

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
LUT School of Energy Systems  
Energiatekniikan koulutusohjelma  
BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Kandidaatintyö

**Kalle Palola**

**SELVITYS YDINKÄYTTÖISISTÄ PINTA-ALUKSISTA JA  
KELLUVISTA SÄHKÖNTUOTANTOLAITOKSISTA  
A report on nuclear-powered surface vessels and floating power plants**

Työn tarkastaja: Dr. sc. Arto Ylönen

Työn ohjaaja: Dr. sc. Arto Ylönen

Lappeenranta 4.5.2015

# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
LUT School of Energy Systems  
Energiatekniikan koulutusohjelma

Kalle Palola

## **Selvitys ydinkäyttöisistä pinta-aluksista ja kelluvista sähköntuotantolaitoksista** A report on nuclear-powered surface vessels and floating nuclear power plants

Kandidaatintyö

2015

45 sivua, 12 kuvaa, 2 liitettä

Työn tarkastaja: Dr. sc. Arto Ylönen

Hakusanat: laivareaktorit, kelluvat sähköntuotantolaitokset, FNPP, ydinkäyttöiset alukset, ydinjäänmurtaajat

Tämä työ on kirjallisuusselvitys ydinvoimakäyttöisistä aluksista. Raportin tavoitteena on toimia kattavana tietolähteenä ydinvoiman käytöstä laivoissa ja muissa pinta-aluksissa. Työn tarkoituksena on toimia myös kompaktina lähdetietokantana lukijalle, joka haluaa perehtyä johonkin laivareaktoreiden osa-alueeseen syvällisemmin. Työn tärkein tuotos on liitteenä oleva laivareaktoritietokanta sekä siihen liittyvä lähdeluettelo.

Kattavaa ja ajankohtaista tietolähdettä ydinkäyttöisistä aluksista ei ole ollut lainkaan saatavilla. Laivareaktoreihin liittyvä tieto on ollut hyvin pirstoutunutta, joten tällaiselle kokoaikaiselle tutkimukselle on ollut kysyntää. Liitteenä oleva luettelo laivareaktoreja käyttävistä aluksista kattaa kaikki tiedossa olevat pinta-alukset. Luettelon tiedonkeruu on toteutettu pitkälti verkosta saatavien dokumenttien pohjalta. Olennaisimmat tiedot on hankittu luotettavista lähteistä ja täydentävien tietojen kohdalla on voitu nojata myös epätieteellisempiin lähteisiin kuten uutisartikkeleihin.

Tämän raportin perusteella laivareaktorit ovat löytäneet korvaamattoman aseman sekä lentotukialusten että jäänmurtaajien keskuudessa. Yhdysvallat tulee ylläpitämään lentotukialuskantaansa ja Venäjän jäänmurtajalaivasto tulee kasvamaan lähitulevaisuudessa. Yhdysvalloilla ei ole suunnitelmia lähteä rakentamaan jäänmurtaajia eikä Venäjällä aikeita lentotukialuksen rakentamiseksi, mutta Venäjällä on sen sijaan suunnitelmia kelluvien sähköntuotantolaitosten rakentamiseksi. Laivareaktoreita tullaan näkemään tulevaisuudessa liikuteltavissa FNPP-laitoksissa sekä tislusasemissa ja mahdollisesti myös rahtialuksissa.

Työ herätti useita jatkotutkimusideoita laivareaktoreiden parista. Hyviä jatkotutkimusaiheita olisivat esimerkiksi ydinvoimalla toimivat tisluslaitokset, SMR-reaktorit, vedenalaiset ydinvoimalat sekä laivareaktoreiden muut vaihtoehtoiset sovelluskohteet.

## SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO .....	5
1.1	Työn taustaa .....	5
1.2	Tavoitteet ja rajaukset .....	6
2	LAIVAREAKTOREIDEN KEHITYS .....	7
2.1	Ensimmäinen ydinsukellusvene USS Nautilus .....	7
2.2	Ensimmäinen ydinkäyttöinen lentotukialus USS Enterprise .....	7
2.3	Ensimmäinen ydinkäyttöinen jäänmurtaja Lenin .....	8
2.4	Onnettomuudet .....	9
3	LAIVAREAKTORIT .....	12
3.1	Laivareaktoreiden nykytila .....	12
3.2	Käyttökohteet ja -tarkoitus .....	15
3.3	Maantieteellinen jakautuminen .....	16
3.4	Reaktorikonseptit .....	17
4	LAIVAREAKTOREIDEN TULEVAISUUDENNÄKYMÄT .....	26
4.1	Rakenteilla tai suunnitteilla olevat projektit .....	26
4.2	Vaihtoehtoiset konseptit .....	29
4.3	Mahdollisuudet Suomessa .....	31
4.4	Tulevaisuuden kehityssuunta .....	32
5	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	34
6	YHTEENVETO .....	35

## LIITTEET

Liite I: Tietokanta ydinkäyttöisistä pinta-aluksista

Liite II: Liitteen I tietokannan lähdeluettelo

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

EMALS	Electromagnetic Aircraft Launch System
FNCP	Floating nuclear co-generation plant
FNPP	Floating Nuclear Power Plant
FNPS	Floating Nuclear Power Station
GE	General Electric
HEU	Highly Enriched Uranium
HTGCR	High-Temperature Gas-Cooled Reactor
LEU	Low Enriched Uranium
LOCA	Loss-of-coolant accident
LUT	Lappeenranta University of Technology
NPDP	Nuclear power and desalination plant
shp	sea horse power
SMR	Small Modular Reactor

## 1 JOHDANTO

Fossiilisten konventionaalisten polttoainevarantojen riittävyys ja hintakehitys herättävät väistämättä kysymyksen siitä, mikä tulee olemaan esimerkiksi rahtilaivojen ensisijainen energialähde tulevaisuudessa. Öljyvarojen riittävyydelle esitetäänkin hyvin erilaisia näkemyksiä, sillä ennusteisiin vaikuttaa olennaisesti arvioivan tahon optimistisuus löytämättömien esiintymien laajuudelle sekä luottamus öljyntuotantoteknologian kehitykselle (Ruska et al. 2012). *Reserves-to-production* -luku kuvaa nykyisten hyödynnettävissä olevien öljyvarantojen riittävyttä nykykulutuksella. Tälle konservatiiviselle arvolle on esitetty arvioita väliltä 40–45 vuotta (IEA 2013). Lukuisista erilaisista näkemyksistä huolimatta selvää on kuitenkin se, että öljy tulee ehtymään ja sen hinta tulee nousemaan tulevaisuudessa huomattavasti. Korvaavien energiantuotantomuotojen löytäminen on siten hyvin ajankohtaista. Meriteitse kulkeva rahti tulee olemaan tulevaisuudessakin hallitseva kuljetusväylä, joten rahtialusten tulevaisuuden voimanlähteiden kartoitus on erittäin perusteltua.

Laivareaktoreita ei voida sammuttaa kuten konventionaalisia polttoaineita käyttäviä laivoja. Ydinreaktiot tuottavat termistä tehoa myös satamassa laivan ollessa paikallaan, ja tätä tehoa voidaan syöttää generaattoreilla mantereella sijaitsevaan verkkoon. Tällaisella toimintamahdollisuudella vältetään kalliin sähköntuotantoyksikön rakentaminen mantereelle. Voimantuotantolaitoksen liikuteltavuus mahdollistaa lyhytaikaisen tehotarpeen tyydyttämisen kustannustehokkaasti. Työssä myös keskitytään tällaisten liikuteltavien sähköntuotantolaitosten rooliin koko laivareaktorisektorilla.

### 1.1 Työn taustaa

Tässä kandidaatintyössä perehdytään ydinvoimakäyttöiseen laivateollisuuteen ja tehdään katsaus alan tilanteeseen. Työssä myös tarkastellaan alan kehityskaarta ja tulevaisuutta sekä arvioidaan alan mahdollisuuksia Suomessa. Tarkoituksena on tuottaa ajankohtainen kokoaava raportti laivareaktorisektorin nykytilanteesta, sillä tietoa ydinkäyttöisistä laivoista löytyy hyvin hajanaisesti. LUT:ssa (Lappeenranta University of Technology) on tutkittu laivareaktoreita kandidaatintyön muodossa aiemminkin, mutta tämä Ilkka Suntion laatima kandidaatintyö *Laivareaktorit* (2014) keskittyi esittelemään laivareaktoreita teknisestä näkökulmasta, kun taas tämän työn tarkoituksena on keskittyä kartoittamaan alusten nykyti-

laa sekä tulevaisuuden kehityssuuntaa. Ydinsukellusveneitä on tutkinut puolestaan Olli Kukkonen kandidaatintyössään *Sukellusvenereaktorit* (2012). Tämäkin raportti tehtiin LUT:n alaisuudessa.

## **1.2 Tavoitteet ja rajaukset**

Työn yhtenä tavoitteena on antaa lukijalle yleiskuva laivareaktoreiden historiasta, kehityksestä ja nykytilasta. Työssä myös keskitytään kellovien sähköntuotantolaitosten esittelyyn ja työ tarjoaa kattavasti tietoa kaikista käynnissä olevista projekteista. Tavoitteena on antaa lukijalle tietoa myös suunnitteluvaiheen konsepteista, joiden toteuttamiseksi ei ole vielä rakennusprojekteja. Ydinvoimakäyttöisten laivojen luokittelu monin eri kriteerein on myös keskeisessä roolissa tämän työn sisällössä. Työssä käytettäviä lajittelukriteerejä ovat maantieteellinen sijainti, käyttökohde, reaktorikonsepti, ikä, toimintastatus sekä kokoluokka. Ydinsukellusveneet rajataan tarkastelusta pois, ja työ keskittyy siten ydinkäyttöisiin lentotukialuksiin, rahtilaivoihin, jäänmurtajiin sekä kelluviin sähköntuotantolaitoksiin. Ydinsukellusveneitä kuitenkin sivutaan kappaleessa 2, jossa käydään läpi alan historiaa. Ilkka Suntio sivuaa raportissaan *Laivareaktorit* (2014) myös tämän työn sisältöä hyvin läheisesti ja tämän työn sisältö onkin pyritty limittämään siten, että raportit olisivat toisiaan täydentäviä.

## **2 LAIVAREAKTOREIDEN KEHITYS**

Kuten monissa uusissa pilottiteknologioissa, myös ydinvoimakäyttöinen laivateknologia lähti kehittymään sotilaalliselta puolelta. Ydinvoiman mahdollisuudet laiva- ja sukellusveneteknologiassa havaittiin jo hyvin varhain suhteessa ydinvoimalaitosten kehitykseen. Ydinvoima käyttövoimana mahdollistaa hyvin pitkät sukellukset sekä nopean etenemisvauhdin, jotka ovatkin sukellusveneille tärkeitä ominaisuuksia. Kehitystyö ydinvoimakäyttöisen sukellusveneen rakentamiseksi aloitettiin jo 1940-luvulla ja maailman ensimmäinen ydinvoimakäyttöinen sukellusvene USS Nautilus laskettiin merelle 1955. (WNA 2015a.)

### **2.1 Ensimmäinen ydinsukellusvene USS Nautilus**

Yhdysvaltain laivaston USS Nautilus SSN-571 -ydinsukellusveneen rakentaminen aloitettiin 1952 ja se valmistui 1954. Merille alus laskettiin 1955. Nautilus kykeni saavuttamaan nopeuksia, sukelluspituuksia ja -aikoja, joihin konventionaaliset sukellusveneet eivät pystyneet. Se oli ensimmäinen alus, joka saavutti pohjoisnavan. Nautilus poistettiin käytöstä 1980, kun se oli palvellut 25 vuotta, suorittanut 2500 sukellusta ja matkustanut 513 000 mailia. Nykyään se palvelee museona Connecticutissa. (Ragheb 2015.) USS Nautilus oli varustettu yhdellä Westinghousen S2W-reaktorilla, jonka terminen teho oli 55–60 MW (Gagarinski et al. 1996).

### **2.2 Ensimmäinen ydinkäyttöinen lentotukialus USS Enterprise**

Ensimmäinen ydinvoimakäyttöinen lentotukialus oli USS Enterprise CVN-65, joka valmistui vuonna 1960 ja se otettiin käyttöön 1961. Sen voimanlähteenä toimi 8 reaktoriyksikköä. Enterprise oli käytössä aina vuoteen 2012 saakka. (WNA 2015a.) Enterprise ehti palvella laivastoa aktiivisesti jopa 51 vuoden ajan. Reaktorit olivat tyypiltään Westinghousen A2W-reaktoreita, jotka käyttivät polttoaineenaan erittäin korkeasti rikastettua uraanidioksidipolttoainetta ( $UO_2$ ). Rikastusaste U-235-isotoopin suhteen oli jopa 97,3 %. A2W-reaktoreiden terminen teho oli 120 MW reaktoriyksikköä kohden. Propulsiotehoa reaktorit tuottivat yhteensä 280 000 shp (sea horse power). Reaktoreiden primääripaine oli 100 bar. Enterprisen pituus oli jopa 342 m. Kookkaampaa ydinvoimalla toimivaa alusta ei ole Enterprisen jälkeen tehty eikä tällaisen kokoluokan alusta ole edes suunnitteilla. (Liite I.)



**Kuva 1.** Maailman ensimmäinen ydinkäyttöinen lentotukialus USS Enterprise CVN-65 (Global Security 2011).

### **2.3 Ensimmäinen ydinkäyttöinen jäänmurtaaja Lenin**

Enterprise ei kuitenkaan ollut ensimmäinen ydinvoimakäyttöinen pinta-alus, sillä Neuvostoliiton Lenin-jäänmurtaaja otettiin käyttöön jo 1959. Lenin palveli 30 vuotta ja se poistettiin käytöstä vuonna 1989 rungon kulumisen vuoksi. Alun perin Leninissä oli kolme 90 MWth OK-150-reaktoria, mutta nämä vahingoittuivat pahoin uudelleenlatausten yhteydessä 1965 ja 1967. Vuonna 1970 nämä kolme reaktoria korvattiin kahdella 171 MWth OK-900-reaktorilla. Reaktorit tuottivat höyryä turbiineille, jotka tuottivat edelleen sähköä potkureille. (WNA 2015a.)





**Kuva 2.** Maailman ensimmäinen ydinkäyttöinen pinta-alus – Neuvostoliiton jäänmurtaja Lenin (Arktinen Keskus 2012).

Leninin reaktorit olivat painevesireaktoreita. Polttoaineen rikastusaste U-235-isotoopin suhteen oli alkuperäisissä OK-150-reaktoreissa vain 5 %, kun OK-900-reaktoreissa sen raportoidaan olleen 45–75 %. Polttoaine oli uraanidioksidia ( $UO_2$ ), joka oli suljettu zirkonium-suojakuoreen. Leninin propulsioteho oli 44 000 shp. (Liite I.)

