Doktorat wdrożeniowy:

# USPRAWNIENIE PROCESU MONTAŻU/DEMONTAŻU I PRZYGOTOWANIE DESKOWANIA DO BETONOWANIA NA BAZIE INNOWACJI TECHNOLOGICZNYCH, ORGANIZACYJNYCH I PROCESOWYCH W OPARCIU O SSN

Autor: mgr inż. Łukasz Majkowski

Promotor: dr hab. inż. Jerzy Pasławski, prof. PUT

Poznań, 2026 r.

SPIS TREŚCI

Streszczenie ..... 4

Abstract ..... 5

1. Wstęp ..... 6

1.1. Uzasadnienie podjęcia tematu ..... 6

1.2. Przedmiot, cel i teza pracy ..... 6

1.3. Charakter wdrożeniowy pracy i metody badawcze ..... 8

1.4. Struktura pracy ..... 8

2. Zarządzanie deskowaniami – przegląd wiedzy ..... 12

2.1. Optymalizacja planowania, wdrażania i kosztów deskowań (szalunków) w budownictwie monolitycznym ..... 12

2.2. Analiza wydajności produkcyjnej (nakład pracy na deskowania) w obiektach kubaturowych ..... 13

2.3. Analiza czynników wpływających na wybór systemów szalunków dla budynków mieszkalnych ..... 14

2.4. Wielokryterialna analiza wyboru systemów deskowań w projektach budowlanych ..... 15

2.5. Model procesowy optymalnego, projektowo specyficznego doboru systemu deskowań ..... 18

2.6. Analiza łańcucha dostaw przemysłowych systemów deskowań z wykorzystaniem mapowania strumienia wartości ..... 19

2.7. Wybór systemu deskowania z zastosowaniem metody „Choosing by Advantages" (CBA) ..... 20

2.8. Kompleksowe podejście do efektywnego planowania wykorzystania deskowań na placu budowy ..... 22

2.9. Podsumowanie przeglądu wiedzy w zakresie zarządzania deskowaniami ..... 23

3. Tezy rozprawy – zmiana paradygmatu zarządzania deskowaniami ..... 28

3.1. Od Construction 4.0 do Construction 6.0 – kontekst tez rozprawy i metody FFF ..... 28

3.2. Zmiana paradygmatu zarządzania ..... 38

3.3. Tezy rozprawy i ich rozwinięcie ..... 40

3.4. Sztuczne sieci neuronowe (SSN) jako warstwa ucząca metody FFF ..... 45

4. Badania własne – pracochłonność deskowań, potrzeby wykonawców i proces obsługi zlecenia u dostawcy ..... 53

4.1. Pracochłonność montażu, demontażu i przygotowania deskowania do betonowania w świetle normatywów branżowych ..... 53

4.2. Potrzeby i dojrzałość procesowa wykonawców konstrukcji żelbetowych – badanie ankietowe (n = 50) ..... 71

4.3. Proces obsługi zlecenia klienta w PERI Polska – mapa BPMN i macierz odpowiedzialności ..... 83

4.4. Podsumowanie części badawczej – wnioski dla metody FFF, tez rozprawy i warstwy uczącej SSN ..... 100

5. Implementacja i weryfikacja metody FFF – budowa, park dzierżawny, uwarunkowania rynkowe i nowe technologie ..... 103

5.1. Synchronizacja potencjałów deskowań, ludzi i logistyki na budowie – studium przypadku biurowca INDUSTRIAL w Poznaniu ..... 103

5.1.1. Wprowadzenie – cel, zakres i źródła danych ..... 103

5.1.2. Analiza konstrukcji kondygnacji nadziemnych – potencjał deskowań ..... 104
5.1.3. Porównanie ilości betonu z wyceny wyjściowej z ilościami rzeczywiście wbudowanymi ..... 107
5.1.4. Potencjał ludzki w cyklu kondygnacji.....110
5.1.5. Wykorzystanie materiału w czasie – analiza ruchów materiału PERI.....112
5.1.6. Analiza wariantowa: deskowanie stropów w systemie SKYDECK zamiast MULTIFLEX .....116
5.1.7. Wnioski ..... 123
5.2. Przepływ deskowań w PERI Polska – wykorzystanie parku dzierżawnego, terminowość wydań i wydajność centrów logistycznych ..... 124
5.2.1. Cel, zakres, źródła danych i metodyka analizy ..... 124
5.2.2. Bieżące wykorzystanie materiałowe parku dzierżawnego w latach 2025–2026..... 126
5.2.3. Terminowość wydań materiału i luka pomiarowa w zakresie terminów zwrotów..... 131
5.2.4. Wydajność centrów logistycznych w latach 2017–2026 i efekty wdrożeń wspomagających pracę fizyczną – od magazynu do placu budowy..... 136
5.2.5. Synteza wyników w świetle metody Flexible Formwork Flow – wnioski i rekomendacje ..... 145
5.3. Rynkowe uwarunkowania metody FFF – koszt pracy, ceny deskowań i ekspansja prefabrykacji żelbetowej ..... 147
5.3.1. Cel, zakres, źródła danych i metodyka analizy ..... 147
5.3.2. Koszt pracy a koszt deskowań w latach 2015–2025..... 148
5.3.3. Model poglądowy relacji kosztu robocizny i dzierżawy deskowania oraz uwarunkowania podażowe rynku pracy ..... 152
5.3.4. Rozwój prefabrykacji żelbetowej w Europie i w Polsce oraz jego skutki w segmentach hal wielkopowierzchniowych, obiektów mostowych i ITPOK ..... 154
5.3.5. Synteza – koszt pracy jako wspólny mechanizm zmian, konsekwencje dla rynku deskowań i metody FFF oraz wnioski ..... 162
5.4. Cyfrowy monitoring betonu i druk 3D w ofercie PERI – technologie wspierające metodę FFF ..... 166
5.4.1. Narzędzia monitoringu betonu oferowane przez VEMAVENTURI (grupa PERI)..... 166
5.4.2. Pierwsze polskie pomiary parcia i dojrzewania betonu sensorami PERI InSite – synteza publikacji ..... 168
5.4.3. Monitoring dojrzewania betonu masywnego na budowie Elektrowni Gazowej CCGT w Grudziądzu (wrzesień 2026 r.) ..... 170
5.4.4. Druk 3D z betonu – drukarki COBOD w ofercie PERI 3D Construction ..... 178
5.4.5. Podsumowanie – nowe technologie PERI a koncepcja Flexible Formwork Flow..... 180
5.5. Podsumowanie części wdrożeniowej – weryfikacja tez, metoda FFF i przesłanki dla warstwy uczącej SSN ..... 182
5.5.1. Model przepływu FFF – synteza części badawczej i wdrożeniowej ..... 182
5.5.2. Wyniki na czterech poziomach wdrożeń ..... 186
5.5.3. Odniesienie do metody FFF ..... 187
5.5.4. Weryfikacja tez rozprawy..... 188

5.5.5. Przesłanki dla warstwy uczącej SSN ..... 188
5.5.6. Ograniczenia i przejście do wniosków końcowych..... 189
6. Podsumowanie i dyskusja ..... 190
6.1. PERI jako pionier zarządzania przepływem – analogia Apple i specyfika modelu dzierżawnego ..... 192
6.2. Zaufanie i korzyść obustronna – partnerstwo wykonawcy i dostawcy w ujęciu Deminga ..... 193
6.3. Rynek w najbliższych dekadach – energetyka, obronność i systemy o niskiej pracochłonności ..... 193
7. Wnioski ..... 195
7.1. Wnioski ogólne ..... 195
7.2. Wnioski szczegółowe ..... 195
7.3. Perspektywy ..... 197
Bibliografia ..... 199
Załącznik nr 1: Szczegółowa mapa procesu obsługi zlecenia w PERI Polska na podstawie mapy BPMN i macierzy odpowiedzialności ..... 206
Załącznik nr 2: Wykres Gantta - czas realizacji konstrukcji 15 kondygnacji nadziemnych w cyklu 28 dni (stan rzeczywisty) ..... 207

## Streszczenie

***„Usprawnienie procesu montażu/demontażu i przygotowanie deskowania do betonowania na bazie innowacji technologicznych, organizacyjnych i procesowych w oparciu o SSN”***

*– rozprawa doktorska w programie „Doktorat wdrożeniowy”*

Doktorant: mgr inż. Łukasz Majkowski | Promotor: dr hab. inż. Jerzy Pasławski, prof. PUT | Opiekun pomocniczy: inż. Kamil Karpała | Przedsiębiorstwo: PERI Polska Sp. z o.o.

**Wprowadzenie i problem.** Koszt robocizny przy robotach deskowaniowych systematycznie rośnie: w latach 2015–2025 przeciętne wynagrodzenie wzrosło o 128,3%, a ceny deskowań – o ok. 3–4% rocznie. Przy deficycie cieśli (76% wykonawców ocenia ich dostępność jako słabą lub krytyczną) i ekspansji prefabrykacji kluczowe dla budów staje się stosowanie systemów i rozwiązań ograniczających pracochłonność. W PERI Polska problemem była niska rotacja parku dzierżawnego: przed wdrożeniem (do lat 2024/2025) średnie wykorzystanie sprzętu wynosiło 52–54% w zależności od systemu, a odchyleń terminów zwrotów nie rejestrowano. Odpowiedzią jest oryginalna metoda FFF – Flexible Formwork Flow.

**Cel i tezy.** Celem jest sformułowanie, uzasadnienie i wdrożenie metody FFF, łączącej LEAN Management, Agile i Construction 5.0, z warstwą uczącą opartą docelowo na sztucznych sieciach neuronowych (SSN). Teza główna: przewaga dostawcy wynikająca z szybkości montażu jego systemów przekłada się na ekonomiczniejszą, szybszą i bezpieczniejszą pracę na budowie oraz na efektywność przedsiębiorstwa dopiero przy ciągłym i elastycznym przepływie w łańcuchu dostawca–budowa–dostawca. Tezy szczegółowe dotyczą synchronizacji materiału, ludzi i logistyki wokół zasobu krytycznego (TS1), organizacji i wsparcia pracy ludzi (TS2) oraz przepływu zamiast wolumenu wydań (TS3). Hipoteza: wykorzystanie parku można podnieść dalej – w kierunku 75% – bez zwiększania majątku.

**Metodologia.** Analiza literatury i normatywów, ankieta CAWI (n = 50), modelowanie BPMN, studium przypadku budowy INDUSTRIAL w Poznaniu, analiza statystyczna danych operacyjnych dostawcy, symulacja kontrfaktyczna oraz analiza danych z czujników betonu.

**Wyniki naukowe.** Oryginalnym wynikiem jest model przepływu FFF w trzech krokach – taktycznym (projekt technologiczny i logistyka dostawcy), operacyjnym (operacje na budowie) i strategicznym (pełny cykl dzierżawy zestawu) – którego efektem końcowym jest korzyść obustronna (win-win): krótszy cykl i niższy koszt dla wykonawcy, więcej obrotów kompletu bez inwestycji dla dostawcy. Na budowie INDUSTRIAL cykl 28 dni wyznaczał jeden żuraw (TS1); 68% wykonawców lokalizuje straty czasu wokół deskowania, a nie w montażu (TS2); cel 75% wymaga skrócenia czasu elementu poza dzierżawą o ok. 38% (TS3).

**Wdrożenie i osiągnięte efekty.** Wdrożono m.in. macierz odpowiedzialności (189 kroków w 21 procesach), raportowanie wykorzystania i analizę odchyleń wydań, metodykę analizy budowy, pomiary PERI InSite oraz egzoszkielety i dźwig obsługi ręcznej. Najważniejsze dotychczasowe efekty: **po wprowadzeniu analizy odchyleń i rozwiązań FFF średnie wykorzystanie sprzętu wzrosło w ciągu roku z 52–54% do 59% – bez zwiększania majątku**; w centrach logistycznych wydajność prac wspieranych wzrosła o 45% i 30%, co pozwoliło w latach 2023–2026 utrzymać przeładunki przy załodze mniejszej o ok. 27% niż w wariancie bez urządzeń (o ok. 23% w CL Koninko i ok. 31% w CL Kąty Wrocławskie) oraz obniżyć koszty pracy fizycznej co najmniej w tej samej proporcji; wykonano pierwszy w Polsce pomiar parcia mieszanki betonowej, a monitoring dojrzewania pozwala rozdeskowywać według pomiaru (wytrzymałość in situ po 2 dobach o ok. 40% wyższa od laboratoryjnej).

**Wnioski.** Cele osiągnięto: tezy TS1–TS3 potwierdzono, a dla dalszej weryfikacji hipotezy ustanowiono linię bazową i system pomiaru. Warunkiem sukcesu jest partnerstwo wykonawcy z dostawcą oparte na zaufaniu (Deming), a przy deficycie pracy wiodące będą systemy o niskiej pracochłonności. Praca łączy naukę z biznesem w pętli: problem firmy – badania – wdrożenia – dane dla SSN.



**Słowa kluczowe:** deskowania systemowe, Flexible Formwork Flow, LEAN Management, Construction 5.0, sztuczne sieci neuronowe, doktorat wdrożeniowy.

## Abstract

***"Improving the formwork assembly/disassembly process and the preparation of formwork for concreting based on technological, organisational and process innovations using ANN"***

*– doctoral dissertation within the "Implementation Doctorate" programme*

Candidate: Łukasz Majkowski, MSc Eng. | Supervisor: Jerzy Pasławski, PhD, DSc, Eng., Prof. PUT | Auxiliary supervisor: Kamil Karpała, Eng. | Company: PERI Polska Sp. z o.o.

**Introduction and problem.** Labour costs in formwork operations are rising steadily: in 2015–2025 the average wage increased by 128.3%, while formwork prices rose by about 3–4% per year. With a shortage of carpenters (76% of contractors rate their availability as poor or critical) and the expansion of precast concrete, the use of systems and solutions that reduce labour input is becoming crucial for construction sites. At PERI Polska the problem was low rotation of the rental fleet: before the implementation (until 2024/2025) average equipment utilisation was 52–54%, depending on the system, and return-date deviations were not recorded. The response is the original FFF – Flexible Formwork Flow method.

**Objective and theses.** The objective is to formulate, substantiate and implement the FFF method, combining LEAN Management, Agile and Construction 5.0, with a learning layer ultimately based on artificial neural networks (ANN). Main thesis: the supplier's advantage arising from the fast assembly of its formwork systems translates into more economical, faster and safer site work and into company efficiency only when flow across the supplier–site–supplier chain is continuous and flexible. The detailed theses concern the synchronisation of material, labour and logistics around the critical resource (TS1), the organisation and support of human work (TS2), and flow rather than volume issued (TS3). Hypothesis: fleet utilisation can be raised further – towards 75% – without increasing assets.

**Methodology.** Literature and labour-standard analysis, a CAWI survey (n = 50), BPMN modelling, a case study of the INDUSTRIAL building in Poznań, statistical analysis of the supplier's operational data, a counterfactual simulation and analysis of concrete sensor data.

**Scientific results.** The key original result is the FFF flow model in three steps – tactical (technological design and supplier logistics), operational (site operations) and strategic (full rental cycle of a formwork set) – whose final effect is a mutual benefit (win-win): a shorter cycle and lower cost for the contractor, more set rotations without investment for the supplier. On the INDUSTRIAL site the 28-day cycle was set by a single crane (TS1); 68% of contractors locate time losses around the formwork rather than in assembly (TS2); the 75% target requires cutting the off-rent time of a component by about 38% (TS3).

**Implementation and results achieved.** Implemented solutions include a responsibility matrix (189 steps in 21 processes), utilisation reporting and delivery-deviation analysis, a site analysis methodology, PERI InSite measurements, and exoskeletons and a manual-handling crane. Key results to date: **after introducing deviation analysis and FFF solutions, average equipment utilisation rose within one year from 52–54% to 59% – without increasing assets**; in the logistics centres productivity of supported work rose by 45% and 30%, which made it possible to maintain throughput in 2023–2026 with a workforce about 27% smaller than in the variant without these devices (approx. 23% at the Koninko and 31% at the Kąty Wrocławskie logistics centre), and to reduce physical labour costs by at least the same proportion; the first fresh-concrete pressure measurement in Poland was carried out, and maturity monitoring showed in-place concrete strength about 40% higher than laboratory strength after 2 days, which allows stripping to be based on measurement.

**Conclusions.** The objectives were achieved: TS1–TS3 were confirmed, and a baseline and measurement system were established for further verification of the hypothesis. Success requires a contractor–supplier partnership based on trust (Deming), and under labour shortages low-labour systems will lead the market. The work links science and business in a loop: company problem – research – implementation – data for ANN.



**Keywords:** system formwork, Flexible Formwork Flow, LEAN Management, Construction 5.0, artificial neural networks, implementation doctorate.

# 1. Wstęp

## 1.1. Uzasadnienie podjęcia tematu

Monolityczne konstrukcje żelbetowe pozostają dominującą technologią wznoszenia obiektów kubaturowych i inżynierskich w Polsce, a deskowanie systemowe jest w tej technologii środkiem produkcji o szczególnym charakterze: nie pozostaje w konstrukcji, lecz jest wielokrotnie przekładane pomiędzy kolejnymi taktami betonowania. O jego rzeczywistym koszcie decyduje zatem nie cena najmu lub zakupu, lecz liczba rotacji możliwych do uzyskania w danym czasie – a ta zależy wprost od sprawności montażu, demontażu i przygotowania deskowania do betonowania (Orłowski Z., 2010). Literatura przedmiotu (Bajorek G., Słonina S., 2023) szacuje udział deskowań w koszcie konstrukcji żelbetowej na 35–45% (w obiektach inżynierskich do 60%), a robocizna związana z montażem i demontażem generuje około połowy nakładów na wykonanie konstrukcji monolitycznej (Rowiński L. i in., 1980). Każde usprawnienie tego procesu ma więc wymierne znaczenie ekonomiczne – zarówno dla wykonawcy, jak i dla dostawcy deskowań, którego park dzierżawny przynosi przychód wyłącznie wtedy, gdy znajduje się na budowie.

Waga problemu w ostatniej dekadzie istotnie wzrosła. Wydajność pracy w budownictwie rosła w skali światowej jedynie o około 1% rocznie, wobec 3,6% w przemyśle wytwórczym, a w 30% pracy wykonywanej przez firmy budowlane stanowi korekta wykrytych za późno błędów (Barbosa F., Woetzel J., 2017). W Polsce przeciętne wynagrodzenie w gospodarce narodowej wzrosło w latach 2015–2025 o 128,3%, a minimalne wynagrodzenie o 166,6%, podczas gdy ceny dzierżawy i sprzedaży deskowań systemowych rosły w tempie około 3–4% rocznie. Koszt pracy ludzkiej stał się tym samym dominującym i najszybciej drożejącym składnikiem kosztu robót deskowaniowych, a wartość każdej roboczogodziny zaoszczędzonej na 1 m² deskowania ponad dwukrotnie wzrosła. Równolegle 76% wykonawców stanów surowych ocenia dostępność wykwalifikowanych cieśli jako słabą lub krytyczną, a rynek – zgodnie z logiką substytucji czynników produkcji – przenosi kolejne segmenty (hale wielkopowierzchniowe, obiekty mostowe małych i średnich rozpiętości, instalacje termicznego przekształcania odpadów) do prefabrykacji. Skrócenie cyklu i ograniczenie pracochłonności deskowania nie jest już wyłącznie zagadnieniem optymalizacji, lecz warunkiem utrzymania konkurencyjności technologii monolitycznej.

**Trzecią przesłanką jest błędne, lecz od wielu lat powszechne na rynku budowlanym przeświadczenie, że im więcej sprzętu dostawca deskowań wyda na budowy, tym więcej zarobi.** Pogląd ten – podzielany często zarówno przez wykonawców, jak i przez służby handlowe dostawców – utożsamia przychód z wolumenem materiału w dzierżawie, pomijając to, że park dzierżawny jest majątkiem, który generuje koszt w każdym dniu, w którym nie „płynie": zarówno wtedy, gdy leży na placu dostawcy, jak i wtedy, gdy stoi na budowie bez rotacji, czekając na zbrojenie, dojrzewanie betonu lub kolejny takt. Doświadczenia innych branż dowodzą, że jest to teza fałszywa. Klasycznym przykładem jest Apple Inc., gdzie w latach 1998–1999 radykalna redukcja zapasów – z poziomu odpowiadającego około miesiącowi sprzedaży do kilku dni – i uczynienie ze wskaźników rotacji głównego miernika pracy całej organizacji przekształciły firmę przynoszącą straty w lidera efektywności operacyjnej. Analogia do gospodarki deskowaniami jest bezpośrednia: o wyniku dostawcy decyduje nie ilość wydanego materiału, lecz liczba rotacji tego samego kompletu w sezonie, a więc sprawność przepływu deskowań przez kolejne budowy. Metoda FFF – Flexible Formwork Flow – jest na to przeświadczenie najlepszą odpowiedzią, ponieważ przenosi punkt ciężkości z wolumenu wydań na przepływ: ze sprzętu, który „leży", na deskowanie, które „płynie", tj. użytkowane wielokrotnie więcej razy przy utrzymaniu rytmicznej produkcji budowlanej.

Czwartą przesłanką podjęcia tematu jest luka poznawcza. Przegląd literatury dotyczącej zarządzania deskowaniami ujawnia wyraźną asymetrię: piśmiennictwo jest bogate w metody **doboru** systemu deskowania (analiza wielokryterialna, systemy ekspertowe, sieci neuronowe, logika rozmyta, metoda Choosing by Advantages), lecz ubogie w metody **zarządzania przepływem** deskowania w trakcie realizacji i w łańcuchu dostaw. Niemal żadna z analizowanych pozycji nie stosuje w sposób metodyczny narzędzi LEAN Management, a poziom floty dostawcy – na którym wzrost wykorzystania deskowań u jednego wykonawcy zmniejsza ich dostępność dla pozostałych – pozostaje w literaturze nieopisany. Tę lukę wypełnia rozwijana w niniejszej pracy koncepcja Flexible Formwork Flow.

## 1.2. Przedmiot, cel i teza pracy

Przedmiotem rozprawy jest usprawnienie procesu montażu i demontażu deskowań systemowych oraz przygotowania deskowania do betonowania, rozpatrywane na bazie innowacji technologicznych,

organizacyjnych i procesowych – w całym łańcuchu przepływu deskowania: od projektu technologicznego, przez rezerwację i kompletację w centrum logistycznym dostawcy, transport, montaż, cykle betonowania i demontaż na budowie, aż po zwrot, remont i ponowne wydanie elementów kolejnemu odbiorcy.

Celem głównym pracy jest **sformułowanie, empiryczne uzasadnienie i wdrożenie metody FFF – Flexible Formwork Flow (elastycznego przepływu deskowań), opartej na połączeniu założeń LEAN Management, podejścia zwinnego (Agile) oraz paradygmatów Industry 5.0 i Construction 5.0, jako narzędzia podnoszenia zgodności planu i realizacji robót deskowaniowych na budowie oraz niezawodności i wykorzystania parku dzierżawnego po stronie dostawcy – wraz z jej warstwą uczącą, opartą na modelach prognostycznych skalibrowanych na danych operacyjnych i docelowo na sztucznych sieciach neuronowych**. Metoda została po raz pierwszy zarysowana w czasopiśmie „Inżynieria i Budownictwo" (Majkowski Ł., Pasławski J., 2023), a niniejsza rozprawa stanowi jej rozwinięcie, ilościowe uzasadnienie i weryfikację wdrożeniową.

Realizacji celu głównego służą cele szczegółowe:

1. osadzenie problematyki gospodarki deskowaniami w paradygmatach rozwoju budownictwa – od Construction 4.0, przez Construction 5.0 (jako rozwinięcie Industry 5.0), do kształtującej się koncepcji Industry 6.0 – oraz uzasadnienie potrzeby zmiany paradygmatu zarządzania deskowaniami z ujęcia czysto technicznego na ujęcie socjotechniczne, łączące rozwiązywanie problemów technicznych z rozwiązywaniem problemów zarządzania ludźmi;
2. krytyczny przegląd literatury z zakresu zarządzania deskowaniami i identyfikacja luki badawczej;
3. ilościowe rozpoznanie struktury nakładów pracochłonności na deskowania (montaż, rozdeskowanie, transport, czyszczenie i olejenie) oraz wpływu organizacji pracy i geometrii obiektu na te nakłady;
4. rozpoznanie potrzeb i dojrzałości procesowej rynku wykonawców konstrukcji żelbetowych w Polsce;
5. analiza i standaryzacja procesu obsługi zlecenia klienta u dostawcy deskowań (mapa BPMN, macierz odpowiedzialności i kompetencji) jako organizacyjnego fundamentu elastycznego przepływu;
6. ocena wykorzystania potencjału deskowań, ludzi i zasobów logistycznych na przykładzie kompletnie udokumentowanej budowy oraz ocena bieżącego wykorzystania materiałowego parku dzierżawnego jako wskaźnika wynikowego całego łańcucha;
7. ekonomiczne uzasadnienie kierunku badań poprzez analizę relacji kosztu pracy do kosztu deskowań w latach 2015–2025 oraz rozpoznanie strukturalnego zagrożenia ze strony prefabrykacji;
8. ocena innowacji technologicznych wspierających metodę FFF – cyfrowego monitoringu betonu, druku 3D, egzoszkieletów i dźwigu obsługi ręcznej – na podstawie rzeczywistych wdrożeń w PERI Polska oraz symulacja przeniesienia efektu egzoszkieletów na plac budowy;
9. zdefiniowanie warstwy uczącej metody FFF: zmiennych, mierników i zbiorów danych, skalibrowanie na nich interpretowalnych modeli prognostycznych oraz sformułowanie koncepcji i etapów budowy sztucznej sieci neuronowej prognozującej zapotrzebowanie na deskowania, pracowników i zasoby logistyczne.
10. zespolenie wyników części badawczej i wdrożeniowej w modelu przepływu FFF, obejmującym poziom taktyczny, operacyjny i strategiczny zarządzania przepływem deskowań, oraz dyskusja jego implikacji dla modelu biznesowego dostawcy, relacji z wykonawcami i kierunków rozwoju rynku.

Teza rozprawy brzmi: **przewaga dostawcy deskowań systemowych, wynikająca z szybkości montażu jego systemów, przekłada się na ekonomiczniejszą, szybszą i bezpieczniejszą pracę na budowie oraz na efektywność przedsiębiorstwa dopiero wtedy, gdy zapewniona jest ciągłość i elastyczność przepływu deskowań w łańcuchu dostawca–budowa–dostawca, czyli synchronizacja potencjałów materiału, ludzi i zasobów logistycznych, wspierana wiarygodną informacją o rzeczywistym stanie elementów i konstrukcji.** Operacyjnym rozwinięciem tezy jest hipoteza, że wdrożenie rozwiązań metody FFF pozwala podnieść łączne wykorzystanie parku

dzierżawnego z poziomu około 59% w kierunku celu strategicznego 75% bez zwiększania majątku, przy jednoczesnym ograniczeniu odchyleń terminów wydań i zwrotów. Teza główna zawiera cztery twierdzenia – o warunkowym charakterze przewagi wynikającej z szybkości montażu systemów, o właściwym poziomie analizy (cały łańcuch, rynek jako układ naczyń połączonych), o mechanizmie synchronizacji trzech potencjałów oraz o wiarygodnej informacji jako warunku koniecznym. Tak sformułowana teza nawiązuje bezpośrednio do misji PERI – „Sprawiamy, że praca na budowie jest bardziej ekonomiczna, szybsza i bezpieczna" – i wskazuje warunek, od którego zależy jej realizacja w skali całego parku dzierżawnego. Teza główna została w rozdziale 3 rozwinięta w trzy tezy szczegółowe: TS1 – o synchronizacji socjotechnicznej i uczeniu się przepływu, TS2 – o organizacji i wsparciu pracy ludzi jako głównej dźwigni efektywności oraz TS3 – o przepływie zamiast wolumenu w łańcuchu dostawca–budowa–dostawca. Każdej z nich przypisano mierniki oraz rozdziały, w których jest weryfikowana.

## 1.3. Charakter wdrożeniowy pracy i metody badawcze

Rozprawa ma charakter doktoratu wdrożeniowego i została zrealizowana w ścisłym powiązaniu z bieżącą działalnością PERI Polska Sp. z o.o. – spółki koncernu PERI, jednego z wiodących dostawców systemów deskowań i rusztowań. Połączono pracę badawczą z praktyką zawodową w przedsiębiorstwie, a mając dostęp do danych operacyjnych, których w literaturze przedmiotu dotąd nie analizowano: pełnych wyciągów ruchów materiału dla konkretnych budów, tygodniowych raportów wykorzystania parku dzierżawnego, eksportów odchyleń terminów wydań z systemu magazynowo-logistycznego, ewidencji przeładunków w centrach logistycznych za lata 2017–2026, dokumentacji procesowej (mapa BPMN, macierz odpowiedzialności) oraz danych pomiarowych z platformy monitoringu betonu. Dane te zostały zanonimizowane w zakresie nazw klientów i wartości majątku, a wszystkie wielkości szacunkowe i założenia wyraźnie oddzielono od danych źródłowych.

Istotą podejścia wdrożeniowego jest to, że część rozwiązań postulowanych przez metodę FFF została w trakcie przygotowywania rozprawy wprowadzona do praktyki przedsiębiorstwa i poddana ocenie na danych rzeczywistych. Do wdrożeń tych należą w szczególności: mapowanie procesu obsługi zlecenia i macierz odpowiedzialności (kompetencji) obejmująca 189 kroków w 21 procesach wraz z zestawem mierników; cotygodniowe raportowanie bieżącego wykorzystania materiałowego oraz ewidencja odchyleń terminów wydań; metodyka analizy wykorzystania potencjału deskowań na budowie zastosowana do biurowca INDUSTRIAL w Poznaniu; system czujników PERI InSite na budowach S7 Rdzawka i CCGT Grudziądz; egzoszkielety w Centrum Logistycznym Kąty Wrocławskie i dźwig obsługi ręcznej w Centrum Logistycznym Koninko.

W pracy zastosowano komplementarny zestaw metod badawczych: krytyczną analizę literatury i dokumentów źródłowych, analizę normatywów pracochłonności wraz z modelowaniem własnym, badanie ankietowe techniką CAWI (n = 50), modelowanie procesów w notacji BPMN i analizę porównawczą dokumentów procesowych, studium przypadku budowy oparte na rysunkach obmiarowych, harmonogramie i ruchach materiału, analizę statystyczną szeregów tygodniowych i rozkładów odchyleń, analizę ekonomiczną na danych GUS i Sekocenbud, symulację kontrfaktyczną oraz analizę danych sensorycznych. Uzupełnieniem są modele prognostyczne (bilans trzech potencjałów budowy, statystyki szeregów wykorzystania, model bilansu pracy centrum logistycznego), skalibrowane na danych operacyjnych i stanowiące pierwszy, interpretowalny etap warstwy uczącej metody FFF. Ramą interpretacyjną wszystkich analiz jest katalog marnotrawstwa LEAN (zapasy, oczekiwanie, nadmierny transport, nadprodukcja, błędy) w adaptacji do cyklu deskowaniowego, a wspólnym mianownikiem ilościowym – prawo Little'a, wiążące wykorzystanie materiałowe z czasem przebywania elementu poza dzierżawą. Wyniki części badawczej i wdrożeniowej zespolono w modelu przepływu FFF, który opisuje czas pełnego obiegu kompletu deskowania w łańcuchu dostawca–budowa–dostawca i wskazuje, w jaki sposób na ten czas wpływają potencjał ludzi, zasoby logistyczne, proces technologiczny betonu, przestoje na budowie oraz przepływ po stronie dostawcy. Model ten ujęto w trzech krokach, odpowiadających poziomowi taktycznemu (projekty technologiczne i logistyka dostawcy), operacyjnemu (operacje i procesy na budowie) i strategicznemu (pełny cykl dzierżawy zestawu), a jego efektem końcowym jest korzyść obustronna wykonawcy i dostawcy.

## 1.4. Struktura pracy

Rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów. Po niniejszym wstępie rozdział 2 zawiera szczegółowy przegląd ośmiu kluczowych pozycji literatury z zakresu zarządzania deskowaniami (optymalizacja rotacji, analiza wydajności, dobór wielokryterialny, modele procesowe, mapowanie strumienia wartości

łańcucha dostaw, metoda CBA, planowanie wykorzystania deskowań), zamknięty w podrozdziale 2.9 syntezą, która identyfikuje nieobecność LEAN Management w literaturze deskowaniowej i formułuje implikacje dla koncepcji FFF.

Rozdział 3 formułuje tezy rozprawy. Podrozdział 3.1 osadza je w przejściu od Construction 4.0, przez Construction 5.0 (jako rozwinięcie Industry 5.0), do kształtującej się koncepcji Industry 6.0 i jej budowlanego odpowiednika oraz pokazuje, w jaki sposób metoda FFF łączy warstwę technologiczną, ludzką i kognitywną tych etapów rozwoju. Podrozdział 3.2 uzasadnia, dlaczego usprawnienie montażu i demontażu deskowań wymaga zmiany paradygmatu zarządzania – od ujęcia technicznego do socjotechnicznego, w którym wydajność jest zjawiskiem społecznym, a technika i organizacja pracy ludzi są projektowane łącznie. Podrozdział 3.3 rozwija tezę główną i hipotezę operacyjną w trzy tezy szczegółowe z miernikami, a podrozdział 3.4 przedstawia sztuczne sieci neuronowe jako warstwę uczącą metody FFF – wraz z przeglądem ich zastosowań w problematyce deskowań, modelami prognostycznymi skalibrowanymi w rozprawie na danych rzeczywistych i etapami dojścia do sieci neuronowej.

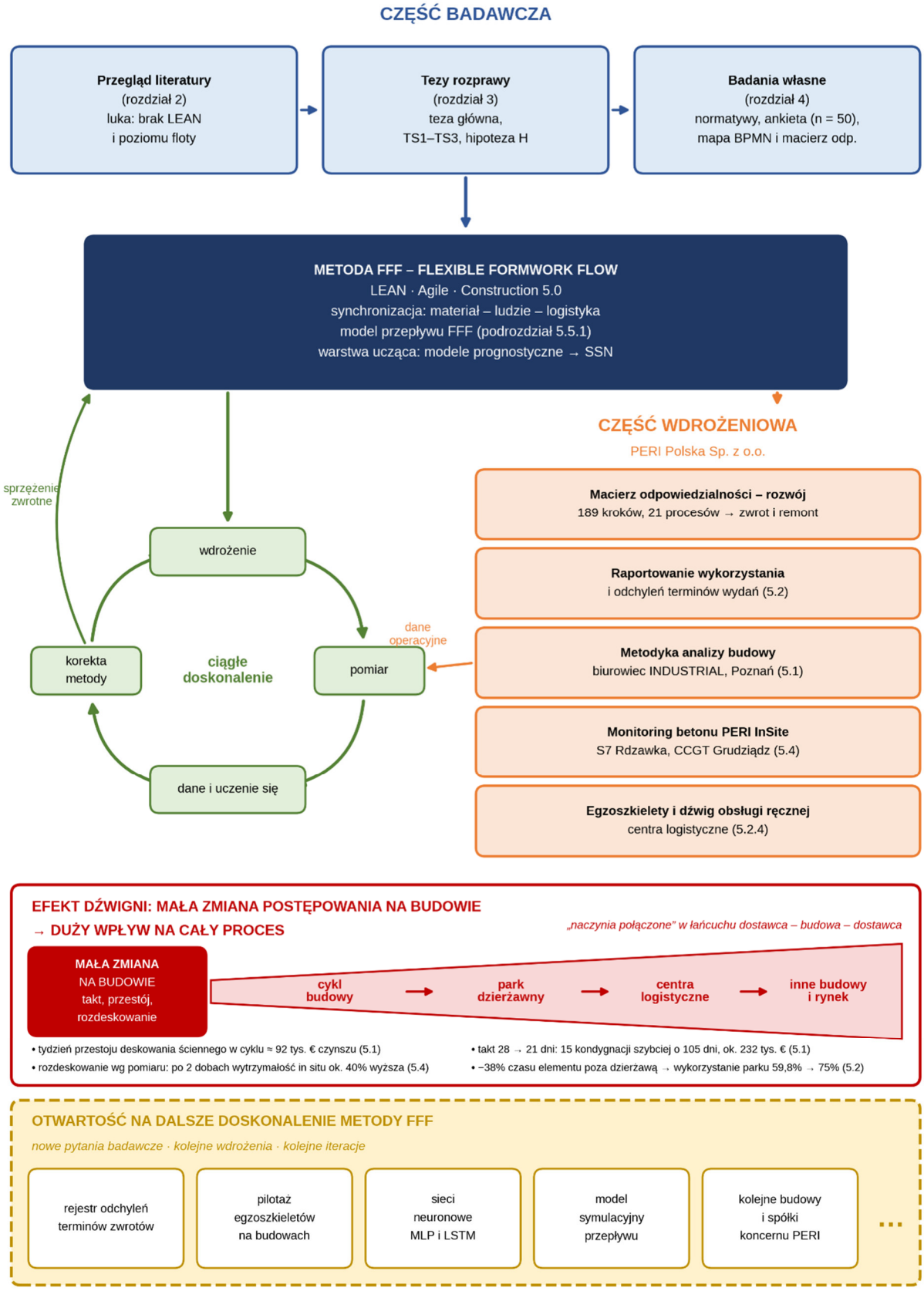
Rozdział 4 stanowi część badawczą rozprawy. Podrozdział 4.1 analizuje niemiecki katalog normatywów pracochłonności robót szalunkowych i dekomponuje cykl deskowaniowy na mierzalne operacje. Podrozdział 4.2 przedstawia wyniki badania ankietowego 50 firm wykonawczych. Podrozdział 4.3 opisuje pierwsze wdrożenie w ramach FFF – analizę procesu obsługi zlecenia klienta w PERI Polska na podstawie mapy BPMN i macierzy odpowiedzialności. Podrozdział 4.4 zestawia wyniki trzech badań i odnosi je do metody FFF, tez szczegółowych oraz warstwy uczącej opartej na sztucznych sieciach neuronowych.

Rozdział 5 stanowi część wdrożeniową rozprawy. Podrozdział 5.1 jest studium przypadku budowy biurowca INDUSTRIAL w Poznaniu, w którym zbadano synchronizację potencjału materiału, ludzi i żurawia. Podrozdział 5.2 poddaje analizie bieżące wykorzystanie materiałowe parku dzierżawnego PERI Polska i odchylenia terminów wydań, ustanawiając linię bazową dla weryfikacji hipotezy, a także analizuje przeładunki w centrach logistycznych w latach 2017–2026, wpływ egzoszkieletów i dźwigu obsługi ręcznej na wydajność, koszty pracy i rotację pracowników oraz – w drodze symulacji – możliwość zastosowania egzoszkieletów na budowie. Podrozdział 5.3 kwantyfikuje zmianę relacji kosztu pracy do kosztu deskowań w latach 2015–2025 i rozpoznaje rozwój prefabrykacji żelbetowej jako strukturalne zagrożenie dla rynku deskowań. Podrozdział 5.4 omawia cyfrowy monitoring betonu i druk 3D jako narzędzia wspierające FFF, w tym wdrożenia systemu InSite w Polsce. Podrozdział 5.5 podsumowuje część badawczą i wdrożeniową: wyprowadza model przepływu FFF w trzech krokach – na poziomie taktycznym, operacyjnym i strategicznym – wraz z efektem końcowym o charakterze korzyści obustronnej, odnosi do niego wyniki uzyskane na sześciu poziomach analizy, ocenia stan weryfikacji tez, wskazuje zadania warstwy uczącej opartej na sieciach neuronowych oraz ograniczenia, w tym konieczność zmiany kultury planowania po stronie wykonawców.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie i dyskusję wyników, ze szczególnym uwzględnieniem nowości technologicznych i problemów rynkowych. Podrozdział 6.1 osadza metodę FFF wśród modeli biznesowych opartych na usłudze i pełnym cyklu życia zasobu – od analogii z Apple Inc. po przykłady Rolls-Royce i Hilti – i wskazuje specyfikę modelu dzierżawnego. Podrozdział 6.2 omawia rolę zaufania i korzyści obustronnej w relacji wykonawcy z dostawcą w ujęciu W. E. Deminga, a podrozdział 6.3 – perspektywy rynku w najbliższych dekadach, w tym inwestycje w energetykę i obronność oraz rosnące znaczenie systemów deskowań o niskiej pracochłonności i rozwiązań wspierających pracowników.

Rozdział 7 zawiera wnioski ogólne i szczegółowe, uporządkowane według tez szczegółowych, oraz perspektywy dalszego rozwoju metody FFF w czterech warstwach: pomiarowej i procesowej, technologicznej (w tym pilotaż egzoszkieletów na budowach), analitycznej i uczącej oraz rynkowej. Pracę zamyka bibliografia; materiały źródłowe – mapa procesu obsługi zlecenia i wykres Gantta realizacji konstrukcji – stanowią załączniki.

Strukturę rozprawy oraz wzajemne powiązania jej części badawczej i wdrożeniowej przedstawiono na rys. 1.1.




*Rys. 1.1. Struktura rozprawy – część badawcza i wdrożeniowa, metoda FFF, pętla ciągłego doskonalenia, efekt dźwigni oraz otwartość na dalsze doskonalenie metody. Źródło: opracowanie własne.*

Schemat odczytuje się od góry. Część badawcza – przegląd literatury (rozdział 2), tezy (rozdział 3) i badania własne (rozdział 4) – prowadzi do metody FFF, która łączy LEAN Management, podejście zwinne i założenia Construction 5.0, opiera się na synchronizacji materiału, ludzi i logistyki oraz obejmuje model przepływu i warstwę uczącą. Z metody wynikają wdrożenia w PERI Polska Sp. z o.o. (rozdziały 4 i 5): rozwój macierzy odpowiedzialności, raportowanie wykorzystania i odchyleń terminów wydań, metodyka analizy budowy, monitoring betonu systemem PERI InSite oraz egzoszkielety i dźwig obsługi ręcznej w centrach logistycznych. Dane operacyjne z wdrożeń zasilają pętlę ciągłego doskonalenia – wdrożenie, pomiar, dane i uczenie się, korekta metody – która przez sprzężenie zwrotne wraca do metody FFF. Tak rozumiany charakter badawczo-wdrożeniowy oznacza, że wyniki badań nie kończą się na rekomendacjach, lecz są wprowadzane do praktyki przedsiębiorstwa, mierzone i wykorzystywane do dalszego doskonalenia metody.

Pas „Efekt dźwigni” wyraża najważniejszą obserwację praktyczną rozprawy: niewielka zmiana postępowania na budowie – dotycząca taktu, przestoju kompletu czy terminu rozdeskowania – przenosi się na cykl budowy, park dzierżawny, centra logistyczne, a w efekcie na inne budowy i cały rynek, który funkcjonuje jak układ naczyń połączonych. Ilustrują to przykłady z rozprawy: tydzień przestoju deskowania ściennego w każdym cyklu odpowiada ok. 92 tys. € czynszu, skrócenie taktu z 28 do 21 dni skraca realizację 15 kondygnacji o 105 dni, rozdeskowanie według pomiaru pozwala wykorzystać wytrzymałość betonu w konstrukcji wyższą po dwóch dobach o ok. 40% od laboratoryjnej, a skrócenie czasu przebywania elementu poza dzierżawą o ok. 38% odpowiada podniesieniu wykorzystania parku z 59,8% do 75%. Dolny pas schematu podkreśla otwartość metody FFF na dalsze doskonalenie – od rejestru odchyleń terminów zwrotów, przez pilotaż egzoszkieletów na budowach, sieci neuronowe MLP i LSTM oraz model symulacyjny przepływu deskowań, po wdrożenie metody na kolejnych budowach i w innych spółkach koncernu PERI. Metoda FFF nie jest zatem zamkniętym zbiorem narzędzi, lecz ramą, która w kolejnych iteracjach będzie uzupełniana o nowe pytania badawcze i nowe wdrożenia.

# 2. Zarządzanie deskowaniami – przegląd wiedzy

## 2.1. Optymalizacja planowania, wdrażania i kosztów deskowań (szalunków) w budownictwie monolitycznym

W 2023 r. podjęto istotny i często marginalizowany problem inżynierii lądowej oraz zarządzania procesami budowlanymi: planowanie i optymalizację użycia deskowań podczas wznoszenia monolitycznych konstrukcji betonowych i żelbetowych (Baskova R. i in., 2023). Deskowania stanowią jeden z najbardziej kosztochłonnych elementów tymczasowych na placu budowy, a mimo to w praktyce (opisywanej na przykładzie Słowacji, lecz odnoszącej się do szerszego rynku europejskiego) ich planowanie jest często pomijane lub opiera się wyłącznie na intuicji i doświadczeniu inżynierów. Zaproponowano przejście od empirycznego zarządzania szalunkami do podejścia zalgorytmizowanego, opartego na modelowaniu dynamicznym, symulacjach oraz autorskim oprogramowaniu DILEF, co ma zniwelować lukę między teoretycznymi modelami optymalizacyjnymi a rzeczywistą praktyką budowlaną.

Punktem wyjścia jest pięć pytań badawczych: ile elementów deskowania jest niezbędnych do optymalnej realizacji inwestycji, jaki jest optymalny współczynnik rotacji komponentów przy różnych czasach trwania budowy, jak koszty deskowania zmieniają się w zależności od czasu realizacji, czy w danych warunkach bardziej opłacalny jest zakup, czy wynajem oraz w jaki sposób modyfikacja parametrów technologicznych mieszanki betonowej (np. czasu wiązania) odbija się na kosztach deskowań. Wspólnym mianownikiem wszystkich pytań jest czynnik czasu – głównym celem optymalizacji jest wyeliminowanie sytuacji, w której elementy deskowania przebywają na budowie dłużej, niż wymaga tego przyrost wytrzymałości betonu. Brak przetrzymywania szalunków oznacza niższe koszty wynajmu i wyższą efektywność ekonomiczną.

Metodologia ma charakter ilościowy i wieloetapowy. Opracowano algorytm integrujący dane z harmonogramu budowy, planu deskowań oraz parametry technologiczne betonu w rzeczywistych warunkach, a następnie zaimplementowano go w oprogramowaniu DILEF. Aplikacja generuje histogramy i wykresy skumulowane montażu i demontażu płyt deskowaniowych w czasie oraz pozwala dynamicznie przeliczać wyniki po zmianie dowolnego parametru wejściowego. Proces budowlany podzielono na mierzalne etapy: montaż deskowania, zbrojenie, betonowanie, pielęgnację betonu oraz demontaż deskowania (częściowy lub całkowity). Stabilność rozwiązań weryfikowano dyskretną analizą wrażliwości oraz modelowaniem parametrycznym.

Istotą modelu jest rozdzielenie całkowitego czasu użytkowania danego typu komponentu w danej strefie roboczej na dwie części: czas niezbędny, wynikający z trwania procesów składowych i przerw technologicznych (np. osiągnięcia przez beton wytrzymałości pozwalającej na rozdeskowanie), oraz czas nadmiarowy, w którym komponenty po demontażu pozostają bezczynnie w strefie roboczej lub na placu składowym, oczekując na ponowne użycie. Optymalizacja kosztów sprowadza się do minimalizacji czasu nadmiarowego – każdy dzień bezczynności oznacza puste koszty dzierżawy lub zamrożony kapitał. Algorytm dąży do takiego ułożenia harmonogramu we wszystkich strefach, aby komponenty były płynnie przekazywane pomiędzy kolejnymi działkami roboczymi.

Symulacje potwierdziły trzy główne ustalenia. Po pierwsze, fundamentem optymalizacji jest prawidłowy dobór typu deskowania i unikanie przewymiarowania (overequipping) ilości elementów w strefach roboczych, a nakładające się histogramy ujawniają momenty, w których szalunki leżą bezczynnie. Po drugie, skład kompletu musi być tak zbalansowany, aby maksymalna liczba elementów mogła być wielokrotnie użyta we wszystkich strefach. Po trzecie, skrócenie przerw technologicznych (np. przez zastosowanie domieszek przyspieszających wiązanie betonu) wyraźnie zmniejsza zapotrzebowanie na deskowania, co natychmiast przekłada się na redukcję kosztów wynajmu. Wartościowym elementem pracy jest ujęcie problemu przez pryzmat trzech filarów zrównoważonego rozwoju: ekonomicznego (mniejsze zużycie i krótszy czas wynajmu), środowiskowego (wyższa rotacja i eksploatacja materiału do granicy jego żywotności ekonomicznej) oraz społecznego (krótsze oddziaływanie budowy na otoczenie – hałas, pył, ruch ciężki). Brak optymalizacji gospodarki deskowaniami uznano za działanie antyekologiczne i niezrównoważone.

Do mocnych stron metody należą: wysoka aplikacyjność praktyczna (działające narzędzie DILEF, użyteczne dla kierowników budów i planistów), trafne ujęcie współzależności między doborem deskowania, harmonogramem i kosztami wynajmu, wizualizacja „ukrytych rezerw" harmonogramu oraz interdyscyplinarne połączenie inżynierii kosztów z ideą zrównoważonego rozwoju. Ograniczenia dotyczą przede wszystkim kontekstu terytorialnego – wnioski o „braku planowania" odnoszą się do Słowacji i mogą być nieaktualne na rynkach, na których planowanie deskowań w standardzie BIM jest

powszechne (np. Niemcy, Skandynawia). Obsługa zaawansowanego oprogramowania wymaga wykwalifikowanej kadry, co dla mniejszych podwykonawców stanowi barierę wdrożeniową. Model jest też silnie zależny od jakości danych wejściowych: optymalny czas rozdeskowania wymaga precyzyjnej znajomości krzywej przyrostu wytrzymałości betonu, a zmienne warunki pogodowe mogą zdestabilizować wyliczony harmonogram rotacji. Brakuje wreszcie analizy przestrzennej i logistycznej – model nie rozstrzyga, czy na ciasnej działce miejskiej jest miejsce na składowanie optymalnej z matematycznego punktu widzenia ilości elementów.

Dla praktyki praca jest wezwaniem do porzucenia zarządzania deskowaniami „na oko", a dla nauki wyznacza kierunek dalszych badań: modele hybrydowe łączące systemy zaawansowane i tradycyjne, zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji w planowaniu przerw technologicznych oraz włączenie wyposażenia tymczasowego do analiz cyklu życia (LCA). Z perspektywy niniejszej rozprawy czas nadmiarowy jest, na poziomie pojedynczej budowy, odpowiednikiem czasu przebywania elementu poza produktywnym użyciem, który metoda Flexible Formwork Flow (FFF) minimalizuje na poziomie całego parku dzierżawnego. Model potwierdza dwie przesłanki FFF: o koszcie deskowania decyduje czas i rotacja, a nie wolumen wydanego sprzętu, oraz sterowanie momentem rozdeskowania rzeczywistą dojrzałością betonu bezpośrednio zmniejsza zapotrzebowanie na deskowania. Nieobecność w modelu logistyki, zasobów ludzkich i poziomu wielobudowlanego wyznacza obszar rozwinięty w dalszej części rozprawy.

## 2.2. Analiza wydajności produkcyjnej (nakład pracy na deskowania) w obiektach kubaturowych

W 2008 r. w Kanadzie podjęto tematykę wydajności pracy w budownictwie (labour productivity), ze szczególnym uwzględnieniem operacji montażu i demontażu deskowań (Moselhi O., Khan Z., 2010). Wydajność pracy jest kluczowym wskaźnikiem decydującym o powodzeniu projektu – bezpośrednio wpływa na terminowość i koszty realizacji, a na etapie przetargowym wykonawcy opierają na niej szacowanie kosztów robocizny. Wcześniejsze badania makroekonomiczne sugerowały spadek wydajności w budownictwie, natomiast nowsze badania mikroekonomiczne wskazują tendencje odwrotne, co ujawnia zawodność surowych danych i niepewność metod ich interpretacji. W przeciwieństwie do większości prac, koncentrujących się na czynnikach długoterminowych, omawiane badanie dotyczy dziennych, krótkoterminowych wahań wydajności, co stanowi jego główną wartość dodaną.

Celem badania była kwantyfikacja wpływu zmiennych czynników środowiskowych i organizacyjnych na dzienną wydajność pracy przy robotach deskowaniowych. Dane zebrano na dwóch wielokondygnacyjnych budowach w ciągu 10 miesięcy, uzyskując 221 zestawów danych. Pochodziły one z obserwacji w czasie rzeczywistym oraz ze spersonalizowanych formularzy wypełnianych przez kierowników robót – w 28% przypadków ilości wykonanej pracy podawali bezpośrednio kierownicy na koniec dnia, a w pozostałych 72% obliczano je na podstawie oznaczeń na planach deskowań. Jako zmienne wejściowe przyjęto dziewięć parametrów: temperaturę, wilgotność względną, prędkość wiatru i opady atmosferyczne (warunki pogodowe), wielkość brygady i udział pracowników niewykwalifikowanych (cechy załogi) oraz wysokość wykonywanych prac (kondygnacje od 1 do 17), rodzaj pracy (strop, ściana, słup) i metodę pracy (tradycyjne deskowania drewniane albo deskowania przestawne typu „flying form").

Do analizy wykorzystano sztuczną sieć neuronową z wsteczną propagacją błędu (oprogramowanie Neuroshell 2, architektura Ward net). Dane podzielono losowo na zbiór uczący (60%), testowy (20%) i walidacyjny (20%), niewidziany przez model w trakcie uczenia, co ograniczyło ryzyko przeuczenia. Współczynniki uczenia i momentu zmniejszono z wartości domyślnych 0,1 do 0,05, co pozwoliło dokładniej dostroić wagi sieci. Model wyjaśnia ponad 83% zmienności dziennej wydajności (współczynnik korelacji wyników przewidywanych i rzeczywistych ok. 0,91) przy niskich błędach średnich. Rozkład błędów pokazuje jednak granice precyzji: ok. 46% przewidywań mieściło się w przedziale błędu do 10%, a ponad 12% obarczonych było błędem przekraczającym 30%.

Najważniejszym wynikiem jest wskazanie temperatury jako czynnika o największym wpływie na dzienną wydajność. Wydajność rośnie wraz z temperaturą do ok. 15°C, po czym tempo wzrostu wyraźnie maleje; maksimum przypada na ok. 22°C, a temperatura 25°C i wyższa wpływa na produktywność zdecydowanie negatywnie. Wilgotność względna powyżej 40% również obniża wydajność załogi. Obok temperatury największe znaczenie mają wysokość wykonywanych prac (numer kondygnacji) oraz

rodzaj pracy (ściany, słupy, stropy). Analizowano także łączne oddziaływanie par zmiennych – temperatury i wilgotności, temperatury i prędkości wiatru oraz wielkości brygady i udziału pracowników niewykwalifikowanych. Przykładowe odczyty z budowy ilustrują wysoką czułość modelu na warunki pogodowe: przy tej samej temperaturze i wilgotności, lecz innym rodzaju opadów i wietrze, dzienna wydajność różniła się istotnie.

Wartością pracy jest oparcie modelu wyłącznie na danych empirycznych zebranych w terenie, a nie na danych historycznych przetworzonych z innych publikacji oraz wykazanie przydatności sieci neuronowych do nieliniowego modelowania zjawisk fizycznych i organizacyjnych na budowie. Ograniczenia zostały przez autorów wskazane wprost. Model nie uwzględnia czynników zarządczych (strategii, umiejętności kierownictwa) ani specyficznych warunków logistycznych projektu. Wyniki dotyczą jedynie dwóch placów budowy, między którymi występują różnice behawioralne, zatem uogólnienie wniosków wymagałoby objęcia badaniem znacznie większej liczby obiektów. Pomiar ma charakter krótkoterminowy – nie ujmuje długofalowych efektów, takich jak zmęczenie czy spadek morale brygady po kilku miesiącach złych warunków pogodowych.

Mimo tych ograniczeń praca stanowi wartościowy wkład w zastosowanie metod sztucznej inteligencji w inżynierii lądowej i zarządzaniu projektami. Dla kosztorysantów i kierowników budów wskazuje, że planowanie pracochłonności robót deskowaniowych powinno uwzględniać zmienne warunki pogodowe i organizacyjne, a nie wyłącznie uśrednione wskaźniki katalogowe. Z perspektywy rozprawy praca dostarcza argumentu, że nakład pracy przy montażu i demontażu deskowań jest wielkością zmienną w czasie, co ma bezpośrednie znaczenie dla planowania rotacji sprzętu i dostępności brygad.

## 2.3. Analiza czynników wpływających na wybór systemów szalunków dla budynków mieszkalnych

Aby poszerzyć przegląd o rynki pozaeuropejskie, przeanalizowano czynniki wpływające na wybór systemów deskowań stosowanych w budownictwie mieszkaniowym w Indiach (Rane N. L. i in., 2023). Celem pracy było porównanie tradycyjnych deskowań z nowoczesnymi technologiami: deskowaniami aluminiowymi, samowznoszącymi (jump formwork) oraz tunelowymi. Badanie przeprowadzono w Mumbaju wśród 53 profesjonalistów z branży budowlanej, co stanowi empiryczną podstawę wniosków.

