

Algoritmit myymälälavojen pakkaamisen optimoinnissa

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos
TkK-tutkielma
Tietotekniikka
Helmikuu 2025
Roni Kleme

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos

RONI KLEME: Algoritmit myymälälavojen pakkaamisen optimoinnissa

TkK-tutkielma, 30 s.
Tietotekniikka
Helmikuu 2025

Myymälälavojen pakkaamisen optimointi on keskeinen osa toimitusketjun tehokkuutta ja hyllytysprosessin sujuvuutta. Tehokas pakkaaminen voi ehkäistä tuotteiden vaurioitumista, parantaa työergonomiaa ja nopeuttaa myymälän operaatioita. Tässä tutkielmassa tarkastellaan myymälälavojen pakkaamisen optimointia kolmen keskeisen tutkimuskysymyksen kautta. Ensimmäiseksi selvitetään, minkä tyyppinen pakkausongelma parhaiten kuvaa myymälälavan pakkaamisen optimointia, hyödyntäen Wäscherin pakkausongelmatypologiaa. Toiseksi analysoidaan, millaisia ominaisuuksia algoritmilta vaaditaan, jotta pakkaaminen olisi sekä turvallista että tehokasta myymäläkäytössä. Kolmanneksi arvioidaan, onko olemassa kokonaisvaltaisia ratkaisuja myymälälavojen automaattiseen pakkaamiseen.

Tutkimus on luonteeltaan kirjallisuuskatsaus, jossa tarkastellaan erityisesti kolmiulotteisia pakkausongelmia, kuten Single Bin Size Bin Packing Problem (SBSBPP) ja Three-Dimensional Capacitated Vehicle Routing Problem (3L-CVRP). Tutkielmassa analysoidaan offline-pakkausongelmia, joissa tuotteiden määrä ja laatu tunnetaan etukäteen. Tulokset osoittavat, että Wäscherin typologia tarjoaa selkeän viitekehyyksen myymälälavojen pakkausongelman luokitteluun, ja että turvallisuus- ja purkamistehokkuusvaatimukset voidaan täyttää hyödyntämällä erityisesti vakauden, painon jakautumisen ja tuoteryhmittelyn huomioivia pakkausmenetelmiä. Lisäksi havaitaan, että olemassa olevat algoritmit eivät täysin ratkaise myymälälavojen automaattisen pakkaamisen ongelmaa, mutta ne tarjoavat lähtökohdan jatkotutkimukselle, jossa yhdistetään heuristisia ja optimoituja ratkaisuja.

Asiasanat: myymälälavat, algoritmit, pakkausongelmat, logistiikka, optimointi, hyllyttäminen

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Tutkimuksen rajaus	2
1.2	Tutkimuskysymykset	3
1.3	Tutkimusmenetelmät ja lähteet	3
2	Myymälälavapakkausalgoritmin rajoitteet, hyödyt ja rooli	6
2.1	Optimoidusti pakattavan myymälälavan rajoitteet	7
2.2	Pakkaamisen algoritmisen optimoinnin hyödyt	10
2.3	Pakkausalgoritmin roolin analyysi toimitusprosessissa	11
3	Myymälälavapakkausongelman tyyppi	13
3.1	Kolmiulotteiset pakkausongelmat	14
3.2	Rajoitteiden luokittelu ja analyysi	17
4	Olemassa olevat ratkaisut	21
5	Yhteenveto	29
	Lähdeluettelo	31

Kuvat

1.1	Aineistonhakuprosessi	3
2.1	Kuivat tuotteita sisältävä myymälälava.	6
2.2	Havainnollistus käytäväryhmittäin pakatusta lavasta	7
2.3	Hyvin ryhmitellyn lavan (vihreä) etu hyllytyksessä verrattuna huonosti ryhmiteltyyn lavaan (purppura) kuvitteellisessa myymäläkartassa	8
2.4	Pakkausalgoritmin rooli toimitusprosessissa	12
3.1	Tutkielman ongelman luokittelu ja siihen liittyvät keskeiset vaiheet .	16

Taulukot

1.1	Hakulauseet ja artikkelien valinta eri tietokannoista	4
2.1	Optimoidusti pakatun myymälälavan rajoitteet	10
3.1	Pakkausongelmien osaongelmat	14
3.2	Ongelmatyypit ja niiden ominaisuudet	17
3.3	Käytännön rajoitteiden luokittelu [11]	20
4.1	Kootut ratkaisut off-line SBSBPP-ongelmalle vuosilta 1974-2024 . . .	23
4.2	Algoritmit ja heuristiikat minimivaatimuksia vastaavissa julkaisuissa .	25

1 Johdanto

Tehokkaat myymäläoperaatiot ovat elintärkeitä kaikille vähittäismyyjille, sillä suuri osa vähittäiskauppiiaan muuttuvista kustannuksista on henkilöstökuluja. Jopa pienten operaatioiden tai konseptimuutosten toteuttamiseen kuluva aika kasvaa helposti sadoiksi työpäiviksi, kun tehtävät ovat jakautuneet satoihin tai tuhansiin myymälöihin. Myymäläoperaatiot vaativat huomattavan määrän työvoimaa. Myymälätason tehtävien hallinta ja työvoiman optimointi jäävät usein edelleen paikallisen myymäläjohdon vastuulle ilman tehokkaita optimointityökaluja ja järjestelmällistä suunnittelua. [1]

Nykyään kuormanpakkaamisoperaatiot heterogeenisissä tapauksissa ovat pääosin ihmisen tekemää työtä. Joskus työ tehdään koneen avustamana raskaiden pakkausten osalta. Manuaaliseen työhön liittyy taloudellisia, tehokkuuteen ja jopa turvallisuuteen liittyviä näkökohtia, jotka tulee ottaa huomioon arvioidessa työn kokonaisuutta. Ensinnäkin tämä prosessi pitää oppia, eli se vaatii usein koulutusta, mikä johtaa koulutuskuluihin. Koulutusta ei voi jättää huomioimatta, sillä usein tällaisissa operaatioissa käytetään tilapäistyöntekijöitä, joilla ei välttämättä ole työpaikkakohtaista koulutusta. [2]

3D-pakkausongelmia voidaan hyödyntää auttamaan työntekijöitä luomaan optimaalisempia pakkausratkaisuja. Nämä algoritmit tarjoavat takuita monitavoitteisten ja monirajoitteisten pakkausongelmien ratkaisemisessa, mikä voi parantaa työn sujuvuutta ja tehokkuutta. Tällaisia algoritmeja voidaan käyttää myös lavojen täy-

sin automaattiseen pakkaamiseen. Ihmisläheinen näkökulma tulee tässä esille, sillä käsin tehty kuorman pakkaaminen on työ, jota moni työntekijä ei ole motivoitunut tekemään, koska sitä pidetään fyysisesti intensiivisenä, toistuvana ja epätyytyttävänä tehtävänä. [2]

Tutkimusaiheen valintaan vaikutti oma työkokemukseni päivittäistavarakaupassa, missä sain käytännön kokemusta myymälälavojen käytöstä ja niiden tehokkaan ja purkamisen tehokkuuden merkityksestä. Tämä kokemus herätti kiinnostuksen tutkia, miten algoritmeilla voidaan tehostaa myymälälavojen pakkaamista ja tehostaa myymäläoperaatioita.

1.1 Tutkimuksen rajaus

Tutkimuksen rajauksessa keskitytään myymälälavojen pakkaamisen optimointiin ja siihen, miten algoritmiset ratkaisut voivat parantaa myymälälavojen pakkaamisen ja purkamisen tehokkuutta ja turvallisuutta. Tutkimuksessa käsitellään erityisesti kolmiulotteisia pakkausongelmia (3D-BPP) ja niiden soveltamista myymälälavojen pakkaamiseen. Tutkimus keskittyy kirjallisuuskatsaukseen ja analysoi olemassa olevia algoritmeja, mutta ei pyri kehittämään täysin uusia algoritmeja.

Rajauksen myötä tutkielmassa tarkastellaan vain offline-pakkausongelmia, joissa tuotteiden määrä ja laatu tunnetaan etukäteen. Lisäksi tutkimus on rajattu koskemaan vain Distributors' Pallet Loading Problem (DPLP)- ja Single Bin Size Bin Packing Problem (SBSBPP) -tyyppisiä ongelmia, eli tarkastellaan heterogeenisten tuotteiden sijoittamista yhdenmukaisille lavoille.

Tutkimuksen painopiste on olemassa olevien algoritmien soveltuvuuden tarkastelussa myymäläympäristön tarpeisiin. Tämä rajaus mahdollistaa syvemmän analyysin erityisesti myymälöiden käytännön vaatimusten näkökulmasta ja tarjoaa konkreettisia kehitysehdotuksia olemassa olevien ratkaisujen hyödyntämiseen.

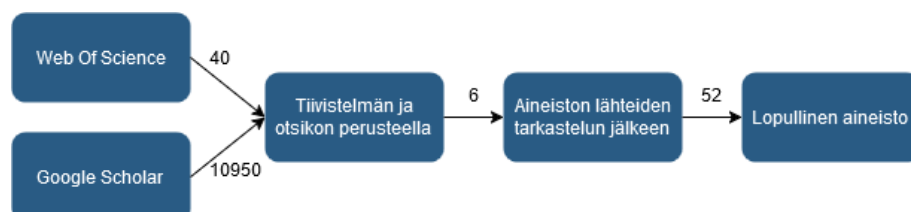
1.2 Tutkimuskysymykset

Tutkimuskysymykset on laadittu tukemaan tutkielman tavoitteita ja rajoituksia. Näiden kysymysten avulla pyritään vastaamaan keskeisiin haasteisiin, jotka liittyvät myymälälavojen pakkaamisen optimointiin ja pakkausongelmien ratkaisemiseen myymäläympäristöissä.

- **TK1:** Minkä tyyppistä pakkausongelmaa voidaan käyttää kuvaamaan myymälälavan pakkaamisen optimointia?
- **TK2:** Mitä ominaisuuksia pakkausalgoritmin tulee sisältää, jotta lavan pakkaaminen olisi turvallista ja sen purkaminen tehokasta?
- **TK3:** Onko myymälälavojen automaattiseen pakkaamiseen olemassa kokonaisvaltaisia ratkaisuja?