## 2.4 Onnettomuudet

Tässä kappaleessa käymme läpi ainoastaan onnettomuuksia tai vaaratilanteita jotka liittyvät läheisesti reaktorin toimintaan tai säteilyyn. Tietoa onnettomuuksista löytyy niukasti, mutta tässä kappaleessa on listattuna onnettomuudet, joista on dokumentoitua tietoa ja joiden tiedetään varmuudella tapahtuneen. Käymme onnettomuudet läpi niiden tapahtumajärjestyksessä.

#### 2.4.1 Lenin 1965–1967

Tämän tapahtuman ajankohdasta ja luonteesta ei ole täysin yksiselitteistä tietoa. Joidenkin lähteiden mukaan onnettomuuksia on tapahtunut kaksi, kun taas toiset lähteet uskovat yhteen LOCA-onnettomuuteen (Loss-of-coolant accident) vuonna 1966. Kaikki lähteet ovat kuitenkin yksimielisiä siitä, että näihin aikoihin venäläisellä Lenin-jäänmurtajalla on tapahtunut vakava onnettomuus.

NKS-järjestön (Pohjoismainen ydinturvallisuustutkimus) raportti *The Potential Risks from Russian Nuclear Ships* (2001) on yhden onnettomuuden teorian kannalla. Raportin mukaan vuonna 1966 Lenin oli läpikäymässä jälleenlatausta ja operaattorin virheen vuoksi jäähdytevesi tyhjeni sydäimestä. Tämän seurauksena sydän oli jonkin aikaa ilman jäähdytystä. Sydämen ylikuumentumisen seurauksena osa polttoaine-elementeistä sulii ja epämuodostui. Vain alle puolet polttoaine-elementeistä pystyttiin poistamaan sydäimestä normaalein toimenpitein. Loput polttoaine-elementit poistettiin yhdessä kehikon kanssa. Tämän onnettomuuden seurauksena vanhat reaktorit korvattiin kahdella KLT-40-reaktorilla. (NKS 2001.) Järjestön toisen raportin mukaan onnettomuuden seurauksena jopa 30 ihmistä on saattanut kuolla välittömästi ja useat ovat altistuneet säteilytauteille. Raportin mukaan alus jouduttiin hylkäämään ainakin vuodeksi ennen kuin töitä laivalla on pystytty jatkamaan. (NKS 1996.)

#### 2.4.2 Mutsu 1974

Japanin ensimmäinen ydinvoimalla toimiva laiva Mutsu oli testiajolla Tyynellä valtamerellä syyskuun 1. päivänä vuonna 1974. Kun miehistö nosti tehon vain 1,4 % tasolle, alkoi reaktori vuotamaan nopeita neutroneita ulos. Säteilyvuodon syy oli reaktorikilven virheellinen rakenne. Westinghouse Electric Company oli varoittanut säteilyvuodon mahdollisuudesta kyseisellä reaktorikilven rakenteella, mutta suunnitelmiin ei tehty muutoksia. Media uutisoi tapauksesta virheellisesti radioaktiivisuusvuotona vaikka kyseessä oli todellisuudessa säteilyvuoto. Tämä väärinkäsitys häiritsi Mutsun korjaustoimien etenemistä, sillä alusta ei haluttu päästää satamaan. (Masayuki 2011.)

#### 2.4.3 Ushakov 1990

Tammikuussa 1990 Neuvostoliiton ydinvoimalla toimiva Kirov-luokan sota-alus Admiral Ushakov kärsi reaktoriongelmistä Välimerellä. Ilmeisesti tapaukseen liittyy pieni jäähdytysvouto toisen reaktorin primääripiirissä. Alus palasi kotisatamaansa Kuolan niemimaalle omin voimin. Tiettävästi alus ei ole ollut käytössä tämän tapahtuman jälkeen. (NKS 1996.)

#### 2.4.4 John S. Stennis CVN-74 1999

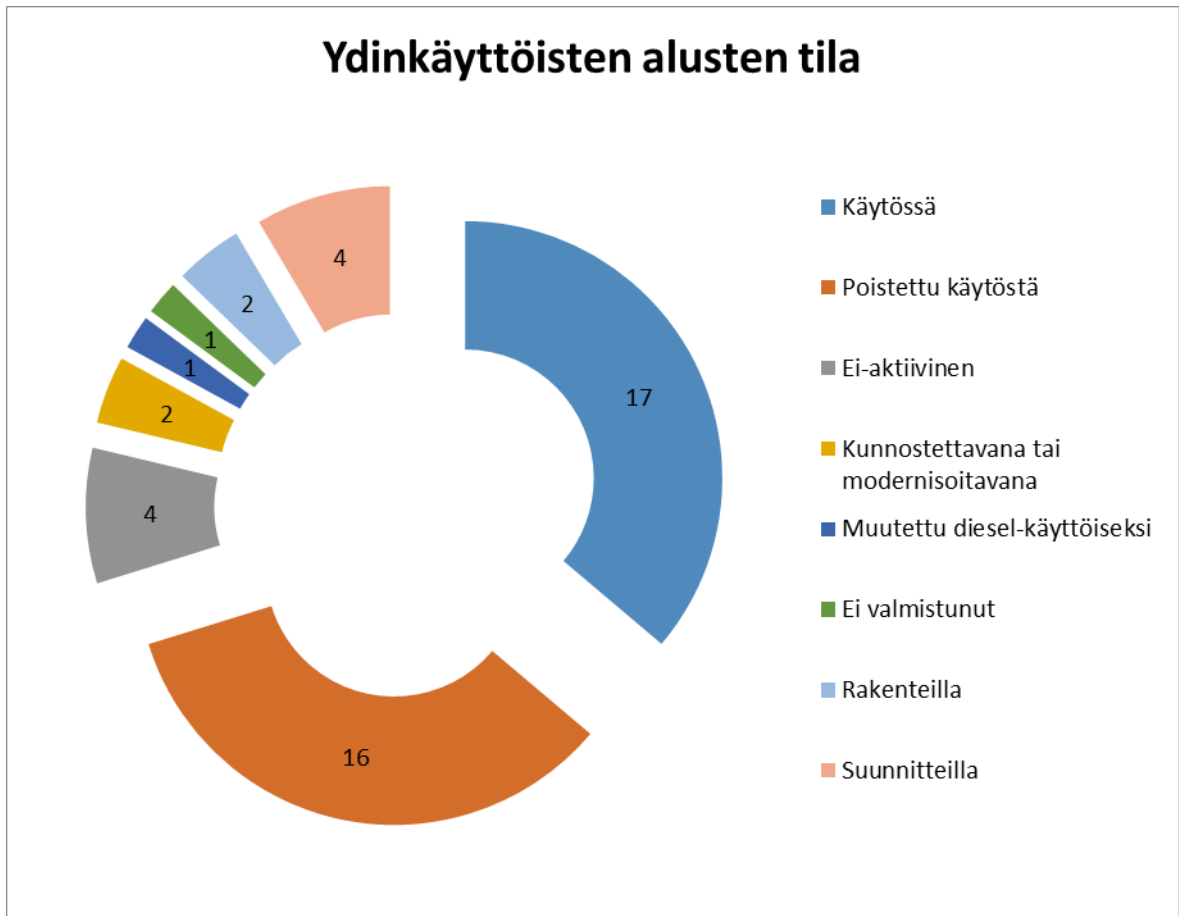
Yhdysvaltain laivaston onnettomuustilasto ydinonnettomuuksien osalta on hyvä johtuen laivaston henkilökunnan korkealuokkaisesta koulutuksesta sekä pitkälle viedystä standardisoinnista (WNA 2015a). Lentotukialus CVN-74 koki kuitenkin vuonna 1999 vaaratilanteen, joka toisen lähteen mukaan on luokiteltu LOCA-onnettomuudeksi, mutta Yhdysvallat itse ei puhu tämän yhteydessä onnettomuudesta tai edes vaaratilanteesta. Marraskuun 30. päivänä 1999 lentotukialus John S. Stennis ajoi karille Kalifornian rannikolla San Diegon lähistöllä. Tämän seurauksena molempien reaktoreiden jäähdytysveden sisäänvirtauskanavat tukkeutuivat liejusta. Automaattinen pikasulkujärjestelmä ajoi toisen reaktorin alas välittömästi ja toista reaktoria ajettiin alemmalla tehotasolla aluksen energiansaannin turvaamiseksi. Lopulta myös tämä reaktori ajettiin alas, kun vaihtoehtoinen jäähdytyslähde saatiin käyttöön. Alusta mahdollisesti kevennettiin sen vesi- ja polttoainevarastoista. Alus hinattiin laituriin syvemmille vesille hinaajan avustamana. (Ragheb 2015.)

### 3 LAIVAREAKTORIT

Tämän työn yksi keskeinen tarkoitus on listata ja lajitella kaikki toiminnassa olleet laivareaktorit. Tässä kappaleessa käsitellään ainoastaan aluksia, jotka ovat olleet käytössä, ovat edelleen käytössä tai ovat rakenteilla. Kappaleessa 3.1 tehdään läpileikkaus reaktoreiden nykytilanteeseen. Kappaleessa esitellään myös reaktoreiden ikä- ja toimintastatusjakauma. Kappale 3.2 keskittyy laivareaktoreiden lajittelemiseen niiden käyttötarkoituksen perusteella. Tämän jälkeen laivareaktorit lajitellaan maantieteellisesti. Kappaleessa 3.4 laivareaktoreita lajitellaan niiden teknisten ominaisuuksien ja konseptin mukaan. Kappale 3 perustuu lähes kokonaan liitteen I tietokantaan. Tästä johtuen tekstissä viitteitä ei ole toistettu, mikäli siihen ei ole nähty erikseen tarvetta. Tekstissä esitetyt asiat on mahdollista tarkistaa tietokannassa ilmoitetuista lähteistä. Liitteen I tietokannan lähteet löytyvät erillisenä luettelona liitteestä II.

#### 3.1 Laivareaktoreiden nykytila

Tällä hetkellä ydinvoimakäyttöisiä aluksia on kaiken kaikkiaan 140, joista suurin osa on ydinsukellusveneitä. Reaktoreita aluksissa on yli 180 ja käyttökokemusta on kertynyt yli 12 000 käyttövuotta. (WNA 2015a.) Tämän tutkimuksen yhteydessä tehdyn tietokannan (ks. Liite I) perusteella ydinvoimakäyttöisiä pinta-aluksia on yhteensä 40, kun lasketaan yhteen käytössä olevat ja käytöstä poistetut alukset. Näistä aluksista 16 on varmuudella poistettu käytöstä ja yksi on muutettu dieselkäyttöiseksi. Neljä aluksista ei ole enää aktiivisessa käytössä ja ne odottavat jatkokäsittelyä. Uutisraportin mukaan venäläinen Sevморput on kunnostettavana, mutta varmempaa tietoa asiasta ei ole. Nakhimov-aluksen puolestaan kerrotaan olevan modernisoitavana. Kaikki ei-aktiivisessa tilassa olevat alukset ovat venäläisiä (ei-aktiiviset, kunnostettavana olevat sekä modernisoitavana olevat alukset). Kuvassa 3 on esitetty alusten tila havainnollisesti. Huomaa, että yksi alus voi olla edustettuna vain yhdessä kategoriassa.



**Kuva 3.** Laivareaktorialusten sijoittuminen toimintastatuksen mukaan (Liite I).

Venäjän Sevmorput-aluksen status on Marine Traffic -sivuston mukaan *Decommissioned or lost* (Marine Traffic 2014). Barents Observer -uutissivuston artikkelin mukaan Sevmorput on ollut vuosia toimeettomana ja se on odottanut purkamistaan. Alkuperäisten suunnitelmien mukaan alus sai purkutuomion, mutta Venäjän suunnitelmat ovat muuttuneet kahteenkin kertaan. Yksi vaihtoehto oli tehdä aluksesta öljynporausalus, mutta Rosatom tuli siihen tulokseen, että jäänmurtajalaivaston ylläpitäminen on tärkeämpää. Sevmorputin odotetaan jatkavan toimintaansa 2016, kun kunnostustyöt on saatu päätökseen. (Barents Observer 2014.)

Kuvan 3 kaaviossa Sevmorputin on oletettu olevan kunnostettavana. Näin ollen aktiivisia pinta-aluksia on siten ainoastaan 17. Näistä aluksista 10 on Yhdysvaltojen laivaston Nimitz-luokan lentotukialuksia. Yhdysvaltojen ydinvoimakäyttöisistä lentotukialuksista ainoastaan USS Enterprise on poistettu käytöstä. Lentotukialuskanta on saamassa Yhdysvalloissa jatkoa, sillä järjestyksessään kahdestoista ydinvoimakäyttöinen lentotukialus Gerald

R. Ford on ollut työn alla vuodesta 2009 asti ja se astuu palvelukseen odotettavasti vuonna 2016. Tämä Gerald R. Ford kantaa mallikoodia CVN-78 ja se aloittaa lentotukialuksissa uuden aikakauden. Gerald R. Ford -luokan toinen alus CVN-79 nimetään John F. Kennedyn mukaan. Tämän aluksen rakentaminen on hyvin varhaisessa vaiheessa eikä sen köliä ole vielä laskettu. Gerald R. Ford -luokan kolmas alus CVN-80 saa jälleen nimen USS Enterprise edeltäjäänsä kunnioittaen. Yhdysvallat aikoo ylläpitää lentotukialuskantaansa viiden vuoden rakentamissyklillä. Yhdysvaltojen laivaston ydinvoimalla toimineet muut pinta-alukset on kaikki poistettu käytöstä jo ennen vuotta 1999. Yhdysvalloilla on ollut myös yksi ydinvoimakäyttöinen rahtialus. NS Savannah otettiin käyttöön 1962 ja poistettiin käytöstä jo 8 vuotta myöhemmin 1970. (Liite I.)

Vuonna 1963 rahtialus Charles H. Cugle valittiin läpikäymään muutosprosessi rahtialuksesta liikuteltavaksi voimalaitokseksi. Voimanlähteeksi tuli painevesireaktori MH-1A. Muutoksen myötä alus sai nimen Sturgis. Se aloitti toiminnan 1967 Virginiassa ja vuoden päästä se hinattiin Panaman kanavavyöhykkeelle, missä sitä käytettiin sähköntuotantoon niin sotilas- kuin siviilitarkoituksiin. Sturgis toimi täällä aina vuoteen 1976 saakka. Sturgisin reaktoria ei käytetty lainkaan propulsiotarkoitukseen. (Honerlah & Hearty 2002.)