Zastosowano podejście mieszane, łączące przegląd literatury z badaniem ankietowym. Na podstawie literatury zidentyfikowano 24 wstępne czynniki, które w badaniu ankietowym zredukowano do pięciu czynników pierwotnych: kosztu początkowego (zakupu lub wynajmu), trwałości (liczby cykli użycia bez utraty funkcjonalności), kosztu pracy przy montażu i demontażu, powtarzalności (przydatności systemu dla powtarzających się elementów) oraz odpadu materiału deskowaniowego. Procedura ta ma charakter praktyczny i pragmatyczny, jednak redukcja z 24 do 5 czynników nie została poparta szczegółowym uzasadnieniem statystycznym.

Porównanie czterech systemów pokazuje wyraźne różnice. Deskowania tradycyjne (drewniane) mają najniższy koszt początkowy i są uniwersalne, lecz cechują się niską trwałością (średnio 5–10 cykli), wysokim kosztem pracy oraz wysokim udziałem odpadów (20–30%); nadają się do małych, jednorazowych i niestandardowych projektów. Deskowania aluminiowe wymagają wyższego nakładu początkowego, ale oferują wysoką trwałość (50–100 i więcej cykli), niższy koszt pracy i niski udział odpadów (5–10%); w perspektywie długoterminowej są o 9% tańsze od systemów tradycyjnych. Deskowania samowznoszące umożliwiają podnoszenie form między kondygnacjami bez całkowitego demontażu, co skraca czas prac i czyni je szczególnie przydatnymi w budynkach wielokondygnacyjnych. Deskowania tunelowe pozwalają jednocześnie szalować ściany i stropy, mają bardzo wysoką trwałość, najniższy koszt pracy i bardzo niski udział odpadów (1–5%), lecz wymagają silnie ustandaryzowanych wymiarów, dlatego są przeznaczone dla dużych, powtarzalnych projektów mieszkaniowych. Wynikającą z tego logikę doboru systemu przedstawiono w tabeli 2.1.

*Tabela 2.1. Matryca decyzji – rekomendowany system deskowania w zależności od charakterystyki projektu*

| Charakterystyka projektu | Rekomendowany system |
|---|---|
| Projekt małych rozmiarów, jednorazowy, niestandaryzowany | Deskowania tradycyjne (drewniane) |

| Charakterystyka projektu | Rekomendowany system |
|---|---|
| Projekt średniej wielkości, powtarzalne elementy | Deskowania aluminiowe |
| Budynek wielokondygnacyjny, potrzeba szybkości realizacji | Deskowania samowznoszące |
| Duży projekt mieszkaniowy, wysoka standaryzacja | Deskowania tunelowe |

*Źródło: opracowanie własne.*

Interpretując wyniki, należy uwzględnić kontekst rynku indyjskiego. Mumbaj wybrano ze względu na dynamiczny rozwój urbanizacyjny, dużą populację pracowników budowlanych i zróżnicowaną skalę przedsięwzięć. Jednocześnie koszt pracy w Indiach jest istotnie niższy niż na rynkach europejskich i północnoamerykańskich, co wpływa na relacje kosztowe między systemami i ogranicza przenoszalność wniosków. Autorzy podkreślają także wymiar środowiskowy – ograniczenie odpadów sprzyja ochronie środowiska, redukcji kosztów zagospodarowania odpadów i zgodności z normami zrównoważonego budownictwa.

Główne wnioski badania są następujące: decydujący jest koszt długoterminowy, a nie początkowy – systemy nowoczesne (aluminiowe, tunelowe) są w perspektywie wieloletniej tańsze; systemy aluminiowe dają realną przewagę finansową rzędu 9%; nowoczesne systemy generują znacznie mniej odpadów; a wybór systemu powinien być indywidualizowany dla każdego projektu z uwzględnieniem skali, stopnia standaryzacji, budżetu i harmonogramu. Menedżerom rekomendowano analizę kosztów cyklu życia (life-cycle cost), inwestowanie w nowoczesne systemy przy projektach o powtarzalnych elementach, szkolenie pracowników oraz monitorowanie i ograniczanie marnotrawstwa.

Do mocnych stron pracy należą jasna struktura łącząca teorię z empirią, praktyczna orientacja, redukcja czynników do pięciu głównych determinant, konkretny wynik liczbowy oraz porównanie czterech głównych systemów. Słabości dotyczą przede wszystkim warstwy statystycznej: brak analizy wariancji, testów istotności, macierzy korelacji i oceny rzetelności narzędzia. Próba 53 osób, wobec populacji pracowników budowlanych Mumbaju szacowanej na ponad 50 tysięcy, daje margines błędu znacznie powyżej standardowych 5%. Brakuje także analizy wrażliwości, analiz scenariuszowych (wariant optymistyczny, realistyczny i pesymistyczny) oraz analizy progu rentowności, która wskazałaby, przy jakiej liczbie cykli system aluminiowy lub tunelowy staje się opłacalny w porównaniu z tradycyjnym. Badanie ograniczone do jednego miasta nie jest reprezentatywne dla innych regionów Indii ani dla krajów o odmiennej strukturze kosztów. W konsekwencji praca dostarcza praktycznych wskazań dla rynku indyjskiego, lecz nie jest dobrym punktem odniesienia dla budownictwa kubaturowego w Europie.

## 2.4. Wielokryterialna analiza wyboru systemów deskowań w projektach budowlanych

Konstrukcje z betonu wylewanego na miejscu stanowią podstawę budownictwa kubaturowego i infrastrukturalnego, a deskowania – choć są konstrukcjami tymczasowymi – wpływają na trzy główne osie projektu: koszt, czas oraz jakość i bezpieczeństwo. Koszty deskowań mogą pochłaniać od 10% do nawet 60% budżetu konstrukcji żelbetowej, a czas montażu, demontażu i transportu szalunków determinuje tempo wznoszenia kolejnych kondygnacji. Wybór systemu deskowań jest zatem złożonym problemem wielokryterialnym (Multi-Criteria Decision-Making, MCDM), który nie powinien opierać się na intuicji kierownika budowy ani na preferencjach cenowych działu zakupów (Terzioglu T. i in., 2021). Wcześniejsze badania identyfikowały różne kryteria wyboru, brakowało jednak rygorystycznych analiz ilościowych pokazujących, jak kryteria te są postrzegane przez różne grupy interesariuszy. Celem pracy było więc nie tylko skatalogowanie czynników, ale przede wszystkim zbadanie rozbieżności w ich percepcji między kadrą zarządzającą, inżynierami budowy, planistami oraz projektantami i sprzedawcami deskowań.

Na podstawie literatury wyodrębniono 35 unikalnych kryteriów pogrupowanych w cztery domeny. Domena projektu budynku (11 kryteriów) obejmuje m.in. typ płyty stropowej i układu przenoszącego obciążenia poziome, wysokość budynku, zmienność wymiarów i lokalizacji słupów, ścian oraz otworów, stopień powtarzalności, liczbę i powierzchnię kondygnacji, wysokość kondygnacji, jednorodność budynku i wymagane wykończenie powierzchni betonu. Domena uwarunkowań lokalnych (6 kryteriów) dotyczy wymaganego tempa budowy, jakości i wydajności siły roboczej, warunków pogodowych oraz

dostępu do placu i jego wielkości – w gęstej zabudowie brak miejsca na składowanie może wykluczyć systemy wielkowymiarowe. Domena charakterystyki systemu (15 kryteriów) obejmuje koszty początkowe, transportu, konserwacji i robocizny, potencjał ponownego użycia, konieczność użycia dźwigu, możliwości własne wykonawcy, zrównoważony charakter materiałów, bezpieczeństwo, trwałość, elastyczność, kompatybilność, złożoność montażu oraz ciężar i wymiary elementów. Domena usług dostawcy (3 kryteria) obejmuje wsparcie techniczne na budowie, wsparcie logistyczne oraz wsparcie w technologii BIM. Zestawienie kryteriów wraz z pozycjami literatury, w których występują, przedstawiono w tabeli 2.2.

Badanie empiryczne przeprowadzono w tureckim sektorze budowlanym, jednym z najprężniej działających na świecie w zakresie eksportu usług budowlanych. Kwestionariusz w formie elektronicznej wykorzystywał sześciostopniową skalę Likerta (od 0 – czynnik pomijany, do 5 – krytycznie ważny), pozbawioną punktu neutralnego, co zmuszało respondentów do jednoznacznej oceny. Przed dystrybucją narzędzie zwalidowało trzech ekspertów z ponad dwudziestoletnim doświadczeniem w inżynierii deskowań i zarządzaniu projektami. Respondentów podzielono na cztery grupy zawodowe: kadrę zarządzającą i właścicieli firm; kierowników projektów, kierowników budów i inżynierów wykonawców; biura techniczne, planistów i działy zakupów; oraz projektantów deskowań i inżynierów sprzedaży reprezentujących dostawców.

Analizę przeprowadzono w programie IBM SPSS 28.0 z użyciem statystyki nieparametrycznej, właściwej dla danych porządkowych, przy poziomie istotności 0,05. Rzetelność narzędzia okazała się bardzo wysoka (alfa Cronbacha 0,973), a trafność konstrukcyjną potwierdziły test Kaisera-Meyera-Olkina (0,942) oraz test sferyczności Bartletta, wskazujący na silne powiązania między kryteriami. Test Kruskala-Wallisa wykazał statystycznie istotne różnice w ocenie wielu kryteriów w zależności od zajmowanego stanowiska – m.in. typu płyty, układu przenoszącego obciążenia poziome, stopnia powtarzalności, zrównoważonego rozwoju, trwałości, a także ciężaru, wymiarów i elastyczności elementów.

Najważniejszym wynikiem jest identyfikacja tzw. „mentalnych silosów", ujawniona testem U Manna-Whitneya. Trzy grupy po stronie wykonawcy (zarząd, kierownicy budów, biura techniczne i planiści) wykazywały dużą zgodność – różniły się w ocenie zaledwie 1–3 spośród 35 kryteriów. Natomiast projektanci i sprzedawcy deskowań różnili się od kadry zarządzającej w ocenie 11 kryteriów, od kierowników budów – 13, a od biur technicznych i planistów aż 23 z 35 kryteriów. Inżynierowie dostawców postrzegają produkt przez pryzmat nośności, jakości materiału, wsparcia technicznego i BIM, podczas gdy inżynier budowy i planista traktują deskowanie jako środek do celu, dla którego kluczowe są logistyka, ciężar elementów względem udźwigu żurawia, możliwość składowania na małej działce i łatwość montażu przez mniej wykwalifikowaną ekipę. Wykazano także, że wielkość przedsięwzięcia modyfikuje proces decyzyjny: w projektach o powierzchni powyżej 20 tys. m² krytyczne staje się wsparcie logistyczne dostawcy, a w budynkach wyższych niż 36,5 m rośnie znaczenie wydajności, dostępności sprzętu dźwigowego i bezpieczeństwa.

Wnioski mają wyraźny wymiar aplikacyjny. Producenci deskowań powinni dostosować komunikację do percepcji odbiorcy – dla kierownika budowy kluczowe jest ograniczenie zapotrzebowania na wykwalifikowaną siłę roboczą i kosztów konserwacji, dla biura technicznego elastyczność geometryczna i kompatybilność. Katalog 35 kryteriów stanowi podstawę do budowy przyszłych systemów eksperckich i narzędzi uczenia maszynowego, a z perspektywy Lean Construction zniwelowanie rozbieżności między dostawcami a wykonawcami powinno stać się priorytetem w fazie przygotowania realizacji (pre-construction planning). Ograniczeniem jest osadzenie badania wyłącznie na rynku tureckim – w krajach o wyższych kosztach pracy wagi kryteriów mogłyby się istotnie przesunąć. Katalog nie uwzględnia też kryteriów związanych z ewolucją technologiczną (druk 3D, robotyka), a praca nie przechodzi od analizy ważności kryteriów do operacyjnego modelu decyzyjnego (np. AHP lub TOPSIS). Mimo to główna teza – że wybór systemu deskowań zależy nie tylko od cech budynku, ale w dużej mierze od profilu zawodowego decydentów – została statystycznie potwierdzona, a ujawniony dysonans między dostawcami a użytkownikami deskowań jest najważniejszą wartością dodaną opracowania.

*Tabela 2.2. □estawienie 35 kryteriów wyboru systemów deskowań i ich występowania w literaturze przedmiotu*

| ID Numbers | FWS Selection / Criteria — References | Hanna, 1989 | Hanna and Sanvido, 1990 | Hanna et al., 1992 | Kamarthi et al., 1992 | Hanna and Senouci, 1995 | Hanna, 1999 | Proverbs et al., 1999 | Elazouni et al., 2005 | Tam et al., 2005 | Shin et al., 2008 | Elbeltagi et al., 2011 | Shin, 2011 | Shin et al., 2012 | Elbeltagi et al., 2012 | Krawczynska-Piechna, 2015 | Safa et al., 2016 | Martinez et al., 2016 | Basu and Jha, 2016 | Krawczynska-Piechna, 2016 | Loganathan and Viswanathan, 2016 | Krawczynska-Piechna, 2017 | Lohana, 2018 | Pawar et al., 2018 | Teja et al., 2018 | Rajeshkumar and Sreevidya, 2019 | Rajeshkumar et al., 2021 | Terzioglu et al., 2021 | **Number of Citations (ilość cytowań)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Type of structural slab (rodzaj stropu konstrukcyjnego) | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 16 |
| 2 | Type of structural lateral loads-supporting system (rodzaj układu konstrukcyjnego przenoszącego obciążenia poziome) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 15 |
| 3 | Total building height (całkowita wysokość budynku) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | | | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | 15 |
| 4 | Variation in column/wall dimensions and location (zmienność wymiarów i lokalizacji słupów/ścian) | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | 5 |
| 5 | Variation in openings/inserts dimensions and location (zmienność wymiarów i lokalizacji otworów/wkładek) | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | 5 |
| 6 | Degree of repetition of the FWS (stopień powtarzalności systemu deskowań) | ✓ | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | 14 |
| 7 | Number of floors (liczba kondygnacji) | | | | | | | | | | | | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | | | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | 6 |
| 8 | Floor area (powierzchnia kondygnacji) | | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | | | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | 7 |
| 9 | Floor to floor height (wysokość kondygnacji) | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 12 |
| 10 | Uniformity of building (jednorodność budynku) | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | | | | | ✓ | | ✓ | ✓ | 16 |
| 11 | Type of concrete finish (rodzaj wykończenia powierzchni betonu) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | 19 |
| 12 | Speed of construction (tempo budowy) | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 25 |
| 13 | Labor quality (jakość siły roboczej) | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | 13 |
| 14 | Labor productivity (wydajność pracy) | | | | | | ✓ | | | | | | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | ✓ | 6 |
| 15 | Weather conditions (warunki pogodowe) | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 11 |
| 16 | Site access (dostęp do placu budowy) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 14 |
| 17 | Size of site (wielkość placu budowy) | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | | | | | | ✓ | | | | | | | | | ✓ | 8 |
| 18 | Initial cost of the FWS (koszt początkowy systemu deskowań) | ✓ | | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 19 |
| 19 | Transportation cost of the FWS (koszt transportu systemu deskowań) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | 3 |
| 20 | Maintenance cost of the FWS (koszt utrzymania systemu deskowań) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 5 |
| 21 | Labor cost of the FWS (koszt robocizny systemu deskowań) | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 14 |
| 22 | Potential reuse of the FWS in other projects (możliwość ponownego wykorzystania systemu deskowań w innych projektach) | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ | 11 |
| 23 | Hoisting equipment (sprzęt dźwigowy) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | ✓ | 12 |
| 24 | In-house capability (własny potencjał wykonawcy) | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | 15 |
| 25 | FWS sustainability (zrównoważony charakter systemu deskowań) | | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | | | | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | 5 |
| 26 | FWS safety (bezpieczeństwo systemu deskowań) | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | 9 |
| 27 | FWS durability (trwałość systemu deskowań) | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | ✓ | 7 |
| 28 | FWS flexibility (elastyczność systemu deskowań) | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | ✓ | ✓ | ✓ | 9 |
| 29 | FWS compatibility (kompatybilność systemu deskowań) | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | | | | | | ✓ | 4 |
| 30 | FWS complexity (złożoność systemu deskowań) | | | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | | | ✓ | | | | | | | ✓ | 3 |
| 31 | FWS weight (ciężar systemu deskowań) | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | ✓ | 7 |
| 32 | FWS size (wielkość systemu deskowań) | | | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | | | | | | | | | | ✓ | 2 |
| 33 | FWF technical support (wsparcie techniczne dostawcy deskowań) | | | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | | | | | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | 5 |
| 34 | FWF logistical support (wsparcie logistyczne dostawcy deskowań) | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 16 |
| 35 | FWF BIM support (wsparcie BIM dostawcy deskowań) | | | | | | | | | | | | | | | | ✓ | | | | | | | | | | | ✓ | 2 |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie* (Terzioglu T. i in., 2021).

## 2.5. Model procesowy optymalnego, projektowo specyficznego doboru systemu deskowań

Punktem wyjścia modelu jest rosnąca presja kosztowa i czasowa na placach budowy oraz obserwacja, że prace deskowaniowe stanowią znaczący udział w kosztach stanu surowego. W praktyce dobór systemu odbywa się najczęściej intuicyjnie – na podstawie osobistych preferencji i doświadczeń z wcześniejszych projektów – z powodu braku czasu decydentów na etapie ofertowania i przygotowania robót oraz niskiej użyteczności istniejących narzędzi wspomagania decyzji, zbyt złożonych i wymagających specjalistycznej wiedzy. W odpowiedzi opracowano model procesowy doboru optymalnego systemu deskowań dla konkretnego projektu (Schalungs-Auswahl-Prozess-Modell, SAP-Modell) (Kersting M., 2012).

Model składa się z czterech zintegrowanych podmodeli. Podmodel geometryczny, po jakościowej preselekcji systemów, tworzy dopuszczalne kombinacje deskowań i na podstawie rzeczywistej geometrii projektu wyznacza teoretyczne zapotrzebowanie na roboczogodziny dla procesów elementarnych – w miejsce dotychczasowych uśrednionych wskaźników z zakończonych projektów. Podmodel zasobów ludzkich bada interakcje między pracownikami i brygadami; za pomocą zmodyfikowanej analizy CYCLONE (modelowania sieci operacji cyklicznych) wyznacza obsadę gwarantującą minimum czasu oczekiwania i podaje rzeczywiste zużycie roboczogodzin. Podmodel logistyczny dostraja zasoby, przede wszystkim obłożenie żurawia, do planu zatrudnienia za pomocą „pętli cybernetycznych”, analizując zarówno stan surowy, jak i jego nakładanie się na roboty wykończeniowe i montaż fasady. Podmodel kosztowy wyznacza wszystkie koszty istotne dla deskowań dla każdej kombinacji systemów, uwzględnia finansowe skutki zmiany czasu budowy (kary i premie), wykorzystuje algorytm genetyczny do dalszej optymalizacji, a ostatecznego wyboru dokonuje na podstawie ekonomicznej zasady minimum.

Model zweryfikowano testem wykonalności na fragmencie obejmującym stoły stropowe w biurowcu wysokościowym, ograniczonym do trzech procesów: rozszalowania z przekładaniem, szalowania z przekładaniem i szalowania. Obliczenia wykonano w arkuszu kalkulacyjnym realizującym analizę CYCLONE. Współczynniki czasu oczekiwania jednoznacznie wskazały, że pięcioosobowa brygada szalująca jest zbyt liczna (czas oczekiwania prawie dwukrotnie dłuższy niż czas pracy), a żuraw przy przekładaniu po rozszalowaniu również ma wysokie oczekiwanie; dopiero zmiana liczebności brygad zbilansowała przepływ. Pełnego przeliczenia całego modelu nie wykonano, ponieważ przewidziane oprogramowanie wspomagające nie zostało zaimplementowane.

Aparat metodyczny jest spójny z celem pracy: teoria grafów służy do odwzorowania geometrii kondygnacji i dróg przemieszczania elementów, teoria procesów i systemów porządkuje hierarchię procesów budowlanych, a kolejność przekładania stołów sformalizowano jako problem najkrótszej ścieżki (algorytmy Dijkstry i A*). Szczególnie wartościowe jest zastąpienie liniowego modelu wydajności grupowej – w którym podwojenie liczby pracowników podwaja wydajność – modelem uwzględniającym degresywną efektywność pracy, odzwierciedlającą zatłoczenie stanowiska, wzajemne blokowanie się procesów i oczekiwanie na wspólny zasób. Praktycznie użyteczne jest także rozróżnienie „prostego” i „kombinowanego” wykorzystania żurawia, pozwalające realistycznie modelować sytuację, w której montaż i demontaż deskowań konkuruje o dźwig z innymi robotami. W modelu kosztowym różnicuje się stawki robocizny zależnie od składu brygady, a uwzględnienie kar i premii terminowych pokazuje, że szybszy, lecz droższy w robociźnie wariant może okazać się tańszy w ujęciu całkowitym.

Najważniejszym oryginalnym wkładem pracy jest odejście od uśrednionych wskaźników nakładu na rzecz wyznaczania nakładów „od dołu” – z rzeczywistej geometrii kondygnacji i wynikających z niej dróg przemieszczania elementów. Zamiast pytać, ile średnio zajmuje metr kwadratowy stropu, model pyta, ile zajmie ten konkretny strop przy danym układzie stołów i kolejności przekładania. Nowość polega przy tym raczej na integracji znanych metod badań operacyjnych w nowej dziedzinie niż na opracowaniu nowych algorytmów.

Główne ograniczenia mają charakter dowodowy, a nie logiczny. Model nie został zwalidowany jako całość, a liczba zarejestrowanych pomiarów czasowych (nagrania wideo na budowach w Szwajcarii) jest niewystarczająca do wniosków statystycznie wiarygodnych; część czasów przyjęto na podstawie założeń eksperckich. Przyjęto uproszczenia wymagające weryfikacji (m.in. pominięcie współczynnika zbiorczej redukcji oraz roboczogodzin operatora żurawia), a analizowano wąski zestaw systemów: deskowania dźwigarowe i stoły stropowe dla stropów oraz deskowania ramowe i platformy samowznoszące dla ścian. Istnieje też napięcie między celem (proste narzędzie dla decydenta działającego pod presją czasu) a środkiem (złożony model wymagający implementacji komputerowej).

Uzyskane wartości nakładów należy traktować jako dowód wykonalności, a nie gotowe normy, a przed zastosowaniem w warunkach polskich wymagają one rekalibracji na własnych pomiarach.

Dla rozprawy praca stanowi punkt odniesienia o dużej wartości. Dostarcza gotowej dekompozycji cyklu deskowaniowego na procesy elementarne, pokazuje, jak ilościowo wiązać geometrię, drogi i czasy, a jej ograniczenia wyznaczają konkretne kierunki kontynuacji: empiryczne wyznaczenie krzywych efektywności pracy brygad montujących i demontujących deskowania w funkcji ich liczebności i kwalifikacji, weryfikację przyjętych współczynników na reprezentatywnej próbie, rozszerzenie analizy na inne systemy deskowań, walidację jakości rozwiązań algorytmu genetycznego oraz konfrontację kryterium kosztowego z metodami wielokryterialnymi uwzględniającymi bezpieczeństwo i jakość.

## 2.6. Analiza łańcucha dostaw przemysłowych systemów deskowań z wykorzystaniem mapowania strumienia wartości

Przedmiotem analizy jest łańcuch dostaw przemysłowych systemów deskowań w tureckim budownictwie żelbetowym, badany z perspektywy Lean Construction metodą mapowania strumienia wartości (Value Stream Mapping, VSM) (Terzioglu T. i in., 2022). Deskowanie jest obecne od początku do końca robót żelbetowych i stanowi główny czynnik kosztotwórczy: jego koszt może sięgać do 60% kosztu jednostkowego konstrukcji żelbetowej, do 15% całkowitego kosztu budowy oraz od jednej trzeciej do dwóch trzecich kosztu szkieletu budynku. Deskowania przemysłowe – modułowe, wielokrotnego użytku, wykonane ze stali, aluminium, drewna i tworzyw – redukują straty materiału i czasu w porównaniu z deskowaniami tradycyjnymi, a mogą być scalane poza budową i dostarczane w stanie gotowym do użycia.

Dotychczasowe badania nad deskowaniami koncentrowały się na trzech nurtach: szczupłym projektowaniu deskowań i ich wdrażaniu na budowie, kryteriach doboru i ocenie wykonalności oraz metodach decyzyjnych doboru. Pomijano natomiast wpływ podziału ról i odpowiedzialności między interesariuszami łańcucha dostaw – inżynierem (projektantem), generalnym wykonawcą i producentem deskowań (formwork fabricator, FWF) – na wyniki czasowe. Role te mogą być łączone na różne sposoby, co opisano pojęciem konfiguracji łańcucha dostaw (supply chain configuration, SCC). Na podstawie wywiadów z pięcioma praktykami o ponad 20-letnim doświadczeniu i wizyt terenowych, z iteracyjną weryfikacją przez praktyków, wyodrębniono trzy konfiguracje: SCC 1, w której wykonawca projektuje rozwiązanie deskowaniowe, wybiera warianty i określa ilości; SCC 2, w której zadania te przejmuje producent deskowań włączany wcześnie w fazę projektową; oraz SCC 3, w której projekt deskowania opracowuje inżynier równolegle z projektem konstrukcji. We wszystkich konfiguracjach producent odpowiada za plan, detal i prefabrykację systemu, inżynier za projekt konstrukcji, a wykonawca za przygotowanie frontu robót, scalanie i montaż.

Analizę ilościową przeprowadzono na trwającej budowie kubaturowej, na której zastosowano 500 m² przemysłowego deskowania ściennego, a trzy konfiguracje zrealizowano odrębnymi zamówieniami. Dla każdego działania – od projektowania konstrukcji, przez projektowanie, plan i detal deskowania, produkcję i dostawę, po przygotowanie frontu robót i scalanie – mierzono czas przejścia (lead time) i czas dodający wartość (value-added time) w dniach kalendarzowych, korzystając z firmowego oprogramowania rejestrującego czas pracy zespołu projektowego producenta lub z dziennika pomiarowego. Podbudowę teoretyczną stanowi filozofia Lean Thinking: rozróżnienie działań dodających wartość, wspierających wartość i niedodających wartości oraz siedem rodzajów marnotrawstwa (nadprodukcja, oczekiwanie, transport, niewłaściwe przetwarzanie, zbędne zapasy, zbędny ruch i wady). Porównanie wyników trzech konfiguracji przedstawiono w tabeli 2.3.

*Tabela 2.3. Synteza porównawcza wyników czasowych trzech konfiguracji łańcucha dostaw deskowań*

| Miara | SCC 1 | SCC 2 | SCC 3 |
|---|---|---|---|
| Podmiot projektujący deskowanie | wykonawca | producent deskowań | inżynier |
| Całkowity czas przejścia [dni] | 68 | 53 | 71 |
| Łączny czas dodający wartość [dni] | 35 | 38 | 39 |
| Czas niedodający wartości [dni] | 33 | 15 | 32 |

| Miara | SCC 1 | SCC 2 | SCC 3 |
|---|---|---|---|
| Czas stracony [%] | 49 | 28 | 45 |
| Opóźnienie montażu względem terminu zapotrzebowania budowy [dni] | 14 | 8 | 15 |
| Strata w planie i detalu deskowania [%] | 71 | 29 (łącznie z projektowaniem) | 50 |
| Strata w scalaniu deskowania [%] | 25 | 14 | 25 |

*Źródło: opracowanie własne.*

Konfiguracja SCC 2 osiągnęła najkrótszy całkowity czas przejścia i najniższy udział czasu straconego, zapewniając o 21% większą redukcję działań niedodających wartości niż SCC 1. Wczesne włączenie producenta deskowań zmniejszyło liczbę komponentów niestandardowych, skróciło czas planu, detalu i produkcji oraz ograniczyło poprawki przy scalaniu. W SCC 3 projekt deskowania wykonany przez inżyniera nie zawsze pasował do standardowych komponentów producenta, a przy braku udziału producenta ilości deskowań mogły być błędnie obliczone, co prowadziło do nadprodukcji. Wspólnymi przyczynami strat czasu we wszystkich konfiguracjach okazały się: brak koordynacji oraz przepływu informacji i danych między interesariuszami, brak ustandaryzowanego systemu wymiany formatów danych, brak ustandaryzowanych metod dla zamówień i komponentów niestandardowych, nieelastyczne systemy produkcyjne, nieodpowiednie zarządzanie zapasami oraz poprawki wynikające z błędów pracowników. SCC 2 okazała się też najczęściej stosowaną konfiguracją w Turcji, natomiast SCC 3 – najrzadziej, ponieważ tamtejsi inżynierowie specjalizują się głównie w projektowaniu konstrukcji.

Do mocnych stron pracy należą trafnie zidentyfikowana luka badawcza, rzetelna, iteracyjna procedura identyfikacji konfiguracji, przejrzysta operacjonalizacja pomiaru czasu z walidacją wyników przez interesariuszy, osadzenie analizy w rzeczywistym studium przypadku oraz powiązanie wyników z teorią Lean, w której wczesne zaangażowanie interesariuszy ogranicza ryzyko zmian w późniejszych fazach. Słabości wynikają przede wszystkim z oparcia wszystkich wyników liczbowych na jednym studium przypadku bez replikacji i analizy wrażliwości. Nie wyjaśniono, czy trzy zamówienia dotyczyły identycznych zakresów i czy realizowano je równolegle, czy sekwencyjnie, co utrudnia ocenę porównywalności pomiarów. Analiza obejmuje wyłącznie metrykę czasu, podczas gdy rekomendacja końcowa rozszerza przewagę SCC 2 na koszt, jakość i bezpieczeństwo. Brakuje charakterystyki obiektu i systemu deskowania, omówienia niepewności pomiaru, a wyniki odnoszą się do jednego rynku, co ogranicza ich przenoszalność, także na rynek polski.

Mimo tych zastrzeżeń wniosek główny jest istotny: konfiguracja z wczesnym zaangażowaniem producenta deskowań, współpracującego z inżynierem i wykonawcą w fazie projektowej, osiąga wyższą wydajność niż pozostałe, a wiedza ekspercka producenta jest kluczowym czynnikiem wydajności łańcucha dostaw deskowań przemysłowych. Straty można dalej ograniczać przez standaryzację przepływu informacji i rozwiązań dla elementów niestandardowych, dokładny transfer danych, elastyczne systemy produkcyjne, skuteczne zarządzanie zapasami i lepszą koordynację. Jako kierunki dalszych badań wskazano integrację modelowania informacji o budynku (BIM) z procesami łańcucha dostaw oraz analizę konfiguracji w budownictwie infrastrukturalnym i przemysłowym.

## 2.7. Wybór systemu deskowania z zastosowaniem metody „Choosing by Advantages” (CBA)

Przedmiotem analizy jest wybór systemu deskowania dla monolitycznej konstrukcji żelbetowej w warunkach, w których klasyczne numeryczne metody wspomagania decyzji zawodzą z powodu niedopasowania kontekstowego (Martinez E. i in., 2016). Deskowania mogą stanowić do 60% kosztu konstrukcji betonowej oraz wpływają na bezpieczeństwo, jakość i tempo budowy, a dobrze dobrany system wygładza przepływ produkcji, uwalniając front robót dla kolejnych branż. Mimo to wykonawcy dobierają je najczęściej na podstawie indywidualnego doświadczenia, bez spójnej metody decyzyjnej, co nie gwarantuje spójnych ani najlepszych rezultatów.

Badanie osadzono w studium przypadku osiedla mieszkań dostępnych cenowo w Durán w Ekwadorze, obejmującego ponad 10 000 monolitycznych, żelbetowych jednostek jedno- i wielorodzinnych, realizowanych przez 8 lat począwszy od 2014 r. Analizowany etap pierwszy to budowa 700 domów jednorodzinnych. Deweloper, po rozważeniu technologii murowej i prefabrykacji, zdecydował się na dostosowane do projektu modułowe deskowanie do betonu monolitycznego, a skala inwestycji i wysokość nakładów na zakup deskowań uczyniły z wyboru systemu decyzję kluczową dla powodzenia przedsięwzięcia.

W pierwszej części przejrzano numeryczne metody doboru deskowań opublikowane w latach 1990–2014 w trzech czasopismach naukowych. Omówiono sześć podejść: system ekspertowy (Hanna A. S. i in., 1992), hybrydę sieci neuronowych i AHP, probabilistyczne sieci neuronowe (Tam C. M. i in., 2005), modele logiki rozmytej oraz wzmacniane drzewa decyzyjne. Żadnej z tych metod nie dało się zastosować w analizowanym przypadku z trzech powodów: odmiennych warunków krajowych, w których je opracowano; zależności wiedzy eksperckiej od kontekstu lokalnego (wykonawcy brytyjscy uznawali za najważniejszy koszt względny, a francuscy – jakość betonu); oraz testowania większości metod w budownictwie wysokim, podczas gdy małe gabaryty jednostek mieszkalnych pozwalały betonować ściany i stropy jednocześnie. Budowa własnej bazy wiedzy byłaby czaso- i zasobochłonna, tym bardziej że dwa z czterech rozważanych systemów nigdy wcześniej nie były używane w regionie.

Zastosowano więc metodę Choosing by Advantages (CBA) – kolaboratywną metodę decyzyjną opartą na ważności przewag (Importance of Advantages, IoA), opracowaną na potrzeby amerykańskiej służby leśnej. W przeciwieństwie do podejść opartych na plusach i minusach lub ważonych czynnikach CBA identyfikuje przewagi każdego wariantu, atrybut po atrybucie, względem atrybutu najmniej preferowanego, a następnie wybiera wariant o największej sumie IoA. Wdrożenie objęło cztery spotkania w ciągu dwóch tygodni z udziałem sześcioosobowego zespołu (facylitator, kierownik projektu, kierownik robót, szef działu planowania oraz nadzorcy zakupów i budżetu). Pierwsze spotkanie poświęcono szkoleniu, gdyż czterech członków zespołu nie znało wcześniej metody; na drugim ustalono warianty (cztery systemy dostępne w regionie), czynniki i kryteria; na trzecim ważono przewagi – najważniejszej przypisano 100 punktów, a pozostałe oceniano w skali 0–100, co wymagało wielu iteracji dla osiągnięcia konsensusu; na czwartym przeprowadzono analizę kosztów. Wyniki końcowe zestawiono w tabeli 2.4.

*Tabela 2.4. □estawienie wyników końcowych zastosowania metody CBA*

| Wariant | Suma IoA | Miejsce wg IoA | Koszt [USD] | Koszt względny (System 4 = 100%) |
|---|---|---|---|---|
| System 1 | 340 | 3. | 528 585 | 105,7% |
| System 2 | 186 | 4. | 766 191 | 153,2% |
| System 3 | 452 | 1. | 535 526 | 107,1% |
| System 4 | 432 | 2. | 500 000 | 100% (odniesienie) |

*Źródło: opracowanie własne.*

Koszt nie został wliczony do sumy IoA, lecz zestawiony z nią, co umożliwiło jawną analizę krańcową. Przejście od systemu 4 do systemu 1 oznaczało dodatkowy koszt bez przyrostu IoA, natomiast przejście do systemu 3 kosztowało 35 526 USD i dawało 20 dodatkowych punktów IoA, wynikających z dłuższego szkolenia załóg na budowie i lepszej jakości wykończenia powierzchni betonu. Uznano, że nakład ten zwróci się krótkoterminowo dzięki lepszemu wykorzystaniu deskowania i ograniczeniu ręcznego zacierania betonu, i wybrano system 3. System 2, o najniższej sumie IoA i najwyższym koszcie, był wariantem najmniej preferowanym. Wywiady z uczestnikami ujawniły dwa społeczne aspekty metody: rolę retoryki (mniej doświadczeni uczestnicy przychylali się do argumentów bardziej doświadczonych kolegów) oraz autorytetu (upodmiotowienie budowało poczucie przynależności, ale niska pozycja w hierarchii mogła hamować aktywny udział).

Mocnymi stronami pracy są autentyczność wdrożenia w żywym procesie decyzyjnym o realnych konsekwencjach finansowych, pełna przejrzystość i audytowalność zapisu decyzji, poprawne metodycznie oddzielenie kosztu od pozostałych czynników, rzeczowe uzasadnienie odrzucenia metod numerycznych oraz poszerzenie analizy o wymiar społeczny. Słabości to oparcie tezy o wyższości CBA na jednym studium przypadku bez równoległego zastosowania metod numerycznych, brak analizy wrażliwości wag (o wyniku przesądza w praktyce jedna waga przy różnicy zaledwie 20 punktów),

anonimizacja systemów bez charakterystyki technicznej, niejednoznaczny sposób normalizacji kosztów względem liczby użyć, dyskusyjne uznanie dłuższego szkolenia za przewagę oraz brak walidacji ex post – nie przedstawiono danych z realizacji potwierdzających trafność decyzji. Warstwa jakościowa nie zawiera liczby wywiadów ani metody analizy transkrypcji, a facylitatorem był sam badacz.

Dla rozprawy metoda ma wartość ponadprzeciętną. Pięć z czternastu czynników dotyczy wprost procesów wykonawczych deskowań: szybkość montażu, szybkość rozszalowania, masa panelu warunkująca transport ręczny bez żurawia, płyta przejściowa przyspieszająca przestawienie deskowania na kolejną kondygnację oraz jakość powierzchni betonu determinująca zakres poprawek. Argumentacja wielu czynników prowadzona jest językiem czasu cyklu budowy i redukcji zapasów, co wiąże CBA ze środowiskiem Lean Construction, choć sama metoda jest narzędziem decyzyjnym, a nie narzędziem zarządzania przepływem. Przegląd metod uczących się dostarcza zaś argumentu negatywnego: przy braku danych o systemach nowych lub dostosowanych do projektu metody te zawodzą, co uzasadnia potrzebę systematycznego gromadzenia danych procesowych oraz podejść hybrydowych, w których modele numeryczne wspierają, a nie zastępują decyzję ekspercką.

## 2.8. Kompleksowe podejście do efektywnego planowania wykorzystania deskowań na placu budowy

Omawiana praca przedstawia spójną, dwuetapową metodę planowania robót betonowych w technologii monolitycznej, rozpoczynającą się od doboru systemu deskowania, a kończącą na harmonogramowaniu przedsięwzięcia z jednoczesną analizą dostępności i efektywności wykorzystania deskowań (Krawczyńska-Piechna A., 2016). Punktem wyjścia jest obserwacja ekonomiczna: deskowanie stanowi największy pojedynczy składnik kosztu ustroju nośnego budynku betonowego – przeciętnie 35–45% kosztu jednostkowego konstrukcji żelbetowej, a w obiektach inżynierskich nawet do 60%. Ponieważ elementy deskowań są zwykle wynajmowane, analiza ich wykorzystania na każdym etapie planowania jest najrozsądniejszą drogą do obniżenia kosztów najmu, a w konsekwencji całkowitych kosztów robót.

Pierwszym problemem jest dobór systemu deskowania, rozwiązywany metodami wielokryterialnego wspomagania decyzji (MCDA). Dziewięć kryteriów decyzyjnych ustalono na podstawie ustrukturyzowanej ankiety wśród wykonawców, wychodząc z założenia, że ważności kryteriów nie da się określić bez zbadania potrzeb lokalnych wykonawców, kultury budowlanej i warunków pracy. Wagi kryteriów wyznaczono metodą Rank Exponent; mieszczą się one w przedziale 0,076–0,134, a najwyższą wagę uzyskało kryterium atrakcyjnych warunków najmu deskowania. Sformułowano wymagania wobec metody obliczeniowej: nie powinna wymagać dodatkowych parametrów (np. progów weta), powinna wskazywać najlepszy wariant jednoznacznie wartością skalarną, porządkować warianty w ramach algorytmu i być łatwa obliczeniowo. Wymagania te spełniają metody TOPSIS i SAW oraz ich rozszerzenia rozmyte (FUZZY TOPSIS, F-SAW), przydatne, gdy planista nie potrafi precyzyjnie ocenić wariantów lub nie jest pewien wag. Metodę ELECTRE uznano za mniej odpowiednią ze względu na możliwość rozwiązań parami nieporównywalnych, a metodę AHP – ze względu na ograniczenia przy większej liczbie kryteriów. W studium przypadku, obejmującym pięć najczęściej używanych systemów i dziewięć kryteriów, wszystkie obliczenia wykonano w arkuszu Excel, co czyni metody dostępnymi dla przeciętnego kierownika budowy. Istotna jest także obserwacja, że na polskich budowach powszechnie używa się ponad 20 różnych systemów deskowań.

Kolejne kroki metody obejmują projekt deskowania, parametryczny model konstrukcji, przedmiar i oszacowanie pracochłonności każdego elementu, interaktywne planowanie robót betonowych z analizą efektywności wykorzystania deskowań oraz ocenę i akceptację lub odrzucenie rozwiązania. Wskazano przy tym luki automatycznego przedmiaru z modeli BIM: generowane konstrukcje deskowań bywają niekompletne (brak podpór, łączników wyrównujących), a na przecięciach elementów ilości bywają zawyżane. Dlatego rekomenduje się wykonywanie projektu deskowania w odrębnym oprogramowaniu dostawcy wybranego systemu.

Drugim problemem jest efektywne wykorzystanie deskowania w trakcie realizacji. Opracowano interaktywny symulator planowania oparty na trójwarstwowym modelu sieciowym. Pierwsza warstwa obejmuje elementy konstrukcyjne, dla których przewidziano cztery operacje technologiczne: roboty wstępne (przygotowanie i ułożenie zbrojenia oraz montaż deskowania), betonowanie, częściowe rozdeskowanie oraz całkowite rozdeskowanie, powiązane relacjami „zakończ–rozpocznij” ze zwłokami technologicznymi zależnymi od typu elementu i deskowania. Druga warstwa opisuje wymaganą

kolejność technologiczną, a trzecia – dynamiczne „lokalizacje” tworzone przez planistę z elementów wykonywanych razem. Symulator generuje sytuacje decyzyjne: utworzenie nowej lokalizacji, rozpoczęcie betonowania, rozdeskowanie częściowe lub całkowite oraz wynajęcie nowych lub zwrot wynajętych elementów deskowania. Miarą jakości harmonogramu jest wirtualny koszt niedostatecznego wykorzystania deskowania, powstający wtedy, gdy deskowanie jest dostępne na budowie, lecz nieużywane albo gdy powinno już zostać rozszalowane, a pozostaje na konstrukcji. Koszt dzienny i skumulowany jest wyświetlany na bieżąco, a planista może wycofać decyzję, jeśli jest on zbyt wysoki – im niższy w stosunku do kosztu całkowitego, tym lepsze rozwiązanie.

Działanie narzędzia zilustrowano porównaniem dwóch symulacji tej samej konstrukcji. W pierwszej skumulowany koszt najmu wyniósł 818 718 PLN, a koszt niedostatecznego wykorzystania 426 102 PLN; w drugiej odpowiednio 661 135 PLN i 343 208 PLN przy czasie realizacji 177 dni. Udział kosztu strat w koszcie całkowitym pozostał w obu przypadkach na poziomie ok. 52%, jednak w drugiej symulacji oba koszty były niższe, a roboty kończyły się wcześniej, co wskazuje na racjonalniejsze wykorzystanie deskowania. Autorka zaznacza, że algorytm nie dostarcza rozwiązania optymalnego, gdyż idea planowania interaktywnego na to nie pozwala, lecz wobec braku podobnych narzędzi na rynku może skutecznie wspierać inżynierów budowy.

Do mocnych stron pracy należą spięcie w jeden ciąg zagadnień zwykle rozpatrywanych oddzielnie (dobór, projekt i przedmiar, harmonogramowanie), empiryczne ugruntowanie kryteriów w realiach polskich wykonawców, świadomy wybór metod MCDA pod kątem użytkownika końcowego, oryginalna, pieniężna miara jakości harmonogramu wbudowana w pętlę decyzyjną, trafna krytyka automatycznego przedmiaru z BIM oraz uczciwość metodologiczna. Ograniczeniami są brak formalnego sposobu obliczania kluczowej miary, brak danych o ankiecie (liczebność i charakterystyka respondentów), brak analizy wrażliwości wag, ilustracyjny charakter eksperymentu (dwie symulacje jednej, nieopisanej konstrukcji), brak walidacji terenowej i testów z użytkownikami oraz ograniczenie miary do kosztu najmu, bez kosztów przestojów brygad i kosztów pośrednich.

Praca wyznacza kilka kierunków dalszych badań istotnych dla rozprawy: integrację analizy efektywności wykorzystania deskowań z narzędziami komercyjnymi, połączenie planowania interaktywnego z optymalizacją lub modelami uczącymi się, podział operacji deskowaniowych na czynności składowe (montaż, czyszczenie, smarowanie, rektyfikacja, demontaż) oraz walidację na rzeczywistych budowach. Szczególnie ważne jest to, że koszt niedostatecznego wykorzystania deskowania jest w istocie kwantyfikacją marnotrawstwa oczekiwania i nadmiaru zapasów w rozumieniu Lean Management, choć praca nie odwołuje się do tej ramy pojęciowej – jej nałożenie stanowi naturalne rozszerzenie metody.

## 2.9. Podsumowanie przeglądu wiedzy w zakresie zarządzania deskowaniami

**Zakres i logika przeglądu**

Rozdział 2 obejmuje osiem pozycji literaturowych (podrozdziały 2.1–2.8), które łącznie pokrywają cztery komplementarne nurty badań nad zarządzaniem deskowaniami: (1) optymalizację ilości i rotacji deskowań w czasie (Baskova R. i in., 2023; Krawczyńska-Piechna A., 2016), (2) analizę wydajności i pracochłonności robót szalunkowych (Moselhi O., Khan Z., 2010; Kersting M., 2012), (3) dobór systemu deskowania jako problem wielokryterialny (Rane N. L. i in., 2023; Terzioglu T. i in., 2021; Martinez E. i in., 2016) oraz (4) analizę łańcucha dostaw deskowań (Terzioglu T. i in., 2022).

Wspólnym mianownikiem wszystkich pozycji jest ekonomiczna waga problemu: koszt deskowań sięga – w zależności od źródła – od 10% do 60% kosztu konstrukcji żelbetowej (Terzioglu T. i in., 2021), przeciętnie 35–45% kosztu jednostkowego konstrukcji, a w obiektach inżynierskich do 60% (Krawczyńska-Piechna A., 2016), oraz do 15% całkowitego kosztu budowy (za Ko C.-H. i in., 2011, cyt. w: Terzioglu T. i in., 2022).

Przegląd ujawnia wyraźną asymetrię: literatura jest bogata w metody **doboru** deskowania (MCDM, systemy ekspertowe, sieci neuronowe, logika rozmyta, CBA), znacznie uboższa w metody **zarządzania przepływem** deskowania w trakcie realizacji i w łańcuchu dostaw – a to właśnie ten drugi obszar jest naturalnym polem dla podejścia LEAN i dla koncepcji Flexible Formwork Flow.

**Zbiorcza ocena pozycji literaturowych**

Tabela zestawia przedmiot i metodę, mocne oraz słabe strony każdej z ośmiu pozycji, a także status zastosowania LEAN Management – kluczowy dla konstatacji głównej przeglądu.

*Tabela 2.5. □estawienie porównawcze przeglądu wiedzy w zakresie zarządzania deskowaniami*

| Pozycja | Przedmiot i metoda | Mocne strony | Słabe strony i ograniczenia | Zastosowanie LEAN Management |
|---|---|---|---|---|
| **2.1. Baskova R. i in. (2023)**<br>Buildings<br>Słowacja | Dynamiczny model matematyczny rotacji deskowań + autorskie oprogramowanie DILEF; minimalizacja czasu nadmiarowego tsik; analiza wrażliwości i modelowanie parametryczne | Działające narzędzie (histogramy montażu/demontażu); powiązanie technologii betonu (przerwy technologiczne) z zapotrzebowaniem i kosztem najmu; ujęcie 3 filarów zrównoważonego rozwoju; wysoka aplikacyjność | Ograniczenie do rynku słowackiego; zależność od precyzyjnych danych o przyroście wytrzymałości betonu; brak analizy przestrzennej składowania; bariera kompetencyjna dla mniejszych firm | Brak. Minimalizacja tsik to de facto eliminacja marnotrawstwa oczekiwania i zapasów, ale bez ram pojęciowych LEAN, bez VSM i taktu |
| **2.2. Moselhi O. i Khan Z. (2010)**<br>Construction Innovation<br>Kanada | ANN (propagacja wsteczna, Ward net, Neuroshell 2); 221 zestawów danych z 10 mies. obserwacji 2 budów; 9 parametrów wejściowych; podział 60/20/20% | Wyłącznie twarde dane terenowe; $R^2$ = 0,8316, r = 0,9136, MSE = 0,007; krzywe wpływu parametrów (optimum 22°C; wilgotność >40% negatywna); dowód przydatności ANN na budowie | Tylko 2 place budowy; pominięcie czynników zarządczych i logistycznych; wyłącznie wydajność dzienna; ponad 12% predykcji z błędem >30% | Brak jakichkolwiek odwołań do LEAN |
| **2.3. Rane N. L. i in. (2023)**<br>IJETT<br>Indie (Mumbai) | Przegląd literatury + ankieta (53 profesjonalistów); redukcja 24 czynników do 5; porównanie 4 systemów (drewno, aluminium, jump, tunel) | Jasna struktura; matryca rekomendacji system–typ projektu; konkretny wynik: systemy aluminiowe o 9% tańsze długoterminowo; akcent na koszt cyklu życia | Brak uzasadnienia statystycznego redukcji czynników (ANOVA, testy istotności); niepewna reprezentatywność próby 53 osób; brak analizy wrażliwości i scenariuszy; nieprzenoszalne na Europę | Brak jakichkolwiek odwołań do LEAN |
| **2.4. Terzioglu T. i in. (2021)**<br>Buildings<br>Turcja | 35 kryteriów wyboru w 4 domenach; 6-stopniowa skala Likerta; walidacja ekspercka; Kruskal–Wallis i test U Manna–Whitneya (SPSS 28.0); α = 0,973, KMO = 0,942 | Najpełniejszy, statystycznie zwalidowany katalog kryteriów; odkrycie „mentalnych silosów": dostawca vs biuro techniczne – 23/35 kryteriów rozbieżnych (wykonawcy między sobą: 1–3); baza dla przyszłych systemów eksperckich i ML | Wyłącznie rynek turecki; brak operacyjnego modelu decyzyjnego (AHP/TOPSIS tylko jako kierunek); brak kryteriów ewolucji technologicznej (druk 3D, robotyka) | Pośrednio. LEAN construction tylko w warstwie implikacji (niwelowanie rozbieżności percepcyjnych w pre-construction planning) |
| **2.5. Kersting M. (2012)** | Model procesowy SAP: 4 podmodele (geometria–praca–logistyka–koszty); analiza CYCLONE; efektywność pracy | Wyznaczanie nakładów „od dołu" z rzeczywistej geometrii (zmiana paradygmatu); realistyczny, degresywny model wydajności | Brak pełnej walidacji (oprogramowanie niezaimplementowane, test tylko fragmentu na stołach stropowych); | Brak. Model (takt docelowy, synchronizacja zasobów, współczynniki oczekiwania) |

| Pozycja | Przedmiot i metoda | Mocne strony | Słabe strony i ograniczenia | Zastosowanie LEAN Management |
|---|---|---|---|---|
| ETH Zurich (rozprawa)<br>Szwajcaria | ωAK; Dijkstra/A*; algorytm genetyczny | brygad; integracja obłożenia żurawia z kosztami i karami terminowymi; gotowa dekompozycja cyklu deskowaniowego | niewystarczająca próba pomiarowa; wąski zestaw systemów; ψ = 1 bez weryfikacji; wyniki (≈ 0,11 h/m²) to dowód wykonalności, nie normy | kompatybilny z duchem LEAN, ale bez odwołań |
| **2.6. Terzioglu T. i in. (2022)**<br>JEPPM<br>Turcja | VSM łańcucha dostaw deskowań przemysłowych; 3 konfiguracje SCC; triangulacja (5 praktyków 20+ lat, wizyty terenowe); studium przypadku: 500 m² deskowania ściennego | Twarde wyniki: SCC 1: 68 dni / 49% straty; SCC 2: 53 dni / 28%; SCC 3: 71 dni / 45%; SCC 2 redukuje działania NVA o 21% vs SCC 1; katalog przyczyn strat; osadzenie w teorii LEAN; wczesne włączenie producenta deskowań jako czynnik wydajności | Pojedyncze studium przypadku bez replikacji; wyłącznie metryka czasu (wnioski o koszcie/jakości/bezpieczeństwie bez pokrycia); brak charakterystyki obiektu i doboru ekspertów; kontekst jednego rynku | **TAK – jedyne pełne zastosowanie.** VSM, działania VA/VS/NVA, katalog 7 typów marnotrawstwa, kwantyfikacja strat, wczesne zaangażowanie interesariuszy |
| **2.7. Martinez E. i in. (2016)**<br>ASCE CRC<br>Ekwador | Choosing by Advantages (CBA); przegląd 6 metod numerycznych (1990–2014); wdrożenie: 4 spotkania / 2 tygodnie / zespół 6 osób; wywiady półstrukturyzowane | Autentyczne wdrożenie o realnych konsekwencjach (700 domów; warianty 500 000–766 191 USD); pełna audytowalność decyzji (IoA: 452/432/340/186); jawna analiza krańcowa (35 526 USD za 20 pkt IoA); uczciwe uzasadnienie odrzucenia metod numerycznych; warstwa społeczna (retoryka, hierarchia) | Brak eksperymentu porównawczego z metodami numerycznymi; brak analizy wrażliwości wag przy różnicy 20 pkt; anonimizacja systemów; brak walidacji ex post; BHP szczątkowo | Pośrednio. CBA osadzona w środowisku LEAN construction, argumentacja językiem czasu cyklu i redukcji zapasów – ale sama CBA to metoda decyzyjna, nie narzędzie LEAN |
| **2.8. Krawczyńska-Piechna A. (2016)**<br>Procedia Engineering<br>Polska | Dwuetapowa metoda: dobór systemu (MCDA: 9 kryteriów z ankiety, wagi Rank Exponent 0,076–0,134; TOPSIS/SAW, FUZZY TOPSIS/F-SAW) + interaktywny symulator z miarą kosztu niedostatecznego wykorzystania deskowania | Jedyne ujęcie całego ciągu: dobór → projekt/przedmiar → harmonogram → ocena; kryteria z realiów polskich wykonawców (najwyższa waga: warunki najmu; ponad 20 systemów na polskich budowach); pieniężna miara efektywności w pętli decyzyjnej (818 718/426 102 PLN vs 661 135/343 208 PLN; 177 dni); trafna krytyka luk BIM/QTO; uczciwość metodologiczna | Brak wzoru kluczowej miary; brak danych o ankiecie (liczebność, dobór); brak analizy wrażliwości wag; eksperyment ilustracyjny (2 symulacje 1 konstrukcji); brak walidacji terenowej i testów z użytkownikami; miara tylko koszt najmu | Brak wprost. Koszt niedostatecznego wykorzystania to de facto kwantyfikacja marnotrawstwa (oczekiwanie, zapasy); nałożenie ram LEAN wskazane jako naturalne rozszerzenie |

*Źródło: opracowanie własne.*

**Pozycje węzłowe: Terzioglu i Krawczyńska-Piechna**

Na tle całego przeglądu dwie linie badawcze wyróżniają się jako fundament dalszych badań.

**Prace Terzioglu T. i in. (2021, 2022)** tworzą razem unikatową parę: statykę i dynamikę problemu. Praca z 2021 r. dostarcza najpełniejszego w literaturze, statystycznie zwalidowanego katalogu 35 kryteriów wyboru wraz z dowodem, że percepcja tych kryteriów zależy od roli interesariusza – z drastycznym pęknięciem na linii dostawca deskowań ↔ wykonawca (do 23/35 kryteriów rozbieżnych). Praca z 2022 r. przenosi problem z poziomu decyzji na poziom przepływu: pokazuje metodą VSM, że sama konfiguracja ról w łańcuchu dostaw – bez zmiany technologii – decyduje o różnicy między 28% a 49% czasu straconego, a wczesne włączenie producenta deskowań (SCC 2) jest konfiguracją najefektywniejszą. Obie prace razem diagnozują ten sam problem z dwóch stron: **niedopasowanie informacyjne między dostawcą a rynkiem wykonawczym jest głównym, mierzalnym źródłem marnotrawstwa w gospodarce deskowaniami.**

**Praca Krawczyńskiej-Piechny (2016)** - wsparta jej wcześniejszymi badaniami z lat 2015-2017, cytowanymi zarówno w tabeli kryteriów Terzioglu (trzykrotnie: 2015, 2016, 2017), jak i jako źródło wskaźnika kosztowego 60% w pracy VSM - ma dla dalszych badań wartość szczególną z trzech powodów. Po pierwsze, jest jedyną pozycją osadzoną w polskich realiach rynkowych, z kryteriami wyprowadzonymi z ankiety wśród polskich wykonawców i z najwyższą wagą przypisaną warunkom najmu – co wprost potwierdza, że w Polsce gospodarka deskowaniami jest przede wszystkim gospodarką **wynajmu**, a więc relacją wykonawca-ostawca. Po drugie, definiuje operacyjną, pieniężną miarę efektywności wykorzystania deskowania (koszt niedostatecznego wykorzystania), gotową do adaptacji jako funkcja celu w dalszych badaniach. Po trzecie, jej symulator wypełnia realną lukę rynkową (żadna aplikacja ERP/planistyczna nie wspiera analizy efektywności wykorzystania deskowań) - lecz zatrzymuje się na poziomie pojedynczej budowy, pozostawiając otwarty poziom floty deskowań u dostawcy.

