Złożenie pracy online:
2026-09-25 18:10:37
Kod pracy:
21442/54128/CloudA

Jakub Jarzmik
(nr albumu: 26951)

Praca magisterska

Optymalizacja procesu kompletacji zamówień poprzez zmianę strategii rozmieszczenia towarów w magazynie na przykładzie systemu klasy WMS.

Optimization of the order picking process by changing the resources placement strategy in a warehouse on the example of a WMS system.

Wydział: Wydział Nauk Społecznych i Informatyki

Kierunek: Zarządzanie

Specjalność: analiza danych

Promotor: dr Katarzyna Jermakowicz

Szanowni Państwo, pragnę serdecznie podziękować wykładowcom Wyższej Szkoły Biznesu – National Louis University w Nowym Sączu za wiedzę, którą przekazali mi w trakcie studiów drugiego stopnia, i za to, że nauczyli mnie patrzeć na organizację szerzej niż przez pryzmat samej technologii. Szczególne wyrazy wdzięczności kieruję do promotora, dr Katarzyny Jermakowicz, za życzliwość, cierpliwość i celne uwagi, dzięki którym ta praca zyskała kształt. Dziękuję również zespołowi, z którym rozwijam opisywany tu system, oraz mojej rodzinie za wyrozumiałość i wsparcie przez cały czas pisania. Z wyrazami szacunku, Jakub Jarzmik

Streszczenie

Kompletacja zamówień jest najbardziej pracochłonnym i kosztotwórczym procesem magazynowym, odpowiadającym za ponad połowę kosztów operacyjnych obiektu, a największą część jej czasu pochłania nieproduktywne przemieszczanie się pracowników, którego zakres zależy od rozmieszczenia towarów. Rozwój handlu elektronicznego, generujący rosnącą liczbę drobnych i rozproszonych zamówień, dodatkowo zwiększa wagę tego procesu dla efektywności całego magazynu. Celem pracy jest zbadanie wpływu obecnego rozmieszczenia asortymentu na wydajność kompletacji oraz opracowanie projektu usprawnień polegającego na relokacji towarów. Badanie oparto na analizie danych historycznych (logów operacyjnych) z produkcyjnego systemu klasy WMS działającego w modelu SaaS. W części empirycznej zdiagnozowano przebieg procesu kompletacji w badanym okresie, przeprowadzono klasyfikację rotacji towarów metodą ABC według częstości pobrań, zweryfikowano zależność między lokalizacją towarów szybkorotujących a czasem kompletacji oraz zaprojektowano zmianę strategii rozmieszczenia, szacując potencjalne oszczędności czasowe w drodze symulacji. Wykazano, że oparta na danych relokacja asortymentu według częstości pobrań skraca łączną drogę kompletacji o 69% oraz czas aktywnej kompletacji o około 48%, stanowiąc efektywny kosztowo kierunek optymalizacji pracy magazynu, możliwy do wdrożenia bez ingerencji w jego infrastrukturę.

Słowa kluczowe

kompletacja zamówień, rozmieszczenie towarów, system WMS, optymalizacja procesów magazynowych, analiza ABC, logistyka magazynowa, model SaaS, analiza danych

Abstract

Order picking is the most labour-intensive and costly warehouse process, accounting for more than half of the operating costs of a facility, and most of its duration is consumed by unproductive travel, whose extent depends on where goods are placed. The growth of e-commerce, generating an increasing number of small and fragmented orders, further raises the importance of this process for overall warehouse efficiency. The aim of the thesis is to examine how the current placement of goods affects picking performance and to design an improvement based on relocating them. The study analyses historical data (operational logs) from a live warehouse management system (WMS) operating in the SaaS model. The empirical part diagnoses the picking process in the period analysed, classifies stock rotation with the ABC method by picking frequency, verifies the relationship between the location of fast-moving items and picking time, and designs a new storage assignment strategy, estimating potential savings through simulation. Data-driven relocation by picking frequency was shown to shorten total picking travel by 69% and active picking time by about 48%, making it a cost-effective way to optimise warehouse operations without any change to its infrastructure.

Keywords

order picking, storage assignment, warehouse management system (WMS), warehouse process optimisation, ABC analysis, warehouse logistics, SaaS model, data analysis

Spis treści

Wstęp ... 3

Rozdział 1. Teoretyczne aspekty logistyki magazynowej i systemów informatycznych ... 5

1.1. Rola magazynowania w nowoczesnym łańcuchu dostaw ... 5

1.2. Charakterystyka i rodzaje procesów kompletacji (order picking) ... 10

1.3. Systemy klasy WMS i ich rola w zarządzaniu przepływem towarów ... 14

Rozdział 2. Metody optymalizacji rozmieszczenia towarów i pomiaru efektywności ... 20

2.1. Strategie rozmieszczenia towarów w magazynie (składowanie stałe vs losowe) ... 20

2.2. Metoda analizy ABC/XYZ jako narzędzie klasyfikacji zapasów ... 23

2.3. Kluczowe wskaźniki efektywności (KPI) w procesie kompletacji (czas cyklu, wydajność pracownika) ... 27

Rozdział 3. Metodologia badań własnych i charakterystyka badanego obiektu ... 32

3.1. Charakterystyka badanego podmiotu oraz specyfika systemu WMS (model SaaS) ... 32

3.2. Opis źródła danych i narzędzi badawczych (analiza logów systemowych, struktura bazy danych) ... 36

3.3. Cel, pytania badawcze i hipotezy ... 40

3.4. Metody i narzędzia weryfikacji hipotez badawczych dotyczących wąskich gardeł w procesie kompletacji ... 41

Rozdział 4. Analiza efektywności procesu kompletacji i projekt usprawnień ... 46

4.1. Diagnoza obecnego stanu procesu kompletacji na podstawie danych z roku 2025 ... 46

4.2. Analiza rotacji towarów metodą ABC w oparciu o częstość pobrań ... 52

4.3. Weryfikacja zależności między lokalizacją towarów rotujących a czasem kompletacji ... 57

4.4. Projekt zmian w strategii rozmieszczenia i symulacja oszczędności ... 61

Zakończenie ... 69

Bibliografia ... 72

Literatura zwarta (książki) ... 72

Artykuły z czasopism ... 72

2026

Źródła internetowe 74

Spis tabel i rysunków 76

Załącznik 1. Wybrane zapytania SQL wykorzystane w badaniu 78

Wstęp

Kompletacja zamówień jest najbardziej pracochłonnym i kosztotwórczym procesem magazynowym, pochłaniającym ponad połowę kosztów operacyjnych obiektu (De Koster, Le-Duc i Roodbergen, 2007, s. 481), a największą część jej czasu zajmuje nieprodukcyjne przemieszczanie się kompletującego, którego zakres zależy bezpośrednio od rozmieszczenia towaru w magazynie. Rozwój handlu elektronicznego, generujący rosnącą liczbę drobnych i rozproszonych zamówień, dodatkowo zwiększa znaczenie tego procesu dla efektywności całego obiektu. W tych warunkach sposób rozmieszczenia asortymentu przestaje być kwestią porządkową, a staje się czynnikiem wydajności, który można kształtować bez nakładów inwestycyjnych, samą zmianą przypisania towaru do lokalizacji.

Podjęcie tematu wynika z możliwości analitycznych, jakie daje dostęp do rzeczywistych danych operacyjnych. Autor pracy jest programistą systemu klasy WMS działającego w modelu SaaS, co pozwala prowadzić analizę wprost na danych historycznych produkcyjnej bazy systemu i ocenić efektywność procesu ilościowo, na podstawie zapisów, bez konieczności prowadzenia obserwacji w obiekcie. Dostępność danych tej skali i jakości jest w badaniach nad kompletacją rzadka, co czyni ją głównym motywem wyboru tematu.

Celem głównym pracy jest zbadanie wpływu obecnego rozmieszczenia asortymentu na wydajność procesu kompletacji oraz opracowanie projektu usprawnień polegającego na relokacji towarów, w oparciu o analizę danych historycznych z produkcyjnego systemu klasy WMS. Praca stawia hipotezę główną, zgodnie z którą oparta na danych relokacja asortymentu według częstości pobrań skraca czas kompletacji i stanowi efektywny kosztowo kierunek optymalizacji pracy magazynu, możliwy do wdrożenia bez ingerencji w jego infrastrukturę. Wynikające z celu głównego cele szczegółowe, pytania badawcze oraz rozwinięcie hipotezy głównej w hipotezy szczegółowe, wraz z ich przesłankami teoretycznymi, przedstawiono w rozdziale trzecim, poświęconym metodologii badań własnych.

Weryfikację hipotez oparto na analizie logów operacyjnych jednego magazynu obsługiwanego przez system, obejmujących pełny rok 2025. Klasyfikację rotacji przeprowadzono metodą ABC według częstości pobrań, a skutki relokacji oceniono w drodze symulacji na rzeczywistych listach kompletacyjnych, z zastosowaniem oceny poza próbą uczącą. Dobór tej metody oraz ograniczenie kryterium do częstości pobrań wynikają z rzeczywistej dostępności danych w badanym obiekcie, co uzasadniono w części metodologicznej.

Praca składa się z czterech rozdziałów. Rozdział pierwszy przedstawia teoretyczne aspekty logistyki magazynowej, charakterystykę procesów kompletacji oraz rolę systemów

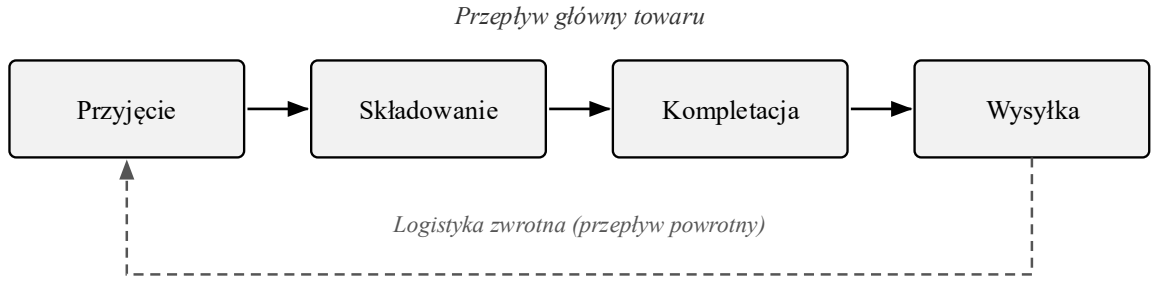
2026

klasy WMS w zarządzaniu przepływem towarów. Rozdział drugi omawia strategie rozmieszczenia towarów, analizę ABC oraz XYZ jako narzędzie klasyfikacji zapasów, a także wskaźniki efektywności procesu kompletacji. Rozdział trzeci zawiera charakterystykę badanego obiektu i opis źródła danych, a następnie cel, pytania i hipotezy badawcze wraz z metodami ich weryfikacji. Rozdział czwarty prezentuje badania własne: diagnozę stanu obecnego, analizę rotacji metodą ABC, weryfikację zależności między położeniem a rotacją oraz projekt relokacji wraz z symulacją oszczędności. Pracę zamyka zakończenie, w którym dokonano ostatecznej weryfikacji hipotez i przedstawiono wnioski wraz z kierunkami dalszych badań.

Rozdział 1. Teoretyczne aspekty logistyki magazynowej i systemów informatycznych

1.1. Rola magazynowania w nowoczesnym łańcuchu dostaw

Magazynowanie definiuje się jako pośrednie składowanie towarów pomiędzy dwoma kolejnymi etapami łańcucha dostaw, w którym obiekt pełni funkcję bufora wyrównującego różnice w tempie i wielkości przepływów (Boysen, De Koster i Weidinger, 2019, s. 396). Obiekt magazynowy realizuje cztery podstawowe funkcje: przyjęcie towaru, jego składowanie, kompletację zamówień oraz wysyłkę (Boysen, De Koster i Füßler, 2021, s. 361). Ich sekwencję wraz z przepływem powrotnym, charakterystycznym dla obsługi zwrotów, przedstawiono na Rysunku 1.1. Funkcje te występują w każdym łańcuchu dostaw niezależnie od branży, co czyni magazyn elementem nieodzownym, a nie opcjonalnym ogniwem dystrybucji. W ostatnich latach wymagania wobec magazynów najsilniej kształtuje segment sprzedaży internetowej B2C, na którym koncentruje się również uwaga badaczy (Boysen i in., 2021, s. 361). Zakres zadań przypisanych temu ogniwu nie jest jednak stały. Wymagania wobec magazynów wynikają z charakterystyki zamówień, które obiekt ma obsłużyć, a ta w ostatniej dekadzie uległa zasadniczej zmianie pod wpływem handlu elektronicznego.



Rysunek 1.1. Cztery podstawowe funkcje magazynu w przepływie towarów.
Źródło: opracowanie własne na podstawie Boysen i in. (2019, 2021).

Rozwój e-handlu postępuje równolegle w segmencie B2B (przedsiębiorstwo–przedsiębiorstwo) oraz B2C (przedsiębiorstwo–klient) i bezpośrednio zwiększa zapotrzebowanie na obiekty obsługujące zamówienia internetowe oraz zwroty (Richards, 2020, s. 17). Skala zjawiska jest wymierna. Udział e-commerce w globalnej sprzedaży detalicznej wzrósł z kilkunastu procent pod koniec ubiegłej dekady, szacowanych na 13,7% w 2019 roku przez jedne źródła (Boysen i in., 2021, s. 361) i 16% przez inne, do 20,1% w 2024 roku, przy wartości sprzedaży rzędu 6,4 bln USD (Oberlo, za: Red Stag Fulfillment, 2024). Prognozy zakładają dalszy wzrost udziału do 22,6% w 2027 roku (eMarketer, za: Red Stag Fulfillment, 2024). Mimo tej dynamiki

2026

handel stacjonarny pozostaje dominującym kanałem dystrybucji, odpowiadając wciąż za blisko cztery piąte światowych obrotów detalicznych. Na rynku polskim sprzedaż internetowa osiągnęła w 2025 roku obrót 91,971 mld zł, a jej udział w handlu detalicznym wzrósł do 9,1% wobec 8,9% rok wcześniej, przy dynamice 6,8% rok do roku (Krajowa Izba Gospodarcza, 2026). Zakupy online deklaruje 78% polskich internautów, co w analizach rynkowych interpretuje się jako wejście rynku w fazę dojrzałości, w której wzrost wynika z częstotliwości zakupów i wartości koszyka, a nie z napływu nowych kupujących (Gemius i in., 2025). Z tego względu rola magazynu kształtowana jest jednocześnie przez wymagania obu kanałów, a nie wyłącznie przez segment internetowy.

Różnica między kanałami sprowadza się do struktury obsługiwanych zamówień. Sprzedaż internetowa generuje zamówienia typu *low-volume-high-mix*: gospodarstwa domowe zamawiają niewielką liczbę sztuk z bardzo szerokiego asortymentu, podczas gdy centra dystrybucyjne sieci stacjonarnych przetwarzają zamówienia *high-volume-low-mix*, obejmujące wiele sztuk tej samej jednostki magazynowej (SKU) z węższego asortymentu (Boysen i in., 2021, s. 362). Zestawienie cech obu typów zamówień zawiera Tabela 1.1. Skalę rozdrobnienia zamówień B2C ilustruje średnia wielkość zamówienia w niemieckich magazynach Amazona, wynosząca zaledwie 1,6 sztuki (Boysen i in., 2019, s. 397). Do tego dochodzą trzy dalsze wymagania segmentu internetowego: szeroki asortyment napędzany efektem „długiego ogona", krótkie terminy realizacji obejmujące dostawy następnego lub tego samego dnia oraz silnie zmienne obciążenia o charakterze sezonowym (Boysen i in., 2019, s. 397). Tradycyjne magazyny w układzie *picker-to-parts*, które w 2007 roku stanowiły ponad 80% obiektów w Europie Zachodniej, słabo odpowiadają tym wymaganiom, ponieważ przy małych zamówieniach nieproduktywny czas przemieszczania się kompletującego rośnie nieproporcjonalnie do liczby pobranych sztuk (Boysen i in., 2019, s. 397).

Tabela 1.1

Porównanie charakterystyki zamówień w handlu internetowym (B2C) i stacjonarnym

Kryterium	Handel internetowy (B2C)	Handel stacjonarny
Struktura zamówień	*low-volume-high-mix*	*high-volume-low-mix*
Liczba pozycji na zamówienie	mała (średnio ok. 1,6–2 szt.)	wiele sztuk tego samego SKU
Asortyment	szeroki (efekt „długiego ogona”)	węższy, ograniczony powierzchnią sklepu
Terminy realizacji	krótkie (dostawa tego samego lub następnego dnia)	regularne, planowane uzupełnienia
Zmienność obciążenia	wysoka (sezonowość, szczyty sprzedaży)	bardziej przewidywalna
Poziom zwrotów	wysoki (do 40% dla części kategorii)	niski
Typowe rozwiązania magazynowe	picker-to-parts z automatyzacją, składowanie wymieszane, grupowanie i sortowanie	cross-docking, zautomatyzowana kompletacja jednostek opakowaniowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie Boysen i in. (2019) oraz Boysen i in. (2021).

Konsekwencje tej zmiany mają wymiar kosztowy. Odnajdywanie i pakowanie przedmiotów o niskiej wartości pochłania tę samą ilość pracy i sprzętu co obsługa przedmiotów wysokowartościowych, przy istotnie niższej marży, co czyni wydajne przetwarzanie dużej liczby pojedynczych zamówień jednym z głównych wyzwań operacyjnych magazynu (Richards, 2020, s. 19). Rosnąca liczba linii produktowych zwiększa presję na dostępność towaru, a jednocześnie zapasy wolnorotujące zajmują przestrzeń składową, co wymusza odejście od składowania podłogowego na rzecz antresol magazynowych oraz regałów przepływowych i karuzelowych (Richards, 2020, s. 19). Decyzja o budowie dedykowanego centrum obsługi zamówień internetowych ma charakter ekonomiczny: próg opłacalności takiego obiektu oszacowano na 200 000 zamówień przy powierzchni 1800–5500 m² (Savills, 2013, za: Richards, 2020, s. 19). Poniżej tego progu zamówienia internetowe obsługiwane są w ramach istniejącej infrastruktury handlu tradycyjnego.

Odrębnym obciążeniem magazynu obsługującego e-handel jest logistyka zwrotna. Zwroty mogą stanowić od 30 do 40% wielkości sprzedaży, a większość zwróconych towarów nadaje się do ponownego wprowadzenia do obiegu pod warunkiem przejścia kontroli jakości (Richards, 2020, s. 20). Niezależne szacunki wskazują wskaźniki zwrotów rzędu 20% i wyższe jako normę dla części kategorii produktowych, a dla pojedynczych jednostek magazynowych nawet przekraczające 80% (Boysen i in., 2019, s. 408). Aktualne dane potwierdzają ten rząd

2026

wielkości: średni wskaźnik zwrotów w handlu internetowym mieści się w przedziale 20–30%, a najwyższy poziom, około 26%, dotyczy odzieży. Samo przetworzenie zwrotu pochłania średnio około 59% ceny sprzedaży produktu (WiFiTalents, 2026). Obsługa zwrotów rodzi współzależności z procesem realizacji zamówień, ponieważ towary zwrócone często cechuje wysokie prawdopodobieństwo ponownego zamówienia w najbliższym czasie, co uzasadnia przypisanie im uprzywilejowanych lokalizacji składowych (Boysen i in., 2019, s. 408). Magazyn przestaje więc pełnić funkcję wyłącznie jednokierunkowego przepływu towaru w stronę klienta i staje się węzłem obsługującym także przepływ powrotny.

Przekształceniom podlega również struktura sieci magazynowej. Dążenie detalistów do redukcji zapasów w łańcuchu dostaw prowadzi do wzrostu liczby składów niemagazynowych, takich jak centra przeładunkowe i konsolidacyjne, oraz do rozwoju operacji cross-dockingowych (Richards, 2020, s. 17). Cross-docking pozostaje strukturalną przewagą handlu stacjonarnego, którego przewidywalny popyt pozwala kierować towar od dostawców bezpośrednio do sklepów z pominięciem składowania w centrum dystrybucji (Boysen i in., 2021, s. 377). Nacisk na redukcję zapasów i obniżenie kosztów transportu sprzyja przesuwaniu produkcji bliżej konsumenta oraz lokowaniu dużych magazynów w pobliżu portów wejścia, a pogłębiona współpraca pozioma i pionowa w łańcuchu dostaw prowadzi do konsolidacji obiektów i wzrostu operacji współużytkowanych (Richards, 2020, s. 17). W dłuższej perspektywie kierunek ten wyznaczają mikro-centra realizacji zamówień (*micro-fulfillment centers*) oraz autonomiczne środki transportu, wymagające kadry kompetentnej w analizie danych i technologiach cyfrowych (Raj i Thandayudhapani, 2024, s. 5). Równolegle upowszechnia się model omni-channel, w którym ten sam obiekt obsługuje zarówno drobne zamówienia internetowe, jak i duże zamówienia sklepowe. Rozwiązania wahają się od magazynów zintegrowanych, pozwalających łączyć zapas i transport, po struktury rozdzielone dla każdego kanału lub równoległe systemy magazynowe w obrębie jednego centrum (Boysen i in., 2021, s. 377). Wybór wariantu zależy od stopnia, w jakim struktury zamówień internetowych i sklepowych różnią się od siebie.

Praktyka wyodrębniła trzy modele obsługi zamówień internetowych. Pierwszym jest obsługa zintegrowana, w której zamówienia online realizowane są łącznie z tradycyjnymi formami sprzedaży. Drugim jest obsługa wyspecjalizowana, prowadzona w obiektach dedykowanych wyłącznie sprzedaży internetowej. Trzecim jest obsługa sklepowa, polegająca na pobraniu zamówionego towaru bezpośrednio z półki sklepu detalicznego (Richards, 2020, s. 20). Model sklepowy dominował we wczesnej fazie rozwoju e-sprzedaży, lecz przy większej skali operacji okazuje się mniej skuteczny (Richards, 2020, s. 21). Brak uniwersalnego wzorca zagospodarowania przestrzeni dla centrum obsługi zamówień internetowych sprawia, że różni

2026

przedsiębiorcy stosują odmienne strategie: od własnych systemów zdolnych przetwarzać skrajnie zróżnicowane wysyłki po przechowywanie zapasów internetowych i tradycyjnych w jednym obiekcie w celu lepszego wykorzystania powierzchni (Richards, 2020, s. 20).

Wraz z rozdrobnieniem zamówień rośnie znaczenie integracji informacyjnej między uczestnikami łańcucha dostaw. Skuteczna realizacja zamówień B2C wymaga przepływu danych między detalistami, dostawcami, operatorami logistycznymi i platformami technologicznymi, co warunkuje pełną widoczność procesu (*end-to-end visibility*), śledzenie przesyłek w czasie rzeczywistym oraz sprawne podejmowanie decyzji (Raj i Thandayudhapani, 2024, s. 2). Wymóg ten oddziałuje na warstwę organizacyjną samego magazynu. Aby sprostać charakterystyce zamówień internetowych, obiekty wdrażają rozwiązania automatyczne, takie jak zautomatyzowane stanowiska kompletacyjne czy systemy z udziałem robotów, oraz adaptacje organizacyjne obejmujące składowanie wymieszane (*mixed-shelves*), dynamiczne przetwarzanie zamówień oraz grupowanie, strefowanie i sortowanie (Boysen i in., 2019, s. 396). W magazynach obsługujących sieci stacjonarne stosowane są z kolei systemy dostosowane do zamówień *high-volume-low-mix*, w tym w pełni zautomatyzowana kompletacja jednostek opakowaniowych (Boysen i in., 2021, s. 361). Dobór konkretnego rozwiązania pozostaje zależny od struktury zamówień, asortymentu oraz wymaganej przepustowości obiektu.

Na rolę magazynu oddziałują dodatkowo wymagania środowiskowe oraz dostępność siły roboczej. Regulacje prawne wymuszają neutralność emisyjną obiektów, czego przykładem jest centrum dystrybucji sieci John Lewis w Wielkiej Brytanii, w którym uzyskano 18-procentową redukcję kosztów zużycia energii, 45-procentową redukcję kosztów zużycia wody oraz 40-procentową redukcję kosztów emisji CO_2, co przyniosło roczną oszczędność rzędu 250 000 GBP (Richards, 2020, s. 18). Ewolucja logistyki e-handlu wiąże się ponadto z upowszechnieniem outsourcingu do operatorów logistycznych (3PL), automatyzacji i robotyzacji operacji magazynowych oraz alternatywnych metod dostawy ostatniej mili, a w warstwie środowiskowej z pojazdami elektrycznymi i zasadami gospodarki obiegowej (Raj i Thandayudhapani, 2024, s. 3, 45). Automatyzacja nie eliminuje czynnika ludzkiego: starzenie się siły roboczej w krajach uprzemysłowionych przesuwa uwagę ku ergonomii stanowisk oraz współpracy pracowników z rozwiązaniami zautomatyzowanymi (Boysen i in., 2021, s. 378). Spośród wszystkich funkcji magazynowych to kompletacja zamówień skupia opisane wyżej naciski (rozdrobnienie zamówień, presję czasu i koszt pracy), co czyni ją procesem decydującym o efektywności całego obiektu i uzasadnia jej szczegółową analizę w kolejnym podrozdziale.

2026

1.2. Charakterystyka i rodzaje procesów kompletacji (order picking)

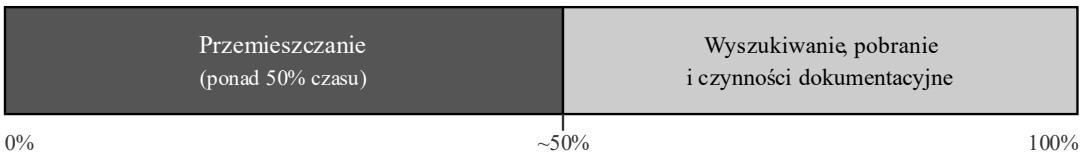
Proces magazynowy definiuje się jako zbiór operacji magazynowych ułożonych w porządku chronologicznym i wykonywanych według przyjętej technologii (Niemczyk, 2015, za: Horeva, 2022, s. 41). Dzieli się on na cztery następujące po sobie fazy: przyjmowanie, składowanie, kompletowanie oraz wydawanie (Niemczyk, 2015, za: Horeva, 2022, s. 41). Kompletowanie (ang. *order picking*) polega na pobraniu jednostek asortymentowych z miejsc składowania w celu zestawienia ich zgodnie z zamówieniem klienta i przekazania do wydania. Faza ta jest powiązana z pozostałymi: jej przebieg zależy od sposobu rozmieszczenia towaru w fazie składowania, a jej wynik warunkuje terminowość wydania. Z tego względu kompletacja jest punktem, w którym decyzje o organizacji magazynu bezpośrednio wpływają na czas i koszt obsługi zamówienia.

Kompletowanie należy do szerszego zbioru czynności składających się na magazynowanie, rozumiane jako zespół działań obejmujących czasowe przyjmowanie, składowanie, kompletowanie, przemieszczanie, konserwację, ewidencjonowanie, kontrolowanie i wydawanie dóbr materialnych (Niemczyk, 2015, za: Horeva, 2022, s. 41). Sam magazyn definiuje się jako jednostkę funkcjonalno-organizacyjną przeznaczoną do przechowywania zapasów w wyodrębnionej przestrzeni, według ustalonej technologii i przy użyciu odpowiednich środków technicznych (PN-N-01800:1984, za: Horeva, 2022, s. 41). Obiekt ten pełni funkcję pomocniczą wobec procesów głównych łańcucha logistycznego, a do jego podstawowych funkcji zalicza się regulowanie wahań popytu i podaży, wspieranie procesów produkcyjnych przez utrzymywanie zapasów, zmniejszanie kosztów transportu dzięki konsolidacji dostaw w większe partie oraz wspieranie działań marketingowych przez gromadzenie zapasów na potrzeby akcji promocyjnych (Murphy i Wood, 2011, za: Horeva, 2022, s. 42). Spośród wymienionych czynności to kompletacja wytwarza bezpośrednią wartość dla klienta przez fizyczne zestawienie zamówienia, a jako najbardziej pracochłonna ma zarazem dominujący udział w kosztach operacyjnych.

