

Konttilaivaston reittioptimoinnista

Jaakko Ahola

Pro gradu -tutkielma
Syyskuu 2015

MATEMATIIKAN JA TILASTOTIETEEN LAITOS
TURUN YLIOPISTO

TURUN YLIOPISTO
Matematiikan ja tilastotieteen laitos

AHOLA, JAAKKO: Konttilaivaston reittioptimoinnista
Pro gradu -tutkielma, 111 s., 28 liites.
Sovellettu matematiikka
Syyskuu 2015

Työssä kerrotaan laajasti konttilaivaukseen liittyvästä taustasta ja siihen vaikuttavista tekijöistä, joista tärkeimpiin kuuluvat muun muassa laivojen eri reititystopologiat, linjalaivaaajien suunnittelutasot ja kysynnän vaihtelut. Lisäksi työssä tarkastellaan konttien kuljettamiseen liittyviä tutkimuksia yleisen kirjallisuuskatsauksen osalta ja lähempään matemaattiseen tarkasteluun otetaan muutamia kirjallisuudesta löytyviä optimointimalleja.

Työn tärkeimpänä antina voidaan pitää luotua reittioptimointimallia. Monimutkaisesta mallista ratkaistaan osittain vakioitu yksinkertainen esimerkkitapaus. Lopuksi mallin jatkokehittämiseen ja ratkaisuun liittyviä tekijöitä tarkastellaan.

Asiasanat: mallinnus, optimointi, reititys, lyhyimmän reitin ongelma, selkäreppuongelma, linjalaivaus, syöttöliikenne, modeling, optimization, routing, shortest path problem, knapsack problem, liner shipping, feeder service, vehicle routing problem

Alkusanat

Tämä pro gradu -tutkielma on saanut alkusysäyksensä jo syksyllä 2013, jolloin Matematiikan ja tilastotieteen laitoksen järjestämällä mallinnusprojektiurssilla MacGregor Oy tilasi työn ryhmältä, johon kuului Suvi Vesterinen, Valtteri Raiko sekä allekirjoittanut. Tavoitteena oli optimoida konttilaivaston kulkua. Lopulta pitkällisen mallinnuksen jälkeen päädyttiin malliin, jossa optimoidaan yhden laivan kulkunopeutta määrättyllä reitillä (Ahola et al. [2]). Tammikuussa 2015 tämä tutkielma sai alkunsa MacGregor Oyn toimiessa edelleen työn tilaajana. Tavoitteena ei tällä kertaa ollut niinkään edellisen mallin parantelu vaan ongelman tarkastelu uudesta näkökulmasta. Päälähteenä tässä työssä on Olcay Polatin väitöskirja [109], jota referoidaan erityisesti johdannossa ja kirjallisuuskatsauksessa. Muita merkittävimpiä lähteitä ovat Mulder & Dekker [97]; Agarwal & Ergul [1]; Chuang et al. [25] ja Chen & Zeng [19].

Haluan kiittää ohjaajaani Marko Mäkelää, työn tilaajan edustajia ja ohjaajia Janne Suomista ja Henri Paukkua, MacGregor Oy:tä rahoituksesta ja työskentelypisteen käyttämisestä sekä Stefan Emetiä, Teemu Linkosaarta (Turun yliopisto) ja Mikael Nybergiä (Åbo Akademi), jotka auttoivat apumuuttujen linearisoinneissa ja mallin implementoinnissa GAMS-optimointikielille.



Kuva 0.1: 18 800 TEU:n konttilaiva Barzan [51]

Sisältö

1	Johdanto	1
1.1	Konttilaivaliikennöinnin taustaa	2
1.1.1	Konttien historiaa	4
1.1.2	Konttityyppejä	4
1.1.3	Alukset	5
1.1.4	Satamat	7
1.1.5	Kauppaliikenne	8
1.1.6	Maaliikenne	10
1.2	Linjalaivaaminen	10
1.2.1	Alkuperä	10
1.2.2	Linjalaivaajat	10
1.2.3	Rahtihinnat	12
1.2.4	Satamamaksut	13
1.3	Palveluverkot	13
1.4	Syöttöliikenne	16
1.4.1	Taustaa	16
1.4.2	Suoran palvelun edut	17
1.4.3	Epäsuoran palvelun edut	17
1.4.4	Modernit hub-and-spoke-palveluverkot	18
1.4.5	Syöttöliikenteen palveluverkot	19
1.4.6	Emo- ja syöttöliikenteen erot	20
1.4.7	Syöttöliikenteen tehokkuuteen vaikuttavat tekijät	22
1.5	Kysynnän vaihtelut	24
1.6	Suunnittelutasot	26
1.6.1	Strateginen suunnittelutaso	28
1.6.2	Taktinen suunnittelutaso	29
1.6.3	Operatiivinen suunnittelutaso	29
2	Kirjallisuuskatsaus	31
2.1	Linjalaivauksen palveluverkon suunnittelu	31
2.2	Syöttöliikenteen suunnittelu ja kuljetusongelma	39
2.3	Linjalaivaus epävakaa kysynnän vaikutuksen alla	39
2.4	Muita konttilaivaukseen liittyviä ongelmia	44
3	Kirjallisuudessa esiintyvien matemaattisten mallien tarkas- telu	45
3.1	Kulkuneuvon reititysongelma yhtäaikaaisella ja aikarajoitteisel- la noutamisella ja toimituksella	45
3.2	Syöttöliikenteen konttilaivojen reititysongelma	47

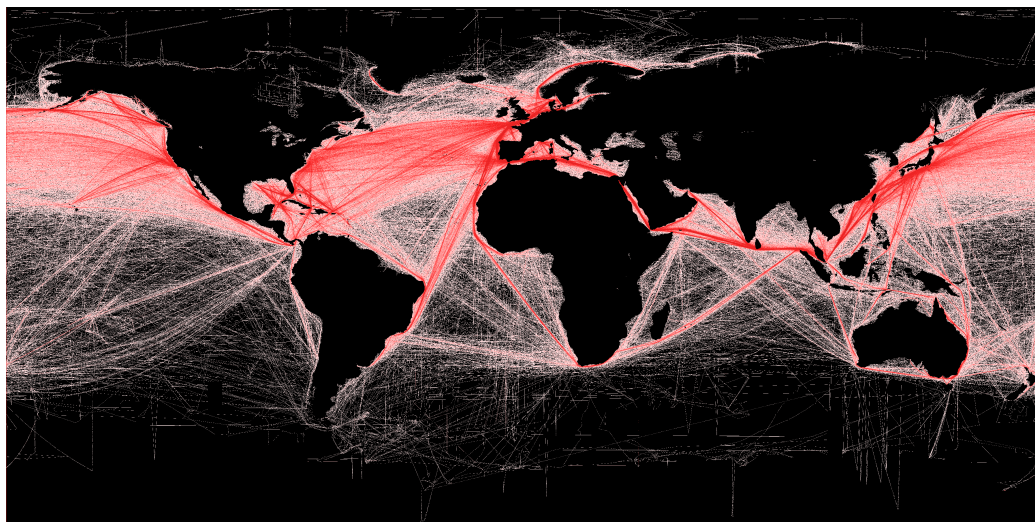
3.3	Syöttöliikenteen palveluverkon suunnitteluongelma	50
3.4	Linjalaivauksen palveluverkon suunnittelu epävakaan kysynnän vallitessa	55
3.5	Yhdistetty laivaston koostumus- ja aikataulutusetongelma sekä konttien reititysongelma	60
3.5.1	Konttien reititysmalli	63
4	Matemaattinen malli	67
4.1	Reittimalli	67
4.2	Työn määrittely ja optimointimalli	70
4.3	Parametrien yksikkömuunnokset ja skaalaus	81
4.4	Päätös- ja apumuuttujien parametrisointi	82
5	Laskennalliset kokeet esimerkkitapauksella	84
5.1	Parametrisoidun mallin tulokset	87
5.2	Täyden mallin ratkaisut	93
6	Yhteenveto ja mallin jatkokehittäminen	94
	Lähteet	96
	Liitteet	1
A	Sanastoa	1
B	Konttilaivojen pääoma- ja operointikustannukset vuonna 2015	5
C	Koodilistaukset	7
C.1	GAMS-koodit	7
C.2	Python-aliohjelmia	26

1 Johdanto

Suurien konttilaivojen aikakaudella globaalit konttilaivavarustamot suunnittelevat toimintareittinsä hub-and-spoke-verkkoina (ks. kuva 1.9), jotta lyhyillä merimatkoilla päästään pienivolyymisille markkinoille vähäisemmillä kustannuksilla. Ison konttialuksen ei ole välttämättä kannattavaa käydä laivareitin jokaisessa satamassa. Juuri tähän ongelmaan pyritään tässä pro graduissa hakemaan vastausta. Tutkielmaan kuuluu myös suhteellisen kattava kirjallisuuskatsaus siitä, miten laajasti konttilaivojen liikennettä on tutkittu eri näkökulmista.

Rahtilaivaoperointi on suuren pääoman liiketoimi. Yhden laivan hankintakustannukset pyörivät miljoonissa dollareissa ja päivittäisetkin kustannukset voivat olla kymmeniä tuhansia dollareita yhdellä laivalla (Agarwal & Ergun [1]). Näin ollen optimointiin perustuvien päätöksentekotyökalujen kehittäminen on tarpeellista laivaston tehokkaan hallinnan kannalta. Vaikka optimiratkaisua ei välttämättä löydettäisikään, vallitsevan tilanteen parantamisellakin voi olla suuret vaikutukset.

Hub-and-spoke-verkko tarkoittaa sellaista järjestelmää, jossa yhdestä tai useammasta solmukohtasatamasta kuljetetaan kontteja lähialueen pienempiin satamiin pienillä tai keskikokoisilla konttilaivoilla eli syöttöliikenneläivoilla (eng. feeder ships). Suuremmat konttilaivat eli niin kutsutut emoalukset (eng. mother ships) kulkevat solmukohtien välillä. Tällainen järjestelmä on tunnetusti käytössä myös matkustajalentoliikenteessä.



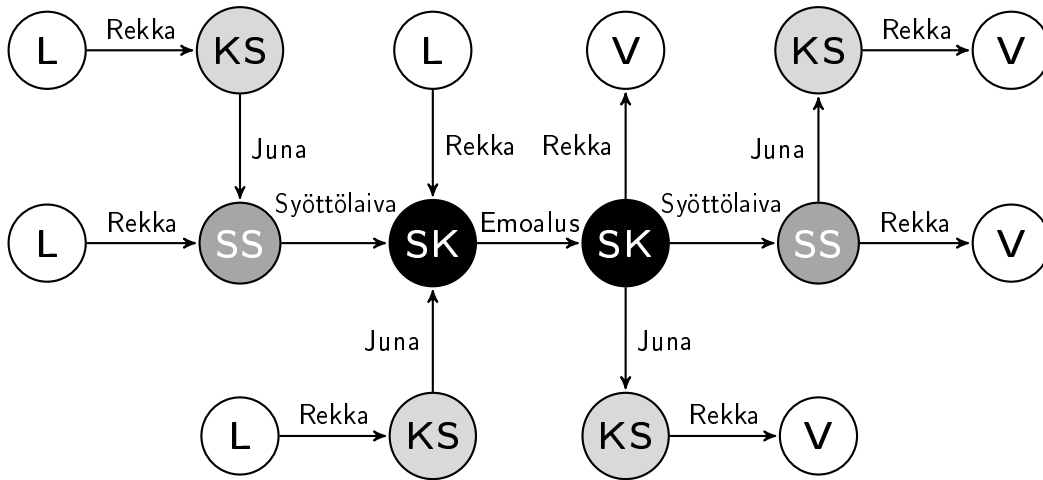
Kuva 1.1: Laivareitit [146]

1.1 Konttilaivaliikennöinnin taustaa

1800-luvulta lähtien maailmanlaajuisen kuljetuksen merkitys on kasvanut samaa tahtia kuin maailmankauppa. Teollisesta vallankumouksesta ja raakamateriaalien saatavuudesta johtuen maailmankauppa kasvoi merkittävästi 1900-luvulla, kun tavaraa kuljetettiin pääosin lännestä itään. Maailmansotien jälkeen suunta on alkanut vähitellen kääntymään itämaiden kehittyessä.

Maailmankauppa on kehittänyt uusia globaaleja kuljetusverkkoja. Rahti kuljetetaan perille eri kuljetusmuotojen yhdistelmällä. Rahti voi kulkea maanteilla, rautateilla, ilmassa tai meriteillä ilman rahdin itsensä käsittelyä vaan se kuljetetaan usein konteissa, joita on helppo siirtää eri kuljetusmuotojen välillä.

Esimerkiksi laivaliikenteeseen pohjautuva kuljetusverkko voi muodostua siten, että ensin lähtömaasta kontit kuljetetaan maanteitse tai junalla satamaan. Lähtösatamasta ja muista lähialueen satamista syöttöliikenteen laiva (eng. feeder ship) kerää kontit paikalliseen solmukohtasatamaan. Suuret emoalukset kuljettavat kontit määränpääalueen solmukohtasatamaan, josta syöttöliikenteen laiva kuljettaa kontit määränpääsatamiin, joista rekat tai junat kuljettavat kontit lopulta vastaanottajilleen. Edellä mainitun kaltainen tyypillinen kuljetusverkko on piirrettynä kuvassa 1.2.



Kuva 1.2: Tyypillinen meriliikenteeseen pohjautuva kuljetusverkko
L: lähettäjä, **KS:** kuivasatama (eng. dry port) (YLE [168]), **SS:** syöttöliikenteen satama (eng. feeder port), **SK:** solmukohta (eng. hub port), **V:** vastaanottaja (Polat [109], s. 2)

Maantieteellisistä rajoituksista huolimatta pitkillä etäisyyksillä on usein ajan ja kustannusten suhteen kannattavaa käyttää useita kuljetusmuotoja.

Rekat ovat suhteellisen nopeita ja joustavia ja niillä pääsee useisiin kohteisiin. Rekat ovat kuitenkin melko kalliita ja kuljetuskapasiteetti on hyvin rajoittunut. Junat ovat halvempia ja niillä on suurempi kuljetuskapasiteetti, mutta kulkureitit ovat rajoittuneempia. Laivat kykenevät kuljettamaan suuria määriä rahtia edullisesti, mutta vauhti on melko hidask. Tässä tutkielmassa keskitytään ainoastaan konttilaivaliikenteeseen.

Meriteitse kulki vuonna 2010 80 prosenttia maailman rahdista (UNCTAD [133]). Näin suuri prosentuaalinen osuus tekee siitä merkittävimmän kuljetusmuodon. Laivamarkkinoiden katsotaan käsittävän kolme eri toimintamuotoa, jotka ovat hakurahtilaivaaminen (eng. tramp shipping), teollinen laivaaminen (eng. industrial shipping) ja linjalaivaaminen (eng. liner shipping) (Lawrence [71]). Hakurahtilaivoja käytetään suoriin toimituksiin tuottavimpien konttien osalta tietyn aikaikkunan sisällä. Hakurahtilaiva odottaa usein satamassa siihen asti, että se on täyteen lastattu. Hakurahtilaivojen toiminta on siten hyvin epäsäännöllistä. Teollisessa laivaamisessa rahdin omistaja hallinnoi laivaa ja se pyrkii minimoimaan laivaamisen kustannukset. Linjalaivaaminen tarkoittaa sitä, että yksi tai useampi laiva kulkee useiden satamien kautta siten, että sillä on määrätty julkinen reitti ja aikataulu (Christiansen et al. [23]). Hakurahtilaivausta voidaan verrata taksin käyttämiseen, teollista laivaamista oman auton omistamiseen ja linjalaivausta linja-autoliikenteeseen. Tässä tutkielmassa keskitytään linjalaivaamiseen eli liner-operointiin.

Jos merirahtia tarkastellaan vetoisuuden kannalta, niin suurin osa kuljetuksista tapahtuu hakurahtilaivoilla ja teollisella laivauksella. Kuitenkin hinnan mukaan määriteltynä 70 prosenttia rahdista linjalaivataan (UNCTAD [133]). Maailmanlaajuinen konttikauppa on kasvanut 28,7 miljoonasta TEU:sta (eng. Twenty-foot Equivalent Unit) vuonna 1990 160 miljoonaan TEU:hun vuonna 2013 ja satamien konttiläpisyttö on kasvanut 88 miljoonasta TEU:sta 651,1 miljoonaan TEU:hun samalla aikavälillä (UNCTAD [134]). Konttien kuljetus on kasvanut vuosittain 8-10 prosenttia (Hingorani et al. [53]).

Vaikka konttikauppa on kasvanut huomattavasti, rahdin hinta (eng. freight rate) on kuitenkin alullepanosta lähtien laskenut voimakkaasti. Alhaiset hinnat, kasvavat polttoainekustannukset ja viimeaikaiset finanssikriisit ovat vaikuttaneet alaan voimakkaasti, ja toimijat pyrkivätkin suunnittelemaan palveluverkkojaan yhä tehokkaammin.

Samalla, kun konttien kuljetusmäärät ovat nousseet, myös linjalaivauksen monimutkaisuus on kasvanut. Linjalaivalla on usein maailmanlaajuinen palveluverkko, joka koostuu määrätyn aikataulun mukaan kuljetusta muutamasta runkoreitistä useiden mantereiden välillä. Linjalaivalla on periaatteessa kaksi vaihtoehtoista suunnitelmaa palveluverkolleen: joko multi-port-calling (MPC), emoalus käy kaikissa satamissa tai hub-and-spoke-palvelu-

verkko (H&S), jossa suuret emoalukset (eng. mother ships) kulkevat pitkillä merimatkoilla solmukohtasatamien välillä ja syöttösatamia (eng. feeder ports) palvelevat syöttölaivat (eng. feeder ships) lyhyillä merimatkoilla.

Hub-and-spoke-verkkojen kehitys on kasvattanut syöttöliikenteen suunnittelun tarvetta. FND-ongelma (eng. feeder service network design problem) pyrkii löytämään optimaalisen ratkaisun syöttöliikenteen toiminnalle. Purjehduskaudella syöttöliikenteen optimaalinen palveluverkko muodostuu taktisista päätöksistä esimerkiksi laivojen määrän, koon, omistamisen, vuokrauksen, reittien ja aikataulujen suhteen. Näihin päätöksiin vaikuttavat laivojen ja satamien ominaisuudet, laivojen operointi- ja vuokrauskustannukset, polttoainekustannukset sekä satamien konttikysynät.

Samoin kuin maailmankauppaan, konttien läpisyöttömääriin vaikuttavat paikalliset ja maailmanlaajuiset kriisit sekä kausittaiset vaihtelut. Konttimäärien heilahtelun ennustaminen on hyvin merkittävää reittien suunnittelun kannalta. Ennustamiseen on kehitetty useita menetelmiä, esimerkiksi Olcay Polatin väitöskirjassa on luotu keinotekoinen neuroverkkoalgoritmi ennustamista varten [109]. Myös Li & Xu [77] ja Liu et al. [81] ovat tutkineet aiheetta. Lisätietoa aiheesta löytyy luvusta 1.5. Kaikkien edellä mainittujen tekijöiden dynaamisen luonteen ymmärtäminen on tärkeää, jotta voidaan luoda joustavia ja ketteriä palveluverkkoja.

1.1.1 Konttien historiaa

Tuhansien vuosien ajan laivoja on käytetty kuljettamaan rahtia maasta toiseen. Ennen konttien kehittämistä, irtolasti kuljetettiin esimerkiksi laatikoissa, kuormalavoilla tai tynnyreissä. Rahdin ahtaaminen oli hyvin kallista ja aikaa vievää. Vanha sota-alus muutettiin ensimmäiseksi konttialukseksi vuonna 1956 Malcom McLeanin toimesta. McLeanin ideana oli, että rahtia voitaisiin siirtää eri kuljetusmuotojen välillä mahdollisimman vähällä vaivalla. Lisätietoja konttien laivaamisen historiasta löytyy esimerkiksi Levinsonilta [72].

1.1.2 Konttityyppejä

Vuonna 1961 International Organization for Standardization (ISO) asetti standardit konttien mitoille, joista osa näkyy taulukossa 1 (Wikipedia [151]). Standardikonteista yleisin on 40-jalkainen kontti (eng. FEU = Forty-foot Equivalent Unit) ja toiseksi yleisin on 20-jalkainen kontti (eng. TEU = Twenty-foot Equivalent Unit) (World Shipping [162]). Standardikonttien lisäksi on olemassa useita erilaisia kontteja, kuten ylhäältä tai sivulta avoimia kontteja,

räkkikontteja, jäädytettyjä kontteja (eng. reefer) ja säiliökontteja. Jäädytettyjen konttien yleisimmät pituudet ovat 20 ja 40 jalkaa.

Maailmalla liikkuu yli 20 miljoonaa konttia, joiden yhteenlaskettu tilavuus vastaa 31,25 miljoonaa TEU:ta (UNCTAD [133]). Lisäinformaatioita konttien standardisoinnista löytyy esimerkiksi Levinsonilta [72] ja Wikipediasta [151].

	20'-kontti (TU)	40'-kontti (FU)	40' high-cube	45' high-cube
Ulkoisen pituus	20'0"	40'0"	40'0"	45'0"
Ulkoisen leveys	8'0"	8'0"	8'0"	8'0"
Ulkoisen korkeus	8'6"	8'6"	9'6"	9'6"
Sisätilavuus	33,1 m ³	67,5 m ³	75,3 m ³	86,1 m ³
Maksimibruttopaino	30400 kg	30400 kg	30848 kg	30400 kg
Tyhjä paino	2200 kg	3800 kg	3900 kg	4800 kg
Nettolastauspaino	28200 kg	26600 kg	26850 kg	25600 kg

Taulukko 1: Yleisimpien, ensisijaisesti kuivalle lastille tarkoitettujen, konttityyppien ISO-standardit (pituusyksiköt jalcoja ja tuumia) (Wikipedia [151])

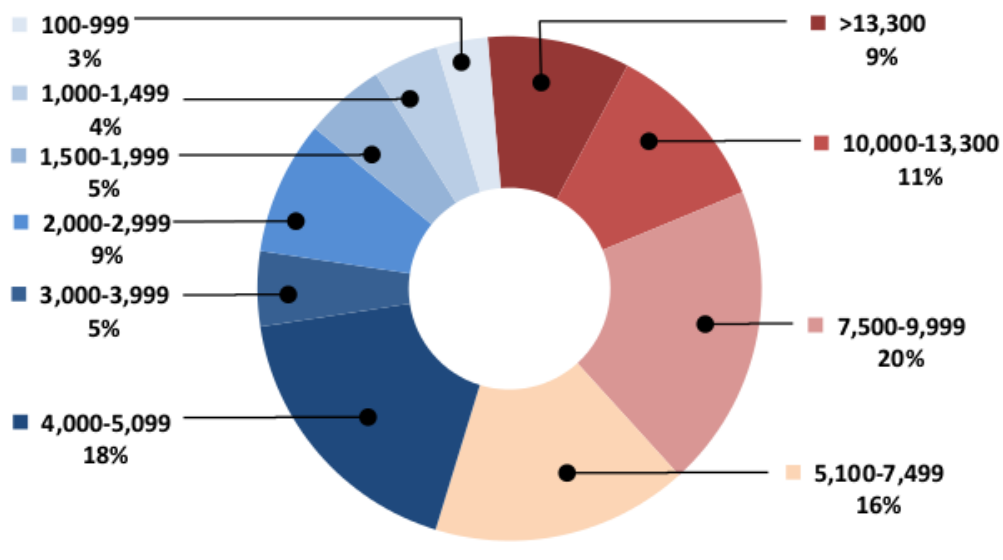
1.1.3 Alukset

Konttilaivojen tehokkuutta on parannettu jatkuvasti vuodesta 1956 lähtien, jolloin ensimmäiset konttilaivat kehitettiin. Laivojen maksimikoko on kasvanut 9,66 kertaiseksi vuodesta 1976, jolloin se oli 1500 TEU:ta, vuoteen 2012, jolloin se oli jo 16000 TEU:ta. Polttoainetehokkuus 4500 TEU:n laivoilla on parantunut 35 prosenttia vuosien 1985 ja 2008 välillä. Hiilidioksidipäästöjen hyötysuhde (rahdin volyyymi merimailia kohden) on tehostunut 75 prosenttia vuoden 1976 1500 TEU:n laivan ja vuoden 2012 16000 TEU:n laivan välillä.

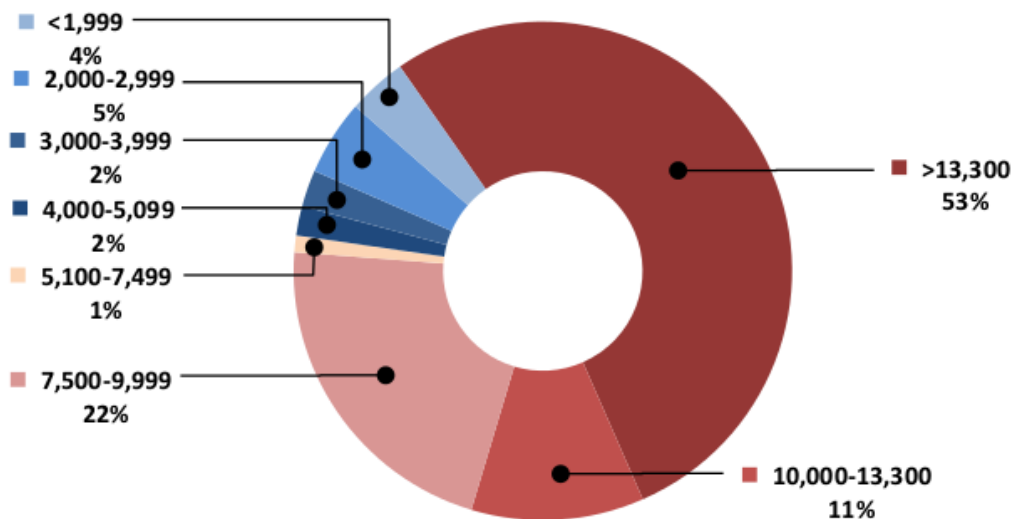
Alphalinerin mukaan [4]; [5] konttilaivaston koko on miltei kolminkertaistunut ja kapasiteetti 8,5-kertaistunut vuodesta 1990. Keskimääräinen konttilaivan kapasiteetti on kasvanut 2,48-kertaiseksi vuosien 1990 (1390 TEU) ja 2014 välillä (3454 TEU) (Alphaliner [4]; [6]). Toukokuussa 2015 maailmalla olevien noin viiden tuhannen konttilaivan yhteenlaskettu kapasiteetti oli lähes 19 miljoonaa TEU:ta. Konttilaivojen koko kasvaa jatkuvasti. Nykyisistä laivoista 40 prosenttia on kapasiteetiltaan yli 7500 TEU:n laivoja (ks. kuva 1.3) ja tilauskirjassa olevista laivoista 86 prosenttia oli yli 7500 TEU:n laivoja (ks. kuva 1.4). (Alphaliner [6].)

Konttilaivoja voidaan luokitella sukupolven, tyyppin, tai sen mukaan pääsevätkö ne kulkemaan merkittävimmistä kanavista läpi (Panama, Suez)

(ks. taulukko 2). Lisäinformaatiota konttilaivojen luokittelusta löytyy Chan & Leen teoksesta [17] ja Wikipediasta [148].



Kuva 1.3: Konttilaivojen kapasiteettien (TEU) osuudet (Alphaliner [6], s. 2)



Kuva 1.4: Konttilaivojen kapasiteettien (TEU) osuudet tilauskirjassa (Alphaliner [6], s. 2)

Syöttöliikenteen laivat (eng. feeder ships) on usein muokattu varusteiltaan tarkoituksenmukaisiksi, jotta niillä voidaan käydä pienissä satamissa, joissa

ei ole konttinostureita (eng. quay crane). Syöttöliikenteen laivojen määritelmä riippuu käyttötarkoituksesta. Pienimpiä syöttölaivoja käytetään joissa ja kanaaleissa, suurempia käytetään yhdessä suuren luokan konttilaivojen kanssa. Konttialukseen lastattavien konttien koko ja aluksen kapasiteetti on merkittävä tekijä matemaattisissa mallissa.

Nimi	Kapasiteetti (TEU)	Pituus (m)	Leveys (m)	Syväys (m)
Ultra Large Container Vessel (ULCV)	>14501	>366	> 49	>15,2
New panamax	10001-14500	366	49	15,2
Post panamax	5101-10000	366	49	15,2
Panamax	3001-5100	294,13	32,31	12,04
Feedermax	2001-3000			
Feeder	1001-2000			
Small feeder (barge)	<1000			

Taulukko 2: Konttilaivojen kokoluokittelu (Wikipedia [148])

1.1.4 Satamat

Satamissa konttialukset ja junat tai rekat pystyvät purkamaan ja lastaamaan kontteja. Satamissa myös varastoidaan kontteja. Muun muassa varastointiin, konttien lastaamiseen ja konttien sijoittamiseen laivoihin liittyy omat matemaattiset ongelmansa, joihin ei tässä työssä puututa. Lisätietoja esimerkiksi seuraavista tutkimuksista: Yang & Kim [166]; Lee, D.H. et al. [73], Lee, L.H. et al. [74]. Laivojen satamassaoloaika riippuu lastaamiseen tai purkamiseen osoitetuista konttinostureista ja terminaalitoimintojen tehokkuudesta (Notteboom [101]). Myös inhimilliset tekijät vaikuttavat ankkurointiin. Yhdessä satamassa voi olla myös useampia konttiterminaalioperaattoreita. Lisätietoja näistä löytyy muun muassa seuraavasta tutkimuksesta: Steenken et al. [127].

Konttilaivaamisen kehitys on johtanut konttisatamien luokitteluun kolmeen eri luokkaan: solmukohtasatamiin (eng. hub ports), syöttöliikenteen satamiin (eng. feeder ports) ja emosatamiin (eng. trunk/main ports)

(Zeng & Yang [172]). Solmukohtasatamissa kontit lastataan uudelleen syöttöliikenteen laivoista emoaluksiin. Syöttöliikenteen satamat ovat tiettyjen talousalueiden yhdyskäytäviä, jotka liittyvät merentakaisiin satamiin syöttöliikenteen laivojen ja solmukohtasatamien kautta. Emosatamat ovat tiettyjen talousalueiden satamia, jotka ovat emoalusten määräsatamia, johtuen niiden suhteellisen korkeasta kysynnästä. Taulukossa 3 on lueteltu maailman suurimpia satamia vuonna 2014.

Sijointus	Satama	TEU
1	Shanghai	35 285 500
2	Singapore	33 869 300
3	Shenzhen	24 037 326
4	Hong Kong	22 226 000
5	Ningbo-Zhoushan	19 450 000
6	Busan	18 651 883
7	Qingdao	16 624 400
8	Guangzhou	16 160 000
9	Dubai	15 249 000
10	LA/LB	15 160 872
11	Tianjin	14 050 000
12	Rotterdam	12 297 570
13	Port Kelang	10 945 804
14	Kaohsiung	10 562 554
15	Dalian	10 127 600
16	Hamburg	9 775 745
17	Antwerp	8 962 000
18	Xiamen	8 572 400
19	Tanjung Pelepas	8 522 936
20	Laem Chabang	6 583 165

Taulukko 3: 20 suurinta satamaa vuonna 2014 (Alphaliner [6], s. 26)

1.1.5 Kauppaliikenne

Kansainvälisen kaupan vientiä hallitsee vahvasti Itä-Aasian maat. Suur-Kiinan (sis. Taiwan ja Hong Kong) osuus merirahdin viennistä oli noin 31,50 prosenttia vuonna 2010 (IHS [60]). Kymmenen suurinta vientimaata käsittää 62,11 prosenttia ja kaksikymmentä suurinta vientimaata käsittää 75,68 prosenttia koko kansainvälisestä viennistä. Tuontikauppa on sen sijaan hajautunut melko tasaisesti, poikkeuksena Yhdysvaltojen ja Kiinan yhteenlaskettu

osuus 25,90 prosenttia. Toisin kuin vientipuolella kymmenen suurinta tuontimaata toivat maahan vain 48,73 prosenttia kaikesta tuontirahdistä. Toisaalta samoin kuin vientipuolella kaksikymmentä suurinta tuontimaata toi maahan 75 prosenttia kansainvälisestä tuonnista. (IHS [60].)

Suurimpana viejänä ja toiseksi suurimpana tuojana Suur-Kiina hallitsee suurta osaa laivareiteistä. Suur-Kiinaan suuntautuneet reitit käsittävät 46,73 prosenttia kaikista reiteistä (IHS [60]). Kymmenen suurinta kauppareittiä käsittää 39,28 prosenttia ja kaksikymmentä suurinta reittiä käsittää 60,73 prosenttia kokonaisrahtimäärästä (ks. taulukko 4).

Sijoitus	Määränpää	Lähtösatama	* (2009)	* (2010)	**
1	Yhdysvallat	Suur-Kiina	7,1	8,5	19,72
2	EU	Suur-Kiina	5,8	6,9	18,97
3	Muu Aasia	Suur-Kiina	4,3	5,3	23,26
4	Muu Aasia	Muu Aasia	4,5	5,0	11,11
5	Lähi-itä	EU	3,1	3,4	9,68
6	Suur-Kiina	Yhdysvallat	3,2	3,4	6,25
7	Lähi-itä	Suur-Kiina	2,7	3,3	22,22
8	EU	Muu Aasia	2,8	3,1	10,71
9	Suur-Kiina	EU	2,9	3,1	6,9
10	Muu Aasia	EU	2,6	2,9	11,54
11	Suur-Kiina	Suur-Kiina	2,6	2,9	11,54
12	Suur-Kiina	Muu Aasia	2,3	2,8	21,74
13	Lähi-itä	Muu Aasia	2,7	2,7	0,0
14	Yhdysvallat	Muu Aasia	2,3	2,6	13,04
15	Yhdysvallat	Lat. Amerikka	2,2	2,4	9,09
16	Japani	Suur-Kiina	2,1	2,4	14,29
17	Muu Eurooppa	Suur-Kiina	1,8	2,3	27,78
18	Yhdysvallat	EU	1,8	2,1	16,67
19	Lat. Amerikka	Suur-Kiina	1,6	2,0	25,00
20	EU	Lähi-itä	1,6	1,9	18,75
Yhteensä	20 suurinta		60,0	69,0	15,00
Yhteensä	Koko maailma		99,7	114,3	14,64

* (Milj. TEU)

** TEU-kasvuprosentti 2009-2010

Taulukko 4: 20 suurinta laivareittiä (IHS [60])

1.1.6 Maaliikenne

Koska suurin osa konteista tulee satamiin rekoilla tai junilla, tehokas ja oikea-aikainen konttien kuljetus lähtöpisteistään vaikuttaa konttiterminaalien suorituskykyyn. Jokainen osa-alue vaikuttaa koko kuljetusketjun tehokkuuteen. Häiriö missä tahansa kohtaa palveluverkkoa voi johtaa rahdin myöhästymiseen ja kustannusten kasvuun (World Shipping [163]). Iannone et al. [59] ovat tutkineet tarkemmin maaliikennetoimintoja.

1.2 Linjalaivaaminen

1.2.1 Alkuperä

Aina 1700-luvun lopulle asti laivat purjehtivat maiden välillä vallitsevien tuuli- ja sääolosuhteiden mukaan. Menestyksekkään höyrykoneiden laivoihin yhdistämisen jälkeen 1800-luvun puolivälissä, laivat alkoivat tarjota säännöllistä palvelua matkustajille ja rahdille. Ennen 1900-luvun puolivälin tienoilla tapahtunutta konttiliikenteen kehitystä, laivat tarjosivat yhdistettyä palvelua irtorahdille, postille ja matkustajille. (Wikipedia [153].)

Konttien kehittämisen jälkeen 1950-luvulla kansainvälisen rahdin määrä on kasvanut eksponentiaalisesti. Tämän myötä laivayhtiöt muuttivat laivat ainoastaan konttien kuljettamista varten. Kuljettamisen yksinkertaisuus ja konttien turvallisuus ovat alkaneet yhdistyä taloudellisen tehokkuuteen. (Levinson [72].)

Linjalaivausta pidetään tehokkaimpana kuljetusmuotona. Suuri 8000 TEU-kontin laiva kykenee kuljettamaan vuodessa 200 000 TEU:n verran kontteja. Saman määrän kuljettamiseen tarvittaisiin satoja rahtilentokoneita, monta kilometriä junavaunuja tai hyvin suuri joukko rekkoja. Konttikuljetuksen hinta polkupyörälle Aasiasta Eurooppaan on noin 10 dollaria, DVD-soittimelle 1,50 dollaria, kilolle kahvia 0,15 dollaria ja oluttölkille noin 0,01 dollaria (World Shipping [164]).

1.2.2 Linjalaivaajat

Linjalaivayhtiö operoi konttilaivastoa tarjotakseen kuljetuspalveluja satamien välillä määrättyillä reiteillä, aikatauluilla ja taajuudella (Windeck [161]). Linjalaivan tulee palvella asiakkaitaan määrättyjen aikataulujen mukaan, jotta kontit saadaan lastattua laivaan. Linjalaivauksessa odotetaan, että laiva palvelee useita satamia reitillään. Aikataulun noudattamisen tarve johtaa siihen, että myös reitti on määrätty. Poikkeama reitiltä voisi johtaa siihen, ettei kontti kulkeudukaan määräsatamaan. Kuten esimerkiksi julkisessa liikenteessä, samoin linjalaivauksessakin tulee noudattaa tiettyä palvelutaajuutta,

jotta asiakkaiden kausittaiset kysyntätarpeet täytetään. Lisätietoa konttilinja-laivauksen määräävistä tekijöistä löytyy Ducruetilta ja Notteboomilta [30].

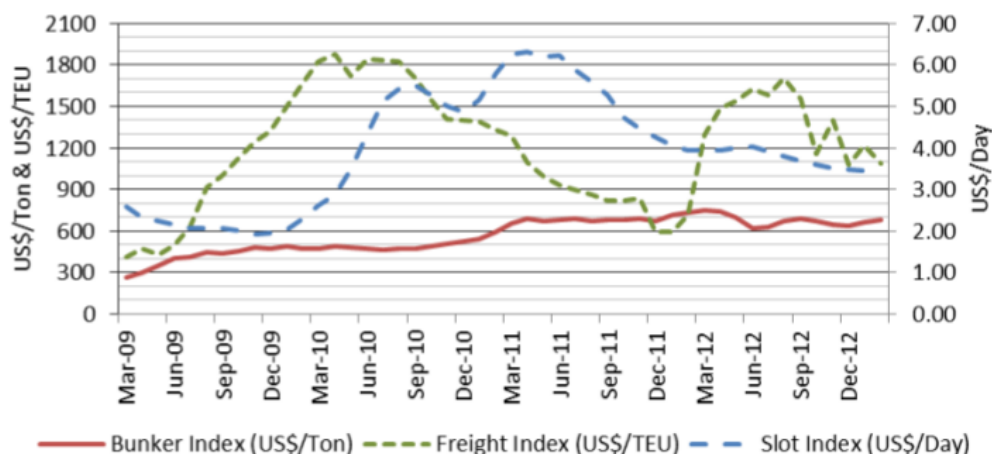
Huolimatta linjalaivauksen ja öljyn hinnan kasvusta, linjalaivauksen voitomarginaali on pienentynyt. Jotta kasvavasta kysynnästä ja laskevista hinnoista selviydytään, laivayhtiöt ovat tehostaneet palveluaan. Vaikka jotkut yhtiöt toimivat edelleen riippumattomasti, yhä useammat tekevät jonkin laatuista yhteistyötä (yhteisiä konferensseja, strategisia liittoumia tai jakamista, fuusioita ja yrityskauppoja). Tämän myötä kahdenkymmenen suurimman linjalaivayhtiön rakenne ja markkinaosuus on muuttunut merkittävästi viimeisen kolmenkymmenen vuoden aikana. Vuonna 1980 kaksikymmentä suurinta yhtiötä hallitsi 26 prosenttia markkinoista, vuonna 1992 lukema oli 46,6 prosenttia ja vuonna 2015 86 prosenttia (ks. taulukko 5; Notteboom [101]; Alphaliner [6]).

Sijoitus	Linjalaivaoperaattori	TEU	Laivat	Markkinaosuus %
1	APM-Maersk	2 899 597	592	15,0
2	MSC	2 558 343	496	13,2
3	CMA CGM	1 731 227	463	8,9
4	Evergreen	978 564	204	5,1
5	Hapag-Lloyd	958 931	183	5,0
6	COSCON	825 454	163	4,3
7	CSCL	704 871	138	3,6
8	Hanjin Shg	633 495	104	3,3
9	MOL	613 965	113	3,2
10	Hamburg Süd	601 756	126	3,1
11	APL	553 883	91	2,9
12	OOCL	885 819	102	2,9
13	NYK	482 457	100	2,5
14	Yang Ming	468 941	93	2,4
15	UASC	407 656	52	2,1
16	K Line	394 374	75	2,0
17	Hyundai M.M.	368 494	56	1,9
18	PIL	360 954	153	1,9
19	Zim	327 597	75	1,7
20	Wan Hai	216 952	93	1,1

Taulukko 5: 20 suurinta linjalaivaoperaattoria 1.5.2015 (Alphaliner [6], s. 12)

1.2.3 Rahtihinnat

Kuljetettavan rahdin hintaan voi vaikuttavia tekijöitä on useita, kuten rahdin muoto, paino, lukumäärä, matkan pituus tai kesto, tavarán arvo tai yhdistelmä edellä mainituista (Maritime Dictionary [86]). Ajan kuluessa laivarahdin hinta on rapautunut markkinavoimien takia. Maailmanlaajuisen kaupan kasvusta johtuen toimiala on kasvattanut laivojen kapasiteettia, jotta kysyntään kyettäisiin vastaamaan. Toimiala on myös joutunut mukautumaan sekä paikallisiin ja globaaleihin kriiseihin että kausivaihteluihin. Suuret vaihtelut ovat johtaneet laivojen ylikapasiteettiin. Linjalaivaus on suuren pääoman toimiala ja laajojen palveluverkkojen pystyttäminen on kallista, joten operaattorit pyrkivät mahdollisimman hyvin hyödyntämään ylimääräisen kapasiteetin. Koska toimiala ei voi vaikuttaa konttien kuljetusmääriin, on hintoja alennettu markkinaosuuden nostamiseksi. Kontin kuljetushinnan alentuessa ja polttoainekulujen kasvaessa operaattorit toimivat yhä pienemmällä voittomarginaalilla. Tämä johtaa usein tappioihin, kun kysyntä on kausittaisesti vähäistä ja kiinteät kustannukset ovat korkeat. (Notteboom [101].)