**Rozprawa doktorska M. Kerstinga (2012) –** jedyna w przeglądzie praca doktorska poświęcona wprost doborowi systemu deskowań. Jej znaczenie dla niniejszej rozprawy jest przede wszystkim metodyczne. Model SAP wyznacza nakłady „od dołu", z rzeczywistej geometrii kondygnacji, zamiast z uśrednionych wskaźników. Analizuje interakcje brygad i żurawia za pomocą współczynników czasu oczekiwania, rozróżnia „proste" i „kombinowane" wykorzystanie żurawia oraz wykazuje, że liniowy model wydajności grupowej zawodzi przy zatłoczeniu stanowiska i oczekiwaniu na wspólny zasób. Tym samym jako pierwszy w przeglądzie ujmuje żuraw jako potencjalny zasób krytyczny cyklu. Ustalenie to potwierdza studium budowy INDUSTRIAL (podrozdział 5.1), a w rozprawie jest ono treścią tezy TS1 i składnika czasu logistycznego we wzorze przepływu FFF (podrozdział 5.5.1). Jednocześnie model w swojej pierwotnej postaci nie przystaje już do obecnych warunków rynkowych, i to z kilku powodów. Po pierwsze, jego podmodel kosztowy wybiera wariant o minimalnym koszcie przy założeniu względnie stabilnej relacji kosztu robocizny do kosztu deskowań. Tymczasem w Polsce w latach 2015–2025 przeciętne wynagrodzenie wzrosło o 128,3%, a ceny deskowań o ok. 3–4% rocznie, a relacja kosztu robocizny deskowaniowej do kosztu dzierżawy wzrosła z ok. 1,0 do ok. 1,6 (podrozdział 5.3). Po drugie, liczebność brygady jest w modelu zmienną decyzyjną, dobieraną tak, by zminimalizować oczekiwanie. W realiach, w których 76% wykonawców ocenia dostępność cieśli jako słabą lub krytyczną (podrozdział 4.2), liczba pracowników jest ograniczeniem, a nie parametrem do optymalizacji. Po trzecie, model optymalizuje pojedyncze przedsięwzięcie z perspektywy wykonawcy i nie uwzględnia faktu, że sprzęt pochodzi przeważnie z parku dzierżawnego, współdzielonego przez wiele budów (podrozdział 5.2). Pomija też to, że w części segmentów rynku wybór nie dotyczy już systemu deskowania, lecz technologii – monolitu albo prefabrykacji (podrozdział 5.3.4). Po czwarte, model ma charakter deterministycznego planowania przed realizacją. Oparto go na nielicznych pomiarach wideo z budów szwajcarskich, a przewidzianego oprogramowania nie zaimplementowano. Nie uwzględnia on ani danych pozyskiwanych w toku robót (czujniki parcia i dojrzałości betonu, cotygodniowe raporty wykorzystania – podrozdziały 5.2 i 5.4), ani technologii wspierających pracownika, które zmieniają parametry wydajności brygady (podrozdział 5.2.4). Model Kerstinga należy więc traktować jako cenne źródło aparatu metodycznego, którego kluczowe elementy – wyznaczanie nakładów z geometrii, bilansowanie brygad i żurawia oraz analiza czasu oczekiwania – rozprawa przejmuje. Jego założenia ekonomiczne i rama decyzyjna mają już jednak wartość głównie historyczną. Metoda FFF przenosi bowiem pytanie z doboru optymalnego systemu dla jednego projektu na zarządzanie przepływem deskowań między budowami i parkiem dostawcy w warunkach deficytu pracy.

**Konstatacja główna: LEAN Management nieobecny**

Najistotniejszym wnioskiem z przeglądu jest to, że **żadna z analizowanych pozycji – poza pracą Terzioglu T. i in. (2022) – nie zawiera jednoznacznego, metodycznego zastosowania LEAN Management.** Tylko analiza VSM łańcucha dostaw operuje pełnym aparatem LEAN: definicją wartości, rozróżnieniem działań VA/VS/NVA, katalogiem siedmiu typów marnotrawstwa i mapowaniem strumienia wartości z kwantyfikacją strat.

Pozostałe pozycje co najwyżej ocierają się o LEAN, nie stosując go:

- **Baskova R. i in. (2023)** minimalizują czas nadmiarowy $t_{sik}$ – co jest de facto eliminacją marnotrawstwa oczekiwania i nadmiaru zapasów – ale bez ram pojęciowych LEAN, bez VSM i bez taktu;
- **Krawczyńska-Piechna A. (2016)** kwantyfikuje pieniężnie marnotrawstwo (bezczynne i przetrzymywane deskowanie), lecz nie używa tej ramy pojęciowej; nałożenie perspektywy LEAN (VSM cyklu deskowaniowego, takt) jest wskazane wprost jako naturalne rozszerzenie jej metody;
- **Martinez E. i in. (2016)** osadzają CBA w środowisku LEAN construction i argumentują czynniki językiem czasu cyklu oraz redukcji zapasów, ale sama CBA jest metodą decyzyjną, nie narzędziem LEAN zarządzania przepływem;
- **Terzioglu T. i in. (2021)** przywołują LEAN construction jedynie w warstwie implikacji (niwelowanie rozbieżności percepcyjnych jako redukcja przepalania czasu w pre-construction planning);
- **Moselhi O. i Khan Z. (2010), Rane N. L. i in. (2023) oraz Kersting M. (2012)** nie odwołują się do LEAN w ogóle - choć model Kerstinga (takt docelowy, synchronizacja zasobów, współczynniki oczekiwania) jest z duchem LEAN w pełni kompatybilny.

Ta luka jest podwójna: (a) brak zastosowań narzędzi LEAN (VSM, takt, pull, 5S, standaryzacja) do procesów montażu, demontażu i rotacji deskowań na budowie oraz (b) brak rozszerzenia jedynego istniejącego zastosowania (VSM Terzioglu) poza pojedyncze studium przypadku i poza samą metrykę czasu.

**Implikacje dla koncepcji Flexible Formwork Flow**

Przegląd uzasadnia kierunek doktoratu w trzech punktach:

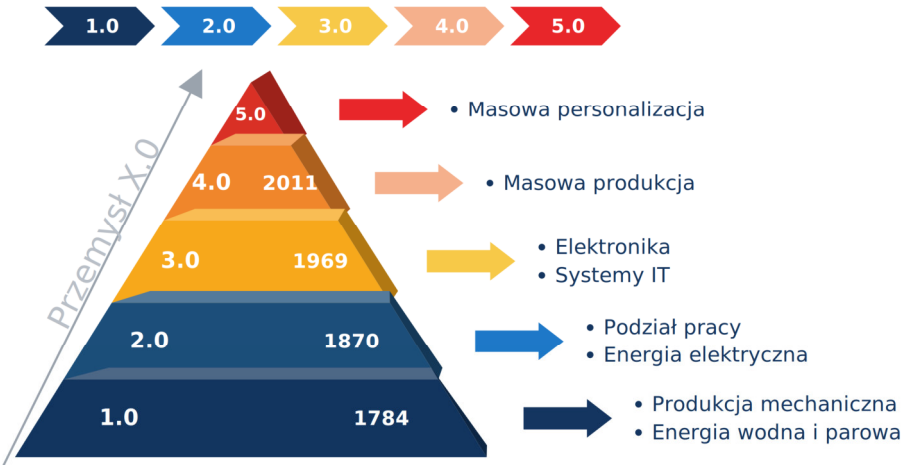
- żadna z pozycji nie podejmuje problemu **równowagi między maksymalizacją wykorzystania deskowań a dostępnością zasobu dla rynku** – czyli sedna koncepcji Flexible Formwork Flow, rozumianej jako synteza między rynkiem budowlanym a kluczowym dostawcą deskowań (PERI). Literatura optymalizuje albo pojedynczą budowę (Baskova, Krawczyńska-Piechna, Kersting), albo pojedynczy łańcuch dostaw jednego zamówienia (Terzioglu T. i in., 2022). Poziom floty dostawcy – gdzie wzrost wykorzystania u jednego wykonawcy zmniejsza dostępność dla pozostałych – pozostaje nieopisany. **To luka, którą doktorat może wypełnić: wykorzystanie rosnące do poziomu maksymalnego, ale zapewniającego jednocześnie dostępność dla rynku**.
- przegląd dostarcza gotowych elementów składowych syntezy: wynik SCC 2 Terzioglu (wczesne włączenie dostawcy jako najefektywniejsza konfiguracja - 28% straty wobec 45–49%) stanowi empiryczny argument za pogłębioną integracją wykonawca-PERI; „mentalne silosy" z pracy 2021 r. wskazują, co konkretnie w tej integracji trzeba naprawić (23/35 rozbieżnych kryteriów na styku dostawca-biuro techniczne); miara Krawczyńskiej-Piechny daje funkcję celu przeliczalną na pieniądze; katalog przyczyn strat z VSM (standaryzacja formatów danych, komponenty niestandardowe, zarządzanie zapasami) wyznacza listę usprawnień; model Kerstinga i dane Moselhiego–Khana dostarczają aparatu do wyznaczania nakładów i przewidywania wydajności.
- konstatacja o nieobecności LEAN wyznacza metodę: skoro jedyne rygorystyczne zastosowanie LEAN (VSM) dało najbardziej aplikacyjne wyniki całego przeglądu, naturalnym rdzeniem metodycznym Flexible Formwork Flow jest rozszerzenie podejścia LEAN z pojedynczego łańcucha dostaw na ciągły, wielobudowlany przepływ deskowań między dostawcą a rynkiem - z miarą niedostatecznego wykorzystania jako kwantyfikacją marnotrawstwa i z konfiguracją ról à la SCC 2 jako organizacyjnym punktem wyjścia.

# 3. Tezy rozprawy – zmiana paradygmatu zarządzania deskowaniami

Niniejszy rozdział formułuje tezy, które rozprawa stawia i weryfikuje, oraz osadza je w szerszym kontekście przemian budownictwa. Tezy te służą realizacji celu głównego rozprawy, którym jest **sformułowanie, empiryczne uzasadnienie i wdrożenie metody FFF – Flexible Formwork Flow, łączącej założenia LEAN Management, podejścia zwinnego (Agile) oraz Industry 5.0 i Construction 5.0 – jako narzędzia podnoszenia zgodności planu i realizacji robót deskowaniowych na budowie oraz niezawodności i wykorzystania parku dzierżawnego po stronie dostawcy, wraz z warstwą uczącą opartą na modelach prognostycznych skalibrowanych na danych operacyjnych i docelowo na sztucznych sieciach neuronowych**. Cel ten wyznacza zarazem układ rozdziału: każda z tez odpowiada na pytanie, dlaczego i w jakich warunkach metoda FFF pozwala przełożyć szybkość montażu systemów deskowań na efektywność budowy i przedsiębiorstwa. W podrozdziale 3.1 przedstawiono przejście od Construction 4.0, przez Construction 5.0, do kształtującej się koncepcji Industry 6.0 i jej budowlanego odpowiednika – nie jako przegląd technologii, lecz jako tło, na którym metoda FFF (Flexible Formwork Flow) i tezy rozprawy nabierają sensu. W podrozdziale 3.2 uzasadniono, dlaczego usprawnienie montażu i demontażu deskowań wymaga zmiany sposobu zarządzania – połączenia rozwiązywania problemów technicznych z rozwiązywaniem problemów zarządzania ludźmi. W podrozdziale 3.3 rozwinięto tezę główną i hipotezę operacyjną, sformułowane we wstępie, w trzy tezy szczegółowe wraz z miernikami i wskazaniem rozdziałów, w których są weryfikowane. Podrozdział 3.4 poświęcono sztucznym sieciom neuronowym jako warstwie uczącej metody FFF, dla której podrozdziały 5.1 i 5.2 dostarczają danych i pierwszych, skalibrowanych na nich modeli prognostycznych.

## 3.1. Od Construction 4.0 do Construction 6.0 – kontekst tez rozprawy i metody FFF

**Kolejne etapy rozwoju przemysłu.** Rozwój przemysłu opisuje się zwykle jako sekwencję rewolucji: od mechanizacji opartej na energii wodnej i parowej (Przemysł 1.0), przez podział pracy i elektryfikację (2.0), elektronikę i systemy informatyczne (3.0), systemy cyber-fizyczne i produkcję sterowaną danymi (4.0), po masową personalizację i współpracę człowieka z maszyną (5.0) – rys. 3.1. Budownictwo przejmowało te koncepcje z opóźnieniem, tworząc ich sektorowe odpowiedniki: Construction 4.0 i Construction 5.0. W literaturze ostatnich lat pojawia się już koncepcja Industry 6.0, zapowiadająca systemy wytwórcze o zdolnościach kognitywnych. Etapy te bywają nazywane paradygmatami – w znaczeniu, które do metodologii nauk wprowadził T. S. Kuhn, rozumiejąc przez paradygmat powszechnie uznane osiągnięcia, które przez pewien czas dostarczają wspólnocie badaczy modelowych problemów i modelowych rozwiązań (Kuhn T. S., 1962). W tym ujęciu o zmianie przesądza nie pojawienie się nowego narzędzia, lecz zmiana sposobu stawiania pytań: co uznaje się za problem wart rozwiązania, jakimi metodami się go rozwiązuje i jakimi miernikami ocenia wynik. Takie – a nie katalogowe – odczytanie przejścia od 4.0 do 6.0 przyjęto w niniejszym podrozdziale.




*Rys. 3.1. Ewolucja rewolucji przemysłowych – od Przemysłu 1.0 do Przemysłu 5.0. Źródło:* (Maddikunta P. K. R. i in., 2022)

Dla gospodarki deskowaniami każdy z etapów stawia inne pytanie wiodące. Construction 4.0 pyta, jaką technologię zastosować. Construction 5.0 pyta, jak technologia ma służyć ludziom, którzy deskowanie planują, kompletują, przeładowują, montują i rozdeskowują. Kształtujące się Construction 6.0 pyta, jak sprawić, by system zarządzania uczył się na własnych danych i przewidywał zapotrzebowanie, zanim powstanie wąskie gardło. Trzy tezy szczegółowe rozprawy (podrozdział 3.3) odpowiadają na te trzy pytania, a metoda FFF jest próbą udzielenia na nie odpowiedzi łącznej.

**Construction 4.0 – obietnica technologiczna.** Termin Construction 4.0 ukuto w 2016 r. w Niemczech jako budowlany odpowiednik Industry 4.0. Pojęcie nie ma dotąd jednolitej definicji; analiza bibliometryczna 260 artykułów wykazała wykładniczy przyrost publikacji i wskazała cztery technologie kluczowe dla jego obecnego rozumienia: druk 3D, big data, rzeczywistość wirtualną i Internet rzeczy (Forcael E. i in., 2020). Implikacje cyfryzacji i automatyzacji dla budownictwa zestawiano metodą triangulacji danych, formułując zarazem program badań dla tej branży (Oesterreich T. D., Teuteberg F., 2016). Zwracano też uwagę, że w niektórych obszarach – przede wszystkim za sprawą BIM – budownictwo nie tyle goni inne sektory, ile wyprzedza je w przyjmowaniu idei Industry 4.0 (Klinc R., Turk Ž., 2019).

Najpełniejszą syntezę Construction 4.0 przedstawił M. Casini, wychodząc od diagnozy stagnacji produktywności (Casini M., 2022). W ostatnich dwóch dekadach wydajność pracy w budownictwie rosła o ok. 1% rocznie, wobec 2,8% w gospodarce światowej i 3,6% w przetwórstwie przemysłowym (Barbosa F., Woetzel J., 2017); do 30% pracy firm budowlanych stanowią poprawki, a 35% czasu pracy specjalistów pochłaniają czynności nieprodukcyjne. Technologie składowe – pozyskiwanie danych (skanowanie, sieci czujników, IoT), cyfrowa informacja i analityka (BIM, cyfrowe bliźniaki, sztuczna inteligencja), automatyzacja procesów (robotyka, druk 3D, egzoszkielety) oraz zaawansowane materiały – osiągnęły poziom pozwalający przebudować cały łańcuch wartości. Kręgosłupem tej przebudowy jest BIM, rozumiany nie jako oprogramowanie, lecz jako proces współpracy na wspólnym modelu. Dla rozprawy istotne jest, że poziom szczegółowości LOD 400 wprost wymienia cieśli, wykonawców deskowań i dostawców żurawi wśród odbiorców modelu, a wymiary 4D i 5D pozwalają odwzorować cykl deskowaniowy – montaż, betonowanie, dojrzewanie i rozdeskowanie – wraz z kosztami robocizny i sprzętu (Casini M., 2022).

**Deskowanie w Construction 4.0.** Z perspektywy deskowań synteza Casiniego dostarcza argumentu podstawowego: deskowanie odpowiada za 35–54% kosztów wznoszenia konstrukcji betonowych (Casini M., 2022). Technologie tego etapu przejmują lub eliminują funkcje deskowania na różne sposoby. W druku 3D nadawanie kształtu i ochronę świeżego betonu przejmują właściwości reologiczne mieszanki. W technologii Smart Dynamic Casting deskowanie staje się elementem aktywnym, zmieniającym kształt w trakcie betonowania. Robotyczne cięcie form z EPS czyni z kolei opłacalnym wytwarzanie deskowań jednostkowych – dla biurowca Kirk Kapital HQ w Vejle wyprodukowano w ten sposób ok. 3800 unikalnych elementów. Trajektoria prowadzi zatem od deskowania pasywnego, przez aktywne, do jego eliminacji. Rozprawa świadomie sytuuje się w innym miejscu tej trajektorii: w gospodarce deskowaniami systemowymi, a więc technologią komercyjnie dojrzałą (TRL 9), której rezerwy tkwią nie w konstrukcji sprzętu, lecz w organizacji jego przepływu.

Z tego założenia wynikają trzy ścieżki usprawnień: optymalizacja organizacyjna i procesowa (LEAN), predykcja oparta na danych – docelowo z użyciem sztucznych sieci neuronowych – oraz, w dalszej perspektywie, wejście w technologie nowej generacji (deskowania robotyczne, drukowane, aktuatorowane). Rozprawa rozwija dwie pierwsze ścieżki, trzecią traktując jako tło oceny kierunków adaptacji oferty dostawcy (podrozdziały 5.3 i 5.4). Ponieważ wzrost produktywności nie jest efektem pojedynczej technologii, lecz wypadkową standaryzacji, automatyzacji, cyfryzacji informacji i metodologii zarządczej, przyjęto mierniki właściwe dla cyklu deskowaniowego, a nie dla samego sprzętu: czas cyklu i nakład pracy [rb-g/m²], wskaźnik PPC (Percent Plan Complete) dla zadań deskowaniowych, udział pracy poprawkowej, liczbę cykli użycia elementów (płyt, rygli, łączników) oraz udział nieproduktywnego czasu oczekiwania. Mierniki te wracają w tezach szczegółowych i w koncepcji zmiennych sieci neuronowej (podrozdział 3.4).

**Sztuczna inteligencja w Construction 4.0.** Wśród technologii tego etapu Casini wyróżnia uczenie maszynowe, a dla rozprawy kluczowe jest głębokie uczenie oparte na rozbudowanych sztucznych sieciach neuronowych – konwolucyjnych (CNN), rekurencyjnych (RNN), sieciach LSTM, generatywnych sieciach przeciwstawnych (GAN) i sieciach typu deep belief (Casini M., 2022). Głębokie uczenie redukuje błędy względem klasycznych metod uczenia maszynowego o 41% w klasyfikacji obrazów, 27% w rozpoznawaniu twarzy i 25% w rozpoznawaniu mowy, lecz wymaga znacznie większych zbiorów danych uczących. Obszary jego zastosowań w budownictwie obejmują wizję komputerową (m.in. wykrywanie środków ochrony indywidualnej i niebezpiecznych zachowań), predykcję kosztów i

przepływów pieniężnych projektu, klasyfikację odpadów budowlanych, wykrywanie defektów konstrukcji oraz monitorowanie postępu robót zintegrowane z modelem 4D BIM (Casini M., 2022). Dwa z nich przekładają się bezpośrednio na proces deskowaniowy. Predykcja – na prognozę czasu cyklu w zależności od typu konstrukcji, wielkości elementu, warunków pogodowych i doświadczenia brygady. Wizja komputerowa – na wykrywanie nieprawidłowości montażu (brak rygli, niewłaściwe rozstawy, niezachowana geometria) przed ułożeniem mieszanki betonowej. Analogiczny charakter ma predykcyjne utrzymanie obiektów oparte na danych z czujników IoT, które odpowiada koncepcji planowania zużycia elementów deskowania systemowego o ograniczonej liczbie cykli użycia. Uzupełnieniem jest cyfrowy bliźniak placu budowy, zasilany danymi z kamer, dronów, urządzeń ubieralnych i czujników. Technologie te dostarczają jednak danych – nie rozstrzygają, kto i jak ma na ich podstawie podejmować decyzje.

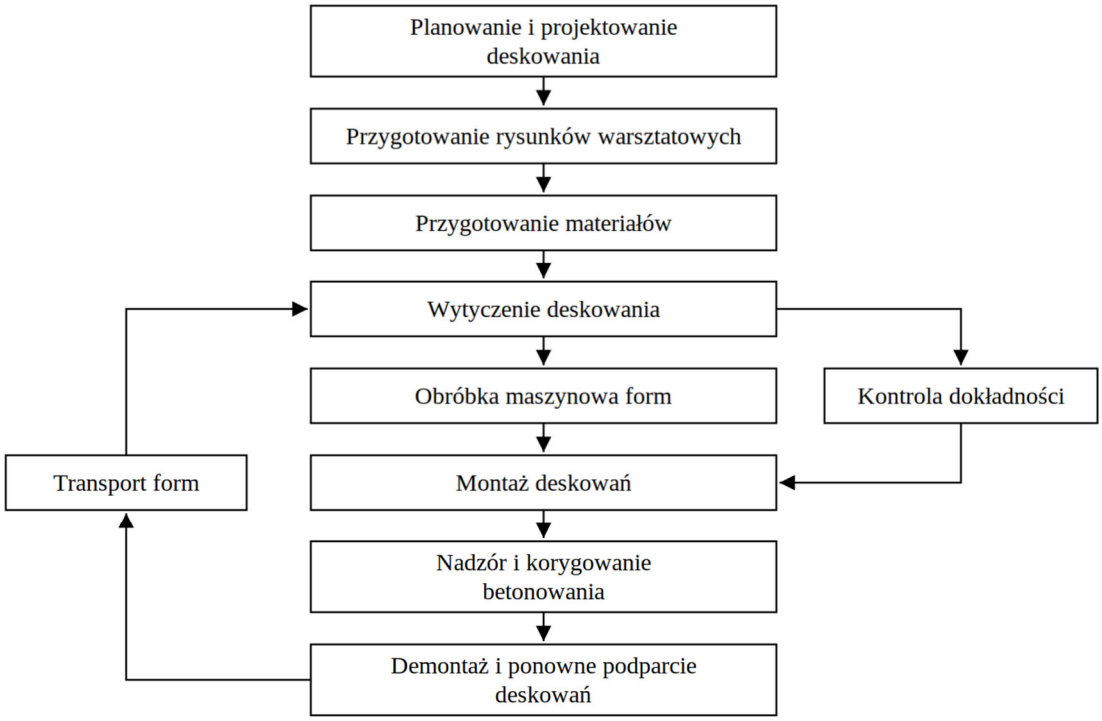
**Granice Construction 4.0.** Najważniejsze dla tez rozprawy jest jednak to, że synteza Construction 4.0 sama dostrzega granice technologii. Źródła niskiej produktywności są strukturalne: fragmentacja sektora (w UE 94% firm zatrudnia mniej niż 10 osób), nakłady na badania i rozwój poniżej 1% przychodów, wysoka rotacja siły roboczej i brak ciągłości wiedzy. Tylko około połowa wykonawców ma co najmniej umiarkowane rozeznanie w procesach LEAN Construction, a obietnice cyfryzacji mogą się spełnić jedynie przy równoległym inwestowaniu w kompetencje ludzi (Casini M., 2022). Podobny wniosek płynie z analizy relacji LEAN i BIM: spośród 56 zidentyfikowanych interakcji między funkcjonalnościami BIM a zasadami lean construction wszystkie poza czterema mają charakter konstruktywny, a połączenie obu nurtów może usprawnić procesy budowlane w stopniu większym niż każdy z nich stosowany osobno (Sacks R. i in., 2020). Technologia jest więc warunkiem koniecznym, lecz niewystarczającym: Construction 4.0 dostarcza danych i narzędzi, nie rozstrzyga natomiast, jak zorganizować z ich pomocą stabilny, wolny od marnotrawstwa przepływ na placu budowy i w łańcuchu dostaw. To pytanie podejmuje metodologia LEAN, stanowiąca ogniwo pośrednie między kolejnymi etapami.

**LEAN – przepływ jako ogniwo pośrednie.** Filozofia szczupłego wytwarzania wyrosła z systemu produkcji Toyoty i jego koncepcji eliminacji marnotrawstwa (muda) (Ohno T., 1988), a następnie została uogólniona w pięć zasad: wartość, strumień wartości, przepływ, ssanie i dążenie do doskonałości (Womack J. P., Jones D. T., 1996). Do budownictwa przeniósł ją L. Koskela, proponując, by produkcję budowlaną rozumieć nie wyłącznie jako ciąg przekształceń materiału, lecz jako przepływ, w którym obok czynności dodających wartość występują oczekiwanie, transport, kontrola i poprawki (Koskela L., 1992); ujęcie to rozwinął następnie w teorię produkcji łączącą perspektywy przekształcenia, przepływu i generowania wartości (Koskela L., 2000). Operacyjnym narzędziem tej teorii stał się system Last Planner, który zamiast wykrywania odchyleń po fakcie ma powodować realizację planów, a za miarę przyjmuje odsetek wykonanych zadań planu (PPC); jedno z pytań badawczych jego twórcy dotyczyło podniesienia niezawodności planów powyżej poziomu 70% PPC (Ballard H. G., 2000). Właśnie zgodność planu i realizacji jest miernikiem, w którym metoda FFF formułuje swój cel na poziomie budowy.

W inżynierii deskowań podejście LEAN zastosowali Ko i Kuo, wskazując, że skoro substytucja tradycyjnych form materiałami alternatywnymi rodzi nowe problemy, doskonalenie powinno koncentrować się na zmianach zarządczych: analizie stanu obecnego, mapowaniu strumienia wartości, systemie kanban i kulturze andon w małych brygadach (Ko C.-H., Kuo J.-D., 2015); w późniejszej pracy przenieśli zasady lean na fazę projektowania deskowań (Ko C.-H., Kuo J.-D., 2019). Z teorii ograniczeń wiadomo przy tym, że wydajność całego systemu wyznacza jego ogniwo krytyczne, a usprawnianie pozostałych ogniw nie poprawia wyniku całości (Goldratt E. M., Cox J., 1984) – na budowie ogniwem tym może być żuraw, a nie brygada czy ilość deskowania. Z kolei prawo Little'a wiąże średnią liczbę elementów w systemie z intensywnością ich napływu i średnim czasem przebywania (Little J. D. C., 1961), co pozwala przełożyć postulat przepływu na mierzalny cel wykorzystania parku dzierżawnego. Trzy te ujęcia – przepływ, ogniwo krytyczne i czas przebywania – stanowią teoretyczne zaplecze tez rozprawy. W warunkach polskich narzędzia LEAN zastosowano m.in. na budowie biurowca w Poznaniu – w procesach betonowania słupów, zarządzania placem składowym i zamawiania rusztowań (Nowotarski P. i in., 2016).

Rozważając wdrożenie LEAN w zarządzaniu deskowaniami, Ko i Kuo wskazują trzy zasadnicze elementy (Ko C.-H., Kuo J.-D., 2015). Pierwszym jest analiza stanu obecnego procesu deskowaniowego: opis przepływu operacyjnego – od planowania i projektowania, przez rysunki warsztatowe, przygotowanie materiałów, obróbkę form, tyczenie, montaż i kontrolę, po monitorowanie betonowania, naprawy, rozszalowanie i ponowne podparcie (rys. 3.2) – uzupełniony analizą ruchów roboczych i analizą przyczyn błędnego zastosowania deskowań. Drugim jest konstrukcja modelu

szczupłego wykonawstwa: kultura andon oparta na brygadach 2–4-osobowych, których liderzy komunikują się z brygadzistą przez krótkofalówki, system czterech kanbanów, zasady rozmieszczenia stref na placu i mapa strumienia wartości stanu przyszłego. Trzecim jest weryfikacja na rzeczywistej budowie, z pomiarem pracochłonności w roboczogodzinach i wydajności liczonej jako iloraz ilości deskowania i liczby pracowników. Podejście to jest najbliższym literaturowym poprzednikiem metody FFF, lecz – podobnie jak pozostałe prace z zakresu zarządzania deskowaniami (rozdział 2) – ogranicza się do jednej budowy i nie obejmuje poziomu dostawcy.




*Rys. 3.2. Schemat operacyjny procesu deskowania. Źródło: opracowanie własne na podstawie (Ko C.-H., Kuo J.-D., 2015).*

**Construction 5.0 – człowiek w centrum.** Koncepcja Industry 5.0, sformułowana przez Komisję Europejską w 2021 r., opiera się na trzech filarach: orientacji na człowieka, zrównoważeniu i odporności. Stawia dobrostan pracownika w centrum procesu produkcyjnego i nie jest chronologicznym następcą Industry 4.0, lecz jego korektą (Breque M. i in., 2021). W literaturze Industry 4.0 określa się jako koncepcję napędzaną technologią, a Industry 5.0 – jako napędzaną wartościami (Xu X. i in., 2021); przegląd systematyczny opisuje to przejście jako przesunięcie od ujęcia technocentrycznego do wartościocentrycznego (Enang E. i in., 2023), a integrację odporności, zrównoważenia i orientacji na człowieka proponuje się ujmować w kategoriach żywotności (viability) systemu (Ivanov D., 2023). Wcześniej S. Nahavandi przedstawił Industry 5.0 jako układ, w którym roboty są współpracownikami, a nie konkurentami człowieka, argumentując, że stworzy on więcej miejsc pracy, niż zlikwiduje (Nahavandi S., 2019).

W budownictwie ujęcie to przyjęło nazwę Construction 5.0. M. Marinelli, śledząc upowszechnianie się wizji cyfryzacji w budownictwie, wskazuje współpracę człowieka z robotem jako rdzeń tej koncepcji (Marinelli M., 2023), a w odrębnej pracy – analogie i synergie między taką współpracą a eliminacją trzech rodzajów strat lean: czynności niedodających wartości (muda), nierównomierności (mura) i przeciążenia ludzi (muri) w budownictwie uprzemysłowionym (Marinelli M., 2022). Numer specjalny czasopisma ITcon poświęcony Construction 5.0 grupuje prace w trzy nurty: stosowaną sztuczną inteligencję i przetwarzanie wizyjne, cyfrową infrastrukturę informacyjną i zaufanie oraz zorientowaną na człowieka automatyzację i robotykę; ten ostatni obejmuje m.in. pracę o etycznych i społecznych ryzykach egzoszkieletów (Zou G., 2026). Construction 5.0 pozostaje jednak koncepcją wschodzącą: liczba udokumentowanych wdrożeń jest niewielka, a granica oddzielająca ją od Construction 4.0 nie została ostro wyznaczona – poza nadrzędnym akcentem na człowieka i odpowiedzialność etyczno-społeczną (Zou G., 2026).

Construction 5.0 definiuje się jako nowe podejście do projektowania, realizacji i zarządzania obiektami, wymagające płynnej współpracy i wymiany danych między ludźmi, robotami i zestawem nowo powstających technologii – cyfrowymi bliźniakami, BIM, sztuczną inteligencją, wytwarzaniem przyrostowym i teledetekcją (Zou G., 2026). Istotą nie jest zatem sama obecność technologii, lecz sposób ich współdziałania z człowiekiem. Z tej definicji wynika sześć cech konstytutywnych: orientacja na człowieka (technologia ma mu służyć, a nie go zastępować), wymiar etyczny i społeczny, dobrostan siły roboczej, interdyscyplinarność, powiązanie teorii z praktyką przez studia przypadku i wdrożenia przemysłowe oraz zrównoważoność i odporność. Określenia „Construction 5.0" i „technologie Industry 5.0" bywają przy tym używane zamiennie, co wskazuje, że budowlana koncepcja jest sektorowym zastosowaniem szerszej idei Industry 5.0. Nacisk na przekładanie ram pojęciowych na zweryfikowane wdrożenia sprawia, że rozprawa o charakterze wdrożeniowym, dokumentująca rozwiązania funkcjonujące w przedsiębiorstwie, stanowi wkład w empiryczną bazę tej koncepcji.

Dla gospodarki deskowaniami wymiar ludzki ma treść bardzo konkretną. Cykl deskowaniowy łączy pracę na wysokości, manipulowanie ciężkimi elementami stalowymi i aluminiowymi oraz powtarzalne czynności w niewygodnych pozycjach – a więc profil zagrożeń, który Casini ilustruje m.in. tym, że 54% pracowników budownictwa zgłasza zaburzenia mięśniowo-szkieletowe kończyn górnych (Casini M., 2022). Przedstawiciele branży budowlanej, pytani o egzoszkielety, uznali je za przydatne przy zadaniach powtarzalnych, przenoszeniu ciężkich materiałów i pracy nad głową, wskazując zarazem bariery: obawy o zdrowie, bezpieczeństwo, użyteczność i zwrot z inwestycji (Kim S. i in., 2019). Rozprawa odpowiada na te bariery danymi: w artykule źródłowym metody FFF odnotowano wzrost wydajności o 47% po ponad dwóch latach użytkowania egzoszkieletów w Centrum Logistycznym Kąty Wrocławskie PERI Polska (Majkowski Ł., Pasławski J., 2023), a analiza szeregów z lat 2017–2026 (podrozdział 5.2.4) wyznaczyła ten efekt na 45% i oceniła go łącznie z efektem dźwigu obsługi ręcznej. Filar zrównoważenia ma z kolei w deskowaniach wymiar gospodarki o obiegu zamkniętym: elementy deskowań systemowych są wielokrotnego użycia (typowo 50–500 cykli), podczas gdy klasyczne deskowania drewniane – zwykle 1–5 cykli. Każdy dzień, w którym komplet nie rotuje, jest więc stratą nie tylko ekonomiczną. Construction 5.0 przesuwa pytanie z „jaką technologię wdrożyć" na „komu i w jakiej pracy technologia ma pomóc" – i to jest punkt wyjścia tezy szczegółowej TS2.

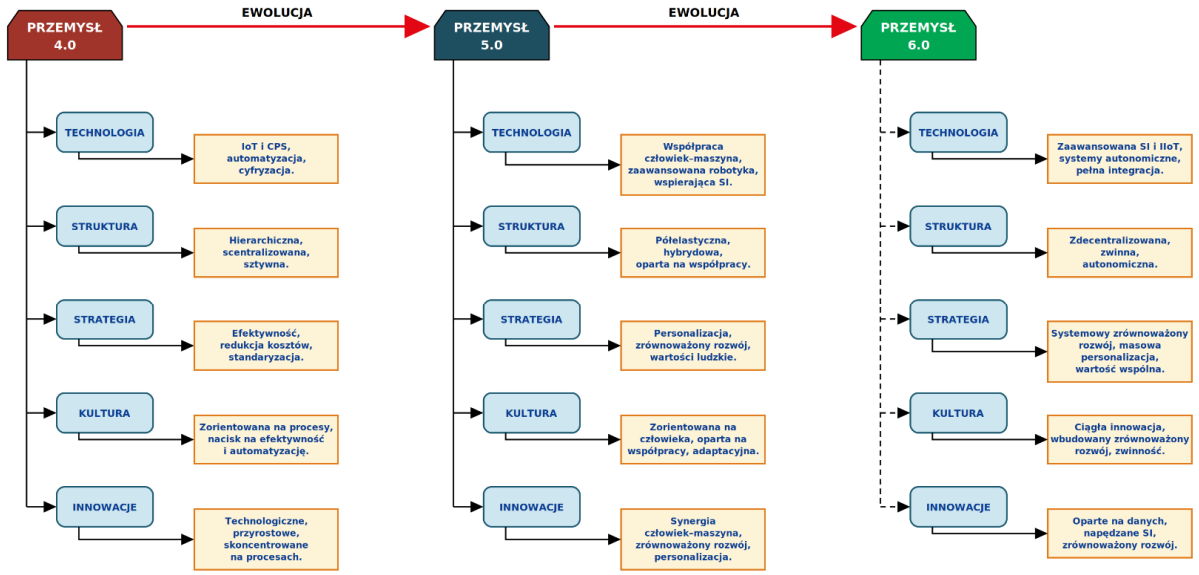
**Industry 6.0 i kształtujące się Construction 6.0 – system uczący się.** Kolejny etap opisywany jest jako produkcja kognitywna (cognitive manufacturing), w której systemy oparte na sztucznej inteligencji i rozproszonych architekturach sterowania przekształcają wiedzę w autonomiczne, adaptacyjne zdolności decyzyjne (Fernández-Miguel A., 2025). Industry 6.0 nie zastępuje Industry 5.0, lecz ją rozszerza: jeżeli etap 4.0 gromadzi i przetwarza dane, a 5.0 przekształca informacje w wiedzę we współpracy człowieka z maszyną, to 6.0 ma przekształcać wiedzę w zdolność „myślenia" systemu – decyzje podejmowane autonomicznie i w sposób zdecentralizowany (rys. 3.3). Wcześniejsze prace ujmowały ten etap w postaci mapy drogowej, zakładając, że około 2050 r. technologia osiągnie pełną autonomię, i proponując ścieżkę prowadzącą przez dwie fazy Industry 5.0 do szóstej rewolucji (Duggal A. S. i in., 2022). Pojawiły się też pierwsze demonstratory, w których generatywna sztuczna inteligencja i rój heterogenicznych robotów przeprowadzają projektowanie, wytwarzanie, logistykę i montaż produktu na podstawie opisu w języku naturalnym (Lykov A. i in., 2024).

Uzasadniając potrzebę dalszych prac, autorzy ram teoretycznych Industry 6.0 wskazują trzy luki (Fernández-Miguel A., 2025). Po pierwsze, istniejące modele traktują wymiar technologiczny, organizacyjny, strategiczny i kulturowy jako zmienne niezależne, a nie jako cyklicznie współzależne konstrukty. Po drugie, ewolucja sztucznej inteligencji i systemów cyber-fizycznych od „procesorów danych" (4.0) i „enablerów wiedzy" (5.0) ku zdolnościom kognitywnym pozostaje teoretycznie niedorozwinięta. Po trzecie, integracja masowej personalizacji i zrównoważonego rozwoju jako wzajemnie wzmacniających się celów nie ma podstawy teoretycznej; brakuje też badań nad długofalowymi skutkami organizacyjnymi i kulturowymi wdrażania środowisk zero-defektowych opartych na sztucznej inteligencji. Wynikające z tego pytania – jakie struktury organizacyjne najlepiej wspierają zdecentralizowane podejmowanie decyzji i jak łączyć zaawansowane technologie z kulturą organizacji – są w gospodarce deskowaniami pytaniami o role, odpowiedzialności i przepływ informacji między dostawcą a budową. Cechy wyróżniające trzy kolejne etapy zestawiono w tabeli 3.1, a model graficzny przejścia między nimi przedstawiono na rys. 3.3.

*Tabela 3.1. Cechy wyróżniające kolejne etapy rozwoju przemysłu – od Przemysłu 4.0 do Przemysłu 6.0*

| Wymiar | Przemysł 4.0 | Przemysł 5.0 | Przemysł 6.0 |
|---|---|---|---|
| Podstawa epistemologiczna | Gromadzenie i przetwarzanie danych | Przekształcanie informacji w wiedzę | Przekształcanie wiedzy w kognitywną „myśl” |
| Główny obszar zainteresowania | Efektywność operacyjna dzięki cyfryzacji | Wiedza oparta na współpracy człowieka z maszyną | Kognitywne systemy wytwórcze |
| Podejmowanie decyzji | Oparte na danych, z nadzorem człowieka | Współpraca człowieka z maszyną oparta na wiedzy | Autonomiczne kognitywne podejmowanie decyzji |
| Struktura organizacyjna | Tradycyjne hierarchie z narzędziami cyfrowymi | Wzmocniona współpraca w ramach istniejących struktur | Zdecentralizowane architektury wspierane kognitywnie |
| Orientacja strategiczna | Redukcja kosztów i efektywność | Dostosowanie ze świadomością zrównoważonego rozwoju | Integracja kognitywnej masowej personalizacji ze zrównoważonym rozwojem |
| Podstawa kulturowa | Kultura optymalizacji procesów | Wartości oparte na współpracy zorientowanej na człowieka | Ciągła transformacja kognitywna |
| Wzorzec innowacji | Ulepszenia napędzane technologią | Innowacje oparte na wspólnej wiedzy | Autonomiczne kognitywne pętle innowacji |
| Nowość teoretyczna | Integracja CPS i IoT | Orientacja na człowieka w pracy opartej na wiedzy | Cykliczne kognitywne sprzężenie zwrotne pomiędzy wszystkimi konstruktami |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie* (Fernández-Miguel A., 2025).




*Rys. 3.3. Model graficzny przejścia od Przemysłu 4.0 do Przemysłu 6.0. Źródło: opracowanie własne.*

Pojęcie Construction 6.0 nie ma jeszcze ugruntowanej pozycji w literaturze przedmiotu; w rozprawie używa się go roboczo, jako budowlanego odpowiednika Industry 6.0. Najbliższym mu, już opisanym ujęciem jest budowa oparta na cyfrowym bliźniaku (Digital Twin Construction), którą należy rozumieć jako całościowy sposób prowadzenia budowy, nastawiony na zamykanie pętli sterowania produkcją, a nie jako rozszerzenie narzędzi BIM o technologie monitoringu (Sacks R. i in., 2020). Dla gospodarki deskowaniami ma to dwie konsekwencje. Po pierwsze, przejście od danych (4.0), przez wiedzę (5.0), do uczenia się systemu (6.0) wyznacza kierunek rozwoju modeli prognostycznych – od jawnych

zależności skalibrowanych na danych do sztucznych sieci neuronowych (podrozdział 3.4). Po drugie, postulat zdecentralizowanych decyzji ma odpowiednik w ustaleniu podrozdziału 4.3: elastyczność przepływu deskowań zależy od przypisania decyzji i widoczności rzeczywistego statusu elementów w punktach styku między działami dostawcy. Industry 6.0, podobnie jak Construction 5.0, pozostaje przy tym ramą wschodzącą o nieustalonych granicach definicyjnych, co w rozprawie uwzględniono, traktując ją jako kierunek, a nie jako gotowy wzorzec.

**Przejście 4.0 → 6.0 w gospodarce deskowaniami.** Zestawienie trzech etapów (tabela 3.2) pokazuje stopniowe przesuwanie punktu ciężkości: od narzędzia (4.0), przez człowieka posługującego się narzędziem (5.0), do systemu, który uczy się na własnych danych (6.0). Żaden z etapów nie unieważnia poprzedniego. Egzoszkielet czy czujnik parcia mieszanki betonowej są technologiami 4.0, lecz dopiero ujęcie 5.0 nadaje im cel – odciążenie i wsparcie człowieka – a ujęcie 6.0 czyni z generowanych przez nie danych materiał do uczenia. Gospodarka deskowaniami jest obszarem, w którym przesunięcie to można prześledzić w sposób wymierny, ponieważ deskowanie systemowe jest technologią dojrzałą, a jego dostawca rejestruje każdy ruch materiału na każdej obsługiwanej budowie.

*Tabela 3.2. Przejście od Construction 4.0 do Construction 6.0 w gospodarce deskowaniami – odniesienie do tez rozprawy*

| Wymiar | Construction 4.0 | Construction 5.0 | Construction 6.0 (kierunek) |
|---|---|---|---|
| Punkt ciężkości | Narzędzie i dane | Człowiek posługujący się narzędziem | System uczący się na własnych danych |
| Pytanie wiodące w gospodarce deskowaniami | Jaki system i jakie narzędzie cyfrowe zastosować? | Jak odciążyć i wesprzeć ludzi, którzy planują, przeładowują, montują i rozdeskowują? | Jak przewidzieć zapotrzebowanie na deskowania, ludzi i zasoby logistyczne, zanim powstanie wąskie gardło? |
| Rola danych | Gromadzenie i przetwarzanie | Przekształcanie informacji w wiedzę we współpracy człowieka z maszyną | Przekształcanie wiedzy w autonomiczne, zdecentralizowane decyzje |
| Przykładowe narzędzia | BIM (LOD 400, 4D/5D), czujniki IoT, druk 3D, robotyka | Egzoszkielety, dźwig obsługi ręcznej, szkolenia, LEAN i Agile | Modele prognostyczne, SSN (MLP, LSTM), cyfrowy bliźniak z zamkniętą pętlą sterowania, symulacja |
| Miernik | Dojrzałość i dostępność technologii | Wydajność, rotacja i dostępność pracowników, obciążenie fizyczne | Trafność prognozy, zgodność planu z realizacją, wykorzystanie materiałowe parku |
| Ograniczenie | Nie rozstrzyga organizacji przepływu; wiele technologii w fazie pilotażowej | Koncepcja wschodząca, niewiele udokumentowanych wdrożeń | Koncepcja kształtująca się; wymaga długich, wiarygodnych szeregów danych |
| Odniesienie do tez i rozdziałów | TS3 – widoczność statusu elementów i przepływ zamiast wolumenu (podrozdz. 4.3 i 5.2) | TS2 – organizacja i wsparcie pracy ludzi (podrozdz. 4.1, 4.2, 5.2.4, 5.3, 5.4) | TS1 – synchronizacja trzech potencjałów i uczenie się systemu (podrozdz. 3.4, 5.1 i 5.2) |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie (Casini M., 2022),* (Breque M. i in., 2021)*,* (Zou G., 2026) *i* (Fernández-Miguel A., 2025)*.*

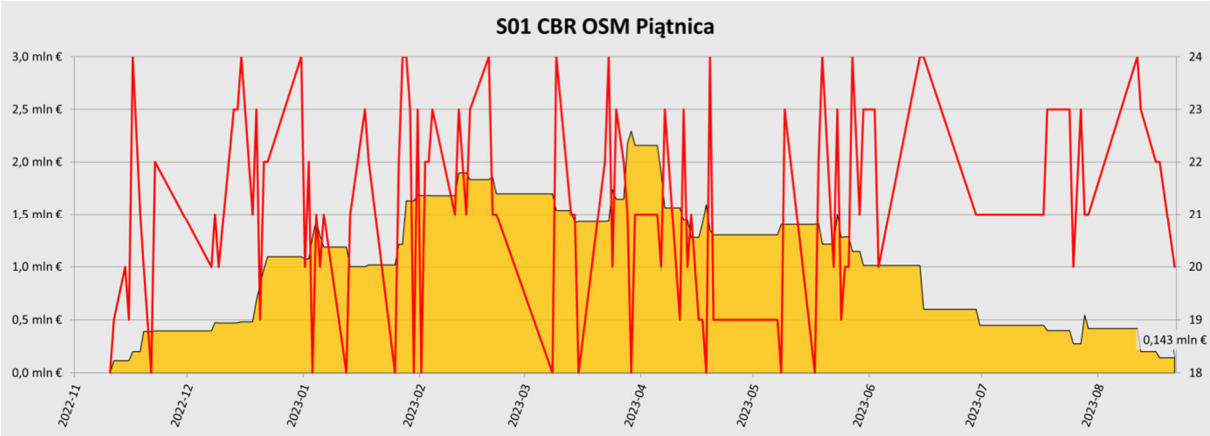
**Metoda FFF jako pomost między etapami.** Construction 4.0 dostarcza warstwy technologicznej, Construction 5.0 – ludzkiej, a Industry 6.0 zapowiada warstwę kognitywną; żadna z nich nie oferuje jednak narzędzi operacyjnych dla przepływu deskowań. Powiązanie tych warstw z metodologią LEAN na przykładzie gospodarki deskowaniami podejmuje metoda FFF – Flexible Formwork Flow, zarysowana po raz pierwszy w artykule (Majkowski Ł., Pasławski J., 2023). Jej celem jest osiągnięcie zgodności planu i realizacji w zarządzaniu deskowaniami na dwóch poziomach (Pasławski J., 2008b) – dostawcy deskowań i ich użytkownika na budowie – w procesach montażu deskowań, montażu zbrojenia, betonowania, pielęgnacji i rozdeskowania. Metoda łączy założenia Industry 5.0, Lean i Agile

(Nowotarski P., 2016) w sześć strategii składowych: wsparcie pracowników przez urządzenia (egzoszkielet), elastyczność i adaptację do zmiennych warunków (np. modyfikację mieszanki betonowej dla utrzymania rotacji deskowań przy zmianie temperatury otoczenia) (Karłowski A., Pasławski J., 2015) – podejście elastyczne z wariantami realizacji (Pasławski J., 2008a), cyfryzację i analizę danych w czasie rzeczywistym, szkolenia i rozwój pracowników, zrównoważony rozwój oraz minimalizację marnotrawstwa. Korzyści dotyczą obu stron: dostawcy – w postaci niezawodności funkcjonowania magazynu deskowań – oraz wykonawcy – w postaci większej zgodności planowania i realizacji procesów.

Rdzeniem zarządczym metody jest katalog form marnotrawstwa w procesie budowlanym – zbędne zapasy, przestój, nadmierny transport, niepoprawna praca, nadprodukcja oraz uszkodzenia i wady – stanowiący adaptację klasycznych typów muda do robót deskowaniowych i wykorzystywany w rozprawie jako rama identyfikacji strat. Metoda uzasadnia też kierunek badań dwoma ustaleniami ilościowymi: pracochłonność montażu i demontażu może różnić się między systemami o 40–50%, a robocizna przy montażu i demontażu generuje ok. 50% nakładów na wykonanie konstrukcji monolitycznej. To w organizacji pracy przy deskowaniach, a nie wyłącznie w samym sprzęcie, tkwi zatem największy potencjał poprawy. W artykule zwrócono ponadto uwagę, że – wbrew typowym opiniom – o sukcesie mogą decydować czynniki związane z zarządzaniem pracownikami; spostrzeżenie to rozwinięto w podrozdziale 3.2.

Metoda FFF osadza gospodarkę deskowaniami w koncepcji Industry 5.0, podkreślając – za dokumentami UE – że nie jest ona chronologiczną kontynuacją Industry 4.0, lecz jej korektą, ukierunkowaną na człowieka, odporność i zrównoważony rozwój. W artykule źródłowym scharakteryzowano dziesięć cech Przemysłu 5.0: produkcję zorientowaną na człowieka, personalizację, zrównoważoną produkcję, coboty, decentralizację, lepsze doświadczenie pracownika, przekwalifikowanie i podnoszenie kwalifikacji, etyczną sztuczną inteligencję, integrację świata wirtualnego i fizycznego (AR/VR) oraz produkcję adaptacyjną (Majkowski Ł., Pasławski J., 2023). Artykuł nie posługuje się wprost terminem Construction 4.0, lecz relacja jest bezpośrednia: skoro Construction 4.0 jest budowlaną adaptacją Industry 4.0, to metoda FFF pokazuje, jak dokonać analogicznej „korekty 5.0” w obszarze deskowań – uzupełnić technologie cyfrowe o wymiar ludzki (egzoszkielety, szkolenia) i zarządczy (lean, agile). Podejście zwinne przeniesiono przy tym z rozwoju oprogramowania: realizacja w krótkich iteracjach (sprintach) z wykorzystaniem metodyk Scrum i Kanban, samoorganizujący się zespół podejmujący decyzje na bieżąco, codzienne spotkania i regularne przeglądy. W metodzie FFF elastyczność ma wymiar ściśle deskowaniowy – jest nią np. modyfikacja mieszanki betonowej utrzymująca rotację deskowań pomimo zmiany temperatury otoczenia, a więc mechanizm stabilizacji taktu produkcji w turbulentnym otoczeniu. Technologiczne wsparcie strategii LEAN obejmuje w artykule egzoszkielety, cyfrowego bliźniaka – wraz z jego korzyściami i wyzwaniami, w tym kosztem i bezpieczeństwem danych – oraz symulację.

Empiryczną przesłankę metody ilustruje rys. 3.4. Na budowie S01 CBR OSM Piątnica w okresie XI 2022 – VIII 2023 liczba czynnie pracujących cieśli zmieniała się praktycznie codziennie, podczas gdy ilość deskowań ściennych i stropowych na budowie pozostawała w poszczególnych jednostkach czasu niezmieniona (Majkowski Ł., Pasławski J., 2023). W kategoriach LEAN jest to jednoczesne marnotrawstwo zapasów (zamrożony, niewykorzystywany potencjał deskowań) i oczekiwania. W kategoriach przejścia od 4.0 do 6.0 jest to dowód, że dane o materiale i dane o ludziach istnieją, lecz nie są ze sobą zsynchronizowane. Elastyczne bilansowanie zasobu deskowań ze zmiennym potencjałem roboczym stanowi istotę metody FFF i treść tezy szczegółowej TS1.




*Rys. 3.4. Rzeczywista ilość deskowań na budowie oraz dzienny potencjał pracowników fizycznych – budowa S01 CBR OSM Piątnica. Źródło:* (Majkowski Ł., Pasławski J., 2023)

**Priorytety wdrożeniowe.** Z połączenia trajektorii Construction 4.0 z metodą FFF wynika pytanie, które komponenty wdrażać w pierwszej kolejności. W oparciu o dojrzałość technologii oraz ograniczenia rozprawy – czas, zasoby i dostępność danych – przyjęto hierarchię priorytetów przedstawioną w tabeli 3.3; w dwóch ostatnich kolumnach wskazano zakres realizacji komponentu w rozprawie oraz tezę szczegółową, której dotyczy. Rdzeń stanowią LEAN i sieci neuronowe, a więc dwie pierwsze ścieżki usprawnień, natomiast komponenty eksploracyjne i perspektywiczne wyznaczają kierunki dalszych prac.