Znaczenie kompletacji wynika z jej udziału w kosztach. Od dawna wskazywana jest ona jako najbardziej pracochłonna i kosztowna czynność magazynu, pochłaniająca nawet 55% całkowitych kosztów operacyjnych obiektu (De Koster i in., 2007, s. 481), a według nowszych szacunków od 55 do 75% (Li, Zhang i Jiang, 2022, s. 1813; Suppini i in., 2024). Wewnątrz samego procesu największą część czasu pochłania przemieszczanie się kompletującego: na przejścia między lokalizacjami przypada ponad połowa czasu kompletacji (Masae, Glock i Grosse, 2020; Li i in., 2022, s. 1813), podczas gdy pozostałą część stanowią wyszukiwanie,

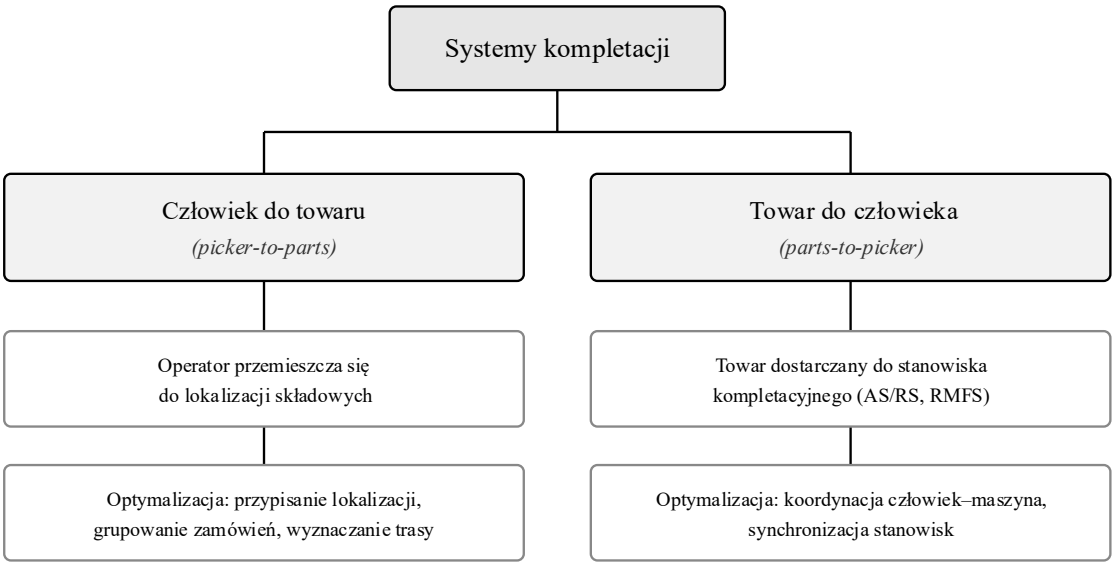
2026

pobranie i czynności dokumentacyjne. Strukturę czasu w cyklu kompletacji przedstawiono na Rysunku 1.2. Przemieszczanie jest pracą nieprodukcyjną, niewnoszącą wartości do zamówienia, co czyni je pierwszym celem optymalizacji. Skalę możliwych usprawnień ilustruje analiza przedsiębiorstwa dystrybucyjnego, w którym czas kompletacji jednego zamówienia wynosił od 16 do 20 minut, a zaproponowane zmiany organizacyjne pozwoliły skrócić go o 79% (Horeva, 2022, s. 51).



Rysunek 1.2. Struktura czasu w cyklu kompletacji.
Źródło: opracowanie własne na podstawie De Koster i in. (2007) oraz Masae i in. (2020).

Systemy kompletacji dzielą się na dwie zasadnicze klasy ze względu na kierunek przepływu między towarem a operatorem. Ich podział wraz z właściwymi im strategiami optymalizacji przedstawiono na Rysunku 1.3. W systemie „człowiek do towaru" (*picker-to-parts*) operator przemieszcza się do kolejnych lokalizacji składowych i pobiera z nich zamówione jednostki. W systemie „towar do człowieka" (*parts-to-picker*) to towar jest dostarczany do stanowiska kompletacyjnego za pomocą układów automatycznych (Li i in., 2022, s. 1813). Pierwszy układ historycznie dominuje, a wysiłek optymalizacyjny koncentruje się w nim na strategiach przypisania lokalizacji składowych (*storage assignment*) oraz grupowania zamówień (*order batching*) (Li i in., 2022, s. 1827). Drugi układ opiera się na zautomatyzowanych systemach składowania i pobierania (AS/RS) oraz systemach realizacji z mobilnymi robotami (RMFS), w których kluczowym zagadnieniem badawczym jest koordynacja współpracy człowieka z maszyną oraz synchronizacja stanowisk kompletacyjnych (Li i in., 2022, s. 1827). Rozwiązanie „towar do człowieka" ogranicza przemieszczanie się personelu do minimum, co zmniejsza liczbę błędów, skraca czas wydań oraz poprawia ergonomię pracy (Olewińska i Rosińska, 2023, s. 117).



Rysunek 1.3. Klasyfikacja systemów kompletacji według kierunku przepływu.
Źródło: opracowanie własne na podstawie Li i in. (2022).

Klasyczny przegląd literatury wyodrębnia w kompletacji manualnej pięć podstawowych problemów decyzyjnych: projekt układu magazynu (*layout*), przypisanie lokalizacji składowych, grupowanie zamówień (*batching*), strefowanie (*zoning*) oraz wyznaczanie trasy kompletującego (*routing*) (De Koster i in., 2007, s. 482). Mimo praktycznej dominacji systemów „człowiek do towaru" to właśnie one doczekały się mniej opracowań niż układy zautomatyzowane (mniej niż 30% analizowanych prac), co wiąże się z ich złożonością i różnorodnością (De Koster i in., 2007, s. 497). W układzie tym strategie optymalizacji dzielą się na pojedyncze oraz złożone, łączące kilka reguł jednocześnie. Najczęściej analizowane są grupowanie zamówień oraz przypisanie lokalizacji składowych, a w ostatnich latach uwagę badaczy przyciąga także strategia podziału zamówień (*order splitting*) oraz łączne harmonogramowanie kompletacji i dostawy (Li i in., 2022, s. 1827). Głównym ograniczeniem tego układu pozostaje nieproduktywny czas przejść, który przy małych zamówieniach rośnie nieproporcjonalnie do liczby pobranych sztuk. System „towar do człowieka" rozwinął się jako odpowiedź na to ograniczenie. Automatyzację magazynów zapoczątkowało uruchomienie w 2006 roku w Niemczech magazynu jednostek ładunkowych, w którym system AS/RS składował zapas na paletach lub w pojemnikach w układzie *miniload* (Li i in., 2022, s. 1813). Kolejnym etapem są mobilne roboty współpracujące z ruchomymi regałami, dzięki którym operator nie musi wchodzić do strefy składowania, a pobrany towar szybciej trafia do pakowania (Li i in., 2022, s. 1813). W tych systemach przedmiotem optymalizacji są wzajemne zależności i koordynacja między

2026

pracownikami, robotami, stanowiskami kompletacyjnymi a regałami, przy czym większość celów sprowadza się do redukcji czasu i kosztu kompletacji (Li i in., 2022, s. 1827).

Niezależnie od klasy systemu kompletację różnicuje liczba zamówień obsługiwanych w jednym przejściu. W strategii kompletacji pojedynczych zamówień (*pick-by-order*) każda trasa odpowiada jednemu zamówieniu klienta, natomiast w kompletacji grupowej (*pick-by-article*, *batch picking*) operator pobiera w jednym przejściu pozycje dla wielu zamówień jednocześnie, co skraca łączną drogę kosztem konieczności późniejszego sortowania (Suppini i in., 2024). Na opłacalność wyboru między tymi strategiami wpływają cztery czynniki: kształt strefy składowania (*shape factor*), położenie punktu wejścia–wyjścia (*input–output point*), polityka wyznaczania trasy (*routing policy*) oraz polityka przypisania lokalizacji składowych (*storage location assignment*) (Suppini i in., 2024). Spośród nich szczególnie intensywnie badane jest wyznaczanie trasy kompletującego, stanowiące szczególny przypadek problemu komiwojażera (TSP). W praktyce przeważają reguły heurystyczne, prostsze we wdrożeniu i mniej podatne na odstępstwa pracowników niż algorytmy optymalne, które jednak osiągają zbliżoną skuteczność (Masae, Glock i Grosse, 2020). Symulacja obejmująca 1260 konfiguracji magazynu wykazała, że znaczenie tych czynników zależy od długości listy kompletacyjnej: przy długich listach decydujące są zmienne organizacyjne, czyli polityki kompletacji i rozmieszczenia, podczas gdy przy krótkich listach istotny wpływ na wynik ma układ przestrzenny obiektu (Suppini i in., 2024). Wniosek ten ma charakter operacyjny: przy dużych zamówieniach poprawę uzyskuje się bez kosztownej przebudowy magazynu, modyfikując same reguły zarządzania.

Na czas kompletacji oddziałuje również sposób przypisania towaru do lokalizacji składowych. Badania nad przypisaniem lokalizacji składowych obejmują układy nietradycyjne, w tym magazyny o kształcie litery V oraz strategię składowania klasowego (*class-based storage*), w której towar rozmieszcza się według intensywności rotacji w celu skrócenia przebywanych tras (Suppini i in., 2024). Kompletacja pozostaje powiązana z procesem uzupełnień (*replenishment*): gdy uzupełnianie prowadzone jest równolegle z pobieraniem, konieczne staje się priorytetyzowanie pozycji tak, aby ograniczyć braki w trakcie kompletacji (Suppini i in., 2024). W jednym obiekcie stosuje się równolegle różne systemy składowania, na przykład pełnopaletowe oraz regały przepływowe wysokiego zagęszczenia (Suppini i in., 2024). Skrócenie przebywanych tras obniża nie tylko koszty operacyjne, lecz także zużycie zasobów, zgodnie z celami zrównoważenia środowiskowego (Suppini i in., 2024). Powiązanie rozmieszczenia towaru z czasem kompletacji stanowi bezpośrednią przesłankę problemu badawczego podjętego w niniejszej pracy.

2026

Dobór metody kompletacji wynika z charakterystyki obsługiwanych zamówień. Omówione w podrozdziale 1.1 cechy zamówień B2C (małe rozmiary, szeroki asortyment, krótkie terminy realizacji oraz zmienne obciążenia) bezpośrednio rzutują na wybór systemu i strategii kompletacji (Boysen i in., 2019, s. 397). Rozdrobnienie zamówień potwierdzają zbieżne pomiary, sytuujące średnią liczbę pozycji w zamówieniu w przedziale od 1,6 do około 2 sztuk (Boysen i in., 2019, s. 397; Weidinger i Boysen, za: Li i in., 2022, s. 1813). Przy tak niskiej liczbie pozycji na zamówienie udział nieprodukcyjnego przemieszczania rośnie, co uzasadnia stosowanie kompletacji grupowej oraz rozwiązań automatycznych. Wzrost liczby zamówień e-commerce w okresach szczytowych, takich jak Boże Narodzenie czy Black Friday, dodatkowo zaostrza wymóg skracania czasu nieprodukcyjnego (Li i in., 2022, s. 1813). Optymalizacja procesu może być przy tym różnicowana według segmentów e-handlu (B2C, B2B oraz C2C), których zamówienia różnią się strukturą, a dalsze kierunki doskonalenia obejmują uwzględnianie dynamicznych niepewności, takich jak chwilowe zatłoczenie magazynu, oraz łączenie systemów zautomatyzowanych z różnymi strategiami kompletacji (Li i in., 2022, s. 1828).

Identyfikacja rezerw czasowych w kompletacji opiera się na metodach diagnostycznych. W analizie przedsiębiorstwa dystrybucyjnego zastosowano mapowanie procesów, analizę „5 razy dlaczego” oraz diagram przyczynowo-skutkowy, uzupełnione obserwacją i wywiadami z wykonawcami procesów (Horeva, 2022, s. 40). Celem takiego postępowania jest ocena efektywności przebiegu procesów oraz ich racjonalizacja, dla której opracowuje się wskaźniki pozwalające zmierzyć skutki wprowadzonych zmian (Horeva, 2022, s. 40). Dla porównania czas przyjęcia dostawy w tym samym obiekcie wynosił od 30 do 50 minut i został skrócony o 55% (Horeva, 2022, s. 51). Obie fazy wykazują zatem potencjał usprawnień, przy czym to kompletacja, ze względu na omówiony wcześniej udział w kosztach operacyjnych, pozostaje priorytetowym obszarem optymalizacji. Presję na skracanie czasów dodatkowo zwiększa model *quick commerce*, w którym realizacja zamówienia nie może przekraczać kilku godzin, a wymóg efektywności łączy się z wymogiem zrównoważenia ekonomicznego i społecznego, w tym ergonomicznego (Suppini i in., 2024). Skuteczna realizacja opisanych strategii wymaga ścisłej koordynacji wszystkich etapów procesu, a tę zapewnia warstwa informatyczna magazynu, której poświęcony jest kolejny podrozdział.

1.3. Systemy klasy WMS i ich rola w zarządzaniu przepływem towarów

System klasy WMS (ang. *Warehouse Management System*) definiowany jest jako aplikacja wspomagająca zarządzanie i inteligentne wykonywanie operacji magazynu, centrum dystrybucji lub centrum realizacji zamówień, wykorzystująca urządzenia mobilne, kody kreskowe

2026

oraz technologie RFID i czujnikowe jako transakcyjny fundament zarządzania magazynem (Gartner, 2026). Wspomaga on obsługę procesów magazynowych i jest zintegrowany z systemami klasy ERP (Grabińska, Pawełoszek i Ziora, 2020, s. 88). Obsługuje on przyjmowanie, przechowywanie oraz wydawanie materiałów w oparciu o obowiązujące dowody obrotu materiałowego, takie jak przyjęcie zewnętrzne (PZ), wydanie zewnętrzne (WZ) czy przesunięcie międzymagazynowe (MM), a ponadto kontroluje przebieg procesów magazynowych, rozmieszczenie towarów oraz dysponowanie miejscami składowymi przeznaczonymi dla określonego typu asortymentu (Grabińska i in., 2020, s. 88). System odwzorowuje zatem opisane wcześniej fazy procesu magazynowego w warstwie informatycznej i wiąże decyzje o lokalizacji towaru z dokumentacją obrotu.

Zakres dowodów obrotu obsługiwanych przez system obejmuje, poza przyjęciem zewnętrznym (PZ) i wydaniem zewnętrznym (WZ), także przyjęcie zewnętrzne bezpośrednie (PZB), zlecenie przyjęcia zewnętrznego (ZPZ), przyjęcie wewnętrzne (PW) oraz zwrot wydania zewnętrznego (ZWZ) (Grabińska i in., 2020, s. 88). System zabezpiecza ponadto materiały przyjęte do magazynu przed kradzieżą, zniszczeniem lub uszkodzeniem oraz umożliwia dodawanie asortymentu, prowadzenie bazy kontrahentów i przewoźników, eksport i import kartotek, a także rozliczanie kosztów. Całość uzupełnia kokpit menedżerski z narzędziami wizualizacji danych (*dashboard*) (Grabińska i in., 2020, s. 88). Funkcje te przenoszą ewidencję i kontrolę obrotu z poziomu dokumentacji papierowej do jednego środowiska informatycznego, w którym każda operacja pozostaje powiązana z konkretnym dokumentem i lokalizacją.

Funkcjonalność systemu organizują wyodrębnione moduły: obsługa dostaw i wysyłek, nadzór wejściowy i wyjściowy, wspomaganie spedycji, inwentaryzacja, raporty oraz klasyfikacja towarów według metod ABC i XYZ (Grabińska i in., 2020, s. 89). Do najważniejszych funkcji systemu zalicza się redukcję czasu poświęconego na dostarczanie i zamawianie towarów, maksymalizację wykorzystania powierzchni magazynu, podniesienie obrotu zapasów, redukcję popełnianych błędów, ułatwiony dostęp do danych oraz automatyzację procesu inwentaryzacji (Grabińska i in., 2020, s. 89). Wbudowana klasyfikacja ABC/XYZ to narzędzie bezpośrednio powiązane z rozmieszczeniem towarów, analizowane szczegółowo w rozdziale drugim.

Uzasadnieniem dla informatyzacji kompletacji jest jej udział w kosztach operacyjnych magazynu, oszacowany w podrozdziale 1.2 na ponad połowę i potwierdzany niezależnie wartościami sięgającymi 60% (Wasp Barcode Technologies, za: Olewińska i Rosińska, 2023, s. 120). Wizja magazynu przyszłości zakłada robotyzację czynności logistycznych oraz automatyzację procesów decyzyjnych za pomocą systemu WMS, którego zadaniem jest

ograniczenie liczby błędów typowych dla zarządzania ręcznego (Olewińska i Rosińska, 2023, s. 122). Niezmienne pozostają fundamentalne cele logistyczne: zwiększenie wydajności, obniżenie kosztów operacyjnych oraz utrzymanie wysokiej jakości obsługi. Ich realizacja, wobec rozwoju e-handlu i presji na krótkie czasy dostaw, staje się jednak coraz trudniejsza (Olewińska i Rosińska, 2023, s. 122).

Rola systemu uwidacznia się w koordynacji zautomatyzowanych metod kompletacji. W układzie „towar do człowieka" WMS integruje i synchronizuje przepływ poszczególnych procesów automatycznych, a operatorowi przy stanowisku kompletacyjnym sygnalizuje na terminalu kolejne operacje do wykonania (Olewińska i Rosińska, 2023, s. 117). Autonomiczne pojazdy AGV poruszają się po magazynie dzięki współdziałaniu systemów naprowadzania z oprogramowaniem sterującym, takim jak system kontroli magazynu (WCS) lub WMS (Olewińska i Rosińska, 2023, s. 117). Pojazdy te wyposaża się w środki bezpieczeństwa, takie jak zderzaki, inteligentne skanery i czujniki wykrywające ruch, chroniące pracowników, ładunki oraz same wózki (Olewińska i Rosińska, 2023, s. 117). W kompletacji głosowej (*pick-by-voice*) system WMS kontroluje przebieg pracy, wyznaczając najszybszą ścieżkę i kolejność pobierania towarów, a operator otrzymuje instrukcje przez słuchawkę i potwierdza ich wykonanie głosowo, dzięki czemu zachowuje wolne ręce i nie musi sprawdzać listy kompletacyjnej (Olewińska i Rosińska, 2023, s. 120). Metodę tę opracowano już około 1995 roku, lecz dopiero dostęp do nowszych technologii uczynił ją opłacalną przy stosunkowo niskich nakładach inwestycyjnych (Olewińska i Rosińska, 2023, s. 121). Sprawdza się ona szczególnie w magazynach, w których użycie terminali radiowych jest utrudnione, na przykład w warunkach ujemnych temperatur wymagających pracy w rękawicach (Olewińska i Rosińska, 2023, s. 121). Połączenie kompletacji głosowej z sygnalizacją świetlną *pick-by-light* pozwoliło w badaniach przyspieszyć kompletację o 19% oraz wyeliminować do 67% pomyłek (Olewińska i Rosińska, 2023, s. 121). Dynamikę wdrożeń tej metody potwierdza prognozowane tempo wzrostu rynku systemów kompletacji głosowej, oszacowane na 14,7% rocznie, z wartością przekraczającą 3 mld USD w 2025 roku (Olewińska i Rosińska, 2023, s. 121).

Architektura dostarczania systemu przesuwa się z modelu instalacji lokalnej (*on-premise*) ku modelowi chmurowemu. Tradycyjne systemy instalowane lokalnie wymagały znacznych nakładów początkowych na sprzęt, oprogramowanie i infrastrukturę informatyczną, były kosztowne w utrzymaniu i mało elastyczne wobec zmieniających się potrzeb przedsiębiorstwa (Apps Insight, 2024). Przykładem rozwiązania działającego w chmurze obliczeniowej jest system WMS.net, obsługujący między innymi magazyny wysokiego składowania (Grabińska i in., 2020, s. 88). W modelu SaaS (ang. *Software as a Service*) system udostępniany jest przez

2026

internet w formule rozliczeniowej *pay-as-you-go*, co eliminuje nakłady na infrastrukturę sprzętową, zapewnia skalowalność wraz ze wzrostem działalności oraz automatyczne aktualizacje oprogramowania po stronie dostawcy (Apps Insight, 2024). Chmura stała się preferowanym modelem wdrożenia WMS: wybiera ją ponad 85% nowych klientów, o ile uzasadnia to rachunek ekonomiczny, choć ze względu na dużą bazę instalacji lokalnych dotychczas wdrożono w tym modelu nieco ponad 35% systemów, w tym około 15% w chmurze wielodostępnej (Gartner, 2026). Model SaaS umożliwia dostęp do danych w czasie rzeczywistym oraz integrację z innymi systemami chmurowymi, w tym ERP i CRM, co tworzy spójny przepływ informacji w organizacji (Apps Insight, 2024). Skalę i dynamikę rynku odzwierciedlają aktualne prognozy: wartość globalnego rynku systemów WMS oszacowano na 4,57 mld USD w 2025 roku, z projekcją wzrostu do 10,04 mld USD w 2030 roku przy średniorocznej stopie wzrostu (CAGR) 17,1%. Najszybciej rośnie segment rozwiązań chmurowych, najatrakcyjniejszych dla małych i średnich przedsiębiorstw oraz firm e-commerce (MarketsandMarkets, 2025). Niezależne szacunki Gartnera sytuują wartość rynku na poziomie blisko 3,5 mld USD w 2025 roku, przy prognozowanej pięcioletniej stopie wzrostu wyrażającej się liczbą dwucyfrową (Gartner, 2026). Rozbieżność wartości wynika z odmiennych zakresów definicyjnych obu analiz, lecz oba źródła wskazują ten sam kierunek: dwucyfrowy wzrost napędzany w znacznej mierze migracją do modelu chmurowego.

Model SaaS przenosi na dostawcę odpowiedzialność za obszary, które w instalacji lokalnej obciążały przedsiębiorstwo. Bezpieczeństwo danych zapewniane jest poprzez szyfrowanie, uwierzytelnianie wieloskładnikowe oraz regularne audyty, a systemy dostosowywane są do zgodności z regulacjami obowiązującymi w różnych regionach, co nabiera znaczenia przy działalności transgranicznej (Apps Insight, 2024). Cyberbezpieczeństwo i niezawodność stały się przy tym rosnącym przedmiotem troski klientów systemów WMS, przy czym dla wdrożeń realizowanych na publicznych chmurach głównych dostawców infrastruktury nie odnotowano dotąd naruszeń bezpieczeństwa, mimo incydentów dotykających część starszych instalacji (Gartner, 2026). Rosnącym wymaganiem jest możliwość konfiguracji systemu do specyfiki konkretnego magazynu, obejmująca własne raporty, integrację z innym oprogramowaniem oraz reguły automatyzacji przepływu pracy. Adaptowalność, rozszerzalność i komponowalność (*composability*) rozwiązania należą obecnie do kluczowych kryteriów oceny systemów WMS (Gartner, 2026). Dostępność mobilna i zdalna pozwala natomiast zarządzać operacjami oraz danymi z dowolnej lokalizacji, co usprawnia współpracę zespołów obsługujących wiele magazynów lub działających w różnych regionach (Apps Insight, 2024).

Dostęp do danych w czasie rzeczywistym oraz skalowalność modelu zwiększają zdolność szybkiego, popartego informacją podejmowania decyzji i pozwalają rozszerzać działalność bez znaczących nakładów kapitałowych, a wspólna platforma umożliwia współpracę między działami oraz z partnerami zewnętrznymi, dzięki czemu przedsiębiorstwo szybciej reaguje na zmiany popytu (Apps Insight, 2024). Z perspektywy badanego podmiotu, dostawcy systemu WMS w modelu SaaS, właściwości te oznaczają, że dane operacyjne wielu magazynów gromadzone są w jednym, scentralizowanym środowisku, co tworzy podstawę do ich systematycznej analizy.

Czynnikami napędzającymi rozwój rynku WMS są rosnący popyt na automatyzację, przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym oraz optymalizację łańcucha dostaw (MarketsandMarkets, 2025). Kierunki te, formułowane w analizach rynkowych i wymagające jeszcze weryfikacji empirycznej, konkretyzują się w technologiach przetwarzania danych. Sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe wykorzystywane są do prognozowania popytu, optymalizacji poziomów zapasów oraz automatyzacji rutynowych zadań, takich jak inwentaryzacja, w której algorytmy szybciej i dokładniej zliczają stany niż kontrola ręczna. Uczenie się modeli na danych historycznych poprawia trafność prognoz w czasie, ograniczając zarówno nadmiar, jak i braki magazynowe (Apps Insight, 2024). Najnowsze kierunki obejmują agentową sztuczną inteligencję (*agentic AI*), generatywną AI wspierającą wyszukiwanie danych i obsługę użytkownika (w tym chatboty pozwalające konwersacyjnie odpytywać system) oraz systemy wizyjne AI w magazynie, podczas gdy niedobory siły roboczej dodatkowo napędzają wdrożenia robotyki wewnątrzmagazynowej i autonomicznych robotów mobilnych (Gartner, 2026).

Pozostałe, wskazywane głównie przez dostawców kierunki rozwoju mają charakter prognoz branżowych wymagających jeszcze weryfikacji empirycznej: integracja z internetem rzeczy (IoT) i znacznikami RFID dla bieżącej aktualizacji stanów bez ręcznego wprowadzania danych, niezmienialne rejestry typu blockchain zwiększające identyfikowalność towaru w przypadku wycofań z rynku, a także funkcje wspierające zrównoważony rozwój przez ograniczanie marnotrawstwa oraz śledzenie zużycia energii i emisji w magazynie (Apps Insight, 2024).

W ujęciu całościowym odpowiednio dobrana i racjonalnie wdrożona automatyzacja przestała być opcją, a stała się warunkiem utrzymania pozycji konkurencyjnej, przy czym magazyn przyszłości zakłada nie tylko wdrażanie nowych rozwiązań, lecz także bieżącą analizę osiąganych wyników (Olewińska i Rosińska, 2023, s. 121). Wspólnym mianownikiem opisanych kierunków rozwoju jest gromadzenie i przetwarzanie danych operacyjnych: system WMS

rejestruje przebieg każdej operacji magazynowej, w tym znaczniki czasu oraz identyfikatory lokalizacji i jednostek asortymentowych, co pozwala odtworzyć rzeczywisty przebieg kompletacji bez konieczności prowadzenia obserwacji bezpośredniej. Czyni to system źródłem danych do analizy efektywności procesów, a właściwość ta jest podstawą metodyczną badań własnych prowadzonych w dalszej części pracy.

Rozdział 2. Metody optymalizacji rozmieszczenia towarów i pomiaru efektywności

2.1. Strategie rozmieszczenia towarów w magazynie (składowanie stałe vs losowe)

Rozmieszczenie towaru w przestrzeni składowej stanowi jeden z pięciu podstawowych problemów decyzyjnych kompletacji manualnej, wymienionych w podrozdziale 1.2 obok projektu układu, grupowania zamówień, strefowania i wyznaczania trasy (De Koster i in., 2007, s. 482). W literaturze ujmuje się je jako problem przypisania lokalizacji składowych (ang. *storage location assignment problem*, SLAP), czyli alokację jednostek asortymentowych do miejsc składowych, która optymalizuje koszty manipulacji lub wykorzystanie przestrzeni przy ograniczeniach pojemności, dostępności miejsc oraz polityki wydań (Reyes, Solano-Charris i Montoya-Torres, 2019, s. 199). Problem jest złożony obliczeniowo: przy liczbie produktów równej liczbie miejsc sprowadza się do zagadnienia przydziału kwadratowego, a w ogólności zalicza się do klasy NP-trudnej, przez co przeszukanie wszystkich wariantów rozmieszczenia jest w praktyce niewykonalne (Reyes i in., 2019, s. 199–200; Lorenc, 2014, s. 3840). Przypisanie lokalizacji oddziałuje na pozostałe decyzje kompletacji i uchodzi za tę spośród nich, która wnosi największą poprawę wydajności, ponieważ bezpośrednio kształtuje drogę pokonywaną przez kompletującego (Islam i Uddin, 2024, s. 126). Przypisanie lokalizacji łączy trzy cele: podniesienie efektywności operacyjnej, obniżenie kosztu składowania oraz minimalizację drogi kompletacji (Islam i Uddin, 2023, s. 295), a miary stosowane do jego oceny obejmują efektywność operacyjną, wykorzystaną przestrzeń i pokonaną odległość, czas, czynnik ludzki oraz koszty manipulacji (Reyes i in., 2019, s. 219). Problem ten występuje w różnych kontekstach logistycznych, od magazynów surowców po centra dystrybucji, a w literaturze bywa określany zamiennie jako przydział lokalizacji, alokacja produktów lub slotting, mimo braku ujednoliconej terminologii (Reyes i in., 2019, s. 199, 219). Strategie rozmieszczenia różnią się sposobem, w jaki wiążą produkt z lokalizacją, oraz kryterium, według którego to wiązanie ustalają.

Dwie graniczne strategie wyznaczają składowanie losowe i składowanie stałe. W składowaniu losowym (ang. *random storage*) przyjmowany towar trafia do dowolnej wolnej lokalizacji, co zapewnia wysokie wykorzystanie przestrzeni, lecz obniża wydajność kompletacji, gdyż ten sam asortyment może znaleźć się w różnych, przypadkowych miejscach (Islam i Uddin, 2024, s. 126). W składowaniu stałym, nazywanym również dedykowanym (ang. *dedicated storage*), każdej jednostce asortymentowej przypisuje się z góry ustaloną lokalizację, zarezerwowaną dla niej także wtedy, gdy jej stan spadnie do zera (Islam i Uddin, 2024, s. 126).

