

POZNAŃ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

---

FACULTY OF COMPUTING AND TELECOMMUNICATIONS



Doctoral dissertation

# Combinatorial optimization problems in port logistics

**Jakub Wawrzyniak**

Supervisor: prof. dr hab. eng. Maciej Drozdowski

Poznań, 2024

# Streszczenie w języku polskim

Globalna żegluga kontenerowa jest jednym z kluczowych i najtrudniejszych sektorów gospodarki. Typowe dla niej problemy można odwzorować na szeroko badane zagadnienia optymalizacji kombinatorycznej i badań operacyjnych. Podczas projektowania nowego morskiego terminala kontenerowego lub przebudowy istniejącego, kluczową decyzją jest podział linii brzegowej (ang. quay) na nabrzeża (ang. berths). Technicznie, układ nabrzeży terminala to podział jednego długiego odcinka (linii brzegowej) na wiele mniejszych (nabrzeża). Rozwiązanie problemu QPP wymaga określenia liczby nabrzeży i ich długości w taki sposób, aby czas oczekiwania na obsługę przybywających kontenerowców był zminimalizowany. W rozprawie doktorskiej stawiana jest następująca hipoteza: *Wydajność morskiego terminala kontenerowego można poprawić poprzez optymalizację podziału linii brzegowej na nabrzeża.*

Pierwszy z rozważanych w pracy problemów, deterministyczny problem podziału linii brzegowej (ang. Deterministic Quay Partitioning Problem, DQPP), sformułowany został w dwóch wariantach: 2w1 i 1w1, dopuszczających odpowiednio przydział maksymalnie dwóch statków lub tylko jednego statku do poszczególnych nabrzeży. Oba warianty okazały się **NP**-trudne nawet w bardzo restrykcyjnych przypadkach. Dla obu przypadków skonstruowano zadanie mieszanego programowania liniowego (ang. Mixed Integer Linear Programming, MIP). Oceniono skalowalność czasową rozwiązania DQPP za pomocą MIP. Przeanalizowano, m.in. jak rozrzut wielkości statków wpływa na wybrane długości nabrzeży.

W pracy rozważany jest problem wyboru algorytmów (ang. Algorithm Selection Problem, ASP) do rozwiązywania dużych problemów przydziału statków do nabrzeży (ang. Berth Allocation Problem, BAP) z ograniczeniami budżetu czasowego. Indywidualna ocena 72 szybkich heurystyk doprowadziła do wniosku, że pewne algorytmy zachłanne są najlepsze dla krótkich

budżetów czasowych, a metaheurystyki są najlepsze dla dużych budżetów czasowych. Zbadano również koncepcję portfolio algorytmów do rozwiązania BAP. Badanie ewolucji portfolio w czasie nie tylko potwierdziło wcześniejszą jakościową intuicję co do stosowalności konkretnych heurystyk, ale także dostarczyło ilościowego sposobu przechodzenia z pierwszego zestawu algorytmów do drugiego. Wyniki przedstawione w tym rozdziale mogą być interesujące z punktu widzenia metodologicznego, ponieważ zaproponowano niestandardowe podejście do oceny heurystyk umożliwiające kompromis między długością czasu wykonania a jakością rozwiązań.

W pracy analizowane są wzorce ruchu kontenerowców w ośmiu portach na świecie. Ma to na celu opracowanie modeli ruchu (ang. Ship Traffic Model, STM) do optymalizacji i symulacji logistyki portowej. Modele te zostały wykorzystane w rozdziale 6. Opracowano bardziej zaawansowane i szczegółowe modele niż istniejące we wcześniejszej literaturze. Modele uwzględniają zależności między rozmiarami statków, czasami przetwarzania (obsługi) i czasami przybycia. Każda klasa wielkości kontenerowców ma swój własny model czasu przetwarzania i czasu powrotu w postaci reprezentacji statystycznej. Szczególną uwagę zwraca się na ich rozkłady. Brane są pod uwagę również statki aperiodyczne.

