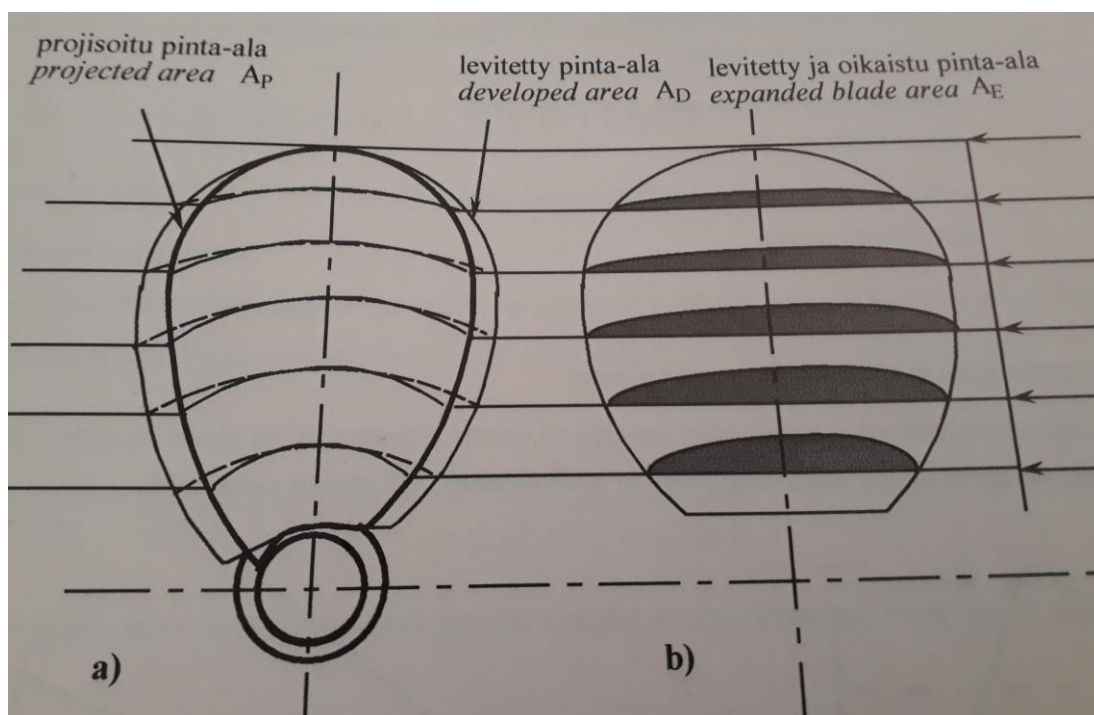
Jossa D on potkurin halkaisija.

P on potkurin nousu.

R on etäisyys.

Potkurin työpiirustuksissa lavan muoto neljänä projektiona.

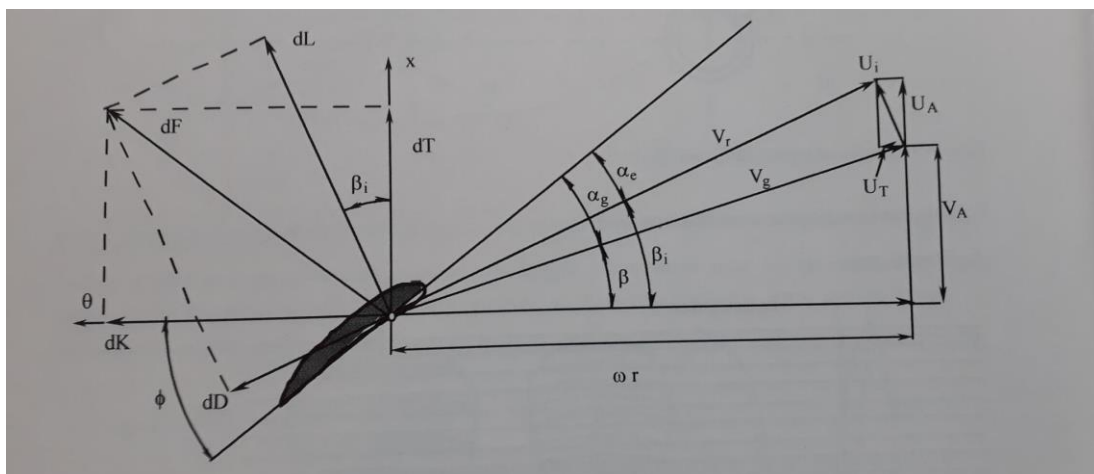
- sivuprojektio
- akselinsuuntainen projektio
- lavan projisoitu pinta-ala
- lavan levitetty pinta-ala



Kuva 14. Akselin suuntainen projektio esittää projisoitua pinta-alaa. Kuvassa myös levitetty pinta-ala, joka saadaan projisoimalla tasoon potkurin painepuolen ruuvipinta. (Matusiak & Kanerva 2000, 8-5)

Potkurin suunnittelun suorittaa yleensä potkurin valmistaja. Suunnittelussa käytetään niin sanottuja kantoviiva- tai kantopintamenetelmiä, tai molempia. Laskelmien avulla voidaan määrittää potkurin geometria ja siipiprofiilin muoto, jotka varmistavat suunnitellun sekä tarvittavan työntövoiman, kun rajoittavina tekijöinä on potkurin halkaisija ja teho. Nykyaikana on menetelmiä, joiden avulla voidaan huomioida aluksen rungon aiheuttama hidastuma eli vanavesi. (Matusiak & Kanerva 2000, 8-8.)

Laskennallisesti ja teoreettisesti voidaan määrittellä erilaisia arvoja ja vektoreita kuten esimerkiksi työntövoimalle tai hyötysuhteelle. Käytännössä kuitenkin laskelmien varaan ei voi liikaa nojata niiden epätarkkuuden takia, jolloin mallikokeella voidaan suorittaa tarkempia tutkimuksia.



Kuva 15. Kuvassa on esitetty nopeusvektorit ja siipiprofiiliin vaikuttavat voimat. Tässä ei ole huomioitu kitkasta aiheutuvaa profiilinvastuskomponenttia, vaan virtauksen on oletettu olevan kitkaton ja pyörteetön. (Matusiak & Kanerva 2000, 8-6.)

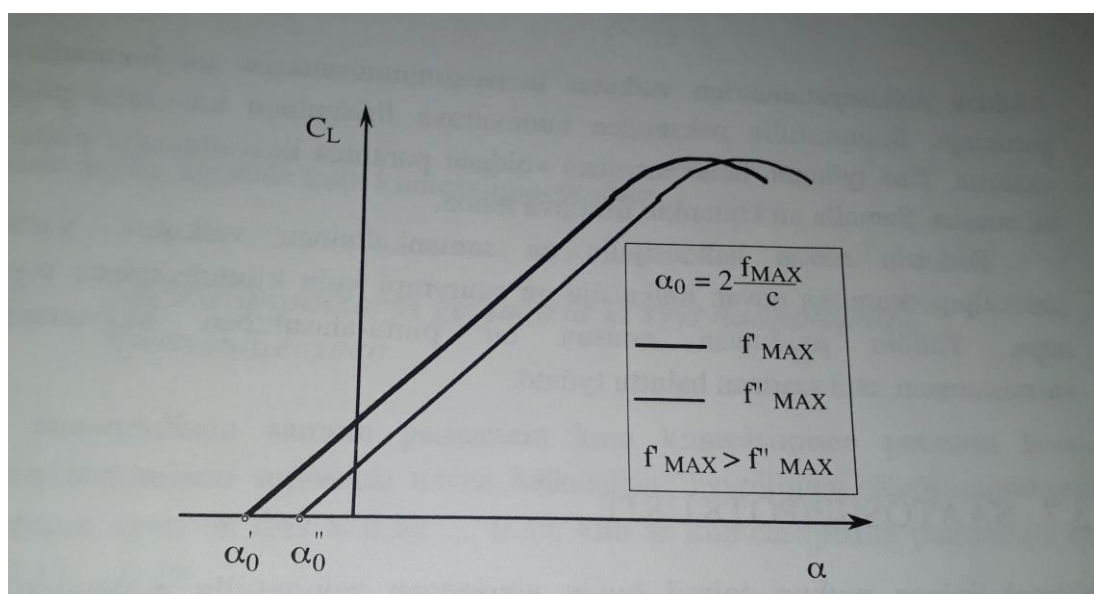
”Potkurin rotaatioliike ωr ja potkurin etenemisnopeus V_A muodostavat resultantti-nopeusvektorin V_g , joka kohtaa profiilin kärkisuoran kulmassa α_g , mikä on nousukulman ϕ ja etenemiskulman β erotus. Potkurin lapa on kolmiulotteinen kantotaso. Se indusoi sekä potkurin akselin suuntaisen U_A , että kehän suuntaisen U_T -nopeuden. Indusoidut nopeudet aiheuttavat sen, että resultanttinopeus V_r ja kohtauskulma α_e poikkeavat geometrisistä arvoista (alaindeksi g). Indusoitujen nopeuksien suurus riippuu potkurin kuormituksesta, jota edustaa geometrisen kohtauskulman $\alpha_g(r)$ ja siipiprofiilipituuden $c(r)$ säteittäiset jakaumat. Mitä suuremmat ovat geometrisen kohtauskulman α_g arvot ja mitä lyhyempi on potkurin lapa suhteutettuna sen pinta-alaan, sitä

suuremmat ovat indusoidut nopeudet. Tehollinen kohtauskulma α_e , joka on geometrisen- ϕ ja ns. hydrodynaamisen nousukulman β_1 erotus, on sitä pienempi mitä suurempia ovat indusoidut nopeudet.”

(Matusiak & Kanerva 2000, 8-6.)

Potkurin nousu on vaikuttaa suuresti sen avovesiominaisuuksiin. Nousun suurentaminen vaikuttaa kohtauskulmaan α_e nostaen sen arvoa. Tästä johtuen potkurin työntö- ja momenttikertoimen arvot nousevat etenemisluvun hyötyalueella. Suurentamalla potkurin nousua, siirtyy hyötysuhteen maksimikohta kohti suurempia etenemisluvun arvoja ja hyötysuhteen suurin arvo kasvaa. Pienemmillä etenemisluvun arvoilla, potkurin nousun kasvattaminen liittyy konstruktiohyötysuhteen η_k aleneminen.