Rozwiązanie to zapewnia przewidywalność i pozwala pracownikom zapamiętać położenie towarów, jednak rezerwacja miejsc dla pozycji chwilowo niedostępnych obniża wykorzystanie przestrzeni składowej. Napięcie między tymi dwoma celami, wysokim wykorzystaniem przestrzeni a krótkim czasem cyklu kompletacji, porządkuje pozostałe strategie, które sytuują się między biegunami (Reyes i in., 2019, s. 199). Podstawowa typologia wywodzi się z klasycznych prac nad automatycznymi systemami składowania, w których wyodrębniono składowanie losowe, dedykowane i klasowe, uzupełnione następnie o politykę najbliższego wolnego miejsca oraz politykę rotacji zapasu, lokującą towary o najwyższych wskaźnikach sprzedaży możliwie blisko stref przyjęć i wydań (Reyes i in., 2019, s. 199). Ich zestawienie wraz z charakterystyką zawiera Tabela 2.1.

Tabela 2.1

Porównanie strategii rozmieszczenia towarów w magazynie

Strategia	**Zasada przypisania lokalizacji**	**Wykorzystanie przestrzeni**	**Wydajność kompletacji**	**Przewidywalność lokalizacji**
Losowe (*random storage*)	dowolna wolna lokalizacja	wysokie	niska	brak
Najbliższe wolne miejsce (*closest open location*)	wolna lokalizacja najbliżej punktu przyjęcia/wydań	wysokie	średnia	brak
Stałe (*dedicated storage*)	z góry przypisana, zarezerwowana lokalizacja	niskie	zależna od kryterium	wysoka
Klasowe (*class-based storage*)	strefa przypisana klasie wydzielonej według cechy	średnie	wysoka przy kryterium rotacji	wysoka w obrębie klasy

Źródło: opracowanie własne na podstawie Reyes i in. (2019), Lorenc (2014) oraz Islam i Uddin (2024).

Między biegunami mieszczą się rozwiązania pośrednie. Strategia najbliższego wolnego miejsca (ang. *closest open location storage*, COLS) kieruje towar do wolnej lokalizacji położonej najbliżej punktu przyjęcia lub wydań, łącząc elastyczność składowania losowego z ograniczeniem drogi (Lorenc, 2014, s. 3840). Składowanie klasowe (ang. *class-based storage*) dzieli asortyment na klasy według wybranej cechy, a następnie przypisuje każdej klasie wyodrębnioną strefę magazynu, przy czym wewnątrz klasy produkty rozmieszczane są dowolnie (Islam i Uddin, 2024, s. 126). Rozwiązanie to zbliża się konstrukcją do składowania stałego,

2026

różniąc się tym, że porządkuje produkty względem siebie według kryterium klasyfikacji, i uchodzi za skuteczniejsze od dedykowanego (Lorenc, 2014, s. 3840). Cel bezpośredni metod klasycznych sprowadza się do wyznaczenia klasy, a nie do minimalizacji czasu czy drogi kompletacji, która pozostaje celem pośrednim, nie zawsze osiąganym (Lorenc, 2014, s. 3840). Słabością składowania stałego pozostaje wrażliwość na wahania popytu: układ ustalony w fazie projektowania zachowuje skuteczność jedynie przy stabilnym asortymencie i stałym popycie, a przy silnej rotacji wymaga kosztownej, powtarzanej relokacji (Lorenc, 2014, s. 3838, 3840). Jedynie metoda EIQ oraz wskaźnik COI sprawdzają się zarówno w systemie stałych, jak i wolnych miejsc składowania, podczas gdy pozostałe metody tracą skuteczność przy zmiennym popycie (Lorenc, 2014, s. 3840). W praktyce przedsiębiorstwa najczęściej sięgają po składowanie klasowe oraz po strategię najbliższego wolnego miejsca (Lorenc, 2014, s. 3840). Wybór strategii nie przesądza jednak o wyniku, ponieważ jej skuteczność zależy od kryterium, według którego dokonuje się klasyfikacji i przypisania.

Niezależnie od przyjętej strategii przypisanie lokalizacji wymaga kryterium różnicującego produkty. W planowaniu rozmieszczenia uwzględnia się najczęściej kilka kryteriów. Popularność wyraża liczbę odwiedzin danej lokalizacji, obrót (ang. *turnover*) łączną liczbę jednostek przechodzących przez magazyn w danym okresie, a objętość iloczyn popytu i objętości produktu. Gęstość pobrań (ang. *pick density*) to stosunek popularności do objętości, współczynnik kubatury na zamówienie (ang. *cube-per-order index*, COI) to stosunek zajmowanej objętości do popularności, a ostatnim kryterium jest waga produktu (Lorenc, 2014, s. 3840). Odrębne kryterium stanowi korelacja, czyli współwystępowanie jednostek asortymentowych na tych samych zamówieniach, wykorzystywane w składowaniu korelacyjnym (ang. *correlated storage*) do umieszczania blisko siebie towarów zamawianych łącznie (Islam i Uddin, 2024, s. 126). Korelacje między jednostkami asortymentowymi wyznacza się na podstawie historycznych danych o zamówieniach, które w systemach informatycznych magazynu pozostają bezpośrednio dostępne (Islam i Uddin, 2023, s. 295). Wskaźnik COI ma charakter dwukryterialny. Wiąże wielkość produktu z popytem, tak aby towary o najniższej wartości wskaźnika, a więc małe i często pobierane, znalazły się najbliżej strefy wydań (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1415). Kryteria te wchodzą w skład metod klasyfikacji zapasów, spośród których najszerzej stosuje się analizę ABC oraz XYZ, omówione w podrozdziale 2.2. Dobór kryterium ma charakter rozstrzygający również dlatego, że przekłada się bezpośrednio na czas kompletacji.

Zależność między rozmieszczeniem a czasem kompletacji wynika ze struktury tego procesu, w którym przemieszczanie się kompletującego pochłania około połowy czasu cyklu (por. podrozdział 1.2). Przypadkowe lub błędne rozmieszczenie, w którym produkty o wysokim

2026

popycie znajdują się w najodleglejszej części magazynu, a rzadko pobierane przy strefie wydań, wydłuża drogę, czas i koszt transportu wewnętrznego oraz zwiększa zapotrzebowanie na pracowników i sprzęt, podnosząc koszty ruchu, oczekiwania i transportu (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1415). Badania symulacyjne potwierdzają wymierność tej zależności. Rozmieszczenie oparte na analizie ABC według wagi, objętości oraz wskaźnika COI skraca czas kompletacji średnio o 28,72% względem metody wolnych miejsc składowania (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1417). Wprowadzenie kryterium korelacji pozwala z kolei ograniczyć drogę kompletacji o 22,55–39,67% w porównaniu ze składowaniem opartym na pełnym obrocie, podczas gdy klasowe rozmieszczenie oparte na samej popularności wypada od niego gorzej o 7,21–9,80%, ponieważ w obrębie klasy produkty pozostają rozmieszczone przypadkowo (Islam i Uddin, 2024, s. 136–137). Efekt przynosi także jednoczesne uwzględnienie masy i popularności przy wyznaczaniu lokalizacji, które w badaniu uwzględniającym ograniczenia ergonomiczne podniosło wydajność kompletacji o 14,9% (Kapou, Ponis, Plakas i Aretoulaki, 2022, s. 1). Rozmieszczenie oddziałuje nie tylko na czas, lecz także na obciążenie kompletujących, ponieważ w systemach kompletacji ręcznej przypisanie lokalizacji bezpośrednio wpływa na zdrowie pracownika (Reyes i in., 2019, s. 219). Uwzględnienie właściwości fizycznych i powiązań między produktami daje więc efekt większy niż sam wybór strategii składowania, co potwierdzają również modele łączące klasyfikację z symulacją procesu, w których ograniczenie czasu sięga 10–16% (Lorenc i Lerher, 2020, s. 27).

Praktyczny wymiar tej zależności potwierdzają badania na rzeczywistych obiektach. W przedsiębiorstwie zajmującym się dystrybucją granulatów i produktów sypkich, składującym towary o masie od 1 do 30 kg pakowane w worki i kartony podatne na uszkodzenia, rozmieszczenie oparte na częstotliwości pobrań oraz gramaturze skróciło czas kompletacji i ograniczyło liczbę przełożeń na wózku, dając przy blisko 200 zamówieniach dziennie oszczędność rzędu 20 godzin miesięcznie (Lorenc i Kaczor, 2012, s. 45). Autorzy wykazali przy tym, że silniejszy wpływ na rozmieszczenie wywiera częstotliwość wspólnego pobierania kilku towarów z jednego punktu niż łączna liczba pobrań pojedynczej jednostki (Lorenc i Kaczor, 2012, s. 45). Skuteczność rozmieszczenia zależy zatem od narzędzia klasyfikacji zapasów oraz od kryterium, według którego dzieli ono asortyment. Zagadnieniom tym poświęcono kolejny podrozdział.

2.2. Metoda analizy ABC/XYZ jako narzędzie klasyfikacji zapasów

Przedsiębiorstwo obsługujące szeroki asortyment nie jest w stanie sterować każdą jednostką asortymentową (ang. *stock keeping unit*, SKU) osobno, dlatego w praktyce wyodrębnia

2026

ograniczoną liczbę klas produktów o zbliżonych cechach i przypisuje im wspólne reguły postępowania (van Kampen, Akkerman i van Donk, 2012, s. 850). Podstawą wyodrębnienia klas jest obserwacja, że produkty różnią się rocznym wolumenem sprzedaży, przewidywalnością popytu, wartością oraz wymaganiami składowymi, a różnice te uzasadniają odmienne polityki zapasów, produkcji i obsługi klienta (van Kampen i in., 2012, s. 850). Klasyfikacja SKU służy trzem głównym celom, którymi są zarządzanie zapasami, prognozowanie popytu oraz wybór strategii produkcji, a jej metoda sprowadza się do trzech decyzji, a więc doboru cech różnicujących produkty, wyboru techniki klasyfikacji oraz sposobu operacjonalizacji klas (van Kampen i in., 2012, s. 872). Utworzenie klasyfikacji wymaga w szczególności rozstrzygnięcia, ile klas wyodrębnić i jak wyznaczyć granice między nimi (van Kampen i in., 2012, s. 850). Literatura wyróżnia szereg technik podziału, w tym analizę ABC klasyfikującą produkty według wartości lub wolumenu popytu oraz podział FNS (ang. *Fast, Normal, Slow*) oparty na tempie popytu, przy czym wśród branych pod uwagę cech wskazuje się wolumen, czas, właściwości produktu oraz klienta (van Kampen i in., 2012, s. 850, 872). Analiza ABC wraz z uzupełniającą ją analizą XYZ wchodzi w skład standardowej funkcjonalności systemów WMS, wskazanej w podrozdziale 1.3, co czyni ją narzędziem bezpośrednio dostępnym w warstwie informatycznej magazynu.

Analiza ABC dzieli asortyment na trzy grupy według malejącego udziału w przyjętym kryterium, przypisując grupie A około 80% wartości, grupie B około 15%, a grupie C około 5% (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1415). Podział opiera się na zasadzie Pareto, zgodnie z którą niewielka część asortymentu odpowiada za przeważającą część obrotu. Kryterium klasyfikacji może stanowić wartość obrotu, liczba sprzedanych sztuk albo częstość pobrań, a jego wybór przesądza o składzie grup (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1415; van Kampen i in., 2012, s. 850). Klasyfikacja według wartości obrotu i według częstości pobrań prowadzi zatem do odmiennego składu grup, co ma znaczenie przy rozmieszczeniu nastawionym na skrócenie drogi kompletacji (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1415). Analiza ABC jest metodą jednokryterialną, co uniemożliwia jednoczesne uwzględnienie kilku cech. Ograniczenie to obchodzi się, wykonując analizę wielokrotnie dla różnych kryteriów i łącząc wyniki z przypisanymi im wagami (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1415). Można też spotkać odmiany podziału wyodrębniające większą liczbę grup o odpowiednio skorygowanym udziale procentowym (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1415). Prostota metody oraz krótki czas jej wykonania na wcześniej przygotowanych danych czynią ją najczęściej wdrażanym narzędziem klasyfikacji zapasów (Lorenc, 2014, s. 3840).

Analiza XYZ uzupełnia podział ABC o wymiar zmienności popytu, dokonując klasyfikacji wewnątrz wydzielonych już grup (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1415). Kryterium stanowi

2026

regularność zużycia wyznaczana z historycznych danych sprzedaży: grupa X obejmuje produkty o popycie regularnym i najczęściej wydawane, grupa Y produkty o popycie zmiennym lub sezonowym, a grupa Z produkty pobierane sporadycznie (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1415; Kubasakova i Kubanova, 2024, s. 469). W odróżnieniu od analizy ABC, która porządkuje produkty względem siebie, analiza XYZ ocenia każdy produkt niezależnie, na podstawie indywidualnego współczynnika (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1415). W ramach klasyfikacji SKU analiza ABC odwołuje się do cechy wolumenu, a analiza XYZ do cechy czasu, czyli regularności popytu, dzięki czemu obie stanowią komplementarne wymiary tej samej klasyfikacji (van Kampen i in., 2012, s. 872). Skalę zjawiska ilustruje analiza magazynu opon, w której do grupy o wysokim obrocie zaliczono blisko 40% asortymentu, przy czym produkty tej grupy wydawano od 17 do 52 razy w roku, natomiast grupa o najniższym obrocie, obejmująca 40% wszystkich artykułów, odpowiadała jedynie za 8% wydań (Kubasakova i Kubanova, 2024, s. 469). Rozkład ten potwierdza, że produkty wytwarzane i przyjmowane w największej liczbie są zarazem najczęściej pobierane (Kubasakova i Kubanova, 2024, s. 469–470).

Nałożenie obu podziałów tworzy dziewięciopolową macierz ABC-XYZ, w której każdy produkt otrzymuje podwójną etykietę łączącą udział w obrocie z regularnością popytu, od klasy AX o wysokim udziale i stabilnym popycie po klasę CZ o niskim udziale i popycie sporadycznym. Podwójna etykieta wskazuje zalecany sposób postępowania: produkty o wysokim udziale i stabilnym popycie nadają się do utrzymywania w większych zapasach oraz uprzywilejowanej lokalizacji, podczas gdy produkty o wysokiej zmienności popytu wymagają ostrożniejszego planowania zapasu, aby nie tworzyć zapasów martwych (Kubasakova i Kubanova, 2024, s. 469–470). Kryteria obu analiz zestawia Tabela 2.2.

Tabela 2.2

Kryteria i klasy w analizie ABC oraz XYZ

Analiza	Kryterium podziału	Klasy i ich charakterystyka
ABC	udział w obrocie (wartość, liczba sztuk lub częstość pobrań)	A około 80% obrotu, B około 15%, C około 5%
XYZ	regularność (zmienność) popytu	X popyt regularny, Y popyt zmienny lub sezonowy, Z popyt sporadyczny

Źródło: opracowanie własne na podstawie Lorenc i Szkoda (2016) oraz Kubasakova i Kubanova (2024).

Kompletacja i rozmieszczanie odpowiadają za znaczną część kosztów logistycznych, przez co usprawnienie tych operacji przynosi wymierne oszczędności w wyniku całościowym magazynu (Duque-Jaramillo, Cogollo-Flórez, Gómez-Marín i Correa-Espinal, 2024, s. 133). Przełożenie klasyfikacji na rozmieszczenie polega na przypisaniu klasom stref magazynu

2026

według odległości od strefy wydań. W analizie ABC produkty przyjmowane w największych ilościach umieszcza się możliwie blisko strefy kompletacji, a przyjmowane rzadziej w głębi magazynu, co skraca drogę pokonywaną przy pobieraniu towarów najczęściej wydawanych (Kubasakova i Kubanova, 2024, s. 469). Podział ABC pozwala też różnicować geometrię stref: dla grupy o dużej liczbie przyjęć, lecz małej liczbie odrębnych artykułów można tworzyć większe bloki składowe o mniejszym udziale alejek manipulacyjnych, podczas gdy grupy obejmujące wiele różnych artykułów wymagają węższych bloków, aby ograniczyć czas dostępu do palety (Kubasakova i Kubanova, 2024, s. 469–470). Rozmieszczenie oparte na sortowaniu według klas ABC, z sekwencyjnym przypisaniem rzędu, poziomu, kolumny i sekcji, daje najkrótszy łączny czas operacji rozmieszczania spośród badanych wariantów (Duque-Jaramillo i in., 2024, s. 133). Dwie klasyczne metody slottingu, analiza ABC oraz wskaźnik COI, nadają priorytet jednostkom asortymentowym odpowiednio według popularności i według gabarytu, odpowiadając tym samym na odmienne charakterystyki asortymentu (Duque-Jaramillo i in., 2024, s. 133). Analiza ABC nie jest przy tym jedynym kryterium slottingu, obok niej stosuje się wskaźnik COI, który wypada lepiej przy zróżnicowanej objętości i częstości zamówień, podczas gdy analiza ABC sprawdza się lepiej przy asortymencie jednorodnym (Duque-Jaramillo i in., 2024, s. 148). Różnice między obiema metodami są największe dla klas A i B, obejmujących do 80% skumulowanego udziału, i mogą się nasilać przy dynamicznym popycie, a zastosowanie każdej z nich wymaga uwzględnienia ograniczeń pojemnościowych lokalizacji (Duque-Jaramillo i in., 2024, s. 148). Klasyfikację ABC oraz wyznaczanie wskaźnika COI łączą również modele wspomagające decyzje o rozmieszczeniu, oparte na powiązanych danych o produktach, zamówieniach i układzie magazynu (Lorenc i Lerher, 2020, s. 1).

Skuteczność klasyfikacji zależy od aktualności podziału. Zmienny asortyment oraz wahania zainteresowania klientów wymagają cyklicznego powtarzania analizy ABC i XYZ, w przeciwnym razie w magazynie powstają zapasy martwe oraz towary składowane w niewłaściwych lokalizacjach, wydłużające drogę kompletacji (Kubasakova i Kubanova, 2024, s. 461, 469). Systematyczne powtarzanie analizy przecięcia ABC i XYZ poprawia zarazem wykorzystanie środków transportu wewnętrznego i zmniejsza liczbę pustych przejść po towary umieszczone w nieodpowiednich miejscach (Kubasakova i Kubanova, 2024, s. 461). Ograniczeniem pozostaje również jednokryterialny charakter podstawowej analizy ABC (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1415), a dobór cech oraz liczby klas zależy od celu i kontekstu klasyfikacji, dla których literatura nie dostarcza ogólnych wytycznych (van Kampen i in., 2012, s. 872). Na liczbę wyodrębnianych klas wpływa również poziom automatyzacji, gdyż podział bardziej rozbudowany, użyteczny w środowisku zautomatyzowanym, bywa trudny do obsługi przy pracy ręcznej (van

2026

Kampen i in., 2012, s. 872). Dobór metody klasyfikacji zależy od jej celu, którym może być zarządzanie zapasami, prognozowanie lub strategia produkcji, a dla rozmieszczenia towaru w magazynie właściwym celem pozostaje skrócenie drogi kompletacji (van Kampen i in., 2012, s. 872). Obie analizy pełnią przy tym różne funkcje: podział ABC służy bezpośrednio fizycznemu rozmieszczeniu towaru, podczas gdy analiza XYZ dostarcza informacji o regularności popytu, wykorzystywanej przede wszystkim w planowaniu zapasów i prognozowaniu (Kubasakova i Kubanova, 2024, s. 469–470). Rozróżnienie to ma znaczenie praktyczne, ponieważ przy rozmieszczeniu opartym na rotacji decydującym kryterium pozostaje częstość pobrań ujmowana analizą ABC. Potwierdza to symulacja, w której rozmieszczenie łączące analizy ABC i XYZ dało jeden z najsłabszych wyników czasowych, ustępując rozmieszczeniu opartemu na samej częstości pobrań (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1416). Wybór kryterium klasyfikacji nie zależy jednak wyłącznie od jego skuteczności czasowej, lecz także od dostępności danych, których to kryterium wymaga. Kryteria wiążące rotację z gabarytem lub masą, w tym wskaźnik COI, dają w symulacjach krótszy czas kompletacji, wymagają natomiast kompletnych danych o objętości i wadze asortymentu, które w praktyce bywają niepełne. Częstość pobrań ujmowana analizą ABC pozostaje wówczas kryterium dostępnym dla całości asortymentu i zarazem najpowszechniej wdrażanym (Lorenc, 2014, s. 3840). To, które z kryteriów znajduje zastosowanie w badanym obiekcie i z czego ten wybór wynika, rozstrzygnięto w rozdziale trzecim na podstawie rzeczywistej dostępności danych. Ustalenie, czy przyjęta strategia klasyfikacji i rozmieszczenia rzeczywiście skraca czas kompletacji, wymaga jednak mierników efektywności procesu, którym poświęcono kolejny podrozdział.

2.3. Kluczowe wskaźniki efektywności (KPI) w procesie kompletacji (czas cyklu, wydajność pracownika)

Ocena, czy przyjęta strategia rozmieszczenia rzeczywiście poprawia funkcjonowanie magazynu, wymaga pomiaru procesu za pomocą mierników i wskaźników. Miernik definiuje się jako liczbę charakteryzującą określone zjawisko i pozwalającą porównać je z innymi, a mierniki oraz wskaźniki logistyczne traktuje się jako zestaw narzędzi analitycznych do pomiaru i oceny efektywności procesów, których zadaniem jest adekwatne i rzetelne odzwierciedlenie stanów rzeczywistych w wymiarze ilości, czasu, miejsca i jakości (Twaróg, 2003, s. 22). Mierniki dzieli się na proste, wyrażane najczęściej w miarach naturalnych, oraz syntetyczne, agregujące w ujęciu wartościowym różne elementy składowe, a ocena dokonań wymaga rozróżnienia skuteczności, efektywności i gospodarności (Twaróg, 2003, s. 22). Sam pomiar poprzedza ustalenie trzech elementów: zmiennych poddawanych mierzeniu, jednostek miary oraz

2026

poziomu agregacji danych (Twaróg, 2003, s. 22). Analiza efektywności polega na okresowym porównywaniu rzeczywistego poziomu osiągnięć z założonymi celami i służy menedżerowi magazynu do podejmowania decyzji (Staudt, Alpan, Di Mascolo i Rodriguez, 2015, s. 5524). Zasadę pomiaru ujmuje reguła, zgodnie z którą mierzyć należy to, czym zamierza się sterować, ponieważ sterowanie obejmuje to, co poddano pomiarowi (Twaróg, 2003, s. 22). Trudność polega na tym, że wobec różnorodności wskaźników i braku ich powszechnie uzgodnionych definicji dobór właściwych miar dla konkretnego magazynu nie jest oczywisty (Staudt i in., 2015, s. 5524). Uporządkowanie wskaźników wymaga zatem ich klasyfikacji według wymiarów, które opisują.

Przegląd literatury porządkuje operacyjne wskaźniki efektywności magazynu według czterech wymiarów: czasu, kosztu, jakości oraz produktywności (Staudt i in., 2015, s. 5524). Wskaźniki dzieli się na bezpośrednie, wyrażane prostymi zależnościami matematycznymi i stanowiące podstawę bieżącego zarządzania, oraz pośrednie, mające charakter miar złożonych, wymagających dużej ilości danych i rzadziej stosowanych w codziennej praktyce (Staudt i in., 2015, s. 5540). Dodatkowo wskaźniki klasyfikuje się według czynności magazynowych, a więc przyjęcia, składowania, kompletacji, wysyłki i dostawy, przy czym wskaźników odnoszących się do strony wyjściowej jest znacznie więcej niż wejściowej, co odzwierciedla rosnące zorientowanie magazynu na klienta (Staudt i in., 2015, s. 5540). Do najczęściej stosowanych zalicza się wydajność pracy, przepustowość, terminowość dostaw, czas realizacji zamówienia oraz koszty zapasów (Staudt i in., 2015, s. 5540). Pozycjonowanie miar bezpośrednich zarówno według wymiaru, jak i według czynności magazynowej pozwala określić granice stosowania każdego wskaźnika i uniknąć sytuacji, w której ta sama nazwa oznacza różnie liczone wielkości (Staudt i in., 2015, s. 5540). Utrwaloną rolę pomiaru w badaniach nad kompletacją potwierdza analiza kierunków badań, wśród których obserwowane wyniki ujmuje się w postaci wskaźników wyjścia i efektywności procesu (Casella, Volpi, Montanari, Tebaldi i Bottani, 2023, s. 2). Zbliżony podział stosuje literatura polska, wyodrębniając dla gospodarki magazynowej mierniki gospodarności, produktywności oraz jakościowe (Twaróg, 2003, s. 67). Analogiczny system wskaźników można odnieść wprost do procesu kompletacji, zastępując przemieszczenia w magazynie odpowiednimi czynnościami kompletacyjnymi, a obiekt magazynowy urządzeniami do kompletacji, co pozwala śledzić w czasie relację kosztów osobowych i kosztów urządzeń przypadających na operację (Twaróg, 2003, s. 67). Systematykę wskaźników wraz z przykładami zawiera Tabela 2.3.

2026

Tabela 2.3

Systematyka wskaźników efektywności kompletacji według czterech wymiarów

Wymiar	Przykładowe wskaźniki
Czas	czas cyklu kompletacji, czas realizacji zamówienia, terminowość opracowania zamówień
Koszt	koszt kompletowania na zamówienie, koszty utrzymania zapasów, koszty powierzchni składowej
Jakość	dokładność kompletacji, wartość błędnych dostaw, kompletność zamówienia
Produktywność	liczba pobrań na roboczogodzinę, liczba rozchodów na pracownika, przepustowość, wykorzystanie powierzchni

Źródło: opracowanie własne na podstawie Staudt i in. (2015) oraz Twaróg (2003).

Wymiar czasu i produktywności obejmuje wskaźniki najbliższe procesowi kompletacji. Podstawową miarą pozostaje czas kompletowania przypadający na jedno zamówienie oraz liczba rozchodów magazynowych realizowanych przez jednego pracownika (Twaróg, 2003, s. 67). Produktywność kompletacji wyraża się najczęściej liczbą pobrań na godzinę, przyjmowaną jako wielkość wyjściowa w ocenie wydajności kompletującego. W badaniu 23 pracowników realizujących ponad sześć tysięcy partii przyjęto tę miarę jako efekt, a jako nakłady dystans, liczbę pobrań oraz objętość przypadające na lokalizację (Klumpp i Loske, 2021, s. 847). Wskaźnik wyznaczono metodą nieparametrycznej analizy obwiedni danych na rzeczywistym zbiorze obejmującym ponad 865 tysięcy pobranych jednostek asortymentowych, a jego trafność potwierdzono zgodnością na poziomie 93% z przyjętym w przedsiębiorstwie systemem premiowania pracowników (Klumpp i Loske, 2021, s. 846). Ponieważ przemieszczanie pochłania około połowy czasu kompletacji (por. podrozdział 1.2), dystans i czas przejść stanowią centralne miary operacyjne procesu, a ich minimalizacja jest tradycyjnym celem planowania kompletacji (Casella i in., 2023, s. 1). Kompletacja pozostaje najbardziej kosztowną czynnością magazynu, odpowiadającą za ponad połowę kosztów operacyjnych, co czyni wskaźniki jej wydajności szczególnie istotnymi (Klumpp i Loske, 2021, s. 846; Casella i in., 2023, s. 1). Bez skutecznego opanowania kompletacji trudno o sprawny system logistyczny przedsiębiorstwa, dlatego pomiar jej wydajności traktuje się jako warunek racjonalnego zarządzania procesem (Casella i in., 2023, s. 45).

Wymiar jakości ujmuje poprawność i kompletność realizacji zamówienia. Do wskaźników jakościowych gospodarki magazynowej zalicza się wartość błędnych dostaw oraz przeciętny czas zatrzymania towarów w procesie kompletowania (Twaróg, 2003, s. 67). W podsystemie obsługi zamówień jakość wyraża czas i niezawodność opracowania zamówień oraz ich

2026

terminowość, mierzona liczbą zamówień opracowanych w wyznaczonym terminie (Twaróg, 2003, s. 86). W praktyce ocena obsługi klienta opiera się na czterech miernikach, czyli na czasie dostawy, niezawodności dostawy, jakości dostawy oraz elastyczności dostawy, którym przypisuje się różne rangi w zależności od segmentu rynku i potrzeb klienta (Twaróg, 2003, s. 86). Dokładność kompletacji, rozumiana jako udział zamówień skompletowanych bez błędu, zyskuje na znaczeniu zwłaszcza w magazynach handlu elektronicznego, w których ograniczanie liczby pomyłek stało się odrębnym przedmiotem badań (Casella i in., 2023, s. 2). Wskaźniki jakości uzupełniają miary czasu i produktywności, ponieważ skrócenie czasu kompletacji nie może następować kosztem wzrostu liczby błędów.