1.3 Tutkimusmenetelmät ja lähteet

Tutkielma toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Aineistohakuprosessi koostui useista vaiheista, joista ensimmäisessä etsittiin relevanttia kirjallisuutta hakutietokannoista. Tietokannoiksi valikoituivat Google Scholar ja Web of Science, sillä ne tuottivat osuvimmat tulokset hakulauseille ja kattavat laajasti tieteellisiä julkaisuja. Aineistohakuprosessi kokonaisuudessaan on esitetty kuvassa 1.1, jossa havainnollistetaan hakuvaiheet tietokantojen valinnasta artikkelien seulontaan.



Kuva 1.1: Aineistohakuprosessi

Hakuprosessin yksityiskohtaiset tulokset ja käytetyt hakulauseet on koottu taulukkoon 1.1. Google Scholarissa käytettiin hakulauseita “kuorman purku kaupassa”, “3D bin pallet loading problem” ja “3D bin packing problem palletizing”. Hakulauseella “kuorman purku kaupassa” löytyi 550 artikkelia, joista tarkemman seulonnan jälkeen valittiin yksi. Hakulauseella “3D bin pallet loading problem” löytyi 8100 artikkelia, joista tutkimukseen valittiin kaksi, ja hakulauseella “3D bin packing problem palletizing” löytyi 2300 artikkelia, joista valittiin myös kaksi. Näin ollen Google Scholarista valittiin yhteensä viisi artikkelia. Web of Sciencessä käytettiin hakulauseita “pallet OR bin”, jolla löytyi 40 artikkelia, joista yksi valittiin mukaan.

Taulukko 1.1: Hakulauseet ja artikkelien valinta eri tietokannoista

Tietokanta	Hakulause	Löydetyt artikkelit	Valitut artikkelit
Google Scholar	“3D bin pallet loading problem”	8100	2
Google Scholar	“3D bin packing problem palletizing”	2300	2
Google Scholar	“kuorman purku kaupassa”	550	1
Web Of Science	“pallet OR bin”	40	1
Yhteensä		10990	6

Hakuprosessissa löydettiin yhteensä 10 990 artikkelia, joista tarkemman seulonnan jälkeen valittiin 6 artikkelia suoraan kirjallisuuskatsaukseen. Suurin osa käytetyistä lähteistä löytyi näiden artikkelien lähdeviitteistä, jotka valittiin otsikon tai asiayhteyden perusteella. Näin mukaan valittiin 46 artikkelia. Lisäksi tutkielmassa hyödynnettiin omakohtaisia havaintoja ja kokemuksia työskentelystä päivittäistavarakaupassa, joissa myymälälavojen haasteet ja mahdollisuudet konkretisoituvat.

Tässä kandidaatintutkielmassa tutkitaan, miten algoritmisia ratkaisuja voidaan hyödyntää myymälälavojen tehokkaassa, turvallisessa ja nopeassa pakkaamisessa. Erityisesti tarkastellaan, kuinka automatisoitu pakkaamisprosessi voisi nopeuttaa hyllyttämistä ja sen myötä myös muita myymäläprosesseja. Toisessa luvussa käsitellään myymälälavan pakkaamisen optimoinnin rajoitteita ja hyötyjä, mukaan lu-

kien vakaus, ryhmittely ja painojärjestys, jotka vaikuttavat myymälälavan käytettävyyteen ja turvallisuuteen. Lisäksi tarkastellaan pakkausalgoritmin roolia toimitusprosessissa, jossa se yhdistää tarvelaskennan, keräilyjärjestelmän ja pakkausrobotin saumattomaksi kokonaisuudeksi, mahdollistaen toimitusprosessin tehokkuuden ja työn sujuvuuden. Kolmannessa luvussa perehdytään tutkielmassa käsiteltävän pakkausongelman typologiaan, algoritmisiin haasteisiin sekä siihen, kuinka pakkausongelmatyypit, kuten SBSBPP (Single Bin Size Bin Packing Problem), soveltuvat myymälälavojen pakkaamisen optimointiin. Neljännessä luvussa tarkastellaan olemassa olevia SBSBPP-ongelman ratkaisuja ja analysoidaan niiden soveltuvuutta myymälälavojen pakkaamisen. Viimeisessä luvussa esitetään yhteenveto ja johtopäätökset tutkimuksen löydöksistä.

2 Myymälälavapakkausalgoritmin rajoitteet, hyödyt ja rooli

Tässä kandidaatintutkielmassa myymälälavalla tarkoitetaan eurolavaa, johon on pakattu heterogeenisiä pakkauksia. Pakkaukset siis vaihtelevat painoltaan ja kooltaan. Myymälälavan ympäri on kierretty pakkausmuovia, jotta pakkaukset pysyvät paikoillaan (Kuva 2.1). Ilman ympäröivää muovia pakkaukset voisivat liukua kuljetuksen aikana. Myymälälavoja kuljetetaan rekoilla myymälöihin, ja myymälän sisäinen tavaransiirto suoritetaan sähköpumpukärryillä, minkä vuoksi lavojen vakaus on ehdoton kriteeri. Myymälälavojen sisältö ryhmitellään yleensä sen mukaan, mille käytävälle tuotteet sijoitetaan. (Kuva 2.2) [1].

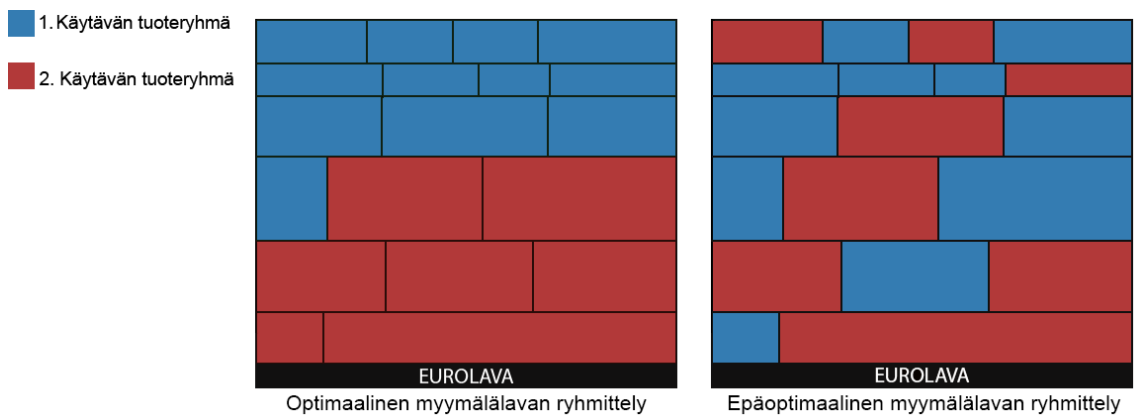


Kuva 2.1: Kuivat tuotteita sisältävä myymälälava.

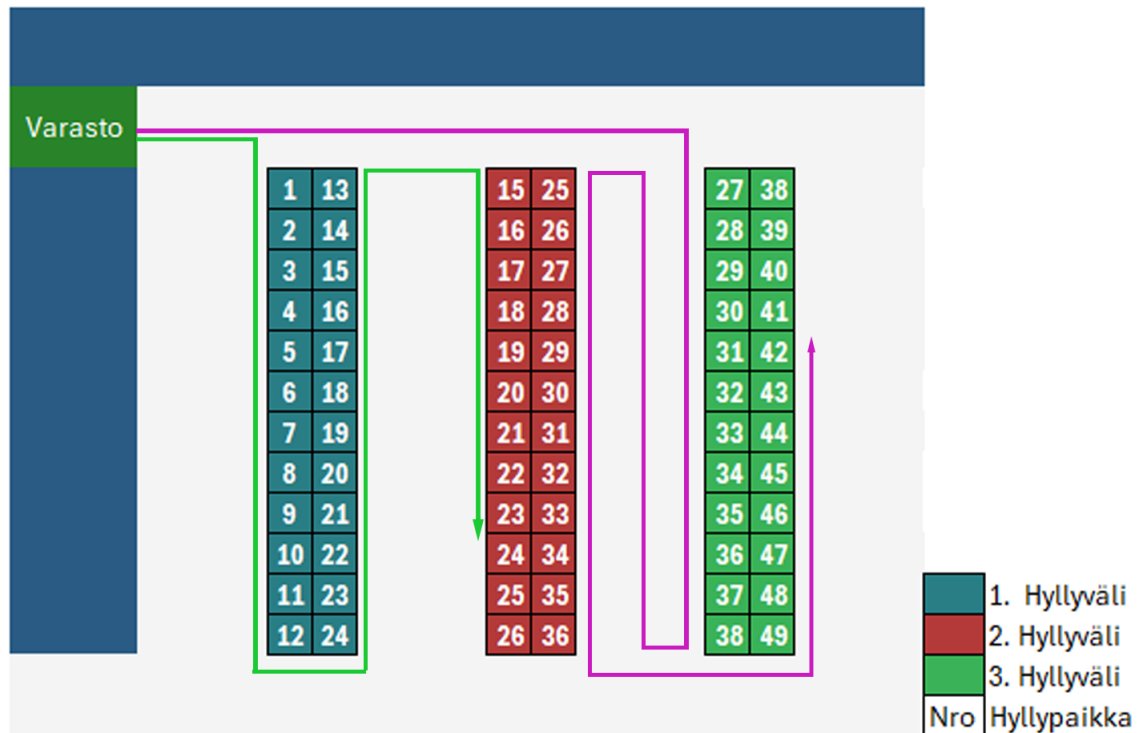
Hyllytyksellä tarkoitetaan prosessia, jossa kuormassa olevat tuotteet asetetaan myymälähyllyyn käsityönä. Myymälöissä on tyypillistä purkaa kuormalavan sisältö suoraan lavalta hyllyyn. Myymälälavat kuljetetaan oikeaan hyllyväliin sähköpump-pukärryllä hyllykartan määräämään paikkaan [1]. Tämän jälkeen pakkausmuovia poistetaan sen verran, että päästään käsittelemään tuotepakkauksia. Pakkaus ote-taan, avataan ja laitetaan myyntipaikalleen.

