

Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden korkeakoulu
Kone- ja rakennustekniikka

Laivojen runkorakenteiden nykyaikaiset tuotantomenetelmät

Miku Sevón

Kandidaatintyö

27.08.2021

Työn ohjaaja:

Professori Heikki Remes

AALTO-YLIOPISTO
INSINÖÖRITIEIDEN KORKEAKOULU
PL 13000
00076 AALTO

TEKNIIKAN KANDIDAATINTYÖN
TIIVISTELMÄ

Tekijä Miku Sevón

Työn nimi Laivojen runkorakenteiden nykyaikaiset tuotantomenetelmät

Koulutusohjelma Kone- ja rakennustekniikka

Pääaine Kone- ja rakennustekniikka ENG 3043

Vastuopettaja Yliopistonlehtori Tommi Mikkola

Työn ohjaaja Professori Heikki Remes

Päivämäärä 23.08.2021

Sivumäärä 32

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Rahtilaivan runko on suuri ja monimutkainen tuote, jonka tuotanto vaatii aikaa ja äärimmäistä tarkkuutta. Tuotantoprosessi seuraa tiettyä kaavaa, vaikka eri telakoiden menetelmien välillä voi olla eroavaisuuksia. Suomalaisessa oppikirjallisuudessa ei ole yleiskattavaa selvitystä runkotuotantoprosessin vaiheista tai menetelmistä.

Tämän kandidaatintyö on kirjallisuuskatsaus, jonka tavoite on kuvata laivan runkotuotantoprosessi loogisesti ja yleistajuisesti siten, että lukija saa peruskäsityksen aiheesta vähäiselläkin esitiedolla. Tämän lisäksi työ käsittelee laivanrakennusteollisuuden nykyaikaisia teknologioita runkotuotannon näkökulmasta. Aineistona on käytetty oppikirjoja, tieteellisiä artikkeleita ja luokituslaitosten julkaisuja.

Opinnäytetyön teoreettisena viitekehyksenä käsitellään runkorakenteen osia, mittoja, muotoja, ominaisuuksia ja komponentteja yleisellä tasolla. Laivan runko on vesitiivis tukirakenne, joka suojelee aluksen matkustajia, lastia ja kalustoa säältä ja merenkäynniltä. Runko koostuu teräslevyistä ja -rakenteista.

Rungon tuotantoprosessi lähtee liikkeelle rakennekomponenttien käsittelystä. Tehtaalta saapuneet teräslevyt ja -rakenteet täytyy leikata ja muokata vaadittuihin kokoihin ja muotoihin. Kokoonpanovaiheessa valmiita rakennekomponentteja yhdistetään osiksi, yksiköiksi ja lohkoiksi. Lopullinen runkokokonaisuus muodostetaan yhdistelemällä lohkoja.

Digitaalisen tietotekniikan yleistyminen on tehnyt runkotuotannosta joustavamman, turvallisemman ja tehokkaamman prosessin robotiikan, virtuaalimaailmojen ja tietokonejärjestelmien avulla. NykYTEknologiat mahdollistavat muun muassa hitsausrobottien virtuaalisen valvonnan ja tietokoneavusteisen suunnittelun.

Avainsanat laivanrakennus, runkorakenne, tuotantoprosessi, digitalisaatio

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	1
Sisällysluettelo	2
Lyhenteet.....	3
1 Johdanto	4
2 Laivan runkorakenne.....	5
2.1 Rungon määritelmä	5
2.2 Rungon muoto	6
2.3 Runkotyypit	7
2.4 Runkorakenteen komponentit.....	9
3 Rungon tuotantoprosessi.....	11
3.1 Rakennekomponenttien käsittely	11
3.1.1 Materiaalin hankinta ja varastointi	12
3.1.2 Komponenttien valmistelu	12
3.1.3 Teräslevyjen leikkaus.....	12
3.1.4 Komponenttien muotoilu.....	16
3.2 Kokoonpano.....	17
3.2.1 Osakoonti	18
3.2.2 Yksikkökoonti.....	18
3.2.3 Lohkokoonti.....	18
3.2.4 Suurlohkokoonti	19
3.2.5 Runkokoonti.....	20
3.3 Rungon suojaus ja viimeistely	20
3.4 Säädökset, lait ja rajoitteet	21
3.4.1 Luokituslaitosten laivasäännöstit	21
3.4.2 Kokorajoitukset	22
4 NykYTEknologian sovellukset runkotuotantoprosessissa	24
4.1 Automatisaatio	24
4.2 Tietokoneavusteinen suunnittelu ja lisäävä valmistus	25
4.3 Tehostettu todellisuus.....	27
4.4 Teollinen internet ja sensoriteknikka	28
5 Yhteenveto.....	29
Viitteet	30

Lyhenteet

LASOX	Laseravusteinen polttoleikkaus (engl. <i>Laser Assisted Oxygen Cutting</i>)
ICCP	Ulkoiseen virtalähteeseen perustuva katodinen suojausjärjestelmä (engl. <i>Impressed Current Cathodic Protection</i>)
IACS	Kansainvälinen luokituslaitosten järjestö (engl. <i>International Association of Classification Societies</i>)
DSME	Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu (engl. <i>Computer-aided Design</i>)
AM	Lisäävä valmistus (engl. <i>Additive manufacturing</i>)
MR	Tehostettu todellisuus (engl. <i>Mixed Reality</i>)
VR	Virtuaalitodellisuus (engl. <i>Virtual Reality</i>)
AR	Lisätty todellisuus (engl. <i>Augmented Reality</i>).
IIoT	Teollinen internet (engl. <i>Industrial Internet of Things</i>)

1 Johdanto

Viime vuosina laivanrakennuksessa on tapahtunut merkittäviä muutoksia digitalisaation ja automatisaation myötä. Kuitenkin laivan rungon tuotannossa käytetään vielä suurimmaksi osaksi ihmisvoimia prosessin monimutkaisuuden ja vaativuuden vuoksi. Runkorakenteen tuotantoa on lähes mahdotonta automatisoida täysin, sillä prosessi kaipaa jatkuvaa soveltamista eikä se aina seuraa tarkkaa kaavaa. Laivat eroavat toisistaan mittojen, kapasiteetin, muodon ja operointitarkoitusten perusteella, eli lähtökohtaisesti jokainen laivanrakennusprojekti on ainutlaatuinen.

Suomalaisessa oppikirjallisuudessa ei ole nykyaikaista ja yleiskattavaa selvitystä runkotuotannosta ja sen tulevaisuuden suuntaviivoista, vaikka tuotantoteknologia on vahvasti muuttumassa neljännen teollisen vallankumouksen myötä. Tämän kandidaatintyön päätavoitteena on runkotuotannon nykytilan kuvaus sekä uusien teknologioiden ja menetelmien käyttökohteiden selvitys. Työn tarkoitus ei ole olla kaikenkattava, vaan mahdollisimman yleistajuinen ja rakenteeltaan looginen kokonaisuus, jonka lukemisen jälkeen lukijalla on yleiskäsitys nykyaikaisesta runkotuotannosta. Työn luettuaan lukija tietää myös merkittävimmistä teknologioista, jotka määrittävät tulevaisuuden runkotuotannon.

Työssä perehdytään rahtilaivojen runkorakenteiden tuotantoon ja teknologiaan kirjallisuustutkimuksen avulla. Työn fokus on tuotannossa, joten rungon materiaalivalintoihin tai suunnitteluprosessiin ei juurikaan perehdytä. Työssä käsitellään vain laivojen runkorakennetta, johon ei lukeudu niiden ohjauslaitteet, propulsorit tai muu kalusto.

Työn alussa esitellään laivan runkoa yleisesti, jotta lukija saa ymmärryksen siitä, minkälaista tuotetta tuotantomenetelmillä ollaan valmistamassa. Luku 2 käsittelee siis runkorakenteen termistöä, muotoilua ja komponentteja. Luku 3 perehtyy runkorakenteen tuotantoon. Luvussa esitellään runkorakennekomponenttien tuotantoprosessia, rungon kokoonpanoa sekä tuotantoon liittyviä säädöksiä. Luvussa 4 tutustutaan runkotuotannon kehitysalueisiin ja nykyteknologian hyödyntämismahdollisuuksiin runkotuotannossa.

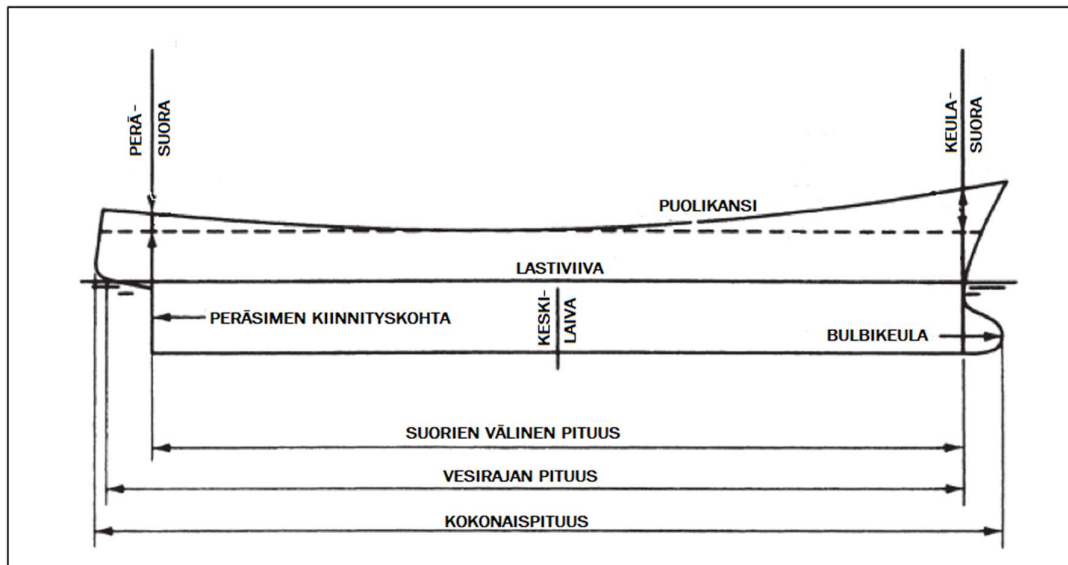
2 Laivan runkorakenne

Runko on kaikin puolin laivan merkittävin ja näkyvin osa. Runko on tukirakenne, joka suojelee laivan lastia, rakenteita, matkustajia ja kalustoa vedeltä, säältä ja muilta vahinkotekijöiltä. Turvallisuuden takaamiseksi runkorakenteen tulee kestää merenkäynnistä aiheutuvat kuormat ja säilyttää vesitiiveys kaikissa operointitilanteissa. Oikean muotoinen runkorakenne minimoi laivaan kohdistuvan kulkuvastuksen ja nostaa aluksen energiatehokkuutta. [1, s. 173]

Tässä luvussa perehdytään rungon termeihin sekä rungon muotoon. Rungon muotoilua ja sen optimointia käsitellään mekaanisesta näkökulmasta. Tämän jälkeen keskitytään eri runkotyyppeihin sekä niiden muodon ja rakenteen yhtäläisyyksiin ja eroavaisuuksiin. Luvun lopussa käydään läpi rungon tärkeimmät rakennekomponentit.

2.1 Rungon määritelmä

Runkorakenne voidaan määritellä erilaisilla termeillä, jotka kuvaavat sen mittoja, osia ja ominaisuuksia. Kuva 1 sisältää runkorakenteeseen liittyviä termejä.