Wymiar kosztu i wykorzystania zasobów wiąże efektywność procesu z jego nakładami. Po stronie kosztowej stosuje się koszt kompletowania przypadający na jedno zamówienie, przeciętne koszty powierzchni składowej oraz koszty utrzymania zapasów (Twaróg, 2003, s. 67; Staudt i in., 2015, s. 5540). Po stronie wykorzystania zasobów mierzy się stopień wykorzystania powierzchni i wysokości składowania oraz wykorzystanie zdolności magazynowych (Twaróg, 2003, s. 67). Jakość gospodarki zapasami opisuje z kolei wskaźnik rotacji wraz z udziałem towarów nierotujących, uzupełniony gotowością do świadczenia dostaw jako centralnym wskaźnikiem strony wykonania (Twaróg, 2003, s. 67). Wskaźniki te pozostają w zależności odwrotnej z wydajnością kompletacji: składowanie stałe podnosi przewidywalność kosztem wykorzystania przestrzeni, a rozmieszczenie skracające drogę kompletacji może wymagać ustępstw w gęstości składowania (por. podrozdział 2.1). Dobrze zaprojektowany system pomiaru dostarcza wskazówek co do równowagi między poziomem obsługi a kosztem jego osiągnięcia (Twaróg, 2003, s. 24). Ocena efektywności rozmieszczenia wymaga zatem jednoczesnego uwzględnienia wskaźników z kilku wymiarów, nie zaś pojedynczej miary.

Cztery klasyczne wymiary uzupełnia w nowszej literaturze aspekt wykraczający poza efektywność ekonomiczną. Efektywność kompletacji analizuje się bowiem w czterech powiązanych obszarach badań, obejmujących technologię, czynnik ludzki, specyfikę zastosowań oraz planowanie i optymalizację (Klumpp i Loske, 2021, s. 847). Badania nad kompletacją coraz częściej obejmują ergonomię i czynnik ludzki, a więc uczenie się pracowników, ograniczanie zmęczenia oraz motywację, ponieważ proces opiera się w znacznym stopniu na pracy fizycznej, a sposób jego planowania wpływa na zdrowie i bezpieczeństwo kompletujących (Klumpp i Loske, 2021, s. 847). Znaczenie tego wymiaru wzmacnia starzenie się siły roboczej oraz przesunięcie uwagi badaczy od klasycznych zagadnień projektowych ku aspektom ergonomicznym i ograniczaniu liczby błędów, zwłaszcza w magazynach handlu elektronicznego (Casella i in.,

2026

2023, s. 2). Wskaźniki tego rodzaju rzadziej dają się jednak odtworzyć wprost z danych transakcyjnych systemu, co ogranicza ich zastosowanie w analizie opartej na logach operacyjnych.

O doborze wskaźników przesądza dostępność danych. Wskaźniki bezpośrednie, oparte na prostych zależnościach, pozostają podstawą pomiaru właśnie dlatego, że nie wymagają danych trudnych do pozyskania, podczas gdy miary pośrednie, mające charakter złożonych koncepcji, wymagają dużej ilości danych, co ogranicza ich zastosowanie w codziennym zarządzaniu (Staudt i in., 2015, s. 5540). Ilościowa, empiryczna ocena wydajności kompletujących pozostaje jednak stosunkowo rzadka, mimo że rosnące wolumeny pobrań zwiększają zapotrzebowanie na analizy tego rodzaju (Klumpp i Loske, 2021, s. 847). System WMS rejestruje przebieg każdej operacji kompletacji wraz ze znacznikami czasu oraz identyfikatorami lokalizacji i jednostek asortymentowych (por. podrozdział 1.3), co pozwala odtworzyć z danych operacyjnych czas cyklu, wydajność kompletującego oraz przerwania procesu bez prowadzenia obserwacji bezpośredniej. Nie wszystkie wymiary pozostają jednak w równym stopniu dostępne w danych transakcyjnych: wskaźniki czasu i produktywności, jako miary bezpośrednie, wynikają wprost z rejestru zdarzeń, podczas gdy część wskaźników jakości i kosztu wymaga danych spoza logu operacyjnego (Staudt i in., 2015, s. 5540). Zgodnie z zasadą, że mierzyć należy to, czym zamierza się sterować (Twaróg, 2003, s. 22), zakres danych dostępnych w systemie wyznacza zbiór wskaźników możliwych do zastosowania w badaniu efektywności. Dla oceny relokacji opartej na rotacji szczególne znaczenie mają wskaźniki czasu cyklu i wydajności kompletacji, dostępne bezpośrednio w rejestrze operacji, co czyni je naturalnym punktem odniesienia części badawczej. Dobór tych wskaźników oraz sposób ich wyznaczenia z danych badanego obiektu stanowią przedmiot metodologii przedstawionej w kolejnym rozdziale.

2026

Rozdział 3. Metodologia badań własnych i charakterystyka badanego obiektu

3.1. Charakterystyka badanego podmiotu oraz specyfika systemu WMS (model SaaS)

Badany magazyn funkcjonuje w środowisku systemu klasy WMS udostępnianego w modelu oprogramowania jako usługa (ang. *Software as a Service*, SaaS), którego ogólną charakterystykę przedstawiono w podrozdziale 1.3. W modelu tym system udostępniany jest przez internet, a odpowiedzialność za infrastrukturę sprzętową, bezpieczeństwo danych i aktualizacje spoczywa po stronie dostawcy, co zapewnia dostęp do danych w czasie rzeczywistym oraz skalowalność wraz ze wzrostem działalności (Apps Insight, 2024). Model chmurowy stał się przy tym preferowanym sposobem wdrożenia systemów WMS, wybieranym przez zdecydowaną większość nowych klientów (Gartner, 2026), a jego integracja z systemami klasy ERP i CRM tworzy spójny przepływ informacji w organizacji (Apps Insight, 2024). Rozwój rynku systemów WMS napędza rosnący popyt na automatyzację oraz przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym (MarketsandMarkets, 2025), a wykorzystanie danych historycznych do prognozowania i optymalizacji zapasów należy do wskazywanych kierunków rozwoju tych systemów (Apps Insight, 2024). Czyni to operacyjne dane magazynowe coraz szerzej dostępnym i wykorzystywanym zasobem analitycznym. Z perspektywy niniejszego badania najistotniejsza jest jednak wielodostępność tego modelu. Dostawca obsługuje wiele magazynów należących do różnych klientów, a dane operacyjne wszystkich obiektów gromadzone są w jednym, scentralizowanym środowisku analitycznym systemu. Środowisko to stanowi wyodrębniony komponent systemu, odwzorowujący przebieg operacji magazynowych w postaci uporządkowanego chronologicznie rejestru zdarzeń, i to ono jest źródłem danych wykorzystanych w pracy, opisanym szczegółowo w podrozdziale 3.2. Centralizacja danych operacyjnych tworzy metodyczną podstawę badania, ponieważ umożliwia systematyczną, ilościową analizę rzeczywistego przebiegu procesów na podstawie zapisów systemowych, bez konieczności prowadzenia obserwacji bezpośredniej w obiekcie.

Podstawą dostępu do danych jest rola autora pracy jako programisty systemu WMS. Analizę przeprowadzono bezpośrednio na bazie analitycznego komponentu systemu, wyłącznie zapytaniami odczytującymi, bez tworzenia pośredniego zbioru danych i bez ich eksportu poza środowisko dostawcy. Zapytania kierowano do odczytowego odwzorowania przebiegu operacji, opisanego w podrozdziale 3.2 i przeznaczonego do celów raportowych, przez co nie obciążały one transakcyjnej części systemu. Tryb pracy bezpośrednio na źródle ogranicza

2026

ryzyko błędów przekształcenia, ponieważ każdy przytoczony wynik pochodzi wprost z zapisów systemu, a treść zapytań stanowi zarazem dokumentację metodyczną badania, zamieszczoną w załączniku 1.

Poufność źródła zapewniono na poziomie prezentacji wyników. W pracy przytacza się wyłącznie wielkości zagregowane, to jest liczebności, mediany, percentyle, udziały oraz rangi, bez odtwarzania pojedynczych rekordów, nazw asortymentu i kontrahentów. Pominięto nazwę dostawcy systemu, nazwę badanego przedsiębiorstwa oraz oznaczenie obiektu, a w załączonych zapytaniach rzeczywiste identyfikatory najemcy i magazynu zastąpiono parametrami. Badany podmiot określany jest wyłącznie przez cechy operacyjne swojego magazynu. Identyfikatory kompletujących wykorzystano jedynie do ustalenia liczby pracowników oraz zagregowania wyników ich pracy, bez sięgania po powiązane z nimi dane osobowe i bez przytaczania danych jednostkowych. Rozwiązanie to pozwala zachować poufność podmiotu przy pełnej rzetelności prowadzonych analiz.

Przedmiotem badania jest jeden magazyn wybrany spośród obiektów obsługiwanych przez system. Wybór poprzedziła analiza porównawcza kandydatów, przeprowadzona bezpośrednio na danych operacyjnych i oceniająca ich przydatność do badania, a jej przebieg udokumentowano na potrzeby odtwarzalności postępowania. Za kryteria doboru przyjęto stabilność operacyjną obiektu w analizowanym okresie, kompletność i wielkość rejestrowanych danych, jednorodność profilu obsługiwanych zamówień oraz strukturę procesu kompletacji. Rozważane obiekty różniły się pod tymi względami istotnie. Część z nich znajdowała się w fazie rozruchu, o rosnącym z miesiąca na miesiąc wolumenie operacji, a taki stan utrudniałby oddzielenie efektu relokacji od skutków dochodzenia obiektu do pełnej skali działania. Wybrany magazyn wyróżniał się największym i najbardziej stabilnym zbiorem danych spośród rozważanych, obejmującym pełny rok kalendarzowy o zbliżonym z miesiąca na miesiąc wolumenie operacji. Czyni go to reprezentatywnym dla ustalonego, dojrzałego stanu procesu. Dodatkowym atutem była dyskretna organizacja kompletacji, w której jedna trasa odpowiada jednemu zamówieniu, co upraszcza przypisanie czasu i drogi do pojedynczego zlecenia. Ograniczeniem doboru pozostawała natomiast niekompletność danych o wymiarach i masie asortymentu, której konsekwencje dla metody badawczej omówiono w dalszej części podrozdziału.

Badany magazyn obsługuje sprzedaż internetową w segmencie B2C, dla której charakterystyczne są drobne, rozproszone zamówienia opisane w podrozdziale 1.1. Kompletacja prowadzona jest w układzie dyskretnym, w którym jedna lista kompletacyjna odpowiada z reguły jednemu zamówieniu klienta, a mediana liczby wydań przypadających na listę wynosi jeden. Zamówienia są niewielkie, o medianie dwóch pozycji na listę, co odpowiada profilowi *low-*

2026

volume-high-mix omówionemu w rozdziale pierwszym. Skalę działalności obrazują dane za 2025 rok. W magazynie zrealizowano wówczas ponad 640 tysięcy operacji pobrania w blisko 118 tysiącach list kompletacyjnych, obejmujących ponad 3,9 tysiąca jednostek asortymentowych (ang. *stock keeping unit*, SKU). Liczba jednostek aktywnych w pojedynczym miesiącu była niższa niż w skali roku. Wskazuje to na naturalną rotację asortymentu, wynikającą z wprowadzania i wycofywania produktów. Miesięczny wolumen pobrań utrzymywał się przez cały rok na zbliżonym poziomie, bez wyraźnych okresów rozruchu czy przestoju. Potwierdza to dojrzały i ustabilizowany charakter procesu. Zestawienie podstawowych parametrów obiektu zawiera Tabela 3.1.

Tabela 3.1

Podstawowe parametry badanego magazynu (2025 rok)

Parametr	Wartość
Profil działalności	sprzedaż internetowa (B2C), kompletacja dyskretna
Okres analizy	rok kalendarzowy 2025
Liczba stref funkcjonalnych	5
Lokalizacje w strefie kompletacji	2444
Jednostki asortymentowe (SKU)	ponad 3,9 tys.
Operacje pobrania	ponad 640 tys.
Listy kompletacyjne	blisko 118 tys.
Mediana pozycji na listę	2
Mediana wydań na listę	1
Model składowania	dedykowane (ok. 95% SKU w jednej lokalizacji)
Koncentracja popytu	ok. 20% SKU odpowiada za ok. 80% pobrań

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych operacyjnych systemu WMS.

Proces kompletacji realizowany jest w układzie „człowiek do towaru” (ang. *picker-to-parts*), opisanym w podrozdziale 1.2. Kompletujący pobiera nośnik, otrzymuje z systemu kolejne lokalizacje do odwiedzenia, przemieszcza się do nich zgodnie z wyznaczoną marszrutą, pobiera wskazaną liczbę sztuk asortymentu i potwierdza pobranie, powtarzając te czynności aż do zamknięcia listy. Każda z tych operacji jest rejestrowana w systemie wraz ze znacznikiem czasu oraz identyfikatorami lokalizacji, jednostki asortymentowej i pracownika. Zapisy te pozwalają odtworzyć rzeczywisty przebieg kompletacji bez sięgania po inne źródła. Rejestr obejmuje również zdarzenia przerwania i wznowienia procesu, umożliwiające identyfikację

2026

przestojów. Taki sposób rejestracji czyni system źródłem danych zdatnym do ilościowej oceny efektywności kompletacji, wykorzystanej w dalszej części pracy.

Strefa kompletacji magazynu liczy 2444 lokalizacje regałowe i stanowi jedną z pięciu wyodrębnionych stref funkcjonalnych obiektu, obok strefy przyjęć towaru, strefy składowania zapasu, strefy pakowania skompletowanych zamówień oraz strefy wydań. Całość pobrań realizowana jest w obrębie strefy kompletacji, wobec czego rozmieszczenie towaru w tej strefie jest jedynym obszarem podlegającym optymalizacji w badaniu. Lokalizacje regałowe rozmieszczone są w alejach magazynu, a ich kolejność wzdłuż ścieżki kompletacji odwzorowuje atrybut porządkujący, stanowiący podstawę modelu odległości przyjętego w badaniu i opisanego w podrozdziale 3.2. Składowanie ma charakter dedykowany, ponieważ blisko 95% jednostek asortymentowych zajmuje pojedynczą lokalizację, a ponad 96% lokalizacji mieści jeden asortyment. Relacja między produktem a miejscem składowym jest więc niemal jednoznaczna. Właściwość ta ma znaczenie dla projektu usprawnień, ponieważ relokacja sprowadza się wówczas do przypisania jednostkom asortymentowym innych, istniejących już lokalizacji, bez zmiany ich liczby ani rozbudowy przestrzeni. Popyt cechuje silna koncentracja zgodna z zasadą Pareto, w której około jednej piątej asortymentu odpowiada za blisko 80% pobrań. W typowym miesiącu wykorzystywana jest część dostępnych lokalizacji, a pozostałe stanowią zapas przestrzeni ułatwiający przeprowadzenie relokacji.

Dwie właściwości obiektu determinują przyjętą metodę badawczą. Po pierwsze, wyznaczanie trasy kompletacji jest w systemie zoptymalizowane, a kompletujący porusza się po ustalonej marszrucie, której kolejność odwzorowuje atrybut porządkujący lokalizacje wzdłuż ścieżki kompletacji. Analiza rzeczywistych sekwencji pobrań wykazała, że kompletujący niemal nigdy nie zawraca, potwierdzając optymalny charakter trasowania. Trasa jest zatem ustalona optymalnie, a jedyną możliwością poprawy wydajności pozostaje rozmieszczenie towaru, co uzasadnia skupienie badania na relokacji, a nie na modyfikacji reguł trasowania. Po drugie, dane o wymiarach i masie asortymentu są w kartotece w znacznej części niekompletne. Objętość produktu zapisano w znikomym zakresie, a masę dla około jednej trzeciej pobrań. Uniemożliwia to zastosowanie kryteriów rozmieszczenia wymagających tych danych, takich jak wskaźnik COI czy kryterium wagowe, omówionych w podrozdziale 2.1. Z tego względu jako kryterium klasyfikacji i relokacji przyjęto częstość pobrań, ujmowaną analizą ABC, która wymaga wyłącznie danych o zdarzeniach pobrania, dostępnych w systemie dla całości asortymentu. Dobór metody wynika zatem bezpośrednio z dostępności danych w badanym obiekcie, a nie z arbitralnego założenia. Jako okres analizy przyjęto pełny rok kalendarzowy 2025, reprezentatywny dla ustabilizowanego stanu procesu. Objęcie całego roku pozwala uwzględnić

2026

ewentualne wahania sezonowe popytu, dzięki czemu klasyfikacja rotacji nie odzwierciedla przejściowego, krótkookresowego stanu asortymentu. Szczegółowy opis źródła danych, struktury bazy oraz metod weryfikacji hipotez przedstawiono w kolejnych podrozdziałach.

3.2. Opis źródła danych i narzędzi badawczych (analiza logów systemowych, struktura bazy danych)

Źródłem danych jest baza analitycznego komponentu systemu WMS, zbudowana na relacyjnej bazie danych PostgreSQL. Komponent ten pełni funkcję odczytowego odwzorowania stanu i przebiegu operacji magazynowych. Zdarzenia rejestrowane w części transakcyjnej systemu są rzutowane na wyodrębnioną, zoptymalizowaną pod kątem odczytu bazę, z której korzysta warstwa raportowa. System klasy WMS rejestruje przebieg procesów magazynowych, w tym przyjmowanie, składowanie, kompletację i wydawanie, wiążąc każdą operację z lokalizacją i dokumentem obrotu (Grabińska i in., 2020, s. 88). Baza podzielona jest na kilkanaście schematów odpowiadających obszarom funkcjonalnym systemu, spośród których dla niniejszego badania istotne są schematy obejmujące kompletację, kartotekę asortymentu oraz lokalizacje. Dane wielu klientów rozdzielone są w bazie identyfikatorem najemcy, a poszczególne magazyny identyfikatorem obiektu, dzięki czemu analizę można ściśle ograniczyć do rekordów badanego magazynu. Jako odwzorowanie odczytowe baza jest częściowo zdenormalizowana i przechowuje migawki wybranych atrybutów utrwalone w chwili zdarzenia, co ogranicza potrzebę łączenia tabel przy odczycie. Struktura ta pozwala odtworzyć rzeczywisty przebieg kompletacji na podstawie zapisów, bez sięgania po dane spoza systemu. Odczytowy charakter bazy oraz utrwalanie zdarzeń w porządku chronologicznym sprawiają, że dane odzwierciedlają historyczny przebieg procesów, zgodnie z wymogami analizy prowadzonej na danych z zamkniętego okresu.

Rdzeniem danych wykorzystanych w badaniu jest rejestr zdarzeń kompletacji. Każdy wiersz rejestru odpowiada pojedynczemu krokowi procesu realizacji listy kompletacyjnej i zawiera znacznik czasu, rodzaj kroku oraz, dla kroków związanych z pobraniem, identyfikatory lokalizacji i jednostki asortymentowej wraz z pobraną liczbą sztuk. Rodzaje kroków obejmują utworzenie i rozpoczęcie listy, pobranie towaru z lokalizacji, przerwanie i wznowienie procesu oraz jego zakończenie. Realizacja pojedynczej listy generuje w rejestrze zdarzenie jej utworzenia i rozpoczęcia, po jednym zdarzeniu pobrania dla każdej pobranej pozycji, ewentualne pary zdarzeń przerwania i wznowienia oraz zdarzenie zakończenia. Zdarzenia przerwania rozróżniają jego przyczynę, obejmującą wyjście z procesu przez przycisk oraz zamknięcie lub zmianę karty przeglądarki. Wiersz pobrania utrwala dodatkowo migawkę atrybutów wymiarowych

2026

asortymentu z chwili pobrania, niezależną od bieżącego stanu kartoteki. Jednostką analityczną badania jest krok oznaczający faktyczne pobranie towaru z lokalizacji, ponieważ tylko on wiąże zdarzenie z konkretnym miejscem składowym i asortymentem. Pozostałe rodzaje kroków opisują cykl życia listy i nie są bezpośrednio wykorzystywane w analizie rozmieszczenia, z wyjątkiem zdarzeń przerwania, które służą do identyfikacji przestojów. Ograniczenie analizy do kroków pobrania zapewnia, że zliczane są rzeczywiste operacje kompletacyjne, a nie zdarzenia administracyjne. Ma to istotne znaczenie dla poprawności miar wolumenu i wydajności. Filtrowanie do kroków pobrania zmniejsza liczbę analizowanych rekordów względem całości rejestru, ponieważ znaczną jego część stanowią zdarzenia cyklu życia listy nieodpowiadające fizycznemu pobraniu, a ich uwzględnienie zawyżałoby miary wolumenu.

Analiza wykorzystuje cztery obszary danych powiązane wspólnymi identyfikatorami. Rejestr zdarzeń kompletacji dostarcza przebiegu czasowego oraz miejsca pobrań. Kartoteka asortymentu zawiera atrybuty jednostek asortymentowych, w tym ich wymiary i masę, wykorzystywane przy ocenie możliwości zastosowania alternatywnych kryteriów rozmieszczenia. Rejestr lokalizacji opisuje miejsca składowe, w tym ich strefę, typ regału oraz atrybut porządkujący je wzdłuż ścieżki kompletacji. Analizę przestrzenną ograniczono do lokalizacji strefy kompletacji, w której realizowane są wszystkie pobrania, wykorzystując do tego atrybut strefy z rejestru lokalizacji. Nagłówki list kompletacyjnych zawierają czas utworzenia i zakończenia listy oraz przypisanie do pracownika, na podstawie których wyznacza się czas cyklu i wydajność. Obszary te łączą wspólne identyfikatory. Rejestr pobrań odwołuje się do lokalizacji i asortymentu przez ich identyfikatory oraz do nagłówka listy kompletacyjnej, co pozwala zestawić czas i miejsce pobrania z jego pozycją na trasie oraz z parametrami zlecenia. Wykorzystane obszary danych wraz z ich rolą w badaniu zestawia Tabela 3.2.

2026

Tabela 3.2

Obszary danych wykorzystane w badaniu i ich rola

Obszar danych	Wykorzystane pola	Rola w badaniu
Rejestr zdarzeń kompletacji	rodzaj kroku, znacznik czasu, lokalizacja, jednostka asortymentowa, liczba sztuk, typ przerwania	odtworzenie przebiegu i czasu kompletacji, zliczenie pobrań, identyfikacja przestojów
Kartoteka asortymentu	kod, wymiary, masa, status	ocena kryteriów wymiarowych, identyfikacja jednostek asortymentowych
Rejestr lokalizacji	atrybut porządkujący (marszruta), strefa, typ regału, status	model odległości, ograniczenie analizy do strefy kompletacji
Nagłówki list kompletacyjnych	czas utworzenia, czas zakończenia, pracownik, status	wyznaczenie czasu cyklu oraz wydajności kompletującego

Źródło: opracowanie własne na podstawie schematu bazy systemu WMS.

Model odległości oparto na atrybucie porządkującym lokalizacje wzdłuż ścieżki kompletacji, który odwzorowuje kolejność ich odwiedzania przez kompletującego. Atrybut ten ma postać kodu hierarchicznego, którego wartości bezwzględne nie są proporcjonalne do fizycznej odległości, zachowują natomiast poprawny porządek marszruty. Kod łączy w sobie informację o strefie, alei, regale i poziomie, przez co różnice jego wartości nie oddają jednakowych odstępów fizycznych. Lokalizacje spoza strefy kompletacji, takie jak strefy przyjęć czy wydań, opatrzone są wartością wartowniczą i pominięto je przy wyznaczaniu rang. Z tego względu jako miarę położenia przyjęto rangę lokalizacji, wyznaczoną przez uporządkowanie 2444 lokalizacji strefy kompletacji według wartości atrybutu, od pozycji najbliższej strefie wydań do najdalszej. Za miarę odległości między dwiema lokalizacjami przyjęto różnicę ich rang. Poprawność tego założenia zweryfikowano na rzeczywistych sekwencjach pobrań. Kolejne pobrania na liście następują niemal wyłącznie w rosnącym porządku rangi, a udział przejść niepowodujących cofnięcia przekracza 99%. Kompletujący porusza się zatem wzdłuż jednej, monotonicznej marszruty. Trasa ma charakter powrotny, w którym kompletujący wyrusza od strefy wydań położonej na początku ścieżki, dociera do najdalszej wymaganej lokalizacji i wraca. Układ ten ustalono na podstawie analizy przebiegu marszruty, a przy takim modelu długość trasy przybliża podwojona ranga najgłębiej położonego pobrania na liście. Formalnie długość trasy dla listy przyjęto jako podwojoną różnicę między rangą najgłębszego pobrania a rangą początku ścieżki, co odzwierciedla drogę w głąb strefy oraz powrót do strefy wydań. Przyjęty model ma charakter porządkowy i nie rozróżnia przejścia w obrębie jednej alei od zmiany alei. Jest to świadome uproszczenie, wystarczające do porównania rozmieszczenia obecnego z proponowanym.

2026

Aby wyrazić skutki relokacji w jednostkach czasu, a nie wyłącznie odległości, zbadano zależność między odległością a czasem na podstawie rzeczywistych interwałów między kolejnymi pobraniami. Czas dzielący dwa następujące po sobie pobrania rośnie monotonicznie wraz z odległością w rankingu między ich lokalizacjami, od wartości bliskiej pięciu sekund dla pobrań z tej samej lokalizacji, odpowiadającej samej czynności pobrania, do około dwudziestu sekund dla przejść najdłuższych. Analiza czasów w podziale na dziesięć przedziałów odległości potwierdziła regularny wzrost mediany czasu wraz z rosnącą odległością w rankingu. Pozwoliło to oszacować udział obu składowych czasu kompletacji, w którym obsługa pobrań odpowiada za około 30%, a przemieszczanie za około 70% czasu spędzanego wewnątrz listy. Z rozkładu tego wynika, że redukcja czasu wynikająca z relokacji jest niższa od redukcji dystansu, ponieważ skróceniu podlega jedynie składowa przemieszczania. Zależność ta potwierdza przydatność rangi jako miary czasu przejścia i pozwala rozłożyć całkowity czas kompletacji na stałą składową obsługi pobrania oraz zmienną składową przemieszczania. Rozkład ten stanowi podstawę przeliczenia oszczędności dystansu, uzyskanej z relokacji, na oszczędność czasu, przedstawionego w rozdziale czwartym. Wyznaczone w ten sposób wskaźniki czasu cyklu oraz wydajności kompletacji odpowiadają miarom omówionym w podrozdziale 2.3, dostępnym bezpośrednio w rejestrze operacji.

Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem języka zapytań SQL na bazie PostgreSQL, stosując funkcje agregujące i okienkowe do rekonstrukcji sekwencji pobrań, wyznaczania rang lokalizacji oraz zliczania operacji w podziale na jednostki asortymentowe i lokalizacje. Wykorzystano między innymi funkcje rangowania, funkcje przesunięcia służące do wyznaczania odstępów między kolejnymi pobraniami oraz funkcje podziału na przedziały i wyznaczania percentyli. Wszystkie zapytania oraz ich wyniki udokumentowano, a te o rozstrzygającym znaczeniu dla wyników zestawiono w załączniku 1, co zapewnia odtwarzalność analizy. Postępowanie badawcze objęło kolejno agregację zdarzeń, walidację przyjętych założeń modelu odległości oraz symulację skutków relokacji, których wyniki przedstawiono w rozdziale czwartym. Jakość danych oceniono przed przystąpieniem do badania. Zdecydowana większość pobrań, ponad 99%, wiąże się z aktywną lokalizacją posiadającą atrybut porządkujący, próba jest więc praktycznie kompletna. Pobrania z lokalizacji usuniętych z systemu w toku roku lub pozbawionych atrybutu porządkującego stanowiły ułamek procenta zbioru i pominięto je w analizie przestrzennej bez istotnego wpływu na wielkość próby. Głównym ograniczeniem danych pozostaje niekompletność atrybutów wymiarowych asortymentu, opisana w podrozdziale 3.1. Wszystkie te ograniczenia odnotowano i uwzględniono przy formułowaniu wniosków, a zestaw

2026

wykorzystanych zapytań stanowi zarazem dokumentację metodyczną badania, umożliwiającą jego powtórzenie na innym zbiorze danych o zbliżonej strukturze.

3.3. Cel, pytania badawcze i hipotezy

Charakterystyka badanego obiektu oraz dostępnego źródła danych, przedstawione w dwóch poprzednich podrozdziałach, pozwalają sformułować konstrukcję badawczą pracy, na którą składają się cel, pytania badawcze oraz hipotezy. Celem głównym pracy jest zbadanie wpływu obecnego rozmieszczenia asortymentu na wydajność procesu kompletacji oraz opracowanie projektu usprawnień polegającego na relokacji towarów, w oparciu o analizę danych historycznych z produkcyjnego systemu klasy WMS działającego w modelu SaaS. Celowi głównemu podporządkowano pięć celów szczegółowych. Pierwszym (C1) jest zdiagnozowanie przebiegu procesu kompletacji w badanym magazynie, w tym struktury czasu cyklu oraz skali i charakteru przestojów. Drugim (C2) jest przeprowadzenie klasyfikacji rotacji asortymentu metodą ABC według częstości pobrań. Trzecim (C3) jest zweryfikowanie zależności między rotacją jednostki asortymentowej a jej położeniem na trasie kompletacji. Czwartym (C4) jest zaprojektowanie relokacji opartej na rotacji oraz oszacowanie w drodze symulacji potencjalnych oszczędności drogi i czasu, z oceną poza próbą uczącą. Piątym (C5) jest ocena wykonalności proponowanej relokacji przy założeniu braku ingerencji w infrastrukturę magazynu, to jest w liczbę i rozmieszczenie lokalizacji.