Potkurin profiilin kaarevuus vaikuttaa avovesiominaisuuksiin samalla tavalla kuin nousu. (Matusiak 2007, 31-32.)



Kuva 16. Nostovoimakertoimen riippuvuus siipiprofiilin kaarevuudesta ja kohtauskulmasta (Matusiak 2007, 33).

Kuvassa:

α = Kohtauskulma.

c = Siipiprofiilin kärkisuora.

f = Siipiprofiilin kaarevuus.

Potkurin pinta-alasuhdetta lisäämällä, voidaan kasvattaa sekä potkurin työntöä, että momenttia. Työntö- ja momenttikertoimien kasvaminen on hitaampaa, kuin pinta- alasuhteen kasvaminen, koska potkurin kuormitus kasvattaa nopeasti indusoituja nopeuksia. Tämä puolestaan pienentää potkurin kohtauskulmaa. Mitä suurempi on potkurin pinta-alasuhte, sitä suurempia ovat kitkahäviöt. Josta seuraa, että suuremmalla pinta-alasuhteella olevalla potkurilla on pienempi hyötysuhteen maksimiarvo. (Matusiak 2007, 33.)

”Työntö- ja momenttikerroin muuttuvat etenemisluvun mukaan. Paaluvetotilanteessa, jota vastaa etenemisluku $J = 0$, virtauksen kohtauskulma α_e saavuttaa maksimiarvonsa. Jos tämä kulma ylittää sakkauskulman arvon, tai jos potkurin lavoissa muodostuu raskaan kuormituksen seurauksena voimakasta kavitaatiota, romahtavat sekä työntö- että momenttikerroin. Ilmiötä kutsutaan työnnön romahtamiseksi.”
(Matusiak 2007, 29.)

Potkurin suunnittelussa pitäisi pyrkiä siihen, että potkuri toimisi mahdollisimman lähellä hyötysuhteen maksimiarvoa. Tämä ei ole useinkaan mahdollista toteuttaa. Etenemisluvun kohdalla, jolla työntökerroin on nolla ($K_T = 0$), potkuriin kohdistuva virtaus pyörittää potkuria kitkavoimien momentin avulla. Kyseisessä tapauksessa propulsiojärjestelmän energian kulutus on nolla ja potkuri vastustaa virtausta pienellä negatiivisella voimalla. Etenemisluvun arvoa kasvatettaessa, kasvaa myös virtausta vastustava negatiivinen voima. Tällöin virtauksen kohtauskulma α_e muuttuu negatiiviseksi ja potkuri tuottaa turbiinin tavoin energiaa. (Matusiak 2007, 29.)

4.2 Potkurin materiaalit

Potkurin materiaalit voidaan jakaa pääosin pronssisiin tai ruostumattomiin teräksiin. Materiaaleina käytetään näitä sekoitettuna muihin metalleihin. Esimerkiksi mangaani-alumiini-pronssi tai nikkeli-alumiini-pronssi. Teräksisiä on esimerkiksi karkaistu ruostumaton teräs tai austenoitu ruostumaton teräs.
(Carlton 2012, 385-286.)

4.3 Potkurin paino

Potkurin paino pitää laskea jokaiseen asennukseen ja valmistaja on yleensä ilmoittanut sen kuivapainon. Kuivapainolla tarkoitetaan potkurin painoa ilmassa, sillä vedessä sen paino muuttuu, kun se on kiinnitettynä aluksen akseliin. Potkurin painon voi laskea yksinkertaisella kaavalla.

$$W_E = W_D - N$$

Jossa:

W_E = Potkurin paino vedessä kiinnitettynä

W_D = Potkurin kuivapaino

N = Potkuriin vaikuttava noste

(Carlton 2012, 272.)

Kappaleeseen vaikuttavan nosteen (N) voi laskea kaavalla

$$N = \rho V g$$

Jossa,

ρ = Nesteen tiheys

V = Upoksissa olevan osan tilavuus

g = Maan putoamiskiihtyvyyys ($9,81\text{m/s}^2$)

4.4 Akselilinjan suunnittelu

”Luokituslaitoksen mukaan potkuriakselin ja väliakselin läpimitta määrätään kaavan mukaan.

$$d = Fk^3 \sqrt{\frac{P}{R} \frac{560}{\sigma_u + 160}}$$

Jossa,

d = Potkuriakselin tai väliakselin halkaisija

F = Kerroin, jonka arvo on 100 potkuriakselia tai väliakselia laskettaessa polttomoottorikäytössä ja 95 tasaisen vääntömomentin antamassa turbiini- ja sähkömoottorikäytössä väliakselia laskettaessa.

k = Kiinnitystavan huomioon ottava kerroin. Potkuriakselia laskettaessa kiilaton tai laippakiinnitys 1.22, kiilaa käyttäen 1.26. Väliakselia laskettaessa kerroin on 1.0

P = Koneiston nimellisteho(kW)

R = Akselin nimellispyörimisnopeus(rpm)

σ_u = Akselimateriaalin minimi vetomurtolujuus”

(Häkkinen 1999, 28.)

4.5 Akselijohto

Akselijohto koostuu väliakselista tai useammasta väliakselista sekä potkuriakselista. Linja voi kohota keulaan 0,5-2 asteen välillä riippuen laivan rungon muodosta ja miten pääkone ja vaihteisto on sijoitettu. Hinaajissa kaltevuudet voivat olla yli 2 astetta ja offshore-käytössä laitteet voivat toimia yli 15 asteen jatkuvassa viippauksessa ja samanaikaisen kallistuman aikana. (Häkkinen 1999, 24.)

4.6 Potkuriakseli

Potkuriakseli on akseli, jonka toisessa päässä on alennusvaihde ja toisessa päässä potkuri. Potkuriakselit ovat yleensä pitkiä ja ne vaativat kannatusta, tätä varten on kannatuslaakerit. (Häkkinen 1999, 28.)



Kuva 17. Potkuriakseli alennusvaihteiden päässä (Tuomas Raumanen 2018)

”Potkuriakselit on vedettävä viiden tai kymmenen vuoden välein; jos laakerit on voideltu vaseliinilla, aikaväli on viisi vuotta, ja jos laakerit on voideltu öljyllä, aikaväli on 10 vuotta. Yli 30 vuotta vanhan aluksen potkuriakselit, joiden laakerit on voideltu öljyllä, on vedettävä viiden vuoden välein. Rungonkatsastaja voi jatkaa potkuriakselien vetämisen aikaväliä 15 vuoteen tai pitempään sillä edellytyksellä, että akselitiivisteet eivät vuoda, laakerien lämpötiloja seurataan säännöllisesti, ja hylsyöljyn koostumus analysoidaan kaksi kertaa vuodessa.”

(Finlexin www-sivut 2018.)



Kuva 18. Potkuriakseli ulosvedettynä (AHT Zeuksen henkilökunta 2010)

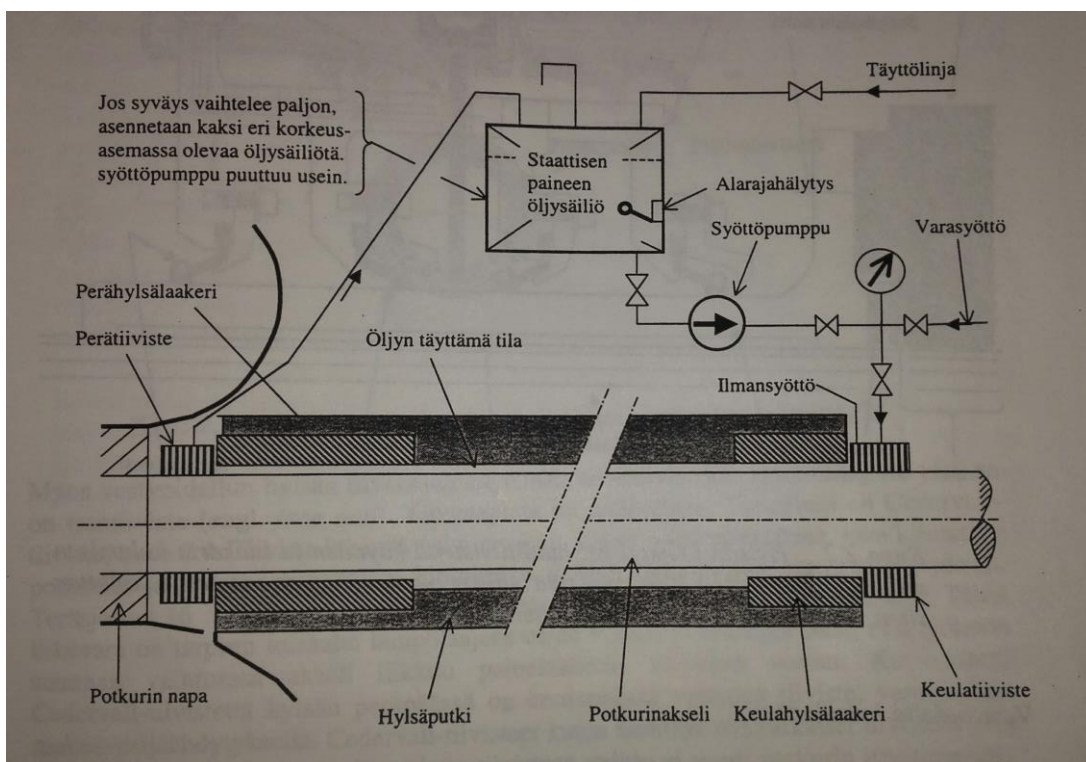
4.7 Hylsä- ja kannatuslaakerit

Hylsä laakeroi potkuriakselin peräpäähän ja sen molemmissa päissä on akselitiivisteet, jotka estävät öljyn ja veden vuotamisen sisään ja ulos. Peräpäässä oleva tiiviste estää öljyn vuotamisen mereen, sekä meriveden pääsemisen laakeriin. Keulimmainen tiiviste estää taas öljyn valumisen sisään pilssiin. Tiiviste säilyttää tiiveytensä, vaikka akseli liikkuisi poikittais- ja pitkittäissuunnassa. (Häkkinen 1999, 25-26.)

