

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

**MERIVOIMIEN APUALUKSEN PROPULSIOJÄRJESTELMÄ JA SEN
KEHITYSMAHDOLLISUUDET**

Pro gradu -tutkielma

Kadetti
Toni Arosuvi

Merikadettikurssi 73
Tekninen linja

Maaliskuu 2007

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Merikadettikurssi 73	Linja Tekninen linja
Tekijä Kadetti Toni Arosuvi	
Tutkielman nimi Merivoimien apualuksen propulsiojärjestelmä ja sen kehitysmahdollisuudet	
Oppiaine johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka Kurssikirjasto (MPKK:n kirjasto)
Aika Maaliskuu 2007	Tekstisivuja 69 Liitesivuja 4

TIIVISTELMÄ

Suomen merivoimien aluskalustoon kuuluu taistelualuksia ja apualuksia. Apualukset ovat välttämättömiä huollon ja kuljetusten välineitä, minkä vuoksi niiltä edellytetään ympärivuotista, luotettavaa ja taloudellista suorituskykyä. Apualusten suorituskykyyn vaikuttaa olennaisesti niiden propulsiojärjestelmä.

Apualuksen propulsiojärjestelmälle merivoimat eivät ole asettaneet erityisvaatimuksia. Järjestelmävalinnat ja tehojen kartoittaminen on tehty aluskohtaisesti uutta alusta suunniteltaessa. Nykyisten apualusten propulsiojärjestelmissä epäillään olevan puutteita tehon ja järjestelmävalintojen osalta. Tämä tutkielma selvittää apualuksen propulsiolle asetettavat vaatimukset ja esittelee järjestelmän mitoittamiseen käytettävät laskukaavat. Tutkielma ottaa myös kantaa apualuksen propulsiojärjestelmän valintaan sekä järjestelmän ominaisuuksiin. Esimerkkeinä on käytetty Valas- ja Pansio-luokan aluksia, joiden järjestelmiin esitetään kehitysehdotuksia.

Tutkielma rakentuu apualusten ja propulsiojärjestelmien perusteille. Apualusten perusteissa etsitään propulsorin valintaan vaikuttavia seikkoja. Propulsiota tarkastellaan laitevalintojen ja mitoituksen kannalta. Nämä perusteet yhdistämällä saadaan vaatimukset apualuksen propulsorille, jonka osien valintaa ja mitoitusta tarkastellaan tutkimuksen loppupuolella.

Tutkielman pääongelma on: Millainen on ihanteellinen propulsiojärjestelmä nykypäivän apualukselle? Tutkielma pyrkii hahmottamaan lukijalle, mitä asioita tulee ottaa huomioon suunniteltaessa apualuksen propulsiota. Tutkielman aineistona ovat olleet propulsiota ja hydrodynamikkaa käsittelevät teokset, propulsiojärjestelmän

osia koskevat teokset sekä merivoimien aiheeseen liittyvät oppaat ja ohjeet. Tutkielmassa on käytetty kolmea tutkimusmenetelmää: kirjallisuusselvitystä, matemaattista analyysia sekä vertailua. Tutkimusstrategiana on tapaustutkimus.

Tutkielman teorian ja laskennan tukemana merivoimien apualukselle soveltuu parhaiten perinteinen potkuripropulsiojärjestelmä keskinopealla dieselmoottorilla sekä kiinteälapaisella potkurilla. Järjestelmä on edullinen, luotettava ja taloudellinen. Apulaitteeksi alukselle tulee asentaa keulapotkuri, jonka käyttöjärjestelmistä parhaaksi on todettu dieselsähköinen järjestelmä. Propulsiojärjestelmien tehot ovat nykyisissä aluksissa liian alhaisia. Heräte- ja meluominaisuuksiltaan nykyiset apualukset ovat sopivia tehtäviinsä, mutta alusten äänieristystä voitaisiin kehittää entisestään.

AVAINSANAT

Huoltoalus, kuljetusalus, apualus, propulsio, propulsori, hydrodynamiikka, potkuri

MERIVOIMIEN APUALUKSEN PROPULSIOJÄRJESTELMÄ JA SEN KEHITYSMAHDOLLISUUDET	
1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksesta	1
1.2 Tutkimuksen rajaus ja viitekehys	4
1.3 Tutkimusstrategia, -ongelmat ja -menetelmät	6
1.4 Keskeiset käsitteet	8
1.4.1 Pääkäsitteet	8
1.4.2 Apukäsitteet	9
2. MERIVOIMIEN APUALUKSET	10
2.1 Tehtävät ja vaatimukset	10
2.2 Merivoimien apualukset ja niiden propulsiojärjestelmät	12
2.2.1 Valas-luokka	12
2.2.2 Pansio-luokka	14
2.3 Apualusten tulevaisuus	16
3. PROPULSIO	16
3.1 Yleistä	16
3.2 Propulsion matematiikasta	18
3.3 Ideaalipropulsori	19
3.4 Potkuripropulsiojärjestelmän esittely	21
3.4.1 Pääkone	21
3.4.2 Alennusvaihde	23
3.4.3 Joustava kytkin	24
3.4.4 Potkuriakseli	25
3.4.5 Potkuri	27
3.4.6 Keulapotkuri	29
3.5 Potkuripropulsiojärjestelmän ominaisuuksista	31
3.5.1 Tehot ja hyötysuhteet	31
3.5.2 Potkuri	36
3.5.3 Melu, heräte ja kavitaatio	38
3.5.4 Keulapotkurin mitoitus	41
3.6 Propulsion tulevaisuus	43

4. APUALUKSEN PROPULSIOJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN	44
4.1 Järjestelmävalinnat	45
4.1.1 Pääkoneisto ja potkurityyppi	45
4.1.2 Keulapotkurijärjestelmä	48
4.2 Koneiden tehontuotto	51
4.2.1 Pääkoneet	51
4.2.2 Keulapotkuri	56
4.3 Melun vaimennus ja herätteen pienentäminen	59
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	64
LÄHTEET	70
LIITTEET	75

MERIVOIMIEN APUALUKSEN PROPULSIOJÄRJESTELMÄ JA SEN KEHITYSMAHDOLLISUUDET

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksesta

Suomen valtion rajasta runsas kolmannes muodostuu merirajasta. Suomen meriraja sijoittuu Etelä- ja Länsi-Suomen edustalle, missä sijaitsee myös suurin osa Suomen asutuksesta, elinkeinoelämästä ja hallinnosta. Merirajan valvonnasta ja merialueen puolustuksesta vastaa Suomen merivoimat. Merivoimien tehtävänä on merialueemme valvonta ja sen koskemattomuuden turvaaminen, alueloukkausten torjunta sekä maallemme elintärkeiden meriyhteyksien ja meriliikenteen suojaaminen [33]. Merivoimat suorittavat tehtävänsä laivasto- ja rannikkojoukoin, joissa tärkeintä kalustoa ovat sota-alukset sekä kiinteä ja liikkuva rannikkotyöstö.

Toiminnallisten lähtökohtien ja niistä määräytyvien suunnittelun erilaisten painotuksien perusteella voidaan sota-alukset jakaa kahteen pääryhmään: taistelualuksiin ja niitä sekä rannikkopuolustuksen infrastruktuuria tukeviin apualuksiin [38, 41]. Taistelualukset jaetaan edelleen pinta-aluksiin ja sukellusveneisiin, joista jälkimmäisiä ei ole Suomen merivoimissa. Apualukset jaetaan kuljetusaluksiin ja huolto- sekä koulutusaluksiin [28, 41]. Suomen meriyhteyksiä turvataan merimiinoitteilla sekä alussaattotoiminnalla, joka hoidetaan pinta-aluksilla. Myös merisotatoimiin osallistuu merivoimien pinta-aluskalusto.

Apualukset ovat lähempänä tavanomaista laivanrakennusta. Käytettävä tekniikka ja materiaalit, samoin kuin laitteistojen standardit voivat olla yksinkertaisempia ja näin olennaisesti halvempia. Nämä alukset suorittavat kuitenkin välttämättömiä sotilaallisia tehtäviä, joten myös niiltä edellytetään omasuojaa ja taistelunkestävyyttä, joiden taso määräytyy toiminta-alueen vaatimuksista. [38]

Suomen merivoimien apualusten roolin tärkeyden todistaa sotahistoria. Laivueen emälaiva eli huoltoalus oli tärkeä pienten alusten täydennyksen kannalta [42]. Kuljetusaluksia tarvittiin muun muassa jatkosodassa Ahvenanmaan miehittämiseen. Joukkojen kuljetusta varten oli varattu 23 kuljetusalusta, ja suojaustehtävä oli annettu saattajaosastolle. Tilanteen kiristyttyä kesäkuussa 1941 kuormattiin raskas kalusto valmiiksi laivoihin, sillä oli tärkeää päästä mahdollisimman nopeasti Ahvenanmaalle [42]. Apualukset ovat tärkeitä myös evakuointitehtävissä. 19.6.1944 Neuvostoliiton alusosasto suoritti maihinnousun Koiviston lähelle Piisaareen. Tilanne vaati luopumista Koivistosta. Evakuointia varten muodostettiin seitsemän kuljetusryhmää, joissa kussakin oli yksi saksalaisilta saatu lautta, pari hinaajaa ja muutamia moottoriveneitä [42]. Oma aluskalusto ei siis aina välttämättä riitä, joten sen laatu ja luotettavuus on taattava.

Sotalaivakoneistolta edellytetään suuria lyhytaikaisia tehoja ja toisaalta joustavuutta ja taloudellisuutta myös pienillä tehoilla kaikissa käyttöolosuhteissa [38]. Ennen kaikkea koneiston tulee kuitenkin olla luotettava. Myös äänettömyys ja pieni heräte ovat mieleisiä tekijöitä. Apualuksen koneistot pyritään rakentamaan luotettaviksi ja niiden hinta on yleensä halpa, sillä apualusten koneistoille ei aseteta yhtä kovia vaatimuksia kuin taistelualuksille. Taistelualusten koneistot suunnitellaan kestämään taistelutehtävien edellyttämiä seikkoja, kuten nopeita ohjailutoimenpiteitä ja kovaa kuormitusta. Lisäksi niiltä vaaditaan erittäin pientä herätettä. Tämän vuoksi taistelualukset vaativat huipputekniikkaa ja kalliita ratkaisuja.

Tämä työ tutkii merivoimien kahta eri alusluokkaa, jotka rauhan aikana suorittavat erilaisia huolto- ja kuljetustehtäviä. Alusluokat ovat Valas ja Pansio. Näillä aluksilla on käytössä yleinen potkuripropulsio, jonka voimanlähteenä on dieselmoottori, ja siksi työn painopisteenä onkin tarkastella perinteistä potkuripropulsiota. Kampela- ja Kala-luokan kuljetuslautat jätän työssäni käsittelemättä siksi, että ne poikkeavat tutkittavista aluksista huomattavan paljon. Kuljetuslauttojen konetehto on reilusti pienempi, niissä ei ole keulapotkuria ja niiden tuulipinta-ala, kansirakenne ja vakavuus poikkeavat paljon tutkittavista aluksista. Valas- ja Pansio-luokkaa tarkastelen nimenomaan apualuksina. En siis käsittele työssäni miina-aluksiin liittyviä seikkoja.

Valas-luokan alukset ovat palvelleet merivoimissa jo pitkään. Ne rakennettiin 1979 – 1981, ja siitä lähtien aluksilla on ollut erilaisia huolto- ja kuljetustehtäviä lähes päivittäin. Pansio-luokan alukset ovat uudempia. Ne ovat rakennettu vuosina 1990 - 1991. Valas- ja Pansio-luokan alukset voivat vielä palvella vuosia eteenpäin oikeanlaisella huollolla ja korjaustoimenpiteillä. Kuitenkaan alukset eivät kestä ikuisesti, minkä vuoksi ennemmin tai myöhemmin on suunniteltava uutta tekniikkaa, mukavuutta ja käytännöllisyyttä hyödyntävä apualus. Haastattelut ja kyselyt tutkijan aiemmassa tutkimuksessa tukivat teoriaa siitä, että alusten järjestelmät ovat jääneet jälkeen nykypäivästä. Nykyään, tekniikan yhä kehittyessä, huoltoaluksiin saatettaisiin saada edullisesti ominaisuuksiltaan nykyistä parempi propulsiojärjestelmä.

Tämän tutkielman tukena käytetään tutkijan aiemmin tekemää sotatieteiden kandidaatin tutkielmaa ”Valas-luokan keulapotkurin modifioiminen sähköhydrauliseksi”. Tässä työssä selvitettiin, että Valas- ja Pansio-luokan alusten propulsiojärjestelmät ovat todettu tehoiltaan heikoiksi ainakin keulapotkurin osalta. Tämän työn tarkoituksena on selvittää, millaisia propulsiojärjestelmiä merivoimien huoltoaluksilla on ja miten niitä voitaisiin kehittää tulevaisuudessa.

Aiempiä tutkimuksia aiheesta on tehty erittäin vähän. Merivoimien apualuksia käsittelevät tutkimukset eivät tarkastele niitä teknisesti, tai sitten niissä on tutkittu jotain muuta teknistä aihetta kuin propulsiojärjestelmää. Itse propulsiojärjestelmiin liittyviä tutkimuksia löytyy välttävästi siviilioppilaitosten kirjastoista, mutta niiden näkökulma on harvoin sotilaallinen, koska teokset eivät huomioi sota-aluksilta vaadittuja heräte-, kestävyys- ja luotettavuusominaisuuksia. Yleisin aihe propulsiota käsittelevissä tutkimuksissa on polttoainetaloudellisuus. Propulsoreiden valmistajat pitävät omat tutkimuksensa usein luottamuksellisina. Mainittavan arvoinen lähdevalikoima löytyy Kotkan Merikirjastosta, jonka valikoimissa on useita insinööri- ja merikapteenitöitä, joissa käsitellään aluksen propulsiota. Näissäkin yleensä keskitytään jonkin tietyn aluksen propulsiojärjestelmään. Muutamissa teoksissa propulsiojärjestelmää käsitellään kattavasti, mutta niissäkin päädytään lopulta tarkastelemaan joko pääkoneita tai potkureita.

Suomen turvallisuus- ja puolustuspoliittinen selonteko (2004) linjaa merivoimien puolustuksen kehittämisen keskeisiksi asioiksi Laivue 2000:n saattamisen operatiiviseen valmiuteen sekä miinantorjuntalaivueen hankkimisen. Merivoimien apualuksien kehitysnäkymiä ei ole vielä mainittu, mutta on melko uskottavaa, että

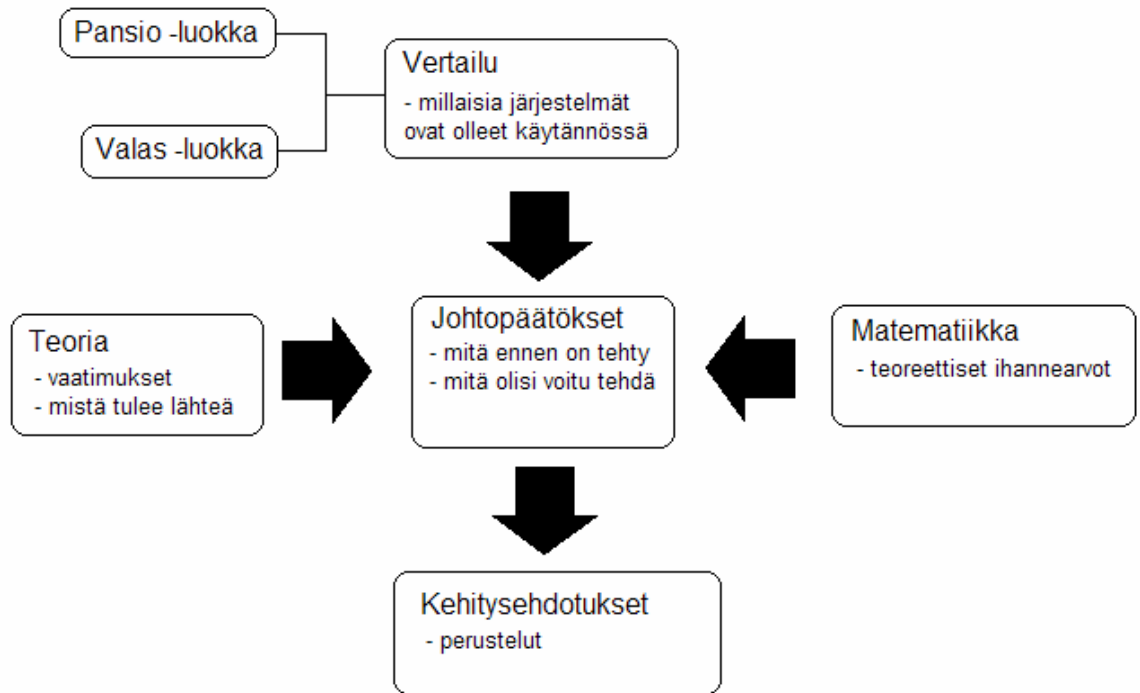
pian aletaan miettiä myös apualusten tilannetta ja käyttökelpoisuutta. Kyseeseen voi tulla tämänhetkisten alusten peruskorjaus tai uusien alusten suunnittelu. Kummassakin tapauksessa tämä tutkimus tulee olemaan hyödyllinen, sillä sen tuloksia voidaan käyttää hyödyksi apualusten ominaisuuksien kehittämisessä.

1.2 Tutkimuksen rajaus ja viitekehys

Tutkimus on rajattu käsittelemään pääasiassa potkuripropulsiota. Apualuksilla tämä koneistoratkaisu on yleisin. Potkuripropulsori on yleisin vaihtoehto myös taistelualuksilla ja kauppalaivoilla. Toinen yleinen propulsori on vesisuihkupropulsio. Tämä propulsori on kuitenkin hyvin harvinainen apualuksilla. Sen käytöstä merivoimien aluksilla on saatu kokemuksia vain ohjusveneiden ja niitä pienempien alusten osalta. POD-propulsio on vielä harvinainen vaihtoehto, mutta se on todettu käytössä lupaavaksi propulsoriksi hyvien ohjailuominaisuuksiensa vuoksi. Merivoimilla ei kuitenkaan ole POD-propulsiosta aluskohtaisia käyttökokemuksia. Näiden seikkojen vuoksi tutkimus ei tarkastele vesisuihku- ja POD –propulsiota yksityiskohtaisesti.

Toisena rajauksena työssä on, että siinä käsitellään esimerkkeinä vain Valas- ja Pansio-luokan aluksia. Kampela- ja Kala-luokan alukset ovat kuljetuslauttoja, minkä vuoksi ne eroavat huomattavasti uppoumarunkoisista kuljetusaluksista. Pienimmät apualukset poikkeavat näistä taas kooltaan. Kaikkien näiden alusluokkien tarkka vertailu keskenään on mahdotonta. Työ tarkastelee näistä vaihtoehdoista vain yleisintä alustyyppiä eli uppoumarunkoista kuljetusalusta.

Esimerkkeinä olevissa alusluokissa on aluskohtaisia eroja. Tutkielmassa ei syvennyttä tarkastelemaan yhtä tiettyä alusta, eikä tämän vuoksi yksittäisiä modifiointeja huomioida. Esimerkeissä käytetään yleisimpiä alusluokkien laitteistoja ja arvoja eli tässä tapauksessa alkuperäisiä koneita ja mittoja, jotka mainitaan telakoiden aluserittelyissä.



Kuva 1: Tutkielman viitekehys

Työ alkaa selvittämällä, millaisia propulsioratkaisuja on ennen tehty merivoimien apualuksille ja mitä etuja ja haittoja niissä on ilmennyt. Työn pohjana on kaksi esimerkkialusluokkaa, joiden tietoja tutkitaan ja verrataan keskenään. Tämä vertailu luo tutkimukselle käytännön näkökulman. Teoriassa asiaa tarkastellaan kahdelta eri alueelta. Ensin otetaan huomioon vaatimukset ja lähtökohdat. Propulsorin vaatimukset ja rakenteen selvitan tukenani propulsiota käsitteleviä teoksia ja tutkimuksia. Apualuksia koskevat vaatimukset selvitetään merivoimien huoltoa käsittelevän kirjallisuuden perusteella. Teoriaa on tuettu haastatteluilla, jotka kertovat myös faktoja, joita ei ole koottu kirjoihin tai tutkittu. Suuremman painoarvon käytännön ja teorian vertailuun antaa matemaattinen tarkastelu, joka selvittää ihanteelliset arvot järjestelmän kokonaistehoista. Myös järjestelmän muiden osien mitoittamiseen käytettäviä kaavoja on esitelty. Matematiikan sovelluksissa käytetään esimerkkeinä Valas- ja Pansio-luokan aluksia. Lopuksi esittelen johtopäätökset. Johtopäätösten avulla voidaan tehdä lopullinen päätös siitä, miten nykyisiä propulsoreita voitaisiin kehittää eri osa-alueilla.

Työssä painottuu teoreettinen puoli etenkin matematiikan avulla. Työssä ei etsitä uutta järjestelmää tietylle alukselle, vaan verrataan nykyisiä propulsioratkaisuja käytännön ja teorian avulla sekä tutkitaan niiden kehittämismahdollisuuksia koko järjestelmän osalta.

1.3 Tutkimusstrategia, -ongelmat ja -menetelmät

Termi tutkimusstrategia tarkoittaa tutkimuksen menetelmällisten ratkaisujen kokonaisuutta [10]. Tutkimusstrategiaa suppeampi käsite on tutkimusmetodi eli tutkimusmenetelmä. Tutkimusstrategian ja tutkimusmenetelmän valinta riippuu tutkimustehtävästä ja tutkimusongelmista. On olemassa kolme perinteistä tutkimusstrategiaa [10]:

- kokeellinen tutkimus, jossa mitataan yhden käsiteltävän muuttujan vaikutusta toiseen muuttujaan.
- survey-tutkimus, jossa kerätään tietoa standardoidussa muodossa joukolta ihmisiä.
- tapaustutkimus (case study), jossa on yksityiskohtaista, intensiivistä tietoa yksittäisestä tapauksesta tai pienestä joukosta toisiinsa suhteessa olevia tapauksia.

Tutkimuksen suuntaus on kvantitatiivinen (määrällinen) tai kvalitatiivinen (laadullinen). Näiden suuntauksien erottaminen toisistaan on joskus vaikeaa. Ne nähdään tutkimuksen toisiaan täydentäviksi lähestymistavoiksi, ei kilpaileviksi suuntauksiksi [10]. Kvantitatiivinen tutkimus on yleisempi sosiaali- ja yhteiskuntatieteissä. Sen lähtökohdat ovat luonnontieteissä, ja sen päämääränä on päätellä asioita tilastolliseen analysointiin perustuen. Keskeisiä piirteitä ovat koejärjestelyt ja koehenkilöt, numeeriset mittaukset sekä taulukot. Kvalitatiivisen tutkimuksen lähtökohtana on kuvata todellista elämää. Siinä todellisuus mielletään moninaiseksi, ja tutkittavaa kohdetta pyritään tutkimaan kokonaisvaltaisesti. Pyrkimyksenä on löytää tai paljastaa tosiasioita sen sijaan, että todennettaisiin jo olemassa olevia asioita.

Teknisen tutkimuksen yhdistäminen tieteelliseen tutkimukseen on vaikeaa. Tekninen ja matemaattis-luonnontieteellinen tutkimus ovat menetelmiltään usein lähellä toisiaan [21]. Ne ovat kuitenkin menetelmiltään eroavia. Tieteellinen tutkimus lisää tietoa maailmasta, tekninen ei [21]. Myös tulosten pysyvyys ja yleispätevyys ovat eroavia. Teknisen tutkimuksen tulos on käyttöäiltään yleensä lyhytaikainen. Tekniikan tutkimuksen tarkoitus on kehittää uusia laitteita ja ratkaisuja sekä ratkaista niihin liittyviä ongelmia, kun taas tieteessä turvaututaan aiempien tutkimuksien tuloksiin. Tieteellisen tutkimuksen tulee olla toistettavissa [21]. Tekniikan tutkimukset ovat toisinaan vaikeita toistaa, eikä sitä yleensä pidetä edes tarpeellisena.

Tekniikan tutkimuksessa ei yleensä edes puhuta tutkimusmenetelmistä, mutta tarvittaessa ne voidaan mainita. Tekniikan tutkimukseen on olemassa useita eri tutkimusmenetelmiä [21]:

- kirjallisuusselvitys, joka on syytä tehdä ensin. Kirjallisuudesta selviää, onko aihetta jo tutkittu ja millaisia tuloksia siitä on saatu.
- matemaattinen analyysi, joka mallintaa toimintaperiaatteet matemaattisilla kaavoilla. Näin saadaan nopeasti selville, onko idea lainkaan mahdollinen.
- simulointi, jossa valmistetaan aiheeseen liittyvä tietokoneohjelma. Se kuvaa aihetta matemaattista analyysiä tarkemmin, mutta sen valmistelu vie paljon aikaa.
- mittaus, jossa mitataan toimintaa ja tarpeellisia parametreja. Mittaus tulee suunnitella huolellisesti ja mielellään toistaa monesti, jotta mahdolliset satunnaistekijät saadaan poistettua tuloksista.
- suunnittelu, joka määrittelee toteutettavan järjestelmän. Sen kanssa tehdään yleensä myös vaatimusmäärittely.
- vertailu, jossa tutkittavaa asiaa vertaillaan vaihtoehtoiseen menetelmään. Myös eri laitteita voidaan vertailla keskenään.

Tässä tutkimuksessa käytetty tutkimusstrategia on tapaustutkimus. Tutkimuksessa käsitellään yksityiskohtaista tietoa yksittäisestä tapauksesta.

Tutkimuksessa käytettyjä tutkimusmetodeja on kolme. Aluksi lähestymme propulsiojärjestelmiä kirjallisuusselvityksen kautta. Selvityksen lähteiden tulee olla ajantasaisia ja niitä tulee olla riittävästi [21]. Suurin osa lähteistä on alle 10 vuotta vanhaa kirjallisuutta. Työn lähteet ovat primäärlähteitä, eli niissä annetaan täydellinen tai ensikertainen selostus käsiteltävästä aiheesta [10]. Työn lähteistä mainittakoon erityisen hyödyllisenä Pekka Räisäsen teos Laivatekniikka. Muita erittäin hyviä teoksia ovat professori Jerzy Matusiakin teos Laivan propulsio sekä professori Pentti Häkkisen teos Laivan kuljetuskoneisto.

Toisena menetelmänä käytetään matemaattista laskentaa, jonka avulla selvitetään esimerkkialusten konetehovaatimukset. Myös propulsioon mitoitukseen käytettävät kaavat esitellään. Työssä käytetyt laskukaavat ovat teoreettisesti täysin yleispäteviä propulsiolaskuihin. Huomioon ei oteta erilaisia sattumia tai todennäköisyyksiä.

Kolmantena menetelmänä käytetään vertailua. Ensin selvitetään merivoimien kahden apualusluokan propulsiojärjestelmien faktat. Sen jälkeen niitä verrataan keskenään ja tutkitaan, onko niissä merkittäviä eroja. Saatujen tulosten avulla saadaan johtopäätöksiä sekä kehitysehdotuksia.

Tutkimuksen pääongelma on:

- Millainen on ihanteellinen propulsiojärjestelmä nykypäivän apualukselle?

