

Merikuljetusten kehittäminen tekoälyn avulla

Toimitusketjujen johtaminen
Kandidatutkielma

Laatija:
Oskari Lepistö

Ohjaaja:
KTT Harri Lorentz

10.5.2025
Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidutkielma

Oppiaine: Toimitusketjujen johtaminen

Tekijä: Oskari Lepistö

Otsikko: Merikuljetusten kehittäminen tekoälyn avulla

Ohjaaja: KTT Harri Lorentz

Sivumäärä: 38 sivua

Päivämäärä: 10.5.2025

Tässä tutkielmassa tarkastellaan tekoälysovellusten tarjoamia mahdollisuuksia ja hyötyjä merikuljetusten kontekstissa riskejä unohtamatta. Merikuljetukset ovat keskeinen osa globaalia toimitusketjua ja vastuussa merkittävästä osasta kansainvälistä kauppaa. Globaalin kaupankäynnin ja kuljetustarpeiden lisääntyessä merikuljetusten merkitys kasvaa entisestään. Lisääntyneiden kuljetusmäärien vuoksi merikuljetusten kehittämisellä on jatkuva tarve. Tähän tarpeeseen pyritään vastaamaan teknologian ja tekoälyn keinoin. Tutkielman tavoitteena on selvittää, minkälaisia mahdollisuuksia tekoälysovellukset tarjoavat merikuljetusten kehittämisen osa-alueilla ja toisaalta, minkälaisia vaatimuksia tekoälyn hyödyntämiseen liittyy.

Turvallisuus, energiatehokkuus, reittioptimointi sekä satamalogistiikka ovat keskeisiä osa-alueita, joiden kehittämisellä on suuri tarve ja samalla tärkeä merkitys. Näillä osa-alueilla tekoälyn hyödyntäminen on jo nykyisinkin mahdollista. Samaan aikaan on kuitenkin tunnistettava tekoälyn rajoitteet sekä sen käytön mukanaan tuomat riskit ja mahdolliset haitat. Tulevaisuudessa on tärkeää, että globaalit ja alueelliset merenkulkuviranomaiset hallinnollisen yhtenäistämisen edistämiseksi.

Tutkielma keskittyy globaaleihin meriteitse toimitettaviin rahtikuljetuksiin ja satamalogistiikkaan sekä niiden integraatioihin. Tutkielma pyrkii luomaan kattavan kuvan merikuljetusten monimutkaisesta ja muuttuvasta kentästä sekä esittelemään selkeitä ratkaisuja merikuljetusten kehittämiseksi.

Avainsanat: Merikuljetukset, Tekoäly, Satamalogistiikka, Koneoppiminen, Reittioptimointi, Energiatehokkuus, Älysatama, Autonomiset alukset

SISÄLLYS

1	Johdanto	6
2	Tekoälyn ominaisuudet ja hyödyntäminen	9
	2.1 Tekoälyn määritelmä	9
	2.2 Kehitys	10
	2.3 Tekoälyn alatasot	11
	2.4 Tekoälyn käytön haasteet	12
3	Merikuljetusten kehittäminen	13
	3.1 Merikuljetusten kehityskulku	13
	3.2 Aluksen suunnittelun vaikutus energiatehokkuuteen	14
	3.3 Reittioptimointi ja navigointi	14
	3.4 Satamalogistiikan kehittäminen	16
	3.5 Merikuljetusten turvallisuuden kehittäminen	17
	3.6 Ympäristöystävällisyys ja energiatehokkuus	18
4	Merikuljetusten kehittäminen tekoälyn avulla	20
	4.1 Navigointi ja kuljetusreittien optimointi	20
	4.1.1 Tekoälyyn ja autonomiaan perustuva reittioptimointi	20
	4.1.2 Säätöjärjestelmä	21
	4.1.3 Reittioptimoinnin mahdollistavat teknologiat	21
	4.2 Alusten energiatehokkuus	22
	4.3 Kuljetusten turvallisuus ja autonomiset alukset	24
	4.4 Satamalogistiikka	27
5	Yhteenveto ja johtopäätökset	30
	Lähteet	33
	Kirjallisuuslähteet	38

1 Johdanto

Merikuljetukset vastaavat nykyään noin 90 % maailmankaupan volyymista, sillä se on kustannustehokkain kuljetusmuoto pitkillä etäisyyksillä. Maailmantalouden jatkuvan kasvun myötä kansainvälisen kaupan määrä on kasvanut voimakkaasti, mikä on johtanut alusten kapasiteetin, koon ja kulkunopeuden nopeaan kasvuun. (X. Zhang ym., 2022.) Teknologinen kehitys alusten suunnittelussa ja rakentamisessa sekä siitä seuranneet suurempien alusten mittakaavaedut ovat alentaneet kaupan ja kuljetuksen kustannuksia edistäen näin kansainvälistä kauppaa erityisesti kehitysmaiden osalta. Näin ollen rahdin kuljettamisesta pitkiä matkoja on tullut edullisempää. Itse asiassa maantieteellisellä etäisyydellä on nykyään huomattavasti vähäisempi merkitys maiden välisen kaupan määrittäjänä ja se on kauppamalleissa korvautumassa käsitteellä taloudellinen etäisyys, jota kuvastavat merirahdit eli kuljetuskustannukset. (Haralambides, 2019.)

Merikuljetukset ovat tärkeä osa liikennejärjestelmää ja merenkulkuala on sitoutunut kehittämään energiatehokkuutta, alusten älyteknologiaa ja navigoinnin turvallisuutta (H. Chen ym., 2025). Allied Market Research:n (2023) tuottaman tutkimuksen mukaan meriliikenteen rahtikuljetusten markkinoiden koko oli \$371,8 miljardia vuonna 2023 ja markkinan ennustetaan saavuttavan \$552,1 miljardia dollaria vuoteen 2033 mennessä. Lukuja voidaan verrata esimerkiksi Suomen bruttokansantuotteeseen, joka oli \$295,5 miljardia vuonna 2023 (Tilastokeskus, 2025).

Tekoälyn nopea kehitys tarjoaa ennennäkemättömiä mahdollisuuksia parantaa eri teollisuuden alojen mukaan lukien kuljetussektorin suorituskykyä. Tekoälynovaatiot sisältävät pitkälle kehittyneitä laskentamenetelmiä, jotka mukailevat ihmisaivojen toimintaa. Kuljetusalalla tekoälyä hyödyntämällä pyritään ratkaisemaan haasteita, jotka liittyvät kuljetustarpeiden kasvuun, hiilidioksidipäästöihin, turvallisuusongelmiin sekä ympäristön pilaantumiseen. Koska digitaaliaikana on saatavilla valtava määrä kvantitatiivista ja kvalitatiivista dataa sekä tekoälyteknologiaa, näiden ongelmien tehokkaasta ratkaisemisesta on tullut entistä helpompaa. (Abduljabbar ym., 2019.) Muun muassa Pagano ym. (2022) yhtyvät tähän näkemykseen ja arvioivat, että 5G, esineiden internet (IoT), lohkoketjuteknologia sekä tekoäly ja koneoppiminen ovat keskeisiä mahdollistavia teknologioita merilogistiikan alalla.

Kun otetaan huomioon merikuljetusten merkittävä rooli toimitusketjuissa niin kustannusten, ajankäytön, vastuullisuuden kuin riskienhallinnankin kannalta, on niiden kehittäminen sekä mielekästä että välttämätöntä. Uusien teknologioiden ja erityisesti tekoälypohjaisten sovellusten yleistymisen tarjoavat tähän aiheeseen ajankohtaisen näkökulman.

Alkuperäinen merikuljetusten murros alkoi ensimmäisen teollisen vallankumouksen myötä 1800-luvulla, kun koneellinen voima otettiin käyttöön ja aluksia alettiin kuljettaa höyryllä, kivihiiltä polttoaineena käyttäen. Seuraava vaihe, toinen teollinen vallankumous, alkoi 1900-luvun alussa dieselmoottorien keksimisen myötä, mikä teki aluksista tehokkaampia ja luotettavampia öljyn tullessa uudeksi polttoaineeksi. Kolmannen teollisen vallankumouksen, eli internetin ja digitaalisen vallankumouksen aikana 1970-luvulla, alusten tietokoneohjaus otettiin käyttöön. Nyt ollaan siirtymässä askeleen pidemmälle kohti uutta paradigmaa, joka liittyy kyberfyysisiin järjestelmiin ja autonomiaan osana "Shipping 4.0" -konseptia. (Rødseth, 2017). Tulevaisuus näyttää, tuleeko tekoälyn laajamittaisesta hyödyntämisestä uusi merkittävä kehitysaskel merikuljetusten historiassa. Näitä mahdollisuuksia ja haasteita tarkastellaan tässä tutkielmassa.

Tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksen muodossa. Työssä tarkastellaan merikuljetuksia globaalissa kontekstissa ja niiden kehittämistä erityisesti tekoälyn avulla. Tutkielmassa selvitetään tekoälyn hyödyntämisen keinoja merikuljetusten keskeisillä osa-alueilla. Tarkastelu keskittyy turvallisuuden, energiatehokkuuden, navigoinnin ja satamalogistiikan näkökulmiin. Tämä tutkielmarakenne on muotoutunut tieteellisten artikkelien perusteella.

Tutkielma käsittelee merikuljetuksia ja satamalogistiikkaa erityisesti tekoälyn näkökulmasta. Suurin painoarvo on luonnollisesti tieteellisessä tekstissä. Tutkimuksia liittyen merikuljetusten kehittämiseen löytyy paljon ja tekoölyyn liittyviä tutkimuksia on valtavasti. Näiden yhdistelmät ovat sen sijaan hieman harvinaisempia. Suoraan aiheeseen liittyviä tekstejä löytyi joitain kymmeniä.

Tutkielman tarkastelu on rajattu rahtikuljetuksiin eli ihmisten kuljettaminen jää tutkielman ulkopuolelle. Mitään alustyyppisiä varsinaisesti jätetty tarkastelun ulkopuolelle, sillä useimmat tutkielmassa esitetyt asiat ovat yleisluontoisia ja koskevat kaikkia alustyyppisiä. Tutkielma pyrkii vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin;

- Miten tekoölyä voidaan hyödyntää merikuljetusten kehittämisessä?
- Minkälaisia etuja tekoälyn käytöllä voidaan saavuttaa?

Tutkielma koostuu johdannosta ja neljästä pääluvusta. Toisessa luvussa tarkastellaan tekoölyä ilmiönä ja käydään läpi tekoälyn alalajeja sekä riskejä ja haasteita. Kolmannessa luvussa keskitytään merikuljetusten kehittämiseen yleisellä tasolla ja tarkastellaan, minkälaisilla merikuljetusten osa-alueilla kehitystä on mahdollista toteuttaa ja mitä se vaatii. Neljäs luku on tutkielman kannalta olennaisin, sillä siinä yhdistyy tekoälyn hyödyntäminen sekä merikuljetusten kehittäminen. Neljäs

luku tarjoaa vastauksia tutkimuskysymyksiin. Yhteenveto ja johtopäätökset -luku kokoaa tutkielman tulokset selkeäksi kokonaisuudeksi ja esittää tulosten perusteella keskeiset johtopäätökset.

2 Tekoälyn ominaisuudet ja hyödyntäminen

Tässä luvussa käydään läpi tekoälyn määritelmä sekä sen alalajeja ja sovelluksia, jotta tutkielman seuraavissa luvussa päästään käsittelemään tekoälyn hyödyntämistä merenkulun kontekstissa. Tämän luvun tarkoitus on vastata kysymykseen: mitä tekoäly on ja millaisia seikkoja sen hyödyntämiseen liittyy.