Tak sformułowanym celom odpowiadają trzy pytania badawcze. Pierwsze (P1) dotyczy tego, czy rozmieszczenie asortymentu w badanym magazynie jest efektywne względem rotacji, to znaczy czy towary najczęściej pobierane są składowane blisko strefy wydań. Drugie (P2) odnosi się do tego, czy relokacja towarów według częstości pobrań skraca łączną drogę i czas kompletacji względem stanu obecnego, i w jakim stopniu. Trzecie (P3) obejmuje kwestię, czy uzyskiwalna poprawa jest istotna i możliwa do osiągnięcia samą zmianą przypisania lokalizacji, bez rozbudowy ani przebudowy magazynu.

Odpowiedzi na te pytania poszukuje hipoteza główna, zgodnie z którą oparta na danych relokacja asortymentu według częstości pobrań skraca czas kompletacji i stanowi efektywny kosztowo kierunek optymalizacji pracy magazynu, możliwy do wdrożenia bez ingerencji w jego infrastrukturę. Hipotezę główną rozwinięto w trzy hipotezy szczegółowe, wynikające z podstaw teoretycznych przedstawionych w rozdziałach pierwszym i drugim.

Zgodnie z hipotezą pierwszą (H1) w badanym magazynie występuje nieefektywność rozmieszczenia, polegająca na składowaniu towarów o najwyższej rotacji daleko od strefy wydań i w rozproszeniu. Przesłanką teoretyczną tej hipotezy jest właściwość składowania stałego,

2026

które zachowuje skuteczność jedynie przy stabilnym asortymencie, a przy silnej rotacji degeneruje się bez cyklicznej relokacji, prowadząc do umieszczenia towarów w niewłaściwych lokalizacjach wydłużających drogę kompletacji (Lorenc, 2014, s. 3838, 3840; Kubasakova i Kubanova, 2024, s. 461, 469).

Zgodnie z hipotezą drugą (H2) relokacja towarów według częstości pobrań skraca łączną drogę oraz czas kompletacji względem stanu obecnego. Przesłankę stanowią wyniki badań, w których rozmieszczenie oparte na rotacji skraca czas kompletacji względem składowania na wolnych miejscach (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1417), a uwzględnienie kryterium rotacji ogranicza drogę kompletacji zarówno na danych rzeczywistych, jak i symulacyjnych (Lorenc i Kaczor, 2012, s. 45; Islam i Uddin, 2024, s. 136–137).

Zgodnie z hipotezą trzecią (H3) uzyskiwalna poprawa jest istotna i osiągalna samą zmianą przypisania jednostek do istniejących lokalizacji, bez zmian w infrastrukturze magazynu. Przesłanką jest ustalenie, że przy dłuższych listach kompletacyjnych o wyniku decydują zmienne organizacyjne, w tym polityka rozmieszczenia, dzięki czemu poprawę uzyskuje się bez kosztownej przebudowy obiektu (Suppini i in., 2024), a samo przypisanie lokalizacji uchodzi za tę decyzję kompletacji, która wnosi największą poprawę wydajności (Islam i Uddin, 2024, s. 126).

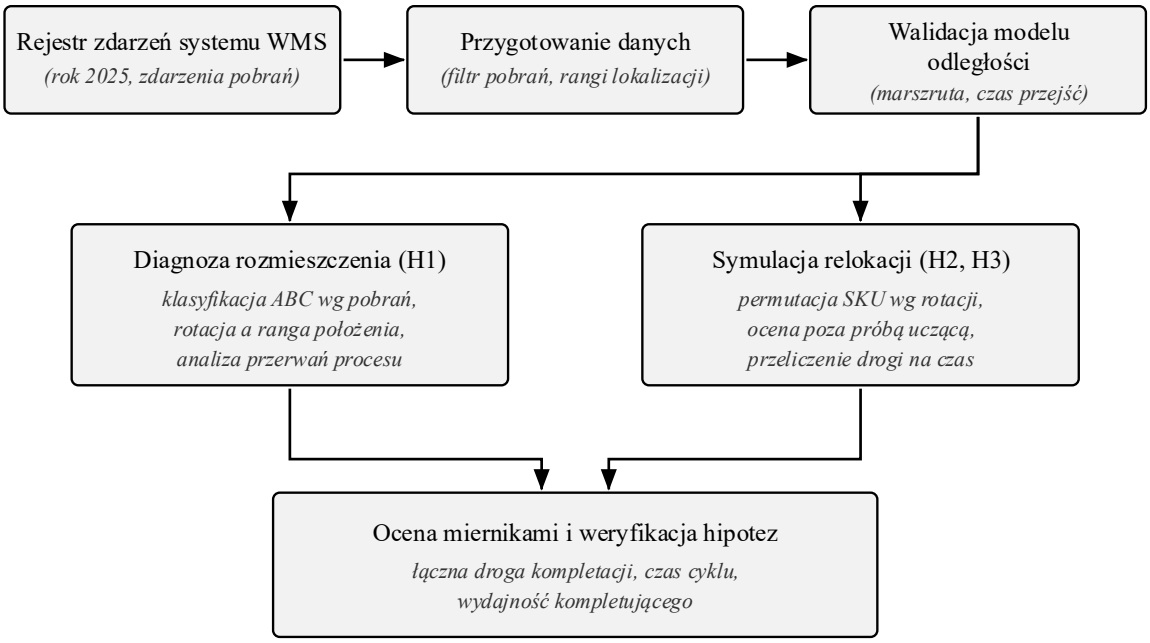
Sposób operacjonalizacji celów szczegółowych i hipotez, metody ich weryfikacji oraz przypisane im mierniki przedstawiono w podrozdziale 3.4.

3.4. Metody i narzędzia weryfikacji hipotez badawczych dotyczących wąskich gardeł w procesie kompletacji

Wąskim gardłem procesu kompletacji jest nieprodukcyjne przemieszczanie się kompletującego, pochłaniające około połowy czasu cyklu (De Koster i in., 2007, s. 481; Masae i in., 2020), którego zakres, jak wykazano w podrozdziale 2.1, zależy bezpośrednio od rozmieszczenia towaru. Skoro w badanym obiekcie trasowanie jest już zoptymalizowane, co ustalono w podrozdziale 3.2, przyczyną nadmiernego przemieszczania pozostaje rozmieszczenie i to ono stanowi właściwy przedmiot weryfikacji. Przemieszczanie jest pracą nieprodukcyjną, niewnoszącą wartości do zamówienia, dlatego jest pierwszym celem optymalizacji kompletacji (De Koster i in., 2007, s. 481). Diagnoza wąskiego gardła obejmuje dwa uzupełniające się elementy, którymi są analiza struktury czasu kompletacji z wyodrębnieniem udziału przemieszczania oraz identyfikacja przestojów procesu na podstawie rejestrowanych w systemie zdarzeń przerwania. Zasadnicza część badania koncentruje się jednak na rozmieszczeniu jako źródle nadmiernego przemieszczania, podatnym na usprawnienie bez ingerencji w infrastrukturę.

2026

Badanie weryfikuje trzy hipotezy szczegółowe sformułowane w podrozdziale 3.3, a weryfikacja każdej z nich opiera się na odrębnej metodzie, opisanej w dalszej części podrozdziału. Przebieg całego postępowania badawczego przedstawiono na Rysunku 3.1.



Rysunek 3.1. Schemat postępowania badawczego.

Źródło: opracowanie własne.

Podstawą zarówno diagnozy, jak i projektu usprawnień jest klasyfikacja asortymentu metodą ABC według częstości pobrań, której wybór uzasadniono dostępnością danych w podrozdziale 3.1. Klasyfikację przeprowadzono, zliczając liczbę pobrań każdej jednostki asortymentowej w okresie badania, porządkując jednostki malejąco według tej liczby, a następnie wyznaczając skumulowany udział w łącznej liczbie pobrań. Jednostki o identycznej liczbie pobrań uszeregowano dodatkowo według ich identyfikatora, zapewniając jednoznaczność podziału. Do klasy A zaliczono jednostki obejmujące łącznie do 80% pobrań, do klasy B kolejne, do 95%, a do klasy C pozostałe, co odpowiada klasycznemu podziałowi omówionemu w podrozdziale 2.2 (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1415). Klasyfikację wykonano na danych z pełnego roku 2025, dzięki czemu ranking rotacji uwzględnia ewentualne wahania sezonowe i nie odzwierciedla stanu przejściowego. Kryterium klasyfikacji stanowi częstość pobrań, a nie wartość obrotu, ponieważ to droga kompletacji, a nie wartość zapasu, jest przedmiotem optymalizacji w niniejszej pracy. Wybór ten ma konsekwencje praktyczne, ponieważ ten sam asortyment uszeregowany według wartości obrotu i według częstości pobrań daje odmienny skład grup,

2026

a dla skrócenia drogi rozstrzygające jest to, jak często odwiedzana jest dana lokalizacja, a nie jaką wartość reprezentuje przechowywany w niej towar.

Weryfikacja hipotezy pierwszej polega na zestawieniu rotacji asortymentu z jego położeniem na trasie kompletacji. Każdej jednostce asortymentowej przypisano reprezentatywną rangę położenia, wyznaczoną jako średnia rang lokalizacji, z których była pobierana, ważona liczbą pobrań. Następnie zbadano rozkład pobrań wzdłuż trasy, dzieląc lokalizacje na równe przedziały według rangi i wyznaczając udział pobrań przypadający na każdy z nich, oraz porównano rozkład rang położenia w poszczególnych klasach ABC. W rozmieszczeniu efektywnym udział pobrań malałby wraz z oddalaniem się od strefy wydań, natomiast rozkład równomierny lub rosnący świadczy o nieefektywności. Miarą uzupełniającą jest współczynnik korelacji między rangą lokalizacji a liczbą pobrań. Jego wartość ujemna wskazywałaby na rozmieszczenie efektywne, w którym częściej odwiedzane lokalizacje leżą bliżej strefy wydań, natomiast wartość dodatnia lub bliska zeru potwierdza rozmieszczenie nieefektywne. Hipotezę pierwszą uznaje się za potwierdzoną, jeżeli pobrania koncentrują się w części trasy odległej od strefy wydań, a mediana rangi położenia klasy A jest wysoka i wyższa niż w klasach o niższej rotacji, co oznaczałoby rozmieszczenie odwrotne do efektywnego.

Uzupełnieniem diagnozy jest analiza przestojów procesu. Rejestr zdarzeń zawiera zdarzenia przerwania wraz z ich przyczyną. Na tej podstawie wyznacza się liczbę przerwań w okresie badania, ich strukturę według przyczyn oraz udział list, których realizacja została przerwana. Miary te pokazują, w jakim stopniu przestoje współtworzą wąskie gardło procesu obok przemieszczania, i pozwalają ocenić, czy usprawnienie rozmieszczenia dotyczy głównej, czy jedynie pobocznej składowej czasu kompletacji.

Weryfikacja hipotez drugiej i trzeciej opiera się na symulacji relokacji, porównującej stan obecny z rozmieszczeniem opartym na rotacji. Ze względu na dedykowany charakter składowania relokacja sprowadza się do permutacji przypisania jednostek asortymentowych do istniejących lokalizacji, bez zmiany ich liczby. Permutacja zachowuje liczbę lokalizacji zajmowanych przez każdą jednostkę, odwzorowując rzeczywiste przesunięcie towaru między istniejącymi miejscami, a nie reorganizację samych lokalizacji. Jednostki uszeregowano malejąco według częstości pobrań i przypisano im kolejne rangi położenia rosnąco, tak aby najczęściej pobierane trafiły najbliżej strefy wydań. Dla każdej rzeczywistej listy kompletacyjnej wyznaczono długość trasy w stanie obecnym oraz w stanie po relokacji, przyjmując model kosztu trasy z podrozdziału 3.2, a następnie zsumowano wyniki i obliczono procentową redukcję drogi. Symulację przeprowadzono na pełnym zbiorze rzeczywistych list z okresu oceny, a nie na próbie losowej, dzięki czemu wynik odzwierciedla faktyczną strukturę zamówień badanego

2026

magazynu. Porównanie obu wariantów oparto na tych samych listach i przy tej samej regule trasowania, wobec czego jedyną zmienną różnicującą wynik pozostaje rozmieszczenie asortymentu, a zmierzona różnica jest efektem relokacji, a nie odmiennych warunków porównania. Aby uniknąć oceny na tych samych danych, na których zbudowano klasyfikację, ranking rotacji ustalono na pierwszej połowie roku, a skutki relokacji oceniono na listach z drugiej połowy roku. Taki podział zapewnia ocenę poza próbą uczącą i sprawdza, czy rozmieszczenie oparte na rotacji z jednego okresu zachowuje skuteczność w okresie następnym, mimo naturalnej rotacji asortymentu. Jednostki nieobecne w okresie uczącym pominięto przy wyznaczaniu skutków, co nie zaburza porównania, ponieważ dotyczy ono tych samych list w obu wariantach rozmieszczenia. Redukcję drogi przeliczono na redukcję czasu, korzystając z rozkładu czasu na składową obsługi oraz przemieszczania opisanego w podrozdziale 3.2. W przeliczeniu tym stała składowa obsługi pozostaje niezmieniona, a skróceniu podlega jedynie składowa przemieszczania, wobec czego procentowa redukcja czasu jest niższa od redukcji drogi. Hipotezę drugą uznaje się za potwierdzoną, jeżeli relokacja skraca łączną drogę i czas kompletacji, a hipotezę trzecią, jeżeli uzyskana redukcja jest znaczna i wynika wyłącznie ze zmiany przypisania lokalizacji, bez rozbudowy magazynu.

Ocena opiera się na trzech miernikach efektywności kompletacji wskazanych w podrozdziale 2.3. Łączna droga kompletacji, wyrażona w jednostkach rangi, mierzy dystans pokonywany przy realizacji list. Czas cyklu, wyznaczony z redukcji drogi oraz rozkładu czasu, ujmuje skutek w jednostkach czasu. Wydajność, rozumiana jako liczba pobrań w jednostce czasu pracy kompletującego, wiąże efekt z nakładem pracy i pozwala wyrazić skutek relokacji w kategoriach zdolności przerobowej magazynu, bez konieczności zwiększania zatrudnienia. Wszystkie mierniki odniesiono do stanu obecnego jako punktu odniesienia. Skutek relokacji wyrażany jest dzięki temu w wartościach względnych, niezależnych od skali obiektu i porównywalnych z wynikami innych badań. Analiza posługuje się statystykami opisowymi, w tym medianą, percentylami oraz współczynnikiem korelacji, wyznaczanymi dla pełnej populacji zdarzeń z okresu badania, a nie dla próby losowej, wobec czego wnioskowanie nie wymaga testów istotności właściwych dla badań próbkowych. Metoda odróżnia potencjał teoretyczny, wynikający z pełnej relokacji wobec stanu obecnego, od skali osiągalnej w praktyce, co odnotowano przy interpretacji wyników. Przyjęte podejście ma świadome ograniczenia. Model odległości zachowuje charakter porządkowy, a założenie o niezmienionej pojemności lokalizacji przyjęto wobec niekompletności danych o gabarytach asortymentu, co opisano w podrozdziałach 3.1 oraz 3.2. Ograniczenia te nie podważają kierunku ani rzędu wielkości wyniku, wyznaczają natomiast granice jego dokładności. Łączne potwierdzenie trzech hipotez oznaczałoby, że

2026

rozmieszczenie stanowi istotne, lecz usuwalne wąskie gardło procesu, a relokacja oparta na danych jest efektywnym kosztowo kierunkiem jego usprawnienia, zgodnie z celem pracy. Odrębną cechą przyjętego podejścia, odróżniającą je od wcześniejszych badań symulacyjnych prowadzonych na losowo generowanych listach kompletacyjnych (Lorenc i Szkoda, 2016), jest oparcie oceny na rzeczywistych, historycznych logach operacyjnych badanego magazynu. Zestawienie hipotez, metod ich weryfikacji oraz przypisanych im mierników zawiera Tabela 3.4.

Tabela 3.4

Mapowanie hipotez badawczych na metody weryfikacji i mierniki

Hipoteza	**Metoda weryfikacji**	**Miernik**	**Kryterium potwierdzenia**
H1 (nieefektywność rozmieszczenia)	klasyfikacja ABC oraz zestawienie rotacji z rangą położenia	mediana rangi klas, udział pobrań w przedziałach trasy, korelacja	pobrania skupione daleko od strefy wydań, klasa A położona najgłębiej
H2 (skrócenie drogi i czasu)	symulacja relokacji z oceną out-of-sample	łączna droga oraz czas cyklu kompletacji	relokacja skraca drogę i czas względem stanu obecnego
H3 (skala i wykonalność)	symulacja relokacji z rozróżnieniem potencjału i praktyki	procentowa redukcja drogi i czasu	redukcja znaczna, osiągnięta bez zmian w infrastrukturze

Źródło: opracowanie własne.

2026

Rozdział 4. Analiza efektywności procesu kompletacji i projekt usprawnień

4.1. Diagnoza obecnego stanu procesu kompletacji na podstawie danych z roku 2025

Diagnozę stanu obecnego przeprowadzono na pełnym zbiorze operacji kompletacji zarejestrowanych w badanym magazynie w 2025 roku, obejmującym 641 422 pobrania oraz 117 650 zakończonych list kompletacyjnych, zrealizowanych przez ośmiu kompletujących. Celem diagnozy jest ustalenie, która składowa czasu kompletacji stanowi wąskie gardło procesu, oraz oddzielenie tej składowej od czynników pozostających poza zakresem relokacji. Jak ustalono w podrozdziale 3.2, trasowanie w obiekcie jest już zoptymalizowane, a kompletujący porusza się po monotonicznej marszrucie, w której udział przejść niepowodujących cofnięcia przekracza 99%. Przyczyny nadmiernego czasu należy więc szukać w rozmieszczeniu towaru, a nie w regułach wyznaczania trasy. Diagnoza obejmuje dwa uzupełniające się elementy, którymi są struktura czasu cyklu z wyodrębnieniem udziału przemieszczania oraz skala i charakter przestojów rejestrowanych jako zdarzenia przerwania.

Przed przystąpieniem do analizy sprawdzono, czy proces zachowuje w badanym okresie stałą charakterystykę, ponieważ tylko wtedy roczne okno obserwacji można uznać za reprezentatywne. Liczba jednostek asortymentowych pobieranych w pojedynczym miesiącu mieściła się w przedziale od 2196 do 2357, a liczba odwiedzanych lokalizacji od 1655 do 1922, przy czym żaden miesiąc nie odbiegał od pozostałych w sposób wskazujący na rozruch obiektu lub przestój w jego pracy. Wielkości te są niższe od wartości rocznych i odzwierciedlają naturalną wymianę asortymentu omówioną w podrozdziale 4.2: w skali roku pobierano ponad 3,9 tysiąca jednostek, natomiast w pojedynczym miesiącu aktywna była jedynie ich część. Stabilny z miesiąca na miesiąc zakres wykorzystywanego asortymentu i przestrzeni składowej potwierdza dojrzały charakter procesu, a tym samym zasadność przyjęcia pełnego roku jako okresu analizy oraz porównywania jego dwóch półroczy, na czym oparto ocenę poza próbą uczącą w podrozdziale 4.4.

Czas związany z realizacją listy rozkłada się na dwa wyraźnie rozdzielone rzędami wielkości odcinki. Pierwszym jest oczekiwanie listy w kolejce, liczone od chwili jej utworzenia na podstawie wydań, kiedy staje się widoczna na terminalu i dostępna do podjęcia, do chwili rozpoczęcia realizacji przez kompletującego, o medianie 6334 s, czyli około 105 min. Drugim jest właściwa realizacja listy, liczona od jej rozpoczęcia do zakończenia, o medianie 60 s, przy rozstępie ćwiartkowym od 30 s dla dolnego kwartyla do 123 s dla górnego oraz 338 s dla dziewiątego decyla. Zestawienie obu odcinków wraz z wyodrębnionym czasem samego pobierania zawiera Tabela 4.1. Różnica skali między oczekiwaniem a realizacją jest zasadnicza: mediana

2026

czasu spędzanego w kolejce jest przeszło stukrotnie dłuższa niż mediana czasu realizacji. Długie oczekiwanie ma jednak charakter organizacyjny. Listy powstają z wyprzedzeniem względem momentu ich podjęcia, a kompletujący wybierają je z terminala samodzielnie, wobec czego odcinek ten odzwierciedla relację między tempem tworzenia list a obsadą zmiany, nie zaś przebieg samej kompletacji. Skrócenie kolejki wymagałoby zmian w harmonogramie tworzenia list lub w obsadzie, a nie w rozmieszczeniu towaru, przez co odcinek ten pozostaje poza zakresem projektowanej relokacji i odnotowano go jako odrębne, drugorzędne wąskie gardło. Przedmiotem dalszej analizy jest czas realizacji, w obrębie którego mieści się przemieszczanie zależne od rozmieszczenia.

Tabela 4.1

Struktura czasu związanego z realizacją listy kompletacyjnej w 2025 roku

Odcinek czasu	Definicja	Mediana (p50)	Dziewiąty decyl (p90)
Oczekiwanie w kolejce	od utworzenia listy do rozpoczęcia realizacji	ok. 6334 s (105 min)	–
Realizacja listy	od rozpoczęcia do zakończenia listy	60 s	338 s
w tym pobieranie i przemieszczanie	od pierwszego do ostatniego pobrania	13 s	198 s

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych operacyjnych systemu WMS.

Zestawienie obu wierszy realizacji pokazuje, jak duża część czasu listy pozostaje poza oknem pomiaru przyjętym w dalszej analizie. Mediana realizacji listy wynosi 60 s, podczas gdy mediana okna między pierwszym a ostatnim pobraniem jedynie 13 s. Dla dziewiątego decyla relacja ta wynosi 338 s wobec 198 s, a więc wraz z długością listy udział okna pomiarowego rośnie. Na krótkich listach, stanowiących większość zleceń, przeważa dojście do pierwszej lokalizacji, powrót po ostatnim pobraniu oraz otwarcie i zamknięcie listy. Odcinki te zależą od rozmieszczenia towaru tak samo jak przejścia między kolejnymi pobraniami, lecz pozostają poza przyjętą podstawą pomiaru, co ma znaczenie dla interpretacji wyników symulacji w podrozdziale 4.4.

Strukturę realizowanych zamówień potwierdza rozkład wielkości list. Pełny rozkład zawiera Tabela 4.2. Listy jednopozycyjne stanowią 39,5% wszystkich zleceń, a mediana liczby pobrań na listę wynosi dwa. Odpowiada to profilowi *low-volume-high-mix* opisanemu w podrozdziale 1.1. Rozkład ma jednak istotny prawostronny ogon: listy obejmujące od trzech do pięciu pobrań stanowią 22,9% zleceń, od sześciu do dziesięciu 12,3%, a powyżej dziesięciu

2026

kolejne 10,5%, wobec czego listy dłuższe niż pięć pobrań obejmują łącznie 22,8% zleceń. Rozdrobnienie zamówień zwiększa udział nieproduktywnego przemieszczania przypadającego na pojedynczą pobraną sztukę, ponieważ dojście do lokalizacji obciąża krótką listę w takim samym stopniu jak długą (Boysen i in., 2019, s. 397). Zarazem to właśnie na listach dłuższych o wyniku decydują zmienne organizacyjne, w tym polityka rozmieszczenia, silniej niż układ przestrzenny obiektu (Suppini i in., 2024). Obie części rozkładu wskazują więc na rozmieszczenie jako czynnik rozstrzygający o czasie realizacji, choć z odmiennych powodów.

Tabela 4.2

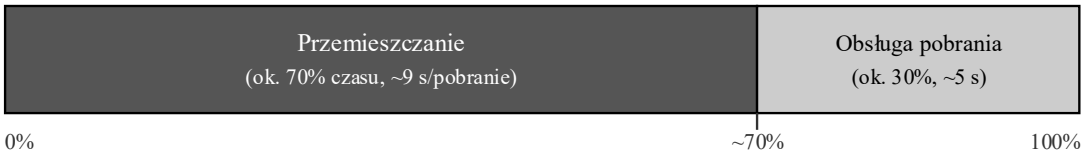
Rozkład list kompletacyjnych według liczby pobrań (2025 rok)

Liczba pobrań na listę	Udział list
1	39,5%
2	14,8%
3–5	22,9%
6–10	12,3%
powyżej 10	10,5%

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych operacyjnych systemu WMS.

Wydajność procesu wyznaczono jako liczbę pobrań przypadających na godzinę czasu aktywnej kompletacji. Ośmiu kompletujących zrealizowało w 2025 roku 641 422 pobrania. Średnia wydajność wyniosła 257,7 pobrania na godzinę, czyli 14,0 s na pojedyncze pobranie. Wartość ta rozkłada się na stałą składową obsługi pobrania, wynoszącą około 5 s, oraz zmienną składową przemieszczania, wynoszącą około 9 s. Rozbicie to jest zgodne z niezależną kalibracją zależności odległości od czasu przedstawioną w podrozdziale 3.2, w której czas obsługi samego pobrania oszacowano na wartość bliską pięciu sekundom. W ujęciu udziałowym obsługa pochłania około 30%, a przemieszczanie około 70% czasu mierzonego wewnątrz listy, co przedstawiono na Rysunku 4.1. W skali roku odpowiada to około 2489 godzinom czasu aktywnej kompletacji, z czego na samo przemieszczanie przypada blisko 1742 godziny. Przemieszczanie jest zatem nie tylko dominującą składową czasu realizacji, lecz także główną pozycją w bilansie pracy zespołu kompletującego.

2026



Udział składowych w czasie mierzonym między kolejnymi pobraniami (14,0 s/pobranie)

Rysunek 4.1. Struktura czasu wewnątrz listy kompletacyjnej w badanym magazynie.
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych operacyjnych systemu WMS.

Rozdzielenie czasu na składową obsługi oraz składową przemieszczania oparto na empirycznej zależności między odległością a czasem, wyznaczonej na rzeczywistych odstępach między kolejnymi pobraniami (por. podrozdział 3.2). Odstępy podzielono na dziesięć równolicznych przedziałów według różnicy rang między lokalizacjami kolejnych pobrań i dla każdego przedziału wyznaczono medianę czasu. Wyniki zawiera Tabela 4.3. Mediana rośnie monotonicznie wraz z odległością, od 5 s dla pobrań realizowanych w tej samej lokalizacji do 20 s dla przejść najdłuższych. Wartość 5 s odpowiada czynnościom niezależnym od odległości, to jest odnalezieniu towaru, pobraniu wskazanej liczby sztuk i potwierdzeniu operacji, natomiast nadwyżka powyżej tego poziomu wyraża czas samego przemieszczania. Monotoniczny przebieg zależności potwierdza, że ranga położenia jest użytecznym przybliżeniem odległości, mimo porządkowego charakteru tej miary. Zależność ta stanowi podstawę przeliczenia oszczędności drogi na oszczędność czasu, przedstawionego w podrozdziale 4.4, i wyznacza zarazem granicę tego przeliczenia: skróceniu podlega wyłącznie składowa zmienna, podczas gdy stała składowa obsługi pozostaje niezmieniona niezależnie od przyjętego rozmieszczenia.

2026

Tabela 4.3

Zależność czasu przejścia od odległości między kolejnymi pobraniami (czerwiec 2025 roku)

Przedział odległości	Różnica rang między lokalizacjami	Mediana czasu
1	do 0 (ta sama lokalizacja)	5 s
2	0–1	6 s
3	1	7 s
4	1–3	9 s
5	3–7	9 s
6	7–12	9 s
7	12–27	11 s
8	27–57	12 s
9	57–175	14 s
10	powyżej 175	20 s

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych operacyjnych systemu WMS.

Zmierzony udział przemieszczania, wynoszący około 70% czasu wewnątrz listy, jest wyższy od wartości przekraczającej 50%, podawanej w literaturze przedmiotu (De Koster i in., 2007, s. 481; Masae i in., 2020). Rozbieżność nie oznacza sprzeczności, lecz wynika z odmiennej podstawy pomiaru. Wartości literaturowe odnoszą udział przemieszczania do pełnego czasu pracy kompletującego, obejmującego również dojście do strefy, przygotowanie nośnika oraz czynności dokumentacyjne, podczas gdy w niniejszym badaniu udział ten wyznaczono względem czasu upływającego między kolejnymi pobraniami w obrębie jednej listy. Węższa podstawa pomiaru podnosi udział przemieszczania, ponieważ pomija czynności okołoprocesowe niezwiązane z przebywaniem trasy. Oba ujęcia prowadzą jednak do tego samego wniosku, w którym przemieszczanie stanowi dominującą i pierwszą w kolejności składową do optymalizacji. Zawężenie pomiaru do czasu między pobraniami ma zarazem konsekwencję metodyczną, ponieważ sprawia, że szacunek oszczędności czasowej z relokacji, przedstawiony w podrozdziale 4.4, pozostaje konserwatywny, pomija bowiem skracające się wraz z relokacją dojście i powrót.