Erialaisten propulsiojärjestelmien vertailu ei ole keskeistä tässä työssä, mutta järjestelmän valinta perustellaan sitä käsittelevässä luvussa. Työ tutkii tarkemmin sitä, millä perusteilla propulsiojärjestelmä tulee mitoittaa ja miten siitä saadaan ominaisuuksiltaan luotettava ja käyttäjäystävällinen. Alaongelmina työssä ovat:

- Miten Valas- ja Pansio-luokan alusten propulsiojärjestelmiä tulisi kehittää?
- Miten apualuksen propulsori mitoitetaan?
- Millaisia ominaisuuksia apualuksen propulsiojärjestelmällä on ja mitä tulee huomioida niihin liittyen?

1.4 Keskeiset käsitteet

Tässä luvussa esitellään tutkimuksen sisältöön liittyvät keskeiset käsitteet. Luku jakaantuu kahteen osaan. Ensin selvitetään työn sisältöön liittyvät pääkäsitteet, jotka ovat keskeisiä koko työn sisällön ymmärtämiseksi. Jäljempänä selvitetään työn sisällössä esiintyviä apukäsitteitä, joiden avulla rakennetaan tutkimuksen sisältöä.

1.4.1 Pääkäsitteet

Apualus, tukitehtäviin käytettävä sota-alus, joka ei toimi taistelualuksena. Apualuksia ovat kuljetus-, huolto- ja koulutusaluksat. [38]

Huoltoalus, alus, jonka pääkäyttötarkoitus on henkilöstön majoitus ja huolto tai materiaalin kuljetus, säilytys tai korjaus. [34]

Kuljetuskoneisto, aluksen kuljetukseen rakennettu koneistojärjestelmä, jonka tehtävänä on laivan itsenäinen propulsio ilman ulkopuolista energiansyöttöä. [15]

Propulsio, laivan kulkuvastuksen kumoamiseen ja kiihdytykseen tarvittavan työntövoiman aikaansaamista laivasta käsin. [25]

Propulsiojärjestelmä, kattaa käsitteenä kaikki aluksen propulsioon tuottamiseen tarvittavat laitteet (tutkijan oma määritelmä).

Propulsori, saa jonkun väliaineen, kuten veden, ilman tai niiden seoksen massavirran kiihtymään taaksepäin, jolloin alus kulkee eteenpäin. [25]

1.4.2 Apukäsitteet

Heräte, aluksen aiheuttama poikkeama luonnolliseen taustaan (magneettinen häiriö, ääni, painepoikkeama, lämpö, valo). [34]

Hyötysuhde, (ruotsiksi verkningsgrad, engl. efficiency, tunnus η), on fysikaalinen suure, joka voidaan ymmärtää koneen tehokkuusasteena [52]. Hyötysuhde ilmoitetaan lukujen 0 ja 1 välillä. Hyötysuhde voidaan ymmärtää myös prosentteina, esimerkiksi hyötysuhde $0,7 = 70\%$ (tutkijan oma määritelmä).

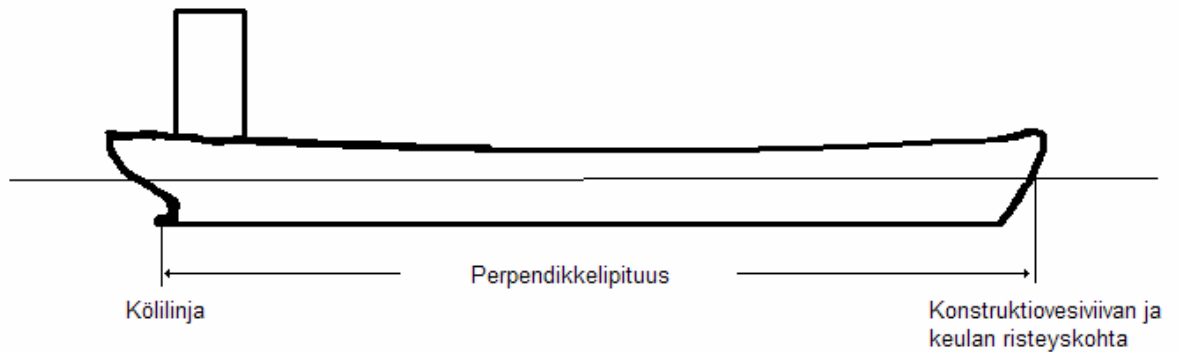
Kavitaatio, on kaasu-faasin muodostumista nesteessä paineen alentumisen seurauksena. Jos paine alenee paikallisesti saavuttaakseen pienimmän mahdollisen nesteessä esiintyvän paineensa, muodostuu nesteen tilalle vesihöyryn ja kaasun seos [25]. Aluksilla kavitaatiota syntyy propulsorin pinnassa, mikä saa aikaan vedenalaisia paineräjähdyksiä. Nämä paineräjähdykset kuluttavat propulsoria ja saavat aikaan melua (tutkijan oma määritelmä).

Lastimerkki, aluksen kylkeen vesilinjaan maalattu viivasto, joka osoittaa aluksen suurimman sallitun syvyyksen eli suurimman uppouman määrän kussakin veden tiheydessä sekä kullakin liikennealueella. [54]

Melu, ilman paineen vaihtelua, jota voimme aistia kuulolla. [38]

Miinalautta, miinanlaskijaksi ja kuljetusalukseksi suunniteltu ja rakennettu alus, jolla on kyky toimia avomerellä hyvissä olosuhteissa. [34]

Perpendikkelipituus, (LBP, length between perpendiculars) mitataan kesälastivesiviivalla peräsinrangan takareunasta keularangan etureunaan. Jos aluksessa ei ole peräsinrankaa, mittaus tehdään peräsintukin keskiviivasta. Perä- ja keulaperpendikkeleillä tarkoitetaan edellä mainittujen pisteiden kautta kulkevia pystysuoria. [27]



Kuva 2: Perpendikkelipituus

POD-propulsio, kutsutaan myös nimillä ruoripropulsio, ruoripotkuri, kompassipotkuri sekä azipod. Kyseessä on potkurilaite, joka koostuu avo- tai suulakepotkurista sekä navasta ja siivenmuotoisesta kannattajasta. Laite kääntyy 360^o, ja se on kytketty pääkoneeseen kulmavaihteiden avulla. [25]

Vesisuihkujärjestelmä, nopeissa aluksissa käytetty propulsiojärjestelmä. Periaatteena on imeä vettä aluksen alta tunneliin ja työntää vesi ulos tunnelista aluksen perästä. Aluksen ohjailu tapahtuu säätämällä vesisuihkun suuntaa ja tehoa (tutkijan oma määritelmä).

2. MERIVOIMIEN APUALUKSET

2.1 Tehtävät ja vaatimukset

Merivoimien tehtävänä on suojata Suomen meriyhteyksiä sekä torjua mereltä suuntautuvat hyökkäykset yhdessä muiden puolustushaarojen kanssa. Merivoimien komentajan johdossa ovat meripuolustusalueet, jotka vastaavat alueensa meripuolustuksen suunnittelusta ja johtamisesta. Meripuolustusalueen alaiset johtoportaat, alusyksiköt ja muut operatiiviset joukot on koulutettu ja varustettu toimimaan ulkomerellä ja saaristossa. [40]

Puolustusvoimien huolto- ja logistiikkajärjestelmä on osa valtakunnallista huoltovarmuutta. Sen tehtävänä on joukkojen huoltaminen ja täydentäminen kaikissa tilanteissa [40]. Merivoimien huollon tehtävänä on luoda edellytykset perustettavien joukkojen varustamiselle sekä joukkojen taistelukelpoisuuden ja toimintakyvyn ylläpitämiselle kaikissa valmiustiloissa ja tilanteissa [19]. Merivoimien huolto jaetaan maakuljetuksiin ja merikuljetuksiin. Merikuljetuksissa käytetään puolustusvoimien omaa kuljetusaluskalustoa sekä mahdollista ottoaluskalustoa. Kuljetusalukset kuuluvat tiettyyn huollon organisaatioon, jonka mukaan niiden tehtävät määräytyvät. Kalustoa käytetään erikseen määrättyllä toiminta-alueella. Yleisesti alusten tehtävinä ovat merikuljetukset. Merikuljetuksia käytetään eniten ihmisten, materiaalin ja muonan kuljettamiseen linnakkeille, mutta niitä järjestetään myös saaristossa sijaitseville varastoille sekä leireille [23].

Alukset voivat kuljettaa ampumatarvikkeita, aseita, henkilöstöä, polttoainetta, voiteluöljyä, elintarvikkeita, ajoneuvoja ja muuta kalustoa. Alukset suorittavat vesikuljetuksia, jotka voidaan jakaa sisävesikuljetuksiin sekä merikuljetuksiin. Meripuolustusalueet vastaavat itse merikuljetuksistaan [13]. Mikäli jokin alusyksikkö vaatii huoltoa, pyritään se toteuttamaan vientiperiaatteella tietyille alueelle käyttäjän ulottuville. Alusyksiköiden huollossa sekä huoltopalveluissa korostuu joukkojen kyky toimia pitkien ja vaikeiden huoltoyhteyksien päässä [13]. Tämä tarkoittaa myös sitä, että huoltoaluksilla joudutaan suorittamaan pitkiä ja vaikeita merikuljetuksia. Alukset pidetään taistelukelpoisina, jotta ne voisivat toteuttaa saamansa tehtävän [19].

Komentaja Aimo Jokelan (Merivoimien materiaalilaitos, Hallinto-osaston päällikkö) haastattelussa 9.11.2006 selvisi, että merivoimat eivät aseta apualusten propulsiojärjestelmille erikoisperusteita. Kuljetusaluksen propulsiojärjestelmän mitoitus tapahtuu samalla tavalla kuin kaupallisten laivojen järjestelmien mitoitus. Tässä käytetään suuntana yleisiä perusteita ja säännöksiä. Kapteeniluutnantti Markku Ronkainen (Merivoimien esikunta, materiaaliosasto) vahvistaa nämä tiedot. Merivoimien apualusten propulsiolle ei ole kirjallisia vaatimuksia tai perusteita. Ronkaisen haastattelussa selvisi suunnitteluprosessin eteneminen merivoimissa. Tämä osa haastattelusta on liitteenä 1.

Kuljetusaluksilta vaaditaan Jokelan mukaan jäissäkulkukykyä, taloudellisuutta ja etenkin luotettavuutta, koska niillä on paljon tehtäviä ja ajotunteja. Esille tuli myös aluksilta vaadittava monitoimikyky. Puolustusvoimien aluskalusto on hyvin rajallinen,

ja tämän vuoksi alusten täytyy pystyä vastaamaan monipuolisten tehtävien haasteisiin. Tehtävinä voi olla kuljetuksien lisäksi kaapelityöt ja virka-aputehtävät.

Teknikkokapteeniluutnantti Pentti Penkkimäki (Kotkan Rannikkopataljoona, konetarkastaja) sanoi haastattelussa 23.11.2006, että kuljetusalusten kansitila on kovin rajallinen moniin nykypäivän tehtäviin. Alusten tulisi pystyä kuljettamaan suurempia lasteja, ja niillä pitäisi olla hyvä kantavuus. Myös Penkkimäki vahvisti haastattelussa, että aluksilta vaaditaan nykyään monikäyttöisyyttä. Apualuksen propulsiojärjestelmää valittaessa hän valitsisi mieluiten säätösiipipotkurilla varustetun potkuripropulsion. Perusteluksi hän mainitsee pääkoneen kuormituksen vähentämisen. Säätösiipipotkurilla voitaisiin ajaa pääkoneen vakiokierroksilla jatkuvista rantautumisista huolimatta, mikä kuormittaisi pääkonetta huomattavasti vähemmän.

Apualuksilta vaaditaan siis avomeritoimintakykyä, jäissäajokykyä, luotettavuutta sekä taloudellisuutta. Sota-alusten käyttötarkoituksesta voi johtua, ettei niiden rakenteessa ole aina mahdollista noudattaa kansallisia tai kansainvälisiä siviilialusmääräyksiä [41]. Tämä ei ole kuitenkaan peruste sille, että aluksen rakenteen vaatimuksista tulisi tinkiä. Apualuksissa pyritään yleensä halpoihin ratkaisuihin, mutta järjestelmien toimivuus ja luotettavuus on taattava. Sota-alusten koneiden perusvaatimuksena on toimintavarmuus. Koneita on käytettävä annettujen käyttörajoitusten puitteissa, mutta niiden tulee kuitenkin tarvittaessa kestää hetkelliset kuormitushuiput [41].

2.2 Merivoimien apualukset ja niiden propulsiojärjestelmät

Tässä luvussa esitellään lyhyesti merivoimien käytössä olevat suuret, uppoumarunkoiset apualukset. Merivoimilla näitä aluksia on kahdessa eri luokassa. Valas-luokan alukset on suunniteltu pääasiassa nimenomaan kuljetustehtäviin, mutta niillä on myös välttävä miinoituskyky. Pansio-luokan miinalautat toimivat kuljetusaluksina, mutta niitä käytetään myös miinavarastoina ja miinanlaskussa. Alusten mitat ja nopeudet ovat liitteenä 2.

2.2.1 Valas-luokka

Valas-luokan alukset on rakennettu jäissäkulkukykyisiksi kuljetusaluksiksi [49]. Alukset voivat toimia myös hinaajina tai miinanlaskijoina. Aluksille ominaista

toimintaa ovat jokapäiväiset tavara- tai henkilöstökuljetukset sekä lisäksi sotaharjoituksissa maalilauttojen hinaus. Alunperin Valas-luokan aluksia kehitettiin öljyntorjuntaan, mutta nykyään siihen on kehitetty omat erikoisaluksensa. Valas-luokan aluksia on viisi: Valas (97), Mursu (98), Vaarlahti (322), Vänö (323) ja Vahakari (121). Näistä ainoa ulkoisesti poikkeava alus on Mursu, joka nykyään toimii sukeltajien emäaluksena. Alus poikkeaa luokassaan, koska siihen ei ole rakennettu peräramppia. Aluksen peräkansi on katettu, mikä lisää aluksen tuulipinta-alaa. Valas-luokan alusten rungon jääluokitus on 1A. Alus kykenee murtamaan 30 cm:n kiintojään [49]. Valas-luokan aluksilla on merkittävä rooli sodanuhan aikana. Alusluokka on ainoa, joka kykenee hajauttamaan taistelualuksia hinaamalla jääolosuhteissa [23].

Valas-luokan aluksen pääpropulsio muodostuu perinteisestä potkuripropulsiosta. Järjestelmään kuuluu yksi pääkone ja sen alennusvaihde, potkuriakseli ja potkuri.

Tietoja pääpropulsion laitteista [20]:

- Pääkoneena aluksella on Wärtsilä Vasa 8R22B, jonka teho on 1070 kW. Moottori on rivimoottori, ja siinä on kahdeksan sylinteriä.
- Alennusvaihteena aluksella on Reintjes WAV 2200, alennussuhde 2,5:1.
- Pääkoneen ja vaihteen välissä on joustava kytkin, jonka merkki on Vulkan EZS series 1101/17.
- Potkuriakseli on Hollming Oy:n konepajan tekemä, ja sen malli on 31F40.
- Potkuri on Pronssivalu Oy:n valmistama. Potkurin materiaali on NiAl-pronssi. Sen halkaisija on 1800mm, ja se on kolmilapainen. Pinta-alasuhde on 0,9. Potkurin jääluokitus on 1A Super. Potkuri on kiinteäsiipinen.

Valas-luokan aluksissa on dieselhydraulinen keulaohjausjärjestelmä. Järjestelmän voimanlähde on toinen aluksen apukoneista, joka on rakennettu niin, että sillä voidaan joko tehdä sähköä generaattorin kautta tai pyörittää hydraulipumppua, joka on kytketty koneen toiseen päähän. Sähköntuotto ja keulapotkurin käyttö yhtäaikaan ei ole mahdollista. Valaan apukoneita käytetään niin, että toisella tehdään sähköä alukselle ja toinen apukone on käyttövalmiudessa. Kun alus kiinnittää tai irrottaa, toinen kone käyttää generaattoria, ja toinen keulapotkurin hydraulipumppua. Hydraulipumpusta lähtee hydrauliiikkaputkistot aluksen keulaan saakka, jossa on keulapotkurin koneikko. Koneikko pyörittää itse keulapotkuria. Koneikkoon sisältyvät hydraulimoottori ja vaihteisto, jotka muuntavat hydraulinesteen tekemän työn

mekaaniseksi työksi. Keulapotkurina aluksessa on Aquamaster T 160, joka on asennettu alukseen sen valmistuksen yhteydessä. Potkuri on nelilapainen, alumiinipronssista valmistettu Kaplantyyppinen potkuri ja sen lavat ovat kiinteät [12].

Tietoja potkurilaitteesta [12]:

- teho käyttöakselilla: 55 kW
- käyttöakselin pyörimisnopeus: 1800 1/min
- potkuriakselin pyörimisnopeus: 600 1/min
- potkurin halkaisija: 750 mm

Alusluokka alkaa olla jo teknisen käyttöikänsä päässä aktiivisesta ja hyvin toteutetusta ylläpitävästä huollosta huolimatta. Käyttöennuste ylittää tämän vuosikymmenen loppuun [23]. Aluksille tulisi toteuttaa peruskorjaus, jotta niiden käyttöikä saataisiin pidennettyä. Peruskorjauksessa tulisi uusia koneiston ohjaus, sähköpäätaulut ja apulaitteet. Pidempi runko voisi mahdollistaa kuljetuskapasiteetin lisäämisen, mutta se heikentäisi jäissäkulkukykyä. Tätä voitaisiin kompensoida ympäripyörivällä azipod –tyyppisellä propulsioratkaisulla [23].

2.2.2 Pansio-luokka

Pansio-luokan miinalautat on suunniteltu miinojen kuljetusta, laskemista ja varastointia varten. Rauhan aikana alus suorittaa erilaisia huolto- ja kuljetustehtäviä. Alus on rakennettu sisä- ja ulkosaariston merialueilla toimivaksi miinalautaksi, jota voidaan käyttää myös raskaan ajoneuvokaluston ja muun kansilastin kuljetustehtäviin [1]. Pansio-luokan alusten rakenne on erikoinen. Alus on rakennettu palvelemaan RoRo-aluksen periaatteella. Siinä siis on keula- ja peräramppi sekä läpiajomahdollisuus. Aluksen komentosilta on rakennettu keskilaivan kohdalle ja aluksella on suuri nosturi keulan vasemmalla puolella. Nämä tekijät yhdessä suuren tuulipinta-alan ja pienen syväyksen kanssa luovat aluksesta omalaatuisen tapauksen. Pansio-luokkaan kuuluu kolme alusta: Pansio (576), Porkkala (777) ja Pyhäranta (575). Pansio-luokan alusten rungon jääluokitus on 1A lukuunottamatta keulaa, jonka luokitus on 1A super. Alus kykenee murtamaan 30 cm:n kiintojään [1].

Pansio-luokan aluksen pääpropulsio muodostuu perinteisestä potkuripropulsiosta. Järjestelmään kuuluu kaksi pääkonetta ja niiden alennusvaihteet, potkuriakselit ja

potkurit. Kumpaankin akselistöön liittyvät laitteistot ovat toiminnallisesti samanlaiset [1].

Seuraavassa tietoja pääpropulsion laitteista [1]:

- Pääkoneina aluksella ovat kaksi MTU 12V 183 TE62 dieselmoottoria. Yhden moottorin teho on 550kW. Moottori on V-mallinen, ja siinä on 12 sylinteriä.
- Alennusvaihteet aluksella ovat mallia Masson RSD 701, alennussuhde 4,060:1.
- Pääkoneen ja vaihteen välissä on joustava kytkin, jonka merkki on Vulkan Rato 1421.
- Potkuriakselien halkaisija on 175mm ja pituus 7500mm.
- Potkurit ovat Pronssivalu Oy:n valmistamat. Potkurien materiaali on NiAl-pronssi. Potkurien halkaisija on 1300mm, ja niissä on neljä lapaa. Pinta-alasuhte/potkuri on 0,78. Potkurit ovat kiinteäsiipiset.

Pansio-luokan aluksilla on dieselsähköinen keulapotkuri. Aluksen apukoneet ovat kytketty generaattoreihin, jotka tuottavat sähköä alukselle. Generaattorit on kytketty aluksen sähköpäätauluun, josta haarautuu sähkönsyöttö alukselle. Sähköpäätaululta on vedetty sähkökaapeli aluksen keulaan keulapotkurin sähkömoottorille. Sähkömoottorin ja keulapotkurin väliin jäävät joustava kytkin ja vedenalainen vaihteisto. Keulapotkurin malli on Jastram 20F BU 2399. Potkuri on rakennettu erikoismateriaalista, ja siinä on neljä lapaa. Se on suunniteltu ja valmistettu niin, että se kehittää likimain yhtä suuren työnnön molempiin suuntiin [18]. Potkurin lavat ovat kiinteät.

Tietoja potkurilaitteesta [18]:

- moottorin teho: 100 kW
- kierrosluku: 1470 1/min
- vääntömomentti: 650 Nm
- potkurin kierrosluku: 557 1/min
- potkurin halkaisija: 840 mm

Pansio-luokan alukset ovat tällä hetkellä erittäin hyvässä kunnossa, ja ne tulee säilymään operatiivisessa käytössä 2020-luvulle saakka [23]. Mahdollinen peruskorjaus pidentäisi alusluokan käyttöikää sitäkin enemmän. Pansio-luokan alukset hoitavat kuljetustehtäviä yhä enemmän tulevaisuudessa ja ne

todennäköisesti tulevat korvaamaan Kampela-luokan alukset kuljetustehtävissä. Miinalauttojen mahdollisessa peruskorjauksessa voisi optiona olla propulsiolaitteiden uusiminen ympäripyöriviin propulsoreihin ja konetehon lisääminen [23]. Nämä ominaisuudet parantaisivat aluksen ohjailua ja jäissäkulkukykyä.

2.3 Apualusten tulevaisuus

Apualusten käyttö tulevaisuudessa on varmaa, ja niiden merkitys korostuu entisestään. Kehitysnäkyminä ovat alusten monipuolinen varustelu, monitoimisuus ja logistinen tukeminen. Aluksille tulee ainakin rajoitettu omasuoja-aseistus sekä kyky tiedustella ja valvoa toiminta-aluetta [44]. Alusten käyttö kansainvälisissä tehtävissä tulee myös yleistymään. Sopivien kuljetusalusten puute on yksi Euroopan merivoimien suurista puutteista, ja se tullaan korjaamaan tulevien vuosikymmenien aikana joko maiden omin hankinnoin, yhteishankinnoin tai vuokrasopimuksilla [44]. Kansainvälisesti trendinä on suurien kuljetusalusten valmistaminen, joilla on todella suuri kuljetuskapasiteetti, johtomahdollisuudet sekä logistiikkakeskuksena toimimisen edellytykset. Tärkeimpinä suunnittelukriteereinä ovat riittävä kuljetuskapasiteetti, toimintamatka, helikopterioperointikyky, lastausrampit, lastin purku merellä ja monikäyttöisyys/modulaarisuus [44]. Nämä kriteerit ovat melko vaativia, ja ne ovat enemmänkin suuren apualuksen ominaisuuksia. Suomen merivoimien apualukset säilyvät jatkossakin kooltaan rajallisina, mikä johtuu niiden saaristoisesta toimintaympäristöstä. Aluksen kokoon vaikuttavia tekijöitä ovat väyliä ja vesialueiden syvyydet, tukeutumispaiikkojen suuruus, laiturien koko, alukselta vaadittu kuljetuskapasiteetti sekä tuuli- ja jääominaisuuksien huomioiminen.

3. PROPULSIO

3.1 Yleistä

Propulsio on saanut alkunsa maailmassa jo muinaisaikoina, kun maata alettiin tutkia merien ylitse. Soutupropulsio oli tuolloin nopein ja varmin propulsiomuoto ja se säilyi sellaisena aina 1300-luvulle asti. Purjeet korvasivat soutamisen 1300-luvulla, kun aluksilla otettiin käyttöön ruutiaseet. Siipiraspropulsio puolestaan tunnettiin jo muinaisessa Kiinassa. Sen ensimmäinen onnistunut versio laivan propulsorina oli 1807 käyttöön otetussa Cleremont-aluksessa. Siipirattaat korvasi myöhemmin potkuri. Potkuri yleistyi 1840-luvulla, jolloin sekä sota- että siviilialuksissa alettiin

käyttää yleisesti ruuvipotkureita. Monet ensimmäisistä laivapotkureista muistuttivat Arkhimedeen ruuvipumppua. [25]

Propulsiolla tarkoitetaan yleisesti työntövoimaa. Laivan propulsiota voidaan karkeasti verrata vaikkapa auton moottoriin ja renkasiin. Auto luo itse etenemisvoimansa moottorin kautta akselille ja aina edelleen renkaille. Se on täysin riippumaton ulkopuolisesta energiansyötöstä, toisin kuin esimerkiksi sähkömoottorit, jotka ovat riippuvaisia sähkönsyötöstä. Laivalla saadaan itse aikaan sen tarvitsema työntövoima.

Aluksen propulsorilla tarkoitetaan järjestelmää, minkä avulla laivaa kuljetetaan. Laiva kulkee potkureiden, vesisuihkupropulsion, purjeiden tai airojen voimalla [53]. Nykypäivänä kuljetuskoneistot antavat varman, luotettavan ja nopean propulsion laivan kuljettamiseen säällä kuin säällä. Kuljetuskoneiston tehtävänä on laivan itsenäinen propulsio ilman ulkopuolista energiansyöttöä. Itsenäinen propulsio muodostuu impulssilain mukaisesti taaksepäin suunnatusta vesi- tai ilmavirtamassasta [15]. Puhuttaessa vesivirtaukseen perustuvista propulsiojärjestelmistä on siis päämääränä työntää vedestä vauhtia laivan liikkumiseksi. Yksinkertaisin esimerkki ovat aivot, joilla soutuveneelle työnnetään vauhtia vedestä. Työnnettäessä airoa veneen perään päin muodostuu sen taakse ylipaine ja eteen alipaine. Airon kulkiessa taakse paine kohdistuu airoon ja saa aikaan työntävän voiman, jolloin vene kulkee eteenpäin. Myös vesisuihku- ja potkuripropulsio perustuvat veden työntämiseen. Vesisuihkun tehtävänä on imeä vettä aluksen alta ja puhaltaa sitä aluksen taakse veden alle, jolloin aluksen taakse muodostuu eteenpäin työntävä painevoima. Potkuri taasen pyörii ruuvimaisesti vedessä, jolloin se kauhoo lavoillaan vettä edestä taakse. Näin syntyy siis imu- ja painepuoli, joista painepuoli saa aikaan alusta työntävän voiman.

Propulsion tehtävänä on siis saada aikaan työntävä voima, jotta laiva liikkuisi eteenpäin. Propulsiolla tarkoitetaan laivan kulkuvastuksen kumoamiseen ja kiihdytykseen tarvittavan työntövoiman aikaansaamista laivasta käsin [25]. Laivaan vaikuttaa monia eri voimia, muun muassa aallot ja tuuli. Jotta laiva saataisiin kulkemaan halutulla nopeudella haluttuun suuntaan, tulee laivan propulsion kyetä kumoamaan vastaan vaikuttavat voimat.

Kuljetuskoneiston tärkein kriteeri on yleensä laivan tyynessä vedessä merikokeen olosuhteissa saavuttama nopeus [15]. Koneiston valintakriteerien tärkeysjärjestys vaihtelee kuitenkin jokaisen aluksen osalta. Tärkeimmät valintakriteerit kuljetuskoneistolle ovat luotettavuus, aluksen suoritus- ja ohjailukyky, pääomakustannukset, polttoainekustannukset, voiteluöljy- ja huoltokustannukset, vaadittu miehistömäärä ja ympäristövaikutukset [15].