Kuva 1.5: Laivausindeksien kehitys 03/2009-02/2013 (Polat [109], s. 18)

Kuvassa 1.5 näkyy, miten polttoaineen, rahdin ja konttipaikkojen hintaindeksit vaihtelivat maaliskuun 2009 ja helmikuun 2013 välillä. Kuvassa bunker index (suom. polttoaineindeksi) tarkoittaa keskimääräistä maailmanlaajuisesta hintaa (US\$) 380 cSt:n polttoaineelle tonnia kohden. Indeksia julkaisee BunkerIndex [15]. Kuvan 1.5 ajanjaksolla polttoaineindeksi vaihteli 267 ja 753 dollarin välillä, keskiarvona 568 dollaria. Freight index (suom. rahtihintaindeksi) kuvastaa tässä esimerkkinä kontin kuljetushintaa Kiinasta Eurooppaan. Tämä hinta vaihteli samalla aikavälillä 413 ja 1872 dollarin

välillä, keskiarvona 1210 dollaria. Toukokuun 26. päivänä vuonna 2015 indeksi oli 499 dollarissa (ShippingChina [123]). Slot index (suom. konttipaikan hintaindeksi) kuvastaa konttipaikan päivävuokrahintaa. Kuvassa 1.5 on 2500 TEU:n laivan konttipaikan hinta VHSS:n mukaan [136].

Yleisesti ottaen kuva 1.5 osoittaa, että hallitsemattomat maailmantalouden olosuhteet ja polttoaineen hintojen nousu johtavat rahtihintojen epävakauteen, jonka myötä laivaajat yhä intensiivisemmin suunnittelevat palveluverkkojaan lyhyellä aikavälillä.

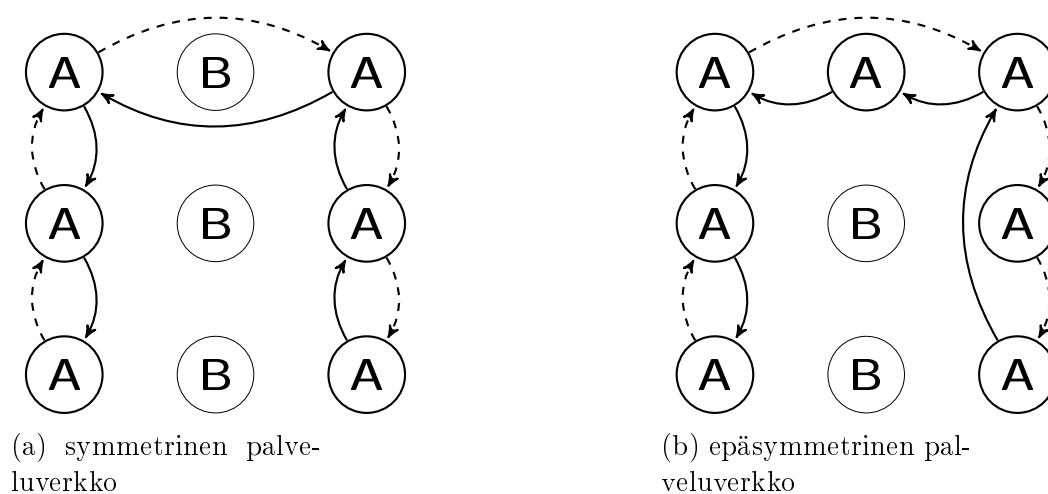
1.2.4 Satamamaksut

Satamien perimissä maksuissa on lähes yhtä monta käytäntöä kuin on satamiakin (Shipping and Freight Resource [124]; Heggie [48]). Satamamaksut voivat koostua rahtimaksuista (eng. cargo due = CD), jotka veloitetaan jokaiselta sataman käyttäjältä, kun rahtia kuljetetaan satamassa; kantavuusmaksuista (eng. tonnage due), joka veloitetaan sataman käyttäjiltä aluksen rekisteröidyn nettopainon mukaan ja satamamaksuista (eng. port due), jotka veloitetaan alukselta ankkurointiajan ja rekisteröidyn bruttokantavuuden mukaan. Lisäksi voi tulla maksuja esimerkiksi jätteistä, vedestä ja nostureiden, hinauksen ja luotsauksen käytöstä. Kirjavista käytännöistä mainittakoon esimerkiksi virolaisen Paldiskin sataman maksukäytännöt [105]. Tämä osoittaa sen, että matemaattisessa mallissa muun muassa satamamaksuja joudutaan yksinkertaistamaan. Satamamaksujen tarkka mallinnus olisi hankalaa ja oikeastaan toissijaista. Lisätietoa satamamaksuista löytyy artikkelista Bandara et al. [11].

1.3 Palveluverkot

Linjalaivaamisen palveluverkot kehitetään siten, että kysynnän, satamien tavoitettavuuden, kuljetuksen keston ja palvelutiheyden tarpeet huomioidaan. Niitä suunniteltaessa operaattorit joutuvat tasapainoilemaan asiakkaiden vaatimusten ja operointikustannusten välillä. Asiakkaat haluaisivat vaatia suoria toimituksia, mutta tämä aiheuttaisi aikataulujen, palvelutiheyden ja reittien mahdottoman yhdistelmän. Palveluverkosta muodostuisi liian monimutkainen. Sen sijaan linjalaivausoperaattorit haluaisivat suunnitella palveluverkon siten, että laivojen käyttö voitaisiin optimoida, satamien kattavuutta voitaisiin lisätä ja kuljetuskustannukset voitaisiin minimoida käyttäen suuria konttilaivoja. Toisin kuin tavallisessa laivauksessa, linjalaivauksen tärkeimpiä tekijöitä on niputtaminen, joka voi tapahtua kahdella eri tasolla: palveluverkon sisällä tai linkittämällä useampia palveluverkkoja. (Zohil & Pijon [174]; Lirn & al. [80]; Ducruet & Notteboom [31].)

Yksittäisen linjalaivan niputtamisen tavoitteena on kerätä kontit useammasta satamasta siten, että ne sopivat samaan reittiin ja aikatauluun (MPC = multi-port-calling). Tällainen reitti muodostuu, kun kaukaisimmasta satamasta kuljetaan toiseen ääripäähän ja matkan varrella käydään useammassa satamassa. Esimerkiksi reitti, joka yhdistää Pohjanmeren satamat (Hampurin, Lontoo, Rotterdam) ja Arabianmeren satamat (Sharjah, Mumbai ja Kochi). Konttilaiva voi käydä kymmenissä satamissa reitin varrella. Tällainen operointi voi olla symmetristä (ks. kuva 1.6a) tai epäsymmetristä (ks. kuva 1.6b) paluumatkasta riippuen. (Ducruet & Notteboom [31].)

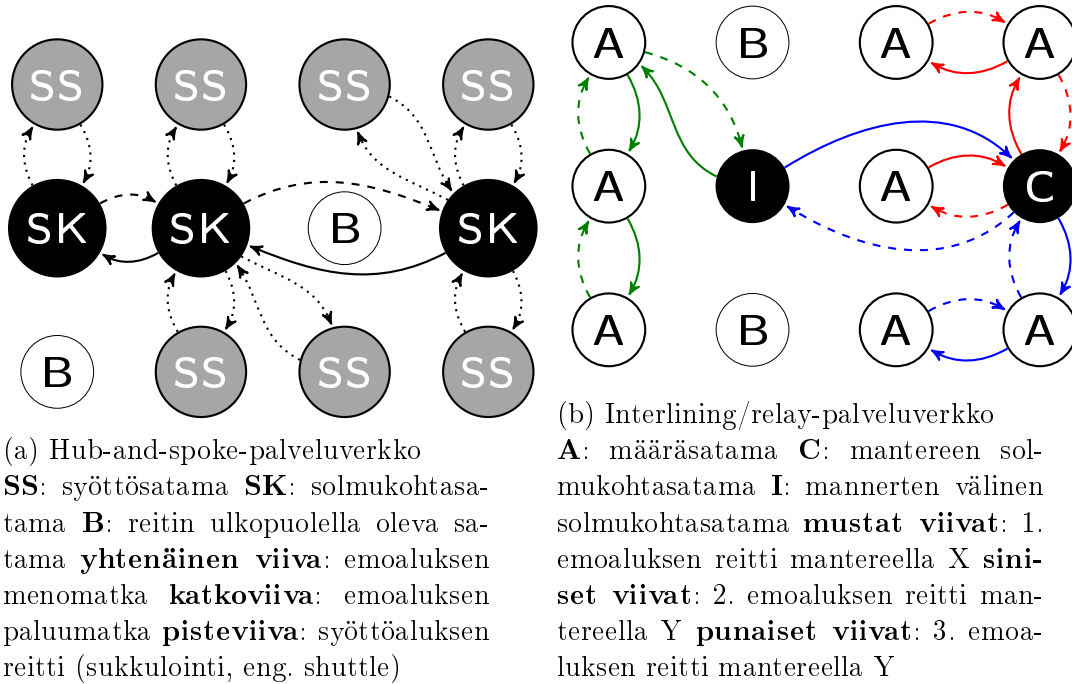


Kuva 1.6: **A**: määräsatama **B**: reitin ulkopuolella oleva satama **yhtenäinen viiva**: menomatka **katkoviiva**: paluumatka (Polat [109], s. 19)

Pendelöinti ja maailman ympäri - palvelut ovat edellä mainitun operoinnin laajennoksia. Pendelöinnissä (ks. kuva 1.7) linjalaiva kattaa usein enemmän kuin kaksi kauppareittiä, esimerkiksi Pohjanmeren satamista Lähi-idän kautta pohjoiselle Tyynellemerelle. Maailmanympäryspalveluverkossa (ks. kuva 1.8) laiva ei käänny lainkaan takaisin tulosuuntaansa vaan jatkaa matkaansa, kunnes saa päätökseen ympäripurjehduksen ja palaa takaisin lähtöpisteeseensä. Tällainen reitti voisi olla esimerkiksi Singaporesta Intian valtameren kautta Välimerelle, Atlantille, Tyynellevaltamerelle ja takaisin Singaporeen.

Hub-and-spoke- ja interlining/relay-palveluverkot ovat tärkeimmät vaihtoehdot, kun niputtamiseen käytetään useampaa kuin yhtä linjalaivaa. Palveluverkkojen kompleksisuuden kasvaessa 1990-luvun puolivälissä, linjalai-vaajat perustivat solmukohtasatamia uudelleenlastausta varten, jotta voitiin vastata kasvaneeseen kysyntään (Ducruet & Notteboom [31]).

muun muassa seuraavista lähteistä Lam & Yap [70], Wilmsmeier & Notteboom [160] ja Ducruet & Notteboom [31].



Kuva 1.9: (Polat [109], s. 20)

1.4 Syöttöliikenne

1.4.1 Taustaa

Konttiaikakauden alusta lähtien on yleisesti uskottu, että sukkulointioperointi (eng. shuttle operation) vähentäisi konttilinjalaivojen kustannuksia (McKinsey [87]). Tällöin sukkulointioperointi voitiin suorittaa maanteitse, junalla tai laivalla tilanteesta riippuen. Junaa pidettiin tehokkaana sisämaan kuljetusmuotona, kunhan etäisyyden, määrän ja maantieteen asettamat ehdot täyttyivät. Maantiekuljetuksia käytettiin pienemmillä volyyymeilla, kun junaa ei ollut käytettävissä. Merisyöttöliikennettä suosittiin vain suhteellisen pitkillä etäisyyksillä ja riittävän suurilla kuljetusvolyyymeilla, korkeammista uudelleenlastauskustannuksista ja pidemmästä kuljetusajasta johtuen. (Jansson & Shneerson [63].)

Konttiaikakauden alussa syvän meren konttialus kävi suhteellisen monessa erikokoisessa satamassa. Tällainen suora palvelu tarkoittaa sitä, että konttialus kuljettaa kontit yhteen tai useampaan määränpääsatamaan ilman, että

kontteja uudelleenlastataan solmukohtasatamissa toisiin laivoihin. Tämä tarkoittaa usein reittejä, joissa useampia satamia on niputettu samalle linjalle (MPC = multi-port-calling). Sen sijaan epäsuora palvelu tarkoittaa useimmiten hub-and-spoke-verkkoja. Suurien konttialusten myötä pitkät merimatkat tulivat edullisemmiksi, mutta ne viettivät liikaa aikaa satamissa huonon reittisuunnittelun vuoksi. Tästä syystä syntyivät hub-and-spoke-verkot (ks. kuva 1.9a). (Jansson & Shneerson [63].)

Molempia sekä MPC:tä (suora) että hub-and-spoke-palveluverkkoja (epäsuora) on kritisoitu, sillä molemmilla on selkeitä etuja ja haittoja (Imai et al. [61]). Suoran palvelun edut ovat pitkälti epäsuoran haittoja ja päinvastoin.

1.4.2 Suoran palvelun edut

Suoran palvelun selkeimmät edut ovat nopea kuljetus, lisäkulujen vähäisyys, houkutteleva ja luotettava palvelu, pilaantuvien tuotteiden pidentynyt käyttöaika ja vähentyneet kuljetusvahingot. Suora palvelu on nopea, sillä kontin kuljettamiseen kuluu aikaa vain lastauksen, kuljetun matkan ja purkamisen verran. Näin siis säästetään aikaa, kun kontteja ei lastata uudelleen solmukohtasatamissa eikä jouduta odottamaan syöttöliikenteen laivoja tai emoaluksia. Koska kontteja ei uudelleenlastata solmukohtasatamissa, ei synny kustannuksia syöttöliikenteen laivoista eikä purkamisesta ja lastaamisesta (Cullinane et al. 1999). Kun suoran palvelun operaattori tarjoaa palveluja korkean kysynnän satamien välille, operaattori voi vähentää rahtikustannuksia lyhentyneen ajan ja syntyneiden lisäkulujen mukaan. Tämä voi houkuttaa lisää asiakkaita. (Ducruet & Notteboom [31].)

Suoran palvelun laiva ei riipu muista laivoista eikä toiminta häiriinny muiden myöhästelyistä. Syöttölaivan viivästyminen voi johtaa siihen, että kontit saadaan vasta seuraavaan emoalukseen, mikä taas johtaa siihen, että kuljetus saattaa myöhästyä jopa kaksi viikkoa. Tämä voi olla rahtaaajien kaupalle kestämätöntä. Nopeampi kuljetusaika mahdollistaa pilaantuvien tuotteiden ja muiden herkkiä terveydenhuoltotuotteiden yms. kuljettamisen. Samoin nopeamman kuljetuksen myötä jäädytettyjen konttien energiankulutus pienenee. Koska kontteja ei uudelleenlastata solmukohtasatamissa, eli kontteja käsitellään vähemmän, kontit kärsivät todennäköisesti myös vähemmän kuljetusvahinkoja.

1.4.3 Epäsuoran palvelun edut

Epäsuoran palvelun etuihin kuuluvat parantunut satamapeitto, poistuneet satamarajoitteet, pienten alusten kasvanut hyödyllisyys, parantunut palvelu, emoalusten kasvanut hyötysuhde, palveluverkon vähentyneet kustannukset ja

vähentynyt maaliikenne sekä saastuminen. Kaupankäynti ei rajoitu epäsuoran palvelun myötä tietyille alueille tai tietyn alueen satamaan. Nykypäivänä jokaisella alueella on omat erityistuotteensa, jotka on tällä tavalla helppo kuljettaa sinne, missä on kysyntää. Pienten satamien kysyntä ei vastaa isojen alusten taloudellisia vaatimuksia, mutta syöttöliikenteen avulla pienetkin satamat pääsevät globaaleille markkinoille. (Jansson & Shneerson [63].)

Pienet satamat eivät edes välttämättä kykene palvelemaan suuria konttialuksia johtuen laituripaikkojen syvyydestä ja puutteellisesta kontin käsittelylaitteistosta. Syöttöliikenteen laivoilla voidaan tehostaa myös suurempien alusten toimintaa pienien satamien osalta. Toisin sanoen satamarajoitteet poistuvat. Pienet alukset ovat hyötysuhteeltaan parempia pienen kysynnän ja lyhyen välimatkan alueilla kuin suuremman luokan alukset. Epäsuoran palvelun ansioista pienet alukset saadaan tehokkaasti käyttöön.

Mannertenvälisessä laivaliikenteessä suuremman luokan alukselta kestää noin 35-40 päivää koko reitin kiertämiseen. Koska linjalaivaus vaatii määrättyjä reittejä, aikatauluja ja palvelutiheyttä, operaattoreiden täytyy ottaa käyttöön useampia aluksia vaatimusten täyttämiseksi. Isot laivat vaativat kuitenkin paljon kysyntää ollakseen hyödyllisiä eli niiden käyttöasteen tulee olla korkea. Tällöin laivat kulkisivat harvemmin. Syöttöliikenteen avulla solmukohtasatamiin ja sitä kautta emoaluksille saadaan enemmän kuljetettavaa. Palvelutiheys kasvaa ja odotusajat pienenevät solmukohtasatamissa, jolloin palvelu paranee huomattavasti.

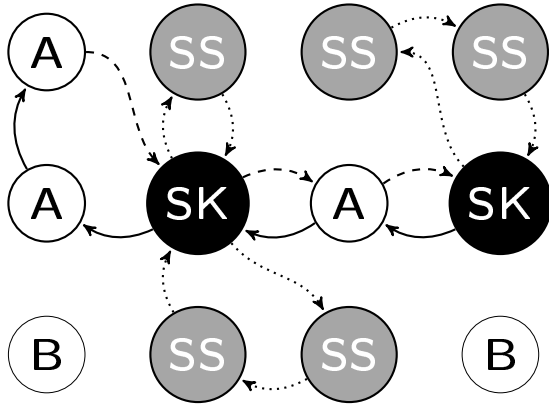
Kun suuret emoalukset käyvät muutamissa suuremman kysynnän satamassa, ne voivat keskittyä pitkiin merimatkoihin (Imai et al. [61]). Emoalusten hyötysuhde paranee, kun kapasiteetin käyttöaste on korkea ja näin ollen kontin suhteelliset kustannukset pienenevät.

Uudelleenlastauksen ja syöttöliikenteen laivojen aiheuttamista lisäkustannuksista huolimatta, solmukohtasatamien lisääntynyt konttikysyntä, parantunut palvelutiheys ja emoalusten kasvanut hyötysuhde voi vähentää palveluverkon kokonaiskustannuksia (Imai et al. [61]). Lisäksi syöttöliikenteen hyödyntäminen vähentää maaliikennesuuhkaa ja siten ilman saastumista (Liao et al. [78]).

1.4.4 Modernit hub-and-spoke-palveluverkot

Perinteisen hub-and-spoke-palveluverkon idea on peräisin lentoliikenteestä (ks. kuva 1.9a). Tavoitteena oli haalia kontit paikallisista satamista sukulointioperoinnilla solmukohtasatamiin, joista edelleen suhteellisen suurilla aluksilla määränpääalueen solmukohtasatamaan. Kasvaneet vaatimukset ovat johtaneet palveluverkkojen kehittämiseen ja satamien hierarkkiseen luokitteluun (ks. luku 1.1.4). Suoran ja epäsuoran palvelun etuja on yhdistetty.

Kuvassa 1.10 on yhdistetty pendelöinnin (ks. kuva 1.7) ja hub-and-spoke-verkon (ks. kuva 1.9a) hyviä puolia.



Kuva 1.10: Moderni monikerroksinen hub-and-spoke-verkko

A: emosatama **B**: reitin ulkopuolella oleva satama **SS**: syöttöliikenteen satama **SK**: solmukohtasatama **yhtenäinen viiva**: emoaluksen menomatka **katkoviiva**: emoaluksen paluumatka **pisteviiva**: syklinen syöttöliikenne (Polat [109], s. 27)

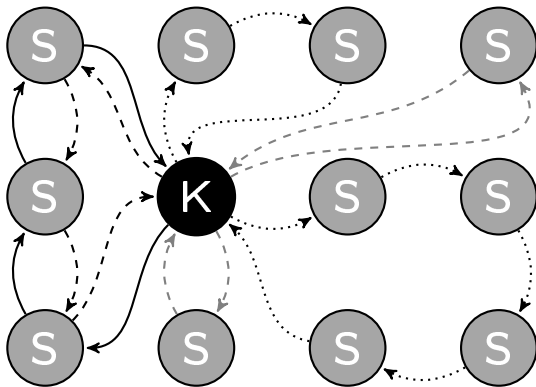
Satamien hierarkia määräytyy strategisen, taktisen ja operatiivisen suunnittelutasojen päätösten perusteella. Hierarkiapäätökset ovat harvoin identtisiä eri toimijoiden kesken ja muiden päätökset voivat hyödyttää toista. Esimerkiksi toisen toimijan solmukohtasatama voi olla toisen toimijan emosatama.

1.4.5 Syöttöliikenteen palveluverkot

Yhteydet paikallisten satamien ja solmukohtasatamien välillä voidaan toteuttaa kolmella tavalla: sukkuloinnilla (edestakaisin kahden sataman välillä), syklistesti (reitille kuuluu useampia satama) tai takaperoissyklistesti (kierroksen jälkeen palataan samaa reittiä takaisin, eng. backtracking) (Wijnolst et al. [145]; Frankel [39]). Suurimmat syöttöliikenteen palveluverkot sijaitsevat suurilla merenlahdilla tai sisämerillä, esimerkiksi Karibianmerellä, Meksikonlahdella ja Mustallamerellä (Jadrijević & Tomašević [62]). Kuva 1.11 esittää syöttöliikennettä osana hub-and-spoke-palveluverkkoa. Syöttöliikenteen avulla konttiliikenteestä on tullut taloudellisesti aiempaa rationaalisempaa, tehokkaampaa ja tuottoisampaa ja se on nykyään korvaamaton osa globaalia palveluverkkoa (Rudić & Hlač [119]). Syöttöliikenteen palveluverkon voidaan katsoa olevan muunnelmä kulkuneuvon reititysongelmasta (eng. VRP = vehicle routing problem, ks. muunnos ongelmasta luvussa 3.1) (Andersen [9]).

Paikallisista markkinoista riippuen useimmiten globaalit emoaluslinjalai-vaajat käyttävät joko tytäryhtiötä tai kolmatta osapuolta hoitamaan syöttöliikennettä. Syöttöliikenteen operaattorit toimivat harvoin maailmanlaajuisella tasolla. (Andersen [9]; Foschi [35]).

Globaalit yhtiöt käyttävät tytäryhtiötä usein, kun alueella on suhteellisen paljon kysyntää. Tytäryhtiöiden hyödyntämisen etuna on muita tapoja alhaisemmat kuljetuskustannukset, joustavammat aikataulut ja palvelutiheys sekä täysi hallinta laivojen konttipaikoista. Kolmansia osapuolia käytetään usein pienemmän kysynnän alueilla. Tämän etuna on, että kustannuksia voidaan jakaa muiden yhtiöiden kanssa, yhtiö maksaa vain kuljetetuista kontteista, ei ole painetta kasvattaa syöttölaivojen käyttöastetta, kuljetusaika on lyhyempi, palvelutiheys on parempi eikä ole kilpailua paikallisten yhtiöiden kanssa.



Kuva 1.11: Syöttöliikenne osana hub-and-spoke-verkkoa - **S**: syöttöliikenteen satama **K**: solmukohtasatama **musta yhtenäinen viiva**: takaperoissyklisen syöttöaluksen menomatka **musta katkoviiva**: takaperoissyklisen syöttöaluksen paluumatka **pisteviiva**: syklinen syöttöliikenne **harmaa katkoviiva**: sukkulointisyöttöliikenne (Polat [109], s. 29)

1.4.6 Emo- ja syöttöliikenteen erot

Tärkeimmät käsitteet, haasteet ja aspektit ovat yleisesti ottaen samat emo- ja syöttöliikenteelle (Andersen [9]). Merkittävimpiä eroja löytyy muun muassa toiminta-alueesta, kysynnästä, aluskoosta, palvelutiheydestä, purjehdusajasta, laivaston koosta, kysynnän vaihtelusta, suunnitteluhorisontista (eng. planning horizon), laivaston omistajuudesta, konttipaikkojen määrästä, aikataulusta, palvelustrategiasta, asiakkaista, satamavalinnasta sekä kilpailusta ja yhteistyöstä

Emoliikenteen toiminta-alue on syvillä vesillä eli pitkällä merimatkoilla maailmanlaajuisesti eri alueiden välillä. Syöttöliikennettä taas on paikallisesti rajatulla alueella lyhyiden merimatkojen päässä. Emoliikenne palvelee merkittäviä talousalueiden satamia ja paikallisia uudelleenlastaussolmukohtasatamia, joten konttien kysyntä on suurta. Syöttöliikenne sen sijaan palvelee pieniä paikallisia satamia. Näin ollen kuljetuksen kysyntä on pientä. Suuret kuljetusvolyymit ja pitkät etäisyydet mahdollistavat emoliikenteelle suurempien alusten hyödyntämisen. Lyhyiden merimatkojen pienempi kysyntä ja toimintaskaala vaativat operoinnin pienemmillä aluksilla.

Linjalaiivauksessa oletusarvoisesti jokaista satamaa palvellaan kerran viikossa, jotta asiakkaiden tarpeet saadaan täytettyä ja niille voidaan tarjota säännöllinen aikataulu. Korkeamman kysynnän emolinjoilla palvelutiheyttä kasvatetaan erityisesti merkittävien solmukohtasatamien osalta. Optimoidakseen toimintakustannuksia syöttöliikenteen tytäryhtiöt palvelevat harvemmin syöttöliikenteen satamia. Kolmannen osapuolen syöttöliikenne toimijat palvelevat usein yhtä tiheästi kuin emoliikennekin, sillä ne palvelevat useampia emoaluslinjoja.

Isojen emoalusten lastaus- ja purkuajat ovat suhteessa pidemmät kuin pienemmillä syöttöliikenteen aluksilla. Samoin suhteessa etäisyyksiin emoalukset tarvitsevat enemmän aikaa merimatkoihin suuremmista nopeuksista huolimatta. Syöttöliikenteellä sen sijaan matka-ajat ovat lyhyitä johtuen lyhyistä matkoista ja nopeista satamatoiminnoista.

Purjehdusajasta, palvelutiheydestä ja katetuista alueista riippuen, emoliikenne tarvitsee yleensä keskikokoisen tai suuren laivaston, jotta kaikki palveluverkon tarpeet saadaan täytettyä. Syöttöliikenteessä sen sijaan lyhyiden purjehdusaikojen ja harvemman palvelutiheyden ansiosta paikalliselle palveluverkolle tarvitaan pieni tai keskikokoinen laivasto.

Emosatamat sijaitsevat yleensä vahvasti teollistuneilla talousalueilla ja solmukohtasatamilla on laajat yhteydet paikallisiin satamiin. Näin ollen emoliikenne on syöttöliikenteeseen verrattuna vähemmän herkkä kysynnän kausivaihteluille. Paikallisten satamien kysyntä on sen sijaan hyvin epävakaa ja kausittaista.

Emoalusten palveluverkot eivät ole kovinkaan joustavia. Niiden toimintojen suunnittelu täytyy tehdä keskipitkällä tai pitkällä aikavälillä, sillä ne vaativat paljon pääomitusia. Syöttöliikenne sen sijaan joutuu olemaan joustavampi muuttuessaan kaupankäynnin vaihtelun mukaisesti. Toisin sanoen suunnitteluhorisontti on näillä kahdella liikennemuodolla hyvin erilainen.

Laivaajat voivat olla operoivien laivojen omistajia tai ne voidaan vuokrata purjehduksen ajaksi. Vuokra-aika voi olla kuukausia, useampia vuosia tai kohdistua vain jollekin kaudelle. Koska emolaivat kulkevat paljon rajoitetummin, operaattorit usein omistavat ne vähentääkseen kustannuksia pit-

källä jaksolla. Syöttöliikennelaivaaajilla on usein kiinteä määrä omistettuja aluksia ja joustovara määritellään vuokratuilla aluksilla kysynnän vaihtelun mukaan, jolloin pääomakustannuksia voidaan vähentää. Emoliikenteen aluksilla on määrätty konttipaikkojen kapasiteetti suunnitteluhorisontin aikana. Vuokra-alusten avulla syöttöliikenteessä konttipaikkojen määrä on sen sijaan joustava.

Emoliikenne toimii kiinteällä aikataululla määrätyn suunnitteluhorisontin ajan. Syöttöliikenteen aikatauluja taas voidaan muokata useasti suunnitteluhorisontin aikana. Näin ollen syöttöliikenne pystyy sopeuttamaan aikataulunsa kausivaihteluihin.

Emo- ja syöttöliikenteen palvelustrategia eroavat selvästi toisistaan. Emoliikenne on epäsuorasti riippuvainen uudelleenlastauksen tuottamasta kysynnästä niiden markkina-alueella. Syöttöliikenne sen sijaan tuottaa palveluja suoraan asiakkailleen. Tosin yhtä lailla suurimmat syöttölaivat voivat käyttää pienempiä paikallisia syöttöaluksia. Myös asiakaskunnissa on eroja. Emoliikenteen asiakkaita ovat rahtaaajat (eli varsinaiset rahdin lähettäjät) ja syöttöliikenteen asiakkaita ovat globaalit laivaajat.

Syöttö- ja emoliikenteelle yhteisiä satamavalintakriteerejä ovat muun muassa rahdin määrä, käsittelymaksut, maayhteydet, luotettavuus ja sijainti. Emoliikenteelle lisäkriteereinä ovat syvyys, syöttöliikenteen yhteydet ja muut satamamaksut. Syöttöliikenteen satamavalintakriteereinä on laituripaikkojen saatavuus, uudelleenlastattavien konttien lukumäärä ja niiden tuotto. (Chang et al. [18].)

Yhteistyötä vaaditaan emo- ja syöttöliikenteen välillä, jotta voidaan luoda tehokkaita palveluverkkoja. Emoliikenne on halvin kuljetusmuoto konttien kuljettamiselle valtamerien välillä, joten kilpailijat ovat usein muita emoliikenteen toimijoita. Syöttöliikenne sen sijaan kilpailee niin suorien yhteyksien ja muiden laivaajien kanssa kuin myös paikallisen rekka- ja junaliikenteen rinnalla. Syöttöliikenne toimii siis välikätenä paikallisten rahtaaajien ja emoliikenteen välillä. Karkeana yhteenvetona voidaan sanoa, että emoliikenne yhdistää suuria globaaleja satamia ja syöttöliikenne toimii toissijaisten satamien äärellä, joilla on epäsäännöllinen ja pieni kysyntä.

1.4.7 Syöttöliikenteen tehokkuuteen vaikuttavat tekijät

Useat tekijät vaikuttavat syöttöliikenteen tehokkuuteen. Nämä voidaan pääasiallisesti luokitella sisäisiin ja ulkoisiin tekijöihin. Markkinat, asiakkaat, satamat ja ympäröivät tekijät ovat ulkoisia. Hallinto ja alustekijät ovat sisäisiä tekijöitä. (Styhre [128].)

Markkinatekijät

Jäähdytettyjen, vaarallisten ja standardikonttien lukumäärä, vienti- ja tuontikonttien epätasapaino, tyhjät ja täydet kontit, päivittäiset ja kausittaiset kysynnän vaihtelut, kilpailu ja yhteistyö muiden laivaaajien kesken ovat laivaaajien verkkoihin ja suorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä. Jäähdytettyjen ja standardikonttien määrä rajaa alusten kuljetuskapasiteetin, sillä jäähdytetyt kontit vaativat energiaa ja paikkoja on rajoitetusti. Myös vaarallisia kontteja varten on vain rajallinen lastausalue.

Vienti- ja tuontikonttien epätasapaino määrittää pääosin satamien kulkujärjestyksen. Ensin laivat käyvät satamissa, joissa on paljon vientikontteja ja sen jälkeen palvellaan tuontisatamia, jotta voidaan maksimoida kuljettavien konttien lukumäärä. Markkinoilla merkittävänä tekijänä on myös täysien ja tyhjien konttien suhde. Päivittäisellä ja kausittaisella konttimäärävaihtelulla on suuri vaikutus kaikkiin suunnittelupäätöksiin syöttöliikenteen palveluverkoissa. Kysyntäennusteiden mukaan päätetään laivojen lukumäärä ja koot, omistettujen ja vuokrattujen laivojen määrät ja satamien kulkujärjestys (ks. luku 1.5). Koska syöttöliikenne toimii alhaisilla hinnoilla, kilpailu ja yhteistyö muiden laivaaajien kesken sekä maayhteydet vaikuttavat syöttöliikenteen suorituskykyyn.

Asiakastekijät

Syöttöliikenteen merkittävimmät asiakkaat ovat globaaleja emoliikenne-laivaaajia. Näin ollen syöttölaivojen aikataulut suunnitellaan emoalusten liikumisten perusteella, jotta kontit odottavat kuljetusta mahdollisimman vähän aikaa solmukohtasatamissa. Odotusaika solmukohtasatamassa lisää konttien varastointikustannuksia kuten myös kokonaiskuljetusaikaa.

Emoliikenteen viivytykset vaikuttavat syöttöliikenteen vakauteen. Riittävä tiedonkulku laivaaajien välillä vaikuttaa syöttölaivojen konttien ahtaamiseen. Kontin sijainnilla laivassa taas on merkitystä lastaus- ja purkamisajan kannalta.

Satamatekijät

Verrattuna solmukohtasatamiin syöttöliikenteen konttiterminaalien varustustaso ja laituripaikkojen syvyys ovat niukkoja ja vaihtelevat runsaasti. Lastauksen ja purkamisen kesto on siis pidempi syöttösatamissa (eng. turnover). Myös työskentelytunnit, luotsien tarve, polttoaine- ja puhdistusmahdollisuudet ovat merkittäviä vaihtuvia tekijöitä satamissa. Sitä vastoin laajoista infrastruktuureista huolimatta, solmukohtasatamat vastaanottavat ensisijaisesti emoaluksia, mikä voi vaikuttaa syöttöalusten suorituskykyyn.

Ympäröivät tekijät

Pitkät jonotusajat syöttö- ja solmukohtasatamiin, sääolosuhteet merellä ja satamissa, alueellinen turvallisuus, ympäristö- ja turvallisuuslainsäädäntö sekä ohjesäännöt vaikuttavat niin syöttöliikenteeseen kuin emoliikenteeseenkin. Jonotusajat ja sääolosuhteet aiheuttavat viivytyksiä ja siten lisäävät polttoainekustannuksia. Koska syöttölaivat operoivat lyhyillä merimatkoilla, ne joutuvat lainsäädännöstä johtuen käyttämään korkeamman luokan polttoainetta vähentääkseen päästöjä. (Wang et al. [143]; Windeck [161].)

Hallintotekijät

Hallintotekijöihin kuuluvat muun muassa organisaation rakenteet, tehokkaat päätöksentekoaupvälineet, omistettujen laivojen määrä ja koko, jotka vaikuttavat myös tehokkuuteen. Operaattorin rooli tytäryhtiönä tai kolmantena osapuolena vaikuttaa suunnittelu- ja järjestelyongelmiin. Tietokonepohjaiset työkalut auttavat tekemään päätöksiä esimerkiksi reittien, ahtauksen ja aikataulutuksen suunnittelun suhteen. Omistettujen ja vuokrattujen laivojen suhde vaikuttaa kausivaihteluihin sopeutumiseen emo- ja syöttöliikenteessä.

Alustekijät

Suorituskykyyn vaikuttavat myös omistettujen ja vuokrattujen laivojen lukumäärä, kapasiteetti, pituus, leveys, syväys, nopeus, ikä, varustus, virran tuotto, vuokra- ja omistuskustannukset sekä polttoainekustannukset. Nämä tekijät ovat merkittäviä jokaisella suunnittelutasolla.

1.5 Kysynnän vaihtelut

Linjalaiivauksen kysyntä on läheisessä yhteydessä maailmankaupan kehitykseen (Zachial & Lemper [171]). Samoin paikallisella taloudella ja syöttöliikenteellä on miltei samanlainen yhteys. Ensinnäkin paikallisen alueen talouden kehitys vaikuttaa vientikonttien tarjontaan sekä tuontitavaroiden ja raakamateriaalien kysyntään, joita hoitavat globaalit linjalaiivaajat. Toisaalta syöttöliikenteen tehokkuus hub-and-spoke-palveluverkossa mahdollistaa maailmalaajuuden tavaroiden vaihdon.

Emo- ja syöttöliikenne vaativat suuria investointeja merkittävistä konttialuksien kiinteistä ja muuttuvista kustannuksista johtuen. Näiden investointien hyöty riippuu kuljetettavien konttien määrästä. Näin ollen muutos maailmankaupassa vaikuttaa kuljetusmääriin (Lun et al. [83]). Kuljetusmäärän lisäksi myös tuonti- ja vientikonttien tasapaino vaikuttaa laivaamisen tuottoihin. Teorian tasolla syöttölaiva kykenee kuljettamaan kaksi kertaa konttipaikkamääränsä verran syklisellä reitillä. Alus lähtee solmukohtasatamasta tuontikonteilla täyteen lastattuna ja kuljettaa ne paikallisiin syöttösatamiin,

joista samalla ottaa ruumaansa vientikontit, jotka viedään solmukohtasatamaan. Kun kauppa on epätasapainossa (tuonti- ja vientikontit), saattaa laivaan jäädä tyhjiä konttipaikkoja sen saapuessa tai lähtiessä solmukohtasatamasta. Käyttöasteen pieneneminen johtaa kuljetuskustannusten kasvuun konttia kohden.

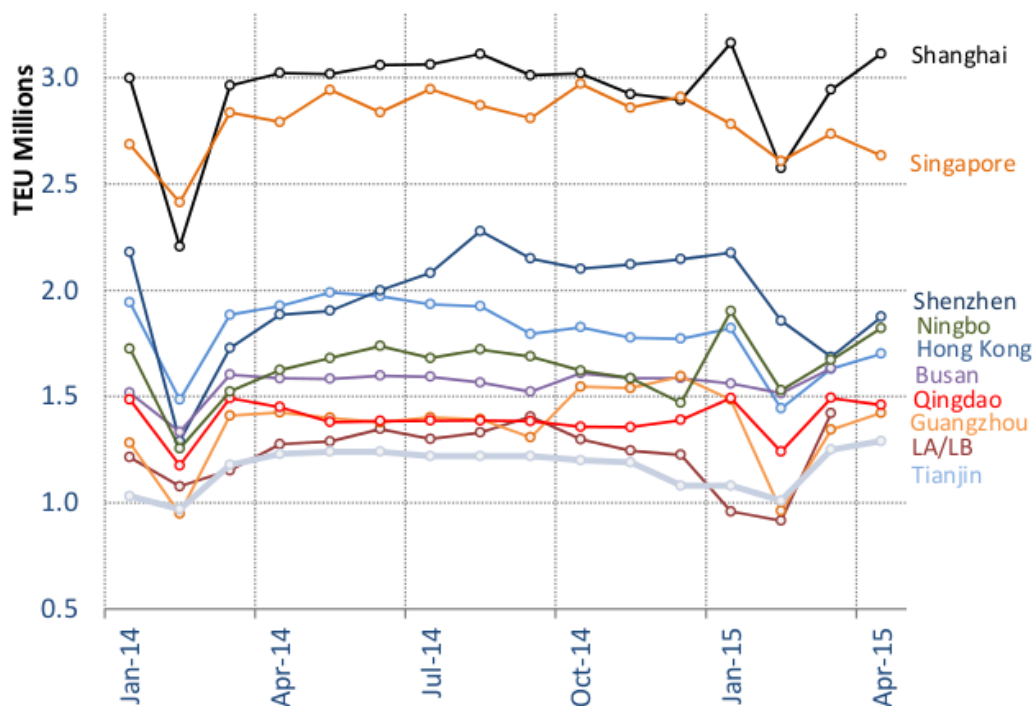
Konttien kysyntä vaihtelee vuoden aikana kausivaihtelujen, kysyntäpiikkien ja odottamattomien pudotuksien ja peruutuksien mukaan (Schulze & Prinz [121]; Polat & Uslu [108]). Joidenkin tuotteiden tuotto ja kulutus voi vaihdella vuoden aikana. Vaihtelut voivat seurata satokausia (esimerkiksi hehdelmät ja kalat) tai julkisia, kansallisia tai uskonnollisia lomakausia. Jotkin näistä vaihteluista vaikuttavat yhteen satamaan tai alueeseen ja jotkin vaikuttavat maailmanlaajuisina kysyntäpiikkeinä, erityisesti joulun ja kiinalainen uusi vuosi. Lisäksi odottamattomat paikalliset tai maailmanlaajuiset poliittiset tai taloudelliset yms. kriisit vaikuttavat negatiivisesti kysyntään. Lisäksi huomioitakoon, että linjalaivauksessa rahtaaaja maksaa konttikuljetuksesta, kun rahti on lastattu laivaa tai kuljetettu perille. Tämä mahdollistaa sen, että rahtaaaja voi perua konttipaikan varauksen pitkän ajan sopimuksesta huolimatta. Näin ollen satamien konttikysyntä on vuoden aikana vain ajoittain vakaa. (Løfstedt et al. [82].)

Satamien konttikysyntä vaikuttaa suoraan linjalaivauksen konttipaikkojen kapasiteettiin. Kysynnän ollessa epävakaa, linjalaivaajien täytyy miettiä tarkkaan, tuleeko kapasiteettia lisätä vai ei. Viivyttely kapasiteetin lisäyksen suhteen voi johtaa siihen, että kontteja kuljetetaankin vähemmän kuin olisi kapasiteettia, silloin kun kysyntä kasvaa. Kysyntä ei vaikuta ainoastaan konttipaikkojen kapasiteettipäätöksiin, vaan pienetkin vaihtelut voivat vaikuttaa koko palveluverkon suunnitteluun (Lun et al. [83]; Andersen [9]). Kuvassa 1.12 näkyy suurimpien satamien läpisyöttömäärät ja miten ne vaihtelevat vuoden 2014 aikana.

Olosuhteiden vaikutuksen ennakointi linjalaivaamisen suhteen ja siten myös luotettavien ennusteiden luominen on miltei mahdotonta. Mutta se ei tarkoita etteikö ennustamisessa olisi järkeä. Ennustamisen tavoitteena ei ole tarkka arviointi, vaan sillä pyritään auttamaan päätöksentekijöitä ymmärtämään tulevaisuutta vähentämällä epävarmuuksia saatavilla olevaa informaatiota tutkittaessa. Konttien läpisyötön ennustaminen palveluverkkojen suunnittelussa on erittäin tärkeää.