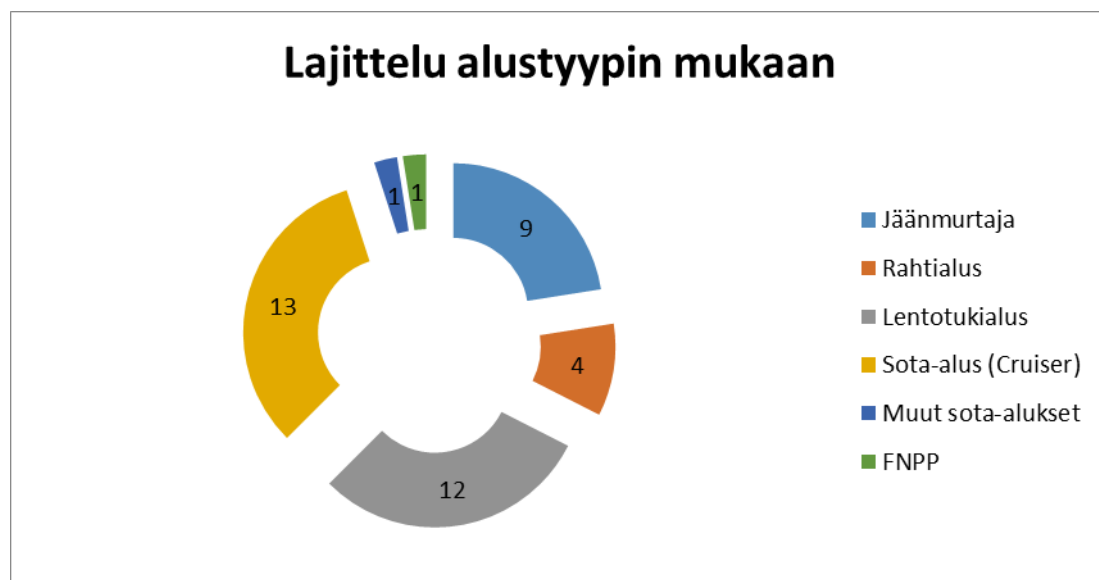
Venäjän kymmenestä jäänmurtajasta kaksi on poistettu käytöstä, kaksi odottaa jatkokäsittelyä ei-aktiivisessa tilassa ja Sevморput läpikäy kunnostustöitä. Aktiivisia aluksia on siten 5. Venäläisistä sotalaivoista palveluksessa on enää Kirov-luokan neljäs eli viimeinen alus Pyotr Veliky. Kirov-luokan pinta-alusten lisäksi Venäjän laivastolla on ollut käytössä ainoastaan yksi muu ydinvoimakäyttöinen pinta-alus, SSV-33 Ural. Ural oli Kapusta-luokan tulenjohtoalus joka tunnetaan myös nimillä Project 1941 tai Titan. Alus otettiin käyttöön 1988. Alus osoittautui venäläisille liian monimutkaiseksi ja se poistettiin lopulta käytöstä 2001. Venäjä aloitti vuonna 1988 rakentamaan Ulyanovsk-nimeä kantavaa lentotukialusta, mutta projekti keskeytettiin taloudellisista syistä 2001. Aluksesta käytettiin myös nimiä Project 1143.7 ja Orel. (Liite I.)

Ranskalla on ollut käytössä ainoastaan yksi ydinvoimakäyttöinen pinta-alus. Charles de Gaulle -nimeä kantava lentotukialus otettiin käyttöön 2000. Alus on yhä aktiivisessa käytössä. Yhdysvaltojen, Venäjän ja Ranskan lisäksi ainoastaan Saksalla ja Japanilla on ollut

ydinvoimalla toimivia pinta-aluksia. Japanilainen kauppa-alus Mutsu ei päätenyt lopulta aktiiviseen käyttöön, sillä se kohtasi paljon teknisiä ongelmia jo testiajojen aikana 1974. Vuonna 1992 Mutsu otettiin pois käytöstä kokoaan. Saksalainen rahtialus Otto Hahn toimi ydinvoimalla vuosina 1972–1982, mutta se muutettiin lopulta diesel-käyttöiseksi liian korkeiden ylläpitokustannusten vuoksi. (WNA 2015a.)

### 3.2 Käyttökohteet ja -tarkoitus

Käyttötarkoituksen mukaan jaottelu kertoo konkreettisesti siitä, millaisissa kohteissa ydinvoiman käytön suhteen on nähty mahdollisuuksia. Tässäkin kappaleessa on huomioitu ainoastaan alukset, jotka ovat olleet käytössä tai ovat yhä käytössä. Tutkimus osoitti, että 2/3 reaktoreita käyttävistä pinta-aluksista oli sotilasaluksia, kun verrattiin laivareaktoreiden suosiota siviili- ja sotilasalusten kesken. Määrällisesti osuudet tarkoittavat sitä, että aluksista sotilaallisessa käytössä on 26 ja siviilikäytössä 13. FNPP-aluksena (Floating Nuclear Power Plant) toiminutta Sturgisia on käytetty sekä siviili- että sotilastarkoituksiin (Honerlah & Hearty 2002). Tästä syystä sitä ei ole huomioitu yllämainituissa luvuissa lainkaan.



**Kuva 4.** Käytössä olleet ydinkäyttöiset alukset alustyyppin mukaan (Liite I).

Venäläinen rahtialus Sevmorput on luokiteltu joissain lähteissä jäänmurtajaksi ja joissain lähteissä rahtialukseksi. Tässä kaaviossa Sevmorput luokiteltiin rahtialukseksi sillä muut jäänmurtajiksi luokitellut alukset ovat omistautuneita pelkästään jäänmurtotehtäviin, kun

Sevmorput on kykenevä kuljettamaan myös rahtia. Näistä kuvan 4 aluksista sotilaallisessa käytössä ovat luonnollisesti lentotukialukset, sota-alukset sekä muut sota-alukset. Muilla sota-aluksilla tarkoitetaan tässä Venäjän laivaston tulenjohtoalusta SSV-33 Ural. Kuten edellä totesimme, FNPP Sturgisia on käytetty myös sotilaallisesti. Lentotukialuksista 11 on Yhdysvaltojen laivaston ja yksi on Ranskan yhä käytössä oleva Charles de Gaulle. (Liite I.)

### 3.3 Maantieteellinen jakautuminen

Kuva 5 ilmentää ainoastaan toteutuneiden hankkeiden jakautumista maantieteellisesti valtioiden kesken. Tässä kuvaajassa on mukana myös käytöstä poistetut alukset. Kuvaaja on siis indikaattori eri maiden kokemukselle hankkeiden lukumäärässä.



**Kuva 5.** Ydinkäyttöisten pinta-alusten jakautuminen valtioiden kesken (Liite I).

Kaikki Neuvostoliiton aikaiset alukset ovat nykyään Venäjän hallinnassa, joten tietokannassa ei ole tehty eroa sille, oliko alus Neuvostoliiton vai Venäjän. Kuvasta voidaan havaita, että vain Venäjällä ja Yhdysvalloilla on ollut resursseja hyödyntää ydinvoimaa merillä laajemmin. Venäjä ja Yhdysvallat toimivat kuitenkin täysin eri sektoreilla. Venäjälle arktisen alueen liikennöinti on ollut ohjaavana tekijänä sille, että Venäjä on ajautunut käyttämään ydinreaktoreita jäänmurtaajissa. Yhdysvallat on puolestaan keskittänyt laivareaktorien käytön pelkästään sukellusveneisiin ja lentotukialuksiin. Myös Venäjällä on paljon ydinsukellusveneitä. Näiden maiden lisäksi ainoastaan Japani, Ranska



ja Saksa ovat käyttäneet ydinvoimaa pinta-aluksissa. Näiden maiden projektit ovat olleet yksittäisiä ponnistuksia eivätkä ne ole johtaneet sarjatuotantoon tai laajempaan käyttöön. Japanin Mutsu ja Saksan Otto Hahn eivät olleet menestyksiä ja nämä maat eivät ole ryhtyneet toimenpiteisiin uusien alusten rakentamiseksi. Ranskan Charles de Gaulle ei tietävästi ole kohdannut suurempia ongelmia ja se on käytössä yhä tänäkin päivänä.



**Kuva 6.** Valtiot, joilla on toiminnassa olevia laivareaktoreita (Liite D).

Mikäli huomioimme ainoastaan aktiiviset alukset, on jakauma kuvan 6 kaltainen. Japani ja Saksa eivät omista aktiivisia aluksia, joten laivareaktoreita käyttäviä valtioita ovat ainoastaan Ranska, Yhdysvallat ja Venäjä. Aktiivisiksi aluksiksi ei ole laskettu aluksia, jotka ovat modernisoitavana tai kunnostettavana.

### 3.4 Reaktorikonseptit

Tässä kappaleessa esitellään reaktoreita teknisestä näkökulmasta. Läpikäytäviä aihealueita ovat mm. reaktorikonsepti, polttoaine, jäähdyte, hidaste sekä reaktiivisuuden hallinta.

### 3.4.1 Reaktorin tyyppi

Kaikissa käytössä olleissa aluksissa on reaktorikonsepti ollut perinteinen PWR-laitos (WNA 2015a). PWR on tunnetusti yleisin konsepti, joten laivoihin ei liene haluttu kokeellista ja erikoista tekniikkaa vaan aluksiin on haluttu luotettavat ja turvalliset reaktorit, joista on käyttökokemusta. Tulevaisuudessa reaktorikonsepteissa näkynee variaatiota, kuten kapaleessa 4 myöhemmin todetaan.

Vaikka pinta-aluksissa muita konsepteja ei ole käytetty, yllättäen sukellusveneissä näitä vaihtoehtoisia konsepteja on kuitenkin kokeiltu. Venäjä on käyttänyt LMCR-konseptia (Liquid Metal Cooled Reactor) kahdeksassa sukellusveneessä. Polttoaineena nämä käyttivät hyvin korkeasti rikastettua U-Be-seosta. Rikastusaste U-235:n suhteen oli 90 %. Jäähdytteenä reaktorissa toimi lyijy-vismutti-seos. Konsepti ei ollut kuitenkaan menestyksenkäs ja sitä ei käytetty muissa aluksissa. Yhdysvaltojen laivaston järjestyksessään toisessa ydinsukellusveneessä käytettiin suolajäähdytteistä S2G-reaktoria. USS Seawolf, SSN-575, oli toiminnassa S2G-reaktorin kanssa alle 2 vuotta. Reaktorin epäkäytännöllisyyksistä johtuen S2G-reaktori korvattiin S2W-tyypin PWR-reaktorilla. (WNA 2015a.)

### 3.4.2 Jäähdyte, hidaste ja reaktiivisuudenhallinta

Esimerkiksi KLT-40S-reaktorin tiedoissa mainitaan primääripiirin jäähdytteen ja hidasteen olevan kevytvettä. Lisäksi termodynaamisen kiertoprosessin mainitaan perustuvan rankineprosessiin. Raportissa mainitaan, että näissä reaktoreissa käytetään kolmea kiertopiiriä: primääripiiri, sekundääripiiri sekä merivesipiiri. Myös OK-900-reaktorin kohdalla mainitaan vastaavasta kiertopiirirakenteesta. (NKS 2006.) Kaikista työn aluksista näitä tietoja ei ole saatavilla tai näistä tiedoista ei ole mainintaa, mutta voimme tehdä turvallisen oletuksen, että myös muut PWR-tekniikkaan perustuvat laivareaktorit toimivat identtisesti. PWR-tyypin reaktoreissa kevytvesijäähdyte toimii samalla hidasteena.

Reaktiivisuudenhallintaan käytetään säätösauvojen lisäksi gadolinium-reaktorimyrkkyä (WNA 2015a). Yhdysvaltojen laivareaktoreissa liukenevaa booria ei käytetä (WNA 2015a), mutta ainakin OK-150-reaktoreissa reaktiivisuudenhallintaan käytetään booria

(B<sup>10</sup>) polttoainesauvoihin sijoitetun gadoliniumin lisäksi. Reaktiivisuusmyrkyjä käytetään tehojakauman tasoittamiseen ja sitä kautta palaman maksimoimiseen. (NKS 2006.)

### 3.4.3 Polttoaine

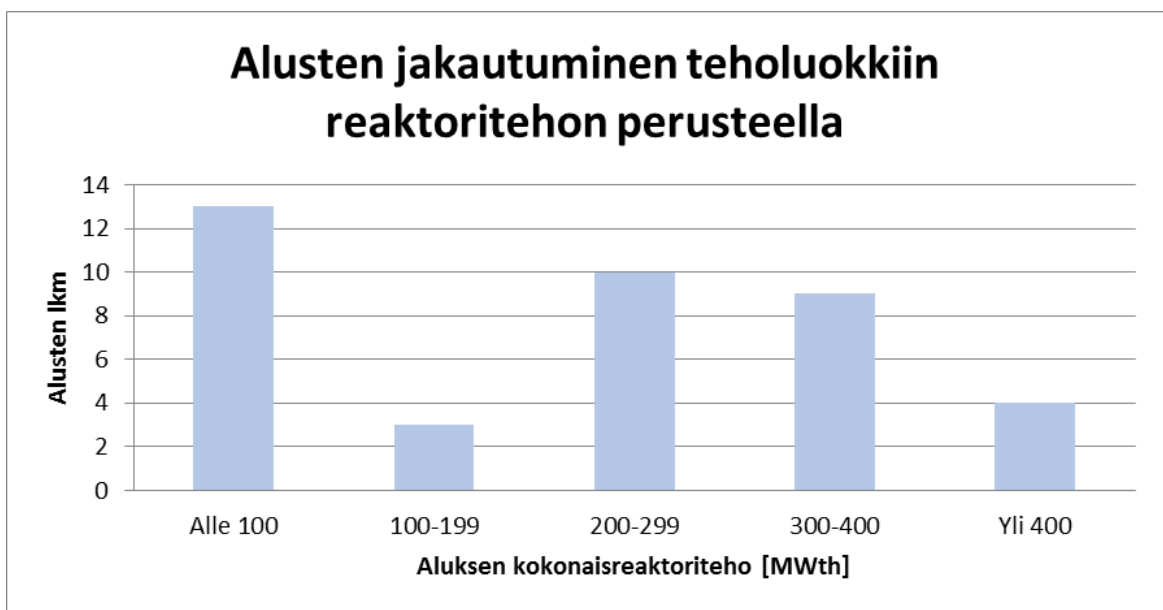
Kaikki tutkielman alukset käyttivät polttoaineenaan uraanipolttoaineita. Polttoainepellettien koostumuksessa oli kuitenkin eroja. Tyypillisesti laivareaktorisovelluksissa polttoaineen rikastusaste U-235-isotoopin suhteen oli erittäin korkea. Korkealla rikastusasteella saavutetaan pitkät latausvälit ja reaktorin koko pysyy kompaktina, kun polttoainetta ei tarvita niin paljoa. Kaikissa Yhdysvaltojen lentotukialuksissa polttoaineen rikastusaste on ollut 97,3 %. Rakenteilla ja suunnitteilla olevien Gerald R. Ford -luokan lentotukialusten reaktoritoimittaja on Bechtel. Näiden A1B-reaktoreiden käyttämästä polttoaineesta ei ole julkistettu mitään tietoja. Yhdysvaltain laivaston cruiser-sota-alusten polttoaineen koostumus on salattu, eikä rikastusasteesta löydy mainintaa mistään lähteistä. Kaikki cruiser-alusten reaktorit ovat GE:n (General Electric) D2G-reaktoreita lukuun ottamatta USS Long Beach -alusta, jonka reaktori on Westinghousen C1W. Yhdysvaltain ainoan kaupallisen NS Savannahin polttoaineena käytettiin rikastusasteeltaan 4,2 % ja 4,6 % olevia polttoaineita. Kelluvan sähköntuotantolaitoksen USS Sturgisin polttoaineena käytettiin 4–7 % rikastettua LEU-polttoainetta. (Liite I.)