Kuva 1: Runkorakenteen osat ja termistö [1, s. 14]

Rungon etuosaa kutsutaan keulaksi ja takaosaa peräksi. Koska keula ja perä eivät itsessään merkitse mitään tarkkaa kohtaa laivassa, laivasuunnittelussa käytetään suoria hydrostaattisten ja -dynaamisten laskujen helpottamiseksi. Keulasuora piirretään usein kohtaan, jossa keula leikkaa vesirajan ja peräsuora kohtaan, johon

peräsin kiinnitetään. Laivan keskellä, keula- ja peräsuorien välissä olevaa mittaa kutsutaan keskilaivaksi (engl. *amidships*). [1, s. 11]

Aluksen kokonaispituus mitataan sen keulan ja perän ääripäistä. Vesirajan pituus on suunnittelussa käytetty mitta, jolla kuvataan rungon vedenalaisen osuuden pituutta. Lastiviivaksi kutsutaan laivan vesirajaa, kun se on mallipainossaan ja kantaa mallilastin. Lastiviivan avulla voidaan päätellä vesirajan korkeus runkoon nähden eri olosuhteissa ja painossa. [1, s. 11 & 14]

Laivan vetoisuudella (engl. *tonnage*) kuvataan rungon tilavuutta. Vetoisuudella on merkitystä merenkulkumaksuissa sekä aluksen miehistön pätevyysvaatimuksissa ja lukumäärässä. Luku ei pidä sisällään aluksen ulkokannella olevia lastitiloja. Volyymilla kuvataan laivan tilavuutta kuutiometreissä. [1, s. 13]

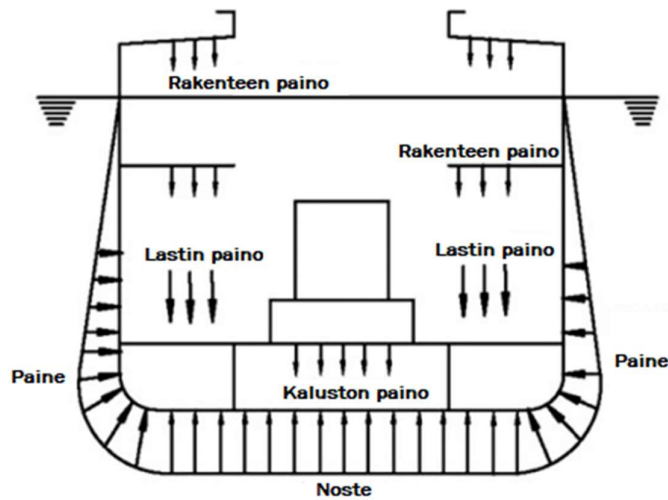
Kun laiva lasketaan veteen, se syrjäyttää oman painonsa verran vettä. Tätä painoa kutsutaan laivan uppoumaksi. Syrjäytetty vesimassa kohdistaa alukseen uppouman suuruisen ylöspäin työntävän voiman – hydrostaattisen nosteen, joka pitää laivan pinnalla. Ilmiö perustuu Arkhimedeen lakiin. Kuollut paino (engl. *deadweight tonnage, DWT*) on aluksen vesivarastojen, tarvikkeiden, polttoaineen, lastin ja henkilöiden yhteispaino, kun alus on täydessä lastissa. Kun kuolleeseen painoon lisätään aluksen oma paino, saadaan uppouma. [1, s. 5]

Laivan vakavuudella kuvataan sen kykyä pysyä pystyssä äärimmäisissä sääolosuhteissa tai lastaustilanteessa. Kelluvuudella kuvataan aluksen kykyä pysyä veden pinnalla. [1, s. 5]

2.2 Rungon muoto

Laivan operointitarkoitus, kuljetustehtävä ja olosuhteet määrittävät rungolta vaadittavat mitat, muodot ja ominaisuudet. Runko määrittää useita osatekijöitä laivan liikkeessä ja kantokyvyssä. Näitä osatekijöitä ovat esimerkiksi uppouma, vastus, vakavuus, nopeus, kapasiteetti, ohjattavuus ja kääntymissäde. Ymmärtääksemme rungon muotoilua tulee meidän tarkastella sitä mekaanisesta näkökulmasta. [1, s. 4–5]

Staattisesti runkoon vaikuttaa lähinnä hydrostaattiset voimat sekä lastin, kaluston ja rakenneosien paino. Hydrostaattisia voimia ovat noste sekä paine, jotka vaikuttavat runkoon jatkuvasti sen ollessa vedessä. Sekä rungon uppouma että painojakauma vaikuttavat hydrostaattisten voimien suuruuteen. Hydrostaattiset voimat vaikuttavat rungon vakavuuteen ja kelluvuuteen. Rungon tasainen pohja pyrkii hajauttamaan hydrostaattisia voimia kaikin puolin runkoa. Kuvassa 2 on esitelty runkorakenteeseen vaikuttavat staattiset kuormat. [1, s. 5] [2, s. 25–26]



Kuva 2: Rungon statiikka [2, s. 26]

Runkorakenteeseen kohdistuu hydrostaattisten voimien lisäksi hydrodynaamisia voimia. Hydrodynaamisia voimia syntyy, kun aallokko voimistaa ja hajaannuttaa nosteen ja paineen aiheuttamia kuormituksia ympäri alusta. Hydrodynaamiset voimat ovat lokaaleja, ja niiden yleisin kohdistumispaikka on runkorakenteen keula. Laivan dynamiikkaan vaikuttaa sääolosuhteiden lisäksi rungon koko, muoto, paino ja nopeus. [1, s. 6] [3, s. 12–15]

Rungon muodon optimoinnilla voidaan minimoida alukseen kohdistuva dynaaminen kulkuvastus, jolloin alus on energiatehokkaampi. Kulkuvastus aiheutuu lähinnä aallokosta, paineesta ja kitkavastuksesta [3, s. 12–13]. Sääolosuhteet vaikuttavat voimakkaasti kulkuvastuksen suuruuteen. Laivan keulan tehtävä on luoda laivan etuosaan vähäpaineinen alue, joka vähentää alukseen vaikuttavaa kulkuvastusta. Monissa nykylaivoissa käytetään bulbikeulaa, joka tehostaa keulan toimintaa. Kuvan 1 rungossa on esimerkki bulbikeulasta. [1, s. 243–244]

Energiatehokkuuden optimointi lisää tarvetta kehittää menetelmiä, jotka tuottavat runkoon tasaisia pintoja. Yksi keino saavuttaa energiatehokkaampi muoto on hioa pohjasta kaikki hitsausliitokset tasaisiksi. [4, s. 413]

2.3 Runkotyypit

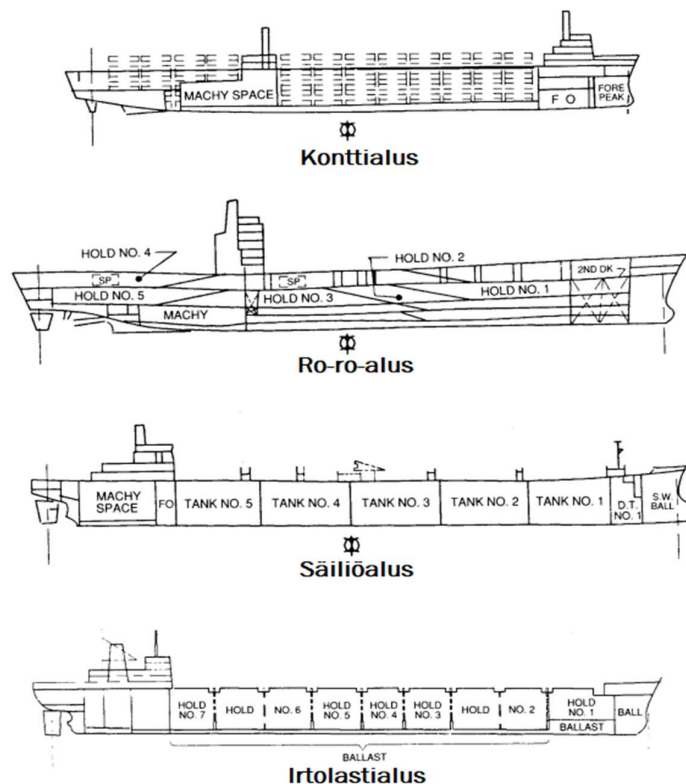
Rahtialukset voidaan jakaa eri tyyppeihin niiden lastin perusteella. Alustyypppejä on käytännöllisesti katsoen neljää eri tyyppiä:

- Konttialus, joka kuljettaa merikuljetuskontteja

- Ro-ro-alus, joka kuljettaa ajoneuvoja
- Säiliöalus, joka kuljettaa nestettä tai kaasua säiliöissä
- Irtolastialus, joka kuljettaa pakkaamatonta kuivarahtia

Rahtialusten rungot ovat hyvin samanlaisia yleiseltä muodoltaan. Voidaan olettaa, että kaikkien rahtilaivojen rungot ovat päätyypiltään uppoumarunkoja (engl. *displacement hull*). Kyseinen runkotyyppi hyödyntää uppoumansa kautta hydrostaattista nostetta pysyäkseen pinnalla. Uppoumarungot ovatkin optimaalisia hitaissa, veden läpi leikkaavissa aluksissa, sillä ne lisäävät aluksen vakavuutta. [3, s. 23–25] [4, s. 9]

Alukset vaativat omat edellytyksensä runkorakenteeltaan, sillä ne kuljettavat erilaisia lastityyppejä ja lastautuvat eri tavoin. Merkittävimmät erot alusten runkorakenteessa on lastin säilytystiloissa ja pohjassa. Runkorakenne tulee toteuttaa siten, että alukset pystyvät helposti noudattamaan lasteihinsa liittyviä rajoituksia.

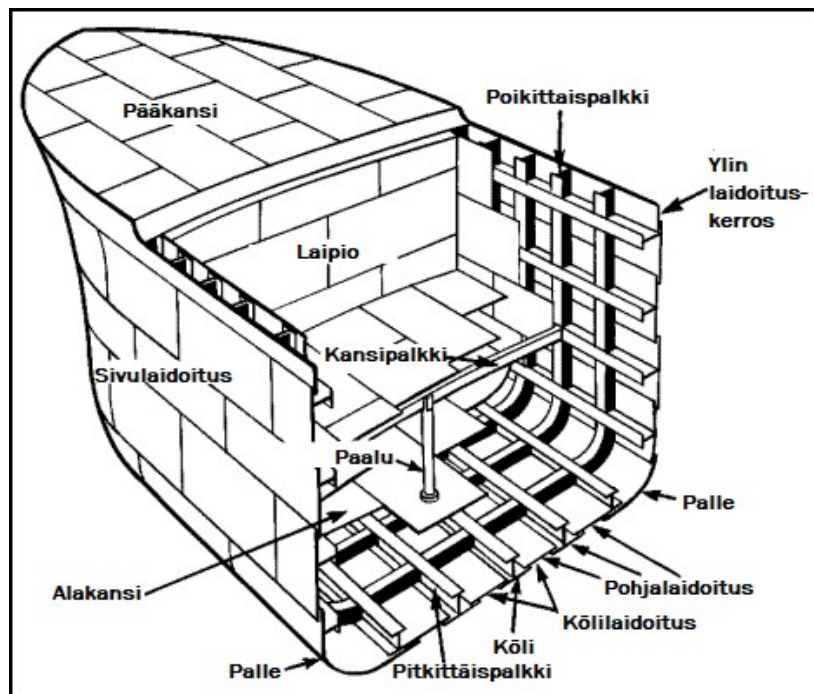


Kuva 3: Alustyyppit [4, s. 9]

Kuva 3 havainnollistaa alusten runkotyypin yhtenäisyyden. Yhdistäviä tekijöitä ovat esimerkiksi tilava pääkansi, bulbikeula ja samanlaiset rakennekomponentit. Yhtenäisyyden vuoksi alusten runkotuotantoprosessi seuraa varsin samoja vaiheita ja menetelmiä, vaikka runkojen rakenteet, koot ja muodot voivat osittain erota toisistaan.