Käsiteltäessä suuria epävarmuuksia, suunnittelumenetelmät ovat yleensä deterministisiä ennusteita, jotka ovat taipuvaisia epäonnistumaan pitkän ajan ennusteissa. Akateemisesta kirjallisuudesta tutut realistisemmat stokastiset ennustusmenetelmät eivät ole suositeltuja linjalaivauksen suunnittelussa, sillä ne vaativat runsaasti tilastollista dataa ja ovat hyvin monimutkaisia. Toisaalta simulointia voidaan käyttää ennustuksen runkona käyttäen de-

terministisiä ennustusmenetelmiä, jotka tarvitsevat vain rajoitetusti dataa. Simulointiin perustuva ennustekehys voi sopia paremmin stokastiseen ympäristöön, jossa saattaa ilmetä odottamattomia pudotuksia ja huippuja. Syöttöliikenteen dynaaminen, monimutkainen ja joustava luonne tekee ennustamisesta pitkäaikaisen haasteen syöttöliikenteen operaattoreille.



Kuva 1.12: Kymmenen suurimman sataman kuukausittainen konttien läpisyöttö 01/2014-04/2015 (Alphaliner [6], s. 26)

1.6 Suunnittelutasot

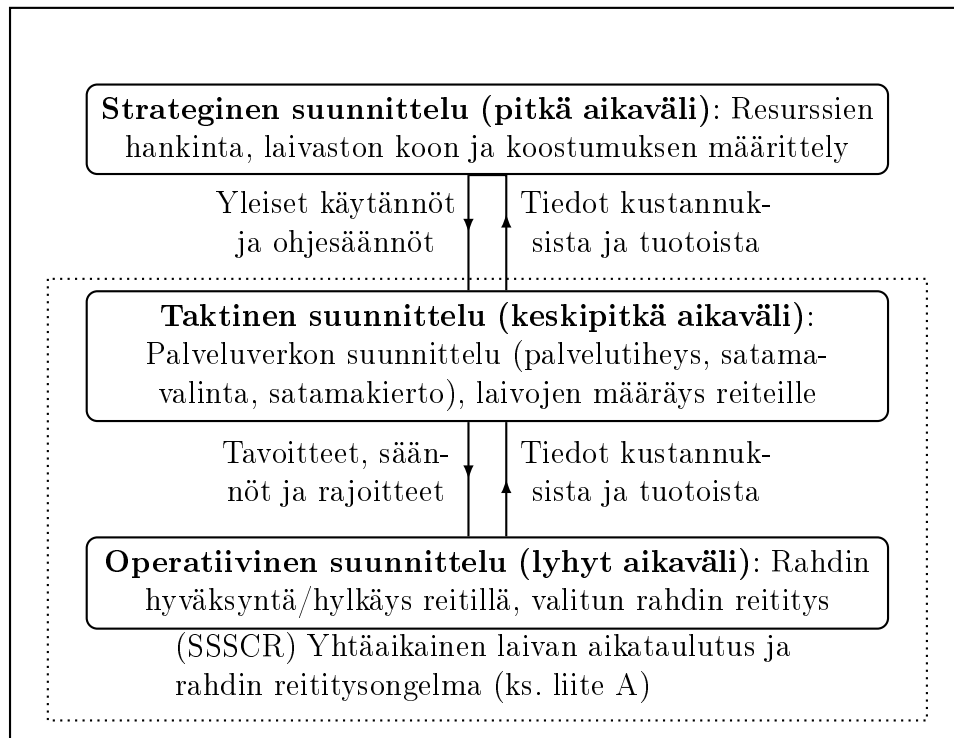
Linjalaivauksen päätöksenteko tehdään strategisella, taktisella ja operatiivisella tasolla (Agarwal & Ergun [1]). Kuvassa 1.13 on kerrottu merkittävimmät päätökset eri tasoilla ja niihin vaikuttavat tekijät. Tarkempaa tietoa eri suunnittelutasoihin liittyvistä ongelmista, jotka ovat yleisesti ottaen samat emo- ja syöttöliikenteelle, löytyy seuraavista tutkimuksista: Christiansen et al. [23]; [24]; Andersen [9]; Windeck [161]; Polat [109].

Syöttöliikenteen osalta suunnittelutasoilla tehdyt päätökset riippuvat organisaation rakenteesta. Jos syöttöliikenneoperaattori on globaalin emoliikenteen toimijan tytäryhtiö, sen päätökset riippuvat paljolti emoyhtiön pää-

töksistä. Kolmannen osapuolen syöttöliikenneoperaattorin päätökset riippuvat enemmän markkinoista. (Polat [109].)

Jokaisella suunnittelutasolla tehdyt päätökset vaikuttavat suoraan muihinkin tasoihin. Eri lähteissä suunnittelutasot on määritelty marginaalisilla eroilla, mikä tässä tapauksessa tarkoittaa sitä, että ne ovat vahvasti sidoksissa toisiinsa. Päätökset strategisella tasolla määräävät yleiset käytännöt ja ohjenuorat taktisella ja operatiivisella tasolla. Samoin päätökset taktisella tasolla määräävät kapasiteettirajoitteet ja palveluverkon rakenteen operatiivisella tasolla. Käänteisessä suunnassa tarkasteltuna tiedot tuloista ja kuluista vallitsevien parametrien pohjalta toimivat tärkeänä palautemekanismina ylemmän tason tuleville päätöksille. (Polat [109].)

Merirahtiteollisuus on ollut hyvin konservatiivinen uusien päätöksenteokoapuvälineiden suhteen. Kokeneiden suunnittelijoiden manuaalisesti tekemillä suunnitelmilla on olemassa pitkät traditiot. Sitä paitsi yleisesti ottaen laivojen aikataulutukseen liittyy laaja joukko erilaisia ongelmia. Räättälöityjä malleja on saatavilla tietyille ongelmille, joilla on määrätty rajoitteet ja tavoitteet. Ongelmien ratkaiseminen yhtä aikaa jokaisella tasolla voisi olla tuottoisaa. (Mulder & Dekker [97].)



Kuva 1.13: Linjalaivauksen suunnittelutasot (Agarwal & Ergul [1], s. 177)

1.6.1 Strateginen suunnittelutaso

Strategisella suunnittelutasolla määrätään optimaalinen alusten määrä ja koko (=koostumus eli kuinka monta ominaisuuksiltaan erilaista alusta) sekä toiminta-alue. Samalla päätetään omistetaanko alukset vai vuokrataanko ne. Strategisen tason aikajakso on usein yhdestä viiteen vuotta emoliikenteelle ja yhdestä kolmeen vuotta syöttöliikenteelle. Pitkäaikaisempien projektien osalta (uusien satamien tai laivastojen rakentaminen) aikaväli saattaa olla viidestä kahteenkymmeneen vuotta. (Polat [109].)

Tarvittavien laivojen tyyppiin vaikuttaa muun muassa laivojen pituus, leveys ja syväys sen mukaan kykenevätkö ne liikkumaan suunnitellun alueen kanavissa ja satamissa. Toiminta-aluetta suunnitellessa valitaan satamat ja mahdollisesti myös solmukohtasataman sijainti. Skaalaetu on myös merkittävä tekijä uusien laivojen hankittaessa. Isoimmilla laivoilla on pienemmät kuljetuskustannukset yhtä TEU:ta kohden. Tosin isommilla laivoilla on suuremmat kiinteät kustannukset. Konttien kysyntä vaikuttaa laivan koon päätöksessä. (Mulder & Dekker [97].)

Tarvittavien laivojen lukumäärä linjalaivauksessa määräytyy ensisijaisesti tarvittavan palvelutiheyden, reitin pituuden ja laivan nopeuden mukaan. Ylläpitääkseen asiakaskuntaa ja tarjotakseen riittävän säännöllisen aikataulun, useimmilla laivaajilla on ainakin yksi lähtö satamasta viikossa. Tämä tarkoittaa sitä, että vaadittavien laivojen lukumäärä on sama kuin reitin kulkemiseen kuluva aika viikoissa. Esimerkiksi Pohjois-Amerikasta Aasiaan kulkevalla reitillä voi kulua jopa kahdeksan viikkoa, joten reitillä kuuluisi olla vähintään kahdeksan alusta. Toisena esimerkkinä viikoittainen linjalaivaus New Yorkin ja Hampurin välillä voi vaatia neljä alusta, jotta voidaan ylläpitää tarvittavaa palvelutiheyttä. Aluksien hinnat pyörivät miljoonissa dollareissa ja esimerkiksi 2000 TEU:n laivan tyhjäkäyttö maksaa kahdestakymmenestä kahteenkymmeneenviiteentuhanteen dollaria päivässä. Operaattoreilla on usein kiinteä määrä omistuksessa olevia aluksia ja kysynnän vaihtelua tasapainotetaan vuokratuilla aluksilla. Mutta jos kysyntä on vakaata tai jopa kasvavaa, vuokrattujen laivojen kustannukset voivat olla moninkertaisia omistettuihin aluksiin verrattuna. Sen sijaan, jos omistettujen alusten suhteen on ylikapasiteettia, niitä voidaan vuokrata muille operaattoreille. Strategisen tason päätökset ovat näin ollen erittäin tärkeitä. (Agarwal & Ergun [1].)

1.6.2 Taktinen suunnittelutaso

Taktisen suunnittelutason päätökset tapahtuvat keskipitkällä aikavälillä, joka on 2-12 kuukautta. Taktisella suunnittelutasolla palveluverkot suunnitellaan siten, että reitit (satamien järjestys) ja palvelutiheydet suunnitellaan ja laivat allokoidaan, eli varataan näille reiteille. Laivat kulkevat sykleissä satamasta toiseen noudattaen samaa järjestystä tietyn suunnitteluhorisontin aikana. Järjestyksellä on merkitystä tuonti- ja vientikonttien tasapainon ja laivan kapasiteetin suhteen. Tähän liittyy ship-scheduling problem eli laivojen aikataulutusaongelma, joka on hyvin merkittävä ja haastava johtuen satamien aukioloajoista, emoliikenteen viivytyksistä, riittämättömästä sataman varustuksesta, huonoista sääolosuhteista, hinaajien ja luotsien odottamisesta, odottamattomista viivytyksistä ja kanava- tai satamajonotuksista (Varbanova [135]). Erilaisten kustannuksien laskeminen ja optimointi on tärkeää tällä tasolla. Kiinteisiin kustannuksiin kuuluu muun muassa operointi-, omistus-, vuokraus-, huolto- ja vakuutuskustannukset. Muuttuvia kustannuksia ovat esimerkiksi polttoaineen kulutus satamissa ja merellä sekä satamien kustannukset, jotka ovat helposti kirjavia. Taktiseen tasoon kuuluu myös sopimusten hallinta eli analysointi ja kehitys satamien ja yhteistyökumppaneiden kanssa.

Reititys-, aikataulutus- ja laivaston koko, koostumus ja allokointiongelmat ovat pääkomponentteja palveluverkon suunnittelussa. Päätökset missä tahansa näistä ongelmista vaikuttavat suoraan muihin. Esimerkiksi, vaikka reitit olisi suunniteltu optimaalisesti, huonosti suunniteltu aikataulu voi kasvattaa tarvittavien alusten määrää, mikä voi aiheuttaa kokonaistuoton pienenemisen. Ongelmien yhtäaikaista ratkaisua on siis tärkeää.

1.6.3 Operatiivinen suunnittelutaso

Operatiivisen suunnittelutason aikaväli voi olla muutamasta tunnista useampaan kuukauteen. Operatiivisella tasolla operaattori päättää laivojen kulkunopeudet, ahtaussuunnitelman (Ambrosino et. al [8]; Wikipedia [156]), ympäristön huomioivan reitin, tyhjien konttien uudelleensijoittamisen, mitä rahtia otetaan kyytiin ja mitä ei sekä millä reitityksellä rahti kulkee. Toisin sanoen valittu rahti allokoidaan tietylle reitille. Tähän viitataan rahdin reititysongelmana (eng. cargo-routing problem). Laivaaaja voi päättää olla ottamatta jotain rahtia kyytiin joko siksi, ettei se ole riittävän tuottoisaa tai että toisessa satamassa on suhteessa tuottavampaa rahtia. Rahti kulkee emo- ja/tai syöttöliikenteen avulla lähtösatamasta määränpääsatamaan. Rahti voidaan siis siirtää laivasta toiseen uudelleenlastaus- eli solmukohtasatamissa.

Kulkunopeus tarkoittaa optimaalista keskiarvoista nopeutta kahden pe-

räkkäisen sataman välillä tai koko reitin aikana. Koska 30 prosentin vähennys nopeudessa vähentää polttoainekustannuksia 50 prosenttia ja kasvihuonepäästöjä 30 prosenttia aikayksikköä kohden, laivaajat ovat alkaneet viime vuosina kulkemaan maksiminopeutta hitaammalla vauhdilla (eng. slow steaming; Wikipedia [157]). Alukset kulkevat yleensä nopeampaa korkeamman kysynnän suuntaan ja hitaammin pienemmän kysynnän suuntaan (Christiansen et al [24]; Windeck [161]).

Ahtaussuunnitelmapäätökset liittyvät konttien sijoittamiseen alukselle. Tehokas ahtaussuunnitelma on olennaisen tärkeää aluksen vakauden ja hyvän massatasapainon kannalta. Lisäksi koska vain päällimmäisiä kontteja voidaan siirtää, tehokas suunnitelma vähentää myös konttien turhia siirtelyjä ja ankkurointiaikaa.

Ympäristön huomioiva reititys tarkoittaa sitä, että laivalle optimoidaan reitti kahden sataman välillä siten, että huomioidaan veden syvyys, vuorovedet, säädökset ja aaltojen suunta ja nopeudet (Windeck [161]). Esimerkiksi suomalainen clean tech -alan Eniram-yhtiö on kehittänyt ohjelmistoa, joka huomioi laivan monista lähteistä saatavaa dataa optimoitaessa polttoainekulutusta ja määrää muun muassa trimmi-, kallistuma- ja nopeussuosituksen, moottorikombinaation ja moottorien käyttöastesuosituksen (Helsingin Sanomat [52]; YLE [169]).

Tyhjien konttien uudelleensijoittaminen on konttien kuljettamiseen liittyvä merkittävä haaste. Kaupan epätasapainosta johtuen joillakin reiteillä, operaattorit joutuvat kuljettamaan paljon tyhjiä kontteja, mistä aiheutuu huomattavia kustannuksia (Agarwal & Ergun [1]). Kymmenen prosentin vähennys varustus- ja uudelleensijoituskustannuksissa voi nostaa tuottavuutta jopa 30-50 prosenttia (ROI [115]). Tyhjien konttien siirtäminen johtuu siis siitä, että vientivetoisiin satamiin tarvitaan lisää tyhjiä kontteja, joita laivaajat kuljettavat tuontivetoisista satamista, joihin muodostuu tyhjien konttien ylijäämää. Reittisuunnitelman tulisi huomioida myös laivan maksimikantokyky lastaamalla laivaan sekä tyhjiä että täysiä kontteja, jotta laivan kapasiteetti voidaan hyödyntää maksimaalisesti.

2 Kirjallisuuskatsaus

Tässä osiossa tarkastellaan suhteellisen laajasti konttilaivaukseen liittyviä tutkimuksia keskittyen eri osa-alueisiin. Kirjallisuuskatsauksen lähteenä on Polatin [109] väitöskirja.

2.1 Linjalaivauksen palveluverkon suunnittelu

Linjalaivauksesta on tullut maailmanlaajuisesti suosittu aihe akateemisessa tutkimuksessa. On julkaistu useita tutkimuksia, jotka keskittyvät aiheen eri ongelmaosa-alueisiin. Katsaustyyppisiä artikkeleita (eng. review article) on julkaistu muun muassa konttilaivauksesta (Notteboom [101]), laivaston koosta ja koostumuksesta (Pantuso et al. [106]), laivaston koostumuksesta ja reitityksestä (Hoff et al. [54]) ja linjalaivauksen palveluverkon suunnittelusta (Ducruet & Notteboom [31]; Yang et al. [166]).

Ensimmäinen yleiskatsaus konttilaivojen reititykseen ja aikataulukseen ennen vuotta 1983 tehdyistä tutkimuksista löytyy Ronenin artikkelista [116]. Jatkotutkimuksesta löytyy yleiskatsaus laivojen aikataulutukseen ja siihen liittyviin ongelmiin vuosien 1983 ja 1993 välillä (Ronen [117]). Seuraava yleiskatsaus linjalaivaustutkimuksista vuosien 1994 ja 2004 välillä löytyy artikkelista Christiansen et al. [23]. Wang & Meng [139] tarkastelivat myös tehtyjä tutkimuksia ja esittivät suunnan tulevalle tutkimukselle. (Mulder & Dekker [97].) Edellä mainituiden laajojen kirjallisuuskatsauksien saatavuudesta johtuen tässä osiossa keskitytään merkittävimpiin tutkimuksiin, joita on listattuna taulukoissa 6, 7 ja 8.

Rana & Vicksonin tutkimuksista lähtien [111]; [112] paljon huomiota on saanut laivojen reititys ja aikataulutus MPC-palveluverkoissa. Ting & Tzen [131] esittivät matemaattisen mallin MPC-palveluverkolla palveluaikaikkunat huomioon ottaen. Minimoidakseen palveluverkon kokonaiskustannukset tekijät kehittivät dynaamisen ohjelmointimallin ja ratkaisivat kymmenen sataman esimerkkitapauksen transatlanttisella palveluverkolla. Heidän tuloksensa osoittavat, että optimointiin perustuvat mallit voivat auttaa suunnittelijoita arvioimaan kuljetuksen kiinteitä ja muuttuvia kustannuksia MPC-palveluverkoissa.

Shintani et al. [122] kehittivät MPC-palveluverkkoa tyhjiä konttien kuljetuksen huomioon ottaen. Maksimoidakseen verkon tuoton tekijät kehittivät geneettiseen algoritmiin perustuvan ratkaisumenetelmän ja ratkaisivat esimerkkitapauksen Kaakkois-Aasian alueella (Wikipedia [150]). Tapaukseen kuului 20 satamaa ja kolme laivaa. Lei et al. [75] tutkivat MPC-linja-laivausta huomioiden palvelun aikaikkunat ja eri yhteistyökäytännöt laivaajien välillä. Tutkijat kehittivät sekalukuoptimointimallin minimoidakseen kuljetuskulut

erikseen konttipaikkojen jakoyhteistyölle, täydelliselle yhteistyölle ja yhteistyöhön perustumattomalle käytännölle. He ratkaisivat useita satunnaisia testijoukkoja käyttäen CPLEX-ohjelmistoa (ks. sanasto A). Heidän tuloksiensa perusteella voidaan sanoa, että laivaaajien välisellä täydellisellä yhteistyöllä on suurta potentiaalia palveluverkon kustannusten vähentämiseen. Yan et al. [165] esittivät matemaattisen mallin laivojen aikataulutukselle lyhyellä aikavälillä jo valmiiksi suunnitelluilla MPC-reiteillä. Tekijät kehittivät ongelman pohjalta useamman tuotteen kokonaisvirtausmallin ja minimoivat kokonaiskustannuksia käyttäen CPLEX-ohjelmistoa Lagrangen relaksaatiota ja aligradienmenetelmää. Malli implementoitiin Taiwanilaisen laivaaajan palveluverkolle, joka käsitti 11 satamaa Itä-Aasiassa.

Lam [69] esitti kokonaisvaltaisen lähestymistavan MPC-palveluverkkojen suunnitteluun ottamalla huomioon aikaikkunat. Päätöksenteon tueksi esitetty työkalu valitsee satamat kandidaattijoukosta laivaaajien toiveiden mukaan ja ehdottaa optimaalisia reittejä, laivojen allokointia reiteille ja aikataulutusta valituille satamille minimoiden kokonaiskustannukset. Windeck [161] esitti sekalukuoptimointimallin reittien yhdistämiselle ja aikataulutukselle MPC-palveluverkossa ympäristön olosuhteet huomioon ottaen maksimoiden saatavat tuotot. Tutkija kehitti VNS-heuristiikan (Wikipedia [159]), jolla ratkaistiin esimerkkitapaukset 33 satamaan ja kuuteen laivaan asti.

Yksi viimeaikaisia merkittäviä tutkimuskohteita on ollut laivojen allokointi jo suunnitelluille MPC-palveluverkoille. Gelareh & Meng [44] kehittivät yhdistetyn palvelutiheys- ja allokointimallin MPC-linjalaiivaukselle huomioiden myös aikaikkunat ja alusten vuokrauksen. Tutkijat minimoivat kokonaiskustannuksia lineaarisella sekalukuoptimointimallilla ja ratkaisivat CPLEX-ohjelmistolla seuraavat esimerkkitapaukset: Tyynenmeren ylittävä seitsemän sataman reitti, transatlanttinen kuuden sataman reitti ja yhdeksän sataman reitti Aasian ja Euroopan välillä. Ronen [118] kehitti laivojen allokointimallin MPC-verkolle polttoainekustannukset ja laivojen nopeudet huomioiden. Löytääkseen optiminopeuden kustannusten minimoimiselle tutkija kehitti matemaattisen mallin ja ratkaisi kirjallisuudesta tunnettuja esimerkkitapauksia. Tulokset osoittavat, että alhaisemmillä nopeuksilla kulkeminen voi vähentää kokonaiskustannuksia mutta pidentää kuljetusaikoja. Meng & Wang [89] esittivät lineaarisen kokonaislukuoptimointimallin määrittääkseen laivaston koon, koostumuksen ja allokoinnin jo valmiiksi suunnitelluilla MPC-verkoilla vuoden pituisilla jaksoilla. Konttien kysyntä oli ennalta annettu ja se kasvaa vuosittain 10 prosenttia jaksojen aikana.

Toinen yleinen tutkimusalue on interlining-palveluverkkojen suunnittelu emoliikenteelle huomioiden samalla uudelleenlastaukset. Agarwal & Ergun [1] kehittivät interlining-palveluverkkoa, jossa on uudelleenlastauksia, ottaen samalla huomioon yhtäaikaisen laivojen reitityksen ja aikataulutuksen.

Uudelleenlastauskustannuksia ei huomioitu. Palveluverkon tuottojen maksimointia varten tutkijat esittivät sekalukuoptimointimallin ja ratkaisivat yhdistetyn ongelman käyttäen ahnetta heuristiikkaa, sarakegenerointiin perustuvaa algoritmia ja kaksivaiheiseen Bendersin hajotelmaan pohjautuvaa algoritmia (Benders [13]). Tekijät ratkaisivat satunnaisia esimerkkitapauksia, joissa oli maksimissaan 20 satamaa ja sata alusta. Alvarez [7] kehitti globaalia interlining-palveluverkkoa huomioiden yhtäaikaisen laivojen reitityksen ja allokoinnin. Minimoidakseen palveluverkon kustannukset tutkija esitti sekalukuoptimointimallin ja ratkaisi yhdistetyn ongelman käyttäen tabuhakuheuristiikkaa ja CPLEX-ohjelmistoa. Esimerkkitapauksena oli globaali konttimarkkina, jossa oli 2,6 miljoonan TEU:n kysyntä 120 satamassa. Agarwal & Ergun [1], Alvarez [7] ja Gelareh & Pisinger [47] tutkimuksissa käytettyjä metodeja voidaan käyttää ratkaisemaan pieniä instansseja optimaalisesti, mutta suuremmille instansseille tarvitaan heuristisia metodeja. (Mulder & Dekker [97].)

Reinhardt & Pisinger [114] kehittivät interlining-palveluverkkoa emoliikenteen osalta huomioiden samalla uudelleenlastauksen ja laivaston allokoinnin. Minimoitava lineaarinen sekalukuoptimointimalli ratkaistiin käyttäen branch-and-cut-menetelmää. Satamia esimerkkitapauksissa oli maksimissaan 15. Wang & Meng [140] kehittivät myös laivaston allokointimallia, jossa alusten vuokraus on myös mahdollista. Minimoidakseen palveluverkon kokonaiskustannukset tutkijat kehittivät sekalukuoptimointimallin ja ratkaisivat Aasian, Euroopan ja Oseanian välisen esimerkkitapauksen, joka sisälsi 46 satamaa käyttäen CPLEX-ohjelmistoa. Wang et al. [144] esittivät lineaarisen kokonaislukumallin, joka optimoi konttien reitityksen ennalta valmiissa palveluverkossa minimoiden konttikohtaiset kuljetuskustannukset huomioiden samalla kuljetusajan ja kabotaasirajoitteet (ks. taulukko A). Tutkijat ratkaisivat globaalin laivaajaoperaattorin palveluverkon, joka käsitti maailmanlaajuisesti 166 satamaa, 75 laivareittiä ja 538 reittiosuutta (eng. voyage leg).

Vain muutamat tutkimukset arvioivat sekä MPC- että hub-and-spoke-palveluverkkojen taloudellisuutta. Hsu & Hsieh [55] kehittivät kaksitavoitemallin laivaille voidakseen verrata optimaalista reititystä, laivan kokoa ja palvelutiheyttä MPC- ja H&S-palveluverkoissa. Mallin ratkaisua varten tutkijat käyttivät pareto-optimaalisuutta täydellisen optimaalisuuden sijaan. Esimerkkitapauksena oli viiden sataman palvelualue Tyynellämerellä. Heidän tuloksensa osoittavat, että optimaalisena ratkaisuna on usein suora laivaus konttimäärän kasvaessa pienissä palveluverkoissa. Chen & Zhang [20] vertailivat suurimpien alusten taloudellista elinkelpoisuutta sekä MPC- että perinteisessä hub-and-spoke-palveluverkossa huomioiden uudelleenlastaus- ja syöttöliikennekustannukset. Minimoidakseen palveluverkkojen kokonaiskus-

tannukset tekijät esittivät lineaarisen sekalukuoptimointimallin ja ratkaisivat esimerkkitapauksen, joka käsitti Euroopan ja Aasian välisessä palveluverkossa 17 satamaa ja Aasian ja Pohjois-Amerikan välisessä palveluverkossa 12 satamaa. Ratkaisuun käytettiin MPC-verkoilla kauppamatkustajan ongelman heuristiikkaa ja hub-and-spoke-palveluverkon tapauksessa minimum location-menetelmää. Tulokset osoittavat, että suurimmat konttialukset olivat kilpailukykyisiä Aasian ja Euroopan välisessä kaupassa kaikissa skenaarioissa sekä Aasian ja Pohjois-Amerikan välisessä kaupassa, kun syöttöliikenteen kustannukset olivat riittävän alhaiset.

Imai et al. [61] vertailivat myös MPC- ja hub-and-spoke-palveluverkkoja sisällyttäen tyhjen konttien uudelleensijoittamisen. Tutkijat tekivät useita numeerisia kokeita Aasian ja Euroopan sekä Aasian ja Pohjois-Amerikan välisille kauppareiteille ja ratkaisivat ongelman LINGO-ohjelmiston avulla [79]. Tulosten pohjalta voidaan sanoa, että MPC on kokonaiskustannuksiltaan edullisempi Pohjois-Amerikan ja Aasian välisillä reiteillä ja hub-and-spoke-palveluverkko on edullisempi Aasian ja Euroopan välisillä reiteillä (vrt. Chen & Zhang [20]). Meng & Wang [88] vertailivat kustannustehokkuutta ennalta suunnitelluissa puhtaissa MPC- ja hub-and-spoke-palveluverkoissa sekä yhdistetyssä MPC- ja hub-and-spoke-palveluverkossa samalla huomioiden tyhjen konttien uudelleensijoittamisen. Esimerkkitapauksena oli Aasian, Euroopan ja Oseanian välinen palveluverkko, johon kuului 46 satamaa. Tutkimuksessa minimoitiin sekalukumallin pohjalta 24 testiesimerkkiä käyttäen CPLEX-ohjelmistoa. Tulokset osoittavat, että yhdistetty MPC- ja hub-and-spoke-palveluverkko on kustannustehokkaampi kuin kumpikaan palveluverkko puhtaana perinteisenä versiona. Kjeldsen & Lysgaard [66] esittivät matemaattisen virtausmallin, jossa yhdistyy konttien ja laivojen reititys MPC- ja hub-and-spoke-palveluverkoissa huomioiden myös allokointiin liittyvät rajoitteet. Tuottojen maksimoimiseksi tekijät kehittivät heuristiikan, joka perustuu Dantzig-Wolfe-hajotelmaan ja sarakegenerointiin. He ratkaisivat CP-ohjelmiston (Wikipedia [149]) avulla useita esimerkkitapauksia Afrikan, Euroopan ja Pohjois-Amerikan alueilla, jotka käsittivät enimmillään 25 satamaa ja 45 laivaa.

Yhä useammassa tutkimuksessa pyritään määrittämään solmukohtasatama ja syöttösatamien reittiallokointi määritelyihin solmukohtasatamiin hub-and-spoke-palveluverkoissa. Baird [10] esitti metodiikan solmukohtasatamien vertailulle ja arvioinnille Pohjois-Euroopassa. Sukkulointityyppisen syöttöliikenteen nykyistä solmukohtasatamaa verrattiin uuteen esitettyyn solmukohtasatamaan Orkneyn saarilla. Gelareh et al. [46] tutkivat myös solmukohtasataman sijaintia hub-and-spoke-palveluverkossa kilpailun vallitessa uuden laivaaajatulokkaan ja hallitsevan operaattorin välillä. Maksimoidakseen uuden toimijan markkinaosuuden tutkijat esittivät sekalukuoptimointimallin ja

ratkaisivat enintään 72 sataman esimerkitapauksia Lagrangen relaksaation ja CPLEX-ohjelmiston avulla.

Laivojen allokointi suunnitelluille hub-and-spoke-palveluverkoille on myös yksi tuoreimmista tutkimusaiheista. Zacharioudakis et al. [170] esittivät laivaston allokointimallin jo suunnitellulle hub-and-spoke-palveluverkolle huomioiden useita palveluvaihtoehtoja. Tekijät kehittivät geneerisen kustannusmallimetodiikan minimoidakseen kokonaiskustannuksia geneettisiä algoritmeja hyödyntäen. Esimerkitapauksena oli Tyynenmeren ylittävä emolinja ja syklinen Aasian sisäinen 20 sataman syöttöliikenneverkosto. Esitetty malli vähensi palveluverkon operoinnin kokonaiskustannuksia lähes 36 prosenttia. Mulder [96] kehitti yhdistetyn laivaston allokointi-, aikataulutus- ja konttien reititysmallin valmiiksi suunnitellulle hub-and-spoke-palveluverkolle huomioiden sekä emon että syöttöliikenteen. Geneettiseen algoritmiin perustuva lineaarisen optimointimallin ratkaisu paransi tuottoja noin 40 prosenttia verrokkipalveluverkkoon nähden. Esimerkitapauksena oli Aasian ja Euroopan välinen palveluverkko, jossa oli 58 satamaa.

Kirjallisuudessa on vain muutamia julkaistuja tutkimuksia, jotka tarkastelevat hub-and-spoke-palveluverkkoja kokonaisuutena lähtösatamasta määränpäähän. Hsu & Hsieh [56] esittivät hub-and-spoke-palveluverkoille kaksitevoitemallin, jonka avulla määritellään optimaalinen reititys, laivan koko ja palvelutiheys minimoimalla kustannukset. Tutkijat esittivät menetelmän, jonka avulla saadaan pareto-optimaalisia ratkaisuja ja tutkivat seitsemän satamaa käsittävää esimerkitapausta.

Yang & Chen [167] tutkivat yhdistettyä reititys-, laivan koko- ja aikatauluongelmaa modernille H&S-palveluverkolle allokoiden syöttösatamat solmu-kohtasatamiin syklisellä reitityksellä. Minimoidakseen operointikustannukset reittiväliä kohden tekijät esittivät kahden tason optimointimallin (eng. bi-level; ks. liite A) ja ratkaisivat Kiinan ja Länsi-Amerikan välisen 14 sataman esimerkitapauksen geneettisellä algoritmilla. Tutkijat käyttivät emoliikennettä korkeamman kysynnän pääsatamille ja solmukohtasatamille ja syöttöliikennettä pienemmän kysynnän satamille, jotta emoalukset eivät kävisi liian monessa satamassa.

Tekijät & Vuosi	Ongelma	Palveluverkko	Esitysmuoto	Kohdefunktio	Ratkaisutapa	Syöttöliikenne	Esimerkkitapaus
Ting & Tzen 2003 [131]	Laivaston allokointi, laivan aikataulut ja reititys	MPC	Dynaaminen optimointi	Kustannusten minimointi	-	-	Transatlanttinen
Shintani et al. 2007 [122]	Laivan aikataulut, tyhjien konttien uudelleensijoitus	MPC	Kustannusmalli	Tuottojen maksimointi	Geneettinen algoritmi	-	Kaakkois-Aasia
Lei et al. 2008 [75]	Laivan aikataulut, yhteistyö	MPC	Lineaarinen sekaluoptimointi	Kustannusten minimointi	CPLEX	-	Satunnainen
Yan et al. 2009 [165]	Laivan aikataulut	MPC	Useamman tuotteen kokonaisluovirtaus (ks. liite A)	Kustannusten minimointi	CPLEX	-	Taiwan
Lam 2010 [69]	Laivaston allokointi, laivan aikataulut ja reititys	MPC	Kustannusmalli	Tuottojen maksimointi	Älykäs järjestelmä	-	-
Wang & Meng 2011a [138]	Laivan aikataulut	MPC	Lineaarinen sekaluoptimointi	Tuottojen maksimointi	Kaksivaiheinen sarakegenerointi (Wikipedia [147])	-	Aasia - Eurooppa
Windeck 2013 [161]	Laivan reititys, aikataulut, ympäristön huomioiva reititys	MPC	Sekaluoptimointi	Tuottojen maksimointi	Variable Neighborhood Search (Wikipedia [159])	-	Meksikonlahti, P.-Atlantti, Pohjanmeri, Aasia - Oseania
Gelareh & Meng 2010 [44]	Palvelutiheys, laivaston allokointi, laivan aikataulut ja vuokraus	MPC	Lineaarinen sekaluoptimointi	Kustannusten minimointi	CPLEX	-	Eurooppa
Ronen 2011 [118]	Laivaston allokointi, polttoainekustannukset, hidasajo (eng. slow steaming, Wikipedia [157])	MPC	Kustannusmalli	Kustannusten minimointi	-	-	Useita
Meng & Wang 2011b [89]	Laivaston allokointi	MPC	Lineaarinen sekaluoptimointi, dynaaminen optimointi	Tuottojen maksimointi	CPLEX	-	Tyyneenmeren välinen, Kaakkois-Aasia - Oseania, Intian valtameren välinen
Agarwal & Ergun 2008 [1]	Laivan aikataulut ja reititys	Interliming	Lineaarinen sekaluoptimointi	Tuottojen maksimointi	Sarakegenerointi (Wikipedia [147]), Benderin hajotelma (Benders [13])	-	Satunnainen

Taulukko 6:
(Polat [109], s. 44)

Tekijät & Vuosi	Ongelma	Palveluverkko	Esitysmuoto	Kohdefunktio	Ratkaisutapa	Syöntöliikenne	Esimerkkitapaus
Alvarez 2009 [7]	Laivan reititys, Laivaston allokointi	Interlining	Sekalukuoptimointi	Kustannusten minimointi	Sarakegenerointi (Wikipedia [147]), CPLEX, Tabuhaku	-	Globaali
Lachner & Boskamp 2011 [68]	Laivan reititys ja aikataulus	Interlining	Kustannusmalli	Tuottojen maksimointi	Usean aloituskohdan paikallishakueuristiikka	-	Aasia - Eurooppa
Reinhardt Pisinger 2012 [114]	Laivan reititys, laivan koko	Interlining	Lineaarinen sekalukuoptimointi	Kustannusten minimointi	CPLEX	-	Satunnainen
Wang & Meng 2012a [140]	Laivaston allokointi, Vuokraus	Interlining	Sekalukuoptimointi	Kustannusten minimointi	CPLEX	-	Aasia - Eurooppa - Oseania
Wang et al. 2013c [144]	Konttien reititys	Interlining	Lineaarinen kokonaislukuoptimointi	Reitityksen kustannusten minimointi	CPLEX	-	Globaali
Hsu & Hsieh 2005 [55]	Laivan reititys, laivan koko, palvelutiheys	MPC, H&S	Monitavoiteoptimointi	Laivaus- ja varastoitus- ja varastointikustannusten minimointi	Pareto-optimaaliset ratkaisut	Sukkulointi	Tyynenvaltameren välinen
Lofstedt et al. 2010 [82]	Monitahtoisen palveluverkon suunnittelu	MPC, H&S	Kokonaislukuoptimointimalli	Tuottojen maksimointi	-	-	Suorituskykytestijoukko
Chen & Zhang 2008 [20]	Laivan reititys, laivan koko	MPC, H&S	Lineaarinen sekalukuoptimointi	Kustannusten minimointi	TSP-heuristiikka, minimium location -menetelmä	Sukkulointi	Aasia - Eurooppa, Aasia - P-Amerikka
Imai et al. 2009 [61]	Laivan reititys, laivan koko, konttien uudelleensijoittaminen	MPC, H&S	Lineaarinen sekalukuoptimointi	Kustannusten minimointi	LINGO	Sukkulointi	Aasia - Eurooppa, Aasia - P-Amerikka
Meng & Wang 2011a [88]	Konttien uudelleensijoittaminen yhdistetyssä MPC- ja H&S-palveluverkossa	MPC, H&S	Lineaarinen sekalukuoptimointi	Kustannusten minimointi	CPLEX	Syklinen	Aasia - Eurooppa - Oseania
Kjeldsen 2011 [66]	Laivojen reititys, konttien reititys	H&S	Virtausmalli	Tuottojen maksimointi	Dantzig-Wolfe hajotelma [27], sarakegenerointi (Wikipedia [147])	Syklinen	Afriikka, Eurooppa, P-Amerikka

Taulukko 7:
(Polat [109], s. 44, 45)

Tekijät & Vuosi	Ongelma	Palveluverkko	Esitysmuoto	Kohdefunktio	Ratkaisutapa	Syötöfliikenne	Esimerkkitaipaus
Takano & Arai 2009 [130]	Hub-sijainti ja spoke-allokaatio (ks. liite A)	H&S	Kapassiteettira-jottiteon yk-sittäisallokoitu p-keskuksen sijoi-tusongelma (ks. liite A; Ernst & Krishnamoorthy [32])	Kustannusten mi-nimointi	Geneettinen algo-ritmi	Sukkulointi	Etelä-Aasia
Gelareh et al. 2010 [46]	Hub location and spoke allocation	H&S	Sekalukuopti-mointi	Markkinaisuuden maksimointi	Lagrangen relak-saatio, CPLEX	Sukkulointi	Satunnainen
Gelareh & Nickel 2011 [45]	Hub location and spoke allocation	H&S	Sekalukuopti-mointi	Kustannusten mi-nimointi	Bendersin hajo-telma (Benders [13]), ahne naa-purustohaku, CPLEX	Sukkulointi	AP-datajoukko (ks. liite A)
Gelareh & Pisinger 2011 [47]	Hub location and spoke allocation	H&S	Sekalukuopti-mointi	Tuottojen maksimointi	Bendersin hajo-telma (Benders [13]), CPLEX	Sukkulointi	Satunnainen P-Amerikassa ja Euroopassa
Zacharioudakis et al. 2011 [170]	Laivaston allo-kointi, hidas ajo, palvelutiheys, vuokraus	H&S	Geneerinen kus-tannusmalli	Kustannusten mi-nimointi	Geneettinen algo-ritmi	Syklinen	Tyyppien vä-riäinen, Aasia
Mulder 2011 [96]	Laivaston allo-kointi, konttien reititys, laivan aikatautus	H&S	Lineaarinen opti-mointi	Tuottojen maksimointi	Geneettinen algo-ritmi	Syklinen	Aasia - Eurooppa
Mulder & Dekker 2013 [97]	Yhdistetty laivo-jen tyypit, laivan aikatautus ja rahdin reititys	H&S	Lineaarinen seka-lukuoptimointi	Tuottojen maksimointi	Ratkaisujen yhdistämissene-temä (eng. com-posite solution approach)	Sukkulointi & Syklinen	Aasia - Eurooppa
Hsu & Hsieh 2007 [56]	Laivan reititys, laivan koko, palvelutiheys	H&S	Monitavoite-optimointi	Laivaus- ja varas-toimikustannus-ten minimointi	Pareto-optimaaliset ratkaisut	Sukkulointi	Tyynenvaltameren välinen
Yang & Chen 2010 [167]	Laivan reititys, Laivan koko, palvelutiheys	H&S	kaksitaso-optimointi (eng. bi-level programming; ks. A)	Kuljetuskustan-nusten minimoin-ti	Geneettinen algo-ritmi	Syklinen	Kiina - Länsi-Amerikka
Lu & Meng 2011 [85]	Laivan reititys, laivan koko	H&S	Kustannusmalli	Operointi-kustannusten mi-nimointi	Tabuhaku	Syklinen	Itä-Aasia Etelä-Aasia P.-Eurooppa

Taulukko 8:
(Polat [109], s. 45)

2.2 Syöttöliikenteen suunnittelu ja kuljetusongelma

Pelkästään syöttöliikenteen suunnitteluun liittyy useita tutkimuksia. Muutamia niistä on listattu taulukossa 9. Sen enempää niihin ei tässä työssä keskitytä. Polatin [109] väitöskirjasta löytyy tarkempi katsaus tästä aihepiiristä. Samassa väitöskirjassa on myös ensikertaa tarkasteltu syöttöliikennettä yksityiskohtaisesti muuttuvien ja kiinteiden kustannusten osalta heterogeeniselle laivastolle koko purjehduskauden ajan.

Tutkimuksessa esitetään sekalukuoptimointimalli, jonka avulla määrätään yhtäaikaisesti laivaston koko ja koostumus, laivaston allokointi, laivojen reititys ja aikataulutukset minimoiden palveluverkon kokonaiskustannukset koko purjehduskauden ajan.

Syöttöliikenteen suunnitteluun liittyy läheisesti VRP (eng. Vehicle Routing Problem) eli kulkuneuvon reititysongelma ja sen eri variaatiot. Kyseistä ongelmaa ja sen muunnelmia on tutkittu laajasti kirjallisuudessa. Mainitakoon erityisesti Gajpalin ja Abadin artikkeli [42], jossa tekijät ratkaisivat kulkuneuvon reititysongelman yhtäaikaisella haulilla ja toimituksella käyttäen muurahaiskolonnaheuristiikkaa.