Venäjän ensimmäinen ydinjäänmurtaja Lenin käytti aluksi vain 5 % rikastettua polttoainetta, mutta reaktoreiden vaihdon jälkeen polttoaineena käytettiin HEU-polttoainetta (Highly Enriched Uranium) jonka rikastusaste oli 45–75 %. Samaa polttoainetta käytettiin myös Leninin seuraajissa, viidessä Arktika-luokan jäänmurtajassa, joiden reaktoreina oli OK-900A-yksiköt. Kun reaktorimalli muuttui KLT-40 -yksiköksi, vaihtui myös polttoaine. Polttoaineena ryhdyttiin käyttämään 90 %:ksi rikastettua uraania. Näitä KLT-40-aluksia oli yhteensä kolme. Venäjän Kirov-luokan sota-alusten polttoaineesta ei ole julkista tietoa saatavilla, mutta sota-alus Uralin polttoaineen rikastusasteen kerrotaan olleen 55–90 %. Työn alla yhä oleva FNCP Akademik Lomonosov tulee käyttämään 14,1 %:ksi rikastettua polttoainetta. Venäjän rakenteilla oleva LK-60-jäänmurtajan RITM-200 -reaktoreiden polttoaineesta on kerrottu, että se tulee olemaan LEU-polttoainetta (Low Enriched Uranium), eli rikastusaste on alle 20 %. (Liite I.)

Ranska on tiedottanut julkisesti, että sen laivaston ydinpolttoaineen rikastusaste on tiputettu 7,5 %:n tasolle. Alkuperäisestä polttoaineesta ei ole tietoa saatavilla. Japanin Mutsun reaktorit käyttivät noin 4 %:iin rikastettua polttoainetta. LEU-polttoainetta käytti myös Saksan Otto Hahn. Sen polttoaineen rikastusasteen kerrotaan olleen 3,5–6,6 %. (Liite I.)

#### 3.4.4 Teholuokka

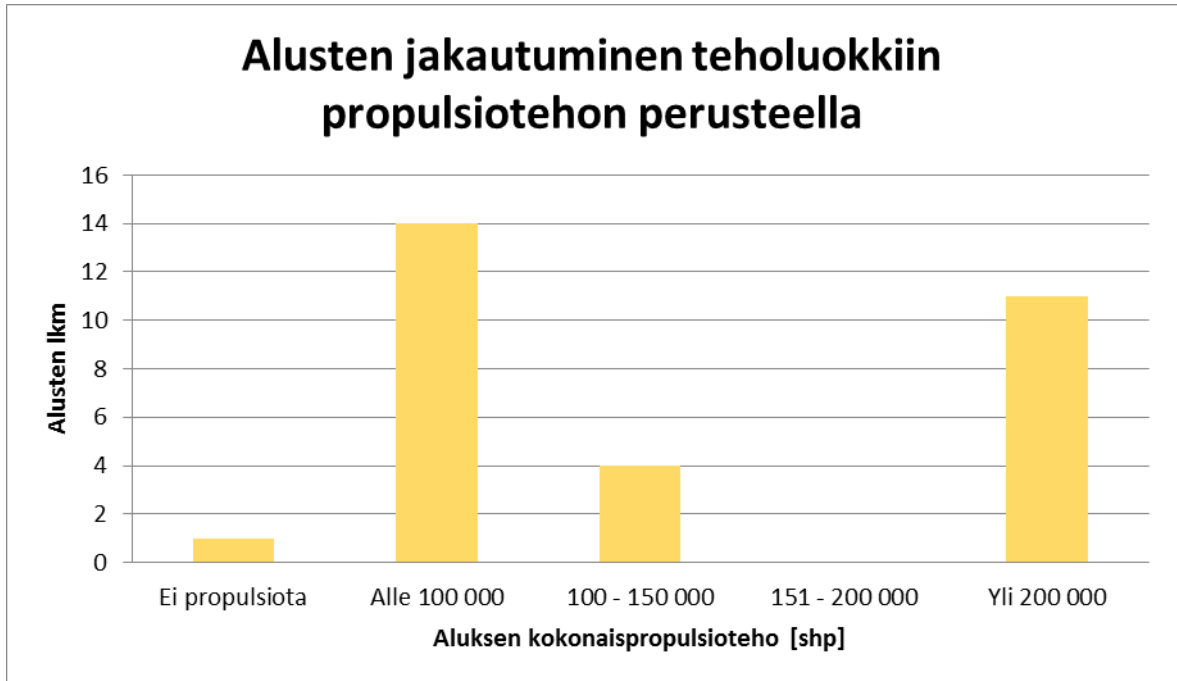
Reaktoreiden terminen kokoluokka vaihteli aina 26 ja 300 MWth välillä. Kuvassa 7 on esitetty alusten reaktorien yhteenlasketun tehon jakauma.



**Kuva 7.** Alusten jakautuminen teholuokkiin reaktoreiden yhteenlasketun lämpötehon perusteella (Liite I).

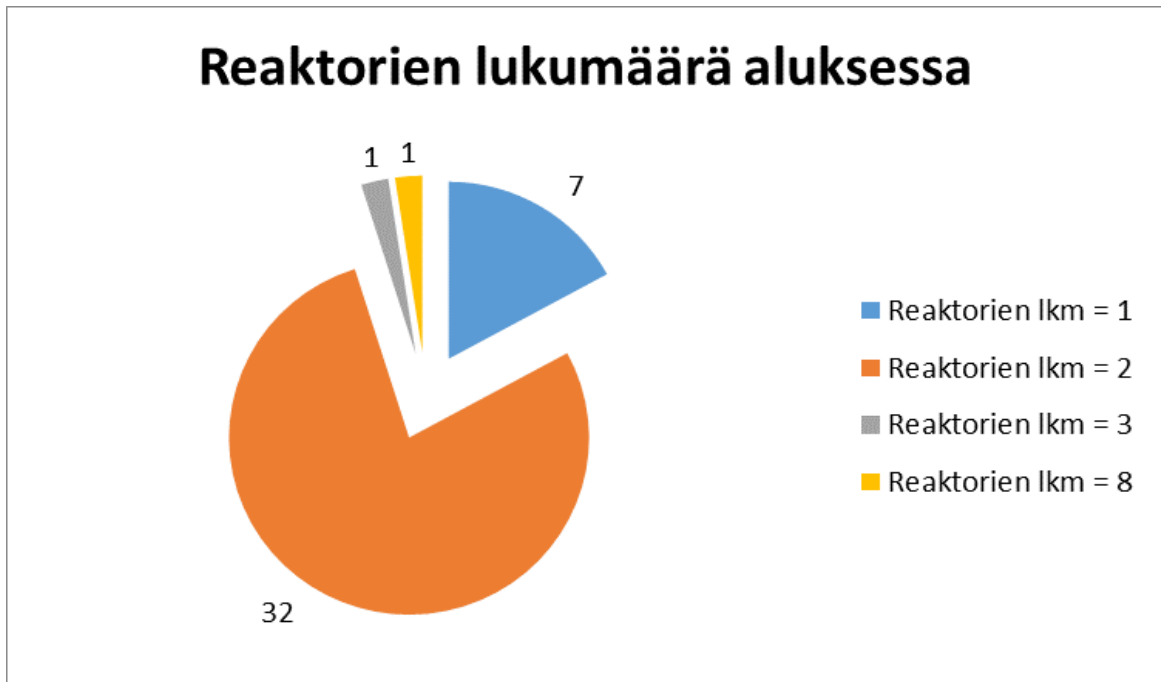
Otto Hahn ja Mutsu edustavat jakauman pienimpiä aluksia. Nämä alukset kantavat vain yhtä 36 MWth reaktoria sisällään. NS Savannahin reaktorin terminen teho oli 75 MWth ja Sturgisin reaktori oli kooltaan 45 MWth. Molemmissa aluksissa on vain yksi reaktori. Pienimmät reaktorit löytyvät Yhdysvaltojen sota-aluksista, jotka kantavat D2G-reaktoreita, mutta kumulatiivinen teho ylittää kuitenkin Otto Hahnin ja Mutsun sillä näissä sota-aluksissa reaktoreita on kaksi. Nämä GE:n toimittamat D2G-reaktorit ovat suuruudeltaan 26,1 MWth. USS Long Beach -aluksessa on Westinghousen C1W-reaktori, jonka teho oli 29,8 MWth. Suurin kumulatiivinen lämpöteho oli USS Enterprise -aluksessa. Kahdeksan 120 MWth reaktoria tuottivat lämpötehoa yhteensä noin 960 MWth. Yksikään muu alus ei ole suuruusluokaltaan samassa sarjassa Enterprisen kanssa. Venäjän epäonnistunut projekti

Ulyanovsk olisi onnistuessaan ollut jopa Enterprisea suurempi. Sen terminen teho olisi ollut kokonaisuudessaan 1 200 MWth (4 x 300 MWth). (Liite I.)



**Kuva 8.** Alusten jakautuminen teholuokkiin propulsiotehon perusteella (Liite I).

Sturgisin reaktoria ei käytetty lainkaan propulsiotarkoitukseen vaan alusta jouduttiin hinaamaan käyttöpaikalle. Kuten kuva 8 osoittaa, kaikissa muissa aluksissa reaktoreita käytetään myös propulsiotehon voimanlähteenä. Suurimmissa aluksissa propulsioteho oli jopa 280 000 shp. Yhdysvaltojen lentotukialusten suunnittelun lähtökohtana on nähtävästi pidetty vakioitua potkuritehoa, sillä kaikkien lentotukialusten propulsiotehon kerrotaan olevan 280 000 shp. Venäjän jäänmurtajien propulsiotehot ovat 40 - 75 000 välillä. (Liite I.)

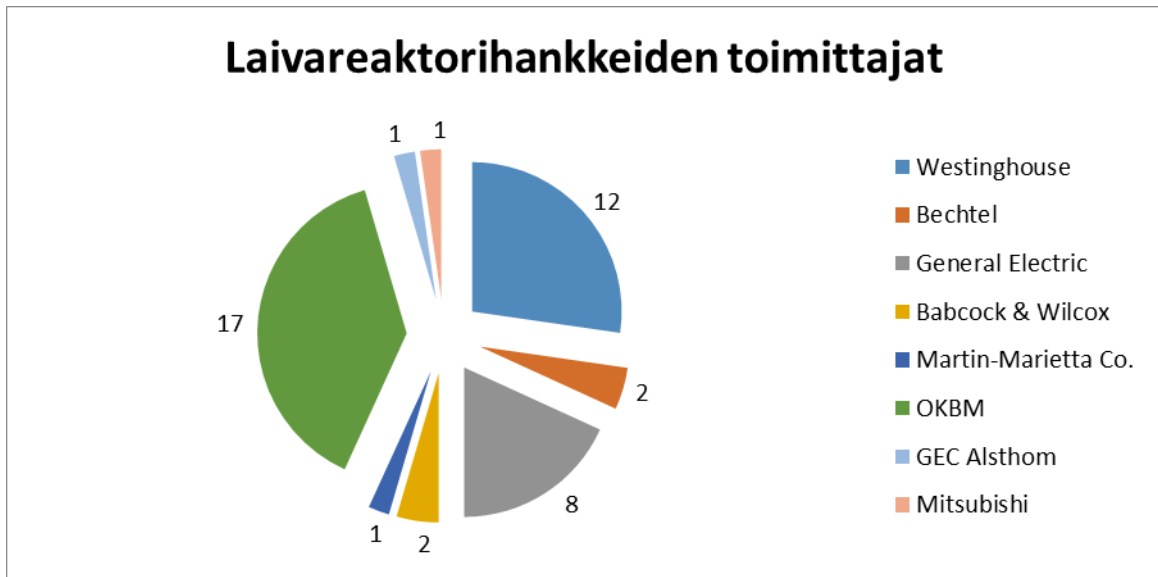


**Kuva 9.** Reaktorien lukumäärä aluksissa (Liite I).

Kuten kuva 9 osoittaa, on kahden reaktorin valinta ylivoimaisesti yleisin ratkaisu. Yhden reaktorin aluksia on ollut käytössä 7. Kolmen reaktorin siivua edustaa Lenin, jonka reaktorit korvattiin kahdella suuremmalla reaktorilla ongelmien vuoksi. Useamman kuin kahden reaktorin aluksia ei ole Enterprisen ja Leninin lisäksi olemassa. Enterprise oli myös reaktorien lukumäärässä vertaansa vailla, sillä Enterprise varustettiin jopa kahdeksalla reaktorilla. (Liite I.)

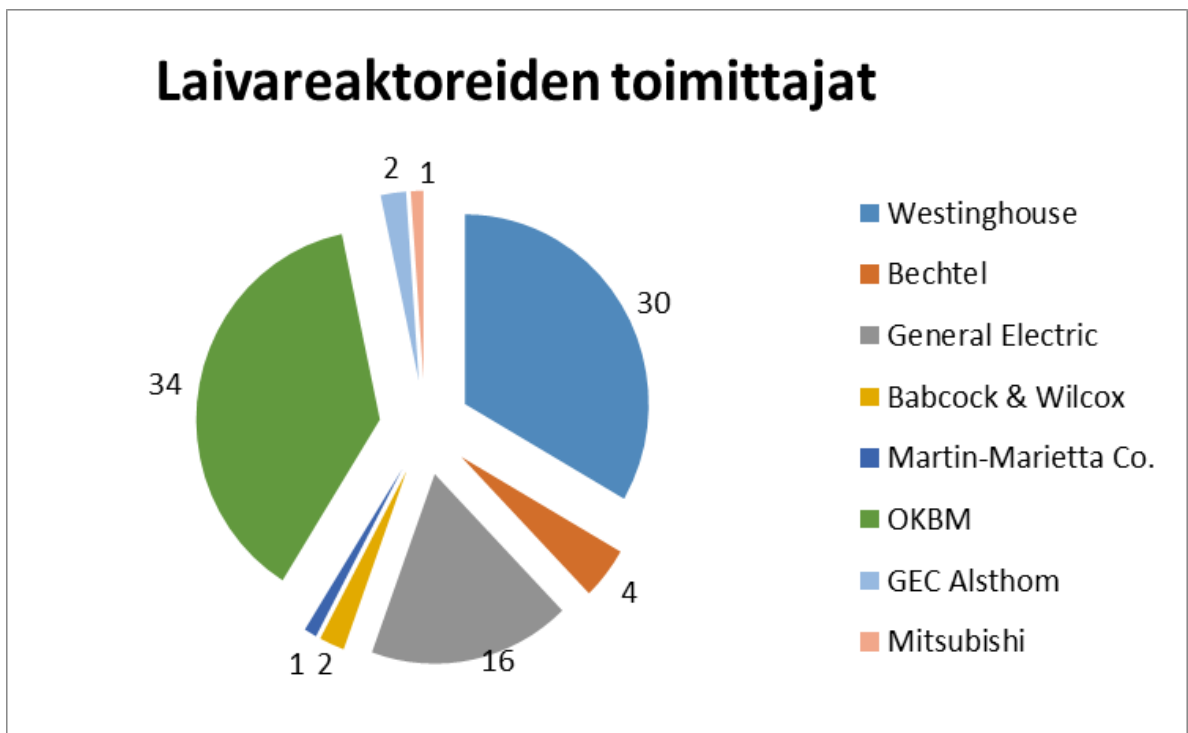
#### 3.4.5 Reaktorien toimittajat

Venäjän reaktoritoimittajana on kaikissa tilauksissa toiminut valtio-omisteisen Rosatomin tytäryhtiö OKBM Afrikantov. Yhdysvalloissa reaktorit on hankittu vapailta markkinoilta ja näin myös reaktoritoimittajissa on hajontaa. Toteutuneiden hankkeiden reaktoritoimittajat on esitelty kuvassa 10. Tässä kuvaajassa on otettu mukaan myös rakenteilla olevat alukset, sillä rakenteilla olevissa hankkeissa reaktoritoimittaja on jo varmistunut.