Öljyvoideltu hylsä

Öljyvoidellussa hylsässä teräksinen hylsäputki, jonka sisään on puristussoviteella painettu valurautaputki, kiinnitetään hitsaamalla molemmista päistä. Valurautaputken

sisäpinnalla on valkometallinen liukukerros. Laakerit ovat pituudeltaan 1,5-2 kertaa akselin halkaisija. Voiteluun ja jäähdytykseen on ylempänä sijaitseva tankki, josta syötetään öljyä laakeriin painovoimaisena. Tankkeja on yleensä kaksi, joiden käyttö valitaan aluksen syvyyden mukaan. Öljy poistuu valumiskanavaa pitkin takaisin tankkiin, josta voidaan myös valvoa mahdollisia epäpuhtauksia. Tiivisteet ovat huuli- tiivisteitä, joita peräpäässä on yleensä kolme peräkkäin. Tiivisteiden sisäpinta koskettaa akselin mukana pyörivään kromattuun holkkiin ja tiivisterenkaat on kiinnitetty ruuvein ulkokehältään. (Häkkinen 1999, 25.)



Kuva 19. Öljyvoitelu hylsän laakeri (Häkkinen 1999, 26.)

Vesivoitelu hylsä

Vesivoitelussa on myös hylsäputki. Vesivoitelu hylsäläakeri on parempi siinä tapauksessa, jos peräpään tiiviste alkaa vuotamaan, sillä laakeri toimii tilapäisesti myös merivesivoitelulla. Veteen, joka voitelee ja jäähdyttää hylsäläakereita, on sekoitettu korroosion- ja jäätymisenestoaineita. Kumi ja muovinen holkki muodostavat laakerin. Muoviholkin vähimmäispituus on 2 kertaa akselin halkaisija, sillä sille sallitaan kohtalaisen korkea paine. (Häkkinen 1999, 26.)

Tiivisteinä käytetään myös vesivoidellussa hylsässä huulitiivisteitä. Yleinen tiiviste murtajissa on tasotiiviste, jonka pinta on radiaalinen. Siinä on valurautainen kulumisrenkas, joka kiinnitetään potkuriin ja hylsän peräpäähän. (Häkkinen 1999, 27.)

Merivesivoitelua käytettiin aiemmin laivoissa. Tällöin laakerissa oli erillisiä puisia sauvoja, jotka olivat kovaa trooppista puuta. Hylsäputkessa oli uria tai pronssilistoja, joihin nämä sauvat kiinnitettiin. Pituuden piti olla vähintään 4 kertaa akselin halkaisija. Merivettä syötettiin hylsään erillisellä pumpulla, ja peräpäähän tiivistettä ei ollut. Keulimmaisena tiivisteinä käytettiin luonnonkuitua olevaa poksitiivistettä. Narumainen tiiviste kierrettiin moninkerroin akselin ympärille. (Häkkinen 1999, 26.)

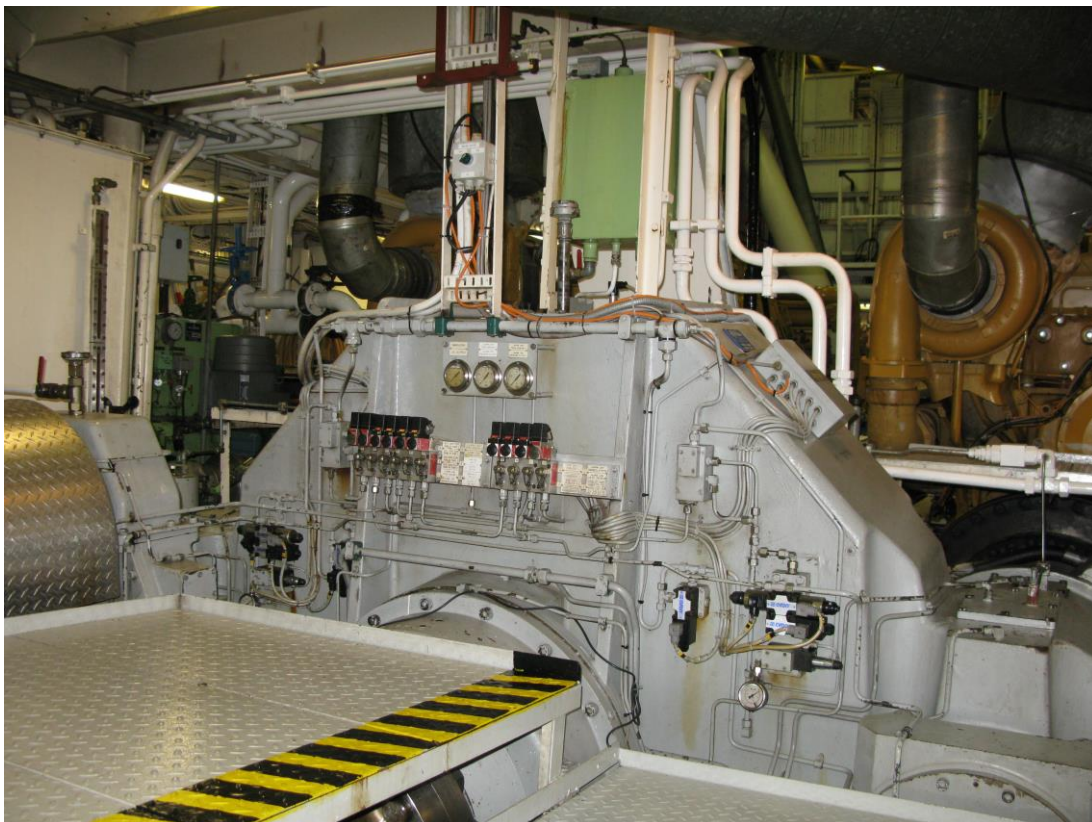
Kannatuslaakerit

Kannatuslaakeri on niin sanotun laakeripukin päällä. Ne ovat yleensä öljyvoideltuja liukulaakereita. Sen tehtävä on nimensä mukaan kannatella akselia ja laakeroida tämä. Laakeripukin sisällä on erillinen öljysäiliö voitelua varten, sekä merivesikierrukka öljyn jäähdyttämistä varten. Akselilla pyörivä rengas nostaa öljyn säiliöstä ylemmälle puolikkaalle, jos kuorman suuruus ja suunta vaihtelevat paljon, öljyn kierrättää erillinen pumppu. Valkometallinen liukupinta riittää olemaan vain alemmalla puolikkaalla, sillä siihen paine kohdistuu. (Häkkinen 1999, 28.)

4.8 Alennusvaihde

Alennusvaihteet ovat hammasvaihteita. Ne ovat luotettavia ja niillä on erittäin hyvä hyötysuhde. Niiden valmistuskustannukset ovat kohtuulliset. Aiemmin luotettavuus aiheutti ongelmia niiden tuotannon takia sekä kuormitustasojen väärin arvioimisen takia. Laivoilla käytettävät vaihteet voidaan jakaa neljään: yksitievaihteet, monitievaihteet, usealla nopeudella varustetut vaihteet ja apukäyttöjen vaihteet. (Häkkinen 1999, 62.)

Kuva 20. Alennusvaihde (Tuomas Raumanen 2018)



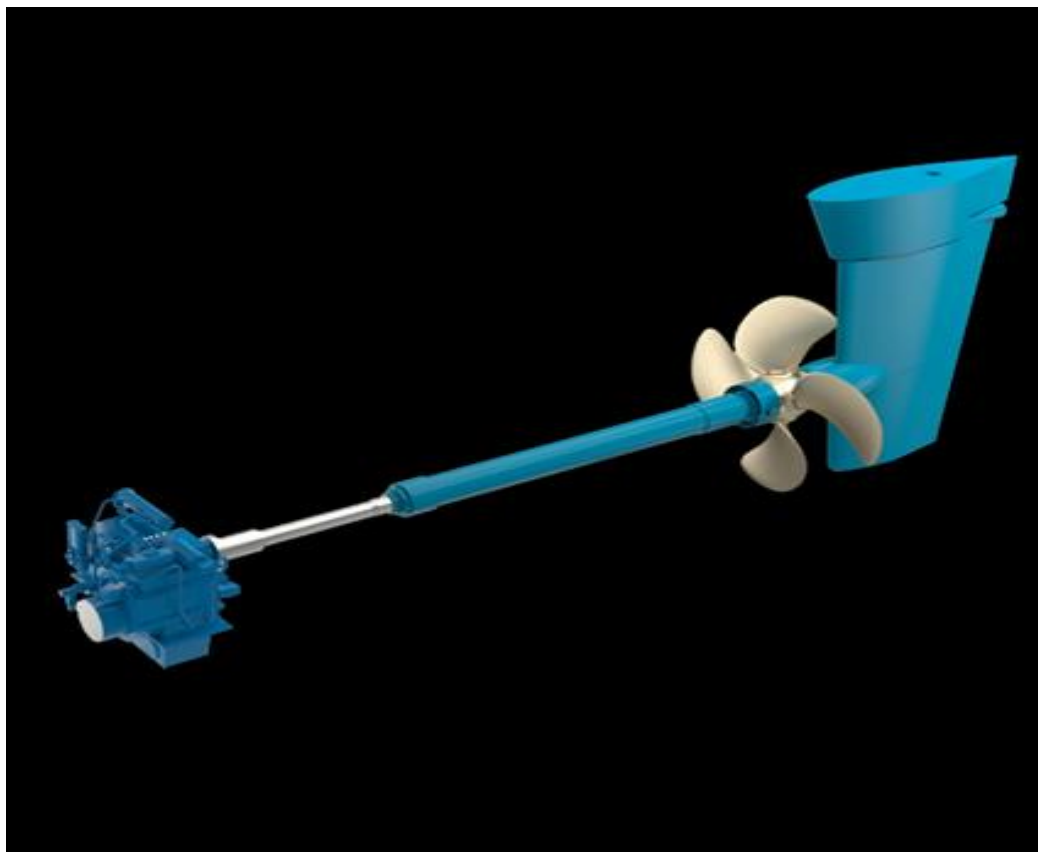
Yksitievaihteissa yksi hammaspyörä on rynnössä vain yhden pyörän kanssa. Kun taas monitievaihteissa yksi hammaspyörä voi olla rynnössä yhden tai useamman pyörän kanssa. Usealla nopeudella olevat vaihteistot ovat harvinaisempia ja niitä asennetaan harvoin. Niitä käytetään kiinteälapaisen potkurin omaavien alusten kanssa, jotta saadaan akselin pyörimissuuntaa muutettua (peruutus). Apukäyttöisiä vaihteita käytetään, kun moottorin tuoma teho halutaan jakaa potkuriakselin lisäksi myös erilliselle akselille, kuten akseligenaattorille. (Häkkinen 1999, 62-65.)