2.3 Linjalaivaus epävakaan kysynnän vaikutuksen alla

Konttien kysynnän epävakautta ja kausittaisuutta ei ole edellä mainituissa tutkimuksissa kovin perusteellisesti tarkasteltu. Tutkimusten tulokset tulee soveltaa linjalaivojen palveluverkkojen suunnitteluun siten, että ne kuvaavat mahdollisimman hyvin todellisuutta. Linjalaivaajaoperaattorit joutuvat kohtaamaan useita epävakaita ja kausittaisia tekijöitä kuten todellisen kuljetusajan kahden sataman välillä, kysyntä- ja tarjontakaavat, tarvittavien laivojen lukumäärän ja koon, alusten käytettävissä olevan kapasiteetin tyhjiä konttien uudelleensijoittamiseen, jne. (ks. luku 1.5).

Esimerkiksi Chuang et al. [25] kehittivät sumean geneettisen algoritmin määrittämään konttialuksen satamien järjestyksen tietyllä alueella. Tutkijat ratkaisivat viiden sataman erikoistapauksen maksimoiden satamista saatavan tuoton huomioiden laivojen kapasiteettia. Vähemmän tuottaviin satamiin meno voitiin hylätä. Esitetyt sumeat joukot käsittävät kysynnän vaihtelua mutta eivät kausittaisuutta.

Konttiaikakauden alusta lähtien tyhjiä konttien uudelleensijoitus on ollut pysyvänä ongelmana merikuljetusteollisuudessa. Useissa tutkimuksissa otetaan huomioon tyhjiä konttien kysynnän epävakaa luonne jo valmiiksi suunnitelluissa palveluverkoissa. Cheung & Chen [21] esittivät kaksivaiheisen stokastisen mallin huomioiden konttien kysynnän epävakaat, alusten kapasiteetit ja niiden vaikutuksen tyhjiä konttien uudelleensijoittamiseen.

Tekijät & Vuosi	Ongelma	Laivasto	Esitysmuoto	Kohdefunktio	Ratkaisutapa	Syöttöliikenne	Esimerkitapaus
Bendall & Stent 2001 [12]	Laivaston allokointi, laivan aikataulut, toistuvat käynnit	Homogeeninen	Sekalukuoptimointi	Tuottojen maksimointi	Branch & Bound	Sukkulointi, Syklinen	Kaakkois-Aasia
Mourao et al. 2001 [95]	Laivan koko, varastointi	Homogeeninen	Lineaarinen kokonaislukuoptimointi	Vuosittaisen kaupan kustannusten minimointi	Excel-raikaisin	Syklinen	Portugali
Catalani 2009 [16]	Satamajärjestys, laivojen aikataulut	Homogeeninen	Matemaattinen kustannusmalli	Operointikustannusten minimointi	Expert System	Syklinen	Aigeianmeri
Sigurt et al. 2005 [125]	Laivan aikataulut, rahdin reititys	Heterogeeninen	Lineaarinen sekalukuoptimointi	Konttien reitityksen kokonaiskustannusten minimointi	Lineaarinen relaxsaatio, heuristinen branch-and-price-algoritmi	Syklinen, toistuvat käynnit	Satunnainen
Andersen 2010 [9]	Laivan aikataulut, konttien reititys	Heterogeeninen	Lineaarinen sekalukuoptimointi	Konttien reitityksen kokonaiskustannusten minimointi	Lineaarinen relaxsaatio, CPLEX	Syklinen, toistuvat käynnit	Satunnainen
Fagerholt 1999; 2004 [33]; [34]	Laivan reititys, laivaston koko ja koostumus (VRPMTL)	Heterogeeninen	Kokonaislukuoptimointi	Kokonaiskujetuskustannusten minimointi	Joukkoihin osittaminen, CPLEX	Sukkulointi, syklinen	Satunnainen
Jin et al. 2005 [64]	Laivan reititys (VRPPDTW)	Homogeeninen	Sekalukuoptimointi	Painotettujen kokonaiskustannusten minimointi	VNS eli muutettava naapurustohaku, tabuhaaku	Syklinen	VRP-instansseja
Sun & Li 2006 [129]	Laivan reititys (VRPPDTW)	Homogeeninen	Sekalukuoptimointi	Painotettujen kokonaiskustannusten minimointi	Immuuni geneettinen algoritmi	Syklinen	VRP-instansseja
Sambracos et al. 2004 [120]	Laivan reititys (CVRP)	Homogeeninen	Yksinkertaistettu lineaarinen optimointi	Operointikustannusten minimointi	Listaukseen perustuva kynnysarvon hyväksyntä -heuristiikka	Syklinen	Aigeianmeri
Karlaftis et al. 2009 [67]	Laivan reititys (VRPSPDTL)	Homogeeninen	Lineaarinen sekalukuoptimointi	Kokonaispurjehdusajan minimointi	Geneettinen algoritmi	Syklinen	Aigeianmeri
Polat 2013 [109]	Yhdistetty laivaston koko, koostumus ja allokointi, laivojen reititys ja aikataulut	Heterogeeninen (VRPSPDTL)	Lineaarinen sekalukuoptimointi	Kokonaiskustannusten minimointi	Mukautuva naapurustohaku -heuristiikka (eng. Adaptive Neighborhood Search)	Syklinen, sukkulointi	Mustameri

Taulukko 9:
(Polat [109], s. 55)

Leung & Wu [76] loivat moniskenaarioisen jatkuva-aikaisen optimointimallin stokastisella kysynnällä. Tämän mallin avulla saatiin toimitettua tyhjätkontit Lähi-idästä useisiin vientisatamiin Kaukoidän alueella ja uudelleensijoitettua tyhjätkontit ylijäämäkontit mistä tahansa satamasta satamiin, joissa oli vajausta tyhjätkontteista.

Song & Dong [126] tarkastelivat tyhjien konttien uudelleensijoitusongelmaa dynaamisesta ja stokastisesta näkökulmasta minimoiden odotetut kokonaiskustannukset, jotka koostuivat varastointikustannuksista, mahdollisista myynninmenetyksistä, purku- ja lastauskustannuksista sekä konttien kuljetuskustannuksista valmiiksi suunnitellussa palveluverkossa. Ei-uudelleensijoituskäytäntöä ja kolmea muuta heuristista käytäntöä vertailtiin käyttäen simulointimallia. Dong & Song [28] arvioivat konttilaivaston koko-ongelmaa valmiiksi suunnittelussa MPC-palveluverkossa huomioiden konttien uudelleensijoittamisen epävakaiden ja epätasapainoisten konttikysyntöjen vallitessa. Näitä havainnollistetaan tasa- ja normaalijakaumilla. Tutkijat minimoivat kokonaiskustannuksia geneettisen algoritmin avulla. Esimerkkitapauksina olivat Tyynenmeren ylittävä kolme satamaa ja neljä alusta käsittävä reitti, jonka jakson kesto oli 22 kuukautta, ja Euroopan ja Aasian välinen 20 kuukauden mittainen, 10 satamaa ja 8 laivaa sisältävä reitti.

Francesco et al. [36] tutkivat tyhjien konttien uudelleensijoitusta huomioiden myös kysynnän vaihtelut. Tutkijat esittivät pitkitetyn moniskenaarioisen stokastisen optimointimallin (eng. time-extended multi-scenario stochastic optimization model), jossa menneiden tapahtumien datalla ei ollut merkitystä päätöksenteon kannalta. Myöhemmin Francesco et al. [37] yleistivät aiemman tutkimuksen [36] tyhjien konttien uudelleensijoitusongelman huomioiden mahdolliset satamahäiriöt valmiiksi suunnitellussa palveluverkossa.

Muutamissa tutkimuksissa on tutkittu laivojen aikataulutusta huomioiden satamien epävarman luonteen jo valmiiksi suunnitelluissa palveluverkoissa. Qi & Song [110] tarkastelivat laivan optimaalista aikataulutusta valmiiksi suunnitellulla laivareitillä minimoiden odotetut polttoainekustannukset ja päästöt huomioimalla satamien epävarmat ajat ja palvelutiheysvaatimukset. Tutkijat esittivät matemaattisen mallin ja ratkaisivat Tyynenmeren ylittävän kahdeksan sataman ja yhdeksän satamakäynnin reitin käyttäen simulaatioon perustuvia stokastisia approksimaatiomenetelmiä. Wang & Meng [141] tutkivat linjalaivauksen aikataulutusta pyrkiessä määrittämään kaikkien laivojen satamaansaapumisajan huomioiden polttoainekulutuskäyrän jokaisella reitillä ja epävarmuudet sekä merellä että satamissa. Tutkijat esittivät epälineaarisen stokastisen sekalukuoptimointimallin minimoidakseen laivojen kustannukset ja odotetut polttoainemenot. Esimerkkitapauksena oli valmiiksi suunniteltu palveluverkko Aasian, Euroopan ja Oseanian välillä, jossa oli 46 satamaa, 11 laivareittiä ja kolme eri laivatyyppiä.

Wang & Meng [142] tarkastelivat robustia linjalaivausaikataulutusta huomioiden myös epävarman ruuhkautumisesta johtuvan jonotusajan satamissa ja epävarman konttien käsittelyajan. Ongelma esitettiin epälineaarisen stokastisena sekalukuoptimointimallina, jossa häiriöistä palaudutaan nopeam- malla kulkunopeudella (eng. fast steaming) säilyttäen edelleen satamajärjes- tyksen. Ongelman ratkaisuun käytettiin hybridialgoritmia, jossa yhdistettiin otoskeskiarvon approksimointimenetelmiä, linearisointitekniikoita ja hajotel- marakenteita. Esimerkkitaipauksena oli Aasian, Euroopan ja Oseanian väli- nen palveluverkko.

Konttilaivojen allokointi (sijoittelu reiteille) on myös linjalaivauksen on- gelma. Ng & Kee [100] arvioivat sukkuloivan syöttölaivan optimaalista kokoa käyttäen talous- ja simulaatiomalleja Kaakkois-Aasian alueella. Tutkijat täh- densivät, että yksikään satamien ennustettu konttikysyntä, joka ei sisältänyt kausittaisuutta tai heilahtelua, ei haastateltujen henkilöiden mukaan kyennyt täyttämään simuloituja laivoja. Meng & Wang [91] ja Meng et al. [92] esit- tivät sattumarajoitteen optimointimallin lyhytaikaista laivastosuunnittelua varten minimoiden palveluverkon kokonaiskustannukset. Esitetty malli pyr- kii määrittämään laivaston koon, koostumuksen, laivojen allokoinnin ja pal- velutiheyden ennalta määrätyillä reiteillä kulkunopeuden huomioiden. Tut- kijat muuttivat mallin lineaariseksi sekalukuoptimointimalliksi ja ratkaisivat Aasia, Euroopan ja Oseanian välisen esimerkkitaipauksen käyttäen CPLEX- ohjelmistoa. Konttien kuljetustarpeen vaihtelu oli määrätty normaaliajakau- man mukaiseksi. Myöhemmin Meng et al. [93] tarkastelivat samaa ongelmaa ottaen huomioon myös uudelleenlastaustoiminnot. Tutkijat esittivät kaksivai- heisen stokastisen kokonaislukuoptimointimallin ja ratkaisualgoritmin, jossa yhdistyi otoskeskiarvon approksimointimenetelmä, duaalinen hajotelma ja Lagrangen relaksaatiomenetelmä. Dong & Song [29] arvioivat konttilaivas- ton koko-ongelmaa huomioiden yhtäaikaaisesti sekä epävakaa kysynnän et- tä stokastiset sisämaan kuljetukset valmiiksi suunnitellussa palveluverkossa. Tutkijat esittivät matemaattisen mallin ja ratkaisivat Tyynenmeren välisen sekä Euroopan ja Aasian välisten palveluverkkojen esimerkkitaipaukset käyt- täen simulointi- ja optimointimenetelmiä.

Dynaamisen linjalaivauksen tutkimuksissa on merkittävästi kiinnitetty huomiota satamien järjestykseen, konttien uudelleensijoittamiseen, kontti- paikkojen allokointiin, laivojen aikataulutukseen ja laivojen allokointiin jo valmiiksi suunnitelluissa palveluverkoissa huomioiden kysynnän vaihtelut. Näiden lisäksi muutamat tutkimukset tarkastelivat näitä ongelmia myös kausit- taisen vaihtelun vallitessa.

Chen & Zeng [19] esittivät epälineaarisen sekalukuoptimointimallin mak- simoidakseen konttipaikan keskimääräisen tuoton homogeenisessä laivastossa kausittaisten kysynnän ja rahtihintojen heilahtelujen vallitessa. Esitetty mal-

li valitsee syklisen satamajärjestyksen kandidaattisatamajoukosta allokoiden konttipaikat satamille siten, että vähemmän tuottavat satamat voidaan hylätä. Tutkijat ratkaisivat kymmenen sataman esimerkin Itä-Aasian alueella keskimääräisen vuosittaisen ja kaksikuukautisen kysynnän ja rahtihintojen vaihtelun vallitessa käyttäen kahden tason geneettistä algoritmia (eng. bi-level genetic algorithm; ks. taulukko A). Tulokset osoittavat, että konttipaikkojen allokoinnin suunnittelu kysynnän ja rahtihintojen heilahtelujen vallitessa voi kasvattaa tuottoja 41 prosenttia ja voi vähentää tarvittavaa keskimääräistä konttipaikkojen määrää 0,31-kertaiseksi. Huomioitakoon, että tutkijat käyttivät määrättyä laivan kokoa koko vuoden ajalle sekä kausittaisen että vuosittaisen kysynnän alla, mutta satamille allokoitujen konttipaikkojen määrä vaihteli kausien mukaisesti. Tutkimuksessa huomioitiin myös rahdin kuljetamiseen vaadittavien konttien omistus ja lyhyt- ja pitkäaikainen vuokraus sekä sijoittaminen tarvittaviin paikkoihin.

Meng & Wang [90] tutkivat laivaston allokointia ja konttien reititysongelmaa valmiiksi suunnitellussa palveluverkossa uudelleenlastaukset huomioiden ja sisällyttäen ongelmaan myös viikoittain vaihtuvat konttien kysynät lähtöpisteestä määränpäähän sekä suurimmat sallitut kuljetusajat. Ensimmäiseksi tutkijat loivat kaikki mahdolliset reitit lähtöpisteestä määränpäähän käyttäen aika-avaruusverkkomenetelmää huomioiden kuljetusaikarajoitteet. Lineaarisen sekalukuoptimointimallin avulla määrättiin optimaaliset alukset reiteille ja konttien kulkureitit huomioiden viikoittaiset kysynät, jotta voitiin minimoida kokonaiskustannukset samalla täyttäen myös konttikysynnän tarpeet. Esimerkkitapaus, joka käsittää Aasian, Euroopan ja Oseanian välillä 46 satamaa, 12 reittiä ja kolme eri mahdollista laivatyyppeä, ratkaistiin relaxatiomallin avulla 26 viikon suunnitteluhorisonttia varten. Huomioitakoon, että tutkijat allokoivat laivat reiteille käyttäen määrättyä laivakokoa koko vuoden ajalle viikoittaisten vaihteluiden vallitessa, mutta allokoivat kontit eri lähtösatama-määränpää-reiteille kausiriippuvaisesti.

Meng & Wangin [90] artikkelissa mainitaan, että linjalaivaamiseen liittyvissä tutkimuksissa, joissa on ennalta määrätty kysyntä, eivät vastaa linjalai-
vauksen todellisuutta kausivaihteluineen. Toisaalta tutkimukset, joissa huomioidaan kysynnän heilahtelut ja kausittaisuus muodostavat lisää ongelmia, kuten konttipaikkojen allokointi, konttien uudelleensijoitus, laivojen aikataulutus ja laivojen allokointi reiteille jo suunnitelluissa palveluverkoissa.

2.4 Muita konttilaivaukseen liittyviä ongelmia

- Tyhjien konttien uudelleensijoittaminen (luvussa 2.3 mainittujen lisäksi: Chen & Zeng [19]; Furio et al. [40]; Furio et al. [41]; Choong et al. [22]; Shintani et al. [122])
- Kulkunopeus (Mulder & Dekker [97]; Ahola et al. [2])
- Konttien ahtaaminen (Ambrosino et al. [8])
- Sataman konttien varastointi- ja kuljettaminen (Huynh [58]; Heinonen et al. [49]; Alcalde [3])
- Ympäristön huomioiva reititys (Windeck [161])
- Konttipaikkojen allokointi laivoihin (Lu et al. [84]; Zeng et al. [173]; Zurheide & Fischer [175]; [176])
- Konttien kysynnän ennustaminen (Walter & Younger [137]; Liu et al. [81]); Khashei et al. [65]; Peng & Chu [107]; Pallis & de Langen [104]; Li & Xu [77]; Polat [109])

3 Kirjallisuudessa esiintyvien matemaattisten mallien tarkastelu

Tässä luvussa referoidaan valikoituja kirjallisuudesta löytyviä konttilaivojen reititykseen liittyviä matemaattisia malleja, joiden pohjalta on helpompi rakentaa tämän tutkimuksen malli, joka löytyy luvusta 4.

3.1 Kulkuneuvon reititysongelma yhtäaikaisella ja aikarajoitteisella noutamisella ja toimituksella

Kulkuneuvon reititysongelma yhtäaikaisella ja aikarajoitteisella noutamisella ja toimituksella (VRPSPDTL = Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery with Time Limit) on kulkuneuvon reititysongelman (VRP = Vehicle Routing Problem) muunnelma, joka voidaan esittää seuraavasti: asiakkaiden joukko sijaitsee jakeluverkossa, jossa asiakkaat vaativat sekä nouto- että toimitusoperaatioita (Polat [109]). Jokaista asiakasta tulee palvella molempien operaatioiden osalta annetulla homogeenisella kulkuneuvojoukolla. Jokainen kulkuneuvo lähtee keskusvarastolta kantaen mukanaan koko toimitusmäärän ja palaa takaisin täynnä noutotavaraa. Jokaisella asiakkaalla on myös palveluaika, jonka aikana purkamisen ja lastaamisen tulee tapahtua. Jokaisen kulkuneuvon kokonaismatka-aika koostuu siis matka-ajasta reitin varrella ja palvelutoiminnoista asiakkaille. Lisäksi jokaisen kulkuneuvon tulee päättää reittinsä ennen suurimman sallitun kestoajan umpeutumista. Tämä ongelma liittyy erityisesti syöttöliikenteeseen. Lineaarinen sekalukuoptimointimalli (MILP = Mixed Integer Linear Problem) tälle ongelmalle (VRPSPDTL) on esitetty artikkelissa Montane & Galvao [94].

Indeksit:

$i, j \in N$	asiakkaiden joukko (0 esittää keskusvarastoa)
$k \in K$	kulkuneuvojen joukko $ K < N $

Parametrit:

R	kulkuneuvojen suurin sallittu kokonaiskesto-aika
Q	kulkuneuvon lastauskapasiteetti
v	kulkuneuvon keskinopeus
c_{ij}	asiakkaiden i ja j välinen etäisyys
s_i	palveluaika asiakkaan i luona
d_i	asiakkaalle i toimitettavat tavarat
p_i	asiakkaalta i noudettavat tavarat

Päätösmuuttujat:

x_{ij}^k 1, jos kaari (i, j) kuuluu kulkuneuvon k reitille; 0, muulloin
 y_{ij} toimitettavat tavarat kaarella (i, j)
 z_{ij} noudettavat tavarat kaarella (i, j)

Ongelman matemaattinen esitys:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij}^k \quad (3.1)$$

s.t.

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} x_{ij}^k = 1, \quad \forall j \in N \setminus \{0\} \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij}^k - \sum_{i \in N} x_{ji}^k = 0, \quad \forall j \in N, k \in K \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in N \setminus \{0\}} x_{0j}^k \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} x_{i0}^k \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ij} - \sum_{i \in N} y_{ji} = p_j, \quad \forall j \in N \setminus \{0\} \quad (3.6)$$

$$\sum_{i \in N} z_{ij} - \sum_{i \in N} z_{ji} = d_j, \quad \forall j \in N \setminus \{0\} \quad (3.7)$$

$$y_{ij} + z_{ij} \leq Q x_{ij}^k, \quad \forall i, j \in N, k \in K \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \frac{c_{ij}}{v} x_{ij}^k + \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{j \in N} s_i x_{ij}^k \leq R, \quad \forall k \in K \quad (3.9)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} x_{ij}^k \leq |B| - 1, \quad \forall k \in K, B \subseteq N \setminus \{0\}, |B| \geq 2 \quad (3.10)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, y_{ij} \geq 0, z_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in N, k \in K. \quad (3.11)$$

Kohdefunktio (3.1) pyrkii minimoimaan kuljetun kokonaismatkan. Ensimmäinen rajoite (3.2) varmistaa, että jokaista asiakasta palvelee vain yksi kulkuneuvo. Rajoite (3.3) takaa, että jokainen kulkuneuvo saapuu ja poistuu jokaisen palvelemissaan asiakkaan luota. Rajoitteet (3.4) ja (3.5) takaavat, että enintään K kulkuneuvoa käytetään. Rajoitteet (3.6) ja (3.7) varmistavat, että jokaisen asiakkaan nouto- ja toimitusvaatimukset täytetään. Rajoite (3.8) takaa, että kulkuneuvo lastataan maksimikapasiteetin rajoissa. Yhtälö (3.9) kuvastaa aikarajoitetta. Yhtälö (3.10) eliminoi alisykliä muodostumisen (Karlaftis et al. [67]). Rajoitteessa (3.11) on muuttujien määrittelyjoukot. Kokonaisuutena tarkastellen rajoitteet varmistavat, että jokainen kulkuneuvo lähtee keskusvarastolta lastinaan toimitettavat tavarat ja saapuu keskusvarastolle lastinaan noudettavat tavarat, jotka on kerätty reitin varrella.

3.2 Syöttöliikenteen konttilaivojen reititysongelma

Syöttöliikenteen konttilaivojen reititysongelmassa (FCRP = Feeder Containership Routing Problem) syöttösatamien joukko sijaitsee jakeluverkossa, jossa syöttösatamat vaativat nouto- ja toimitusoperaatioita (Polat [109]). Jokaista syöttösatamaa tulee palvella kumpakaan operaatiota varten homogeenisellä konttilaivastolla (laivojen kapasiteetit ovat identtiset). Jokainen alus lähtee solmukohtasatamasta mukanaan kaikki toimitettavat kontit ja palaa takaisin solmukohtasatamaan mukanaan kaikki reitin varrella noudetut kontit. VRPSPDTL:ssä matkan tuli päättyä ennen suurinta sallittua kesto-aikaa. FCRP:ssä pyritään sen sijaan toimittamaan kaikki kontit ennen määriteltäviä aikarajoja (Karlaftis et al. [67]). Koska merikuljetuksen ja syöttösatamien operaatiot ovat hyvin riippuvaisia vallitsevista sääolosuhteista, FCRP:ssä aikaraja on niin sanotusti pehmeä. Toisin kuin VRPSPDTL:ssä, laivojen reitit voivat rikkoa aikarajoja, mutta tällaisia reittejä kuitenkin rangaistaan tietyn prosentoin mukaan. Lisäksi FCRP:ssä pyritään perinteisistä kuljetusongelmista poiketen minimoimaan konttien kokonaiskuljetusaika. Polatin tutkimuksessa [109] ongelma on ratkaistu käyttäen Egeanmeren saarten esimerkkitapausta, jonka on kehittänyt Sambracos et al. [120] ja yleistänyt Karlaftis et al. [67].

FCRP voidaan esittää MILP-ongelmana seuraavasti.

Indeksit:

$i, j \in N$	satamien joukko (0 esittää solmukohtasatama)
$k \in K$	konttilaivojen joukko $ K < N $

Parametrit:

L	palvelun aikaraja syöttösatamille
Q	konttilaivan lastauskapasiteetti
v	konttilaivan keskinopeus
c_{ij}	satamien i ja j välinen etäisyys
s_i	palveluaika satamassa i
d_i	satamaan i toimitettavat kontit
p_i	satamasta i noudettavat kontit
α	prosenttiluku, joka ilmaisee kokonaisaikasakkoa viivytyksistä

Päätösmuuttujat:

x_{ij}^k	1, jos kaari (i, j) kuuluu konttilaivan k reitille; 0, muulloin
y_{ij}	toimitettavat kontit kaarella (i, j)
z_{ij}	noudettavat kontit kaarella (i, j)
d_j^k	viive saavuttaessa satamaan j konttilaivalla k

Taulukko 11

FCRP:n matemaattinen esitys:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \frac{c_{ij}}{v} x_{ij}^k + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N \setminus \{0\}} x_{ij}^k \cdot s_j + \alpha \sum_{k \in K} \sum_{j \in N \setminus \{0\}} d_j \quad (3.12)$$

s.t.

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} x_{ij}^k = 1, \quad \forall j \in N \setminus \{0\} \quad (3.13)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij}^k - \sum_{i \in N} x_{ji}^k = 0, \quad \forall j \in N, k \in K \quad (3.14)$$

$$\sum_{j \in N \setminus \{0\}} x_{0j}^k \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (3.15)$$

$$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} x_{i0}^k \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (3.16)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ij} - \sum_{i \in N} y_{ji} = p_j, \quad \forall j \in N \setminus \{0\} \quad (3.17)$$

$$\sum_{i \in N} z_{ij} - \sum_{i \in N} z_{ji} = d_j, \quad \forall j \in N \setminus \{0\} \quad (3.18)$$

$$y_{ij} + z_{ij} \leq Qx_{ij}^k, \quad \forall i, j \in N, k \in K \quad (3.19)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \frac{c_{ij}}{v} x_{ij}^k + \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \sum_{j \in N} s_i x_{ij}^k \leq R, \quad \forall k \in K \quad (3.20)$$

$$L - \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \frac{c_{ij}}{v} x_{ij}^k = d_j^k, \quad \forall j \in N, k \in K \quad (3.21)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} x_{ij}^k \leq |B| - 1, \quad \forall k \in K, B \subseteq N \setminus \{0\}, |B| \geq 2 \quad (3.22)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, y_{ij} \geq 0, z_{ij} \geq 0, d_j^k \geq 0 \quad \forall i, j \in N, k \in K. \quad (3.23)$$

Kohdefunktio (3.12) minimoi matkan kokonaiskestoajan (reitti- ja satama-aika) ja kokonaisviivytyksestä aiheutuvan rangaistuksen. Ensimmäinen rajoite (3.13) takaa, että jokaisessa syöttösatamassa käy vain yksi konttialus. Toinen rajoite (3.14) varmistaa, että jokainen alus saapuu ja lähtee syöttösatamasta. Rajoitteet (3.15) ja (3.16) takaavat, että laivoja on käytössä maksimissaan K kappaletta. Rajoitteet (3.17) ja (3.18) varmistavat syöttösatamien konttien toimitus- ja noutotarpeiden täyttämisen. Yhtälö (3.19) on laivojen kapasiteettirajoite. Yhtälö (3.20) on palvelun aikarajoite. Yhtälö (3.21) antaa laivojen viivästymisen saavuttaessa satamiin. Rajoite (3.22) varmistaa, ettei alisyklejä synny. Rajoitteessa (3.23) on muuttujien määrittelyjoukot. FCRP eroaa siis VRPSPDTL:ssä kohdefunktion (3.12) ja rajoitteen (3.21) osalta. Yleisesti ottaen rajoitteet takaavat, että jokainen laiva lähtee solmukohtasatamasta mukanaan kaikki toimitettavat kontit ja palaa solmukohtasatamaan mukanaan reitin aikana syöttösatamista noutamansa kontit.

3.3 Syöttöliikenteen palveluverkon suunnitteluongelma

Tässä luvussa tarkastellaan Polatin väitöskirjassa [109] esitettyä matemaattista mallia, jossa syöttöliikenteen suunnitteluongelmassa (FND = Feeder Network Design) huomioidaan ensimmäistä kertaa koko purjehduskauden aikaiset heterogeenisen laivaston yksityiskohtaiset muuttuvat ja kiinteät kustannukset (ks. taulukko 12). Tässä esitetään lineaarinen sekalukuoptimointimalli (MILP), jonka avulla määritetään yhtäaikaisesti laivaston koko ja koostumus, laivojen allokointi reiteille, laivojen reititys sekä aikataulutuksen minimoimien syöttöliikenteen palveluverkon kokonaiskustannukset purjehduskauden aikana.

Syöttöliikenteen palveluverkossa syöttölaivat käyvät satamissa ennalta määritettyjä reittejä pitkin. Palveluverkossa tulee huomioida seuraavia tekijöitä: syöttölaivojen kapasiteetit, satamien ominaisuudet, satamien konttikysynät, polttoainekustannukset, laivojen operointi- ja vuokrauskustannukset.

Syöttöliikenteen palveluverkon suunnitteluongelma (FND) voidaan esittää seuraavasti. Syöttösatamien joukko sijaitsee jakeluverkossa, jossa syöttösatamat vaativat sekä konttien toimitus- että nouto-operaatioita. Jokaista syöttösatamaa tulee palvella kerran matkan aikana molempia operaatioita varten heterogeenisen laivaston avulla. Jokainen alus lähtee solmukohtasatamasta mukanaan toimitettavat kontit ja palaa takaisin solmukohtasatamaan mukanaan matkan aikana noudetut kontit. Jokaisella satamalla (syöttösatamat ja solmukohtasatama) on tietty operatiivinen tehokkuus konttien lastausta ja purkamista varten. Palveluaika satamissa riippuu satamatoimintojen tehokkuudesta, laivan koosta, purettavien ja lastattavien konttien määrästä ja luotsausajasta satamaan ja satamasta pois. Kokonaismatka-aika koostuu siis satamissa kuluvasta ajasta ja matkan kulkuajasta. Matka alkaa solmukohtasatamasta ja päättyy samaan pisteeseen sen jälkeen, kun toimitettavat kontit on viety syöttösatamiin ja samalla matkan varrella noudettavat kontit on purettu solmukohtasatamassa. Jokaisen aluksen täytyy päästä matkansa loppuun ennen aikarajaa. Ennen uuden matkan aloittamista laiva tarvitsee kunnostusajan korjauksia, puhdistusta ja jätteiden poistoa varten.

FND:llä on edellä mainittujen tietojen pohjalta samankaltaisuuksia VRPSPDTL:n kanssa (ks. luku 3.1). VRPSPDTL:ssä pyritään minimoimaan kuljettua kokonaismatkaa, FCRP:ssä (ks. luku 3.2) minimoidaan matkan kokonaiskestoa ja FND:ssä pyritään palvelemaan jokaista syöttösatamaa minimoimien purjehduskauden operoinnin kokonaiskustannukset.

Koska tässä tarkastellaan todellisen maailman ongelmaa, joitakin yksinkertaistuksia joudutaan tekemään, jotta voidaan paremmin keskittyä olennaisiin näkökohtiin.

Parametri/Muuttuja	Laskutapa
Kokonaiskustannukset	Kiinteät kustannukset + Muuttuvat kustannukset
Kiinteät kustannukset (eng. Capital expenditures CAPEX)	Tarvittavien laivojen lukumäärä * (Vuokraus + Ope- rointikustannukset)
Muuttuvat kustannukset (eng. Operating expenditures OPEX)	Palveluiden määrä * (Polttoainekustannukset merellä + Polttoainekustannukset satamissa + Satamamak- sut)
Tarvittavien laivojen lu- kumäärä	$[(\text{Matka-aika} + \text{Kunnostusaika}) / \text{Palvelutiheys}]$
Palveluiden määrä	$[\text{Suunnittelujakson pituus} / \text{Palvelutiheys}]$
Matka-aika	Merimatkojen kesto + Satamassa oloaika (syöttösa- tamat) + Satamassa oloaika (solmukohtasatama)
Joutoaika	Tarvittavien laivojen lukumäärä * Palvelutiheys- (Matka-aika + Kunnostusaika)
Laivan kokonaisaika	Matka-aika + Kunnostusaika + Joutoaika

Taulukko 12: Purjehduskauden kokonaiskustannusten muodostuminen (Polat [109], s. 74)

- Parametrien arvot ovat deterministisiä, esim. sääolosuhteet ja kausit-
taiset vaikutukset on poissuljettu
- Syöttösatamien välillä ei ole suoraa toimitusta
- Jonotusaikaa satamissa ei ole huomioitu
- Satamien laituriin kiinnittymisen aikaikkunoita ei huomioida, sillä niitä
ei tiedetä edeltä koko purjehduskauden ajalle
- Syöttösatamien konttien kysyntää ja tarjontaa ei voida jakaa
- Samantyyppisillä aluksilla on yhtä suuri kapasiteetti
- Polttoainekustannukset ovat samat kaikissa satamissa
- Tarkastellaan ainoastaan vuokrattuja laivoja
- Satamassa laivan valmisteluaika (luotsaus, laituriin kiinnittyminen, puh-
distaminen jne.) riippuu ainoastaan laivan tyypistä
- Nopeudesta riippuvia polttoainekustannuksia ja kanaaleissa tai vastaa-
vissa kulkemisen kestoa ja polttoainekustannuksia ei tässä mallissa huo-
mioida

Matemaattisen esityksen muuttujat ja parametrit:

Indeksit ja joukot

$i, j \in N$	satamien joukko (0 = solmukohtasatama)
$s \in S$	konttilaivatyyppien joukko
$(i, j) \in L$	sallittujen satamien välisten matkaosuuksien joukko
$r \in R$	reittien joukko ($ R < N $)

Parametrit

f	palvelutiheys	[vrk]
γ	palveluiden määrä purjehduskauden aikana	[lkm]
D	purjehduskauden kesto	[vrk]
K	matkan suurin sallittu kesto	[tunti]
v_i^s	laivatyyppin s valmistelu-aika satamassa i	[tunti]
u^s	laivatyyppin s kunnostusaika	[tunti]
m^s	saatavilla olevien laivojen lukumäärä tyyppiä s	[lkm]
q^s	laivatyyppin s kapasiteetti	[TEU]
h^s	laivatyyppin s keskinopeus	[solmu]
o_i^s	satamatoimintojen tehokkuus satamassa i laivatyyppille s	[TEU/tunti]
w_{ij}	satamien i ja j välinen etäisyys	[merimaili]
t_i^s	laiturointiaika laivatyyppillä s satamassa i	[tunti]
d_i	sataman i päivittäinen konttikysyntä (toimitus)	[TEU]
p_i	sataman i päivittäinen konttitarjonta (nouto)	[TEU]
α	päämoottorin polttoaineen hinta	[\$/tonni]
β	apumoottorin polttoaineen hinta	[\$/tonni]
cc^s	laivatyyppin s vuokraushinta	[\$/laiva]
fc^s	laivatyyppin s operointikustannukset (hallinto, huolto, vakuutus jne.)	[\$/laiva]
a^s	laivatyyppin s päämoottorin polttoaineen kulutus merellä	[tonni/merimaili]
b^s	laivatyyppin s apumoottorin polttoaineen kulutus laiturissa	[tonni/tunti]
bc_i^s	laivatyyppin s valmistelukustannukset satamassa i	[\$/laiva]

Päätösmuuttujat

x_{ij}^{rs}	1, jos kaari kuuluu satamien i ja j välillä reitille r laivatyyppillä s ; 0, muulloin	[binääri]
y_{ij}	kontit, jotka noudetaan reitin varrella satamaan i asti ja jotka kuljetetaan satamasta i satamaan j	[TEU]
z_{ij}	kontit, jotka toimitetaan satamiin reitin varrella sataman i jälkeen ja kuljetetaan satamasta i satamaan j	[TEU]
e^{rs}	laivatyyppiä s tarvittava lukumäärä reitillä r	[lkm]
c^{rs}	reitillä r kiertoaika laivatyyppillä s	[tunti]
FC	purjehduskauden yhteenlasketut kiinteät kustannukset	[\$]
VC	purjehduskauden yhteenlasketut muuttuvat kustannukset	[\$]

Taulukko 13

FND:n MILP-esitys:

$$\min FC + VC \quad (3.24)$$

s.t.

$$FC = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} (cc^s + fc^s) \cdot e^{rs} \quad (3.25)$$

$$VC = \gamma \cdot \left(\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} w_{ij} \cdot a^s \cdot \alpha \cdot x_{ij}^{rs} + \sum_{i \in N} \sum_{s \in S} t_i^s \cdot b^s \cdot \beta + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N \setminus \{0\}} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} bc_i^s \cdot x_{ij}^{rs} \right), \quad (3.26)$$

missä $\gamma = \lceil \frac{D}{f} \rceil$ ja $t_i^s = \frac{(p_i + d_i) \cdot f}{o_i^s}$.

$$\frac{c^{rs} + u^s}{f} \leq e^{rs} \quad \forall r \in R, s \in S \quad (3.27)$$

$$c^{rs} = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \left(t_i^s + v_i^s + \frac{w_{ij}}{h^s} \right) \cdot x_{ij}^{rs} \quad \forall r \in R, s \in S \quad (3.28)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} x_{ij}^{rs} = 1 \quad \forall j \in N \setminus \{0\} \quad (3.29)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij}^{rs} - \sum_{i \in N} x_{ji}^{rs} \quad \forall j \in N, r \in R, s \in S \quad (3.30)$$

$$\sum_{j \in N \setminus \{0\}} x_{0j}^{rs} \leq 1 \quad \forall r \in R, s \in S \quad (3.31)$$

$$\sum_{j \in N \setminus \{0\}} x_{i0}^{rs} \leq 1 \quad \forall r \in R, s \in S \quad (3.32)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} x_{ij}^{rs} \leq |B| - 1 \quad \forall r \in R, s \in S, B \subseteq N \setminus \{0\}, |B| \geq 2 \quad (3.33)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{r \in R} x_{ij}^{rs} \leq m^s \quad \forall s \in S \quad (3.34)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ji} - \sum_{i \in N} y_{ij} = p_j \cdot f \quad \forall j \in N \quad (3.35)$$

$$\sum_{i \in N} z_{ij} - \sum_{i \in N} z_{ji} = d_j \cdot f \quad \forall j \in N \quad (3.36)$$

$$y_{ij} + z_{ij} \leq q^s \cdot x_{ij}^{rs} \quad \forall i, j \in N, r \in R, s \in S \quad (3.37)$$

$$c^{rs} \leq K \quad \forall r \in R, s \in S \quad (3.38)$$

$$x_{ij}^{rs} \in \{0, 1\}, y_{ij}, z_{ij}, e^{rs} \in \mathbb{Z}^+, c^{rs} \geq 0 \quad \forall i, j \in N, (i, j) \in L, r \in R, s \in S. \quad (3.39)$$

Kohdefunktio (3.24) minimoi purjehduskauden kokonaiskustannukset. Lausekkeissa (3.25) ja (3.26) määritellään kiinteät ja muuttuvat kustannukset. Lausekkeessa (3.27) on laskettu tarvittavien laivojen määrä jokaiselle reitille. Lauseke (3.28) määrittää laivojen kierrosajan jokaisella reitillä (laituointiaika + palveluaika + merimatkan kesto). Rajoite (3.29) varmistaa, että jokaista syöttösatamaa palvelee vain yksi laiva yhden reitin aikana. Rajoite (3.30) takaa, että jokainen laiva saapuu ja lähtee syöttösatamasta. Rajoitteet (3.31) ja (3.32) määräävät saman myös solmukohtasatamalle, josta jokainen reitti alkaa ja loppuu. Rajoitteessa (3.33) eliminoidaan alisykliä muodostuminen (Karlaftis et al. [67]). Rajoite (3.34) varmistaa, että käytössä olevien laivatyyppien määrä ei ylitä sallittua ylärajaa. Rajoitteet (3.35) ja (3.36) esittävät jokaisen syöttösataman konttien nouto- ja toimitusmääriä. Yhtälö (3.37) on laivojen kapasiteettirajoite. Rajoite (3.38) kuvaa matkan maksimikestoajaa. Viimeisessä kohdassa (3.39) on päätösmuuttujien määrittelyalueet. Rajoitteet yleisesti ottaen varmistavat, että jokainen alus lähtee solmukohtasatamasta mukanaan toimitettavat kontit ja palaa takaisin solmukohtasatamaan mukanaan reitin varrella noutamansa kontit.

3.4 Linjalaivauksen palveluverkon suunnittelu epävakaan kysynnän vallitessa

Tässä luvussa tarkastellaan linjalaivauksen palveluverkon suunnittelua epävakaan kysynnän vallitessa (LSND = Liner Shipping Network Design), joka löytyy Polatin väitöskirjasta [109]. Useimmissa tutkimuksissa linjalaivausta tarkastellaan tilanteessa, jossa konttien kysyntä ja tarjonta ovat vakaita arvoja purjehduskauden aikana. Tutkimukset, joissa tutkitaan kysynnän heilahtelua ja kausittaisuutta, tarkastelevat ongelmia valmiiksi suunnitelluissa palveluverkoissa (ks. luku 2.3). Polatin väitöskirjassa tutkitaan ensimmäistä kertaa kysynnän heilahtelujen vaikutusta koko purjehduskauden ajalla. Tässä lineaarisessa sekalukuoptimointimallissa määrätään yhtäaikaisesti laivaston koko ja koostumus, laivojen allokointi reiteille, laivojen reititys ja aikataulut hub-and-spoke-syöttöliikennepalveluverkossa minimoimalla purjehduskauden kokonaiskustannukset kausittaisten kysynnän heilahtelujen vallitessa. Malli sallii purjehduskauden aikana jaksoittaisia muutoksia palveluverkossa reittien, laivojen allokoinnin ja aikataulutuksen osalta ennustetun kysynnän mukaan. Ennusteet määräytyvät linjalaivaajien päätöksentekijöiden mukaan.

Luvussa 3.3 esitettyä MILP-mallia on laajennettu huomioiden satamien epävakaat konttikysynät jaksoittaisesti purjehduskauden aikana. Laajennus sisältää käytettävissä olevat laivat ja sallii tarpeettomien laivojen ulosvuokrauksen.