2.1 Tekoälyn määritelmä

Khang (2024) määrittelee tekoälyn sen tarkoituksen ja tavoitteen perusteella: ”Tekoälyn keskeinen tarkoitus on antaa koneille mahdollisuus käyttäytyä älykkäästi kuten ihminen, hyödyntämällä kehittyneitä algoritmeja ja laskennallisia malleja.” Tekoäly (AI) on teknologia, jonka avulla tietokoneet ja koneet voivat jäljitellä ihmismäistä oppimista, ymmärtämistä, ongelmanratkaisua, päätöksentekoa, luovuutta ja itsenäisyyttä. Tekoälyllä varustetut sovellukset ja laitteet voivat nähdä ja tunnistaa kohteita. Ne ymmärtävät ihmisen kieltä ja voivat vastata siihen. Ne voivat oppia uuden tiedon ja kokemusten avulla. Ne voivat antaa yksityiskohtaisia ohjeita käyttäjille ja asiantuntijoille sekä toimia itsenäisesti korvaten ihmisen älykkyyden tai toiminnan. (*What Is Artificial Intelligence (AI)*, 2024.) Tämä artikkeli laajensi määrittelyn tekoälyn ominaisuuksiin ja kykyihin.

Laajassa tekoälytutkimuksessaan Sheikh ym. (2023) tulevat tulokseen, että Euroopan komission määritelmä tekoälylle on paras: ”Tekoäly on järjestelmä, joka osoittaa älyllistä kyvykkyyttä analysoimalla ympäristöään ja tekemällä osittain itsenäisesti toimia pyrkien saavuttamaan tavoitteita.” Sen sijaan yksinkertaisen, mutta hieman ympärilyöreän määritelmän tarjoavat Abduljabbar ym., (2019): ”Tekoäly (AI) on laaja tietojenkäsittelytieteen osa-alue, joka saa koneet toimimaan ihmisen aivojen tavoin. Sitä käytetään sellaisten kysymysten ratkaisemiseen, joita on vaikea selvittää perinteisillä laskentatekniikoilla.” Kirjassa *Mission AI* todetaan oivaltavasti, että niin kauan, kun ihmiskunta ei täysin ymmärrä, mitä on ihmisälykkyys, on mahdotonta olla tarkka siitä, miten älykkyys (*engl. intelligence*) voidaan imitoida keinotekoisesti (*engl. artificial*) (Sheikh ym., 2023).

Tekoälylle on siis kehitetty lukuisia erilaisia määritelmiä, eikä tällä hetkellä ole olemassa mitään yksittäistä hyväksyttyä määritelmää. Määritelmissä toistuvat; ihmismäinen älykkyys, itsenäisyys, analyttisyys sekä ongelmanratkaisukyky. Useiden eri määritelmien ja ominaisuuksiensa vuoksi tekoälyn käsittäminen voi olla monelle haastavaa ja jopa alan ammattilaisten keskuudessa asiasta voi

syntyä joskus ristiriitoja. Selkeyden vuoksi voidaan tässä tutkielmassa nojata Euroopan komission julkaisemaan määritelmään.

Tekoälypohjaiset järjestelmät voivat olla pelkästään ohjelmistopohjaisia ja toimia virtuaalisessa ympäristössä (esimerkiksi puheavustajat, kuvantunnistusohjelmistot, hakukoneet, puheen- ja kasvojentunnistusjärjestelmät), tai tekoäly voi olla sisällytetty fyysisiin laitteisiin (esimerkiksi kehittyneet robotit, autonomiset ajoneuvot, droonit tai esineiden internet -sovellukset) (*Euroopan komissio*, 2023). Määritelmää tärkeämpää on lopulta ymmärtää erilaiset tekoälyn käyttökohteet ja sovellukset, joita käsitellään myöhemmin.

2.2 Kehitys

Arvioiden mukaan tekoälyn hyödyntämisen rahallinen vaikutus on globaalissa kaupan käynnissä \$400 miljardia, logistiikka-alalla \$400 miljardia, automatisoidussa tuotannossa \$300 miljardia ja pankkisektorilla \$200 miljardia. Tekoälyn laajamittaista ja luotettavaa hyödyntämistä varten on luotu EU:n eettiset ohjeet, jossa yksi ensimmäisistä suosituksista jäsenvaltioiden hallituksille on luoda suotuista ympäristö tekoälyn tehokkaalle kehittämiselle ja laatia kansalliset strategiat tekoälyyn perustuvia sovelluksia varten. (Mukhamediev ym., 2022.)

Tekoälyllä yhdessä muiden teknologioiden kanssa on potentiaalia ratkaista joitakin yhteiskunnan suurimmista haasteista. Tekoälyllä on valtavat mahdollisuudet liiketoiminnassa, valmistuksessa, terveydenhuollossa, koulutuksessa, puolustuksessa ja monilla muilla aloilla. Lukuisia innovaatioita on kehitetty tekoälypohjaisen teknologian avulla, kuten kasvojentunnistus ja itseajavat autot. Nämä sovellukset edellyttävät, että tekoälyjärjestelmät pystyvät vuorovaikutukseen reaali maailman kanssa ja tekemään automaattisia päätöksiä. (W. Wang & Siau, 2019.)

Tekoälystä puhui ensimmäisen kerran John McCarthy vuonna 1956, mutta teknologisten innovaatioiden puute teki tekoälyn hyödyntämisestä tuolloin vähemmän lupaavan. Vuosina 1960–1970 tutkijat tarkastelivat tekoälyä tietopohjaisten järjestelmien (*engl. knowledge-based system, KBS*) ja keinoitekoisten neuroverkkojärjestelmien (*engl. artificial neural network, ANN*) avulla. KBS-järjestelmät ovat tietokoneita, jotka antavat neuvoja ennalta määrättyjen sääntöjen avulla ihmisten sille esittämän tiedon perusteella. (Abduljabbar ym., 2019.) Vuonna 2023 organisaatioista 33 % käytti yleistä tekoälyä säännöllisesti ainakin yhdessä business-toiminnossa. 40 % organisaatioista lisää investointeja tekoälyyn yleisen tekoälyn ansiosta. 60 % tekoälyä käyttävistä organisaatioista käyttää jo yleistä tekoälyä (*The state of AI in 2023: Generative AI's breakout year | McKinsey*, 2023).

2.3 Tekoälyn alatasot

Tekoälyyn kuuluu useita suuria tieteenaloja, kuten koneoppiminen, luonnollisen kielen käsittely, teksti- ja puhesynteesi, tietokonenäkö, robotiikka, suunnittelu ja asiantuntijajärjestelmät. Suuri osa tekoälysovelluksista perustuu koneoppimismenetelmiin. Nämä menetelmät toteuttavat tekoälyn perusajatuksen, jossa palauteluoppi oppii jatkuvasti ja kehittää itseään. Esimerkkejä tekoälymenetelmistä, jotka ovat yleistymässä kuljetusalalla, ovat muun muassa keinotekoiset neuroverkot (ANN), geneettiset algoritmit (GA), automaattinen tunnistusjärjestelmä (AIS), muurahaispesäoptimointi (ACO) ja mehiläisyhdyskuntien optimointi (BCO) sekä sumea logiikkamalli (FLM). (Abduljabbar ym., 2019.)

Mukhamediev ym., (2022) mukaan tekoälyn ytimessä on koneoppiminen (*engl. machine learning, ML*). Tämä on algoritmien ja menetelmien kokonaisuus, joka käsittelee luokittelu-, klusterointi- ja ennustamisongelmia. Tekoälyn ja koneoppimisen käytännön soveltaminen on lupaavaa, minkä vuoksi alan tutkimus on vilkasta. Koneoppimismenetelmät ovat joukko tekoälyssä usein käytettyjä menetelmiä. Niiden avulla voidaan ennustaa datan uusia ominaisuuksia harjoitusdatasta havaittujen tunnettujen ominaisuuksien perusteella. Wang ja Siau (2019) näkevät koneoppimisen automatisoituna prosessina, joka mahdollistaa koneiden analysoida suuria tietomääriä, tunnistaa toistuvia säännönmukaisuuksia ja oppia datasta tarjotakseen tukea ennusteiden tekemiseen ja päätöksenteon tueksi.

Koneoppimisen tärkein etu on kyky purkaa ja jäsentää monimutkaisia malleja, mikä tekee siitä sopivan edistyneisiin merenkulun sovelluksiin (Huang ym., 2022). On nähtävissä, että koneoppimisella tulee olemaan itsenäinen kyky tarjota luotettavia arvioita riittävän koulutuksen jälkeen, ja sen kapasiteettia voidaan edelleen laajentaa yhä useammilla projekteilla ajan myötä. Tämä tarkoittaa, että laaja joukko alusten parametreja voidaan huomioida luotettavasti. Suunnittelun alkuvaiheet hyötyvät merkittävästi koneoppimisesta, sillä tällöin täytyy testata lukemattomia konfiguraatioita, joiden hankkiminen CFD-menetelmällä tai kokeellisesti olisi liian työlästä. (Huang ym., 2022.)

Syväoppiminen (engl. deep learning, DL) on nopeimmin kasvava tekoälyn osa-alue. Syväoppiminen koostuu menetelmistä, jotka hyödyntävät syviä neuroverkkoja – toisin sanoen verkkoja, joissa on kaksi tai useampia piilokerroksia. Syvien arkkitehtuurien suurin etu liittyy niiden kykyyn ratkaista tehtäviä end-to-end-menetelmällä. Tämä lähestymistapa vähentää ennakkokäsittelyn tarvetta, sillä verkon syötteenä käytetään esimerkiksi signaali- tai kuvavektoria, ja verkko tunnistaa itsenäisesti säännönmukaisuuksia syötevektorin ja tavoitemuuttujan välillä. Verkko suorittaa raskaan ja

monimutkaisen, merkityksellisten piirteiden valintaprosessin, mikä helpottaa tutkijan työtä merkittävästi. Nämä edut tulevat kuitenkin esiin vain, jos käytettävissä on riittävän suuri määrä opetusdataa ja oikein valittu neuroverkon arkkitehtuuri. (Mukhamediev ym., 2022.)

2.4 Tekoälyn käytön haasteet

Tekoälyn haasteet voidaan jakaa karkeasti ulkoisiin ja sisäisiin tekijöihin. Tekoälyn teolliset sovellukset ja sen intensiivisempi käyttö yhteiskunnassa eivät ole kuitenkaan vielä levinneet laajalle. Laaja-alaisten tekoälysovellusten haasteita täytyy tarkastella sekä teknologian (sisäiset ongelmat) että yhteisön (ulkoiset ongelmat) näkökulmasta. Tieteellinen yhteisö identifioi seuraavanlaiset rajoitteet: sosiaaliset rajoitteet, kuten eettiset, moraaliset ja oikeudelliset kysymykset sekä organisatoriset rajoitteet kuten tekoälyn käyttöönoton strategian puute ja heikko teknologinen infrastruktuuri. (Mukhamediev ym., 2022.) Hieman tarkemman kuvauksen tekoälyn haasteista tarjoavat Wang ja Siau (2019). He havaitsivat yhdeksän keskeistä ongelmaa: datan laatu, yksityisyyden suojaan liittyvät huolet ja turvallisuus; tietojen vääristymät ja tekniset rajoitukset; ”black box” (ei tiedetä, miten päätökset syntyvät), läpinäkyvyys ja ennustettavuus; varallisuuserot; kehitysmaiden talous; työpaikkojen siirtyminen ja korvaaminen; luottamus ja hyväksyminen; eettiset ja moraaliset kysymykset; oikeudelliset kysymykset ja sääntelypolitiikka.

Huolena on, että mitä kehittyneemmäksi tekoäly tulee, sitä enemmän se voi aiheuttaa riskejä ihmiskunnalle ja yhteiskunnalle. Esimerkiksi tekoäly saattaa tehdä päätöksiä, joita ihmiset eivät pysty hallitsemaan tai ymmärtämään. Monet tunnetut tieteentekijät ja teknologia-alan vaikuttajat ovat viime aikoina ilmaisseet huolensa tekoälyn aiheuttamista riskeistä, osittain siksi, että monet tekoälyn kehitysaskeleet – joita asiantuntijat ovat aiemmin arvioineet saavutettavan vasta vuosikymmenien päästä – on jo saavutettu. (W. Wang & Siau, 2019.)