Wydajność procesu odniesiono również do organizacji pracy zespołu. Osiem osób realizujących kompletację wykonało w badanym okresie od kilkudziesięciu do blisko stu pięćdziesięciu tysięcy pobrań, przy medianie 102 568 pobrań na osobę i wartości maksymalnej 145 466. Mediana przewyższa średnią, wynoszącą 80 178 pobrań na osobę, co oznacza, że część

2026

pracowników wykonywała kompletację jedynie przez fragment roku lub równolegle z innymi zadaniami. Rozrzut ten nie zaburza jednak przyjętej miary wydajności, ponieważ odnosi ona liczbę pobrań do czasu aktywnej kompletacji, a nie do liczby zatrudnionych, przez co jest niewrażliwa na różnice w wymiarze czasu pracy. Wielkości te odpowiadają miarom produktywności omówionym w podrozdziale 2.3, w których liczba pobrań na roboczogodzinę stanowi podstawową wielkość wyjściową oceny wydajności kompletującego (Klumpp i Loske, 2021, s. 847). Wyrażenie czasu przemieszczania w godzinach pracy zespołu pozwala ująć skutki rozmieszczenia w kategoriach zdolności przerobowej, a nie wyłącznie w wartościach procentowych, co wykorzystano w podrozdziale 4.4. Z perspektywy zarządzania obiektem istotne jest przy tym, że nieefektywne rozmieszczenie nie objawia się pojedynczym, zauważalnym zdarzeniem, lecz stałym i rozproszonym obciążeniem, którego skala ujawnia się dopiero w agregacji rocznej.

Uzupełnieniem diagnozy jest analiza przestojów procesu, wyznaczonych na podstawie rejestrowanych w systemie zdarzeń przerwania. W 2025 roku odnotowano 9872 przerwania, z których wszystkie powstały wskutek wyjścia z procesu przez przycisk, przy zerowej liczbie przerwań wynikających z zamknięcia lub zmiany karty przeglądarki. Struktura ta wskazuje, że przerwania mają charakter celowy i wynikają z planowego wstrzymania pracy, a nie z awarii aplikacji czy utraty sesji. Przerwania dotyczyły 6563 list, to jest 5,6% wszystkich zrealizowanych zleceń, a mediana czasu pojedynczego przerwania wyniosła 53 s. Podstawowe miary przestojów zestawiono w Tabeli 4.4. Łączny czas przerwań w skali roku, wynoszący około 1528 godzin, jest zawyżony przez przerwania przypadające na granicę zmian roboczych, w których wyjście z procesu wieczorem i jego wznowienie następnego dnia rejestrowane jest jako jedno długie przerwanie. Miarą oddającą rzeczywisty przestój jest zatem mediana rzędu 53 s, a nie suma czasu. Przestoje obejmują niewielki odsetek list i krótką medianę czasu, wobec czego stanowią wąskie gardło drugorzędne wobec przemieszczania i nie są głównym przedmiotem projektowanych usprawnień.

Tabela 4.4

Charakterystyka przestojów procesu kompletacji w 2025 roku

Miara	Wartość
Liczba przerwań	9872
Przyczyna przerwania	wyjście przyciskiem 9872 (100%), zamknięcie lub zmiana karty 0
Listy z przynajmniej jednym przerwaniem	6563 (5,6% z 117 650)
Mediana czasu pojedynczego przerwania	53 s

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych operacyjnych systemu WMS.

Diagnozę zamyka ocena jakości realizacji, która wyznacza granicę dopuszczalnych usprawnień. Spośród 117 650 zakończonych list jedynie 5 zawierało braki w realizacji. Odpowiada to udziałowi 0,004% i wskazuje na skuteczność kompletacji bliską stu procentom. Wysoka jakość procesu oznacza, że skracanie czasu kompletacji nie może następować kosztem wzrostu liczby błędów, a projektowana relokacja musi tę jakość zachować. Zestawienie ustaleń diagnozy prowadzi do jednoznacznego wniosku kierunkowego. Trasowanie jest zoptymalizowane, jakość realizacji bliska pełnej, a przestoje mają charakter drugorzędny, dlatego jedyną istotną i podatną na usprawnienie składową czasu realizacji pozostaje przemieszczanie, pochłaniające około 70% czasu wewnątrz listy i blisko 1742 godziny pracy zespołu rocznie. Ponieważ zakres przemieszczania zależy bezpośrednio od rozmieszczenia towaru, dalsza analiza koncentruje się na rotacji asortymentu, przedstawionej w podrozdziale 4.2, oraz na jej zestawieniu z położeniem jednostek na trasie kompletacji, przeprowadzonym w podrozdziale 4.3.

4.2. Analiza rotacji towarów metodą ABC w oparciu o częstość pobrań

Analiza rotacji asortymentu stanowi podstawę zarówno diagnozy nieefektywności rozmieszczenia, przedstawionej w podrozdziale 4.3, jak i projektu relokacji, omówionego w podrozdziale 4.4. Klasyfikację przeprowadzono metodą ABC według częstości pobrań, której wybór uzasadniono dostępnością danych w podrozdziale 3.1, a procedurę jej wyznaczenia opisano w podrozdziale 3.4. Jednostki asortymentowe uszeregowano malejąco według liczby pobrań zarejestrowanych w 2025 roku, wyznaczono ich skumulowany udział w łącznej liczbie pobrań, a następnie przypisano do klasy A jednostki obejmujące łącznie do 80% pobrań, do klasy B kolejne, do 95%, oraz do klasy C pozostałe. Analiza objęła pełny asortyment 3929 jednostek odpowiadających za 640 550 pobrań, czyli tę część spośród 641 422 pobrań zarejestrowanych

2026

w 2025 roku, dla której ustalono położenie w strefie kompletacji. Klasyfikacja na danych całorocznych uwzględnia ewentualne wahania sezonowe rotacji i nie odzwierciedla stanu przejściowego.

Wynik klasyfikacji przedstawiono w Tabeli 4.5. Do klasy A zaliczono 875 jednostek, stanowiących 22,3% asortymentu, które odpowiadały za 512 312 pobrań, czyli 80% ich łącznej liczby. Klasa B objęła 1008 jednostek, czyli 25,7% asortymentu i 15% pobrań, a klasa C 2046 jednostek, czyli 52,1% asortymentu przy zaledwie 5% pobrań. Rozkład ten potwierdza silne działanie zasady Pareto w badanym magazynie: nieco ponad jedna piąta asortymentu generuje cztery piąte całego ruchu kompletacyjnego, podczas gdy ponad połowa jednostek należy do wolnorotującego ogona odpowiadającego za jedną dwudziestą pobrań (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1415). Asymetria ta ma bezpośrednie znaczenie dla rozmieszczenia, ponieważ o łącznej drodze kompletacji decyduje położenie wąskiej grupy jednostek najczęściej odwiedzanych, nie zaś rozmieszczenie licznej, lecz rzadko pobieranej reszty asortymentu.

Tabela 4.5

Wynik klasyfikacji ABC asortymentu badanego magazynu według częstości pobrań (2025 rok)

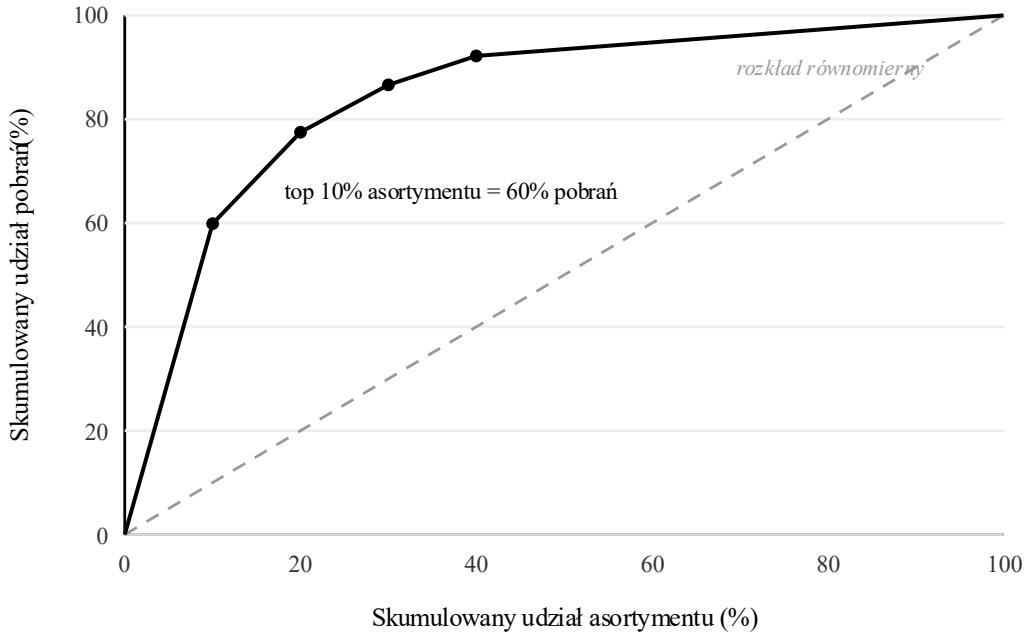
Klasa	Liczba jednostek (SKU)	Udział w asortymencie	Liczba pobrań	Udział w pobraniach
A	875	22,3%	512 312	80%
B	1008	25,7%	96 182	15%
C	2046	52,1%	32 056	5%
Razem	3929	100%	640 550	100%

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych operacyjnych systemu WMS.

Liczebność klas przekłada się wprost na zapotrzebowanie na przestrzeń w części trasy przylegającej do strefy wydań. Przy składowaniu dedykowanym, w którym jednostce odpowiada z reguły jedno miejsce składowe, 875 jednostek klasy A wymaga 875 spośród 2444 lokalizacji strefy kompletacji, to jest 35,8% jej długości. Klasy A i B łącznie, obejmujące 1883 jednostki, zajęłyby 77,0% lokalizacji. Skupienie całego ruchu szybkorotującego w początkowych 36% trasy jest zatem wykonalne pod względem liczby dostępnych miejsc, a jedynym ograniczeniem pozostaje ich pojemność, do której odniesiono się w podrozdziale 4.4. Rachunek ten wyznacza zarazem docelowy kształt rozmieszczenia: klasa A zamyka się w początkowych 36% strefy, klasa B wypełnia odcinek środkowy, a klasa C zajmuje pozostałe, najgłębiej położone lokalizacje.

2026

Szczegółowy rozkład koncentracji pobrań jest ostrzejszy niż wynikałoby to z klasycznej proporcji osiemdziesiąt do dwudziestu. Uporządkowanie asortymentu malejąco według częstości pobrań i wyznaczenie skumulowanego udziału w kolejnych decylach wykazało, że najaktywniejsze 10% jednostek skupia 59,9% wszystkich pobrań, najaktywniejsze 20% odpowiada za 77,5%, 30% za 86,6%, a 40% za 92,2% pobrań. Zależność tę, w postaci krzywej koncentracji Lorenza, przedstawiono na Rysunku 4.2. Krzywa przebiega znacznie powyżej przekątnej rozkładu równomiernego, a jej największe nachylenie przypada na początkowy odcinek asortymentu, obrazując skupienie ruchu na niewielkiej grupie jednostek. Praktyczną konsekwencją tak silnej koncentracji jest to, że relokacja obejmująca wyłącznie najaktywniejszą część asortymentu wychwytuje przeważającą część możliwej do uzyskania poprawy, przy niewielkiej liczbie przemieszczeń. Ustalenie to wraca w analizie wariantów wdrożenia w podrozdziale 4.4.



Rysunek 4.2. Krzywa koncentracji pobrań (Lorenza) dla asortymentu badanego magazynu.
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych operacyjnych systemu WMS.

Skala koncentracji ma znaczenie także dla liczby wyodrębnianych klas. Skoro najaktywniejsze 10% asortymentu odpowiada za blisko 60% pobrań, podział trójstopniowy wystarcza do celu przyjętego w pracy, którym jest skrócenie drogi kompletacji, a dalsze rozdrabnianie klas nie wniosłoby istotnej informacji, utrudniając zarazem obsługę w warunkach pracy ręcznej (van Kampen i in., 2012, s. 872). Rozkład ten wskazuje zarazem granicę zastosowania klasyfikacji. Klasa C, obejmująca ponad połowę jednostek i jedną dwudziestą pobrań, ma znikomy

2026

wpływ na długość trasy, wobec czego jej rozmieszczenie można podporządkować innym celom, na przykład gęstości składowania, bez pogorszenia wydajności procesu. Ustalenie to wykorzystano przy konstruowaniu wariantów relokacji w podrozdziale 4.4, w których jednostki wolnorotujące przejmują pozycje zwolnione przez asortyment szybkorotujący.

Koncentracja rotacji przekłada koszt i korzyść na tę samą, wąską grupę jednostek. Skoro obciążenie procesu skupia się w klasie A, to niewłaściwe rozmieszczenie właśnie tej klasy generuje większość nadmiarowej drogi, a jej relokacja przynosi większość możliwej poprawy. Wynika stąd, że skuteczne usprawnienie nie wymaga reorganizacji całego magazynu, lecz uporządkowania rozmieszczenia jednostek szybkorotujących, zgodnie z zasadą składowania klasowego opartego na rotacji, w którym towary najczęściej pobierane lokuje się możliwie blisko strefy wydań (Islam i Uddin, 2024, s. 126). Warunkiem przełożenia klasyfikacji na trwały efekt jest jednak stabilność podziału w czasie, ponieważ rozmieszczenie ustalone dla jednego okresu ma obowiązywać także w okresach następnych, mimo naturalnej rotacji asortymentu.

Trwałość klasyfikacji zbadano, porównując przynależność jednostek do klas w pierwszym i drugim półroczu 2025 roku. Pełne zestawienie przejść między klasami zawiera Tabela 4.6. Spośród 732 jednostek zaliczonych do klasy A w pierwszym półroczu 552, czyli 75,4%, zachowało tę przynależność również w drugim półroczu, natomiast pozostałe przeszły do klas niższych lub przestały być pobierane. Istotniejsza z perspektywy oceny skutków relokacji jest jednak trwałość w ujęciu wolumenu pobrań. Pobrania klasy A w drugim półroczu, wynoszące 267 650, w 79,3% pochodziły z jednostek, które należały do klasy A już w pierwszym półroczu. Klasyfikacja zbudowana na jednym półroczu obejmuje zatem blisko cztery piąte ruchu szybkorotującego okresu następnego.

Tabela 4.6

Macierz przejść jednostek asortymentowych między klasami ABC (pierwsze i drugie półrocze 2025 roku)

Klasa w pierwszym półroczu	do klasy A	do klasy B	do klasy C	brak pobrań	Razem
A	552	117	37	26	732
B	130	391	206	106	833
C	51	176	733	661	1621
nieobecne w pierwszym półroczu	100	183	463	–	746
Razem	833	867	1439	793	–

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych operacyjnych systemu WMS.

2026

Macierz przejść ujawnia dwa różne rodzaje zmienności asortymentu. Pierwszym jest migracja między klasami: 117 jednostek klasy A przeszło do klasy B, a 37 do klasy C, natomiast w kierunku przeciwnym awansowało do klasy A 130 jednostek z klasy B oraz 51 z klasy C. Przepływy te w znacznej mierze się kompensują, dzięki czemu liczebność klasy A pozostaje w obu półroczach zbliżona i wynosi odpowiednio 732 oraz 833 jednostki. Drugim rodzajem zmienności jest wymiana asortymentu: 793 jednostki pobierane w pierwszym półroczu przestały być pobierane w drugim, a 746 jednostek pojawiło się jako nowe. Zjawisko to koncentruje się w klasie C, z której 661 jednostek wypadło ze zbioru pobieranych. Odpowiada to naturalnemu wygaszaniu asortymentu wolnorotującego i nie wpływa istotnie na długość trasy kompletacji. Rozkład ten ma dwie konsekwencje dla projektu relokacji. Po pierwsze, rdzeń szybkorotujący jest trwały, ponieważ trzy czwarte jednostek klasy A utrzymuje przynależność do niej w kolejnym półroczu, a przepływy w obrębie klas A oraz B pozostają ograniczone. Po drugie, wśród jednostek nowych 100 trafiło od razu do klasy A, generując 17 933 pobrania, wobec czego rozmieszczenie ustalone z wyprzedzeniem nie obejmuje części ruchu szybkorotującego. Jest to bezpośrednie źródło ubytku skuteczności rozmieszczenia w czasie i uzasadnia cykliczne powtarzanie klasyfikacji, wskazywane w literaturze jako warunek utrzymania jej aktualności (Kubasakova i Kubanova, 2024, s. 461, 469).

Analiza przejść między klasami pełni w badaniu funkcję, którą w klasycznym ujęciu przypisuje się analizie XYZ, omówionej w podrozdziale 2.2. Klasyfikacji tej nie zastosowano, ponieważ opisuje ona regularność popytu i służy przede wszystkim planowaniu zapasów, podczas gdy o długości trasy kompletacji rozstrzyga sama częstość odwiedzin lokalizacji. Potwierdza to przywołana w podrozdziale 2.2 symulacja, w której rozmieszczenie łączące analizy ABC i XYZ dało jeden z najsłabszych wyników czasowych, ustępując rozmieszczeniu opartemu na samej częstości pobrań (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1416). Dla projektu relokacji rozstrzygające jest natomiast to, czy ustalony podział zachowuje ważność w okresie następnym, a na to pytanie odpowiada macierz przejść wyznaczona bezpośrednio z danych badanego obiektu.

Poziom stabilności klasyfikacji ma dwojakie znaczenie metodyczne. Z jednej strony pokrycie blisko czterech piątych wolumenu szybkorotującego uzasadnia ocenę projektu relokacji poza próbą uczącą, w której klasyfikację ustala się na jednym okresie, a jej skutki mierzy na okresie następnym, co przedstawiono w podrozdziale 4.4. Z drugiej strony pozostałe około jednej piątej wolumenu, wynikające z jednostek nowych, wycofanych oraz migrujących między klasami, wyznacza naturalny ubytek skuteczności rozmieszczenia ustalonego z wyprzedzeniem i tłumaczy, dlaczego wynik oceny poza próbą uczącą jest nieco niższy od potencjału pełnej relokacji ocenianej na tych samych danych. Rotacja asortymentu jest więc obecna, lecz na tyle

2026

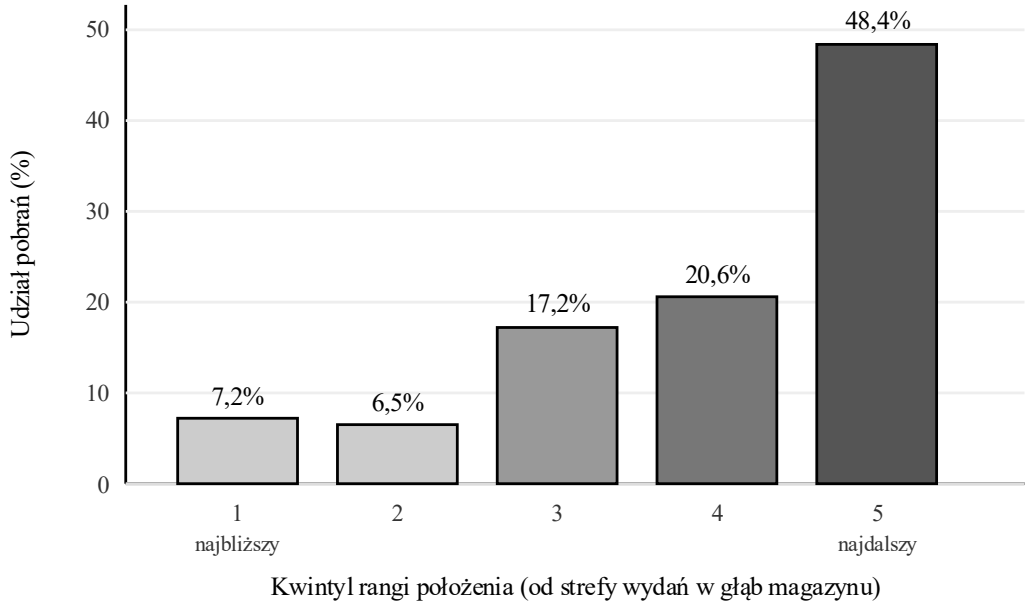
ograniczona, że nie podważa trwałości podziału na klasy w horyzoncie półrocza. Klasyfikacja ABC ustala, które jednostki odpowiadają za ruch kompletacyjny, natomiast ocena efektywności rozmieszczenia wymaga zestawienia tej rotacji z faktycznym położeniem jednostek na trasie kompletacji, co stanowi przedmiot podrozdziału 4.3.

4.3. Weryfikacja zależności między lokalizacją towarów rotujących a czasem kompletacji

Weryfikacja hipotezy pierwszej wymaga zestawienia rotacji asortymentu z jego położeniem na trasie kompletacji. Hipoteza zakłada, że towary o najwyższej rotacji są składowane daleko od strefy wydań i rozproszone wzdłuż trasy. Ponieważ trasowanie w obiekcie jest zoptymalizowane, co ustalono w podrozdziale 3.2, nadmiarowa droga może wynikać wyłącznie z rozmieszczenia towaru, nie zaś z przebiegu marszruty. Położenie jednostki wyrażono rangą jej lokalizacji, wyznaczoną przez uporządkowanie 2444 lokalizacji strefy kompletacji od najbliższej strefie wydań do najdalszej. Zależność między rotacją a położeniem zbadano trzema uzupełniającymi się metodami, którymi są rozkład pobrań wzdłuż trasy, mediana rangi położenia w poszczególnych klasach ABC oraz współczynnik korelacji między rangą a liczbą pobrań. Zbieżność wyników trzech metod rozstrzyga o przyjęciu lub odrzuceniu hipotezy.

Pierwszą i najmocniejszą przesłanką jest rozkład pobrań wzdłuż trasy. Lokalizacje podzielono na pięć równolicznych przedziałów rangi, od kwintyla najbliższego strefie wydań do najdalszego, i wyznaczono udział pobrań przypadający na każdy z nich. Udział ten wynosi kolejno 7,2%, 6,5%, 17,2%, 20,6% oraz 48,4%, co przedstawiono na Rysunku 4.3. Rozkład rośnie wraz z oddalaniem się od strefy wydań, a najdalszy kwintyl skupia niemal połowę wszystkich pobrań. Najdalsze dwie piąte trasy, obejmujące kwintyle czwarty i piąty, odpowiadają łącznie za 69,0% pobrań, podczas gdy najbliższe dwie piąte jedynie za 13,7%. Rozmieszczenie efektywne dałoby rozkład malejący, w którym najwięcej pobrań przypada na lokalizacje przy strefie wydań, a ich udział spada w głąb magazynu (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1415). Obserwowany rozkład jest odwrotnością tego wzorca i wprost wskazuje na nieefektywność rozmieszczenia.

2026



Rysunek 4.3. Rozkład pobrań wzdłuż trasy kompletacji według kwintyli rangi położenia.
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych operacyjnych systemu WMS.

Skalę odchylenia od stanu neutralnego wyznacza porównanie z rozmieszczeniem losowym. Kwintyle obejmują zbliżoną liczbę lokalizacji, od 473 do 474, wobec czego przypisanie asortymentu bez żadnej reguły dawałoby w przybliżeniu po 20% pobrań na każdy z nich. Obserwowany udział najdalszego kwintyla, wynoszący 48,4%, przewyższa ten poziom blisko dwuipółkrotnie, a łączny udział dwóch kwintyli przylegających do strefy wydań, wynoszący 13,7%, jest blisko trzykrotnie niższy od oczekiwanych dla nich 40%. Obecne rozmieszczenie nie jest zatem jedynie pozbawione reguły wiążącej rotację z położeniem, lecz wypada gorzej niż przypisanie losowe, ponieważ ruch kompletacyjny skupia się w najdroższej części trasy. Ustalenie to zaostrza wymowę hipotezy pierwszej, przedmiotem usprawnienia nie jest bowiem brak optymalizacji, lecz układ działający wbrew rotacji.

Drugą przesłanką jest położenie poszczególnych klas rotacji. Każdej jednostce asortymentowej przypisano reprezentatywną rangę położenia, wyznaczoną jako średnia rang lokalizacji ważona liczbą pobrań, a następnie porównano rozkład tych rang w klasach ABC. Zestawienie zawiera Tabela 4.7. Mediana rangi położenia klasy A wynosi 1856 na 2444 lokalizacje, wobec 1451 dla klasy B i 1468 dla klasy C. Klasa A, odpowiadająca za 80% pobrań, jest zatem składowana najgłębiej, dalej od strefy wydań niż klasy wolniej rotujące. Rozstęp jej położeń, od rangi 740 dla dziesiątego percentyla do 2387 dla dziewięćdziesiątego, obejmuje niemal całą długość trasy i świadczy o rozproszeniu jednostek szybkorotujących zamiast ich skupienia

2026

w jednej strefie. Oba spostrzeżenia odpowiadają dwóm członom hipotezy pierwszej: towary o najwyższej rotacji leżą daleko od strefy wydań i są rozproszone wzdłuż trasy. Układ, w którym najczęściej odwiedzana klasa zajmuje najgłębsze i najbardziej rozrzucone pozycje, jest przeciwieństwem składowania klasowego opartego na rotacji.

Skalę rozbieżności wyznacza porównanie z przedziałem docelowym. Rozmieszczenie oparte na rotacji lokowałoby wszystkie 875 jednostek klasy A w przedziale rang od 1 do 875, wyznaczonym w podrozdziale 4.2. Obecnie dziesiąty percentyl położenia tej klasy wypada dopiero na randze 740, a jej mediana na 1856, wobec czego w przedziale docelowym mieści się niewielka część jednostek odpowiadających za 80% pobrań. Ponad połowa ruchu szybkorotującego odbywa się zatem poza obszarem, który przy rozmieszczeniu opartym na rotacji powinien mieścić go w całości.

Tabela 4.7

Rozkład rangi położenia jednostek asortymentowych według klas ABC (2444 lokalizacje)

Klasa	Udział w pobraniach	Ranga (p10)	Mediana rangi (p50)	Ranga (p90)
A	80%	740	1856	2387
B	15%	313	1451	2407
C	5%	201	1468	2442

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych operacyjnych systemu WMS.

Trzecią, uzupełniającą przesłanką jest korelacja między rangą lokalizacji a liczbą pobrań. Na poziomie lokalizacji współczynnik korelacji wynosi 0,242 przy 2367 lokalizacjach, a na poziomie jednostek asortymentowych 0,158 przy 3929 jednostkach. Wartość dodatnia potwierdza brak efektywnego gradientu: częściej odwiedzane miejsca leżą raczej dalej od strefy wydań, podczas gdy rozmieszczenie efektywne dałoby korelację ujemną. Współczynnik determinacji pozostaje jednak niski i wynosi 0,059 na poziomie lokalizacji oraz 0,025 na poziomie jednostek, co oznacza, że samo położenie tłumaczy jedynie kilka procent zmienności liczby pobrań. Korelacja pełni zatem funkcję dowodu kierunkowego, potwierdzającego zwrot zależności, natomiast siłę rozstrzygnięcia hipotezy niosą analiza kwintylowa i klasowa, w których różnice są wyraźne. Rozróżnienie to jest istotne metodycznie, ponieważ zapobiega przypisaniu współczynnikowi korelacji roli większej, niż wynika z jego wartości.

Zestawienie rotacji z położeniem odnosi się do czasu kompletacji pośrednio, przez długość trasy. Zależność tę ustalono empirycznie w podrozdziale 4.1: mediana czasu dzielącego kolejne pobrania rośnie z 5 s przy pobraniach z tej samej lokalizacji do 20 s przy przejściach dłuższych niż 175 rang (por. Tabela 4.3), a przemieszczanie pochłania około 70% czasu

2026

mierzonego wewnątrz listy. Położenie jednostki przekłada się więc na czas przez drogę, nie zaś przez czas obsługi samego pobrania, który pozostaje stały niezależnie od rozmieszczenia. Skoro 48,4% pobrań przypada na najdalszy kwintyl, a klasa A odpowiadająca za 80% ruchu leży na medianie rangi 1856 z 2444, to typowa lista wymaga dojścia w głąb strefy i powrotu na dystansie bliskim jej pełnej długości. Roczny koszt tego układu wyraża się w blisko 1742 godzinach przemieszczania wyznaczonych w podrozdziale 4.1. Nieefektywność rozmieszczenia ma zatem wymierne przełożenie na czas procesu, a jego skalę oszacowano w podrozdziale 4.4.