LSND-ongelman laajennettu MILP-malli voidaan esittää käyttäen seuraavia parametreja ja muuttujia:

Indeksit ja joukot

i, j	\in	satamien joukko ($0 =$ solmukohtasatama)
N		
$s \in S$		konttilaivatyyppien joukko
$(i, j) \in L$		sallittujen satamien välisten matkaosuuksien joukko
$r \in R$		reittien joukko ($ R < N $)
$g \in G$		sallittujen palveluverkon muutosjaksojen joukko

Parametrit

f	palvelutiheys	[vrk]
a_g	jakson g kesto	[vrk]
γ_g	palveluiden määrä jakson g aikana	[lkm]
K	matkan suurin sallittu kesto	[tunti]
v_i^s	laivatyyppin s valmistelu-aika satamassa i	[tunti]
u^s	laivatyyppin s kunnostusaika	[tunti]
m^s	vuokralle saatavissa olevien laivojen lukumäärä tyyppiä s	[lkm]
sn^s	käytettävissä olevien laivojen lukumäärä tyyppiä s	[lkm]
q^s	laivatyyppin s kapasiteetti	[TEU]
h^s	laivatyyppin s keskinopeus	[solmu]
o_i^s	satamatoimintojen tehokkuus satamassa i laivatyyppille s	[TEU/tunti]
w_{ij}	satamien i ja j välinen etäisyys	[merimaili]
t_{gi}^s	laituointiaika laivatyyppillä s satamassa i jaksolla g	[tunti]
d_{gi}	sataman i konttikysyntä (toimitus) jaksolla g	[TEU/vrk]
p_{gi}	sataman i konttitarjonta (nouto) jaksolla g	[TEU/vrk]
α	päämoottorin polttoaineen hinta	[\$/tonni]
β	apumoottorin polttoaineen hinta	[\$/tonni]
cc^s	laivatyyppin s vuokraushinta (charter in)	[\$/vrk]
cp^s	laivatyyppin s ulosvuokraushinta (charter out)	[\$/vrk]
oc^s	laivatyyppin s omistushinta	[\$/vrk]
fc^s	laivatyyppin s operointikustannukset (hallinto, huolto, vakuutus jne.)	[\$/laiva]
mf^s	laivatyyppin s päämoottorin polttoaineen kulutus merellä	[tonni/merimaili]

af^s	laivatyypin s apumoottorin polttoaineen kulutus laiturissa	[tonni/tunti]
bc_i^s	laivatyypin s valmistelukustannukset satamassa i	[\$/laiva]

Päätösmuuttujat

x_{gij}^{rs}	1, jos kaari kuuluu satamien i ja j välillä reitille r laivatyypillä s jaksolla g ; 0, muulloin	[binääri]
y_{gij}	kontit, jotka noudetaan reitin varrella satamaan i asti ja jotka kuljetetaan satamasta i satamaan j jaksolla g	[TEU]
z_{gij}	kontit, jotka toimitetaan satamiin reitin varrella sataman i jälkeen ja kuljetetaan satamasta i satamaan j jaksolla g	[TEU]
e_g^{rs}	laivatyyppejä s tarvittava lukumäärä reitillä r jaksolla g	[lkm]
c_g^{rs}	reitin r kiertoaika laivatyypillä s jaksolla g	[tunti]
su_g^{rs}	käytettävien omistettujen laivojen määrä tyyppiä s reitillä r jaksolla g	[lkm]
co_g^s	ulosvuokrattujen laivojen määrä tyyppiä s jaksolla g	[lkm]
ci_g^{rs}	käytettävien vuokrattujen laivojen määrä tyyppiä s reitillä r jaksolla g	[lkm]
FC	purjehduskauden yhteenlasketut kiinteät kustannukset	[\$]
VC	purjehduskauden yhteenlasketut muuttuvat kustannukset	[\$]

Taulukko 14

LSND:n MILP-esitys:

$$\begin{aligned} \min \quad & FC + VC & (3.40) \\ \text{s.t.} \quad & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} FC = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{g \in G} ((oc^s + fc^s)su_g^{rs} + (cc^s + fc^s)ci_g^{rs}) \\ - \sum_{s \in S} \sum_{g \in G} co_g^s \cdot cp^s \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned}
VC = & \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{g \in G} \gamma_g \cdot w_{ij} \cdot x_{gij}^{rs} \cdot m \cdot f^s \cdot \alpha + \sum_{i \in N} \sum_{s \in S} \sum_{g \in G} \gamma_g \cdot t_{gi}^s \cdot a \cdot f^s \cdot \beta \\
& + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N \setminus \{0\}} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \gamma_g \cdot x_{gij}^{rs} \cdot b c_i^s, \quad (3.42)
\end{aligned}$$

missä $\gamma_g = \lceil \frac{a_g}{f} \rceil$ ja $t_{gi}^s = \frac{(p_{gi} + d_{gi})f}{o_i^s}$.

$$\frac{c_g^{rs} + u^s}{f} \leq e_g^{rs} \quad \forall r \in R, s \in S, g \in G \quad (3.43)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \left(t_{gi}^s + v_i^s + \frac{w_{ij}}{h^s} \right) x_{gij}^{rs} = c_g^{rs} \quad \forall r \in R, s \in S, g \in G \quad (3.44)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} x_{gij}^{rs} = 1 \quad \forall j \in N \setminus \{0\}, g \in G \quad (3.45)$$

$$\sum_{i \in N} x_{gij}^{rs} - \sum_{i \in N} x_{gji}^{rs} = 0 \quad \forall j \in N, r \in R, s \in S, g \in G \quad (3.46)$$

$$\sum_{j \in N \setminus \{0\}} x_{g0j}^{rs} \leq 1 \quad \forall r \in R, s \in S, g \in G \quad (3.47)$$

$$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} x_{gi0}^{rs} \leq 1 \quad \forall r \in R, s \in S, g \in G \quad (3.48)$$

$$s u_g^{rs} + c i_g^{rs} = e_g^{rs} \quad \forall r \in R, s \in S, g \in G \quad (3.49)$$

$$\sum_{r \in R} s u_g^{rs} + c o_g^{rs} = s n^s \quad \forall s \in S, g \in G \quad (3.50)$$

$$\sum_{r \in R} c i_g^{rs} \leq m^s \quad \forall s \in S, g \in G \quad (3.51)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ggi} - \sum_{i \in N} y_{gij} = p_{gj} f \quad \forall j \in N, g \in G \quad (3.52)$$

$$\sum_{i \in N} z_{gij} - \sum_{i \in N} z_{gji} = d_{gj} f \quad \forall j \in N, g \in G \quad (3.53)$$

$$y_{ggi} + z_{gij} \leq q^s x_{gij}^{rs} \quad \forall i, j \in N, r \in R, s \in S, g \in G \quad (3.54)$$

$$c_g^{rs} \leq K \quad \forall r \in R, s \in S, g \in G \quad (3.55)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} x_{gij}^{rs} \leq |B| - 1 \quad \forall r \in R, s \in S, g \in G, B \subseteq N \setminus \{0\}, |B| \geq 2 \quad (3.56)$$

$$\begin{aligned} x_{gij}^{rs} &\in \{0, 1\} \\ y_{gij}, z_{gij}, e_g^{rs}, su_g^{rs}, co_g^s, ct_g^{rs} &\in \mathbb{Z}^+ \\ c_g^{rs} &\geq 0 \end{aligned} \quad \forall i, j \in N, (i, j) \in L, r \in R, s \in S, g \in G. \quad (3.57)$$

Kohdefunktio (3.40) minimoi palveluverkon kokonaiskustannukset purjehduskauden ajalla. Lausekkeet (3.41) ja (3.42) ilmaisevat kiinteitä ja muuttuvia kustannuksia. Tarvittavien alusten määrä täydelle palvelukierrokselle kaikille reiteille on laskettu lausekkeessa (3.43). Lauseke (3.44) laskee jokaisen aluksen kierrosajan jokaiselle reitille (laituointiaika + palveluaika + merimatka-aika). Rajoite (3.45) takaa, että jokaista syöttösatamaa palvelee vain yksi laiva ja rajoite (3.46) varmistaa, että sama alus saapuu ja lähtee syöttösatamasta jokaisella reitillä. Rajoitteet (3.47) ja (3.48) takaavat saman solmukohtasatamalle, josta reitit alkavat ja päättyvät. Lausekkeissa (3.49) ja (3.50) lasketaan vuokrattujen ja ulosvuokrattujen laivojen lukumäärät. Rajoite (3.51) esittää käytettävissä olevien vuokrattujen laivojen maksimimäärää tyyppiä kohden. Rajoitteet (3.52) ja (3.53) varmistavat, että syöttösatamien konttien nouto- ja toimituskysynät täytetään. Rajoite (3.54) kuvaa laivojen lastauskapasiteettia. Rajoite (3.55) kuvastaa matkan suurinta sallitua kestoa. Rajoitteen (3.56) avulla eliminoidaan alisykliä muodostuminen.

Lopuksi kohdassa (3.57) on kerrottu päätösmuuttujien määrittelyalueet. Kokonaisuutena rajoitteet varmistavat, että jokainen alus lähtee solmukohtasatamasta mukanaan toimitettavat kontit ja palaa takaisin solmukohtasatamaan mukanaan reitin varrella noutamansa kontit.

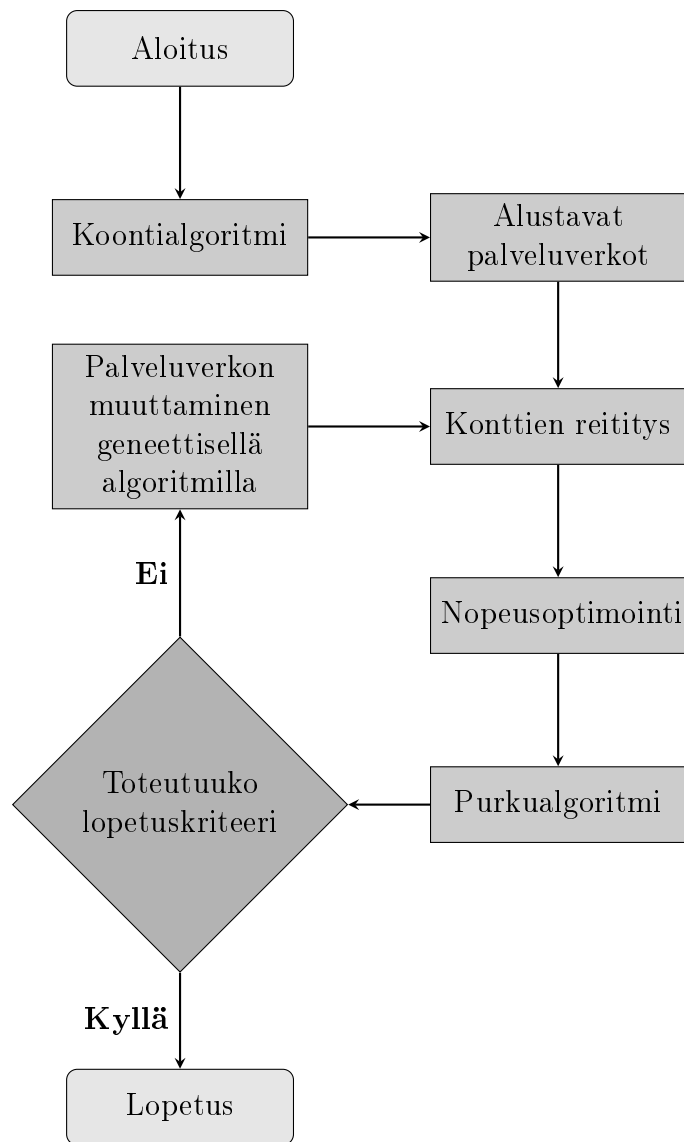
Polatin [109] väitöskirjan tutkimuksessa tämän mallin implementoinnissa palveluverkkoon on jokaisen jakson alussa mahdollista tehdä muutoksia, joita voivat olla muun muassa uudet reitit, aikataulut ja laivojen uudelleen allokointi käsittäen uusien aluksien vuokrauksen tai tarpeettomien laivojen ulosvuokrauksen. Emoliikenteeseen verrattuna syöttöliikenne kykenee useisiin ja tehokkaisiin palveluverkon muutoksiin.

3.5 Yhdistetty laivaston koostumus- ja aikataulutuson- gelma sekä konttien reititysongelma

Mulder & Dekker [97] tarkastelivat tutkimuksessaan yhdistettyä laivaston koostumus-, aikataulutus- ja reititysongelmaa. Laivaston koko on tässä tutkimuksessa määritetty vapaasti siten, että eri laivatyypit ovat 1000 TEU:n kerrannaisia eikä siis lähtökohtaista laivastoa ole. Saatavilla olevien laivojen määrällä on kuitenkin maksimiraja. Laivojen reitit ovat syklisiä ja koostuvat itään ja länteen suuntautuvista osista eli kokonaisen reitin aikana satamassa voidaan käydä kahdesti. Laivojen aikataulutus määräytyy aluksen nopeuden ja pääasiassa viikoittaisen palvelutiheyden mukaan. Mitä hitaammin halutaan kulkea, sitä enemmän reitille tulee allokoida aluksia. Konttien reitityksessä päätetään, mitkä kontit lastataan laivoihin ja millä reitityksellä ne kulkevat määränpäähänsä. Jotkin kontit voidaan hylätä, koska niistä saatavat tulot eivät peitä kustannuksia tai joitakin kontteja voidaan jättää lastaamatta, koska muualla voi olla vielä tuottoisampia kontteja.

Jokaisen osaongelman ratkaisu vaikuttaa toisiin, joten Mulderin ja Dekkerin [97] tutkimuksessa nämä ratkaistaan yhtäaikaaisesti algoritmin (ks. kuva 3.1) mukaisesti, jotta palveluverkko voisi olla vielä tuottoisampi. Tutkimuksessa huomioitiin ainoastaan olennaisimmat laivoihin liittyvät kustannukset, sillä muista kustannuksista (hallinto, myyntiorganisaatio ja päämaja) ei ollut saatavilla tietoa.

Ratkaisualgoritmissa satamat jaetaan keskinäisten välimatkojen pohjalta klustereihin eli ryppäisiin, joiden perusteella luodaan myöhemmin emo- ja syöttöliikenne (koontialgoritmi). Tämän jälkeen luodaan satunnainen alustava palveluverkko, jolle allokoidaan satunnaiset laivat saatavilla olevasta laivastosta (alustavat palveluverkot). Sitten määrätään kuljetettavien konttien reititys lineaarisen usean tuotteen virtausmallin avulla (konttien reititys, ks. luku 3.5.1).



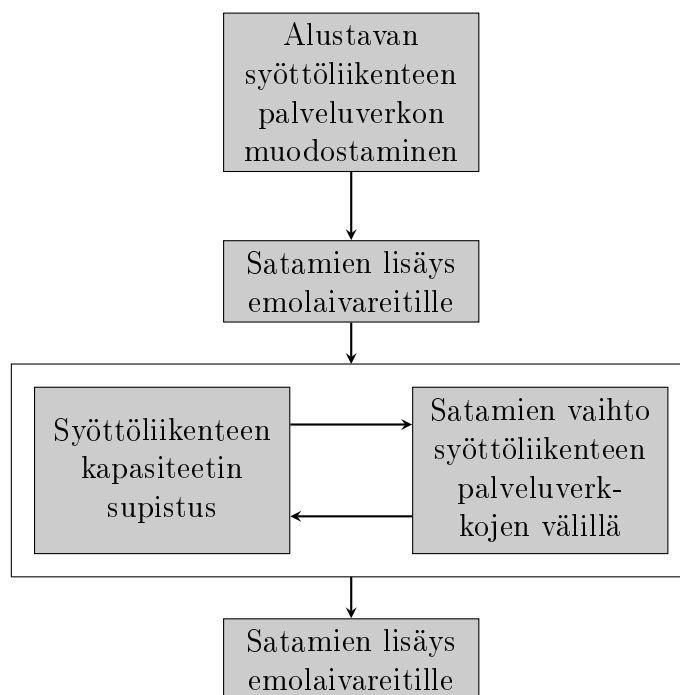
Kuva 3.1: Ratkaisualgoritmin vuokaavio (Mulder & Dekker [97], s. 3)

Tämän jälkeen määrätään luetteloinnin avulla laivojen optiminopeus palvelutiheyden ja laivojen tyyppin mukaan (nopeusoptimointi). Seuraavaksi satamaryypät (klusteri) hajotetaan ja luodaan ryppäälle syöttöliikenne (purkualgoritmi). Purkualgoritmi on kuvattu tarkemmin kuvassa 3.2. Edellä mainittuja algoritmin vaiheita toistetaan geneettisen algoritmin avulla, kunnes määritetty lopetuskriteeri toteutuu (palveluverkon muuttaminen geneettisellä algoritmilla).

Tutkimuksen numeerisessa osassa esimerkkitapauksena käytettiin Maerskin 58 satamaa käsittävää Aasian ja Euroopan välistä linjalaivausreittoa. Todellista dataa on vaikea saada, joten tässä tutkimuksessa käytettiin konttien kysyntämäärän arviointiin satamien konttien läpisyöttömääriä ja Maerskin vuosittaisia raportteja. Erityyppisten laivojen kustannusten ja nopeuksien arviointiin käytettiin seuraavista tutkimuksista löytyviä tietoja: Francesetti & Foschi [38], Lachener & Boskamp [68] ja Notteboom [102].

Paras tulos saatiin, kun satamat jaettiin kymmeneen ryppäeseen. Tällöin parannusta referenssipalveluverkkoon oli 14,4 prosenttia. Tässä tutkimuksessa referenssipalveluverkko koostui ainoastaan emoliikenteestä. Järjestyksessä seuraavaksi parhaimmat rypäskoot olivat 12, 8 ja 15. Kymmenen satamanryppään palveluverkossa käytössä oli 64 alusta emoliikenteessä ja 12 alusta syöttöliikenteessä. Referenssipalveluverkossa emoliikenteessä käytössä oli 91 alusta. Satamien järjestys ei ollut aina maantieteen mukainen.

Tutkimuksessa myös testattiin epävakaan kysynnän vaikutusta siten, että kysyntä vaihteli annetusta tasosta 80 ja 120 prosentin välillä kymmenessä eri testissä. Tällä oli alle yhden prosenttiyksikön vaikutus tuottoihin. Kymmenen ryppään verkko ja referenssipalveluverkko eivät siis olleet herkkiä kysynnän heilahteluille.



Kuva 3.2: Purkualgoritmin vuokaavio (Mulder & Dekker [97], s. 6)

3.5.1 Konttien reititysmalli

Tässä luvussa tarkastellaan konttien (rahdin) reititysmallia (CRM = Cargo Routing Model). Mallissa erotetaan suorat ja uudelleenlastausvirrat. Suorissa virroissa ei siis ole lainkaan uudelleenlastausta, vaan kontit kulkevat samassa laivassa.

Indeksit ja joukot

$h \in \mathcal{H}$	satamien joukko	
$t \in \mathcal{T} \subset \mathcal{H}$	uudelleenlastaussatamien joukko	(solmukohtasatamien)
$s \in \mathcal{S}$	laivareittien joukko	
$j \in \mathcal{J}$	osoitin, joka ilmaisee kulkeeko laiva satamien $h_1 \in \mathcal{H}$ ja $h_2 \in \mathcal{H}$ välillä reitillä $s \in \mathcal{S}$, missä $j = (h_1, h_2, s)$.	
$k \in \mathcal{K}$	osoitin, joka ilmaisee kulkeeko laiva suoraan satamien $h_1 \in \mathcal{H}$ ja $h_2 \in \mathcal{H}$ välillä reitillä $s \in \mathcal{S}$ käymättä välillä muissa satamissa, missä $k = (h_1, h_2, s)$.	

Parametrit

r_{h_1, h_2}	myyntitulo yhden TEU:n kuljettamisesta satamasta $h_1 \in \mathcal{H}$ satamaan $h_2 \in \mathcal{H}$
c_t^t	yhden TEU:n uudelleenlastauksen kustannukset solmukohtasatamassa $t \in \mathcal{T}$
c_h^h	yhden TEU:n purku- tai lastauskustannukset lähtö- tai määränpääsatamassa $h \in \mathcal{H}$
d_{h_1, h_2}	kuljetettavien konttien kysyntä satamasta $h_1 \in \mathcal{H}$ satamaan $h_2 \in \mathcal{H}$
b_s	laivareitin $s \in \mathcal{S}$ kapasiteetti
$I_{h_1, h_2, h_3, h_4, s}^{path}$	binäärinen parametri: 1, jos laiva kulkee peräkkäisten satamien $h_3 \in \mathcal{H}$ ja $h_4 \in \mathcal{H}$ kautta kulkiessaan satamasta $h_1 \in \mathcal{H}$ satamaan $h_2 \in \mathcal{H}$ reitillä $s \in \mathcal{S}$

Päätösmuuttujat

$x_{h_1, h_2, s}$	konttivirta laivareitillä $s \in \mathcal{S}$ peräkkäisten satamien $h_1 \in \mathcal{H}$ ja $h_2 \in \mathcal{H}$ välillä
$x_{h_1, h_2, s}^{od}$	suora konttivirta laivareitillä $s \in \mathcal{S}$ satamien $h_1 \in \mathcal{H}$ ja $h_2 \in \mathcal{H}$ välillä
$x_{h_1, t, h_2, s}^{ot}$	uudelleenlastauskonttivirta laivareitillä $s \in \mathcal{S}$ sataman $h_1 \in \mathcal{H}$ ja uudelleenlastaussataman $t \in \mathcal{T}$ välillä määränpäänä satama $h_2 \in \mathcal{H}$
x_{t, h, s_1, s_2}^{td}	uudelleenlastauskonttivirta laivareitillä $s_2 \in \mathcal{S}$ uudelleenlastaussataman $t \in \mathcal{T}$ ja määränpääsataman $h \in \mathcal{H}$ välillä, missä konttivirta uudelleenlastaussatamaan $t \in \mathcal{T}$ kuljetettiin laivareitillä $s_1 \in \mathcal{S}$
$x_{t_1, t_2, h, s_1, s_2}^{tt}$	uudelleenlastauskonttivirta laivareitillä $s_2 \in \mathcal{S}$ uudelleenlastaussatamien $t_1 \in \mathcal{T}$ ja $t_2 \in \mathcal{T}$ välillä määränpäänä satama $h \in \mathcal{H}$, missä konttivirta uudelleenlastaussatamaan $t_1 \in \mathcal{T}$ kuljetettiin laivareitillä $s_1 \in \mathcal{S}$
$x_{h_1, h_2, s}^{tot}$	kokonaiskonttivirta laivareitillä $s \in \mathcal{S}$ satamien $h_1 \in \mathcal{H}$ ja $h_2 \in \mathcal{H}$ välillä

Taulukko 15

CRM:n lineaarinen optimointimalli:

$$\begin{aligned}
& \max \sum_{h_1 \in \mathcal{H}} \sum_{h_2 \in \mathcal{H}} \sum_{s \in \mathcal{S}} r_{h_1, h_2} \left(x_{h_1, h_2, s}^{od} + \sum_{t \in \mathcal{T}} x_{h_1, t, h_2, s}^{ot} \right) \\
& - \sum_{h_1 \in \mathcal{H}} c_{h_1}^h \left(\sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{h_2 \in \mathcal{H}} \sum_{s \in \mathcal{S}} [x_{h_1, t, h_2, s}^{ot} + x_{h_2, t, h_1, s}^{ot}] + \sum_{h_2 \in \mathcal{H}} \sum_{s \in \mathcal{S}} [x_{h_1, h_2, s}^{od} + x_{h_1, h_2, s}^{od}] \right) \\
& - \sum_{t_1 \in \mathcal{T}} c_{t_1}^t \left(\sum_{t_2 \in \mathcal{T}} \sum_{h_2 \in \mathcal{H}} \sum_{s_1 \in \mathcal{S}} \sum_{s_2 \in \mathcal{S}} x_{t_1, t_2, h_2, s_1, s_2}^{tt} + \sum_{h_2 \in \mathcal{H}} \sum_{s_1 \in \mathcal{S}} \sum_{s_2 \in \mathcal{S}} x_{t_1, h_2, s_1, s_2}^{td} \right) \tag{3.58}
\end{aligned}$$

s.t.

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{s \in \mathcal{S}} x_{h_1, t, h_2, s}^{ot} + \sum_{s \in \mathcal{S}} x_{h_1, h_2, s}^{od} \leq d_{h_1, h_2} \quad \forall h_1, h_2 \in \mathcal{H} \tag{3.59}$$

$$x_{h_1, h_2, s} \leq b_s \quad \forall (h_1, h_2, s) \in \mathcal{K} \tag{3.60}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{h_1 \in \mathcal{H}} x_{h_1, t, h_2, s_1}^{ot} + \sum_{t_2 \in \mathcal{T}} \sum_{s_2 \in \mathcal{S}} x_{t_2, t_1, h_2, s_2, s_1}^{tt} - \sum_{s_2 \in \mathcal{S}} x_{t_1, h_2, s_1, s_2}^{td} \\
& - \sum_{t_2 \in \mathcal{T}} \sum_{s_2 \in \mathcal{S}} x_{t_1, t_2, h_2, s_1, s_2}^{tt} = 0 \quad \forall (t_1, h_2, s) \in \mathcal{J} \tag{3.61}
\end{aligned}$$

$$x_{h_1, h_2, s} - \sum_{h_3 \in \mathcal{H}} \sum_{h_4 \in \mathcal{H}} x_{h_3, h_4, s}^{tot} I_{h_3, h_4, h_1, h_2, s}^{path} = 0 \quad \forall (h_1, h_2, s) \in \mathcal{K} \tag{3.62}$$

$$\begin{aligned}
& x_{h_1, h_2, s_1}^{tot} - x_{h_1, h_2, s}^{od} - \sum_{h_3 \in \mathcal{H}} x_{h_1, h_2, h_3, s_1}^{ot} \sum_{s_2 \in \mathcal{S}} x_{h_1, h_2, s_2, s_1}^{td} \\
& - \sum_{h_3 \in \mathcal{H}} \sum_{s_2 \in \mathcal{S}} x_{h_1, h_2, h_3, s_2, s_1}^{tt} = 0 \quad \forall h_1, h_2 \in \mathcal{H}, s_1 \in \mathcal{S} \tag{3.63}
\end{aligned}$$

$$x_{h_1, h_2, s} \geq 0 \quad \forall (h_1, h_2, s) \in \mathcal{K} \tag{3.64}$$

$$x_{h_1, h_2, s}^{od} \geq 0 \quad \forall h_1, h_2 \in \mathcal{H}, s \in \mathcal{S} \quad (3.65)$$

$$x_{h_1, t, h_2, s}^{ot} \geq 0 \quad \forall h_2 \in \mathcal{H}, (h_1, t, s) \in \mathcal{J} \quad (3.66)$$

$$x_{t, h, s_1, s_2}^{td} \geq 0 \quad \forall s_1 \in \mathcal{S}, (t, h, s_2) \in \mathcal{J} \quad (3.67)$$

$$x_{t_1, t_2, h, s_1, s_2}^{tt} \geq 0 \quad \forall h \in \mathcal{H}, s_1 \in \mathcal{S}, (t_1, t_2, s_2) \in \mathcal{J}. \quad (3.68)$$

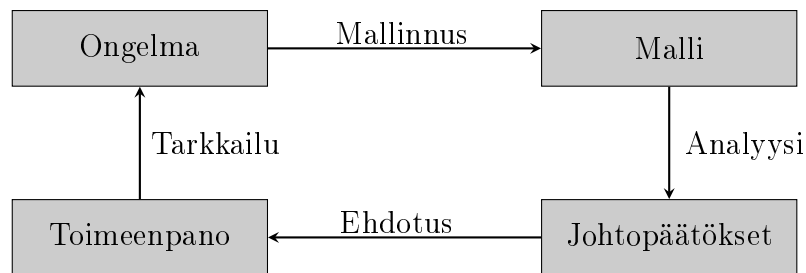
Kohdefunktiossa (3.58) pyritään maksimoimaan saatava voitto, joka on yhtä kuin tulot vähennettynä menoilla. Kustannukset koostuvat ainoastaan konttien lastauksesta, purkamisesta ja uudelleenlastauksesta. Koska reittiverkosto on jo annettu, kaikki muut kustannukset on määritetty ja ne voidaan vähentää myöhemmin tuotosta.

Rajoite (3.59) takaa, että satamasta toiseen kuljetettava konttimäärä ei ylitä annettua kysyntää. Rajoite (3.60) takaa, että laivaan lastattu konttimäärä kahden perättäisen sataman välillä ei ylitä laivan kapasiteettia. Rajoite (3.61) varmistaa, että uudelleenlastaussatamaan tuleva konttivirta, jonka määränäänä on satama $h_2 \in \mathcal{H}$ on yhtä suuri kuin uudelleenlastaussatamasta lähtevä konttivirta, jonka määränäänä on $h_2 \in \mathcal{H}$. Toisin sanoen, kaikki purettu uudelleenlastauskonttivirta myös lastataan uudelle reitille. Rajoite (3.62) määrittää konttivirran määrän kahden peräkkäisen sataman välillä. Rajoite (3.63) määrittää kokonaiskonttivirran kahden sataman välillä saman kierroksen aikana. Rajoitteet (3.64), (3.65), (3.66), (3.67) ja (3.68) varmistavat, että kahden sataman välillä ei ole negatiivisia virtoja.

4 Matemaattinen malli

Matemaattinen malli on muuttujien ja riippuvuuksien joukko, jota tarvitaan kuvaamaan operaatio-ongelman olennaisia piirteitä (Heinonen [50]; Rardin [113]). Optimointimallissa pyritään löytämään päätösmuuttujille optimaalisimmat arvot siten, että kohdefunktio saadaan minimoitua tai maksimoitua rajoitteiden sallimissa rajoissa. Optimointimallin tärkeimmät osat ovat vakiot, parametrit, päätösmuuttujat, rajoitukset ja kohdefunktio(t). Parametrien arvot tai jakaumat ovat ennalta tunnettuja. Päätösmuuttujien arvot määräytyvät optimoinnin tuloksena. Rajoitukset ovat päätösmuuttujien, vakioiden ja parametrien välisiä relaatiota. Kohdefunktio on päätösmuuttujien funktio, jolla mitataan päätöskriteerien saamia arvoja (Heinonen [50]; Huovinen [57]). Optimoinnissa pyritään löytämään mallia hyödyntämällä optimiratkaisua, joka on kaikista mahdollisista päätösmuuttujien arvoista koostuva joukko, jolla kohdefunktio saavuttaa vähintään yhtä hyvän arvon kuin millä tahansa muulla ratkaisulla noudattaen annettuja rajoituksia (Heinonen [50]; Rardin [113]).

Reaalimaailman mallinnus asettaa aina omat haasteensa ja rajoitteensa, sillä mallista tulee helposti liian monimutkainen huolimatta siitä, että se kuvastaa vain pientä osaa reaalimaailmasta. Laaja malli voi osoittautua liian mahdottomaksi ratkaista tai se saattaa kuormittaa laitteistoa suhteettomasti. Tässä tapauksessa mallia tulee yksinkertaistaa laskennan mahdollistamiseksi. Vaikka malli olisikin riittävän kattava, on olennaista löytää ja saada oikeat arvot parametreille. Mallinnusprosessi etenee usein kuvan 4.1 mukaisesti. (Heinonen [50].)



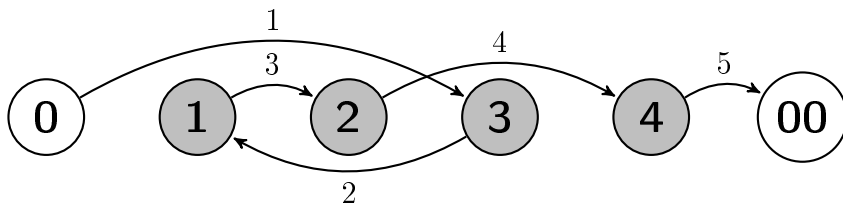
Kuva 4.1: Mallinnusprosessin kaavio (Mäkelä [98], s. 3)

4.1 Reittimalli

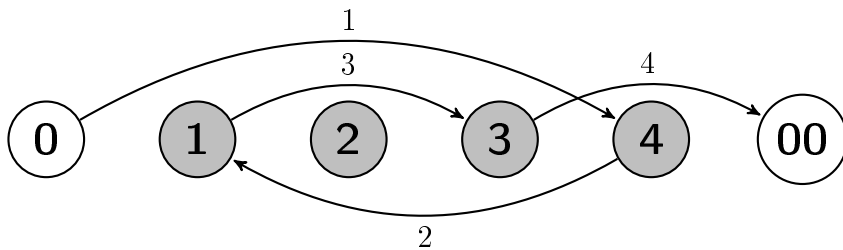
Tämän tutkimuksen lähtökohtana on se, että laivat kykenevät valitsemaan reitilleen vain tuottavimmat satamat, eli jotkin satamat voidaan ohittaa (eng. blank sailing), sillä perusteella, että saatavat tulot eivät ylitä menoja tai

jossain toisessa satamassa on tuottavampia kontteja. Luvussa 3 tarkastellut mallit eivät suoraan sovellu tähän tutkimukseen, sillä kyseisissä malleissa jokaisessa satamassa on välttämätöntä käydä. Tässä tutkielmassa esitellyn mallin avulla voidaan löytää tuottavimmat satamat, jonka jälkeen laivat voidaan aikatauluttaa. Laivojen aikataulutus jää kuitenkin tämän tutkielman ulkopuolelle.

Tutkimuksessa luodaan reittimalli, jossa konttilaivan symmetrinen tai epäsymmetrinen MPC-palveluverkko (ks. kuva 1.6) pilkotaan meno- ja paluureittiin. Tämän pohjalta voidaan luoda lyhyimmän (tuottavimman) reitin mukainen matemaattinen malli, jossa lähtö- ja maalisatamat ovat virtuaalisia (ks. kuva 4.2, solmut 0 ja 00). Tämä reittimalli on joustava, sillä se voi käsitellä useita reititysstrategioita. Käyttökelpoisin se on kuitenkin silloin, kun satamat ovat jonkinasteisessa jonomuodostelmassa, kuten yleensä Aasian ja Euroopan välisessä linjalaivauksessa. Useita muitakin reittimallitopologioitakin kokeiltiin, eritoten sellaisia, joissa jokaisella satamalla oli rinnakkainen virtuaalisatama. Ne todettiin toimimattomiksi lähinnä siitä syystä, että laivan todellinen reitti olisi ollut hankala määrittää ja sen pohjalta myös konttien kuljetusrajoitteiden luominen olisi ollut vaikeaa.



Kuva 4.2: Esimerkki: neljän sataman palveluverkon menoreitti



Kuva 4.3: Esimerkki: neljän sataman palveluverkon paluureitti

Reitin muodostamiselle saadaan seuraavat yleiset rajoitteet. Päätösmuuttuja $x_{g,i,j}^{r,s}$ tarkoittaa suunnattua kaarta satamasta i satamaan j laivan s reitillä r ajanjaksolla g . Joukko N sisältää kaikki satamat, joukko M on virtu-

aalisatamien joukko ja joukko P käsittää sekä satamat että virtuaalisatamat.

$$\sum_{i \in N} x_{g,0,i}^{r,s} = 1 \quad \forall g \in G, r \in R, s \in S \quad (4.1)$$

$$\sum_{i \in N} x_{g,i,00}^{r,s} = 1 \quad \forall g \in G, r \in R, s \in S \quad (4.2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{g,i,j}^{r,s} - \sum_{j \in N} x_{g,j,i}^{r,s} = 0 \quad \forall g \in G, i \in N, r \in R, s \in S \quad (4.3)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in P} x_{g,j,i}^{r,s} \geq 2 \quad \forall g \in G, r \in R, s \in S \quad (4.4)$$

Yhtälössä (4.1) reitti alkaa virtuaalisatamasta 0, josta siirrytään johonkin satamasta. Yhtälö (4.2) varmistaa, että reitti päättyy lopetussolmuun eli virtuaalisatamaan 00. Rajoitteet (4.1) ja (4.2) relaxoidaan varsinaisessa optimointimallissa, sillä jos aikarajoite tulee vastaan, laivaa ei voi reitittää. Rajoite (4.3) varmistaa, että jos satamaan tullaan, niin sieltä myös lähdetään. Rajoite (4.4) takaa, että meno- tai paluureitin varrella käydään vähintään kahdessa satamassa, muutoin sitä ei voi edes kutsua reitiksi. Tätä rajoitetta ei huomioida lopullisessa optimointimallissa, sillä jos reittiä ei muodostu, ei voida kuljettaa kontteja eikä näin ollen saada tuloja. Toisin sanoen rajoite sisältyy jo itse malliin. Jos rajoite olisi mukana mallissa, se olisi ristiriidassa aikarajoitteen kanssa.

Luonnollisesti paluureitin tulee alkaa siitä satamasta, johon menoreitti päättyy ja seuraava menoreitti alkaa samasta satamasta kuin edeltävä paluureitti päättyy. Olkoon joukon R parittomat indeksit (alkiot) menoreittejä ja parilliset indeksit paluureittejä. Näiden ehtojen pohjalta saadaan seuraava rajoite.

$$x_{g,0,i}^{(r+1),s} = x_{g,i,00}^{r,s} \quad \forall g \in G, i \in N, r \in R, r+1 \leq |R|, s \in S. \quad (4.5)$$

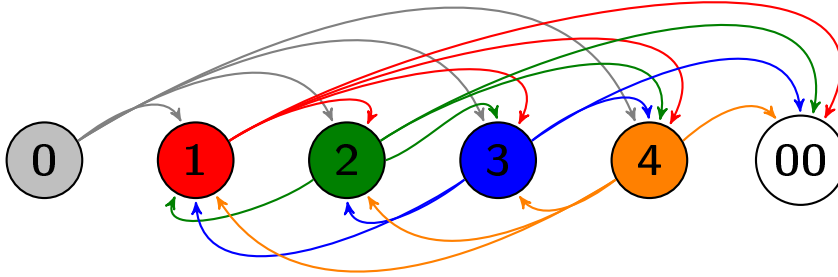
Lisäksi seuraavat kaaret eivät ole ylipäättään mahdollisia.

$$x_{g,i,0}^{r,s} = 0 \quad \forall g \in G, i \in P, r \in R, s \in S \quad (4.6)$$

$$x_{g,00,i}^{r,s} = 0 \quad \forall g \in G, i \in P, r \in R, s \in S \quad (4.7)$$

$$x_{g,i,i}^{r,s} = 0 \quad \forall g \in G, i \in P, r \in R, s \in S. \quad (4.8)$$

Tässä mallipohjassa kaikki mahdolliset (virtuaali)satamien väliset kaaret näkyvät kuvassa (4.4). Reittimallin muodostamisessa päätösmuuttujia on n :n sataman tapauksessa $n \cdot (n + 1) = n^2 + n$ kappaletta. Palveluverkkoja, joissa on vain kaksi satamaa ei ole mielekäästä tutkia, näin ollen $n \geq 3$.



Kuva 4.4: Kaikki mahdolliset kaaret

4.2 Työn määrittely ja optimointimalli

Työn tavoitteena on luoda matemaattinen malli, jossa valitaan laivastolle tuottavimmat laivareitit reittimallin pohjalta (ks. luku 4.1). Laivaston koko on ensisijaisesti rajoitettu eli mallissa lähdetään liikkeelle palveluntarjoajan nykyisestä laivastosta ja uusia laivoja voidaan ostaa tai vuokrata. Käytettävät laivat voivat siis olla omistuksessa tai vuokralla. Tarpeettomat omistuksessa olevat laivat voidaan vuokrata muille toimijoille. Palveluverkkoja voidaan muuttaa, kun suunnittelujakso $g \in G$ vaihtuu. Suunnittelujaksojen ideana on, että mallista saadaan dynaaminen siten, että kuljetettavien konttien määrät ja hinnat voivat muuttua, minkä seurauksena palveluverkko-kin voi muuttua. Toisin sanoen optimointimalli ratkaistaan erikseen jokaista $g \in G$ kohden. Muuttujissa ja parametreissa ilmenevät indeksit g eivät siis suoranaisesti vaikeuta ratkaisun laskentaa, vaan sillä osoitetaan, mitkä arvot ovat kausivaihteluille alttiimpia.

Lyhyesti sanottuna mallissa voidaan päättää, mitä aluksia käytetään, mihin satamiin mennään, missä järjestyksessä ja mitkä kontit otetaan mistäkin satamasta kyytiin. Malli on siten yhdistelmä ja muunnos lyhyimmän reitin ongelmasta (ks. luku 4.1; Wikipedia [155]) ja selkäreppuongelmasta (tuottavimpien konttien valitseminen; Wikipedia [152]). Mallin tavoitteena on löytää päätöksentekostrategian merkittävimpiä kriteereitä, sillä täysin autenttista mallia on liki mahdotonta luoda, sillä kaikkea tietoa ei ole saatavilla ja todellinen tilanne muuttuu jatkuvasti.

Mallia on yksinkertaistettu siten, että siinä huomioidaan ainoastaan TEU-kontit eikä lainkaan muita konttityyppejä. Tyhjien konttien uudelleensijoittamista ei huomioida. Tyhjien konttien uudelleensijoittaminen tarkoittaa siis sitä, että kuljettavan rahdin lähtösatamassa on riittävästi kontteja, joihin rahti voidaan ahdata. Tyhjien konttien uudelleensijoittamista on tarkasteltu monipuolisesti erityisesti Chen & Zengin tutkimuksessa [19]. Konttien uudelleenlastausta eli syöttöliikennettä ei ole huomioitu tässä mallissa, sillä se tekisi mallista entistä vaikeamman ratkaista.

Palvelutiheyttä ei huomioida tässä mallissa. Palvelutiheys on aiemmissa tutkimuksissa huomioitu siten, että satamissa tulee käydä riittävän usein suunnittelujakson aikana. Tässä tutkimuksessa yhtenä lähtökohtana on se, että satamassa ei ole välttämätöntä käydä, mikä olisi ristiriidassa palvelutiheysvaatimuksen kanssa. Tavoitteena onkin ensisijaisesti löytää tuottavimmat satamat ja sen perusteella myöhemmin aikatauluttaa laivat palvelutiheysvaatimusten toteuttamiseksi. Sitä ei kuitenkaan tässä tutkimuksessa käsitellä.

Laivojen kapasiteetteja on yksinkertaistettu siten, että kapasiteettirajoite q^s tarkoittaa käyttökapasiteettia. Laivalla on nominaalikapasiteetti, joka kertoo kuinka paljon laivaan mahtuu kontteja, käyttökapasiteetti, joka kertoo kuinka monta konttia korkeintaan on mahdollista lastata, sekä todellinen kapasiteetti, joka kertoo kuinka paljon kontteja todellisuudessa lastataan. Käyttökapasiteetti on noin 80 prosenttia nominaalikapasiteetista. (Ahola et al. [2].) Yleensä laivoja ei lastata täyteen kapasiteettiinsa, sillä usein satamassa laivasta ei välttämättä pureta kontteja yhtä monta kuin sinne lastataan. Samalla tyhjä tila saattaa olla myös tarpeen, jotta konttien siirtely satamassa helpottuisi, sillä ainoastaan konttipinon päällimmäiseen konttiin päästään käsiksi.