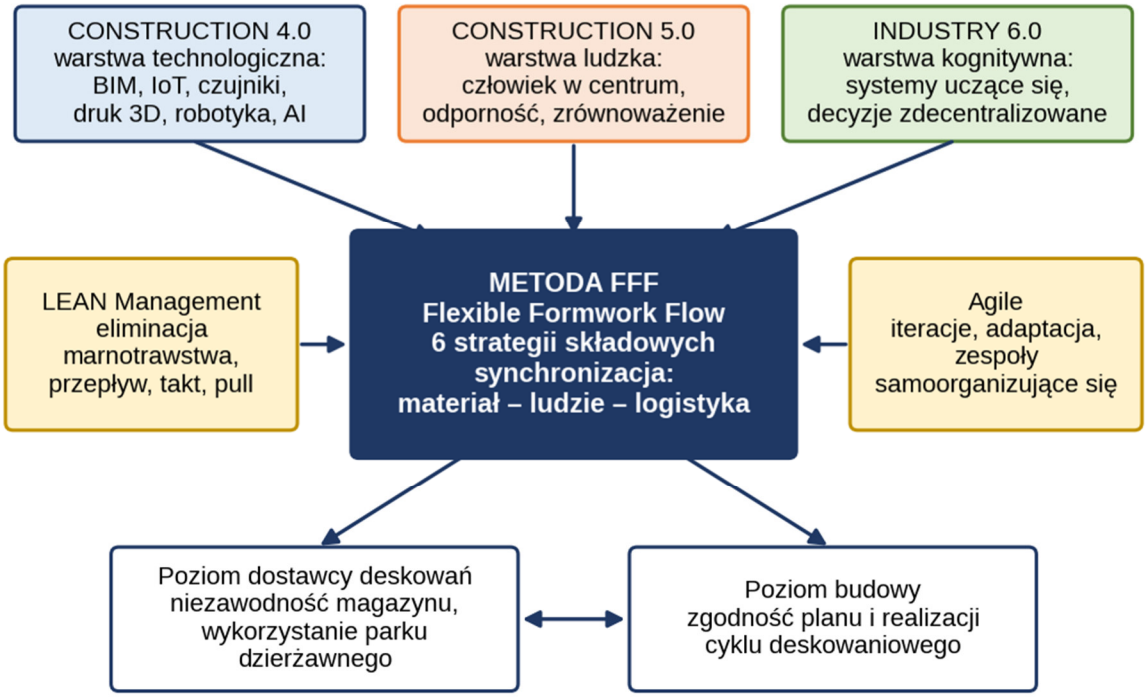
*Tabela 3.3. Hierarchia priorytetów wdrożeniowych, zakres ich realizacji w rozprawie i powiązanie z tezami*

| Priorytet | Komponent | Uzasadnienie | Zakres realizacji w rozprawie | Teza |
|---|---|---|---|---|
| 1 (rdzeń) | LEAN Construction (LPS, JIT, kanban) dla cyklu deskowaniowego | Dojrzała metodologia, niska bariera wdrożenia, mierzalne efekty (do 9% produktywności, do 7% kosztów) | Katalog marnotrawstwa jako rama wszystkich analiz; standaryzacja procesu (podrozdz. 4.3), analiza budowy (podrozdz. 5.1) i parku dzierżawnego (podrozdz. 5.2) | TS2, TS3 |
| 2 (rdzeń) | SSN (MLP, LSTM) dla predykcji czasu cyklu i zapotrzebowania | Dojrzała technologia uczenia maszynowego, dostępne biblioteki; wymaga zbioru danych historycznych | Zestaw predyktorów (podrozdz. 4.1), zbiory danych operacyjnych i skalibrowane na nich modele (podrozdz. 5.1 i 5.2); koncepcja sieci (podrozdz. 3.4); pełna sieć – kierunek dalszych prac (rozdz. 6) | TS1 |
| 3 (uzupełniający) | Integracja z BIM (eksport IFC, wtyczka lub samodzielne narzędzie) | Platforma integracyjna; wymaga znajomości IFC i SDK BIM | Rysunki obmiarowe i schematy PERI CAD jako źródło danych o potencjale deskowań (podrozdz. 5.1) | TS1 |
| 4 (eksploracyjny) | CNN dla inspekcji przed betonowaniem | Wysoka wartość praktyczna, lecz wymaga oznaczonych zbiorów zdjęć | Poza zakresem rozprawy | – |
| 5 (eksploracyjny) | Cyfrowy bliźniak cyklu deskowaniowego | Integracja IoT, BIM i SSN; wymaga infrastruktury i partnerstwa z wykonawcą | Częściowo: cyfrowy monitoring parcia i dojrzałości betonu PERI InSite (podrozdz. 5.4) | TS2 |

| Priorytet | Komponent | Uzasadnienie | Zakres realizacji w rozprawie | Teza |
|---|---|---|---|---|
| 6 (perspektywiczny) | Egzoszkielety dla pracowników deskowaniowych | Aspekt BHP; możliwe pilotaże w partnerstwie z producentami | Wdrożenie w centrum logistycznym ocenione na danych z lat 2017–2026 (podrozdz. 5.2.4); pilotaż na budowie – kierunek dalszych prac | TS2 |
| 7 (perspektywiczny) | Robotyka STCR dla powtarzalnego montażu i demontażu | Wysoki TRL technologii ogólnej, niski dla zastosowań deskowaniowych | Poza zakresem rozprawy | – |

*Źródło: opracowanie własne.*

**Miejsce metody FFF i rozprawy.** Metoda FFF wypełnia lukę powiązania kolejnych etapów rozwoju budownictwa z LEAN Management w trzech wymiarach (rys. 3.5). W wymiarze koncepcyjnym integruje technologie właściwe dla Construction 4.0 i Industry 5.0 – egzoszkielet, cyfrowy bliźniak, analizę danych, symulację – ze strategiami lean i agile, pokazując, że wartością nie jest sama implementacja narzędzi, lecz ich osadzenie w procesie eliminacji marnotrawstwa i stabilizacji przepływu. W wymiarze operacyjnym dostarcza katalogu marnotrawstwa specyficznego dla gospodarki deskowaniami oraz przesłanek liczbowych. W wymiarze prospektywnym wskazuje drogę do prognozowania opartego na danych – zapowiadając modele symulacyjne na danych z wielu budów, możliwe do zbudowania w środowisku łączącym symulację zdarzeń dyskretnych, symulację agentową i dynamikę systemów (Majkowski Ł., Pasławski J., 2023) – a więc do warstwy, którą Industry 6.0 opisuje jako kognitywną. Niniejsza rozprawa kontynuuje ten kierunek: od jakościowego powiązania technologii z LEAN w stronę ilościowej, opartej na danych synchronizacji i predykcji przepływu deskowań.




*Rys. 3.5. Miejsce metody FFF (Flexible Formwork Flow) na tle koncepcji Construction 4.0, Construction 5.0 i Industry 6.0. Źródło: opracowanie własne.*

**Wnioski dla tez rozprawy.** Z przedstawionego przejścia wynikają trzy wnioski, które prowadzą wprost do tez szczegółowych. Po pierwsze, skoro wydajność systemu wyznacza ogniwo krytyczne, a dane o materiale, ludziach i logistyce istnieją, lecz nie są zsynchronizowane, to efektywność montażu i demontażu zależy od łącznego projektowania techniki i organizacji pracy oraz od zdolności systemu do uczenia się tych zależności – co jest treścią tezy TS1 (kierunek 6.0). Po drugie, skoro Construction 5.0 stawia w centrum człowieka, a koszt pracy jest dominującym i najszybciej drożejącym składnikiem

kosztu robót deskowaniowych, to główną dźwignią usprawnień jest organizacja i wsparcie pracy ludzi – teza TS2 (kierunek 5.0). Po trzecie, skoro Construction 4.0 dostarcza informacji, lecz nie organizacji przepływu, to o wyniku całego łańcucha dostawca–budowa–dostawca decyduje widoczność rzeczywistego statusu elementów i przepływ zamiast wolumenu – teza TS3 (kierunek 4.0). Zanim tezy te zostaną sformułowane (podrozdział 3.3), podrozdział 3.2 uzasadnia wspólne dla nich założenie: usprawnienie montażu i demontażu deskowań wymaga zmiany sposobu zarządzania.

## 3.2. Zmiana paradygmatu zarządzania

**Zarządzanie jako nauka społeczna.** W obowiązującej w Polsce klasyfikacji dziedzin nauki i dyscyplin naukowych nauki o zarządzaniu i jakości należą do dziedziny nauk społecznych, natomiast inżynieria lądowa, geodezja i transport – do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych. Podział ten nie jest wyłącznie formalny. Nauki inżynieryjno-techniczne badają obiekty, które zachowują się zgodnie z prawami fizyki: parcie mieszanki betonowej, nośność podpory czy przyrost wytrzymałości betonu można zmierzyć, opisać modelem i przewidzieć. Nauki społeczne badają ludzi i organizacje – a więc układy, w których wynik zależy od nastawienia, motywacji, kompetencji, zaufania i sposobu komunikowania się. Niniejsza rozprawa wyrasta z inżynierii lądowej i z praktyki technologii robót żelbetowych, jednak jej przedmiot – usprawnienie procesu montażu i demontażu deskowań na bazie innowacji technologicznych, organizacyjnych i procesowych – jest de facto przedmiotem nauk o zarządzaniu. Deskowanie systemowe jest technologią dojrzałą (TRL 9); tym, co w praktyce decyduje o jego efektywności, jest sposób, w jaki ludzie planują, zamawiają, kompletują, montują, rozdeskowują i zwracają elementy. Metoda FFF jest zatem metodą zarządzania, a rozprawa – pracą z pogranicza dwóch dziedzin nauki.

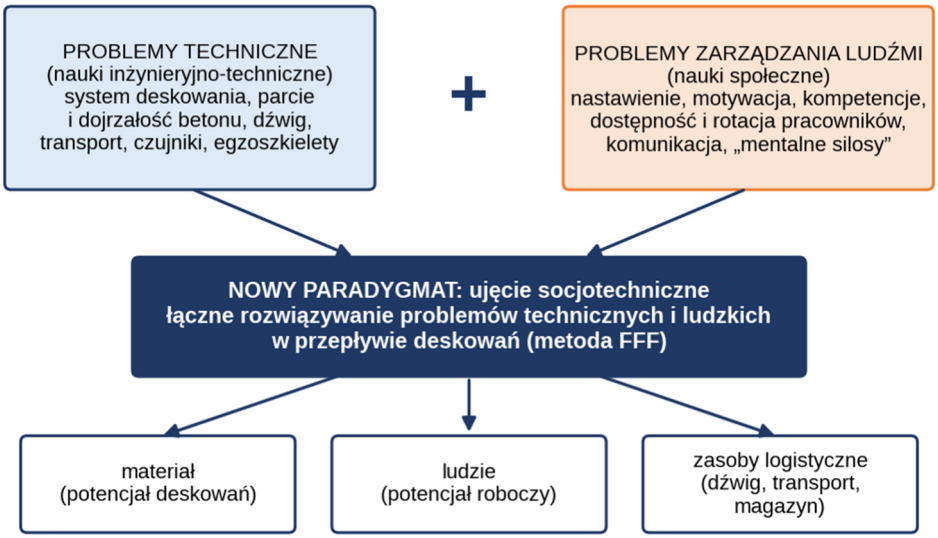
**Wydajność zależy od nastawienia ludzkiego.** Dominujący w budownictwie sposób myślenia o wydajności ma rodowód techniczny: wydajność traktuje się jako cechę sprzętu i normatywu, a człowieka – jako wykonawcę normy. Ograniczenia tego ujęcia wykazały już badania prowadzone w latach 1924–1932 w zakładach Hawthorne spółki Western Electric, opisane przez E. Mayo: zmiany warunków fizycznych pracy tłumaczyły wyniki zespołów w stopniu znacznie mniejszym niż czynniki społeczne – zainteresowanie okazywane pracownikom, relacje w grupie, nieformalne normy i stosunek do przełożonych (Mayo E., 1933). Badania te zapoczątkowały nurt stosunków międzyludzkich (human relations) w naukach o zarządzaniu i ugruntowały pogląd, że wydajność jest zjawiskiem społecznym, a nie wyłącznie technicznym.

Drugim fundamentem jest koncepcja systemów socjotechnicznych. E. Trist i K. Bamforth, badając wprowadzenie zmechanizowanej metody ścianowej w brytyjskich kopalniach węgla, wykazali, że technicznie doskonalsza metoda nie przyniosła oczekiwanych efektów, ponieważ rozbiła małe, samodzielne zespoły górników i naruszyła więzi, na których opierały się zarówno wydajność, jak i bezpieczeństwo pracy (Trist E. L., Bamforth K. W., 1951). Wniosek, który dał początek ujęciu socjotechnicznemu, brzmi: podsystem techniczny i podsystem społeczny organizacji muszą być projektowane łącznie – optymalizacja jednego z pominięciem drugiego pogarsza wynik całości.

Analogia do gospodarki deskowaniami jest bezpośrednia i znajduje potwierdzenie w materiale zgromadzonym w rozprawie. W przeglądzie czynników wydajności pracy przywołanym w artykule źródłowym metody FFF cztery z pięciu zidentyfikowanych czynników mają charakter ludzki lub zarządczy: niekompetentni przełożeni oraz złe zarządzanie i planowanie, niska efektywność i brak doświadczenia, brak zaangażowania i motywacji oraz umiejętności pracowników; tylko jeden – brak materiałów, narzędzi i sprzętu – jest czynnikiem rzeczowym (Majkowski Ł., Pasławski J., 2023). Casini wskazuje, że do 30% pracy firm budowlanych stanowi korekta błędów, a 35% czasu pracy specjalistów pochłaniają czynności nieprodukcyjne (Casini M., 2022) – są to straty powstające w organizacji pracy i w przepływie informacji, nie w sprzęcie. Badania Terzioglu i in. ujawniły „mentalne silosy": rozbieżność percepcji aż 23 z 35 kryteriów doboru deskowań na styku dostawca–biuro techniczne wykonawcy, a więc problem o naturze czysto społecznej. Wreszcie model sieci neuronowej Moselhiego i Khana, mimo wysokiej jakości dopasowania, nie uwzględnia żadnych parametrów związanych ze strategiami zarządczymi i umiejętnościami kierownictwa, co sami autorzy wskazują jako jego ograniczenie (Moselhi O., Khan Z., 2010).

Wyniki badań własnych prowadzą do tego samego wniosku. W badaniu ankietowym 50 firm wykonawczych (podrozdział 4.2) tylko 14% respondentów wskazało montaż i demontaż deskowania jako główne źródło strat czasu, natomiast 68% – transport wewnętrzny, przestoje żurawia, składowanie, czyszczenie, sortowanie i zwroty; 76% firm ocenia dostępność wykwalifikowanych cieśli jako słabą lub krytyczną, 92% nie stosuje w praktyce narzędzi LEAN, 88% nie korzysta regularnie z narzędzi

cyfrowych, 44% w ogóle nie mierzy czasów montażu i demontażu, a systematyczny pomiar na każdej budowie prowadzi 18% (rys. 3.7). Na budowie biurowca INDUSTRIAL (podrozdział 5.1) stała załoga 12 cieśli w cyklu 28 dni oznaczała wzrost nakładu z 0,68 do 1,15–1,19 rb-g/m² deskowania wraz ze zmniejszeniem rzutu kondygnacji – system deskowania pozostał ten sam, zmieniło się wykorzystanie potencjału ludzi. W centrach logistycznych (podrozdział 5.2.4) urządzenia wspierające pracownika nie tylko podniosły wydajność prac, lecz – według obserwacji kierownictwa obu centrów – znacząco obniżyły rotację pracowników fizycznych, a więc oddziaływały na nastawienie do pracy, nie wyłącznie na jej fizyczną uciążliwość. W procesie obsługi zlecenia (podrozdział 4.3) przepływ jest przerywany w punktach styku między działami, a elastyczność jest dziś realizowana nieformalnie – przez ludzi, a nie przez system.




*Rys. 3.6. □miana paradygmatu zarządzania deskowaniami – połączenie rozwiązywania problemów technicznych i problemów zarządzania ludźmi. Źródło: opracowanie własne.*

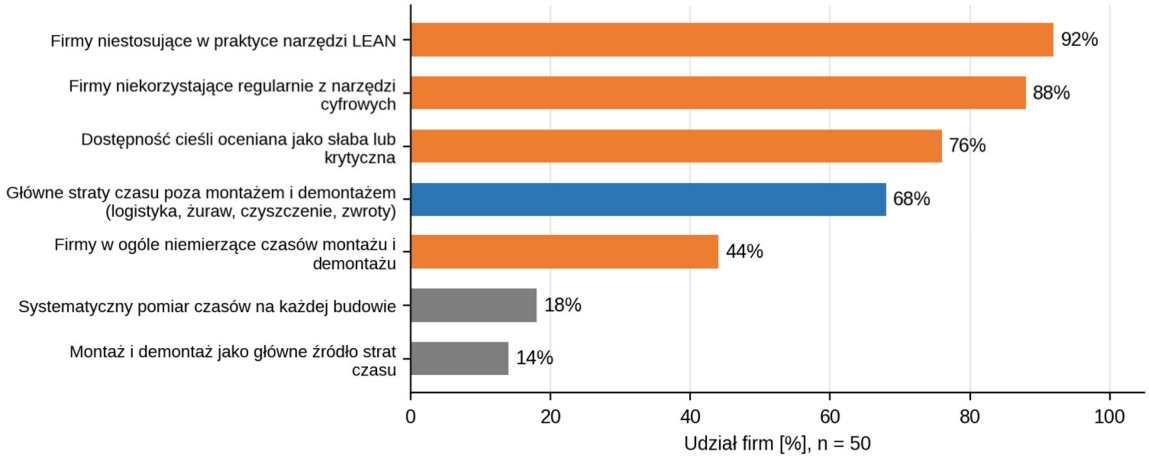
**Istota zmiany paradygmatu.** W rozumieniu przyjętym w podrozdziale 3.1 paradygmat rozstrzyga (Pasławski J., 2009), co uznaje się za problem wart rozwiązania, jakimi metodami i jakimi miernikami ocenia się wynik. Dotychczasowy paradygmat gospodarki deskowaniami odpowiada na te pytania następująco: problemem jest dobór systemu deskowania, metodą – analiza techniczno-kosztowa (w literaturze: analiza wielokryterialna, systemy ekspertowe, sieci neuronowe, logika rozmyta), miernikiem – cena najmu i normatywna pracochłonność, a po stronie dostawcy – wolumen wydanego sprzętu. Paradygmat proponowany w rozprawie odpowiada inaczej: problemem jest ciągłość i elastyczność przepływu deskowań w łańcuchu dostawca–budowa–dostawca, metodą – łączne projektowanie rozwiązań technicznych i organizacyjno-ludzkich, miernikiem – zgodność planu z realizacją, czas cyklu i wykorzystanie materiałowe parku. **Zmiana paradygmatu polega zatem na połączeniu rozwiązywania problemów technicznych z rozwiązywaniem problemów zarządzania ludźmi** (rys. 3.6): żadna z tych grup problemów rozwiązana osobno nie daje trwałego efektu. Zestawienie obu ujęć zawiera tabela 3.4.

*Tabela 3.4. Dotychczasowy i proponowany paradygmat zarządzania deskowaniami*

| Wymiar | Ujęcie techniczne (dotychczasowe) | Ujęcie społeczne | Ujęcie socjotechniczne – metoda FFF |
|---|---|---|---|
| Przedmiot zarządzania | System deskowania, sprzęt, norma | Ludzie, zespoły, relacje | Przepływ deskowań: materiał, ludzie i zasoby logistyczne łącznie |
| Pytanie wiodące | Jaki system dobrać i ile sprzętu dostarczyć? | Jak pozyskać, utrzymać i zaangażować pracowników? | Jak zsynchronizować trzy potencjały w całym łańcuchu dostawca–budowa–dostawca? |

| Wymiar | Ujęcie techniczne (dotychczasowe) | Ujęcie społeczne | Ujęcie socjotechniczne – metoda FFF |
|---|---|---|---|
| Źródło wydajności | Parametry techniczne systemu | Nastawienie, kompetencje, stabilność brygady | Dopasowanie techniki do ludzi i organizacji; eliminacja marnotrawstwa w przepływie |
| Miernik | Cena najmu, normatyw rb-g/m², wolumen wydań | Rotacja i dostępność pracowników, absencja, urazy | Zgodność planu i realizacji, czas cyklu, wykorzystanie materiałowe parku, odchylenia wydań i zwrotów |
| Rola technologii | Cel sam w sobie | Zagrożenie lub obojętna | Wsparcie człowieka (egzoszkielet, dźwig, czujniki, modele prognostyczne) |
| Rola dostawcy deskowań | Wydanie i odbiór sprzętu | – | Partner identyfikujący wąskie gardło budowy na podstawie własnych danych |
| Zaplecze teoretyczne | Construction 4.0 | Nurt human relations (Mayo E., 1933), Construction 5.0 | Systemy socjotechniczne (Trist E. L., Bamforth K. W., 1951), LEAN, Agile, Industry 5.0 |

*Źródło: opracowanie własne.*




*Rys. 3.7. Empiryczne przesłanki zmiany paradygmatu – wybrane wyniki badania ankietowego wykonawców konstrukcji żelbetowych (n = 50; podrozdział 4.2). Źródło: opracowanie własne.*

Zmianę paradygmatu wymusza także ekonomia. W latach 2015–2025 przeciętne wynagrodzenie w gospodarce narodowej wzrosło o 128,3%, a minimalne o 166,6%, podczas gdy ceny dzierżawy i sprzedaży deskowań rosły o ok. 3–4% rocznie; wartość roboczogodziny zaoszczędzonej na 1 m² deskowania wzrosła z ok. 28 zł do ok. 64 zł (podrozdział 5.3). Czynnik ludzki stał się tym samym najdroższym i najtrudniej dostępnym składnikiem cyklu deskowaniowego, a rynek odpowiada na to przenoszeniem kolejnych segmentów do prefabrykacji (podrozdział 5.3.4). W tych warunkach zarządzanie, które widzi wyłącznie sprzęt, optymalizuje składnik tańszy i łatwiej dostępny, pomijając droższy i deficytowy. Proponowana zmiana paradygmatu jest zgodna z kierunkiem wyznaczonym przez Construction 5.0: technologia ma służyć człowiekowi, a nie go zastępować – z tym zastrzeżeniem, że rozprawa nie poprzestaje na deklaracji, lecz wskazuje mierniki i wdrożenia, na których zmianę tę można zweryfikować.

## 3.3. Tezy rozprawy i ich rozwinięcie

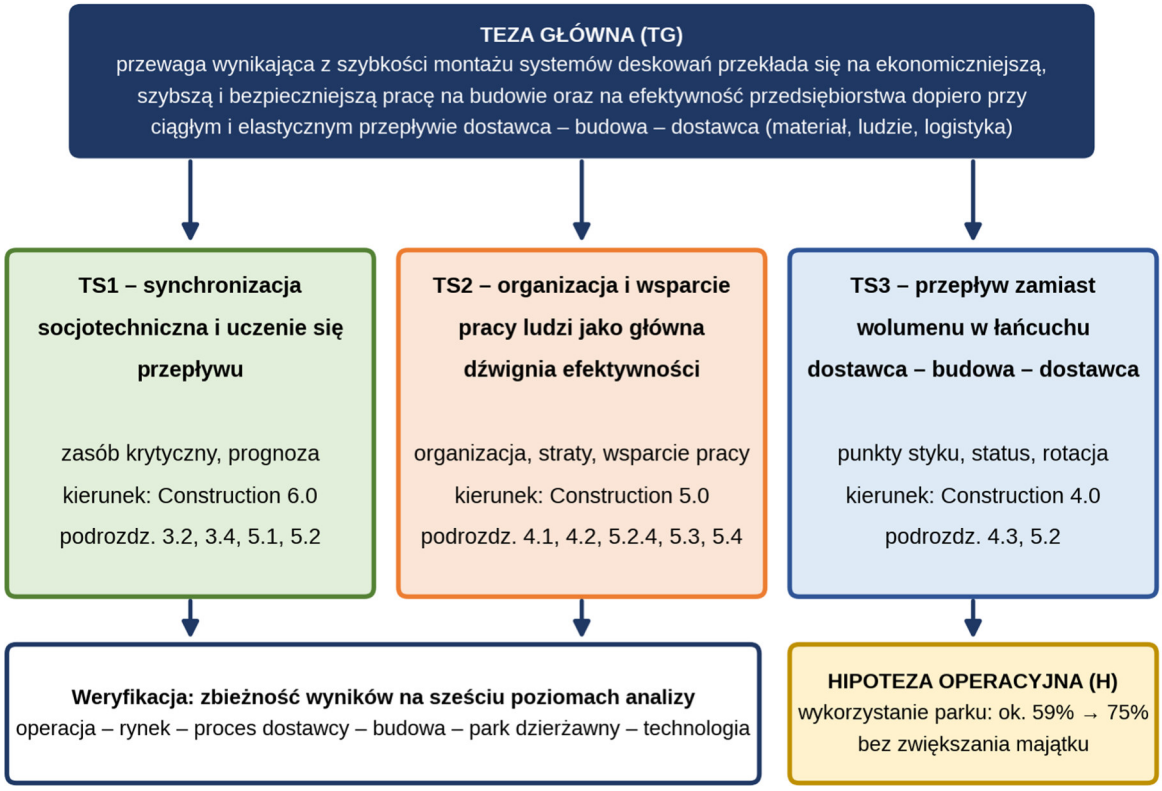
**Teza rozprawy**, sformułowana we wstępie, brzmi: **przewaga dostawcy deskowań systemowych, wynikająca z szybkości montażu jego systemów, przekłada się na ekonomiczniejszą, szybszą i**

**bezpieczniejszą pracę na budowie oraz na efektywność przedsiębiorstwa dopiero wtedy, gdy zapewniona jest ciągłość i elastyczność przepływu deskowań w łańcuchu dostawca–budowa–dostawca, czyli synchronizacja potencjałów materiału, ludzi i zasobów logistycznych, wspierana wiarygodną informacją o rzeczywistym stanie elementów i konstrukcji.**

Teza zawiera cztery twierdzenia, z których każde wymaga odrębnego uzasadnienia. Pierwsze ma charakter warunkowy: szybkość montażu systemów deskowań jest realną przewagą dostawcy, lecz przekłada się na ekonomiczniejszą, szybszą i bezpieczniejszą pracę na budowie oraz na efektywność przedsiębiorstwa dopiero wtedy, gdy nie ogranicza jej inny zasób – **co przeczy rozpowszechnionej praktyce, w której usprawnień szuka się wyłącznie w katalogu produktów lub w normie dla brygady**. Drugie wskazuje właściwy poziom analizy: cały łańcuch dostawca–budowa–dostawca, a nie pojedyncza budowa; **konsekwencją jest traktowanie rynku jako układu naczyń połączonych**, w którym komplet deskowania przetrzymany bez rotacji na jednej budowie jest kompletem niedostępnym dla innej. Trzecie definiuje mechanizm: **synchronizację trzech potencjałów – materiału, ludzi i zasobów logistycznych** – z których dwa pierwsze odpowiadają dwóm grupom problemów omówionym w podrozdziale 3.2, a trzeci jest ogniwem je łączącym. Czwarte wskazuje warunek konieczny: **wiarygodną informację o rzeczywistym – a nie deklarowanym – stanie elementów i konstrukcji**.

**Hipoteza operacyjna.** Operacyjnym rozwinięciem tezy jest hipoteza, że wdrożenie rozwiązań metody FFF pozwala podnieść łączne wykorzystanie parku dzierżawnego z poziomu około 59% w kierunku celu strategicznego 75% bez zwiększania majątku, przy jednoczesnym ograniczeniu odchyleń terminów wydań i zwrotów. Hipoteza nadaje tezie postać mierzalną: jeżeli o efektywności decyduje przepływ, to jego poprawa musi być widoczna w mierniku stanu przepływu całego parku, a nie wyłącznie w wynikach pojedynczych budów.

**Tezy szczegółowe.** Dla potrzeb weryfikacji tezę główną rozwinięto w trzy tezy szczegółowe (TS1–TS3). Każda odpowiada jednemu z trzech pytań wyprowadzonych w podrozdziale 3.1 – o synchronizację i uczenie się systemu (kierunek 6.0), o człowieka i organizację jego pracy (kierunek 5.0) oraz o przepływ informacji i materiału w łańcuchu dostawcy (kierunek 4.0) – i obejmuje kilka powiązanych ze sobą składowych. Strukturę tez przedstawiono na rys. 3.8, a składowe poszczególnych tez szczegółowych wraz z rozdziałami, w których są weryfikowane – w tabeli 3.5.




*Rys. 3.8. Struktura tez rozprawy – teza główna, trzy tezy szczegółowe i hipoteza operacyjna. Źródło: opracowanie własne.*

*Tabela 3.5. Składowe tez szczegółowych TS1–TS3 i rozdziały, w których są weryfikowane*

| Teza szczegółowa | Składowa tezy szczegółowej | Rozdział weryfikujący |
|---|---|---|
| TS1 | Trwałe usprawnienie wymaga łącznego rozwiązywania problemów technicznych i problemów zarządzania ludźmi | podrozdz. 3.2, 5.1, 5.2.4 |
| TS1 | O długości cyklu decyduje zasób krytyczny – synchronizacja trzech potencjałów | podrozdz. 5.1 |
| TS1 | Model zarządzania deskowaniami można nauczyć prognozowania zapotrzebowania | podrozdz. 3.4, 5.1, 5.2 |
| TS2 | Organizacja pracy jest podstawą doboru systemu deskowania | podrozdz. 4.1 |
| TS2 | Straty czasu powstają wokół deskowania, a nie w samym montażu i demontażu | podrozdz. 4.2 |
| TS2 | Technologie wspierające człowieka są ekonomicznie uzasadnione, a ich opłacalność jest proporcjonalna do kosztów robocizny | podrozdz. 5.2.4, 5.3, 5.4 |
| TS3 | Przepływ jest przerywany na interfejsach; decyduje widoczność statusu i przypisanie decyzji | podrozdz. 4.3 |
| TS3 | Przepływ zamiast wolumenu wydań; ze składową tą związana jest hipoteza operacyjna H | podrozdz. 5.2 |

*Źródło: opracowanie własne.*

**TS1 – teza o synchronizacji socjotechnicznej i uczeniu się przepływu**. **Trwałe usprawnienie montażu i demontażu deskowań wymaga łącznego projektowania rozwiązań technicznych i organizacyjno-ludzkich, ponieważ o długości cyklu decyduje zasób krytyczny, wynikający z synchronizacji trzech potencjałów – materiału, ludzi i zasobów logistycznych – którym nie musi być ani brygada, ani ilość deskowania; zależności między tymi potencjałami można uchwycić w modelu uczącym się na danych operacyjnych, którymi dostawca deskowań już dysponuje, i na tej podstawie prognozować zapotrzebowanie na deskowania, pracowników i zasoby logistyczne.**

Teza wyrasta z rozważań podrozdziału 3.2 oraz z teorii ograniczeń przywołanej w podrozdziale 3.1 i stanowi ramę dla pozostałych. Na budowie INDUSTRIAL (podrozdział 5.1) 28-dniowy cykl kondygnacji determinował jeden żuraw wieżowy, obsługujący sekwencyjnie deskowanie ścienne, zbrojenie, deskowanie stropowe, wieże podparcia oraz 168 dostaw i 186 zwrotów materiału. Wariant deskowania stropowego SKYDECK okazuje się tam opłacalny dopiero przy skróceniu cyklu do 21 dni, to zaś wymaga drugiego żurawia i lepszego wykorzystania brygady cieśli – technika i organizacja pracy działają wyłącznie łącznie. Podobnie egzoszkielety i dźwig obsługi ręcznej przyniosły efekt dlatego, że poprawiły zarazem wydajność i warunki pracy (podrozdział 5.2.4). Potencjał deskowań wyznaczony przez dostawcę z rysunków okazał się przy tym wiarygodniejszą miarą zakresu robót niż przedmiar wykonawcy: ilości rzeczywiście wbudowane były o 16,3% wyższe od wyceny wyjściowej. To ostatnie ustalenie stanowi pomost do części predykcyjnej tezy: skoro dane dostawcy trafniej opisują rzeczywistość niż deklaracje, można na nich uczyć model prognozujący. W rozprawie model taki skalibrowano w postaci jawnych zależności parametrycznych i statystycznych (podrozdziały 5.1 i 5.2), a sieć neuronowa jest jego etapem docelowym (podrozdział 3.4). Teza łączy zatem warstwę ludzką z warstwą kognitywną: jej część dotycząca synchronizacji została potwierdzona studium przypadku i analizą centrów logistycznych, część predykcyjna – częściowo, na poziomie modeli interpretowalnych.

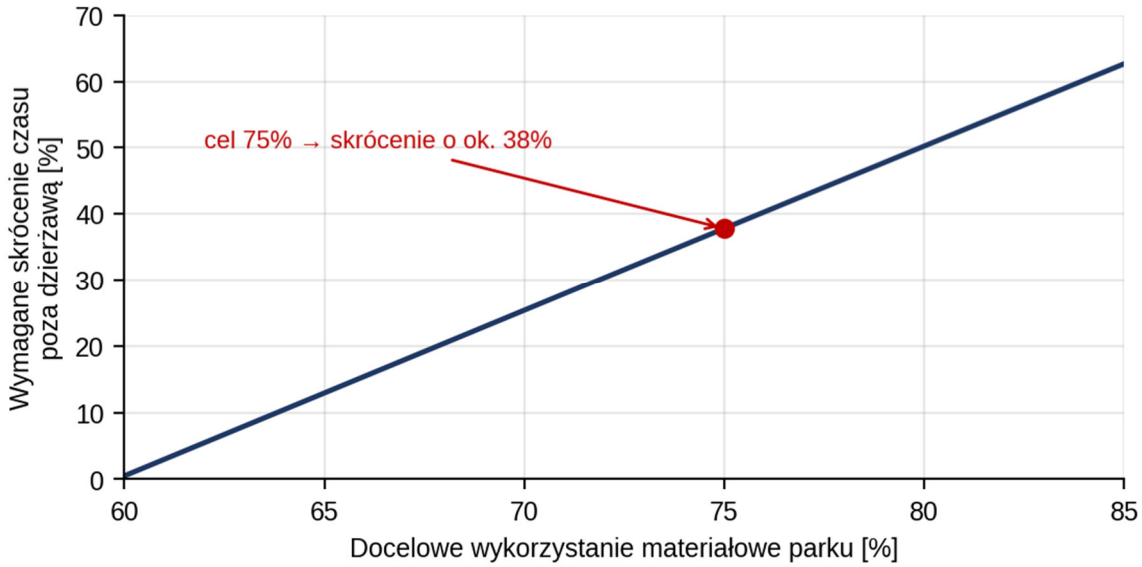
**TS2 – teza o organizacji i wsparciu pracy ludzi jako głównej dźwigni efektywności**. **Główne rezerwy efektywności cyklu deskowaniowego tkwią nie w samym systemie deskowania ani w operacji montażu, lecz w organizacji i wsparciu pracy ludzi wokół deskowania: innowacja czysto organizacyjna daje redukcję nakładu pracy porównywalną z efektem doboru systemu, straty czasu powstają przede wszystkim w czynnościach towarzyszących montażowi i demontażowi, a technologie wspierające pracownika i dostarczające danych z konstrukcji są ekonomicznie uzasadnione, przy czym ich opłacalność rośnie wraz z kosztem pracy.**

Według katalogu normatywów analizowanego w podrozdziale 4.1 samo przejście z pracy pojedynczymi elementami na pracę zestawami obniża nakład z 0,34 do 0,30 rb-g/m² (o ok. 11,8%), podczas gdy

rozstęp między systemami wynosi 0,22–0,26 rb-g/m² (ok. 18%) – jest to skwantyfikowany w źródle branżowym dowód, że sposób zorganizowania pracy ludzi jest dźwignią tego samego rzędu co sprzęt (Proverbs D., 1999). W badaniu ankietowym (podrozdział 4.2) 68% wykonawców lokalizuje główne straty w transporcie wewnętrznym, przestojach żurawia, składowaniu, czyszczeniu, sortowaniu i zwrotach, a jedynie 14% – w montażu i demontażu, co uzasadnia rozszerzenie pola analizy z operacji ciesielskiej na cały przepływ. Symulacja kontrfaktyczna w podrozdziale 5.2.4 wykazała, że bez egzoszkieletów i dźwigu obsługi ręcznej przeładowanie tego samego tonażu wymagałoby zatrudnienia o ok. 8–9 pracowników więcej w Koninku i o ok. 13–15 więcej w Kątach Wrocławskich rocznie, co odpowiada ok. 4,9 mln zł kosztów pracy w latach 2023–2026 (szacunek dolny). Dane z systemu PERI InSite (podrozdział 5.4) pokazały z kolei, że decyzje o tempie betonowania i momencie rozdeskowania można opierać na rzeczywistym parciu i dojrzałości betonu, a nie na kalendarzu (Majkowski Ł., 2025). Opłacalność takich rozwiązań rośnie, ponieważ w latach 2015–2025 koszt pracy rósł od dwóch do ponad trzech razy szybciej niż ceny deskowań (podrozdział 5.3). Teza została potwierdzona na danych normatywnych, ankietowych i operacyjnych; jej część normatywna wymaga uzupełnienia chronometrażem w warunkach polskich.

**TS3 – teza o przepływie zamiast wolumenu w łańcuchu dostawca–budowa–dostawca**. **O wyniku gospodarki deskowaniami decyduje nie ilość sprzętu wydanego na budowy, lecz liczba rotacji tego samego kompletu, a więc wykorzystanie materiałowe parku dzierżawnego; przepływ ten jest przerywany w punktach styku między uczestnikami procesu, a jego ciągłość zależy od widoczności rzeczywistego statusu elementów i jednoznacznego przypisania decyzji – nie od wydajności poszczególnych stanowisk.**

Teza jest odpowiedzią na powszechne na rynku przeświadczenie, że im więcej sprzętu dostawca wyda, tym więcej zarobi; jego fałszywość ilustruje przywołany we wstępie przykład Apple Inc. (Lashinsky A., 2012). Analiza mapy BPMN i macierzy odpowiedzialności (podrozdział 4.3) wykazała, że Lokalny Ośrodek Koordynacji uczestniczy w 11 z 18 interfejsów procesu, a ścieżki wyjątkowe – braki fizyczne, zmiany po akceptacji, pilność – są obsługiwane nieformalnie; ta część tezy ma naturę ściśle zarządczą i dotyczy ról, odpowiedzialności i komunikacji. Łączne wykorzystanie parku PERI Polska wynosiło w okresie 51 tygodni średnio 59,1%, a cel 75% nie został osiągnięty dla całego parku ani razu (podrozdział 5.2). Z prawa Little'a (Little J. D. C., 1961) wynika, że podniesienie wskaźnika z 59,8% do 75% przy tej samej wielkości parku i tym samym popycie wymaga skrócenia średniego czasu przebywania elementu poza dzierżawą o ok. 38% (rys. 3.9) – jest to zadanie przepływowe, a nie inwestycyjne. Z tezą TS3 związana jest bezpośrednio hipoteza operacyjna H.




*Rys. 3.9. Wymagane skrócenie średniego czasu przebywania elementu poza dzierżawą w funkcji docelowego wykorzystania materiałowego parku – zależność wynikająca z prawa Little'a dla stanu wyjściowego 59,8% (podrozdział 5.2). Źródło: opracowanie własne.*

Zestawienie tez z miernikami, rozdziałami weryfikującymi i stanem weryfikacji zawiera tabela 3.6, a macierz powiązań tez z rozdziałami – tabela 3.7.

*Tabela 3.6. Tezy rozprawy – treść, miernik, rozdział weryfikujący i stan weryfikacji*

| Teza | Treść skrócona | Miernik / dowód | Rozdział | Stan weryfikacji |
|---|---|---|---|---|
| TG | O efektywności decyduje ciągłość i elastyczność przepływu – synchronizacja materiału, ludzi i zasobów logistycznych wspierana wiarygodną informacją | Zbieżność wyników na sześciu poziomach analizy | 4–6 | Potwierdzona z kilku niezależnych stron (rozdz. 6) |
| H | Wykorzystanie parku z ok. 59% w kierunku 75% bez zwiększania majątku; mniejsze odchylenia wydań i zwrotów | Wykorzystanie materiałowe [%]; odchylenia terminów [dni] | 5.2, 6 | Ustanowiono linię bazową i aparat pomiaru; pełna weryfikacja po wdrożeniu FFF na budowach |
| TS1 | Łączne rozwiązywanie problemów technicznych i zarządzania ludźmi; o cyklu decyduje zasób krytyczny – synchronizacja trzech potencjałów; model zarządzania można nauczyć prognozowania zapotrzebowania | Efekty wdrożeń łączących technikę i organizację; cykl 28 dni determinowany przez jeden dźwig; +16,3% betonu wobec wyceny; modele skalibrowane na danych operacyjnych; koncepcja SSN | 3, 5.1, 5.2, 6 | Potwierdzona studiami przypadków i na jednej budowie; część predykcyjna – częściowo: modele parametryczne i statystyczne, sieć neuronowa – kierunek dalszych prac |
| TS2 | Organizacja pracy jest dźwignią rzędu doboru systemu; straty powstają wokół deskowania, nie w montażu; technologia wspierająca człowieka jest ekonomicznie uzasadniona | 0,34 → 0,30 rb-g/m² (–11,8%) wobec rozstępu ok. 18% między systemami; 68% wobec 14% wskazań; 8–9 i 13–15 uniknietych etatów rocznie; ok. 4,9 mln zł (2023–2026) | 4.1, 4.2, 5.2, 5.3, 5.4 | Potwierdzona na danych normatywnych (wymaga chronometrażu w warunkach polskich), ankietowych (n = 50) i operacyjnych z lat 2017–2026 |
| TS3 | Przepływ przerywany na interfejsach – decyduje widoczność statusu i przypisanie decyzji; przepływ zamiast wolumenu wydań | 11 z 18 interfejsów z udziałem LOK; ścieżki wyjątkowe poza standardem; wykorzystanie 59,1%; wymagane skrócenie czasu poza dzierżawą o ok. 38% | 4.3, 5.2 | Potwierdzona analizą procesu; skala zadania wyznaczona ilościowo |

*Źródło: opracowanie własne.*

*Tabela 3.7. Macierz powiązań tez z podrozdziałami rozprawy (● – weryfikacja zasadnicza, ○ – przesłanka lub uzupełnienie)*

| Teza | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TG | ● | ● | ● | ● | ● | ○ | ● |
| H | | | | | ● | | |
| TS1 | ○ | | ○ | ● | ● | | |
| TS2 | ● | ● | | ○ | ○ | ● | ● |
| TS3 | | | ● | ○ | ● | | |

*Źródło: opracowanie własne.*

Układ tez odzwierciedla strukturę dowodu przyjętą w rozprawie: teza główna nie jest weryfikowana jednym eksperymentem, lecz zbieżnością wyników uzyskanych na sześciu poziomach – operacji, rynku, procesu dostawcy, budowy, parku dzierżawnego i technologii. Hipoteza operacyjna nie została w ramach rozprawy zweryfikowana w pełni, ponieważ okres obserwacji obejmuje stan przed pełnym wdrożeniem rozwiązań FFF na budowach; rozprawa ustanawia linię bazową, trójelementowy system pomiaru (wykorzystanie materiałowe, odchylenia wydań, odchylenia zwrotów) i ilościowo wyznaczoną

skalę zadania. Ograniczenie to jest konsekwencją uczciwego rozdzielenia tego, co zmierzono, od tego, co postulowano.

## 3.4. Sztuczne sieci neuronowe (SSN) jako warstwa ucząca metody FFF

**Od neuronu do głębokiego uczenia.** Sztuczna sieć neuronowa (SSN) jest modelem obliczeniowym złożonym z prostych, wzajemnie połączonych jednostek – neuronów – ułożonych w warstwy: wejściową, jedną lub więcej warstw ukrytych i wyjściową. Każde połączenie ma wagę, a każdy neuron oblicza ważoną sumę sygnałów wejściowych i przekształca ją nieliniową funkcją aktywacji. Uczenie polega na takim doborze wag, aby odpowiedź sieci na dane wejściowe możliwie najmniej różniła się od wartości rzeczywistych; służy do tego algorytm wstecznej propagacji błędu, spopularyzowany przez D. Rumelharta, G. Hintona i R. Williamsa (Rumelhart D. E. i in., 1986). Teoretycznym uzasadnieniem użyteczności sieci jest twierdzenie o uniwersalnej aproksymacji: wielowarstwowa sieć jednokierunkowa, nawet z jedną warstwą ukrytą o dostatecznej liczbie neuronów, może przybliżyć z dowolną dokładnością szeroką klasę funkcji (Hornik K. i in., 1989). Istotę współczesnego, głębokiego uczenia ujęli Y. LeCun, Y. Bengio i G. Hinton: modele złożone z wielu warstw przetwarzania uczą się reprezentacji danych na kolejnych poziomach abstrakcji, samodzielnie odkrywając strukturę w dużych zbiorach danych; sieci konwolucyjne przyniosły przełom w przetwarzaniu obrazu, wideo, mowy i dźwięku, a sieci rekurencyjne – w analizie danych sekwencyjnych, takich jak tekst i szeregi czasowe (LeCun Y. i in., 2015). Systematyczny wykład tych metod zawiera monografia (Goodfellow I. i in., 2016).

Dla szeregów czasowych, a więc dla danych, jakimi są tygodniowe raporty wykorzystania parku czy ewidencja przeładunków, szczególne znaczenie ma architektura LSTM (long short-term memory). Jej komórki pamięci wyposażone w bramki pozwalają sieci uczyć się zależności odległych w czasie, z którymi proste sieci rekurencyjne sobie nie radzą (Hochreiter S., Schmidhuber J., 1997). Z punktu widzenia inżynierii produkcji budowlanej kluczowa jest jednak przede wszystkim jedna właściwość SSN: zdolność odwzorowania zależności nieliniowych i wieloczynnikowych bez konieczności zadawania z góry postaci funkcji – a dokładnie taki charakter ma zależność nakładu pracy i czasu cyklu od cech obiektu, systemu, brygady, pogody i organizacji budowy.

**Rodzaje uczenia.** Uczenie maszynowe obejmuje cztery klasyczne sposoby uczenia (Casini M., 2022). W uczeniu nadzorowanym algorytm otrzymuje pary wejście–wyjście i uczy się odwzorowania między nimi (klasyfikacja i regresja, np. predykcja czasu i kosztu). W uczeniu nienadzorowanym szuka struktury w danych bez etykiet (np. grupuje budowy o podobnej charakterystyce). Uczenie częściowo nadzorowane łączy oba podejścia, a w uczeniu ze wzmocnieniem agent uczy się metodą prób i błędów, otrzymując nagrody lub kary za działania w środowisku (Sutton R. S., Barto A. G., 2018). W metodzie FFF pierwsze z nich służy prognozowaniu nakładu pracy, czasu cyklu i zapotrzebowania, drugie – typizacji budów i grup produktowych, a czwarte stanowi perspektywę wsparcia decyzji planisty w środowisku symulacyjnym.

**Obecny etap rozwoju sztucznej inteligencji.** Rozprawa powstaje w okresie bezprecedensowego przyspieszenia rozwoju sztucznej inteligencji. Punktem zwrotnym było zaproponowanie w 2017 r. architektury transformera, opartej wyłącznie na mechanizmie uwagi, bez rekurencji i konwolucji (Vaswani A. i in., 2017); stała się ona podstawą dużych modeli językowych, które od końca 2022 r. są powszechnie dostępne i w ciągu kilku lat przeszły drogę od ciekawostki technologicznej do narzędzia codziennej pracy biurowej i inżynierskiej. O randze tej dziedziny świadczy przyznanie w 2024 r. Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki J. Hopfieldowi i G. Hintonowi za fundamentalne odkrycia i wynalazki umożliwiające uczenie maszynowe z użyciem sztucznych sieci neuronowych. Rozwój ten odpowiada trajektorii opisanej w podrozdziale 3.1: od gromadzenia i przetwarzania danych (4.0), przez przekształcanie informacji w wiedzę we współpracy człowieka z maszyną (5.0), do systemów kognitywnych o autonomicznych, zdecentralizowanych zdolnościach decyzyjnych (6.0) (Fernández-Miguel A., 2025).

W inżynierii i zarządzaniu budową przyspieszenie to jest dobrze udokumentowane. Przegląd scjentometryczny 4473 artykułów z lat 1997–2020 wykazał gwałtowny przyrost publikacji w ostatniej dekadzie i przesunięcie zainteresowania od systemów ekspertowych w stronę BIM i cyfrowych bliźniaków; jako wiodące tematy wskazano reprezentację wiedzy i wnioskowanie, fuzję informacji, wizję komputerową, przetwarzanie języka naturalnego, optymalizację oraz eksplorację procesów (process mining), których wspólnym celem jest modelowanie, prognozowanie i optymalizacja oparte na danych w całym cyklu życia przedsięwzięcia (Pan Y., Zhang L., 2021). Inny przegląd podkreśla, że budownictwo należy do najsłabiej zdigitalizowanych branż świata, a zastosowania sztucznej inteligencji – m.in. w

monitorowaniu czynności, zarządzaniu ryzykiem oraz optymalizacji zasobów i odpadów – napotykają w nim specyficzne wyzwania wdrożeniowe (Abioye S. O. i in., 2021).

**Barierą są dane, a nie algorytmy.** Dla gospodarki deskowaniami płyną stąd trzy wnioski. Po pierwsze, algorytmy i moc obliczeniowa przestały być barierą – biblioteki uczenia maszynowego są ogólnodostępne, a modele o architekturze MLP lub LSTM można trenować na zwykłym komputerze. Po drugie, barierą pozostały dane. Głębokie uczenie wymaga dużych zbiorów treningowych, co jest istotnym ograniczeniem w problemach niszowych, dla których brak publicznych baz danych historycznych (Casini M., 2022); przegląd literatury w rozdziale 2 potwierdza, że metody uczące się zawodzą przy braku danych o systemach nowych lub dostosowywanych do projektu, a warunkiem ich stosowania jest systematyczne gromadzenie danych procesowych. W gospodarce deskowaniami przewagę ma zatem ten, kto dysponuje danymi – a jest nim dostawca deskowań, którego systemy rejestrują każdy ruch materiału na każdej obsługiwanej budowie. Po trzecie, większa złożoność modelu nie gwarantuje lepszej prognozy. W porównaniu przeprowadzonym na 1045 miesięcznych szeregach czasowych z konkursu M3 popularne metody uczenia maszynowego ustępowały pod względem dokładności ośmiu tradycyjnym metodom statystycznym we wszystkich badanych horyzontach, przy znacznie większych wymaganiach obliczeniowych (Makridakis S. i in., 2018). Przegląd metod głębokiego uczenia dla szeregów czasowych wskazuje z kolei na rozwój modeli hybrydowych, łączących sprawdzone modele statystyczne z komponentami sieci neuronowych (Lim B., Zohren S., 2021), a w decyzjach o wysokiej stawce postuluje się stosowanie modeli z natury interpretowalnych zamiast objaśniania „czarnych skrzynek” (Rudin C., 2019). Wnioski te uzasadniają przyjęty w rozprawie porządek: najpierw interpretowalne modele odniesienia skalibrowane na danych, dopiero potem sieć neuronowa – przyjmowana do użytku tylko wtedy, gdy przewyższa model odniesienia.

**Sieci neuronowe w literaturze deskowaniowej.** Zastosowania SSN w problematyce deskowań rozwijały się w dwóch nurtach (tabela 3.8). Pierwszy dotyczy doboru systemu deskowania. Punktem wyjścia był system ekspertowy WALLFORM, wspomagający dobór deskowań pionowych na podstawie reguł decyzyjnych (Hanna A. S., Sanvido V. E., 1990). System Neuroform zastąpił reguły siecią neuronową; jego rekomendacje zweryfikowano w porównaniu z systemem WALLFORM, a test statystyczny przy niepełnych danych wejściowych potwierdził odporność sieci na braki danych i jej zdolność uogólniania (Kamarthi S. V. i in., 1990). W tym samym nurcie zastosowano probabilistyczne sieci neuronowe do wyboru deskowań pionowych, wskazując jako kluczowe czynniki wysokość i układ konstrukcyjny budynku, wymagane wykończenie betonu, warunki placu budowy, dostępność sprzętu i kształt budynku (Tam C. M. i in., 2005). Sieci szacujące akceptowalność nowych systemów deskowań uczono z kolei na parach złożonych z wektora sześciu cech użytkowych i wartości akceptowalności, wyznaczonych metodą AHP na podstawie danych od 40 użytkowników w Egipcie (Elazouni A. M. i in., 2005), w nawiązaniu do wcześniejszej metody szacowania akceptowalności technologii budowlanych (Chao L.-C., Skibniewski M. J., 1995).

Drugi nurt dotyczy prognozowania wydajności i pracochłonności robót deskowaniowych. Model opracowany we współpracy z generalnym wykonawcą wykorzystywał dane historyczne i oceny doświadczonych kierowników robót; spośród badanych struktur przyjęto sieć trójwarstwową z rozmytym wyjściem, ponieważ znaczna część danych wejściowych miała charakter subiektywny (Portas J., AbouRizk S., 1997). Metodykę łączącą regresję i sieci neuronowe zastosowano do modeli wydajności betonowania, deskowania i wykańczania powierzchni betonu na danych z ośmiu budów (Sonmez R., Rowings J. E., 1998). Moselhi i Khan nauczyli sieć ze wsteczną propagacją błędu na 221 zestawach danych zebranych w ciągu 10 miesięcy na dwóch budowach, prognozując dzienną wydajność robót deskowaniowych na podstawie dziewięciu zmiennych (temperatura, wilgotność, wielkość brygady, udział pracowników wykwalifikowanych, prędkość wiatru, wysokość pracy, opady, rodzaj elementu i metoda pracy) i uzyskując $R^2 = 0{,}83$ (Moselhi O., Khan Z., 2010). Model szacujący roboczogodziny robót deskowaniowych w budynkach żelbetowych o konstrukcji szkieletowej dał w dwóch studiach przypadku wyniki zbliżone do pomiarów terenowych (Dikmen S., Sonmez M., 2011). W porównaniu kilku typów sieci – GRNN, sieci ze wsteczną propagacją błędu, sieci o radialnych funkcjach bazowych i systemu ANFIS – najlepsze wyniki w modelowaniu wydajności robót deskowaniowych uzyskała sieć ze wsteczną propagacją (Golnaraghi S. i in., 2019), a na danych z dwóch budynków wysokich w Montrealu zaproponowano wariant sieci RBF z dekompozycją LU, trafniejszy od porównywanych metod (Golnaraghi S. i in., 2020).

*Tabela 3.8. Sztuczne sieci neuronowe w literaturze dotyczącej deskowań – zestawienie*

| Praca | Zadanie | Dane i metoda | Wynik | Ograniczenie z perspektywy FFF |
|---|---|---|---|---|
| (Hanna A. S., Sanvido V. E., 1990) | Dobór deskowań pionowych | System ekspertowy (reguły) – punkt odniesienia dla SSN | Narzędzie wspomagające planistę deskowań | Wiedza zamrożona w regułach; brak uczenia |
| (Kamarthi S. V. i in., 1990) | Dobór deskowań pionowych | SSN (Neuroform) zamiast reguł | Zgodność z WALLFORM; odporność na niepełne dane | Decyzja jednorazowa; brak dynamiki przepływu |
| (Portas J., AbouRizk S., 1997) | Wydajność robót deskowaniowych | Dane historyczne i oceny kierowników robót; sieć trójwarstwowa z rozmytym wyjściem | Model wdrożony u generalnego wykonawcy | Poziom operacji; dane częściowo subiektywne |
| (Sonmez R., Rowings J. E., 1998) | Wydajność betonowania, deskowania i wykańczania | Regresja i SSN; dane z 8 budów | Ilościowa ocena wpływu wielu czynników | Poziom brygady; brak zmiennych logistycznych |
| (Tam C. M. i in., 2005) | Dobór deskowań pionowych | Probabilistyczna sieć neuronowa (PNN) | Potwierdzenie w studium przypadku | Dobór systemu, nie zarządzanie jego przepływem |
| (Elazouni A. M. i in., 2005) | Akceptowalność nowych systemów | 40 użytkowników (Egipt); 6 cech; pary uczące z AHP | Zadowalająca trafność na danych testowych | Ocena ex ante; brak danych z eksploatacji |
| (Moselhi O., Khan Z., 2010) | Dzienna wydajność robót deskowaniowych | 221 zestawów danych, 2 budowy, 10 miesięcy; 9 zmiennych; sieć ze wsteczną propagacją | $R^2 = 0,83$ | Brak zmiennych zarządczych (wskazany przez autorów) |
| (Dikmen S., Sonmez M., 2011) | Roboczogodziny robót deskowaniowych | SSN; weryfikacja na 2 studiach przypadku | Wyniki zbliżone do pomiarów terenowych | Poziom obiektu; brak poziomu floty |
| (Golnaraghi S. i in., 2019) | Wydajność robót deskowaniowych | Zmienne środowiskowe i operacyjne; GRNN, BNN, RBFNN, ANFIS | Najlepsza sieć ze wsteczną propagacją (BNN) | Poziom brygady |
| (Golnaraghi S. i in., 2020) | Wydajność montażu deskowań | 2 budynki wysokie (Montreal); sieć LU-RBF | Trafniejsza od porównywanych metod | Mała liczba budów; poziom operacji |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie wskazanych prac.*

Przegląd ten prowadzi do trzech wniosków istotnych dla rozprawy. Po pierwsze, SSN są w problematyce deskowaniowej narzędziem sprawdzonym – zarówno w klasyfikacji (dobór systemu), jak i w regresji (wydajność, pracochłonność). Po drugie, wszystkie przywołane prace zatrzymują się na poziomie pojedynczej decyzji o systemie albo wydajności brygady i opierają się na danych z jednej lub kilku budów; żadna nie podejmuje prognozowania na poziomie przepływu deskowań i floty dostawcy. Po trzecie, modele wydajności obejmują zmienne techniczne i środowiskowe, pomijając czynniki zarządcze – co w przypadku modelu Moselhiego i Khana sami autorzy wskazują jako ograniczenie (Moselhi O., Khan Z., 2010). Należy też pamiętać, że prognoza jest w gospodarce deskowaniami dopiero wejściem do decyzji: rozmieszczenie i przydział deskowań można następnie optymalizować, np. metodami programowania całkowitoliczbowego mieszanego, stosowanymi do planów rozmieszczenia deskowań pionowych (Biruk S., Jaśkowski P., 2017).

**Architektury sieci a zadania metody FFF.** Różne zadania prognostyczne metody FFF wymagają różnych architektur. Zadania o charakterze statycznym – nakład pracy czy czas cyklu dla danej budowy i elementu – odpowiadają sieci jednokierunkowej (MLP). Zadania o charakterze sekwencyjnym –

wykorzystanie materiałowe grup produktowych i terminy zwrotów – odpowiadają sieciom rekurencyjnym, w szczególności LSTM. Sieci konwolucyjne i architektura transformera wyznaczają kierunki dalsze, a uczenie ze wzmocnieniem – perspektywę wsparcia decyzji planisty. Przyporządkowanie to wraz z etapem, na którym dana architektura pojawia się w rozprawie, zawiera tabela 3.9.