5 PROPULSIORATKAISUJA

5.1 Kiinteälapainen potkuri

Potkurin lavat ovat kiinteät ja pysyvät samassa kulmassa. Peruuttamiseen tarvitaan vaihdelaatikko, joka muuttaa potkuriakselin pyörimissuuntaa. Teho on suoraan verrannollinen koneen pyörimisnopeuteen. Kiinteälapaisia potkureita käytetään nykyään pääosin veneissä ja pienissä aluksissa. Akseligeneraattorin käyttö on mahdotonta ilman tasaista akselin pyörimisnopeutta, tällöin kiinteälapaisella potkurilla varustetuissa aluksissa tätä ei voida soveltaa. (Häkkinen 1999, 30-31.)

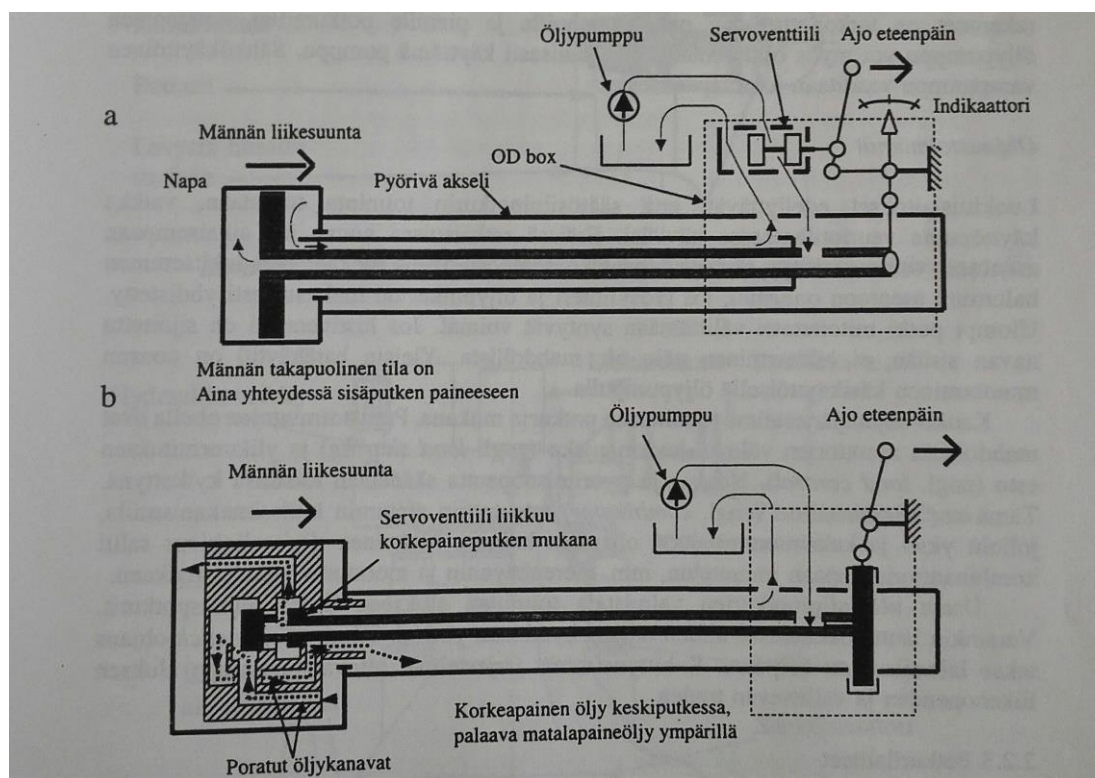
5.2 Säätlapapotkuri



Kuva 21. Säätlapapotkuri (Wärtsilän www-sivut 2018)

Potkurin lavat ovat napaan istutettuja, irrallisia ja kääntyviä. Sääto tapahtuu kombinaattorikäyrän mukaan, joka on ennalta ohjelmoitu. Lapojen ohjaaminen toimii yleisesti hydraulikalla. (Matusiak & Kanerva 2000, 8-10.)

”Potkurin navassa on hydraulisylinteri, jonka mäntä siirtää sen eri puolilla olevan öljyn paine-erolla. Öljyn tuloa ja poistoa työsylinterin eri puolille ohjaa männänvarren sisässä oleva luisti. Luistin siirtäminen saa männän liikkumaan, kunnes luisti on taas palautunut nolla-asentoon. Männän liike välittyy mekanismin kautta siipien nousun muutokseksi. Tappia ja uraa käyttävät eri muodoissa mm. KaMeWa ja LIPS. Työntömekanismia käyttää Escher Wyss.” (Häkkinen 1999, 35.)



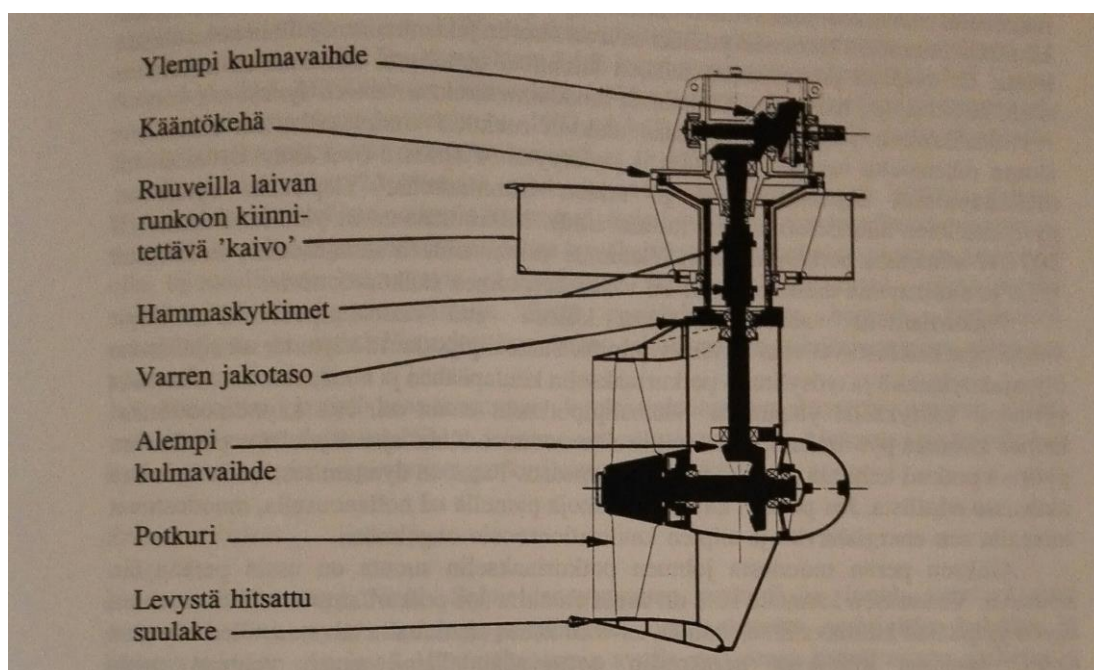
Kuva 22. Säätolapapotkurin hydraulikan toiminta (Häkkinen 1999, 35)

Säätolapapotkurissa tehon jako tapahtuu koneiden ja lapakulmien avulla. Akseligeneraattorin kannalta hyvä ratkaisu, koska akseli pyörii aina samaa nopeutta. Peruu- tus tapahtuu lapakulmia säättämällä, joka ei ole niin tehokas kuin esimerkiksi kiinteäl- paisessa potkurissa. (Häkkinen 1999, 33.)

Säätölapapotkuri on välttämätön, kun halutaan jakaa teho usealta koneelta samalle akselille. Koneen päässä on alennusvaihde, tähän vaihteistoon voidaan liittää useampi moottori. Alennusvaihde siirtää tehon koneilta potkuriakselille. (Häkkinen 1999, 33.)