2.1 Optimoidusti pakattavan myymälälavan rajoit-teet

Tuotteiden sijainnilla lavalla on vaikutus purkamisnopeuteen ja työn rasittavuuteen. Epäoptimaaliseen järjestykseen pakatun lavan vuoksi työntekijä joutuu kulkemaan edestakaisin hyllyjen välissä tai jopa siirtymään hyllyväliltä toiselle viedäkseen tuot-teet paikoilleen. Tuotteet tulisi siis ryhmitellä myymälälavalle käytävittäin, niin että ne ovat hyvässä järjestyksessä (Kuva 2.2). Käytävien tuotteet voitaisiin pyrkiä aset-tamaan lavalle siten, että lähekkäin olevat tuotteet lavalla olisivat lähekkäin myös myymäläkartassa. Tämä mahdollistaisi purkamisen kävelemällä myymälän käytävää eteenpäin ilman edestakaista liikkumista (Kuva 2.3).



Kuva 2.2: Havainnollistus käytäväryhmittäin pakatusta lavasta



Kuva 2.3: Hyvin ryhmitellyn lavan (vihreä) etu hyllytyksessä verrattuna huonosti ryhmiteltyyn lavaan (purppura) kuvitteellisessa myymäläkartassa

Myymäälälavan vakaus on tärkeä osa tehokasta ja turvallista kuorman purkua. Lavalla on useita rajoitteita, jotka liittyvät sen vakauteen. Yleisesti käytetty termi tälle on vakausrajoite (engl. stability constraint). Usein vakausrajoitteen laskentaan käytetään massan keskipisteen laskentaa. Se jakautuu staattiseen ja dynaamiseen vakauteen. Staattinen vakaus (engl. static stability) suojaa lavaa kaatumiselta, kun se on paikoillaan. Dynaaminen vakaus (engl. dynamic stability) suojaa lavaa kaatumiselta, kun lavaan kohdistuu voimia siirron aikana. [3]

Massan keskipisteen laskenta ei yksinään riitä takaamaan myymälälavan vakautta. Tarkastelussa tulee ottaa huomioon myös pinoamisrajoite (engl. stacking constraints). Pinoamisrajoitteessa on määritetty, kuinka paljon tietty laatikko kestää painoa ennen kuin se menee rikki. Laatikon sietokyky riippuu sen materiaalista, rakenteesta ja erityisesti sen reunojen kantavuudesta. Myös se, miten päin laatikko on

asetettu vaikuttaa kestävyyteen. Kirjallisuudessa yleinen lähestymistapa on päättää esineelle enimmäispaino, jonka se kestää tietyistä suunnasta. Usein kuitenkin näitä rajoitteita ei ole määritelty ja käytetäänkin yleistä sääntöä, että painavampia tuotteita ei aseteta kevyempien tuotteiden päälle. [4]

Lastauksen ja purkamisen aikana on tärkeää estää tuotteiden putoaminen, joka voisi aiheuttaa vaaratilanteita tai henkilövahinkoja. Tukirajoituksilla varmistetaan, että kuormattavat esineet ovat riittävästi tuettuja ja tasapainossa. Tukivaatimukset voivat perustua esimerkiksi esineen kosketukseen tietyissä kohdissa siten, että tietty prosentti esineen pohjasta on muiden esineiden päällä. Lisäksi rajoituksena voi olla, että esineet eivät saa ulottua lavan määriteltyjen rajojen ulkopuolelle, kuten pinta-alan tai maksimikorkeuden ylitse. [2]

Kun kuorma on vaarassa kaatua, aikaa kuluu turhaan, koska myymälälava täytyy purkaa toiselle eurolavalle, jotta se saadaan vakautetuksi. Kuorman kaatuessa se täytyy pakata kokonaan uudelleen. Yksi syy epävakaalle myymälälavalle on, että jokin pakkaus on hajonnut, koska se ei kestänyt päällä olevaa kuormaa.

Tehokkaasti ja turvallisesti purettava lava on ryhmitelty käytävittäin siten, että lavaa voi kuljettaa ja purkaa kulkemalla suoraan eteenpäin. Lavan on myös oltava vakaa, jotta se ei kaadu. Vakaa lava on tasapainossa ja tuotteet ovat pinoamisrajoitteen edellyttämässä järjestyksessä. Rajoitteet, jotka vaikuttavat lavan käytettävyyteen, vakauteen ja turvallisuuteen, on esitetty taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1: Optimoidusti pakatun myymälälavan rajoitteet

Rajoite	Kuvaus	Syy
Vakaus	Vakaus estää kuorman kaatumisen paikoillaan (staattinen) ja liikkeessa (dynaaminen).	Painopiste ja pinoamisrajoitteet.
Ryhmittely	Tuotteet ryhmitellään siten, että lähekkäin olevat tuotteet lavalla ovat lähekkäin myös myymäläkartassa. Esim. käytävittäin.	Huono järjestys lisää liikkumistarvetta purkaessa.
Painojärjestys	Painavat tuotteet eivät saa olla kevyempien päällä.	Huono pinoamisjärjestys voi heikentää lavan vakautta ja rikkoa tuotteita.
Painoraja	Määritelty maksimipaino kuormille.	Ylitys voi estää kuorman kuljetuksen
Maksimikorkeus	Maksimikorkeus, jotta mahtuu rekkaan ja ovista.	Ylitys estää kuljetuksen ja voi vahingoittaa tiloja.
Turvallisuus	Tuotteet pysyvät paikoillaan lastauksen aikana.	Tukivaatimusten noudattaminen.

2.2 Pakkaamisen algoritmisen optimoinnin hyödyt

Lavojen algoritmisen pakkaaminen mahdollistaa täyden automaation, jolloin tuotteet sijoitetaan optimaalisesti lavalle. Tämä ei ainoastaan paranna myymäläoperaatioiden tehokkuutta hyllytyksessä, vaan myös vähentää työntekijöiden fyysistä kuormitusta ja parantaa turvallisuutta kuorman purkamisen aikana. Optimoidut

pakkausratkaisut voivat pienentää logistisia kustannuksia, sillä tehokkaampi tilankäyttö vähentää kuljetus- ja varastointikustannuksia, mikä tekee koko prosessista taloudellisesti kannattavamman [2].

Mitä tehokkaammin kuorma saadaan purettua myymälähyllyyn, sitä nopeammin työntekijät pääsevät suorittamaan muita keskeisiä tehtäviä, kuten kassatyökentelyä [1]. Jos kuorman purkaminen on hidasta tai tuotteet ovat kuorman pohjalla, asiakkaat eivät välttämättä saa haluamaansa. Tehokas purkaminen parantaa asiakastyytyväisyyttä vaikuttamalla jonotusaikoihin ja saatavuuteen.

Myyvälälavan algoritminen pakkaaminen mahdollistaa robotiikan käytön. Myyvälälavojen kokoaminen käsin on fyysisesti raskasta, yksitoikkoista ja siksi usein työntekijöille epätyytyttävä työtehtävä. [2]. Robotiikka voi vähentää työntekijöiden fyysistä rasitusta ja tapaturmariskiä, ja se tarjoaa kustannustehokkaan tavan korvata manuaalista työtä.

Optimoidut pakkausratkaisut ovat erityisen hyödyllisiä jakelukeskuksissa, joissa pakkaustyötä tehdään suuria määriä ja tehokkuuden parantaminen on tärkeää, sillä ne tehostavat myymäläoperaatioita tekemällä purkamisesta nopeaa ja järjestelmällistä.

2.3 Pakkausalgoritmin roolin analyysi toimitusprosessissa

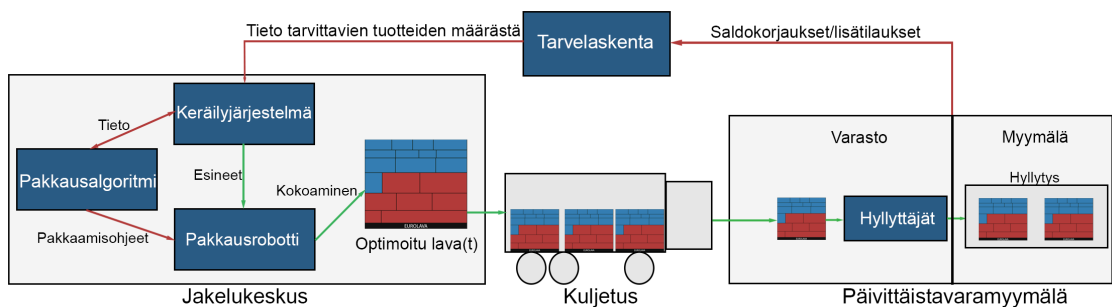
Pakkausalgoritmi toimisi keskeisenä osana myymälälavojen pakkausprosessia yhdistäen tarvelaskennan, keräilyjärjestelmän ja pakkausrobotin saumattomaksi kokonaisuudeksi. Algoritmin tehtävä ei rajoittuisi pelkästään yksittäisten tuotteiden optimaaliseen sijoitteluun lavalle, vaan se toimisi myös tiedonvälittäjänä ja koordinoijana prosessin eri vaiheiden välillä, kuten kuvassa 2.4 esitetään.

Toimitusprosessi alkaa tarvelaskennasta, joka määrittää päivittäistavaramyymä-

län tarvitsemat tuotteet ja niiden määrät. Tämä tieto välitetään keräilyjärjestelmälle, joka vastaa tuotteiden syötöstä pakkausrobotille. Pakkausalgoritmi saa keräilyjärjestelmältä tiedot tuotteista ja laskee niiden perusteella optimaalisen myymälälavan rakenteen. Laskennassa otetaan huomioon muun muassa lavan vakaus, tuotteiden ryhmittely myymäläkartan mukaisesti ja pinoamisrajoitteet.

Laskennan valmistuttua algoritmi lähettää keräilyjärjestelmälle ohjeet tuotteiden lähettämisyjärjestyksestä liukuhihnaa pitkin. Näin pakkausrobotti, joka sijoittaa tuotteet eurolavalle algoritmin laskelmien mukaisesti, pystyy kokoamaan lavat tehokkaasti ja tarkasti. Lopputuloksena syntyy optimoitu myymälälava, joka täyttää sekä vakaus- että käytettävyyksivaatimukset.