*Tabela 3.9. Architektury modeli uczących się a zadania prognostyczne metody FFF*

| Architektura | Właściwość | Zadanie w metodzie FFF | Etap i status w rozprawie |
|---|---|---|---|
| Modele interpretowalne (bilans potencjałów, regresja, statystyki szeregów, prawo Little'a) | Jawna postać; parametry możliwe do weryfikacji (Rudin C., 2019) | Model odniesienia; zapotrzebowanie na pracowników centrów logistycznych; skala zmiany przepływu | Etap 1 – zrealizowany (podrozdz. 5.1 i 5.2) |
| Sieć jednokierunkowa (MLP) | Odwzorowanie nieliniowych zależności wielu zmiennych (Hornik K. i in., 1989) | Nakład pracy [rb-g/m²] i czas cyklu dla budowy i elementu | Etap 2 – po zgromadzeniu danych z próby budów |
| Sieć rekurencyjna (LSTM) | Pamięć zależności odległych w czasie (Hochreiter S., Schmidhuber J., 1997) | Wykorzystanie materiałowe grup produktowych; prawdopodobny termin zwrotu | Etap 3 – po wydłużeniu szeregów i wdrożeniu rejestru zwrotów |
| Sieć konwolucyjna (CNN) | Rozpoznawanie wzorców w obrazach (LeCun Y. i in., 2015) | Kontrola poprawności montażu przed betonowaniem; śledzenie postępu robót | Poza zakresem rozprawy – kierunek dalszych prac |
| Transformer | Mechanizm uwagi, długie sekwencje (Vaswani A. i in., 2017) | Prognozy wielohoryzontowe; analiza treści zleceń i dokumentów | Perspektywa |
| Uczenie ze wzmocnieniem | Uczenie polityki decyzji metodą prób i błędów (Sutton R. S., Barto A. G., 2018) | Wsparcie planisty w modelu symulacyjnym przepływu deskowań | Etap 4 – po zbudowaniu modelu symulacyjnego |

*Źródło: opracowanie własne.*

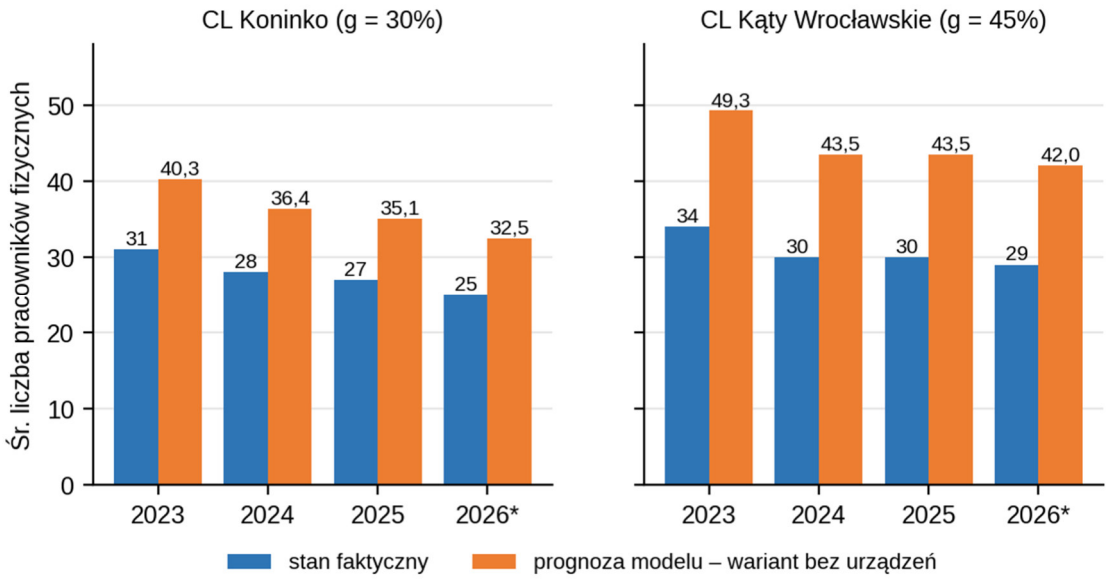
**Czego nauczono model zarządzania deskowaniami w rozprawie.** W podrozdziałach 5.1 i 5.2 – przede wszystkim w podrozdziale 5.2.4 – model zarządzania deskowaniami został nauczony prognozowania zapotrzebowania na podstawie danych rzeczywistych: jego parametry nie zostały przyjęte z literatury ani z normatywu, lecz wyznaczone z danych operacyjnych PERI Polska, a wyniki mają postać prognoz możliwych do skonfrontowania z rzeczywistością (tabela 3.10). Należy przy tym zachować precyzję terminologiczną: modele te mają postać jawnych zależności parametrycznych i statystycznych skalibrowanych na danych, a nie wytrenowanej sieci neuronowej. Stanowią one pierwszy, interpretowalny etap uczenia – i zarazem zbiory uczące, zmienne oraz funkcje celu dla sieci neuronowej, która jest etapem docelowym.

*Tabela 3.10. Warstwa ucząca metody FFF w podrozdziałach 5.1 i 5.2 – dane, model i prognozowana wielkość*

| Rozdział | Dane uczące | Postać modelu | Co model prognozuje | Wynik |
|---|---|---|---|---|
| 5.1 – budowa INDUSTRIAL | Rysunki obmiarowe, harmonogram, pełny wyciąg ruchów materiału (30.10.2023–08.09.2026; 168 dostaw i 186 zwrotów), schematy PERI CAD | Bilans trzech potencjałów: materiału (wartość·dni), ludzi (rb-g/m², kg/rb-g) i dźwigu; analiza wariantowa cyklu | Zapotrzebowanie na deskowania i czas ich zaangażowania; zasób krytyczny; skutek zmiany cyklu | Potencjał z rysunków trafniejszy niż przedmiar (+16,3% betonu); cykl 21 dni skraca dzierżawę parku o 105 dni – pod warunkiem drugiego dźwigu |
| 5.2 – park dzierżawny | 51 raportów tygodniowych dla 22 grup produktowych (1122 obserwacje grupa–tydzień); 2353 pozycje wydań z kodami przyczyn | Statystyki szeregów tygodniowych (średnie, zmienność grup), rozkład odchyleń wydań, prawo Little'a | Dostępność materiału w grupach; skalę zmiany przepływu potrzebną do osiągnięcia celu | Linia bazowa 59,1%; cel 75% wymaga skrócenia czasu poza dzierżawą o ok. 38%; postulat planowania opartego na prawdopodobieństwie zwrotu |
| 5.2.4 – centra logistyczne | Ewidencja przeładunków i zatrudnienia dwóch centrów z lat 2017–2026 (20 obserwacji centrum–rok); wzrost wydajności prac 45% i 30% z danych operacyjnych | Model bilansu pracy $W' = W\cdot(1 + c\cdot s\cdot g)$ z analizą wrażliwości parametru s | Zapotrzebowanie na pracowników fizycznych, tonaż możliwy do przeładowania, koszt pracy | Bez urządzeń: +8–9 (Koninko) i +13–15 (Kąty Wrocławskie) pracowników rocznie; ok. 4,9 mln zł w latach 2023–2026 |

*Źródło: opracowanie własne.*

Najpełniejszą postać ma model z podrozdziału 5.2.4. Wiąże on średnioroczną liczbę pracowników fizycznych W z udziałem prac objętych wsparciem urządzenia (s), wzrostem wydajności tych prac (g) i stopniem objęcia roku wdrożeniem (c), a parametr g został wyznaczony z danych operacyjnych: 45% dla egzoszkieletów w CL Kąty Wrocławskie i 30% dla dźwigu obsługi ręcznej w CL Koninko. Tak skalibrowany model prognozuje zapotrzebowanie na pracowników dla dowolnego tonażu i wariantu wyposażenia (rys. 3.10), a po podstawieniu rzeczywistego kosztu etatu – również koszt pracy. Podrozdział 5.2 uczy model rozkładów: zmienność wykorzystania poszczególnych grup produktowych i „grube ogony" rozkładu odchyleń wydań pokazują, że planowanie oparte na wartościach deklarowanych musi zostać zastąpione planowaniem opartym na prawdopodobieństwie – co wymaga rejestru odchyleń zwrotów, którego wprowadzenie rozprawa postuluje. Podrozdział 5.1 uczy model na poziomie pojedynczej budowy: pokazuje, że zapotrzebowanie na deskowania i czas ich zaangażowania można przewidzieć z danych dostawcy trafniej niż z przedmiarów wykonawcy oraz że prognoza cyklu musi uwzględniać zasób krytyczny.




*Rys. 3.10. Prognoza zapotrzebowania na pracowników fizycznych w centrach logistycznych według modelu skalibrowanego w podrozdziale 5.2.4 (wariant bez urządzeń, s = 100%; 2026* – dane do lipca). Źródło: opracowanie własne.*

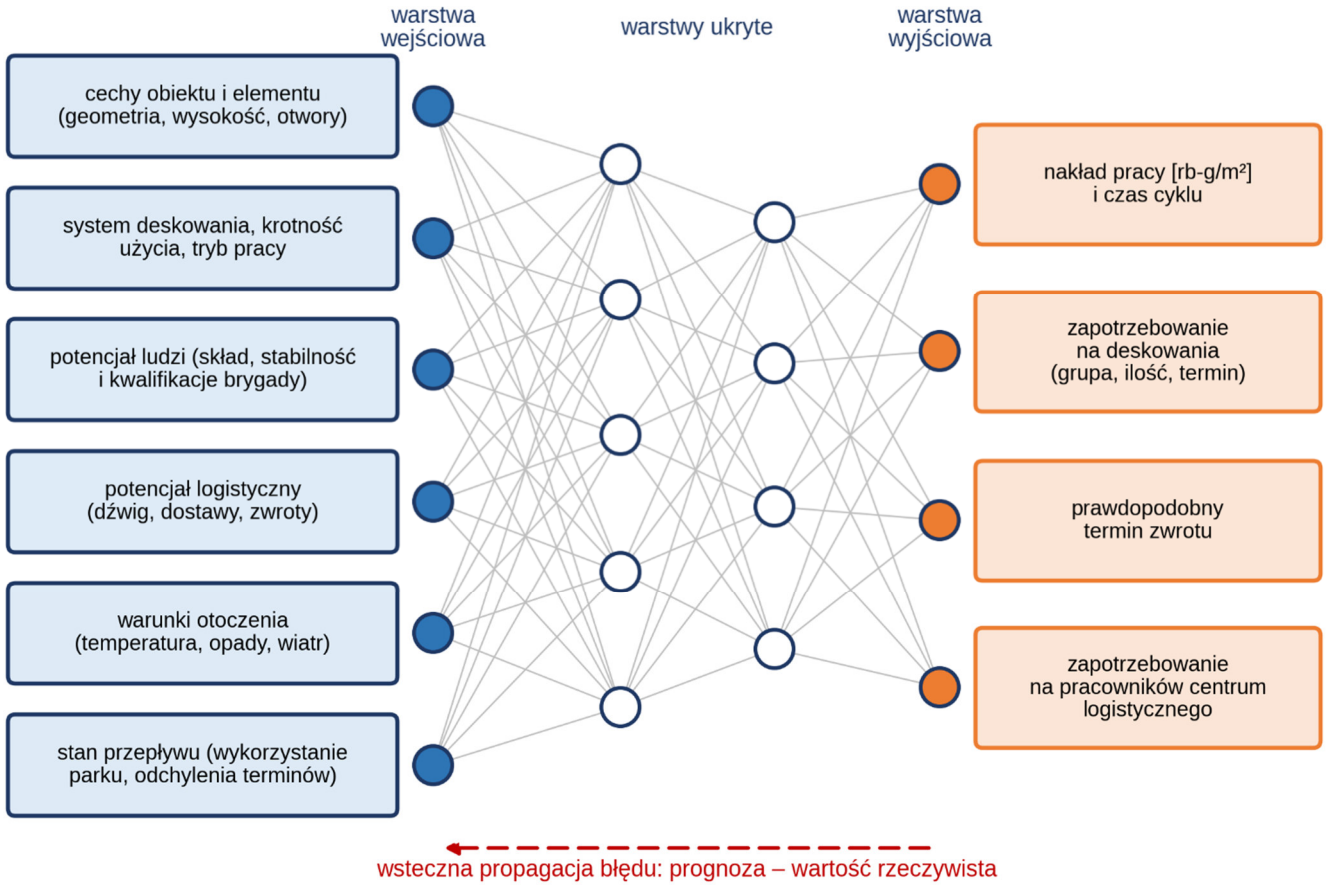
**Koncepcja sieci neuronowej dla metody FFF.** Naturalnym następnym krokiem jest zastąpienie jawnych zależności siecią neuronową, która uczy się zależności nieliniowych bezpośrednio z danych (rys. 3.11). Zestaw zmiennych wejściowych wynika z ustaleń rozprawy (tabela 3.11): predyktory techniczne wyprowadzono z katalogu normatywów w podrozdziale 4.1 (system, wysokość elementu, technika kotwienia, tryb pracy, krotność użycia, geometria, nasycenie otworami), zmienne otoczenia – z pracy Moselhiego i Khana, zmienne logistyczne – ze studium INDUSTRIAL, a zmienne stanu przepływu – z raportów wykorzystania i ewidencji odchyleń. Zasadniczą nowością względem literatury zestawionej w tabeli 3.8 jest grupa zmiennych opisujących potencjał ludzi i sposób zarządzania – a więc te czynniki, których brak w dotychczasowych modelach wskazano w podrozdziale 3.2. Nastawienia pracowników nie da się zmierzyć wprost, można je jednak ująć przez zmienne zastępcze: stabilność składu brygady, rotację pracowników, udział pracowników wykwalifikowanych, stosowanie pomiaru czasów i planowania taktowego czy wskaźnik PPC. W ten sposób sieć neuronowa staje się narzędziem spójnym z proponowaną zmianą sposobu zarządzania: prognozuje wynik układu socjotechnicznego, a nie samego sprzętu.

*Tabela 3.11. Koncepcja zmiennych wejściowych i wyjściowych sieci neuronowej w metodzie FFF*

| Grupa zmiennych | Przykładowe zmienne | Źródło danych w rozprawie |
|---|---|---|
| Wejście: obiekt i element | Rodzaj elementu, geometria (prosta, w rzucie, szyb), wysokość, nasycenie otworami, powierzchnia kondygnacji | Rysunki obmiarowe i schematy PERI CAD (podrozdz. 5.1); katalog normatywów (podrozdz. 4.1) |
| Wejście: system i tryb pracy | System deskowania, technika kotwienia, praca elementami lub zestawami, krotność użycia | Katalog normatywów (podrozdz. 4.1); zestawienia materiałowe (podrozdz. 5.1) |
| Wejście: potencjał ludzi i zarządzanie | Wielkość i stabilność brygady, udział pracowników wykwalifikowanych, rotacja, stosowanie LEAN i pomiaru czasów, PPC | Informacje kierownictwa budowy (podrozdz. 5.1); badanie ankietowe (podrozdz. 4.2); dane centrów logistycznych (podrozdz. 5.2.4) |
| Wejście: potencjał logistyczny | Liczba dźwigów, liczba dostaw i zwrotów, terminowość wydań | Wyciąg ruchów materiału (podrozdz. 5.1); ewidencja odchyleń wydań (podrozdz. 5.2) |

| Grupa zmiennych | Przykładowe zmienne | Źródło danych w rozprawie |
|---|---|---|
| Wejście: otoczenie | Temperatura, opady, wiatr; dojrzałość betonu | Zmienne wg (Moselhi O., Khan Z., 2010); czujniki PERI InSite (podrozdz. 5.4) |
| Wejście: stan przepływu | Wykorzystanie materiałowe grupy, odchylenia wydań i – docelowo – zwrotów | Raporty tygodniowe i ewidencja odchyleń (podrozdz. 5.2) |
| Wyjście | Nakład pracy [rb-g/m²] i czas cyklu; zapotrzebowanie na deskowania (grupa, ilość, termin); prawdopodobny termin zwrotu; zapotrzebowanie na pracowników centrum logistycznego | Wartości rzeczywiste z podrozdz. 5.1 i 5.2 jako wzorce uczące |

*Źródło: opracowanie własne.*




*Rys. 3.11. Schemat koncepcyjny sieci neuronowej prognozującej zapotrzebowanie w metodzie FFF. Źródło: opracowanie własne.*

**Protokół uczenia i walidacji.** Aby sieć mogła zastąpić modele interpretowalne, musi zostać oceniona w sposób wykluczający złudzenie trafności. W rozprawie proponuje się cztery zasady. Po pierwsze, podział danych na zbiór uczący, walidacyjny i testowy powinien przebiegać według budów, a dla szeregów czasowych – według czasu (prognoza zawsze „w przód"), tak aby model nie był oceniany na danych z tej samej budowy lub z tego samego okresu, na których się uczył. Po drugie, każda sieć powinna być porównana z modelem odniesienia z etapu 1 oraz z prostymi metodami statystycznymi, skoro złożone modele nie muszą ich przewyższać (Makridakis S. i in., 2018). Po trzecie, miary błędu powinny być wyrażone w jednostkach decyzyjnych – rb-g/m², dniach, punktach procentowych wykorzystania – i uzupełnione analizą wrażliwości na poszczególne zmienne. Po czwarte, sieć powinna być przyjmowana do użytku wyłącznie wtedy, gdy trafnością przewyższa model interpretowalny w stopniu uzasadniającym utratę przejrzystości (Rudin C., 2019); dopuszczalne jest przy tym rozwiązanie hybrydowe, w którym sieć koryguje prognozę modelu statystycznego (Lim B., Zohren S., 2021).

Dojście do tak rozumianej sieci wymaga etapowania, które wynika z dostępności danych:

1. **Etap 1 (zrealizowany w rozprawie)** – zgromadzenie i uporządkowanie danych operacyjnych oraz skalibrowanie na nich modeli interpretowalnych (podrozdziały 5.1 i 5.2), które wyznaczają zmienne, funkcje celu i poziom odniesienia dla modeli uczących się.
2. **Etap 2** – sieć typu MLP prognozująca nakład pracy i czas cyklu, ucząca się na danych z reprezentatywnej próby budów analizowanych metodyką INDUSTRIAL; punktem odniesienia co do wielkości zbioru jest model Moselhiego i Khana, nauczony na 221 zestawach danych z dwóch budów.
3. **Etap 3** – sieć rekurencyjna (LSTM) prognozująca wykorzystanie materiałowe grup produktowych i terminy zwrotów na podstawie szeregów tygodniowych; warunkiem jest wydłużenie szeregów poza obecne 51 tygodni i wdrożenie rejestru odchyleń zwrotów.
4. **Etap 4** – sprzężenie sieci z modelem symulacyjnym przepływu deskowań (AnyLogic), w którym przebiegi symulacji stają się dodatkowymi danymi uczącymi (Matejević-Nikolić B., Živković L., 2022), a w dalszej perspektywie – środowiskiem uczenia ze wzmocnieniem, wspierającym decyzje planisty.

**Człowiek w pętli decyzyjnej.** Zgodnie z ujęciem Construction 5.0 i z zasadą etycznej sztucznej inteligencji, wymienianą wśród cech Przemysłu 5.0, sieć neuronowa ma w metodzie FFF wspierać, a nie zastępować decyzję ekspercką – co jest też wnioskiem przeglądu literatury w rozdziale 2. Prognoza zapotrzebowania jest informacją dla technologa, koordynatora logistyki i kierownika budowy; decyzja pozostaje przy człowieku, który zna kontekst niedostępny dla modelu. Ma to również uzasadnienie praktyczne: modele uczące się są tak dobre, jak dane, na których je nauczono, a jakość danych w gospodarce deskowaniami zależy od ludzi, którzy je wprowadzają – od rzetelności kodów przyczyn odchyleń po deklarowane terminy zwrotów. Warstwa kognitywna nie zastępuje więc zmiany sposobu zarządzania opisanej w podrozdziale 3.2, lecz ją zakłada.

**Ograniczenia.** Należy wyraźnie wskazać granice przedstawionego ujęcia. Dane pochodzą z jednego przedsiębiorstwa i jednego rynku; szeregi wykorzystania obejmują 12 miesięcy, studium budowy – jeden obiekt, a dane centrów logistycznych – dwadzieścia obserwacji rocznych, co wystarcza do kalibracji modeli parametrycznych, lecz nie do wiarygodnego trenowania sieci głębokiej. Część parametrów modelu z podrozdziału 5.2.4 (udział prac wspieranych, narzut kosztów pracodawcy, wskaźniki rotacji) ma charakter założeń wymagających zastąpienia danymi rzeczywistymi. Z tych powodów rozprawa traktuje sieć neuronową jako kierunek dalszych prac (rozdział 6), a własny wkład upatruje w tym, co jest warunkiem koniecznym każdego uczenia maszynowego: w zdefiniowaniu zmiennych i mierników, zgromadzeniu i zweryfikowaniu danych oraz w zbudowaniu modeli odniesienia, z którymi przyszłe sieci będzie można porównać.

Podsumowując, cztery wątki niniejszego rozdziału tworzą spójną całość. Przejście od Construction 4.0 do Construction 6.0 wskazuje kierunek: od narzędzia, przez człowieka, do systemu uczącego się. Zmiana sposobu zarządzania wskazuje, co należy usprawniać: układ złożony z techniki i ludzi, a nie sam sprzęt. Trzy tezy szczegółowe wskazują, gdzie i jakimi miernikami tę zmianę weryfikować – od pojedynczej operacji po park dzierżawny całego dostawcy. Sztuczne sieci neuronowe wskazują, w jaki sposób zgromadzone doświadczenie przekształcić w zdolność przewidywania – tak, aby deskowanie „płynęło” nie dzięki nadmiarowi sprzętu, lecz dzięki wiedzy o tym, gdzie, kiedy i przez kogo będzie potrzebne. Kolejne rozdziały dostarczają materiału, na którym tezy te są weryfikowane.

# 4. Badania własne – pracochłonność deskowań, potrzeby wykonawców i proces obsługi zlecenia u dostawcy

Rozdział otwiera część badawczą rozprawy. Obejmuje trzy pierwsze z sześciu poziomów analizy, na których weryfikowana jest teza główna (podrozdział 3.3): poziom operacji – pracochłonność montażu, demontażu i przygotowania deskowania do betonowania (Skarżyński A., 1992) w świetle normatywów branżowych (PKN, 2011) (podrozdział 4.1.), poziom rynku – potrzeby, dojrzałość procesową i ograniczenia wykonawców konstrukcji żelbetowych w Polsce (podrozdział 4.2) oraz poziom procesu dostawcy – obsługę zlecenia klienta w PERI Polska od wpływu zamówienia do wydania materiału (podrozdział 4.3). Podrozdział 4.4 zestawia wyniki trzech badań i odnosi je do metody FFF, tez szczegółowych TS1–TS3 oraz warstwy uczącej opartej na sztucznych sieciach neuronowych. Rozdział 5 przenosi analizę na poziom budowy (podrozdział 5.1), parku dzierżawnego i centrów logistycznych (podrozdział 5.2), uwarunkowań rynkowych – kosztu pracy i prefabrykacji (podrozdział 5.3) – oraz technologii (podrozdział 5.4).

## 4.1. Pracochłonność montażu, demontażu i przygotowania deskowania do betonowania w świetle normatywów branżowych

Podrozdział dotyczy poziomu operacji. Dostarcza przesłanek dla tezy szczegółowej TS2 oraz zestawu predyktorów i wartości odniesienia dla warstwy uczącej metody FFF (podrozdział 3.4). Normatywy czasu pracy wywodzą się z tradycji badania pracy (work study), przeniesionej do budownictwa z inżynierii przemysłowej. Analizując modele tego typu, Thomas i in. wskazali, że kładą one nacisk na metody pracy, podczas gdy największą szansę poprawy wydajności stwarza koncentracja na czynnikach, na które ma wpływ kierownictwo (Thomas H. R. i in., 1990). Alternatywą jest model czynnikowy, zakładający, że wydajność brygady zakłócają liczne czynniki; po ich skwantyfikowaniu i odjęciu od danych rzeczywistych uzyskuje się krzywą wydajności idealnej, przydatną do prognozowania (Thomas H. R., Yiakoumis I., 1987). Obie perspektywy wyjaśniają, dlaczego wartości katalogowe traktuje się w rozprawie jako punkt odniesienia, a nie jako wynik ostateczny.

Przedmiotem niniejszego podrozdziału jest analiza niemieckiego branżowego katalogu czasów normatywnych (niem. Richtzeiten) robót szalunkowych pt. „Handbuch Arbeitsorganisation Bau - Schalarbeiten: Rahmenschalung Wände, Stützenschalung. Richtzeiten” (Podręcznik organizacji pracy na budowie. Roboty szalunkowe: deskowanie ramowe ścian, deskowanie słupów. Czasy normatywne) (Zeittechnik-Verlag, 2019), wydanego w 2019 r. przez ztv Zeittechnik-Verlag GmbH (Neu-Isenburg) we współpracy merytorycznej z Institut für Zeitwirtschaft und Betriebsberatung Bau (ISBN 978-3-939216-28-5).

Opracowanie stanowi rozszerzenie i uszczegółowienie wydawanych przez strony układu zbiorowego tabel ARH (Arbeitszeit-Richtwerte-Tabellen Hochbau). Zasadnicza różnica polega na tym, że tabele ARH w wąskim znaczeniu podają czas pojedynczej czynności (np. samego deskowania lub samego rozdeskowania elementu), natomiast analizowany katalog ujmuje obok deskowania (Einschalen) i rozdeskowania (Ausschalen) również proporcjonalne czasy transportu oraz nakład na czyszczenie i olejenie deskowania (Reinigen und Ölen der Schalung). Właśnie ta dekompozycja czyni katalog szczególnie przydatnym w badaniach nad procesem montażu i demontażu deskowań oraz nad przygotowaniem deskowania do betonowania, będących przedmiotem niniejszej rozprawy.

Zakres rzeczowy katalogu obejmuje: część ogólną dla deskowań ramowych ścian (dwustronna i jednostronna technika kotwienia, wysokości deskowania 270 i 360 cm, praca elementami pojedynczymi oraz w zestawach), część producencką (systemy Doka Framax Xlife plus, Hünnebeck Platinum 100, MEVA Mammut XT, PERI MAXIMO) wraz z pomostami roboczymi (Arbeitsbühnen) MEVA i PERI, deskowania okrągłe (radienverstellbare i polygonale Rundschalung) oraz deskowania słupowe z mechanizmem składanym (PASCHAL Grip, PERI QUATTRO). Dla każdego systemu obok wypełnionych tabel wartości normatywnych ARH przewidziano pustą tabelę „Betriebliche Richtzeiten”, w którą przedsiębiorstwo wpisuje własne wartości zakładowe - co wpisuje katalog w logikę ciągłego doskonalenia i kalibracji norm branżowych pomiarem własnym.

**Cel i przeznaczenie opracowania źródłowego**

Celem katalogu nie jest dowiedzenie tezy badawczej, lecz dostarczenie praktykom - kosztorysantom, kierownikom budów oraz służbom przygotowania produkcji - wiarygodnej bazy wartości czasowych do kalkulacji ofertowej, kalkulacji kontraktowej, planowania przebiegu robót, planowania zatrudnienia,

planowania pracy sprzętu oraz planowania terminowego. Wartości wyrażono najczęściej w roboczo-godzinach na metr kwadratowy powierzchni deskowania (rb-g/m²), dla deskowań słupowych - w roboczo-godzinach na słup (rb-g/kpl.), a dla pomostów roboczych - w roboczo-godzinach na metr bieżący (rb-g/mb).

### A. Kontekst ekonomiczno-organizacyjny normatywów czasu

Część wprowadzająca katalogu uzasadnienia ekonomiczne dla stosowania metodycznie wyznaczonych czasów w trzech tezach:

1. konkurencja rynkowa i wahania koniunktury zmuszają przedsiębiorstwa do obniżania kosztów i skracania czasów budowy;
2. producenci deskowań odpowiadają na tę presję nie tylko rozwojem systemów, lecz także wzrostem znaczenia nowoczesnych metod planowania i sterowania przebiegiem robót;
3. płaca akordowa/wynikowa - przy poprawnym stosowaniu - przynosi korzyści zarówno przedsiębiorstwu, jak i pracownikom, jednak bywa wdrażana zbyt rzadko, m.in. z powodu obaw o nakład pracy administracyjnej oraz niepewności przy ustalaniu czasów zadanych (Vorgabezeiten). Problem tej niepewności katalog proponuje łagodzić właśnie przez wartości normatywne typu ARH.

Czasy użytkowania, a przede wszystkim montażu i demontażu stanowią najważniejszą wielkość rachunkową spośród danych podstawowych przedsiębiorstwa i na nich opiera się około jednej trzeciej kosztów wytworzenia. Kalkulacja ofertowa powstaje wcześnie - zanim znane są szczegóły techniczne i warunki wykonawcze - i z natury jest oszacowaniem ceny ofertowej. Dopiero kalkulacja kontraktowa, sporządzana po pozyskaniu zlecenia i przy znanych projektach wykonawczych, pozwala dokładnie wyznaczyć nakłady na robociznę, materiały i sprzęt. Comiesięczne zestawienie czasów zadanych z czasami rzeczywistymi daje porównanie, pełniące jednocześnie funkcję kontroli operacyjnej i podstawy rozliczenia płacy wynikowej.

### B. Metoda wyznaczania wartości normatywnych

Na podstawie zawartych deklaracji (nie podano liczby budów, liczby pomiarów, okresu zbierania danych, techniki chronometrażu ani miar rozproszenia) główne dane zebrano na podstawie następujących elementów metody pomiarowej:

1. **źródło danych:** wartości wyznaczono z czasów cząstkowych pochodzących z licznych pomiarów na budowach; konkretna liczba budów i pomiarów nie jest podana;
2. **sposób agregacji:** modułowo, oddzielnie dla różnych systemów deskowań, przez budowę wartości łącznych z elementarnych czasów cząstkowych przypisanych do poszczególnych czynności;
3. **odniesienie geometryczne:** wartości obliczono dla zdefiniowanego rzutu wzorcowego; dla techniki dwustronnej przyjęto wysokość elementu 270 cm przy 2 miejscach kotwienia na styku oraz 360 cm przy 3 miejscach kotwienia, plus nadstawki; dla techniki jednostronnej zastosowano osobny rzut wzorcowy z podziałem na odcinki robocze;
4. **charakter wyniku:** wartości są średnimi i mają wysoki stopień dokładności wyłącznie dla rzutu, dla którego je policzono; przeniesienie na rzut skomplikowany (wiele naroży, wiele wąskich elementów) daje tylko dokładność przybliżoną i wymaga dostosowania do obiektu.

### C. Założenia obowiązywania wartości normatywnych

Warunki, przy których wartości są ważne i ich jawne wyliczenie jest mocną stroną katalogu i jednocześnie wyznacza granice stosowalności wartości a dla badań własnych stanowi wzorzec definiowania warunków brzegowych pomiaru pracochłonności (tab. 4.1).

*Tabela 4.1. Ogólne założenia obowiązywania wartości normatywnych (pkt 0.1–0.6)*

| Punkt | Założenie (parafraza) |
|---|---|
| 0.1 | Wartości to czasy normatywne (wartości średnie) w godzinach na jednostkę, ujęte wg warunków pracy i podzielone wg branż (Gewerke). |
| 0.11-0.14 | Właściwa i celowa organizacja placu; uporządkowany, skoordynowany przebieg pracy; odpowiednia obsada fachowa; jednorodny skład załogi/grup roboczych przez cały przebieg. |
| 0.2 | Budowa bez nadzwyczajnych wymagań co do warunków lokalnych, powierzchni składowych i dróg dojazdowych. |
| 0.31-0.33 | Sprawne i bezpieczne maszyny i urządzenia; składowanie materiałów oraz punkty poboru wody i prądu w odległości poziomej do 30 m od miejsca wbudowania; przy pracy żurawia - składowanie w zasięgu obrotu wysięgnika. |
| 0.41-0.43 | Grupa robocza złożona z doświadczonych pracowników o właściwym składzie; pracownicy w systemie akordowym odpowiednio wprawni; operatorzy maszyn i żurawi wliczeni w wartość normatywną na czas ich użycia. |
| 0.51-0.54 | Plany wykonawcze dostępne przed rozpoczęciem; transporty w zasięgu żurawia oraz transport poziomy do 30 m - wliczone; bieżąca konserwacja i czyszczenie sprzętu - wliczone; czasy oczekiwania do ¼ godziny na zmianę i pracownika - wliczone. |
| 0.61-0.62 | Obmiar wg VOB część C; świadczenia dodatkowe niewymienione w uwagach należy ustalić i wycenić oddzielnie. |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019)*

### D. Granice rzeczowe procesu — czynności wliczone i niewliczone

Zdefizniowano dokładny zakres operacji ujętych w wartościach. Z punktu widzenia analizy procesu montażu/demontażu i przygotowania deskowania do betonowania jest to najważniejsza część danych, ponieważ jednoznacznie wyznacza granice rzeczowe mierzonego procesu (tab. 4.2).

*Tabela 4.2. □akres czynności wliczonych i niewliczonych w wartości normatywne (pkt 1.02–1.03)*

| Czynności wliczone w czas (pkt 1.02) | Czynności niewliczone w czas (pkt 1.03) |
|---|---|
| informowanie o sposobie wykonania przydzielonej pracy; przemieszczanie, ustawianie i przestawianie środków produkcji i sprzętu; deskowanie i rozdeskowanie elementami pojedynczymi lub w kombinacjach wraz z transportem w zasięgu żurawia przy drodze przejazdu do 30 m; montaż i demontaż dystansów oraz ściągów; zachowanie wymiarów konstrukcji (wysokości, osie, punkty kierunkowe); czyszczenie i nałożenie środka antyadhezyjnego deskowania; grube oczyszczenie stanowiska z odpadów szalunkowych po deskowaniu i rozdeskowaniu | zwilżanie deskowań warunkowane pogodą oraz ich odladzanie; naprawy/utrzymanie deskowania - zależne od rodzaju systemu i liczby użyć, wartości nie podano, do ustalenia zakładowo; stosowanie deskowań konwencjonalnych jako uzupełnienia lub dodatkowych poszyć dla powierzchni strukturalnych; praca w warunkach ograniczonej przestrzeni roboczej; zamykanie otworów po ściągach w betonie; czyszczenie końcowe, sortowanie i sztaplowanie elementów do wywozu |

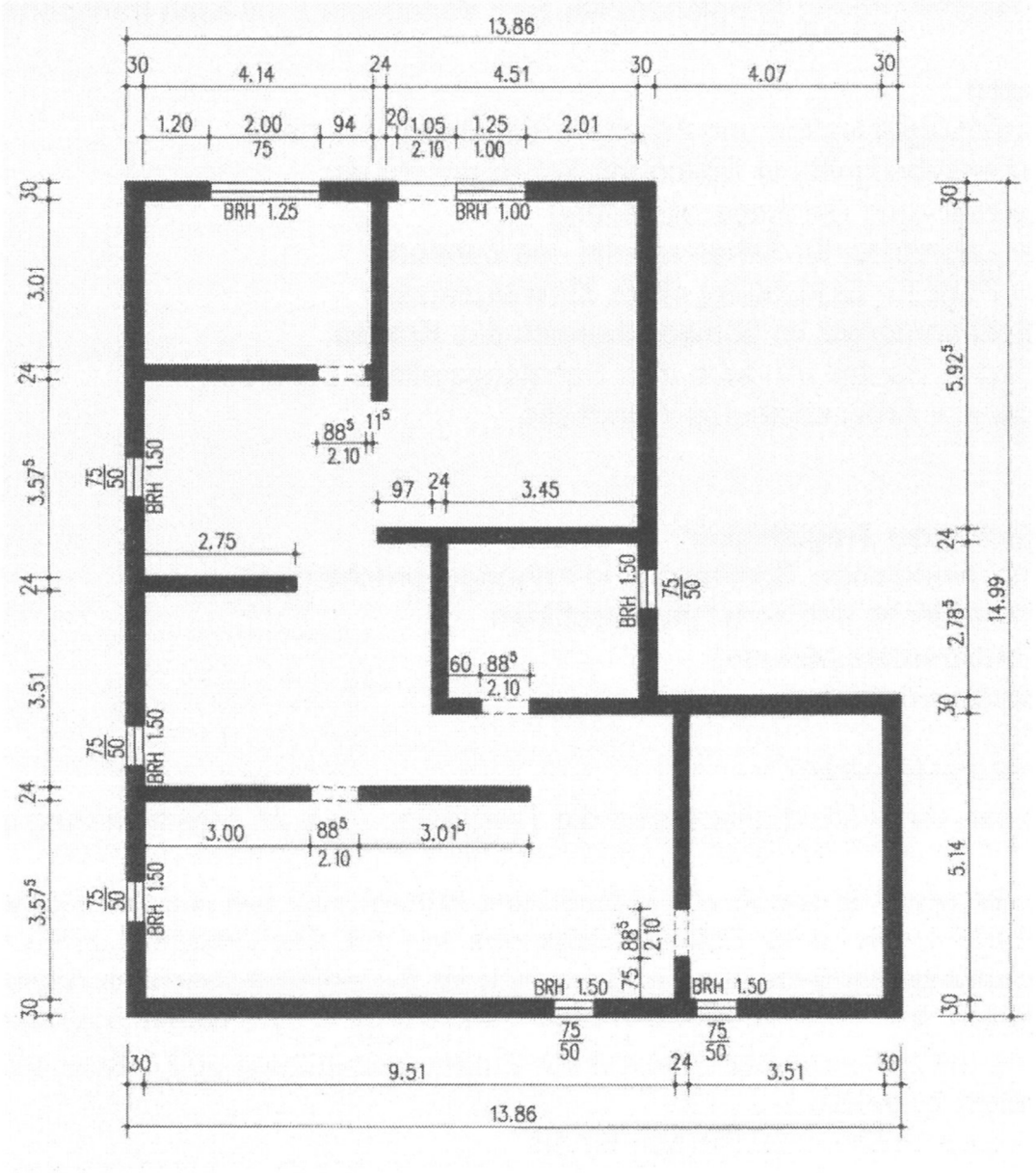
*Źródło: opracowanie własne na podstawie Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019)*

Na szczególne podkreślenie zasługuje wyodrębnienie czyszczenia i aplikowania środka antyadhezyjnego na deskowania jako osobnej pozycji czasowej (0,01–0,02 rb-g/m² w zależności od

systemu). Dla dalszej analizy poświęconej przygotowaniu deskowania do betonowania oznacza to, że operacja ta staje się mierzalna i porównywalna między systemami - a nie ukryta w wartości zbiorczej.

### E. Rzuty wzorcowe i tryby pracy

Wartości dla deskowania ramowego ścian w technice dwustronnej odniesiono do rzutu wzorcowego (Hanna A. S., Senouci A., 1997) o wymiarach zewnętrznych ok. 13,86 × 14,99 m, z układem ścian wewnętrznych i zewnętrznych oraz otworami okiennymi i drzwiowymi. Dla techniki jednostronnego kotwienia zastosowano osobny rzut wzorcowy z podziałem na odcinki robocze BA 1–BA 14.




*Rys. 4.1. Układ wzorcowy ścian do przygotowania zestawu deskowania ściannego. Źródło:* Zeittechnik-Verlag, 2019

Badania nakładów rozróżniają dwa tryby wielokrotnego użycia deskowania: pracę pojedynczymi elementami, gdzie zestaw jest po każdym takcie rozkładany na pojedyncze elementy i magazynowany pośrednio, oraz pracę zestawami, gdzie do czterech elementów przestawia się razem, a na pojedyncze rozkłada dopiero przy ostatnim rozdeskowaniu. Rozróżnienie to ma charakter stricte organizacyjny a a jego ilościowy skutek stanowi jeden z najciekawszych wyników katalogu z perspektywy LEAN Management.

Katalog definiuje ponadto wzorcową sekwencję operacji deskowania i rozdeskowania, którą można traktować jako gotową mapę procesu:

1. rozładunek elementów i transport żurawiem na plac składowy deskowania;
2. transport elementów, części i osprzętu żurawiem na poziom roboczy;
3. transport poziomy na poziomie roboczym (do 30 m);
4. deskowanie elementów pojedynczo z użyciem przepisanej konstrukcji szalunkowej;
5. spryskanie poszycia środkiem antyadhezyjnym - po raz pierwszy przy 1. takcie;
6. zabezpieczenie elementów podporami montażowymi i ich zakotwienie do stropu;
7. zespolenie deskowania systemowymi zamkami napinającymi
8. rozłączenie urządzeń napinających, zluzowanie i demontaż podpór, oderwanie elementów od konstrukcji;
9. zdjęcie i odtransportowanie deskowania na skład pośredni;
10. czyszczenie deskowania i ponowne spryskanie poszycia środkiem antyadhezyjnym;
11. po ostatnim rozdeskowaniu — transport elementów żurawiem na plac załadunkowy.

Sekwencja ta stanowi w badaniach własnych szkielet do mapowania strumienia wartości (VSM) procesu deskowaniowego.

### F. Jednostki i konwencje zapisu

Katalog posługuje się jednostkami metrycznymi, nie zachodzi więc potrzeba konwersji wartości. Wymagane jest natomiast ujednolicenie nazewnictwa z polską praktyką kalkulacyjną: jednostka Std./Einheit (godzina na jednostkę) odpowiada polskiej roboczogodzinie na jednostkę (rb-g/jedn.), przy tożsamości wartości liczbowych (tab. 4.3).

*Tabela 4.3. Jednostki i symbole stosowane w katalogu oraz ich odpowiedniki w polskiej praktyce*

| Zapis w katalogu | Znaczenie | Odpowiednik polski (bez zmiany wartości) |
|---|---|---|
| Std./m² | godziny na metr kwadratowy deskowania | rb-g/m² |
| Std./Stk (Std./Stütze) | godziny na sztukę / na słup | rb-g/szt. |
| Std./m | godziny na metr bieżący (pomosty) | rb-g/mb |
| BRH (Brüstungshöhe) | wysokość podokiennika | wys. podokiennika [m] |
| Spannstellen/Stoß | miejsca kotwienia na styku elementów | punkty kotwienia na styku [szt.] |
| Einschalen / Ausschalen | deskowanie / rozdeskowanie | montaż / demontaż deskowania |
| Richtzeit / Vorgabewert | czas normatywny (średni) / wartość zadana | norma orientacyjna / norma zakładowa |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019).*

### G. Metodyka niniejszej analizy i zastrzeżenia

Wszystkie wartości liczbowe, nazwy systemów i jednostki przytoczono dosłownie za dokumentem; tam, gdzie informacji w dokumencie brak (np. liczność próby pomiarowej), zaznaczono to wprost. Zestawienia porównawcze, udziały procentowe, rankingi oraz wykresy stanowią opracowanie własne na danych źródłowych i zostały każdorazowo tak oznaczone. Ze względu na różnice założeń między częścią ogólną katalogu (brygada wzorcowa: 3 robotników fachowych + 1 operator żurawia) a częścią producencką (2 robotników fachowych + 1 operator żurawia) porównania międzygrupowe mają charakter orientacyjny.

**Wyniki pomiarów poszczególnych systemów deskowań**

**1) Deskowanie ramowe ścian — część ogólna, praca pojedynczymi elementami**

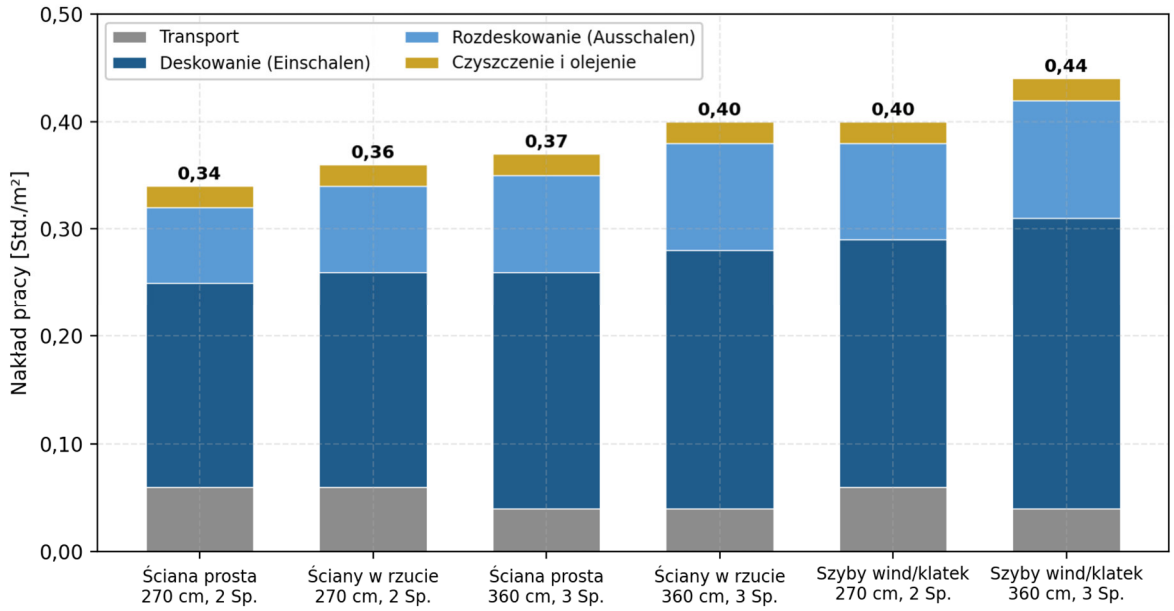
Brygada wzorcowa: 3 robotników fachowych + 1 operator żurawia, praca wielokrotna pojedynczymi elementami) obejmuje warianty geometryczne rzutu wzorcowego dla dwóch wysokości deskowania: 270 cm (2 ściągi na wysokości) oraz 360 cm (3 ściągi na wysokości).

Wartości zestawiono w tab. 4.4, a ich strukturę zilustrowano na rys. 4.2.

*Tabela 4.4. Deskowanie ramowe ścian — część ogólna, praca pojedynczymi elementami [rb-g/m²]*

| Wariant / wysokość / ilość ściągów na wysokości deskowania | Transport | Deskowanie | Rozdeskowanie | Czyszczenie i aplikowanie środka antyadhezyjnego | SUMA |
|---|---|---|---|---|---|
| Ściana prosta, 270 cm, 2 | 0,06* | 0,19 | 0,07 | 0,02 | 0,34 |
| Ściany w rzucie, 270 cm, 2 | 0,06* | 0,20 | 0,08 | 0,02 | 0,36 |
| Ściana prosta, 360 cm, 3 | 0,04* | 0,22 | 0,09 | 0,02 | 0,37 |
| Ściany w rzucie, 360 cm, 3 | 0,04* | 0,24 | 0,10 | 0,02 | 0,40 |
| Szyby wind i klatek, 270 cm, 2 | 0,06* | 0,23 | 0,09 | 0,02 | 0,40 |
| Szyby wind i klatek, 360 cm, 3 | 0,04* | 0,27 | 0,11 | 0,02 | 0,44 |
| Nadstawki- jako dodatek | 0,03 | 0,13 | 0,07 | - | 0,23 |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019)*




*Rys. 4.2. Struktura nakładu pracy — deskowanie ramowe ścian, część ogólna, praca pojedynczymi elementami. Źródło: opracowanie własne na podstawie Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019)*

Z zestawienia wynikają trzy prawidłowości:

1. nakład rośnie wraz z wysokością deskowania i liczbą ściągów na wysokości - dla ściany prostej z 0,34 (270 cm, 2 ściągi na wysokości) do 0,37 rb-g/m² (360 cm, 3 ściągi na wysokości);
2. przejście od ściany prostej do ścian w rzucie (naroża, połączenia) podnosi nakład o 0,02–0,03 rb-g/m², a najbardziej pracochłonne są szyby wind i klatek schodowych (0,40–0,44 rb-g/m²), co odzwierciedla utrudnienia geometryczne pracy w zamkniętym obrysie;
3. we wszystkich wariantach nakład na czyszczenie i olejenie (aplikacja środka antyadhezyjnego) deskowania jest stały (0,02 rb-g/m²) - pozycja ta jest zatem niezależna od geometrii, a zależna wyłącznie od powierzchni poszycia.

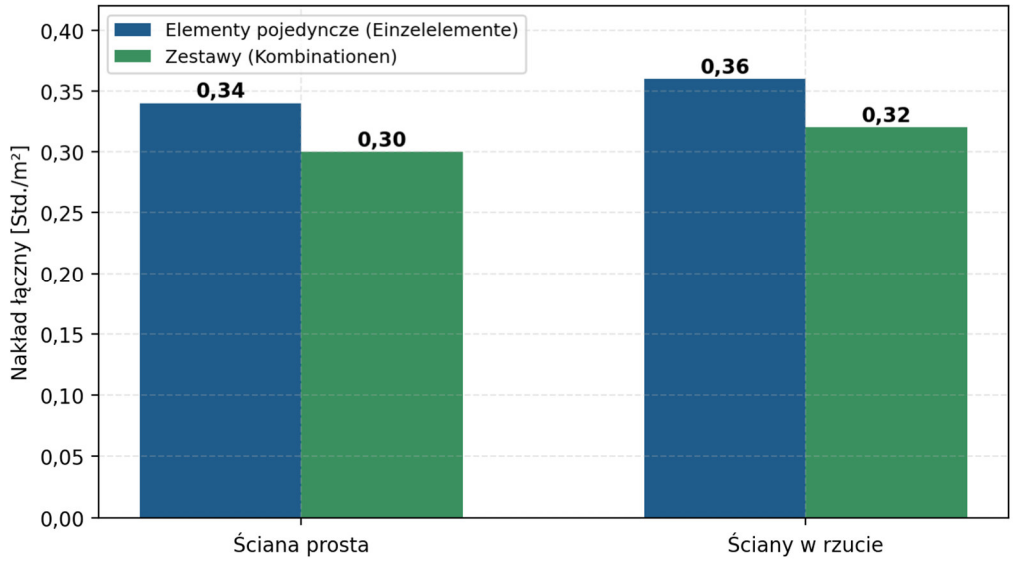
### 2) Praca zestawami - wpływ organizacji pracy

Dla wysokości 270 cm (2 ściągi na wysokości) katalog podaje równolegle wartości dla pracy zestawami, w której do czterech elementów przestawia się razem, bez rozkładania na pojedyncze elementy po każdym takcie (tab. 4.5, rys. 4.3).

*Tabela 4.5. Deskowanie ramowe ścian - praca zestawami, 270 cm, 2 ściągi na wysokości [rb-g/m²]*

| Wariant | Transport | Deskowanie | Rozdeskowanie | Czyszczenie i olejenie | Suma |
|---|---|---|---|---|---|
| Ściana prosta (zestawy) | 0,06* | 0,18 | 0,04 | 0,02 | 0,30 |
| Ściany w rzucie (zestawy) | 0,06* | 0,19 | 0,05 | 0,02 | 0,32 |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019)*




*Rys. 4.3. Porównanie nakładu łącznego: praca pojedynczymi elementami vs praca zestawami, 270 cm, 2 ściągi na wysokości. Źródło: opracowanie własne na podstawie Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019)*

Porównanie z tab. 4.4 dokumentuje wymierny efekt czysto organizacyjnej zmiany sposobu pracy: dla ściany prostej nakład spada z 0,34 do 0,30 rb-g/m², a dla ścian w rzucie z 0,36 do 0,32 rb-g/m² - w obu przypadkach o 0,04 rb-g/m², czyli o ok. 11,8% względnie 11,1% (obliczenie własne). Oszczędność powstaje niemal w całości w fazie rozdeskowania (0,04 vs 0,07 rb-g/m² dla ściany prostej) oraz częściowo w fazie deskowania (0,18 vs 0,19 Std./m²), przy niezmienionym transporcie oraz czyszczeniu i olejeniu. Jest to bezpośredni, skwantyfikowany w źródle branżowym argument na rzecz tezy, że innowacje organizacyjne - bez zmiany systemu deskowania ani technologii - istotnie redukują pracochłonność procesu. Wątek ten koresponduje wprost z zasadami LEAN Management (eliminacja zbędnego ruchu i nadmiernego przetwarzania przez przestawianie elementów w zestawach).

### 3) Systemy producenckie deskowań ramowych ścian

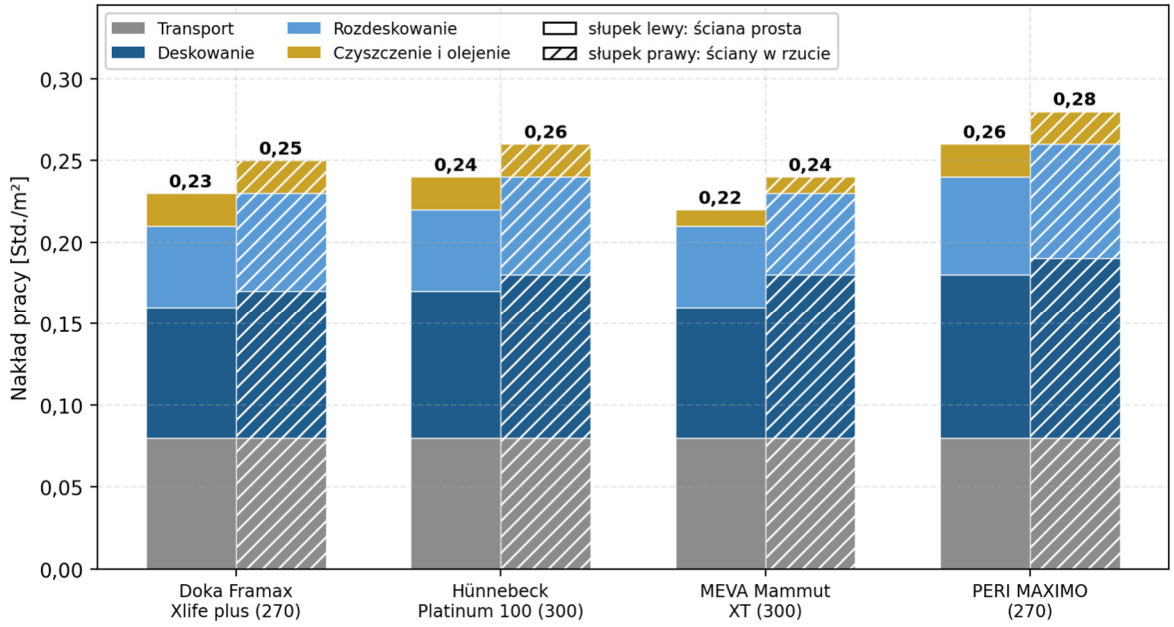
Część producencka katalogu podaje wartości dla czterech systemów deskowań ramowych ścian: Doka Framax Xlife plus, Hünnebeck Platinum 100, MEVA Mammut XT oraz PERI MAXIMO. Wartości te odnoszą się do pracy jednokrotnej pojedynczymi elementami oraz do brygady wzorcowej 2 robotników fachowych + 1 operator żurawia - a więc do założeń odmiennych niż w części ogólnej (praca wielokrotna, brygada 3+1). Z tego względu wartości producenckich nie należy porównywać wprost z wartościami części ogólnej; porównania między samymi systemami producenckimi są natomiast w pełni uprawnione, gdyż założenia są dla nich jednolite (tab. 4.6, rys. 4.4).

*Tabela 4.6. Systemy producenckie deskowań ramowych ścian - praca jednokrotna, pojedyncze elementy [rb-g/m²]*

| System / wysokość / wariant | Transport | Deskowanie | Rozdeskowanie | Czyszczenie i olejenie | Suma |
|---|---|---|---|---|---|
| Doka Framax Xlife plus, 270 cm — ściana prosta | 0,08* | 0,08 | 0,05 | 0,02 | 0,23 |
| Doka Framax Xlife plus, 270 cm - ściany w rzucie | 0,08* | 0,09 | 0,06 | 0,02 | 0,25 |
| Hünnebeck Platinum 100, 300 cm - ściana prosta | 0,08* | 0,09 | 0,05 | 0,02 | 0,24 |

| System / wysokość / wariant | Transport | Deskowanie | Rozdeskowanie | Czyszczenie i olejenie | Suma |
|---|---|---|---|---|---|
| Hünnebeck Platinum 100, 300 cm - ściany w rzucie | 0,08* | 0,10 | 0,06 | 0,02 | 0,26 |
| MEVA Mammut XT, 300 cm - ściana prosta | 0,08* | 0,08 | 0,05 | 0,01 | 0,22 |
| MEVA Mammut XT, 300 cm - ściany w rzucie | 0,08* | 0,10 | 0,05 | 0,01 | 0,24 |
| PERI MAXIMO, 270 cm - ściana prosta | 0,08* | 0,10 | 0,06 | 0,02 | 0,26 |
| PERI MAXIMO, 270 cm - ściany w rzucie | 0,08* | 0,11 | 0,07 | 0,02 | 0,28 |

*Źródło: Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019), * Transport 0,04 + 0,04 = 0,08 — zsumowano. Brygada wzorcowa: 2 robotników fachowych + 1 operator żurawia.*




*Rys. 4.4. Struktura nakładu pracy w systemach producenckich deskowań ramowych ścian. Źródło: opracowanie własne na podstawie Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019)*

Rozstęp między systemami wynosi 0,04rb-g/m² dla ściany prostej (od 0,22 dla MEVA Mammut XT do 0,26 dla PERI MAXIMO) i tyle samo dla ścian w rzucie (0,24–0,28rb-g/m²), co odpowiada różnicy względnej ok. 18% między wariantem najkorzystniejszym (Proverbs D., Holt G., 1999b) a najmniej korzystnym (obliczenie własne). Zwraca uwagę, że MEVA Mammut XT jako jedyny system ma nakład na czyszczenie i olejenie 0,01 zamiast 0,02 rb-g./m² - katalog wiąże właściwości tego systemu m.in. ze zintegrowanymi punktami (otworami) po ściągach **co jest zastanawiające, gdyż system MAXIMO jest uznawany za najbardziej efektywny system deskowań ściennych na świecie.** Różnice między systemami wynikają także z wielkości formatów elementów i rozwiązań osprzętu, przy czym katalog nie dekomponuje wpływu poszczególnych cech konstrukcyjnych na nakład - czyni to z tych danych materiał wyjściowy, a nie gotowe wyjaśnienie przyczynowe.