Merkittävimmät mallin yksinkertaistukset

- palvelutiheyttä ei huomioida
- vain TEU-kontteja
- konttien uudelleenlastaamista ei huomioida
- tyhjien konttien uudelleensijoittamista ei huomioida
- kaikki laivaan lastatut kontit puretaan ennen seuraavalle reitille siirtymistä

Optimointimallin luomiseksi tarvitaan myös muutamia apumuuttujia. Apumuuttuja $\varphi_{g,i}^{r,s}$ tarkoittaa sataman i järjestystä laivan s reitillä r .

$$\varphi_{g,i}^{r,s} = \begin{cases} 1, & \text{jos } x_{g,0,i}^{r,s} = 1 \\ 2, & \text{jos } x_{g,0,j}^{r,s} \cdot x_{g,j,i}^{r,s} = 1, \exists j \in N \\ 3, & \text{jos } x_{g,0,j_1}^{r,s} \cdot x_{g,j_1,j_2}^{r,s} \cdot x_{g,j_2,i}^{r,s} = 1, \exists j_1, j_2 \in N \\ n-1, & \text{jos } x_{g,0,j_1}^{r,s} \cdot x_{g,j_1,j_2}^{r,s} \cdot \dots \cdot x_{g,j_{n-1},j_{n-2}}^{r,s} \cdot x_{g,j_{n-2},i}^{r,s} = 1, \exists j_h \in N \\ n, & \text{jos } x_{g,0,j_1}^{r,s} \cdot x_{g,j_1,j_2}^{r,s} \cdot \dots \cdot x_{g,j_{n-1},j_{n-2}}^{r,s} \cdot x_{g,j_{n-2},i}^{r,s} \cdot x_{g,i,00}^{r,s} = 1, \exists j_h \in N \\ 0, & \text{muutoin} \end{cases} \quad \forall g \in G, i \in N, r \in R, s \in S, \quad (4.9)$$

missä $n = |N|$. Jos reitillä ohitetaan m satamaa, suurin $\varphi_{g,i}^{r,s}$ arvo on $n - m$. Apumuuttujasta tulee yksinkertaisempi, kun se linearisoidaan, kuten kaupamatkustajan ongelmassa on tehty (Wikipedia [158]).

$$\varphi_{g,i}^{r,s} - \varphi_{g,j}^{r,s} + n \cdot x_{g,i,j}^{r,s} \leq n - 1 \quad \forall g \in G, i, j \in N, r \in R, s \in S. \quad (4.10)$$

Apumuuttuja $\varphi_{g,i}^{r,s}$ voidaan myös esittää rekursiivisena funktiona (ks. algoritmi (1)), kun päätösmuuttujia $x_{g,i,j}^{r,s}$ tarkastellaan reitin mukaisessa järjestyksessä. Tätä funktiota voidaan esimerkiksi käyttää luotaessa heuristiikkaa. Funktio löytyy myös liitteestä C.2 python-ohjelmointikielellä kirjoitettuna.

Apumuuttuja $u_{g,i,j}^{r,s} \in \{0, 1\}$ ilmaisee sitä, päästäänkö reitillä satamasta i satamaan j (joukko N sisältää satamat). Tämä toteutuu, kun sataman i järjestysluku $\varphi_{g,i}^{r,s}$ reitillä on suurempi kuin 0 ja pienempi kuin määränpääsataman järjestysluku $\varphi_{g,j}^{r,s}$. Seuraavaa esitystapaa voidaan käyttää heuristiikan rakentamisessa:

$$u_{g,i,j}^{r,s} = \begin{cases} 1, & \text{jos } \varphi_{g,j}^{r,s} > \varphi_{g,i}^{r,s} > 0 \\ 0, & \text{muutoin} \end{cases} \quad \forall g \in G, i, j \in N, r \in R, s \in S. \quad (4.11)$$

Algoritmi 1 Funktio laskee $\varphi_{g,i}^{r,s}$:n arvot jokaiselle $i \in N$ jokaista $g \in G, r \in R, s \in S$ kohden

```

1: procedure MÄÄRITÄ.JÄRJESTYS( )           ▷ Sataman  $i \in N$ 
2:                                           ▷ järjestys laivan  $s$  reitillä  $r$ 
3:   while  $g \in G$  do
4:     while  $s \in S$  do
5:       while  $r \in R$  do
6:          $i \leftarrow \text{satama } 0$ 
7:          $k \leftarrow 1$                                ▷ laskuri
8:         while  $i \neq \text{satama } 00$  do
9:            $i \leftarrow \text{HAE.SEURAAVA}(i)$        ▷ HAE.SEURAAVA( $i$ )
10:          ▷ -funktio palauttaa sataman  $k$ ,
11:          ▷ jolle pätee  $x_{g,i,k}^{r,s} = 1$ 
12:           $\varphi_{g,i}^{r,s} \leftarrow k$ 
13:           $k \leftarrow k + 1$ 
14:        end while
15:         $r \leftarrow \text{SEURAAJA}(r)$            ▷ SEURAAJA( ) -funktio
16:        ▷ palauttaa joukon seuraavan alkion
17:      end while
18:       $s \leftarrow \text{SEURAAJA}(s)$ 
19:    end while
20:     $g \leftarrow \text{SEURAAJA}(g)$ 
21:  end while
22: end procedure

```

Apumuuttuja $u_{g,i,j}^{r,s}$ voidaan myös linearisoida.

$$\mathcal{M}_1 \cdot (u_{g,i,j}^{r,s} - 1) \leq \varphi_{g,j}^{r,s} - \varphi_{g,i}^{r,s} \quad \forall g \in G, i, j \in N, r \in R, s \in S, \quad (4.12)$$

missä \mathcal{M}_1 on riittävän suuri vakio $\mathcal{M}_1 \geq |N| - 1$.

Apumuuttuja $pc_{g,i}^{r,s}$ kertoo käydäänkö satamassa i laivan s reitillä r ajanjaksolla g .

$$pc_{g,i}^{r,s} = \max \{x_{g,j,i}^{r,s} \mid j \in P\} \quad \forall g \in G, i \in N, r \in R, s \in S. \quad (4.13)$$

Apumuuttuja $pc_{g,i}^{r,s}$ voidaan linearisoida binäärisen apumuuttujan $y_i \in \{0, 1\}$, $i \in N$ ja riittävän suuren vakion $\mathcal{M}_2 \geq 1$ avulla.

$$x_{g,j,i}^{r,s} \leq pc_{g,i}^{r,s} \quad \forall g \in G, i \in N, j \in P, r \in R, s \in S \quad (4.14)$$

$$x_{g,j,i}^{r,s} \geq pc_{g,i}^{r,s} - \mathcal{M}_2 \cdot (1 - y_i) \quad \forall g \in G, i \in N, j \in P, r \in R, s \in S \quad (4.15)$$

$$\sum_{i \in N} y_i \geq 1. \quad (4.16)$$

Apumuuttuja $zz_{g,i}^{r,s}$ kertoo kuinka monta konttia puretaan tai lastataan satamassa i laivan s reitillä r ajanjaksolla g .

$$zz_{g,i}^{r,s} = \sum_{k \in N} \sum_{j \in N} (z_{g,j,i}^{r,s} + z_{g,i,k}^{r,s}) \quad \forall g \in G, i \in N, s \in S. \quad (4.17)$$

Binääriapumuuttujan $\theta_{g,k,i,j}^{r,s}$ avulla tiedetään, mitä kontteja $z_{g,i,j}^{r,s}$ laivaan voi olla lastattuna, kun lähdetään satamasta k . Kontit satamasta i satamaan j voivat olla lastattuna laivaan, kun lähdetään satamasta k , mikäli satamassa i on käyty tai siellä ollaan ($i = j$) ja satama j on vielä tulossa reitin varrella. Huomionarvoista on se, että tässä mallissa kaikki reitin varrella noudetut kontit myös toimitetaan saman reitin varrella. Toisin sanoen yhtään konttia ei siirry laivan mukana menoreitiltä paluureitille tai toisin päin. Seuraavaa esitystapaa voidaan käyttää heuristiikan luomisessa.

$$\theta_{g,k,i,j}^{r,s} = \begin{cases} 1, & \text{jos } \varphi_{g,j}^{r,s} > \varphi_{g,k}^{r,s} \geq \varphi_{g,i}^{r,s} > 0 \\ 0, & \text{muutoin} \end{cases} \quad \forall g \in G, i, j, k \in N, r \in R, s \in S. \quad (4.18)$$

Apumuuttuja $\theta_{g,k,i,j}^{r,s}$ voidaan myös linearisoida.

$$\mathcal{M}_3 \cdot (\theta_{g,k,i,j}^{r,s} - 1) \leq \varphi_{g,j}^{r,s} - \varphi_{g,k}^{r,s} - \varphi_{g,i}^{r,s} + n - 1 \quad \forall g \in G, i, j, k \in N, r \in R, s \in S, \quad (4.19)$$

missä \mathcal{M}_3 on riittävän suuri vakio $\mathcal{M}_3 \geq n + 2$ ja $n = |N|$.

Luodaan epälineaarinen (kvadraattinen) sekalukuoptimointimalli konttilaivojen reittien optimointia varten luvuissa 3.4 ja 4.1 esiintyvien mallien pohjalta. Malli sisältää piirteitä myös Cheng & Zengin [19] ja Mulder & Dekkerin [97] tutkimuksista sekä mallinnusprojektista Ahola et al. [2].

Indeksit ja joukot

$g \in G$	sallittujen palveluverkon suunnittelujaksojen joukko
$i, j \in N$	satamien joukko $N \subset P, N = n$
$i, j \in M$	virtuaalisatamien joukko $M \subset P, M = 2$
$i, j \in P$	satamien ja virtuaalisatamien joukko $ P = n + 2,$ $N \cup M = P, N \cap M = \emptyset$
$s \in S_O$	omistuksessa olevien laivojen joukko
$s \in S_C$	vuokrattavissa olevien laivojen joukko
$s \in S$	konttilaivojen joukko $S_O \cup S_C = S$
$r \in R$	reittien joukko

Parametrit

a_g	jakson g kesto	[vrk]
α	päämoottorin polttoaineen hinta	[\$/tonni]
β	apumoottorin polttoaineen hinta	[\$/tonni]
bc_i^s	laivan s kiinteät satamakustannukset satamassa i	[\$/laiva]
bp^s	laivan s apumoottorin polttoaineen kulutus satamassa	[tonni/tunti]
bs^s	laivan s päämoottorin polttoaineen kulutus merellä nominaalinopeudella	[tonni/tunti]
cc^s	laivan s vuokraushinta (eng. charter in)	[\$/vrk]
cp^s	laivan s ulosvuokraushinta (eng. charter out)	[\$/vrk]
$d_{g,i,j}$	konttien kysyntä satamasta i satamaan j ajanjaksolla g	[TEU]
fc^s	laivan s operointikustannukset (hallinto, huolto, va- kuutus jne.)	[\$/vrk]
o_i^s	satamatoimintojen tehokkuus satamassa i laivalle s	[TEU/tunti]
oc^s	laivan s omistushinta	[\$/vrk]
pt_i^s	laivan s laiturointiaika satamassa i ($\forall s \in S, i, j \in$ $M, pt_i^s = 0$)	[tunti]
q^s	laivan s lastauskapasiteetti	[TEU]
$r_{g,i,j}$	kontin kuljettamisesta saatavat tulot satamasta i sa- tamaan j jaksolla g	[\$/TEU]
$st_{g,i}$	kontin lastaus- tai purkukustannus satamassa i jak- solla g	[\$/TEU]

rt^s	laivan s kunnostusaika	[tunti]
vs^s	laivan s nominaalinen nopeus (eng. velocity service)	[solmu]
v_{\min}^s	laivan s pienin mahdollinen matkanopeus	[solmu]
v_{\max}^s	laivan s suurin mahdollinen matkanopeus	[solmu]
$w_{i,j}$	satamien i ja j välinen etäisyys ($\forall i, j \in M, w_{i,j} = 0$)	[merimaili]

Päätösmuuttujat

sc_g^s	vuokralle saatavissa olevat laivat jaksolla g - muuttuja saa arvon 1, jos laiva $s \in S_C$ vuokrataan; 0, muutoin	[binääri]
so_g^s	omistuksessa olevat laivat jaksolla g - muuttuja saa arvon 1, jos laiva $s \in S_0$ on käytössä; 0, jos laiva ulosvuokrataan	[binääri]
$v_g^{r,s}$	laivan s nopeus jaksolla g reitillä r	[solmu]
$x_{g,i,j}^{r,s}$	1, jos kaari kuuluu satamien $i \in P$ ja $j \in P$ välillä reitillä r laivalla s jaksolla g ; 0, muulloin	[binääri]
$z_{g,i,j}^{r,s}$	kuljetettavat kontit satamasta i satamaan j laivalla s reitillä r ajanjaksolla g	[TEU]

Apumuuttujat

$\varphi_{g,i}^{r,s}$	sataman $i \in N$ järjestys laivan s reitillä r	[kokonaisluku]
$pc_{g,i}^{r,s}$	käydäänkö satamassa $i \in N$ laivan s reitillä r jaksolla g	[binääri]
$\theta_{g,k,i,j}^{r,s}$	apumuuttuja kertoo voivatko satamasta $i \in N$ satamaan $j \in N$ kuljetettavat kontit olla lastattuna laivassa s reitillä r ajanjaksolla g , kun lähdetään satamasta $k \in N$	[binääri]
$t_{g,i}^{r,s}$	konttien purku- ja lastausaika laivalla s reitillä r satamassa i jaksolla g	[tunti]
$u_{g,i,j}^{r,s}$	päästäänkö satamasta $i \in N$ satamaan $j \in N$ laivan s reitillä s jaksolla g	[binääri]
$zz_{g,i}^{r,s}$	ahdettavien konttien lukumäärä satamassa i laivan s reitillä r ajanjaksolla g	[TEU]
y_i	apumuuttuja $pc_{g,i}^{r,s}$:n määrittämiseksi	[binääri]

<u>Lyhenteet</u>	
RV	konttien kuljettamisesta saatavat yhteenlasketut tulot [\\$] (eng. ReVenue)
FC	purjehduskauden yhteenlasketut kiinteät kustannukset (eng. Fixed Costs) [\\$]
CO	laivojen ulosvuokrauksesta saatavat tulot (eng. Charter Out revenue) [\\$]
FS	polttoainekustannukset merellä (eng. Fuel costs at Sea) [\\$]
FP	polttoainekustannukset satamissa (eng. Fuel costs at Port) [\\$]
PF	satamamaksut yhteensä (eng. Port Fees) [\\$]
SF	yhteenlasketut konttien lastaus- ja purkukustannukset eli ahtauskustannukset (eng. Stowage Fees) [\\$]

Taulukko 16

$$\max RV - FC + CO - FS - FP - PF - SF \quad (4.20)$$

s.t.

$$RV = \sum_{g \in G} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} r_{g,i,j} \cdot z_{g,i,j}^{r,s} \quad (4.21)$$

$$FC = \sum_{g \in G} \sum_{s \in S_O} (oc^s + fc^s) \cdot so_g^s + \sum_{g \in G} \sum_{s \in S_C} (cc^s + fc^s) \cdot sc_g^s \quad (4.22)$$

$$CO = \sum_{g \in G} \sum_{s \in S_O} cp^s \cdot (1 - so_g^s) \quad (4.23)$$

$$FS = \sum_{g \in G} \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \alpha \cdot bs^s \cdot w_{i,j} \cdot \frac{(v_g^{r,s})^2}{(vs^s)^3} \cdot x_{g,i,j}^{r,s} \quad (4.24)$$

$$FP = \sum_{g \in G} \sum_{i \in N} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \beta \cdot bp^s \cdot pc_{g,i}^{r,s} \cdot (pt_i^s + t_{g,i}^{r,s}) \quad (4.25)$$

$$PF = \sum_{g \in G} \sum_{i \in N} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} bc_i^s \cdot pc_{g,i}^{r,s} \quad (4.26)$$

$$SF = \sum_{g \in G} \sum_{i \in N} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} st_{g,i} \cdot zz_{g,i}^{r,s} \quad (4.27)$$

$$z_{g,i,j}^{r,s} \leq d_{g,i,j} \cdot u_{g,i,j}^{r,s} \quad \forall g \in G, i, j \in N, r \in R, s \in S \quad (4.28)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in S} u_{g,i,j}^{r,s} \cdot z_{g,i,j}^{r,s} \leq d_{g,i,j} \quad \forall g \in G, i \in N, j \in N \quad (4.29)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \theta_{g,k,i,j}^{r,s} \cdot z_{g,i,j}^{r,s} \leq q^s, \quad \forall g \in G, k \in N, r \in R, s \in S \quad (4.30)$$

$$\sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{r \in R} \left(pt_i^s + rt^s + t_{g,i}^{r,s} + \frac{w_{i,j} \cdot x_{g,i,j}^{r,s}}{v_g^{r,s}} \right) \leq a_g \quad \forall g \in G, s \in S \quad (4.31)$$

$$\sum_{i \in N} x_{g,0,i}^{r,s} \leq 1 \quad \forall g \in G, r \in R, s \in S \quad (4.32)$$

$$\sum_{i \in N} x_{g,i,00}^{r,s} \leq 1 \quad \forall g \in G, r \in R, s \in S \quad (4.33)$$

$$\sum_{j \in N} x_{g,i,j}^{r,s} - \sum_{j \in N} x_{g,j,i}^{r,s} = 0 \quad \forall g \in G, i \in N, r \in R, s \in S \quad (4.34)$$

$$x_{g,0,i}^{(r+1),s} = x_{g,i,00}^{r,s} \quad \forall g \in G, i \in N, r \in R, r+1 \leq |R|, s \in S \quad (4.35)$$

$$x_{g,i,0}^{r,s} = 0 \quad \forall g \in G, i \in P, r \in R, s \in S \quad (4.36)$$

$$x_{g,00,i}^{r,s} = 0 \quad \forall g \in G, i \in P, r \in R, s \in S \quad (4.37)$$

$$x_{g,i,i}^{r,s} = 0 \quad \forall g \in G, i \in P, r \in R, s \in S \quad (4.38)$$

$$\varphi_{g,i}^{r,s} - \varphi_{g,j}^{r,s} + n \cdot x_{g,i,j}^{r,s} \leq n - 1 \quad \forall g \in G, i, j \in N, r \in R, s \in S \quad (4.39)$$

$$x_{g,j,i}^{r,s} \leq pc_{g,i}^{r,s} \quad \forall g \in G, i \in N, j \in P, r \in R, s \in S \quad (4.40)$$

$$x_{g,j,i}^{r,s} \geq pc_{g,i}^{r,s} - K \cdot (1 - y_i) \quad \forall g \in G, i \in N, j \in P, r \in R, s \in S \quad (4.41)$$

$$\sum_{i \in N} y_i \geq 1 \quad (4.42)$$

$$K \cdot (\theta_{g,k,i,j}^{r,s} - 1) \leq \varphi_{g,j}^{r,s} - \varphi_{g,k}^{r,s} - \varphi_{g,i}^{r,s} + n - 1 \quad \forall g \in G, i, j, k \in N, r \in R, s \in S \quad (4.43)$$

$$K \cdot (u_{g,i,j}^{r,s} - 1) \leq \varphi_{g,j}^{r,s} - \varphi_{g,i}^{r,s} \quad \forall g \in G, i, j \in N, r \in R, s \in S \quad (4.44)$$

$$zz_{g,i}^{r,s} = \sum_{k \in N} \sum_{j \in N} (z_{g,j,i}^{r,s} + z_{g,i,k}^{r,s}) \quad \forall g \in G, i \in N, s \in S \quad (4.45)$$

$$t_{g,i}^{r,s} = \begin{cases} \frac{zz_{g,i}^{r,s}}{o_i^s} & \forall g \in G, i \in N, r \in R, s \in S \\ 0, & \forall g \in G, i \in M, r \in R, s \in S \end{cases} \quad (4.46)$$

$$x_{g,i,j}^{r,s} \leq so_g^s \quad \forall g \in G, i, j \in P, r \in R, s \in S_O \quad (4.47)$$

$$x_{g,i,j}^{r,s} \leq sc_g^s \quad \forall g \in G, i, j \in P, r \in R, s \in S_C \quad (4.48)$$

$$|R| = \lfloor \frac{\max \{v_{\max}^s \mid \forall s \in S\} \cdot a_g}{\min \{w_{ij} \mid \forall i, j \in N\}} \rfloor \quad \forall g \in G \quad (4.49)$$

$$v_{\min}^s \leq v_g^{r,s} \leq v_{\max}^s \quad \forall g \in G, r \in R, s \in S \quad (4.50)$$

$$0 \leq z_{g,i,j}^{r,s} \leq \max \{q^s \mid s \in S\} \quad (4.51)$$

$$v_g^{r,s} \in \mathbb{R}^+, z_{g,i,j}^{r,s} \in \mathbb{N}, so_g^s, sc_g^s, x_{g,i,j}^{r,s} \in \{0, 1\} \quad (4.52)$$

$$\varphi_{g,i}^{r,s} \in \mathbb{N}, pc_{g,i}^{r,s}, \theta_{g,k,i,j}^{r,s}, u_{g,i}^{r,s}, y_i \in \{0, 1\}, z_{g,i,j}^{r,s} \in \mathbb{N}, t_{g,i}^{r,s} \in \mathbb{R}^+. \quad (4.53)$$

Optimointimallin kohdefunktio (4.20) koostuu tuloista (4.21), laivojen kiinteistä kustannuksista (4.22), ulosvuokrauksesta saatavista tuloista (4.23), polttoainekustannuksista merellä (4.24) ja satamissa (4.25), kiinteistä satamamaksuista (4.26) ja lastaus- ja purkukustannuksista (4.27). Rajoite (4.29) varmistaa, että kontteja ei kuljeteta enempää kuin on kysyntää. Rajoitteet (4.28) ja (4.30) takaavat, että jokaisella satamavälillä satamasta i satamaan j reitillä r laivaan s lastatut kontit eivät ylitä sen kapasiteettia. Rajoite (4.31) varmistaa, että jokaisen laivan kokonaisreittiaika ei ylitä jakson kestoa. Rajoitteet (4.32), (4.33), (4.34), (4.35), (4.36), (4.37) ja (4.38) ovat laivareittien muodostusrajoitteet, jotka on esitelty luvussa 4.1. Apumuuttujat (4.39), (4.40), (4.41), (4.42), (4.43), (4.44) ja (4.45) on esitelty jo aiemmin. Lausekkeessa (4.46) on laskettu konttien purku- ja lastausaika satamassa i laivalla s . Rajoitteet (4.47) ja (4.48) takaavat sen, että jos laiva s ei ole käytössä, niin sitä ei voida myöskään allokoida millekään reitille. Rajoite (4.49) rajoittaa joukon R kokoa helpottaen ratkaisemista. Lopuksi lausekkeet (4.50), (4.51), (4.52) ja (4.53) käsittävät päätös- ja apumuuttujien määrittelyjoukot. Käytetään vakion K arvoa $K = 2|N|$.

Merimatkoilla muodostuvien polttoainekustannusten (4.24) laskenta perustuu Consort-manuaalista [14] löytyvään kaavaan

$$\text{tuntikulutus} = bs^s \cdot \left(\frac{v_g^{r,s}}{vs^s} \right)^3, \quad (4.54)$$

joka tekee aikarajoitteen (4.31) ohella mallista epälineaarisen. Aluksen s nopeus $v_g^{r,s}$ voi muuttua jakson g ja reitin r vaihtuessa, sillä yleensä alus kulkee nopeammin korkeamman kysynnän suuntaan (Christiansen et al. [24]; Winddeck [161]). Laskentaa voidaan tarvittaessa helpottaa esimerkiksi siten, että aluksen nopeus $v_g^{r,s}$ saa arvoja 0,5 solmun välein, kuten Mulder & Dekkerin tutkimuksessa on tehty ([97], liite A s. 2) tai vaihtoehtoisesti se voidaan kiinnittää parametriksi.

4.3 Parametrien yksikkömuunnokset ja skaalaus

Parametrien tulee olla samoissa aikayksiköissä ja laskennan helpottamiseksi voidaan suorittaa skaalausta konttimäärissä ja rahasummissa (ks. taulukko 17). Esimerkiksi GAMS-ohjelmistolla laskenta on sitä helpompaa, mitä pienempää suuruusluokkaa muuttujat ovat.

Konttimäärät ja rahasummat liikkuvat tuhansissa yksiköissä, mutta niitä voidaan skaalata pienemmiksi jakamalla tai kertomalla kontteihin liittyvät parametrit skaalauskertoimella st ja rahasummiin liittyvät parametrit skaalauskertoimella sr . Esimerkkitapauksessa (ks. luku 5) aikayksiköt on muutettu tunteihin, mutta yksikkömuunnos on intuitiivinen myös vuorokausiin muunnettuna. Näiden välillä voidaan halutessa tehdä laskentatehvertailua, ratkaistun parametrisoidun mallin osalta tätä ei tehty, sillä laskenta-aika oli minimaalinen. Mikäli parametreja skaalataan tai yksikköjä muunnetaan, tulee saaduissa ratkaisuissa huomioida tehdyt skaalaukset tai muunnokset.

Parametri	yksikkö	muunnos [tunti]	muunnos [vrk]	TEU- skaalaus st	raha- skaalaus sr
a_g	[vrk]	*24			
α	[\$/tonni]				/ sr
β	[\$/tonni]				/ sr
bc_i^s	[\$/laiva]				/ sr
bp^s	[tonni/tunti]		*24		
bs^s	[tonni/tunti]		*24		
cc^s	[\$/vrk]	/24			/ sr
cp^s	[\$/vrk]	/24			/ sr
$d_{g,i,j}$	[TEU]			/ st	
fc^s	[\$/vrk]	/24			/ sr

o_i^s	[TEU/tunti]		*24	* st	
oc^s	[\$/vrk]	/24			/ sr
pt_i^s	[tunti]		*24		
q^s	[TEU]			/ st	
$r_{g,i,j}$	[\$/TEU]			/ st	* sr
$st_{g,i}$	[\$/TEU]			/ st	* sr
rt^s	[tunti]		*24		
vs^s	[solmu]		*24		
v_{\min}^s	[solmu]		*24		
v_{\max}^s	[solmu]		*24		
$w_{i,j}$	[merimaili]				

Taulukko 17

4.4 Päätös- ja apumuuttujien parametrisointi

Laskennan helpottamiseksi päätösmuuttujia voidaan parametrisoida eli kiinnittää ennalta määräytyiksi (ks. taulukko 18). Esimerkiksi nopeusmuuttuja voi olla hyvinkin tarpeellista parametrisoida, sillä muutoin se tekee mallista kvadraattisen. Joidenkin muuttujien parametrisointi linkittyy toisiin muuttujiin, mikä on kirjattu taulukkoon 18 yhtenevillä symboleilla. Muista riippumattomien päätösmuuttujien parametrisointi on merkitty symbolilla ∇ . Mikäli laivojen reitit eli päätösmuuttuja $x_{g,i,j}^{r,s}$ halutaan kiinnittää, joudutaan symbolilla \otimes merkatut muuttujat myöskin kiinnittämään. Jos vastaavasti päätösmuuttuja $z_{g,i,j}^{r,s}$ halutaan kiinnittää, symbolilla \boxtimes on merkattu ne muuttujat, jotka tulee myös kiinnittää. Tällöin nopeutta $v_g^{r,s}$ lukuun ottamatta kaikki muuttujat kiinnitetään.

Päätösmuuttuja	yksikkö	parametrisointi
sc_g^s	[binääri]	$\nabla \otimes \bowtie$
so_g^s	[binääri]	$\nabla \otimes \bowtie$
$v_g^{r,s}$	[solmu]	∇
$x_{g,i,j}^{r,s}$	[binääri]	$\otimes \bowtie$
$z_{g,i,j}^{r,s}$	[TEU]	$\nabla \bowtie$
Apumuuttuja		
$\varphi_{g,i}^{r,s}$	[binääri]	$\otimes \bowtie$
$pc_{g,i}^{r,s}$	[binääri]	$\otimes \bowtie$
$\theta_{g,k,i,j}^{r,s}$	[binääri]	$\otimes \bowtie$
$u_{g,i,j}^{r,s}$	[binääri]	$\otimes \bowtie$
y_i	[binääri]	$\otimes \bowtie$
$t_{g,i}^{r,s}$	[tunti]	\bowtie
$zz_{g,i}^{r,s}$	[TEU]	\bowtie

Taulukko 18

5 Laskennalliset kokeet esimerkkitapauksella

Optimointimallin testaamiseksi ja validoinniksi luodaan satunnainen kolmen sataman ja kahden laivan testijoukko. Toinen laivoista on omistuksessa ja toinen laiva voidaan vuokrata. Laivat ovat muutoin identtiset. Tämän esimerkkitapauksen implementoinnin avulla mallista löydettiin virheitä ja sen jatkokehittäminen on täten helpompaa.

Kirjoitetaan malli tietokoneohjelmaksi käyttäen GAMS-optimointikieltä [43] ja ratkaistaan se käyttäen eksaktia CPLEX-ratkaisinta NEOS-palvelimella [99], jonne voi lähettää optimointiongelmia ratkaistavaksi. Mallin parametrien arvot löytyvät pääasiassa Mulder & Dekkerin [97] tutkimuksen liitteistä, Polatin ([109], s. 112) väitöskirjasta tai ovat olleet käytössä mallinnusprojektissa Ahola et al. [2]. Taulukossa 19 on lueteltu parametrien arvoja. Mikäli joukon alkioita eli indeksiä ei ole tarkasti annettu, se pätee kaikille joukon alkioille. Parametrien arvoissa tärkeintä on osua oikeaan suuruusluokkaan. Tämän esimerkkitapauksen ratkaisun tavoitteena ei ole niinkään realistisen palveluverkon luonti vaan optimointimallin validointi.

Mallia tutkitaan vain yhden meno- ja paluureitin osalta. Parametrisoidussa mallissa (ks. luku 5.1) aikarajoitetta eli jakson pituutta a_1 ei huomioida, sillä reitti on ennalta määrätty. Koko suunnittelujakson konttien kysynnän suuruusluokka taulukossa 21 perustuu karkeasti laivojen yhteenlaskettuun kapasiteettiin ja kuinka monta kertaa suunnittelujakson aikana laiva kykenee käymään satamassa kulkiessaan lyhyintä reittiväliä maksiminopeudellaan.

Konteista saatavat tulot perustuvat Mulder & Dekkerin [97] tutkimuksessa käytettyyn kaavaan: 0,0838 [\$/merimaili] itään päin kuljettaessa (merkitään parametrilla re) ja 0,1677 [\$/merimaili] länteen päin kuljettaessa (merkitään parametrilla rw). Lisäksi, jos satamat luetellaan lännestä itään (ts. satama 1 on läntisin), niin tämän pohjalta saadaan tulokerroinmatriisi (5.1).

$$\begin{pmatrix} 0 & & & & \\ & \cdot & & re & \\ & & & & \\ & rw & & \cdot & \\ & & & & 0 \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Kun tulokerroinmatriisi kerrotaan alkioittain etäisyysmatriisin $w_{i,j}$ (ks. taulukko 20) kanssa, saadaan yhdestä kontista saatavat tulot, kun se kuljetetaan satamasta i satamaan j (ks. taulukko 22).

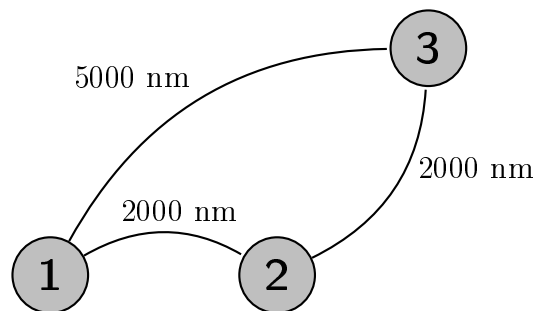
Parametrit

a_1	jakson 1 kesto	[vrk]	30
α	päämoottorin polttoaineen hinta	[\$/tonni]	500
β	apumoottorin polttoaineen hinta	[\$/tonni]	800
bc_i^s	laivan s kiinteät satamakustannukset satamassa i	[\$/laiva]	25000
bp^s	laivan s apumoottorin polttoaineen kulutus satamassa	[tonni/tunti]	0.5
bs^s	laivan s päämoottorin polttoaineen kulutus merellä nominaalinopeudella	[tonni/tunti]	3
cc^s	laivan s vuokraushinta (eng. charter in)	[\$/vrk]	21000
cp^s	laivan s ulosvuokraushinta (eng. charter out)	[\$/vrk]	21000
fc^s	laivan s operointikustannukset (hallinto, huolto, vakuutus jne.)	[\$/vrk]	14000
o_i^s	satamatoimintojen tehokkuus satamassa i laivalle s	[TEU/tunti]	25
oc^s	laivan s omistushinta	[\$/vrk]	19000
pt_i^s	laivan s valmistelu-aika satamassa i	[tunti]	20
q^s	laivan s lastauskapasiteetti	[TEU]	8000
$st_{1,i}$	yhden TEU-kontin lastaus- tai purkukustannus satamassa i jaksolla 1	[\$]	175
rt^s	laivan s kunnostusaika	[tunti]	48
vs^s	laivan s nominaalinen nopeus (eng. velocity service)	[solmu]	20
v_{\min}^s	laivan s pienin mahdollinen matkanopeus	[solmu]	12
v_{\max}^s	laivan s suurin mahdollinen matkanopeus	[solmu]	25

Taulukko 19

Etäisyydet $w_{i,j}$ [merimaili]	satamaan $j = 1$	satamaan $j = 2$	satamaan $j = 3$
satamasta $i = 1$	0	2000	5000
satamasta $i = 2$	2000	0	2000
satamasta $i = 3$	5000	2000	0

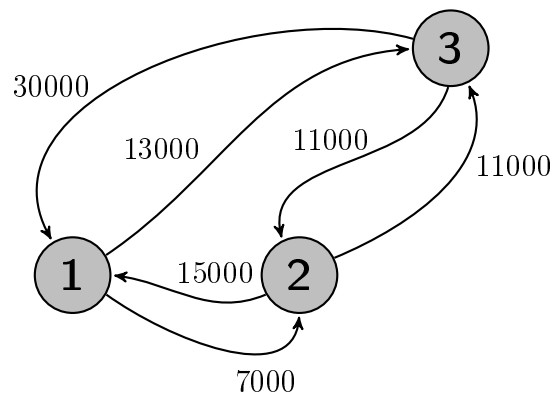
Taulukko 20



Kuva 5.1: Esimerkkitapauksen satamien väliset etäisyydet

Konttien kysyntä $d_{1,i,j}$ [TEU]	satamaan $j = 1$	satamaan $j = 2$	satamaan $j = 3$
satamasta $i = 1$	0	7000	13000
satamasta $i = 2$	15000	0	11000
satamasta $i = 3$	30000	11000	0

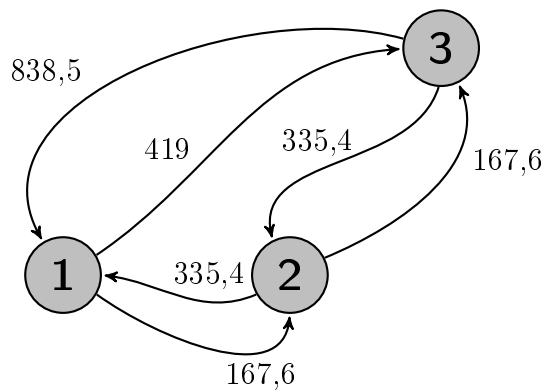
Taulukko 21



Kuva 5.2: Esimerkkitapauksen konttien kysyntä

Konttitulo $r_{1,i,j}$	satamaan	satamaan	satamaan
	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
satamasta $i = 1$	0	167,6	419
satamasta $i = 2$	335,4	0	167,6
satamasta $i = 3$	838,5	335,4	0

Taulukko 22



Kuva 5.3: Esimerkkitapauksen konteista saatavat tulot [\\$]

5.1 Parametrisoidun mallin tulokset

Tässä luvussa esiteltävät tulokset on saatu parametrisoidusta mallista (ks. GAMS-koodilistaus, liite C.1), jossa päätösmuuttujien sc_g^s , so_g^s , $v_g^{r,s}$ ja $x_{g,i,j}^{r,s}$ arvot olivat kiinnitettyjä. Toisin sanoen laivojen määrä, nopeudet ja reitit olivat ennalta määrättyjä. Reittipäätösmuuttujan $x_{g,i,j}^{r,s}$ kiinnittämisen myötä kaikkien binääristen apumuuttujien arvot kiinnitettiin (ks. taulukko 18). Ainoaksi päätösmuuttujaksi jäi kuljetettavat kontit $z_{g,i,j}^{r,s}$.

Käytössä oli kaksi laivaa, joista ensimmäisellä menoreitti oli $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ ja paluureitti $3 \rightarrow 1$. Toisella laivalla menoreitti oli $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ ja paluureitti $1 \rightarrow 3$. Laivat toisin sanoen kiersivät satamasykliä eri suuntiin. Tässä reittimallissa täytyy kuitenkin ottaa huomioon se, että kontit eivät voi olla lastatuna laivassa siirryttäessä seuraavalle reitille. Näin ollen esimerkkitapaus on hieman kömpelö. Kuitenkin, kun reitti on ennalta määrätty, optimointimalli redusoituu selkäreppuongelmaksi. Saaduista tuloksista voidaan päätellä, että malli osoittautui toimivaksi kohdefunktion osa-alueiden ja konttien kuljetusrajoitteiden osalta.

Kyseinen esimerkkitapaus oli varsin herkkä konttien ahtauskustannuksille $st_{g,i}$. Mikäli käytettiin taulukossa 19 käytettyä arvoa 175, kontteja ei kannattanut kuljettaa ollenkaan.

Taulukossa 23 on lueteltu saadun ratkaisun tulot ja menot tuhansissa dollareissa. Ulosvuokrauksesta ei ole tuloja, sillä omistettu laiva on parametrisoitu käytettäväksi. Taulukossa 24 on kirjattu menojen suhteelliset osuudet sekä tulojen ja menojen suhteet:

$$T = \frac{|\text{tulot}|}{|\text{menot} + \text{tulot}|} \quad (5.2)$$

$$M = \frac{|\text{menot}|}{|\text{menot} + \text{tulot}|}. \quad (5.3)$$

Taulukossa 24 ei ole laskettu tulojen suhteellisiä osuuksia, sillä vain konttien kuljetuksesta saadaan tällä parametrisoinnilla tuloja.

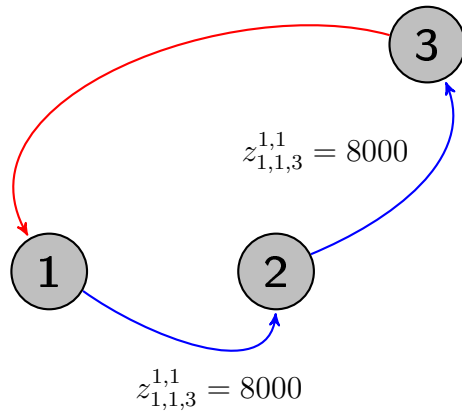
Seuraavaksi näytetään parametrisoidun mallin päätösmuuttujien $z_{1,i,j}^{r,s}$ optimaaliset ratkaisut eri $st_{g,i}$:n arvoilla, lukuun ottamatta tapausta $st_{g,i} = 175$, jolloin kontteja ei kannattanut kuljettaa ollenkaan. Merkitään menoreittiä sinisellä ja paluureittiä punaisella kaarella. Mallissa oli yhtä aikaa käytössä kaksi laivaa.

$st_{g,i}$ [\$]	Tulot (RV) [k\$]	Kiinteät menot (FC) [k\$]	Ulosvuok- raustulot (CO) [k\$]	Polttoai- nemenot merellä (FS) [k\$]	Poltto- ainemenot satamassa (FP) [k\$]	Satama- maksut (PF) [k\$]	Ahtaus- kustann- ukset (SF) [k\$]	Liike- voitto [k\$]
175	0	2,833	0	1350	100	250	0	-1702,833
100	13416	2,833	0	1350	100,002	250	9600	2113,165
60	18 863	2,833	0	1350	100,003	250	10440	6720,164
27	19868,600	2,833	0	1350	100,003	250	5670	12495,763

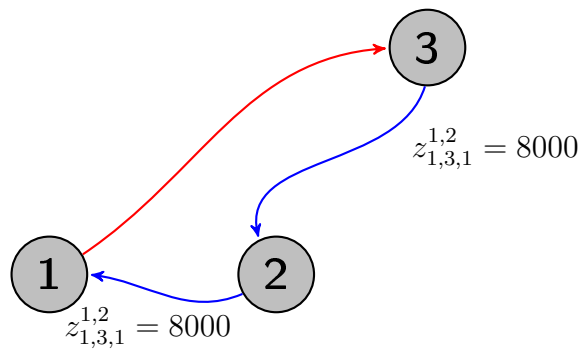
Taulukko 23:
tulot ja me-
not

$st_{g,i}$ [\$]	T (5.2)	M (5.3)	$\frac{FC}{\text{menot}}$	$\frac{FS}{\text{menot}}$	$\frac{FP}{\text{menot}}$	$\frac{PF}{\text{menot}}$	$\frac{SF}{\text{menot}}$
175	0	1	0,0017	0,7928	0,0587	0,1468	0
100	0,543	0,457	0,0003	0,1194	0,0088	0,0221	0,8493
60	0,608	0,392	0,0002	0,1112	0,0082	0,0206	0,8598
27	0,729	0,271	0,0004	0,1831	0,0136	0,0339	0,7690

Taulukko 24:
suhteelliset
osuudet

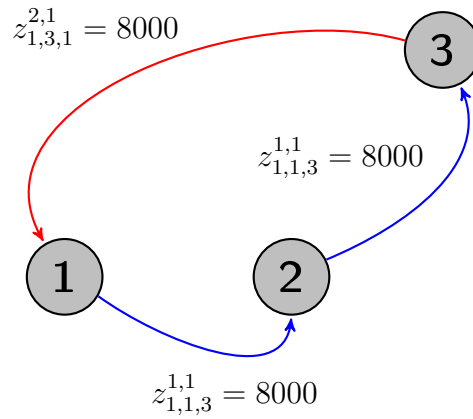


Kuva 5.4: Laivaan 1 lastatut kontit satamaväleillä, kun $st_{g,i} = 100$

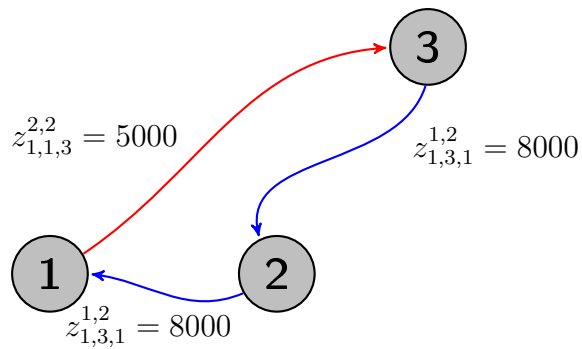


Kuva 5.5: Laivaan 2 lastatut kontit satamaväleillä, kun $st_{g,i} = 100$

Seuraavasta ratkaisusta huomataan, että mallin konttirajoitukset toimivat, sillä satamasta 1 satamaan 3 kuljetettavat kontit eivät ylitä annettua kysyntärajaa 13000.