Kun lavat on koottu, ne kuljetetaan myymälään, jossa optimoidusti pakatut lavat helpottavat hyllytyksen suorittamista. Tuotteiden ryhmittely myymäläkartan mukaisesti mahdollistaa hyllytyksen nopean etenemisen minimoiden tarpeettoman liikkumisen. Näin pakkausalgoritmin toiminta heijastuu suoraan toimitusprosessin tehokkuuteen ja työn sujuvuuteen. Keräilyn ja pakkaamisen robotisointi vähentää manuaalista työtä ja fyysistä kuormitusta, samalla kun optimaalinen pakkausjärjestys minimoi työntekijöiden tarpeettoman liikkumisen. Tämä tekee työstä ergonomisempaa, tehokkaampaa ja turvallisempaa



Kuva 2.4: Pakkausalgoritmin rooli toimitusprosessissa

3 Myymälälavapakkausongelman tyyppi

Tässä luvussa käytetään Wäscherin ja muiden luomaa pakkausongelmatypologiaa ongelman luokitteluun. Wäscherin typologia on kehitetty Dyckhoffin [5] alkuperäisestä typologiasta, mutta se tarjoaa paremman ja kattavamman lähestymistavan, joka ottaa huomioon kehityksen alalla. Typologian avulla voidaan luoda selkeä ja johdonmukainen järjestelmä ongelmatyypeille, mikä mahdollistaa kaikkien tunnettujen pakkausongelmien sekä niihin liittyvän kirjallisuuden kokonaisvaltaisen luokittelun. Tämä ei ainoastaan helpota tutkimusten vertailua, vaan myös auttaa tunnistamaan alueet, joissaa ei ole tai joissa on vain hyvin vähän tutkimusta. [6]

Pakkausongelmat ovat ongelmatyyppejä, joissa tavoitteena on sijoittaa 'pienempiä esineitä' (engl. small items), kuten tuotteita, 'suurempiin objekteihin' (engl. large objects), kuten eurolavoihin, mahdollisimman tehokkaasti. Objektijoukot on määritetty tietyn ulottuvuuden mitoissa (1, 2, 3, n...) [6]. Bin- ja pallet-ongelmat voidaan käsitellä samankaltaisesti, sillä molemmissa käsitellään samantyyppisiä tilankäyttöhaasteita [4]. Wäscherin typologiaa soveltaen pakkausongelmissa ratkaisuprosessi voidaan jakaa viiteen osaongelmaan, jotka on esitetty taulukossa 3.1. Nämä osaongelmat auttavat jäsentämään ongelmanratkaisua tarkemmin. Kaikissa pakkausongelmissa ei kuitenkaan ole kaikkia viittä osaongelmaa, jolloin niitä sanotaan "degeneroituneiksi" pakkausongelmiksi [6]. Tämän tutkielman pakkausongelmaan ei sisälly

osaongelmia O1 ja O2, koska tuotteiden kuljetukseen on vakioitunut eurolava. Pienille esineille ei ole valintaongelmaa, sillä kaikki tilatut tuotteet sisältyvät kuljetukseen. Kyseessä on kuitenkin pakkausongelma, ja sen offline-luonne vaikuttaa ratkaisutapaan: käytännön pakkausongelmat vaihtelevat sen mukaan, kuinka paljon ennakkotietoa pakattavista esineistä on saatavilla. Joissakin tilanteissa (online-ongelma) tuotteet pakataan myymälälavoihin hetken tarpeen mukaan, jolloin ei tiedetä tarkasti, mitä pakataan. Toisissa ympäristöissä (offline-ongelma) tilaajat määrittelevät tilauksensa etukäteen, jolloin lähetyksen sisältö tunnetaan tarkasti [2]. Myymälälavaa pakkaavalla jakelukeskuksella on ennakkotieto tarvittavista tuotteista, joten kyseessä on offline-ongelma.

Taulukko 3.1: Pakkausongelmien osaongelmat

Viittaus	Osaongelma	Kuvaus	Sisältyy
O1	Valintaongelma suurille objekteille	Mitkä suuret objektit valitaan käytettäväksi?	
O2	Valintaongelma pienille esineille	Mitkä pienet esineet valitaan mukaan?	
O3	Ryhmittelyongelma pienille esineille	Miten pienet esineet ryhmitellään?	x
O4	Allokaatio-ongelma	Miten nämä ryhmät jaetaan suurille objekteille?	x
O5	Asetteluongelma	Miten pienet esineet järjestetään valituille suurille objekteille niin, että geometriset ehdot täyttyvät?	x

Koska kyseessä on pakkausongelma, jossa ryhmittely, allokaatio ja asettelu ovat keskeisiä vaiheita, tarkasteltavaa ongelmaa voidaan luokitella tarkemmin Wäscherin typologian ominaisuuksien avulla.

3.1 Kolmiulotteiset pakkausongelmat

Kolmiulotteista pakkausongelmaa, jossa pienet esineet ovat vahvasti heterogeenisiä (MPLP) on kolmea eri varianttia: Reppuongelma (engl. The Knapsack Loading Problem, TKLP), Open Dimensional Packing Problem (ODPP) ja 3-Dimensional Bin Packing Problem (3DBPP) [7] [6]. Reppuongelman tavoitteena on maksimoida pakattujen esineiden arvo, mikä ei vastaa tutkielmassa käsiteltävän ongelman tavoitetta. ODPP-ongelmassa myymälälavan yksi ulottuvuus voi vaihdella, mutta tässä

työssä pakattavien myymälälavojen maksimikorkeuden yläraja on aina vakio, mikä sulkee pois tämän tyypin. Sen sijaan 3DBPP, jossa pyritään sijoittamaan heterogeeninen esinejoukko kiinteän kokoisiin eurolavoihin mahdollisimman vähällä määrällä lavoja, soveltuu ongelman luokitteluun. [8]

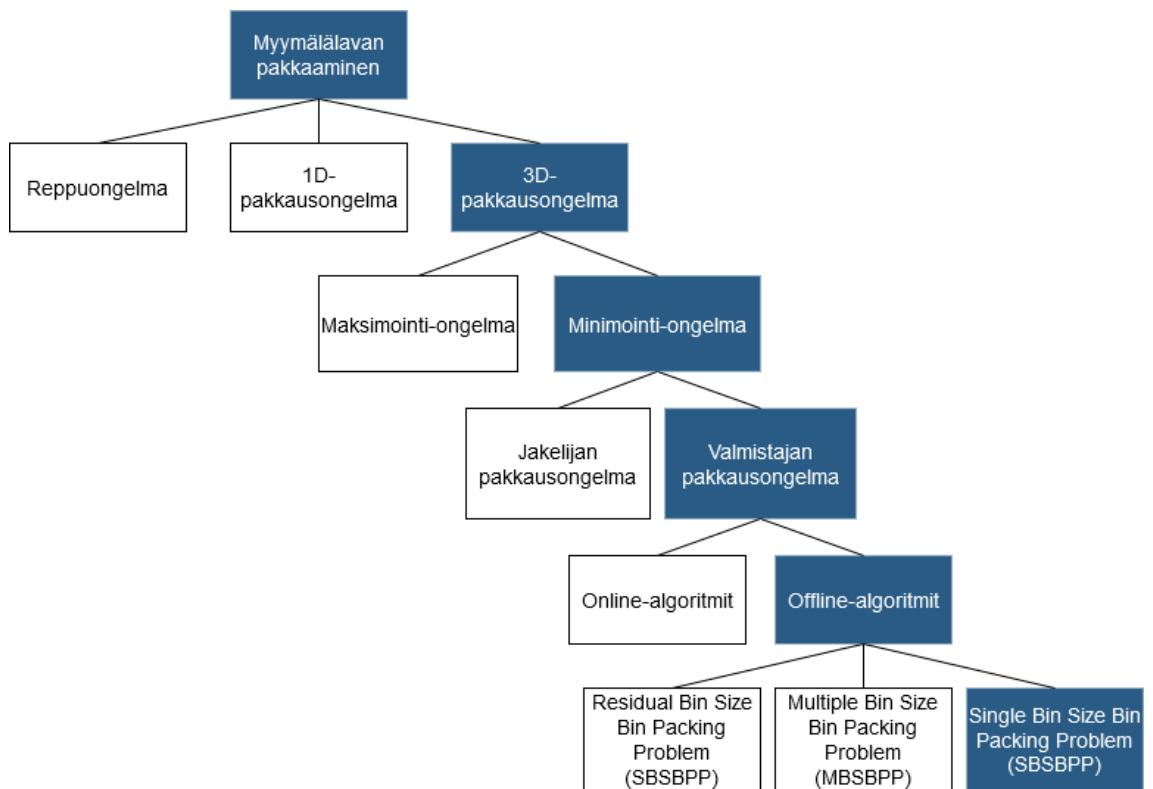
Objektien mitat on tässä tutkielmassa tarpeen määrittellä kolmessa ulottuvuudessa: pituudessa, leveydessä ja korkeudessa. Tästä johtuen tutkielmassa käsiteltävä ongelma on kolmiulotteinen pakkausongelma, jossa tavoitteena on pakata tuotteet eurolavalle siten, että ne mahtuvat lavalle eivätkä mene toistensa sisään. Tavoitteena on lähetettävien lavojen määrän minimointi (Input Minimization) ja tilankäytön tehokkuuden maksimointi. Tämä ongelma soveltuu 3DBPP-tyyppiseksi pakkausongelmaksi, jossa kolmiulotteinen tila optimoidaan tehokkaasti.

Kuormalavan kuormausongelmat (engl. Pallet Loading Problem, PLP) voidaan jakaa kahteen luokkaan, joista toinen on valmistajan kuormalavan kuormausongelma (engl. Manufacturer's Pallet Loading Problem, MPLP) ja toinen jakelijan kuormalavan kuormausongelma (engl. The Distributor's Pallet Loading Problem, DPLP). Ne eroavat toisistaan siten, että MPLP:ssä on kyse ongelmasta, jossa homogeenisiä laatikoita asetetaan tehokkaasti lavalle, kun taas DPLP-ongelmassa pinotaan heterogeenisiä esineitä lavalle. [9]. Luvussa 2 todettiin, että myymälälavojen tuotteet ovat vahvasti heterogeenisiä kooltaan ja painoltaan, mikä tekee tutkielman ongelmasta erityisen haastavan. Nämä ominaisuudet vastaavat DPLP-ongelman vaatimuksia. Lavat puolestaan ovat identtisiä, mikä yksinkertaistaa ratkaisua ja luokittelee ongelman Single Bin Size Bin Packing Problem -tyyppiseksi 2.1.