### 4) Pomosty robocze

Dla dwóch systemów pomostów roboczych współpracujących z deskowaniami ściennymi katalog podaje nakłady w godzinach na metr bieżący pomostu, rozliczane na poziom - tab. 4.7.

*Tabela 4.7. Pomosty robocze — montaż i demontaż na poziom [rb-g/mb]*

| System pomostu | Transport | Montaż | Demontaż | Suma |
|---|---|---|---|---|
| MEVA Betonierklappbühne BKB 125/235 (Mammut XT), przestawianie żurawiem | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,09 |
| PERI Konsolensystem MXK (MAXIMO/TRIO), montaż z poziomu ziemi ręcznie | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,08 |

*Źródło: Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019).*

Nakłady obu systemów są zbliżone (0,08–0,09 rb-g/mb na poziom), przy odmiennej technice montażu: pomost MEVA przestawiany jest żurawiem, natomiast konsole PERI MXK montowane są ręcznie z poziomu ziemi, co zmniejsza zaangażowanie żurawia - **zasobu zwykle krytycznego w taktowanym cyklu deskowaniowym**. Z perspektywy planowania taktowego różnica ta może być istotniejsza niż nominalna różnica 0,01 rb-g/mb.

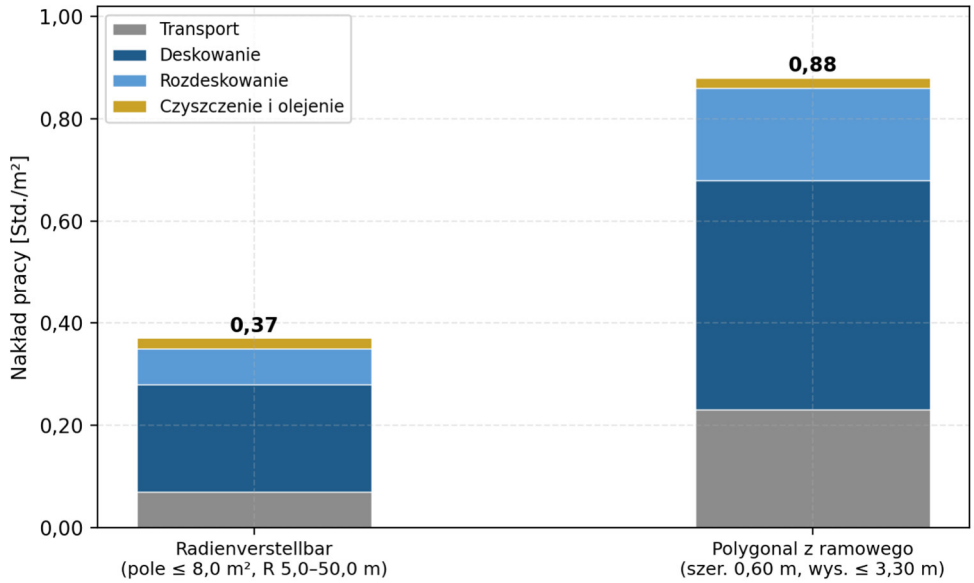
**5) Deskowania okrągłe (Rundschalung)**

Dla ścian krzywoliniowych katalog rozróżnia deskowanie okrągłe nastawne (radienverstellbare Rundschalung), o płynnie regulowanym promieniu, oraz deskowanie wielokątne (polygonale Rundschalung) zestawiane z deskowania ramowego, aproksymujące łuk odcinkami prostymi o szerokości 0,60 m (tab. 4.8, rys. 4.5).

*Tabela 4.8. Deskowania okrągłe — praca pojedynczymi elementami [rb-g/m²]*

| Wariant | Transport | Deskowanie | Rozdeskowanie | Czyszczenie i olejenie | Suma |
|---|---|---|---|---|---|
| Radienverstellbar, pole ≤ 8,0 m², R 5,0–50,0 m | 0,07* | 0,21 | 0,07 | 0,02 | 0,37 |
| Polygonal z deskowania ramowego, szer. 0,60 m, wys. ≤ 3,30 m | 0,23* | 0,45 | 0,18 | 0,02 | 0,88 |

*Źródło: Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019); * transport 0,06 (deskowanie) + 0,01 (rozdeskowanie); polygonal: 0,13 + 0,10 - zsumowano.*




*Rys. 4.5. Deskowania okrągłe — porównanie nakładu deskowania nastawnego i wielokątnego. Źródło: opracowanie własne na podstawie Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019)*

Deskowanie wielokątne zestawiane z systemu ramowego jest ponad dwukrotnie pracochłonniejsze od okrągłego nastawnego (0,88 vs 0,37 rb-g/m²; różnica +138% względem wariantu nastawnego - obliczenie własne), przy czym różnica narasta we wszystkich czynnościach: w transporcie (0,23 vs 0,07), deskowaniu (0,45 vs 0,21) i rozdeskowaniu (0,18 vs 0,07). Jest to ilościowa miara kosztu improwizowanego doboru deskowania - adaptacja systemu ramowego do geometrii łukowej, choć technicznie możliwa, generuje istotny narzut pracochłonności.

Dla deskowań okrągłych katalog podaje ponadto czynności rozliczane odrębnie: montaż i demontaż elementów czołowych 0,45 rb-g/kpl, czołowe odcięcia betonowania 1,00 rb-g/kpl, montaż nadstawek 0,10 i ich demontaż 0,08 rb-g/kpl, a także dodatki dla wariantu nastawnego: jednokrotny użytek (1 takt) 0,17 rb-g/m², nastawienie promienia 0,08 oraz jego zerowanie 0,06 rb-g/m².

### 6) Deskowania słupowe z mechanizmem składanym

Dla deskowań słupowych katalog przyjmuje odmienną konwencję rozliczeniową: nakład podawany jest na słup (rb-g/kpl), a całość dzieli się na powtarzalny cykl deskowania (transport, deskowanie, rozdeskowanie z przestawieniem, czyszczenie i olejenie) oraz jednorazowe wartości podstawowe montażu i demontażu kompletu w pozycji leżącej (tab. 4.9 i 4.10, rys. 4.6).

*Tabela 4.9. Deskowania słupowe — powtarzalny cykl deskowania [rb-g/kpl]*

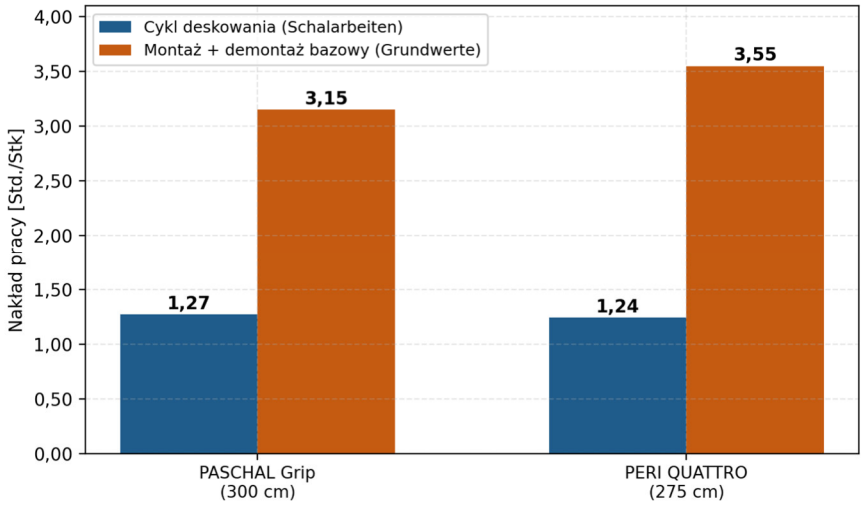
| System / wysokość / zakres przekrojów | Transport | Deskowanie | Rozdeskowanie i przestawienie | Czyszczenie i olejenie | Suma |
|---|---|---|---|---|---|
| PASCHAL Grip, 300 cm (przekroje 20/20–60/60 cm) | 0,26* | 0,55 | 0,30 | 0,16 | 1,27 |
| PERI QUATTRO, 275 cm (przekroje 20/20–60/60 cm) | 0,26* | 0,54 | 0,28 | 0,16 | 1,24 |

*Źródło: Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019); * Transport 0,13 + 0,13 - zsumowano.*

*Tabela 4.10. Deskowania słupowe - wartości podstawowe montażu i demontażu kompletu w pozycji leżącej [rb-g/kpl]*

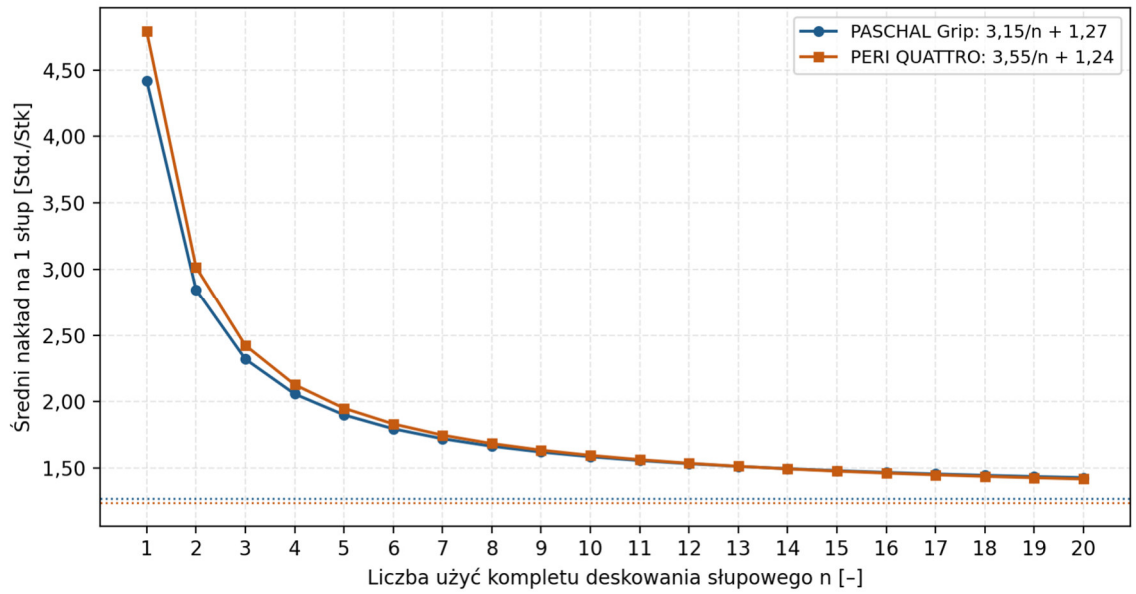
| System | Montaż bazowy (leżąco) | Demontaż bazowy (leżąco) | Suma |
|---|---|---|---|
| PASCHAL Grip | 1,90 | 1,25 | 3,15 |
| PERI QUATTRO | 2,10 | 1,45 | 3,55 |

*Źródło: Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019). Dodatki: nadstawka - montaż 0,42 / demontaż 0,23 Std./Stk; zmiana szerokości 2-skrzydłowa 0,43 (PASCHAL) / 0,45 (PERI), 4-skrzydłowa 0,86 (PASCHAL) / 0,90 (PERI) rb-g/kpl*




*Rys. 4.6. Deskowania słupowe - składniki nakładu na słup: powtarzalny cykl i wartości podstawowe (opracowanie własne na danych: □eittechnik-Verlag, 2019)*

Oba systemy mają niemal identyczny cykl deskowania (1,27 vs 1,24 Std./Stk; różnica 2,4% — obliczenie własne), natomiast wyraźnie różnią się nakładem bazowym: komplet PERI QUATTRO wymaga o 0,40 rb-g/kpl (ok. 12,7%) więcej na jednorazowy montaż i demontaż niż PASCHAL Grip. Rozkład łącznej pracochłonności między te składniki zależy więc od krotności użycia kompletu, co zilustrowano na rys. 4.7: średni nakład na słup przy n użyciach kompletu wynosi S(n) = G/n + c, gdzie G — Summe Grundwerte, c — cykl deskowania (model własny na danych źródłowych).



*Rys. 4.7. Średni nakład na słup w funkcji liczby użyć kompletu deskowania słupowego — model amortyzacji wartości podstawowych. Źródło: opracowanie własne na podstawie Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019).*

Z modelu wynika, że przy jednym użyciu przewaga PASCHAL Grip sięga 0,37 rb-g/kpl (4,42 vs 4,79), lecz już przy czterech użyciach maleje do ok. 0,13, a od ok. dziesięciu użyć oba systemy stają się praktycznie równoważne, przy czym asymptotycznie minimalnie korzystniejszy jest PERI QUATTRO (niższy cykl: 1,24 vs 1,27 rb-g/kpl). Jest to klasyczna zależność amortyzacji nakładu jednorazowego, istotna dla decyzji o doborze systemu w zależności od liczby słupów na komplecie i planowanej rotacji.

### 7) Dodatki - czynności rozliczane odrębnie

Poza nakładem podstawowym katalog wyodrębnia czynności dodatkowe rozliczane na sztukę lub na m² (tab. 4.11). Ich osobna wycena doprecyzowuje granice rzeczowe wartości podstawowych i pozwala kalkulować obiekty o niestandardowym nasyceniu otworami i detalami.

*Tabela 4.11. Dodatki dla deskowań ściennych*

| Dodatek | Wartość | Jednostka |
|---|---|---|
| Rusztowania robocze i ochronne (część ogólna) | 0,03 | Rb-g/m² |
| Szyna łączenia zbrojenia | 0,15 | rb-g/kpl |
| Otwór drzwiowy | 1,60 | rb-g/kpl |
| Otwór okienny | 1,15 | rb-g/kpl |
| Otwór okna piwnicznego | 0,25 | rb-g/kpl |
| Zmiana grubości ściany z pierścieniami dystansowymi (PERI MAXIMO) | 0,02 | rb-g/m² |

*Źródło: Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019). W rozdziałach producenckich występują dodatki specyficzne dla systemu, np. zmiana grubości ściany u Doki i Hünnebeck.*

Dla badań nad pracochłonnością istotna jest zwłaszcza wysoka wycena otworów: pojedynczy otwór drzwiowy (1,60 rb-g/kpl) odpowiada nakładowi deskowania blisko 5 m² ściany prostej w części ogólnej (obliczenie własne: 1,60 / 0,34 ≈ 4,7 m²). Nasycenie rzutu otworami jest więc naturalnym kandydatem na predyktor w modelu predykcji pracochłonności (Proverbs D., Holt G., 1999a).

### 8) Zbiorcza analiza porównawcza

#### a) Ranking nakładu - deskowanie ramowe ściany proste

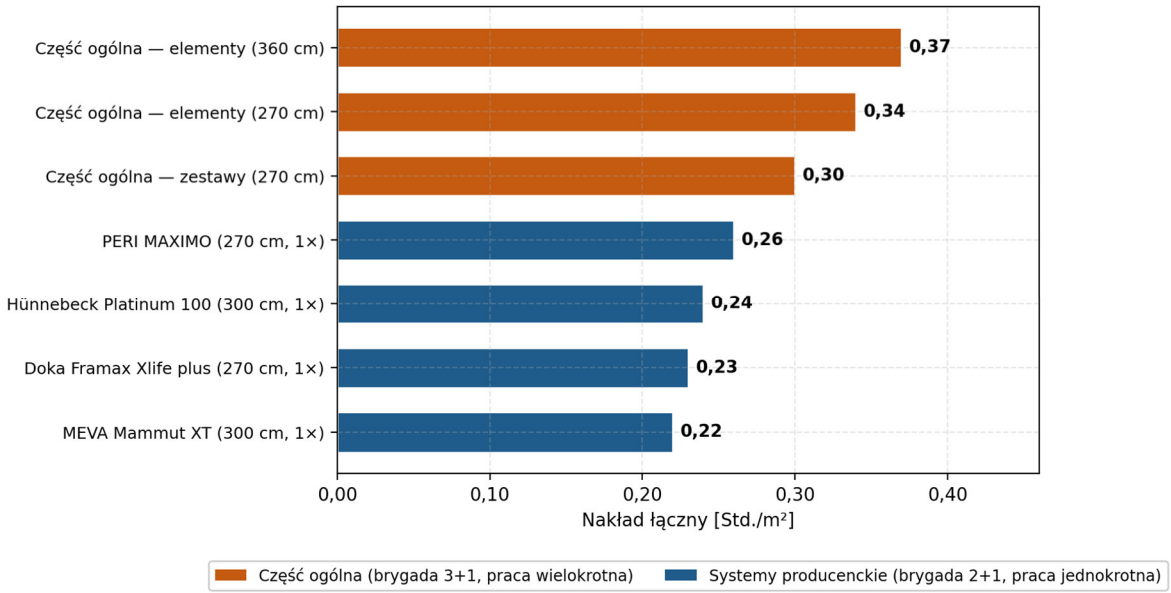
W tab. 4.12 i na rys. 4.8 uszeregowano warianty deskowania ściany prostej według rosnącego nakładu łącznego. Zestawienie ma charakter orientacyjny: warianty części ogólnej odniesiono do brygady 3+1 i pracy wielokrotnej, a systemy producenckie do brygady 2+1 i pracy jednokrotnej, więc szereg nie jest ściśle równoważny metodycznie.

*Tabela 4.12. Ranking nakładu łącznego — deskowanie ramowe ściany prostej (analiza własna)*

| Lp. | Wariant | Summe [Std./m²] | Uwagi o założeniach |
|---|---|---|---|
| 1 | MEVA Mammut XT (300 cm, jednokrotnie) | 0,22 | brygada 2+1; czyszczenie 0,01 |
| 2 | Doka Framax Xlife plus (270 cm, jednokrotnie) | 0,23 | brygada 2+1 |

| Lp. | Wariant | Summe [Std./m²] | Uwagi o założeniach |
|---|---|---|---|
| 3 | Hünnebeck Platinum 100 (300 cm, jednokrotnie) | 0,24 | brygada 2+1 |
| 4 | PERI MAXIMO (270 cm, jednokrotnie) | 0,26 | brygada 2+1 |
| 5 | Rahmenschalung ogólna — zestawy (270 cm) | 0,30 | brygada 3+1 |
| 6 | Rahmenschalung ogólna — elementy (270 cm) | 0,34 | brygada 3+1 |
| 7 | Rahmenschalung ogólna — elementy (360 cm) | 0,37 | brygada 3+1; 3 Spannstellen |

*Źródło: analiza własna; wartości jednostkowe - Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019), tab. 4.4–4.6.*




*Rys. 4.8. Ranking nakładu łącznego dla deskowania ściany prostej - z rozróżnieniem odmiennych założeń części ogólnej i producenckiej. Źródło: opracowanie własne na podstawie Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019)*

### b) Struktura nakładu w podziale na czynności

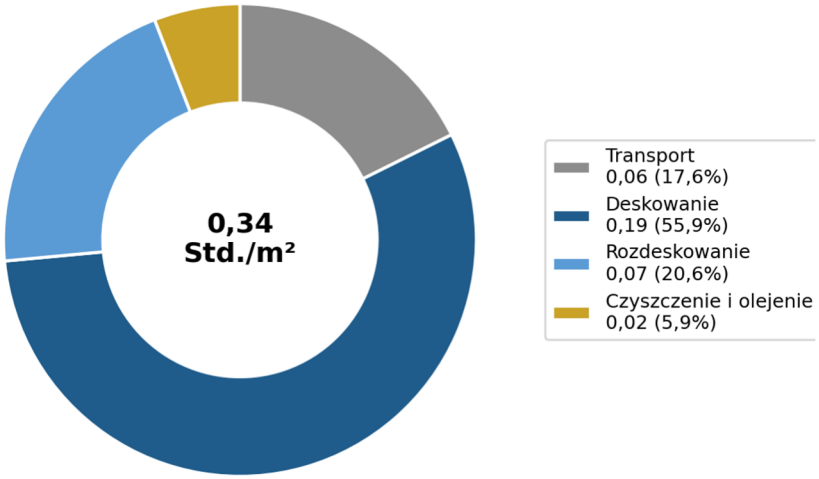
Dla wariantu odniesienia (ściana prosta, 270 cm, część ogólna, pojedyncze elementy) strukturę nakładu 0,34rb-g/m² przedstawiono w tab. 4.13 i na rys. 4.9. Udziały procentowe stanowią obliczenie własne; wartości bazowe pochodzą ze źródła.

*Tabela 4.13. Struktura nakładu 0,34 rb-g/m² w podziale na czynności (udziały: obliczenie własne)*

| Czynność | Wartość [rb-g/m²] | Udział [%] |
|---|---|---|
| Transport (deskowanie + rozdeskowanie) | 0,06 | ok. 17,6 |
| Deskowanie | 0,19 | ok. 55,9 |
| Rozdeskowanie | 0,07 | ok. 20,6 |

| Czynność | Wartość [rb-g/m²] | Udział [%] |
|---|---|---|
| Czyszczenie i olejenie (aplikowanie środka antyadhezyjnego) | 0,02 | ok. 5,9 |
| **RAZEM** | **0,34** | **100,0** |

*Źródło: analiza własna; wartości bazowe Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019)*




*Rys. 4.9. Struktura nakładu 0,34 rb-g/m² — ściana prosta 270 cm, część ogólna, pojedyncze elementy. Źródło: opracowanie własne na podstawie Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019)*

Dominującą czynnością jest deskowanie (ponad połowa nakładu łącznego), co kieruje uwagę optymalizacyjną przede wszystkim na fazę montażu. Czyszczenie i olejenie, choć stanowi jedynie ok. 6% nakładu, jest operacją krytyczną dla jakości powierzchni betonu i krotności użycia poszycia — a zatem wartą odrębnej analizy mimo niewielkiego udziału czasowego. Rozdeskowanie (ok. 21%) jest zarazem czynnością, w której praca zestawami przynosi największą względną redukcję (por. pkt 2), co wskazuje je jako pierwszy obszar usprawnień organizacyjnych.

### c) Przeliczenia pomocnicze

Dla ułatwienia wykorzystania wartości w kalkulacjach i porównaniach z pomiarami własnymi w tab. 4.14 zestawiono przeliczenie nakładu jednostkowego na nakład całkowity dla przykładowych powierzchni deskowania (1 rb-g/m² = 1 r-g/m²; przykład ilustracyjny własny).

*Tabela 4.14. Przeliczenie nakładu jednostkowego na nakład całkowity (przykład własny)*

| Wskaźnik | Powierzchnia 100 m² | Powierzchnia 1 000 m² |
|---|---|---|
| Ściana prosta ogólna (0,34 r-g/m²) | 34 rb-g | 340 rb-g |
| Ściana w zestawach (0,30 r-g/m²) | 30 rb-g | 300 rb-g |
| MEVA Mammut XT (0,22 r-g/m²) | 22 rb-g | 220 rb-g |

*Źródło: obliczenie własne; wartości jednostkowe — Handbuch Arbeitsorganisation Bau (□eittechnik-Verlag, 2019).*

Przykładowo dla 1 000 m² powierzchni deskowania ściany prostej (część ogólna, pojedyncze elementy) nakład wynosi ok. 340 r-g, co przy brygadzie wzorcowej trzech robotników fachowych odpowiada ok. 113 roboczogodzinom na pracownika (bez czasu operatora żurawia, ujętego w wartości normatywnej na czas jego użycia). Samo przejście na pracę zestawami redukuje ten nakład o 40 rb-g na każde 1 000 m² deskowanej powierzchni.

**Podsumowanie i wnioski**

**Ocena wartości poznawczej źródła**

Analizowany katalog jest rzetelnie zorganizowanym, branżowym źródłem czasów normatywnych robót deskowaniowych, którego największą wartością metodyczną są: jawnie zdefiniowane założenia obowiązywania wartości (pkt 0.1–0.6 i 1.01–1.03), jednoznacznie wyznaczone granice rzeczowe procesu (katalog czynności wliczonych i niewliczonych) oraz dekompozycja nakładu na czynności — transport, deskowanie, rozdeskowanie oraz czyszczenie i olejenie. Dekompozycja ta umożliwia analizę składowych pracochłonności, a nie tylko wartości zbiorczej, i czyni operację przygotowania deskowania do betonowania (czyszczenie i olejenie: 0,01–0,02 rb-g/m²) mierzalną i porównywalną między systemami. Jednolity układ tabel dla wielu systemów producenckich pozwala na bezpośrednie zestawienia nakładów, a rozróżnienie trybów pracy (pojedyncze elementy vs zestawy) ujmuje ilościowo wpływ organizacji pracy na pracochłonność. Puste tabele wartości zakładowych wpisują katalog w logikę ciągłego doskonalenia: norma branżowa stanowi punkt wyjścia do własnego pomiaru i kalibracji, a schemat pętli planowania i sterowania wiąże dane czasowe z całym cyklem kalkulacja–planowanie–wykonanie–kontrola–sterowanie.

**Ograniczenia źródłowe**

Przy wykorzystywaniu wartości katalogu w pracy naukowej należy mieć na uwadze następujące ograniczenia:

1) brak opisu próby i procedury pomiarowej: nie podano liczby budów, liczby pomiarów, okresu zbierania danych, techniki chronometrażu ani sposobu eliminacji zakłóceń; deklaracja „zahlreiche Baustellenmessungen” pozostaje bez parametrów, co uniemożliwia ocenę reprezentatywności i replikowalności;
2) brak miar rozproszenia: podano wyłącznie wartości średnie, bez odchyleń standardowych, przedziałów ani rozstępów - nie wiadomo, jak szerokie są rozkłady, z których średnie te pochodzą, co ogranicza użyteczność wartości w analizie ryzyka i planowaniu buforów;
3) niespójność brygady wzorcowej: część ogólna zakłada grupę 3 robotników fachowych + 1 operator żurawia, część producencka - 2 + 1; wartości z obu części nie są wprost porównywalne, a katalog nie podaje współczynnika przeliczeniowego, zaznaczając jedynie, że zmiana składu grupy zmienia wartości;
4) ryzyko charakteru promocyjnego wartości producenckich: wartości dla systemów producenckich (0,22–0,26 rb-g/m²) są niższe od ogólnych (0,34 rb-g/m²), a w katalogu współwystępują materiały reklamowe producentów; niższe wartości wynikają częściowo z odmiennych założeń (mniejsza brygada, praca jednokrotna, większe formaty), lecz ostrożność nakazuje traktować je jako optymistyczne;
5) ograniczona generalizowalność: katalog sam zastrzega, że dla rzutów skomplikowanych (wiele naroży, wiele wąskich elementów) wartości mają jedynie dokładność przybliżoną i wymagają dostosowania do obiektu, nie podając metody tej korekty;
6) brak walidacji niezależnej: nie przedstawiono porównania wartości normatywnych z niezależnym zbiorem wykonań (analizy SOLL/IST na danych empirycznych), mimo że sama koncepcja SOLL/IST jest w katalogu opisana;
7) kontekst krajowy: wartości osadzone są w niemieckim systemie organizacyjnym, taryfowym (RTV-LL) i obmiarowym (VOB/C); bezpośrednie przeniesienie do polskiej praktyki kalkulacyjnej (KNR/KNNR, odmienny rynek pracy) wymaga ostrożności i weryfikacji pomiarem własnym.

**Wnioski merytoryczne z analizy danych**

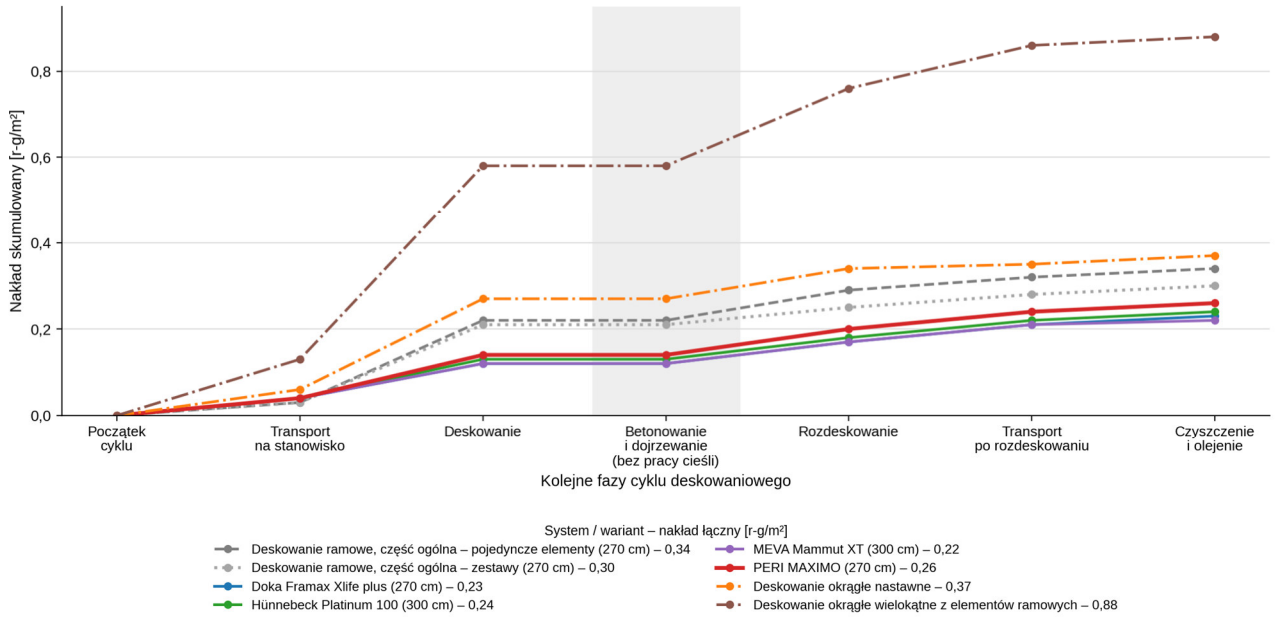
Z przeprowadzonych zestawień i analiz własnych wynikają następujące wnioski:

1) Faza montażu (deskowania) dominuje w strukturze pracochłonności — dla wariantu odniesienia stanowi ok. 55,9% nakładu łącznego, wobec ok. 20,6% rozdeskowania, ok. 17,6% transportu i ok. 5,9% czyszczenia i olejenia. Działania usprawniające powinny więc koncentrować się

przede wszystkim na fazie deskowania, przy czym potencjał względny fazy rozdeskowania ujawnia się przy zmianie organizacji pracy.

2) Sama zmiana organizacyjna — przejście z pracy pojedynczymi elementami na pracę zestawami - redukuje nakład łączny o 0,04 rb-g/m² (z 0,34 do 0,30 dla ściany prostej, tj. o ok. 11,8%), niemal w całości w fazie rozdeskowania. Jest to skwantyfikowany w źródle branżowym dowód skuteczności innowacji czysto organizacyjnych, zbieżny z zasadami LEAN Management.
3) Rozstęp nakładu między porównywalnymi systemami producenckimi wynosi 0,04 rb-g/m² (0,22–0,26 dla ściany prostej), tj. ok. 18% względem wariantu najkorzystniejszego - dobór systemu deskowania jest zatem istotną, mierzalną dźwignią pracochłonności, choć katalog nie dekomponuje wpływu poszczególnych cech konstrukcyjnych.
4) Geometria obiektu silnie różnicuje nakład: od 0,34 (ściana prosta) do 0,44 rb-g/m² (szyby wind i klatek, 360 cm) w części ogólnej, a improwizowana adaptacja deskowania ramowego do ścian łukowych podnosi nakład ponad dwukrotnie (0,88 vs 0,37 rb-g/m² deskowania nastawnego).
5) Dla deskowań słupowych o wyborze systemu decyduje krotność użycia kompletu: przy małej liczbie użyć przewagę daje niższy nakład bazowy (PASCHAL Grip: 3,15 vs 3,55 rb-g/kpl), przy dużej - minimalnie niższy cykl (PERI QUATTRO: 1,24 vs 1,27 rb-g/kpl); od ok. dziesięciu użyć systemy stają się praktycznie równoważne (model własny).
6) Nakład na czyszczenie i olejenie deskowania jest stały względem geometrii (0,02 rb-g/m²; 0,01 dla MEVA Mammut XT) i stanowi niewielki, lecz systematyczny składnik każdego cyklu - jego wyodrębnienie w źródle czyni przygotowanie deskowania do betonowania operacją mierzalną i porównywalną między systemami.

**Rozkład nakładu robocizny w cyklu deskowaniowym.** Rozwinięciem przedstawionych wniosków jest zbiorcze zestawienie narastania nakładu robocizny w kolejnych fazach cyklu deskowaniowego dla wszystkich systemów deskowań ścian objętych analizowanym katalogiem normatywów (Zeittechnik-Verlag, 2019) (rys. 4.10). Nakłady poszczególnych czynności zsumowano w kolejności ich wykonywania: transport na stanowisko, deskowanie, betonowanie i dojrzewanie betonu, rozdeskowanie, transport po rozdeskowaniu oraz czyszczenie i olejenie. Nakład transportu podzielono na część przypisaną deskowaniu i rozdeskowaniu zgodnie z danymi źródłowymi; dla wariantu pracy zestawami, dla którego źródło podaje transport łącznie, przyjęto podział po połowie.




*Rys. 4.10. Skumulowany nakład robocizny w kolejnych fazach cyklu deskowaniowego – systemy deskowań ścian objęte katalogiem normatywów [r-g/m²]. Źródło: opracowanie własne na podstawie (□eittechnik-Verlag, 2019).*

Krzywe mają wspólny kształt: nakład koncentruje się w dwóch impulsach pracy. Pierwszy obejmuje transport na stanowisko i deskowanie – przypada na nie od ok. 52–55% nakładu łącznego w systemach producenckich do ok. 65–66% w części ogólnej katalogu i w deskowaniu okrągłym wielokątnym. Drugi obejmuje rozdeskowanie, transport zwrotny oraz czyszczenie i olejenie. Oba impulsy rozdziela faza betonowania i dojrzewania, w której brygada ciesielska nie wykonuje pracy przy danym komplecie (poziomy odcinek krzywych). Zapotrzebowanie na cieśli ma więc w cyklu charakter nieciągły, a efektywność pracy zależy od tego, czy brygada zostanie w tym czasie przesunięta do innego zadania. Jest to bezpośrednie uzasadnienie synchronizacji potencjału ludzi z cyklem deskowania w metodzie FFF (teza TS1).

W systemach producenckich transport stanowi ok. 31–36% nakładu łącznego, a więc tyle, co samo deskowanie. W części ogólnej udział transportu wynosi ok. 18%, a udział deskowania – ok. 56%. Przy nowoczesnych systemach punkt ciężkości pracy przesuwa się zatem z operacji ciesielskiej na przepływ materiału wokół niej (teza TS2). Końcowe wartości krzywych dla systemów producenckich mieszczą się w przedziale 0,22–0,26 r-g/m² (rozstęp ok. 18%), natomiast deskowanie okrągłe wielokątne z elementów ramowych (0,88 r-g/m²) wymaga ok. 2,4 razy więcej pracy niż deskowanie okrągłe nastawne (0,37 r-g/m²). Porównania między częścią ogólną katalogu (brygada 3+1, praca wielokrotna) a systemami producenckimi (brygada 2+1, praca jednokrotna) mają charakter orientacyjny, a oś pozioma przedstawia kolejność faz cyklu, nie czas kalendarzowy. Deskowania słupowe pominięto, ponieważ ich nakłady podano w przeliczeniu na sztukę, a nie na metr kwadratowy.

**Wykorzystanie wyników w dalszych częściach rozprawy**

Zidentyfikowane w analizie luki źródła wyznaczają jednocześnie pola wkładu własnego rozprawy. Katalog podaje wartości tabelaryczne dla rzutu wzorcowego, lecz nie modeluje zależności nakładu od cech obiektu (powierzchnia, liczba naroży, udział otworów, krotność użycia) - jest to naturalna luka dla modelu regresyjnego lub sztucznej sieci neuronowej. Nie parametryzuje wpływu organizacji pracy (takt, wielkość zestawu, krotność) na pracochłonność, mimo że różnica między pracą elementami a zestawami dowodzi, iż wpływ ten istnieje i jest mierzalny. Nie ujmuje rozproszenia wartości — badania własne mogą dostarczyć rozkładów, a nie tylko średnich i powiązać je z wymiarowaniem buforów w planowaniu taktowym. Nie wiąże wreszcie nakładu czyszczenia i olejenia z jakością powierzchni betonu i krotnością użycia poszycia - obszar bezpośrednio dotykający problematyki przygotowania deskowania do betonowania.

Sposób wykorzystania danych katalogu w poszczególnych częściach rozprawy zestawiono w tab. 4.15.

*Tabela 4.15. Wykorzystanie danych katalogu w strukturze rozprawy*

| **Część rozprawy** | **Sposób wykorzystania** |
|---|---|
| Stan wiedzy — deskowania | źródło niemieckich wartości normatywnych; zestawienie i charakterystyka systemów ściennych, okrągłych i słupowych wraz z przypisanymi nakładami |
| Stan wiedzy - LEAN Management | pętla planowania i sterowania (SOLL/IST) jako branżowy odpowiednik cyklu PDCA; skwantyfikowany wpływ organizacji pracy (zestawy vs elementy) na pracochłonność |
| Metodologia badań własnych | wzorzec dekompozycji procesu na czynności (transport / deskowanie / rozdeskowanie / czyszczenie i olejenie) oraz wzorzec definiowania warunków brzegowych i granic rzeczowych pomiaru |
| Wyniki i dyskusja | punkt odniesienia dla własnych pomiarów chronometrażowych (ściany ramowe: 0,22–0,44 rb-g/m²; słupy składane: cykl 1,24–1,27 oraz Grundwerte 3,15–3,55 rb-g/kpl) |
| Modelowanie ANN/ML | zestaw predyktorów: system, wysokość elementu, liczba punktów kotwienia, technika kotwienia, tryb pracy, krotność użycia, geometria (prosta / w rzucie / szyb), nasycenie otworami; zmienna objaśniana: nakład jednostkowy |

*Źródło: opracowanie własne.*

**Wnioski końcowe**

Katalog Handbuch Arbeitsorganisation Bau (Zeittechnik-Verlag, 2019) stanowi dla niniejszej rozprawy źródło o wysokiej przydatności w trzech rolach:

- jako benchmark branżowych wartości pracochłonności robót deskowaniowych,
- jako wzorzec dekompozycji i delimitacji procesu montażu, demontażu i przygotowania deskowania do betonowania
- jako uporządkowany zestaw cech i wartości odniesienia dla modelowania predykcyjnego.

Zarazem jego ograniczenia:

- brak opisu próby, brak miar rozproszenia,
- niejednolitość brygady wzorcowej
- możliwy optymizm wartości producenckich

przesądzają, że wartości katalogowe należy w badaniach własnych traktować jako punkt odniesienia podlegający weryfikacji chronometrażem, a nie jako dane wzorcowe. Właśnie wypełnienie luk źródła - parametryzacja wpływu cech obiektu i organizacji pracy na pracochłonność oraz ujęcie rozproszenia wartości - wyznacza przestrzeń oryginalnego wkładu rozprawy.

## 4.2. Potrzeby i dojrzałość procesowa wykonawców konstrukcji żelbetowych – badanie ankietowe (n = 50)

Podrozdział dotyczy poziomu rynku. Dostarcza przesłanek dla tezy szczegółowej TS2 (w części dotyczącej lokalizacji strat czasu) oraz kontekstu dla tez TS1 i TS3 – danych o deficycie cieśli, modelu korzystania z deskowań i kulturze pomiaru, od której zależy dostępność danych dla warstwy uczącej. Ankiety samodzielnie wypełniane przez internet są w literaturze metodologicznej traktowane jako odrębny tryb badań, wymagający starannego zaprojektowania kwestionariusza, jego układu i sposobu formułowania pytań (Dillman D. A. i in., 2014).

**Metodyka badania oraz kompleksowy opis pytań i ich celów**

Badanie zrealizowano techniką CAWI (kwestionariusz internetowy Microsoft Forms) na próbie 50 firm wykonawczych, które czynnie realizują kontrakty budowlane w zakresie stanów surowych. Kwestionariusz składał się z 20 pytań zamkniętych jednokrotnego wyboru, pogrupowanych w cztery bloki tematyczne. Badanie było anonimowe, a średni czas wypełnienia wyniósł 3 minuty i 7 sekund, co świadczy o dobrze skalibrowanej długości ankiety i niskim ryzyku odpowiedzi udzielanych mechanicznie. Wszystkie pytania uzyskały komplet 50 odpowiedzi.

Konstrukcja kwestionariusza ma charakter lejkowy: od profilowania respondenta, przez charakterystykę jego działalności operacyjnej, po zachowania zakupowe oraz ocenę procesów i rynku. Taki układ umożliwia interpretację wyników w kontekście segmentów klientów oraz identyfikację obszarów rozwoju oferty dostawcy deskowań i rusztowań.

**Blok A – Profil firmy (pytania 1–6)**

Pytania metryczkowe segmentują respondentów według profilu działalności (generalne wykonawstwo vs podwykonawstwo żelbetów – pyt. 1), funkcji respondenta, a więc jego mocy decyzyjnej (pyt. 2), modelu wykonawstwa robót ciesielsko-zbrojarskich na osi siły własne – podwykonawcy (pyt. 3) oraz skali biznesu mierzonej trzema komplementarnymi miarami: liczbą równolegle prowadzonych budów (pyt. 4), liczbą pracowników fizycznych (pyt. 5) i roczną wartością kontraktów w stanach surowych (pyt.

6). Celem bloku jest ocena struktury i reprezentatywności próby oraz stworzenie podstawy do analiz w podgrupach.

**Blok B – Charakterystyka prowadzonych robót (pytania 7–10)**

Blok opisuje środowisko pracy respondenta: dominujący typ obiektów (pyt. 7), model korzystania z deskowań systemowych na osi własność – najem (pyt. 8), stopień koncentracji zakupów, czyli faktyczną lojalność wobec dostawców (pyt. 9), oraz korzystanie z usług dodatkowych, takich jak pierwomontaż, serwis czyszczenia, transport i nadzór nad montażem (pyt. 10). Cel biznesowy: oszacowanie potencjału najmu i usług dodatkowych oraz rozpoznanie, na ile klienci kupują relacyjnie, a na ile transakcyjnie.

**Blok C – Wycena i wybór dostawcy (pytania 11–14)**

To komercyjny rdzeń badania. Pytanie 11 diagnozuje proces ofertowania (wyceny dostawców vs własne wskaźniki), pytanie 12 – hierarchię kryteriów decyzyjnych i realną rolę ceny, pytanie 13 – najważniejsze kryterium pozacenowe (jakość i terminowość, wsparcie techniczne, elastyczność logistyczna, zaufanie do marki), a pytanie 14 – dostępność wykwalifikowanych cieśli. Pytanie kadrowe celowo domyka blok: deficyt cieśli bezpośrednio podnosi wartość systemów szybkiego montażu oraz usług dostawcy. Celem bloku jest zrozumienie ścieżki zakupowej i punktów budowania przewagi pozacenowej.

**Blok D – Organizacja pracy, technologia i ocena rynku (pytania 15–20)**

Blok diagnozuje dojrzałość procesową i technologiczną wykonawców: pomiar czasów montażu i demontażu deskowań w rbg/m² (pyt. 15), lokalizację największych strat czasu w procesie deskowaniowym (pyt. 16), znajomość i stosowanie narzędzi LEAN – Last Planner, planowanie taktowe, 5S (pyt. 17) oraz wykorzystanie narzędzi cyfrowych: portali klienta, aplikacji sprzętowych i projektów BIM/3D (pyt. 18). Pytania 19–20 mają charakter koniunkturalno-prognostyczny: subiektywna ocena rynku robót żelbetowych w Polsce oraz wskazanie czynnika o największym wpływie na efektywność robót deskowaniowych w horyzoncie 5 lat. Cel: identyfikacja marnotrawstwa w duchu LEAN, ocena gotowości na cyfryzację i uchwycenie nastrojów rynkowych.

**1) Tabelaryczne zestawienie wyników wraz z omówieniem**

Poniżej zestawiono rozkłady odpowiedzi na wszystkie 20 pytań (n = 50; udziały procentowe liczone od pełnej próby; przy n = 50 każdy respondent odpowiada dokładnie 2 punktom procentowym). W każdej tabeli wyróżniono odpowiedź dominującą (modalną).

**Blok A – Profil firmy**

**Pytanie 1. Profil działalności Twojej firmy to:**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | generalne wykonawstwo | 18 | 36% |
| b) | roboty żelbetowe (podwykonawstwo stanów surowych) | 16 | 32% |
| c) | jedno i drugie | 16 | 32% |
| | Razem | 50 | 100% |

Struktura próby jest niemal równomierna: 36% to generalni wykonawcy, 32% podwykonawcy robót żelbetowych, a 32% firmy łączące obie role. Wyniki badania odzwierciedlają zatem perspektywę całego łańcucha realizacji stanów surowych, a nie tylko jednej grupy.

**Pytanie 2. Jaką funkcję pełnisz w firmie?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | właściciel / współwłaściciel | 20 | 40% |
| b) | osoba decyzyjna (dyrektor / zarząd) | 14 | 28% |
| c) | kierownik kontraktu / budowy | 13 | 26% |
| d) | inne stanowisko | 3 | 6% |
| | Razem | 50 | 100% |

Aż 68% respondentów to właściciele lub osoby decyzyjne szczebla zarządczego, a kolejne 26% to kierownicy kontraktów/budów. Odpowiedzi pochodzą więc od osób realnie decydujących o wyborze dostawców i organizacji robót, co podnosi wiarygodność biznesową wyników.

**Pytanie 3. W jakim modelu realizujesz roboty ciesielsko-zbrojarskie?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | wyłącznie pracownikami własnymi | 8 | 16% |
| b) | głównie własnymi, częściowo podwykonawcami | 17 | 34% |
| c) | głównie podwykonawcami | 21 | 42% |
| d) | wyłącznie podwykonawcami | 4 | 8% |
| | Razem | 50 | 100% |

Dominuje model oparty na podwykonawcach: 50% firm realizuje roboty głównie lub wyłącznie siłami obcymi, a tylko 16% wyłącznie własnymi pracownikami. To istotny kontekst dla interpretacji pytań o kadry i pomiar wydajności.

**Pytanie 4. Ile budów / kontraktów Twoja firma prowadzi jednocześnie w ciągu roku?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | 1–5 budów jednocześnie | 15 | 30% |
| b) | 6–14 budów jednocześnie | 24 | 48% |
| c) | 15 i więcej budów jednocześnie | 11 | 22% |
| | Razem | 50 | 100% |

Najliczniejsza grupa (48%) prowadzi 6–14 budów jednocześnie, a 22% – 15 i więcej. Próba jest zdominowana przez firmy o średniej i dużej intensywności operacyjnej, dla których logistyka sprzętu ma duże znaczenie.

**Pytanie 5. Ilu pracowników fizycznych (cieśle i zbrojarze, z podwykonawcami) zatrudnia Twoja firma?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | 1–20 | 5 | 10% |
| b) | 21–50 | 18 | 36% |
| c) | 51–100 | 13 | 26% |

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| d) | powyżej 100 | 14 | 28% |
| | Razem | 50 | 100% |

Aż 90% firm zatrudnia ponad 20 pracowników fizycznych, w tym 28% ponad 100. Struktura zatrudnienia potwierdza, że badanie objęło ustabilizowane, większe podmioty rynku stanów surowych.

**Pytanie 6. Łączna roczna wartość kontraktów (TYLKO stany surowe)?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | do 4,99 mln zł | 3 | 6% |
| b) | 5–9,99 mln zł | 8 | 16% |
| c) | 10–19,99 mln zł | 11 | 22% |
| d) | 20–49,99 mln zł | 10 | 20% |
| e) | powyżej 50 mln zł | 18 | 36% |
| | Razem | 50 | 100% |

Rozkład przychodów jest przesunięty w stronę dużych podmiotów: 56% firm realizuje kontrakty o wartości co najmniej 20 mln zł rocznie (w tym 36% powyżej 50 mln zł), a jedynie 6% poniżej 5 mln zł.

Blok B – Charakterystyka prowadzonych robót

**Pytanie 7. Jaki typ obiektów dominuje w Twoim portfelu zleceń?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | mieszkaniowe wielorodzinne | 14 | 28% |
| b) | kubaturowe komercyjne (biura, hotele, galerie) | 8 | 16% |
| c) | przemysłowe / magazynowe | 16 | 32% |
| d) | inżynieryjne / infrastrukturalne | 12 | 24% |
| | Razem | 50 | 100% |

Portfele zleceń są zdywersyfikowane, z lekką przewagą obiektów przemysłowo-magazynowych (32%) i mieszkaniówki wielorodzinnej (28%). Najmniejszy udział ma kubatura komercyjna (16%), co koresponduje z osłabieniem tego segmentu rynku.

**Pytanie 8. W jakim modelu przede wszystkim korzystasz z deskowań systemowych?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | wyłącznie deskowania własne (zakupione) | 5 | 10% |
| b) | głównie własne, uzupełniane najmem | 13 | 26% |
| c) | głównie najem, uzupełniany sprzętem własnym | 19 | 38% |
| d) | wyłącznie najem | 13 | 26% |
| | Razem | 50 | 100% |

Najem jest podstawowym modelem dostępu do deskowań: 64% firm korzysta głównie lub wyłącznie z najmu, a tylko 10% pracuje wyłącznie na sprzęcie własnym. Rynek jest więc silnie „najmowy", co zwiększa znaczenie dostępności i elastyczności dostawcy.

**Pytanie 9. Z ilu dostawców deskowań korzystasz regularnie?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | z jednego (stała współpraca) | 12 | 24% |
| b) | z dwóch–trzech | 25 | 50% |
| c) | z więcej niż trzech – decyduje cena / dostępność | 13 | 26% |
| | Razem | 50 | 100% |

Połowa respondentów (50%) współpracuje regularnie z dwoma–trzema dostawcami, 26% pracuje transakcyjnie z więcej niż trzema, a tylko 24% związało się z jednym dostawcą. Typowy klient utrzymuje krótką listę dostawców i porównuje oferty.

**Pytanie 10. Czy korzystasz z usług dodatkowych dostawców deskowań (pierwomontaż, serwis, transport, nadzór)?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | tak, regularnie | 8 | 16% |
| b) | tak, ale tylko przy skomplikowanych zadaniach | 32 | 64% |
| c) | nie – wszystko własnymi siłami | 10 | 20% |
| | Razem | 50 | 100% |

80% firm korzysta z usług dodatkowych dostawców, ale zdecydowana większość (64%) sięga po nie wyłącznie przy zadaniach skomplikowanych. Stały, regularny popyt na usługi deklaruje tylko 16% – usługi pełnią rolę wsparcia „na trudne momenty".

**Blok C – Wycena i wybór dostawcy**

**Pytanie 11. Wyceniając konkretne zadanie (ofertowanie kontraktu), w zakresie deskowań:**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | korzystam z wycen firm deskowaniowych | 18 | 36% |
| b) | przyjmuję własne wskaźniki cenowe | 18 | 36% |
| c) | łączę oba podejścia | 14 | 28% |
| | Razem | 50 | 100% |

Rynek dzieli się niemal równo na trzy podejścia do wyceny: 36% opiera się na ofertach dostawców, 36% na własnych wskaźnikach, a 28% łączy oba podejścia. Zapytania ofertowe pozostają ważnym punktem styku z klientem już na etapie ofertowania kontraktu.

Pytanie 12. Podejmując decyzję o wyborze konkretnego dostawcy deskowań, kierujesz się:

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | tylko ceną | 12 | 24% |

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| b) | najpierw ceną, później doświadczeniem i portfolio | 27 | 54% |
| c) | najpierw technologią i logistyką, na końcu ceną | 11 | 22% |
| | Razem | 50 | 100% |

Cena jest pierwszym filtrem decyzji dla 78% respondentów (24% kieruje się wyłącznie ceną, 54% najpierw ceną). Jedynie 22% stawia na pierwszym miejscu możliwości technologiczno-logistyczne. Konkurowanie wartością wymaga więc najpierw „obrony" pozycji cenowej.

**Pytanie 13. Najważniejsze pozacenowe kryterium wyboru dostawcy deskowań?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | jakość i kompletność sprzętu, terminowość dostaw | 17 | 34% |
| b) | wsparcie techniczne (projekty, doradztwo, obsługa) | 13 | 26% |
| c) | elastyczność logistyczna (dowozy, zwroty częściowe) | 15 | 30% |
| d) | dotychczasowa współpraca i zaufanie do marki | 5 | 10% |
| | Razem | 50 | 100% |

Wśród kryteriów pozacenowych wygrywa jakość i kompletność sprzętu wraz z terminowością dostaw (34%), przed elastycznością logistyczną (30%) i wsparciem technicznym (26%). Sama marka i dotychczasowa współpraca przekonują tylko 10% – lojalność trzeba podtrzymywać wykonaniem, nie historią.

**Pytanie 14. Jak oceniasz dostępność wykwalifikowanych cieśli na rynku pracy?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | bardzo dobra – brak problemów kadrowych | 1 | 2% |
| b) | wystarczająca, ale rekrutacja trwa coraz dłużej | 11 | 22% |
| c) | słaba – niedobór ogranicza moce przerobowe | 34 | 68% |
| d) | krytyczna – rezygnujemy z kontraktów | 4 | 8% |
| | Razem | 50 | 100% |

Sytuacja kadrowa jest zła: 76% ocenia dostępność cieśli jako słabą lub krytyczną (w tym 8% rezygnuje z kontraktów z powodu braku kadr), a tylko 2% nie odczuwa problemów. Deficyt cieśli jest faktycznym wąskim gardłem mocy przerobowych branży.

**Blok D – Organizacja pracy, technologia i ocena rynku**

**Pytanie 15. Czy Twoja firma analizuje czasy montażu i demontażu deskowań (np. rbg/m²)?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | tak, systematycznie na każdej budowie | 9 | 18% |
| b) | tak, ale tylko na wybranych kontraktach | 17 | 34% |

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| c) | nie – doświadczenie i szacunki | 22 | 44% |
| d) | nie, ale planujemy wprowadzić | 2 | 4% |
| | Razem | 50 | 100% |

44% firm w ogóle nie mierzy czasów montażu i demontażu deskowań, opierając się na doświadczeniu, a systematyczne pomiary na każdej budowie prowadzi tylko 18%. Kultura pomiaru wydajności jest w powijakach, mimo że to warunek optymalizacji procesu.

**Pytanie 16. Który element procesu deskowaniowego generuje największe straty czasu na budowie?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | montaż i demontaż deskowania | 7 | 14% |
| b) | transport wewnętrzny i logistyka (żuraw, składowanie) | 19 | 38% |
| c) | czyszczenie, sortowanie i zwroty sprzętu | 15 | 30% |
| d) | braki kompletacyjne / oczekiwanie na dostawy | 9 | 18% |
| | Razem | 50 | 100% |

Za największe źródło strat czasu respondenci uznali transport wewnętrzny i logistykę, w tym przestoje żurawia (38%), oraz czyszczenie, sortowanie i zwroty sprzętu (30%). Sam montaż i demontaż wskazało tylko 14% – straty tkwią głównie „wokół" deskowania, a nie w nim samym.

**Pytanie 17. Czy stosujesz lub znasz narzędzia LEAN (Last Planner, planowanie taktowe, 5S)?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | tak, stosujemy w praktyce | 4 | 8% |
| b) | znamy, ale nie stosujemy | 23 | 46% |
| c) | nie znamy tych narzędzi | 23 | 46% |
| | Razem | 50 | 100% |

Zaledwie 8% firm stosuje narzędzia LEAN w praktyce; pozostali dzielą się równo na znających, lecz niestosujących (46%) i nieznających tych narzędzi (46%). Luka wdrożeniowa i edukacyjna w zakresie doskonalenia procesów jest bardzo duża.

**Pytanie 18. Czy korzystasz z narzędzi cyfrowych w obszarze deskowań (portale, aplikacje, BIM/3D)?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | tak, regularnie | 6 | 12% |
| b) | sporadycznie / testujemy | 17 | 34% |
| c) | nie, ale jesteśmy zainteresowani | 23 | 46% |
| d) | nie i nie widzimy potrzeby | 4 | 8% |

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| | Razem | 50 | 100% |

Regularnie z narzędzi cyfrowych korzysta tylko 12% firm, ale aż 46% deklaruje zainteresowanie, a 34% testuje takie rozwiązania. Jedynie 8% nie widzi potrzeby cyfryzacji – rynek jest więc otwarty, lecz czeka na impuls i wsparcie wdrożeniowe.

**Pytanie 19. Jak oceniasz obecną sytuację na rynku robót żelbetowych w Polsce?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | rynek rośnie – więcej zapytań niż mocy | 0 | 0% |
| b) | rynek stabilny – portfel zapewniony | 13 | 26% |
| c) | rynek się kurczy – rośnie konkurencja cenowa | 27 | 54% |
| d) | trudno powiedzieć / duża niepewność | 10 | 20% |
| | Razem | 50 | 100% |

Nastroje rynkowe są pesymistyczne: 54% uważa, że rynek się kurczy i rośnie konkurencja cenowa, 20% deklaruje dużą niepewność, a nikt (0%) nie ocenia rynku jako rosnącego. Tylko 26% mówi o stabilnym portfelu zleceń.