Kinder (2024) mukaan yli puolet Yhdysvaltain suurimmista yrityksistä näkee tekoälyn riskinä liiketoiminnalleen. Tutkimuksessa havaittiin, että jopa 56 prosenttia maan suurimmasta 500 yrityksestä mainitsi vuoden 2023 vuosikertomuksessaan tekoälyn riskitekijänä. Vielä vuonna 2022 vastaava luku oli vain 9 prosenttia. Yrityksiä huolesti kiristyvän kilpailun ja rahanmenon lisäksi tekoälyn mahdollisesti aiheuttamat mainehaitat sekä eettiset ongelmat. (Kinder, 2024.) Monilla yrityksillä on huolta uudesta teknologiasta, joka voi aiheuttaa uusia riskejä navigointiin ja kyberuhkiin liittyen (Kim ym., 2020). Koneoppimisalgoritmien merkittävä haittapuoli on niiden fysiikkaan perustuvan pohjan puuttuminen, mikä aiheuttaa suurta epävarmuutta ennusteissa. (Huang ym., 2022.)

3 Merikuljetusten kehittäminen

Tässä luvussa tarkastellaan merikuljetusten kehittämistä aluksen suunnittelun, reittioptimoinnin, satamalogistiikan, turvallisuuden ja ympäristöystävällisyyden näkökulmasta. Muita aiheeseen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa sosiaaliset tekijät, lait ja politiikka sekä globaalin talouden kehittyminen. Näiden tekijöiden vaikutus on merkittävä, mutta samalla hyvin spekulatiivinen ja siksi niiden tarkastelu jätetään tämän tutkielman ulkopuolelle.

3.1 Merikuljetusten kehityskulku

Merenkulun logistiikka ja toimitusketjun hallinta ovat monimutkaistuneet talouden globalisaation myötä. Merikuljetusten kehittäminen on ajankohtainen ja jopa kiireellinen asia merilogistiikan ja toimitusketjun hallinnan tehostamiseksi (X. Chen ym., 2024). Merikuljetusten osuus on lähes 3 prosenttia globaaleista kasvihuonepäästöistä, mikä tekee alasta kuudenneksi suurimman hiilidioksidipäästöjen lähteen globaalisti. Tähän vaikuttaa heikko alusten muotoilu sekä suunnittelun ja resurssien optimaalisen käytön puute (Krčum ym., 2021). Näiden olosuhteiden vallitessa on perusteltua pohtia keinoja, joiden avulla merikuljetusalasta saadaan tulevaisuudessa turvallisempi, ympäristöystävällisempi ja kustannustehokkaampi.

Kilpailun kasvaessa on selvää, että tulevaisuudessa vaaditaan merkittäviä sijoituksia teknologisiin innovaatioihin (Haralambides, 2019). Tämä näkemys on linjassa Legorburu et al. (2022) havaintojen kanssa. Tutkimukset ovat osoittaneet, että seuraavat innovaatiot ja trendit voisivat nousta keskiöön 2030-luvulla: automatisoidut ja autonomiset alukset, älykkäät laivastot ja satamat, ympäristöystävälliset, energiatehokkaat ja joustavat sisävesialukset sekä erittäin vähäpäästöiset alukset ja järjestelmät (Oloruntobi ym., 2023).

Merikuljetusten kehittämisellä on pitkä historia ja se on ollut jatkuva haaste aluksen liikkeenharjoittajille, suunnittelijoille ja laivanrakentajille. Jo satoja vuosia sitten laivasuunnittelijat alkoivat etsiä parempia rungon muotoja, jotta alusten vesivastus pienenesi. Vaikka nämä lähestymistavat olivat pääosin empiirisiä ja perustuivat yksinkertaistettuun fysiikkaan, ne loivat laivanrakennuksen perusteoria parantaen merkittävästi runkosuunnittelua ja käynnistäen useiden vuosisatojen mittaisen meriliikenteen kehityskauden. Näitä parannuksia seurasi merimoottoreiden optimointi teollisen vallankumouksen myötä. (Huang ym., 2022.) Moottorien optimointiin liittyy myös vahvasti erilaisten polttoaineiden kehittäminen esimerkkinä nesteytetty maakaasu (LNG) (Kim ym., 2020).

Tulevaisuudessa merenkulku tarvitsee koneoppimista, sillä aluksen suorituskykyyn vaikuttavat lukuisat tekijät, kuten trimmi, syväys, keulan ja perän kulmat, tuulet, aallot, virtaukset, aluksen pohjan kasvustot, moottorin hyötysuhde sekä aluksen rungon geometriset ominaisuudet. Näiden muuttujien väliset yhteydet eivät ole suoraviivaisia, mikä tekee perinteisten regressiomenetelmien käyttämisestä kokonaisvaltaiseen suunnitteluun, analysointiin ja optimointiin haastavaa. (Huang ym., 2022.) Vaikka tuotetun datan määrä on kasvanut, haasteena on yhä, kuinka dataa voidaan hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti seuraavan kehitysvaiheen tukemiseksi (Sullivan ym., 2020).

3.2 Aluksen suunnittelun vaikutus energiatehokkuuteen

Aiemmin mainittujen aluksen suorituskykyyn vaikuttavien tekijöiden ja säädätöiden avulla voidaan hyödyntää optimaalista ajotilaa tietyissä navigointiolosuhteissa. Myöhemmässä optimointivaiheessa, joka on kriittinen osa aluksen suorituskyvyn parantamista, laivasuunnittelijoiden on kuitenkin perinteisesti täytynyt tukeutua omaan kokemukseensa ja asiantuntemukseensa runkosuunnitelman muokkaamisessa. (Huang ym., 2022.)

Merkittäviä avainhenkilöitä laivasuunnittelun alalla olivat muun muassa Ray ym. (1995), jotka esittelivät ensimmäistä kertaa globaalin optimointistrategian laivasuunnittelussa. Erilliset alukseen vaikuttavat tekijät kuten vastus, paino, laidat, rakennuskustannukset ja vakaus yhdistettiin kehittämällä järjestelmäohjain. Laskelmissa käytettiin klassisia laivarakennuksen yhtälöitä, ja rajoitteet lisättiin 136 TEU:n konttialuksen purjehdusvaatimusten mukaisesti. Optimoitavat tekijät painotettiin samansuuruisiksi ja kirjoittajat osoittivatkin älykkäämmän päätöksentekostrategian tarpeen tulevaisuudessa. (Ray ym., 1995.)

Optimoidakseen korkeatehoisten potkureiden käyttöolosuhteet, aluksen runkomuotoon voidaan soveltaa erityisiä pinnoitteita tai ilmavoitelua, koska aluksen työntövoiman tarpeet ovat vähäiset. Näiden havaintojen mukaan kehittyneitä virtuaaliodellisuus- ja simulointiteknologioita tullaan todennäköisesti käyttämään tulevaisuuden alusten suunnittelussa. (Oloruntobi ym., 2023.) Kun ymmärretään aluksen suunnitteluprosessi, on helpompaa ymmärtää laivan energiatehokkuuden parantaminen nykyteknologian avulla.

3.3 Reittioptimointi ja navigointi

Globaalilla reittioptimoinnilla tarkoitetaan ”lyhimmän vapaan reitin löytämistä tunnetusta lähtöpisteestä määränpäähän olemassa olevan tiedon perusteella, ottaen huomioon esteiden tai

huonon sään vaikutukset merellisessä ympäristössä.” Yleisesti ottaen globaalien reitinoptimoinnin rajoitteisiin kuuluvat aikajärjestys, esteiden aiheuttamat rajoitteet, sääolosuhteet sekä kansainvälinen merenkulun COLREGS-säännöstö. (X. Zhang ym., 2021.)

Viimeaikaiset huolenaiheet energiatehokkuudesta ja päästöjen vähentämisestä (IMO, 2009) sekä meriliikenteen kiristynyt kilpailu ovat lisänneet painetta tutkia merikuljetusten monikriteerioptimointia ja energiatehokkuuden parantamista (Vettor & Guedes Soares, 2016). Aluksen suorituskyky vaihtelee merkittävästi tyynen veden olosuhteista aina myrskyolosuhteisiin asti, joihin alus on suunniteltu kestäväksi. Ympäristötekijöiden, erityisesti aaltojen, tuulen ja virtausten vaikutuksesta alukseen kohdistuu kuormitusta. Kaikki edellä mainitut tekijät on arvioitava luotettavasti, kun suunnitellaan optimaalista reittiä satamien välillä. Tämä on toimenpide, jonka jokainen aluksen päällikkö tekee intuitionsa, kokemuksensa, aluksen tuntemuksensa ja sidosryhmiltä saamiensa neuvojen perusteella. Aluksen dynamiikka riippuu useiden tekijöiden vuorovaikutuksesta, jonka vaikutuksia voi olla vaikea ennakoida etukäteen. Siksi on tärkeää kehittää tieteellisiä menetelmiä ja toimintatapoja sekä innovatiivisia työkaluja, joiden avulla voidaan minimoida inhimillisen tekijän vaikutus näin merkittävässä päätöksenteossa. (Vettor & Guedes Soares, 2016.)

Antwerpenin satama raportoi tämän vuoden kesäkuussa, että 28 % aluksista myöhästyi saapumisestaan, keskimääräisen viiveen ollessa yli 20 tuntia (Knowler, 2015). Matkan keston tarkka ennustaminen onkin yksi laivannavigoinnin keskeisimmistä tehtävistä. Kaupallisten sääreitipalvelujen raportit ja tilastot ovat saavuttaneet merkittäviä tuloksia, kuten viivästyneiden tuntien määrän väheneminen 80 %:lla, rakenteellisten vaurioiden väheneminen 73 %:lla ja myrskyisästä säästä johtuvien rahtivaurioiden korvausvaatimusten väheneminen 87 %:lla. (Chen, 2002.)

Tehokas sääreititys tarvitsee yhtenäisen tiedon tuottaakseen luotettavia tuloksia. Suunnitteluvaiheessa laskelmat ja mallikokeet rajoittuvat aina tiettyyn määrään olosuhteita käytännöllisistä ja taloudellisista syistä. Merellä purjehdittaessa aluksen vasteet on kuitenkin arvioitava kaikissa ennustetuissa meri- ja sääolosuhteissa, jotta voidaan määrittää, ovatko valittu reitti ja nopeus sopivia, vai johtaisiko jokin toinen strategia suotuisampaan lopputulokseen. Tämän vuoksi tarvitaan kattava malli aluksen dynamiikasta ja propulsiojärjestelmästä. Mitä tarkempi mallinnus on, sitä luotettavampia tuloksia voidaan odottaa pitäen kuitenkin aina mielessä sääennusteisiin sisältyvä epävarmuus sekä tarvittava tasapaino luotettavuuden ja laskennallisen kuormituksen välillä. Operatiivisessa järjestelmässä näitä tietoja voidaan päivittää reaaliaikaisilla mittauksilla integroidusta valvontajärjestelmästä. (Rathje, 2009.)

3.4 Satamalogistiikan kehittäminen

Sataman rakenne on pääperiaatteiltaan yhdenmukainen ja koostuu kolmesta alueesta. *Terminaal* on rajattu alue satamassa, jossa käsitellään tietyn tyyppistä rahtia, kuten kontteja, öljyä, kaasua tai risteilymatkustajia. Terminaalilla voi olla useita laitureita. *Laituri* on alue, johon alukset kiinnittyvät ja jossa on lastaus- ja purkulaitteita. *Kenttä* on väliaikainen varastointialue konteille. Jokainen kontti, jonka korkeus on tyypillisesti 2,62 metriä, pinotaan toistensa päälle enintään 16 metrin korkeuteen ISO-standardin mukaisesti. Kontit asetellaan ruudukkomuodostelmaan, ja konttipinojen välissä on 25–30 metrin levyiset kulkuväylät kenttätrailereita varten. (Yau ym., 2020.) Voidaan olettaa, että tällainen standardoitu satamarakenne helpottaa satamatoimintojen automatisointia ja vähentää hukkaa.