W pracy rozważano problem podziału linii brzegowej w wariancie stochastycznym (ang. Stochastic Quay Partitioning Problem, SQPP). Różne ścieżki badawcze przedstawione we wcześniejszych rozdziałach tej pracy zostały tutaj połączone. Modele ruchu statków wprowadzone w rozdziale 5 były elementami definicji SQPP. Aby ocenić podziały linii brzegowej, użyto celowo zaprojektowanego portfolio algorytmów wybranych w rozdziale 4 dla zadanego krótkiego czasu symulacji i dobrej jakości rozwiązań w wybranych granicach czasowych. Rozwiązania oparte na budowaniu nabrzeży o równej długości lub jak największej liczby dużych nabrzeży nie są na ogół najlepsze, jednak dla niektórych STM mogą zapewnić zadowalające rozwiązania. Wyliczenie metodą brutalnej siły wszystkich możliwych podziałów nabrzeża i ich ocena są w ograniczonym stopniu wykonalne dla współczesnych terminali, takich jak Hawr lub Szanghaj. Zaproponowano szereg metod o mniejszej złożoności, których celem jest zastosowanie w przyszłych projektach terminali umożliwiających budowę znacznie większej liczby nabrzeży.

# Summary

Global container shipping is one of the key and most challenging sectors of the economy. The typical problems can be successfully mapped to the widely studied problems of combinatorial optimization and operations research. When designing a new maritime container terminal or rebuilding an existing one, a key decision is the division of the quay into berths. Technically, the layout of the terminal quay is the division of one long segment (the quay) into many smaller ones (the berths). The solution requires determining the number of berths and their lengths in such a way that the waiting time of the arriving container ships is minimized. In this doctoral dissertation, the following hypothesis is defended: *The efficiency of a maritime container terminal can be improved by optimizing the partitioning of the quay into berths.*

The first considered problem, the Deterministic Quay Partitioning Problem (DQPP), is formulated in two variants: 2in1 and 1in1, allowing for the allocation of at most two ships or only one ship to individual berths, respectively. Both variants turned out to be **NP**-hard even in very restrictive cases. For both cases, a mixed integer linear program (MIP) was constructed. The time scalability of the DQPP solution using MIP was assessed. Among the others, the impact of the dispersion of ship sizes on the selected berths lengths was analyzed.

This thesis considers the problem of selecting algorithms (Algorithm Selection Problem, ASP) for solving large Berth Allocation Problems (BAP) with time budget constraints. The individual evaluation of 72 fast heuristics led to the conclusion that certain greedy algorithms are best for short time budgets, while metaheuristics are best for large time budgets. The concept of a portfolio of algorithms for solving BAP was also investigated. The study of the evolution of the portfolio in time not only confirmed the previous qualitative intuition about the use of specific heuristics, but also provided a quantitative way of moving from the first set of algorithms

to the second. The results presented in this Chapter can be interesting from a methodological point of view, as a non-standard approach to the evaluation of heuristics is proposed, including a trade-off between the execution time and the solution quality.

Traffic patterns of container ships in eight ports around the world are analyzed in this thesis. The aim is to develop traffic models (Ship Traffic Models, STMs) for the optimization and simulation of port logistics. These models were used in Chapter 6. More advanced and detailed models than those in the previous literature were developed. The models take into account the relationships between ship sizes, processing (handling) times and return times. Each vessel size class has its own statistical processing time model and return time model. Particular attention is paid to the distributions of these times. Aperiodic ships are also considered.

In the thesis Stochastic Quay Partitioning Problem (SQPP) was considered in Chapter 6. Different research paths presented in the previous chapters were combined here. The ship traffic models introduced in Chapter 5 were elements of the SQPP definition. To evaluate the quay partitions, a purposefully designed portfolio of algorithms selected in Chapter 4 was used for the given short simulation time budget and good quality of solutions. It turned out that solutions based on building equal length berths or as many large berths as possible are generally not the best, but for specific STMs they may provide satisfactory solutions. Brute force enumeration of all possible quay divisions and their evaluation, are to a limited extent feasible for modern terminals such as Le Havre or Shanghai. A number of less complex algorithms have been proposed with the aim of designing future terminals significantly more berths.