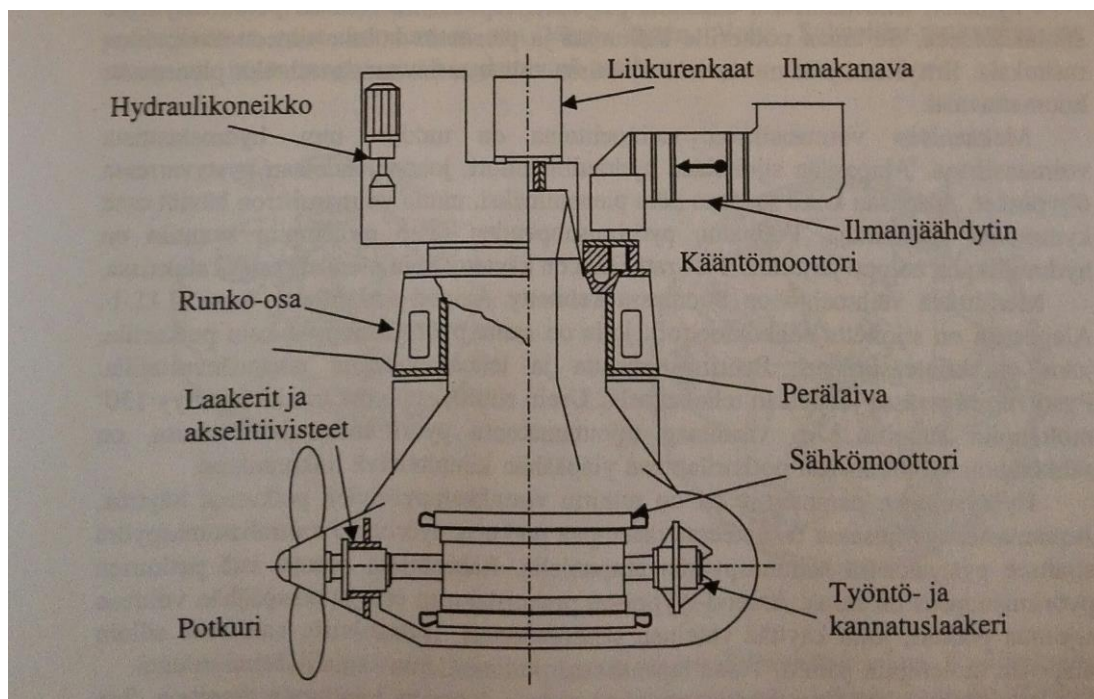
Sen hyötysuhde on 2-4% huonompi, kuin kiinteälapaisen. Säätölapapotkuria alettiin käyttää paljolti rahtilaivoissa, kun niiden hinta saatiin alas hyvän kehitystyön ansiosta. (Häkkinen 1999, 33.)

5.3 Kääntyvä potkurilaite



Kuva 23. Kääntyvän potkurilaitteen rakenne (Häkkinen 1999, 37.)

Kääntyvä potkurilaite on ruoripotkuri, joka pyörii 360 astetta, jolloin erillistä ruoria ei tarvita. Sen voimantuotantoon käytetään diesel tai dieselsähkö menetelmää, jolloin moottorilta voima siirretään akselin avulla joko sähkömoottorilta tai suoraan dieselmoottorilta. Ylhäällä oleva kulmavaihde siirtää voiman alas akselilta alemmalle kulmavaihteelle, joka kääntää taas voiman potkurille. (Häkkinen 1999, 36-38.)



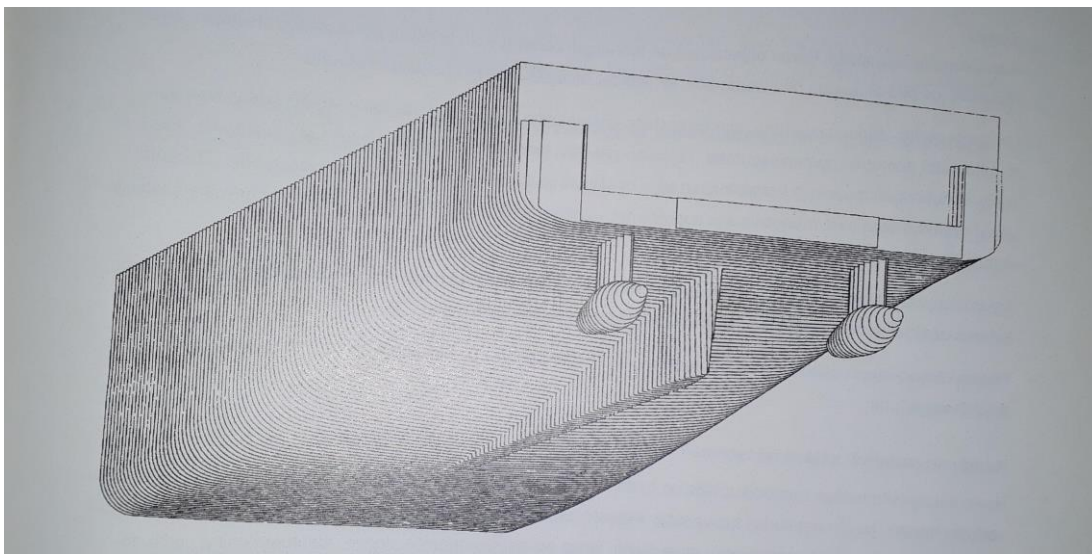
Kuva 24. Pod mallisen potkurilaitteen rakenne (Häkkinen 1999, 37.)

Pod mallisessa potkurilaitteessa sähkömoottori on potkurin navassa eli veden alla. Kun koneikolle ei tarvita erillistä tilaa säästetään tilaa laivan sisätiloissa. Muuten laitteisto toimii käytännössä samalla tavalla kuin perinteinen kääntyvä potkurilaitte. Ohjailtavuus on erittäin monipuolista ja yksinkertaista. (Häkkinen 1999, 36-38.)

Hyvin suunnitellun vetävän potkurilaitteen paremmuus työntävään nähden korostuu nopeuden kasvaessa. Se on hydrodynamiikaltaan parempi vaihtoehto. Potkuri, joka on sioitettu podin etuosaan, kiihdyttää virtausta, jonka seurauksena paine alenee pyrähdysymmetrisen osan etupuolella. Tämä pienentää laitteen hydrodynaamista vastusta. Työntävä laite on parempi, jos podia ei ole suunniteltu tarpeeksi virtaviivaisen muotoiseksi. (Matusiak & Kanerva 2000, 8-20.)

Kääntyviä potkurilaitteita tarvitaan erityisesti hinaajissa ja off-shore käytössä, joissa ohjailtavuus on kriittisen tärkeää. Nopeat suunnan muutokset sekä liikkuvuus mihin suuntaan tahansa on 360 astetta pyörivällä potkurilaitteistolla mahdollista ja helppoa.

Kääntyvän potkurilaitteen käyttö mahdollistaa myös laivan perän suunnittelemisen eri tavalla kuin tavallisella potkurilla varustettavan laivan. Potkuriakselien pituudesta eikä peräsimestä tarvitse huolehtia. Toisaalta ruoripotkurin tilavuus on tavanomaista potkurijärjestelmää suurempi ja jakautuu lyhyelle alueelle virtauksen suunnassa. Tästä seuraa ylimääräistä virtauksen vastusta ja potkurin kuormitusta, joka aiheuttaa propulsiohyötysuhteen alenemista. (Matusiak & Kanerva 2000, 8-20.)



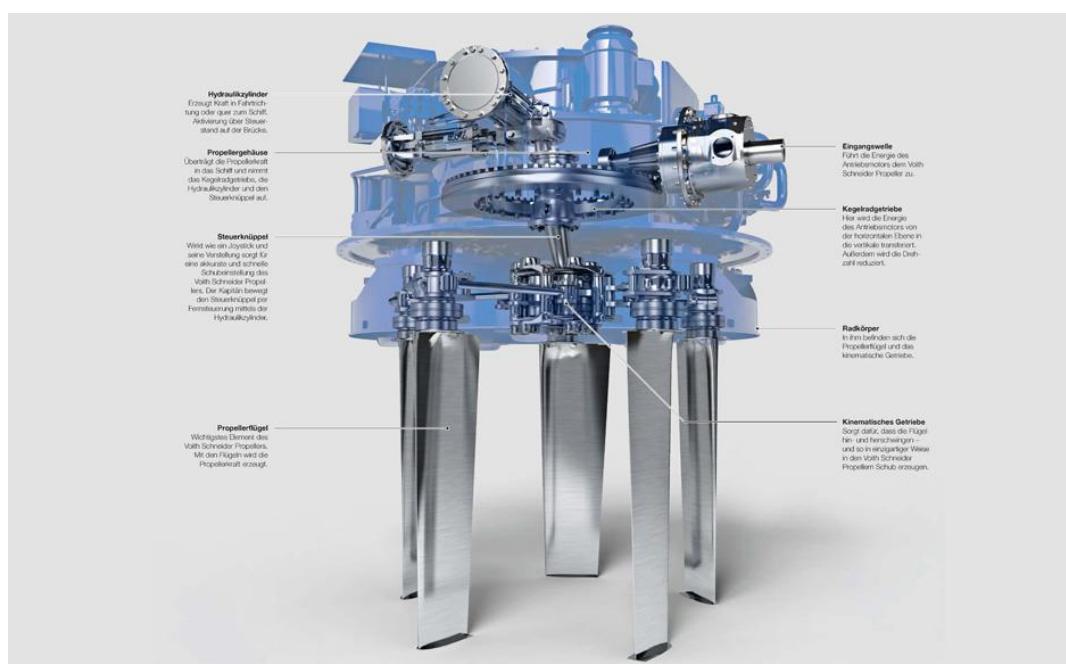
Kuva 25. Ruoripotkurille optimaalinen rungon muoto (Matusiak & Kanerva 2000, 8-19).

Ruoripotkurilaitte voidaan suunnitella asennettavaksi niin, että perää pitkin nouseva virtaus kohtaa propulsiotason kohtisuorassa linjassa. Podin potkuriakselin kulma tulisi olla noin 30-50 % rungon vastaavasta vertikaalikulmasta. Vaakasuuntaus tulisi myös kohdistaa kohti virtausta, johtoreunan arvon tulisi olla noin 1-3 astetta ulospäin keski- viivaan nähden. Näin potkuvirran suunta on todelliseen virtaukseen päin, mikä on harvoin mahdollista tavanomaisella potkurijärjestelyllä. Näin mahdollistetaan potkurin suunnittelulle enemmän vapauksia, koska virtauskulma on optimaalinen. Tuloksena saadaan paremmat kavitaatio-ominaisuudet sekä parempi propulsiohyötysuhde.

Tavanomaisen kaksipotkurisen laivan potkurin aiheuttaman värähtelyn ja melun suurin aiheuttaja on potkurin tuenta. Akselit ja pukit aiheuttavat virtauksen paikallisia hidastumia, jotka näkyvät vanavedessä. Ja koska vanaveden epähomogeenisuus synnyttää kavitaation nopeaa vaihtelua, joka puolestaan aiheuttaa melu- ja värähtelyongelmia. Tästä syystä ruoripotkurilla varustettu alus tuottaa vähemmän edellä mainittuja ongelmia.