Laivan koneistosuunnittelija kokoaa kuljetuskoneiston asetettujen kriteerien ja reunaehtojen mukaisesti optimoiden [15]. Kaiken pohjan aluksen kuljetuskoneistolle luo tutkittu teoriapohja. Jokainen alus on täysin oma tapauksensa, mikä johtuu sen rungon muodoista, vakavuudesta, materiaaleista, virtaviivaisuudesta ja muista tekijöistä. Kuljetuskoneiston valinnalla on suuri vaikutus aluksen rakennuskustannuksiin, suorituskykyyn, käyttötalouteen ja luotettavuuteen [15]. On siis täysin aluskohtaista, mitä mainituista osa-alueista halutaan painottaa. Myös sisaralukset, eli samaan alusluokkaan kuuluvat alukset, voivat poiketa hieman toisistaan. Yleensä tietty alus suunnitellaan täysin sen käytön ja sijoituskohteen mukaan. Aluksia voidaan myös modifioida myöhemmin vastaamaan paremmin niiden käyttötarkoitusta.

Vesisuihkupropulsiota käytetään yhä yleisimmin myös suurissa ja nopeissa aluksissa [15]. Sen etuina ovat potkuria parempi hyötysuhde, nopeus, ohjailukyky ja pysäytys. Vesisuihkupropulsio on myös todettu luotettavaksi järjestelmäksi. Vesisuihkulaite ei kuitenkaan sovi hitaille uppoumarunkoisille aluksille. Laivan nopeuden ollessa pieni ja työntötarpeen suuri tarvitaan hyvin isokokoinen suihkulaite, jotta sen hyötysuhde vastaisi potkurin hyötysuhdetta [15]. Apualukset ovat usein uppoumarunkoisia aluksia, joiden nopeus on 10-13 solmua. Voimme myöskin kuvitella, etteivät suuret ja raskaat kuljetukset onnistu nopeilla, pienen uppouman vesisuihkualuksilla. Jo pelkkä jyskintä kovassa vauhdissa voi vaurioittaa lastia. Suurin osa taistelualuksista on yksirunkoisia ja propulsiolaitteena on akselin päässä pyörivä potkuri [44]. Näiden seikkojen vuoksi tarkastelemme tarkemmin ainoastaan potkuripropulsiojärjestelmää.

3.2 Propulsion matematiikasta

Matematiikka on propulsion kartoittamisessa tärkein suunnannäyttävä. Se on hyödyllinen apuväline siksi, että se pohjautuu luonnon lakeihin ja se antaa varmaa tietoa. Jos mitoitamme jollekin alukselle potkurin, voimme tehdä sen

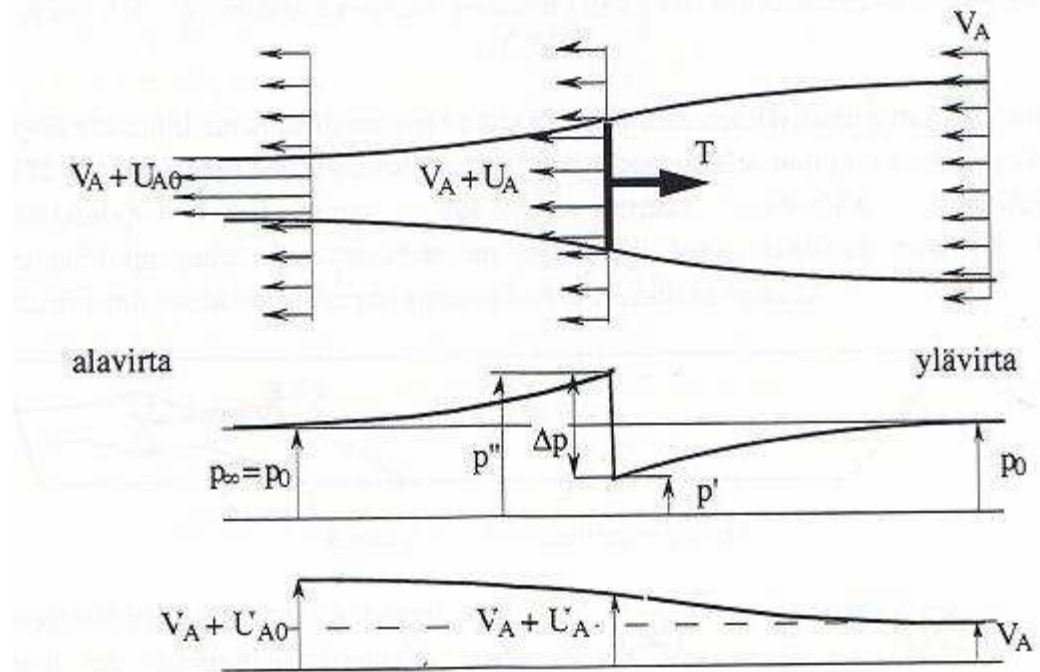
silmämääräisesti, kopiaamalla toisesta mallista tai kokeilemalla jotain perusteltua ratkaisua. Mikäli tässä ei ole käytetty matematiikkaa, tulee potkurista epäluotettava, optimoimaton ja välttävä osa propulsiota. Matematiikan avulla voimme saada potkurista oikean muotoisen ja oikean mittaisen, jotta saamme koko propulsiojärjestelmästä irti mahdollisimman hyvän hyötysuhteen. Tämä vaikuttaa aluksen nopeuteen, luotettavuuteen ja taloudellisuuteen. Tekniikan tutkimuksen tavoitteena onkin tuottaa tehokkaita ja toimivia ratkaisuja edullisesti [21].

Matematiikan tehtävänä on paitsi näyttää oikeaa suuntaa propulsiojärjestelmän suunnittelussa, myös ilmaista optimituloksia. Optimoinnin avulla saadaan selville parhaat arvot järjestelmän eri osille. Toisinaan voi syntyä ristiriitoja eri tuloksien välillä. Jos haluaa alukseen nopean ja taloudellisen koneen, on myös vertailtava eri tuloksia, sillä harvoin voidaan löytää ylivertaisesti paras vaihtoehto usean tekijän vaikuttaessa. Optimivalintana tällöin olisi järjestelmä, jonka luotettavuudesta voitaisiin tinkiä, mutta jossa olisi optimaalisesti paras nopeuden ja taloudellisuuden suhde.

Erilaisissa pyrkimyksissä, niin myös sodankäynnissä, on olennaista yrittää saavuttaa mahdollisimman hyvä lopputulos niin, että resursseja kulutetaan mahdollisimman vähän [21]. Matematiikka on tässä kohdassa hyvä työkalu. Sen avulla voidaan saada tuloksia pelkän istumatyön avulla. Laskut voivat muodostua monimutkaisiksi ja niitä voi tulla vastaan sitä enemmän, mitä enemmän selvityksen kohteelle asetetaan vaikuttavia kriteereitä. Matematiikka on silti paras selvitysväline, koska se ei vaadi mitään käytännön toimia. Ongelman ratkaiseminen puhtaasti matemaattisin menetelmin on tutkimustavoista ekonomisimpia. Se ei vaadi mitään erityisiä välineitä tai kalliita ja materiaalia kuluttavia kokeita [21].

3.3 Ideaalipropulsori

Ideaalipropulsoriteorian avulla selitetään potkurin toimintaa ja sen hyötysuhteen riippuvuutta propulsorin kuormituksesta. Ideaalipropulsorilla tarkoitetaan virtauksen läpäisevää tasoa, joka on suunnattu kohtisuoraan virtaukseen nähden. Tason nopeus on V_A , ja etäällä propulsorista vallitsee paine p_0 . Tasaisesti ja kohtisuoraan tasoon nähden kohdistuva ulkoinen kuormitus aiheuttaa askelmuotoisen paineen muutoksen ja virtausnopeuden tasaisen kasvun virtaputkessa. Tasaisen ulkoisen kuormituksen ansiosta myös virtaus virtaputkessa on tasaista. Virtauksen oletetaan olevan kitkatonta ja pyörteetöntä. [25]



Kuva 3: Ideaalipropulsorin aiheuttama virtaus [25]

Ideaalipropulsorin teoria on yleispätevä. Siinä ei kuvata tietyn propulsorin toimintaa, vaan se voi olla mikä tahansa laite, joka saa aikaan työntövirran. Liikemäärän ja Bernoullin yhtälöistä voidaan johtaa sekä ideaalipropulsorin työntövoima että indusoidut nopeudet U_A (propulsorin tasossa) ja U_{A0} (etäällä alavirrassa) [25, 38].

Ideaalipropulsorin työntövoima saadaan kaavalla [25, 38]:

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

Tässä kaavassa:

T = työntö

p = paine

A_0 = potkurin ympyräpinta/ hydraulisen poikkileikkauksen pinta-ala

ρ = veden tiheys

V_A = potkurin etenemisnopeus

Indusoitu virtausnopeus propulsorin tasossa on puolet indusoidusta nopeudesta etäällä alavirrassa. Se saadaan kaavalla [25, 38]:

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

Ideaalipropulsorin hyötysuhde saadaan laskettua kaavalla [25, 38]:

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

Tässä kaavassa:

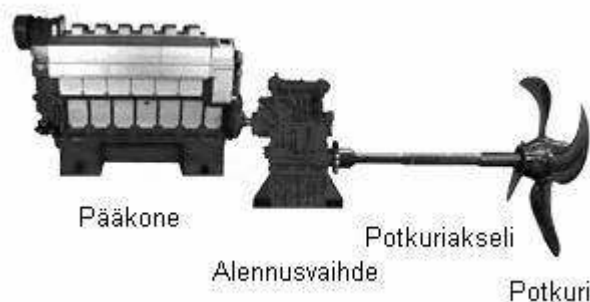
η_I = ideaalihyötysuhde

P_T = työntöteho ($= T \cdot V_A$)

P_D = potkuriteho

Näiden selvitysten perusteella voimme todeta, että ideaalipropulsorin hyötysuhde on aina alle yhden. Millään koneella ei voi olla hyötysuhdetta $\eta \geq 1$. Energiaperiaatteen mukaan kone voisi tällöin tuottaa itselleen energiaa omaa käyntiään varten ja vielä sen jälkeen tuottaa energiaa johonkin muuhun tarkoitukseen [52]. Tällöin puhuttaisiin ikiliikkujasta. Ideaalipropulsorin hyötysuhde on sitä suurempi, mitä pienempi propulsorin indusoitu nopeus on suhteutettuna potkurin tason nopeuteen [38]. Sopivan suurella propulsorin halkileikkauksella voidaan saavuttaa parempi työntövoima ja hyötysuhde.

3.4 Potkuripropulsiojärjestelmän esittely



Kuva 4: Potkuripropulsiojärjestelmä [43]

3.4.1 Pääkone

Laivan pääkone (main engine) toimii propulsiojärjestelmän voimanlähteenä. Sen tehtävänä on muuttaa sille syötettävän polttoaineen energia liike-energiaksi. Liike-energia saadaan ulos koneen kampiakselilta pyörimisliikkeenä. Laivojen moottorit ovat kooltaan suuria, mutta rakenteeltaan perinteisiä polttomoottoreita.

Polttomoottorit jaetaan ottomoottoreihin ja dieselmoottoreihin. Ottomoottorit eivät tule laivoissa kyseeseen. Niiden polttoaineena käytetty bensiini on kallista ja herkästi haihtuvana palovaarallista verrattuna dieselmoottorien polttoaineisiin. Dieselmoottorit ovat luotettavia, ja niiden kulutus on taloudellisempaa kuin ottomoottoreiden. Dieselmoottoreiden odotettu käyttöikä on myös pidempi. Näiden syiden vuoksi laivoilla käytetään dieselmoottoreita [2, 15].

Moottorityypin valinta riippuu aina aluksesta ja sille asetetuista vaatimuksista. Laivoilla käytettäviä yleisimpiä dieselmoottorityyppejä ovat V-moottorit ja rivimoottorit. Rivimoottoreiden antama teho ja vääntömomentti suhteessa moottorin kokoon on V-moottoreita huonompi. Ne ovat silti suositumpi valinta, sillä V-moottoreiden huoltaminen on vaikeampaa moottorin rakenteen monimutkaisuuden takia. V-moottori on tehoyksikköä kohti yleensä rivimoottoria halvempi. [15]

Nopeudeltaan moottorit jaetaan kolmeen eri luokkaan. Hidaskäyntisiksi kutsutaan dieselmoottoreita, joiden nimellispyörimisnopeus on alle 250 rpm. Niiden hyötysuhde on hyvä, vääntömomentti suuri ja polttoainekulutus pieni. Hidaskäyntiset dieselmoottorit ovat yleensä suuria kooltaan, ja ne ovat yleisiä isoissa rahtilaivoissa. Koska koneen kierrosnopeudet ovat alhaisia, ei sen ja potkuriakselin väliin tarvita alennusvaihdetta. Pyörimisnopeuden alhaisuuteen vaikuttaa myös suuri männän iskupituus, joka alentaa männän vauhtia. [15]

Keskinopeiden dieselmoottorien pyörimisnopeus on välillä 350-1000 rpm. Ne ovat yleensä nelitahtisia, sillä kaksitahtisessa moottorissa on koettu yleiseksi piirteeksi jäädytysongelmat. Keskinopea moottori kytketään laivan potkuriakseliin alennusvaihteen kautta, jotta potkurille saataisiin parempi hyötysuhde ja vääntömomentti. Tässä luokassa rivimoottorit ovat suosituimpia, koska niiden koko ja hinta ovat pienemmät kuin V-moottoreissa. Sylinterien lukumäärät vaihtelevat huomattavasti eri moottorimalleissa aina jopa 20-sylinteriseen V-moottoriin asti. Pyrkimyksenä on kuitenkin yleensä valita moottori, jonka koko on kohtuullinen ja sylinteriluku pieni. Lähihistoriassa keskinopeiden koneiden mäntien iskunpituudet ovat kasvaneet ja pyörimisnopeudet alentuneet. [15]

Nopeakäyntisten dieselmoottoreiden pyörimisnopeus on yli 1000 rpm. Ne poikkeavat rakenteeltaan huomattavasti keskinopeista koneista. Nopeakäyntiset koneet kytketään alennusvaihteen kautta tai sähköisesti potkuriakseliin. Niitä käytetään

nopeissa ja pienissä aluksissa, ja niiden mitat ja paino pyritään pitämään pieninä. Pienempi koneen koko saavutetaan yleensä suuremmalla sylinteriluvulla. Nopeakäyntinen moottori on luotu tuottamaan nimenomaan nopeaa vauhtia alukselle. Tästä syystä polttoainekulut voivat olla korkeat. Paineiden nousu pyritään pitämään rauhallisempänä, kuin muissa koneissa, jotteivät koneen osat vaurioituisi liian helposti. Nopeakäyntinen moottori pyritään pitämään pienikokoisena, helppohuoltoisena sekä rakennuskustannuksiltaan edullisena koneena. [15]

Päämoottorit voivat myös olla turboahdettuja. Ahtamisella saavutetaan parempi ominaisteho ja hyötysuhde, mutta se rasittaa enemmän koneen osia sekä monimutkaistaa koneen rakennetta. Turboahdetun moottorin hyötysuhteen kannalta tehokas kaasunvaihto on tärkeää [15]. Tämä pyritään huomioimaan tasapainejärjestelmällä tai pulssiahtauksella. Näiden järjestelmien tehtävänä on pakokaasujen johtaminen eteenpäin. Molemmissa järjestelmissä ovat etunsa ja haittansa, joista mainittavimmaksi nousee pulssiahtauksen huollon vaikeus. Tasapainejärjestelmä on yleisempi hidaskäyntisissä pääkoneissa. Turboahdinten kehitys tähtää hyötysuhteen ja paineen nostoon [15]. Itse päämoottoreissa pyritään koneiden hyötysuhteen kehittämiseen sekä päästöjen vähentämiseen.

3.4.2 Alennusvaihte

Alennusvaihte (reduction gear) sijaitsee pääkoneen ja potkuriakselin välissä. Sen tehtävänä on alentaa potkuriakselin kierrosnopeutta pääkoneen kampiakseliin nähden. Alennusvaihdetta käytetään, mikäli suora kytkentä pääkoneen kampiakselin ja potkuriakselin välillä ei ole mahdollista. Sähkömoottoreilla ja suoraan kytketyillä päädieselmootoreilla saavutetaan kussakin teholuokassa optimaalinen pyörimisnopeus, myös erittäin hitaasti pyörivien potkurien tapauksessa [15]. Vaihte tarvitaan, jos kyseessä on monimoottorikäyttö tai potkurilla niin alhainen pyörimisnopeus, ettei suorakäyttöistä voimalaitetta ole tai sen koko on liian suuri mahtuakseen konehuoneeseen [15].

Alennusvaihte on luotettava ja helppohuoltoinen kone-elin. Useimmat vikaantumiset johtuvat sen apulaitteista, ja ne on helppo korjata. Valmistusvirheille jää pieni mahdollisuus, mutta nekin ovat erittäin harvinaisia. Alennusvaihteista puhutaan yleensä hammasvaihteina, ja yleisin rakenne on lieriövaihte. Se on tuloksiltaan ja taloudeltaan edullisempi kuin kartiovaihte. Kartiovaihteita on käytetty laivoissa vain

pakottavissa erikoistapauksissa, joissa käyttävän ja käytetyn akselin välillä on kulmapoikkeama. [15]

Vaihteen rakenne pyritään pitämään yksinkertaisena ja varmana. Sen osien suunnitteluun ja mitoittamiseen ovat omat standardinsa ja määräyksensä. Alennusvaihdetta tarvitaan, koska pääkoneelta tulevassa akselissa on pienempi hammaspyörä ja potkuriakselissa isompi hammaspyörä. Pienemmän pyörän pyöriessä täyden kierroksen pyörii isompi pyörä vain vajaan kierroksen, jolloin saadaan aikaan pyörimisvauhdin aleneminen. Kierroksien alenemisen suhteesta puhutaan välityssuhteena. Välityssuhde määrää sen, kuinka monta hammaspyörää vaihteessa on, ja sen, valitaanko alukseen yksi- vai kaksiportainen alennusvaihde. Hammaspyörät valmistetaan erikoisteräksestä tai valuraudasta, ja niiden kestävyyttä saadaan lisättyä karkaisulla tai nitrauksella [15]. Niiden käyttöikä ja kestävyys saadaan pidettyä yllä oikeanlaisella voitelulla. Vaihteen kotelo valmistetaan valuraudasta tai teräksestä. Muita vaihteen osia ovat painelaakeri, liukulaakerit, rullalaakerit ja voiteluöljyjärjestelmä.

Alennusvaihde on hyvin herkkä vaurioitumaan, mikäli sitä ei ole asennettu oikeaan asentoon tai se pääsee liikkumaan. Siksi se pitää asentaa vankasti lujalle perustalle. Mikäli aluksella käytetään akseligenaattoreita sähkön tuottamiseen, vaatii se myös alennusvaihteelta erilaisia ratkaisuja. Akseligenaattorit vaativat erikoisratkaisuja muun muassa joustavalta kytkimeltä sekä alennusvaihteen pyörimisnopeuteen liittyviltä seikoilta.

3.4.3 Joustava kytkin



Kuva 5: Joustava kytkin [46]

Alusten propulsiojärjestelmissä voi olla erilaisia kytkimiä, jotka liittyvät vääntömomentin välittämiseen eteenpäin ongelmallisissa tapauksissa. Käsittelen tässä kohdassa suppeasti joustavan kytkimen periaatteen.

Joustava kytkin (elastic coupling) on akselien väliin asennettava osa, joka sallii pienet liikkeet ja vääntymät. Karkeasti sanottuna joustava kytkin on kuin kahden akselin väliin laitettava kuminpala, joka on metallisia osia taipuisampaa ja estää näin mahdollisia vääntövaurioita. Joustavia kytkimiä käytetään korjaamaan pieniä siirtymiä ja epätarkkuuksia. Akselien välillä esiintyy aksiaali-, radiaali- ja kulmasiirtymiä [15]. Joustavan kytkimen tehtävänä on siirtymien salliminen, ja sen rakenteen täytyy kestää niitä. Erilaisiin tarkoituksiin on monia erilaisia kytkinratkaisuja. Pääsääntöisesti joustavia kytkimiä on kahdenlaisia, joista toiset ovat vääntöjäykkiä ja toiset vääntöjoustavia kytkimiä. Kytkimien rakenteet ovat myös erilaisia, joten valittaessa kytkintä tulee myös huomioida sen kestävyys eri olosuhteissa. Kuva joustavan kytkimen toimintaperiaatteesta on liitteenä 3.

3.4.4 Potkuriakseli

Potkuriakseli (propeller shaft) on kappale, jonka tehtävänä on siirtää pääkoneen tuottama pyörimisvoima potkurille. Akseliin kohdistuu myös potkurin työntövoima [9]. Akseliin kohdistuvien voimien vuoksi se tulee suunnitella erittäin kestäväksi. Potkuriakseli voi olla joskus hyvinkin pitkä, sillä sen pituus riippuu täysin pääkoneen sijoituksesta ja aluksen pituudesta. Periaatteessa potkuriakseli on yhtä pitkä, kuin aluksen pääkoneen ja potkurin välinen matka. Nykyään alukset pyritään rakentamaan niin, että tuo matka olisi mahdollisimman pieni. Perinteisen rahtilaivan akseli johto oli pitkä, koska ainoa voimalaite sijaitsi keskilaivassa. Tuotantorajoitusten ja käsiteltävyyden takia akseli johto jaettiin 5-8 m pitkiin väliakselihin ja potkurin akseliin, jonka päähän potkuri kiinnitettiin [15]. Pitkä matka vaatii siis akselin osittamista väliakselihin, sillä yhtenäistä pitkä akseli on vaikea valmistaa ja käsitellä. Mikäli yhtenäinen akseli vaurioituisi, tulisi koko akseli vaihtaa, ja se olisi perin työlästä. Silti väliakselitkaan eivät ole suosittuja, sillä ne tekevät voimansiirtomatka pidemmän ja tuovat järjestelmään lisää heikkoja liitoskohtia. Pitkän akselijohdon mitoittaminen, laakerointi ja linjaus ovat myös vaikeaa. Eräissä tapauksissa akseli johto voi olla jopa hyvin lyhyt tai sitä ei tarvita ollenkaan. Näissä tapauksissa on yleensä kyseessä vesisuihku- tai potkurilaite. Niillä voidaan saavuttaa

tiettyjä etuja pitkäakseliseen potkuripropulsioon nähden, kuten tilan säästämistä. Toisaalta akselijohto on suhteessa halpa kone-elin [15]. Tämä johtuu siitä, että akseli on rakenteeltaan yksinkertainen.

Potkuriakseli sijoittuu alennusvaihteen ja potkurin välille suurin piirtein tasaisesti. Akselijohto on yleensä köliviivan suuntainen [15]. Tämä pätee yksipotkurisessa järjestelmässä. Kahden tai useamman pääkoneen tullessa kyseeseen akselilinjat ovat yleensä hieman vinossa toisiinsa nähden. Näin pyritään optimoimaan alukselle mahdollisimman hyvä ohjailukyky, nopeus ja potkurien hyötysuhde. Kyseessä voi olla myös pääkoneiden sijoittelu konehuoneessa. Akselijohto on yleensä suorassa linjassa vaihteesta potkuriin, mutta se voi olla joskus hieman kallelleen asennettu. Akselijohto kohoaa toisinaan keulaan $0,5^{\circ}$ - 2° kaltevuudella, jottei vaihteen tai moottorin alle tarvita kaksoispohjaa heikentävää leikkausta [15]. Myös muita kaltevuustapauksia on olemassa, mutta ne saattavat vaatia erityisominaisuuksia myös muilta propulsiojärjestelmän osilta.

Potkuriakselin halkaisijoista määrätään luokituslaitoksien säännöissä. Halkaisijan suuruuteen vaikuttavat aluksen jääluokitus ja potkuriakselin valmistusmateriaali. Säättösiipipotkuri edellyttää akselin poraamisen ontoksi [15]. Tämä johtuu siitä, että säättösiipipotkurin akselijohdon sisällä kulkee lapojen säätämiseen tarvittavaa hydraulioiljyä. Järjestelmän mukaan akseli voi olla joko kokonaan tai osittain ontto. Tämän takia akselin halkaisijaa on suurennettava, jotta se kestäisi vaaditut minimirasitukset.

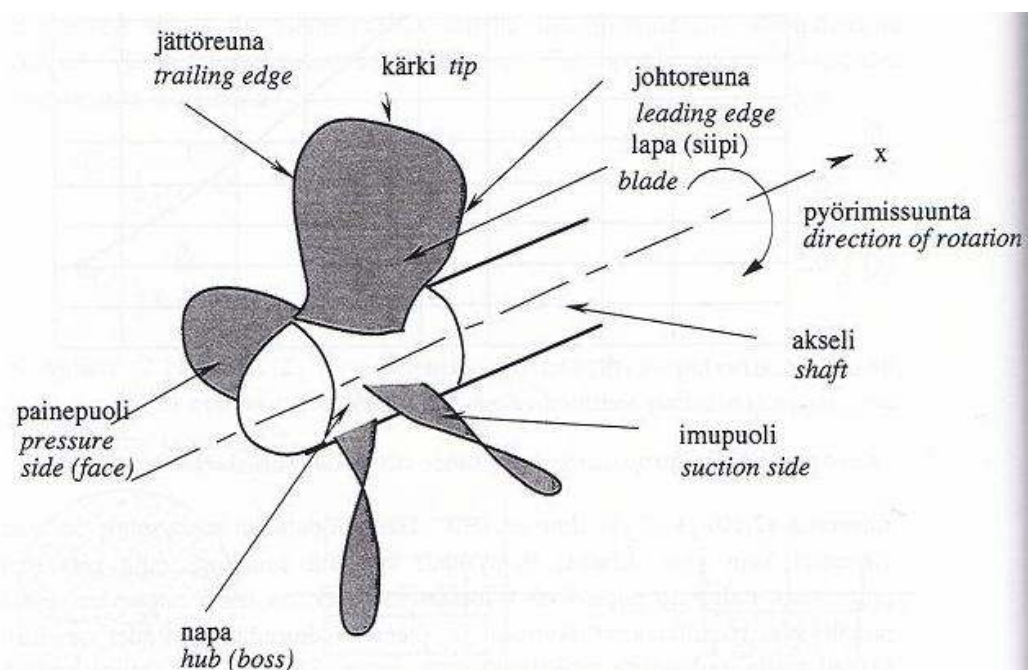
Potkuriakselin peräosassa ennen potkuria on hylsä. Hylsän tehtävä on laakeroida potkuriakselin peräpää ja estää meriveden pääsy alukseen ja laakeriin. Hylsälaakerit ovat öljy- tai vesivoideltuja liukulaakereita [15]. Voitelutapa määrää muun muassa hylsän rakenteen, tiivistämisen ja paineen. Vesivoideltu hylsä ei ole yhtä herkkä vaurioille ja epäpuhtauksille kuin öljyvoideltu hylsä, mutta veden voiteluominaisuudet ovat huonommat. Molemmissa ratkaisuissa on omat etunsa ja haittansa, joten on aluskohtaista, kumpi niistä on käytännöllisempi. Hylsälle on olemassa myös erikoisratkaisuja, mutta ne ovat monimutkaisempia ja kalliimpia.