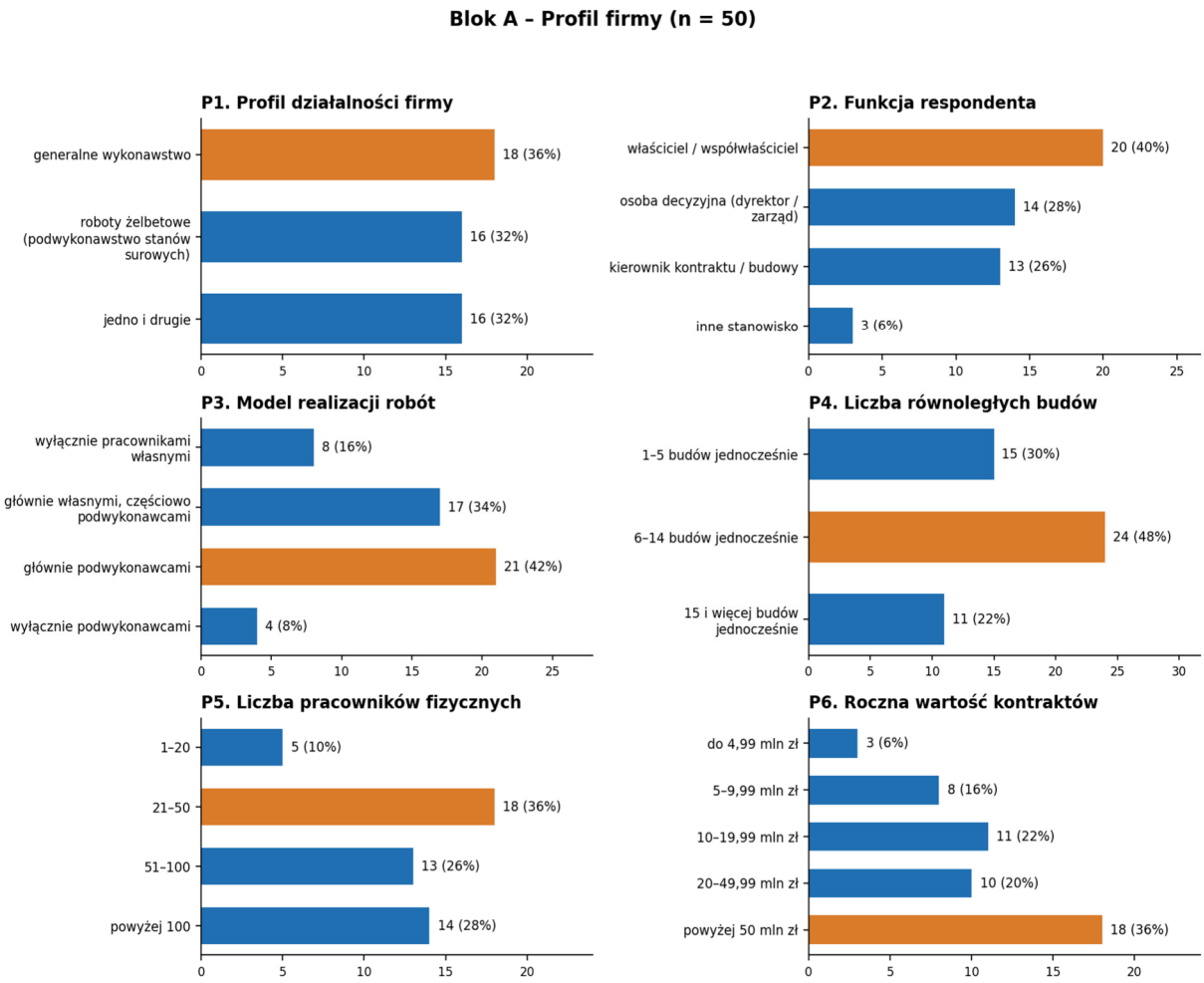
**Pytanie 20. Co będzie miało największy wpływ na efektywność robót deskowaniowych w najbliższych 5 latach?**

| Lp. | Wariant odpowiedzi | n | % |
|---|---|---|---|
| a) | automatyzacja i digitalizacja (BIM, aplikacje) | 5 | 10% |
| b) | niedobór cieśli i wzrost kosztów pracy | 19 | 38% |
| c) | systemy o szybszym montażu (lżejsze, mniej elementów) | 14 | 28% |
| d) | presja cenowa i optymalizacja kosztów najmu | 12 | 24% |
| | Razem | 50 | 100% |

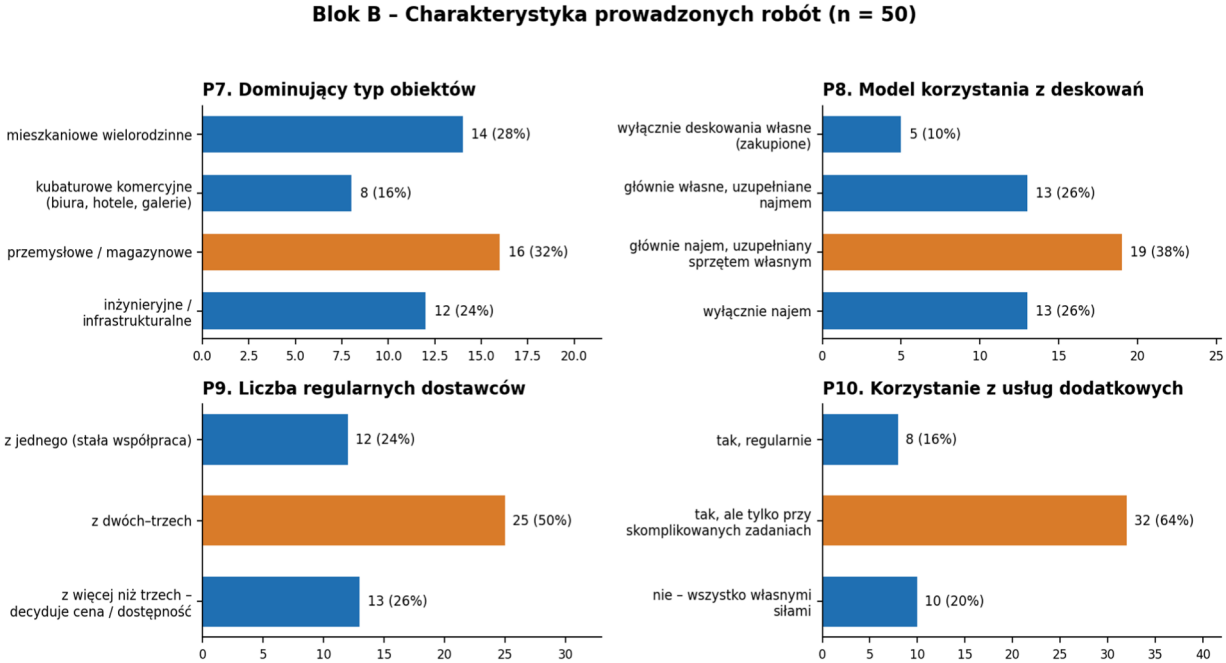
Jako główny czynnik wpływu na efektywność w perspektywie 5 lat wskazano niedobór cieśli i wzrost kosztów pracy (38%), przed rozwojem systemów o szybszym montażu (28%) i presją cenową (24%). Automatyzację i digitalizację wskazało tylko 10% – cyfryzacja nie jest jeszcze postrzegana jako dźwignia efektywności.

**Wykresy i statystyki**

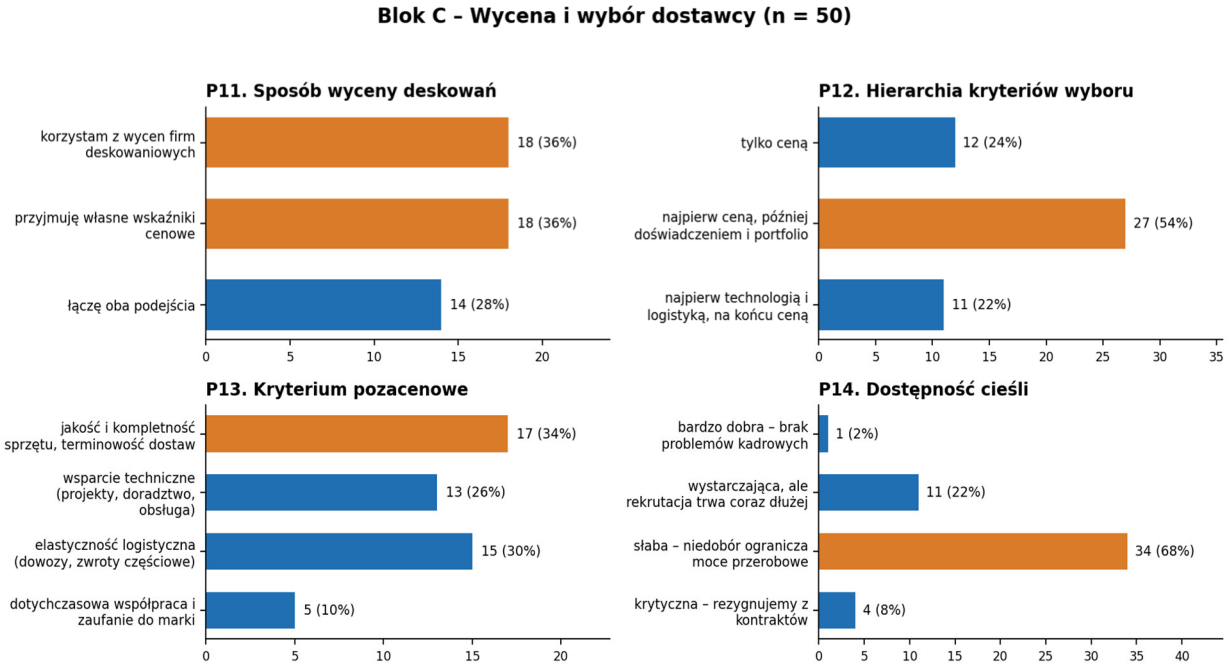
Na wykresach przedstawiono rozkłady liczebności i udziałów procentowych dla wszystkich pytań, w podziale na bloki tematyczne. Kolorem pomarańczowym wyróżniono odpowiedź dominującą (modalną) w każdym pytaniu.



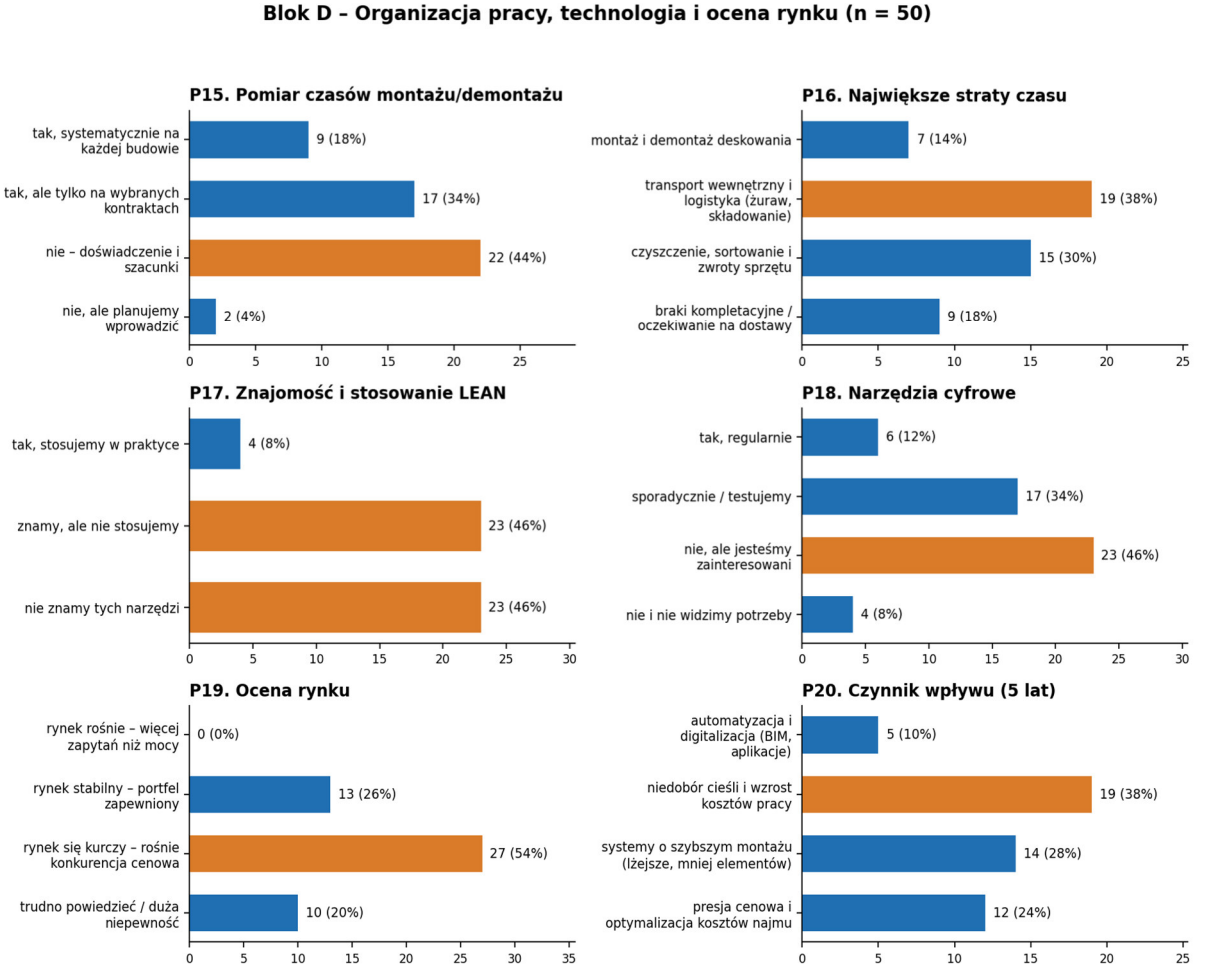

*Rys. 4.11. Rozkłady odpowiedzi – Blok A: Profil firmy (n = 50). Źródło: opracowanie własne.*



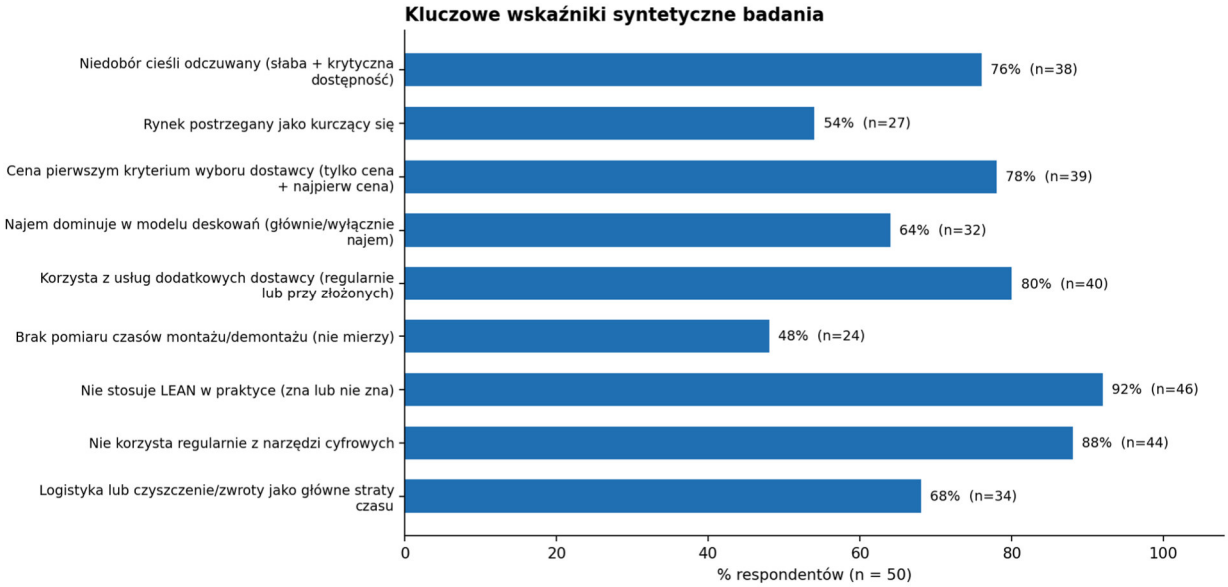

*Rys. 4.12. Rozkłady odpowiedzi – Blok B: Charakterystyka prowadzonych robót (n = 50). Źródło: opracowanie własne.*




*Rys. 4.13. Rozkłady odpowiedzi – Blok C: Wycena i wybór dostawcy (n = 50). Źródło: opracowanie własne.*




*Rys. 4.14. Rozkłady odpowiedzi – Blok D: Organizacja pracy, technologia i ocena rynku (n = 50). Źródło: opracowanie własne.*




*Rys. 4.15. Kluczowe wskaźniki syntetyczne badania (odsetki po agregacji wariantów odpowiedzi). Źródło: opracowanie własne.*

### Statystyki opisowe i wskaźniki syntetyczne

Ponieważ wszystkie pytania mają charakter jakościowy (nominalny lub porządkowy), podstawową statystyką opisową jest dominanta (moda) oraz struktura procentowa. Najsilniejsze koncentracje odpowiedzi (najwyższe udziały dominanty) wystąpiły w pytaniach: P14 – słaba dostępność cieśli (68%), P10 – usługi dodatkowe tylko przy zadaniach skomplikowanych (64%), P12 – najpierw cena (54%), P19 – rynek się kurczy (54%) i P9 – dwóch–trzech dostawców (50%). Najbardziej rozproszone rozkłady, świadczące o zróżnicowaniu rynku, dotyczyły pytań P1, P7, P11 i P13, gdzie żadna odpowiedź nie przekroczyła 40%.

Po agregacji wariantów odpowiedzi uzyskano następujące wskaźniki syntetyczne: niedobór cieśli odczuwa 76% firm (dostępność słaba lub krytyczna), pierwszeństwo ceny w wyborze dostawcy deklaruje 78%, w modelu najmu (głównie lub wyłącznie) pracuje 64%, z usług dodatkowych korzysta łącznie 80%, czasy montażu i demontażu mierzy w jakiejkolwiek formie 52% (ale systematycznie tylko 18%), narzędzi LEAN nie stosuje w praktyce 92%, regularnie z narzędzi cyfrowych nie korzysta 88%, a logistykę wewnętrzną lub czyszczenie i zwroty jako główne źródło strat czasu wskazuje łącznie 68%. Pesymizm lub niepewność co do rynku wyraża 74% respondentów, przy zerowym odsetku ocen wzrostowych.

Uwaga metodyczna: raport opracowano na podstawie zbiorczego wydruku wyników z Microsoft Forms, który zawiera wyłącznie rozkłady brzegowe. Nie było możliwe wykonanie analiz krzyżowych między pytaniami (np. kryteria wyboru dostawcy w zależności od wielkości firmy) – takie analizy wymagałyby eksportu odpowiedzi jednostkowych do pliku Excel. Przy n = 50 wyniki należy traktować jako wiarygodny obraz badanej grupy klientów; błąd oszacowania frakcji dla całej populacji wynosi maksymalnie ok. ±14 p.p. przy poziomie ufności 95%.

### Wnioski

**Wniosek 1. Próba jest wiarygodna decyzyjnie i reprezentuje trzon rynku.**

Odpowiedzi pochodzą w 94% od właścicieli, zarządów i kierowników kontraktów, a 90% firm zatrudnia ponad 20 pracowników fizycznych i w większości (56%) realizuje kontrakty o wartości co najmniej 20 mln zł rocznie. Wyniki odzwierciedlają zatem opinie realnych decydentów średnich i dużych wykonawców stanów surowych.

**Wniosek 2. Rynek jest „najmowy" i wielodostawcowy – lojalność trzeba zdobywać wykonaniem.**

64% firm opiera się głównie lub wyłącznie na najmie deskowań, ale tylko 24% związało się z jednym dostawcą, a 26% kupuje czysto transakcyjnie. W połączeniu z tym, że zaufanie do marki jest

najważniejszym kryterium pozacenowym tylko dla 10% respondentów, oznacza to, że pozycję u klienta buduje się każdorazowo jakością sprzętu, terminowością i elastycznością logistyczną (łącznie 64% wskazań pozacenowych), a nie historią współpracy.

**Wniosek 3. Cena jest biletem wstępu, ale nie jedynym polem gry.**

78% klientów filtruje oferty najpierw ceną, a rynek postrzegany przez 54% jako kurczący się tę presję wzmacnia. Jednocześnie 22% decydentów stawia technologię i logistykę przed ceną, a 80% korzysta z usług dodatkowych. Strategia dostawcy powinna więc łączyć konkurencyjność cenową z wyraźnie komunikowaną wartością usługową, szczególnie przy zadaniach skomplikowanych, gdzie po usługi sięga aż 64% firm.

**Wniosek 4. Deficyt cieśli jest wąskim gardłem branży i głównym motorem zmian.**

76% firm ocenia dostępność cieśli jako słabą lub krytyczną, 8% rezygnuje z tego powodu z kontraktów, a niedobór kadr i wzrost kosztów pracy uznano za najważniejszy czynnik wpływu na efektywność w horyzoncie 5 lat (38%). Wraz z drugim wskazaniem – systemami o szybszym montażu (28%) – tworzy to jednoznaczny sygnał popytowy: rozwiązania ograniczające pracochłonność (lżejsze systemy, mniej elementów, pierwomontaż, nadzór montażowy) odpowiadają na najbardziej palący problem klientów.

**Wniosek 5. Straty czasu tkwią wokół deskowania, nie w samym deskowaniu.**

Tylko 14% wskazało montaż i demontaż jako główne źródło strat; 38% wskazuje transport wewnętrzny i logistykę (przestoje żurawia, składowanie), a 30% czyszczenie, sortowanie i zwroty. To silny argument za rozwijaniem usług logistycznych, serwisu czyszczenia, zwrotów częściowych oraz doradztwa w organizacji placu budowy – obszarów, które klienci sami identyfikują jako marnotrawstwo.

**Wniosek 6. Dojrzałość procesowa jest niska – to bariera i szansa.**

44% firm nie mierzy czasów montażu i demontażu, systematyczne pomiary prowadzi tylko 18%, narzędzia LEAN stosuje w praktyce zaledwie 8%, a 46% w ogóle ich nie zna. Klienci nie dysponują więc twardymi danymi o własnej wydajności, co utrudnia im wycenę korzyści z lepszych systemów. Dostawca, który dostarczy proste narzędzia pomiaru i benchmarki (rbg/m²) oraz edukację LEAN, może realnie kształtować kryteria oceny na rynku.

**Wniosek 7. Cyfryzacja: niskie użycie, wysoki potencjał.**

Regularnie z narzędzi cyfrowych korzysta 12% firm, ale aż 46% deklaruje zainteresowanie, a 34% testuje rozwiązania; potrzeby nie widzi tylko 8%. Jednocześnie zaledwie 10% uznaje digitalizację za kluczowy czynnik efektywności. Rynek czeka na łatwe wdrożeniowo narzędzia o szybko widocznej wartości (portal klienta, zarządzanie sprzętem, BIM/3D) – najlepiej powiązane z redukcją strat logistycznych i kompletacyjnych, które klienci już dziś uznają za problem.

**Wniosek 8. Nastroje rynkowe wymuszają strategię defensywno-efektywnościową.**

Nikt nie ocenia rynku jako rosnącego, 54% widzi jego kurczenie się i zaostrzenie konkurencji cenowej, a 20% deklaruje dużą niepewność. W takim otoczeniu przewagę zyskają dostawcy pomagający klientom obniżać całkowity koszt procesu (TCO), a nie wyłącznie stawkę najmu – poprzez szybszy montaż, mniejszą pracochłonność, sprawną logistykę i ograniczenie przestojów żurawia.

**Rekomendowane kierunki działań**

Synteza wyników wskazuje cztery priorytety: (1) rozwój i aktywna sprzedaż usług ograniczających pracochłonność i straty logistyczne (pierwomontaż, serwis czyszczenia, zwroty częściowe, nadzór montażowy, doradztwo logistyczne), (2) pozycjonowanie oferty wokół całkowitego kosztu procesu deskowaniowego zamiast samej stawki najmu, z kalkulatorami korzyści opartymi na rbg/m², (3) program edukacyjno-wdrożeniowy w zakresie pomiaru wydajności i narzędzi LEAN jako element budowania relacji doradczych z klientem, (4) niskoprogowa cyfryzacja – portal klienta i aplikacja sprzętowa rozwiązujące konkretne bolączki (dostępność sprzętu, kompletacja, zwroty), adresowane do 46% firm otwartych na takie rozwiązania. W kolejnym kroku warto wykonać analizy krzyżowe na danych jednostkowych (eksport z Forms do Excela), aby doprecyzować, które segmenty klientów są najbardziej otwarte na usługi i cyfryzację.

## 4.3. Proces obsługi zlecenia klienta w PERI Polska – mapa BPMN i macierz odpowiedzialności

Podrozdział dotyczy poziomu procesu dostawcy stanowi podstawę weryfikacji tezy szczegółowej TS3 w części dotyczącej punktów styku: przepływ deskowań jest przerywany w punktach styku między uczestnikami procesu, a jego ciągłość zależy od widoczności rzeczywistego statusu elementów i jednoznacznego przypisania decyzji. Do opisu procesu wykorzystano notację BPMN (Business Process Model and Notation) – standard modelowania procesów utrzymywany przez Object Management Group, którego wersję 2.0 opublikowano w styczniu 2011 r. (OMG, 2011).

**Wprowadzenie, cel i źródła danych**

Celem niniejszego podrozdziału jest opis i analiza procesu obsługi zlecenia klienta w przedsiębiorstwie PERI Polska – od wpływu zamówienia, przez projektowanie, rezerwację materiału, kompletację i transport, aż po wydanie towaru – w ujęciu organizacyjnym (kto wykonuje, kto zatwierdza, kto jest informowany) oraz procesowym (jakie czynności, w jakiej kolejności, z jakimi punktami decyzyjnymi). **Jest to pierwsze wdrożenie w ramach metody Flexible Formwork Flow (FFF), służące weryfikacji tezy szczegółowej TS3 (podrozdział 3.3).**

Analiza opiera się wyłącznie na trzech dokumentach źródłowych udostępnionych przez przedsiębiorstwo:

- **Szczegółowa mapa procesu** „Mapowanie PERI– Mapa szczegółowa” (plik PDF, jedna plansza w formacie 8506 × 2381 pkt – ze względu na duży format wydruku stanowi niezależny załącznik) – między-funkcyjna mapa procesu w notacji BPMN, obejmująca pięć torów (basen „Klient” oraz basen „PERI Polska” z torami „Dział Handlowy”, „Dział Techniczny”, „LOK” i „Magazyn (OM)”), z naniesionymi uwagami procesowymi. **Stosowne komentarze (w odpowiednich kolorach) podkreślają, iż cały dokument jest w fazie wdrożenia i poszczególne kroki mogą ulegać stosownym zmianom w miarę doprecyzowania procesu jako ogółu.**
- **Legenda i opis mapy** „BPMN – Legenda i opis PEŁNY PERI” (plik DOCX) – opis metodologii, legenda symboli BPMN, dodatkowe oznaczenia (OK/NOK, TAK/NIE, Blokada, Decyzja Klienta, Akceptacja, Rezerwacja) oraz lista uczestników procesu.
- **Macierz odpowiedzialności** „Wszystkie Procesy – do 27.10.2025” (plik XLSX, aktualizacja 27.10.2025 - ze względu na duży format wydruku stanowi niezależny załącznik) – macierz pionowa obejmująca 189 numerowanych kroków w 21 procesach, z przypisaniem ról: wykonujący zadanie, wspierający realizację, zatwierdzający/rozliczający, konsultant/ekspert, poinformowany o efektach działania, a także kolumny „Uwagi” (dokumenty, instrukcje, aplikacje) i „Co chcemy mierzyć w procesie?”. Plik zawiera dodatkowo arkusz „POINFORMOWANI” (16 zdefiniowanych przepływów informacji) oraz legendę skrótów ról.

Należy podkreślić różnicę czasową między dokumentami: mapa procesu odzwierciedla stan „as-is” zidentyfikowany w listopadzie 2023 r., natomiast macierz odpowiedzialności została zaktualizowana w październiku 2025 r. Różnica ta jest istotna interpretacyjnie – część niezgodności między mapą a macierzą może wynikać nie z błędu któregoś z dokumentów, lecz z ewolucji procesu w okresie niemal dwóch lat (macierz w kilku miejscach wprost standaryzuje to, co na mapie oznaczono jako brak standardu). Wszystkie zestawienia w podrozdziale odnoszą się wiernie do treści dokumentów źródłowych; tam, gdzie formułuję własną interpretację, jest to wyraźnie zaznaczone.

**Metodyka: notacja BPMN i oznaczenia stosowane na mapie**

Zgodnie z legendą, mapa została opracowana w metodyce BPMN (Business Process Model and Notation) i ma charakter szczegółowej mapy międzyfunkcyjnej (cross-functional process map), ponieważ pokazuje przebieg procesu pomiędzy wieloma działami organizacji oraz klientem. Dokument legendy wskazuje, że mapa – oprócz przebiegu procesu – ma również charakter analityczny: zawiera komentarze wskazujące na problemy organizacyjne, brak standardów działania, ryzyka komunikacyjne, niejednoznaczny podział odpowiedzialności oraz potencjalne działania usprawniające, dzięki czemu może służyć zarówno do opisu procesu „as-is”, jak i do projektowania procesu „to-be”. W tabeli 4.16 zestawiono symbole BPMN wraz ze znaczeniem podanym w legendzie.

*Tabela 4.16. Legenda symboli BPMN stosowanych na mapie (wg dokumentu „BPMN – Legenda i opis PEŁNY PERI")*

| Symbol / nazwa | Znaczenie wg legendy | Przykład użycia na mapie (odczyt własny) |
|---|---|---|
| Zdarzenie początkowe (Start Event) | Oznacza rozpoczęcie procesu, np. wpływ zamówienia od klienta. | „Zamówienie Klienta" (tor Klient); „Przyjazd kierowcy bez awizacji" (tor LOK). |
| Zdarzenie końcowe (End Event) | Oznacza zakończenie procesu lub zakończenie jednej z gałęzi procesu. | Zakończenie ścieżki „Transport spedycyjny"; „Szykowanie sprzedaży". |
| Zadanie (Task) | Pojedyncza czynność wykonywana przez uczestnika procesu. | „Wykonanie rysunku i dokumentacji", „Szykowanie materiału", „Wydruk WZ". |
| Podproces (Subprocess) | Grupa działań stanowiąca bardziej złożony etap procesu. | „Weryfikacja zakresu z klientem", „Rozmowy z klientem", „Organizacja spedycji", „Naprawy / Remonty", „Szukanie towaru w innych lokalizacjach". |
| Bramka decyzyjna (Exclusive Gateway) | Punkt podejmowania decyzji skutkujący wyborem jednej ścieżki. | „Wymaga projektu / Nie wymaga projektu", „Pilne / Niepilne", „Dzierżawa / Sprzedaż". |
| Bramka równoległa (Parallel Gateway) | Rozdziela lub scala działania wykonywane równolegle. | Rozdzielenie ścieżek po „Zamówienie na zakres / Lista materiałowa". |
| Przepływ sekwencji (Sequence Flow) | Pokazuje kolejność realizacji działań. | Strzałki ciągłe między zadaniami. |
| Przepływ komunikatu (Message Flow) | Pokazuje wymianę informacji pomiędzy uczestnikami procesu. | Zdarzenia „Wiadomość z windykacji", „Informacja zwrotna z LC", „Otrzymanie nowego zamówienia z LOK". |
| Basen procesu (Pool) | Główny uczestnik procesu lub organizacja. | Baseny „KLIENT" i „PERI POLSKA". |
| Tor procesu (Lane) | Obszar odpowiedzialności określonego działu lub roli. | Tory „Dział Handlowy", „Dział Techniczny", „LOK", „Magazyn (OM)". |
| Dokument / Dane | Dane wejściowe i wyjściowe procesu. | „Tabelka braki". |
| Magazyn danych (Data Store) | System przechowywania danych, np. PSD, Stradivari lub PLX. | Symbol „PSD" przy „Wprowadzenie stawek i warunków" oraz przy „Sprawdzenie czy są u lokalnych Klientów". |
| Uwaga procesowa | Komentarz identyfikujący problem, ryzyko lub możliwość usprawnienia. | Żółte pola, np. „Brak jasnych kryteriów", „Nie pilnujemy terminów zwrotów". |

*Źródło: opracowanie własne.*

Legenda mapy definiuje ponadto dodatkowe oznaczenia stosowane na mapie: OK – warunek spełniony, możliwe przejście do kolejnego kroku; NOK – warunek niespełniony, wymagane działania wyjaśniające lub korygujące; TAK/NIE – wynik decyzji w punkcie decyzyjnym; Blokada – ograniczenie systemowe lub biznesowe wymagające dodatkowej akceptacji; Decyzja Klienta – dalszy przebieg procesu zależy od decyzji klienta; Informacja do / Kontakt z – przekazanie informacji pomiędzy uczestnikami procesu; Akceptacja – formalne zatwierdzenie dokumentacji, projektu lub zestawienia materiałowego; Rezerwacja – zabezpieczenie materiałów pod realizację konkretnego zamówienia. Z odczytu samej mapy wynika dodatkowo, że różowe pola pełnią rolę etykiet ścieżek („Ścieżka Dzierżawa", „Transport spedycyjny", „Transport Klienta", „Transport własny PERI") – oznaczenie to nie jest opisane w legendzie.

**Uczestnicy procesu, stanowiska i zakresy odpowiedzialności**

Uczestnicy według legendy mapy i według macierzy

Dokument legendy wymienia ośmiu uczestników procesu (swimlanes): Klient, Dział Handlowy (PTH), Dział Techniczny, Logistyka, LOK, Magazyn (OM), Dział Rozliczeń oraz Logistyka Centralna (LC). Na samej mapie fizycznie wyodrębniono jednak tylko pięć torów: basen „KLIENT" oraz – w basenie „PERI POLSKA" – tory „Dział Handlowy", „Dział Techniczny", „LOK" i „Magazyn (OM)". Dział Rozliczeń i Logistyka Centralna nie mają własnych torów; występują jako adresaci lub nadawcy komunikatów

wewnątrz toru Handlowego i LOK (np. „Kontakt z Działem Rozliczeń – nadanie nr PSD", „Wysłanie prośby do działu Rozliczeń, żeby odblokowali na czas rezerwacji", „Zamówienie w LC", „Informacja zwrotna z LC"). Jest to pierwsza, formalna rozbieżność między legendą a mapą, o istotnym znaczeniu dla analizy punktów styku: dwa podmioty o kluczowych kompetencjach (numeracja i blokady klientów; zaopatrzenie ponadlokalne) są w modelu „niewidoczne" jako odpowiedzialni wykonawcy.

Macierz odpowiedzialności operuje znacznie bardziej szczegółowym katalogiem ról (20 kodów). Zestawienie kodów wraz z rozwinięciami z legendy macierzy, przypisaniem do torów mapy (interpretacja własna) oraz statystyką występowania w 189 krokach macierzy przedstawia tabela 4.17. Statystykę policzono na podstawie kolumn macierzy pionowej (kody „WIR" i „WiR" są tożsame).

*Tabela 4.17. Role w macierzy odpowiedzialności PERI Polska (27.10.2025) i ich odwzorowanie na tory mapy BPMN (27.11.2023)*

| Kod | Nazwa roli (legenda macierzy) | Tor / oznaczenie na mapie (interpretacja) | Wyk. | Wsp. | Zatw. | Kons. | Poinf. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DH | Dyrektor Handlowy | brak toru; nie występuje na mapie | 0 | 1 | 3 | 3 | 0 |
| DO | Dyrektor Oddziału | brak toru; „Kontakt do PTH, Klienta lub Dyrektora" (zdjęcie blokady) | 3 | 0 | 22 | 0 | 7 |
| A | Asystentka Dyrektora Oddziału | brak | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| PTH | Przedstawiciel Techniczno-Handlowy (Handlowiec) | tor „Dział Handlowy"; na mapie: „Handlowiec", „PTH" | 59 | 5 | 5 | 1 | 24 |
| IOS | Inżynier ds. Ofertowania i Sprzedaży | brak | 1 | 18 | 0 | 0 | 1 |
| KZT | Kierownik Zespołu Technologów | tor „Dział Techniczny"; na mapie: „Kierownik", „kierownik DW" | 8 | 0 | 7 | 8 | 6 |
| T | Technolog | tor „Dział Techniczny"; na mapie: „Technolog" | 36 | 8 | 1 | 2 | 3 |
| SZEF CL | Szef Centrum Logistycznego | brak | 0 | 1 | 0 | 2 | 13 |
| MISTRZ | Mistrz Placowy | tor „Magazyn (OM)"; na mapie: „Mistrz OM", „Mistrz" | 3 | 0 | 5 | 0 | 1 |
| OM | Obsługa Magazynowa | tor „Magazyn (OM)" | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Z-ca LOK | Z-ca Kierownika ds. LOK | brak | 0 | 5 | 6 | 1 | 5 |
| LOK | Logistyczna Obsługa Klienta | tor „LOK" | 52 | 3 | 1 | 0 | 19 |
| LC | Logistyka Centralna | brak toru; zadania „Zamówienie w LC", „Informacja LC o brakach" | 1 | 5 | 0 | 4 | 1 |
| Z-ca OM | Z-ca Kierownika OM | brak | 14 | 2 | 3 | 7 | 8 |
| O | Operator | tor „Magazyn (OM)"; na mapie: „Operator" | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| WiR | Dział Rozliczeń i Windykacji | brak toru; „Dział Rozliczeń", „windykacja" | 11 | 4 | 1 | 0 | 4 |
| PRZEWOŹNIK | Przewoźnik | brak toru; „Wybór przewoźnika i samochodu" | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| KIEROWCA | Kierowca | brak toru; zdarzenia „Przyjazd kierowcy" | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| K | Klient | basen „KLIENT" | 7 | 0 | 0 | 0 | 10 |

| Kod | Nazwa roli (legenda macierzy) | Tor / oznaczenie na mapie (interpretacja) | Wyk. | Wsp. | Zatw. | Kons. | Poinf. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | Prawnik | brak | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |

*Źródło: opracowanie własne.*

Dane w tabeli pokazują wyraźną koncentrację odpowiedzialności wykonawczej w trzech rolach: PTH (59 kroków), LOK (52) i Technolog (36) – łącznie ok. 70% wszystkich przypisań wykonawczych. Rolą zatwierdzającą jest przede wszystkim Dyrektor Oddziału (22 przypisania), co potwierdza scentralizowany model akceptacji na poziomie oddziału. Rola „poinformowany" dominuje u PTH (24) i LOK (19), co jest spójne z obrazem mapy, na której te dwa tory są głównymi węzłami komunikacyjnymi. Kilka ról obecnych w macierzy (DH, IOS, SZEF CL, Z-ca LOK, Z-ca OM, A, P) w ogóle nie występuje na mapie – mapa modeluje bowiem wykonawców operacyjnych, a nie strukturę nadzoru.

**Charakterystyka stanowisk i zakresów odpowiedzialności**

Poniższa charakterystyka została zbudowana wyłącznie na podstawie kroków macierzy, w których dana rola występuje jako wykonujący, zatwierdzający lub konsultant, uzupełniona odniesieniami do elementów mapy.

**Dyrektor Oddziału (DO)** – właściciel procesów: Prospecting, Oferta, Negocjacje, Obsługa budowy [przygotowanie], Sprzedaż asortymentu na przedpłatę, Rozliczenie miesięczne, Rozliczenie końcowe oraz wariantów 2–3 procesu „Przygotowanie zamówienia klienta bez projektu". Wykonuje osobiście m.in. podpisanie umowy/aneksu (krok 27) i akceptację dyspozycji opustu większego niż dopuszczalny przez Zarząd (154). Zatwierdza decyzję o złożeniu oferty (5), warunki kontraktu w CENTRIO (29, 30), negocjacje (23, 26), dyspozycję fakturowania (145), wprowadzenie zamówienia dla klienta na blokadzie (165) oraz jest współwykonawcą zdjęcia blokady (169). Na mapie pojawia się jedynie pośrednio jako adresat kontaktu przy blokadzie na etapie wydruku WZ.

**Przedstawiciel Techniczno-Handlowy (PTH)** – rola o największym zakresie wykonawczym. Odpowiada za pozyskanie zapytania i całą fazę ofertowo-negocjacyjną (1–27), uzupełnienie i zmianę warunków kontraktu w CENTRIO (29, 30), stworzenie struktury zlecenia w Centrio i drzewka LV w PERIan (32, 34), przekazanie listy kontaktowej (36), zamówienia „bez projektu" w QUICKSOLVE i Library Viewer (85, 86), wystawianie proform i zamówienie materiału w LOK w sprzedaży na przedpłatę (135–137, 139), sprawdzenie druku kontrolnego i dyspozycję fakturowania (144, 145, 151), bieżące działania windykacyjne (166) oraz obsługę zapytań serwisowych (170, 172–174). Na mapie tor „Dział Handlowy" obejmuje sprawdzenie zakresu zamówienia, przygotowanie i przesłanie zestawienia, weryfikację windykacyjną, nadanie numeru w PSD, analizę rozbieżności, sprawdzenie z ofertą oraz kontakt z Działem Rozliczeń w sprawie numerów klienta i zlecenia.

**Kierownik Zespołu Technologów (KZT)** – właściciel procesów „Przygotowanie zamówienia klienta z projektem" i wariantu 1 „bez projektu". Wykonuje przydzielenie pracy (70), sprawdzenie samodzielnego zestawienia klienta (84), spotkanie z klientem – prezentację rozwiązania (22), a jako współwykonawca – stworzenie zespołu ofertowego (10), poinformowanie klienta o kosztach projektowania (73), dyspozycję fakturowania za arkusze (82) oraz opracowania pierwomontażu (45, 46); zatwierdza tworzenie oferty z opracowaniem technicznym (11), weryfikację rysunków w BT (76), potwierdzenie projektowania systemów specjalnych (83) i rozwiązanie zamienne technologa (116); jest konsultantem przy sprawdzeniu oferty (15), spotkaniach z klientem (18, 21), harmonogramie rysunków (42), wykonaniu rysunku (74), zgodności finansowej (75), zmianie zestawienia przez BT (110) i wyjaśnianiu niezgodności (152). Na mapie odpowiada zadaniom „Przekazanie do Kierownika" i „Przekazanie do Technologa (kierownik DW)".

**Technolog (T)** – realizuje weryfikację zakresu z klientem (71), sprawdzenie zakresu w ofercie (72), poinformowanie o kosztach projektowania (73), wykonanie rysunku i zestawienia (74), sprawdzenie zgodności finansowej (75), weryfikację i zatwierdzenie rysunków w BT (76), przesłanie projektu z protokołem przekazania (77), uzyskanie akceptacji rozwiązania (80), złożenie zamówienia zestawienia do LOK najbliżej budowy (81), dyspozycję fakturowania za arkusze (82); w organizacji materiału analizuje możliwość zmiany zestawienia (108–110) i opracowuje rozwiązanie zamienne, gdy materiału brak na świecie (116); w procesie pierwomontażu wykonuje opracowania techniczne, dokumentację i zamówienia (45, 46, 51–54) oraz kontrolę jakości (61). Na mapie tor „Dział Techniczny" zawiera pełny cykl projektowy: weryfikację zakresu, wykonanie rysunku, weryfikację poprawności i „odchudzanie"

projektu, przekazanie do akceptacji, wykonanie zestawienia, wybór typu rozliczenia i kanału przekazania zestawienia.

**Logistyczna Obsługa Klienta (LOK)** – właścicielem procesów LOK jest Z-ca Kierownika ds. LOK. LOK wykonuje: przesłanie klientowi linku do przeglądu wyrobów (89), sprawdzenie warunków kontraktu i wprowadzenie do PSD (90), wprowadzenie zamówienia do PERIan i PSD (91, 92), sprawdzenie dostępności materiału (93, 94), wszystkie warianty organizacji materiału (95–107, 111–114), przesłanie zamówienia do Stradivari (117), planowanie transportu, awizację PLX i kontakt z klientem (120–122), wydruk WZ i wydanie dokumentów kierowcy (126, 127), organizację transportu zwrotów i wystawienie dokumentów (129, 133, 134), wprowadzenie zamówienia dla klienta na blokadzie (165), przyjęcie i rejestrację reklamacji (157–160, 162, 164). Tor „LOK" na mapie jest najdłuższy i obejmuje sprawdzenie listy, numerację klienta/zlecenia, blokady, formę rozliczenia, rezerwację, zarządzanie brakami, transport oraz obsługę kierowców.

**Magazyn (OM): Mistrz Placowy, Operator, Obsługa Magazynowa, Z-ca Kierownika OM** – właścicielem procesów Załadunek, Zwrot materiału, Pierwomontaż, Reklamacje i Serwis PERI jest Z-ca Kierownika ds. OM. Operator (O) wykonuje kompletację zamówienia (118), kontakt z LOK w razie niezgodności (119), zdjęcia i załadunek (124), rozładunek zwrotów (130). Mistrz Placowy zatwierdza kompletację (118, 119), sprawdza przygotowane zamówienie (123), pobiera zamówienie ze Stradivari (125), wymienia elementy wadliwe (163). Obsługa Magazynowa (OM) wykonuje sprawdzenie ilościowe i jakościowe zwrotów (131, 132) oraz prace serwisowe (179–181, 184). Z-ca OM wykonuje wyceny i rozliczenia pierwomontażu, zlecenia CNC oraz wyjaśnia reklamacje (161). Na mapie tor „Magazyn (OM)" obejmuje sprawdzenie statusu elementów na magazynach 4XXX/5XXX, szykowanie materiału, obsługę zmian w zestawieniu, przyjęcie dostaw brakujących elementów, załadunek oraz ścieżkę sprzedaży.

**Dział Rozliczeń i Windykacji (WiR)** – właścicielem procesu Windykacja jest Kierownik Działu Rozliczeń i Windykacji. WiR weryfikuje klienta w windykacji (4; obligatoryjnie po min. 3-miesięcznej przerwie we współpracy), odblokowuje i ponownie blokuje klienta w PSD (138, 141), sprawdza druk kontrolny i wystawia faktury (146, 147, 189), zamyka projekt w PSD (155), kontaktuje się z klientem w pilnych sytuacjach (167), przyjmuje potwierdzenie przelewu (168) i zdejmuje blokadę (169). Na mapie Dział Rozliczeń jest adresatem „Kontakt z Działem Rozliczeń – nadanie nr PSD", nadawcą „Wiadomość z windykacji" i „Informacja o zmianie statusu blokady".

**Logistyka Centralna (LC)** – wykonuje sprawdzenie dostępności materiału i odpowiedź (115), jest wspierającym przy wprowadzeniu zamówienia do PSD (92), sprawdzeniu dostępności (94), organizacji transportu (98, 105) i zamówieniu do LC (101), konsultantem przy planowaniu materiału do oferty (13, 14). Na mapie LC występuje w zadaniach „Wysłanie tabelki do Logistyki Centralnej", „Sprawdzenie czy LC zleciła dyspozycję wydania braków", „Zamówienie w LC", „Informacja LC o brakach", „Informacja zwrotna z LC" i „Informacja o dostawie z innego kraju od LC".

**Klient (K)** – w macierzy wykonuje złożenie zamówienia do LOK (87), zamianę błędnie zamówionych elementów (88), złożenie zapytania na pierwomontaż (43), zgłoszenie zwrotu (128) i reklamacji (156), organizację transportu i protokół przekazania w serwisie (177, 178). Na mapie basen „Klient" zawiera zdarzenie początkowe i rozdzielenie zamówienia na „zamówienie na zakres" (wymagające sprawdzenia, czy potrzebny jest projekt) oraz „listę materiałową"; ponadto klient jest źródłem licznych zdarzeń decyzyjnych („Decyzja Klienta") rozsianych po wszystkich torach.

**Opis mapy procesu obsługi zlecenia**

Mapa jest jednym, ciągłym modelem odczytywanym od lewej do prawej. Symbole zastosowane na mapie objaśnia legenda (rys. 4.16), a mapę w całości przedstawia załącznik nr 1 do rozprawy. Dla celów analizy mapę podzielono na dwadzieścia etapów (A–T), wyodrębnionych według spójnych bloków czynności i torów; ich oznaczenia wykorzystywane są w tabelach 4.18, 4.20 i 4.21. Elementy mapy – zadania, podprocesy, bramki, zdarzenia i magazyny danych – ponumerowano w sposób ciągły (1–258); numeracja ta jest wykorzystywana w porównaniu z macierzą odpowiedzialności (tabela 4.20). Ze względu na objętość w podrozdziale nie zamieszczono wycinków mapy ani szczegółowych opisów i zestawień elementów dla poszczególnych etapów, a naniesione na mapę uwagi procesowe zebrano tematycznie w tabeli 4.21.




*Rys. 4.16. Mapa procesu obsługi zlecenia – legenda symboli. Źródło: opracowanie własne.*

**Szczegółowa mapa procesu obsługi zlecenia w PERI Polska na podstawie mapy BPMN i macierzy odpowiedzialności (jako wydruk całościowy) stanowi załącznik nr 1 końcowy niniejszej rozprawy i jest wpięty na jej końcu.**

Wyodrębnione etapy mapy obejmują kolejno: A – Klient – wpływ zamówienia i rozdzielenie ścieżek; B – Dział Handlowy – sprawdzenie zakresu, zestawienie, weryfikacja windykacyjna, nadanie numeru; C – Dział Handlowy – analiza rozbieżności i sprawdzenie z ofertą; D – Dział Techniczny – przyjęcie tematu i przydział pracy; E – Dział Techniczny – weryfikacja projektu, akceptacja klienta, zestawienie i kanał przekazania; F – LOK – sprawdzenie listy materiałowej klienta; G – LOK i Dział Handlowy – numer klienta, numer zlecenia, blokady, warunki kontraktu; H – LOK – forma rozliczenia i wprowadzenie zestawienia do PSD; I – LOK i Magazyn – sprawdzenie dostępności lokalnej, rezerwacja, obsługa braków; J – LOK – rezerwacja, wysłanie do Stradivari, blokada, pilność; K – LOK – materiał niedostępny lokalnie: inne magazyny, zwroty, Logistyka Centralna; L – LOK – zamawianie spedycji i organizacja transportu; M – Magazyn (OM) – szykowanie materiału („Ścieżka Dzierżawa”); N – LOK – wyjaśnienie fizycznego braku i działania korygujące; O – Magazyn (OM) – towar oczekujący na wysyłkę: zmiany w zestawieniu i anulowanie; P – LOK – trzy warianty transportu; Q – LOK – przyjazd kierowcy bez awizacji; R – Magazyn (OM) – załadunek; S – LOK – wydruk WZ, blokada, wydanie dokumentów; T – Magazyn (OM) – ścieżka sprzedaży ze specjalnymi warunkami. Poszczególne etapy przedstawiono na mapie całościowej (rys. 4.16), a ich zawartość – w zakresie punktów styku, zgodności z macierzą odpowiedzialności i uwag procesowych – omówiono w dalszej części podrozdziału.

**Podsumowanie ilościowe mapy**

Łącznie w etapach A–T zidentyfikowano 258 elementów mapy (zadania, podprocesy, bramki, zdarzenia i ich kombinacje), z czego zdecydowana większość przypada na tor LOK, następnie na tor Magazynu (OM), Dział Techniczny i Dział Handlowy; basen Klienta zawiera jedynie cztery elementy. Mapa nie zawiera żadnej czynności w torach Działu Rozliczeń ani Logistyki Centralnej – ich udział jest modelowany wyłącznie przez komunikaty. Na mapie zidentyfikowano ponad 60 uwag procesowych (żółte pola) oraz jedno pole zielone; ich pełny wykaz tematyczny zawiera tabela 4.21.

### Punkty styku między uczestnikami procesu

Punkt styku rozumiany jest tu jako miejsce, w którym przepływ pracy lub informacji przekracza granicę toru (działu) albo granicę organizacji. Na mapie punkty styku są modelowane trojako: (1) przez przepływy sekwencji przechodzące między torami, (2) przez zdarzenia komunikatu (koperta / dokument) oraz (3) przez zadania typu „Informacja do / Kontakt z / Pytanie do” wykonywane w jednym torze, ale adresowane do innego uczestnika. Tabela 4.18 zestawia wszystkie zidentyfikowane na mapie punkty styku pogrupowane parami uczestników; w kolumnie ostatniej wskazano uwagi procesowe, które dotyczą danego interfejsu.

*Tabela 4.18. Punkty styku zidentyfikowane na mapie procesu (27.11.2023)*

| Nr | Interfejs (od ↔ do) | Elementy mapy tworzące punkt styku | Etap | Uwagi procesowe dotyczące interfejsu |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Klient → Dział Handlowy / Logistyka (LOK) / Dział Techniczny | „Zamówienie Klienta” z adnotacją trzech adresatów; „Zamówienie na zakres”; „Lista materiałowa” | A, B, F | Brak jasnego podziału odpowiedzialności (znanego każdemu) |
| 2 | Dział Handlowy ↔ Klient | „Przesłanie zestawienia do Klienta”; „Decyzja Klienta”; „Wiadomość do klienta”; „Rozmowy z klientem”; „Decyzja klienta” | B, C | Zestawienie może się zmienić, ale nie zawsze jest to komunikowane; Nie ma standardu, że bez akceptacji klienta nie realizujemy projektu dalej |
| 3 | Dział Handlowy → Dział Techniczny | Wyjście „Nie mamy czasu lub zakres jest zbyt duży”; wejścia „Kontynuacja” / „Nowy projekt” | B, D | Nie ma jasnych reguł kiedy przekazujemy pracę; Brak jasnych kryteriów jaki temat może samodzielnie realizować Handlowiec |
| 4 | Dział Techniczny → Dział Handlowy | „Pytanie do Działu Handlowego czy temat jest znany”; „Są rozbieżności” → „Analiza przyczyny”; „Przekazuję do Handlowca” | C, D, E | Brak jasnych kryteriów (kanał przekazania zestawienia) |
| 5 | Dział Handlowy ↔ Dział Rozliczeń (WiR) | „Przekazanie do sprawdzenia windykacji” / „Wiadomość z windykacji”; „Kontakt z Działem Rozliczeń – nadanie nr PSD” (klient i zlecenie) | B, G | Obowiązek w nowym procesie – sprawdzenie dla każdego klienta windykacji; Dział rozliczeń wysyła informacje, że jest nowy Klient |
| 6 | Dział Handlowy → LOK | „Przesłanie zestawienia do Logistyki”; „Akceptacja numeru Klienta / Zlecenia”; „Informacja do LOK o uzupełnieniu” | B, G | — |
| 7 | Dział Techniczny ↔ Klient | „Weryfikacja zakresu z klientem”; „Otrzymanie kompletu informacji od Klienta”; „Przekazanie do Klienta do Akceptacji”; „Informacja zwrotna od Klienta”; „Czas określony w umowie” | D, E | Akceptacja od Klienta powinna być potwierdzeniem, a nie negowaniem; Nie jest respektowany ten czas (zapis w umowie); W międzyczasie klient może zmienić zestawienie; W większości akceptacje są mailowe (nie zawsze) |
| 8 | Dział Techniczny → LOK | „Przekazuję od razu do LOK”; „Chcę przekazać do LOK”; „Zamówienie materiału samodzielnie” | E | Różny sposób przekazania m.in. Excel, PERlan, pdf; W Kętach zdarza się przekazanie zestawienia z LV do LOK (tylko lista materiału) |
| 9 | LOK → Dział Handlowy (PTH) | „Wysłanie prośby o nadanie nr Klienta”; „Ponaglenie PTH o nadanie numeru”; „Wysłanie prośby o nadanie nr Zlecenia”; „Kontakt do PTH” (WK, blokada); „Kontakt do PTH, Klienta lub Dyrektora”; „Uzgodnienie formy rozwiązania” → „Decyzja PTH” | G, J, N, S | Zwrotne informacje z logistyki wprowadzają dodatkową pracę w Dziale Technicznym; Różne sposoby postępowania (kontakt do PTH lub samodzielnie kontakt LOK z Klientem) |
| 10 | LOK ↔ Dział Rozliczeń (WiR) | „Wysłanie prośby do działu Rozliczeń, żeby odblokowali na czas rezerwacji” / „Informacja o zmianie statusu blokady” | G | Informacja wysłana również do handlowca |
| 11 | LOK ↔ Dział Techniczny (Technolog) | „Pytanie o możliwość zamiany brakującego elementu”; „Kontakt z Technologiem i Handlowcem”; „Przeprojektowanie”; „Uzgodnienie formy rozwiązania” → „Decyzja Technologa”; „Wyjaśnienie z Technologami” | I, K, N, Q | Pytanie jest do Klienta lub Technologa; Doprecyzować odpowiedzialność czy LOK może sam decydować o zamianie |

| Nr | Interfejs (od ↔ do) | Elementy mapy tworzące punkt styku | Etap | Uwagi procesowe dotyczące interfejsu |
|---|---|---|---|---|
| 12 | LOK ↔ Magazyn (OM) | „Pytanie do OM o dostępność towaru" / „Informacja do LOK"; „Rezerwacja materiału" (komentarz dla Mistrza); „Wysłanie zestawienia do Stradivari"; „Przekazanie informacji do LOK o braku"; „Informacja o zmianie do OM"; „Otrzymanie nowego zamówienia z LOK"; „Otrzymanie informacji o zmianach"; „Przekazanie informacji do LOK o usunięciu"; „Zakończenie pracy w Stradivari" → „Przejście ze Stradivari do PSD"; „Załadunek nie mieści się na aucie" → „Organizacja dodatkowego transportu" | I, J, M, N, O, R, S | Dodatkowo wpisywany komentarz, o którym Mistrz OM musi pamiętać; Komentarz nie zawsze jest lub czasem można go przegapić; Operator nie widzi komentarzy; Kontakt telefoniczny z LOK; Operator czasem ich nie usuwa – LOK musi usunąć |
| 13 | LOK ↔ Logistyka Centralna (LC) | „Wysłanie tabelki do Logistyki Centralnej"; „Sprawdzenie czy LC zleciła dyspozycję wydania braków"; „Zamówienie w LC"; „Informacja LC o brakach"; „Informacja zwrotna z LC"; „Informacja o dostawie z innego kraju od LC" | I, K | Na koniec dnia lub na początek następnego; W tej sytuacji powinno być przekazanie do LC; Dostawa może być w różne CL |
| 14 | LOK ↔ inne LOK | „Pytanie do lokalnego LOK o możliwość odbioru"; „Wysłanie maila do pozostałych LOK z prośbą o sprawdzenie możliwości zwrotu"; „Otrzymanie odpowiedzi" | K | Nie zawsze odpowiedź przychodzi |
| 15 | LOK ↔ Klient | „Doprecyzowanie z Klientem"; „Kontakt z Klientem potwierdzenie kilku dostaw"; „Ustalenie z Klientem sposobu rozładunku"; „Kontakt z Klientami z pytaniem o zwrot"; „Uzgodnienie z Klientem formy rozwiązania problemu"; „Przekazanie informacji do Klienta"; „Informacja do Klienta o terminie dostawy i danymi kierowcy"; „Próba lokalizacji zamówienia (u Klienta lub Handlowca)" | F, K, L, N, P, Q | Doprecyzowanie jest czasem kierowane do technologa / handlowca; Nie ma standardu kiedy działamy prokliencko; Nie pilnujemy terminów zwrotów |
| 16 | LOK ↔ Przewoźnik / Spedytor / Kierowca | „Zamawianie spedycji"; „Kontakt z Kierowcą / Spedytorem (termin dojazdu)"; „Wybór przewoźnika i samochodu"; „Informacja do Kierowcy o szczegółach"; „Przyjazd kierowcy"; „Weryfikacja Kierowcy"; „Przekazanie dokumentów do Kierowcy" | L, P, Q, S | Ten krok czasem jest zapominany (koszty w systemach) |
| 17 | Magazyn (OM) → Dział Handlowy | „Prośba o doprecyzowanie u PTH" (specjalne warunki sprzedaży) | T | Nie powinniśmy akceptować definiowania jakości |
| 18 | Magazyn (OM) ↔ Klient | Wybór towaru zgodnie z oczekiwaniami klienta | T | Czasem Klient sam wybiera sobie towar na placu; Oczekiwania mogą być różne |

*Źródło: opracowanie własne.*

Z zestawienia wynika, że najbardziej obciążonym węzłem komunikacyjnym jest LOK – uczestniczy w 11 z 18 interfejsów, w tym we wszystkich kontaktach z Logistyką Centralną, innymi oddziałami LOK, przewoźnikami i kierowcami, a także w większości kontaktów z klientem po etapie projektowym. Drugi węzeł stanowi Dział Handlowy (PTH), do którego LOK i Magazyn kierują zapytania wyjaśniające (numery, warunki kontraktu, blokady, specjalne warunki sprzedaży). Interfejs LOK–Magazyn jest jedynym, w którym mapa wprost modeluje komunikację ustną i telefoniczną („Przekazanie słownie zmian ilościowych do operatora", „Kontakt telefoniczny z LOK"), co koresponduje z największym skupiskiem uwag o ryzyku utraty informacji.