**Kuva 10.** Reaktoritoimittajien jakauma hankkeiden lukumäärän mukaan laskettuna (Liite I).

Aluksissa reaktoreiden lukumäärä kuitenkin vaihtelee yhdestä reaktorista aina 8 reaktoriin saakka, joten kuva 10 ei edusta suoraan toimittajien reaktorikokemusta. Kun huomioidaan toimitettujen reaktorien lukumäärä, saadaan kuvan 11 mukainen jakauma.



**Kuva 11.** Reaktoritoimittajien jakauma toimitettujen reaktorien lukumäärän mukaan (Liite I).

Kuten kappaleesta 2.3 kävi ilmi, korvattiin Leninin kolme reaktoria kahdella reaktorilla vuonna 1970. OKBM kerrytti yhdestä laivareaktorihankkeesta toimituskokemusta yhteensä viiden reaktorin verran. Nämä kaikki viisi reaktoria sisältyvät OKBM:n osuuteen.

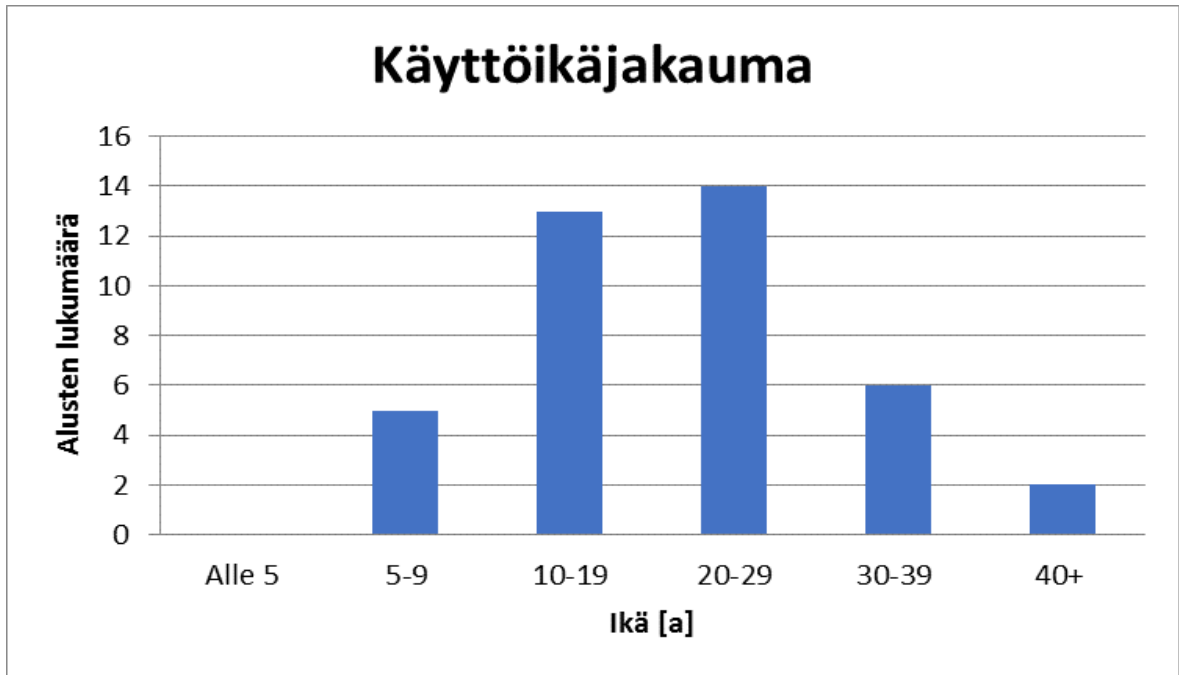
Näissä kuvaajissa 10 ja 11 on mukana ainoastaan pinta-alushankkeet – mukaan lukien FNPP-laitokset. Kuvaajat 10 ja 11 osoittavat, että markkinoilla on kolme suurta toimijaa: amerikkalaiset Westinghouse ja GE (General Electric) sekä venäläinen OKBM. Westinghouse ja OKBM ovat lähes tasavahvoja toimitettujen reaktoreiden lukumäärissä, mutta hankkeissa OKBM:llä on määrällisesti enemmän kokemusta Westinghouseen verrattuna. Muistettakoon, että OKBM:llä on Venäjällä monopoliasema reaktoritoimituksissa.

Uusissa Gerald R. Ford -luokan lentotukialuksissa reaktoritoimittajana on Bechtel. Näitä aluksia on rakenteilla kaksi. Bechtelin osuus reaktoritoimittajien jakaumassa tulee siis kasvamaan lähitulevaisuudessa sillä Yhdysvaltain laivasto ylläpitää lentotukialuskantaansa viiden vuoden rakentamissyklillä (O'Rourke 2015). Babcock & Wilcox on toimittanut reaktorit ainoastaan aluksiin NS Savannah (Yhdysvallat) ja Otto Hahn (Saksa). Martin-Marietta Corporation toimitti reaktorin maailman ensimmäiseen kelluvaan sähköntuotantolaitokseen USS Sturgisiin. Ranskan ainoan ydinvoimalla toimivan lentotukialuksen reaktorit on toimittanut ranskalainen GEC Alsthom (nykyisin Alstom). Mitsubishi toimitti reaktorin Japanin Mutsu-testialukseen.

#### 3.4.6 Reaktorien ikä

Kuva 12 havainnollistaa millainen laivareaktoreita käyttävien alusten käyttöikäjakauma on. Kuvaajassa käyttöiällä tarkoitetaan käyttönoton ja käytöstä poiston erotusta. Tämä kuvaaja ei siis kerro kumulatiivista todellista käyttöikää. Reaktori tai alus on saattanut olla poissa käytöstä pitkiäkin aikoja ennen kuin se on otettu taas käyttöön.





**Kuva 12.** Alusten käyttöikäjakauma (Liite I).

Tässä kuvaajassa oletettiin, että *laid up* -tilassa olevat alukset on poistettu käytöstä vaikka ne saatetaankin tulevaisuudessa ottaa vielä käyttöön kunnostustöiden jälkeen. Käyttöiän laskelmat on tehty yksinkertaistaen siten, että käyttöikä on laskettu käyttöönottovuoden ja käytöstäpoistovuoden suorana erotuksena. Näin ollen riippuen tapahtumien tarkasta ajankohdasta voi käyttöikään tulla virhettä, jonka suuruus on maksimissaan yksi vuosi molempiin suuntiin. Keskiarvo alusten käyttöiälle on n. 19,7 vuotta. Kuvaajan mukaan kaikki käyttöönotetut alukset ovat kestäneet vähintään 5 vuotta. Toisaalta alle 5-vuotiaiden alusten puuttuminen kertoo myös siitä, että uusia aluksia ei ole otettu käyttöön viime vuosina. Uusia aluksia on kyllä rakenteilla ja tulossa käyttöön lähivuosina, jolloin käyttöikäjakauma tulee nuorentumaan.

## 4 LAIVAREAKTOREIDEN TULEVAISUUDENNÄKYMÄT

Laivareaktoreiden käytön suurehko suosio suurta tehoa vaativissa jäänmurtajissa ja lentotukialuksissa herättää väistämättä kysymyksen siitä, miksi reaktoreita ei ole käytetty laajemmin kaupallisissa aluksissa. Benjamin S. Haas listaa tälle neljä pääasiallista osatekijää tutkielmassaan *Strategies for the Success of Nuclear Powered Commercial Shipping* (2014). Nämä osatekijät ovat:

- Ydinvoimasektori on tuottanut ainoastaan valtavan suuria aluksia ja näin eristänyt itsensä hyvin pienille markkinoille. Suurille aluksille on radikaalisti vähemmän kysyntää verrattuna pienen kokoluokan aluksiin.
- Ydinpolttoaineen hintaero öljyn hintaan on kasvanut erittäin merkittäväksi vasta suhteellisen myöhään. Ydinvoima ei siis ole ollut kilpailukykyinen vaihtoehto kaikissa kokoluokissa.
- Sijoittajien luottamuksen puute siihen, että projekteja suojellaan poliittiselta vastustukselta.
- Tutkimushankkeet ovat keskittyneet tehokkaiden alusten tutkimukseen ja näille suuren kokoluokan aluksille ei ole ollut kysyntää.

Tutkimuksessa todetaan, että nykyisellä fossiilisten polttoaineiden hintatasolla ydinvoiman käyttäminen aluksissa voi olla taloudellisesti kilpailukykyistä joissakin skenaarioissa. Ydinvoiman käyttäminen edellyttää suurempia investointeja ja tämän vuoksi hintaetu eri polttoaineiden välillä mitätöityy. Tämä on myös syy miksi tutkimukset keskittyvät suuren kokoluokan aluksiin. (Haas 2014.)

### 4.1 Rakenteilla tai suunnitteilla olevat projektit

Tällä hetkellä rakenteilla tai suunnitteilla ei ole lainkaan rahtialusprojekteja. Jäänmurtajien, lentotukialusten sekä FNPP-laitosten parissa sen sijaan tapahtuu tänäkin päivänä. Tehdään nyt tilannekatsaus alustyypeittäin käynnissä oleviin projekteihin. Tässä kappaleessa ei kuitenkaan käsitellä vaihtoehtoisia konseptitason suunnitelmia, joiden toteuttamiseksi ei ole

olemassa vielä mitään konkreettista. Nämä vaihtoehtoiset konseptit käsitellään kappaleessa 4.2.

#### 4.1.1 Jäänmurtaajat

ROSATOMin tiedotteen (30.5.2014) mukaan ROSATOM on solminut sopimukset Baltijskiy Zavod-Sudostroyenie -varustamon kanssa kahden ydinjäänmurtaajan rakentamisesta. Jäänmurtaajat ovat luokan Project 22220 aluksia. Alusten tavoitteelliset valmistumisvuodet ovat 2019 ja 2020. Varustamo Baltijskiy Zavod-Sudostroyenie rakentaa parhaillaan luokan Project 22220 pilottialusta. Aluksen köli laskettiin marraskuussa 2013. Näiden alusten voimanlähteinä tulee toimimaan uudentyyppinen reaktori RITM-200. Venäjän ydinvoimaa käyttävä jäänmurtajalaivasto saa siis vahvistusta kolmen uuden aluksen verran vuoteen 2020 mennessä. (ROSATOM 2014.) Pilottialus kantaa nimeä Arctica ja sen odotetaan valmistuvan vuoden 2017 loppuun mennessä. Kaksi 175 MWth:n suuruista RITM-200-reaktoria tuottavat yhdessä 60 MW potkuritehoa aluksille. Polttoaineena alukset käyttävät LEU-polttoainetta. Latausjakso on 65 % käyttöasteella 7–10 vuoden välein. 40 vuoden suunnitellun käyttöiän aikana alus huolletaan kerran 20 vuoden kohdalla. World Nuclear Association -järjestön mukaan Venäjällä on suunnitelmia yhä suuremman LK-110-jäänmurtaajan rakentamiseksi, jonka potkuriteho olisi jopa 110 MW. (WNA 2015b.) Kuten aikaisemmin on todettu, Venäjällä on lisäksi toimettona makaavia jäänmurtaajia yhteensä 3 kappaletta – yksi kunnostettavana ja kaksi ei-aktiivisessa tilassa. Näistä ainakin yksi tulee aktiiviseen käyttöön lähitulevaisuudessa.

#### 4.1.2 Lentotukialukset

Yhdysvalloissa rakenteilla on kaksi Gerald R. Ford -luokan lentotukialusta ja kolmannen aluksen valmistus alkanee 2018. Tämän uuden lentotukialusluokan ensimmäisen aluksen Gerald R. Fordin (CVN 78) köli on laskettu 2009 ja se otetaan käyttöön oletettavasti 2016. PCU John F. Kennedyn (CVN 79) rakentaminen on vielä alkuvaiheessa, vaikka ensimmäiset rakennusvaiheet ovat alkaneet jo 2011. Aluksen odotetaan valmistuvan vuonna 2022. CVN 78 -aluksen valmiusaste on yli 80 % ja CVN 79 -aluksen vain 20 %. Gerald R. Ford -luokan kolmas alus CVN 80 tulee kantamaan nimeä Enterprise. Nämä uudet lentotukialukset aloittavat Yhdysvaltojen laivastossa uuden aikakauden sillä niiden reaktorit toimittaa Bechtel ja Westinghouse jää toistaiseksi historiaan lentotukialusten reaktoritoimittajana.

Nimitz-luokan lentotukialuksissa hävittäjien laukaisukatapultit toimivat prosessihöyryllä kun taas uudet Gerald R. Ford -aluksat käyttävät EMALS-katapultteja (Electromagnetic Aircraft Launch System), joiden toiminta perustuu sähkömagnetismiin. Yhdysvallat tulee ylläpitämään lentotukialuskantaansa viiden vuoden rakennussyklillä, mutta Enterprisen (CVN 80) jälkeisistä aluksista ei ole mitään teknistä tietoa saatavilla. Ronald O'Rourken Yhdysvaltain kongressille tehdyssä raportissa *Navy Ford (CVN-78) Class Aircraft Carrier Program: Background and Issues for Congress* (2015) mainitaan mahdollisuudesta, että CVN 80 ja CVN 81 -lentotukialusten osahankintoja voitaisiin yhdistää. Tästä maininnasta voidaan tehdä johtopäätös, että lentotukialusten rakenteisiin ja ominaisuuksiin ei kuitenkaan suunnitella radikaaleja muutoksia vielä lähitulevaisuudessa. Tämä on ainoa johtolanka CVN 80 -aluksen jälkeisistä lentotukialuksista. Näiden CVN 78-80 lentotukialusten hinta-arviot nykyarvomenetelmällä ovat 12,9; 11,3 sekä 13,5 miljardia USD. (O'Rourke 2015.)