Hylsän ja alennusvaihteen välillä kulkevaa akselia tuetaan kannatuslaakereilla. Kannatuslaakereita asennetaan tietty määrä akselin pituuden mukaan. Tavallisesti kullakin väliakselilla on yksi kannatuslaakeri, jolloin niiden etäisyydeksi tulee 10-15

kertaa akselin halkaisija [15]. Laakerit kannattavat akselia, mutta ne myös pitävät sitä paikoillaan. Laakereiden ja akselin välissä kulkee voiteluöljyä, jonka tehtävänä on jäähdyttää osia ja estää kitkan muodostuminen. Erillisellä painelaakerilla voidaan saavuttaa parempi voitelu ja öljynsyöttö. Se on kuitenkin herkempi vaurioitumaan laakeripesän kallistuessa. Siksi erillinen painelaakeri pyritään kiinnittämään akselin keskitasossa ja tekemään perusta tukevaksi [15].

3.4.5 Potkuri

Ruotsalais-amerikkalainen insinööri John Ericsson (1803-1889) suunnitteli 1836 laivan potkurin, joka vielä nykyäänkin on yleisin propulsori laivoissa. Potkuri (propeller) on ruuvimainen, vähintään kaksisiipinen pyörivä kappale, jonka tehtävänä on saada aikaan tietyn aineen virtaus. Tämä saadaan aikaan niin, että pyörivä liike, joka tulee akselilta potkuriin, muunnetaan potkurilla työnnöksi [3]. Potkurista saatetaan puhua myös siipipyöränä, mutta laivojen yhteydessä sen nimityksenä käytetään sanaa potkuri. Laivoissa olevien potkurien siipiä kutsutaan lavoiksi. Laivan potkurin lapojen määrä vaihtelee laivan koon ja käyttötarkoituksen mukaan. Yleisin ratkaisu on kolmelapainen potkuri, jossa yhdistyvät parhaiten potkurin tasapaino ja tehokkuus [9]. Lavat ovat yleensä toisiinsa nähden symmetriset. Potkurin pyöriessä lapojen eri puolille muodostuu paine-ero, joka aiheuttaa potkuriin eteenpäin suuntautuvan voiman. Potkuri muistuttaa useilla kielillä sanaa "propelli", joka tulee latinan sanasta propellere, ajaa eteenpäin [55].

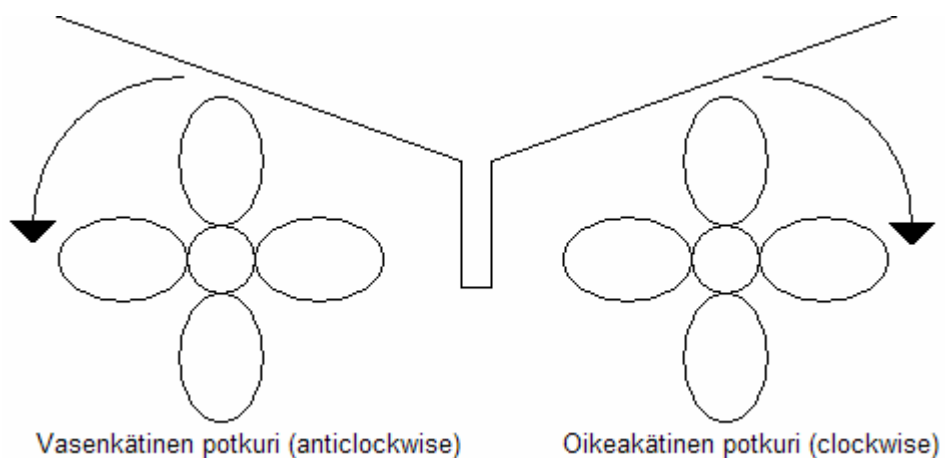


Kuva 6: Oikeakätinen ruuvipotkuri [25]

Potkuri saa aikaan tietyn nestemäisen tai kaasumaisen aineen virtauksen. Laivan potkurin pyöriessä se siirtää tietyn määrän vettä taakseen. Veden virtauksen määrä riippuu potkurin koosta, sen pyörimisnopeudesta sekä potkurin noususta. Potkurin nousulla tarkoitetaan potkurin kulkemaa matkaa yhden kierroksen aikana, mikäli se kulkisi kiinteässä aineessa (esimerkiksi savi) [2, 3, 25]. Paras hyöty laivan potkurista saadaan, kun potkuri on suuri, sen nousu on optimoitu ja sen käyntikierrokset ovat pienet. Potkurin suuruus ja kierrosnopeus riippuvat täysin aluksesta. Pienissä veneissä ei voida käyttää järin suuria laitteita, joten niissä on tyydyttävä nopeakierroksisiin ja pienipotkurisiin vaihtoehtoihin. Nämä ratkaisut voivat antaa suuren vauhdin ja kiihtyvyyden, mutta niiden taloudellisuus ja hyötysuhde ovat huonot.

Pelkkä potkurin synnyttämä veden virtaus ei vielä itsessään saa laivaa kulkemaan eteenpäin. Jotta alus liikkuisi, sen täytyy voittaa sen kulkuvastus. Kulkuvastuksia ovat laivaan vaikuttavat voimat. Näitä voivat olla esimerkiksi tuuli ja merenkäynti. Jotta alus kulkisi vakionopeudella, aluksen kulkuvastuksen ja propulsioon työntön tulee olla yhtä suuria [25].

Potkureista puhutaan yleensä oikea- tai vasenkätisinä potkureina, mikä tarkoittaa potkurin pyörimissuuntaa [9, 36]. Potkuri on oikeakätinen, mikäli se perästä katsottuna pyörii myötäpäivään (clockwise). Tämä ratkaisu on vasenkätistä yleisempi, jolloin potkuri pyörii vastapäivään (anticlockwise). Mikäli aluksessa on kaksi potkuria, on yleisimpänä ratkaisuna asentaa molemmat vaihtoehdot.



Kuva 7: Kaksipotkurisen aluksen potkurit perästä nähtynä

On olemassa monia erilaisia potkurisovelluksia. Joissakin tapauksissa tulevat kyseeseen esimerkiksi peräkkäin asennettavat, eri suuntiin pyörivät potkurit. Kaksi yleisintä potkuriratkaisua on kiinteäsiipinen ja säätösiipinen potkuri.

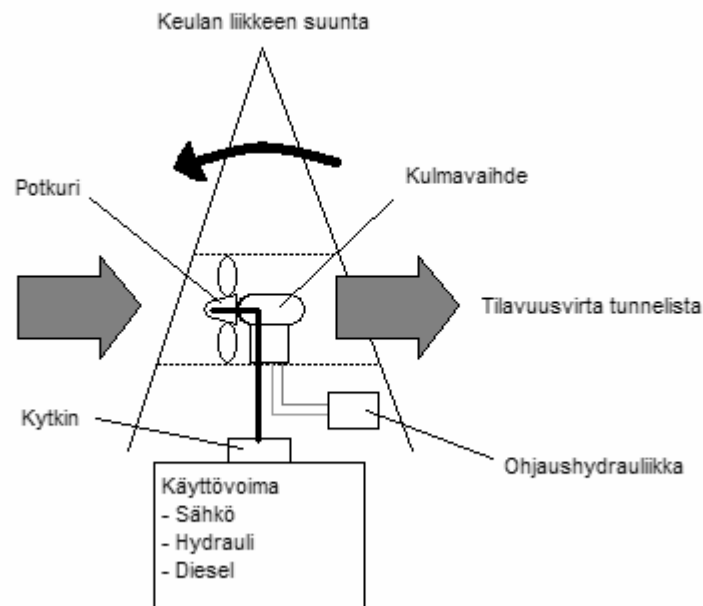
Kiinteäsiipisessä potkurissa (fixed-pitch propeller) potkurin lavat ovat kiinteästi kiinni potkurin navassa. Lapojen nousu on näin vakio. Mikäli aluksella halutaan kulkea taaksepäin, on potkurin pyörimissuuntaa vaihdettava. Nykyaikana kiinteälapaiset potkurit valmistetaan lähes poikkeuksetta niin, että koko potkuri on valettu yhtenäiseksi kappaleeksi yhdessä muotissa [15]. On olemassa myös versioita, joissa lavat pultataan jälkikäteen napaan, mutta tämä heikentää potkurin rakennetta. Kiinteälapaisessa potkurissa voi olla lapoja kahdesta jopa seitsemään. Potkurin napasuhde on pieni, mistä seuraa hyvä hyötysuhde [15]. Kiinteäsiipinen potkuri on yleisin aluksissa käytetty potkurityyppi [3].

Säätösiipisessä potkurissa (controllable-pitch propeller) potkurin lavat ovat kiinnitetty nivellettyinä potkurin napaan niin, että lapojen nousua voidaan säätää. Tämä tarjoaa mahdollisuuden käyttää samaa kierrosnopeutta eri nopeudella säätämällä lapojen kulman suuruutta. Säätösiipipotkurilla peruuttaminen on kiinteäsiipistä helpompaa, sillä potkurin pyörimissuuntaa ei tarvitse vaihtaa. Tällöin aluksella ei myöskään tarvita alennusvaihdetta, joka sallii pyörimissuunnan vaihtamisen [36]. Säätösiipisen potkurin peruutusteho on kuitenkin huonompi [15]. Säätösiipisen potkurin merkittävimmät edut ovat portaaton tehonsäätö, pysähtymismatkan lyheneminen ja päämoottorien kuormituksen sekä käynnistyskertojen väheneminen. Haittoina säätösiipisestä potkurista mainittakoon, että sen rakenne on heikompi ja monimutkaisempi sekä sen hinta ja huoltotarve ovat kiinteäsiipistä potkuria korkeammat [15, 38]. Säätösiipisen potkurin napa on säätölaitteiston takia suurempi, joten sen hyötysuhde on kiinteäsiipistä huonompi.

3.4.6 Keulapotkuri

Keulapotkuri on aluksen poikittaistyöntölaitteisiin kuuluva propulsori. Poikittaistyöntölaitteita käytetään aluksen satamakäsittelyyn eli irroitus- ja kiinnitystilanteissa tai esimerkiksi ankkuroitaessa [27]. Poikittaistyöntölaitteiksi luetaan keula- ja peräpotkurit. Laitteiden nimitys riippuu niiden sijoituksesta laivassa, mutta toiminnallisesti ja rakenteellisesti ne ovat samanlaisia. Suurissa aluksissa ohjauspotkureita on muissakin rungon osissa kuin vain keulassa ja perässä [27].

Keulapotkureita käytetään lähes kaikissa suurissa aluksissa, kuten kauppa-aluksissa, sota-aluksissa ja hinaajissa. Myös joissain veneissä käytetään keulapotkuria.



Kuva 8: Keulapotkurin toimintaperiaate [30]

Keulapotkuri on rakennettu aluksen keulaan ja sen tehtävänä on mahdollistaa aluksen keulan sivuttaisliike. Se on yleensä sijoitettu tunneliin, joka on rakennettu aluksen keulaosaan konstruktiivovesiviivan alapuolelle. Tunneli on halkaisijaltaan hieman suurempi kuin itse potkuri, yleensä noin 1-2 metriä aluksen koon mukaan. Tunneli on rakennettu niin, että se on täsmälleen poikkilinjassa aluksen keskilinjaan nähden. Kun keulapotkuri pyörii tunnelissa, se siirtää vettä tunnelin toiselta puolelta toiselle ja saa aluksen kääntymään haluttuun suuntaan veden virtauksen mukaan. Tunneli on yleensä suojattu metalliristikolla, jotta meressä olevat suuret kiinteät esineet, esimerkiksi jäälohkot, eivät pääsisi potkurijärjestelmään. Se pienentää myös laivan kulkuvastusta [38]. Lapoja keulapotkurissa on yleensä kolme tai neljä. Potkurin materiaalina on metalli, joka kestää hyvin kulutusta ja kavitaatiota, yleensä pronssi tai jokin erikoisseos. Tunneliin asennetaan usein paljon sinkki- tai alumiinianodeja, sillä tunneli on todella herkkä kulumiselle. Anodit suojaavat tunnelia syöpymiseltä. Potkureita on tunnelissa yleensä yksi, joskin myös kaksipotkurisia vaihtoehtoja on kehitelty [51]. Nämä eivät tosin ole hyötysuhteeltaan paljonkaan parempia, ja lisäksi laitteiden kustannukset ovat suuremmat niiden monimutkaisen rakenteen vuoksi.

Keulapotkuri voi olla kiinteä- tai säätösiipilapainen [15]. Säätösiipilapainen on mutkikkaampi ratkaisu ja herkempi vaurioille, joskin siinä ovat omat etunsa. Sen ei tarvitse pyöriä kuin yhteen suuntaan, sillä lapakulman vaihtamisella säädellään työntövoiman suuruutta ja suuntaa. Kiinteälapaisen potkurin tulee pyöriä molempiin suuntiin. Sen työntövoiman suuruutta ja suuntaa säädellään pyörimissuunnalla ja nopeudella [15, 38]. Voimanlähteenä keulaohjausjärjestelmällä on yleensä sähkömoottori, mutta myös dieselmoottoreita ja hydraulikoneikkoja on käytössä [15, 27].

Poikittaistunnelissa sijaitseva keulapotkuri on yleisin keulapotkurityyppi. Sen etuja ovat halpa hinta, yksinkertaisuus, suojainen sijainti ja se, ettei laite lisää syväystä. Huonoja puolia ovat pieni työntön ja tehon suhde, työntö vain kahteen suuntaan, meluisuus ja värähtelyä aiheuttava vaikutus runkoon [38]. On olemassa myös vaihtoehtoisia järjestelmiä, kuten vesisuihkulla toimiva potkuri ja 360 astetta kääntyvä kompassipotkurilaitteisto [27, 30, 38]. Koska tekniikka on kehittynyt ja vaatimukset kasvaneet, rakennetaan nykyään yhä enemmän näiden mallien yhdistelmiä. Näin saadaan hyvät mahdollisuudet ohjailta laivaa mitä hankalimpiin paikkoihin.

3.5 Potkuripropulsiojärjestelmän ominaisuuksista

3.5.1 Tehot ja hyötysuhteet

Eräs keino selvittää aluksen pääkoneelta vaadittava teho on käyttää amiraliteetin yhtälöä. Amiraliteetin yhtälö on seuraavanlainen [47]:

$$P = \frac{V^3}{C} \cdot \nabla^{\frac{2}{3}}$$

Tässä laskukaavassa:

P = akseliteho (kW)

V = alukselta haluttu nopeus (solmuina)

C = amiraliteetin vakio

∇ = aluksen tilavuusuppouma (m³)

Amiraliteetin vakio C on yhtälössä käytettävä vastuskerroin. Mikäli tämä arvo tiedetään, antaa laskukaava tarkan vastauksen vaadituksi tehoksi. Amiraliteetin vakio ratkaistaan normaalisti mallikokeilla, ja se riippuu rungon muodosta (kauppalaivoilla C= 270-550).

Aluksen tilavuusuppouma saadaan puolestaan selville kaavalla [47]:

$$\nabla = \frac{\Delta}{\rho}$$

Tässä laskukaavassa:

∇ = aluksen tilavuusuppouma (m³)

Δ = aluksen massa (kg)

ρ = veden tiheys (1005 kg/m³)

Toinen keino laskea tarvittava pääkonetehto alukselle on käyttää kaavaa, jolla huomioidaan myös jäissä kulkemisen vaatimukset. Apualuksilta vaaditaan ympärivuotista toimintamahdollisuutta, joten tämä laskukeino antanee luotettavamman tuloksen. Tällä kaavalla saataneen vastaukseksi huomattavasti suurempi teho vaatimus kuin amiraliteetin yhtälöllä, mutta molemmista kaavoista saatuja vastauksia on hyvä verrata keskenään. Kaava on seuraavanlainen [26]:

$$P_e = K_e \frac{(R_{CH} / 1000)^{\frac{3}{2}}}{D_P}$$

Tässä kaavassa:

P_E = konetehto (kW)

K_E = potkurista riippuva kerroin

R_{CH} = aluksen aiheuttama vastus (N)

D_P = potkurin halkaisija (m)

Arvo K_E määräytyy kaavassa seuraavan taulukon mukaan:

Potkuri- tai koneistotyyppi	Säätösiipipotkuri tai sähköinen tai hydraulinen käyttökoneisto	Kiinteäsiipinen potkuri
1 potkuri	2,03	2,26
2 potkuria	1,44	1,60
3 potkuria	1,18	1,31

Taulukko 1: K_E :n arvot tavanomaisissa kuljetuskoneistoissa [26]

Arvo R_{CH} on aluksen aiheuttama vastus murretussa jääuomassa, jossa on jäänyt pintakerros [26]. Se määräytyy seuraavan kaavan mukaan:

$$R_{CH} = C_1 + C_2 + C_3 C_\mu (H_F + H_M)^2 (B + C_\psi H_F) + C_4 L_{PAR} H_F^2 + C_5 \left(\frac{LT}{B^2}\right)^3 \frac{A_{wf}}{L}$$

Tässä kaavassa [26]:

$C_\mu = 0,15 \cos \varphi^2 + \sin \varphi \sin \alpha$, $C_\mu =$ valitaan yhtä suureksi tai suuremmaksi kuin 0,45

$C_\psi = 0,047 \cdot \psi - 2,115$ ja $C_\psi = 0$, kun ψ on suurempi tai yhtä suuri kuin 45°

$H_F =$ keulan syrjään työntämän jäämurskakerroksen paksuus [m]

$$H_F = 0,26 + (H_M B)^{0,5}$$

$H_M =$ jäämurskan paksuus keskiuomassa [m]

$$H_M = 1,0 \text{ jääluokissa IA ja IA Super}$$

$$= 0,8 \text{ jääluokassa IB}$$

$$= 0,6 \text{ jääluokassa IC}$$

$B =$ aluksen suurin leveys [m]

$L_{PAR} =$ keskilaivan yhdensuuntaisen osan pituus [m]

$L =$ aluksen perpendikkelipituus [m]

$T =$ aluksen jääluokkasyväys [m]

$A_{wf} =$ keulan vesiviivan pinta-ala [m²]

$$C_3 = 845 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{s}^2)$$

$$C_4 = 42 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{s}^2)$$

$$C_5 = 825 \text{ kg}/\text{s}^2$$

$\alpha =$ vesiviivan kulma kohdassa $B/4$ [astetta]

$\varphi_1 =$ keulan kallistuskulma keskiviivan kohdalla [astetta]

$\varphi_2 =$ keulan kallistuskulma kohdassa $B/4$ [astetta]

$$\psi = \arctan\left(\frac{\tan \varphi_2}{\sin \alpha}\right)$$

$\left(\frac{LT}{B^2}\right)^3$ ei oteta pienemmäksi kuin 5, eikä suuremmaksi kuin 20.

C_1 ja C_2 huomioivat jäämurskan uudelleen jäätyneen ylemmän kerroksen ja ne voi ottaa nolllaksi jääluokille IA, IB ja IC [26]. Mikäli kaavan joitakin arvoja on vaikeaa määrittellä, on myös vaihtoehtoinen kaava:

$$R_{CH} = C_1 + C_2 + C_3 (H_F + H_M)^2 (B + 0,658 H_F) + C_4 L H_F^2 + C_5 \left(\frac{LT}{B^2}\right)^3 \frac{B}{4}$$

Jossa C:n eri arvot ovat:

$$C_3 = 460 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{s}^2)$$

$$C_4 = 18,7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{s}^2)$$

$$C_5 = 825 \text{ kg}/\text{s}^2$$

Jääluokassa IA voidaan $C_{1:n}$ ja $C_{2:n}$ arvoksi ottaa edelleen nolla. Näillä on merkitystä vain laskettaessa IA Super –jääluokan aluksen laskuja.

Aluksen propulsioon vaatima teho koneen laipassa voidaan määrittää seuraavalla kaavalla [38]:

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

Tässä kaavassa:

P_B = propulsioteho

P_D = potkuriteho

η_S = akselihyötysuhde

Akselihyötysuhde on noin 0,98 lyhyellä akselilinjalla ilman alennusvaihdetta ja noin 0,96 alennusvaihteen kanssa [38]. Potkuriteho saadaan selville kaavalla [38]:

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

Tässä kaavassa:

P_D = potkuriteho

P_E = hinausteho

η_D = propulsiohyötysuhde

Jotta saisimme selville potkuritehon laskemiseen käytettävät arvot, voimme selvittää niitä edelleen yksinkertaisilla kaavoilla. Hinausteho saadaan kaavalla [38]:

$$P_E = R_{TS} \cdot V_S$$

Tässä kaavassa:

P_E = hinausteho

R_{TS} = laivan kokonaisvastus

V_S = laivan nopeus

Propulsiohyötysuhde saadaan kertomalla kaikki siihen vaikuttavat hyötysuhdetekijät keskenään. Hyötysuhteen tarkoituksena on kertoa, kuinka paljon energiaa käytetään hyötykäyttöön ja mihin sitä häviää.

Propulsiohyötysuhde saadaan kaavalla [38]:

$$\eta_D = \eta_O \eta_R \eta_H = \eta_B \eta_H$$

Tässä kaavassa:

η_D = propulsiohyötysuhde

η_O = potkurin avovesihyötysuhde

η_R = suhteellinen pyörimishyötysuhde

η_H = rungon hyötysuhde

η_B = potkurin hyötysuhde laivassa

Mikäli edelleen tarvitaan tarkempia arvoja rungon hyötysuhteen selvittämiseksi, voidaan se selvittää seuraavien kaavojen avulla [38]:

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

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

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

Joissa:

η_H = rungon hyötysuhde

t = työnnon vähennyskerroin (yksipotkurisissa 0,05-0,35 / kaksipotkurisissa 0,02-0,25)

T = potkurin työntö

w = vanavesikerroin (yksipotkurisissa 0,15-0,60 / kaksipotkurisessa 0,05-0,25)

V_A = potkurin kohtaama veden nopeus

V_S = laivan nopeus

R_T = laivan kokonaisvastus $R_T = R_W + R_R$ (jäännösvastus + viskoosivastus)

Laivan kokonaisvastuksen laskeminen on työläs ja monimutkainen prosessi. Vastuksen määrittäminen kohtuullisen tarkasti suoraan laskemalla on toistaiseksi lähes mahdotonta muuten kuin poikkeustapauksissa [38]. Laivan kokonaisvastuksen tietäminen on kuitenkin yksi tärkeimpiä perusteita, jotta voimme määrittää alukselle sen tehoarvoja. Laivan kokonaisvastus pyritään nykyään määrittämään mallikokeiden avulla. Aluksesta rakennetaan pienoismalli, joka on saman muotoinen oikean aluksen kanssa. Tällä pienoismallilla tehdään vetokokeita vesialtaassa, joissa pyritään selvittämään aluksen vastustekijöitä. Ongelmaksi muodostui ja ongelma on

edelleen mallin vastus- ja konetehoarvojen siirtäminen laivan täyteen mittakaavaan riittävän tarkasti ja luotettavasti [38]. Mitä erikoisempia ratkaisuja aluksessa on, sitä vaikeampaa on määrittää tarkkoja kertoimia eri arvoille. Koska laivan vastuksen määrittäminen on selvästi monimutkainen, pitkäaikainen ja laboratorio-olosuhteita vaativa prosessi, emme paneudu aiheeseen tarkemmin tässä työssä.

3.5.2 Potkuri

Potkurin yksityiskohtaisen suunnittelun suorittaa yleensä potkurin valmistaja [25]. Tämän vuoksi luvussa ei paneuduta yksityiskohtaisesti potkurin eri arvojen määrittämiseen. Potkurin suunnittelu on monimutkainen prosessi, ja sen selvittämiseen tarvitaan monia yksityiskohtaisia laskukaavoja. Tässä luvussa esitellään pääosin potkurin geometriaa.

Potkurin tulee vastata kahteen tavoitteeseen. Sen pitää sopia yhteen moottorin tehon ja kierrosluvun sekä aluksen koon ja nopeuden kanssa [9]. Potkurin geometriset ominaisuudet riippuvat potkurille asetetusta tavoitetyönnöstä ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Rajoittavina tekijöinä ovat potkurin halkaisija ja teho [25]. Potkuria suunniteltaessa pyritään siis monen tekijän summana optimoimaan potkurista sellainen osa järjestelmää, joka luo pyöriessään geometriallaan halutun mukaisen työnnön. Potkurin geometriaa ei voida suoraan optimoida ainoastaan halkaisijan ja tehon rajoittamana, sillä todellisuudessa työntöön vaikuttaa myös aluksen vanavesi. Nykyään potkurisuunnittelun laskelmilla voidaan huomioida kaikki nämä tekijät optimoinnissa. Laskelmien epätarkkuus on kuitenkin sitä luokkaa, että niiden lisäksi tarvitaan mallikokeita [25].

Potkurin nousu kertoo etäisyyden, minkä verran potkuri etenisi yhden kierroksen aikana kiinteässä aineessa. Potkurin nousuun vaikuttaa lapojen kulmien suuruus ja potkurin halkaisija. Nousu ilmoitetaan yleensä P/D -lukuna. Tässä P tarkoittaa potkurin yhden kierroksen aikana etenemää matkaa ja D potkurin halkaisijaa. Yleensä laivojen potkurien nousu vaihtelee 0,5-2,5 [9]. Potkurin nousu voidaan ilmaista myös nousukulmana seuraavan kaavan avulla [25]:

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

Tässä kaavassa:

Φ = nousukulma

P = potkurin etenemä matka yhden kierroksen aikana

D = potkurin halkaisija

r = potkurin säde

Kaavaa hyödynnetään enemmän kiinteäsiipiseen potkuriin, koska säätösiipipotkurin nousu on muutettavissa.

Potkurin geometriaa mallinnetaan erilaisilla nimityksillä ja määritelmillä. Potkurin pääosina ovat akseliin kiinnitettävä napa ja potkurin lavat. Potkurin lavoissa on paine- ja imupuoli. Painepuoli on sillä puolella potkuria, minne vettä työnnetään. Lavan vettä leikkaava sivu on johtoreuna, ja perässä tuleva puoli jättöreuna.

Potkurin ominaisuuksia kuvataan dimensiottomilla suureilla etenemisluku J , työntökerroin K_T ja momenttikerroin K_Q [15]. Ne saadaan seuraavilla kaavoilla [4, 15, 25, 38]:

$$J = \frac{V_A}{\omega/(2\pi)D} = \frac{V_A}{n \cdot D}$$

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

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

Näissä kaavoissa:

D = potkurin halkaisija

Q = potkurin vääntömomentti

n = potkurin pyörimisnopeus

ρ = veden tiheys

ω = potkurin kulmanopeus

T = potkurin työntövoima

V_A = potkurin etenemisnopeus (jossa huomioitu vanaveden vaikutus)

3.5.3 Melu, heräte ja kavitaatio

Käydessään aluksen koneet tuottavat paljon ääntä. Nämä äänet saavat yhdessä aikaan haitallista melua. Melu on ilman paineen vaihtelua, jonka ihminen aistii korvillaan. Melu on myös häiritsevää ääntä, joka voi olla haitallista ihmiselle. Melun vaikutuksia ihmiseen ovat psyykkinen kuormitus, levon tai unen häiriintyminen, puheen erottamisen vaikeutuminen, suorituskyvyn huononeminen ja hermostolliset muutokset [5]. Melulle altistumisesta on laadittu tarkkoja säädöksiä ja lakeja, joissa määrätään kuulosuojauksen käytöstä ja työturvallisuudesta. Päivittäisen meluallistuksen alempi toiminta-arvo on 80 dB, ylempi toiminta-arvo on 85 dB, sekä päivittäisen meluallistuksen raja-arvo on 87 dB [7]. Jos melun jatkuva A-äänitaso ylittää 85 dB, kuulovaurion riski on niin suuri, että tarvitaan erityinen meluntorjuntaohjelma [5]. Seuraavassa taulukossa on esitelty päivittäiset aikarajat, jotka vastaavat tätä arvoa.