Vetävällä ruoripotkurilaitteella varustetun aluksen potkuri kohtaa ainoastaan rungon aiheuttaman virtauksen hidastuman, joka on yleensä hyvin pientä ja näin ollen synnyttää harvoin kavitaatio- ja värähtelyongelmia. Näin ollen aluksen rungon ja potkurin kärjen välilyös voidaan minimoida ja kasvattaa potkurin halkaisijaa. Toisaalta, kuten edellä on mainittu, niin vetävän laitteen podin muotoilu, on oltava onnistunut. (Matusiak & Kanerva 2000, 8-19.)

5.4 Vertical axis propeller



Kuva 26. Voith Schneider. (Voithin www-sivut 2018)

Potkurilavat ovat pystysuuntaiset ja ne on laakeroitu pyörivään kehään. Työnnön suuntaa ohjataan vipumekanismilla, jolla päätetään missä pyörimisvaiheessa lapa kääntyy. Tällä vipumekanismilla muutetaan kääntymisen vaihetta. Voith Schneide- rissa on erittäin tehokas ohjailtavuus, jonka vuoksi niitä on yleisesti käytetty hinaajissa. Kääntyvät potkurilaitteet ovat osaltaan syrjäyttäneet sen, sen kalliin hinnan ja huonon hyötysuhteen vuoksi. (Häkkinen 1999, 39.)

5.5 Vesisuihkupropulsio



Kuva 27. Vesisuihkupropulsio. (Hamilton jetin www-sivut 2018)

Vesisuihkupropulsiossa potkuri, joka toimii pumppuna, on tunnelissa vesilinjan yläpuolella. Se tekee kovan imuvoiman ja imee vettä suihkuttaen sen kovalla paineella ulos tunnelin toisesta päästä. Potkuri on tehty korroosioon vaikuttamattomilla metalliyhdisteillä. Tunneli voi olla pinnoitettu, jotta kavitaatio ja korrosio ei syövyttäisi sitä. Potkurin lavat ovat terävät, jotta se silppuaisi puun kappaleet ja muut pienet vedessä olevat partikkelit vahingoittamasta laitteistoa. (Häkkinen 1999, 40.)

Kuva 28. Vesisuihkupropulsio. (Hamilton jetin www-sivut 2018)



Ohjaus tapahtuu suihkun suuntaa muuttamalla. Tunnelin perässä on suulake, joka liikkuu sivusuunnassa, jolloin työntön suuntaa voidaan muuttaa. Peruutukselle on ”kauha”, joka lasketaan vesisuihkun eteen. Tämä muuttaa suihkun suuntaa päinvastaiseen suuntaan. (Häkkinen 1999, 40.)

Vesisuihkupropulsio on erittäin hyvä nopeakulkuisissa aluksissa. Pienissä aluksissa se toimii kustannustehokkaasti, mutta suurissa sen kustannukset nousevat radikaalisti. Se vaatii nopean pyörimisnopeuden, joka lisää polttoaineen kulutusta. (Häkkinen 1999, 40.)

Vesisuihkulaitteen hyötysuhde voidaan laskea samalla tavalla kuin ideaalipropulsorissakin, hyödyntämällä Bernoullin ja liikemäärän yhtälöitä. Laitteen työntövoima saadaan liikemäärän säilymislaista. (Matusiak 2007, 121.)

$$T = m (V_j - V).$$

Missä:

T = Työntövoima.

m = Massavirta.

V_j = Vesisuihkun nopeus.

V = Aluksen nopeus

Veden massavirta suulakkeen kautta saadaan laskettua seuraavasta kaavasta:

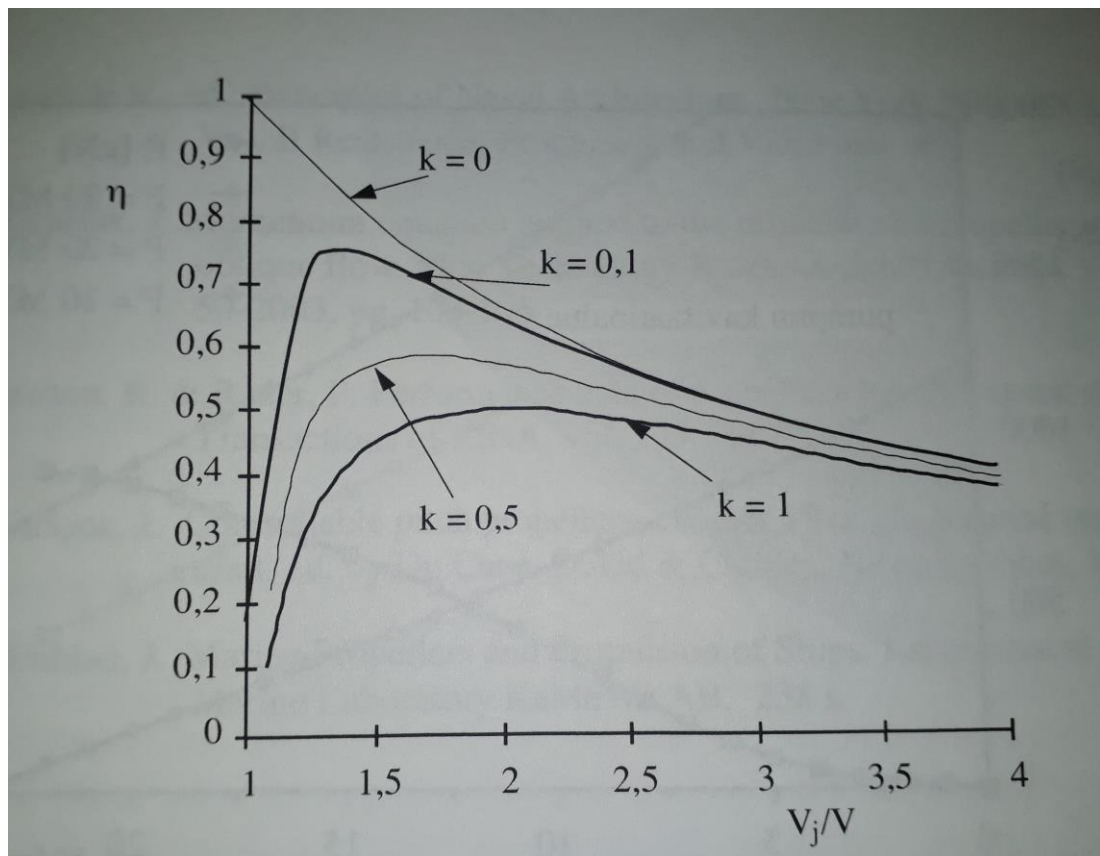
$$m = \rho V_j A_n$$

Missä:

A_n = Suulakkeen poikkipinta-ala.

ρ = Veden tiheys.

Vesisuihkun nopeuden ollessa pieni, on kitkahäviöiden vaikutus hyötysuhteeseen suuri. Vesisuihkun suhteellisen nopeuden ollessa suuri, ei kitkahäviöillä ole suurta merkitystä, sillä hyötysuhde on muutenkin pieni. Saavuttaakseen suuren hyötysuhteen ja työntövoiman, on laitteen ja erityisesti suulakkeen poikkipinta-alan oltava suuri. Imuaukon ja imukanavan suunnittelussa on pyrittävä siihen, että pumpulle tulevan virtauksen nopeus on mahdollisimman korkea ja homogeeninen. Jos pumppu joutuu kehittämään veden virtausnopeuden nolosta suihkunopeuteen, niin laitteen kitkahäviökerroin kasvaa ja hyötysuhdekerroin η_{maks} on korkeintaan 0,5. Jos virtauskenttä imukanavassa on epähomogeeninen, syntyy helposti pumpun kavitaatio-ongelmia. (Matusiak 2007, 123.)



Kuva 29. Vesisuihkulaitteen hyötysuhde suhteellisen nopeuden funktiona. (Matusiak 2007, 123.)

Kuvassa:

k = Kitkahäviökerroin.

η = Hyötysuhdekerroin.

Vesisuihkupropulsio ei sovellu hitaille uppouma-aluksille. Jos hitailla aluksilla, jossa vaaditaan suurta työntövoimaa ja halutaan saavuttaa yhtä suuri hyötysuhteen arvo, kuin potkurilla varustetussa aluksessa, niin vesisuihkulaitteen koon pitää olla erittäin suuri.

Vesisuihkupropulsioon hyviä puolia ovat:

- Hyvät ohjailuominaisuudet
- Sopii hyvin aluksiin, joilta vaaditaan pienempää syväyttä.
- Hiljaisempi kuin potkuri.

Huonoja puolia:

- Soveltuu vain nopeakulkuisiin aluksiin.
- Laitteisto vaatii paljon tilaa.

5.6 RIM Propeller

Toiminta perustuu samaan kuin sähkömoottori. Roottori, johon on suoraan kiinnitetty potkurin lavat, pyörii staattorin sisällä sähköisen magneetin voimalla. Tämä ratkaisu on hyvä pienissä hidaskulkuisissa aluksissa, sillä nopeutta näillä ei saada tuotettua tarpeeksi.