Satamat ovat intermodaalisia solmukohtia, jotka yhdistävät merikuljetukset sisämaan kuljetusverkostoihin, kuten teihin ja rautateihin. Satamat sijaitsevat institutionaalisten, teollisten ja ohjaustoimintojen keskipisteessä, tietojärjestelmien verkostossa. Koska satamat toimivat rahti- ja matkustajaliiketoiminnassa, pääasialliset vertikaaliset sovellukset liittyvät logistiikkaan ja digitaalisiin palveluihin. (Pagano ym., 2022) Kontteja käsittelevät terminaalit ovat normaalisti ylikuormittuneita lastauksesta, laskin purkamisesta ja muista toiminnoista. Ruuhka terminaalissa voi muodostaa pullonkaulan globaaliin toimitusketjuun. (Yau ym., 2020.)

Satamien viides sukupolvi on asiakas- ja yhteisökeskeinen älykäs satama, joka erottuu viidellä pääpiirteellä: älykkäät satamapalvelut ja -sovellukset, kuten aluksen ja konttien hallinta; teknologiat, kuten datakeskus, 5G-verkko ja viestintä sekä automaatio; kestävä teknologian käyttö energiatehokkuuden parantamiseksi ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi; klusterinhallinta, kuten laivakuljetusklusteri, joka koostuu maantieteellisesti lähekkäin sijaitsevista yrityksistä ja sidosryhmistä, joiden päätoiminta on laivaliikenne; ja solmukohtien infrastruktuurien kehittäminen eri satamien välisen yhteistyön edistämiseksi. (Yau ym., 2020.)

Kun alukset ovat kiinnitettyinä laitureihin lastausta ja purkamista varten, niiden pää- ja apumoottorit käyttävät alhaisen laatutason polttoainetta tai bunkkeripolttoöljyä, erityisesti alhaisen laatutason dieseliä tarjotakseen jatkuvaa tehoa laivalla käytettäväksi. Tämä alhaisen laatutason polttoaine sisältää rikkiä 3000 kertaa enemmän kuin tavallisessa dieselissä ajoneuvojen päästöissä. Tämä ongelma pahenee, kun ei noudateta alusten piippusuodattimille asetettuja standardeja. (Yau ym., 2020a.)

Logistiikka- ja merenkulkuprosesseja on suunniteltu uudelleen arvon luomisen ja tehottomasta toiminnasta sekä huonosta organisoinnista aiheutuvan hukan poistamisen näkökulmasta. Tämä on johtanut siihen, että satamat ovat yhä enemmän automatisoituneita ja optimoituja ICT:n ja robotiikan yhdistymisen sekä integroinnin muiden sisämaan ja meren yli suuntautuvien kuljetusmuotojen kanssa. (Pagano ym., 2022)

3.5 Merikuljetusten turvallisuuden kehittäminen

Merionnettomuuksilla voi olla vakavia vaikutuksia meri- ja rannikkoekosysteemeihin, globaaleihin taloudellisiin toimintoihin sekä jopa yhteiskunnallisiin ja kulttuurisiin rakenteisiin. Tieteellisiin kirjallisuuskatsauksiin koottujen menetelmien painopiste on ollut onnettomuuksien esiintymistiheyden ja niihin liittyvien seurausten tunnistamisessa, niin pitkälle kuin se käytännössä on mahdollista. Historialliset onnettomuustilastot ja liikennetiedot viittaavat myös siihen, että merenkulun sidosryhmien tulisi parantaa riskien hahmottamista ja ymmärtää riskienhallinnan merkitys alusten suunnittelussa ja operoinnissa. (M. Zhang ym., 2025.) EU:n kansallisilta onnettomuustutkintaviranomaisilta saatujen raporttien mukaan vuosina 2014–2019 lähes puolet merionnettomuuksista olivat navigointiperäisiä, mukaan lukien kosketus, hallinnan menetys, kolari ja karille ajautuminen (EMSA, 2020).

Eräs merikuljetusten turvallisuuteen vaikuttava seikka on aluksen suorituskyky ja fyysiset ominaisuudet. Nykyaikaisissa aluksissa merikelpoisuuteen ja rungon ominaisuuksiin kiinnitetään usein erityistä huomiota jo suunnitteluvaiheessa, mikä mahdollistaa ankarienkin olosuhteiden kohtaamisen huomattavasti turvallisemmin kuin aiemmin (Guedes Soares & Teixeira, 2001). Suurin osa onnettomuuksista tapahtuu rannikkoalueilla tai ruuhkaisilla merialueilla ja monesti syynä on puutteellinen ohjattavuus tai aluksen kuljettajan huolimaton havainnointi, mikä voi johtaa muun muassa karilleajoon tai yhteentörmäyksiin (X. Zhang ym., 2021).

Yhä polarisoituneemmassa maailmassa alukset ovat entistä haavoittuvampia ulkoisille hyökkäyksille. Uudemmissa aluksilla tulisi olla kyky vastustaa digitaalista kaappausta ja kestää terrori-iskuja. Oloruntobi ym. (2023) ja Legorburu ym. (2018) ovat esittäneet todisteita siitä, että alukset voidaan kunnostaa nopeasti tukemaan uusia merialueen toimintoja. Mahdollisuus on se, että monia aluksia voitaisiin käyttää etsintä- ja pelastustoimintaan hätätilanteessa. Tämän vuoksi merialueen työveneillä on oltava laaja käyttöikkuna myrskyisillä merillä, mikä mahdollistaa miehistöjen työskentelyn turvallisesti ja terveellisesti pitkien aikojen ajan, mikä voisi merkittävästi vähentää käyttökustannuksia. (Legorburu ym., 2018.)

3.6 Ympäristöystävällisyys ja energiatehokkuus

Tavaroiden ja ihmisten kuljetus muodostaa jopa 25 % maailman kokonaisenergiankulutuksesta, mikä tekee siitä yhden suurimmista CO₂-päästöjen lähteistä, joista noin 3 % kuuluu merenkululle. Vaikka merenkulku on energiaintensiivisyydeltään tehokkain kuljetusmuoto, meritse kuljetettavan tavarán määrä ja siihen liittyvät päästöt kasvavat jatkuvasti. Kansainvälinen merenkulkuorganisaatio (IMO) raportoi alusten kasvihuonekaasupäästöjen lisääntyneen 9,6 % vuosina 2012–2018. Lisäksi vuonna 2050 alusten CO₂-päästöjen odotetaan olevan jopa 130 % vuoden 2008 tasosta ilman ennakoivia toimia. (Kondratenko ym., 2025.)

Kun puhutaan merikuljetuksista ja niiden ympäristövaikutuksista, on oleellista ottaa huomioon aluksen käyttämien polttoaineiden vaikutus. Merenkulkuala on kokenut paineita rahtihintojen laskun ja ylikapasiteetin vuoksi kovassa kilpailutilanteessa, jossa mittakaavaedut ovat keskiössä. Uusien vähähiilisten tai nollapäästöisten polttoaineiden käyttöönoton myötä laivojen aiheuttamien päästöjen ja saastumisen vähentäminen sekä alusten turvallisuuden parantaminen ovat tärkeämpiä kuin koskaan. (Kim et al. 2017). Uusi paradigman muutos on parhaillaan käynnissä nopeasti kehittyvän teknologian myötä. Tähän muutokseen kytkeytyy vahvasti merenkulun vaihtoehtoiset polttoaineet, joiden avulla saavutetaan turvallisempia, vihreämpiä ja tehokkaampia aluksia vastauksena kansainvälisten säädösten tiukentuneisiin vaatimuksiin. (Kim ym., 2020.)

On esitetty, että nesteytetty maakaasu (LNG) tulisi olla ensisijainen polttoaine tulevaisuuden aluksille. Ensimmäisiä LNG:n käyttäjiä voisivat olla lyhyen matkan alukset alueilla, joilla on laajasti saatavilla kaasuntankkausinfrastruktuuria. Tämän jälkeen myös valtamerialukset voisivat siirtyä LNG:n käyttöön, kun maailmanlaajuinen tankkausinfrastruktuuri on kehittynempi. (Oloruntobi ym., 2023) Vuoden 2030 maailmanlaajuisten tavoitteiden saavuttamiseksi on pohdittu myös vetykäsitellyn kasviöljyn (HVO) käyttöä tehokkaissa ja erittäin vähäpäästöisissä aluksissa (*engl. ultra-low emission vessels*) (Oloruntobi ym., 2023.) Näihin vaihtoehtoiisiin energialähteisiin siirtymisen helpottamiseksi kaikki uudet alukset voitaisiin varustaa monipolttoainemoottoreilla, jotka voivat saumattomasti vaihtaa ensisijaisten polttoaineiden välillä (Zęczak & Gromadzińska, 2020).

Alan asiantuntijoiden mukaan monet lyhyen matkan alukset hyötyisivät merkittävästi sähkömoottoreiden käytöstä, kun taas toiset voisivat hyödyntää sähkö- ja kaasukäyttöisten moottoreiden yhdistelmää. Kehittyneiden polttoaineiden ja propulsiojärjestelmien teknistaloudellisessa tutkimuksessa huomattiin, että sähkömoottori saattaa vaatia useita muutoksia suunnitteluhaasteiden vuoksi. Lopulta kaikki alukset saattavat kuitenkin siirtyä nopeasti sähköiseen propulsioon. (Oloruntobi ym., 2023)

Näiden edistysaskeleiden lisäksi tulevaisuuden alukset saattavat hyödyntää myös tuulivoimaa propulsioon, kun taas aurinkoenergiaa käytettäisiin akkujen lataamiseen muihin kuin propulsioon liittyviin tehtäviin (Oloruntobi ym., 2023). Horvath ym. (2018) ennustivat tutkimuksessaan, että tuuli- ja aurinkoenergiasta tulisi merenkulun tärkeimmät käyttövoimat vuoteen 2030 mennessä. Sekä kyseinen tutkimus että Korberg ym. (2021) näkivät, että fossiilivapaat energialähteet korvaavat meridieselin lyhyen matkan meriliikenteessä jo ennen vuotta 2030. Molemmat tutkimukset ennustivat, että myös valtamerialukset ottavat käyttöön aurinko- ja tuulivoimalla toimivia propulsiojärjestelmiä vuoteen 2030 mennessä. Tällainen tuulivoimalla toimiva propulsiojärjestelmä on ollut käytössä muun muassa Viking Line -varustamon aluksella, mutta sen hyödyistä ei oltu täysin yksimielisiä (Enkvist, 2019).

4 Merikuljetusten kehittäminen tekoälyn avulla

Tässä luvussa esitellään tekoälyn keinoja ja sovelluksia, joiden avulla merikuljetuksia on mahdollista kehittää. Nämä kehittämisen osa-alueet ovat jakautuneet seuraavasti: navigointi ja kuljetusreittien optimointi, energiatehokkuus ja kestävä kehitys, kuljetusten turvallisuus sekä satamalogistiikka.

Tekoälyn onnistunut hyödyntäminen edellyttää hyvää ymmärrystä sekä tekoälyn ja datan välisistä suhteista että logistiikkajärjestelmän ominaisuuksien ja muuttujien välisistä suhteista. Viranomaistenkin kannalta on mielenkiintoista selvittää, miten näitä teknologioita voidaan hyödyntää kuljetusten kehittämisessä (Abduljabbar ym., 2019).

4.1 Navigointi ja kuljetusreittien optimointi

Navigointiongelmien ratkaisemisen haasteena ovat usein tiedon epävarmuus, monimutkaisuus ja tiukka aikaikkuna. Taktisia päätöksiä, joiden avulla pyritään ymmärtämään liikennemalleja ja tulevia alusten kohtaamisia voidaan verrata shakkipeliin, jossa pelaaja asettaa itselleen tavoitteita ja harkitsee useita siirtoja eteenpäin. (MacKinnon ym., 2020.)

4.1.1 Tekoölyyn ja autonomiaan perustuva reittioptimointi

Autonomisen aluksen reittioptimoinnin laskennassa kustannusten määrittelystrategia on usein tärkeämpi kuin reittisuunnittelu ja lyhimmän reitin valinta (T. Wang ym., 2020). Asettamalla lähtö- ja päämääräsatamat sähköiselle merikartalle sekä laskemalla reittioptimin ja esteiden asettamat rajoitteet määritetään useita kustannuksiin perustuvia väyläpisteitä. Nämä väyläpisteet muodostavat optimoidun globaalin reitin (X. Zhang ym., 2021).