#### 4.1.3 FNPP-laitokset

Venäjällä on parhaillaan rakenteilla Akademik Lomonosov -nimeä kantava FNCP-laitos (Floating Nuclear Co-generation Plant). Myös nimityksiä PATES ja Academician Lomonosov käytetään. Termi FNCP viittaa siihen, että alus on kykenevä tuottamaan sähkön ohella myös puhdasta juomavettä merivedestä. Alus ei liiku omalla voimalla vaan se vaatii hinauksen käyttöpaikalle. Aluksen köli on laskettu 2007 ja aluksen odotetaan valmistuvan vuonna 2016. Alukseen tulee kaksi OKBM:n toimittamaa PWR-reaktoria. Reaktoreiden malli on KLT-40S (joissakin yhteyksissä käännetty KLT-40C). Reaktorit ovat kooltaan 150 MW<sub>th</sub> ja ne kykenevät tuottamaan yhteensä 60 MW sähkötehoa ulkopuoliseen verkkoon. Aluksen suunniteltu käyttöikä on 40 vuotta. Polttoaineen latausväli on IAEA:n raportin mukaan ainoastaan 28 kuukautta. Lyhyehkö latausväli johtunee reaktoreiden käytämästä LEU-polttoaineesta. Rikastusasteen kerrotaan olevan 13–16 %, mikä alittaa IAEA:n proliferaatorajan (20 %). LEU-polttoainetta (U-235-pitoisuus alle 20 %) ei voi hyödyntää suoraan ydinaseissa. Polttoaine on UO<sub>2</sub>-muodossa zirconium-suojakuoressa. (IAEA 2013.)

Muita FNPP-laitoksia ei ole tällä hetkellä rakenteilla, mutta ainakin Venäjällä on ollut aikaisemmin suunnitelmissa rakentaa useampiakin laitoksia omiin kohteisiinsa. Neljän lai-

toksen piti omistautua Yakutian alueen uraaninlouhintaan ja viiden laitoksen piti tulla Gazpromin öljyn- ja kaasunporauskäyttöön. Nämä suunnitelmat eivät ole kuitenkaan toteutuneet. OKBM kehittää parhaillaan pienemmän kokoluokan ABV-reaktoreita. Reaktorit on varustettu integroiduilla höyrystimillä. ABV-3 on 18 MWth yksikkö ja suurempi 38 MWth reaktori on nimeltään ABV-6M. ABV-reaktorit kykenevät tuottamaan sähköä 4–18 MW. Reaktorit soveltuvat myös käytettäväksi kelluvissa tuotantolaitoksissa. Nämä PWR-reaktorit käyttävät polttoaineenaan uraania, jonka rikastusaste on 16,5 %. Jälleenlataus on 8–10 vuoden välein ja reaktoreiden iäksi on kaavailtu 50 vuotta. (WNA 2015b.)

Toukokuussa 2014 Rosatom ja CAEA (China Atomic Energy Authority) solmivat yhteistyösopimuksen FNCP-laitosten rakentamiseksi Kiinan offshore-kohteisiin. Alukset tullaan rakentamaan Kiinassa, mutta ne perustuvat venäläiseen teknologiaan. Reaktoreiksi tulee mahdollisesti OKBM:n KLT-40S -reaktorit. (WNA 2015c.) Kiinalla on myös oma FNPP-konsepti, mutta projektin toteuttamiseksi ei ole vielä tehty toimenpiteitä. SMR-reaktoreihin lukeutuva PWR-konsepti on nimeltään CAP-FNPP. Reaktorikonsepti on suunniteltu yhteistyössä SNERDI:n (Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute) ja SNPTC:n (State Nuclear Power Technology Corporation) kanssa. Reaktorin terminen teho on 200 MWth. Reaktorin käyttötarkoitus on sähkön ja puhtaan juomaveden tuotanto. Laitoksen rakentaminen kestää alle 3 vuotta ja laitoksen suunniteltu käyttöikä on jopa 60 vuotta. Täydellä teholla laitos voisi toimia ilman jälleenlatausta yli 5 vuotta. 50 %:n tehotasolla latausjakso voisi olla jopa 10 vuotta. Laitoksen passiivinen turvallisuussuunnittelu takaa onnettomuustilanteessa laitoksen turvallisen toiminnan vähintään seitsemäksi päiväksi ilman minkäänlaista väliintuloa. (Mingguang 2013.)

## **4.2 Vaihtoehtoiset konseptit**

Meriveden tislauksen ja suolanpoiston on yksi kohde, jossa SMR- ja laivareaktoreilla nähdään tulevaisuutta. Venäjällä on useita co-generation-konsepteja, joissa laitokset on valjastettu tuottamaan sekä sähköä, kaukolämpöä että puhdasta juomavettä. Yksi potentiaalinen käyttökohta laivareaktoreille on myös vedenalaiset laitokset.

#### 4.2.1 Suolanpoisto- ja co-generation-laitokset

Venäläinen APVS-80 on suolanpoistoon tarkoitettu kelluvalle alustalle rakennettava laitoskonsepti. Reaktorina konseptissa on 80 MWth KLT-40-yksiköt. APVS-80-laitoksen terminen teho on 160 MWth, eli reaktoreita tulee laitokselle kaksi. Alus toimii laitosalustana eikä siinä ole propulsiotekniikkaa. Alus on 160 m pitkä, 44 m leveä ja sen syväys on 7 m. Laitos kykenee tuottamaan 80 000 m<sup>3</sup> puhdasta vettä vuorokaudessa. Tässä konseptissa myös suolanpoisto on sijoitettu samalle alukselle reaktoriyksikön kanssa. Toisessa vaihtoehdossa suolanpoisto on sijoitettu erilliselle alukselle ja FNPS (Floating Nuclear Power Station) on itsenäinen yksikkö. Tällaisen FNPS-aluksen pituus on 120 m, leveys 28 m ja syväys vain 3,5–4,5 m. Reaktoreita alukseen tulee kaksi. ABV-reaktoriin perustuvassa konseptissa suolanpoisto ja FNPS olisivat erillisiä laitoksia. FNPS-tulisi Volnolom-tyypin alustalle. FNPS-aluksen pituus on suunnitelmissa 97,3 m. ABV-reaktorin primääripiiri toimisi luonnonkierrolla. ATETS-80 on kahden 250 MWth reaktorin co-generation-kompleksi, joka tuottaa joko 70 MW kaukolämpöä, 85 MW sähköä tai 120 000 m<sup>3</sup> juomakelpoista vettä vuorokaudessa käyttäen siihen 38 MW sähkötehoa. Yhteistuotannossa näitä huippuarvoja ei pystytä saavuttamaan yhtäaikaisesti. Konseptista voidaan rakentaa kelluva laitos tai se voidaan rakentaa maalle. (Panov et al. 1997.)

#### 4.2.2 Vedenalaiset laitokset

Venäläisen NIKIETin kehittämä PWR-konsepti SHELF kykenee tuottamaan 6 MW sähköä 28 MWth reaktorillaan. Moduuli on sylinterinmuotoinen noin 15 m x 8 m suuruinen kapseli ja se makaa merenpohjassa. SHELF käyttää LEU-polttoainetta joka on alumiinikapseleiden sisällä UO<sub>2</sub>-muodossa. Polttoaineen vaihtosykli on 56 kuukautta. SHELF on tarkoitettu energianlähteeksi öljyn- ja kaasunporauskohteisiin arktisille alueille. SHELF-konsepti on vielä suunnitteluvaiheessa. Flexblue on useiden ranskalaisten yhtiöiden kehittämä konsepti vedenalaiselle reaktorille. Se on suunniteltu upotettavaksi 60–100 m syvyyteen 15 km päähän rannasta. Huoltojen ajaksi moduuli viedään kuivatelakalle. Moduulin pituus on noin 100 m ja halkaisija 12–15 m. Moduulien liikuttamiseen tarvitaan tähän tarkoitukseen rakennettu alus. Tuotantokapasiteetti on 50–250 MWe. (WNA 2015d.)

### 4.3 Mahdollisuudet Suomessa

Tämä kappale pyrkii vastaamaan siihen, voisiko Suomella olla roolia ydinkäyttöisten alusten rakentamisessa, omistuksessa tai operoinnissa tulevaisuudessa. Tällä hetkellä mitään hankkeita laivareaktoreiden käytön edistämiseksi ei ole Suomessa näköpiirissä. Helsingin Wärtsilän telakalla on kuitenkin kokemusta venäläisten ydinkäyttöisten jäänmurtajien rakentamisesta. Vuosina 1989 ja 1990 käyttöön otetut jäänmurtajat Taimyr ja Vaigach rakennettiin Suomessa, mutta reaktorit asennettiin Pietarissa. (NKS 2006) Näin ollen Suomella olisi edellytykset toimia ainakin rakentajan roolissa, kun uusia jäänmurtajaprojekteja tulee kilpailutettavaksi. Ydinkäyttöisten alusten operoinnista Suomessa ei ole kokemusta, mutta ydinteknistä osaamista Suomesta löytyy. Ydinvoimalaitosten operoinnista Suomessa on vahvaa osaamista, joten mahdollisen FNPP-laitoksen käyttöhenkilökunnan koulutus olisi mahdollista suorittaa Suomessa. Merenkulkualan ja ydinteknisen koulutuksen yhteisvoimin Suomella olisi edellytykset myös ydinkäyttöisten alusten käyttämiseen. Ydinkäyttöisille jäänmurtajille voisi teoriassa tulla tarvetta nykyisen konventionaalisen kaluston ikääntyttyä. Käytännössä ydinjäänmurtajien kokoluokka on kuitenkin niin suuri, ettei rakentaminen liene taloudellisesti järkevää pienen käyttöasteen vuoksi.

FNPP-laitoksille Suomessa ei löydy käyttöä jo olemassa olevan kattavan sähköverkon ansiosta. Kaupalliset hankkeet ulkomailla sen sijaan voisivat tulla kysymykseen sillä tutkimusten mukaan FNPP-laitoksilla voidaan tuottaa sähköä kilpailukykyiseen hintaan. Suomi voisi olla mukana myös kolmansiin maihin tarkoitettujen FNCP-laitosten rakentamisessa, omistuksessa tai käytössä. Kehitysmaissa sähköverkkoinfra on hyvin puutteellinen, joten puhdasta juomavettä ja sähköä tuottava Co-Generation-Plant voisi olla järkevä vaihtoehto tällaisissa kohteissa. Hyvien pohjavesivarantojen ansiosta Suomessa ei ole tarvetta myöskään suolanpoistolaitoksille.

Syyskuussa 2014 Suomi ja Venäjä solmivat molemminpuolista jäänmurtoavustusta koskevan sopimuksen. Sopimuksen myötä Suomella ja Venäjällä on mahdollisuus pyytää jäänmurtoavustusta tarvittaessa. Ennen sopimusta Venäjän lainsäädäntö ei ole sallinut suomalaisten jäänmurtajien liikennöintiä aluevesillään tai satamissa. Hallituksen esitys HE 314/2014 pyrki saattamaan tämän sopimuksen yksityiskohdat lainsäädäntöön asti ja esitys

on myös hyväksytty eduskunnassa 6.2.2015. Esityksessä todetaan, että ydinjäänmurtajien kohdalla noudatetaan ydinenergia-asetuksen 161/1988 luvun 10 mukaista lupamenettelyä. (HE 314/2014.) Ydinlaitoksen sisältävän kulkuvälineen on anottava lupaa aluksen tilapäiseen käyttöön Suomen alueella. Hakemuksesta on käytävä ilmi seuraavat asiat: aluksen käyttötarkoitus, maassaoloaika, reittisuunnitelma, turva- ja valmiusjärjestelyt, vahingonkorvausvastuun järjestäminen onnettomuuden sattuessa, selvitys viranomaisten pääsystä kulkuvälineeseen, selvitys luvanhakijan asiantuntemuksesta ja käyttöorganisaatiosta sekä selvitys laitoksen teknisistä ominaisuuksista ja turvallisuustoiminnoista. Ydinenergalaki 990/1987 määrittelee, millainen lupamenettely ydinlaitoksen rakentamisessa ja käyttämisessä on. Ydinkäyttöisten alusten kohdalla sovelletaan tätä samaa ydinenergalakia. Periaatteellista estettä kelluvan ydinvoimalaitoksen tai ydinjäänmurtajan rakentamiselle tai käyttämiselle Suomessa ei siis laissa ole. (Ydinenergia-asetus 161/1988.)

#### **4.4 Tulevaisuuden kehityssuunta**

Royal Academy of Engineering toteaa julkaisussaan, että nykyinen jako rahtiliikenteen voimanlähteiden kesken tulee väistämättä muuttumaan lähitulevaisuudessa. Laaja keskustelu ilmastonmuutoksen torjumisesta painostaa myös rahtiliikennettä vähentämään kasvihuonepäästöjä. Rahtiliikenteen arvioidaan tuottavan noin 3 % globaaleista hiilidioksidipäästöistä, kun meriteitse kulkevan rahdin osuus kaikesta rahtiliikenteestä on jopa 95 %. Hiilidioksidipäästöjen vähentämispaineet yhdessä öljyn hintatrendin kanssa ajavat rah-tisektoria väistämättä muutokseen. Raportti toteaa seuraavien skenaarioiden olevan potentiaalisimpia puhuttaessa laivasektorin päästöjen vähentämisestä.

- I. Pakokaasun puhdistusteknologioiden asentaminen nykyisiin aluksiin sekä vähäpäästöisempien polttoaineiden käyttäminen ovat pääasialliset keinot. LNG (Liquefied Natural Gas) on muun muassa tällainen polttoaine. Laivojen tehontarpeen pienentämiseen tulisi myös kiinnittää huomiota.
- II. Edellä mainittujen keinojen lisäksi lähitulevaisuudessa rakennettaviin aluksiin hybridipropulsiotekniikkaa.
- III. Pidemmällä tähtäimellä laivoihin on harkittava täysin vaihtoehtoisia tekniikoita kuten polttokennot, akut ja ydinvoima. Polttokenno- ja akkutekniikka vaatii teknolo-



gian kehittymistä kun taas ydinvoiman käyttö edellyttäisi suuria muutoksia alusten omistajarakenteeseen sekä operointitahoihin.