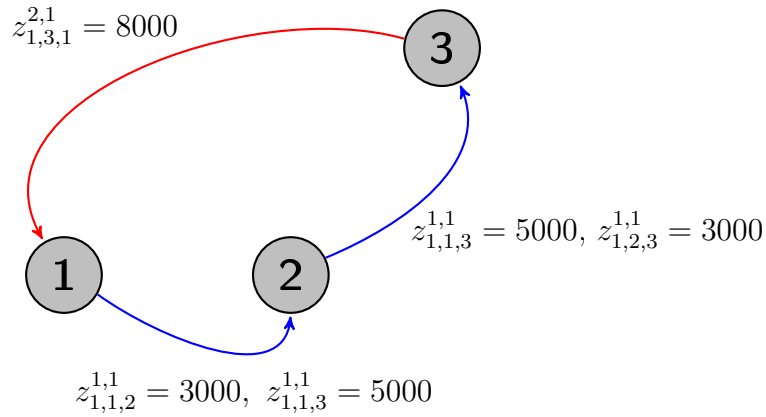


Kuva 5.6: Laivaan 1 lastatut kontit satamaväleillä, kun $st_{g,i} = 60$

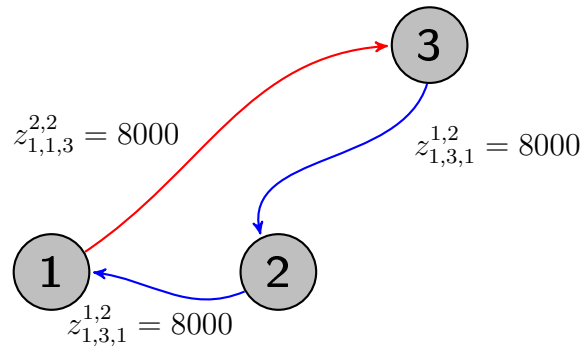


Kuva 5.7: Laivaan 2 lastatut kontit satamaväleillä, kun $st_{g,i} = 60$

Seuraavassa ratkaisussa kontteja kannattaa ottaa kyytiin myös satamasta 2, kun $st_{g,i} = 27$.



Kuva 5.8: Laivaan 1 lastatut kontit satamaväleillä, kun $st_{g,i} = 27$



Kuva 5.9: Laivaan 2 lastatut kontit satamaväleillä, kun $st_{g,i} = 27$

Edellä luetelluista ratkaisuista huomataan, että mallin konttien kuljetusrajoitteet toimivat, kun laivojen reitit ovat ennalta määrättyt. Samoin esimerkkitapauksen menot ja tulot vaikuttavat suhteellisen järkeenkäyviltä, mikäli huomioidaan se, että usein näin lyhyt kahden tai kolmen sataman reitti ei ole todellisuudessa kannattava.

5.2 Täyden mallin ratkaisut

Kun täyttä mallia (ks. GAMS-koodilistaus, liite C.1) yritettiin ratkaista esimerkkitapauksen parametreilla (ks. taulukko 19) käyttäen eksaktia CPLEX-ratkaisinta NEOS-palvelimella [99], ratkaisua ei saatu lainkaan, sillä ohjelma lopetti ratkaisun etsimisen. Tämä johtunee mallin monimutkaisuudesta ja siitä, että malli on alunperinkin suunniteltu niin, että se ratkaistaisiin jollakin heuristiikalla. Heuristiikkaa on ollut tarkoitus käyttää ensisijaisena ratkaisumethodina, sillä mallin kompleksisuus on suurempaa luokkaa kuin esimerkiksi kauppamatkustajan ongelmassa, jossa yleensä käytetään heuristiikkaa ratkaisun saamiseen. Tämä johtuu siitä, että solmujen määrä on valittavissa ja niiden välille tulee valita paras reitti.

Laivojen ja nopeuden kiinnittäminen tai tiettyjen reitinmuodostusrajoitteiden poissulkeminen ei helpottanut ratkaisun löytämistä. Nopeuden kiinnittäminen onkin eksaktin ratkaisun kannalta lähes välttämätöntä, sillä muutoin malli on epälineaarinen. Reitin muodostumiseen liittyvät rajoitteet on kuitenkin testattu generoimalla parametrisoidun mallin reitit annettujen ehtojen mukaisesti käyttäen python-aliohjelmia (ks. liite C.2), joita voi myös hyödyntää jatkossa heuristiikan luomisessa.

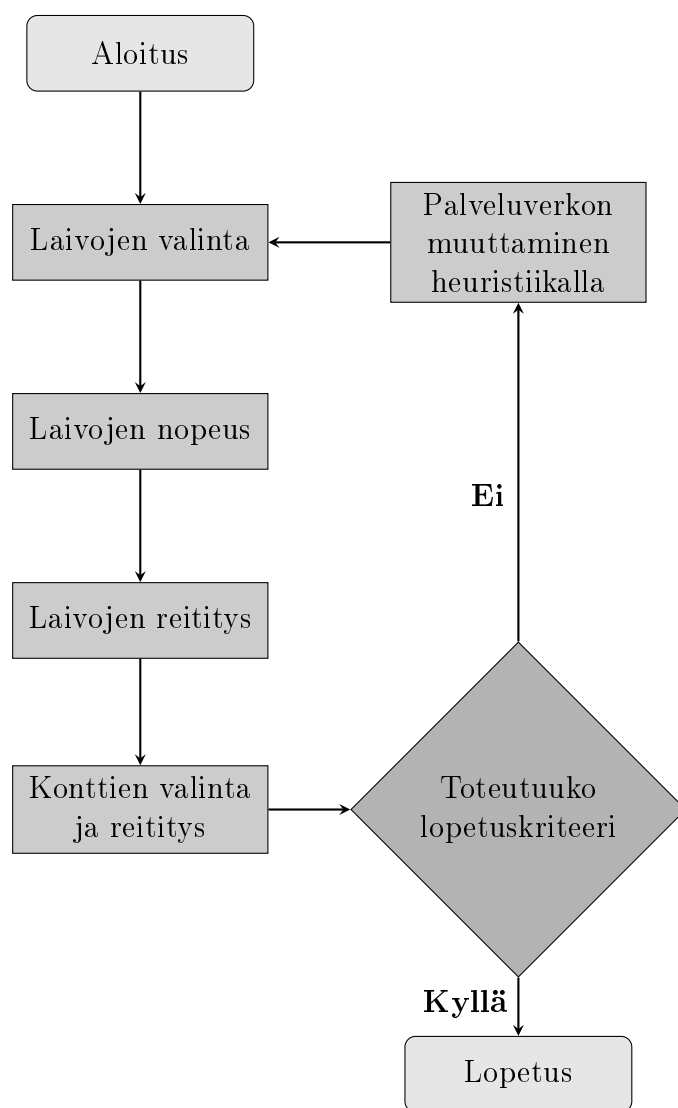
6 Yhteenvedo ja mallin jatkokehittäminen

Tässä pro gradu -työssä on tarkasteltu muun muassa konttilaivaukseen liittyvää taustatietoa ja pyritty löytämään merkittävimpiä päätöksentekostrategiaan vaikuttavia tekijöitä. Myös laaja kirjallisuuskatsaus linjalaivaukseen liittyvistä matemaattisista tutkimuksista osoittaa, että konttien kuljettaminen on hyvin monimutkainen mallinnuskohde ja joitakin yksinkertaistuksia joudutaan aina tekemään. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, etteikö tutkimuksista olisi ollut konttilaivaukselle hyötyä. Osa yhtiöistä osaa hyödyntää nykyaikaisia suunnittelun aputyökaluja, mutta edelleen asioita tehdään pitkälti perinteen mukaan.

Työn parhaimpana antina voidaan pitää edeltävien mallien inspiroimana luotua optimointimallia. Vaikka mallia ei kyetty ratkaisemaan täydessä laajuudessaan luvussa 5.2 annetuista mahdollisista syistä johtuen, antaa se hyvän pohjan työn jatkokehittämiselle. Parametrisoitua mallia voidaan myös käyttää esitettyä esimerkkitapausta laajemmassa numeerisessa tarkastelussa. Jo pelkästään siinä riittää työsarkaa, sillä mallissa on useita parametreja, jotka vaikuttavat saatuun ratkaisuun.

Mikäli tässä tutkielmassa esitettyä optimointimallia halutaan edelleen kehittää, olisi hyvä huomioida muun muassa satamien vaatimukset palvelutiheydestä, tyhjien konttien uudelleensijoittaminen ja syöttöliikenne eli mahdollisuus konttien uudelleenlastaamiseen. Jos optimointiongelma halutaan ratkaista heuristisin menetelmin, eli löytämään riittävän hyvä ratkaisu mahdollisimman nopeasti, ratkaisualgoritmin vaiheiden järjestys voisi olla esimerkiksi kuvan 6.1 mukainen. Tämä järjestys perustuu muuttujien riippuvuuksiin ja Mulder & Dekkerin 3.1 tutkimuksessa käytettyyn algoritmiin.

Heuristiikkaa voidaan lähteä kehittämään aluksi siltä pohjalta, että reitien generoinnille luodaan esimerkiksi geneettinen algoritmi. Näin ollen malli ratkaistaisiin parametrisoidulla reitillä käyttäen GAMS-ohjelmointikieltä ja eksaktia CPLEX-ratkaisinta, jonka avulla saataisiin laivoihin lastattavat kontit. Heuristista ratkaisumenetelmää ei tässä työssä lähdetty sen enempää kehittämään, sillä siinä riittäisi työtä jo toisen pro gradun verran.



Kuva 6.1: Ratkaisualgoritmin vuokaavio

Lähteet

- [1] Agarwal, R. & Ergun, O. (2008) *Ship scheduling and network design for cargo routing in liner shipping*. *Transportation Science*, 42:175-196
- [2] Ahola, J. & Vesterinen, S. & Raiko, V. (2013) *Konttilaivasto-optimointi*. Mallinnusprojektin loppuraportti, Matematiikan ja tilastotieteen laitoksen kurssi, Turun Yliopisto
- [3] Alcalde, E. M. (2014) *Strategies for improving import yard performance at container marine terminals*. Väitöskirja, Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Port de Barcelona, Espanja, <http://hdl.handle.net/10803/277420>
- [4] Alphaliner (2010) *The containership market in 2009*. Alphaliner annual reports
- [5] Alphaliner (2013) *Cellular fleet statistics 03/2013*.
- [6] Alphaliner (2015), *Alphaliner monthly monitor 05/2015*.
- [7] Alvarez, J. F. (2009) *Joint routing and deployment of a fleet of container vessels*. *Maritime Economics & Logistics*, 11:186-208
- [8] Ambrosino, D., & Sciomachen, A. & Tanfani, E. (2004) *Stowing a containership: the master bay plan problem*. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38 (2):81-99, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2003.09.002>
- [9] Andersen, M.W. (2010) *Service network design and management in liner container shipping applications*. Kappale 5, Väitöskirja, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark
- [10] Baird, A. J. (2006) *Optimising the container transshipment hub location in northern Europe*. *Journal of Transport Geography*, 14:195-214
- [11] Bandara, Y. M. & Nguyen, H-O. & Chen, S-L. (2013) *Determinants of Port Infrastructure Pricing*. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 29 (2):187-206, doi:10.1016/j.ajsl.2013.08.004
- [12] Bendall, H. B. & Stent, A. F. (2001) *A scheduling model for a high speed containership service: A hub and spoke short-sea application*. *International Journal of Maritime Economics*, 3 (3):262-277

- [13] Benders, J. F. (1962) *Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems*. Numerische Mathematik, 4 (3):238-252, http://www.digizeitschriften.de/download/PPN362160546_0004/log28.pdf
- [14] Brookes Bell Group (2013) *Consort - user manual*. Safety at Sea
- [15] *Bunker Index 380 CST*. http://www.bunkerindex.com/prices/bixfree.php?priceindex_id=2 (tiedot haettu 30.6.2015)
- [16] Catalani, M. (2009) *Ship scheduling and routing optimization: An application to Western Mediterranean area*. European Transport, 42:67-82
- [17] Chan, C. T. & Lee, H. H. (2000) *Containers, containerships & quay cranes: A practical guide*. Genesis Typesetting & Publication Services, Singapore
- [18] Chang, Y-T. & Lee, S-Y. & Tongzon, J.L. (2008) *Port selection factors for shipping lines: Different perspectives between trunk liners and feers service providers*. Marine Policy, 32:877-885
- [19] Chen, C. & Zeng, Q. (2010) *Designing container shipping network under changing demand and freight rates*. Transport 25 (1):46-57
- [20] Chen, F-E. & Zhang, R-Y. (2008) *Economic viability of mega-size containership in different service networks*. Journal of Shanghai Jiaotong University, 13 (2):221-225
- [21] Cheung, R. K. & Chen, C. Y. (1998) *A two-stage stochastic network model and solutions methods for the dynamic empty container allocation problem*. Transportation Science, 32 (2):142-162
- [22] Choong, S. T. & Cole, M. H. & Kutanoglu, E. (2002) *Empty container management for intermodal transportation networks*. Transportation Research Part E, 38:423-438
- [23] Christiansen, M. & Fagerholt, K. & Ronen, D. (2004) *Ship routing and scheduling: Status and perspective*. Transportation Science, 38 (1):1-18
- [24] Christiansen, M. & Fagerholt, K. & Nygreen, B. & Ronen, D. (2007) *Maritime transportation*. Teoksessa: C. Barnhart, G. L. (toim.) Transportation. Handbooks in Operations Researchs and Management Science, vol. 14, North-Holland, Amsterdam, 189-284

- [25] Chuang, T-N. & Lin, C-T. & Kung, J-Y. & Lin, M-D. (2010) *Planning the route of container ships: A fuzzy genetic approach*. Expert Systems with Applications, 37:2948-2956
- [26] Cullinanne, K. & Khanna, M. & Song, D-W. (1999) *How big is beautiful: Economies of scale and the optimal size of containerships*. Proceedings of International Association of Maritime Economists, Halifax, GeoJournal, 74 (1):7-22, doi:10.1007/s10708-008-9211-3
- [27] Dantzig, G. B. & Wolfe, P. (1960) *Decomposition Principle for Linear Programs*. Operations Research, 8:101-111, doi:10.1287/opre.8.1.101
- [28] Dong, J-X. & Song, D-P. (2009) *Container fleet sizing and empty re-positioning in liner shipping systems*. Transportation Research Part E, 45:860-877
- [29] Dong, J-X. & Song, D-P. (2012) *Quantifying the impact of inland transport times on container fleet sizing in liner shipping services with uncertainties*. OR Spectrum, 34 (1):155-180
- [30] Ducruet, C. & Notteboom, T. (2010) *The worldwide maritime network of container shipping: Spatial structure and regional dynamics*. GaWC Research Bulletin, 364, (halshs-00538051-v1)
- [31] Ducruet, C. & Notteboom, T. (2012) *Developing liner service networks in container shipping*. Teoksessa: Song, D. W. & Panayides, P. (toim.) Maritime Logistics: A Complete guide to effective shipping and port management. Kogan Page, London, pp 77-100
- [32] Ernst, A. & Krishnamoorthy, M. (1996) *Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem*. Location science, 4 (3):139-154, doi:10.1016/S0966-8349(96)00011-3
- [33] Fagerholt, K. (1999) *Optimal fleet design in a ship routing problem*. International Transactions in Operations Research, 6 (5):453-464
- [34] Fagerholt, K. (2004) *Designing optimal routes in a liner shipping problem*. Maritime Policy & Management, 31 (4):259-268
- [35] Foschi, A. D. (2003) *The maritime container transport structure in the Mediterranean and Italy*. University of Pisa, Department of Economics, Paper 2003-24:1-33

- [36] Francesco, M. D. & Crainic, T. G. & Zuddas, P. (2009) *The effect of multi-scenario policies on empty container repositioning*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 45 (5): 758-770
- [37] Francesco, M. D. & Lai, M. & Zuddas, P. (2013) *Maritime repositioning of empty containers under uncertain port disruptions*. Computers & Industrial Engineering 64 (3):827-837
- [38] Francesetti, D., & Foschi, A. (2002) *The impact of hub and spokes networks in the mediterranean peculiarity*. Tutkimus esitetty IAME:n (International Association of Maritime Economists) vuosittaisessa konferenssissa Panamassa
- [39] Frankel, E.G. (2002) *The challenge of container transshipment in the Caribbean*. Tutkimus esitetty IAME:n (International Association of Maritime Economists) vuosittaisessa konferenssissa Panamassa
- [40] Furió, S. & Andrés, C. & Lozano, S. & Adenso-Díaz, B. (2009) *Mathematical model to optimize land empty container movements*. http://www.fundacion.valenciaport.com/Articles/doc/presentations/HMS2009_Paperid_27_Furio.aspx (tiedot haettu 18.6.2015)
- [41] Furió, S. & Andrés, C. & Adenso-Díaz, B. & Lozano, S. (2013) *Optimization of empty container movements using street-turn: Application to Valencia hinterland*. Computers & Industrial Engineering, 66 (4):909-917, doi:10.1016/j.cie.2013.09.003
- [42] Gajpal, Y. & Abad, P. (2009) *An ant colony system (ACS) for vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup*. Computers & Operations Research, 36 (12):3215-3223
- [43] GAMS (General Algebraic Modeling System) (2015) <http://www.gams.com/> (tiedot haettu 17.8.2015)
- [44] Gelareh, S. & Meng, Q. (2010) *A novel modeling approach for the fleet deployment problem within a short-term planning horizon*. Transportation Research Part E, 46:76-89
- [45] Gelareh, S. & Nickel, S. (2011) *Hub location problems in transportation networks*. Transportation Research Part E, 47:1092-1111
- [46] Gelareh, S. & Nickel, S. & Pisinger, D. (2010) *Liner shipping hub network design in a competitive environment*. Transportation Research Part E, 46:991-1004

- [47] Gelareh, S. & Pisinger, D. (2011) *Fleet deployment, network design and hub location of liner shipping companies*. Transportation Research Part E, 47:947-964
- [48] Heggie, I. G. (1974) *Charging for port facilities*. Journal of Transport Economics and Policy, 111 (1):3-25
- [49] Heinonen, J. & Huikuri, M. & Linkosaari, T. & Pyhäranta, M. (2009) *Satamatoimintojen mallintaminen*. Mallinnusprojektin loppuraportti, Matematiikan laitoksen kurssi, Turun Yliopisto
- [50] Heinonen, J. (2011) *Ensihoito: ambulanssien kiinteiden sijoituspaikkojen optimointitehtävän mallinnus*. Pro gradu -tutkielma, Matematiikan laitos, Turun Yliopisto
- [51] Hellenic Shipping News (2015) <http://www.hellenicshippingnews.com/uasc-cements-its-presence-in-jordan/> (tiedot haettu 24.8.2015)
- [52] Helsingin Sanomat (2014) *Suomalaisyrittäjä tuo laivoille isot säästöt* <http://www.hs.fi/talous/a1406610705384> (tiedot haettu 18.6.2015)
- [53] Hingorani, N. & Moore, D. & Tornqvist, K. (2005) *Setting a new course in the container shipping industry*. IBM Technical Report, IBM Institute for Business Value Study
- [54] Hoff, A. & Andersson, H. & Christiansen, M. & Hasle, G. & Løkketangen, A. (2010) *Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing*. Computers & Operations Research, 37 (12):2041-2061
- [55] Hsu, C-I. & Hsieh, Y-P. (2005) *Direct versus terminal routing on a maritime hub-and-spoke container network*. Journal of Marine Science and Technology, 13 (3):209-217
- [56] Hsu, C-I. & Hsieh, Y-P. (2007) *Routing, ship size, and sailing frequency decision-making for a maritime hub-and-spoke container network*. Mathematical and Computer Modeling, 45:899-916
- [57] Huovinen, M. (2008) *Optimointimallin muodostaminen - tapaus Turun saariston yhteysalusliikenne*. Pro gradu -tutkielma, Matematiikan laitos, Turun yliopisto
- [58] Huynh, N. (2008) *Analysis of container dwell time on marine terminal throughput and rehandling productivity*. Journal of International Logistics and Trade, 6 (2):69-89

- [59] Iannone, F. & Thore, S. A. & Forte, E. (2007) *Inland container logistics and interports. Goals and features of an ongoing applied research.* Artikkele esitelty The Ninth Scientific Meeting of the Italian Society of Transport Economists -konferenssissa, Napoli, Italia, Lokakuu 3-5, 2007
- [60] IHS (2012) *IHS Global Insight.* World Trade Service Database
- [61] Imai, A. & Shintani, K. & Papadimitriou, S. (2009) *Multi-port vs. hub-and-spoke port calls by containerships.* Transportation Research Part E, 45 (5):740-757
- [62] Jadrijević, N. & Tomašević, M. (2011) *Feeder service development in Mediterranean ports toward more efficient transport technologies.* Tutkimus esitetty: 14. International Conference on Transport Science - ICTS Portoroz, Slovenia
- [63] Jansson, J. O. & Shneerson, D. (1982) *The design of liner shipping services: the problem of feeder services versus multi-port-calls.* Maritime Policy & management, 9 (3):175-188
- [64] Jin, Z-H. & You, Q-H. & Wang, J. (2005) *The container ship routing problem and its practical solutions.* Tutkimus esitetty: the International Conference on Management Science and Engineering -konferenssissa, Incheon, Korea
- [65] Khashei, M. & Bijari, M. & Ardali, G. A. R. (2009) *Improvement of auto-regressive integrated moving average models using fuzzy logic and artificial neural networks (ANNs).* Neurocomputing, 72:956- 967
- [66] Kjeldsen, K. H. (2011) *Classification of ship routing and scheduling problems in liner shipping.* INFOR: Information Systems and Operational Research, 49 (2):139-152
- [67] Karlaftis, M. G. & Kepaptsoglou, K. & Sambracos, E. (2009) *Containership routing with time deadlines and simultaneous deliveries and pick-ups.* Transportation Research Part E, 45 (1):210-221
- [68] Lachner, S. A. & Boskamp, V. A. G. (2011) *Routing and scheduling in liner shipping with multi-start local search heuristics.* Pro gradu - tutkielma, Erasmus University, Rotterdam, Alankomaat
- [69] Lam, J. S. L. (2010) *An integrated approach for port selection, ship scheduling and financial analysis.* Netnomics, 11:33-46

- [70] Lam, J. S. L. & Yap, W. Y. (2011) *Dynamics of liner shipping network and port connectivity in supply chain systems: analysis on East Asia*. Journal of Transport Geography, 19:1272-1281
- [71] Lawrence, S. A. (1972) *International sea transport: the years ahead*. Lexington Books, Lexington, USA
- [72] Levinson, M. (2008) *The box: How the shipping container made the world smaller and the world economy bigger*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey
- [73] Lee, D.H. & Wang, H. Q. & Miao, L. (2008) *Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals*. Transportation Research Part E, 44 (1):124-135
- [74] Lee, L. H. & Chew, E. P. & Tan, K. C. & Han, Y. (2006) *An optimization model for storage yard management in transshipment hubs*. OR Spectrum, 28:539-561
- [75] Lei, L. & Fan, C. & Boile, M. & Theofanis, S. (2008) *Collaborative vs. non-collaborative container-vessel scheduling*. Transportation Research Part E, 44:504-520
- [76] Leung, S. C. H. & Wu, Y. (2004) *A robust optimization model for dynamic empty container allocation problems in an uncertain environment*. International Journal of Operations and Quantitative Management, 10 (4):1-20
- [77] Li, X. & Xu, S. (2011) *A study on port container throughput prediction based on optimal combined forecasting model in Shanghai port*. International conference of Chinese Transportation Professionals, Nanjing, China
- [78] Liao, C-H. & Tseng, P-H. & Cullinane, K. & Lu, C-S. (2010) *The impact of an emerging port on the carbon dioxide emissions of inland container transport: An empirical study of Taipei port*. Energy policy, 38 (9):5251-5257
- [79] Lingo (2015) www.lindo.com/products/lingo/ (tiedot haettu 10.9.2015)
- [80] Lirn, T. & Thanopolou, H. & Beynon, M. & Beresford, A. (2004) *An application of AHP on transshipment port selection: a global perspective*. Maritime Economics and Logistics, 6:70-91

- [81] Liu, Z. & Ji L. & Ye, Y. & Geng, Z. (2007) *Combined forecast method of port container throughput based on RBF neural network*. Journal of Tongji University, (Nature Science), 35 (6):739-744
- [82] Løfstedt, B. & Alvarez, J. F. & Plum, C. E. M. & Pisinger, D. & Sigurd, M. M. (2010) *An integer programming model and benchmark suite for liner shipping network design*. Report 19.2010, DTU Management Engineering
- [83] Lun, Y. H. V. & Lai, K-H. & Cheng, T. C. E. (2010) *Shipping and Logistics Management*. Springer-Verlag, London
- [84] Lu, H-A. & Chu, C-W. & Che, P-Y. (2010) *Seasonal slot allocation planning for a container liner shipping service*. Journal of Marine Science and Technology, 18 (1):84-92
- [85] Lu, K. & Meng, Q. (2011) *Containership routing problem with hub-and-spoke operations*. Tutkimus esitelty: Transportation Research Board 90th Annual Meeting -konferenssissa, Washington, USA
- [86] *Freight rate*. <http://maritimedictionary.org> (tiedot haettu 30.6.2015)
- [87] McKinsey, C. (1967) *Containerization: The Key to Low-Cost Transportation*. Report to the British Transport Docks Board
- [88] Meng, Q. & Wang, S. (2011a) *Liner shipping service network design with empty container repositioning*. Transportation Research Part E, 47:695-708
- [89] Meng, Q. & Wang, S. (2011b) *A scenario-based dynamic programming model for multi-period liner ship fleet planning*. Transportation Research Part E, 47:401-413
- [90] Meng, Q. & Wang, S. (2012) *Liner ship fleet deployment with week-dependent containershipment demand*. European Journal of Operational Research, 222 (2):241-252
- [91] Meng, Q. & Wang, T. (2010) *A chance constrained programming model for short-term liner ship fleet planning problems*. Maritime Policy & Management, 37 (4):329-346
- [92] Meng, Q. & Wang, T. & Gelareh, S. (2011) *A linearized approach for the liner containership fleet planning with demand uncertainty*. Teoksessa:

- Chew, E.P. & Lee, L. H. & Tang, L. C. (toim.) *Advances in Maritime Logistics and Supply Chain Systems*. World Scientific Publishing, Singapore, 229-256
- [93] Meng, Q. & Wang, T. & Wang, S. (2012) *Short-term liner ship fleet planning with container transshipment and uncertain container shipment demand*. *European Journal of Operational Research*, 223 (1):96-105
- [94] Montane, F. A. T. & Galvao, R. D. (2006) *A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service*. *European Journal of Operational Research*, 33 (3):595-619
- [95] Mourao, M. C. & Pato, M. V. & Paixao, A. C. (2001) *Ship assignment with hub and spoke constraints*. *Maritime Policy & Management*, 29 (2):135-150
- [96] Mulder, J. (2011) *Constructing service networks in liner shipping*. Pro gradu -tutkielma, Erasmus University, Rotterdam, Alankomaat
- [97] Mulder, J. & Dekker, R. (2013) *Methods fo strategic liner shipping network design*. *European Journal of Operational Research*, 235 (2):367-377, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.041>
- [98] Mäkelä, M. M. (2015) *Matemaattinen optimointi I*. Luentomoniste, Matematiikan ja tilastotieteen laitos, Turun yliopisto
- [99] NEOS Server (2015) <http://www.neos-server.org/neos/solvers/milp:CPLEX/GAMS.html>
- [100] Ng, A. K. Y. & Kee, J. K. Y. (2008) *The optimal ship sizes of container liner feeder services in Southeast Asia: A ship operator's perspective*. *Maritime Policy & Management*, 35 (4):353-376
- [101] Notteboom, T. E. (2004) *Container shipping and ports: An overview*. *Review of Network Economics*, 3 (2):86-106
- [102] Notteboom, T. (2006). *The time factor in liner shipping services*. *Maritime Economics & Logistics*, 8 (1):19-39
- [103] *OR-library*. <http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/info.html>
- [104] Pallis, A. A. & de Langen, P. W. (2010) *Seaports and the structural implications of the economic crisis*. *Research in Transportation Economics*, 27 (1):10-18

- [105] Paldiski, Northern Port (2015) *Port dues and other applicable charges for services rendered to the vessels*. http://www.portofpaldiski.ee/pdf/eng_tariifid/eng_tariifid.pdf (tiedot haettu 30.6.2015)
- [106] Pantuso, G. & Fagerholt, K. & Hvattum, L. M. (2013) *A survey on maritime fleet size and mix problems*. European Journal of Operational Research, 235 (2):341-349, doi:10.1016/j.ejor.2013.04.058:1-27
- [107] Peng, W-Y. & Chu, C-W (2009) *A comparison of univariate methods for forecasting container throughput volumes*. Mathematical and Computer Modeling, 50 (7-8):1045-1057
- [108] Polat, O. & Uslu, E. E. (2010) *Seasonality in foreign trade data of Turkey*. Gaziantep, University Journal of Social Sciences, 9 (2):407-423
- [109] Polat, O. (2013) *Designing liner shipping feeder service networks in the new era of mega containerships*. Väitöskirja, Fakultät VII - Wirtschaft und Management, Technische Universität Berlin
- [110] Qi, X. & Song, D-P. (2012) *Minimizing fuel emissions by optimizing vessel schedules in liner shipping with uncertain port times*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 48 (4):863-880
- [111] Rana, K. & Vickson, R. G. (1988) *A model and solution algorithm for optimal routing of a time-chartered containership*. Transportation Science, 22:83-95
- [112] Rana, K. & Vickson, R. G. (1991) *Routing container ships using Lagrangean relaxation and decomposition*. Transportation Science, 25:201-214
- [113] Rardin R. L. (1998) *Optimization in operations research*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, United States of America, uusintapainos 2000.
- [114] Reinhardt, L. B. & Pisinger, D. (2012) *A branch and cut algorithm for the container shipping network design problem*. Flexible Services and Manufacturing Journal, 24 (2):349-374
- [115] ROI (2002) *Profit optimization for container carriers*. IMS World Group
- [116] Ronen, D. (1983) *Cargo ship routing and scheduling: Survey of models and problems*. European Journal of Operational Research, 12 (6):112-119

- [117] Ronen, D. (1993) *Ship scheduling: The last decade*. European Journal of Operational Research, 71 (3):325-333
- [118] Ronen, D (2011) *The effect of oil price on containership speed and fleet size*. Journal of the Operational Research Society, 62:211-216
- [119] Rudić, D. & Hlač, B. (2005) *Feeder service to promote revitalization of the container transport in the Adriatic ports*. Naše more, Journal of Marine Science and Technology, 52 (1-2):37-44
- [120] Sambracos, E. & Paravantis, J. A. & Tarantilis, C. D. & Kiranoudis, C. T. (2004) *Dispatching of small containers via coastal freight liners: The case of the Aegean Sea*. European Journal of Operational Research, 152:365-381
- [121] Schulze, P. M. & Prinz, A. (2009) *Forecasting container transshipment in Germany*. Applied Economics, 41:2809-2815
- [122] Shintani, K. & Imai, A. & Nishimura, E. & Papadimitriou, S. (2007) *The container shipping network design problem with empty container repositioning*. Transportation Research Part E, 43 (1):39-59
- [123] ShippingChina (2015) *China Forwarders Freight Index (CFFI)*. <http://en.shippingchina.com/scfi/index/index.html> (tiedot haettu 30.6.2015)
- [124] Shipping and Freight Resource (2015) *Difference between Cargo dues, Tonnage dues & port dues*. <http://www.shippingandfreightresource.com/difference-between-cargo-dues-tonnage-dues-port-dues/> (tiedot haettu 17.6.2015)
- [125] Sigurt, M. & Ulstein, N. & Nygreen, B & Ryan, D. (2005) *Ship scheduling with recurring visits and visit separation requirements*. Teoksessa: Desaulniers, G. & Desrosiers, J. & Solomon, M. (toim.) Column Generation. Springer, US, 225-245
- [126] Song, D-P. & Dong, J-X. (2008) *Empty container management in cyclic shipping routes*. Maritime Economics & Logistics, 10:335-361
- [127] Steenken, D. & Voß, S. & Stahlbock, R. (2004) *Container terminal operation and operations research - classification and literature review*. OR Spectrum, 26:3-49

- [128] Styhre, L. (2010) *Capacity utilisation in short sea shipping*. (Kappale 9), Väitöskirja, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden
- [129] Sun, X. & Li, N. (2006) *A new immune genetic algorithm for the large scale ship routing problems*. Tutkimus esitety: the International Conference on Management of Logistics and Supply Chain - konferenssissa; Chang Sha, Chine - Sydney, Australia
- [130] Takano, K. & Arai, M. (2009) *A genetic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service*. Computer and Operations Research, 33:595-619
- [131] Ting, S-C. & Tzeng, G-H. (2003) *Ship scheduling and cost analysis for route planning in liner shipping*. Maritime Economics & Logistics, 5 (4):378-392
- [132] Toth, P. & Vigo, D. (1997) *An exact algorithm for the vehicle routing problem with backhauls*. Transportation Science, 31 (4):372-385, doi: 10.1287/trsc.31.4.372
- [133] UNCTAD (2012) *United Nations conference on trade and development review of maritime transport*. United Nations, New York and Geneva
- [134] UNCTAD (2014) *United Nations conference on trade and development review of maritime transport*. United Nations, New York and Geneva
- [135] Varbanova, A. (2011) *Current Issues in operational planning of general cargo transportation on container feeder lines in the Black Sea region*. The International virtual journal for science, techniques and innovations for the industry "Machines, Technologies, Materials", 2011 (3):35-38
- [136] *Containership time-charter-rates*. (2015) <http://www.vhss.de/hax> (tiedot haettu 30.6.2015)
- [137] Walter, M. & Younger, W. (1988) *Forecasting the demand for services of a new port*. GeoJournal, 16 (3):295-300
- [138] Wang, S. & Meng, Q. (2011a) *Liner shipping network design with time window constraints*. Tutkimus esitelty: Transportation Research Board 90th Annual Meeting -konferenssissa, Washington, USA
- [139] Wang, S. & Meng, Q. (2011b) *Liner Ship Routing and Scheduling: State of the Art*. International maritime-port technology and development conference (mtec 2011), 69-74

- [140] Wang, S. & Meng, Q. (2012a) *Liner ship fleet deployment with container transshipment operations*. *Transportation Research Part E*, 48 (2):470-484
- [141] Wang, S. & Meng, Q. (2012b) *Liner ship route schedule design with sea contingency time and port time uncertainty*. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46 (5):615-633
- [142] Wang, S. & Meng, Q. (2012c) *Robust schedule design for liner shipping services*. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48 (6):1093-1106
- [143] Wang, S. & Meng, Q. & Liu, Z. (2013b) *Bunker consumption optimization methods in shipping: A critical review and extensions*. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 53:49-62
- [144] Wang, S. & Meng, Q. & Sun, Z. (2013c) *Container routing in liner shipping*. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49 (1):1-7
- [145] Wijnolst, N. & Waals, F. & Bello, F. & Gendronneau, Y. & Kempen, Dv. (2000) *Malacca max (2) Container Shipping Network Economy*. Delft Univeristy Press, Delft/Netherlands
- [146] Wikimedia (2015) *Shipping density (commercial)* https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shipping_routes_red_black.png (kuva haettu 23.6.2015)
- [147] Wikipedia (2015a) *Column generation*. http://en.wikipedia.org/wiki/Column_generation (tiedot haettu 22.6.2015)
- [148] Wikipedia (2015b) *Container Ship*. http://en.wikipedia.org/wiki/Container_ship (tiedot haettu 28.5.2015)
- [149] Wikipedia (2015c) *Constraint programming*. https://en.wikipedia.org/wiki/Constraint_programming (tiedot haettu 9.9.2015)
- [150] Wikipedia (2015d) *Geneettinen algoritmi*. https://fi.wikipedia.org/wiki/Geneettinen_algoritmi (tiedot haettu 10.9.2015)
- [151] Wikipedia (2015e) *Intermodal container*. http://en.wikipedia.org/wiki/Intermodal_container (tiedot haettu 21.5.2015)
- [152] Wikipedia (2015f) *Knapsack problem*. https://en.wikipedia.org/wiki/Knapsack_problem (tiedot haettu 10.9.2015)

- [153] Wikipedia (2015g) *Ocean Liner*. http://en.wikipedia.org/wiki/Ocean_liner (tiedot haettu 8.6.2015)
- [154] Wikipedia (2015h) ($P=NP$). <https://fi.wikipedia.org/wiki/P%3DNP> (tiedot haettu 10.9.2015)
- [155] Wikipedia (2015i) *Shortest path problem*. https://en.wikipedia.org/wiki/Shortest_path_problem (tiedot haettu 10.9.2015)
- [156] Wikipedia (2015j) *Stowage*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Stowage> (tiedot haettu 18.6.2015)
- [157] Wikipedia (2015k) *Slow steaming*. http://en.wikipedia.org/wiki/Slow_steaming (tiedot haettu 18.6.2015)
- [158] Wikipedia (2015l) *Travelling salesman problem*. https://en.wikipedia.org/wiki/Travelling_salesman_problem (tiedot haettu 21.8.2015)
- [159] Wikipedia (2015m) *Variable neighborhood search*. http://en.wikipedia.org/wiki/Variable_neighborhood_search (tiedot haettu 22.6.2015)
- [160] Wilmsmeier, G. & Notteboom, T. (2011) *Determinants of liner shipping network configuration: A two-region comparison*. *GeoJournal*, 76 (3):213-228
- [161] Windeck, V. (2013) *A liner shipping network design: Routing and scheduling considering environmental influences*. Produktion und Logistik, Springer Gabler, Wiesbaden
- [162] World Shipping (2015a) *Containers*. <http://www.worldshipping.org/about-the-industry/containers> (tiedot haettu 28.5.2015)
- [163] World Shipping (2015b) *Inland dispersal of Cargo*. <http://www.worldshipping.org/about-the-industry/global-trade/inland-dispersal-of-cargo> (tiedot haettu 8.6.2015)
- [164] World Shipping (2015c) *Benefits of liner shipping - Efficiency*. <http://www.worldshipping.org/benefits-of-liner-shipping/efficiency> (tiedot haettu 8.6.2015)
- [165] Yan, S. & Chen, C-Y. & Lin, S-C. (2009) *Ship scheduling and container shipment planning for liners in short-term operations*. *Journal of Marine Science and Technology*, 14 (4):417-435

- [166] Yang, J. H. & Kim, K. H. (2006) *A grouped storage method for minimizing relocations in block stacking systems*. Journal of Intelligent Manufacturing, 17, 453-463
- [167] Yang Z. & Chen, K. (2010) *Optimization of shipping network of trunk and feeder lines for inter-regional and intra-regional container transport*. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 8:682-693
- [168] YLE Kymenlaakso (2011) *Kouvolalla hyvät valmiudet kuivasatamaksi*. http://yle.fi/uutiset/kouvolalla_hyvät_valmiudet_kuivasatamaksi/5425820 (tiedot haettu 20.5.2015)
- [169] YLE Uutiset (2014) *Suomalaisyrittäjien keksintö vähentää laivojen päästöjä jopa kymmenyksen*. http://yle.fi/uutiset/suomalaisyrittäjien_keksinto_vahentaa_laivojen_paastoja_jopa_kymmenyksen/7382420 (tiedot haettu 18.6.2015)
- [170] Zacharioudakis, P. G. & Iordanis, S. & Lyridis, D. V. & Psaraftis, H. N. (2011) *Liner shipping cycle cost modeling, fleet deployment optimization and what-if analysis*. Maritime Economics & Logistics, 13:278-297
- [171] Zachial, M. & Lemper, B. (2006) *Container shipping: An overview of Development Trends*. Teoksessa: Heideloff, C. & Pawlik, T. (toim.) Handbook of Container Shipping Management. Vol 32. Institute of Shipping Economics and Logistics (ISL), Bremen, Germany, pp. 23-37
- [172] Zeng, Z. & Yang, Z. (2002) *Dynamic programming of port position and scale in the hierarchized container ports network*. Maritime Policy & Management, 29 (2):163-177
- [173] Zeng, Q. & Yang, Z. & Chen, C. (2010) *Robust optimization model for resource allocation of container shipping lines*. Tsinghua Science & Technology, 15 (5):586-594
- [174] Zohil J. & Prijon, M. (1999) *The MED rule: the interdependence of container throughput and transshipment volumes in the Mediterranean ports*. Maritime Policy & Management, 26 (2):175-193
- [175] Zurheide, S. & Fischer, K. (2011) *A Simulation study for evaluating a slot allocation model for a liner shipping network*. Lecture Notes in Computer Science, 6971:354-369

- [176] Zurheide, S. & Fischer, K. (2012) *A revenue management slot allocation model for liner shipping networks*. *Maritime Economics & Logistics*, 14:334-361

Liitteet

A Sanastoa

Taulukko 25

lyhenne/suom.	eng.	selitys
AP-datajoukko	AP data set	operaatioanalyysissa usein käytetty testijoukko [103]
takaperoissyklinen	backtracking	syöttöliikenteen tyyppi (ks. kuva 1.11)
	blank sailing	sataman ohittaminen reitin varrella
	bi-level programming/optimization	kahden tason (sisäkkäinen, eng. nested) optimointi
	cabotage	kabotaasi eli määräys, jolla rahdin kuljettaminen maan sisällä (rannikolla) sallitaan vain kyseisen maan lipun alla purjehtiville aluksille
CAPEX	Capital expenditures	kiinteät kustannukset
kuljetusyritys	carrier	henkilö, yritys tai järjestö eli operaattori, joka kuljettaa rahdin
	charter	laivan vuokraus
CPLEX		eksakti menetelmän optimointiohjelmisto
CRM	cargo routing model	rahdin reititysmalli
syklinen	cyclic	syöttöliikenteen tyyppi (ks. kuva 1.11)
FCRP	feeder containership routing problem	syöttöliikenteen konttilaivojen reititysongelma
	feeder line	syöttö- eli liityntäliikenne
	feeder ship	syöttölaiva