Jatkuva A-äänitaso (dB)	Melussaoloaika
85	8 tuntia
88	4 "
91	2 "
94	1 tunti
97	30 minuuttia
100	15 "
103	8 "
106	4 "
109	2 "
112	1 minuutti
115	ei lainkaan

Taulukko 2: 85 dB:n altistustasoa vastaavat päivittäiset aikarajat [5]

Värähtely liittyy usein meluun. Voimme aistia koneiden tuottaman värähtelyn tuntoaistilla. Värähtelyn taajuus määrittää äänen korkeuden, jonka yksikkö on hertsi (Hz) [14]. Suurin osa laivassa kuulemistamme äänistä välittyy runkomeluna. Runkomelu välittyy koneelta kuulijalle alun matkaa rakenteiden värähtelynä, ilmamelu taasen kulkeutuu ilmasta rakenteiden läpi ilmaan [38].

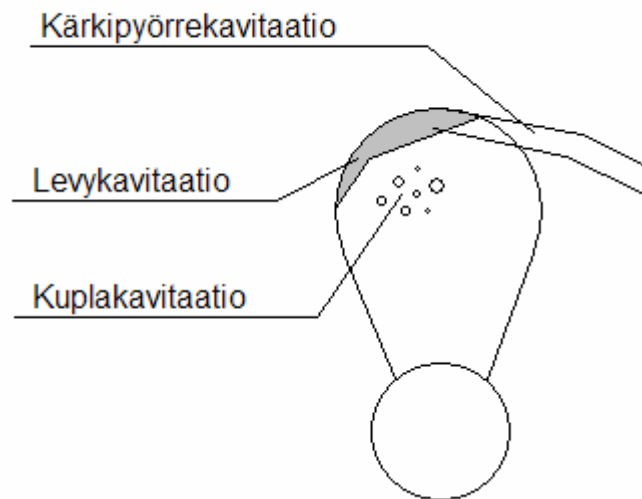
Melun yksikkö on dB (desibeli). Laskettaessa koneiden desibelimääriä tulee tietää, että melutasot lasketaan yhteen logaritmisesti. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että kahden samanarvoisen melulähteen yhteisvaikutus on 3dB suurempi kuin toisen yksinään [38]. Suunniteltaessa vaimennuksia eri koneille tulee siis vaimentaa meluisin vaihtoehto, jolloin vaimennuksen hyöty on parhain.

Aluksella melu vaikuttaa pääosin viihtyvyyteen ja työturvallisuuteen. Sota-aluksella melu ja värähtely ovat riskejä myös herätteinä. Mitä enemmän sota-alus luo melua, sitä alttiimpi se on herätemiinoille ja vedenalaisille kuuntelulaitteille. Akustisella herätteellä tarkoitetaan aluksen ja sen koneiston veteen synnyttämää ääntä, joka etenee vedessä pitkittäisenä aaltoliikkeenä [29]. Ääniherätteiksi jaetaan koneisto-, propulsio- ja runkoääni. Aluksen suurin melunlähde on propulsiojärjestelmä [11, 29, 38].

Eniten melua aluksella tuottaa pääkone. Sen aiheuttama spektri on hyvin laaja, sillä se sisältää kaikkia taajuuksia aina 8000Hz asti [38]. Keskinopeat dieselkoneet eroavat hieman hidaskäyntisistä dieselkoneista, sillä niiden tuottama ilmamelu on runsaampaa. Pääkoneen melua ei voi vaimentaa juuri muuten kuin asentamalla sen joustimien päälle [38]. Tällöin kone ei ole asennettu suoraan kiinni aluksen runkoon, mikä alentaa huomattavasti runkomelun määrää.

Toiseksi eniten melua tuottaa aluksen vaihteisto. Se tuottaa paljon ilma- ja runkomelua eri taajuuksilla. Vaihteiston hiljaisuuteen voidaan vaikuttaa eniten silloin, kun se valitaan. Hiljaiselle vaihteistolle ominaisia piirteitä ovat suuri hammasluku, suuret hammaspyörät, korkea viimeistelyaste, tukevat akselit sekä kansi [38]. Hammaspyörien tarkka viimeistelyhionta takaa hiljaisemmän melutason [14].

Potkurin tuottamaa melua voidaan vähentää muotoilemalla potkuria. Potkuri synnyttää sen kierrosluvun kerrannaistaajuuksia ja niiden monikertoja, jotka esiintyvät spektrin alapäässä [11]. Potkuri tuottaa eniten melua kavitoinnin seurauksena. Kavitoinnin määrä riippuu vanavesikentästä ja potkurin kuormituksesta [38]. Mitä nopeammin potkuri pyörii, sitä enemmän se kavitoi. Herätettä suurempi huolenaihe kavitoinnissa on, että se saa aikaan vaurioita potkurin pinnassa. Kavitoinnissa syntyvät kaasukuplat räjähtävät potkurin pinnassa, mikä saa aikaan äänen lisäksi värähtelyä, eroosiota ja työnnön heikentymistä [4]. Kuplan räjähdyspaine voi olla jopa 10000 baria, ja paineisku leviää voimakkaana meluna ympäristöön [11]. Mitä enemmän potkuri kavitoi ja mitä enemmän sitä kuormitetaan, sitä enemmän sen muotoilu kärsii. Tämän takia potkurin värähtely lisääntyy entisestään ja sen tasapaino häviää vähitellen [9].



Kuva 9: Potkurissa esiintyvät kavitaatiolajit

Potkurissa esiintyy kolmea erilaista kavitaatiolajia. Levykavitaatio on ohut lasimainen kerros, joka on kiinni lavassa ja sisältää höyryn, veden ja kaasun seoksen. Levykavitaation tilavuuden muutoksiin liittyy hydrodyaamisia paineita, jotka voivat aiheuttaa alukselle värähtelyongelmia. Levykavitaatioon voi liittyä kuplakavitaatio, jossa kuplat ajautuvat korkean paineen alueelle ja hajoavat erittäin nopeasti. Tästä seuranneet painepulssit saavat aikaan meluhaittoja sekä potkurilapojen eroosiota. Lavan kärjessä ja juuressa voi esiintyä kärki- ja juuripyörrekavitaatiota, jota syntyy, mikäli aineen pyörre on tarpeeksi voimakasta. Näistä voi seurata potkurin osien syöpymistä. [25, 38]

Kavitaatiota esiintyy yleensä potkurin imupuolella. Säättösiipipotkurilla on mahdollista saada aikaan kavitaatiota myös potkurin painepuolelle. Painepuolen kavitaatiota tulisi aina välttää, sillä se aiheuttaa hyvin nopeasti potkurin lapojen eroosiota [38]. Kavitaatio on yleinen ongelma pinta-aluksilla, eikä sitä voida juuri välttää. Potkurikavitaation aiheuttamassa paineessa esiintyy hitaasti vaimenevaa melua, jonka taajuus ulottuu kymmeniin kilohertzeihin. Tämä melu on haitaksi aluksen miehistölle ja nopeuttaa sota-aluksien kohdalla niiden havaitsemista [38].

Ohjauspotkurit aiheuttavat voimakasta runkomelua, koska ne tavallisesti mitoitetaan taloudellisin perustein eikä melun kannalta [38]. Niitä käytetään muita melunlähteitä harvemmin, minkä vuoksi niiden aiheuttama melu jää vähemmälle huomiolle. Ohjauspotkurin melua voidaan vaimentaa ostamalla ylittehoiva laite, jonka potkuria kuormitetaan vähän, tai asentamalla potkurille kaksoistunneli [38]. Runkomelua

voidaan vähentää niin, että ohjauspotkuria käyttävät koneikot asennetaan joustimien päälle.

3.5.4 Keulapotkurin mitoitus

Kun alukselle mitoitetaan keulapotkuria, tulee sille asettaa vaatimukseksi tuuliraja, jossa alusta pystytään vielä manöveeraamaan. Tämän lisäksi lähtöarvoiksi tarvitaan aluksen kokonaispituus, etäisyys perän ja keulapotkurin välillä, tuulipinta-ala sekä pisteet, joissa tuuli ja vääntömomentti vaikuttavat. Helpoin tapa laskea tarvittava työntövoima on asettaa tuulen voima 90° kulmaan alukseen nähden. Tämä on myös kulma, missä tuuli vaikuttaa eniten työntövoimaan. On aluskohtaista, mihin kohtaan aluksen kylkeä tuuli eniten vaikuttaa, mutta yleensä tuulen vaikutuspiste asetetaan keskelle kylkeä. Aluksen aerodynamiikka huomioidaan laskelmissa, ja siksi tuulipinta-alan yhteydessä käytetään vähennyskerrointa. Yleisin vähennyskerroin on 0,75 [30, 51].

Tarvittavan työntövoiman laskeminen aloitetaan selvittämällä tuulirajoitukseksi asetetun tuulen paine. Taulukko tuulen paineen arvoista on liitteenä 4. Tuulen paine saadaan kaavalla [30, 51]:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$$

Tässä kaavassa:

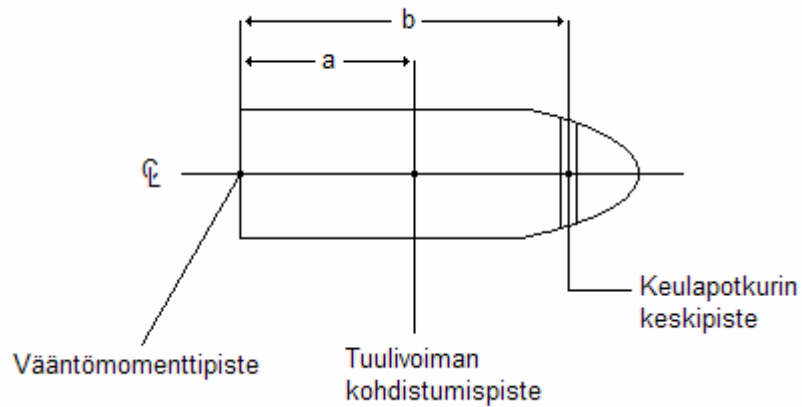
P = tuulen paine (N/m²)

ρ = ilman massa (1,28 kg/m³)

V = tuulen nopeus (m/s)

Tuulen nopeuden lisääntyessä tuulen paine kasvaa toiseen potenssiin [30]. Yleensä tuulivaatimus ilmoitetaan solmuissa, jolloin se täytyy muuntaa yksikköön ”metriä sekunnissa” (m/s):

$$1 \text{ solmu} = 1,852 \text{ km/h} = 0,5144 \text{ m/s}$$



Kuva 10: Vääntömomenttikaavio (laskujen mitat a ja b) [30]

Tarvittava vääntömomentti saadaan kaavalla [30, 51]:

$$T = P \cdot A \cdot x \cdot a$$

Tässä kaavassa:

T = vääntömomentti (Nm)

P = tuulen paine (N/m²)

A = aluksen kyljen tuulipinta-ala

x = käytetty vähennyskerroin (yleensä 0,75)

a = aluksen rotaatiopisteen (perä) ja tuulen vaikutuspisteen välinen etäisyys (m), missä yleensä käytetään arvona puolta aluksen kokonaispituudesta

Tarvittava työntövoima saadaan kaavalla [30, 51]:

$$F = \frac{T}{b}$$

Tässä kaavassa:

F = työntövoima (N)

T = vääntömomentti (Nm)

b = aluksen rotaatiopisteen (perä) ja keulapotkurin keskipisteen välinen etäisyys (m)

Tämän laskusarjan tuloksena saadaan selvitettyä, minkä suuruinen voima tarvitaan kyseisen kokoisen aluksen keulapotkurille, jotta se täyttäisi vaatimukset asetettua tuulirajaa vastaan.

3.6 Propulsion tulevaisuus

Laivan hydrodynamiikka on yksi kehityksen kohteena olevista asioista. Laivan kulkuvastuksen pienentäminen ja merikelpoisuuden parantaminen ovat tutkittavina yhdessä aluksen ohjailuominaisuuksien ja syväyksen kanssa. Tämä voi johtaa myös alusten propulsiojärjestelmien kehittymiseen. Siviilialuksilla käytetään yhä enemmän vesisuihkupropulsiota sekä viime aikoina yleistyneitä ruoripotkurilaitteita. Näitä ruoripotkurilaitteita kutsutaan yleensä nimellä POD. Niiden merkittävin ominaisuus on vaikutus aluksen ohjailuun. Laite kääntyy 360^o ja soveltuu erittäin hyvin aluksiin, joilta vaaditaan hyviä ohjausominaisuuksia ja erityisesti hyvää paikallapysymisen kykyä (huolto-, poraus- ja tutkimusaluksia) [25]. Ruoripotkuripropulsiosta ei ole vielä kokemuksia sota-aluksilla. Tutkimuksien kohteena ovat laitteen magneettinen heräte ja suurin mahdollinen huippunopeus [24]. POD-laitteet ovat toistaiseksi kalliita, ja niiden hyötysuhde on normaalia potkuripropulsiota huonompi, mutta niiden kehittyessä ne tulevat haastamaan muut propulsorivaihtoehdot.

Tulevaisuudessa taistelualuksen propulsion voimanlähteenä voi olla myös pelkästään sähkö. Yhdysvalloissa tutkitaan mahdollisuuksia rakentaa täysin sähköinen laiva. Yhdysvaltojen laivasto harkitsee vielä täysin sähköisten alusten rakentamista, koska kustannukset ja teknologiasta saatava hyöty eivät ole selvillä [35]. Tutkimuksia kuitenkin jatketaan edelleen. Myös tässä projektissa on mainittu POD-propulsio yhtenä tutkintakohteena. Sähköiset ruoripropulsiolaitteet ovat periaatteessa hyvin sopivia sota-aluksiin, joissa sovelletaan ”kokonaan sähköinen alus” –konseptia [24]. Ruoripotkurilaitteiden käyttöönottoa suunnitellaan Isossa-Britanniassa, Ranskassa, Hollannissa ja Belgiassa, missä niiden mahdollisuuksia on esitetty sotalaivaprojekteissa [8, 32, 37, 44]. Sähköpropulsio on luonnollinen valinta aluksissa, joiden tehontarve vaihtelee propulsion ja muiden tehonkuluttajien välillä [44]. Täyssähköinen ratkaisu on siis kuitenkin vielä kehitteillä nimenomaan taistelualuksiin, eikä sen käytöstä ole vielä kokemuksia.

Eräinä propulsioteknologian suurimpina tutkimusaiheina ovat vaihtoehdot, jotka eivät kuluta öljyä. Maailman öljyvarat ovat kovassa kulutuksessa ja niiden on ennustettu loppuvan pian. On ennustettu, että öljyn kulutuksen huippu sijoittuisi 2000-luvun alkuun. Mahdollisina seurauksina öljyhuipusta on katastrofi, taantuma ja ilmastonmuutos [56]. Katastrofilla ja taantumalla viitataan siihen, että öljyä tarvitaan nykyään paljon hyvin monessa eri kohteessa. Sen loppuminen vaikuttaisi välittömästi

koko ihmiskunnan elämään. Ongelmanratkaisuina voidaan nähdä biopolttoaineet ja uusi tekniikka [56]. Yhdysvaltojen laivastossa on tehty tutkimusta, jossa pyritään kartoittamaan erilaisia propulsiovaihtoehtoja, jotka säästäisivät öljyä. Tutkimuksen neljänä strategiana öljynkulutuksen vähentämiseen ovat laivaston laivojen energiankulutuksen pienentäminen, vaihtoehtoiset hiilivety-polttoaineet, ydinkäyttöinen propulsio sekä purje- ja aurinkovoima [6]. Öljyn ehtyessä nämä ratkaisut tulevat todennäköisimmin yleistymään aluksen propulsiovoimanlähdevaihtoehtoina.

Perinteinen ruuvipotkuri on kehittynyt jo sille tasolle, ettei merkittäviä parannuksia hyötysuhteeseen ole odotettavissa [44]. Ainoat mielenkiinnon kohteet keskittyvät potkurin materiaalin valintaan ja herätteen pienentämiseen.

Vesisuihkupropulsiohyötysuhde on isoilla kulkunopeuksilla ruuvipotkuria parempi ja sen herätteisyys on pienempi [24]. Apualuksilla vesisuihkupropulsio ei kuitenkaan korvaa potkuria, sillä sen hyötysuhde alhaisissa nopeuksissa on potkuria huonompi, sen hinta on kallis ja järjestelmän osat vaativat paljon tilaa.

Keulapotkurien kehitys riippuu paljon propulsiojärjestelmien kehityksestä. Ainakin perinteistä potkuripropulsiota käyttävissä aluksissa keulapotkuri tulee edelleen olemaan hyvä väline ohjailun parantamiseen. Veneen osia valmistava Vetus on viime aikoina kehittänyt hydrodynamiikkalaboratorio Marinin kanssa potkurimallin, jonka melutaso on markkinoiden muita malleja huomattavasti pienempi. Lisäksi uusissa potkureissa työntövoima on täysin sama kumpaankin suuntaan ja muotoilun ansiosta virrankulutus on saatu laskemaan jopa 10% [51]. Tällä hetkellä melu onkin yksi suurimmista haitoista keulapotkurin käytössä. Keula- (tai perä-) ohjauspotkurit aiheuttavat voimakasta runkomelua, koska ne tavallisesti mitoitetaan taloudellisin perustein eikä melun kannalta [38]. Keulapotkureissa on siis kehitettävää ainakin melun vähentämisen osalta.

4. APUALUKSEN PROPULSIOJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN

Tässä luvussa tutkitaan, millainen on ihanteellinen apualuksen propulsiojärjestelmä. Luvussa otetaan kantaa propulsiojärjestelmän rakenteeseen, propulsoreiden voimanlähteiden tehoon ja propulsiojärjestelmän melu- ja herätearvojen vaimentamiseen. Saatuja tuloksia verrataan Valas- ja Pansio-luokan alusten

ratkaisuihin, joiden pohjalta tehdään mahdollisia kehitysehdotuksia merivoimien apualusten järjestelmiin.

4.1 Järjestelmävalinnat

4.1.1 Pääkoneisto ja potkurityyppi

Kuten jo aiemmin perusteltiin, vesisuihkupropulsio ei sovellu suuren uppoumarunkoisen apualuksen propulsoriksi, enkä siksi tarkastele kyseistä propulsoria tässä luvussa. Kapteeniluutnantti Markku Ronkainen (Merivoimien Esikunta, Materiaaliosasto) kertoi haastattelussa 4.12.2006, mikä järjestelmä hänestä sopisi uudelle apualukselle. Hän perusteli kolmea propulsiojärjestelmää:

- Potkuripropulsio kiinteäsiipisellä potkurilla on perinteinen järjestelmä, jossa pääosat ovat pääkone, alennusvaihte, potkuriakseli, potkuri. Kustannuksiltaan edullisin vaihtoehto.
- Potkuripropulsio säätösiipisellä potkurilla on kuin edellinen järjestelmä, mutta potkurin lapoja voidaan säätää. Potkuri voidaan mitoittaa jäissäkulkua varten. Säätötekniikan vuoksi edellistä kalliimpi järjestelmä.
- POD-propulsio on 360^o:n ympärilyörivällä potkurilaitteella varustettu ratkaisu, jonka voimanlähteenä ovat dieselaggregaatit. Järjestelmä olisi sähköllä toimiva. Vaihtoehtoista kallein ratkaisu.

POD-propulsorit ovat vielä toistaiseksi melko harvinaisia. Ne ovat epävarma vaihtoehto nykypäivän apualukselle siksi, että merivoimilla ei ole riittävästi kokemuksia niistä. POD-propulsion tulevaisuus näyttää hyvältä, minkä vuoksi niitä tulisi tutkia enemmän lähitulevaisuudessa. Tutkimuksista saatujen tulosten perusteella voitaisiin suunnitella apualukselle sopiva POD-propulsori.

Tarkasteltavaksi jäävät potkuripropulsion vaihtoehdot eli kiinteäsiipinen ja säätösiipinen potkuri. Aiemmin selvitetty, apualuksen propulsiolle asetetut vaatimukset ovat avomeritoimintakyky, jäissäajokyky, luotettavuus sekä taloudellisuus.

Valas-luokan aluksilla on käytössä keskinopea dieselmoottori, mutta Pansio-luokan aluksilla on kaksi nopeakäyntistä dieselmoottoria. Apualuksen pääkoneeksi soveltuu siis keskinopea (350-1000rpm) tai nopea (yli 1000rpm) dieselmoottori. Hidaskäyntiset koneet ovat suuria ja painavia, eivätkä ne sovellu kuin suurimpien alusten käyttöön.

Päämoottorien tyyppi ja lukumäärä valitaan, kun potkurien lukumäärä ja tehontarve on päätetty [14]. Yleensä yksi moottori käyttää yhtä potkuria, jolloin pääkoneiden ja potkurien lukumäärä on sama. Suomen merivoimien apualukset eivät tule kehittymään niin suuriksi, että niissä tarvittaisiin kolmea pääkonetta ja potkuria. Pääkoneen valintaperusteista tärkein on riittävä teho. Muita vaikuttavia tekijöitä ovat hinta, käyttökustannukset, päämittarajoitukset, kuormitettavuus, luotettavuus ja melu [14]. Apualukselle riittävä pääkonetehto voidaan saavuttaa yhdellä keskinopealla pääkoneella. Etujen ja haittojen lisäksi tulee huomioida järjestelmävalinnan vaikutus koko alukseen [3]. Verrataan lyhyesti kahta vaihtoehtoa:

	Yksi pääkone ja potkuri	Kaksi pääkonetta ja potkuria
Hinta	Halpa	Kallis (kaksi järjestelmää)
Käyttökustannukset	Edulliset	Kalliit (kaksi konetta)
Päämittarajoitukset	Vaatii vähemmän tilaa	Vaatii enemmän tilaa
Kuormitettavuus	Vähemmän tehoa/vääntöä	Enemmän tehoa/vääntöä
Luotettavuus	Ei varajärjestelmää	Varajärjestelmä
Melu	Vähemmän	Enemmän
Pisteet	4	2

Taulukko 3: Järjestelmien vertailu

Yksinkertaisen vertailun perusteella apualukselle on suositeltavampaa asentaa yksi keskinopea pääkone. Vaikka vertailussa painotettaisiin apualuksen tärkeimpiä vaatimuksia, tulos olisi sama. Järjestelmän halpa hinta ja edulliset käyttökustannukset luovat taloudellisemman vaihtoehdon. Varajärjestelmän rakentaminen on toissijaista, sillä yhden pääkoneen luotettavuutta voidaan parantaa oikeanlaisella ja ennakoivalla huollolla.

Yksi nopeakäyntinen pääkone ei ole riittävä Valas- ja Pansio-luokkia vastaavan aluksen voimanlähteeksi, sillä sen vääntöominaisuudet ovat keskinopeaa konetta heikommat. On selvää, että mikäli alukselle asennettaisiin kaksi keskinopeaa konetta, olisivat kustannukset yhtä konetta kalliimmat. Mikäli kyseeseen tulisi kaksi nopeakäyntistä konetta, seuraisi siitä järjestelmän hyötysuhteen aleneminen ja mahdollinen polttoainekustannusten nouseminen. Lisäksi nopeakäyntiset pääkoneet ovat massaltaan kevyempiä, eikä koneita suunnitella toimimaan pitkiä jaksoja matalalla kuormituksella [15]. Pääkoneen keveys alentaa järjestelmän luotettavuutta vääntö- ja värähtelyominaisuuksien osalta etenkin nopeissa kuormituksen muutoksissa. Lisäksi järjestelmän kuormitettavuus olisi heikompaa kuormitusalueiden rajoituksien vuoksi.

Toinen järjestelmävalinnan keskeinen seikka on, valitaanko alukseen kiinteäsiipinen vai säätösiipinen potkuri. Suomen merivoimilla on kokemusta miinalaivoihin asennettavasta säätösiipipotkurista. Säätösiipipotkurien luotettavuus ja hyötysuhde ovatkin kehittyneet isoissa sota-aluksissa, joissa niiden ohjailukyky on tärkeä etu [15]. Apualuksissa tarkan ohjailun vaatimukset ovat kuitenkin toissijaisia. Verrataan lyhyesti myös näitä vaihtoehtoja. Koska potkureiden vertailussa on paljon huomioitavia seikkoja, painotan tuloksissa taloudellisuutta ja luotettavuutta antamalla painotetusta kohdasta kaksi pistettä paremmalle vaihtoehdolle.

	Kiinteäsiipinen potkuri	Säätösiipinen potkuri	Painotettava ominaisuus (2p)
Rakenne	Yksinkertainen	Mutkikas (nousunohjausjärjestelmä)	
Huollettavuus	Helpompaa (yksinkertainen rakenne)	Vaikeampaa (mutkikas rakenne ja enemmän osia)	
Hinta	Halvempi	Kalliimpi	X (taloudellisuus)
Hyötysuhde	Parempi (pieni napa)	Huonompi (noin 1,5 - 6%)	X (taloudellisuus)
Vaurioherkkyys	Alhaisempi (kiinteä)	Suurempi (irtonaiset lavat)	X (luotettavuus)
Pääkoneen kuormitus	Suurempi	Pienempi	X (taloudellisuus)
Ohjailu	Vaikeampaa	Helpompaa	
Peruutus	Työläämpää (pyörimissuunnan vaihto)	Helpompaa (lajojen säätö)	
Peruutustyöntö	Parempi (vastaa normaalia)	Huonompi (noin 70% normaalista)	
Pysähtyminen	Hitaampi	Nopeampi (10-50% nopeammin)	
Potkurin vaurionkorjaus	Työläämpää (koko potkuri)	Helpompaa (lavan vaihtaminen)	
Potkurin muotoilu (kierto)	Vaikeampaa (lujuusmitoitukset pyörimissuuntaan)	Helpompaa (lujuusmitoitus vain yhteen pyörimissuuntaan)	
Pisteet	9	7	

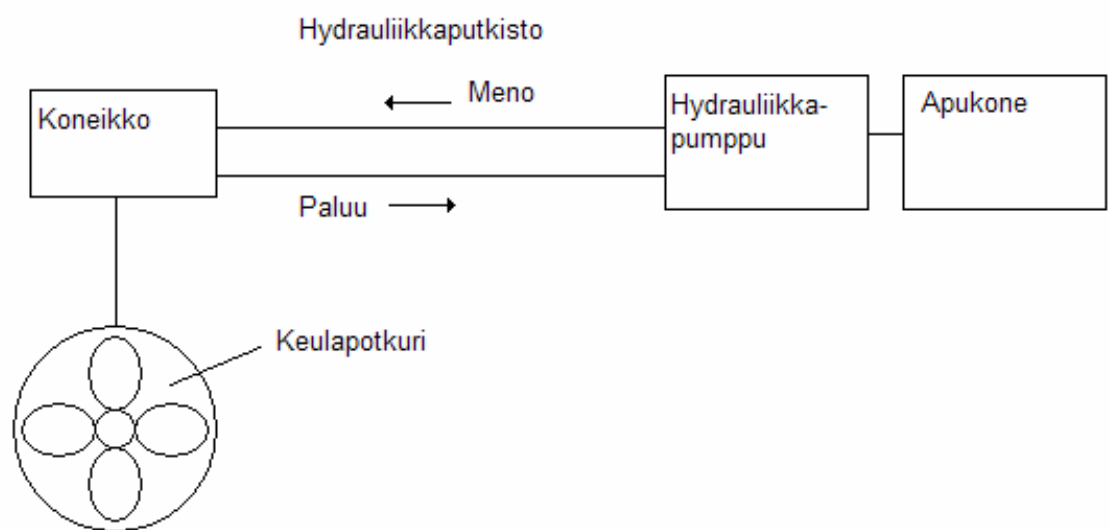
Taulukko 4: Potkurien vertailu

Vertailun perusteella apualukselle sopii paremmin kiinteälapainen potkuri. Vertailun ero on kuitenkin pieni, joten potkurityypin valinta on aluskohtaista ja vaatii perusteluja. Kiinteälapainen potkuri sopii apualukselle siksi, ettei alukselta vaadita erittäin tarkkaa ohjailukykyä eikä pientä herätettä. Kiinteälapaisella potkurilla varustettu järjestelmä on myös huomattavasti halvempi ratkaisu kuin säätölapaisella potkurilla varustettu järjestelmä.