Kuten luvussa 2 todettiin, pakattavien esineiden muodot ovat säännöllisiä, kuten suorakulmaisia laatikoita. Tämä yksinkertaistaa algoritmista käsittelyä ja mahdollistaa tarkkojen geometrinen ehtojen soveltamisen ilman monimutkaisia muotokoh-
taisia mukautuksia. Lisäksi luvussa 2 esiteltyt staattiset ja dynaamiset rajoitteet, kuten massan keskipisteen laskeminen ja liikkeen vakauden huomioiminen, ovat kes-

keisiä lavojen käytännön optimoinnissa.

Näiden ominaisuuksien perusteella tutkielman ongelma kuuluu 3DBPP-luokkaan, ja sen erityispiirteet viittaavat tarkemmin SBSBPP-ongelmaan. Taulukossa 3.2 on määritelty ongelmatyypin tarkemmat ominaisuudet, kuten ulottuvuudet ja esineiden valikoiman luonne, jotka tarjoavat perustelut ongelman luokittelulle. Kuvassa 3.1 on tiivistetty ongelman luokittelu ja siihen liittyvät keskeiset vaiheet yleisemmällä tasolla, mikä havainnollistaa tutkielman ongelman ratkaisuprosessin kokonaiskuva.



Kuva 3.1: Tutkielman ongelman luokittelu ja siihen liittyvät keskeiset vaiheet

Taulukko 3.2: Ongelmatyypit ja niiden ominaisuudet

Ominaisuus	Arvo	Kuvaus
Ulottuvuus	3D	Ongelmassa kolme ulottuvuutta.
Tehtävän luonne	Minimointitehtävä	Mahdollisimman paljon tuotteita mahdollisimman pienelle määrälle lavoja.
Tuotteiden yhdenmukaisuus	Vahvasti heterogeeninen	Tuotteet eivät ole identtisiä; vain hyvin harvat ovat saman muotoisia ja kokoisia.
Asetettävien tuotteiden muoto	Säännölliset tuotteet	Tuotteet ovat säännöllisiä muodoltaan, eli suorakulmion muotoisia.
Lavojen määrä	Lavoja voi olla useita	Tuotteet voidaan pakata tarvittaessa useammalle lavalle.

3.2 Rajoitteiden luokittelu ja analyysi

Wäscher ja muut luokittelivat käytännön rajoitteet, jotka liittyvät kontteihin, esineisiin, lastiin, sijoitteluun ja kuormaan. [6] Ramos, Silva ja Oliveira totesivat kuitenkin, että ehdotettu luokittelu ei pystynyt selkeästi osoittamaan rajoitusten välistä suhdetta, ja esittivät uuden luokittelurakenteen, jonka avulla luotiin perusta, joka suhteuttaa käytännön rajoitukset asianmukaisesti toisiinsa. [10] Ehdotetussa luokittelussa rajoitteet jaetaan turvallisuuteen ja logistiikkaan, kuten taulukossa 3.3 esitetään. [11]

Kun tarkastellaan luvussa 2 mainittuja optimoidun lavan rajoitteita, voidaan huomata, että monet niistä vastaavat Wäscherin luokittelussa [6] esitettyjä rajoitteita. Esimerkiksi vakaus on yksi optimin lavan tärkeimmistä ominaisuuksista, ja tämä voidaan liittää Wäscherin vakaus-rajoitteeseen. Vakaus varmistaa, että esineet pysyvät paikoillaan kuljetuksen aikana ja estää niiden liikkumisen. Vaikka tämä ei ole suoraan mainittu Wäscherin rajoitteissa, vakaus on olennainen osa turvallisuusrajoitteiden kokonaisuutta, koska se estää kuorman kaatumisen ja varmistaa kuorman

siirtämisen rikkoutumattomana.

Luvun 2 taulukossa 2.1 mainitut ominaisuudet, kuten vakaus, painojärjestys ja painoraja, kuuluvat Wäscherin rajoitteisiin, jotka on luokiteltu turvallisuusrajoitteiksi. Vakaus voidaan suoraan yhdistää Wäscherin vakaus-rajoitteeseen, joka varmistaa, että kuorma pysyy paikoillaan sekä paikoillaan ollessa (staattinen vakaus) että kuljetuksen aikana (dynaaminen vakaus). Painoraja on suoraan yhteydessä Wäscherin painorajaa koskevaan rajoitteeseen, joka määrittää, kuinka paljon lavan kokonaispaino voi olla ilman, että se ylittää sen kantokykyä.

Maksimikorkeus ei ole erikseen määritelty Wäscherin typologiassa, mutta tämä ei aiheuta ongelmaa tässä tapauksessa. Tutkielmassa käsiteltävän ongelman tyyppi on SBSBPP (Single Bin-Size Bin Packing Problem), jossa korkeusrajoite on vakio ongelman määritelmän mukaan. Tästä syystä maksimikorkeuden rajoite ei ole tarpeellinen.

Muita turvallisuusrajoitteita Wäscherin typologiassa ovat painon jakautuminen, orientaatio ja sijainti. Painon jakautuminen liittyy epäsuorasti jo mainittuun vakauuteen, sillä oikea painon jakautuminen saavutetaan, kun lavalla olevien tuotteiden painopiste on lähellä lavan geometrinen keskipistettä. Tämä parantaa lavan vakautta ja estää kuorman kaatumisen. Orientaatio mahdollistaa esineiden kääntämisen eri asentoihin, jolloin voidaan saavuttaa tiiviimpi pakkaus. Tällä voi olla myös rajoituksia, sillä joitain tuotteita ei voi laittaa väärään asentoon. Esimerkiksi joissakin mehukollien pakkauksissa ei ole päälliosaa, jolloin väärään asentoon asetettu pakkaus voi vaikeuttaa purkamista. Sijainti puolestaan määrittelee, mihin tietyt esineet tulee sijoittaa lavalle, jotta erityiset vaatimukset täyttyvät. Vaatimuksia voivat olla mm. helposti rikki menevien tuotteiden suojaaminen ja nopeasti tarvittavien tuotteiden sijoittaminen.

Luvussa 2 mainittu ryhmittely-rajoite liittyy vahvasti logistisiin rajoitteisiin. Ryhmittelyyn kuuluu allokaatio, joka määrittää mitkä tuotteet voidaan pakata sa-

malle lavalle. Esimerkiksi kylmätuotteet ja kuivatuotteet eivät voi olla samassa lavassa, koska ne vaativat eri säilytysolosuhteet. Tilaajan määrittämä sijainti puolestaan voi liittyä eri hyllyryhmien sijoittamiseen myymälälavalla vierekkäin, mikä tehostaa purkamista ja logistiikkaprosessia.

Asioita, joita ei suoraan mainittu luvussa 2, ovat lastausprioriteetti, täydellinen lähetys ja kuvion monimutkaisuus. Lastausprioriteetti määrittää esineiden tärkeysjärjestyksen, esimerkiksi toimitusaikojen mukaan. Tämä on tärkeä tekijä, koska se varmistaa, että kiireellisimmät tuotteet tulevat varmasti pakatuiksi ja lähetetyiksi nopeasti. Täydellinen lähetys puolestaan varmistaa, että kaikki saman tilauksen tuotteet pakataan yhteen lähetykseen, mikä optimoi logistiikkaprosessia ja vähentää virheitä lastauksessa. Kuvion monimutkaisuus viittaa pakkauskuvion monimutkaisuuteen ja siihen, kuinka hyvin pakkaaminen voidaan toteuttaa manuaalisesti tai automaattisesti. Monimutkainen pakkauskuvio voi vaikeuttaa ja hidastaa prosessia, mutta yksinkertaisempi kuvio voi parantaa tehokkuutta ja vähentää virheitä. Tällöin pakkausprosessista tulee nopeampi ja kustannustehokkaampi.

Taulukko 3.3: Käytännön rajoitteiden luokittelu [11]

Turvallisuusrajoitteet	
Painoraja	Pakattujen esineiden kokonaispaino ei saa ylittää lavan tai siirtokaluston kantokapasiteettia.
Painon jakautuminen	Paino tulee jakaa tasaisesti lavan pohjalle, jotta painopiste olisi keskellä.
Orientaatio	Rajoittaa, missä asennoissa esine voi olla.
Pinoaminen	Rajoittaa, miten laatikot voidaan pinoata toistensa päälle, jotta ne eivät vahingoitu.
Sijainti	Tietyt esineet tulee sijoittaa tiettyyn paikkaan lavalla.
Vakaus	Varmistaa esineiden turvallisuuden kuljetuksen aikana.
Logistiset rajoitteet	
Lastausprioriteetti	Määrittää esineiden tärkeysjärjestyksen esim. toimitusaikojen mukaan.
Täydellinen lähetys	Kaikki saman tilauksen esineet tulee pakata yhteen lähetykseen.
Allokaatio	Määrittää, mitkä esineet voidaan pakata samalle myymälälavalle.
Tilaaajan päättämä sijainti	Esinekokoelman pakkaamista yhteen tai tietyn etäisyyden päähän toisistaan.
Kuvion monimutkaisuus	Pakkauskuvioiden monimutkaisuus, joka voi vaikuttaa manuaalisen tai automaattisen pakkaamisen vaikeuteen.