Olipa kyseessä mikä tahansa väyläpisteisiin liittyvä optimointimalli, kohtaavat nämä menetelmät ongelmia kuten käytännön mallin muodostamisen vaikeus ja heikko sopeutumiskyky. Tähän on kuitenkin löydetty ratkaisu. Suurten datamassojen teknologian kehittymisen ja laajan merenkulun sovellusten myötä optimaalinen reitti voidaan löytää puhdistamalla, sovittamalla, louhimalla, luokittelemalla ja ennustamalla valtavaa määrää AIS-reittidataa. Merenkulun big dataan perustuva globaalin optimaalisen reitin muodostusmalli on suhteellisen turvallinen ja käytännöllinen. Useita historiallisia reittejä sovittamalla saadaan aikaan suositeltuja reittejä ja väyläpisteitä. (X. Zhang ym., 2021.) Voisi kuvitella, että optimaalisen reitin saavuttaminen on yksinkertaista, mutta vasta nykyteknologian avulla on pystytty huomioimaan ”mikroreitinvalintoja”.

4.1.2 Sääreititysjärjestelmä

Huang ym. (2022) ottavat reittien optimoinnissa huomioon myös sääolosuhteet. Alusten liikennöintiä varten reittien optimointi voidaan toteuttaa koneoppimismalleilla yhdistämällä aluksen parametrit reaaliaikaiseen säädädataan. Koneoppimisen nopeus mahdollistaa reitin optimoinnin reaaliajassa. Toimintastrategiat tehostuvat, kun koneoppiminen pystyy mukauttamaan niitä moottorin suorituskyvyn ja vallitsevien meriolosuhteiden mukaan. (Huang ym., 2022)

(Vettor & Guedes Soares, 2016) kutsuvat tätä meriolosuhteet huomioivaa reittisuunnittelua nimellä sääreititysjärjestelmä (*engl. weather routing system*). Heidän mukaansa kasvaneet laskentatehot ovat mahdollistaneet kehittyneempien menetelmien, kuten GIS-ruudukkoon perustuvan monikriteerisen menetelmän kehittämisen sekä dynaamisen ohjelmoinnin ja geneettisten algoritmien yhä yleisemmän käytön. X.-Y. Zhang ym. (2015) mukaan sääreitityksen on jo osoitettu olevan hyödyllistä paitsi valtamerireiteillä, myös reunamerten, kuten Välimeren alueilla sekä alueellisessa liikenteessä toimivilla feeder-aluksilla.

Sharma ym. (2024) löytävät haasteita reittisuunnittelusta. Heidän mukaansa meriolosuhteet vaikuttavat haitallisesti alusten navigoinnin ja reittisuunnittelun automatisointiin. Se johtaa poikkeamiin asetetusta kurssista, vaurioittaa alusten rakennetta ja vähentää yleistä tehokkuutta. Laivojen automaattiohjaus voi pitää aluksen kurssilla, mutta se ei pysty valitsemaan tehokasta reittiä reaaliaikaisesti. Vaihteleva aallonkorkeus on yksi merkittävimmistä syistä, jotka johtavat tähän tehottomuuteen aluksen automaattiohjausjärjestelmässä. (Sharma ym., 2024.) Myös Mackinnon ym. (2020) näkevät vielä paljon haasteita koneoppimisen hyödyntämisessä reittisuunnittelussa ja korostavat sitä, että koneoppimismenetelmät ovat suhteellisen heikkoja ja perustuvat siihen, että jokainen päätös luodaan joka kerta uudelleen laskentatehon ja älykkäiden algoritmien avulla.

4.1.3 Reittioptimoinnin mahdollistavat teknologiat

Koneoppiminen voi tarjota nopeita arvioita, joissa otetaan huomioon epälineaarisuudet, ja siten välttämään nykyisin käytettyjen lineaaristen analyysimenetelmien epätarkkuudet (Huang ym., 2022). Alukset ovat monimutkaisia järjestelmiä, jotka tuottavat ja tarvitsevat suuria määriä dataa toimiakseen tehokkaasti. Antureiden ja esineiden internetin (*engl. Internet of Things, IoT*) hyödyntäminen merenkulussa edellyttää ennakoivaa ja tulevaisuuteen suuntautunutta lähestymistapaa, jotta ”Industry 4.0” tarjoamat hyödyt voidaan ottaa laajemmin käyttöön. (Sullivan ym., 2020.)

Merenkulun IoT-liikennedatan kasvava saatavuus ja jatkuva meriliikenteen volyymin kasvu ovat ajureita, jotka vauhdittavat viimeisimpiä tekoälytutkimuksia merenkulkualalla (X. Zhang ym., 2022). Tekoälyalgoritmit käsittelevät tätä dataa tarjotakseen kehotuksia ja ennusteita, kuten alusten reittien ennustamista törmäysten välttämiseksi sekä poikkeavuuksien havaitsemiseksi (R. W. Liu ym., 2021).

Kun maailmanlaajuiset merenkulkumahdollisuudet avautuvat, tieto- ja viestintäteknologian avustamat navigointijärjestelmät voivat sopeutua sijaintiin, liikenteeseen ja hätätilanteisiin. Tämä mahdollistaa asteittaisen autonomian hyödyntämisen. ICT-teknologian kehittyessä rannikkokeskukset pystyvät vaivattomasti etänä operoimaan aluksia ruuhkaisilla merireiteillä, satamien ja terminaalien läheisyydessä sekä hätätilanteissa (X. Zhang ym., 2021). Näissä komentokeskuksissa käytettävät järjestelmäsimulaattorit voivat simuloida skenaarioita, joissa on mukana kaikki alukset ja mahdollistaa ihmisen väliintulon. Toisiinsa ja rannikkokeskukseen yhteydessä olevien alusten toimivuus riippuu viestintäyhteyksien turvallisuudesta ja luotettavuudesta. Uudemman teknologian itseohjautuvien alusten odotetaan olevan valmiita käytettäväksi ja otettavaksi käyttöön lyhyen matkan lautoilla ja sisävesiväylillä kulkevilla aluksilla ennen vuotta 2030. (Oloruntobi ym., 2023)

X. Zhang ym. (2022) tutkimus vahvistaa reittisuunnittelun merkitystä toteamalla, että alusten kulkureitin suunnittelu (*engl. vessel trajectory planning, VTP*) voi auttaa merkittävästi erilaisissa reaali maailman sovelluksissa kuten törmäysriskin varoittamisessa ja meriliikenteenhallinnassa. Vaikka tutkimuksessa on saavutettu joitakin onnistuneita edistysaskeleita, tehokas ja luotettava alusten reittien ennustaminen on yhä haaste (X. Zhang ym., 2022).

4.2 Alusten energiatehokkuus

Merenkulkuala kuljettaa noin 90 % maailmankaupasta. Merikuljetuksilla on siis merkittävä vaikutus maailmanlaajuisiin kasvi-huonekaasupäästöihin, jotka aiheuttavat ilmastonmuutosta. Kasvava paine alaa kohtaan sen hiilijalanjäljen vähentämiseksi vaatii erikoistuneiden energiatehokkaiden teknologioiden kehittämistä ja niiden yhteensopivuuden tutkimista vesikuljetussektorin nykyisten turvallisuus- ja kestävyysodotusten kanssa. (Kondratenko ym., 2025.)

Vuonna 2012 maailmanlaajuiset merenkulun päästöt olivat noin 938 miljoonaa tonnia CO₂:ta ja 961 miljoonaa tonnia CO₂e:tä, mikä merkitsi noin 2,2 %:a maailmanlaajuisista ihmistoiminnan aiheuttamista kasvihuonekaasuista (Huang ym., 2022). Vuoteen 2050 mennessä merenkulkusektorin on vähennettävä vuosittaisia kasvihuonekaasupäästöjään 50 % verrattuna vuoteen 2008, jotta

globaalin lämpötilan nousu rajoittuisi enintään 2 °C:een esiteolliseen tasoon verrattuna (Martin Cames & Cook, 2015). Tässä kontekstissa merikuljetusten rooli osoittautuu ratkaisevan tärkeäksi, mikä alleviivaa kestävästä merenkulun edistämisen tärkeyttä (Huang ym., 2022).

Tavaroiden ja ihmisten kuljettaminen muodostaa jopa 25 % maailman kokonaisenergiankulutuksesta, mikä tekee siitä yhden suurimmista CO₂-päästöjen lähteistä, joista noin 3 % kuuluu merenkululle. Vaikka merenkulku on energiaintensiivisyydeltään tehokkain kuljetusmuoto, meritse kuljetettavan tavaran määrä ja siihen liittyvät päästöt kasvavat jatkuvasti. Kansainvälinen merenkulkuorganisaatio IMO raportoi alusten kasvihuonekaasupäästöjen lisääntyneen 9,6 % vuosina 2012–2018. Lisäksi vuonna 2050 alusten CO₂-päästöjen odotetaan olevan jopa 130 % vuoden 2008 tasosta ilman ennakoivia toimia. (Kondratenko ym., 2025.)

Perinteisesti alusten polttoaineenkulutuksen vähentäminen on saavutettu suunnitteluvaiheessa ja aluksen rakennuksen jälkeen aluksen toimintojen optimoinnilla. Viime vuosina alusten energiatehokkuutta on onnistuttu kehittämään nopeasti edistyneiden koneoppimismenetelmien avulla. Tämän on mahdollistanut etäseurannasta, kokeista ja tarkoista simulaatioista kerätty data. (Huang ym., 2022.)

Viimeisen vuosikymmenen aikana alalla on luotu laajoja geospaatialisia tietojärjestelmiä, kuten Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). Nämä järjestelmät integroivat historiallisia säädataa ja tarjoavat tulevaisuuden ennusteita matkan suunnittelun tukemiseksi. Lisäksi dataa alusten polttoaineenkulutuksesta voidaan myös tallentaa. Perinteisten manuaalisten menetelmien sijaan koneoppimista käytetään tehokkaiden integroitujen toimintojen varmistamiseen, jotka voivat vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Koneoppimisen käsite merenkulkualalla perustuu datavirtaan, joka voidaan analysoida suoraan aluksen silmukassa olevan järjestelmän kautta tai epäsuorasti erillisten tietokoneiden avulla. (Huang ym., 2022.)

Laivarakennuksessa aluksen suunnittelu on olennainen tehtävä, jonka avulla pyritään saavuttamaan erinomainen hydrodynaaminen suorituskyky polttoaineenkulutuksen minimoimiseksi. Aluksen suunnittelu perustuu monimutkaisiin kokeellisiin ja laskennallisiin tekniikoihin, joita käytetään useiden runkomuotojen ja -kokojen hydrodynaamisen suorituskyvyn arvioimiseen. (Huang ym., 2022.)

Ensimmäisenä koneoppimisen sovelluksena tässä yhteydessä voidaan pitää Holtropin ja Mennenin (1982) empiirisiä algoritmeja, joissa esitetään tilastollinen menetelmä aluksen vastuksen likimääräiseksi arvioimiseksi useiden eri mallien testitulosten perusteella. Menetelmää voidaan

soveltaa vain rungon muotoihin, jotka muistuttavat keskimääräistä alusta, jota kuvaavat regression muodostamisessa käytetyt rungon päämitat ja muotokertoimet. (Huang ym., 2022.)