Kun kyseessä on potkuripropulsio, jossa käytetään kiinteälapaista potkuria, tulee huomioida tämän vaikutus muihin järjestelmän osiin. Tällöin sekä pääkoneen että alennusvaihteen pyörimissuuntia tulee kyetä vaihtamaan peruutusilanteissa. Potkuriakselia ei tarvitse porata ontoksi, koska kiinteälapainen potkuri ei tarvitse akselin sisälle rakennettavaa säätötekniikkaa.

Mikäli tietylle apualusluokalle asetetaan vaatimukseksi hyvä ohjailukyky eikä hinta ole ratkaiseva tekijä, tulee säätölapaisen potkurin valintaa harkita.

4.1.2 Keulapotkurijärjestelmä



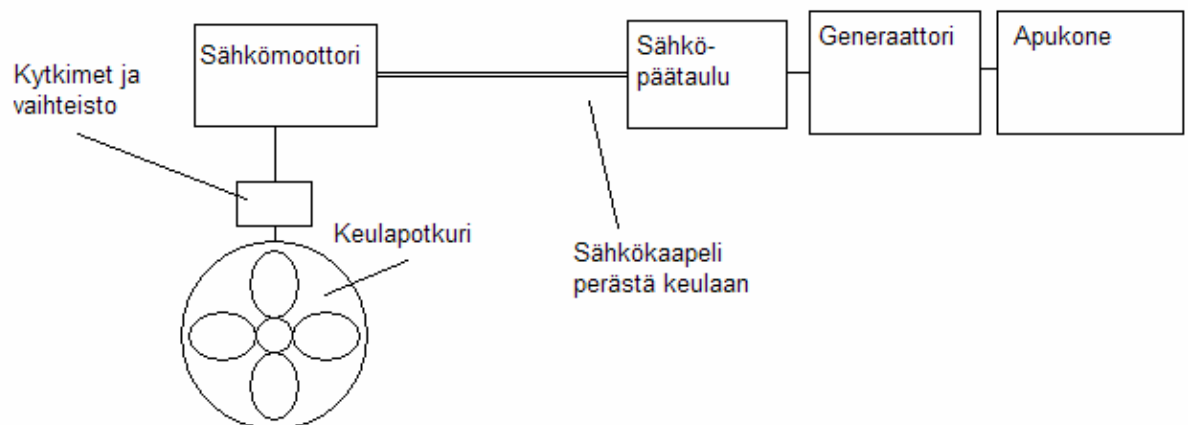
Kuva 11: Dieselhydraulinen keulapotkurijärjestelmä (Valas –luokka)

Keulapotkurin merkittävimmät seikat ovat sen tehokkuus ja sen käyttöjärjestelmä. Valas-luokan aluksilla on tällä hetkellä dieselhydraulinen käyttöjärjestelmä. Siihen sisältyy monia vanhanaikaisia ja riskialttiita ratkaisuja. Suurena haittana järjestelmässä on hydrauliikkaputkiston pituus. Pelkkä hiusmurtuma putkistojen liitoskohdassa saattaa vaikuttaa huomattavasti järjestelmän toimintaan. Valas-luokan aluksilla on ollut usein ongelmia putkistojen kanssa. Etenkin Vahakarilla, joka on päivittäin ajossa, kova käyttö on aiheuttanut paljon huoltotoimenpiteitä. Kotkan Rannikkopataljoonan konetarkastajan, teknikkokapteeniluutnantti Pentti Penkkimäen mukaan Valas-luokan keulapotkurin hydrauliikkaputkistoissa on yli 200 barin paine ja paikoin paine voi olla laitteiston eri osissa jopa 400 barin luokkaa. Mikäli putkisto menee rikki, on se hyvin suuri tapaturmia tai lisävahinkoja aiheuttava riskitekijä. Pitkällä hydrauliputkistolla on lisäksi huono hyötysuhde [31]. Suurimpana haittana nykyisessä järjestelmässä on se, että keulapotkuria voidaan käyttää ainoastaan

toisella apukoneella. Tällöin toinen apukone on kokonaan keulapotkurikäyttöä varten ja toinen tuottaa sähköä alukselle. Sähkön tuottaminen ja keulapotkurin käyttäminen yhdellä apukoneella on mahdotonta. Mikäli toinen apukone rikkoutuu, ei keulapotkuria voida käyttää edes pienillä kierroksilla tuottamalla samalla sähköä alukselle.

Tutkija on aiemmin tutkinut aihetta, jossa oli päämääränä suunnitella Valas-luokalle sähköhydraulinen keulapotkuri. Teknikkokapteeniluutnantti Rainer Öhman Merisotakoululta kertoo, että Valas-luokan aluksille ei tehty suoraan sähköhydraulista keulapotkuria niiden valmistuksen yhteydessä vuosina 1979-1980, sillä sopivaa järjestelmää ei tuolloin vielä ollut. Sähköhydraulisen järjestelmän säätötekniikka oli harvinaista ja kustannuksiltaan kallista. Näiden lisäksi laitteistojen koko vei paljon tilaa, eikä niitä olisi voinut asentaa Valas-luokan aluksille. Kehittymätön tekniikka olisi lisäksi vaatinut todella suuria sähkötehoja. Sähköhydraulinen järjestelmä voisi olla nykyään yksi vaihtoehto.

Hydrauliikassa saadaan luotua suuria voimia ja momentteja pienilläkin laitteilla. Hydraulijärjestelmillä on myös yleisesti ottaen hyvä hyötysuhde. Haittana hydrauliikassa on se, että energiamuodosta toiseen siirtyminen on kallista. Huollon tarve on vähäistä muihin järjestelmiin verrattuna, sillä hydrauliikka huoltaa itseään tiettyyn rajaan saakka [17]. Hydrauliikan edut säilyisivät sähköhydraulisessa järjestelmässä, mutta pitkä putkisto voitaisiin korvata sähkökaapelilla.



Kuva 12: Dieselsähköinen keulapotkurijärjestelmä (Pansio –luokka)

Sähköhydraulisen järjestelmän kanssa kilpailee dieselsähköinen järjestelmä. Pansio-luokan alukset käyttävät tätä järjestelmää. Dieselsähköisessä järjestelmässä

keulapotkuriyksikköä käyttää suoraan kytkennässä oleva sähkömoottori. Tämä järjestelmä vie alukselta paljon sähkötehoa käytössä. Se voi olla kuitenkin parempi ratkaisu kuin sähköhydraulinen järjestelmä, jossa moottorin lisäksi hydraulijärjestelmä vaatii oman tehonsa. Dieselsähköinen järjestelmä vaatii sähköjärjestelmän ja sähkötehojen tarkistamista. Dieselsähköisen järjestelmän rakenne on hyvin yksinkertainen. Apukone käyttää sähkögeneraattoria, joka syöttää virtaa sähköpäätaululle. Sähköpäätaululta vedetään kaapeli aluksen keulaan sähkömoottorille. Yksinkertaisen kokonaisuuden vuoksi tämä järjestelmä on myös halpa ja sen hyötysuhde on hyvä [30]. Dieselsähköisessä järjestelmässä työntövoiman säätö tapahtuu säätösiipipotkurin lapojen asentoa muuttamalla, tai mikäli potkuri on kiinteä, tapahtuu sen ohjaus taajuusmuuntajalla. Dieselsähköisen järjestelmän huonot puolet ovat pyörimisnopeuden säätöä varten tehtävien asennuksien monimutkaisuus sekä huono vääntömomentti pienillä käyttö kierroksilla.

Tulevan apualuksen paras käyttöjärjestelmä keulapotkurille on siis dieselsähköinen tai sähköhydraulinen järjestelmä. Teknikkokapteeniluutnantti Pentti Penkkimäki kertoi tutkijan aiemman tutkielman haastattelussa, että hydraulisen keulapotkurin takapaineiskut ovat paremmat kuin kokonaan sähköisellä, jos tunneliin menee jäitä. Penkkimäki kuitenkin halusi, että hydrauliihkaputkistoa lyhennettäisiin. Sähköjohto on helpompi vaihtoehto monessa suhteessa. Verratessa näitä kahta järjestelmää korostuvat kaksi ominaisuutta: rakenne ja tehontarve. Dieselsähköisen järjestelmän rakenne on huomattavasti yksinkertaisempi. Periaatteessa järjestelmät ovat täysin samanlaisia, mutta sähköhydraulisessa järjestelmässä on lisäksi hydrauliihkkoneikko välissä. Tämä tietää monimutkaisempaa rakennetta ja suurempaa tehontarvetta.

Otetaan yksinkertainen mitoitusesimerkki eri järjestelmien sähkönkulutuksesta. Valas-luokan alusten keulapotkuriteho käyttöakselilla on 55 kW. Valas-luokan keulapotkurin hydraulijärjestelmä on suljettu järjestelmä, jonka pohjalta voidaan arvioida järjestelmän hyötysuhteeksi 0,7-0,8 [31]. Hydrauliihkan hyötysuhde riippuu paljon putkiston pituudesta, joten arvioidaan pitkälle putkistolle arvoksi 0,7 ja lyhyelle putkistolle 0,8. Sähköhydraulisessa järjestelmässä kokonaishyötysuhde huononee, sillä keulaan sijoitettavalle hydraulijärjestelmälle tulee asentaa sähkömoottori, jolla on myös oma hyötysuhteensa. Yleensä teollisuuden käyttämien moottoreiden hyötysuhde on parempi kuin 80 % [22]. Arvioin sähkömoottorin hyötysuhteeksi 0,85.

Kokonaistehontarpeet järjestelmävaihtoehdoille selviävät seuraavista laskelmista. Emme huomioi pienimpiä hyötysuhdetekijöitä.

$$\text{Dieselhydraulinen} : \frac{55kW}{0,7} \approx 78,6kW$$

$$\text{Sähköhydraulinen} : \frac{55kW}{0,8 \cdot 0,85} \approx 80,9kW$$

$$\text{Dieselsähköinen} : \frac{55kW}{0,85} \approx 64,7kW$$

Edellä olevissa laskuissa on laskettu, paljonko eri järjestelmät vaativat käyttötehoa toimiakseen. On selvää, että mitä parempi kokonaishyötysuhde järjestelmässä on, sitä vähemmän se tarvitsee käyttötehoa toimiakseen. Tässä tapauksessa dieselsähköinen järjestelmä on paras vaihtoehto. Hydrauliiikan hyvät vääntöedut menetettäisiin, mutta tehonkulutus olisi vähäistä ja järjestelmä pysyisi yksinkertaisena sekä helppohuoltoisena.

4.2 Koneiden tehontuotto

4.2.1 Pääkoneet

Koska tiedossamme on tämänhetkinen Valas-luokan aluksen pääkoneen teho, voimme selvittää amiraliteetin yhtälöllä alukselle ominaisen amiraliteetin vakion. Alukselle asetettu nopeusvaatimus on 12 solmua, ja aluksen paino täydessä lastissa on 285 tonnia eli 285000 kg.

Selvitetään seuraavaksi Valas-luokan aluksen tilavuusuppouma:

$$\nabla = \frac{\Delta}{\rho} = \frac{285000kg}{1005 \frac{kg}{m^3}} = 283,582089... \approx 283,58m^3$$

Tämän jälkeen voidaan selvittää Valas-luokan alukselle ominainen amiraliteetin vakio:

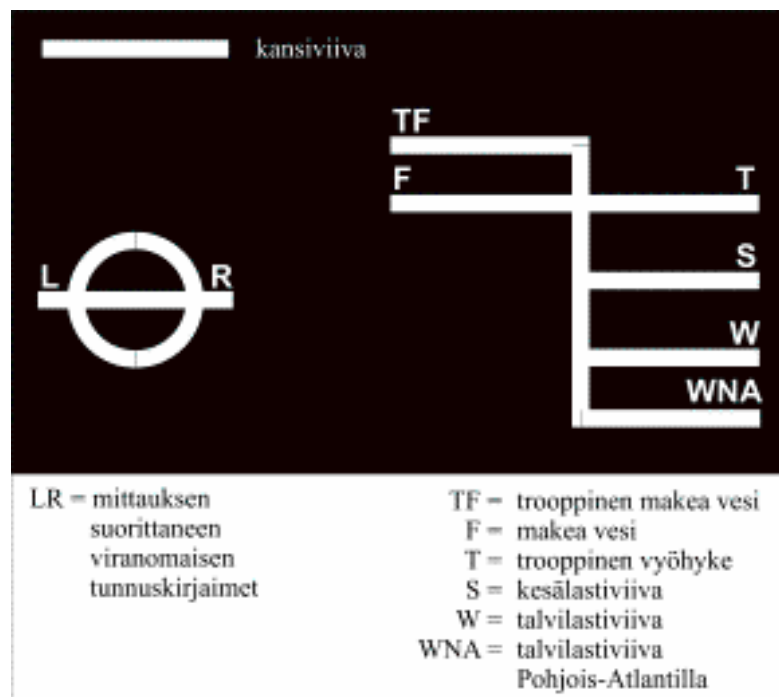
$$P = \frac{V^3}{C} \cdot \nabla^{\frac{2}{3}} \rightarrow C = \frac{V^3 \cdot \nabla^{\frac{2}{3}}}{P} = \frac{(12kn)^3 \cdot (283,58m^3)^{\frac{2}{3}}}{1070kW} = 69,70710170 \approx 69,7$$

Valas-luokan aluksen amiraliteetin vakio on siis 69,7.

Aluksen jäissäkulkuun vaadittu konetehto selviää merenkulkulaitoksen kaavan avulla. Ensin selvitetään aluksen aiheuttama vastus murretussa jääuomassa seuraavalla kaavalla:

$$R_{CH} = C_1 + C_2 + C_3(H_F + H_M)^2(B + 0,658H_F) + C_4LH_F^2 + C_5\left(\frac{LT}{B}\right)^3\frac{B}{4}$$

Puolustusvoimien aluksille ei ole määritetty Plimsollin lastimerkin mukaista kesälastiviivaa, joka vastaisi merenkulkulaitoksen ohjeiden mukaista jääluokkasyvyyksen arvoa. Teknikkokapteeniluutnantti Pentti Penkkimäki (Kotkan Rannikkopataljoona, konetarkastaja) ehdottikin käyttämään laskuissa alusten maksimisyvyyksen arvoa. Alukset toimivat erittäin harvoin muulla toiminta-alueella kuin Suomen vesialueella. Tämän vuoksi meriveden lämpötila ja sää eivät vaikuta olennaisesti aluksen syvyykseen. Käytettäessä maksimisyvyyksen arvoa laskuissa saadaan vastaus varmistettua kaikille syväysarvoille. Tämän takia kohdassa T käytetään aluksen maksimisyvyyksen arvoa.



Kuva 13: Plimsollin lastimerkki [39]

Valas-luokan aluksen arvot tässä kaavassa ovat:

$$C_1 = 0$$

$$C_2 = 0$$

$$C_3 = 460 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}^2)$$

$$C_4 = 18,7 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}^2)$$

$$C_5 = 825 \text{ kg}/\text{s}^2$$

$$B = 8,1\text{m}$$

$$L = 27,29\text{m}$$

$$T = 3,5\text{m}$$

$$H_M = 1,0$$

$$H_F = 0,26 + (H_M \cdot B)^{\frac{1}{2}} = 0,26 + (1,0 \cdot 8,1\text{m})^{\frac{1}{2}} \approx 3,106\text{m}$$

$$\left(\frac{L \cdot T}{B^2}\right)^3 = \left(\frac{27,29\text{m} \cdot 3,5\text{m}}{(8,1\text{m})^2}\right)^3 \approx 3,085, \text{ jonka vuoksi käytämme pienintä sallittua lukua 5.}$$

Seuraavaksi lasketaan tulos:

$$R_{CH} = 0 + 0 + 460 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}^2} \cdot (3,106\text{m} + 1,0)^2 \cdot (8,1\text{m} + 0,658 \cdot 3,106\text{m}) + 18,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}^2} \cdot 27,29\text{m} \cdot (3,106\text{m})^2 + 825 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \cdot 5 \cdot \frac{8,1\text{m}}{4} = 91943,61849$$

Vaadittu konetehto lasketaan kaavalla:

$$P_e = K_e \frac{(R_{CH} / 1000)^{\frac{3}{2}}}{D_P}$$

Valas-luokan aluksen arvot tässä kaavassa ovat:

$$K_E = 2,26$$

$$R_{CH} = 91943,61849$$

$$D_P = 1,8\text{m}$$

Sijoitetaan luvut:

$$P_e = 2,26 \frac{(91943,61849 / 1000)^{\frac{3}{2}}}{1,8\text{m}} = 1106,92532 \approx 1107\text{kW}$$

Valas-luokan alukselta vaaditaan siis 1107kW pääkonetehoa, jotta se täyttää sille asetetut jäissäkulun vaatimukset. Valas-luokan tämänhetkinen pääkonetehto on 1070kW. Tästä on pääteltävissä, että pääkoneen tehokkuus on juuri siinä rajoilla, mitä siltä vaaditaan.

Pansio-luokan laskut ovat samoista osa-alueista kuin Valas-luokan yhteydessä on esitelty. Näin voidaan vertailla alusluokkien tuloksia keskenään. Pansio-luokan

alukselle asetettu nopeusvaatimus on 11 solmua, ja aluksen paino täydessä lastissa on 620 tonnia eli 620000 kg.

Pansio –luokan aluksen tilavuusuppouma:

$$\nabla = \frac{\Delta}{\rho} = \frac{620000 \text{ kg}}{1005 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 616,9154229... \approx 616,92 \text{ m}^3$$

Pansio-luokan alukselle ominainen amiraliteetin vakio:

$$P = \frac{V^3}{C} \cdot \nabla^{\frac{2}{3}} \rightarrow C = \frac{V^3 \cdot \nabla^{\frac{2}{3}}}{P} = \frac{(11 \text{ kn})^3 \cdot (616,92 \text{ m}^3)^{\frac{2}{3}}}{(2 \cdot 550) \text{ kW}} = 87,68755019 \approx 87,7$$

Pansio-luokan aluksen amiraliteetin vakio on siis 87,7.

Tarkistetaan jälleen jäissäkulkuun vaadittu konetehto merenkulkulaitoksen kaavan avulla. Selvitetään aluksen aiheuttama vastus murretussa jääuomassa:

$$R_{CH} = C_1 + C_2 + C_3(H_F + H_M)^2(B + 0,658H_F) + C_4LH_F^2 + C_5\left(\frac{LT}{B^2}\right)^3 \frac{B}{4}$$

Laskut suoritetaan samoin kuin aiemmin Valas-luokan aluksen laskuissa. Luutnantti Aleksi Pitkänen (Suomenlahden Meripuolustusalue, Miinalautta Pyhärannan koneupseeri) ilmoitti myös, ettei Pansio-luokan alukselle ole määritetty varsinaista kesälastiviivaa. Käytämme jälleen aluksen maksimisyvyyksen arvoa kohdassa T.

Pansio-luokan aluksen arvot tässä kaavassa ovat:

$$C_1 = 0$$

$$C_2 = 0$$

$$C_3 = 460 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}^2)$$

$$C_4 = 18,7 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}^2)$$

$$C_5 = 825 \text{ kg}/\text{s}^2$$

$$B = 10,26 \text{ m}$$

$$L = 38,50 \text{ m}$$

$$T = 2,0 \text{ m}$$

$$H_M = 1,0$$

$$H_F = 0,26 + (H_M \cdot B)^{\frac{1}{2}} = 0,26 + (1,0 \cdot 10,26 \text{ m})^{\frac{1}{2}} \approx 3,463 \text{ m}$$

$$\left(\frac{L \cdot T}{B^2}\right)^3 = \left(\frac{38,50 \text{ m} \cdot 2,0 \text{ m}}{(10,26 \text{ m})^2}\right)^3 \approx 0,391, \text{ jonka vuoksi käytämme pienintä sallittua lukua 5.}$$

Seuraavaksi lasketaan tulos:

$$R_{CH} = 0 + 0 + 460 \frac{kg}{m^2 s^2} \cdot (3,463m + 1,0)^2 \cdot (10,26m + 0,658 \cdot 3,463m) + 18,7 \frac{kg}{m^2 s^2} \cdot 38,50m \cdot (3,463m)^2 + 825 \frac{kg}{s^2} \cdot 5 \cdot \frac{10,26m}{4} = 134099,3182$$

Vaaditun konetehon kaava:

$$P_e = K_e \frac{(R_{CH} / 1000)^{\frac{3}{2}}}{D_p}$$

Pansio-luokan aluksen arvot tässä kaavassa ovat:

$$K_E = 1,60$$

$$R_{CH} = 134099,3182$$

$$D_p = 1,3m$$

Sijoitetaan luvut:

$$P_e = 1,60 \frac{(134099,3182 / 1000)^{\frac{3}{2}}}{1,3m} = 1911,245540 \approx 1911kW$$

Pansio-luokan alukselta vaaditaan siis yhteensä 1911kW pääkonetehoa, jotta se täyttää sille asetetut jäissäkulun vaatimukset. Pansio-luokan tämän hetkinen pääkonetehto on 1100kW (2 x 550kW). Tästä huomaamme välittömästi, että aluksen tämänhetkinen koneisto ei täytä sille asetettuja vaatimuksia.

Molemmista aluksista tulokseksi saadut amiraliteetin vakiot ovat melko lähellä toisiaan. Näitä arvoja käyttämällä voitaisiin laskea suuntaa antava pääkonetehto uudelle apualusluokalle. On kuitenkin syytä epäillä näiden arvojen todellista luotettavuutta. Kuten aiemmin jo todettiin, amiraliteetin vakio riippuu rungon muodosta ja vaatii yleensä mallikokeita. Lisäksi amiraliteetin yhtälöllä saadaan vastaukseksi alukselta vaadittu pääkonetehto ottamatta huomioon jäätäkijöitä. Tämän vuoksi vastaukseksi saadun tehon pitäisi olla huomattavasti pienempi, kuin merenkulkulaitoksen kaavalla saatu teho. Ylempänä laskettiin kaavalla käänteisesti niin, että selvitettiin alusten amiraliteetin vakioita. Koska ei pystytä selvittämään luotettavasti alusten amiraliteetin vakioita, ei näillä vastauksilla ole tieteellistä arvoa. Amiraliteetin yhtälöä ei siis kannata käyttää pääkonetehojen kartoittamiseen, koska sen antamat tulokset ovat epäluotettavia.

Luotettavamman vastauksen pääkonetehosta antaa merenkulkulaitoksen kaava. Tämä kaava on laadittu määräyksen muotoon, joten alusten tulisi täyttää sen asettamat vaatimukset. Tarkastetaan alusten pääkonetehtojen erot nykyisten arvojen ja vaatimusten välillä:

$$\text{Valas} : 1070kW - 1107kW = -37kW$$

$$\text{Pansio} : 1100kW - 1911kW = -811kW$$

Koneteho ei saa olla pienempi kuin kaavan määrittämä eikä missään tapauksessa pienempi kuin 1000kW jääluokassa 1A, 1B ja 1C [26]. Tulokset kertovat, että merivoimien tämänhetkisten kuljetusalusten propulsiojärjestelmät on mitoitettu alitehoisiksi jääluokitukseensa nähden. Pansio-luokan miinalautan erittelyssä todetaan: ”Meriominaisuuksiltaan ja varustukseltaan on alus suunniteltu siten, että se soveltuu kuljetus- ja miinalauttana ulkosaariston olosuhteisiin kaikissa sääolosuhteissa” [1]. Tämä tarkoittaa myös sitä, että sen tulisi kyetä hyvään talvimerenkulkuun. Luutnantti Aleksi Pitkänen kertoi haastattelussa (30.11.2006), että alus on toisinaan hyvin riippuvainen talvisesta jäänmurtaja-avusta. Alus on joskus jopa noussut jäiden päälle ja jäänyt kiinni jäihin. Tämän selittää aluksen pieni syväys ja keulan muoto. Teknikkokapteeniluutnantti Pentti Penkkimäki kertoi haastattelussa (23.11.2006), että Valas-luokan Vahakari on pystynyt kulkemaan joskus jopa 60 cm kiintojäässä. Näistä haastatteluista saadaan kaksi johtopäätöstä: aluksilla on liian pieni koneteho ja Pansio-luokan miinalauttojen jäissäkulkukyky tulisi olla huomattavasti parempi.

4.2.2 Keulapotkuri

Hyvänä suunnitteluperustana voidaan käyttää arviota, jonka mukaan 10kN:n työntövoiman tuottamiseen tarvitaan 100kW:n käyttöteho [30]. Näin voidaan suorittaa aiemmin esitellyt keulapotkurin tehonmäärityslaskut takaperin. Valas-luokan alusten keulapotkurin työntöteho eli käyttöteho akselilla on 55kW. Näin voidaan arvioida, että potkurin työntövoima on 5,5kN. Kaavoissa esiintyvät pituudet a ja b ovat Valas-luokan aluksissa a=15,3 m ja b=22 m [48]. Alusten tuulipinta-ala on 130,2 m² [50]. Päämääränämme on tietää, miten kovaa tuulta vastaan keulapotkurit on mitoitettu merivoimien aluksissa. Aloitetaan kaavalla:

$$F = \frac{T}{b} \rightarrow T = F \cdot b = 5500N \cdot 22m = 121000Nm$$

Tämän jälkeen sijoitetaan saatu vääntömomentti kaavaan:

$$T = P \cdot A \cdot x \cdot a \rightarrow P = \frac{T}{A \cdot x \cdot a} = \frac{121000Nm}{130,2m^2 \cdot 0,75 \cdot 15,3m} = 80,98818978... \frac{N}{m^2} \approx 80,99 \frac{N}{m^2}$$

Nyt voidaan sijoittaa selvitetty tuulen paine kaavaan, josta saadaan selville tuulen nopeus:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \rightarrow V^2 = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho} = \frac{80,99 \frac{N}{m^2}}{\frac{1}{2} \cdot 1,28 \frac{kg}{m^3}} = 126,546875 \rightarrow V = \sqrt{126,546875} \approx 11,25 \frac{m}{s}$$

Valas-luokan aluksen keulapotkuri on mitoitettu 11,25m/s suuruista tuulta vastaan.