Konventionaalisista moottoreista raportti piti mahdollisena niin diesel-moottoreita, biopolttoaineita, LNG:tä kuin kaasuturbiinejakin. Muista propulsiotekniikoista puhuttaessa raportti mainitsee ydinvoiman, akut, polttokennot, tuuli- ja aurinkoenergian, vetymoottorit, kiuvan ammoniakkin, paineilman sekä nestetyypen ja viimeisimmäksi hybridipropulsion. Ydinvoiman hyödyiksi raportissa mainitaan seuraavat ominaisuudet: PWR-tekniikan vankka kokemus myös marine-puolella, voimalaitoskonseptien soveltuvuus myös kaupallisiin aluksiin, polttoaineen hinnanvaihtelut eivät vaikuta kannattavuuteen sekä se, että ydinvoima ei tuota lainkaan hiukkaspäästöjä. Haitoiksi raportti luettelee suunnittelun, operoinnin ja käyttöönoton hankaluuden, asiantuntijoiden vähyyden sekä alusten vakuutusjärjestelyt. (Royal Academy of Engineering 2013.)

Benjamin S. Haas arvioi raportissaan, millaiset reaktorikonseptit voisivat olla potentiaalisia vaihtoehtoja kaupallisissa aluksissa. Haas toteaa, että kaikkien laivojen tulisi olla hylättävissä riippumatta siitä, millainen on laivan voimanlähde. Tämä kriteeri rajaa pois reaktorikonsepteja, jotka vaativat aktiivista jäähdytystä sydänsulaonnettomuuden välttämiseksi. Mikäli laivalla tapahtuu onnettomuus joka vaatii miehistön evakuoointia, voi laiva joutua ajelehtimaan yksin useita päiviä tai jopa viikkoja ennen kuin apua voidaan viedä alukselle. Haas ei pidä todennäköisenä, että aktiivista jäähdytystä vaativat reaktorikonseptit tulevat lyömään läpi tulevaisuudessa kun passiiviseen turvallisuuteen perustuvia konsepteja on saatavilla. Pitkien rahtialusten katkeaminen on myös mahdollista ja ydinvoimalla toimivassa aluksessa tämä voisi tarkoittaa jäähdytyksen katkeamista. Hänen näkemyksensä mukaan ainoastaan konsepteja joissa sydänsulaonnettomuus on mahdoton, tulisi käyttää kaupallisissa aluksissa. Tällaisia konsepteja ovat Haasin mukaan sulasuolareaktorit sekä HTGCR-reaktorit (High-Temperature Gas-Cooled Reactor). HTGCR-reaktoreista myös Pebble Bed-reaktorit ovat ominaisuuksiltaan varteenotettavia konsepteja. Myös muut konseptit voivat hänen mukaansa olla toteutettavissa turvallisuuskriteerien puitteissa, mutta taloudellisessa mielessä edellä mainitut konseptit ovat ainoat potentiaaliset konseptit marine-käyttöön. (Haas 2014.)

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Yllättävä yksityiskohta työn tuloksissa oli ydinreaktoreiden pieni määrä pinta-aluksissa, kun ydinsukellusveneet ovat puolestaan kohtalaisen yleisiä. Ydinreaktoreiden yleisyys sukellusveneissä johtunee siitä, että sukellusveneet ovat pääasiassa sota-aluksia, jolloin ydinvoiman käytön sosiaalisia tai ympäristövaikutuksia ei tarvitse huomioida samassa mittakaavassa kuin esimerkiksi rahtialusten tapauksessa. Rahtialusten varustaminen ydinvoimalla vaatisi yleisen hyväksynnän, jotta alus voi liikennöidä vapaasti valtioiden vesillä ja satamissa. Tämä selittänee osin sen, miksi ydinvoimaa ei käytetä rahtialusten voimanlähteenä. Raakaöljyn hintakehitys edesauttaneee lähitulevaisuudessa ydinvoimateknologian implementoimista rahtiliikennekäyttöön. Royal Academy of Engineering -järjestön *FUTURE SHIP POWERING OPTIONS: Exploring Alternative Methods Of Ship Propulsion* -julkaisun (2013) perusteella laivanrakennusala etsii tulevaisuuden ratkaisuja tosissaan ja harkitsee vakavasti myös radikaalejakin ehdotuksia laivojen voimanlähteiksi, sillä julkaisussa pohdittiin vakavasti jopa purjeiden ja aurinkokennojen hyödyntämistä. Ydinvoima ei siis suinkaan ole erikoisin vaihtoehto, jota tulevaisuuden laivoihin kaavaillaan käytettäväksi.

Tämän työn tulosten perusteella laivareaktoreilla on tulevaisuutta ja laivareaktoriala tulee kasvamaan ennen kaikkea siviilialusten keskuudessa. Sotilaallisten alusten lukumäärään ei tule suuria muutoksia, sillä Yhdysvallat aikoo vain ylläpitää laivastonsa kokoa – ei kasvatata sitä. Venäjällä on suunnitelmia rakentaa lisää ydinjäänmurtaajia, mutta projektien aikatauluja on mahdoton ennustaa, kuten historia on osoittanut nyt rakenteilla olevan jäänmurtaajaprojektin kohdalla. FNPP- ja FNCP-laitoksia tullaan todennäköisesti näkemään tulevaisuudessa, sillä Venäjällä, Japanilla, Korealla ja Kiinalla on kaikilla olemassa omia konsepteja. Usean maan kiinnostuneisuus tällaisia laitoksia kohtaan kertonee, että aluksille on kysyntää ja niillä on mahdollista saavuttaa merkittäviä etuja maalle rakennettaviin laitoksiin verrattuna.

## 6 YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä on käsitelty kaikki tiedossa olevat ydinkäyttöiset pinta-alukset, kelluvat sähköntuotantolaitokset sekä tulevaisuuden vaihtoehtoiset laivareaktorisovellukset. Työ tarjoaakin lukijalle kattavan koosteen laivareaktoreiden käytöstä pinta-aluksissa ja on siten hyvä lähde teos aihepiirin syvällisemmälle tutkimiselle. Lähdeluettelosta löytyy alaan liittyvät keskeisimmät teokset. Laivareaktoreiden aihepiiri osoittautui erittäin laajaksi ja haastavaksi eikä tässä työssä ollut siten resursseja syventyä alusten ja reaktoreiden tekniikkiin ominaisuuksiin tarkemmin. Koska suuri osa aluksista oli sotilasaluksia, tietoa oli toisinaan hyvin vaikea löytää. Tietoa joutui toisinaan etsimään myös lähteistä, jotka eivät olleet puhtaasti tieteellisiä. Yhdysvallat jakaa melko avoimesti tietoja aluksistaan, mutta esimerkiksi polttoaineen rikastusastetta ei useinkaan ilmoitettu sotilasalusten kohdalla. Venäjällä tietoa sotilasaluksista ei käytännössä ole lainkaan saatavilla. Venäläisten alusten tietoja löytyi usein länsimaisten julkaisujen kautta ja tieto oli usein epäsuoran analysoinnin tulosta.

Työ synnytti runsaasti ideoita jatkotutkimuksille. TNPP-laitokset (Transportable Nuclear Power Plant) ovat itsessään jo riittävän laaja aihe tutkimukselle sillä TNPP-laitokset pitävät sisällään kaikenlaiset liikuteltavat ydinvoimalaitokset. TNPP-laitoksia voidaan liikutella laivalla, junalla tai rekalla ja ne voidaan sijoittaa itse laivalle, mantereelle tai merenpohjaan. TNPP-aihe sivuaa läheisesti SMR-reaktoreiden aihepiiriä sillä käytännössä kaikkien TNPP-laitosten reaktoreiden on oltava SMR-tyypin modulaarisia reaktoreita tai integroituja pienen kokoluokan reaktoreita. FNPP- ja FNCP-laitokset tarjoavat myös ajankohtaisen tutkimuskohteen. Vedenalaisia konsepteja on tietävästi vasta kaksi eivätkä ne yksistään tarjoa vielä paljota tutkittavaa, mutta esimerkiksi kallioon maan alle sijoitettavien ja merenpohjaan sijoitettavien laitosten vertailu voisi olla mielenkiintoinen tutkimuskohde.

## LÄHTEET

Ruska, M., Koljonen, T., Koreneff, G. & Lehtilä, A. 2012. Fossiiliset polttoainevarat ja -markkinat, [verkkodokumentti]. Espoo: VTT, 2012. ISBN 978-951-38-7843-6. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2012/T28.pdf>

IEA. 2013. Resources to Reserves 2013, [verkkodokumentti]. France, Paris Cedex: International Energy Agency (IEA). ISBN 978-92-64-08354-7. Saatavissa: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Resources2013.pdf>

WNA. 2015a. Nuclear-Powered Ships, [www-sivu]. World Nuclear Association (WNA). Päivitetty 1/2015. [Viitattu 5.3.2015]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships/>

Ragheb, Magdi. 2015. Nuclear marine propulsion, [verkkodokumentti], Päivitetty 5.3.2015. Saatavissa: <http://mragheb.com/NPRE%20402%20ME%20405%20Nuclear%20Power%20Engineering/Nuclear%20Marine%20Propulsion.pdf>

Gagarinski, A., Ignatiev, V. & Devell, L. 1996. Studviks Report: Design and properties of marine reactors and associated R&D, [verkkodokumentti]. Sweden: STUDSVIK ECO & SAFETY AB. Julkaistu 30.5.1996. Saatavissa: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/27/073/27073072.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/073/27073072.pdf)

Global Security. 2011. CVN-65 Enterprise. CVN-65 Pictures, [www-sivu]. GlobalSecurity. Päivitetty 7.7.2011. Saatavissa: <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/cvn-65-gallery.htm>

Arktinen Keskus. 2012. Arctic Centre leads transformation of the first nuclear icebreaker into a science centre, [www-sivu]. Lapin yliopisto. Julkaistu 13.3.2012. Saatavissa: <http://www.arcticcentre.org/news/Arctic-Centre-leads-transformation-of-the-first-nuclear-icebreaker-into-a-science-centre/pmtrvo5n/b7ea8ec7-0eba-4efa-a6bc-0b427b16ed71>

NKS. 2001. NKS-SBA-1 Status Report: The Potential Risks From Russian Nuclear Ships, [verkkodokumentti]. Tanska, Roskilde: 11/2001. Pohjoismainen ydinturvallisuustutkimus (NKS). Saatavissa: <http://www.nks.org/download/pdf/NKS-Pub/NKS-57.pdf>

NKS. 1996. Accidents In Nuclear Ships, [verkkodokumentti]. Tanska, Roskilde: 12/1996. Pohjoismainen ydinturvallisuustutkimus (NKS). Saatavissa: <http://www.risoe.dk/rispubl/NKS/NKS-96-RAK-2TR-C3.pdf>

Masayuki, Nakao. 2011. Radiation Leaks from Nuclear Power Ship “Mutsu”, [verkkodokumentti]. Hatamura Institute for the Advancement of Technology. Saatavissa: <http://www.sozogaku.com/fkd/en/hfen/HA1000615.pdf>

Marinetraffic. 2014. SEVMORPUT - General Cargo: Current Position and Details | IMO 8729810, MMSI -8729810, Callsign | Registered in - AIS Marine Traffic, [www-sivu].  
Marinetraffic. Päivitetty 24.6.2014. [Viitattu 6.3.2015]. Saatavissa: <http://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:901605/mmsi:-8729810/vessel:SEVMORPUT>

Barents Observer. 2014. Nuclear Container Ship to Be Put Back in Service, [www-sivu].  
Barents Observer. Julkaistu 10.1.2014. [Viitattu 6.3.2015]. Saatavissa: <http://barentsobserver.com/en/arctic/2014/01/nuclear-container-ship-be-put-back-service-10-01>

Honerlah, H. B. & Hearty, B. P. 2002. CHARACTERIZATION OF THE NUCLEAR BARGE STURGIS, [konferenssijulkaisu]. WM'02 Conference, February 24-28, 2002, Tucson, Arizona. WM Symposia (WMS). Esitetty 24.-28.2.2002 konferenssissa. Saatavissa: <http://www.wmsym.org/archives/2002/Proceedings/44/168.pdf>

Haas, Benjamin S. 2014. Strategies for the Success of Nuclear Powered Commercial Shipping, [verkkójulkaisu]. Julkaistu 3/2014. Saatavissa:

[http://atomicinsightscom.c.presscdn.com/wp-content/uploads/CMA-Nuclear-Paper\\_Benjamin-Haas-3.pdf](http://atomicinsightscom.c.presscdn.com/wp-content/uploads/CMA-Nuclear-Paper_Benjamin-Haas-3.pdf)

Rosatom. 2014. ROSATOM Awarded Contract for Building Two Series Nuclear Icebreakers of Project 22220, [www-sivu]. ROSATOM. Päivitetty 30.5.2014. [Viitattu 6.3.2015].

Saatavissa:

<http://www.rosatom.ru/en/presscentre/news/006c2300442f03c0bf2abffbf29b353a>

O'Rourke, Ronald. 2015. Navy Ford (CVN-78) Class Aircraft Carrier Program: Background and Issues for Congress, [verkkodokumentti]. Congressional Research Service. Julkaistu 24.3.2015. Saatavissa:

<http://fas.org/sgp/crs/weapons/RS20643.pdf>

IAEA. 2013. KLT-40S, [verkkodokumentti]. International Atomic Energy Agency

(IAEA). Advanced Reactors Information System (ARIS). Päivitetty 23.4.2013. Saatavissa:

<https://aris.iaea.org/pdf/KLT-40S.pdf>

WNA. 2015b. Nuclear Power in Russia, [www-sivu]. World Nuclear Association (WNA).