4 Olemassa olevat ratkaisut

Pakkausongelmien tutkimus ei ole ollut aluksi kovin suosittua, mutta se on yleistynyt jatkuvasti. Pakkausongelmia käsittelevien julkaisujen määrä on kasvanut merkittävästi. Kehitys ilmenee siitä, että vuosina 2010 ja 2011 julkaistiin lähes yhtä monta artikkelia (39) kuin viiden edeltävän vuoden aikana (2005-2009), jolloin artikkeleita oli yhteensä 41 [4]. Lisäksi vuosina 2012-2021 julkaistiin peräti 107 artikkelia [11]. Vuoden 2020 jälkeen kasvu on jatkunut, ja trendi on vain voimistunut aina vuoteen 2024 saakka. Tämä suosion nousu liittyy läheisesti teollisuus 4.0 (engl. Industry 4.0) teknologioiden kehittymiseen, erityisesti logistiikassa ja toimitusketjujen hallinnassa. [12].

3DBPP-ongelmat ovat yleisesti NP-vaikeita ratkaista, sillä tunnetut ratkaisut vaativat eksponentiaalista aikaa ongelman koon kasvaessa ja merkittävää laskentatehoa [13]. Tämä laskennallinen haastavuus on osaltaan rajoittanut tutkimusta erityisesti varhaisempina vuosikymmeninä, kun käytettävissä ei ollut nykyaikaisia heuristisia algoritmeja tai riittävää laskentatehoa.

Vaikka tarkkoja algoritmeja kolmiulotteisiin pakkausongelmiin on olemassa, niiden suurin haaste on laskenta-ajan kasvu, mikä tekee niiden soveltamisesta laajamittaiseen käyttöön hankalaa. Laskenta-aikaa voidaan kuitenkin vähentää käyttämällä heuristisia menetelmiä [12]. Optimoidusti pakattujen myymälälavojen luominen suuressa mittakaavassa on edelleen haastavaa, mutta mahdollista kehittää ratkaisuja, jotka täyttävät käytännön vaatimukset ja ovat riittävän tehokkaita toimimaan

reaalimaailman logistiikkaprosesseissa.

Taulukko 4.1 on muodostettu yhdistämällä julkaisuissa [4] ja [11] esitetyt ratkaisut, joista on kerätty vain SBSBPP-tyyppiset ongelmat. Tämän jälkeen hakulauseiden avulla on etsitty vuoden 2020 jälkeen julkaistuja tutkimuksia, koska edellä mainitut taulukot sisälsivät tuloksia vain vuosilta 1994-2020. Taulukkoon on lisätty paikalle 0 tutkielmassa käsiteltävä ongelma, jossa on minimivaatimusten mukaiset rajoitteet toiminnalle.

Toimivan algoritmisen myymälälavapakkausratkaisun tulee sisältää rajoitteita, kuten painorajan, jotta eurolava ja kuljetuskalusto kestävät kuorman. Tuotteiden asentoa on pystyttävä vaikuttamaan, sillä jotkin tuotteet eivät voi olla ylösalaisin ja tuotteita kääntämällä voidaan tiivistää pakkausta. Pinoamisrajoitteet ovat välttämättömiä, jotta estetään tuotteiden vaurioituminen ja lavan kaatuminen. Vakaus on tärkeä rajoite niin dynaamisesti kuin staattisesti, jotta lavaa voidaan kuljettaa ja säilyttää turvallisesti. Allokaatio on myös pakollinen rajoite, sillä kylmätuotteet ja kuivat tuotteet on pidettävä erillisillä lavoilla. Tilaajan päättämä sijainti on tärkeä hyllytyksen tehokkuuden tekijä, sillä sen avulla voidaan ryhmitellä tuotteet lavalle järkevästi.

Painon jakautuminen tasaisesti ei ole välttämätöntä, jos lava on muuten vakaa stabiilisti ja staattisesti. Lastausprioriteetti ei ole pakollinen rajoite, koska täydellinen lähetys takaa, että tuote toimitetaan perille. Sijaintirajoite ei ole välttämätön, vaikka se voi olla hyödyllinen kiireellisesti purettavien tuotteiden asettamisessa lavan päälle. Pakkauskuvion monimutkaisuus ei ole pakollinen rajoite, vaikka se saattaa helpottaa purkamista ja robottien käytön mahdollisuuksia lavan pakkaamisessa. Täydellinen lähetys -rajoite ei ole tarpeellinen, sillä jos esimerkiksi jakelukseskukselta puuttuisi jokin tuote, niin tällöin lavaa ei pakattaisi ollenkaan. Rajoitteet voivat vaihdella sen mukaan, miten koko toimitusketju on suunniteltu ja toteutettu.

Tämän kirjallisuuskatsauksen aikana löytyi viisi julkaisua, jotka vastasivat asetettuja minimivaatimuksia myymälälavan pakkausongelman ratkaisemiseksi. Näistä julkaisuista yksikään ei kuitenkaan täysin kohdannut tarkasteltavan ongelman erityispiirteitä. Kaikki käsittelivät 3L-CVRP:ta (Three-Dimensional Loading Capacitated Vehicle Routing Problem), joka on laaja ja monimutkainen optimointiongelma, yhdistäen ajoneuvojen reitityksen ja kolmiulotteisen kuormauksen. Tämän ongelman tavoitteena on löytää optimaaliset reitit ja tehokkaat pakkausratkaisut, joissa otetaan huomioon tärkeitä reunaehtoja, kuten painorajoitusten hallinta ja särkyvien tuotteiden suojaaminen.

Useassa julkaisussa ajoneuvojen reitityksen optimointiin käytettiin Tabu Search (TS) -algoritmia, joka on iteratiivinen optimointimenetelmä. Se etsii parempia ratkaisuja tutkimalla naapuriratkaisuja ja estää hakua juuttumasta paikallisiin optimeihin tabu-listan avulla.

Vaikka nämä lähestymistavat eivät täysin ratkaise myymälälavoihin liittyvää ongelmaa, ne tarjoavat arvokkaita lähtökohtia ratkaisumallin kehittämiseksi. Taulukossa 4.2 on tiivistettynä käytetyt algoritmit ja heuristiikat eri julkaisuissa.

Ensimmäisessä julkaisussa [14] ongelman ratkaiseminen perustuu Ant Colony Optimization (ACO) -algoritmin käyttöön. Tämä algoritmi jäljittelee muurahaisen toimintaa, joissa muurahaiset etsivät reittejä feromonipohjaisen kommunikoinnin avulla. Tässä 3L-CVRP-ongelmassa ACO optimoi ajoreittejä hyödyntäen feromonien vahvuutta, joka heijastaa aiempien ratkaisujen laatua. Reitit muodostetaan priorisoimalla asiakkaat ja arvioimalla kustannuksia, jolloin reittien tehokkuutta parannetaan jokaisen iteraation aikana.

Kuormausongelman ratkaisu perustuu Bottom-Left-Fill ja Touching-Area heuristiikkoihin. Bottom-Left-Fill sijoittaa esineet konttiin aloittaen vasemmasta alakulmasta, pyrkien täyttämään tilan tehokkaasti. Touching-Area puolestaan maksimoidaan esineiden kosketuspinta muiden esineiden tai konttiseinämien kanssa. Näin

Taulukko 4.2: Algoritmit ja heuristiikat minimivaatimuksia vastaavissa julkaisuissa

#	Julkaisu	Reititysalgoritmit	Pakkausheuristiikat
1	Fuellerer et al. (2010) [14]	Ant Colony Optimization	Bottom-Left-Fill Touching-Area
2	Gendreau et al. (2006) [15]	Tabu Search	Bottom-Left Touching Area
3	Tarantilis et al. (2009) [16]	Tabu Search Guided Local Search	BackLeftLow LeftBackLow MaxTouchingAreaW MaxTouchingAreaNoWallsW MaxTouchingAreaL MaxTouchingAreaNoWallsL
4	Wang et al. (2010) [17]	Tabu Search	Deepest-Bottom-Left-Fill Maximum Touching Area
5	Bortfeldt et al. (2012) [18]	Tabu Search	Puuhakualgoritmi

varmistetaan paitsi tilan täyttö myös särkyvien esineiden suojaaminen.

Ratkaisussa tarkistetaan iteratiivisesti kuormauksen kelpoisuus, ja se hylätään, jos se ylittää paino-, tilavuus- tai särkyvyysrajoitteet. Tämä prosessi optimoi ensin ajoneuvojen reitit ja sen jälkeen kuormauksen, samalla varmistaen, että kaikki rajoitteet täyttyvät.

Toinen julkaisu [15] keskittyy Single Vehicle Loading Problem (SVLP) -osaongelmaan, joka liittyy yhden ajoneuvon kuormauksen optimointiin osana 3L-CVRP-ongelmaa. Ratkaisussa käytetään Tabu Search -algoritmia, jossa reittejä ja kuormausratkaisuja optimoidaan siirtämällä toimituspisteitä eri reiteille, vaihtamalla niiden paikkoja keskenään tai yhdistämällä reitin osia tehokkaammiksi kokonaisuuksiksi.

Kuormausvaiheessa hyödynnetään kahta heuristiikkaa. BL_{3L-SV} (Bottom-Left-SV) sijoittaa esineet konttiin aloittaen vasemmasta alakulmasta ja pyrkii täyttämään tilaa tehokkaasti. TA_{3L-SV} (Touching Area) puolestaan arvioi esineiden paikkoja ottaen huomioon niiden kosketuspinnan muiden esineiden ja konttiseinämien kanssa, jolloin saadaan optimaalinen järjestys esineiden asettelulle.

Kuormauksen kelpoisuus tarkistetaan iteratiivisesti, ja se hylätään, jos se ylittää paino-, tilavuus- tai särkyvyysrajoitteet. LIFO-politiikka (Last In, First Out) varmistaa, että kuorma puretaan oikeassa järjestyksessä. Tämä prosessi optimoi ensin ajoneuvojen reitit ja sen jälkeen kuormauksen, samalla varmistuen, että kaikki käytännön rajoitteet, kuten paino ja orientaatio, täyttyvät.