Voith Inline Thruster and Voith Inline Propulsor for Yachts



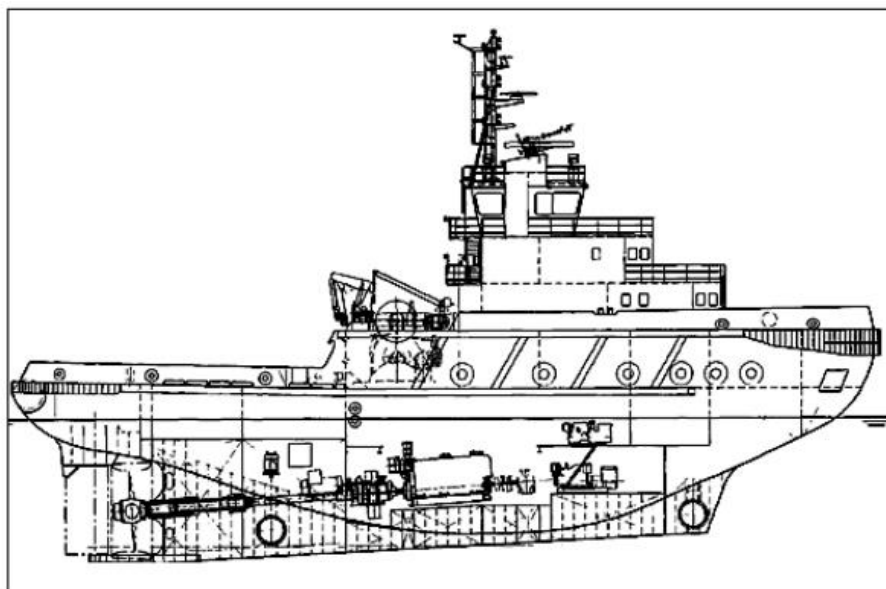
Kuva 30. RIM Propeller. (Voithin www-sivut 2018.)

Keulapotkurina RIM potkuri toimii hyvin, sillä se ei ylikuumene herkästi, sillä moottori, joka pyörittää potkuria on veden alla. Tällöin jäähtytys itsessään tapahtuu itsenäisesti. Ohjailukyky on hyvä ja huolto on vähäistä, sillä voitelu tapahtuu vedellä, jolloin tiivisteitä ei ole samalla tavalla kuin öljy voideltussa. (Voithin www-sivut 2018)

6 AHT ZEUS OF FINLAND

6.1 Yleistä

Esimerkkinä tarkastelemme keskikokoisen offshore-hinaajan säätölapapotkurin toimintaa. Kyseessä on Alfons Hakans- varustamon AHT (Anchor Handler Tug) Zeus of Finland. Alus on rakennettu vuonna 1995, Simekin telakalla, Flekkefjordissa, Norjassa. Aluksen alkuperäinen nimi on Zeus, ja tästä eteenpäin tekstissä käytetään nimeä Zeus.



ZEUS OF FINLAND

Classification DNV-GL + 1A1, TUG, E0, Ice 1A Super + Fi-Fi class 1

DIMENSIONS

LOA 45,10 m
LBP 39,28 m LPP
Breadth moduled 14,00 m
Draft to cwl 7,77 m Draft max.
GT 1012
NT 331
Deadweight 510 tons

PERFORMANCES

Bollard pull 101 tons
Speed 15 knots

DECK LAYOUT

Towing hook Mampaey disc type 100 tons SWL
Towing winch Ulstein Brattvaag SL 100
Pulling power 100 tons on first layer
Towing cable 64 mm 850 m 269 MBL - wire
Towing spare wire 64 mm 900 m SWL 274 MBL
Deck crane Effer 44000-5S 15 tons / 2,5m - 1,25 tons / 15,5m
Fast rescue boat First class DSB

PROPULSION SYSTEM

Main engine 2 x CAT 3608 MCR
Total power: 5420 kW (7370 bhp)

Kuva 31. Zeus of Finland. (Alfons Hakansin www-sivut, 2018)



Kuva 32. Zeus telakka-altaassa 2018. (Zeuksen henkilökunta.)

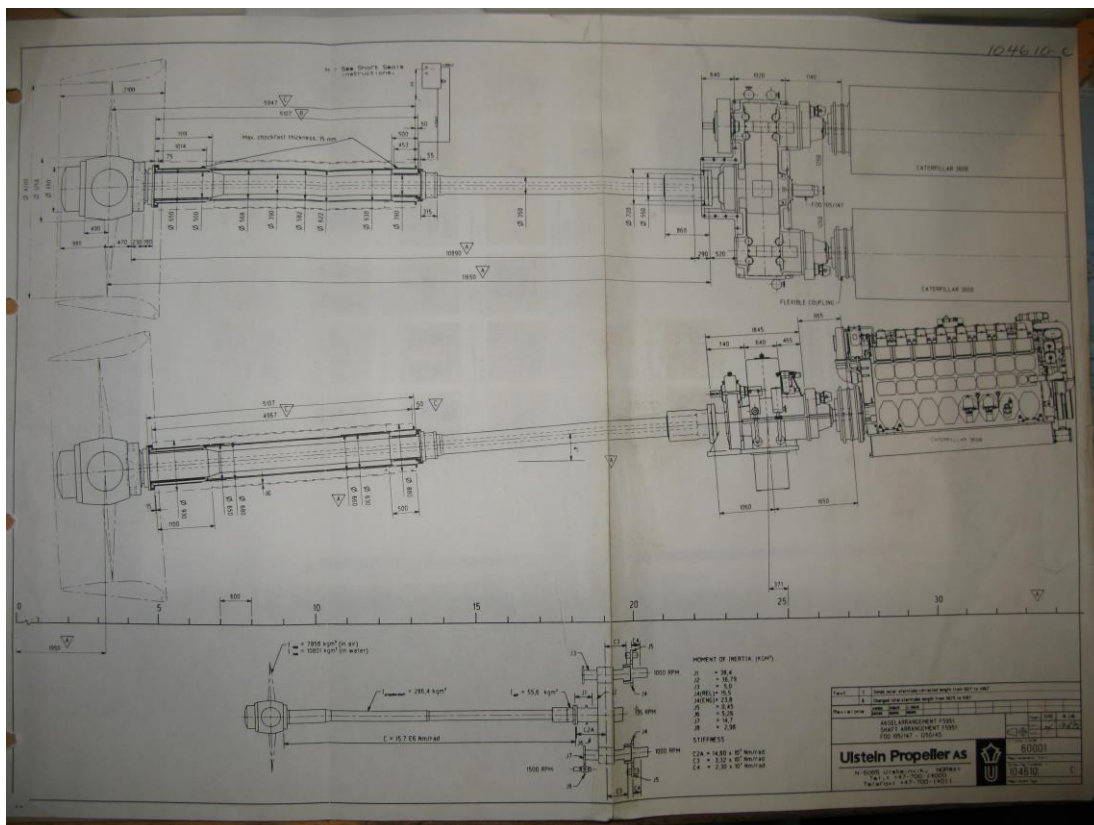
Zeuksen liikennealue on maailmanlaajuinen, mutta pääasiassa sillä tehdään töitä avovesiaikana pohjanmeren ja irlanninmeren öljykentillä ja talvikautena sitä käytetään jäänmurrossa Suomessa. Talvimerenkulku aiheuttaa oman haasteensa propulsiojärjestelmän teknisten ratkaisujen kestävyudessa. Zeuksen jääluokka on Suomalais-Ruotsalaisen jääluokkasäännösten FSICR:n (Finnish-Swedish Ice Class Rules) paras mahdollinen eli 1 A Super.

Jääluokkasäännöissä määritellään aluksen potkurille ja sen koneistolle tietyt minimiarvot, kuten potkurin lapojen taivutusmomentille jäissä ajettaessa. Tässä opinnäytetyössä ei jääluokitukseen kuitenkaan kiinnitetä huomiota tämän enempää.

Zeus on varustettu kahdella pääkoneella, joilta kytkimien ja alennusvaihteen kautta jaetaan voima potkuriakselille ja pyörimisliikkeen vuoksi potkuri tuottaa työntövoimaa. Esimerkiksi jäänmurrossa, on aluksen molemmat pääkoneet käynnissä ja kytkettyinä alennusvaihteeseen, toisaalta taas siirtoajoissa avovedessä voidaan käyttää vain toista pääkonetta matalammilla kierroksilla, jolloin saavutetaan parempi polttoainetalous.

6.2 Zeuksen potkurin lapakulmien säätö

Alus on varustettu säätölapapotkurilla (Controllable Pitch Propeller), jolloin potkurin kierrosnopeus pidetään vakiona ja työntövoimaa muutetaan potkurin lapakulmilla. Tämä vakiokierrosnopeus mahdollistaa myös vaihdelaatikkoon kytketyn akseligeneraattorin käyttämisen, jolloin on oleellista sähköverkon taajuuden kannalta säilyttää sama kierrosnopeus. Ajettaessa taloudellisesti voidaan pääkoneiden ohjailu vaihtaa ns. kombinaattorimoodiin, jolloin potkurin ja pääkoneiden ohjausjärjestelmät ohjaavat kierroslukua sekä potkurin lapakulmia ohjelmoitujen arvojen perusteella. Tämä tietysti tarkoittaa myös sitä, että sähköön tuotantoa ei voida enää suorittaa akseligeneraattorilla.



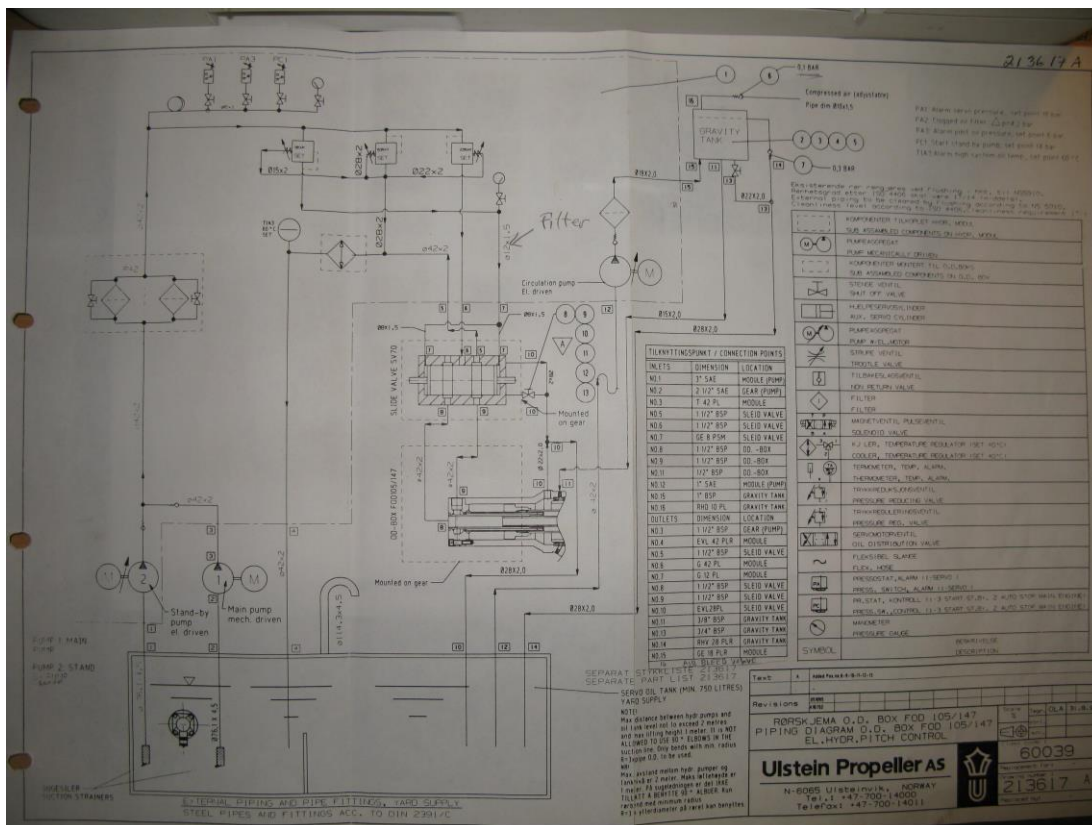
Kuva 33. Piirros Zeuksen potkuriakselilinjasta (Alkuperäisestä Ulsteinin piirroksesta kuvan ottanut Tuomas Raumanen.)