Ao ym. (2023) edistivät tutkimusta kehittämällä syväoppimismallin, joka käyttää täysin yhdistettyä hermoverkkoa (*engl. fully connected neural network*) ennustamaan laivan rungon kokonaisvastustan alkuvaiheen suunnitteluprosessissa CAD-geometrian hallintapisteiden perusteella. Kirjoittajat raportoivat, että keskimääräinen virhe oli alle 4 %, verrattuna CFD-datan tuloksiin. Samoin Abbas ym. (2022) kehittivät geometrian pohjalta toimivan syväoppimismallin, joka ennustaa tuulivastuksen laivoille ja koneoppimismallilla ennustetut tulokset ovat hyvin lähellä CFD-tuloksia. Kuitenkin kahdessa tässä mainitussa tutkimuksessa tarkasteltiin vain vastusta. Jos tätä lähestymistapaa yhdistetään muihin suorituskykytuuttuihin, kuten vakauteen ja rakenteelliseen eheyteen, sillä on potentiaalia yleistyä suosituksi automaattiseksi toimintatavaksi laivasuunnittelussa. (Huang ym., 2022.)

Vuoden 2015 sopimuksen mukaisesti satamien odotetaan ottavan käyttöön säädöksiä ja politiikkaa, jotka tähtäävät niiden hiilijalanjäljen vähentämiseen (Pagano ym., 2022). Tähän ratkaisuna Oloruntobi ym. (2023) esittävät, että vuoteen 2030 mennessä sähköisen voimalinjan käyttö satamissa ja ympäristönsuojelualueilla vähentää merkittävästi saastumista. On myös suunniteltu, että satamilla on hallintapaneeli, joka kykenee arvioimaan laituri- ja satama-alueet saastumistasojen, erityisesti hiilijalanjäljen, perusteella. Edellä mainittuja toimintoja varten voidaan hyödyntää tekoälyä sekä koneoppimista datan aggregointiin, reaaliaikaiseen analytiikkaan ja datanlouhintaan. (Pagano ym., 2022.)

4.3 Kuljetusten turvallisuus ja autonomiset alukset

Nopea tekoälyn kehitys edistää merkittävästi autonomisten pinta-alusten törmäyksenestoon perustuvaa navigointia, mikä puolestaan tarjoaa merkittäviä hyötyjä merikuljetuksille ja lisää mahdollisuuksia koordinoituihin useampien alusten kuljetusoperaatioihin. Autonominen alus ei välttämättä tarkoita täysin itsenäisesti seilaavaa alusta, vaan autonomia on jaettu neljään tasoon. Tasolla 1 on alus, jossa on autonomisia prosesseja ja päätöksenteon tukijärjestelmiä, taso 2 tarkoittaa etäohjattua alus, jossa on merimiehiä aluksella, tasolla 3 on etäohjattu alus ilman merimiehiä aluksella ja tasolla 4 täysin autonominen alus. (X. Zhang ym., 2021.)

Vastauksena kysymykseen: miksi autonomista merenkulkua harkitaan ja tutkitaan, Porathe ym. (2014) esittävät neljä syytä: tarve parantaa miehistön työolosuhteita aluksilla ja lieventää tulevaa

merimiesten pulaa; pyrkimykset kuljetuskustannusten vähentämiseen; maailmanlaajuinen tarve päästöjen vähentämiseksi; sekä tarve parantaa merenkulun turvallisuutta.

Merkittävästä teknologisesta kehityksestä, merenkulkustandardien parantumisesta ja vankkoista varmuusjärjestelmistä huolimatta alusten törmäysten ja karilleajojen vakavat seuraukset ovat edelleen näkyvästi esillä merionnettomuuksissa. Vaikka autonomisten alusten tarkoitus on vähentää inhimillisiä virheitä, niiden laajamittainen käyttöönotto on vielä tulevaisuuden tavoite, ja kriittiset riskit, kuten öljyvuodot, vakavat laivatulvat ja ihmishenkien menetykset ovat edelleen yleisiä uhkia. (M. Zhang ym., 2025.) Tällä hetkellä autonominen teknologia rajoittuu sovelluksiin, kuten miehittämättömiin pinta-aluksiin ja vedenalaisiin robotteihin, eli miehittämättömät rahtialukset eivät vielä kykene täysin autonomiseen navigointiin (X. Zhang ym., 2021). Myös Bakdi & Vanem (2024) mukaan autonomisten alusten uudet järjestelmät ja teknologiat vaativat vielä perusteellista testausta, jotta voidaan tunnistaa ennakoimattomia riskitekijöitä.

Alusten on myös noudatettava kansainvälisiä sääntöjä (COLREG), joita pidetään yleisesti merenkulun sääntöinä. Käytännössä näitä sääntöjä voidaan kuitenkin rikkoa liikennetilanteiden ratkaisemiseksi ilman, että tilanteen riski kasvaa. Jotta autonomista merenkulkua tukevat teknologiat olisivat turvallisia ja luotettavia, järjestelmän ei pidä pelkäästi tietää, minne alus kulkee, vaan sen on myös ennakoitava ympäröivien alusten aikeet. (MacKinnon ym., 2020.)

Älykkäiden päätöksenteon tukijärjestelmien kehittäminen ja integrointi (autonomian taso 1) ovat keskeisiä edistysaskeleita navigointiturvallisuuden ja operatiivisen päätöksenteon parantamisessa. Nämä järjestelmät hyödyntävät kehittyviä teknologioita, kuten suuria datan analysointimenetelmiä, tekoälyä ja koneoppimista tarjotakseen proaktiivista riskienhallintaa. Älykkäät päätöksenteon tukijärjestelmät ovat merkittävä edistysaskel merenkulun turvallisuuden kehittämisessä, sillä ne auttavat vähentämään inhimillisten virheiden vaikutuksia, jotka ovat yhä merionnettomuuksien yleisin syy. Samalla päätöksenteon tukijärjestelmät vastaavat laivaliikenteen kasvavaan monimutkaisuuteen erityisesti vilkkailla ja ympäristöllisesti herkillä merireiteillä. (M. Zhang ym., 2025.)

Viime vuosina autonomisen navigoinnin päätöksenteon ja suunnittelun tutkimuskohteet ovat monien tutkijoiden ja asiantuntijoiden keskuudessa jakautuneet karkeasti reittisuunnitteluun, esteiden väistämisen suunnitteluun ja käyttäytymispohjaiseen päätöksentekoon. Käyttäytymispohjainen päätöksenteko (*engl. behavioral decision-making*) jäljittelee ihmismiehistön ajattelutoimintaa tai aluksen ohjauksen prosessia. Jokaisessa törmäyksenestoon tai kuljetukseen liittyvässä tilanteessa

valitaan optimaalinen navigointistrategia useista vaihtoehdoista omien käyttäytymisrajoitteiden mukaisesti. (X. Zhang ym., 2021.)

Teemallinen analyysi paljasti neljä keskeistä teemaa, jotka liittyvät inhimillisiin tekijöihin ja autonomiaan monimutkaisissa ja turvallisuuden kannalta kriittisissä järjestelmissä: *luottamus, tietoisuus ja ymmärrys, hallinta ja koulutus* sekä *työn organisointi* (Mallam ym., 2020). Tällaisia ratkaisuja ei enää estä niinkään teknologian puute, vaan haasteet liittyvät yhä enemmän ihmisen ja teknologian väliseen vuorovaikutukseen sekä kehittyviin sääntelyyn, vastuuseen ja turvallisuuteen liittyviin kysymyksiin. Koska autonomiset teknologiat kehittyvät nopeasti, on yhä tärkeämpää ymmärtää, millainen rooli ihmisellä on muuttuvissa, monimutkaisissa ja turvallisuuden kannalta kriittisissä järjestelmissä. Oleellista on myös pohtia, miten tätä roolia voidaan tukea kestävällä ja onnistuneella tavalla. (Mallam ym., 2020.)

Tekoälyteknologian kehittymisen myötä autonomisten alusten esteiden välttämisen tutkimus ja kehitys on siirtynyt neljänteen vaiheeseen: tekoälyalgoritmeihin perustuvaan autonomiseen esteiden välttämiseen. Tämä sisältää menetelmiä kuten iteratiivinen havainnointi ja päättely, neuroverkot ja sumea logiikka (*engl. fuzzy logic*), syvävahvistusoppiminen sekä peliteoria (Fan ym., 2020). Lisäksi koneoppimismallit mahdollistavat jatkuvan seurannan, joka raportoi riskeistä, aluksen rakenteellisesta väsymisestä ja moottorivioista. Tämä tehostaa huolto- ja korjaustoimia aluksen elinkaaren aikana. (Vettor & Guedes Soares, 2016.)

Koska autonomiset alukset ovat vahvasti riippuvaisia ohjelmistoista ja yhteyksistä, kyberturvallisuusriski on noussut keskeiseksi huolenaiheeksi etäohjauksen ja -hallinnan kannalta. Koska autonomisten alusten toiminta perustuu suurelta osin sekä aluksella että maissa oleviin tietojärjestelmiin, ne ovat alttiimpia kyberhyökkäyksille kuin perinteiset alukset. Etäohjaustoiminnon osalta kyberterroristit voisivat murtautua viestintäyhteyteen ja ohjata toimintaa suoraan. Mitä riippuvaisempi aluksen toiminta on ohjelmistoista ja viestinnästä, sitä haavoittuvampi se on näille uhille. (DNV-GL, 2018.)

Autonomisten alusten käyttöönotto yhdessä vaihtoehtoisten polttoaineiden kanssa on avaamassa merenkulun alalla uuden aikakauden ja johtamassa paradigman muutokseen turvallisuuden, suojelun ja ympäristönsuojelun näkökulmasta (Kim ym., 2020). Vuoteen 2030 mennessä tieto- ja viestintäteknologian odotetaan yhdistävän suurimman osan maailman aluksista. Tämä loisi runsaasti mahdollisuuksia ja tulevaisuuden autonomisille ja automatisoiduille aluksille (Ghaderi, 2019).

4.4 Satamalogistiikka

Tekoälyn hyödyntämistä satamalogistiikassa on tutkittu vähäisesti verrattuna muihin merikuljetusten osa-alueisiin. Voidaan siis puhua jonkin asteisesta tutkimusaukosta.

Älykkäässä satamassa hyödynnetään pääosin neljää keskeistä infrastruktuurilaitetta:

- Laiturinosturi (*engl. quay crane, QC*) suorittaa konttien lastaus- ja purkutoiminnot aluksista laiturialueella.
- Kenttätraileri (*engl. yard trailer, YT*) kuljettaa kontteja autonomisesti ennalta määrättyä reittiä tai ohjattua alustaa pitkin terminaalin ja kenttäalueen välillä.
- Kumipyöräinen pukkinosturi vastaa konttien lastaamisesta ja purkamisesta kenttätrailereista sekä konttien pinoamisesta kenttäalueelle. Noin 30 metriä korkea pukkinosturi liikkuu suoraviivaisesti ennalta määritellyllä kiskoreitillä.
- Terminaalinhallintajärjestelmä (*engl. terminal operating system, TOS*) toimii älykkään sataman ohjauskeskuksena. Se on integroitu järjestelmä, joka suunnittelee, hallinnoi ja valvoo laajaa tehtäväkenttää hallinnollisista prosesseista kenttätoimintoihin, kuten lastaukseen, purkuun, varastointipaikkojen määrittämiseen ja konttien siirtoihin satama-alueella. (Yau ym., 2020)

Älykäs konttienhallinta kattaa konttien hankinnan, seurannan, kuljetuksen, varastoinnin ja uudelleensijoittamisen samoin konttien siirtokuljetukset. Älykkään konttienhallinnan avulla lyhennetään alusten satamakäyntien kestoja. Tämä tehostaa logistiikkapalveluita ja voi vähentää operatiivisia kustannuksia jopa 10 prosentilla. (Jović ym., 2019.) Yau ym. (2020a) tutkimuksen mukaan myös vaikeaselkoisten konttikoodien tunnistamisessa voidaan hyödyntää mallipohjaista tunnistamista ja syväoppimista.

Kun meriliikenteen kautta käytävä maailmanlaajuinen kauppa kasvaa vuosittain, merisatamien välinen kilpailu edellyttää dynaamista aikataulutusta toiminnan hallinnassa satamien suorituskyvyn optimoimiseksi. Laiturinosturin aikataulutusergelma (QCSP) on tyypillinen optimointiergelma, joka koskee konttiterminaalin toimintaa. Laiturinosturin aikataulutusergelma määrittää konttiterminaalien tuottavuuden ja suorituskyvyn. Tätä ergelmaa onkin jo onnistuttu ratkaisemaan vahvistusoppimisen (*engl. reinforcement learning*) avulla. (Long ym., 2025.)