Kolmas julkaisu [16] esittelee hybridialgoritmin, joka yhdistää Tabu Search -algoritmin ja Guided Local Searchin (GLS) ajoneuvojen reitityksen ja kolmiulotteisen kuormauksen optimointiin. Tabu Search tutkii ratkaisuvaihtoehtoja tehokkaasti etsimällä parannuksia naapuriratkaisuista, kuten siirtämällä toimituspisteitä reitiltä toiselle, vaihtamalla niiden keskinäistä järjestystä tai muokkaamalla reitin rakennetta. Tämä menetelmä voi kuitenkin jäädä paikalliseen optimiin, jos kaikki mahdolliset siirrot on tutkittu. Guided Local Search täydentää tätä ongelmaa ohjaamalla hakua pois epäedullisista ratkaisuista, kuten pitkistä reittiosuuksista, jotka lisäävät kuljetuskustannuksia. GLS parantaa Tabu Searchin kykyä löytää globaalisti optimaalisia ratkaisuja erityisesti silloin, kun perinteinen TS ei enää etene. Näiden algoritmien yhdistelmä mahdollistaa monipuolisen ja tehokkaan reitityksen sekä kuormauksen optimoinnin.

Kuormauksen osalta hyödynnetään kuuden heuristiikan sarjaa, jotka on suunniteltu ratkaisemaan monimutkaisia reunaehtoja. Näihin heuristiikkoihin kuuluvat BackLeftLow ja LeftBackLow, jotka sijoittavat esineet järjestelmällisesti säiliön vasemmalle ja alas tasoittain. Lisäksi MaxTouchingAreaW ja MaxTouchingAreaNoWallsW maksimoivat esineiden kosketuspinnan muiden esineiden tai säiliön seinämien kanssa vakauden lisäämiseksi. MaxTouchingAreaL ja MaxTouchingAreaNoWallsL toimivat samalla periaatteella, mutta keskittyvät erityisesti esineiden välisiin kosketuspintoihin ilman säiliön seinämiä.

Neljännessä julkaisussa [17] käsitellään yhdistetyn reititys- ja kuormausongelman ratkaisemista kahden vaiheen Tabu Search -algoritmillä sekä Deepest-Bottom-

Left-Fill (DBLF) ja Maximum Touching Area (MTA) -heuristiikoilla. Tabu Search optimoi reitit käyttämällä naapuruusoperaattoreita, jotka määrittävät, kuinka algoritmi muokkaa ratkaisuja ratkaisuavaruudessa. Naapuruusoperaattorit, kuten 2-opt, 2-swap, move, crossover ja splitting, mahdollistavat reittien tehokkaan muokkaamisen. Esimerkiksi 2-opt vaihtaa kahden toimituspisteen välistä yhteyttä reitillä, mikä muuttaa reitin rakennetta ja voi lyhentää sen kokonaispituutta, kun taas move siirtää asiakkaan yhdeltä reitiltä toiselle ja crossover yhdistää kahden reitin alku- ja loppuosat. Näitä operaatioita käytetään iteratiivisesti, ja niiden todennäköisyyttä soveltaa säädetään kokeellisesti määritetyillä painotuksilla.

Tabu Searchin ensimmäinen vaihe keskittyy tekemään alkuperäisestä kelpaamattomasta ratkaisusta kelvollisen, ja toinen vaihe optimoi matkakustannuksia kelvollisten ratkaisujen joukossa, parantaen reitityksen tehokkuutta.

DBLF sijoittaa esineet syvimpään ja alimpaan mahdolliseen paikkaan noudattaen LIFO-politiikkaa ja paino-rajoitteita, kun taas MTA asettaa esineet siten, että niiden kosketuspinta muiden esineiden tai konttiseinämien kanssa maksimoituu.

Viides julkaisu [18] esittelee hybridialgoritmin, joka yhdistää Tabu Search -algoritmin ajoneuvojen reitityksen optimointiin ja puuhakualgoritmin kuormauksen optimointiin 3L-CVRP-ongelman ratkaisemiseksi. Ajoneuvoreititys

Tabu Search optimoi ajoneuvojen reititystä vähentämällä ajoneuvojen määrää ja matkakustannuksia asiakkaiden siirtojen, reittien yhdistämisen ja vaihtojen avulla. Algoritmi toimii kahdessa vaiheessa: ensimmäisessä vaiheessa muodostetaan kelvollinen reititys, jossa kaikki asiakkaat tulevat palveluiksi, ja toisessa vaiheessa optimointia jatketaan kustannustehokkuuden parantamiseksi. Kuormausalgoritmi

Kuormauksen optimointi perustuu puuhakualgoritmiin, joka rakentaa pakkaussuunnitelmat iteratiivisesti. Algoritmi minimoi laskentakustannuksia arvioimalla ensin reitityksen kelpoisuuden ja simuloimalla kuormauksen vain lupaaville ratkaisuille reunaehdot huomioon ottaen.

Verrattuna tutkielman esittämään myymälälavapakkausongelmaan analysoidut algoritmit käsittelevät pääosin reittien optimointia ja tavaroiden pakkausta ajoneuvoihin. Näissä algoritmeissa huomioidaan keskeiset reunaehdot, kuten painorajat, vakaus ja orientaatorajoitteet, jotka ovat tärkeitä myös myymälälavojen optimoinnissa. Näin ollen näitä algoritmeja voitaisiin muokata ratkaisemaan myymälälavojen pakkaaminen, jolloin tuotteet olisi järjestetty purkamisen ja myymäläkartan mukaisesti optimaaliselle reitille. Tulevaisuuden tutkimus voisi keskittyä näiden algoritmien yhdistämiseen käytännön tarpeisiin ja arvioida niiden tehokkuutta jakelukeskusten käytännön ympäristöissä.

5 Yhteenveto

Tutkielmassa tarkasteltiin myymälälavojen pakkaamisen optimointia ja algoritmisten ratkaisujen soveltamista tehokkaaseen ja turvalliseen lavapakkaamiseen, jonka ansiosta koko prosessi jakelukeskuksesta hyllytykseen tehostuu. Erityistä huomiota kiinnitettiin siihen, miten nykyisiä pakkausongelmien malleja ja algoritmeja voidaan hyödyntää myymälälavojen pakkaamisessa siten, että lopputulos tukisi nopeaa hyllyttämistä ja minimoisi manuaalisen työn tarpeen. Tutkimus keskittyi kolmen pääkysymyksen ympärille, jotka liittyivät sopivien pakkausongelmien määrittämiseen, algoritmien vaatimuksiin ja olemassa olevien kokonaisvaltaisten ratkaisujen mahdollisuuksiin.

TK1: Luvussa 3 todettiin, että ongelmaa voidaan mallintaa SBSBPP-mallilla (Single Bin Size Bin Packing Problem). Luvussa 4 havaittiin, että 3L-CVRP:n (Three-Dimensional Capacitated Vehicle Routing Problem) sovellukset tarjoavat käyttökelpoisen lähestymistavan. 3L-CVRP mahdollistaa lavojen pakkaamisen siten, että purkaminen voidaan suorittaa suoraan oikeille hyllypaikoille ilman ylimääräistä liikkumista. Lisäksi malli mahdollistaa järjestelmän joustavan mukauttamisen muuttuvan myymäläkartan vaatimuksiin, mikä tekee siitä erityisen soveltuvan käytännön tarpeisiin.

TK2: Vastaukset saatiin luvuista 2 ja 3, joissa analysoitiin myymälälavan vakautteen ja ryhmittelyyn liittyviä rajoitteita sekä luokiteltiin nämä Wäscherin typologian mukaisesti. Algoritmin vaatimuksissa korostuivat turvallisuuden ja tehokkuuden nä-

kökohdat. Mahdollisimman optimoidusti pakatun myymälälavan on oltava vakaa sekä staattisesti että dynaamisesti, jotta se kestää kaatumatta sekä kuljetuksen että hyllyttämisen. Tämä edellyttää tarkkaa painon jakautumisen ja painopisteen hallintaa. Pinoamisrajoitteet, kuten tuotteen kantokyky ja orientaatio, ovat keskeisiä turvallisuuden takaamiseksi. Lisäksi tuotteiden ryhmittely myymäläkartan mukaisesti vähentää työntekijöiden turhaa liikkumista hyllyttämisen aikana, mikä nopeuttaa hyllytysprosessia ja vähentää fyysistä kuormitusta.

TK3: *Onko myymälälavojen automaattiseen pakkaamiseen olemassa kokonaisvaltaisia ratkaisuja?* Vastaukset saatiin luvusta 4, jossa analysoitiin olemassa olevia SBSBPP-ratkaisuja, kuten 3L-CVRP-malliin perustuvia algoritmeja. Nykyiset ongelmatyypit, kuten 3L-CVRP, on kehitetty ensisijaisesti kuorma-autojen pakkaamiseen, mutta niitä voidaan muokata vastaamaan myymälälavojen erityistarpeita. Näiden algoritmien yhdistäminen ja mukauttaminen voisi mahdollistaa kokonaisvaltaisen järjestelmän, joka sijoittaa tuotteet lavalle optimaalisesti myymäläkartan mukaisiin paikkoihin, tehostaen samalla hyllytysprosessia ja vähentäen työntekijöiden kuormitusta.

Jatkotutkimuksessa tulisi keskittyä algoritmien soveltamiseen käytännön myymäläympäristöissä, erityisesti yhdistämällä lavapakkaus ja reititysongelmat yhtenäiseksi järjestelmäksi. Tämä mahdollistaisi myymäläoperaatioiden tehokkuuden lisäämisen ja henkilöstön työkuormituksen vähentämisen, samalla kun toimitusketjuista tehtäisiin taloudellisesti ja toiminnallisesti kestävämpiä.

Lähdeluettelo

- [1] S. Finne ja H. Sivonen, *The Retail Value Chain: How to Gain Competitive Advantage through Efficient Consumer Response (ECR) Strategies*, 1st. London: Kogan Page Ltd, 2008, Print.
- [2] A. A. Ananno ja L. Ribeiro, "A Multi-Heuristic Algorithm for Multi-Container 3-D Bin Packing Problem Optimization Using Real World Constraints", *IEEE Access*, vol. 12, s. 42 105–42 130, 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3378063.
- [3] M. Alonso, R. Alvarez-Valdes, M. Iori ja F. Parreño, "Mathematical models for Multi Container Loading Problems with practical constraints", *Computers Industrial Engineering*, vol. 127, s. 722–733, 2019, ISSN: 0360-8352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.012>.
- [4] A. Bortfeldt ja G. Wäscher, "Constraints in container loading – A state-of-the-art review", *European Journal of Operational Research*, vol. 229, nro 1, s. 1–20, 2013, ISSN: 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.12.006>.
- [5] H. Dyckhoff, "A Typology of Cutting and Packing Problems", *European Journal of Operational Research*, vol. 44, s. 145–159, tammikuu 1990. DOI: 10.1016/0377-2217(90)90350-K.
- [6] G. Wäscher, H. Haußner ja H. Schumann, "An improved typology of cutting and packing problems", *European Journal of Operational Research*, vol. 183, nro 3, s. 1109–1130, 2007.