Pansio-luokan alusten keulapotkurin akselitehoa ei ole määritetty aluksen papereissa. Keulapotkuria käyttävän sähkömoottorin teho on 100kW. Sähkömoottorin hyötysuhde on erinomainen. Yleensä teollisuuden käyttämien moottoreiden hyötysuhde on parempi kuin 80 % [22]. Sähkömoottorin ja potkurin väliin jäävät joustava kytkin ja vedenalainen vaihteisto, joiden aiheuttama häviö on pieni. Seuraavassa laskussa keulapotkurin akseliteho on arvioitu niin, että sähkömoottorin ja väliin jäävien osien hyötysuhde on yhteensä tasan 85 %, tässä tapauksessa $100kW \cdot 0,85 = 85kW$. Käytämme jälleen arviota, jonka mukaan 10 kN:n työntövoiman tuottamiseen tarvitaan 100 kW:n käyttöteho. Tällöin Pansio-luokan aluksen keulapotkurin työntöteho eli käyttöteho akselilla on noin 8,5 kN.

Miinalautta Pyhärannan konepäällikkö, luutnantti Ville Kannasto sekä koneupseeri, luutnantti Aleksi Pitkänen eivät löytäneet aluksen arkistoista tarkkaa arvoa aluksen tuulipinta-alasta (30.11.2006). Tämän vuoksi aluksen tuulipinta-ala on laskettu sen pääpiirustuksista. Tämä tapahtui niin, että aluksen suurin pituus mitattiin pääpiirustuksista. Pituus piirustuksissa oli 151 mm. Aluksen suurimman pituuden arvo luonnossa on 43300 mm. Näiden avulla saatiin laskettua mittakaavaksi:

$$\frac{43300mm}{151mm} \approx 286,755$$

Tämä tarkoittaa sitä, että yksi millimetri aluksen piirustuksissa on 286,755 mm luonnollisessa koossa. Tämän jälkeen mitattiin aluksen pinta-ala paloina

mahdollisimman tarkasti sen piirustuksista ja ynnättiin saadut arvot. Arvioitu tuulipinta-ala on tutkijan laskujen perusteella 265,23 m² [48].

Pansio-luokan alusten kaavoissa esiintyvät pituudet a ja b ovat a=21,65 m ja b=34,12 m [48]. Suoritetaan samat laskut kuin Valas-luokalle:

$$F = \frac{T}{b} \rightarrow T = F \cdot b = 8500N \cdot 34,12m = 290020Nm$$

$$T = P \cdot A \cdot x \cdot a \rightarrow P = \frac{T}{A \cdot x \cdot a} = \frac{290020Nm}{265,23m^2 \cdot 0,75 \cdot 21,65m} = 67,34201991 \frac{N}{m^2} \approx 67,34 \frac{N}{m^2}$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \rightarrow V^2 = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho} = \frac{67,34 \frac{N}{m^2}}{\frac{1}{2} \cdot 1,28 \frac{kg}{m^3}} = 105,21875 \rightarrow V = \sqrt{105,21875} \approx 10,26 \frac{m}{s}$$

Pansio –luokan aluksen keulapotkuri on mitoitettu 10,26 m/s suuruista tuulta vastaan.

Näin on selvitetty alusten keulapotkureista, kuinka kovaa tuulta vastaan ne on mitoitettu. Tuloksina saimme:

- Valas: 11,25 m/s
- Pansio: 10,26 m/s

Alusten keulapotkurit on mitoitettu lujan ja navakan tuulen rajalle. Tuloksista voidaan päätellä, että normaalissa ajotilanteessa keulapotkurien tehot ovat riittävät, mutta mikäli tuuli yltyy navakaksi, ohjailuominaisuudet suoraan tuulta vastaan ovat välttävät. Alusten valmistuserittelyissä ei mainita, millaisissa tuuliolosuhteissa alusten tulee kyetä toimimaan. Ainoat huomioitavat maininnat liittyvät siihen, että alusten tulee kyetä toimimaan kaikissa sääolosuhteissa.

Isosaaressa vuosina 1986-2005 mitattujen tuulikeskiarvojen mukaan vuodessa on kyseisellä alueella keskimäärin 151 päivää, jolloin tuuli on vähintään navakkaa (yli 10 m/s) [16]. Säätaulukko on liitteenä 4. Valas- ja Pansio-luokan alukset ovat käytössä ympärivuotisesti lähes päivittäin. Voimme epäillä, että aluksilla on ohjailuongelmia laiturin tulossa tai laiturista irroitettaessa noin 41 %:ssa sen ajamista päivistä (151/365=0,4136...). Tämä on melko karkea arvio, sillä siinä ei ole huomioitu tuulen suuntaa aluksen kylkeen nähden eikä mahdollisia katveja. Suuntaa antavana arvona

tämä tulos kuitenkin vahvistaa epäilykset alusten keulapotkurien mahdollisesta alitehoisuudesta. Alusten keulapotkureille tulisi asettaa kovemmat tuulivaatimukset niitä mitoitettaessa.

4.3 Melun vaimennus ja herätteen pienentäminen

Tämän luvun tarkoituksena on tarkastella alusten erilaisia melunvaimennus- sekä herätteenalentamismenetelmiä. Tarkoituksena ei ole laskea tarkkoja vaimennusarvoja, vaan etsiä ja ehdottaa apualukselle soveltuvia ratkaisuja. Melunvaimennus painottuu mukavuuden ja työturvallisuuden näkökulmasta. Valas- ja Pansio-luokan alusten äänieristykset ovat tällä hetkellä tyydyttävät. Aiemmassa tutkimuksessani (Valas-luokan keulapotkurin modifioiminen sähköhydrauliseksi) sain selville, että Valas-luokan aluksilla on meluongelma keulapotkurikäytön aikana. Keulapotkuritila sijaitsee miehistömessin alapuolella, ja potkuria käytettäessä meluhaitat ovat niin suuret, että messissä oleskelu on vaarallista. Jotta tällaiset ongelmat vältetään tulevaisuudessa, on syytä tutkia kattavasti erilaisia vaimennusmenetelmiä ja niiden käytettävyyttä apualuksella.

Melun ja tärinän osalta kone suunnitellaan ja rakennetaan siten, että melupäästöistä tai tärinästä aiheutuvat vaarat on vähennetty alhaisimmalle mahdolliselle tasolle. Vaarojen minimoimiseksi on otettava huomioon tekniikan kehitys ja kaikki käytössä olevat keinot vähentää melua ja tärinää erityisesti melulähteeseen kohdistuvin toimenpitein. [5]

Apualuksen akustinen heräte ei ole sen suunnittelussa kriittinen peruste. Merivoimien apualukset operoivat yleensä oman rannikon tuntumassa, jolloin aluksille ei koidu suurta vaaraa joutua herätemiinoitukseen. Herätemiinojen maaleina ovat yleensä suuret sota-alukset tai kauppa-alukset [11]. On kuitenkin mahdollista, että alukset joutuvat kulkemaan riskialttiiden alueiden läpi suorittaessaan kuljetus- tai miinoitustehtävää. Yksittäisiä herätemiinoja voidaan käyttää ansoina väyläristeyksissä tai -kapeikoissa. Myös maantieteellisesti kriittiset kohdat, kuten Hankoniemen ja Porkkalanniemen edustat, ovat otollisia miina-aseen käyttökohteita. Toisaalta voidaan ajatella, että pienen herätetason omaavat alukset voivat välttää miinoitteen, mutta eivät kuitenkaan paljasta sen olemassaoloa [11]. Tällöin miinoite jää odottamaan suurempaa herätettä, joka voi tietää myös suurempia tappioita.

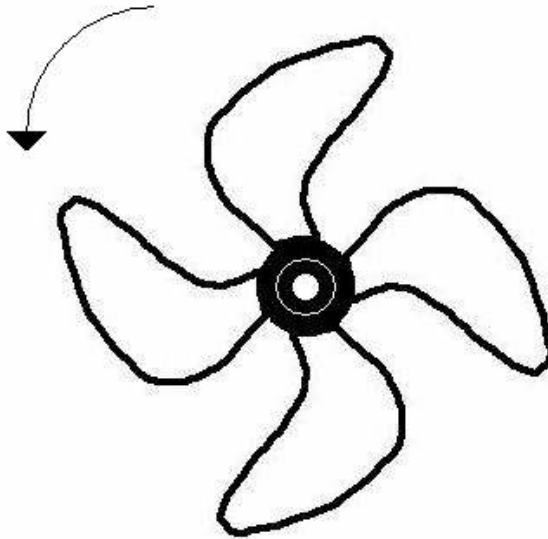
Lähtökohtaisesti kaikki sota-alukset ovat kuitenkin luokassaan korvaamattomia, joten myös apualusten heräte tulee huomioida tyydyttävästi.

Aluksen pääkoneiston luomaa herätettä ja melua voidaan helposti vaimentaa asentamalla aluksen koneet joustimien päälle. Tällainen asennusvaihtoehto on kustannuksiltaan melko kallis, mutta sen vaikutukset koneen luomaan herätteeseen ovat huomattavia. Joustavalla asennuksella saavutetaan herätteen taajuuden mukaan 15-30 dB:n vaimennus [11, 14]. Asennuksen kustannukset ovat kalliit vaativan suunnittelun, joustavien elementtien sekä kytkimen ja putkistojen vaihtamisen takia [14]. Pääkoneiden joustava asennus soveltuu pieniin tai keskiskalaan koneisiin, joten ratkaisua voidaan soveltaa myös apualuksen järjestelmään. Mikäli pääkoneet asennetaan joustavasti, on myös vaihteisto asennettava joustavasti tai on ostettava kallis erikoisvaihte [38].

Toinen vaihtoehto pääkoneiston melun vaimentamiseen on kerrostettu runkorakenne. Tämä ratkaisu katkaisee koneistomelun välittymisen aluksen rungon kautta veteen. Ratkaisua on sovellettu toistaiseksi ainoastaan pienehköihin erikoisyksikköihin, kuten heräteraivaajiin [11]. Ratkaisun soveltaminen onnistuisi myös suurempiin aluksiin, mutta on melko kyseenalaista, että apualuksille suunniteltaisiin samanlaisia heräteominaisuuksia kuin heräteraivaajille. Pelkkä joustava asennus vähentäisi jo huomattavasti aluksen akustista herätettä ja yleistä melutasoa, eikä herätteen lisävaimennuksia välttämättä tarvittaisi.

Potkurin akustista herätettä voidaan alentaa suunnittelemalla alukselle potkuri, jolla on mahdollisimman suuri halkaisija ja hidas kierrosnopeus [11]. Mikäli potkuri halutaan suunnitella näillä kriteereillä, tulee mittojen optimoinnissa olla erittäin huolellinen. Ylisuurien potkurien asennuksesta voi seurata suuria painepulsseja laivan runkoon sekä laakerien nopeaa kulumista [15]. Potkurien herätettä voidaan pienentää myös highly skewed -erikoismuotoilulla eli korkealla lavan kierrolla [25, 38]. Tämä muotoilu vähentää hieman potkurin hyötysuhdetta, mutta vähentää huomattavasti potkurin värähtelyä [3]. Tämä potkurityyppi hylkii enemmän vieraita objekteja vedessä kuin kiertämätön potkuri. Kierretty potkuri ei kerää kasvustoa eikä juutu jäihin helposti, koska sen lapojen johtoreunan alle ei jää suurta esineitä keräävää lovea. Voimakaskierteinen muotoilu on helpompaa toteuttaa säätölapaiseen potkuriin, koska lapoja ei tarvitse mitoittaa kestävästi pyörimistä vastakkaiseen pyörimissuuntaan [14]. Muotoilua voidaan silti tehdä myös

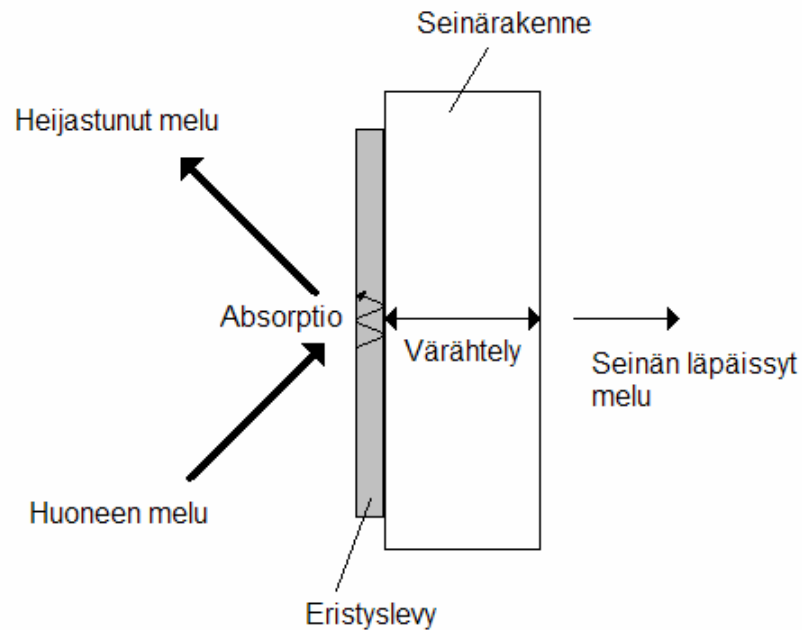
kiinteälapaiseen potkuriin. Mitä enemmän potkurissa on lapoja, sitä vähemmän potkuri värähtelee. Riskinä kiinteälapaisen potkurin muotoilussa on peruutustyön heikkeneminen ja objektien tarttuminen potkuriin peruutuksen aikana.



Kuva 14: Voimakaskierteinen (highly skewed) potkuri

Merivoimilla on kokemusta kierretystä potkurista. Hämeenmaa-luokan miinalaiva suunniteltiin toimimaan miinavaarallisella alueella, minkä vuoksi sen heräte tuli olla mahdollisimman pieni. Aluksen ensimmäisellä merikoematkalla havaittiin hitailla nopeuksilla potkurimelua, joka oli niin voimakasta, että se vaikutti aluksen operatiiviseen suorituskäyttöön. Kehitystyö aloitettiin potkurivalmistajan kanssa, ja uusi ratkaisu oli asentaa alukselle ruostumattomasta teräksestä valmistetut potkurit, joissa oli ohutprofiilinen ja voimakaskierteinen lapamuoto. Tämä vähensi potkurien painepuolista kavitaatiota ja pudotti aluksen melutasoa. [45]

Kavitoinnin vaurioita voidaan vähentää myös superkavitoivalla potkurilla. Superkavitoivan potkurin lavat muotoillaan niin, että niiden johtoreuna on terävämpi ja jättöreuna tylpempi kuin tavallisessa potkurissa. Tämä muotoilu saa aikaan ilmiön, jossa kavitaatiokuplat vaeltavat lavan imupuolella koko lavan matkan, mutta räjähtävät vasta lavan jättöreunan jälkeen [3]. Tällöin kuplien paineräjähdykset eivät vaurioita potkurin pintaa. Superkavitoivan potkurin hyötysuhde on tavallista potkuria huonompi tavanomaisilla nopeuksilla, mutta sen hyötysuhde voi olla huomattavasti parempi suurilla nopeuksilla [3]. Tämän vuoksi superkavitoiva potkuri ei ole hyvä ratkaisu apualuksille, sillä alusten kulkunopeus on yleensä melko alhainen.



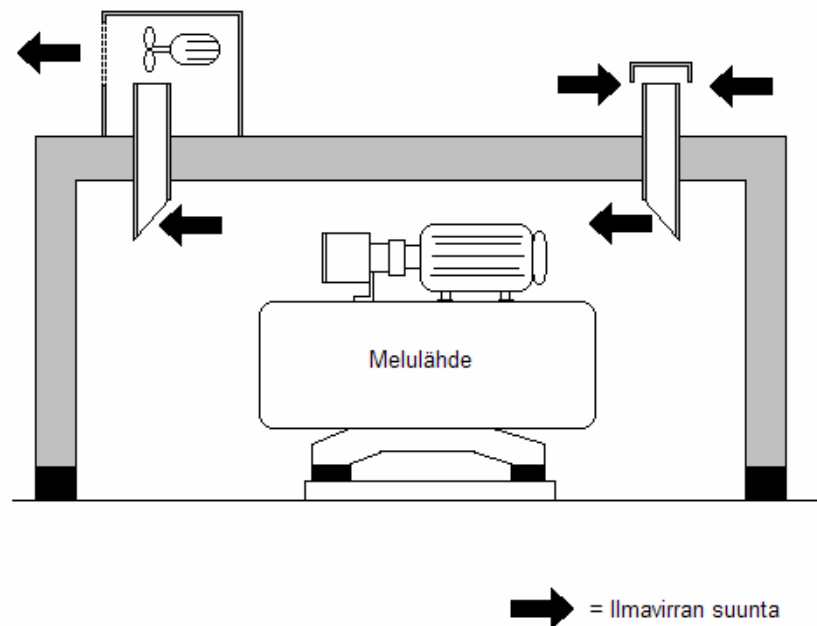
Kuva 15: Äänieristyksen periaate

Propulsiojärjestelmän laitteita sisältävien tilojen äänieristäminen tapahtuu niin, että koko tila vuorataan ääntä absorboivalla materiaalilla. Konehuoneen laipiot ja katto verhotaan yleensä ääntä absorboivalla vuorivillalla [14]. Täytyy myös muistaa, että kyseessä tulee olla paloturvallinen eristysmateriaali. Periaatteena eristämisessä on se, että mitä paksumpi eristys on, sitä vähemmän ääni tunkeutuu siitä läpi. Yksinkertainen 50 mm:n mineraalivillatäytteinen seinä tuottaa parhaimmillaan 30 dB:n eristyksen, mutta kaksinkertainen seinärakenne antaa tulokseksi jo 40 dB:n eristyksen [14]. Eristeiden asennuksessa tulee huomioida eristyksen tiiveys, jotta siitä hyödytään mahdollisimman paljon. Erityisesti huomioitavia kohteita ovat konehuoneen oviaukot ja luukut.

Asuinhytin ja jonkin meluisan tilan välille vaaditaan normaalia parempaa äänieristystä [14]. Pansio-luokalla tällainen tila löytyy varusmiesmajoituksen ja keulavaraston välillä. Keulavaraston tilassa on myös keulapotkurin sähkömoottori, joka on yksi merkittävimmistä melulähteistä aluksella. Näiden tilojen välillä on oltava hyvä äänieristys kuulovaurioriskin alentamiseksi sekä viihtyvyyden parantamiseksi. Yleensä tällaisten tilojen välille on rakennettu teräslaipio, joka vuorataan paloeristeellä [14]. Toinen keino alentaa sähkömoottorin melua olisi rakentaa sen ympärille melukoppa. Melukoppa ei ole kovin yleinen ratkaisu, sillä se vaatii tilaa koneen ympäriltä eikä sitä aina välttämättä edes tarvita, mikäli muu eristys voidaan toteuttaa vaatimusten mukaan [38]. Melukopan ajatuksena on ympäröidä melulähde ääntä eristävällä materiaalilla kokonaan lukuunottamatta tuuletusaukkoja. Tämä ei

ole välttämättä hyvä ratkaisu sota-alukselle, sillä koppa vie ylimääräistä tilaa laitteen ympäriltä ja hankaloittaa laitteen huoltoa. On suositeltavampaa asentaa sähkömoottori joustavasti ja eristää tilojen välinen laipio huolellisesti paloeristeellä. Tällöin melueristys on riittävä hetkelliseen oleskeluun majoitustilassa. Tämä ratkaisu voidaan myös perustella sillä seikalla, että sota-aluksen keulapotkuria käytetään harvoissa tilanteissa, kuten irrotuksessa ja kiinnityksessä, jolloin tilassa ei yleensä ole ketään.

Valas-luokan alusten yleisjärjestely vaatii myös hyvää äänieristystä keulapotkuritilan ympärille. Keulapotkuritila sijaitsee miehistömessin alapuolella sekä majoitustilojen läheisyydessä. Nykyään messitilassa oleskelu keulapotkurikäytön aikana ei ole suositeltavaa ilman kuulosuojaimia. Tutkijan aiemmassa tutkimuksessa (Valas-luokan keulapotkurin modifioiminen sähköhydrauliseksi) tutkittiin mahdollisuutta rakentaa aluksen keulapotkuritilasta hydraulihuone. Hydraulihuoneessa tila eristetään raskaalla materiaalilla, jolla on hyvät vaimennusominaisuudet. Tämän kerroksen päälle tulee toinen kerros pehmeämpää ainetta, kuten lasivillaa, joka absorboi sisään suljetun äänienergian. Hydraulihuoneen rakenteiden saumakohtat ja läpiviennit tiivistetään huolellisesti. Tilan lämpenemisen vuoksi tulee siihen suunnitella myös ilmanvaihto [31]. Tällaisen tilan rakentaminen vaatii huolellista työtä, mutta sen äänieristys on erinomainen.



Kuva 16: Hydraulihuoneen rakenne [31]

Melun vaimentaminen voidaan huomioida jo aluksen suunnitteluvaiheessa. Tehokkain keino estää meluongelmia on viedä hiljaiseksi saatavat tilat kauaksi melun aiheuttajista ja pyrkiä tekemään toisarvoisista tiloista puskurialueita melua vastaan [38]. Aluksen pohjapiirustuksissa tulee siis huomioida kriittisimmät melulähteet. Myös aluksen tukevimmat rakenteet kuljettavat hyvin runkoääniä, joten hiljaisia tiloja ei kannata suunnitella paksujen laipioiden yhteyteen.

Herätteen alentamiseksi voidaan vähentää aluksen kulkunopeutta. Tällöin aluksen koneisto tuottaa huomattavasti vähemmän melua. Tätä keinoa voidaan soveltaa apualuksella, mikäli aluksen tiedetään operoivan miinavaarallisella alueella. Tällöin aluksen potkuria ei tarvitse muotoilla heräteominaisuuksien parantamiseksi ja potkurissa säilyy kestävämpi rakenne ja parempi hyötysuhde.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Johtopäätöksien alussa kerrotaan, mihin merivoimien apualuksia käytetään ja mitä vaatimuksia apualusten propulsiojärjestelmälle asetetaan. Näiden jälkeen perustellaan alukselle sopivin propulsorivaihtoehto, jota tarkastellaan lähemmin järjestelmän osien ja ominaisuuksien kannalta. Pohdittavana ovat myös merivoimien apualusten propulsiojärjestelmien puutteet ja niiden kehitysehdotukset. Lopuksi esitellään vastaus tutkimuksen pääkysymykseen eli millainen on ihanteellinen propulsiojärjestelmä merivoimien apualukselle. Luvun lopussa tarkastellaan lyhyesti propulsiojärjestelmän tulevaisuutta sekä ehdotetaan aiheeseen liittyviä jatkotutkimuksia.

Apualukset ovat korvaamattomia huollon välineitä. Niiden avulla kuljetetaan ihmisiä ja tavaroita linnakkeille, saarille sekä tukeutumispaikeille. Aluksilla voidaan kuljettaa suuria määriä tavaroita kerralla, ja niiden avulla saadaan huoltopalvelut lähelle käyttäjää. Apualuksia käytetään ympärivuotisesti lähes päivittäin. Niiden toiminta-alueena on saaristo ja ulkomeri. Aluksilta vaaditaan toimintakykyä pitkille ja vaikeille kuljetuksille kaikissa tilanteissa. Apualuksen suunnittelun lähtökohtana ovat suuri kuljetuskapasiteetti sekä monitoimikyky erilaisiin aputehtäviin. Merivoimat eivät aseta apualusten propulsiolle erikoisperusteita. Aluksen propulsiojärjestelmän ominaisuudet tarkastellaan aina aluskohtaisesti alusta suunniteltaessa. Yleisimmät vaatimukset apualuksen propulsiolle ovat taloudellisuus, jäissäkulkukyky sekä luotettavuus.

Laivan propulsiota on kehitetty huomattavasti viimeisen 200 vuoden aikana, mutta sitä tutkitaan ja pyritään kehittämään edelleen. Kehitettävää on laivan hydrodynamiikassa ja mallikokeista saatujen tuloksien sovittamisessa todelliseen alukseen. Aluksen propulsiion suunnittelu on aina aluskohtainen prosessi. Suunnittelussa tulee huomioida alukselle asetetut vaatimukset, kuten ohjailukyky ja suurin nopeus. Eniten suunnitteluun vaikuttaa aluksen rungon muoto. Propulsiion suunnittelun tärkein työkalu on matematiikka. Ilman matematiikkaa propulsiojärjestelmää olisi lähes mahdotonta optimoida ja eri osien sovittaminen keskenään olisi hankalaa.

Propulsoreita on kehitetty moneen eri tarkoitukseen. Vesisuihkupropulsio sopii hyvin alukseen, joka vaatii suuria nopeuksia ja nopeaa ohjailua. Perinteinen potkuripropulsio on taas taloudellisin vaihtoehto, ja vielä melko harvinainen POD-propulsori on valmistettu erittäin tarkkaan ja helppoon ohjailuun. Nämä ovat yleisimmät propulsorityypit. Yleisimpänä propulsiion apulaitteena käytetään poikittaistunnelissa sijaitsevaa keulapotkuria.

Apualukselle sopivin propulsiojärjestelmä on potkuripropulsio, jossa on kiinteälapainen potkuri. Tämä järjestelmä on halpa, yksinkertainen ja luotettava. Järjestelmän pääkoneeksi sopii parhaiten keskinopea dieselmoottori, jonka pyörimissuunta tulee olla vaihdettavissa. Hidaskäyntinen kone ei sovellu sotaluokselle, koska sen kiihtyvyys ja käyntinopeus ovat alhaisia. Lisäksi koneen massa ja koko ovat liian suuria. Nopeakäyntinen kone on taas massaltaan liian kevyt, mikä voi aiheuttaa vaurioita ja vääntymiä. Koneelta vaadittava teho riippuu aluksen koosta ja järjestelmävalinnoista, mutta sen tulee olla ainakin riittävä jäissäkulkua varten. Tämä voidaan selvittää merenkulkulaitoksen laatimalla kaavalla. Ehdotan, että apualusten pääkonetehot kehitetään vastaamaan vähintään kaavalla saatavaa arvoa, joka saadaan käyttämällä jääluokan 1A arvoja. Propulsiojärjestelmien määrä riippuu aluksen koosta, tehontarpeesta ja ohjailuvaatimuksista. Suositeltavinta on asentaa vain yksi propulsiojärjestelmä.

Pääkoneen suuren pyörimisnopeuden vuoksi järjestelmässä tulee olla myös alennusvaihte. Alennusvaihteen välityssuhde määräytyy aluskohtaisesti. Tarkoituksena on alentaa pääkoneen kampiakselilta tuleva kierrosnopeus niin, että potkurin pyörimisnopeus on optimaalinen. Alennusvaihteen ominaisuuksissa tulee huomioida sen luotettavuus ja viimeistelytaso. Sekä pääkoneen että alennusvaihteen

asentaminen joustavasti on suositeltavaa herätteen ja melun alentamiseksi. Tämä tulee huomioida myös konevalinnoissa.

Potkuriakseli tulee linjata tarkasti ja laakeroida tasaisesti. Asennuksessa tulee huomioida mahdollisten vääntymien aiheuttamat vaarat. Akselia ei tarvitse porata ontoksi, jolloin sen halkaisija voidaan optimoida pienemmäksi luokituslaitosten sääntöjen sallimissa rajoissa. Potkuriakseli voidaan jakaa väliakseleihin, mikäli etäisyys vaihteen ja potkurin välillä on suuri.