2.4 Runkorakenteen komponentit

Rahtilaivan runko voidaan käsittää yhteen kiinnitettyjen teräsrakenteiden ja -levyjen kokonaisuutena. Näihin rakenteisiin kuuluvat mm. kansilevyt, palkit, muotoraudat, laipiolevyt, kulmalevyt ja polviot [1, s. 173–174]. Rakenteet luovat yhdessä lujan, kestävä ja tukevan runkokokonaisuuden. Kuva 4 sisältää tärkeimmät runkorakenteen komponentit. [2, s. 27 & 39]



Kuva 4: Rungon rakennekomponentit [1]

Aluksen vedenpitävä ulkokuori muodostuu pohja- ja sivulaidoituksesta. Rungon laidoituksen muodostavat toisiinsa hitsatut teräslevyt, jotka kiinnitetään keulassa ja perässä oleviin rankoihin. Palle (engl. *bilge*) on aluksen pohja- ja sivulaidoituksen yhdistävä kaareva levy. Ulkokuori on rungon tärkein osa ja sen lujuudesta ja kestävydestä täytyy varmistua tuotannon aikana. Levyjä käytetään myös muodostamaan kansia ja laipioita, eli tulen- ja vedenkestäviä seinämiä, jotka erottavat aluksen tiloja toisistaan. [2, s. 39–40]

Runko vaatii kiertolujuutta, pitkittäislujuutta, poikittaislujuutta ja lokaalia lujuutta. Lujuuden mahdollistamiseksi runkorakenteen täytyy sisältää vertikaali- ja horisontaalipalkkien muodostamia kehyksiä. Rungossa on sekä sen pysty- ja pituussuunnissa kulkevia palkkeja (engl. *girder*) että sen leveyssuunnassa kulkevia palkkeja (engl. *transverse*). Palkit voidaan jakaa eteenpäin keski- ja sivupalkkeihin. Aallokosta aiheutuvien kuormien vuoksi laivan keulassa käytetään T-palkkeja ja breast hook- levyjä, jotka yhdistävät tyyrpuurin ja paapuurin puolen rakenteet toisiinsa. [2, s. 40–44]

Palkit kiinnitetään yhteen tai useampaan kansilevyyn, jotka yhdessä muodostavat alukseen kansia. Kannet ovat vaakasuoria rakenteita, jotka jakavat aluksen kerroksittaisiin tiloihin. Kansi yltää usein laivan keulasta aivan perään asti. Kansi vahvistaa runkoa ja toimii säänkestävänä katteena. Rahtilaivoissa on pinta-alaltaan suuria kansia lastikapasiteetin lisäämiseksi. Laivan ylintä kantta kutsutaan pääkanneksi ja alinta kantta alakanneksi. Kansi on puolikansi, jos se peittää vain osan aluksen pituudesta. [1, s. 226]

3 Rungon tuotantoprosessi

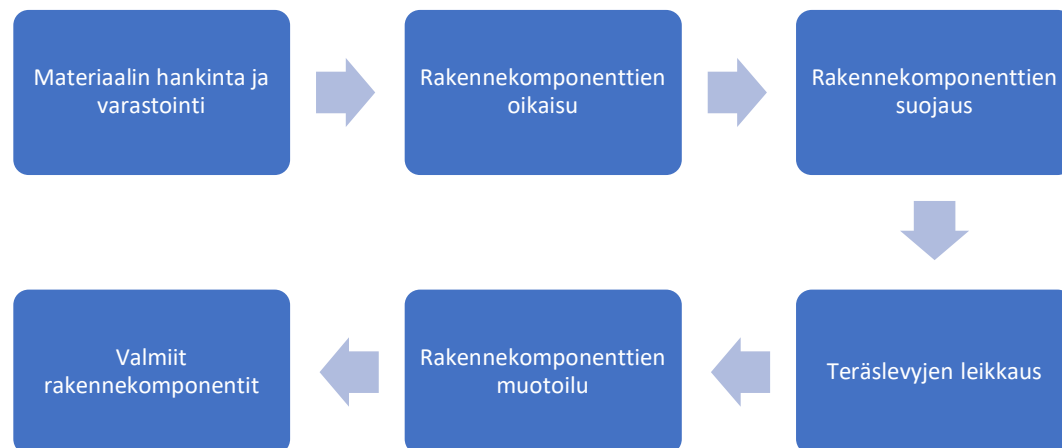
Laivat ovat suurimpia ihmisten rakentamia liikkuvia rakenteita. Jokainen laiva tuotetaan asiakkaan vaatimusten ja tarpeiden mukaan, eli jokainen projekti on ainutlaatuinen. Projektien eroavaisuuksien vuoksi laivoja ei voida valmistaa massatai sarjatuotantona, kuten esimerkiksi autoja. Tämä tekee rungon valmistamisesta hyvin monimutkaisen ja vaativan prosessin sekä tuotannollisesti että taloudellisesti. Työvaiheet eroavat toisistaan niin teknologisesti kuin ajallisestikin, joten niiden välillä tulee olla vuorovaikutusta ja keskinäistä riippuvaisuutta. Laivanrakennus on pitkä prosessi, joka kestää projektista riippuen 2–4 vuotta. Vaikka melkein jokainen laiva on uniikki, rungon tuotantoprosessi seuraa lähes poikkeuksetta tiettyjä vaihteita. [5, s. 78]

Tämä luku pyrkii etenemään oikean runkotuotantoprosessin kaltaisesti. Ensin tarkastellaan rakennekomponenttien käsittelyä, jonka jälkeen siirrytään rungon kokoonpanoon ja suojaukseen. Luvun lopussa käsitellään runkotuotantoon liittyviä säästöjä ja rajoitteita.

3.1 Rakennekomponenttien käsittely

Telakka ostaa kaikki aluksen rakennekomponentit valmiina tehtailta. Teräslevyjä ja -rakenteita ei kuitenkaan voi suoraan käyttää tuotannossa, sillä ne ovat väärissä ko'issa ja muodoissa. Komponentit vaativat siis useita toimenpiteitä ennen kokoonpanovaihetta. Käsittelyn vaiheet on havainnollistettu kaavioon 1.

Kaavio 1: Rakennekomponenttien tuotantoprosessi



3.1.1 Materiaalin hankinta ja varastointi

Vaikka laivojen runkoja ei pystytä valmistamaan massatuotantona, ei prosessi ole puhdasta yksittäistuotantoakaan. Rungon rakentamisessa käytetään samanlaisia teräsrakenteita, joita tuotetaan tehtaissa massatuotantona. Tuotantoprosessin ensimmäinen vaihe on teräslevyjen ja -rakenteiden hankinta. Suunnitteluprosessin aikana on määriteltävä komponenttien paksuus ja teräslaatu. Paksuus ja teräslaatu vaihtelevat rungon eri kohdissa. [1, s. 136] [2, s. 111]

Varastoidessa komponentit merkitään tunnisteilla, joista nähdään mihin projektiin ne kuuluvat. Teräslevyt varastoidaan vaak- ja pystysuunnassa. Pystysuunnassa varastointi on suotavampaa, sillä se vie vähemmän tilaa ja yksittäisten levyjen nostaminen on helpompaa. [1, s. 136]

3.1.2 Komponenttien valmistelu

Tehtaalla tulleet levyt eivät ole täysin suoria ja levyihin on muodostunut jäännösjännitystä, joka heikentää niiden lujuutta [1, s. 137]. Tuotannon tehostamiseksi levyjen täytyy olla ideaalikunnossa prosessointia varten. Levyt täytyy oikaista, sillä epätasaisuus voi johtaa sovituvirheisiin kokoonpanovaiheessa. Levyjen oikaisu ja jäännösjännityksen poisto tapahtuu valssaamalla. Valssauksessa muokattava levy kulkee valssaimen rullien eli valssien välistä. Valssien määrä riippuu levyn paksuudesta. [1, s. 137] [2, s. 112]

Valssauksessa levyyn pintaan muodostuu valssihilsettä. Valssihilse on kuumavalssatun teräksen hiutaleinen pinta, joka koostuu sekoitetuista rautaoksideista. Valssihilse täytyy poistaa kaikista rakennekomponenteista, sillä se voi liata hitsauskoneistoa ja aiheuttaa rungon korroosiota. Valssihilse voidaan poistaa esimerkiksi lämpökäsittelyllä tai raepuhalluksella. [1, s. 137] [2, s. 112]

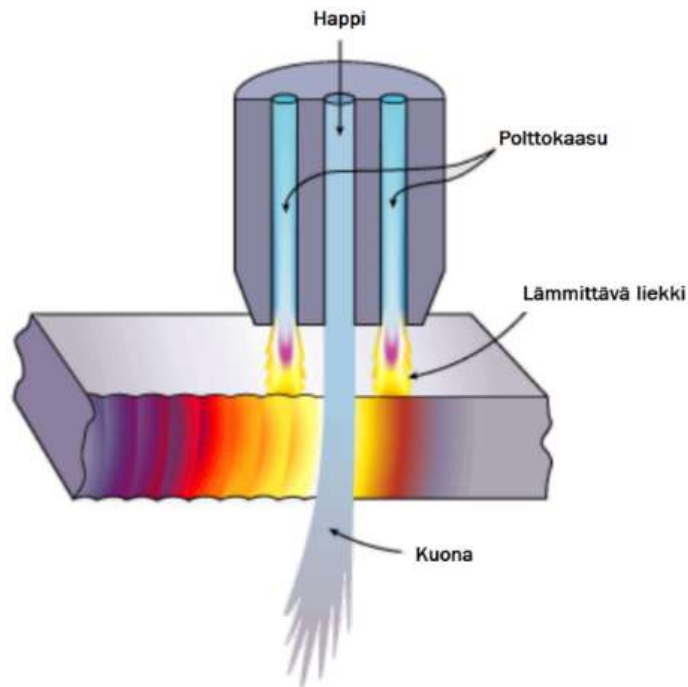
Korroosion estämiseksi teräslevyt ja -rakenteet pitää pohjustaa sinkkipitoisella pohjustusmaalilla [1, s. 137]. Pohjustuksen jälkeen komponentit laitetaan kuivaushuoneeseen, jotta kosteus ei sotkisi prosessia. Jos valssihilsettä ei poisteta, pohjustusmaali tarttuu siihen ja lopulta maali tippuu pois valssihilseen mukana, jolloin runko on osittain altis korroosiolle. [2, s. 112]

3.1.3 Teräslevyjen leikkaus

Pintakäsittelyn jälkeen levyt täytyy leikata ja taivuttaa haluttuihin kokoihin ja muotoihin. Ennen leikkausta levyt skannataan ja leikkausviiva merkitään levyihin tietokoneohjelman avulla. Tämä prosessi on nimeltään nestaus ja sen tarkoitus on minimoida materiaalihukka. [1, s. 133]

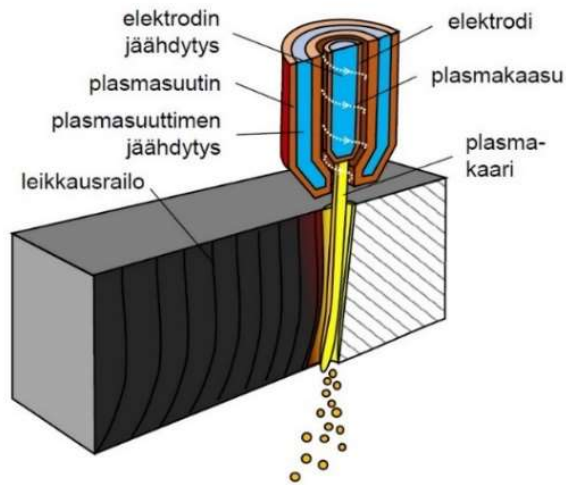
Levyt voidaan leikata pääsääntöisesti neljällä tavalla. Ensimmäinen näistä on polttoleikkaus. Polttoleikkauksessa leikkausviivaa lämmitetään hapen ja polttokaasun yhteisvaikutuksella. Polttokaasulla nostetaan teräksen lämpötila

hehkuvaksi, jonka jälkeen leikkausviivan suihkutetaan puhdasta hapetta. Reagoidessaan hapen kanssa teräs palaa pois. Leikkausprosessia on selvennetty kuvassa 5. Reaktiossa syntyy kuonaa, jonka happisuihku puhaltaa pois. Polttoleikkaus sopii levyihin, joiden paksuus on 6–25 mm:ä. [1, s. 98] [2, s. 123–124]