FSMVRP	fleet size and mix vehicle routing problem	kulkuneuvon reititysongelma, jossa huomioidaan laivaston koko ja koostumus
	fleet size	laivaston alusten lukumäärä
FND	fleet mix Feeder Network Design	heterogeenisen laivaston koostumus erilaisista aluksista Syöttöliikenteen palveluverkon suunnittelu
	genetic algorithm	geneettinen algoritmi (Wikipedia [150])
heuristiikka	heuristic	elegantti arvausmenetelmä, jolla päästään nopeasti riittävän lähelle parasta mahdollista ratkaisua
H&S	hub-and-spoke	(ks. kuva 1.9)
	Hub location and spoke allocation	Solmukohtasatamien määrittäminen ja muiden satamien reittiallokointi solmukohtasatamiin
	hub port	solmukohtasatama
	integer multiple commodity network flow	useamman tuotteen kokonaislukuvirtaus
	interlining	rahti kulkee perille kahden tai useamman laivastoyhtiön toimesta
LSND	Liner Shipping service Network Design	Linjalaivauksen palveluverkon suunnittelu
MILP	Mixed-Integer Linear Programming	lineaarinen sekalukuoptimointi
MLVRPSPD	Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery with Maximum Distance Length	kulkuneuvon reititysongelma yhtäaikaistulla noudolla ja toimituksella sisältäen suurimman sallitun kuljetun matkan
	mother ship	emo- eli runkolaiva

MPC	multi-port-calling	(ks. kuva 1.6)
MVRPB	multi-start local search heuristics Mixed Vehicle Routing Problem with Backhauls	usean aloituskohdan paikallishakuheuristiikka
NP	Non-deterministic Polynomial-time	epädeterministinen polynomiaalisessa ajassa (ks. Wikipedia [154])
OPEX	Operating expenditures	muuttuvat (operointi)kustannukset
PDP	Pickup and Delivery Problem	nouto- ja toimitusongelma
RFU	reefer	jäähdytetty kontti (eli jääkaappikontti)
rahtaaaja	shipper	rahdin omistaja tai toimittaja
sukkulointi	shuttle	syöttöliikenteen tyyppi (ks. kuva 1.11)
	slot capacity	konttipaikkojen määrä/-kapasiteetti
SSSCR	simultaneous ship-scheduling and cargo-routing problem	yhtäaikainen laivan aikataulutusta ja rahdin reititysongelma
ahtaaminen	stowage	laivan kapasiteetin täyttäminen rahdilla mahdollisimman optimaalisesti, tasapainoisesti ja nopeasti (Ambrosino et al. [8])
läpisyöttö	throughput	sataman kautta kulkevien konttien lkm.
uudelleenlastausatama	transshipment port	satama, jossa rahti siirretään laivasta toiseen (eng. hub port)
	trunk line	emo- eli runkoliikenne
TSP	travelling salesman problem	kauppamatkustajan ongelma
ULCV	Ultra Large Container Vessel	erittäin suuri konttialus (ks. taulukko 2)

USApHMP	uncapacitated single allocation p-hub median problem	Kapasiteettirajoitteeton yksittäisallokoitu p-keskuksen sijoitusongelma (Ernst & Krishnamoorthy [32])
UNCTAD	The United Nations Conference on Trade and Development	Yhdistyneiden kansakuntien kaupan ja kehityksen konferenssi
VNS	Variable Neighborhood Search	muuttuva naapurustohaku (Wikipedia [159])
VRP	Vehicle Routing Problem	kulkuneuvojen reititysongelma
VRPB	Vehicle Routing Problem with Backhauls	kulkuneuvojen reititysongelma, jossa asiakkaiden joukko on jaettu kahteen osajoukkoon. Ensimmäisestä asiakasjoukosta noudetaan tavaroita ja toiseen joukkoon tavarat toimitetaan (Toth & Vigo [132])
VRPMTTL	Vehicle Routing Problem with Multi Trip and Time Limit	kulkuneuvojen reititysongelma, jossa kulkuneuvo voi kulkea usealla reitillä samalla huomioiden aikarajoitteen
VRPPD	Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery	kulkuneuvojen reititysongelma, jossa tavaroita noudetaan ja toimitetaan
VRPPDTW	Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery with Time Windows	kulkuneuvojen reititysongelma, jossa tavaroita noudetaan ja toimitetaan aikarajoitteen puitteissa
VRPSPD	Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery	kulkuneuvojen reititysongelma yhtäaikaishalla tavaroiden noudolla ja toimituksella

VRPSPDTL	Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery with Time Limit	kulkuneuvojen reititys-ongelma yhtäaikaisella tavaroiden noudolla ja toimituksella aikarajoitteen puitteissa
VRPSPDTW	Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery with Time Windows	kulkuneuvojen reititys-ongelma yhtäaikaisella tavaroiden noudolla ja toimituksella aikakunoiden sallimissa rajoissa

B Konttilaivojen pääoma- ja operointikustannukset vuonna 2015

Kapasiteetti [TEU]	2000	3500	4500	6800	8500	10800	12500	14500	18270	22000	24000
Pääomakustannukset											
Hankintahinta [mlj. \$]	25,0	35,5	40,0	57,5	76,5	90,0	112,0	130,0	162,0	178,0	190,0
Pääomakustannus [\$/vrk]	10307	14638	16491	23706	31539	37104	46174	53595	66788	73384	78331
Operointikustannukset											
Miehistö [\$/vrk]	3200	3650	3650	3650	3650	3650	3650	3800	4100	3650	3650
Korjaus & Huolto [\$/vrk]	1096	1568	1734	2456	2903	3238	3573	3948	4353	3284	6635
Vakuutus [\$/vrk]	655	936	1035	1466	1733	1933	2133	2350	3100	3751	3961
Hallinto & Muut kustannukset [\$/vrk]	1000	1100	1100	1200	1200	1200	1300	1475	1650	1300	1300
Operointikustannukset yhteensä [\$/vrk]	5951	7253	7519	8773	9486	10021	10656	11573	13203	14986	15546
Yhteensä [\$/TEU]	16258 8,13	21889 6,25	24010 5,34	32478 4,78	41025 4,83	47125 4,36	56830 4,55	65168 4,49	79991 4,38	88370 4,02	93877 3,91

Taulukko 26: Lähde: Ocean Shipping Consultants

C Koodilistaukset

C.1 GAMS-koodit

Parametrisoitu malli, jossa kolme satamaa ja kaksi laivaa.

```
1 $eolcom #
3 * joukko P
4 SET ii "kaikki satamat" /virtuaalisatama0, satama1*
   satama3, virtuaalisatama00/;
5 alias (ii,jj); # identtiset joukot
7 * joukko N
8 SET i(ii) satamat /satama1*satama3/;
9 alias (i,j);
10 alias (i,k);
12 * joukko M
13 SET m(ii) virtuaalisatamat /virtuaalisatama0, virtuaalisatama00/
   ;
15 * joukko S
16 SET s laivat /omalaiva1, vuokrattulaiva1/;
17 alias (s,ss)
18 * joukko S_O
19 SET s_o(s) omistetutlaivat /omalaiva1/;
21 * joukko S_C
22 SET s_c(s) vuokratutlaivat / vuokrattulaiva1 /;
24 * joukko R
25 SET r reittijoukko /reitti1,reitti2/;
27 SET r_oma_meno(r) "oman laivan menoreittijoukko" /reitti1/;
28 SET r_oma_paluu(r) "oman laivan paluureittijoukko" /reitti2/;
30 SET r_vuok_meno(r) "vuokratun laivan menoreittijoukko" /reitti1/
   ;
31 SET r_vuok_paluu(r) "vuokratun laivan paluureittijoukko" /
   reitti2/;
33 SCALAR rw /0.0838/; # tulokerroin lanteenpain mentaessa
35 SCALAR re /0.1677/; # tulokerroin itaanpain mentaessa
37 SCALAR konttiskaala /1000/; # konttien suuruusluokka, eli kuinka
   paljon pienennetaan
38 # lukuja laskennan helpottamiseksi
```

```

40 SCALAR rahaskaala /1000/; # rahasuuruusluokka

42 PARAMETER a /30/; # jakson pituus [vrk]

44 PARAMETER alpha /500/; # paamoottorin polttoaineen hinta [$]

46 PARAMETER beta /800/; # apumoottorin polttoaineen hinta [$]

48 TABLE bc(s,i) "laivan s kiinteat satamakustannukset satamassa i
    [$]"
49
50          satama1 satama2 satama3
51 omalaival      25000  25000  25000
52 vuokrattulaival 25000  25000  25000;

53 PARAMETER bp(s) "laivan s apumoottorin polttoaineen kulutus
    satamassa tonni/tunti"
54 / omalaival 0.5
55 vuokrattulaival 0.5 /;

57 PARAMETER bs(s) "laivan s paamoottorin polttoaineen kulutus
    merella nominaalinopeudella [tonni/tunti]"
58 / omalaival 3
59 vuokrattulaival 3/;

61 PARAMETER cc(s_c) "vuokrattavan laivan s vuokraushinta $/vrk
    /"
62 / vuokrattulaival 21000/;

64 PARAMETER cp(s_o) "omistetun laivan s ulosvuokraushinta $/vrk
    /"
65 / omalaival 21000/;

67 PARAMETER fc_o(s_o) "omistetun laivan s operointikustannukset $
    /[vrk]"
68 / omalaival 14000/;

70 PARAMETER fc_c(s_c) "vuokratun laivan s operointikustannukset $
    /[vrk]"
71 / vuokrattulaival 14000/;

73 TABLE o(s,i) "satamatoimintojen tehokkuus laivalle s satamassa
    i TEU/[vrk]"
74
75          satama1 satama2 satama3
76 omalaival      25      25      25
77 vuokrattulaival 25      25      25;

78 PARAMETER oc(s_o) "laivan s omistushinta $/[vrk]"
79 /omalaival 19000/;

```

```

81 TABLE pt(s,ii) laivan s valmistelu-aika satamassa [tunti]
82             virtuaalisatama0 satama1 satama2
             satama3 virtuaalisatama00
83     omalaival      0             25      25      25
             0
84     vuokrattulaival 0             25      25      25
             0;

87 PARAMETER q(s) "laivan s kapasiteetti"
88     /omalaival      8000
89     vuokrattulaival 8000/;

91 PARAMETER st(i) "yhden TEU-kontin ahtauskustannus satamassa s [
    $]"
92     / satama1      175
93     satama2      175
94     satama3      175/;

96 PARAMETER rt(s) "laivan s kunnostusaika [tunti]"
97     / omalaival      48
98     vuokrattulaival 48/;

100 PARAMETER sc(s_c)          vuokralle saatavissa olevat laivat
101     / vuokrattulaival 1/;

103 PARAMETER so(s_o)          omistetut laivat
104     / omalaival 1/;

106 PARAMETER vs(s) "laivan s nominaalinen nopeus [solmu]"
107     / omalaival      20
108     vuokrattulaival 20/;

110 PARAMETER v(r,s) "laivan s ajonopeus [solmu]";
111     v(r,s) = 20;

113 TABLE w(ii,jj) "satamien valiset etaisyydet"
114             virtuaalisatama0          satama1
             satama2          satama3
             virtuaalisatama00
115     virtuaalisatama0  0             0
             0             0
116     satama1          0             0
             2000          5000          0
117     satama2          0             2000
             0             2000          0
118     satama3          0             5000
             2000          0             0
119     virtuaalisatama00 0             0

```

```

                                0                0                0;
121 TABLE d(i,j) "konttien kysynnat"
122                satama1                satama2
                                satama3
123    satama1                0                7000
                                13000
124    satama2                15000                0
                                11000
125    satama3                30000                11000
                                0;

128 PARAMETER    x(r,s,ii,jj)    "1, jos kaari kuuluu satamien
    i ja j valilla reitilla r laivalla s";

130                x(r,s,ii,jj) = 0;

132    x(r_oma_meno,'omalaival', 'virtuaalisatama0', 'satama1
    ') = 1;
133    x(r_oma_meno,'omalaival', 'satama1', 'satama2') =1;
134    x(r_oma_meno,'omalaival', 'satama2', 'satama3') =1;
135    x(r_oma_meno,'omalaival', 'satama3', '
    virtuaalisatama00') =1;

137    x(r_oma_paluu,'omalaival', 'virtuaalisatama0', 'satama3
    ') =1;
138    x(r_oma_paluu,'omalaival', 'satama3', 'satama1') =1;
139    x(r_oma_paluu,'omalaival', 'satama1', '
    virtuaalisatama00') =1;

141    x(r_vuok_meno,'vuokrattulaival','virtuaalisatama0', '
    satama3') =1;
142    x(r_vuok_meno,'vuokrattulaival', 'satama3', 'satama2')
    =1;
143    x(r_vuok_meno,'vuokrattulaival', 'satama2', 'satama1')
    =1;
144    x(r_vuok_meno,'vuokrattulaival', 'satama1', '
    virtuaalisatama00') =1;

146    x(r_vuok_paluu,'vuokrattulaival','virtuaalisatama0', '
    satama1') =1;
147    x(r_vuok_paluu,'vuokrattulaival', 'satama1', 'satama3')
    =1;
148    x(r_vuok_paluu,'vuokrattulaival', 'satama3', '
    virtuaalisatama00') =1;

```

```

152 PARAMETER pc(r,s,i) "kaydaanko satamassa i laivan s reitilla r";

154         pc(r,s,i) = smax(jj, x(r,s,jj,i));

156 *PARAMETER fii(r,s,i) "sataman jarjestys" ;
157 *         fii(r,s,i) = 0;
158 *
159 *         fii(r_oma_meno,'omalaival','satama1') = 1;
160 *         fii(r_oma_meno,'omalaival','satama2') = 2;
161 *         fii(r_oma_meno,'omalaival','satama3') = 3;

163 *         fii(r_oma_paluu,'omalaival','satama1') = 2;
164 *         fii(r_oma_paluu,'omalaival','satama3') = 1;

166 *         fii(r_vuok_meno,'vuokrattulaival','satama1') = 2;
167 *         fii(r_vuok_meno,'vuokrattulaival','satama2') = 1;

169 *         fii(r_vuok_paluu,'vuokrattulaival','satama1') = 1;
170 *         fii(r_vuok_paluu,'vuokrattulaival','satama2') = 2;

172 PARAMETER u(r,s,i,j) "paastaanko satamasta i satamaan j laivan s
        reitilla r";

174         u(r,s,i,j) = 0;

176         u(r_oma_meno,'omalaival','satama1','satama2')=1;
177         u(r_oma_meno,'omalaival','satama1','satama3')=1;
178         u(r_oma_meno,'omalaival','satama2','satama3')=1;

180         u(r_oma_paluu,'omalaival','satama3','satama1')=1;

182         u(r_vuok_meno,'vuokrattulaival','satama2','satama1')=1;
183         u(r_vuok_meno,'vuokrattulaival','satama3','satama1')=1;
184         u(r_vuok_meno,'vuokrattulaival','satama3','satama2')=1;

186         u(r_vuok_paluu,'vuokrattulaival','satama1','satama3')
                =1;

189 PARAMETER theta(r,s,k,i,j);
190 *         apumuuttuja kertoo voivatko
        satamasta i satamaan j
191 *         kuljettavat kontit olla
        lastattuna laivassa s
192 *         reitilla r, kun lahdetaan
        satamasta k
193         theta(r,s,k,i,j) = 0;

195         theta(r_oma_meno, 'omalaival','satama1', 'satama1', '

```

```

        satama2')=1;
196 theta(r_oma_meno, 'omalaival','satama1', 'satama1', '
        satama3')=1;
197 theta(r_oma_meno, 'omalaival','satama2', 'satama1', '
        satama3')=1;
198 theta(r_oma_meno, 'omalaival','satama2', 'satama2', '
        satama3')=1;

200 theta(r_oma_paluu, 'omalaival','satama3', 'satama3', '
        satama1')=1;

202 theta(r_vuok_meno, 'vuokrattulaival','satama2', '
        satama2', 'satama1')=1;
203 theta(r_vuok_meno, 'vuokrattulaival','satama2', '
        satama3', 'satama1')=1;
204 theta(r_vuok_meno, 'vuokrattulaival','satama3', '
        satama3', 'satama1')=1;
205 theta(r_vuok_meno, 'vuokrattulaival','satama3', '
        satama3', 'satama2')=1;

207 theta(r_vuok_paluu, 'vuokrattulaival','satama1', '
        satama1', 'satama3')=1;

209 PARAMETER rr(i,j) "tulokerroinmatriisi";

211 rr(i,j)$(ord(i) > ord(j) ) = re; #
        ylakolmiomatriisiin re-parametri
212 rr(i,j)$(ord(i) < ord(j) ) = rw; #
        alakolmiomatriisiin rw-parametri
213 rr(i,j)$(ord(i) = ord(j) ) = 0; # diagonaalille 0

215 PARAMETER r_tulo(i,j) konteista saatava tulo satamasta i
        satamaan j;

217 r_tulo(i,j) = w(i,j)*rr(i,j);
218 st(i) = 100;
219 ***** yksikkomuunnokset
220 a = a/24.0;
221 cc(s_c) = cc(s_c)/24.0;
222 cp(s_o) = cp(s_o)/24.0;
223 fc_o(s_o) = fc_o(s_o)/24.0;
224 fc_c(s_c) = fc_c(s_c)/24.0;
225 oc(s_o) = oc(s_o)/24.0;

227 ***** konttimaarien skaalaus
228 r_tulo(i,j) = r_tulo(i,j)*konttiskaala;
229 d(i,j) =d(i,j)/konttiskaala;
230 q(s) = q(s)/konttiskaala;
231 o(s,i) = o(s,i)*konttiskaala;

```

```

232         st(i) = st(i)*konttiskaala;

234 ***** rahaluokkaskaalaus
235         alpha = alpha / rahaskaala;
236         beta = beta /rahaskaala;
237         bc(s,i) = bc(s,i)/rahaskaala;
238         cc(s_c) = cc(s_c) / rahaskaala;
239         cp(s_o) = cp(s_o)/rahaskaala;
240         fc_o(s_o) = fc_o(s_o)/rahaskaala;
241         fc_c(s_c) = fc_c(s_c)/rahaskaala;
242         oc(s_o) = oc(s_o)/rahaskaala;
243         st(i) = st(i)/rahaskaala;
244         r_tulo(i,j) = r_tulo(i,j)/rahaskaala;

246 VARIABLES
247         z(r,s,i,j)      kuljetettavat kontit satamasta i
                          satamaan j laivalla s reitilla r
248         ;

250 integer variable z;
251         z.lo(r,s,i,j) = 0;
252         z.up(r,s,i,j) = smax( ss, q(ss) ) ;

256 ** apumuuttujat
257 VARIABLES
258         t(r,s,ii)

260         zz(r,s,i)

262         RV
263         FC
264         CO
265         FS
266         FP
267         PF
268         SF
269         ;

271 positive variable t;

273 integer variable zz;
274         zz.lo(r,s,i) = 0;
275         zz.up(r,s,i) = sum( (j,k), d(j,k) );

277 variable profit;

279 EQUATIONS

```

```

280      tmaarl(r,s,i)                                "apumuuttuja"
281      tmaarl2(r,s,m)                               "apumuuttuja"
282      zzmaarl(r,s,i)                               "apumuuttuja"

284      revenue                                     "tulot
        konteista"
285      fixedcosts                                  "kiinteat
        kustannukset"
286      charterout                                  "tulot
        ulosvuokrauksesta"
287      fuelsea                                     "
        polttoainekulut merella"
288      fuelport                                    "
        polttoainekulut satamassa"
289      portfees                                    "satamamaksut"
290      stowagefees                                 "konttien
        lastaus- ja purkukustannukset eli ahtauskustannukset
        "

293      kohdefunktio                               "maksimoitava
        kohdefunktio"
294      konttirajoiteyksittain(r,s,i,j)            "konttien
        kysyntarajoite yksittain"
295      konttirajoiteyhteensa(i,j)                 "
        konttien kysyntarajoite yhteensa"
296      kapasiteettirajoite(r,s,k)                 "lastauksen
        kapasiteettirajoite"
297      ;

300      *apumuuttujien maarittely
301      tmaarl(r,s,i) .. t(r,s,i) =e= zz(r,s,i) / o(s,i) ;
302      tmaarl2(r,s,m) .. t(r,s,m) =e= 0;

304      zzmaarl(r,s,i) .. zz(r,s,i) =e= sum( (j, k), z(r,s,j,i) + z(r,s,i
        ,k) );

308      **kohdefunktion maarittely osittain
309      revenue .. RV =e= Sum( (r, s, i, j), r_tulo(i,j)*z(r,s,i,j) );

311      fixedcosts .. FC =e=      Sum( s_o, (oc(s_o) + fc_o(s_o))*so(s_o)
        )
312      + Sum( s_c, (cc(s_c) + fc_c(s_c))*sc(s_c) )
        ;

314      charterout .. CO =e= Sum( s_o, cp(s_o)*( 1-so(s_o) ) );

```

```

316 fuelsea .. FS =e= Sum( (r, s, ii, jj), alpha * bs(s) * w(ii,jj)
    * power(v(r,s),2) / (power(vs(s),3)) * x(r,s,ii,jj) );

318 fuelport .. FP =e= Sum( (r, s, i), beta * bp(s) * pc(r,s,i) * (
    pt(s,i) + t(r,s,i) );

320 portfees .. PF =e= Sum( (r, s,i), bc(s,i) * pc(r,s,i) );

322 stowagefees .. SF =e= Sum( (r, s, i), st(i) * zz(r,s,i) );

324 kohdefunktio .. profit =e= Sum( (r, s, i, j), r_tulo(i,j)*z(r,s,
    i,j) ) # revenue
325         - Sum( s_o, (oc(s_o) + fc_o(s_o))*so(
    s_o) ) # fixed costs owned ships
326         - Sum( s_c, (cc(s_c) + fc_c(s_c))*sc
    (s_c) ) #fixed costs chartered
    ships
327         + Sum( s_o, cp(s_o)*( 1-so(s_o) ) )
    # charter out revenue
328         - Sum( (r, s, ii, jj), alpha * bs(s)
    * w(ii,jj) * power(v(r,s),2) / (
    power(vs(s),3)) * x(r,s,ii,jj) )
    # fuelsea
329         - Sum( (r, s, i), beta * bp(s) * pc
    (r,s,i) * (pt(s,i) + t(r,s,i)) )
    #fuel port
330         - Sum( (r, s,i), bc(s,i) * pc(r,s,i)
    ) # port fees
331         - Sum( (r, s, i), st(i) * zz(r,s,i)
    ); #stowage fees

332 **rajoitteet**

334 konttirajoiteyksittain(r,s,i,j) .. z(r,s,i,j) =l= d(i,j) * u(r,s
    ,i,j);

336 konttirajoiteyhteensa(i,j) .. Sum( (r, s), u(r,s,i,j) * z(r,s,i,
    j) ) =l= d(i,j);

338 kapasiteettirajoite(r,s,k) .. Sum( (i,j), theta(r, s, k, i, j) *
    z(r, s, i, j) ) =l= q(s);

340 * aikarajoitetta eika reititysrajoitteita huomioida, silla
    paatosmuuttuja x on parametrisoitu,
341 * eli reitti on ennalta maaratty

343 **ratkaiseminen

345 model satamat3laivat2 /all/ ;

```

```

347 solve satamat3laivat2 using miqcp maximizing profit;

350 display pc;
351 display u;
352 display r_tulo;

354 display theta;

356 display RV.l;
357 display FC.l;
358 display CO.l;
359 display FS.l;
360 display FP.l;
361 display PF.l;
362 display SF.l;
363 display profit.l;
364 display st;
365 Display z.l, z.m ;

```

Malli, jossa kolme satamaa ja kaksi laivaa. Laivojen lukumäärä ja nopeus lähtökohtaisesti parametrisoitu.

```

1 $eolcom #
2 $onempty

4 * joukko P
5 SET ii "kaikki satamat" /virtuaalisatama0, satama1*
   satama3, virtuaalisatama00/;
6 alias (ii,jj); # identtiset joukot

8 * joukko N
9 SET i(ii) satamat /satama1*satama3/;
10 alias (i,j);
11 alias (i,k);

13 * joukko M
14 SET m(ii) virtuaalisatamat /virtuaalisatama0, virtuaalisatama00/
   ;

16 * joukko S
17 SET s laivat /omalaiva1, vuokrattulaiva1/;
18 alias (s,ss)
19 * joukko S_0
20 SET s_o(s) omistetutlaivat /omalaiva1/;

22 * joukko S_C
23 SET s_c(s) vuokratutlaivat / vuokrattulaiva1 /;

```

```

26 * joukko R
27 SET r reittijoukko /reittil*reitti2/; #huomhuom

29 SCALAR rw /0.0838/; # tulokerroin lanteenpain mentaassa

31 SCALAR re /0.1677/; # tulokerroin itaanpain mentaassa

33 SCALAR konttiskaala /1000/; # konttien suuruusluokka, eli kuinka
    paljon pienennetaan
34                                     # lukuja laskennan helpottamiseksi

36 SCALAR rahaskaala /1000/; # rahasuuruusluokka

38 PARAMETER a /30/; # jakson pituus [vrk]

40 PARAMETER alpha /500/; # paamoottorin polttoaineen hinta [$]

42 PARAMETER beta /800/; # apumoottorin polttoaineen hinta [$]

44 TABLE bc(s,i) "laivan s kiinteat satamakustannukset satamassa i
    [$]"
45                                     satama1 satama2 satama3
46     omalaival                       25000  25000  25000
47     vuokrattulaival                   25000  25000  25000;

49 PARAMETER bp(s) "laivan s apumoottorin polttoaineen kulutus
    satamassa tonni/tunti"
50     / omalaival 0.5
51     vuokrattulaival 0.5 /;

53 PARAMETER bs(s) "laivan s paamoottorin polttoaineen kulutus
    merella nominaalinopeudella [tonni/tunti]"
54     / omalaival 3
55     vuokrattulaival 3/;

57 PARAMETER cc(s_c) "vuokrattavan laivan s vuokraushinta /$/vrk
    /"
58     / vuokrattulaival 21000/;

60 PARAMETER cp(s_o) "omistetun laivan s ulosvuokraushinta /$/vrk
    /"
61     / omalaival 21000/;

63 PARAMETER fc_o(s_o) "omistetun laivan s operointikustannukset $
    /[vrk]"
64     / omalaival 14000/;

```

```

66 PARAMETER fc_c(s_c) "vuokratun laivan s operointikustannukset $
    / [vrk]"
67     / vuokrattulaival 14000/;

69 TABLE o(s,i) "satamatoimintojen tehokkuus laivalle s satamassa
    i TEU/[vrk]"
70     satama1 satama2 satama3
71     omalaival 25 25 25
72     vuokrattulaival 25 25 25;

74 PARAMETER oc(s_o) "laivan s omistushinta $/[vrk]"
75     /omalaival 19000/;

77 TABLE pt(s,ii) laivan s valmisteluaika satamassa [tunti]
78     virtuaalisatama0 satama1 satama2
79     satama3 virtuaalisatama0
80     omalaival 0 25 25 25
81     0
82     vuokrattulaival 0 25 25 25
83     0;

83 PARAMETER q(s) "laivan s kapasiteetti"
84     /omalaival 8000
85     vuokrattulaival 8000/;

87 PARAMETER st(i) "yhden TEU-kontin ahtauskustannus satamassa s [
    $]" #huomhuom
88     / satama1 15
89     satama2 15
90     satama3 15/;

92 PARAMETER rt(s) "laivan s kunnostusaika [tunti]"
93     / omalaival 48
94     vuokrattulaival 48/;

97 PARAMETER vs(s) "laivan s nominaalinen nopeus [solmu]"
98     / omalaival 20
99     vuokrattulaival 20/;

101 PARAMETER v_min(s) "laivan s miniminopeus [solmu]"
102     / omalaival 12
103     vuokrattulaival 12/;

105 PARAMETER v_max(s) "laivan s maksiminopeus [solmu]"
106     / omalaival 25
107     vuokrattulaival 25/;

```



```

144         r_tulo(i,j) = r_tulo(i,j)*konttiskaala;
145         d(i,j) =d(i,j)/konttiskaala;
146         q(s) = q(s)/konttiskaala;
147         o(s,i) = o(s,i)*konttiskaala;
148         st(i) = st(i)*konttiskaala;

150 ***** rahaluokkaskaalaus
151         alpha = alpha / rahaskaala;
152         beta = beta /rahaskaala;
153         bc(s,i) = bc(s,i)/rahaskaala;
154         cc(s_c) = cc(s_c) / rahaskaala;
155         cp(s_o) = cp(s_o)/rahaskaala;
156         fc_o(s_o) = fc_o(s_o)/rahaskaala;
157         fc_c(s_c) = fc_c(s_c)/rahaskaala;
158         oc(s_o) = oc(s_o)/rahaskaala;
159         st(i) = st(i)/rahaskaala;
160         r_tulo(i,j) = r_tulo(i,j)/rahaskaala; ##huomhumm

163 *testausosio, muutetaan parametrit mahdollisimman suotuisiksi
164 *         r_tulo(i,j) = r_tulo(i,j)*100000; ##huomhuom
165 *         a = 10000*a;
166 *         alpha = 1;
167 *         beta = 1;
168 *         bc(s,i)= 1;
169 *         bp(s)=0.0001;
170 *         bs(s)= 0.0001;
171 *         cc(s_c) = 1;
172 *         cp(s_o) = 1;
173 *         fc_o(s_o) = 1;
174 *         fc_c(s_c) =1;
175 *         oc(s_o) = 1;
176 *         st(i)=1;

179 * todellisten satamien lukumaara
180 PARAMETER LKM;
181         LKM = card(i);

183 * riittavan iso vakio
184 PARAMETER isoK;
185         isoK = 4*LKM;

187 * paatosmuuttujat
188 VARIABLES
189         sc(s_c)          "vuokralle saatavissa olevat laivat"
190         so(s_o)          "omistetut laivat, kaytossa vai ei"
191         v(r,s) parametrisoitu

```

```

192         x(r,s,ii,jj)    "1, jos kaari kuuluu satamien i ja j
                valilla reitilla r laivalla s"
193         z(r,s,i,j)      kuljetettavat kontit satamasta i
                satamaan j laivalla s reitilla r
194         ;

196 * maarittelyjoukot
197 binary variable sc;

199 binary variable so;

201 binary variable x;

203 positive variable v(r,s);
204         v.lo(r,s) = v_min(s);
205         v.up(r,s) = v_max(s);

207 integer variable z;
208         z.lo(r,s,i,j) = 0;
209         z.up(r,s,i,j) = smax( ss, q(ss) ) ;

213 ** apumuuttujat
214 VARIABLES
215         fii(r,s,i) "sataman jarjestys"
216         pc(r,s,i) "kaydaanko satamassa i laivan s reitilla r"
217         theta(r,s,k,i,j)
218         t(r,s,ii)
219         u(r,s,i,j) "paastaanko satamasta i satamaan j laivan s
                reitilla r"
220         zz(r,s,i)
221         y(i)
222 * lyhenteet
223         RV
224         FC
225         CO
226         FS
227         FP
228         PF
229         SF
230         profit
231         ;

233 * apumuuttujien maarittelyjoukot

235 integer variable fii;
236         fii.lo(r,s,i) = 0;
237         fii.up(r,s,i) = LKM;

```

```

239 binary variable pc;

241 binary variable theta;

243 positive variable t;

245 binary variable u;

247 binary variable y;

251 integer variable zz;
252     zz.lo(r,s,i) = 0;
253     zz.up(r,s,i) = sum( (j,k), d(j,k) );

255 EQUATIONS
256     fiimaar(r,s,i,j)                "satamien
        järjestyksen maaritysehto"
257     pcmaar1(r,s,i,j)                "
        binaariapumuuttuja"
258     thetamaar(r,s,k,i,j)           "
        binaariapumuuttuja"
259     pcmaar2(r,s,i,j)
260     pcmaar3
261     tmaar1(r,s,i)                  "apumuuttuja"
262     tmaar2(r,s,m)                  "apumuuttuja"
263     umaar(r,s,i,j)                 "
        binaariapumuuttuja"
264     zzmaar(r,s,i)                  "apumuuttuja"

267     revenue                         "tulot
        konteista"
268     fixedcosts                       "kiinteat
        kustannukset"
269     charterout                       "tulot
        ulosvuokrauksesta"
270     fuelsea                          "
        polttoainekulut merella"
271     fuelport                         "
        polttoainekulut satamassa"
272     portfees                         "satamamaksut"
273     stowagefees                      "konttien
        lastaus- ja purkukustannukset eli ahtauskustannukset
        "

```

```

276      kohdefunktio                                "maksimoitava
      kohdefunktio"
277      konttirajoiteyksittain(r,s,i,j)            "konttien
      kysyntarajoite yksittain"
278      konttirajoiteyhteensa(i,j)                "konttien
      kysyntarajoite yhteensa"
279      kapasiteettirajoite(r,s,k)                "lastauksen
      kapasiteettirajoite"
280      aikarajoite(s)                             "laivojen kulun
      aikarajoite"
281      reittirajoitel(r,s)                       "reitin
      muodosturajoite 1"
282      reittirajoite2(r,s)                       "reitin
      muodosturajoite 2"
283      reittirajoite3(r,s,i)                    "reitin
      muodosturajoite 3"
284 *      reittirajoite4(r,s)                    "reitin
      muodosturajoite 4"
285      reittirajoite5(r,s,i)                     "reitin
      muodosturajoite 5"
286      reittirajoite6(r,s,ii)                   "reitin
      muodosturajoite 6"
287      reittirajoite7(r,s,ii)                   "reitin
      muodosturajoite 7"
288      reittirajoite8(r,s,ii)                   "reitin
      muodosturajoite 8"
289      laivojenreititysehto1(r,s_o,ii,jj)       "oma laiva
      voidaan reitittaa jos se on kaytossa"
290      laivojenreititysehto2(r,s_c,ii,jj)       "vuokrattu
      laiva voidaan reitittaa jos se on kaytossa"
291      ;
292      ;

295      fiimaar(r,s,i,j) .. fii(r,s,i) - fii(r,s,j) + LKM* x(r,s,i,j) =
      l= LKM -1;

297      *pcmaarl(r,s,i) .. pc(r,s,i) =e= smax( jj, x(r,s,jj,i) );

299      pcmaarl(r,s,i,j) .. x(r,s,j,i) =l= pc(r,s,i);

301      pcmaar2(r,s,i,j) .. x(r,s,j,i) =g= pc(r,s,i) - isoK * (1 - y(i)
      );

303      pcmaar3          .. sum( i , y(i) ) =g= 1;

305      thetamaar(r,s,k,i,j) .. isoK * ( theta(r,s,k,i,j) -1) =l= fii(r,
      s,j) - fii(r,s,k) - fii(r,s,i) + LKM - 1;

```

```

307  umaar(r,s,i,j) .. isoK *( u(r,s,i,j) -1 ) =l= fii(r,s,j) - fii(r
    ,s,i) ;

309  * apumuuttujen maarittely
310  tmaar1(r,s,i) .. t(r,s,i) =e= zz(r,s,i) / o(s,i) ;
311  tmaar2(r,s,m) .. t(r,s,m) =e= 0;

313  zzmaar(r,s,i) .. zz(r,s,i) =e= sum( (j, k), z(r,s,j,i) + z(r,s,i
    ,k) );

315  **kohdefunktion maarittely osittain
316  revenue .. RV =e= Sum( (r, s, i, j), r_tulo(i,j)*z(r,s,i,j) );

318  fixedcosts .. FC =e= Sum( s_o, (oc(s_o) + fc_o(s_o))*so(s_o)
    )
319  + Sum( s_c, (cc(s_c) + fc_c(s_c))*sc(s_c) )
    ;

321  charterout .. CO =e= Sum( s_o, cp(s_o)*( 1-so(s_o) ) );

323  fuelsea .. FS =e= Sum( (r, s, ii, jj), alpha * bs(s) * w(ii,jj)
    * power(v(r,s),2) / (power(vs(s),3)) * x(r,s,ii,jj) );

325  fuelport .. FP =e= Sum( (r, s, i), beta * bp(s) * pc(r,s,i) * (
    pt(s,i) + t(r,s,i)) );

327  portfees .. PF =e= Sum( (r, s,i), bc(s,i) * pc(r,s,i) );

329  stowagefees .. SF =e= Sum( (r, s, i), st(i) * zz(r,s,i) );

331  kohdefunktio .. profit =e= Sum( (r, s, i, j), r_tulo(i,j)*z(r,s,
    i,j) ) # revenue
332  - Sum( s_o, (oc(s_o) + fc_o(s_o))*so(
    s_o) ) # fixed costs owned ships
333  - Sum( s_c, (cc(s_c) + fc_c(s_c))*sc
    (s_c) ) #fixed costs chartered
    ships
334  + Sum( s_o, cp(s_o)*( 1-so(s_o) ) )
    # charter out revenue
335  - Sum( (r, s, ii, jj), alpha * bs(s)
    * w(ii,jj) * power(v(r,s),2) / (
    power(vs(s),3)) * x(r,s,ii,jj) )
    # fuelsea
336  - Sum( (r, s, i), beta * bp(s) * pc
    (r,s,i) * (pt(s,i) + t(r,s,i)) )
    #fuel port
337  - Sum( (r, s,i), bc(s,i) * pc(r,s,i)
    ) # port fees

```

```

338             - Sum( (r, s, i), st(i) * zz(r,s,i)
                 ); #stowage fees
339 * rajoitteet

341 konttirajoiteyksittain(r,s,i,j) .. z(r,s,i,j) =l= d(i,j) * u(r,s
    ,i,j);

343 konttirajoiteyhteensa(i,j) .. Sum( (r, s), u(r,s,i,j) * z(r,s,i,
    j) ) =l= d(i,j);

345 kapasiteettirajoite(r,s,k) .. Sum( (i,j), theta(r, s, k, i, j) *
    z(r, s, i, j) ) =l= q(s);

347 aikarajoite(s) .. Sum( (ii, jj, r), pt(s,ii) + rt(s) + t(r,s,
    ii) + w(ii, jj) * x(r, s, ii , jj) / v(r,s) ) =l= a;

349 reittirajoitel(r,s) .. Sum( i, x(r, s, 'virtuaalisatama0', i) )
    =e= 1;

351 reittirajoite2(r,s) .. Sum( i, x(r, s, i, 'virtuaalisatama00') )
    =e= 1;

353 reittirajoite3(r,s,i) .. Sum( j, x(r,s,i,j) ) - Sum( j, x(r,s,j,
    i) )=e= 0;

355 *reittirajoite4(r,s) .. Sum( (jj, i), x(r,s, jj, i) ) =g= 2 ;

357 reittirajoite5(r,s,i) .. x(r+1, s, 'virtuaalisatama0', i) =e= x(
    r, s, i, 'virtuaalisatama00' );

359 reittirajoite6(r, s, ii) .. x(r, s, ii, 'virtuaalisatama0' ) =e
    = 0;

361 reittirajoite7(r, s, ii) .. x(r, s, 'virtuaalisatama00', ii ) =e
    = 0;

363 reittirajoite8(r, s, ii) .. x(r,s, ii, ii ) =e= 0;

365 laivojenreititysehto1(r, s_o, ii, jj) .. x(r, s_o, ii, jj) =l=
    so(s_o);

367 laivojenreititysehto2(r, s_c, ii, jj) .. x(r, s_c, ii, jj) =l=
    sc(s_c);

369 so.fx(s_o) = 1;      # laivan kiinnitys kayttoon
370 sc.fx(s_c) = 1;      # kiinnitetaan laiva vuokrattavaksi
371 v.fx(r,s) = 20;      # kiinnitetaan nopeus 20 solmuun

373 **ratkaiseminen

```

```

375 *model satamat3laivat2 /all/ ;
376 model laivatnopeuskiinnitetty /all/ ;

378 *solve satamat3laivat2 using miqcp maximizing profit;

382 solve laivatnopeuskiinnitetty using miqcp maximizing profit;

384 *display pc;
385 *display u;
386 *display r_tulo;

388 display RV.l;
389 display FC.l;
390 display CO.l;
391 display FS.l;
392 display FP.l;
393 display PF.l;
394 display SF.l;
395 display profit.l;
396 display st;
397 display z.l;
398 display x.l;
399 display sc.l;
400 display so.l;
401 display v.l;

```

C.2 Python-aliohjelmia

```

1 import random
2 import numpy as np           # numpy-kirjasto sopii
3                               # matemaattiselle laskennalle

5 def generoi_x(jarjestys,n): # anna satamien jarjestys listana
6                               # esim [4,2,3]
7                               # ja satamien lukumaara n=4
8                               # niin funktio generoi arvot
9                               # matriisille x, joka kohdistuu
10                              # tietylle laivan s reitille r
11     if len(jarjestys) > n:
12         print("Annettu satama lukumaara n on liian pieni")

14     koko = n+2
15     palautettava = np.zeros((koko,koko))
16     mallijarjestys = [0]

```

```

17     mallijarjestys.extend(jarjestys)
18     mallijarjestys.append(n+1)

20     for i in xrange(len(jarjestys)+1):
21         palautettava[mallijarjestys[i], mallijarjestys[i+1]]=1

24     return palautettava

27 def fii(x): # apumuuttuja fii:n laskenta tietylle
28             # laivan s reitille r, mita esittaa matriisi x

30     satama = 0
31     lkm= int(sum(sum(x)))
32     palautettava = np.zeros((len(x)))
33     for h in xrange(lkm-1):
34         satama = np.where(np.asarray(x[satama])==1)[0][0]
35         palautettava[satama] = h+1

37     return palautettava

39 def theta(x): # apumuuttuja thetan:n laskenta tietylle
40               # laivan s reitille r, mita esittaa
41               # matriisi x

42     fiiLista = fii(x)
43     koko = len(x)
44     palautettava = np.zeros((koko,koko,koko))
45     for k in xrange(koko):
46         for i in xrange(koko):
47             for j in xrange(koko):
48                 if fiiLista[j] > fiiLista[k] >= fiiLista[i] > 0:
49                     palautettava[k,i,j]=1

51     return palautettava

56 def u(x): # apumuuttuja u:n laskenta

58     fiiLista=fii(x)
59     koko = len(fiiLista)
60     palautettava = np.zeros((koko,koko))
61     for i in xrange(koko):
62         for j in xrange(koko):
63             if fiiLista[j] > fiiLista[i] > 0:
64                 palautettava[i,j] = 1
65     return palautettava

```

```
67 n=200
68 satamajarjestys = range(1,n+1)
69 random.shuffle(satamajarjestys)

71 x = generoi_x( satamajarjestys, n )

73 koko = len(x)

75 fii_lista = fii(x)

77 u_lista = u(x)

79 theta_lista = theta(x)
```