Järjestelmän potkuri on kiinteälapainen. Sen optimoinnin suorittaa aluksen valmistaja, joka huomioi suunnittelussa aluksen koon ja rungon muodon. Ilman tarkkoja teho- ja runkoarvoja järjestelmän mitoittaminen on arvotonta. Yleisin ratkaisu on suurihalkaisijainen, kolmilapainen potkuri. Potkureita valmistetaan erilaisista materiaaleista, kuten metalliseoksista. Apualuksen potkurissa ei tarvita pieniä heräteominaisuuksia, joten potkuria ei tarvitse muotoilla kierrettyksi. Kavitoinnin välttäminen on toissijaista potkurin hyötysuhteeseen nähden, joten superkavitoivaa muotoilua ei tarvita. Potkurin herätettä voidaan alentaa tarpeen vaatiessa vähentämällä aluksen kulkunopeutta.

Apualukselle on hyvä rakentaa ohjailua helpottava keulapotkuri. Keulapotkurijärjestelmäksi kannattaa valita dieselsähköinen vaihtoehto, jonka rakenne on yksinkertainen ja huoltaminen helppoa. Dieselsähköisen järjestelmän kokonaishyötysuhde on edullinen. Suunnittelussa tulee huomioida keulapotkurikäytön aikana tuleva sähköntarve. Tämä vaikuttaa sähköntuottotarpeeseen ja sähköpäätaulun suunnitteluun. Alukselle riittää yksi keulapotkuri. Keulapotkuri tulee mitoittaa matemaattisin kaavoin, joissa alukselle asetetaan tuulivaatimus. Suosittelem apualuksen keulapotkurin tuulivaatimuksen nostamista nykyisestä arvosta (noin 11 m/s) arvoon 13 m/s, jolloin aluksen ohjailukyky paranee kovissa tuuliolosuhteissa.

Apualuksen propulsiojärjestelmä on matemaattisesti täysin mitoitettavissa yleisesti käytettävillä kaavoilla. Pääkonetehoissa on suositeltavaa käyttää merenkulkulaitoksen laatimaa kaavaa. Amiraliteetin yhtälöön tarvitaan aluksen muotokerroin, jonka selvittäminen on hankalaa. Lisäksi tällä kaavalla saadaan tulos, jossa ei oteta huomioon jäissäkulun vaatimuksia. Propulsiojärjestelmän periaate on sama kuin siviili- tai kauppa-aluksissa. Kyseessä ovat pääkone, alennusvaihte,

potkuriakseli ja potkuri. Näille merivoimat asettavat tietyt kriteerit aluksen suunnitteluvaiheessa, ja niiden rakenteessa ja asentamisessa noudatetaan mukailien luokituslaitosten määräyksiä.

Apualuksen propulsiojärjestelmän osia sisältävät tilat tulee äänieristää huolellisesti. Konehuone äänieristetään niin, että tila vuorataan kokonaan paloturvallisella eristeellä. Eristeen paksuus kannattaa olla yli 50 mm, jolloin huoneen läpäisevä melu on vaimentunut vaarattomaksi. Keulapotkuritilojen äänieristystä tulee kehittää nykyisestä mallista. Mikäli tila on pieni, siitä voidaan suunnitella hydraulihuoneen kaltainen. Muussa tapauksessa tila kannattaa äänieristää konehuoneen kaltaisesti. Erityisesti tulee huomioida melutilojen viereiset tilat. Mikäli meluisan huoneen vieressä on tila, joka vaatii huomattavaa melun alennusta, tulee tilojen välinen seinämä eristää vähintään kaksinkertaisesti (100 mm).

Valas-luokan alukset ovat iältään siinä vaiheessa, että ne tulisi peruskorjata. Peruskorjauksen yhteydessä voitaisiin aluksille tehdä myös propulsiojärjestelmän muutostöitä. Ehdotan, että Valas-luokan keulapotkurijärjestelmästä rakennetaan dieselsähköinen ja järjestelmän tehoa nostetaan vastaamaan tuulirajaa 13 m/s. Myös alusluokan sähköntuottojärjestelmä ja sähköpäätaulu tulee uusiksi. Tällä työllä saavutettavia etuja ovat järjestelmän parempi hyötysuhde, helppo huollettavuus ja yksinkertainen rakenne. Tällöin myös toinen apukone saataisiin kytkettyä sähköverkkoon keulapotkurikäytöstä riippumatta ja kytkentäongelmia tuottanut hydraulipumppu voitaisiin poistaa. Ehdotan myös, että keulapotkuritilan eristystä parannetaan niin, että miehistömessissä oleskelu on mahdollista ilman kuulovaurion vaaraa. Valas-luokan alusten pääkonetehto on nykyisellään niin lähellä suositeltavaa arvoa, että tehon lisääminen ei kannata.

Pansio-luokan alukset ovat hyvässä kunnossa, ja ne jatkavat tehtäväänsä monta vuotta ennen korjaustarvetta. Alukset on suunniteltu jäissäkulkukykyisiksi, mutta niiden ominaisuuksissa on puutteita. Merenkulkulaitoksen kaavalla saadut tulokset todistavat, että alusten propulsiojärjestelmien tehot ovat liian pienet. Ehdotan, että tulevaisuudessa Pansio-luokan alusten pääkoneiden yhteistehoa lisätään 800 kW:lla, jolloin alusluokan konetehtävät vastaavat jääluokkaa 1A. Ehdotan myös jatkotutkimusta nopean pääkoneen soveltumisesta sota-alukselle, sillä nykyisessä ratkaisussa on todettu ongelmia järjestelmän kytkentöjen osalta. Kolmantena ehdotuksena on, että aluksen keulapotkurin tehoa lisätään vastaamaan tuulirajaa 13 m/s.

Apualuksia rakennetaan edelleen tulevaisuudessa ja niiden rooli tulee korostumaan. Nykypäivänä erilaisiin tehtäviin sopivien apualusten puute on suuri ongelma monessa maassa. Tämä ongelma ratkeaa lähitulevaisuudessa. Pyrkimyksenä maailmalla on rakentaa RoRo-aluksiin verrattavia suuria apualuksia, joilla on suuri kuljetuskapasiteetti, reilusti kansitilaa, johtomahdollisuudet ja monipuolinen varustelu erilaisiin aputehtäviin. Aluksia käytetään myös kansainvälisissä tehtävissä. Suomessa apualusten rooli muuttuu ainoastaan tehtävien osalta, sillä alukset suunnitellaan nykyistä monikäyttöisemmiksi erilaisiin kuljetus- ja virka-aputehtäviin.

Voimme arvioida tutkimuksessa saatujen havaintojen perusteella, millainen voisi olla Suomen merivoimien tulevaisuuden apualus. Aluksen jääluokitus on vähintään 1A, ja se kykenee murtamaan 30 - 40 cm:n jääkerroksen ilman syöksyä. Aluksen päämitat ovat lähellä Pansio-luokan alusta, sillä kansitilaa tarvitaan reilusti. Tällöin aluksen pituus olisi noin 40 metriä ja leveys noin 10 metriä. Aluksen korkeutta pyritään rajoittamaan häiveominaisuuksien parantamiseksi ja tuulipinta-alan minimoimiseksi. Alus on uppoumarunkoinen ja kykenee raskaisiin merikuljetuksiin. Kulkunopeus aluksella on 10 - 14 solmua. Aluksen syväys on noin kolme metriä vakavuustekijöiden ja jäissäkulkukyvyn varmistamiseksi. Alus kykenee kuljetustehtävien lisäksi monipuolisiin huolto- ja aputehtäviin, minkä vuoksi sillä on ainakin yksi nosturi ja monipuolinen varustelu. Lisäksi alus on avomerikulkykyinen ja sillä on rajoitettu omasuoja-aseistus ilmatorjuntaa varten.

Propulsoreita pyritään edelleen kehittämään niiden ominaisuuksien parantamiseksi. Lupaavin propulsiojärjestelmä tulevaisuuden kannalta on POD-propulsori. Sen ohjailukyky on erittäin hyvä, mutta sen hyötysuhdetta pyritään kehittämään paremmaksi. Perinteinen potkuripropulsio on jo kehittynyt niin pitkälle, ettei siihen tule suuria muutoksia. Säätolapainen ja kiinteälapainen potkuri kilpailevat edelleen tulevaisuudessa, sillä potkurityypin valinta perustuu aluskohtaiseen ominaisuuksien painotukseen.

Tutkimuksessa saatiin selville, että potkuripropulsio on paras vaihtoehto apualukselle. POD-propulsio on kuitenkin ominaisuuksiltaan ja tulevaisuudeltaan lupaava järjestelmä, minkä vuoksi sen soveltuvuutta merivoimien aluksiin olisi hyvä tutkia. Koska järjestelmästä ei ole vielä kokemuksia merivoimissa ja sitä testataan maailmalla, ei aiheesta ole tarkkoja tutkimuksia tai tuloksia. Tämän vuoksi ei voida

olla varmoja, onko järjestelmä potkuripropulsiota parempi vai huonompi. Ehdotan jatkotutkimusta aiheesta ”POD-propulsorin soveltuvuus merivoimien alukselle”. Tässä työssä voitaisiin selvittää propulsorin ominaisuudet ja siitä saatuja kokemuksia muilla aluksilla. Tutkimus selvittäisi, onko propulsori sopiva merivoimien alukselle.

Toinen tutkimuksessa huomioitava asia on tulevaisuuden propulsiojärjestelmän voimanlähde. Dieselmootorit ovat tällä hetkellä suosituin voimanlähde, mutta niistä joudutaan luopumaan tulevaisuudessa, kun maailman öljyvarat ehtyvät. Aihetta on alettu miettiä maailmalla ja aloitettu korvaavien vaihtoehtojen vertailu. Lupaavimmalta vaihtoehdolta näyttää tällä hetkellä ”täyssähköistetty” laiva, jossa myös aluksen propulsoria käytetään sähkön voimalla. Ehdotan jatkotutkimusta aiheesta ”Propulsiojärjestelmän voimanlähteet vuonna 2030”. Tässä työssä voitaisiin esitellä vaihtoehtoiset voimanlähteet ja tutkia niiden ominaisuuksia. Näin saataisiin selvitettyä dieselmootorit korvaava vaihtoehto etuineen ja haittoineen.

LÄHTEET

- [1] Aluserittely, Pansio-luokka. Olkiluodon telakka Oy. 1991.
- [2] Bartlett, Tim. The RYA book of diesel engines. Second edition. Amberley marine 1998, 2002. London 2002.
- [3] Benford, Harry. Naval architecture for non-naval architects. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. New Jersey 1991.
- [4] Bertram, Volker. Practical ship hydrodynamics. Copyright Volker Bertram 2000. Printed in Great Britain 2000.
- [5] Euroopan työterveys- ja työturvallisuusvirasto.
http://www.tyosuojelutietopankki.fi/good_practice/koneet/paastot.stm, 15.2.2007.
- [6] FAS - Federation of american scientists.
<http://www.fas.org/sgp/crs/weapons/RL33360.pdf>, 27.11.2006.
- [7] Finlex – Valtion säädöstietopankki.
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2006/20060085>, 15.2.2007.
- [8] Fluent computational fluid dynamics (cfd) software & services.
<http://www.fluent.com/about/news/newsletters/05v14i1/s7.htm>, 28.1.2007.
- [9] Gerr, Dave. Propeller handbook. International Marine, a division of The McGraw-Hill Companies 1989. Published by Adlard Coles Nautical. U.S.A. 1997.
- [10] Hirsjärvi, Sinikka - Remes, Pirkko - Sajavaara, Paula. Tutki ja kirjoita. 6.-9. painos. Tekijät ja Kirjayhtymä Oy 1997. 2003.
- [11] Huhtinen, Immo. Heräteemiinatekniikka. Silmu-tuotanto. Turku 1992. **Kirja on turvaluokiteltu: ETS – ei saa antaa tietoja sivullisille.**
- [12] Huolto-ohjekirja Aquamaster T 160 ohjauspotkuri. Hollming Oy. Rauma 1979.

- [13] Huoltopalveluopas. Luonnos. Pääesikunta, Huolto-osasto. Hämeenlinna 2002.
- [14] Häkkinen, Pentti. Laivan koneistot. Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto, laivalaboratorio. Otaniemi 1993.
- [15] Häkkinen, Pentti. Laivan kuljetuskoneisto. Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto. Otaniemi 1997.
- [16] Ilmatieteen laitos. http://www.fmi.fi/saa/tilastot_20.html#5, 1.12.2006.
- [17] Jalkanen, Tapani. Hydrauliiikan perusteet. Kymenlaakson ammattikorkeakoulun Merenkulun oppilaitoksen opintomoniste. Kotka 2003.
- [18] Keulaohjauspotkuri 20 F BU 2399 Käyttöohje. Olkiluodon telakka Oy / Jastram-Werke, Hamburg. Käännös 25.7.1991.
- [19] Kuljetusopas. Luonnos. Pääesikunta, Huolto-osasto. Vaasa 2002.
- [20] Laiteluettelo, Valas –luokka. Hollming Oy. Rauma 12.10.1979.
- [21] Lappalainen, Esa ja Jormakka, Jorma. Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoulussa. Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos. Helsinki 2004.
- [22] Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan osasto. <http://www.ee.lut.fi/sahkomoottori.html>, 26.11.2006.
- [23] Leskinen, Pasi. Esiupseerikurssin päättötyö - Nykyisen aluskaluston käytettävyys raskaisiin merikuljetuksiin. Maanpuolustuskorkeakoulu. Esiupseerikurssi 57/ Merivoimalinja 23. Kesäkuu 2004. **Tutkimus on turvaluokiteltu viranomaiskäyttöön (TLL IV).**
- [24] Matusiak, Jerzy. Hydrodynamiikan sovellukset sota-aluksissa – ennuste vuoteen 2020. Teknillinen korkeakoulu, laivalaboratorio. Espoo 2004.

- [25] Matusiak, Jerzy. Laivan propulsio. 6. laajennettu ja korjattu painos. Teknillinen korkeakoulu, laivalaboratorio. Otaniemi 2005.
- [26] Merenkululaitoksen tiedotuslehti 13/01.10.2002: Aluksen rakennetta ja konetehoa koskevat talviliikennevaatimukset.
<http://www.fma.fi/palvelut/tietopalvelut/julkaisut/tiedotuslehti/hae.php?l=fi&s=v>,
26.11.2006.
- [27] Merimiestaito. Puolustusvoimien koulutuksen kehittämiskeskus. Vaasa, 2000.
- [28] Merisotilaan käsikirja. Merivoimien esikunta. Helsinki 2003.
- [29] Miinantorjuntaopas (MiTorjO). Puolustusvoimien koulutuksen kehittämiskeskus. Vaasa 1999.
- [30] Mynttinen, Janne. Insinööriyö - Keulapotkurin jälkiasennus merivoimien alukselle. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, Merenkulun oppilaitos. Turku 2003.
- [31] Mäkinen, Reijo. Hydraulikka 3 - suunnittelu. Reijo Mäkinen ja kustannusosakeyhtiö Otava. 1980.
- [32] Navy matters. An independent website considering the future royal navy and promoting naval affairs. <http://navy-matters.beedall.com/cvf6.htm> sekä <http://navy-matters.beedall.com/cvf3-2.htm>, 28.1.2007.
- [33] Puolustusvoimat. Merivoimien esittely.
<http://www.mil.fi/merivoimat/esikunta/index.dsp>, 15.2.2007.
- [34] Puolustusvoimien PVAH –järjestelmän määritelmärekisteri, 8.1.2007.
- [35] Rand corporation. http://www.rand.org/natsec_area/products/electricships.html,
26.11.2006.
- [36] Rawson, K.J. ja Tupper, E.C. Basic ship theory, volume 2. Third edition. Longman Group Limited. New York, 1984.

[37] Royal Navy website.

<http://www.royal-navy.mod.uk/server/show/ConWebDoc.6150/changeNav/3533>,
28.1.2007.

[38] Räisänen, Pekka. Laivatekniikka - Modernin laivanrakennuksen käsikirja. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä 2000.

[39] Satamaoperaattorit Ry. Merenkulun tietoa.

<http://www.satamaoperaattorit.fi/FACTS4.HTM>, 12.2.2007.

[40] Sisäasiainministeriö. Suomen turvallisuus- ja puolustuspolitiikka 2004. Valtioneuvoston selonteko VNS 6/2004. Valtioneuvoston kanslia.

[http://www.intermin.fi/intermin/hankkeet/skh/home.nsf/files/Suomen%20turvallisuus-%20ja%20puolustuspolitiikka/\\$file/Suomen%20turvallisuus-%20ja%20puolustuspolitiikka.pdf](http://www.intermin.fi/intermin/hankkeet/skh/home.nsf/files/Suomen%20turvallisuus-%20ja%20puolustuspolitiikka/$file/Suomen%20turvallisuus-%20ja%20puolustuspolitiikka.pdf), 3.1.2007.

[41] Sotilasmerenkulkuohje (SMO). 2. korjattu painos. Puolustusvoimien koulutuksen kehittämiskeskus. Vaasa 1998.

[42] Suomi sodassa – talvi- ja jatkosodan tärkeät päivät. Ensimmäinen painos. Oy Valitut palat – Reader's Digest Ab 1983. Kustannusosakeyhtiö Otavan painolaitokset, Keuruu 1982.

[43] Teknillinen korkeakoulu. <http://www.tkk.fi/Yksikot/Laiva/Opinnot/Kurssit/Kul-24.305/index.html>, 9.1.2007. Tutkija muokannut kuvaa nimeämällä osat.

[44] Teknologian kehitys. Sotatekninen arvio ja ennuste 2020. STAE 2020, osa 1. Pääesikunta, Sotatalousosasto. Helsinki 2004.

[45] Tiede ja ase. Suomen sotatieteellisen seuran vuosijulkaisu N:o 52. PunaMusta, Joensuu 1994.

[46] Transfluid – transmissioni industrialii. http://www.transfluid.it/images/com_102.gif, 7.1.2007.

[47] Tutkijan muistiinpanot. ”Alus ja sen koneistot” –kurssi, 73.MeK koneopintosuunta. Merisotakoulu, teknikkoyliluutnantti Lasse Jokinen. Kevät 2004. Muistiinpanot tutkijan hallussa.

[48] Tutkijan suorittamat mittauslaskut. Aineistona alusten pääpiirustukset/ yleisjärjestelypiirustukset. Laskut ja muistiinpanot tutkijan hallussa.

[49] Valasluokan kuljetusalus, Erittely n:o 9111 E 001. Hollming Oy. Rauma 1977.

[50] Valasluokan kuljetusalus, Tuulipinta-alat ja jääkuormat. Hollming Oy. Rauma 1978.

[51] Vetus - Digitaalinen kuvasto 2007. Vetus den Ouden N.V. Alankomaat. http://www.vetus.nl/digcat/DIGCAT_2007_FIN/pages/digcat.php, 26.11.2006.

[52] Wikipedia, vapaa tietosanakirja. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Hy%C3%B6tysuhde>, 3.1.2007.

[53] Wikipedia, vapaa tietosanakirja. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Laiva>, 26.11.2006.

[54] Wikipedia, vapaa tietosanakirja. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Lastimerkki>, 12.2.2007.

[55] Wikipedia, vapaa tietosanakirja. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Potkuri>, 26.11.2006.

[56] Wikipedia, vapaa tietosanakirja. <http://fi.wikipedia.org/wiki/%C3%96ljyhuippu>, 27.11.2006.

LIITTEET

- Liite 1 Merivoimien apualuksen suunnitteluperusteet
- Liite 2 Valas- ja Pansio-luokan alusten mitat ja nopeudet
- Liite 3 Joustavan kytkimen toimintaperiaate
- Liite 4 Tuulen paine ja navakan tuulen päivät

MERIVOIMIEN APUALUKSEN SUUNNITTELUPERUSTEET

Tutkija: Olen yrittänyt löytää kirjallista aineistoa, jossa kerrotaisiin apualuksen suunnittelun perusteita ja vaatimuksia. Onko merivoimilla omia dokumentteja, jotka suoraan käsittelevät apualusten käyttö- tai mitoitusperusteita?

Ronkainen: Apualusten perusteista ja vaatimuksista en löytänyt mitään dokumenttia. Mitä täällä työskennellessäni olen huomannut, niin homma on edennyt seuraavasti:

- Ylemmältä johdolta tulee laiva-alalle käsky suunnitella alus, joka kykenee suoriutumaan jostakin tai joistakin seuraavista tehtävistä:
 - o joukkojen kuljetuksista, henkilölukumäärästä
 - o miina/ammuskuljetuksista, kapasiteettivaatimuksista
 - o henkilö- ja materiaalikuljetuksista
 - o täydennyskuljetuksista, kapasiteettivaatimuksista
 - o ajoneuvokuljetuksista
- Lisäksi otetaan huomioon:
 - o syväysvaatimukset, jotka vaikuttavat rungon muotoon ja propulsiokoneiston valintaan
 - o nopeusvaatimukset, jotka vaikuttavat rungon muotoon ja propulsiokoneiston valintaan
 - o toiminta-aika ja toimintamatka, varastojen kapasiteetit
 - o omasuoja
 - o olosuhdevaatimukset: avomerikelpoisuus, saaristokelpoisuus, tuuli-, aallokko ja jäissäkulkuvaatimukset (rungon materiaali)
 - o luokittelu taistelu- vai apualukseksi, ABC –suojaus, ylipaineistus
 - o kansi- ja konehenkilöstön pätevyysmääräykset ja lukumäärä.

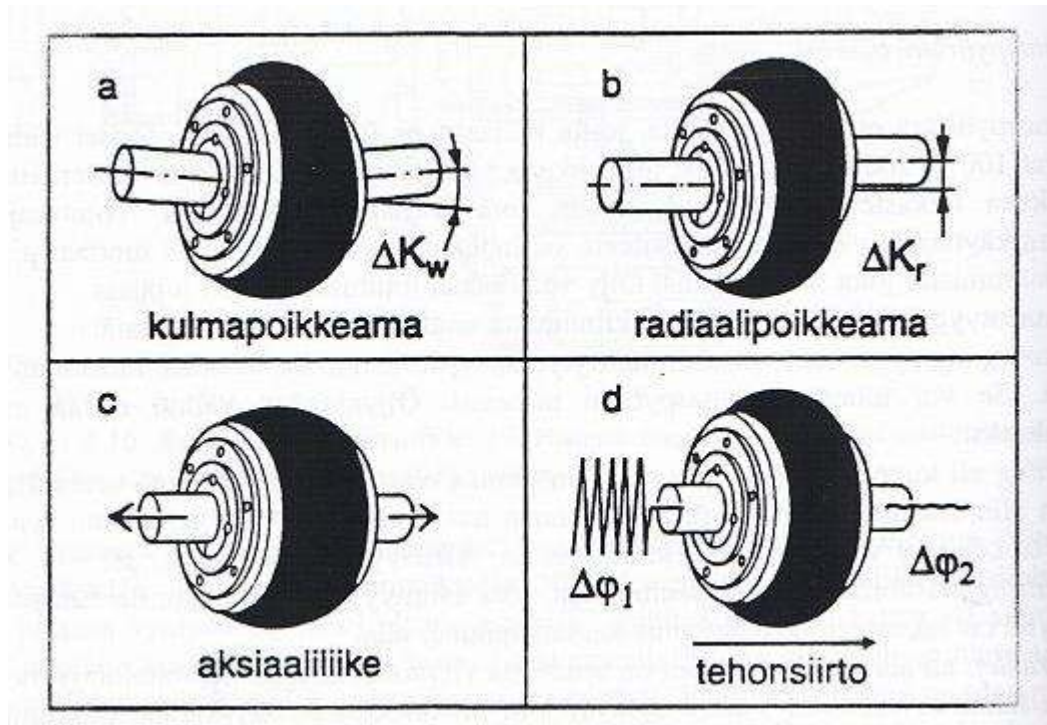
Lähde: Kapteeniluutnantti Markku Ronkaisen (Merivoimien esikunta, materiaaliosasto) haastattelu 25.1.2007.

VALAS- JA PANSIO-LUOKAN ALUSTEN MITAT JA NOPEUDET**Valas-luokka:**

- pituus KVV 27,7m
- pituus KOK 30,65m
- leveys max 8,1m
- syväys 3,2m
- nopeus n.12s
- uppouma max 285t

**Pansio-luokka:**

- pituus KVV 39,2m
- pituus KOK 43,3m
- leveys max 10,26m
- syväys 2,0m
- nopeus 10-11s
- uppouma max 621t

JOUSTAVAN KYTKIMEN TOIMINTAPERIAATE

Lähde: Häkkinen, Pentti. Laivan kuljetuskoneisto. Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto. Otaniemi 1997.

TUULEN PAINEN JA NAVAKAN TUULEN PÄIVÄT

Tuulen voima Beaufort	Kuvaus	Tuulen nopeus m/s	Tuulen paine N/m ²
4	Kohtalainen	5,5 - 7,9	20 - 40
5	Luja	8,0 - 10,7	41 - 74
6	Navakka	10,8 - 13,8	75 - 123
7	Voimakas	13,9 - 17,1	125 - 189
8	Myrsky	17,2 - 20,7	191 - 276

Lähde: Tuulen paine - Vetus - Digitaalinen kuvasto 2007. Vetus den Ouden N.V.
Alankomaat. http://www.vetus.nl/digcat/DIGCAT_2007_FIN/pages/digcat.php,
26.11.2006.

Navakan tuulen päivät					Keskiarvovuodet 1996-2005				
Isosaari	>=10 m/s				Valassaaret	>=10 m/s			
	2006	Keskiarvo	2005	2004		2006	Keskiarvo	2005	2004
Tammikuu	14	18	24	12	Tammikuu	12	16	19	12
Helmikuu	5	16	15	17	Helmikuu	5	14	13	8
Maaliskuu	7	12	6	8	Maaliskuu	9	12	7	14
Huhtikuu	5	10	5	4	Huhtikuu	4	8	5	3
Toukokuu	5	9	10	6	Toukokuu	0	7	5	7
Kesäkuu	4	7	6	3	Kesäkuu	2	6	4	4
Heinäkuu	3	6	4	8	Heinäkuu	8	4	4	3
Elokuu	12	8	13	9	Elokuu	0	8	8	5
Syyskuu	8	12	5	14	Syyskuu	5	10	15	12
Lokakuu	18	17	15	17	Lokakuu	13	16	20	13
Marraskuu		18	22	18	Marraskuu		16	18	22
Joulukuu		20	19	16	Joulukuu		17	12	17
Kpl/vuosi	81	151	144	132	Kpl/vuosi	58	133	130	120
Kovan tuulen päivät					Keskiarvovuodet 1990-2005				
Bogskär	>=14 m/s				Kemi, Ajos	>=14 m/s			
	2006	Keskiarvo	2005	2004		2006	Keskiarvo	2005	2004
Tammikuu	10	12	20	11	Tammikuu	4	5	6	4
Helmikuu	3	8	7	8	Helmikuu	0	5	5	5
Maaliskuu	1	6	5	3	Maaliskuu	0	4	0	0
Huhtikuu	1	3	4	0	Huhtikuu	0	1	1	0
Toukokuu	1	1	1	0	Toukokuu	0	1	1	0
Kesäkuu	1	1	0	1	Kesäkuu	2	1	0	0
Heinäkuu	1	1	1	0	Heinäkuu	2	1	0	1
Elokuu	0	1	3	3	Elokuu	0	1	1	0
Syyskuu	8	5	2	10	Syyskuu	2	4	14	1
Lokakuu	5	7	10	6	Lokakuu	4	4	15	2
Marraskuu		8	11	11	Marraskuu		4	9	7
Joulukuu		10	12	17	Joulukuu		5	1	11
Kpl/vuosi	29	65	76	70	Kpl/vuosi	14	36	53	31

Päivitetty 1.11.2006

Lähde: Navakan tuulen päivät - Ilmatieteen laitos.
http://www.fmi.fi/saa/tilastot_20.html#5, 1.12.2006.