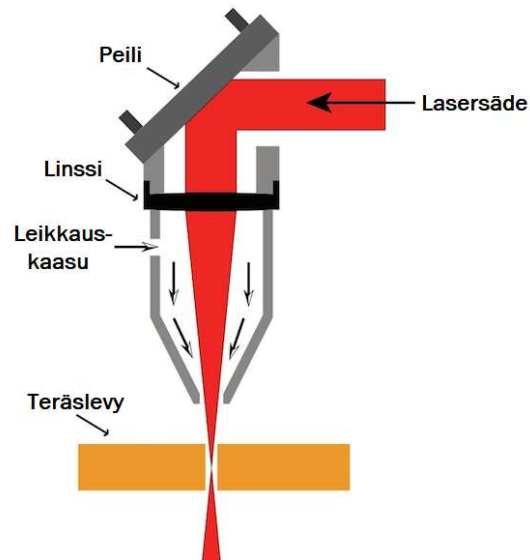
Kuva 5: Polttoleikkaus [6]

Plasmaleikkaus on materiaalivalikoimaltaan monipuolisempi ja nopeampi leikkausmenetelmä kuin polttoleikkaus. Prosessissa plasmasuuttimen sisään on sijoitettu elektrodi, joka toimii reaktiossa katodina. Elektrodi muodostaa anodina toimivan työkappaleen kanssa lämpöä tuottavan valokaaren. Elektrodin ympärillä virtaa plasmakaasua suurella nopeudella, joka ionisoituu valokaareissa muodostaen plasmakaaren. Plasmasuuttimen kärjessä on kapeneva aukko, joka kaventaa plasmakaaren ja suihkuttaa sen työkappaleeseen, joka sulaa ja osittain höyrystyy korkeassa lämpötilassa. Plasmakaasuvirtauksen kineettinen energia muodostaa leikkausrailon kappaleeseen. Leikkausprosessia on selvennetty kuvassa 6. Leikkausmenetelmällä voidaan leikata jopa 150 mm:iin asti. [1, s. 98–100] [2, s. 125–130]



Kuva 6: Plasmaleikkaus [7]

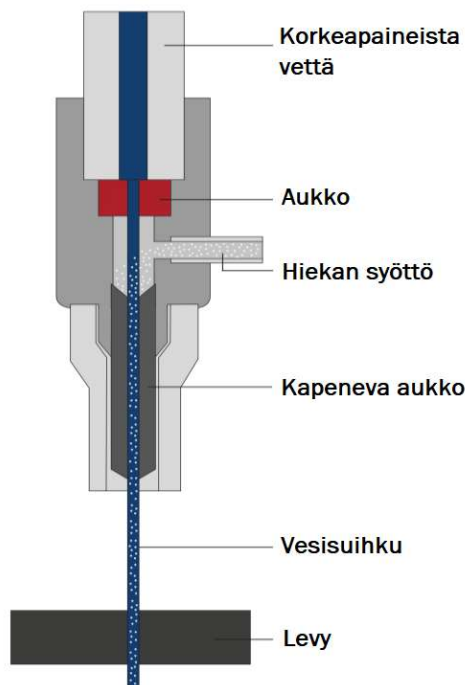
Laserleikkauksessa lasersäde kohdistetaan linssillä polttopisteeksi leikattavaan materiaaliin. Polttopiste kuumenee niin kuumaksi, että työstettävä materiaali sulaa, palaa tai höyrystyy ja leikkausrailo muodostuu. Leikkausprosessia tehostetaan leikkauskaasulla, jonka avulla teräs palaa eksotermisesti eli se vapauttaa lämpöenergiaa ympärilleen. Prosessissa syntynyt kuona puhalletaan pois leikkauskaasulla. Leikkausprosessia on selvennetty kuvassa 7. Laserleikkauksella voidaan leikata jopa 30 mm:n paksuisia levyjä. [1, s. 100–101] [2, s. 130–132]



Kuva 7: Laserleikkaus [8]

Leikkausmenetelmien yhdistäminen on mahdollista ja usein tehokkaampaa. Poltto- ja laserleikkauksen yhdistelmää kutsutaan LASOX-menetelmäksi. LASOX-prosessissa lasersäde esilämmittää levyn, jonka jälkeen happisuihku viimeistelee leikkauksen. LASOX-leikkauskoneet voivat sujuvasti leikata levyjä, joiden paksuus on 3–50 mm:ä. [2, s. 132]

Polttoleikkaus, plasmaleikkaus ja laserleikkaus ovat termisiä leikkausmenetelmiä. Levyjä voidaan leikata myös käyttäen mekaanisia leikkausmenetelmiä, kuten vesisuihkuleikkausta. Vesisuihkuleikkauksessa vettä pusketaan hyvin kapean aukon läpi, jolloin sen nopeus ja paine kasvavat hyvin suuriksi ja vesisuihku kykenee leikkautumaan levystä läpi. Veteen voidaan lisätä hiekkaa leikkauksen tehostamiseksi. Leikkausprosessia on selvennetty kuvassa 8. [1, s. 101] [2, s. 118–119]



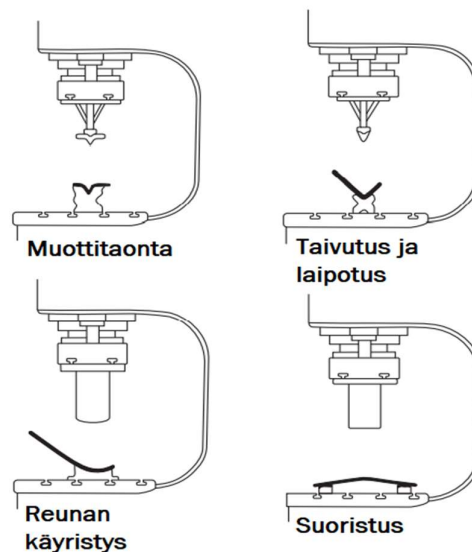
Kuva 8: Vesisuihkuleikkaus [9, s. 121]

Eyres ja Bruce [1, s. 101] pitävät vesisuihkuleikkausta toissijaisena menetelmänä sen hitauden vuoksi. He tuovat esille myös, että vesisuihkuleikkaukuskalusto ei ole helposti siirrettävissä. Mandal tuo kirjassaan [2, s. 118–122] esiin toisenlaisen näkemyksen: vesisuihkuleikkaus on turvallisempi, ympäristöystävällisempi ja halvempi vaihtoehto. Vesisuihkuleikkaus ei myöskään vaadi lämpöä, jolloin teräslevyyn ei synny lämpöjännityksiä tai epämuodostumia. Toisaalta vedenalainen laserleikkauskin minimoi lämpöjännitykset ja epämuodostumat. [28]

3.1.4 Komponenttien muotoilu

Saavuttaakseen lujan, dynaamisen ja energiatehokkaan muodon laivan runkorakenteessa on useita kaarteita. Useimmissa aluksissa noin 15 %:a runkorakenteen levyistä ovat kaarevia [2, s. 135]. Teräslevyt tulee muovata siis siten, että ne myötäilevät rungon muotoja. Yleisiä muovaustoimenpiteitä ovat taivutus, suoristaminen ja reunojen käyristäminen. Levyjen muotoja muokataan pääsääntöisesti hydraulisesti tai lämpökäsittelyllä. Ennen levyjen muotoilua niihin merkataan palkkien kiinnityspaikat. [1, s. 140–141] [2, s. 136]

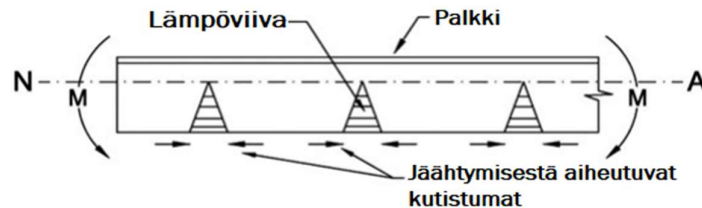
Hydraulisella puristimella taivuttaminen on halpaa eikä siinä käytetä lämpöä, eli levyyn ei synny lämpöjännitystä. Hydraulinen puristin käyttää hyväkseen fluidien sisäistä energiaa luomaan Pascalin lain mukaisen kokonaisvoiman, joka kykenee puristamaan lujia objekteja. Hydraulinen puristin on hyvin monikäyttöinen levyjen muokkauksessa, kuten kuvasta 9 nähdään. Hydraulisen taivutuksen varjopuoli on elastinen kimpoaminen (engl. *elastic spring-back*). Teräslevy siis kimpoaa taivutuksen jälkeen takaisinpäin, jolloin todellinen taivutus on toivottua pienempi. Oikean kuormitusmäärän laskemiseen vaaditaan ammattitaitoisia työntekijöitä. Lisäksi toimenpiteessä voidaan käyttää apuna tarkkailujärjestelmää, joka tarkistaa levyn tilan jokaisen puristuksen jälkeen. [1, s. 140–141] [2, s. 136]



Kuva 9: Hydraulisen puristimen käyttö levyjen muotoilussa [1, s. 141]

Levyjen lisäksi osa palkeista vaatii muotoilua. Palkkien muotoilu tapahtuu usein lämpöä käyttäen. Toimenpiteessä palkkia lämmitetään yhtä tai useampaa viivaa pitkin. Viivat kulkevat yleensä palkin keskeltä, jolloin lämpötila kasvaa eksponentiaalisesti palkin reunoilta kohti lämpöviivaa. Lämpöviivaa pitkin tapahtuu lämpölaajenemista, joka johtaa kuormituksen kasvuun lämpöviivassa. Lämpötila on

suurempi siltä puolelta, josta palkkia lämmitetään, joka johtaa lämpögradientin syntymiseen. Nyt myös kuormitus on suurempi lämmitettävältä puolelta, joka johtaa palkin taipumiseen lämpöviivan kohdalta. Lämpötaivutusprosessia on havainnollistettu kuvassa 10. Tarkkojen 3D-muotojen tuottamiseen käytetään tietokoneohjelmaa, joka määrittää kaasun lämpötilan, lämpöviivojen sijainnin ja polttimen nopeuden. [1, s. 142–143] [2, s. 140–141]

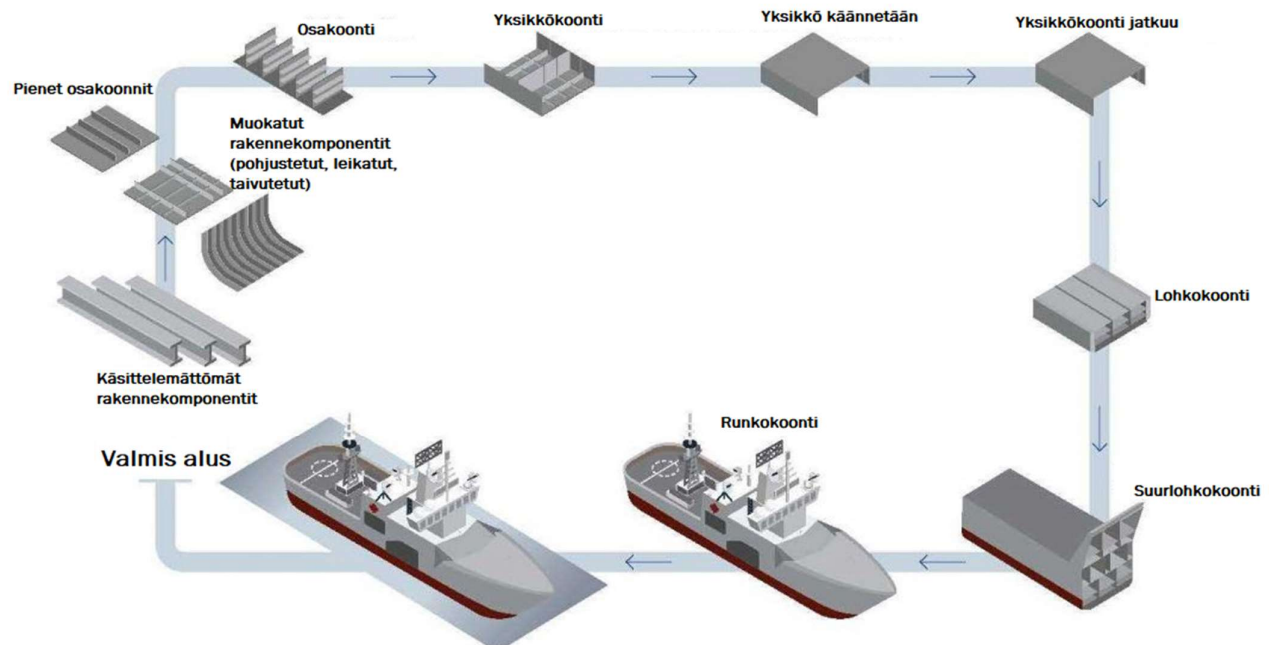


Kuva 10: Lämpötaivutus [2, s. 140]

Muotoilun jälkeen rakennekomponentit ovat täysin käsitellyt ja valmiina kokoonpanovaihetta varten.