Skalę nieefektywności można wyrazić również przez porównanie z układem odwrotnym. Gdyby rozkład pobrań wzdłuż trasy stanowił zwierciadlane odbicie obserwowanego, to jest gdyby 48,4% pobrań przypadało na kwintyl najbliższy strefie wydań, a 7,2% na najdalszy, przeciętna trasa domykałaby się w początkowej części strefy. Układ obserwowany jest natomiast obciążony w części najdalszej, co oznacza, że obiekt ponosi koszt przemieszczania bliski maksymalnemu dla danej struktury zamówień. Nie wynika to z pojedynczego błędu, lecz z braku reguły wiążącej rotację z położeniem. Przy składowaniu dedykowanym, prowadzonym bez cyklicznej relokacji, przypisanie lokalizacji utrwala się w chwili pierwszego wprowadzenia towaru i nie podlega korekcie wraz ze zmianą jego rotacji. Literatura wskazuje to jako podstawową słabość tej strategii (Lorenc, 2014, s. 3838, 3840).

Diagnozę uzupełnia charakterystyka polityki składowania, warunkująca wykonalność relokacji. Migawka stanu magazynu wykazała, że 94,7% jednostek asortymentowych zajmuje pojedynczą lokalizację, a 96,4% lokalizacji mieści jeden asortyment. Potwierdza to dedykowany charakter składowania opisany w podrozdziale 3.1. Spośród 2444 lokalizacji strefy kompletacji w użyciu pozostaje 1875, a około 570 miejsc jest wolnych. Nieefektywność rozmieszczenia nie wynika zatem z braku miejsca, lecz z przypisania jednostek do lokalizacji, a istniejący zapas wolnych miejsc umożliwia relokację przez zmianę przypisania, bez rozbudowy przestrzeni. Właściwość ta stanowi warunek konieczny projektu usprawnień przedstawionego w podrozdziale 4.4.

Trzy zastosowane metody prowadzą do zgodnego wniosku. Pobrania koncentrują się w najdalszej części trasy, klasa A leży najgłębiej i jest rozproszona, a korelacja rangi z liczbą pobrań jest dodatnia zamiast ujemnej. Hipotezę pierwszą uznaje się w związku z tym za potwierdzoną: w badanym magazynie występuje nieefektywność rozmieszczenia, polegająca na składowaniu towarów o najwyższej rotacji daleko od strefy wydań i w rozproszeniu. Nieefektywność ma charakter strukturalny i wynika z przypisania lokalizacji, nie z reguł trasowania, które są już zoptymalizowane. Wobec tego jedynym sposobem skrócenia drogi i czasu

2026

kompletacji pozostaje relokacja asortymentu, której potencjał, granice odporności oraz wykonalność oceniono w podrozdziale 4.4.

4.4. Projekt zmian w strategii rozmieszczenia i symulacja oszczędności

Podrozdział weryfikuje hipotezę drugą, zakładającą, że relokacja towarów według częstości pobrań skraca łączną drogę i czas kompletacji, oraz hipotezę trzecią, zakładającą, że uzyskiwalna poprawa jest istotna i osiągalna samą zmianą przypisania lokalizacji, bez ingerencji w infrastrukturę. Projekt relokacji opiera się na modelu opisanym w podrozdziale 3.4. Ze względu na dedykowany charakter składowania, potwierdzony w podrozdziale 4.3, relokacja sprowadza się do permutacji przypisania jednostek asortymentowych do istniejących lokalizacji: jednostki uszeregowano malejąco według częstości pobrań i przypisano im kolejne, coraz dalsze pozycje rangowe, tak aby najczęściej pobierane trafiły najbliżej strefy wydań. Liczba lokalizacji zajmowanych przez asortyment pozostaje niezmieniona. Skutki relokacji oceniono poza próbą uczącą: klasyfikację rotacji ustalono na pierwszym półroczu 2025 roku, a długość tras porównano na rzeczywistych listach z drugiego półrocza. Podział ten sprawdza, czy rozmieszczenie oparte na rotacji z jednego okresu zachowuje skuteczność w okresie następnym, a jego zasadność potwierdza wykazana w podrozdziale 4.2 stabilność klasyfikacji, w której blisko cztery piąte wolumenu klasy A drugiego półrocza pochodziło z jednostek zaklasyfikowanych do niej już w pierwszym.

Pełna relokacja asortymentu skraca łączną drogę kompletacji o 69,0%. Na zbiorze 58 751 list z drugiego półrocza średnia długość trasy, wyrażona w jednostkach rangi, spada z 4219,9 do 1306,6, a łączna droga maleje z 247,9 do 76,8 miliona jednostek rangi. Wynik pochodzi z oceny poza próbą uczącą, wobec czego nie jest efektem dopasowania rozmieszczenia do tych samych danych, na których je zbudowano, lecz odzwierciedla skuteczność klasyfikacji przeniesionej na okres następny. Redukcja drogi tej skali potwierdza pierwszą część hipotezy drugiej, dotyczącą skrócenia trasy kompletacji.

Wielkości wyrażone w jednostkach rangi zyskują konkretny sens po przeliczeniu na położenie najgłębszego pobrania, które w przyjętym modelu wyznacza długość trasy. Średnia droga 4219,9 jednostki odpowiada sięganiu po towar położony przeciętnie na randze 2111 spośród 2444 lokalizacji strefy kompletacji, czyli na 86% jej długości. Po relokacji średnia droga 1306,6 jednostki odpowiada randze 654, to jest 27% długości strefy. Zmiana polega zatem na tym, że przeciętna lista przestaje wymagać dojścia do najdalszych rejonów magazynu i domyka się w jego początkowym odcinku. W wariantach częściowych przeciętne położenie najgłębszego pobrania wypada na randze 818 przy relokacji klasy A oraz 1579 przy relokacji stu

2026

jednostek, co pokazuje, że nawet ograniczona zmiana wyprowadza typową trasę z najdalszej części strefy.

Skrócenie drogi przekłada się na krótszy czas, choć w mniejszym stopniu. Zgodnie z rozkładem czasu na składową obsługi i przemieszczania, ustalonym w podrozdziale 3.2, skróceniu podlega jedynie składowa przemieszczania, stanowiąca około 70% czasu wewnątrz listy, podczas gdy stała składowa obsługi pobrania pozostaje niezmieniona. Redukcja drogi o 69,0% przekłada się w związku z tym na skrócenie czasu aktywnej kompletacji o około 48%. Wartość ta jest szacunkiem konserwatywnym, ponieważ czas przemieszczania zmierzono jako odstęp między kolejnymi pobraniami, z pominięciem dojścia do pierwszej lokalizacji i powrotu po ostatnim pobraniu, które relokacja również skraca. Skrócenie zarówno drogi, jak i czasu potwierdza hipotezę drugą w pełnym zakresie.

Skutek relokacji wyraża się również trzecim miernikiem wskazanym w podrozdziale 3.4, czyli wydajnością kompletacji. Przy obecnym rozmieszczeniu jedno pobranie pochłania 14,0 s czasu aktywnej kompletacji. Odpowiada to wydajności 257,7 pobrania na godzinę wyznaczonej w podrozdziale 4.1. Skrócenie tego czasu o około 48% obniża nakład przypadający na pojedyncze pobranie do około 7,3 s i podnosi wydajność do blisko 495 pobrań na godzinę. Relokacja ograniczona do klasy A daje odpowiednio około 8,0 s i blisko 450 pobrań na godzinę. Ujęcie takie wiąże efekt z nakładem pracy i pokazuje, że zmiana rozmieszczenia podnosi zdolność przerobową obiektu przy niezmienionym zatrudnieniu oraz niezmienionej infrastrukturze.

Odporność uzyskanego wyniku zbadano, przeliczając redukcję drogi pod trzema różnymi metrykami kosztu trasy, których zestawienie zawiera Tabela 4.8. Metryka bazowa, przyjmująca koszt listy jako podwojoną rangę najgłębszego pobrania, daje redukcję 69,0%. Metryka sumująca rangi wszystkich pobrań na liście daje 71,3%, co dowodzi, że wynik nie zależy ani od przyjętego podwojenia, ani od sprowadzenia kosztu do samego najgłębszego pobrania. Trzecia metryka, ujmująca koszt jako rozpiętość między najgłębszym a najpłytszym pobraniem, daje wartość ujemną, równą −10,6%. Rozbieżność ta nie podważa wyniku, lecz ujawnia jego warunek. Metryka rozpiętości pomija punkt wejścia i wyjścia strefy, przy którym kompletujący rozpoczyna i kończy trasę, podczas gdy relokacja według częstości celowo oddala od siebie jednostki szybko- i wolnorotujące, przez co rozpiętość list mieszanych rośnie. Koszt rzeczywisty w badanym obiekcie wyznacza jednak głębokość dojścia liczona od stałego frontu strefy wydań, a nie wzajemna odległość pobrań, ponieważ trasa ma charakter powrotny i jest zakotwiczona na tym froncie, co ustalono w podrozdziale 3.2. Metryka rozpiętości mierzy w istocie współwystępowanie jednostek na liście, będące przedmiotem składowania korelacyjnego, które pozostaje poza zakresem przyjętego kryterium jednokryterialnego (Islam i Uddin, 2024,

2026

s. 126). Wynik redukcji jest zatem odporny na szczegóły modelu kosztu, zachowuje natomiast zależność od udokumentowanego założenia o trasie zakotwiczonej na froncie strefy.

Tabela 4.8

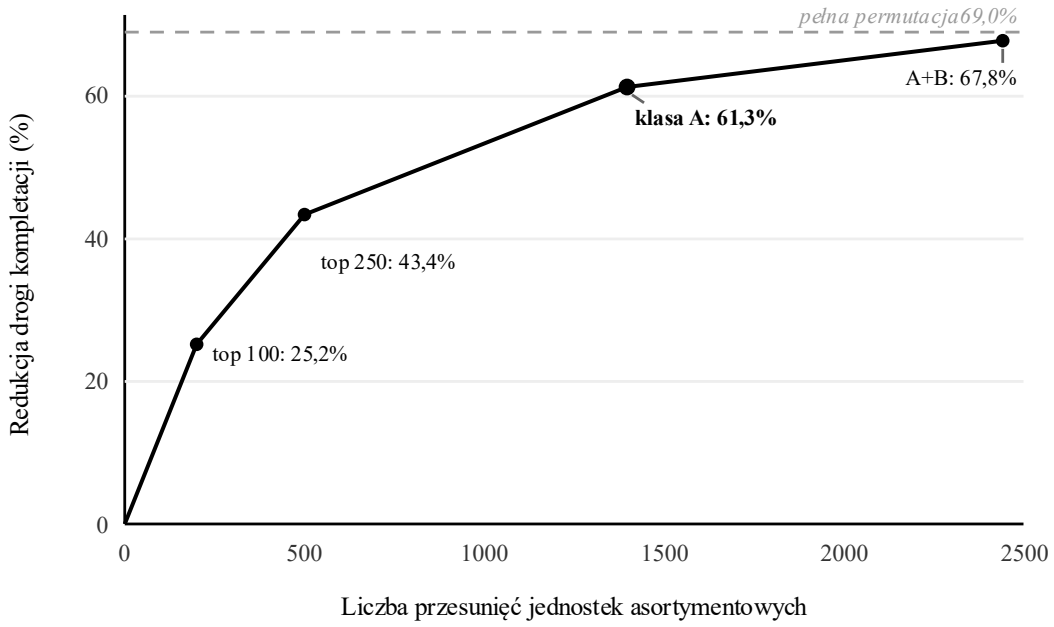
Redukcja drogi kompletacji pod trzema metrykami kosztu trasy (ocena poza próbą uczącą)

Metryka kosztu trasy	Definicja kosztu listy	Redukcja drogi
M1 (bazowa)	podwojona ranga najgłębszego pobrania	69,0%
M2	suma rang wszystkich pobrań	71,3%
M3	rozpiętość między najgłębszym a najpłytszym pobraniem	−10,6%

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych operacyjnych systemu WMS.

Pełna relokacja wyznacza potencjał teoretyczny, osiągalny przy przemieszczeniu całego asortymentu. Z perspektywy wdrożeniowej istotne jest, jaką część tego potencjału zapewnia relokacja ograniczona do węższego zbioru jednostek, ponieważ każde przemieszczenie towaru wiąże się z nakładem pracy. Liczba przesunięć obejmuje zarówno jednostki wprowadzane na dogodniejsze pozycje, jak i jednostki z tych pozycji wypierane. Wypierany jest przy tym głównie asortyment wolnorotujący, zajmujący dziś miejsca bliskie strefy wydań, na co wskazuje rozkład rang klas B i C, których dziesiąte percentyle wynoszą odpowiednio 313 i 201 wobec 740 dla klasy A (Tabela 4.7). Przeniesienie tych jednostek w głąb strefy nie pogarsza wyniku, ponieważ klasa C odpowiada za 5% pobrań, a jej wkład w łączną drogę jest odpowiednio niewielki. Zależność między liczbą przesunięć a uzyskaną redukcją drogi przedstawiono na Rysunku 4.4, a odpowiadające jej warianty zestawiono w Tabeli 4.9. Relokacja stu najczęściej pobieranych jednostek, wymagająca 200 przesunięć, skraca drogę o 25,2%, to jest o ponad jedną trzecią pełnego potencjału. Relokacja klasy A, obejmująca 1397 przesunięć, daje redukcję 61,3%, czyli 89% potencjału pełnej permutacji, a rozszerzenie jej o klasę B, przy 2442 przesunięciach, podnosi wynik do 67,8%, praktycznie dorównując pełnej relokacji. Krzywa ma wyraźnie malejące przyrosty: podstawową część korzyści zapewnia relokacja wąskiej grupy jednostek szybkorotujących, a dokładanie kolejnych, coraz rzadziej pobieranych jednostek przynosi coraz mniejszy efekt. Ustalenie to jest bezpośrednią konsekwencją silnej koncentracji rotacji wykazanej w podrozdziale 4.2 i ma znaczenie praktyczne, ponieważ pozwala uzyskać większość poprawy przy ułamku nakładu pełnej reorganizacji.

2026



Rysunek 4.4. Krzywa wdrożenia: redukcja drogi kompletacji w funkcji liczby przesunięć.
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych operacyjnych systemu WMS.

Redukcję drogi i czasu można wyrazić w jednostkach pracy zespołu kompletującego. Aktywny czas kompletacji w 2025 roku wyniósł około 2489 godzin, z czego na przemieszczanie przypadło blisko 1742 godziny. Pełna relokacja, skracająca czas aktywnej kompletacji o około 48%, odpowiada oszczędności rzędu 1195 godzin pracy rocznie, relokacja klasy A około 1070 godzin, a relokacja stu jednostek około 450 godzin. Wartości te wyrażają uwolnioną zdolność przerobową magazynu, którą można przeznaczyć na obsługę większego wolumenu zamówień bez zwiększania zatrudnienia, zgodnie ze wskaźnikami produktywności omówionymi w podrozdziale 2.3. Zestawienie wariantów wraz z przeliczeniem na czas i pracę zawiera Tabela 4.9.

2026

Tabela 4.9

Warianty relokacji: nakład, redukcja drogi i czasu oraz oszczędność pracy (ocena poza próbą uczącą)

Wariant relokacji	Przesunięcia	Redukcja drogi	Udział potencjału	Redukcja czasu	Oszczędność [h/rok]
100 najczęstszych jednostek	200	25,2%	37%	~18%	~450
250 najczęstszych jednostek	500	43,4%	63%	~30%	~760
Klasa A	1397	61,3%	89%	~43%	~1070
Klasa A i B	2442	67,8%	98%	~47%	~1180
Pełna permutacja	cały asortyment	69,0%	100%	~48%	~1195

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych operacyjnych systemu WMS.

Krzywa wdrożenia pozwala sformułować zalecenie o charakterze praktycznym. Wariant obejmujący relokację klasy A zapewnia 89% potencjału pełnej permutacji przy 1397 przesunięciach, a więc przy nakładzie znacznie mniejszym niż reorganizacja całego asortymentu, wobec czego cechuje się najkorzystniejszą relacją efektu do nakładu. Wariant obejmujący sto jednostek, wymagający zaledwie 200 przesunięć, daje 25,2% redukcji drogi i może posłużyć jako etap pierwszy, pozwalający potwierdzić oczekiwany efekt na ograniczonej skali przed podjęciem szerszej zmiany. Rozszerzenie relokacji na klasę B podnosi wynik jedynie o 6,5 punktu procentowego przy niemal dwukrotnie większej liczbie przesunięć i pozostaje wątpliwe ekonomicznie. Etapowanie zmiany ma także uzasadnienie operacyjne, ponieważ przesunięcia towaru wykonywane są w czynnym magazynie i konkurują o zasoby z bieżącą kompletacją oraz z uzupełnianiem zapasu, prowadzonym równolegle z pobieraniem, na co wskazano w podrozdziale 1.2. Relokacja przeprowadzona partiami, rozłożona w czasie i rozpoczęta od jednostek o najwyższej rotacji, pozwala uzyskać przeważającą część korzyści bez wstrzymywania pracy obiektu.

Zapas około 570 wolnych lokalizacji, wykazany w podrozdziale 4.3, ma przy tym znaczenie organizacyjne, a nie pojemnościowe. Permutacja przypisania nie wymaga dodatkowej przestrzeni, ponieważ liczba zajmowanych miejsc pozostaje niezmieniona, natomiast wolne lokalizacje pozwalają wykonywać ją pojedynczymi przełożeniami zamiast łańcuchów wymian, upraszczając przeprowadzenie zmiany w czynnym magazynie.

2026

Zestawienie oszczędności z nakładem pozwala wyznaczyć próg opłacalności pojedynczego przesunięcia, rozumiany jako czas, powyżej którego relokacja nie zwróciłaby się w pierwszym roku. Wariant obejmujący sto jednostek zwalnia około 450 godzin rocznie za 200 przesunięć, czyli próg 2,2 godziny na przesunięcie. Relokacja klasy A daje około 1070 godzin za 1397 przesunięć, czyli próg około 46 minut, a rozszerzenie jej o klasę B obniża go do około 29 minut. Progi te wielokrotnie przewyższają czas jednej operacji przełożenia towaru w obrębie strefy kompletacji, wobec czego każdy z wariantów zwraca nakład w pierwszym roku. Sama pracochłonność przesunięcia nie jest jednak rejestrowana w systemie, dlatego wielkość tę należy traktować jako kryterium decyzyjne, a nie jako zmierzony koszt. Malejąca wartość progu potwierdza rosnący koszt krańcowy kolejnych przesunięć i wspiera etapowe wdrożenie rozpoczynane od jednostek o najwyższej rotacji.

Przełożenie wyniku na działanie wymaga procedury możliwej do powtarzania. Wszystkie dane potrzebne do wyznaczenia klasyfikacji oraz nowego przypisania pochodzą z rejestru zdarzeń kompletacji opisanego w podrozdziale 3.2, wobec czego procedurę można osadzić wewnątrz samego systemu WMS, bez pozyskiwania danych spoza niego. Obejmuje ona pięć kroków. Pierwszym jest przeliczenie liczby pobrań każdej jednostki asortymentowej w oknie obejmującym poprzedni okres oraz przypisanie klas według progów 80 i 95%. Drugim jest uszeregowanie jednostek według częstości pobrań i zestawienie go z bieżącym porządkiem rang lokalizacji. Trzecim jest wyznaczenie listy różnic, czyli tych jednostek, których pozycja docelowa odbiega od obecnej na tyle, by przesunięcie mieściło się w progu opłacalności. Czwartym jest realizacja przesunięć partiami, w okresach niższego obciążenia obiektu, z wykorzystaniem wolnych lokalizacji jako miejsc pośrednich. Piątym jest kontrola efektu miernikami czasu cyklu oraz wydajności, omówionymi w podrozdziale 2.3 i dostępnymi w rejestrze bez dodatkowego pomiaru.

Ponieważ klasyfikacja rotacji traci aktualność wraz z wymianą asortymentu, co wykazano w podrozdziale 4.2, wdrożenie nie powinno mieć charakteru jednorazowego. Cykliczne powtarzanie analizy i korygowanie położenia jednostek, których klasa się zmieniła, utrzymuje uzyskany efekt w czasie i odpowiada zaleceniu formułowanemu w literaturze przedmiotu (Kubasakova i Kubanova, 2024, s. 461). Długość okna aktualizacji wynika z trwałości samej klasyfikacji. Podział ustalony na jednym półroczu obejmuje 79,3% wolumenu klasy A półrocza następnego, wobec czego półroczny cykl przeliczenia utrzymuje rozmieszczenie w zgodzie z bieżącą rotacją przy ograniczonej liczbie korekt. Skrócenie cyklu podnosi pokrycie kosztem częstszych przesunięć, a jego wydłużenie działa odwrotnie. Wybór okresu ma zatem tę samą naturę co wybór zakresu relokacji i podlega temu samemu kryterium relacji efektu do nakładu.

2026

Uzyskane wartości przewyższają wyniki wcześniejszych badań symulacyjnych i wymagają wyjaśnienia. Rozmieszczenie oparte na analizie ABC skracało czas kompletacji o 28,72% względem składowania na wolnych miejscach (Lorenc i Szkoda, 2016, s. 1417), a uwzględnienie kryterium korelacji ograniczało drogę o 22,55–39,67% względem składowania opartego na obrocie (Islam i Uddin, 2024, s. 136–137). Wyższy wynik badanego obiektu ma trzy źródła. Po pierwsze, stan wyjściowy jest wyjątkowo nieefektywny, ponieważ klasa A leży na medianie rangi 1856 na 2444 lokalizacje, co wykazano w podrozdziale 4.3, wobec czego do odzyskania pozostaje więcej niż w magazynie o umiarkowanym nieuporządkowaniu. Po drugie, pełna permutacja wyznacza potencjał teoretyczny wobec stanu obecnego, podczas gdy cytowane badania porównują konkretne warianty rozmieszczenia między sobą. Po trzecie, warianty częściowe mieszczą się w przedziałach zbliżonych do literatury: relokacja stu jednostek daje 25,2% redukcji drogi, a relokacja klasy A pośrednie 61,3%. Po zestawieniu ze scenariuszami cytowanych prac wynik pozostaje z nimi spójny co do rzędu wielkości. Rozbieżność wynika zatem ze skali nieuporządkowania stanu wyjściowego oraz z teoretycznego charakteru pełnego wariantu, nie zaś z błędu metody.

Interpretacja wyników wymaga rozróżnienia potencjału teoretycznego od skali osiągalnej w praktyce. Podane redukcje odnoszą pełne, optymalne rozmieszczenie do stanu obecnego, bez ograniczeń pojemnościowych lokalizacji, natomiast rzeczywista, etapowa relokacja wychwyci jedynie część tego potencjału. Model odległości ma charakter porządkowy i nie rozróżnia przejścia w obrębie alei od zmiany alei, a kierunek trasy przyjęto na podstawie dowodów pośrednich, co opisano w podrozdziałach 3.2 oraz 3.4. Najistotniejszym ograniczeniem wykonalności pozostaje brak danych o gabarytach asortymentu, uniemożliwiający sprawdzenie, czy lokalizacje bliższe strefy wydań pomieszczą przypisywane im jednostki szybkorotujące. Osobną granicę wyznacza sposób potraktowania asortymentu nowego. Jednostki nieobecne w okresie uczącym pominięto po obu stronach porównania, podczas gdy w rozmieszczeniu rzeczywistym trafiałyby one na miejsca wolne, położone z reguły w głębi strefy. Ponieważ sto takich jednostek weszło od razu do klasy A, generując 17 933 pobrania, co wykazano w podrozdziale 4.2, pominięcie tej grupy działa na korzyść wyniku, który wyznacza tym samym górną granicę efektu osiągalnego bez cyklicznego powtarzania klasyfikacji. Z tego względu wynik należy traktować jako oszacowanie potencjału i kierunku poprawy, którego dokładność, lecz nie zwrot ani rząd wielkości, zależy od wymienionych założeń. Ograniczenia te wyznaczają granice interpretacji, nie podważają natomiast wniosku, że relokacja skraca drogę i czas kompletacji.

2026

Zakres uzyskanej poprawy należy odnieść do pełnego czasu obsługi zamówienia. Jak wykazano w podrozdziale 4.1, mediana oczekiwania listy w kolejce przekracza sto minut, podczas gdy mediana samej realizacji wynosi około minuty. Relokacja skraca składową realizacji, nie wpływa natomiast na czas oczekiwania, który wynika z harmonogramu tworzenia list oraz z obsady zmiany. Skrócenie czasu kompletacji o blisko połowę nie przekłada się zatem na proporcjonalne skrócenie czasu realizacji zamówienia liczonego od utworzenia listy kompletacyjnej. Korzyść ujawnia się w zdolności przerobowej obiektu: te same zasoby pozwalają obsłużyć większy wolumen zleceń, a przy wolumenie niezmienionym zwalniają czas pracy, który można przeznaczyć na inne czynności magazynowe. Rozgraniczenie obu perspektyw jest istotne, ponieważ chroni przed przypisaniem relokacji skutków, których nie wywołuje.

Zebrane wyniki pozwalają rozstrzygnąć obie hipotezy. Hipotezę drugą uznaje się za potwierdzoną, ponieważ relokacja według częstości pobrań skraca łączną drogę kompletacji o 69,0% oraz czas aktywnej kompletacji o około 48% względem stanu obecnego, przy ocenie poza próbą uczącą i przy odporności wyniku na wybór metryki kosztu. Hipotezę trzecią uznaje się za potwierdzoną, ponieważ istotną część tej poprawy uzyskuje się samą zmianą przypisania jednostek do istniejących lokalizacji, bez rozbudowy magazynu, przy czym relokacja klasy A zapewnia 89% pełnego potencjału za 1397 przesunięć, a dostępny zapas wolnych lokalizacji, wykazany w podrozdziale 4.3, pozwala przeprowadzić ją pojedynczymi przełożeniami. Potwierdzenie hipotez pierwszej, drugiej i trzeciej daje łącznie podstawę do przyjęcia hipotezy głównej, zgodnie z którą oparta na danych relokacja asortymentu według częstości pobrań jest efektywnym kosztowo kierunkiem optymalizacji pracy magazynu, możliwym do wdrożenia bez ingerencji w jego infrastrukturę. Całościową ocenę weryfikacji hipotez oraz wynikające z niej wnioski przedstawiono w zakończeniu pracy.

Zakończenie

Celem pracy było zbadanie wpływu obecnego rozmieszczenia asortymentu na wydajność procesu kompletacji oraz opracowanie projektu usprawnień polegającego na relokacji towarów, w oparciu o analizę danych historycznych z produkcyjnego systemu klasy WMS. Znaczenie problemu wynika z udziału kompletacji w kosztach operacyjnych magazynu oraz z dominującego udziału nieprodukcyjnego przemieszczania w czasie tego procesu, którego zakres zależy od rozmieszczenia towaru. Przeprowadzona analiza pozwoliła odpowiedzieć na postawione pytania badawcze i rozstrzygnąć hipotezy.

Diagnoza stanu obecnego wykazała, że przemieszczanie stanowi około 70% czasu mierzonego wewnątrz listy kompletacyjnej, podczas gdy trasowanie jest już zoptymalizowane, a przestoje oraz błędy realizacji mają charakter marginalny. Głównym i podatnym na usprawnienie wąskim gardłem procesu pozostaje zatem rozmieszczenie towaru, nie zaś reguły wyznaczania trasy czy organizacja pracy.

Hipoteza pierwsza została potwierdzona. Towary o najwyższej rotacji, tworzące klasę A odpowiadającą za 80% pobrań, są składowane najgłębiej w magazynie, na medianie rangi 1856 na 2444 lokalizacje, dalej niż klasy wolniej rotujące, i pozostają rozproszone wzdłuż niemal całej trasy. Blisko połowa wszystkich pobrań, 48,4%, przypada na najdalszy kwintyl trasy, a korelacja rangi położenia z liczbą pobrań jest dodatnia zamiast ujemnej. Rozkład pobrań wzdłuż trasy odbiega przy tym od przypisania losowego na niekorzyść obiektu, co wskazuje na układ działający wbrew rotacji, a nie jedynie jej nieuwzględniający. Rozmieszczenie asortymentu w badanym magazynie jest więc nieefektywne względem rotacji, co stanowi odpowiedź na pierwsze pytanie badawcze.

Hipoteza druga została potwierdzona. Symulacja pełnej relokacji, przeprowadzona na rzeczywistych listach kompletacyjnych z oceną poza próbą uczącą, wykazała skrócenie łącznej drogi kompletacji o 69,0% oraz czasu aktywnej kompletacji o około 48% względem stanu obecnego, co odpowiada wzrostowi wydajności ze 257,7 do blisko 495 pobrań na godzinę. Wynik okazał się odporny na wybór metryki kosztu trasy, zachowując zależność jedynie od udokumentowanego założenia o trasie zakotwiczonej na froncie strefy wydań. Relokacja według częstości pobrań skraca zatem drogę i czas kompletacji, co stanowi odpowiedź na drugie pytanie badawcze.