Zeuksessa potkurin lapakulmien säätö tapahtuu hydraulisesti. Erillisellä hydrauliko-neikolla, joka sisältää kaksi sähkökäyttöistä pumppua, tehdään tarvittava öljynpaine hydraulijärjestelmään. Vain yhtä pumppua käytetään ajossa, toinen on varalla.

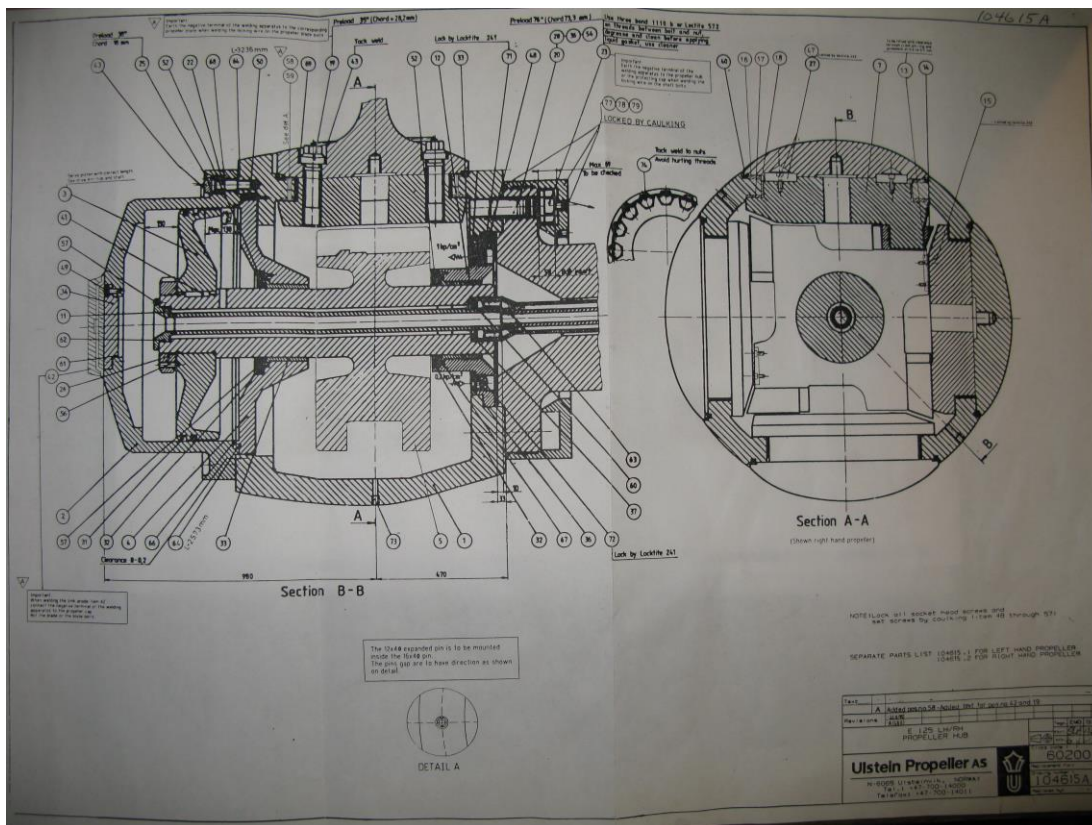


Kuva 34. Zeuksen säätölapapotkurin hydraulikkakoneikko. (Tuomas Raumanen 2018)

Paineinen hydraulioöljy johdetaan putkistoa pitkin OD-boxille (Oil Distribution box), joka ohjaa ontossa potkuriakselissa kulkevaa pikkuakselia. OD-Boxissa oleva mekanismi liikuttaa hydraulikkapaineen avulla pikkuakselia aksiaalisesti eteen ja taakse. Pikkuakselin toinen pää on yhdistetty potkurin navassa olevaan mekanismiin, jossa akselin liikkeet eteen ja taakse aiheuttavat potkurin lapakulmien muutoksen. Eli kun esimerkiksi komentosillalla lapakulmien säätökahvaa säädetään kohtaan 40% eteenpäin, tulee sieltä sähköisesti viesti säätölapapotkurin ohjausjärjestelmään, joka puolestaan lähettää pyynnön OD-Boxin servoventtiilille ohjata hydraulikkaöljyn painetta Boxille niin, että potkurin lavat liikkuvat. Kun ohjausjärjestelmä saa ”palautteen” lapakulmien halutusta asennosta, pitää järjestelmä lapakulman siinä, kunnes säätökahvan asentoa muutetaan.



Kuva 35. Zeuksen CPP-järjestelmän piirustus. (Alkuperäisestä Ulsteinin piirustuksesta kuvan ottanut Tuomas Raumanen).



Kuva 36. Piirustus Zeuksen säätölapapapotkurin navasta. (Alkuperäisestä Ulsteinin piirustuksesta kuvan ottanut Tuomas Raumanen 2018).



Kuva 37. Zeuksen OD-Boxin purkua. (Tuomas Raumanen 2015.)

7 LOPPUYHTEENVETO

Lopuksi voimme todeta propulsiojärjestemien kehittyneen paljon siitä hetkestä, kun John Ericsson vuonna 1836 testasi rataspotkurilla varustettua puulaivaansa. Ja kuinka airojen, purjeiden ja siipirattaiden kautta on tultu tähän hetkeen, jossa pystytään jatkuvasti kehittämään uusia ratkaisuja tehokkaampien, taloudellisempien ja ympäristöystävällisempien propulsiojärjestelmien luomisessa. Monissa maissa tehdään kovasti töitä sen eteen, miten pystytään suunnittelemaan entistä vähemmän kavitoivia potku-reita ja aluksia, pääasiassa sotateollisuuteen, mutta varmasti näistä tutkimuksista saatava hyöty kohtaa myös kauppa-alukset.

Alati kehittyvien tiedonkeruu- ja tietokonejärjestelmien avulla pystytään tehokkaammin mallintamaan sekä karsimaan jo suunnitteluvaiheessa mahdollisia ongelmakohtia. Myös kerättävä data ja kokemus, myös huonoista ratkaisuista laivanrakennuksesta helpottaa tulevaisuuden suunnittelijoita.

Työssämme työn jako on tapahtunut seuraavasti. Elmeri Laukkanen on tehnyt kappaleet 1,4 ja 5. Ville Risunen on tehnyt kappaleet 2,3,6 ja 7. Työn läpikäynti ja materiaalin kasaus on tehty yhdessä.

LÄHTEET

Alfons Hakansin www-sivut 2018. Viitattu 27.11.2018. <http://www.alfonshakans.fi>

Carlton, J. 2012. Marine proppellers and propulsion. Third edition. Oxford. Butterworth-Heinemann.

Graham, I. 2016. 50 laivaa, jotka muuttivat historian kulun. Suomentanut Talvitie Jyrki, K. Helsinki. Kustannus Oy Minerva.

Helle, E. 1937. Laivanrakennus. Teoksessa V. Airas (toim.) Vesirakennus, laiva- ja ilmaliikenne. Porvoo. Werner Söderström Osakeyhtiö.

Häkkinen, P. 1999. Laivan koneistot. Helsinki. Teknillinen korkeakoulu. Konetekniikan osasto.

Kujanen, H. & Kero, R. 1989. Kivikirveestä tietotekniikkaan. Tekniikan sosiaalishistoriaa kivikaudesta nykypäivään. Turku. Turun yliopiston historian laitos.

Landels, J. G. 1985. Antiikin insinööritaito. Suomentanut Hirvonen, Kaarle. Helsinki. Insinööritieto Oy.

Landström, B. 1990. Laiva: katsaus laivan historiaan alkukantaisesta lautasta atomikäyttöiseen sukellusveneeseen. Suomentanut Martti Vuorenjuuri. 6.painos. Helsinki. Otava.

Liikenteen turvallisuusviraston määräys koskien alusten runkorakenteita. TRAFI/9321/03.04.01.00/2013. <https://www.finlex.fi>

Matusiak, J. 2007. Laivan propulsio. 7. painos Espoo. Teknillinen korkeakoulu. Laivalaboratorio.

Matusiak, J. & Kanerva, M. 2000. Potkuri. Teoksessa P. Räisänen (toim.) Laivatekniikka. 2. painos. Jyväskylä. Gummerus kirjapaino Oy.

Vettä ei tarvitse kantaa, jos sitä pumppaa. 2015. Tieteen kuvalehti historia. Bonnier publications Oy.

Voithin www-sivut 2018. Viitattu 20.11.2018. <http://www.voith.com>