3.2 Kokoonpano

Eyres & Bruce [1, s. 151–159] jakavat rungon kokoonpanon osa-, yksikkö-, lohko- ja runkokokoontiin. Valmiit rakennekomponentit yhdistetään osiksi, joista kootaan yksiköitä. Yksiköt yhdistetään lohkoiksi, joista lopullinen runkokokonaisuus muodostuu. Kyseinen rakennusmenetelmä – lohkorakentaminen – mahdollistaa rungon osien samanaikaisen rakentamisen useassa eri koontipaikassa ja eri yritysten toimesta. Kuva 11 havainnollistaa rungon kokoonpanon vaiheet.



Kuva 11: Rungon kokoonpano [10]

Osat ja kokonaisuudet yhdistetään toisiinsa hitsaamalla. Laivanrakennuksessa käytetään fuusiohitsausta, joka perustuu metallin sulamiseen ja kiteytymiseen. Hitsauksen lämmönlähteenä käytetään usein kaasuliekkiä, sähkövirtaa, plasmaa tai näiden yhdistelmiä. Hitsaus on tehokkuuden ja vesitiiveyden kannalta paras kiinnitysmenetelmä. [1, s. 81–93]

3.2.1 Osakoonti

Käsittelyn ja muokkauksen jälkeen rakennekomponentteja voidaan alkaa yhdistelemään kaksiulotteisiksi osakokonaisuuksiksi. Osakoonti voidaan jakaa pienosakoontiin (engl. *minor assembly*) ja suurosakoontiin (engl. *subassembly*). [1, s. 151]

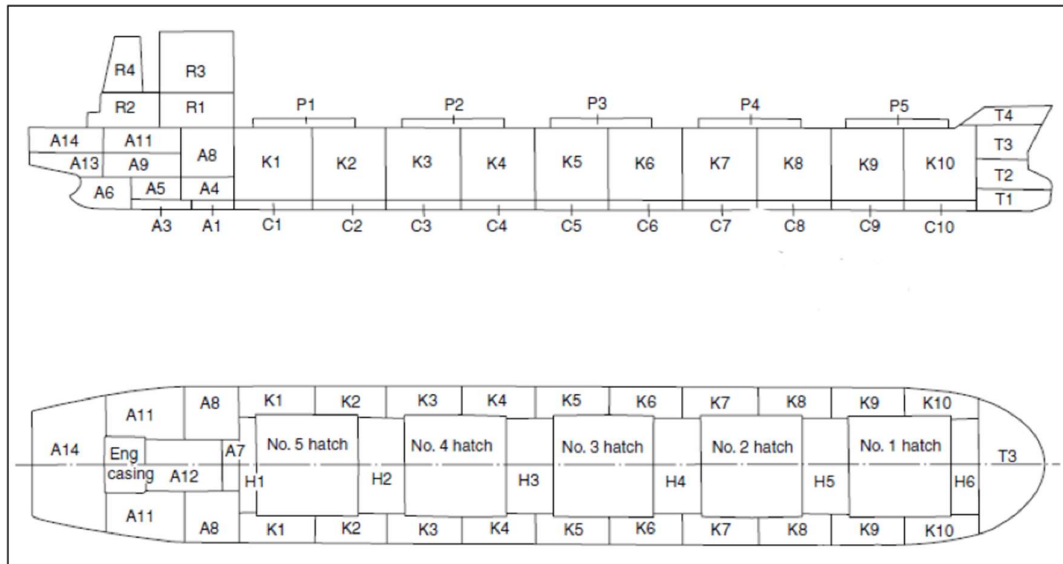
Pienosakokonaisuudet ovat mitoiltaan usein alle 2x5 m ja painoltaan alle 2000 kg. Pienosakoonnissa yhdistetään usein samoja elementtejä toisiinsa – esimerkiksi teräslevyistä voidaan koota suuria teräspaneelleja. Suurosakoonnissa yhdistetään pienosakokonaisuuksia. Teräspaneelit voidaan yhdistää esimerkiksi kansi-, laidoitus- tai laipiokerroksiksi. Kerrokseen kiinnitetään kulmalevyjä ja palkkeja kestävyys takaamiseksi. Suurosakokonaisuudet voivat olla mitoiltaan jopa 12x12 m ja painoltaan 20 000 kg. [1, s. 151] [2, s. 50–59]

3.2.2 Yksikkökoonti

Yksikkökoonnissa kaksiulotteiset osakokonaisuudet yhdistetään kolmiulotteisiksi yksiköiksi. Rungon suunnitteluvaiheessa on määriteltävä haluttujen yksiköiden mitat ja painorajat. Rajoissa on otettu huomioon telakan mitat ja kaluston nostokapasiteetti. Yksiköt sisältävät jo useita tukirakenteita, mutta ovat usein vielä avonaisia. Hitsaustyön helpottamiseksi yksiköt käännetään koonnin aikana. [1, s. 151–152]

3.2.3 Lohkokoonti

Lohko koostuu kahdesta tai useammasta yksiköstä. Lohkot ovat usein umpinaisia, ja niiden koko ja muoto vaihtelee rungon koon ja muodon mukaan. Lisäksi lohkojen sijainti vaikuttaa niiden rakenteen monimutkaisuuteen. Lohkoja erottavat toisistaan laipio- ja kansilevyt. Kokoonpanon helpottamiseksi lohkot on merkitty tunnisteilla. Merkintätapoja on monenlaisia, mutta usein identtisillä tai lähes identtisillä lohkoilla on tunnisteissaan yhteinen osa. Kuvassa 12 tunnisteina on käytetty kirjain-numerokodeja ja rungon keskiosan yhtenäisiä lohkoja kuvataan kirjaimella K. [1, s. 149–152]



Kuva 12: Esimerkki rungon lohkojaosta [1, s. 157]

Yksittäisen lohkon rakentamisen ensimmäinen vaihe on kansien kohdistaminen oikeisiin ulottuvuuksiin. Tämän jälkeen kansien välille asennetaan pitkittäisjäykistäjät, jotka jäykistävät ja vakauttavat runkoa pituussuunnassa. Lohkolinjastolla kokonaisuuteen kiinnitetään poikittaisjäykistäjät, laipiot ja pienosat. Kun rakenteet on liitetty lohkoon, on aika asentaa leikatut ja muotoillut teräslevyt laidoiksi. Osien kiinnittäminen tapahtuu hitsaamalla ja osien käsittelyssä käytetään apuna nosturia. Kokoamista edesauttavat ohjainrakenteet, laserkohdistus ja pienilämpötilaiset hitsaustekniikat. Lohkot kootaan ylösalaisin varustuksen helpottamiseksi. [1, s. 154–158]

3.2.4 Suurlohkokoonti

Bock ja Linner tuovat vuonna 2015 julkaistussa artikkelissaan esille suurlohkojen käytön laivan rungon kokoonpanossa. Kun yksittäisiä lohkoja on rakennettu tarpeeksi, voidaan siirtyä suurlohkovaiheeseen, jossa lohkot yhdistetään suurlohkoiksi. Suurlohkot ovat yleensä 1–6:n kansivälin korkuisia ja koostuvat usein 5–10:stä lohkoista. Monet telakat eivät kokoa erillisiä suurlohkoja, vaan kokoavat rungon lohkoista. [11, s. 129]

Rungon keskiosan lohkot ja suurlohkot ovat rakenteeltaan suhteellisen yksinkertaisia ja yhtenäisiä, mutta pohja-, keula- ja perärakenteiden lohkot vaativat tarkkuutta ja soveltamista niiden kriittisyyden ja vaativien muotojen vuoksi. Kuvan 12 mallitapauksesta nähdään, miten lohkoja on sovitettu tukemaan pohjan, keulan ja perän muotoja. Esimerkiksi lohkot T1 ja T2 muodostavat bulbikeulan. [2, s. 61–63 & 66–74]

3.2.5 Runkokoonti

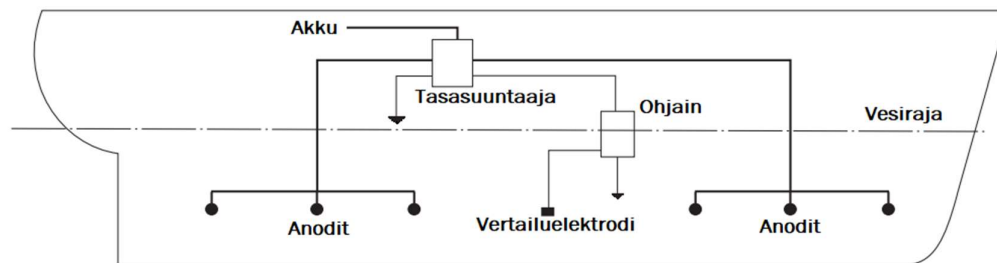
Rungonkoonti tapahtuu usein telakan altaalla, josta vesi on pumpattu pois. Valmiit suurlohkot nostetaan altaaseen ja kohdistetaan käyttäen optisia työkaluja, jonka jälkeen ne yhdistetään toisiinsa hitsaamalla. Koonti alkaa kölin laskulla. Tämän ensimmäisen suurlohkon ympärille aloitetaan rakentamaan pyramidimaisesti laivan runkoa. Vaihtoehtoisesti suurlohkovaihe ohitetaan ja runko kootaan yksittäisistä lohkoista. Rungonkoontia valvotaan ihmisvoimin, mutta myös automaattisten tarkkailujärjestelmien käyttöönottoa on ehdotettu. [1, s. 158] [27]

Kaikilla telakoilla ei kuitenkaan ole satama-allasta. Eyres ja Bruce tuovat esille [1, s. 158–159], että rungonkoonti voi vaihtoehtoisesti tapahtua veden pinnalla kontrolloidussa ympäristössä. Kelluvat suurlohkot vedetään kiinni toisiinsa käyttäen köysistöjä ja kohdistetaan hydraulisilla sylintereillä. On myös yleistä, että suurlohkot kiinnitetään toisiinsa osittain vedenpinnalla, jonka jälkeen runko voidaan nostaa telakalle yhtenä kappaleena ja hitsaus viimeistellä. Toinen menetelmä on käyttää arkkupatoa (engl. *cofferdam*), joka on liikutettava vesitiivis rakennelma. Arkkupato asetetaan rungon ympärille, jonka jälkeen vesi pumpataan padon sisältä pois ja hitsaus voidaan suorittaa. Toimenpiteen jälkeen padon sulut avataan ja vesi nostaa aluksen pinnalle.