-
- [7] S. Martello, D. Pisinger ja D. Vigo, "The three-dimensional bin packing problem", *Operations Research*, vol. 48, nro 2, s. 256–267, 2000.
- [8] B. C. Yildiz, "Models and Solution Methods for the Pallet Loading Problem", A thesis presented in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Management Sciences, tohtorinväitöskirja, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2018.
- [9] A. Tarnowski, J. Terno ja G. Scheithauer, "A Polynomial Time Algorithm For The Guillotine Pallet Loading Problem", *INFOR: Information Systems and Operational Research*, vol. 32, tammikuu 1999. DOI: 10.1080/03155986.1994.11732257.
- [10] L. Oliveira, V. Loti de Lima, T. Queiroz ja F. Miyazawa, "The container loading problem with cargo stability: a study on support factors, mechanical equilibrium and grids", *Engineering Optimization*, vol. 53, s. 1–20, heinäkuu 2020. DOI: 10.1080/0305215X.2020.1779250.
- [11] S. Ali, A. Ramos, M. Carravilla ja J. Oliveira, "On-line three-dimensional packing problems: A review of off-line and on-line solution approaches", *Computers Industrial Engineering*, vol. 168, s. 108 122, maaliskuu 2022. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108122.
- [12] A. Daios, N. Kladovasilakis ja I. Kostavelis, "Mixed Palletizing for Smart Warehouse Environments: Sustainability Review of Existing Methods", *Sustainability*, vol. 16, nro 3, 2024, ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su16031278.
- [13] S. Martello, D. Pisinger ja D. Vigo, "The Three-Dimensional Bin Packing Problem", *Operations Research*, vol. 48, helmikuu 1998. DOI: 10.1287/opre.48.2.256.12386.

- [14] G. Fuellerer, K. Doerner, R. Hartl ja M. Iori, "Metaheuristics for vehicle routing problems with three-dimensional loading constraints", *European Journal of Operational Research*, vol. 201, s. 751–759, 2010.
- [15] M. Gendreau, M. Iori, G. Laporte ja S. Martello, "A tabu search algorithm for a routing and container loading problem", *Transportation Science*, vol. 40, s. 342–350, 2006.
- [16] C. Tarantilis, E. Zachariadis ja D. Kiranoudis, "A hybrid metaheuristic algorithm for the integrated vehicle routing and three-dimensional container loading problem", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 10, s. 255–271, 2009.
- [17] L. Wang, S. Guo, S. Chen, W. Zhu ja A. Lim, "Two natural heuristics for 3D packing with practical loading constraints", teoksessa *Lecture Notes on Artificial Intelligence, 6230/2010*, Springer, 2010, s. 256–267.
- [18] A. Bortfeldt, "A hybrid algorithm for the capacitated vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints", *Computers & Operations Research*, vol. 39, nro 9, s. 2248–2257, 2012.
- [19] P. Prosser, "A hybrid genetic algorithm for container loading", teoksessa *ECAI '88 – Proceedings of the 8th European Conference on Artificial Intelligence*, London: Pitmann, 1988, s. 159–164.
- [20] J.-L. Lin, C.-H. Chang ja J.-Y. Yang, "A study of optimal system for multiple-constraint multiple-container packing problems", *IEA/AIE 2006*, s. 1200–1210, 2006.
- [21] F. Gzara, S. Elhedhli ja B. C. Yildiz, "The pallet loading problem: Three-dimensional bin packing with practical constraints", *European Journal of Operational Research*, 2020.

- [22] M. T. Alonso, R. Alvarez-Valdés ja F. Parreño, "A grasp algorithm for multi container loading problems with practical constraints", *4OR*, vol. 18, nro 1, s. 49–72, 2020.
- [23] Y. Harrath, "A Three-Stage Layer-Based Heuristic to Solve the 3D Bin-Packing Problem under Balancing Constraint", *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, heinäkuu 2021. DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.07.007.
- [24] G. Tresca, G. Cavone, R. Carli, A. Cerviotti ja M. Dotoli, "Automating Bin Packing: A Layer Building Matheuristics for Cost Effective Logistics", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 19, s. 1–15, heinäkuu 2022. DOI: 10.1109/TASE.2022.3177422.
- [25] R. R. Amossen ja D. Pisinger, "Multi-dimensional bin packing problems with guillotine constraints", *Computers & Operations Research*, vol. 37, nro 11, s. 1999–2006, 2010.
- [26] J. de Castro Silva, N. Soma ja N. Maculan, "A greedy search for the three-dimensional bin packing problem: the packing static stability case", *International Transactions in Operational Research*, vol. 10, nro 2, s. 141–153, 2003.
- [27] T. de Queiroz, F. Miyazawa, Y. Wakabayashi ja E. Xavier, "Algorithms for 3D guillotine cutting problems: unbounded knapsack, cutting stock and strip packing", *Computers & Operations Research*, vol. 39, s. 200–212, 2011.
- [28] E. den Boef, J. Korst, S. Martello, D. Pisinger ja D. Vigo, "Erratum to "The three-dimensional bin packing problem: robot-packable and orthogonal variants of packing problems"", *Operations Research*, vol. 53, s. 735–736, 2005.
- [29] Z. Jin, T. Ito ja K. Ohno, "A three-dimensional bin packing problem and its practical algorithm", *JSME International Journal, Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, vol. 46, s. 60–66, 2003.

-
- [30] S. Martello, D. Pisinger ja D. Vigo, "Algorithm 864: general and robot-packable variants of the three-dimensional bin packing problem", *ACM Transactions on Mathematical Software*, vol. 33, nro 1, article 7, 2007.
- [31] U. Sommerweiß, "Modeling of practical requirements of the distributors packing problem", s. 427–432, 1996.
- [32] S. Elhedhli, F. Gzara ja B. Yildiz, "Three-dimensional bin packing and mixed-case palletization", *Inform's Journal on Optimization*, vol. 1, nro 4, s. 323–352, 2019.
- [33] M. Boschetti, "New lower bounds for the three-dimensional finite bin packing problem", *Discrete Applied Mathematics*, vol. 140, s. 241–258, 2004.
- [34] E. Burke, M. Hyde, G. Kendall ja J. Woodward, "Automating the packing heuristic design process with genetic programming", *Evolutionary Computation*, 2011. DOI: 10.1162/EVCO_a_00044.
- [35] T. Crainic, G. Perboli ja R. Tadei, "Extreme point-based heuristics for three-dimensional bin packing", *INFORMS Journal on Computing*, vol. 20, s. 368–384, 2008.
- [36] T. Crainic, G. Perboli ja R. Tadei, "TS2PACK: a two-level tabu search for the three-dimensional bin packing problem", *European Journal of Operational Research*, vol. 195, s. 744–760, 2009.
- [37] O. Faroe, D. Pisinger ja M. Zachariassen, "Guided local search for the three-dimensional bin-packing problem", *INFORMS Journal on Computing*, vol. 15, s. 267–283, 2003.
- [38] M. Hifi, I. Kacem, S. Nègre ja L. Wu, "A linear programming approach for the three-dimensional bin packing problem", *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, vol. 36, s. 993–1000, 2010.

- [39] C.-H. Hsu ja C.-S. Liao, "New lower bounds for the three-dimensional orthogonal bin packing problem", *Proceedings of the 23rd Canadian Conference on Computational Geometry*, unpublished, 2011.
- [40] A. Lodi, S. Martello ja D. Vigo, "Heuristic algorithms for the three-dimensional bin packing problem", *European Journal of Operational Research*, vol. 141, s. 410–420, 2002.
- [41] A. Lodi, S. Martello ja D. Vigo, "TSPACK: A unified tabu search code for multi-dimensional bin packing problems", *Annals of Operations Research*, vol. 131, s. 203–213, 2004.
- [42] S. Martello, D. Pisinger ja D. Vigo, "The three-dimensional bin packing problem", *Operations Research*, vol. 48, s. 256–267, 2000.
- [43] F. Miyazawa ja Y. Wakabayashi, "Two- and three-dimensional parametric packing", *Computers & Operations Research*, vol. 9, s. 2589–2603, 2007.
- [44] F. Parreño, R. Alvarez-Valdez, J. Oliveira ja J. Tamarit, "A hybrid GRASP/VND algorithm for two- and three-dimensional bin packing", *Annals of Operations Research*, vol. 179, s. 203–220, 2010.
- [45] Z. Zhang, S. Guo, W. Zhu, W.-C. Oon ja A. Lim, "Space defragmentation heuristic for 2D and 3D bin packing problems", *Proceedings of the Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence*, s. 699–704, 2011.
- [46] B. Mahvash, A. Awasthi ja S. Chauhan, "A column generation-based heuristic for the three-dimensional bin packing problem with rotation", *Journal of the Operational Research Society*, s. 1–13, 2017.
- [47] M. Arenales ja R. Morabito, "An overview of AND/OR-graph approaches to cutting and packing problems", s. 207–224, 1997.

-
- [48] W. Dowsland, "Three-dimensional packing 2013 solution approaches and heuristic development", *International Journal of Production Research*, vol. 29, s. 1673–1685, 1991.
- [49] L. Epstein ja M. Levy, "Dynamic multi-dimensional bin packing", *Journal of Discrete Algorithms*, vol. 8, s. 356–372, 2010.
- [50] A. Lim ja X. Zhang, "The container loading problem", s. 913–917, 2005.
- [51] F. Miyazawa ja Y. Wakabayashi, "Cube packing", *Theoretical Computer Science*, vol. 297, s. 355–366, 2003.
- [52] F. Miyazawa ja Y. Wakabayashi, "Three-dimensional packings with rotations", *Computers & Operations Research*, vol. 36, s. 2801–2815, 2009.