Päivitetty 3/2015. [Viitattu 2.4.2015]. Saatavissa: [http://www.world-](http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/)

[nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/](http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/)

WNA. 2015c. Nuclear Power in China, [www-sivu]. World Nuclear Association. Päivitetty

31.3.2015. [Viitattu 2.4.2015]. Saatavissa: [http://www.world-nuclear.org/info/Country-](http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/)

[Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/](http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/)

Mingguang, Zheng. 2013. Small Reactors R&D in China, [konferenssijulkaisu]. TWG-

LWR, June 18<sup>th</sup>-20<sup>th</sup>, 2013, Vienna. Shanghai Nuclear Engineering Research & Development Institute (SNPTC). Esitetty 18.-20.6.2013 konferenssissa. Saatavissa:

<https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2013/2013-06-18-06-20-TWG-NPTD/36-snerdi-china-smr.pdf>

Panov, Yu., Polunichev, V. & Zverev, K. 1997. Use of reactor plants of enhanced safety for sea water desalination, industrial and district heating, [verkkodokumentti]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Julkaistu 1997. Saatavissa:

[http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/28/031/28031285.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/031/28031285.pdf)

WNA. 2015d. Small Nuclear Power Reactors, [www-sivu]. World Nuclear Association (WNA). Päivitetty 3/2015. [Viitattu 2.4.2015]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Small-Nuclear-Power-Reactors/>

Lillington, John N. 2004. The Future of Nuclear Power, [sähköinen Google-kirja]. San Diego, CA: Elsevier. ISBN: 9780080444895. Saatavissa:

[https://books.google.fi/books?id=QKjhJvJrLSgC&pg=PA294&lpg=PA294&dq=UNITHERM+PWR&source=bl&ots=m\\_DGj3GoSt&sig=HQ\\_V6sTSLueUKet8dODvG9X71Rs&hl=fi&sa=X&ei=khkRVY62EOSuygOjkIGIDg&ved=0CB8Q6AEwAA#v=onepage&q=UNITHERM%20PWR&f=false](https://books.google.fi/books?id=QKjhJvJrLSgC&pg=PA294&lpg=PA294&dq=UNITHERM+PWR&source=bl&ots=m_DGj3GoSt&sig=HQ_V6sTSLueUKet8dODvG9X71Rs&hl=fi&sa=X&ei=khkRVY62EOSuygOjkIGIDg&ved=0CB8Q6AEwAA#v=onepage&q=UNITHERM%20PWR&f=false)

NKS. 2006. Russian Nuclear Power Plants for Marine Applications, [verkkodokumentti]. Pohjoismainen ydinturvallisuustutkimus (NKS). Denmark, Roskilde: 4/2006. Saatavissa: [http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:90453/datastreams/file\\_7712233/content](http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:90453/datastreams/file_7712233/content)

HE 314/2014. 2014. Hallituksen esitys eduskunnalle jäänmurtoavustusta koskevasta yhteistyöstä ja vuorovaikutuksesta Itämerellä Venäjän federaation hallituksen kanssa tehdyn sopimuksen hyväksymisestä ja laiksi sopimuksen lainsäädännön alaan kuuluvien määräysten voimaansaattamisesta, [www-sivu]. Helsinki, 4.12.2014. Hallituksen esitykset, Finlex. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/esitykset/he/2014/20140314#idp2666064>

Ydinenergia-asetus 161/1988, [www-sivu]. Lainsäädäntö, Finlex. Saatavissa:

<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1988/19880161#L10>

Royal Academy of Engineering. 2013. FUTURE SHIP POWERING OPTIONS: Exploring Alternative Methods Of Ship Propulsion, [verkkodokumentti]. London, England: Royal Academy of Engineering, 7/2013. Saatavissa:  
<http://www.raeng.org.uk/publications/reports/future-ship-powering-options>







## Liite II: Liitteen I tietokannan lähdeluettelo

### TIETOKANNAN LÄHDELUETTELO

- 1) Polmar, Norman. 1993. The Naval Institute Guide To The Ships And Aircraft Of The U.S. Fleet. 18th edition. Annapolis, Maryland: U.S.Naval Institute Press, 2005. ISBN-10 1-59114-685-2. Saatavissa: <http://books.google.fi/books?id=8MwyTX-iA2wC&pg=PA112&dq=nimitz+class+displacement&hl=fi#v=onepage&q=nimitz%20class%20displacement&f=false>
- 2) O'Rourke, Ronald. 2015. Navy Ford (CVN-78) Class Aircraft Carrier Program: Background and Issues for Congress, [verkkodokumentti]. Congressional Research Service. Julkaistu 24.3.2015. Saatavissa: <http://fas.org/sgp/crs/weapons/RS20643.pdf>
- 3) Global Security. 2011. CGN 25 BAINBRIDGE class, [www-sivu]. GlobalSecurity. Päivitetty 22.7.2011. [viitattu 10.4.2015]. Saatavissa: <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/cgn-25.htm>
- 4) The American Society of Mechanical Engineers. 1983. First Nuclear-Powered Merchant Vessel, [verkkodokumentti]. Mt. Pleasant, S.C.: Patriots Point Naval & Maritime Museum. The American Society of Mechanical Engineers, Oct 15 1983. Saatavissa: <https://www.asme.org/getmedia/7e339fc8-68ec-4965-a495-73c9483baf23/87-NS-Savannah-1962.asp>
- 5) Official Website of the United States Navy. 2014. United States Navy, Fact File, Aircraft Carriers - CVN, [www-sivu]. Päivitetty 16.10.2014. [Viitattu 8.4.2015]. Saatavissa: [http://www.navy.mil/navydata/fact\\_display.asp?cid=4200&tid=200&ct=4](http://www.navy.mil/navydata/fact_display.asp?cid=4200&tid=200&ct=4)
- 6) NKS. 2006. Russian Nuclear Power Plants for Marine Applications, [verkkodokumentti]. Pohjoismainen ydinturvallisuustutkimus (NKS). Denmark, Roskilde: Huhtikuu 2006. Saatavissa: [http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:90453/datastreams/file\\_7712233/content](http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:90453/datastreams/file_7712233/content)
- 7) OKBM Afrikantov. FNPP "Academician Lomonosov" [www-sivu]. [viitattu 10.4.2015]. Saatavissa: <http://www.okbm.nnov.ru/english/lomonosov>
- 8) Nilsen, T., Kudrik, I. & Nikitin, A. 1996. The Russian Northern Fleet, Sources of Radioactive contamination, [verkkodokumentti]. Oslo: The Bellona Foundation. Saatavissa: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/28/002/28002184.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/002/28002184.pdf)
- 9) Reistad, O., Bremer Mærli, M. & Bøhmer, N. 2005. Russian naval nuclear fuel and reactors, [verkkodokumentti]. The Nonproliferation Review 12 (2005). DOI: 10.1080/10736700500209171. Saatavissa: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10736700500209171>
- 10) WNA. 2015. Nuclear Power in Russia, [www-sivu]. World Nuclear Association (WNA). Päivitetty 3/2015. [Viitattu 2.4.2015]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/>
- 11) IAEA. 2012. Status of small and medium sized reactor designs [verkkodokumentti]. Julkaistu 9/2012. Saatavissa: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/SMR/files/smr-status-sep-2012.pdf>
- 12) Honkova, Jana. 2013. Current Developments in Russia's Ballistic Missile Defense, [verkkodokumentti]. Arlington, VA: George C. Marshall Institute, Huhtikuu 2013. Saatavissa: <http://missilethreat.com/wp-content/uploads/2013/04/Russian-BMD-April-13.pdf>
- 13) Bøhmer, Nils. 2001. The Arctic Nuclear Challenge, [verkkodokumentti]. Oslo, Norway: Bellona Foundation, 2001. Bellona Report Volume 3 - 2001. Saatavissa: [http://bellona.org/assets/sites/6/The\\_Arctic\\_Nuclear\\_Challenge.pdf](http://bellona.org/assets/sites/6/The_Arctic_Nuclear_Challenge.pdf)
- 14) WNA. 2015. Nuclear-Powered Ships, [verkkosivu]. World Nuclear Association (WNA). Päivitetty 1/2015. [Viitattu 5.3.2015]. Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships/>
- 15) Newport News Shipbuilding. 2015. John F. Kennedy CVN 79, Newport News Shipbuilding, [www-sivu]. [viitattu 4.3.2015]. Saatavissa: <http://nns.huntingtonalls.com/products/carriers/ford/cvn79>
- 16) Ragheb, Magdi. 2015. Nuclear marine propulsion, [verkkodokumentti], Päivitetty 5.3.2015. [Viitattu 7.4.2015]. Saatavissa: <http://mragheb.com/NPRE%20402%20ME%20405%20Nuclear%20Power%20Engineering/Nuclear%20Marine%20Propulsion.pdf>

(jatkuu)

- 17) Chunyan, M. & von Hippel, F. 2001. Ending the Production of Highly Enriched Uranium for Naval Reactors, The Nonproliferation Review/Spring 2001, [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://cns.mis.edu/npr/pdfs/81mahip.pdf>
- 18) U.S. Department of Energy. 2006. Highly Enriched Uranium: Striking a Balance, [verkkodokumentti]. Washington, DC: Department of Energy, Tammikuu 2001. Saatavissa: <http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/heu/striking.pdf>
- 19) Polmar, Norman. 2007. Aircraft Carriers: A History of Carrier Aviation and Its Influence on World Events: Vol. II, 1946-2006. Washington, D.C.: Potomac Books Inc., 2007. [julkaistu 28.4.2007]. ISBN-10: 1574886657.
- 20) Marine Traffic. Aluskartta - AIS - Alusten Liikenne Ja Sijainnit - AIS Marine Traffic, [www-sivu]. Saatavissa: <https://www.marinetraffic.com/fi/>
- 21) Russia & India Report. 2014. The rise and fall of SSV-33 Ural, [uutisartikkeli]. Russia & India Report. Julkaistu 18.3.2014. [viitattu 4.3.2015]. Saatavissa: [http://in.rbth.com/economics/2014/03/18/the\\_rise\\_and\\_fall\\_of\\_ssv-33\\_ural\\_33805.html](http://in.rbth.com/economics/2014/03/18/the_rise_and_fall_of_ssv-33_ural_33805.html)
- 22) Babcock & Wilcox Nuclear Energy. 2010. B&W mPower™ Reactor Design Overview, Technical Report 08-0000341-000(NP), [verkkodokumentti]. Julkaistu Toukokuu 2010. Saatavissa: <http://pbdupws.nrc.gov/docs/ML1015/ML101550512.pdf>
- 23) Federation of American Scientists. 2000. Project 1143.7 Orel Ul'yanovsk class, [www-sivu]. Päivitetty 7.9.2000. [viitattu 9.4.2015]. Saatavissa: [http://fas.org/man/dod-101/sys/ship/row/rus/1143\\_7.htm](http://fas.org/man/dod-101/sys/ship/row/rus/1143_7.htm)
- 24) Rosatom Flot. 2015. Nuclear Power Plant, [verkkosivu]. [viitattu 8.3.2015]. Saatavissa: <http://www.rosatomflot.ru/index.php?menuid=33&lang=en>
- 25) Masayuki, Nakao. 2011. Radiation Leaks from Nuclear Power Ship "Mutsu", [verkkodokumentti]. Hatamura Institute for the Advancement of Technology. Saatavissa: <http://www.sozogaku.com/fkd/en/hfen/HA1000615.pdf>
- 26) IAEA. 2013. KLT-40S, [verkkodokumentti]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Advanced Reactors Information System (ARIS). Päivitetty 23.4.2013. Saatavissa: <https://aris.iaea.org/sites/.%5CPDF%5CKLT-40S.pdf>
- 27) Hirdaris, S. E., Cheng, Y. F., Shallcross, P., Bonafoux, J., Carlson, D. & Sarris, G. A. 2014. Concept design for a Suezmax tanker powered by a 70MW small modular reactor, [verkkojulkaisu]. Transactions RINA, Vol 156, Part A1, International Journal Maritime Engineering, Jan-Mar 2014. The Royal Institution of Naval Architects. doi: 10.3940/rina.ijme.2014.a1.276. Saatavissa: [http://www.researchgate.net/publication/260431156\\_CONCEPT\\_DESIGN\\_FOR\\_A\\_SUEZMAX\\_TANKER\\_POWERED\\_BY\\_A\\_70MW\\_SMALL\\_MODULAR\\_REACTOR](http://www.researchgate.net/publication/260431156_CONCEPT_DESIGN_FOR_A_SUEZMAX_TANKER_POWERED_BY_A_70MW_SMALL_MODULAR_REACTOR)
- 28) Dowdall, M. & Standring, W.J.F. 2008. Floating Nuclear Power Plants and Associated Technologies in the Northern Areas, [verkkodokumentti]. StrålevernRapport 2008:15. Østerås: Statens strålevern, 2008. Saatavissa: <http://www.nrpa.no/dav/0e1f312fc9.pdf>
- 29) Navyrecognition. 2012. Gerald R. Ford Class (CVN-78) Aircraft Carrier, [www-sivu]. Päivitetty 27.12.2012. [viitattu 9.4.2015]. Saatavissa: <http://www.navyrecognition.com/index.php/world-naval-forces/north-american-navies-vessels-ships-equipment/usa/aircraft-carriers/809-uss-gerald-r-ford-class-cvn-78-aircraft-carrier-nuclear-powered-john-f-kennedy-cvn-79-enterprise-cvn-80-cvnx-cvn-21-program-united-states-us-navy-newport-news-shipbuilding-huntington-ingalls-datasheet-pictures-photos-video-specifications.html>
- 30) BarentsObserver. 2014. Nuclear Container Ship to Be Put Back in Service, [www-sivu]. BarentsObserver. Julkaistu 10.1.2014. [Viitattu 6.3.2015]. Saatavissa: <http://barentsobserver.com/en/arctic/2014/01/nuclear-container-ship-be-put-back-service-10-01>
- 31) OKBM Afrikantov. Nuclear Power Plants [www-sivu]. [viitattu 10.4.2015]. Saatavissa: <http://www.okbm.nnov.ru/npp#maritime>
- 32) Nikitin, V.S. Differences between dismantling Admiral Ushakov Class vessel compared with that for nuclear powered submarines. Saatavissa: [http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/CEG/documents/ws052005\\_4E.pdf](http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/CEG/documents/ws052005_4E.pdf)
- 33) Barentsobserver. 2014. Potential nuclear threat to be eliminated, [uutisartikkeli]. Barentsobserver. Julkaistu 23.6.2015. [viitattu 8.4.2015]. Saatavissa: <http://barentsobserver.com/en/security/2014/06/potential-nuclear-threat-be-eliminated-23-06>

- 34) Watson, H. E. & Hawthorne, J. R. 1976. Metallurgical Failure Analysis of MH-1A Reactor Core Hold-Down Bolts [verkkodokumentti]. Washington D.C.: Naval Research Lab, Marraskuu 1976. Saatavissa: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA033436>
- 35) Barentsobserver. 2014. Soviet nuclear battle cruiser to be re-launched, [uutisartikkeli]. Barentsobserver. Julkaistu 31.10.2014. [viitattu 9.4.2015]. Saatavissa: <http://barentsobserver.com/en/security/2014/10/soviet-nuclear-battle-cruiser-be-re-launched-31-10>
- 36) Federation of American Scientists. 2000. Project 1144.2 Orlan, Kirov class, Guided Missile Cruiser (Nuclear Powered), [www-sivu]. Päivitetty 7.9.2000. [viitattu 9.4.2015]. Saatavissa: <http://fas.org/man/dod-101/sys/ship/row/rus/1144.htm>
- 37) Hirdaris, S. E., Cheng, Y. F., Shallcross, P., Bonafoux, J., Carlson, D. & Sarris, G. A. 2014. Considerations on the potential use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion, [verkköjulkaisu]. Ocean Engineering, Volume 79, 15 March 2014. Julkaistu 15.3.2014. doi: 10.1016/j.oceaneng.2013.10.015. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801813003843>
- 38) Radiationworks. Nuclear Powered Surface Ships of the World [www-sivu]. [viitattu 10.4.2015]. Saatavissa: <http://www.radiationworks.com/nuclearships.htm>
- 39) Gagarinski A., Ignatiev, V. & Devell, L. 1996. Studviks Report: Design and properties of marine reactors and associated R&D, [verkkodokumentti]. Sweden: STUDEVIK ECO & SAFETY AB. Julkaistu 30.5.1996. Saatavissa: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/27/073/27073072.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/073/27073072.pdf)