Älykäs alustenhallinta ohjaa alusten liikennöintiä ja reitti- ja satamavalintoja hyödyntäen satamien sijainti- ja liikennetietoja parantaakseen alusten saapumisten täsmällisyyttä. 48 % konttialuksista saapuu satamaan vähintään 12 tuntia myöhässä, mikä lisää polttoaineenkulutusta ja heikentää terminaalien resurssien käyttöastetta. Älykäs alustenhallinta auttaa vähentämään alusten odotus- ja seisonta-aikaa, mikä tuottaa kustannushyötyjä. Esimerkiksi aluksen kiinnittymiseen kuluvan ajan lyhentäminen yhdellä tunnilla voi säästää jopa \$80 000. (Yau ym., 2020a.) Nämä mahdollisuudet ovat linjassa (Sullivan ym., 2020), ennustusten kanssa, joiden mukaan tulevaisuuden alukset sopeuttavat toimintaansa satamien ruuhkautumiseen ja sääolosuhteisiin optimoimalla reitin ja nopeuden.

Kontteihin ja niiden operaatioihin liittyen on olemassa paljon standardeja. Sen sijaan yleiskuljetuksen osalta spesifikaatiot ovat vain löyhästi standardoituja. Muita toimintoja, kuten datan aggregointia, tapahtumien luomista, turvaamista ja jakamista, ei ole standardoitu, vaan ne jäävät avoimelle markkinalle, jotta sidosryhmät voivat luottaa tehokkaisiin alustoihin ja palveluihin tavaroiden seurannassa ja jäljittämisessä logistiikkaketjussa. Satamat ovat keskeisiä paikkoja yhdistää linjaoperaattorit terminaaleihin sekä liittää satamaportit älykkäiden teiden kanssa. (Pagano ym., 2022.)

Saumattoman liikennejärjestelmien integraation saavuttamiseksi tulevaisuudessa on tärkeää, että globaalit ja alueelliset merenkulkuviranomaiset tekevät yhteistyötä hallinnollisen yhtenäistämisen edistämiseksi. (Oloruntobi ym., 2023) Tämä tukee Pfeifer ym. (2020) tutkimusta, jossa huomataan, että jatkuva lippuvaltioiden ja maailmanlaajuisten merenkulkujärjestöjen yhdenmukaistaminen todennäköisesti edistää eri kuljetusmuotojen integrointia.

Oloruntobi ym. (2023) mukaan älyalukset ja älysatamat voivat vähentää meriliikenteen määrää, odotusaikoja, ruuhkia ja kuljetuskustannuksia. Tähän liittyen Pagano ym. (2022) listaavat avainteknologioita, joiden avulla satamista kehitetään älysatamia: kattava 5G verkko nopeaan ja reaaliaikaiseen kaksisuuntaiseen viestintään aluksen ja sataman välillä; IoT tarkkoihin veden syvyystietoihin, reaaliaikaiseen sää- ja meriseurantaan sekä HD-videolähteisiin aluksilla ja satamassa; lohkoketjuteknologia luotettavan rahtitiedon hakemiseen; tekoäly ja koneoppiminen datan yhdistämiseen ja reaaliaikaiseen analyttiseen käsittelyyn.

Pagano ym. (2022) mukaan tekoälyavusteinen ja automatisoitu rahdinhallinta ja -valvonta sekä älykäs sisäsatamanavigointi ovat valmiita innovaatioita käyttöönottaviksi, kun taas satamaporttien automaatio, autonominenreititys odottavat edelleen täyttä käyttöönottoa. Valmiiden ja keskeneräisten palveluiden tulisi perustua standardoituihin spesifikaatioihin, jotta edistetään markkinoiden kilpailukykyä satamien ja digitaalisten palveluntarjoajien välillä (Pagano ym., 2022).

Älykkään sataman tehokkuutta kuvastavat erityisesti vähentyneet kasvihuonekaasupäästöt, alhaisempi energiankulutus, pienemmät viiveet sekä parantunut ennustetarkkuus. Vaikka tarve älykkäiden satamien kehittämiseksi on ilmeinen, aihetta on viime vuosina tutkittu vain pintapuolisesti. Tämä on yllättävää, sillä älysatamilla on merkittävä potentiaali parantaa edellä mainittuja asioita. Tulevaisuuden tutkimus voisi keskittyä uusien sovellusten, satamien välisen yhteistyöalustan, kehittyneiden toiminnanohjausjärjestelmien, älykkäiden alusten ja älysatamien yhteistoiminnan sekä big datan, lohkoketjuteknologian ja kyberturvallisuusratkaisujen kehittämiseen. (Yau ym., 2020.)

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Merikuljetusten merkitys globaalissa kaupankäynnissä on hyvin suuri ja jatkuvasti kasvavan kysynnän takia on jatkuva tarve kehittää merikuljetuksia turvallisempaan, ympäristöystävällisempään ja kustannustehokkaampaan suuntaan. Onneksi nämä tavoitteet kulkevat monesti käsi kädessä. Esimerkiksi reittioptimointi voi edes auttaa näiden kaikkien tavoitteiden toteutumista. Teknologian kehitys on muovannut merikuljetusten toimintoja kiihtyvään tahtiin. Tässä kehityksessä tekoälyn hyödyntäminen on saavuttanut yhä merkittävemmän roolin. Erilaiset tekoälysovellukset mahdollistavat edellä mainittujen tavoitteiden saavuttamisen entistä tehokkaammin. Samalla alan toimijoiden on kuitenkin muistettava tekoälyn rajoitteet ja riskit.

Tämän tutkielman tavoitteena oli selvittää, miten tekoälyä voidaan hyödyntää merikuljetusten kehittämisessä ja minkälaisia hyötyjä tekoälyn avulla voidaan saavuttaa. Tutkimuksessa keskityttiin niihin merikuljetusten osa-alueisiin, joilla tekoälyn hyödyntäminen on mahdollista nyt tai lähitulevaisuudessa. Näiltä osa-alueilta löytyi lukuisia kehityskohteita, joissa erilaisia tekoälysovelluksia pystyttiin hyödyntämään. Aiheeseen liittyvien artikkelien perusteella tekoälyä hyödyntävien sovellusten avulla on mahdollista siirtyä seuraavalle merenkulun ja merikuljetusalan aikakaudelle (Shipping 4.0).

Kuljetusreittien optimoinnissa tekoäly ja koneoppiminen mahdollistavat reaaliaikaisen päätöksenteon muuttuvissa meriolosuhteissa, mikä parantaa merikuljetusten tehokkuutta ja turvallisuutta. AIS-datan, sääennusteiden ja aluksen fyysisten tietojen yhdistäminen koneoppimismalleihin mahdollistaa reittien optimoinnin, mikä johtaa polttoainekulutuksen vähenemiseen ja tarkempiin aikatauluihin.

Sääreititysjärjestelmät ja IoT-datan hyödyntäminen tarjoavat mahdollisuuden ennakoida matalikkoja ja toisia aluksia sekä reagoida muuttuviin olosuhteisiin. Vaikka teknologia on jo tuonut merkittäviä hyötyjä esimerkiksi viivästysten ja onnettomuusriskien vähentämisessä, haasteena ovat edelleen muun muassa meriolosuhteiden vaihtelevuus ja laskentatehon rajoitteet. Jatkuva tekoälyn kehitys ja sensoridatan tehokas käyttö tulevat olemaan avainasemassa navigoinnin ja reittioptimoinnin edistämässä.

Energiatehokkuuden kehittäminen merenkulussa perustuu koneoppimisen ja kehittyneiden simulointiteknologioiden hyödyntämiseen alusten suunnittelussa ja operoinnissa. Tekoäly auttaa optimoimaan polttoainekulutusta ja tukee siirtymää vähäpäästöisiin polttoaineisiin ja vaihtoehtoisiiin propulsioratkaisuihin. Sääreititysjärjestelmä avulla pystytään optimoimaan aluksen nopeutta haastavissa meriolosuhteissa ja vähentämään viivästyksiä.

Älykkäiden päätöksenteon tukijärjestelmien avulla voidaan vähentämään inhimillisten virheiden osuutta merionnettomuuksissa. Turvalliset ja tehokkaat merikuljetukset riippuvat pitkälti älykkäistä navigointijärjestelmistä, joissa on havaintokyky, esteiden väistämisen mahdollistava teknologia ja pitkälle kehittynyt autonominen ohjaus. Vaikka täysin autonomiset alukset ovat realismia vasta vuosien tai vuosikymmenten päästä, tekoälypohjaiset navigointijärjestelmät ja esteiden väistäminen parantavat jo nyt turvallisuutta vähentämällä inhimillisten riskien mahdollisuutta.

On odotettavissa, että jo 2030-luvulla suuri osa aluksista on yhdistettynä toisiinsa sekä satamiin älykkäiden ratkaisujen avulla. Älykkäät satamat mahdollistavat tulevaisuudessa tehokkaan integraation sisämaan kuljetusverkostojen välillä ja konttienkäsittelyn optimointi lyhentää merkittävästi alusten satamakäyntien kestoa. Autonomiset alukset tekevät tuloaan autonomian vaihe kerallaan ja tulevaisuudessa saatetaan nähdä useampien alusten muodostamia laivueita. Tässä kentässä muun muassa kattava 5G verkkoinfrastruktuuri, alusten ja satamien IoT-järjestelmät sekä koneoppimisalgoritmit toimivat keskeisessä roolissa. Tällöin on mahdollista optimoida alusten kulkunopeutta ja toisaalta estää satamien ruuhkautuminen. Kun vältetään turhan alusten odottaminen, myös päästöjä syntyy vähemmän. Nämä tekijät yhdessä muodostavat merkittäviä kustannushyötyjä.

Monia tutkielmassa esitettyjä ratkaisuja ei estä enää teknologian puute, vaan haasteena nousee esiin ihmisten ja teknologian välinen vuorovaikutus sekä sääntelyyn, vastuuseen ja turvallisuuteen liittyvät kysymykset. Olennaista on siis ymmärtää ihmisten rooli tässä muuttuvassa ympäristössä ja varmistaa, ettei tekoälyavusteiset päätöksentekojärjestelmät ja ohjausjärjestelmät tee vahingollisia tai tuntemattomia päätöksiä. Samalla on tärkeää huolehtia tietojärjestelmien suojauksesta kyberhyökkäyksiä vastaan.

Tekoälyn käyttöilmoitus kandityössä

- **Onko tekoälyä käytetty työssä:** kyllä
- **Vastuuvakuutus:** Otan täyden vastuun työn sisällöstä, joka perustuu tekoälyn käyttöön.
- **Tekoälyn käyttö:**
 1. **Työkalut:** Open AI ChatGPT, DeepL
 2. **Käytön tarkoitus:** vieraskielisten lähteiden kääntäminen
 3. **Käytön kuvaus:** Tekoälyä hyödynnettiin apuna haastavien lauserakenteiden kääntämisessä. Valmiita kappaleita ei käännetty tekoälyn avulla, vaan tekoälyä hyödynnettiin kääntämistä avustavana työkaluna.