3.3 Rungon suojaus ja viimeistely

Metalleilla on taipumus reagoida ympäristönsä kanssa. Tämä reagointi johtaa usein korroosiotuotteiden, kuten ruosteen, syntymiseen. Korroosio vaikuttaa laivan runkoon eri muodoissa sekä sen tuotannon että käytön aikana. Tuotannossa runkoon vaikuttaa lähinnä ilmastollinen korroosio, joka on kriittisimmillään ilmankosteuden ollessa yli 70 %. Rungon ollessa vesillä siihen vaikuttaa upotuksesta aiheutuva galvaaninen korroosio. Galvaanista korroosiota tapahtuu eri potentiaalisten metallien välillä, kun ne on upotettu samaan elektrolyyttiin. [1, s. 328] [2, s. 5]

Kokoonpanon jälkeen yhtenäinen runko suojataan korroosiolta kiinnittymisenesto- ja suojavalmisteilla tai myrkkymaaleilla. Nykypäivänä on yleistynyt myös ulkoiseen virtalähteeseen perustuva katodinen suojausjärjestelmä (engl. *impressed current cathodic protection, ICCP*). Runkoon asennettujen anodien ja ohjauspaneelien kytkettyjen vertailuelektrodien avulla järjestelmä tuottaa sähkökentän, joka on tarpeeksi voimakas tukahduttamaan määrän rungon pinnalla muutoin tapahtuvan luonnollisen sähkökemiallisen reaktion. Järjestelmä siis estää galvaanisen korroosion syntymistä levyjen pinnoille. ICCP-järjestelmän rakennetta esitellään kuvassa 13. [1, s. 334]



Kuva 13: ICCP-järjestelmä [1, s. 335]

Suojauksen jälkeen runkorakenne on täysin valmis ja aluksen varustusta ja kalustoa viimeistellään. Runkoon asennetaan esimerkiksi putkisto- ja sähköjärjestelmiä. Kun tarpeellinen varustus on asennettu, alus voidaan laskea vesille.

3.4 Säädökset, lait ja rajoitteet

Laivanrakennukseen liittyy monia säädöksiä, jotka varmistavat aluksen rakenteellisen kestävyys ja turvallisuuden sekä tuotannon, että koko toimintaiän ajan. Useat säädöksistä ovat kansainvälisiä, mutta usein valmistajamailla on myös omia laivanrakennukseen liittyviä lakeja. Aluksen ominaisuuksia ja päämittoja rajoittaa myös sen toimintaympäristö. [1, s. 38]

3.4.1 Luokituslaitosten laivasäännöstöt

Kansainvälinen luokituslaitosten järjestö (engl. *International Association of Classification Societies, IACS*) on tekninen kansalaisjärjestö, johon kuuluu 13 luokituslaitosta. Jäsenet ovat pääosin eurooppalaisia, mutta mukana on myös amerikkalaisia ja aasialaisia luokituslaitoksia. Luokituslaitosten tehtävä on antaa aluksille luokitus, joka määrittää aluksen turvallisuuden ja merikelpoisuuden. Luokituslaitokset perustavat luokituksensa omaan laivasäännöstöönsä, joka pohjautuu IACS:n asettamiin sääntöihin. Pääsääntöisesti luokituslaitosten säännöstöt ovat hyvin samanlaisia. Lloyd's Register Group on alusten luokituslaitos, riskienhallintaorganisaatio ja IACS:n jäsen. Lloyd'sin laivasäännöstö pohjautuu vahvasti IACS:n säännöksiin ja kattaa turvallisuusohjeistuksen lukuisille rahti-, sota- ja yksityisaluksille. [1, s. 37–39] [12]

Runkotuotannossa tulee siis seurata Lloyd'sin tai jonkin toisen luokituslaitoksen laivasäännöstön määrittämiä rakennussäädöksiä, rakennemateriaaleja ja rakennevaatimuksia. Runkotuotanto tulee lisäksi toteuttaa IACS:n suositusten nro. 47 mukaisesti. Kyseinen suositus varmistaa runkorakenteen kestävyys. Suositus takaa myös henkilöstön ammattitaidon ja antaa ehdot teräslevyjen ja -rakenteiden pinnan kunnolle, valittaville materiaaleille ja kokoonpanolle. Suositus sisältää taulukoita, jotka määrittävät teräslevyjen ja -rakenteiden sallitut kohdistamiskulmat ja -tavat. [1, s. 38–39] [13]

Merkittävimpiä sääntöjä, jotka löytyvät sekä IACS:n että Lloyd'sin laivasäännöstoista:

- Teräslevyjen ja rakenteiden tulee olla asianmukaisesti valmisteltu, eivätkä ne saa sisältää lovia, koloja tai halkeamia (Lloyd's Ch 12, Sec 1/2.1).
- Kaikkien levyjen vapaat kulmat tulee pyöristää (Lloyd's Ch 12, Sec 1/2.1).
- Levyjä muotoillessa taivutussäde ei saa olla pienempi kuin teräslevyn paksuus kerrottuna kahdella (Lloyd's Ch. 12, Sec 1/3.3).
- Lämpötaivutuksessa lämpötilan tulee olla välillä 28–650 °C. Jos kriittiset lämpötilat ohitetaan, tulee levyille suorittaa mekaanisia testejä, jotka varmistavat, ettei se ole vaurioitunut ali- tai yllälämmöstä (Lloyd's Ch 12, Sec 1/4.1).
- Levyjä nostaessa tai kiinnittäessä ei saa käyttää liiallista voimaa, joka voisi aiheuttaa rakenteisiin epämuodostumia (Lloyd's Ch 12, Sec 1/5.1).
- Kokoonpanovaiheessa tulee noudattaa IACS:n suosituksen nro. 47 taulukoiden asettamia ehtoja rakenteiden kohdistamiselle (Lloyd's Ch 12, Sec 1/5.1).
- Hitsaajien tulee olla luokituslaitoksen tai kansallisten standardien mukaan ammattitaitoisia (Lloyd's Ch 12, Sec 2/1.3).

Sääntöjen noudattaminen on välttämätöntä, jos alus haluaa luokitustodistuksen. Ilman luokitustodistusta alusta ei voida rekisteröidä, joka vaikeuttaa sen liikennöintiä ja estää omistajaa saamasta vakuutusta. Kaikki muutokset laivan runkoon tuotannon aikana ja sen jälkeen täytyy etukäteen hyväksyttää luokituslaitoksella. [13, s. 3] [14, s. 557]

3.4.2 Kokorajoitukset

Suuri runko on rahtilaivoissa optimaalinen, sillä se on vetoisuudeltaan suurempi ja säänkestävämpi. Toisaalta rungon mitat eivät saa rajoittaa aluksen liikkumista. Runkorakenteen kokoa rajoittaa laivan toimintaympäristö, reitti ja operointitarkoitus. [1, s. 4–5]

Kanavat eli keinotekoiset vesiuomat nopeuttavat rahtiliikenteen kulkemista ympäri maailmaa ja ovat elintärkeitä maailmanlaajuiselle kaupankäynnille. Päästäkseen niistä läpi alusten tulee täyttää tietyt mittarajoitukset. Panamax-kokoluokka osoittaa maksimimittasuhteet niille aluksille, joiden reitti kulkee Panaman kanavan läpi. Mittasuhteet on määritelty kanavan kapeimman sulun mukaan. Kanavaa on lähivuosina laajennettu, ja sen myötä on syntynyt uusi kokoluokka. New Panamax -

kokoluokan alukset ovat mittasuhteiltaan n. 25 % suuremmat. Taulukossa 1 on vertailu Panamax- ja New Panamax -mittasuhteita. [1, s. 15]

Taulukko 1 [1, s. 15] Panamax ja New Panamax -mittasuhteet:

	Panamax	New Panamax
Pituus (m)	294.13	366
Leveys (m)	32.81	49
Kulkusyvyys (m)	12.04	15.2

Muita kokoluokkia ovat esimerkiksi Aframax, Chinamax, Handymax, Suezmax ja Q-Max. Suomalaista rahtiliikennettä rajoittaa Tanskan salmista aiheutuva Baltimax-kokoluokka. Baltimax määrittää alusten pituudeksi 240–260 metriä, leveydeksi 42–48 metriä ja syvyydeksi 15 metriä. [14, s. 389]

4 NykYTEknologian sovellukset runkotuotantoprosessissa

Teknologian kehitys avaa uusia vaihtoehtoja ja mahdollisuuksia monille toimialoille, kuten laivanrakennusteollisuudelle. Stanić, Hadjina, Fafandjel ja Matulja esittävät vuonna 2018 julkaistussa artikkelissaan nykyisen laivanrakennuksen kriittisimmät kehitysalueet:

- Tuotantotehokkuus
- Kustannustehokkuus
- Energiansäästö
- Turvallisuus

Artikkeli käsittelee teollisuuden neljännen vallankumouksen – Industry 4.0:n – saapumista laivateollisuuteen. Industry 4.0 tuo mukanaan muun muassa robotiikkaa, virtuaalitodellisuutta, 3D-suunnittelua sekä Big data ja Internet of Things -järjestelmiä. Kokonaisuudessaan laivanrakennuksesta on tulossa digitaalisempi ja joustavampi kuin koskaan ennen. [15]

Tämä luku käsittelee automatisaatiota, 3D-mallinnusta ja tehostettua todellisuutta runkotuotannon ja laivatekniikan näkökulmasta. Luvussa toistuvana teemana on hitsausjärjestelmien optimointi.

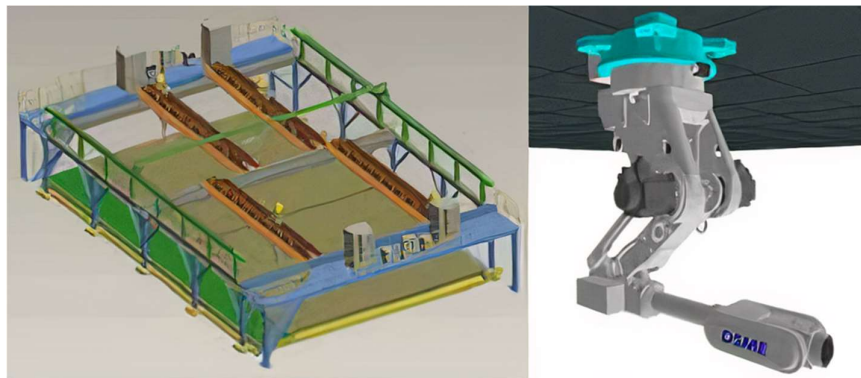
4.1 Automatisaatio

Robotiikan kehitys on vahvasti kytköksissä sensoritekniikan ja ohjaustoimintojen kehitykseen [16, s. 48]. Kyseisten teknologioiden ansiosta nykyaikaiset robotit omaavat keinotekoiset aistit, joiden avulla ne kykenevät työskentelemään lähes autonomisesti. Robotit sopeutuvat siis ympäristöön ja tilanteeseen tekemällä automaattisia säädöksiä liikerataansa ja toimintaansa. Laivanrakennuksessa käytetään pääasiallisesti kahta robottityyppiä: pieniä, helposti siirrettäviä robotteja sekä portaalirobotteja (engl. *gantry robot*). Portaaliroboteilla tarkoitetaan lineaarisesti kehikoissa liikkuvia robotteja. [1, s. 144–145]