Hipoteza trzecia została potwierdzona. Istotną część możliwej poprawy uzyskuje się samą zmianą przypisania jednostek do istniejących lokalizacji, bez rozbudowy magazynu. Relokacja samej klasy A, wymagająca 1397 przesunięć, zapewnia 89% potencjału pełnej

2026

permutacji, a dostępny zapas około 570 wolnych lokalizacji pozwala przeprowadzić ją pojedynczymi przełożeniami. Silna koncentracja rotacji sprawia, że korzyść rośnie najszybciej przy relokacji wąskiej grupy jednostek szybkorotujących, co pozwala wdrażać zmianę etapowo i przy niewielkim nakładzie. Wyznaczony próg opłacalności, wynoszący dla tego wariantu około 46 minut na jedno przesunięcie, wielokrotnie przewyższa czas takiej operacji, wobec czego zmiana zwraca nakład w pierwszym roku. Stanowi to odpowiedź na trzecie pytanie badawcze.

Potwierdzenie trzech hipotez szczegółowych daje podstawę do przyjęcia hipotezy głównej. Oparta na danych relokacja asortymentu według częstości pobrań skraca czas kompletacji i stanowi efektywny kosztowo kierunek optymalizacji pracy magazynu, możliwy do wdrożenia bez ingerencji w jego infrastrukturę. Wymiar praktyczny wyniku wyraża się w uwolnionej zdolności przerobowej: pełna relokacja odpowiada oszczędności rzędu 1195 godzin pracy rocznie, którą można przeznaczyć na obsługę większego wolumenu zamówień bez zwiększania zatrudnienia. Cel pracy uznaje się tym samym za zrealizowany.

Wkład własny autora obejmuje całość procedury badawczej przeprowadzonej na surowych logach produkcyjnego systemu WMS: dobór obiektu, walidację porządkowego modelu odległości i kalibrację zależności odległości od czasu, klasyfikację oraz diagnozę rozmieszczenia, symulację relokacji ocenioną poza próbą uczącą, a także przeliczenie wyniku na godziny pracy zespołu i próg opłacalności pojedynczego przesunięcia.

Uzyskane wyniki należy interpretować z uwzględnieniem ograniczeń przyjętego podejścia. Model odległości ma charakter porządkowy i nie rozróżnia przejścia w obrębie alei od zmiany alei, kierunek trasy ustalono na podstawie dowodów pośrednich, a podane redukcje wyrażają potencjał teoretyczny wobec stanu obecnego, który rzeczywista, etapowa relokacja wychwyci jedynie w części. Najistotniejszym ograniczeniem wykonalności pozostaje niekompletność danych o gabarytach asortymentu, uniemożliwiająca sprawdzenie, czy lokalizacje bliższe strefy wydań pomieszczą przypisywane im jednostki. Ograniczenia te wyznaczają granice dokładności wyniku, nie podważają natomiast jego kierunku ani rzędu wielkości.

Wnioski z pracy wskazują kierunki dalszych badań. Uzupełnienie danych o wymiarach i masie asortymentu pozwoliłoby zastosować kryteria łączące rotację z gabarytem, w tym wskaźnik COI, oraz zweryfikować wykonalność relokacji pod względem pojemności lokalizacji. Rozszerzenie modelu odległości o strukturę alei umożliwiłoby dokładniejsze odwzorowanie rzeczywistych tras. Osobnym kierunkiem jest uwzględnienie współwystępowania towarów na zamówieniach, prowadzące ku składowaniu korelacyjnemu, oraz przeniesienie metody na obiekty o innej organizacji kompletacji, w tym kompletacji wsadowej. Podejście zastosowane

2026

w pracy pozostaje przenośne na inne magazyny o zbliżonej strukturze danych, co czyni je narzędziem powtarzalnej diagnozy efektywności rozmieszczenia.

Bibliografia

Literatura zwarta (książki)

Grabińska, A., Pawełoszek, I., Ziora, L. (2020). Informatyczne wspomaganie procesów logistycznych. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.

Horeva, A. (2022). Analiza i doskonalenie procesów magazynowych – case study przedsiębiorstwa X. W: J. Brach, I. Dziaduch (red.), Logistyka i transport 2022 (s. 40–52). Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu.

Olewińska, A., Rosińska, A. (2023). Magazyn przyszłości – trendy w magazynowaniu. W: S. Skiba (red.), Logistyka wobec wyzwań XXI wieku (s. 114–122). Gdynia: Wydawnictwo Uniwersytetu Morskiego w Gdyni.

Richards, G. (2020). Zarządzanie logistyką magazynową. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

Twaróg, J. (2003). Mierniki i wskaźniki logistyczne. Poznań: Instytut Logistyki i Magazynowania (Biblioteka Logistyka).

Artykuły z czasopism

Boysen, N., De Koster, R., Füßler, D. (2021). The forgotten sons: Warehousing systems for brick-and-mortar retail chains. European Journal of Operational Research, 288, 361–381. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.04.058 (3.05.2026).

Boysen, N., De Koster, R., Weidinger, F. (2019). Warehousing in the e-commerce era: A survey. European Journal of Operational Research, 277, 396–411. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.023 (2.05.2026).

Casella, G., Volpi, A., Montanari, R., Tebaldi, L., Bottani, E. (2023). Trends in order picking: A 2007–2022 review of the literature. Production & Manufacturing Research, 11(1), 2191115. https://doi.org/10.1080/21693277.2023.2191115 (10.07.2026).

De Koster, R., Le-Duc, T., Roodbergen, K. J. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. European Journal of Operational Research, 182(2), 481–501. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009 (31.05.2026).

Duque-Jaramillo, J. C., Cogollo-Flórez, J. M., Gómez-Marín, C. G., Correa-Espinal, A. A. (2024). Warehouse management optimization using a sorting-based slotting approach. Journal of Industrial Engineering and Management, 17(1), 133–150. https://doi.org/10.3926/jiem.5661 (10.07.2026).

Islam, M. S., Uddin, M. K. (2023). Correlated storage assignment approach in warehouses: A systematic literature review. Journal of Industrial Engineering and Management, 16(2), 294–318. https://doi.org/10.3926/jiem.4850 (10.07.2026).

Islam, M. S., Uddin, M. K. (2024). An efficient correlation-based storage location assignment heuristic for multi-block multi-aisle warehouses. International Journal of Industrial Engineering and Management, 15(2), 125–139. https://doi.org/10.24867/IJIEM-2024-2-352 (10.07.2026).

Kapou, V., Ponis, S. T., Plakas, G., Aretoulaki, E. (2022). An innovative layout design and storage assignment method for manual order picking with respect to ergonomic criteria. Logistics, 6(4), 83. https://doi.org/10.3390/logistics6040083 (10.07.2026).

Klumpp, M., Loske, D. (2021). Order picking and e-commerce: Introducing non-parametric efficiency measurement for sustainable retail logistics. Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research, 16(4), 846–858. https://doi.org/10.3390/jtaer16040048 (10.07.2026).

Kubasakova, I., Kubanova, J. (2024). Utilization of the intersection of ABC and XYZ analysis in stock planning in the warehouse by Covid period. Acta Logistica, 11(3), 461–472. https://actalogistica.eu/issues/2024/III_2024_12_Kubasakova_Kubanova.pdf (10.07.2026).

Li, Y., Zhang, R., Jiang, D. (2022). Order-picking efficiency in e-commerce warehouses: A literature review. Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research, 17(4), 1812–1830. https://doi.org/10.3390/jtaer17040091 (6.06.2026).

Lorenc, A. K. (2014). Planowanie rozmieszczania produktów w magazynie – najnowsze rozwiązania i trendy rozwojowe. Logistyka, 3, 3838–3844.

Lorenc, A. K., Kaczor, G. (2012). Zwiększenie efektywności procesu kompletacji zamówień w wyniku optymalizacji rozmieszczenia produktów w magazynie z uwzględnieniem ich częstotliwości pobrań oraz gramatury. Logistyka, 5, 41–45.

Lorenc, A., Lerher, T. (2020). PickupSimulo – Prototype of intelligent software to support warehouse managers decisions for product allocation problem. Applied Sciences, 10(23), 8683. https://doi.org/10.3390/app10238683 (10.07.2026).

Lorenc, A., Szkoda, M. (2016). Wpływ metod klasyfikacji produktów stosowanych w magazynach na efektywność procesu kompletacji. Autobusy, 6, 1415–1419.

Masae, M., Glock, C. H., Grosse, E. H. (2020). Order picker routing in warehouses: A systematic literature review. International Journal of Production Economics, 224, 107564. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107564 (13.06.2026).

Raj, D., Thandayudhapani, S. (2024). Evolution of e-commerce logistics: Global trends and implementations. ComFin Research, 12(2), 42–45. https://doi.org/10.34293/commerce.v12i2.7466 (30.05.2026).

Reyes, J., Solano-Charris, E., Montoya-Torres, J. (2019). The storage location assignment problem: A literature review. International Journal of Industrial Engineering Computations, 10(2), 199–224. https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2018.8.001 (10.07.2026).

Staudt, F. H., Alpan, G., Di Mascolo, M., Rodriguez, C. M. T. (2015). Warehouse performance measurement: A literature review. International Journal of Production Research, 53(18), 5524–5544. https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1030466 (10.07.2026).

Suppini, C., Lysova, N., Bocelli, M., Solari, F., Tebaldi, L., Volpi, A., Montanari, R. (2024). From single orders to batches: A sensitivity analysis of warehouse picking efficiency. Sustainability, 16(18), 8231. https://doi.org/10.3390/su16188231 (7.06.2026).

van Kampen, T. J., Akkerman, R., van Donk, D. P. (2012). SKU classification: A literature review and conceptual framework. International Journal of Operations & Production Management, 32(7), 850–876. https://doi.org/10.1108/01443571211250112 (10.07.2026).

Źródła internetowe

Apps Insight. (2024). *Current trends shaping SaaS warehouse management systems*. Pobrane z: https://appsinsight.medium.com/current-trends-shaping-saas-warehouse-management-systems-be76575ff0dc (14.06.2026).

Gartner. (2026). *Magic Quadrant for warehouse management systems* (ID G00834211; oprac. S. Tunstall, R. Narang, F. Stufano). Pobrane z: https://www.gartner.com/en/documents/6411575 (13.06.2026).

Gemius, Polskie Badania Internetu, IAB Polska, Akademia Leona Koźmińskiego. (2025). *E-commerce w Polsce 2025*. Pobrane z: https://gemius.com/documents/81/RAPORT_E-COMMERCE_2025.pdf (23.05.2026).

Krajowa Izba Gospodarcza. (2026). *E-handel coraz mocniejszy w Polsce – 92 mld zł obrotu w 2025 r. i rekordowe wyniki e-grocery*. Pobrane z: https://kig.pl/aktualnosc-ekonomicz/e-handel-coraz-mocniejszy-w-polsce-92-mld-zl-obrotu-w-2025-r-i-rekordowe-wyniki-e-grocery/ (10.05.2026).

MarketsandMarkets. (2025). *Warehouse management system market – global forecast to 2030*. Pobrane z: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/warehouse-management-system-market-41614951.html (20.06.2026).

Red Stag Fulfillment. (2024). *What share of global retail sales is ecommerce?* Pobrane z: https://redstagfulfillment.com/what-share-of-global-retail-sales-is-ecommerce/ (9.05.2026).

WiFiTalents. (2026). *E-commerce return statistics*. Pobrane z: https://wifitalents.com/ecommerce-return-statistics/ (24.05.2026).

Spis tabel i rysunków

Spis tabel

Tabela 1.1. Porównanie charakterystyki zamówień w handlu internetowym (B2C) i stacjonarnym 7
Tabela 2.1. Porównanie strategii rozmieszczenia towarów w magazynie 21
Tabela 2.2. Kryteria i klasy w analizie ABC oraz XYZ 25
Tabela 2.3. Systematyka wskaźników efektywności kompletacji według czterech wymiarów 29
Tabela 3.1. Podstawowe parametry badanego magazynu (2025 rok) 34
Tabela 3.2. Obszary danych wykorzystane w badaniu i ich rola 38
Tabela 3.4. Mapowanie hipotez badawczych na metody weryfikacji i mierniki 45
Tabela 4.1. Struktura czasu związanego z realizacją listy kompletacyjnej w 2025 roku 47
Tabela 4.2. Rozkład list kompletacyjnych według liczby pobrań (2025 rok) 48
Tabela 4.3. Zależność czasu przejścia od odległości między kolejnymi pobraniami (czerwiec 2025 roku) 50
Tabela 4.4. Charakterystyka przestojów procesu kompletacji w 2025 roku 52
Tabela 4.5. Wynik klasyfikacji ABC asortymentu badanego magazynu według częstości pobrań (2025 rok) 53
Tabela 4.6. Macierz przejść jednostek asortymentowych między klasami ABC (pierwsze i drugie półrocze 2025 roku) 55
Tabela 4.7. Rozkład rangi położenia jednostek asortymentowych według klas ABC (2444 lokalizacje) 59
Tabela 4.8. Redukcja drogi kompletacji pod trzema metrykami kosztu trasy (ocena poza próbą uczącą) 63
Tabela 4.9. Warianty relokacji: nakład, redukcja drogi i czasu oraz oszczędność pracy (ocena poza próbą uczącą) 65
Tabela Z1. Powiązanie analiz przedstawionych w pracy z zapytaniami źródłowymi (załącznik 1) 83

Spis rysunków

Rysunek 1.1. Cztery podstawowe funkcje magazynu w przepływie towarów. 5
Rysunek 1.2. Struktura czasu w cyklu kompletacji. 11
Rysunek 1.3. Klasyfikacja systemów kompletacji według kierunku przepływu. 12

2026

Rysunek 3.1. Schemat postępowania badawczego. 42
Rysunek 4.1. Struktura czasu wewnątrz listy kompletacyjnej w badanym magazynie. 49
Rysunek 4.2. Krzywa koncentracji pobrań (Lorenza) dla asortymentu badanego magazynu. 54
Rysunek 4.3. Rozkład pobrań wzdłuż trasy kompletacji według kwintyli rangi położenia. ... 58
Rysunek 4.4. Krzywa wdrożenia: redukcja drogi kompletacji w funkcji liczby przesunięć. . 64

Załącznik 1. Wybrane zapytania SQL wykorzystane w badaniu

Badanie przeprowadzono na analitycznym komponencie systemu klasy WMS, zbudowanym na relacyjnej bazie danych PostgreSQL. Poniżej zestawiono kluczowe zapytania, na podstawie których uzyskano wyniki przedstawione w rozdziale czwartym. Przy każdym zapytaniu podano, co ono wyznacza, a uzyskany w badanym obiekcie wynik zamieszczono w komentarzu zamykającym kod. Załącznik obejmuje zapytania rozstrzygające o wynikach pracy. Pozostałe, służące diagnozie czasu, wydajności i przestojów oraz wyznaczeniu wariantów relokacji, zbudowano jako modyfikacje tych samych wzorców i udokumentowano w materiałach roboczych autora.

Przyjęte oznaczenia i konwencje:

- `:tenant`, `:warehouse` – identyfikatory najemcy oraz magazynu; w miejsce rzeczywistych wartości wstawiono parametry.
- `step = 30` – zdarzenie pobrania towaru z lokalizacji (w modelu procesu odpowiada operacji *PickedFromLocation*); jest to jednostka analityczna badania.
- `zone = 1` – strefa kompletacji (*PICKING*), w której realizowane są wszystkie pobrania.
- **ranga** – pozycja lokalizacji na trasie kompletacji, wyznaczona funkcją dense_rank() według atrybutu porządkującego path_stop_no, od najbliższej strefie wydań do najdalszej. Ranga jest przyjętą w pracy miarą odległości (por. podrozdział 3.2).
- Okres badania obejmuje pełny rok 2025; przy ocenie poza próbą uczącą klasyfikację ustala się na pierwszym półroczu, a jej skutki mierzy na drugim.

Z1. Walidacja modelu odległości – monotoniczność trasy

Co wyznacza: sprawdza, czy kolejne pobrania na liście następują w rosnącym porządku rangi położenia. Dla każdej listy porównuje rangę bieżącego pobrania z rangą poprzedniego (funkcja lag()) i liczy udział przejść, które nie powodują cofnięcia. Wysoki udział potwierdza, że trasa jest monotoniczna, a path_stop_no jest wiarygodną współrzędną trasy, co uzasadnia przyjęty model odległości. Zbiór ograniczono tu do zdarzeń powiązanych z lokalizacją, ponieważ tylko one wyznaczają punkty trasy. Obliczenie wykonano na próbie jednego miesiąca.

```
WITH picks AS (
  SELECT l.picking_list_id,
         loc.path_stop_no,
         row_number() OVER (PARTITION BY l.picking_list_id
                            ORDER BY l."timestamp", l.step) AS pick_no
  FROM picking.picking_logs l
  JOIN catalog.locations loc
```

```
    ON loc.tenant_id = l.tenant_id AND loc.id = l.resource_location_id
  WHERE l.tenant_id = :tenant AND l.warehouse_id = :warehouse
    AND l."timestamp" >= '2025-06-01' AND l."timestamp" < '2025-07-01'
    AND l.resource_location_id IS NOT NULL AND loc.path_stop_no IS NOT NULL
),
transitions AS (
  SELECT path_stop_no,
         lag(path_stop_no) OVER (PARTITION BY picking_list_id ORDER BY pick_no) AS
prev_stop
  FROM picks
)
SELECT count(*) FILTER (WHERE prev_stop IS NOT NULL) AS transition_count,
       round(100.0 * count(*) FILTER (WHERE path_stop_no >= prev_stop)
             / nullif(count(*) FILTER (WHERE prev_stop IS NOT NULL), 0), 2) AS
pct_non_decreasing
FROM transitions;

-- Wynik: 99,65% przejść niemalejących -> trasa monotoniczna, ranga jako miara
odległości uzasadniona.
```

Z2. Klasyfikacja ABC oraz położenie klas na trasie

Co wyznacza: zlicza pobrania każdej jednostki asortymentowej w 2025 roku, porządkuje jednostki malejąco i na podstawie skumulowanego udziału (funkcja okienkowa sum() OVER) przypisuje je do klas A (do 80% pobrań), B (do 95%) i C (pozostałe). Jednocześnie dla każdej jednostki wyznacza średnią rangę położenia ważoną pobraniami, a następnie porównuje rozkład tych rang w klasach za pomocą percentyli. Jedno zapytanie dostarcza zatem zarówno składu klas (Tabela 4.5), jak i ich położenia (Tabela 4.7).

```
WITH location_rank AS (
  SELECT id, dense_rank() OVER (ORDER BY path_stop_no) AS rank_no
  FROM catalog.locations
  WHERE tenant_id = :tenant AND warehouse_id = :warehouse
    AND NOT deleted AND path_stop_no IS NOT NULL AND zone = 1
),
sku_picks AS (
  SELECT l.resource_product_product_id AS sku,
         count(*) AS picks,
         sum(lr.rank_no)::numeric / count(*) AS avg_rank
  FROM picking.picking_logs l
  JOIN location_rank lr ON lr.id = l.resource_location_id
  WHERE l.tenant_id = :tenant AND l.warehouse_id = :warehouse AND l.step = 30
    AND l."timestamp" >= '2025-01-01' AND l."timestamp" < '2026-01-01'
    AND l.resource_product_product_id IS NOT NULL
  GROUP BY 1
),
classified AS (
  SELECT sku, picks, avg_rank,
         CASE WHEN sum(picks) OVER (ORDER BY picks DESC, sku) <= 0.80 * sum(picks)
OVER () THEN 'A'
              WHEN sum(picks) OVER (ORDER BY picks DESC, sku) <= 0.95 * sum(picks)
OVER () THEN 'B'
              ELSE 'C' END AS abc_class
  FROM sku_picks
)
SELECT abc_class,
       count(*)                                                    AS
sku_count,
       sum(picks)                                                  AS picks,
```


2026

```
       round(100.0 * sum(picks) / sum(sum(picks)) OVER (), 1)            AS
pct_picks,
       round(percentile_cont(0.10) WITHIN GROUP (ORDER BY avg_rank))     AS
rank_p10,
       round(percentile_cont(0.50) WITHIN GROUP (ORDER BY avg_rank))     AS
rank_median,
       round(percentile_cont(0.90) WITHIN GROUP (ORDER BY avg_rank))     AS
rank_p90
FROM classified
GROUP BY abc_class ORDER BY abc_class;

-- Wynik: A 875 SKU / 80% pobrań / mediana rangi 1856; B 1008 / 15% / 1451; C 2046
/ 5% / 1468.
```

Z3. Rozkład pobrań wzdłuż trasy kompletacji

Co wyznacza: dzieli lokalizacje strefy kompletacji na pięć równolicznych przedziałów rangi (kwintyle, funkcja ntile(5)), od najbliższego strefie wydań do najdalszego, i wyznacza udział pobrań przypadający na każdy przedział. Rozkład rosnący w głąb magazynu świadczy o nieefektywności rozmieszczenia (Rysunek 4.3).

```
WITH location_picks AS (
  SELECT loc.id, loc.path_stop_no, count(*) AS picks
  FROM picking.picking_logs l
  JOIN catalog.locations loc
    ON loc.tenant_id = l.tenant_id AND loc.id = l.resource_location_id
  WHERE l.tenant_id = :tenant AND l.warehouse_id = :warehouse AND l.step = 30
    AND l."timestamp" >= '2025-01-01' AND l."timestamp" < '2026-01-01'
    AND loc.path_stop_no IS NOT NULL AND NOT loc.deleted AND loc.zone = 1
  GROUP BY loc.id, loc.path_stop_no
),
quintiles AS (
  SELECT picks, ntile(5) OVER (ORDER BY path_stop_no) AS quintile
  FROM location_picks
)
SELECT quintile,
       sum(picks)                                                AS picks,
       round(100.0 * sum(picks) / sum(sum(picks)) OVER (), 1)  AS pct_picks
FROM quintiles GROUP BY quintile ORDER BY quintile;

-- Wynik: 7,2% / 6,5% / 17,2% / 20,6% / 48,4% – niemal połowa pobrań w najdalszym
kwintylu.
```

Z4. Symulacja relokacji – redukcja drogi (ocena poza próbą uczącą)

Co wyznacza: porównuje długość tras kompletacji przed relokacją i po niej. Klasyfikację rotacji ustala na pierwszym półroczu 2025 roku (próba ucząca), a skutki mierzy na rzeczywistych listach z drugiego półrocza (ocena poza próbą uczącą). Model relokacji jest permutacją: k-ta najczęściej pobierana jednostka trafia na k-tą najniższą (najbliższą wydaniom) zajętą pozycję rangową. Koszt trasy listy przyjęto jako podwojoną rangę najgłębszego pobrania (trasa powrotna, układ U). Zapytanie oblicza procentową redukcję łącznej drogi.

```
WITH location_rank AS (
```

```
  SELECT id, dense_rank() OVER (ORDER BY path_stop_no) AS rank_no
  FROM catalog.locations
  WHERE tenant_id = :tenant AND warehouse_id = :warehouse
    AND NOT deleted AND path_stop_no IS NOT NULL AND zone = 1
),
train AS (                                    -- klasyfikacja: I półrocze
  SELECT l.resource_product_product_id AS sku, count(*) AS picks,
         avg(lr.rank_no) AS current_rank
  FROM picking.picking_logs l
  JOIN location_rank lr ON lr.id = l.resource_location_id
  WHERE l.tenant_id = :tenant AND l.warehouse_id = :warehouse AND l.step = 30
    AND l."timestamp" >= '2025-01-01' AND l."timestamp" < '2025-07-01'
    AND l.resource_product_product_id IS NOT NULL
  GROUP BY 1
),
by_frequency AS (
  SELECT sku, current_rank,
         row_number() OVER (ORDER BY picks DESC, sku) AS frequency_pos
  FROM train
),
slot_pool AS (
  SELECT current_rank,
         row_number() OVER (ORDER BY current_rank) AS slot_no
  FROM train
),
new_assignment AS (                           -- permutacja SKU -> pozycja
  SELECT f.sku, f.current_rank, s.current_rank AS new_rank
  FROM by_frequency f
  JOIN slot_pool s ON s.slot_no = f.frequency_pos
),
evaluation AS (                               -- ocena: II półrocze
  SELECT l.picking_list_id, na.current_rank, na.new_rank
  FROM picking.picking_logs l
  JOIN new_assignment na ON na.sku = l.resource_product_product_id
  WHERE l.tenant_id = :tenant AND l.warehouse_id = :warehouse AND l.step = 30
    AND l."timestamp" >= '2025-07-01' AND l."timestamp" < '2026-01-01'
),
per_list AS (                                 -- koszt trasy (układ U)
  SELECT picking_list_id,
         2 * (max(current_rank) - 1) AS distance_current,
         2 * (max(new_rank)     - 1) AS distance_new
  FROM evaluation GROUP BY picking_list_id
)
SELECT count(*) AS lists,
       round(100.0 * (sum(distance_current) - sum(distance_new)) /
sum(distance_current), 1) AS reduction_pct
FROM per_list;

-- Wynik: 69,0% redukcji łącznej drogi kompletacji (58 751 list II półrocza).
```

Redukcję drogi przeliczono na czas w oparciu o udział przemieszczania (około 70% czasu wewnątrz listy), co daje skrócenie czasu aktywnej kompletacji o około 48% (por. podrozdziały 3.2 i 4.4).

Z5. Odporność wyniku na wybór metryki kosztu trasy

Co wyznacza: powtarza symulację z zapytania Z4, licząc koszt trasy trzema metrykami: podwojoną rangą najgłębszego pobrania (M1, model bazowy), sumą rang wszystkich pobrań (M2) oraz rozpiętością między najgłębszym a najpłytszym pobraniem (M3). Zbieżność M1 i M2 potwierdza, że wynik nie zależy od szczegółów modelu; ujemna wartość M3 wynika z pominięcia

2026

kotwicy trasy na froncie strefy wydań i została omówiona w podrozdziale 4.4. Zapytanie różni się od Z4 wyłącznie ostatnim etapem (człony CTE od ranga_lokalizacji do ocena są identyczne).

```
-- (człony CTE location_rank ... evaluation – identyczne jak w zapytaniu Z4)
per_list AS (
  SELECT picking_list_id,
         2 * (max(current_rank) - 1)                  AS m1_current,
         2 * (max(new_rank)     - 1)                  AS m1_new,
         sum(current_rank - 1)                        AS m2_current,
         sum(new_rank - 1)                            AS m2_new,
         (max(current_rank) - min(current_rank))      AS m3_current,
         (max(new_rank)     - min(new_rank))          AS m3_new
  FROM evaluation GROUP BY picking_list_id
)
SELECT round(100.0 * (sum(m1_current) - sum(m1_new)) / sum(m1_current), 1)
AS reduction_m1,
       round(100.0 * (sum(m2_current) - sum(m2_new)) / sum(m2_current), 1)
AS reduction_m2,
       round(100.0 * (sum(m3_current) - sum(m3_new)) / nullif(sum(m3_current), 0),
1) AS reduction_m3
FROM per_list;

-- Wynik: M1 = 69,0% ; M2 = 71,3% ; M3 = −10,6% (Tabela 4.8).
```

Warianty częściowe relokacji, stanowiące podstawę krzywej wdrożenia (Tabela 4.9), uzyskano jako kolejną modyfikację zapytania Z4, w której zbiór jednostek przemieszczanych ograniczono do najczęściej pobieranych (sto, dwieście pięćdziesiąt, klasa A, klasa A i B). Poza tym ograniczeniem przebieg obliczeń pozostaje identyczny.

2026

Mapa powiązań: analiza – zapytanie – wynik

Tabela Z1

Powiązanie analiz przedstawionych w pracy z zapytaniami źródłowymi

Analiza w pracy	Zapytanie	Kluczowa funkcja SQL	Uzyskany wynik
Model odległości (podrozdz. 3.2)	Z1	lag(), porównanie kolejnych rang	99,65% przejść monotonicznych
Klasyfikacja ABC (Tabela 4.5)	Z2	sum() OVER (udział skumulowany), progi 80/95%	A 875/80%, B 1008/15%, C 2046/5%
Położenie klas (Tabela 4.7)	Z2	percentile_cont w podziale na klasy	mediana rangi A 1856 > B 1451, C 1468
Rozkład wzdłuż trasy (Rysunek 4.3)	Z3	ntile(5) po randze	48,4% pobrań w najdalszym kwintylu
Symulacja relokacji (hipoteza H2)	Z4	permutacja SKU–pozycja, ocena poza próbą uczącą	−69,0% drogi, ~−48% czasu
Odporność wyniku (Tabela 4.8)	Z5	trzy metryki kosztu trasy	69,0% / 71,3% / −10,6%
Warianty wdrożenia (Tabela 4.9)	modyfikacja Z4	ograniczenie zbioru relokowanego	klasa A 61,3% za 1397 przesunięć

Źródło: opracowanie własne.

2026