Lähteet

- 20200827STO85804_fi.pdf. (ei pvm.). Noudettu 23. maaliskuuta 2025, osoitteesta https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2020/9/story/20200827STO85804/20200827STO85804_fi.pdf
- Abbas, A., Rafiee, A., Haase, M., & Malcolm, A. (2022). Geometrical deep learning for performance prediction of high-speed craft. *Ocean Engineering*, 258. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111716>
- Abduljabbar, R., Dia, H., Liyanage, S., & Bagloee, S. A. (2019). Applications of Artificial Intelligence in Transport: An Overview. *Sustainability*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/su11010189>
- Ao, Y., Li, Y., Gong, J., & Li, S. (2023). An artificial intelligence-aided design (AIAD) of ship hull structures. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 8(1), 15–32. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2021.11.003>
- Bakdi, A., & Vanem, E. (2024). Complexity Analysis Using Graph Models for Conflict Resolution for Autonomous Ships in Complex Situations. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 147(031406). <https://doi.org/10.1115/1.4066198>
- Chen, H., Wen, Y., Huang, Y., Xiao, C., & Sui, Z. (2025). Edge Computing Enabling Internet of Ships: A Survey on Architectures, Emerging Applications, and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 12(2), 1509–1528. Scopus. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3491162>
- Chen, X., Ma, D., & Liu, R. W. (2024). Application of Artificial Intelligence in Maritime Transportation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/jmse12030439>
- DNV-GL-Menon-The-Leading-Maritime-Nations-2018_09.pdf. (ei pvm.). Noudettu 28. huhtikuuta 2025, osoitteesta https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2018/09/DNV-GL-Menon-The-Leading-Maritime-Nations-2018_09.pdf
- Enkvist, L. (2019, toukokuuta 16). *Roottoripurje ei tuonutkaan säästöjä Viking Linelle – purjeen kehittäjä pitää testituloksia erinomaisina*. ts.fi. <https://www.ts.fi/uutiset/4579234>
- Europe } G. K. (1421827868000). *China ports grow on back of robust US trade* | *Journal of Commerce*. <https://joc.com/article/china-ports-grow-on-back-of-robust-us-trade-5233784>

- Fan, S., Zhang, J., Blanco-Davis, E., Yang, Z., & Yan, X. (2020). Maritime accident prevention strategy formulation from a human factor perspective using Bayesian Networks and TOPSIS. *Ocean Engineering*, 210, 107544. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107544>
- Ghaderi, H. (2019). Autonomous technologies in short sea shipping: Trends, feasibility and implications. *Transport Reviews*, 39(1), 152–173. <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1502834>
- Haralambides, H. E. (2019). Gigantism in container shipping, ports and global logistics: A time-lapse into the future. *Maritime Economics & Logistics*, 21(1), 1–60. <https://doi.org/10.1057/s41278-018-00116-0>
- Holtrop, J., & Mennen, G. G. J. (1982). An approximate power prediction method. *International Shipbuilding Progress*, 29(335), 166–170. <https://doi.org/10.3233/ISP-1982-2933501>
- Horvath, S., Fasihi, M., & Breyer, C. (2018). Techno-economic analysis of a decarbonized shipping sector: Technology suggestions for a fleet in 2030 and 2040. *Energy Conversion and Management*, 164, 230–241. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.098>
- <https://www.alliedmarketresearch.com>, A. M. R. (ei pvm.). *Maritime Freight Transport Market Size | Analysis Report—2033*. Allied Market Research. Noudettu 20. maaliskuuta 2025, osoitteesta <https://www.alliedmarketresearch.com/maritime-freight-transport-market-A241419>
- Huang, L., Pena, B., Liu, Y., & Anderlini, E. (2022). Machine learning in sustainable ship design and operation: A review. *Ocean Engineering*, 266, 112907. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112907>
- Jović, M., Kavran, N., Aksentijević, S., & Tijan, E. (2019). The Transition of Croatian Seaports into Smart Ports. *2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 1386–1390. <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2019.8757111>
- Khang, A. (2024). An AI-Driven self-sustained approach for redefining urban waste management. *Teoksessa Revolutionizing Automated Waste Treatment Systems: IoT and Bioelectronics* (ss. 77–89). Scopus. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6016-3.ch006>
- Kim, M., Joung, Tae-Hwan, Jeong, Byongug, & Park, H.-S. (2020). Autonomous shipping and its impact on regulations, technologies, and industries. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 4(2), 17–25. <https://doi.org/10.1080/25725084.2020.1779427>
- Kinder, T. (2024, elokuuta 18). Biggest US companies warn of growing AI risk. *Financial Times*.

- Kondratenko, A. A., Zhang, M., Tavakoli, S., Altarriba, E., & Hirdaris, S. (2025). Existing technologies and scientific advancements to decarbonize shipping by retrofitting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 212*, 115430. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115430>
- Korberg, A. D., Brynolf, S., Grahn, M., & Skov, I. R. (2021). Techno-economic assessment of advanced fuels and propulsion systems in future fossil-free ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 142*, 110861. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110861>
- Krčum, M., Zubčić, M., Kaštelan, N., & Gudelj, A. (2021). Reducing the dimensions of the ship's main switchboard—A contribution to energy efficiency. *Energies, 14*(22). Scopus. <https://doi.org/10.3390/en14227567>
- Legorburu, I., Johnson, K. R., & Kerr, S. A. (2018). Shipping: Shipbuilding and maritime transportation. *Teoksessa Building Industries at Sea: "Blue Growth" and the New Maritime Economy* (ss. 257–284). Scopus.
- Liu, C. I., Jula, H., Vukadinovic, K., & Ioannou, P. A. (2000). Comparing different technologies for containers movement in marine container terminals. *ITSC2000. 2000 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.00TH8493)*, 488–493. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2000.881118>
- Liu, R. W., Liang, M., Nie, J., Deng, X., Xiong, Z., Kang, J., Yang, H., & Zhang, Y. (2021). *Intelligent Data-Driven Vessel Trajectory Prediction in Marine Transportation Cyber-Physical System*. 314–321. Scopus. <https://doi.org/10.1109/iThings-GreenCom-CPSCoM-SmartData-Cybermatics53846.2021.00058>
- Long, L. N. B., You, S.-S., Cuong, T. N., & Kim, H.-S. (2025). Optimizing quay crane scheduling using deep reinforcement learning with hybrid metaheuristic algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 143*, 110021. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110021>
- MacKinnon, S. N., Weber, R., Olindersson, F., & Lundh, M. (2020). Artificial Intelligence in Maritime Navigation: A Human Factors Perspective. *Advances in Intelligent Systems and Computing, 1212 AISC*, 429–435. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50943-9_54
- Mallam, S. C., Nazir, Salman, & and Sharma, A. (2020). The human element in future Maritime Operations – perceived impact of autonomous shipping. *Ergonomics, 63*(3), 334–345. <https://doi.org/10.1080/00140139.2019.1659995>

- Martin Cames, J. G., & Cook, V. (2015). *Emission Reduction Targets for International Aviation and Shipping: A Study for the European Parliament*. <https://policycommons.net/artifacts/1334721/emission-reduction-targets-for-international-aviation-and-shipping/1940504/>
- Mukhamediev, R. I., Popova, Y., Kuchin, Y., Zaitseva, E., Kalimoldayev, A., Symagulov, A., Levashenko, V., Abdoldina, F., Gopejenko, V., Yakunin, K., Muhamedijeva, E., & Yelis, M. (2022). Review of Artificial Intelligence and Machine Learning Technologies: Classification, Restrictions, Opportunities and Challenges. *Mathematics*, 10(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/math10152552>
- Oloruntobi, O., Mokhtar, K., Gohari, A., Asif, S., & Chuah, L. F. (2023). Sustainable transition towards greener and cleaner seaborne shipping industry: Challenges and opportunities. *Cleaner Engineering and Technology*, 13. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100628>
- Pagano, P., Antonelli, S., & Tardo, A. (2022). C-Ports: A proposal for a comprehensive standardization and implementation plan of digital services offered by the “Port of the Future”. *Computers in Industry*, 134, 103556. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103556>
- Pfeifer, A., Prebeg, P., & Duić, N. (2020). Challenges and opportunities of zero emission shipping in smart islands: A study of zero emission ferry lines. *eTransportation*, 3, 100048. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100048>
- Porathe, T., Prison, J., & Man, Y. (2014). Situation awareness in remote control centres for unmanned ships. *Proceedings of Human Factors in Ship Design & Operation, 26-27 February 2014, London, UK*, 93–101.
- Ray, T., Gokarn, R. P., & Sha, O. P. (1995). A global optimization model for ship design. *Computers in Industry*, 26(2), 175–192. Scopus. [https://doi.org/10.1016/0166-3615\(95\)00003-M](https://doi.org/10.1016/0166-3615(95)00003-M)
- Sharma, T., Bedi, J., Anand, A., & Aggarwal, A. (2024). Wave Height Prediction in Maritime Transportation Using Decomposition Based Learning. *Trans. Intell. Transport. Sys.*, 25(5), 4304–4313. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3322192>
- Sheikh, H., Prins, C., & Schrijvers, E. (2023). Artificial Intelligence: Definition and Background. Teoksessa H. Sheikh, C. Prins, & E. Schrijvers (Toim.), *Mission AI: The New System Technology* (ss. 15–41). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21448-6_2

- Sullivan, B. P., Desai, S., Sole, J., Rossi, M., Ramundo, L., & Terzi, S. (2020). *Maritime 4.0—Opportunities in digitalization and advanced manufacturing for vessel development*. 42, 246–253. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.078>
- The state of AI in 2023: Generative AI's breakout year* | McKinsey. (ei pvm.). Noudettu 20. huhtikuuta 2025, osoitteesta <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai-in-2023-generative-ais-breakout-year>
- Tilastokeskus. (ei pvm.). *Tilastokeskus*. Tilastokeskus. Noudettu 19. huhtikuuta 2025, osoitteesta https://stat.fi/tup/suoluk/suoluk_kansantalous.html
- Vettor, R., & Guedes Soares, C. (2016). Development of a ship weather routing system. *Ocean Engineering*, 123, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.06.035>
- Wang, T., Wu, Q., Zhang, J., Wu, B., & Wang, Y. (2020). Autonomous decision-making scheme for multi-ship collision avoidance with iterative observation and inference. *Ocean Engineering*, 197. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106873>
- Wang, W., & Siau, K. (2019). Artificial Intelligence, Machine Learning, Automation, Robotics, Future of Work and Future of Humanity: A Review and Research Agenda. *Journal of Database Management (JDM)*, 30(1), 61–79. <https://doi.org/10.4018/JDM.2019010104>
- webmaster. (ei pvm.). *Accident Investigation Publications*. Noudettu 23. huhtikuuta 2025, osoitteesta <https://www.emsa.europa.eu/accident-investigation-publications/annual-overview.html>
- What Is Artificial Intelligence (AI)?* | IBM. (2024, elokuuta 9). <https://www.ibm.com/think/topics/artificial-intelligence>
- Yau, K.-L. A., Peng, S., Qadir, J., Low, Y.-C., & Ling, M. H. (2020). Towards Smart Port Infrastructures: Enhancing Port Activities Using Information and Communications Technology. *IEEE Access*, 8, 83387–83404. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990961>
- Zeńczak, W., & Gromadzińska, A. K. (2020). Preliminary Analysis of the Use of Solid Biofuels in a Ship's Power System. *Polish Maritime Research*, 27(4), 67–79. <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0067>
- Zhang, M., Taimuri, G., Zhang, J., Zhang, D., Yan, X., Kujala, P., & Hirdaris, S. (2025). Systems driven intelligent decision support methods for ship collision and grounding prevention: Present status, possible solutions, and challenges. *Reliability Engineering & System Safety*, 253, 110489. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110489>

- Zhang, X., Fu, X., Xiao, Z., Xu, H., & Qin, Z. (2022). Vessel Trajectory Prediction in Maritime Transportation: Current Approaches and beyond. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(11), 19980–19998. Scopus. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3192574>
- Zhang, X., Wang, C., Jiang, L., An, L., & Yang, R. (2021). Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey. *Ocean Engineering*, 235, 109380. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109380>
- Zhang, X.-Y., Ji, M.-J., Yao, S., & Chen, X. (2015). Optimising Feeder Routing for Container Ships through an Electronic Chart Display and Information System. *Journal of Navigation*, 68(5), 848–868. Scopus. <https://doi.org/10.1017/S0373463315000211>

Kirjallisuuslähteet

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092575351300266X>

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03088839.2021.1875142>

<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/13598541311293195/full/html?mobileUi=0&fullSc=1&mbSc=1&fullSc=1&fullSc=1>

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03088839.2020.1729432?src=recsys>

https://www.utupub.fi/bitstream/handle/10024/150868/B211_Satamien_digitalisaation_tulevaisuuden_skenariot_2030.pdf?sequence=1