Lähes kaikki runkotuotantoprosessin vaiheet voidaan automatisoida täysin tai ainakin osittain. Robotteja käytetään sekä tehokkuuden että turvallisuuden lisäämiseksi [16, s. 49]. Yleisimmin robotteja käytetään vaativiin ja riskialttiisiin työtehtäviin, kuten teräsrakenteiden leikkaukseen, muotoiluun ja hitsaamiseen. Robotiikkaa käytetään hyväksi myös esimerkiksi maalaamisessa ja levyjen nostamisessa. Toimenpiteet ovat hyvin suoraviivaisia ja itseään toistavia, jolloin vaadittavat parametrit voidaan syöttää järjestelmään etukäteen tietokoneen kautta. Suurilla telakoilla on pitkiä automatisoituja tuotantolinjoja, joissa robotit tekevät

vuorotellen toimenpiteensä ja siirtävät rakenneosat eteenpäin seuraavaa toimenpidettä varten. Mitä pidemmälle tuotantoprosessissa mennään, sitä vähemmän robotiikkaa käytetään hyödyksi [17, s. 479]. Tämä johtuu rakenteiden mittojen kasvamisesta sekä toimenpiteiden monimutkaistumisesta. [1, s. 105–106]

Monet telakat ja telakkajärjestelmien toimittajat ovat keskittyneet hitsausrobottien suunnitteluun ja kehitykseen [1, s. 144]. Hitsauksen täysi automatisaatio olisi laivanrakennuksen kannalta hyvin merkittävä kehitysaskel, sillä rakenteiden kokoonpano on runkotuotannon työläin ja pisin vaihe. Vaihe vaatii monia kymmeniä hitsaajia ja toimitiloja eri paikoissa samaan aikaan. Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd (DSME) on kehittänyt automaattisia hitsausjärjestelmiä, joiden toiminta perustuu kappaleiden muodon ja asennon tunnistamiseen. Robotti koostuu manipulaattorista ja portaalirobotista. Manipulaattori on kiinni 21 x 13 x 5.1 m portaalirobotissa, jonka avulla se saavuttaa kaikki kuusi vapausastetta. Portaalirobotin tehtävä on siis liikuttaa manipulaattoria, joka suorittaa hitsaustyön. Kuva 14 havainnollistaa robotin rakennetta. [18]



Kuva 14: Portaalirobotti (vas.) ja manipulaattori (oik.) [18]

Global Marine Technology Trends 2030 -julkaisun mukaan robotit tekevät laivanrakennuksesta kustannustehokkaamman ja turvallisemman prosessin. Automatisaation avulla telakat pystyvät leikkaamaan palkkakulujaan sekä vähentämään työntekijöiden kuormitusta ja vaarantamista. Robotiikan ja tehokkuuden välillä on myös suora yhteys. Maailman tehokkaimmaksi nimetty Geojen telakka, joka valmistaa noin 30 alusta vuodessa, on automatisoinut 68 % sen tuotantoprosesseista. [16]

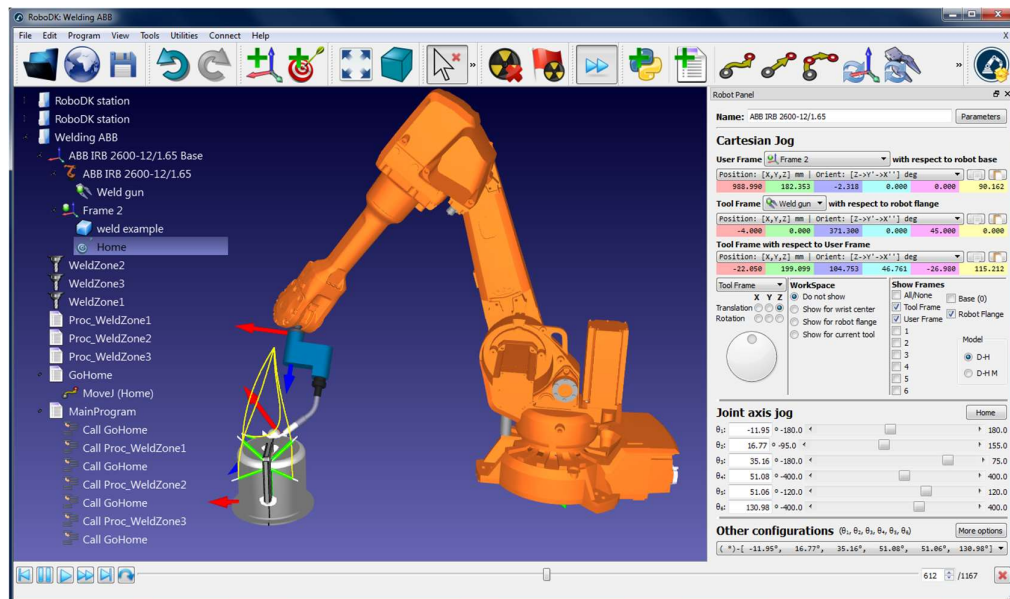
4.2 Tietokoneavusteinen suunnittelu ja lisäävä valmistus

Tietokoneavusteinen suunnittelu (engl. *Computer-aided Design, CAD*) on tietokoneohjelmien hyödyntämistä insinöörien suunnittelutyössä. CAD-ohjelmien käyttö laivanrakennuksessa on hyödyllistä; suunnittelu on helpompaa, halvempaa ja nopeampaa. CAD-ohjelmia käyttäen aluksesta voidaan luoda valmis 3D-malli ennen

rakentamisen aloittamista. Monet CAD-ohjelmat mahdollistavat myös simuloinnin, jonka avulla laivan tai laitteiston ominaisuuksia voidaan tarkastella etukäteen. [1, s. 146] [19]

CAD-ohjelmien toinen käyttötarkoitus on robottien konfigurointi. CAD-simulaatioiden avulla robottien liikeratoja ja toimintoja pystytään tarkastelemaan ja muokkaamaan yhteydettömästi eli ilman, että robotit joutuvat lopettamaan toimintansa. Tehtyjä muutoksia ja niiden vaikutuksia tarkastellaan virtuaalisella robottimallilla, ja vasta valmiit muutokset syötetään todelliseen robottiin. [17]

Alexander Zych tutkii vuoden 2021 artikkelissaan [17] hitsausrobottien yhteydetöntä CAD-pohjaista ohjelmointia (engl. *CAD-based Offline Programming*). Yhteydetöntä ohjelmointia ryhdyttiin kehittämään, kun ensimmäiset hitsausrobotit ottivat takaiskua puutteellisten ohjelmointimenetelmien vuoksi. Yhteydetön ohjelmointi on tehokkaampi vaihtoehto, mutta se vaatii paljon valmisteluja. CAD-ohjelmaan luodaan 3D-malli työsolusta, johon syötetään robotin reitit, liikeradat ja toiminnot. CAD-mallin konfigurointia voidaan nopeuttaa käyttämällä esimerkiksi valmiita liikeratamalleja ja törmäyksenestojärjestelmiä. Suurin osa hitsausrobottien ohjelmoinnista tapahtuu yhteydettömästi. Kuvassa 15 on esimerkki robotin yhteydettömästä ohjelmoinnista. Yhteydettömän ohjelmoinnin järjestelmät vaativat ammattitaitoista osaamista ja huoltoa, jonka vuoksi niitä käytetään lähinnä suurilla telakoilla. [20]



Kuva 15: Hitsausrobotin yhteydetöntä CAD-ohjelmointia [21]

Lisäävä valmistus (AM, *Additive manufacturing*) eli arkikielessä 3D-tulostus on toimenpide, jossa virtuaalisesta 3D CAD-mallista tuotetaan konkreettinen kappale. Lisäävä valmistus tuo mukanaan joustavuutta ja muunneltavuutta valmistusprosesseihin, joka mahdollistaa pienten sarjojen tai yksittäisten komponenttien nykyistä edullisemman valmistamisen. Laivatekniikan kohdalla lisäävä valmistus mahdollistaa esimerkiksi materiaalien yhdistämisen erilaisiksi komposiittirakenteiksi. Tämän lisäksi 3D-tulostamisen myötä tuotantoon on tulossa uusia mahdollisuuksia monimutkaisten rakenteiden valmistamiseen. Lisäävän valmistuksen yhdistäminen lähes automatisoituun tuotantoon tuo todennäköisesti mittavia taloudellisia vaikutuksia laivanrakennusteollisuudelle. [22]

4.3 Tehostettu todellisuus

Tehostettu todellisuus (engl. *Mixed Reality, MR*) koostuu virtuaalitodellisuudesta (engl. *Virtual Reality, VR*) ja lisätystä todellisuudesta (engl. *Augmented Reality, AR*).

Virtuaalitodellisuus on tietokonesimulaation tuottamien aistimusten avulla luotu keinotekoinen ympäristö. Useimmat virtuaalitodellisuudet perustuvat lähes kokonaan visuaaliseen vaikutelmaan, joka lähetetään yleensä tietokoneen näytölle tai VR-laseille. Laivan suunnittelun aikana rungosta tehdään 3D-malli, jonka perusteella lopullinen runko rakennetaan. VR:ää voidaan käyttää runkomallin osien ja rakenteiden tutkimiseen aidosta kuvakulmasta. Tarkastelun jälkeen mallia voidaan muokata hetkessä käyttäen CAD-ohjelmaa. VR-tarkastelu on tehokkaampaa kuin fyysisten prototyyppien tarkastelu, sillä prototyyppien muokkaamiseen voi kulua jopa useita päiviä. [23]

Lisätty todellisuus sisältää digitaalisia elementtejä ja dataa, joita voidaan lisätä reaali maailmaan esimerkiksi mobiililaitteilla. AR:n toiminta perustuu 3D-paikannukseen sekä reaali esineiden ja -asioiden tunnistamiseen. AR mahdollistaa suoraviivaisen yhteyden aluksella työskentelevien teknikoiden ja toimistoympäristössä olevien insinöörien välillä. Insinöörit ja tietokoneet voivat opastaa teknikkoa heijastamalla hänelle fyysisiin osiin liittyviä digitaalisia elementtejä. [24]

Wang, Cheng, Jiao, Johnson ja Zhang tekivät vuonna 2019 tutkimuksen [25] ihmisen ja robotin yhteistyöhön perustuvasta hitsausjärjestelmästä, jonka toteutuksessa käytettiin virtuaalitodellisuutta. Kyseisessä järjestelmässä käytettiin UR-5-robottia, joka kykenee itsenäiseen hitsaustyöhön. Teknikko seuraa työn etenemistä ja tarvittaessa ottaa ohjat virtuaalisen hitsausympäristön kautta. Virtuaaliympäristön käyttö suojaa teknikkoa vaaratekijöiltä, joita hitsaustyön aikana voi esiintyä. Järjestelmän rakenne on hyvin joustava, joten samanlaisia toteutuksia voitaisiin ottaa helposti käyttöön muissakin prosessivaiheissa.

Hitsaajat joutuvat käyttämään työssään paljon suojavarusteita, jotka vaikuttavat heidän näkyvyytensä. Antonelli ja Astanin ovat tutkineet vuoden 2015 artikkelissaan [26] AR:n hyödyntämistä manuaalisessa hitsauksessa. AR:n avulla hitsaajan näkyvyyttä voitaisiin parantaa korostamalla hänelle hitsausliitosten ja hitsauspistoolin sijainnit digitaalisesti. AR voisi lisäksi arvioida ja heijastaa liitosten laadun sekä ehdottaa liikesarjoja. Antonellin ja Astanin avustusjärjestelmän prototyyppi oli testatessa toiminut virheettömästi.

4.4 Teollinen internet ja sensoritekniikka

Yksi Industry 4.0:n merkittävimmistä edistäjistä on teollinen internet. Teollinen internet (engl. *Industrial Internet of Things, IIoT*) on teollisuuskäyttöisten laitteiden verkko. Teollinen internet perustuu teknisten laitteiden etäseurantaan ja -ohjaukseen sekä niiden automaattiseen tiedonsiirtoon internetin välityksellä. Fyysisiin laitteisiin tai kappaleisiin liitetään siis antureita ja sensoreita, joiden avulla ne pystyvät aistimaan ympäristöään, välittämään havaintojaan ja toimimaan tilanteen mukaisesti. [15] [29]

Runkorakenteeseen vaikuttavaa kuormitusta tarkastellaan ja valvotaan lasikuitusensoreilla. Sensorit mittaavat muun muassa rakenteen lämpötilaa, väsymistä ja paikallisia kuormituksia. Sensoreiden tuottama data auttaa rungon elinkaareen ja huoltotarpeen arvioinnissa. Sensoreiden keräämää dataa joudutaan vielä pääsääntöisesti purkamaan ja tutkitaan matkan jälkeen satamassa, mutta teollisen internetin myötä reaaliaikainen datansiirto on yleistymässä. IIoT:n ja sensoritekniikan hyödyntäminen johtaa turvallisempiin matkoihin sekä energiatehokkaampiin ja kestävämpiin runkoratkaisuihin. [30]

5 Yhteenveto

Kandidaatintyön tavoitteena oli antaa lukijalle yleisymmärrys laivan runkorakenteen tuotantoprosessista ja kuvata nykYTEknologian järjestelmien käyttötarkoituksia runkotuotannossa. Työ oli tarpeellinen, sillä runkotuotanto on kehittymässä nopeaa tahtia eikä suomalaisesta oppikirjallisuudesta löydy yleiskattavaa kuvausta prosessin tuotantomenetelmistä. Työn aineistona käytettiin pääsääntöisesti viimeisen 10 vuoden aikana julkaistuja oppikirjoja, tieteellisiä artikkeleita ja luokituslaitosten julkaisuja.

Työssä käytiin aluksi läpi runkorakenteeseen liittyvää teoriaa, jotta lukijalle muodostuisi kuva runkotuotannon tavoitteista ja haasteista. Laivan runko on teräslevyistä ja -rakenteista koostuva vesitiivis tukirakenne, joka pitää aluksen pinnalla ja suojaa sitä vahinkotekijöiltä. Aluksen operointitarkoitus, kuljetustehtävä ja olosuhteet määrittävät rungon muodot ja ominaisuudet – käytännöllisesti katsoen jokainen runkorakenne on uniikki.

Teoriaosuuden jälkeen rungon tuotantoprosessin oleelliset vaiheet käytiin läpi kronologisessa järjestyksessä. Karkeasti katsottuna runkotuotantoprosessi koostuu rakennekomponenttien käsittelystä ja rungon kokoonpanosta. Tehtaalta saapuneet teräslevyt ja -rakenteet suoritetaan ja suojataan, jonka jälkeen ne leikataan oikeisiin mittoihin käyttäen poltto-, plasma-, laser- tai vesisuihkuleikkausta. Tämän jälkeen rakennekomponentteja käyristetään ja taivutetaan, jotta runkokokonaisuus saa energiatehokkaan muodon. Valmiit rakennekomponentit liitetään toisiinsa hitsaamalla. Rakennekomponenteista ja näiden yhdistelmästä tulee lopulta suuria lohkoja, jotka voidaan yhdistää rungoksi. Kokoonpanon jälkeen runko suojataan käyttäen myrkkymaaleja tai sähköisiä järjestelmiä.

Työn lopussa perehdyttiin laivanrakennusteollisuuden digitaaliseen vallankumoukseen runkotuotannon näkökulmasta. Runkotuotannon merkittävimpiä nykyaikaisia teknologioita olivat automatisaatio, tietokoneavusteinen suunnittelu, tehostettu todellisuus ja teollinen internet. Parhaimmillaan kaikki nämä teknologiat voidaan yhdistää yhdeksi järjestelmäkokonaisuudeksi – tietokoneavusteisella suunnittelulla voidaan valmistaa robotteja, joiden työskentelyä voidaan valvoa ja etäohjata virtuaalisesti.

Runko on vaativa tuote, jonka tuotanto vaatii runsaasti ammattitaitoista työvoimaa ja kalustoa. NykYTEknologian sovellusten myötä runkotuotannosta on tullut tehokkaampi, joustavampi ja turvallisempi prosessi. Automatisaation ja digitalisaation voimin on mahdollista viedä maailman suurimman kuljetusalan tuotanto entistä korkeammalle tasolle tulevaisuudessa.

Viitteet

1. Eyres, D & Bruce, G. Ship Construction. 7th edition. 2012. Elsevier. 363 s. ISBN 978-0750680707
2. Mandal, N. Ship Construction and Welding. Vol 2. 2016. Department of Ocean Engineering and Naval Architecture Indian Institute of Technology Kharagpur. Springer, Singapore. 314 s. ISBN 978-981-10-2953-0
3. Molland, A & Turnock, S & Hudson, D. Ship Resistance and Propulsion. Cambridge University. 2011. 537 s. ISBN 978-0-521-76052-2.
4. Storch, R; Hammon, C; Bunch, H & Moore, R. Ship Production, 2nd edition. 1995. Cornell Maritime Press. 435 s. ISBN 0-87033-461
5. Hadjina, M; Fafandjel, N & Matulja, T. Shipbuilding production process design methodology using computer simulation. 2015. Brodogradnja, Vol 66, Pages 77-91. Saatavissa:
https://www.researchgate.net/publication/288183926_Shipbuilding_production_process_design_methodology_using_computer_simulation
6. Oxyfuel cutting – process and fuel gases. twiglobal.com. [Kuvälähde]. [Viitattu 26.06.2021] Saatavissa: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/oxyfuel-cutting-process-and-fuel-gases-049>
7. Plasmaleikkaus. ionix.fi. [Kuvälähde]. [Viitattu 28.06.2021] Saatavissa: <https://www.ionix.fi/fi/teknologiat/plasmatyosto/plasmaleikkaus/>
8. The First look at Laser Cutting and Engraving - 2020 guide. treatstock.fr. [Kuvälähde]. [Viitattu 28.06.2021] Saatavissa: <https://www.treatstock.fr/guide/article/149-the-first-look-at-laser-cutting-and-engraving-2020-guide>
9. Moravčíková, J; Delgado, D; Košťál P & Daynier, R. Analysis of the surface morphology of the S235JRG1 steel after an abrasive water jet cutting process. 2018. Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology. Saatavissa: <https://sciendo.com/article/10.2478/rput-2018-0014>
10. How We Build the Arctic and Offshore Patrol Ships. shipsforcanada.ca. [Kuvälähde] 20.9.2016. [Viitattu 11.08.2021] Saatavissa: <https://shipsforcanada.ca/our-stories/how-we-build-ships>
11. Bock, T & Linner, T. Robot-oriented design: Design and management tools for the deployment of automation and robotics in construction. 2015. Cambridge

- University Press. ISBN 9781107076389. Saatavissa:
[https://www.researchgate.net/publication/290531717 Robot-oriented design Design and management tools for the deployment of automation and robotics in construction](https://www.researchgate.net/publication/290531717_Robot-oriented_design_Design_and_management_tools_for_the_deployment_of_automation_and_robotics_in_construction)
12. Lloyd's Register. Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, Technical Background Rule Reference. 2014. Lloyd's Register Group Limited.
13. IACS. No.47 Shipbuilding and Repair Quality Standard. Rev 5. 2010. Saatavissa:
<https://www.iacs.org.uk/download/5863>
14. Wijnolst, N & Wergelan, T. Shipping innovation. 2009. IOS Press, Amsterdam. 832 s. ISBN 978-1-58603-943-1
15. Stanić, V; Hadjina, M; Fafandjel, N & Matulja, T. Toward shipbuilding 4.0 – An Industry 4.0 changing the face of the shipbuilding industry. 2018. Brodogradnja, Vol 69, Pages 111-128. Saatavissa:
[https://www.researchgate.net/publication/325715397 Toward shipbuilding 40-an industry 40 changing the face of the shipbuilding industry](https://www.researchgate.net/publication/325715397_Toward_shipbuilding_40-an_industry_40_changing_the_face_of_the_shipbuilding_industry)
16. Lloyd's Register Group Limited. QinetiQ and University of Southampton. 2015. Global Marine Technology Trends 2030. Saatavissa:
<https://www.lr.org/en/insights/global-marine-trends-2030/global-marine-technology-trends-2030/>
17. Zych, A. Programming of Welding Robots in Shipbuilding. 2021. Procedia CIRP, Vol 99, Pages 478-483. Elsevier.
 Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.107>
18. Kang, S; Youn, H; Kim, D; Kim, K; Lee, S; Kim, S.Y & Kim, S.H. Development of multi welding robot system for sub assembly in shipbuilding. 2008. IFAC Proceedings Volumes, Vol 41, Issue 2, Pages 5273-5278. The International Federation of Automatic Control, Seoul. Saatavissa: <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.00885>
19. Perez, R. The latest advantages in shipbuilding CAD systems. 2016. Sener Marine. Saatavissa: <https://www.marine.sener/papers/the-latest-advantages-in-shipbuilding-cad-systems>
20. Ferreira, L; Figueira, L; Iglesias, F & Souto, M. Offline CAD-based robot programming and welding parametrization of a flexible and adaptive robotic cell using enriched CAD/CAM system for shipbuilding. 2017. Procedia Manufacturing, Vol 11, Pages 215-223. Elsevier.
 Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.228>

21. Montaqim, A. Offline programming software for industrial robots from RoboDK offers hundreds of virtual industrial robots from top robotics companies. roboticsandautomationnews.com. [Kuvallähde] 14.07.2015. [Viitattu 16.08.2021] Saatavissa: <https://roboticsandautomationnews.com/2015/07/14/offline-programming-software-robodk-offers-hundreds-of-virtual-industrial-robots-from-top-robotics-companies/540/>
22. Javaid, M; Haleem, A; Singh, R; Suman, R & Rab, S. Role of Additive Manufacturing applications towards environmental sustainability. 2021. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.07.005>.
23. Fernández, R & Alonso, V. Virtual Reality in a shipbuilding environment. 2014. Advances in Engineering Software, Vol 81, Pages 30-40. Elsevier. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.11.001>
24. Vargas, D; Vijayan, K & Mork, O. Augmented Reality for Future Research Opportunities and Challenges in the Shipbuilding Industry: A Literature Review. 2020. Procedia Manufacturing, Vol 45, Pages 497-503. Elsevier. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.063>
25. Wang, Q; Cheng, Y; Jiao, W; Johnson, M & Zhang, Y. Virtual reality human-robot collaborative welding: A case study of weaving gas tungsten arc welding. 2019. Journal of Manufacturing Processes, Vol 48, Pages 210-217. Elsevier. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.10.016>
26. Antonelli, D & Astanin, S. Enhancing the Quality of Manual Spot Welding through Augmented Reality Assisted Guidance. 2015. Procedia CIRP, Vol 33, Pages 556-561. Elsevier. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.076>
27. Kim, M; Choi, W; Kim, B; Kim, H; Seol, J; Woo, J & Ko, K. A vision-based system for monitoring block assembly in shipbuilding. 2014. Computer-Aided Design, Vol 59, Pages 98-108. Elsevier. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.09.001>
28. Shin, J; Oh, S; Park, S; Park, H & Lee, J. Improved underwater laser cutting of thick steel plates through initial oblique cutting. 2021. Optics & Laser Technology, Vol 141. Elsevier. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107120>
29. Hiekata, K; Wanaka, S; Mitsuyuki, T; Ueno, R; Wada, R & Moser, B. Systems analysis for deployment of internet of things (IoT) in the maritime industry. 2020. Journal of Marine Science and Technology, Vol 26, Pages 459-469. Springer. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s00773-020-00750-5>
30. Guide for hull condition monitoring systems. 2020. American Bureau of Shipping. Saatavissa: <https://standards.globalspec.com/std/14306195/73>