**Punkty styku informacyjne według macierzy (arkusz „POINFORMOWANI")**

Macierz odpowiedzialności zawiera odrębny arkusz definiujący 16 formalnych przepływów informacji („od kogo – do kogo – jak przekazana"). Zestawiono je w tabeli 4.19 wraz z odniesieniem do odpowiadających im elementów mapy.

*Tabela 4.19. Przepływy informacji zdefiniowane w arkuszu „POINFORMOWANI" macierzy (27.10.2025) i ich odpowiedniki na mapie*

| Lp. | Proces / etap (wg macierzy) | Od kogo → do kogo | Forma | Odpowiednik na mapie (odczyt własny) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Oferta – weryfikacja klienta w windykacji | WiR → PTH | CRM | „Wiadomość z windykacji" (etap B) – na mapie w fazie zamówienia, nie oferty |
| 2 | Windykacja – zdjęcie blokady | WiR → PTH | e-mail | „Informacja wysłana również do handlowca" (etap G) |
| 3 | Windykacja – zdjęcie blokady | WiR / DO → Specjalista LOK | e-mail | „Informacja o zmianie statusu blokady" (etap G); „Zdjęcie blokady" (J, S) |
| 4 | Przygotowanie zamówienia z projektem – przydzielenie pracy | KZT → PTH | e-mail | Brak na mapie (na mapie: „Pytanie do Działu Handlowego czy temat jest znany" – kierunek odwrotny) |
| 5 | Przygotowanie do obsługi budowy – lista kontaktowa | KZT → PTH | e-mail | Brak na mapie (etap poza zakresem mapy) |
| 6–8 | Organizacja materiału, wariant „niedostępny w PL – zamówienie w LC" – sprawdzenie dostępności i odpowiedź | LC → Technolog; LC → PTH; LC → Specjalista LOK | e-mail | „Informacja zwrotna z LC" (etap K) – na mapie tylko do LOK; do T i PTH pośrednio przez „Kontakt z Technologiem i Handlowcem" |
| 9 | Oferta – sprawdzenie dostępności materiału | LOK → PTH | e-mail | Brak na mapie (etap ofertowy poza zakresem) |
| 10 | Zamówienie bez projektu – lista materiałowa (DW z PERIan) | LOK → PTH | e-mail DW z PERIan | „Sporządzenie zestawienia do wydania do LOKu" (etap F) |
| 11 | Reklamacja – informacja zwrotna do klienta | LOK → PTH | e-mail | Brak na mapie (reklamacje poza zakresem) |
| 12 | Reklamacja – rozliczenie | LOK → PTH | e-mail | Brak na mapie |
| 13 | Windykacja – zamówienie dla klienta na blokadzie | LOK → PTH | e-mail | „Wysłanie prośby do działu Rozliczeń…" z adnotacją o informacji do handlowca (etap G); „Kontakt do PTH" (J) |
| 14 | Obsługa zamówienia przez LOK – złożenie zamówienia | LOK → PTH | e-mail DW z PERIan | „Wprowadzenie zestawienia do systemu" (etap G) – na mapie brak zdefiniowanej informacji zwrotnej do PTH |
| 15 | Zwrot materiału – dokumenty | LOK → PTH | e-mail | Brak na mapie (zwroty poza zakresem) |
| 16 | Rozliczenie końcowe – informacja o zdaniu całego materiału | LOK → PTH | e-mail | Brak na mapie |

*Źródło: opracowanie własne.*

Uderzające jest, że 15 z 16 formalnie zdefiniowanych przepływów ma jako odbiorcę PTH (a jeden – LOK), oraz że nośnikiem jest niemal wyłącznie e-mail. Żaden z przepływów macierzy nie dotyczy interfejsu LOK–Magazyn, który na mapie jest interfejsem o największej liczbie zidentyfikowanych ryzyk. Innymi słowy, macierz formalizuje komunikację „w górę" (do handlowca), natomiast komunikacja operacyjna między LOK a placem pozostaje nieopisana.

**Porównanie mapy procesu z macierzą odpowiedzialności**

Porównanie wykonano dwukierunkowo. Najpierw dla każdego bloku czynności mapy poszukiwano kroku macierzy (numer Lp.), który odpowiada mu treściowo, i oceniono zgodność w trzech stopniach: „Pełna" – czynność i jej wykonawca w macierzy odpowiadają torowi na mapie; „Częściowa" – czynność

istnieje w macierzy, ale w innym zakresie, innym procesie, u innego wykonawcy lub macierz agreguje kilka elementów mapy w jeden krok; „Brak” – czynność z mapy nie ma odpowiednika w macierzy. Następnie zidentyfikowano kroki macierzy nieobecne na mapie. Wyniki przedstawia tabela 4.20.

*Tabela 4.20. Odwzorowanie elementów mapy (27.11.2023) na kroki macierzy odpowiedzialności (27.10.2025)*

| Etap | Elementy mapy (Nr elementu) | Krok macierzy (Lp.) i wykonawca | Zgodność | Komentarz |
|---|---|---|---|---|
| A | 1–4: zamówienie, rozdzielenie, sprawdzenie czy wymaga projektu | 87 „Złożenie zamówienia do LOK” (K); podział procesów „z projektem” (70–83) / „bez projektu” (84–86) | Częściowa | Macierz nie modeluje decyzji klienta o kanale wejścia; rozróżnienie projekt / bez projektu istnieje jako podział procesów. |
| B | 5–6: sprawdzenie zakresu i decyzja handlowca „mamy czas / nie mamy czasu” | 72 „Sprawdzenie zakresu w ofercie” (T, zatw. PTH); 85 „Zamówienie na zakres – ściany w QUICKSOLVE” (PTH); 86 „Zestawienie na komplet… Library Viewer” (PTH) | Częściowa | Na mapie sprawdzenie zakresu wykonuje Handlowiec; w macierzy – Technolog. Kroki 85–86 wprowadzają kryterium (ściany w QUICKSOLVE, komplety w Library Viewer), którego brak sygnalizuje mapa. |
| B | 7–10: przygotowanie zestawienia, przesłanie do klienta, decyzja, przesłanie do Logistyki | 85–86 (PTH); brak kroku „przesłanie zestawienia do LOK” przez PTH (139 istnieje tylko w sprzedaży na przedpłatę) | Częściowa | Akceptacja zestawienia przez klienta i przekazanie do LOK przez PTH nie są krokami macierzy. |
| B | 11–13: sprawdzenie zamówienia, weryfikacja windykacji, wiadomość z windykacji | 4 „Weryfikacja Klienta w windykacji” (WiR, zatw. DO); 165–169 Windykacja | Częściowa | Macierz lokuje weryfikację w procesie Oferta (obligatoryjnie po 3-mies. przerwie); mapa – przy każdym zamówieniu („obowiązek w nowym procesie”). |
| B | 14–16: bramka OK/NOK, wiadomość do klienta, nadanie numeru w PSD | Brak kroku „nadanie numeru w PSD”; 2 „Założenie Klienta w CRM” (A); 90 „Sprawdzenie WK i wprowadzenie do PSD” (LOK) | Brak | Nadawanie numeru klienta/zlecenia w PSD (Dział Rozliczeń) nie występuje w macierzy. |
| C | 17–23: analiza przyczyny, rozmowy z klientem, sprawdzenie z ofertą | 75 „Sprawdzenie zgodności finansowej z ofertą” (T, zatw. PTH, kons. KZT); 152 „Kontakt i wyjaśnianie niezgodności z Klientem” (PTH) | Częściowa | Na mapie sprawdzenie z ofertą jest w torze Handlowym; w macierzy wykonawcą jest T, a PTH zatwierdza. |
| D | 24–26: przekazanie do Technologa / Kierownika, pytanie do Działu Handlowego | 70 „Przydzielenie pracy” (KZT, poinf. PTH) | Pełna (24–25) / Brak (26) | Pytanie do Działu Handlowego, czy temat jest znany, nie jest krokiem macierzy (macierz zakłada informację KZT → PTH). |
| D | 27–31: weryfikacja zakresu z klientem, komplet informacji, wykonanie rysunku | 71 „Weryfikacja zakresu projektowego z Klientem” (T); 74 „Wykonanie rysunku i zestawienia” (T, kons. KZT) | Pełna | — |
| E | 32–36: weryfikacja poprawności, odchudzanie projektu | 76 „Weryfikacja i zatwierdzenie rysunków technicznych w BT” (T, zatw. KZT) | Częściowa | „Odchudzanie projektu” (optymalizacja) nie występuje w macierzy. |
| E | 37–39: przekazanie do akceptacji, oczekiwanie (informacja zwrotna / czas z umowy), akceptacja | 77 „Przesłanie projektu do Klienta wraz z protokołem” (T); 78 „Otrzymanie podpisanego protokołu” (T); 80 „Akceptacja rozwiązania przez Klienta” (T, wsp. PTH) | Pełna | Macierz dodaje protokół przekazania dokumentacji, którego mapa nie pokazuje; mapa dodaje zdarzenie czasowe z umowy. |

| Etap | Elementy mapy (Nr elementu) | Krok macierzy (Lp.) i wykonawca | Zgodność | Komentarz |
|---|---|---|---|---|
| E | 40–41: wykonanie zestawienia, typ rozliczenia projektu | 74 (T); 73 „Poinformowanie klienta o kosztach projektowania” (T, KZT); 149–150 rozliczenie projektowania ryczałtowego / rewizji (PTH, T) | Częściowa | Typ rozliczenia (LV/ryczałt/stawka) jest w macierzy rozstrzygany dopiero w rozliczeniu miesięcznym. |
| E | 42–45: wybór kanału przekazania zestawienia (Handlowiec / LOK / samodzielnie) | 81 „Złożenie zamówienia zestawienia do LOKu, który jest najbliżej budowy” (T, poinf. PTH) | Częściowa | Macierz definiuje jedną ścieżkę (T → LOK najbliżej budowy); mapa pokazuje trzy ścieżki i „brak jasnych kryteriów”. Macierz standaryzuje ten wybór. |
| F | 46–50: sprawdzenie listy, doprecyzowanie z klientem, zestawienie do wydania | 84 „Samodzielne zestawienie Klienta z prośbą o sprawdzenie” (KZT, wsp. T); 88 „Zamiana błędnie zamówionych elementów” (K); 89 link do przeglądu wyrobów (LOK); 91 „Wprowadzenie zamówienia od Klienta do PERIAN” (LOK) | Częściowa | Na mapie listę sprawdza LOK; w macierzy sprawdzenie zestawienia klienta jest po stronie KZT/T, a korekta – po stronie klienta. |
| G | 51, 69–73: wprowadzenie do systemu, sprawdzenie WK, kontakt do PTH, uzupełnienie WK | 92 „Wprowadzenie zamówienia do PSD” (LOK, wsp. LC); 90 „Sprawdzenie warunków kontraktu i wprowadzenie do PSD” (LOK); 29–30 warunki kontraktu w CENTRIO (PTH, zatw. DO) | Pełna | — |
| G | 52–59: sprawdzenie i nadanie numeru klienta, ponaglenie | Brak | Brak | Cała pętla numeru klienta (LOK ↔ PTH ↔ Dział Rozliczeń) nie ma odpowiednika w macierzy. |
| G | 60–62: blokada normalna/absolutna, prośba o odblokowanie, informacja o zmianie statusu | 165 „Wprowadzenie zamówienia… Klienta będącego na blokadzie (3 dni)” (LOK, zatw. DO); 169 „Zdjęcie blokady” (WiR, DO; zatw. DH) | Częściowa | Macierz nie rozróżnia blokady normalnej i absolutnej; wprowadza zatwierdzenie DO/DH, którego mapa nie pokazuje. |
| G | 63–68: sprawdzenie i nadanie numeru zlecenia | Brak | Brak | Pętla numeru zlecenia nie występuje w macierzy (uwaga na mapie: „Brak mierzenia”). |
| H | 74–82: forma rozliczenia, stworzenie drzewa LV, wprowadzenie do PSD | 34 „Stworzenie drzewka LV w pliku PERIan” (PTH, wsp. IOS); 32 struktura zlecenia w Centrio (PTH); 92 (LOK) | Częściowa | Na mapie drzewo LV tworzy LOK; w macierzy – PTH (w procesie „Obsługa budowy [przygotowanie]”). Rozbieżność właściciela czynności. |
| I | 83–85: sprawdzenie dostępności lokalnie, pytanie do OM | 93 „Sprawdzenie dostępności materiału w PSD” (LOK); 94 „Sprawdzenie dostępności materiału” (LOK, wsp. LC, poinf. K) | Pełna (LOK) / Brak (OM) | Zapytanie do OM o stan 4XXX/5XXX nie jest krokiem macierzy. |
| I | 86–94: sprawdzenie statusu 5XXX, przegląd jakościowy 4XXX, przeksięgowania, wyksięgowanie | Najbliższy: 112–113 Wariant 3 „Materiał dostępny na innych magazynach [np. Remontowy]” (LOK, poinf. Z-ca OM) | Brak | Czynności magazynowe (przeksięgowanie, złomowanie) nie występują w macierzy; wariant 3 przypisuje działanie LOK, nie OM. |
| I | 95–103: podebranie z innej rezerwacji, przypomnienie w telefonie, tabelka braków do LC, kontrola dyspozycji | 101 „Zamówienie do LC [opcjonalne]” (LOK, wsp./kons. LC); 114–115 wariant 4 | Częściowa | Odrezerwowanie, przypomnienie w telefonie i tabelka braków nie są krokami macierzy. |

| Etap | Elementy mapy (Nr elementu) | Krok macierzy (Lp.) i wykonawca | Zgodność | Komentarz |
|---|---|---|---|---|
| I | 104–108: zamiana brakującego elementu | 107 „Kontakt / Zapytanie do BT” (LOK); 108 „Analiza możliwości zmiany przez BT” (T); 109 „Konsultacja z Klientem” (T, zatw. DO); 110 „Przygotowanie zmiany zestawienia” (T); 111 „Wprowadzenie zmiany zestawienia” (LOK) | Pełna | Macierz rozstrzyga wątpliwość z mapy: decyzję o zamianie podejmuje Technolog (BT), LOK ją wprowadza. |
| J | 109–113: rezerwacja, wysłanie do Stradivari, blokada, zdjęcie blokady | 117 „Przesłanie zamówienia do Stradivari” (LOK); 165, 169 | Pełna (117) / Częściowa (blokada) | Rezerwacja materiału jako odrębna czynność nie występuje w macierzy (mieści się w 92). |
| J | 114–115: sprawdzenie pilności | Brak | Brak | Pojęcie zlecenia pilnego nie występuje w macierzy (na mapie: „do zdefiniowania”). |
| K | 116–118, 119–123: inne magazyny, rezerwacja, uzgodnienia z klientem | 95–99 Wariant 1 (całość w innym magazynie) i 100–106 (częściowo) – LOK; 98/105 „Organizacja transportu” (LOK, wsp. LC, poinf. K) | Pełna | Macierz definiuje warianty 1–4 organizacji materiału, spójne z bramkami mapy. |
| K | 124–135: zwroty od klientów, kontakt z klientami i innymi LOK | 96–97, 103–104 „Kontakt z innym LOK / Odpowiedź z innego LOK” (LOK) | Częściowa | Poszukiwanie materiału na zwrotach od klientów (PSD, kontakt z klientami) nie jest krokiem macierzy; zwroty (128–134) są w macierzy procesem inicjowanym przez klienta. |
| K | 136–139: informacja LC o brakach, odpowiedź, dostawa z innego kraju | 114 „Wysłanie zapytania do LC” (LOK); 115 „Sprawdzenie dostępności materiału i odpowiedź” (LC, poinf. LOK, T, PTH) | Pełna | — |
| K | 140–143: kontakt z Technologiem i Handlowcem, rezygnacja / przeprojektowanie | 116 „Rozwiązanie zamienne przez Technologa [jeśli brak na świecie]” (T, zatw. KZT, poinf. K, LOK) | Częściowa | „Zamknięcie zlecenia” przy rezygnacji klienta nie jest krokiem macierzy. |
| L | 144–151: spedycja, zlecenie transportowe, kontakt z kierowcą, transport alternatywny | 99/106 „Założenie zlecenia w PERI transport i przesłanie danych do LOKu” (LOK); 120 „Zaplanowanie transportu” (LOK, poinf. Przewoźnik) | Pełna | — |
| M | 152–158: sprawdzenie zamówienia, komentarz, przekazanie operatorowi, szykowanie | 118 „Kompletacja zamówienia” (O, zatw. MISTRZ, kons. Z-ca OM, poinf. LOK) | Częściowa | Macierz agreguje 7 elementów mapy w jeden krok; obsługa komentarzy (ustna) nie jest opisana. |
| M | 159–162: fizyczny brak, sprawdzenie 4XXX/5XXX, informacja do LOK | 119 „Kontakt z LOK w razie niezgodności” (O, zatw. MISTRZ) | Pełna | — |
| M | 163–171: zmiany asortymentowe/ilościowe w trakcie szykowania | Brak (92 mierzy „ilość zmian”) | Brak | Postępowanie przy zmianach w trakcie szykowania nie jest opisane w macierzy. |
| M | 172–174: odłożenie, gotowość i wydruk w Stradivari | 123 „Sprawdzenie przygotowanego zamówienia” (MISTRZ); 125 „Pobranie zamówienia ze STRADIVARI” (MISTRZ) | Częściowa | Macierz lokuje te czynności w procesie Załadunek. |
| M | 175–179: dostawa brakujących elementów, przyjęcie, naprawy/remonty | Brak (130–132 dotyczą zwrotów od klienta; 184 „Remont elementów” w Serwisie PERI) | Brak | Przyjęcie dostaw wewnętrznych z LC nie jest krokiem macierzy. |

| Etap | Elementy mapy (Nr elementu) | Krok macierzy (Lp.) i wykonawca | Zgodność | Komentarz |
|---|---|---|---|---|
| N | 180–195: decyzja z kim wyjaśnić brak, podmianka / późniejszy transport / rezygnacja, wirtualne wydanie, kasowanie z PSD | Brak | Brak | Cała procedura korygująca po fizycznym braku nie występuje w macierzy. |
| O | 196–204: zmiany w zestawieniu, anulowanie zamówienia | Brak (117 mierzy „ilość anulowanych zamówień”) | Brak | Macierz mierzy skutek, nie definiuje postępowania. |
| P | 205–219: warianty transportu (spedycyjny, klienta, własny PERI) | 120 „Zaplanowanie transportu” (LOK, poinf. Przewoźnik); 121 „Awizacja transportu PLX” (LOK); 122 „Kontakt z Klientem” (LOK) | Częściowa | Macierz nie rozróżnia trzech wariantów; nie zawiera kroków „wprowadzenie kosztów do systemów” ani „zlecenie w Peri Transport” (poza 99/106). |
| Q | 220–233: przyjazd kierowcy bez awizacji | Brak | Brak | Wątek wyjątkowy nieobecny w macierzy. |
| R | 234–240: sprawdzenie przygotówki, zdjęcia, załadunek, zakończenie w Stradivari | 123 (MISTRZ); 124 „Zdjęcia materiału i załadunek” (O, zatw. Z-ca OM); 125 (MISTRZ) | Pełna | Macierz dodaje zatwierdzenie Z-cy OM oraz eskalację do Szefa CL „jeśli błąd”. |
| S | 241–247: wydruk WZ, blokada, dokumenty dla kierowcy, dodatkowy transport | 126 „Wydruk WZ” (LOK); 127 „Wydanie dokumentów kierowcy” (LOK, poinf. Kierowca, K); 169 | Pełna | „Organizacja dodatkowego transportu” nie jest krokiem macierzy. |
| T | 248–258: ścieżka sprzedaży ze specjalnymi warunkami, opakowania niesystemowe | 135–141 „Sprzedaż asortymentu na przedpłatę” (PTH, WiR, LOK) – wyłącznie aspekt finansowy | Brak | Fizyczne szykowanie sprzedaży, ocena jakościowa, przepakowanie i opakowania w kaucji nie występują w macierzy. |

*Źródło: opracowanie własne.*

**Elementy pokrywające się**

Pełną zgodność stwierdzono dla rdzenia procesu, tj. dla czynności, które są rutynowe, systemowe i mają jednoznacznego wykonawcę: przydzielenie pracy w Dziale Technicznym (70), weryfikacja zakresu i wykonanie rysunku (71, 74), przekazanie do akceptacji i akceptacja (77, 78, 80), wprowadzenie zamówienia do PSD i sprawdzenie warunków kontraktu (90, 92), sprawdzenie dostępności (93, 94), warianty organizacji materiału z innych magazynów i z LC (95–106, 114, 115), zamiana elementów (107–111), przesłanie do Stradivari (117), kontakt magazynu z LOK przy niezgodności (119), planowanie transportu (99, 106, 120), załadunek (123–125) oraz wydruk WZ i wydanie dokumentów (126, 127). W tych obszarach macierz nie tylko potwierdza mapę, lecz także uzupełnia ją o role zatwierdzające i konsultacyjne (KZT, DO, Z-ca OM, Szef CL) oraz o mierniki (np. czas realizacji zamówienia T/PTH–LOK, czas przygotowania zamówienia w magazynie, ilość anulowanych zamówień, ilość błędów w załadunku, ilość niepodstawionych aut spedycji, ilość przerwań cyklu serwisowego).

**Elementy niepokrywające się – mapa bez odpowiednika w macierzy**

Brak odpowiednika w macierzy dotyczy przede wszystkim ścieżek wyjątkowych i korygujących, a więc dokładnie tych, w których mapa gromadzi najwięcej uwag o braku standardu:

- nadawanie numeru klienta i numeru zlecenia w PSD przez Dział Rozliczeń wraz z pętlami ponaglenia (etapy B, G) – mimo że mapa sygnalizuje wydania na niewłaściwy numer zlecenia i brak pomiaru tego zjawiska;
- rozróżnienie blokady normalnej i absolutnej oraz odblokowanie „na czas rezerwacji” (G);
- kwalifikacja zlecenia jako pilnego i ścieżka „pilne, ale niedostępne lokalnie” (J, K);
- czynności magazynu na magazynach 4XXX/5XXX (sprawdzenie statusu, przegląd jakościowy, przeksięgowanie, wyksięgowanie) – w macierzy wariant 3 przypisuje działanie LOK, nie OM (I);

- nieformalne narzędzia zarządzania brakami: podebranie z innej rezerwacji, przypomnienie w telefonie, tabelka braków (I);
- poszukiwanie materiału na zwrotach od klientów i wśród klientów innych LOK (K);
- obsługa fizycznego braku po stronie LOK: decyzja z kim wyjaśnić brak, podmianka, późniejszy transport, rezygnacja, „wirtualne wydanie", kasowanie z PSD i PLX (N);
- obsługa zmian w zestawieniu i anulowania w trakcie szykowania oraz gdy towar oczekuje na wysyłkę (M, O) – macierz mierzy jedynie liczbę zmian i anulowań;
- przyjęcie dostaw brakujących elementów i skierowanie do napraw (M);
- przyjazd kierowcy bez awizacji (Q);
- wprowadzanie kosztów transportu do systemów PLX / Stradivari / Peri Transport – krok „czasem zapominany" (P);
- fizyczna ścieżka sprzedaży: specjalne warunki, ocena jakościowa, wybór towaru przez klienta, przepakowanie w opakowania niesystemowe, opakowania w kaucji (T).

**Elementy niepokrywające się – macierz bez odpowiednika na mapie**

Macierz obejmuje 21 procesów, z których mapa dotyczy zasadniczo pięciu (przygotowanie zamówienia z projektem i bez projektu, obsługa zamówienia przez LOK, organizacja materiału, przygotowanie materiału do wydania i transportu, załadunek) oraz fragmentów windykacji i sprzedaży. Poza zakresem mapy pozostają: prospecting, oferta (1–19), negocjacje (20–27), obsługa budowy – przygotowanie (28–42), pierwomontaż (43–69), zwrot materiału (128–134), rozliczenie miesięczne i końcowe (142–155), reklamacje (156–164) oraz serwis PERI (170–189). Istotne dla przepływu deskowań jest zwłaszcza to, że macierz zawiera pełny proces zwrotu materiału (zgłoszenie, transport, rozładunek, sprawdzenie ilościowe i jakościowe, dokumenty) oraz jakościowe kryteria materiału zwracanego (JKZM, krok 40), podczas gdy mapa kończy się na wyjeździe do klienta. Z perspektywy pętli obiegu deskowań mapa opisuje więc tylko połowę cyklu.

**Rozbieżności w przypisaniu wykonawcy**

Odrębną kategorię stanowią czynności obecne w obu dokumentach, ale przypisane innym wykonawcom (wszystkie odczyty z tabeli porównawczej):

- **Sprawdzenie zakresu i zgodności z ofertą** – mapa: tor Działu Handlowego; macierz: Technolog wykonuje (72, 75), PTH zatwierdza.
- **Stworzenie drzewa LV** – mapa: LOK (etap H); macierz: PTH ze wsparciem IOS (34), w procesie „Obsługa budowy [przygotowanie]".
- **Sprawdzenie listy materiałowej klienta** – mapa: LOK (etap F); macierz: KZT ze wsparciem T (84), a korekta błędnie zamówionych elementów – Klient (88).
- **Decyzja o zamianie brakującego elementu** – mapa: „Pytanie jest do Klienta lub Technologa", odpowiedzialność LOK do doprecyzowania; macierz: analiza i przygotowanie zmiany przez Technologa (108–110), konsultacja z klientem przez T z zatwierdzeniem DO (109), wprowadzenie przez LOK (111).
- **Materiał na magazynach remontowych** – mapa: czynności w torze Magazynu (OM); macierz: LOK wysyła zapytanie do innego LOK, Z-ca OM jest jedynie informowany (112–113).
- **Kanał przekazania zestawienia z Działu Technicznego** – mapa: trzy równoprawne ścieżki wybierane bez kryteriów; macierz: jedna ścieżka T → LOK najbliżej budowy (81).
- **Weryfikacja windykacyjna** – mapa: przy każdym zamówieniu, w torze Handlowym; macierz: w procesie Oferta, przez WiR, obligatoryjnie po 3-miesięcznej przerwie (4).

Część tych rozbieżności (zamiana elementów, kanał przekazania zestawienia, zamówienia bez projektu w QUICKSOLVE / Library Viewer) należy interpretować jako świadome decyzje standaryzacyjne podjęte między listopadem 2023 a październikiem 2025 – macierz rozstrzyga to, co mapa oznaczała jako „brak jasnych kryteriów". Pozostałe (drzewo LV, sprawdzenie zakresu, magazyny remontowe) wymagają

wyjaśnienia z organizacją, ponieważ oba dokumenty deklarują różnych wykonawców tej samej czynności.

### Katalog problemów procesowych zidentyfikowanych na mapie

Uwagi procesowe naniesione na mapę pogrupowano tematycznie (tabela 4.21). Kolumna ostatnia zawiera ocenę autora, czy macierz z 2025 r. odnosi się do danego problemu.

*Tabela 4.21. Katalog uwag procesowych z mapy (cytaty) w podziale tematycznym*

| Obszar | Uwagi procesowe (cytaty z mapy) | Etap | Odniesienie w macierzy 2025 |
|---|---|---|---|
| Podział pracy i odpowiedzialności | „Nie ma jasnych reguł kiedy przekazujemy pracę"; „Brak jasnych kryteriów jaki temat może samodzielnie realizować Handlowiec – osoba, która powinna rozdzielać pracę"; „Brak jasnego podziału odpowiedzialności (znanego każdemu)"; „Powinna być każdorazowo kontrola działu Technicznego"; „Sprawdzić zapis pkt 1.3 w umowie"; „Brak jasnych kryteriów" (kanał przekazania); „Doprecyzować odpowiedzialność czy LOK może sam decydować o zamianie"; „Pytanie jest do Klienta lub Technologa"; „Doprecyzowanie jest czasem kierowane do technologa / handlowca" | B, E, F, I | Częściowo: kroki 84–86 (kryteria zamówień bez projektu), 81 (jedna ścieżka do LOK), 107–111 (zamiana przez BT). |
| Akceptacja i zmiany po stronie klienta | „Nie ma standardu, że bez akceptacji klienta nie realizujemy projektu dalej"; „Zestawienie może się zmienić, ale nie zawsze jest to komunikowane"; „Akceptacja od Klienta powinna być potwierdzeniem, a nie negowaniem"; „W międzyczasie klient może zmienić zestawienie"; „W większości akceptacje są mailowe (nie zawsze)"; „Nie jest respektowany ten czas (zapis w umowie)"; „Postępowanie w przypadku zmian klienta"; „Nie powinniśmy akceptować zmian w zestawieniu w trakcie szykowania" | B, E, M, O | Częściowo: protokoły przekazania dokumentacji (77, 78) i DTR (37, 38); brak reguł dla zmian po akceptacji. |
| Numeracja, blokady, warunki kontraktu | „Zwrotne informacje z logistyki wprowadzają dodatkową pracę w Dziale Technicznym"; „Dział rozliczeń wysyła informacje, że jest nowy Klient"; „Zdarza się wydanie na inny nr zlecenia bo nie został jeszcze nowy założony"; „Brak mierzenia"; „Sprawdzenie w Centrio – warunki nie zawsze są uzupełnione"; „Różne sposoby postępowania (kontakt do PTH lub samodzielnie kontakt LOK z Klientem)" | G, J | Częściowo: 29–30 z instrukcją i raportem PowerBI „CENTRIO – warunki handlowe"; 165–169 z aplikacją SPoKo i miernikami blokad; numeracja – brak. |
| Rezerwacje i braki | „Powinna być rezerwacja elementów np. Kozły na wczesnym etapie"; „REZERWACJE"; „Możliwość wykonania jeśli jest dostępny w kraju"; „Na koniec dnia lub na początek następnego"; „Cały czas jest kontrola czy można zrealizować transport"; „Jeśli płyta jest remontowa, ale czeka na remont, to nadal widać ją w systemie"; „Dostawa może być w różne CL" | D, I, K | Częściowo: warianty 1–4 organizacji materiału; miernik „ilość przerwań cyklu serwisowego [podbieranie materiału z remontu]" (120). |
| Pilność i zapisy umowne | „Do zdefiniowania czym jest zlecenie pilne"; „Do zdefiniowania ścieżka jak postępować w sytuacji kiedy zlecenie pilne, ale niedostępne lokalnie"; „Umowa zakłada 3 dni na realizację co często jest nierealne"; „Nie wszyscy w procesie znają zapisy w Umowie"; „W tej sytuacji powinno być przekazanie do LC"; „Nie ma standardu reagowania na szybkie rozwiązywanie błędów (klient czeka na bramie bo nie dostał tego co chciał)"; „Nie ma standardu kiedy działamy prokliencko (bierzemy wszystko na siebie) – np. naprawa naszego błędu" | J, K | Częściowo: „3 dni czasu na przygotowanie" pojawia się tylko przy kliencie na blokadzie (165); „Lista kontrolna wymagań umownych" (39). |
| Zwroty i współpraca między LOK | „Nie pilnujemy terminów zwrotów"; „Nie zawsze odpowiedź przychodzi" | K | Częściowo: miernik „ilość zwrotów po terminie" (132). |

| Obszar | Uwagi procesowe (cytaty z mapy) | Etap | Odniesienie w macierzy 2025 |
|---|---|---|---|
| Komunikacja LOK – Magazyn | „Dodatkowo wpisywany komentarz, o którym Mistrz OM musi pamiętać"; „Komentarz nie zawsze jest lub czasem można go przegapić"; „Operator nie widzi komentarzy"; „Uwagi z komentarz są przekazywane operatorowi ustnie"; „Kontakt telefoniczny z LOK"; „Nie powinniśmy akceptować definiowania jakości" | J, M | Brak. |
| Systemy i dane | „Operator czasem ich nie usuwa – LOK musi usunąć"; „Po każdym wydaniu trzeba ręcznie usunąć wiszące w systemie rezerwacje (towar, opakowania)"; „Ten krok czasem jest zapominany" (koszty w PLX, Stradivari, Peri Transport); „Trzeba przejść przez taki sam proces jak wydanie dla Klienta"; „Różny sposób przekazania m.in. Excel, PERIan, pdf"; „W Kętach zdarza się przekazanie zestawienia z LV do LOK (tylko lista materiału)"; „Różny sposób dystrybucji projektów (Kęty, Koninko)"; „Klienci mają różne osoby do kontaktu w wariancie Wrocławskim"; „Są różne warunki dla stworzenia drzewa LV" | D, E, H, M, O, P | Częściowo: raporty PowerBI (142–145), „Przewodnik po LV" (32, 34), „e-mail DW z PERIan" jako standard przekazania (arkusz POINFORMOWANI). |
| Sprzedaż, opakowania, kaucja | „Zastanowić się nad wprowadzeniem procentowego udziału w kaucji zamiast 500+"; „Wymaga to poświęcenia czasu na wymyślenie opakowania zastępczego"; „Do zmierzenia koszt opakowania własnego + bezpieczeństwo"; „Wprowadzenie opakowań w kaucji"; „Oczekiwania mogą być różne"; „Czasem Klient sam wybiera sobie towar na placu" | O, T | Częściowo: „Raport PowerBI: LV Opakowania wg pozycji" (143); brak reguł dla sprzedaży fizycznej. |
| Pomiar | pole zielone „Czas na zdobywanie informacji"; „Brak mierzenia"; „Do zmierzenia koszt opakowania własnego + bezpieczeństwo" | F, G, T | Tak: kolumna „Co chcemy mierzyć w procesie?" definiuje 20 mierników, m.in. czas realizacji zamówienia T/PTH–LOK, czas opracowania zamówienia, ilość zamówień/dokładek/zmian, ilość anulowanych zamówień, ilość błędów w załadunku. |

*Źródło: opracowanie własne.*

**Podsumowanie i wnioski**

Synteza wyników

Analiza trzech dokumentów źródłowych pozwala sformułować pięć ustaleń. Po pierwsze, proces obsługi zlecenia w PERI Polska jest procesem wysoce między-funkcyjnym: na mapie zidentyfikowano 18 interfejsów między uczestnikami, a LOK uczestniczy w 11 z nich, co czyni tę komórkę krytycznym węzłem przepływu zarówno materiału, jak i informacji. Po drugie, rdzeń procesu (projektowanie, wprowadzenie do PSD, warianty organizacji materiału, transport, załadunek, WZ) jest spójnie opisany w obu dokumentach, natomiast ścieżki wyjątkowe – braki fizyczne, zmiany po akceptacji, blokady, pilność, kierowca bez awizacji, sprzedaż fizyczna – są obecne wyłącznie na mapie i wyłącznie tam gromadzą się uwagi o braku standardu. Po trzecie, macierz z 2025 r. rozstrzyga część problemów sygnalizowanych na mapie z 2023 r. (kryteria zamówień bez projektu, jedna ścieżka przekazania zestawienia, decyzja o zamianie po stronie Technologa, mierniki procesu), ale pozostawia bez opisu interfejs LOK–Magazyn oraz całą procedurę korygującą po wykryciu braku. Po czwarte, w co najmniej trzech czynnościach (drzewo LV, sprawdzenie zakresu, magazyny remontowe) dokumenty wskazują różnych wykonawców. Po piąte, mapa obejmuje tylko połowę cyklu obiegu deskowań – od zamówienia do wyjazdu do klienta – podczas gdy zwrot, ocena jakościowa zwrotu i remont są opisane wyłącznie w macierzy.

**Odniesienie do tez rozprawy i metody Flexible Formwork Flow**

Teza główna rozprawy (podrozdział 3.3), operacjonalizowana w metodzie Flexible Formwork Flow (FFF), zakłada, że przewaga wynikająca z szybkości montażu systemów deskowań przekłada się na efektywność budowy nie tylko dzięki organizacji robót na placu budowy, lecz przede wszystkim dzięki ciągłości i elastyczności przepływu elementów deskowaniowych w całym łańcuchu: od projektu

technologicznego, przez rezerwację i kompletację w centrum logistycznym, transport, montaż, demontaż, zwrot i remont, aż po ponowne udostępnienie elementów kolejnemu odbiorcy.

**Analiza mapy i macierzy PERI Polska dostarcza dla tezy głównej i tezy szczegółowej TS3 następujących argumentów empirycznych:**

- **Przepływ jest przerywany w punktach styku, nie wewnątrz zadań.** Wszystkie zdarzenia oczekiwania na mapie (decyzje klienta, informacja zwrotna z LC, odpowiedź innych LOK, akceptacja numeru, zdjęcie blokady, czas określony w umowie) leżą na granicach torów. Elastyczność przepływu deskowań jest więc funkcją jakości interfejsów organizacyjnych, a nie wydajności pojedynczych stanowisk.
- **Elastyczność jest dziś realizowana nieformalnie.** Mechanizmy, które faktycznie pozwalają dostosować dostawę do zmieniających się potrzeb budowy – podebranie z innej rezerwacji, tabelka braków, przypomnienie w telefonie, podmianka elementu, ustne przekazanie zmian operatorowi, kontakt telefoniczny magazynu z LOK – nie mają odpowiednika w macierzy odpowiedzialności. FFF wymaga, by te mechanizmy zostały nazwane, przypisane i zmierzone, a nie zlikwidowane.
- **Zmiana zestawienia jest zdarzeniem normalnym, a nie wyjątkiem.** Mapa modeluje zmiany w zestawieniu w czterech miejscach (po akceptacji projektu, w trakcie szykowania, gdy towar oczekuje na wysyłkę, przy załadunku) i za każdym razem opatruje je uwagą o braku standardu. Koncepcja FFF przyjmuje zmienność zapotrzebowania na elementy jako właściwość procesu budowlanego i postuluje projektowanie procesu logistycznego pod kątem obsługi zmian, a nie ich blokowania.
- **Widoczność stanu elementów decyduje o elastyczności.** Uwagi „płyta remontowa nadal widać w systemie", „nie pilnujemy terminów zwrotów", „wiszące rezerwacje", „brak mierzenia" wskazują, że system nie odzwierciedla rzeczywistego statusu elementów deskowaniowych (dostępny / zarezerwowany / w remoncie / u klienta / w drodze). Bez wiarygodnego statusu każdej sztuki elastyczny przepływ jest niemożliwy.
- **Pełny cykl wymaga domknięcia mapy o zwrot i remont.** Ponieważ mapa kończy się na wyjeździe do klienta, a macierz opisuje zwrot i serwis osobno, obecnie żaden dokument nie pokazuje pętli elementu. FFF traktuje zwrot z budowy jako źródło zaopatrzenia kolejnej budowy (co mapa już intuicyjnie robi w etapie K – „Sprawdzenie czy towar jest na zwrotach od Klientów"), a więc wymaga zamkniętego modelu obiegu.

**Odniesienie do paradygmatu Construction 4.0**

Paradygmat Construction 4.0 – przeniesienie założeń Przemysłu 4.0 na budownictwo – akcentuje cyfryzację, integrację systemów informatycznych, automatyczną identyfikację obiektów, dane w czasie rzeczywistym oraz decyzje oparte na danych. W świetle analizowanych dokumentów PERI Polska dysponuje rozbudowaną infrastrukturą systemową: w mapie i macierzy wymieniono PSD, Stradivari, PLX, Peri Transport, Centrio, CRM, PERIan, QUICKSOLVE, Library Viewer, SPoKo, Showpad, raporty PowerBI oraz skanowanie kodów QR przy załadunku. Jednocześnie mapa ujawnia „analogowe wyspy" między tymi systemami: zestawienie przekazywane w Excelu, PERIan lub pdf; komentarz do rezerwacji, którego operator nie widzi; tabelka braków wysyłana e-mailem na koniec dnia; przypomnienie w telefonie; ręczne usuwanie rezerwacji po wydaniu; zapominane wprowadzanie kosztów; ustne przekazywanie zmian ilościowych. Z perspektywy Construction 4.0 problemem nie jest brak narzędzi, lecz brak integracji przepływu danych między nimi na styku LOK–Magazyn oraz brak automatycznej aktualizacji statusu elementu. Macierz z 2025 r. dodaje warstwę pomiarową (20 mierników, raporty PowerBI), co jest warunkiem koniecznym, ale niewystarczającym – mierniki opisują skutki (liczba zmian, anulowań, błędów), a nie stan przepływu w czasie rzeczywistym.

**Odniesienie do paradygmatu Construction 5.0**

Construction 5.0, wzorem Przemysłu 5.0, uzupełnia agendę technologiczną o trzy filary: orientację na człowieka (human-centricity), odporność (resilience) i zrównoważony rozwój (sustainability). Analizowane dokumenty dostarczają materiału dla każdego z nich. W wymiarze orientacji na człowieka mapa pokazuje, że kluczowe decyzje o elastyczności przepływu (czy zamienić element, czy działać prokliencko, kogo zapytać o brak, czy przyjąć zmianę w trakcie szykowania) są podejmowane przez

pracowników LOK i Mistrza OM w warunkach nieokreślonych uprawnień – uwagi „doprecyzować odpowiedzialność czy LOK może sam decydować", „Mistrz OM musi pamiętać", „nie wszyscy w procesie znają zapisy w umowie" opisują obciążenie wiedzą ukrytą i ryzykiem decyzyjnym, które paradygmat 5.0 postuluje przenieść na czytelnie zdefiniowane uprawnienia wspierane przez systemy, a nie na pamięć pracownika. W wymiarze odporności mapa dokumentuje brak zdefiniowanej ścieżki dla zlecenia pilnego niedostępnego lokalnie, nieprzychodzące odpowiedzi innych LOK oraz nierealny trzydniowy termin umowny – czyli brak zaprojektowanej reakcji na zakłócenia; jednocześnie wielopoziomowa sieć zaopatrzenia (magazyn lokalny → inne CL → zwroty od klientów → LC → inny kraj) stanowi zasób odporności, który wymaga jedynie sformalizowania. W wymiarze zrównoważonego rozwoju mapa i macierz opisują obieg zamknięty elementów (magazyny 4XXX/5XXX, przegląd jakościowy, remont, złomowanie, JKZM, serwis PERI) oraz problem opakowań niesystemowych i kaucji – obszary, w których decyzje operacyjne bezpośrednio przekładają się na zużycie materiału i transport. Ujęcie procesu w kategoriach FFF łączy oba paradygmaty: integracja danych (4.0) jest środkiem, a elastyczny, odporny i oparty na uprawnionych ludziach przepływ deskowań (5.0) – celem.

**Rekomendacje badawcze i praktyczne wynikające z podrozdziału**

- uzupełnienie mapy o tory Działu Rozliczeń i Logistyki Centralnej oraz o proces zwrotu i remontu, tak aby model obejmował pełną pętlę elementu deskowaniowego;
- ujednolicenie przypisania wykonawców dla czynności rozbieżnych między mapą a macierzą (drzewo LV, sprawdzenie zakresu, magazyny remontowe) i potwierdzenie z organizacją, które z rozbieżności są zmianą standardu, a które błędem dokumentu;
- sformalizowanie w macierzy ścieżek wyjątkowych obecnych na mapie: obsługa braku fizycznego, zmiany po akceptacji, pilność, kierowca bez awizacji, sprzedaż fizyczna – wraz z wykonawcą, zatwierdzającym i miernikiem;
- opisanie interfejsu LOK–Magazyn w arkuszu „POINFORMOWANI" (obecnie 15 z 16 przepływów kończy się u PTH) i zastąpienie komunikacji ustnej komunikacją systemową widoczną dla operatora;
- wykorzystanie mierników zdefiniowanych w macierzy (w szczególności: czas realizacji zamówienia T/PTH–LOK, czas opracowania zamówienia, ilość zmian, ilość anulowanych zamówień, ilość przerwań cyklu serwisowego) jako zmiennych zależnych w dalszej, ilościowej części pracy dotyczącej elastyczności przepływu deskowań.

## 4.4. Podsumowanie części badawczej – wnioski dla metody FFF, tez rozprawy i warstwy uczącej SSN

**Trzy poziomy analizy, jeden kierunek wniosków.** Trzy badania przedstawione w rozdziale dotyczą różnych poziomów i opierają się na odmiennych źródłach: branżowym katalogu normatywów, deklaracjach 50 wykonawców i dokumentacji procesowej dostawcy. Prowadzą jednak do zbieżnego wniosku: rezerwy efektywności cyklu deskowaniowego tkwią w mniejszym stopniu w samym systemie deskowania i w samej operacji montażu, a w większym – w organizacji pracy i przepływu wokół tej operacji. Najważniejsze ustalenia zestawiono w tabeli 4.22.

Na poziomie operacji (podrozdział 4.1) struktura nakładu dla wariantu odniesienia – ściany prostej o wysokości 270 cm – jest zdominowana przez deskowanie (ok. 55,9% z 0,34 rb-g/m²), przed rozdeskowaniem (ok. 20,6%), transportem (ok. 17,6%) oraz czyszczeniem i olejeniem (ok. 5,9%). Sama zmiana organizacji pracy – przejście z pracy pojedynczymi elementami na pracę zestawami – obniża nakład z 0,34 do 0,30 rb-g/m² (o ok. 11,8%), podczas gdy rozstęp między porównywalnymi systemami producenckimi wynosi ok. 18%. Nakład silnie różnicują geometria obiektu (od 0,34 do 0,44 rb-g/m² w części ogólnej) i nasycenie otworami (pojedynczy otwór drzwiowy odpowiada nakładowi deskowania ok. 4,7 m² ściany prostej), a improwizowana adaptacja deskowania ramowego do ścian łukowych podnosi go ponad dwukrotnie.

Na poziomie rynku (podrozdział 4.2) 76% wykonawców ocenia dostępność wykwalifikowanych cieśli jako słabą lub krytyczną, a 38% wskazuje niedobór cieśli i wzrost kosztów pracy jako czynnik o

największym wpływie na efektywność robót deskowaniowych w horyzoncie 5 lat. Główne straty czasu 68% respondentów lokalizuje w transporcie wewnętrznym i logistyce (w tym przestojach żurawia) oraz w czyszczeniu, sortowaniu i zwrotach, a jedynie 14% – w samym montażu i demontażu. Dojrzałość procesowa jest niska: 92% firm nie stosuje w praktyce narzędzi LEAN, 88% nie korzysta regularnie z narzędzi cyfrowych, 44% w ogóle nie mierzy czasów montażu i demontażu, a systematyczny pomiar na każdej budowie prowadzi 18%. Jednocześnie 64% firm korzysta z deskowań głównie lub wyłącznie w modelu najmu, co przenosi znaczną część odpowiedzialności za dostępność i przepływ sprzętu na dostawcę.

Na poziomie procesu dostawcy (podrozdział 4.3) mapa procesu obsługi zlecenia obejmuje 258 elementów i 18 interfejsów między uczestnikami, z których w 11 uczestniczy Logistyczna Obsługa Klienta. Rdzeń procesu jest spójnie opisany na mapie i w macierzy odpowiedzialności (189 kroków w 21 procesach), natomiast ścieżki wyjątkowe – braki fizyczne, zmiany po akceptacji, blokady, pilność – są obecne wyłącznie na mapie i tam gromadzą się uwagi o braku standardu. Między systemami informatycznymi przedsiębiorstwa pozostają „analogowe wyspy" (zestawienia w różnych formatach, komentarze niewidoczne dla operatora, tabelki wysyłane e-mailem, ustne przekazywanie zmian), a mapa obejmuje tylko połowę cyklu obiegu deskowań – od zamówienia do wydania materiału.

*Tabela 4.22. Synteza wyników części badawczej – ustalenia, element metody FFF, teza i znaczenie dla warstwy uczącej SSN*

| Poziom analizy | Kluczowe ustalenie | Element metody FFF | Teza szczegółowa | Znaczenie dla warstwy uczącej SSN |
|---|---|---|---|---|
| Operacja (podrozdz. 4.1) | Praca zestawami obniża nakład z 0,34 do 0,30 rb-g/m² (ok. 11,8%); rozstęp między systemami ok. 18%; geometria i otwory silnie różnicują nakład | Minimalizacja marnotrawstwa (zbędny ruch i przetwarzanie); standaryzacja trybu pracy | TS2 | Zestaw predyktorów (system, wysokość, kotwienie, tryb pracy, krotność użycia, geometria, otwory); wartości katalogowe jako poziom odniesienia; brak miar rozproszenia |
| Rynek (podrozdz. 4.2) | 68% wskazań strat wokół deskowania wobec 14% w montażu i demontażu; 76% – słaba lub krytyczna dostępność cieśli; 92% bez LEAN; 44% bez pomiaru czasów | Wsparcie pracowników, szkolenia i rozwój, minimalizacja marnotrawstwa w logistyce budowy | TS1 i TS3 | Niska kultura pomiaru u wykonawców – głównym źródłem danych uczących jest dostawca; stosowanie LEAN i pomiaru czasów jako zmienne zarządcze |
| Proces dostawcy (podrozdz. 4.3) | 18 interfejsów, LOK w 11; ścieżki wyjątkowe obsługiwane nieformalnie; mapa obejmuje połowę cyklu; w macierzy zdefiniowano mierniki procesu | Cyfryzacja i analiza danych; elastyczność i adaptacja; jednoznaczne przypisanie decyzji | TS3 | Punkty styku jako miejsca rejestracji zdarzeń (status, odchylenia); mierniki macierzy jako kandydaci na zmienne i etykiety; jakość danych zależna od przypisania odpowiedzialności |

*Źródło: opracowanie własne.*

**Odniesienie do metody FFF.** Wyniki trzech badań można odczytać przez katalog marnotrawstwa i strategie składowe metody FFF (Majkowski Ł., Pasławski J., 2023). Praca zestawami (podrozdział 4.1) jest przykładem eliminacji zbędnego ruchu bez zmiany systemu deskowania – a więc czysto organizacyjnej realizacji strategii minimalizacji marnotrawstwa. Straty, które wykonawcy lokalizują wokół deskowania (podrozdział 4.2), odpowiadają pozycjom katalogu: przestojowi, nadmiernemu transportowi i zbędnym zapasom. Nieformalna obsługa ścieżek wyjątkowych u dostawcy (podrozdział 4.3) pokazuje z kolei, że elastyczność – jedna ze strategii FFF – jest dziś realizowana przez ludzi, a nie przez system; warunkiem jej przeniesienia do systemu jest cyfryzacja i analiza danych na styku uczestników procesu. Pierwszym wdrożeniem metody jest macierz odpowiedzialności obejmująca 189 kroków w 21 procesach wraz z zestawem mierników. Wzorcowa sekwencja operacji deskowania i rozdeskowania z katalogu normatywów oraz mapa procesu obsługi zlecenia tworzą łącznie szkielet mapy strumienia

wartości całego łańcucha dostawca–budowa–dostawca – narzędzia, które w metodyce LEAN służy dostrzeganiu i eliminowaniu marnotrawstwa (Rother M., Shook J., 1999).

**Odniesienie do tez rozprawy.** Wyniki rozdziału potwierdzają tezę szczegółową TS2 w dwóch jej składowych: organizacja pracy jest dźwignią tego samego rzędu co dobór systemu, a straty czasu powstają przede wszystkim wokół deskowania; potwierdzenie ma charakter normatywny i deklaratywny i wymaga uzupełnienia pomiarem na budowie. Analiza procesu obsługi zlecenia potwierdza składową tezy TS3 dotyczącą punktów styku i przypisania decyzji, a jej drugą składową – przepływ zamiast wolumenu – weryfikuje podrozdział 5.2. Dla tezy TS1 rozdział dostarcza kontekstu: deficyt cieśli czyni potencjał ludzi zasobem rzadkim, a wskazania strat związanych z transportem wewnętrznym i przestojami żurawia sygnalizują, że o cyklu może decydować zasób logistyczny, a nie brygada czy ilość deskowania; synchronizację trzech potencjałów bada się na poziomie budowy w podrozdziale 5.1. Wszystkie trzy badania wspierają pierwsze twierdzenie tezy głównej – że przewaga wynikająca z szybkości montażu systemów deskowań ujawnia się w pełni dopiero przy ciągłym i zsynchronizowanym przepływie, a o efektywności nie rozstrzyga sam system ani lokalna wydajność brygady.

**Odniesienie do warstwy uczącej SSN.** Rozdział wnosi do koncepcji sieci neuronowej (podrozdział 3.4) trzy elementy. Po pierwsze, katalog normatywów definiuje zmienną objaśnianą – nakład jednostkowy [rb-g/m²] – oraz zestaw predyktorów technicznych, a jego wartości stanowią poziom odniesienia, z którym porównać można przyszłe prognozy (tabela 4.15). Podaje on jednak wyłącznie średnie, bez miar rozproszenia, dlatego sieć ucząca się rozkładów nakładu wymaga pomiarów własnych. Zależność średniego nakładu na słup od krotności użycia kompletu, $S(n) = G/n + c$, jest przy tym przykładem modelu interpretowalnego, od którego zgodnie z przyjętym porządkiem należy zaczynać, a model czynnikowy przywołany na początku podrozdziału 4.1 – ujęciem, które sieć neuronowa uogólnia na zależności nieliniowe. Po drugie, badanie ankietowe pokazuje, że danych uczących nie należy oczekiwać od wykonawców: czasy montażu i demontażu systematycznie mierzy zaledwie 18% firm. Źródłem danych musi więc być dostawca, a zmienne zarządcze – stosowanie pomiaru czasów, narzędzi LEAN czy planowania taktowego – mogą wejść do modelu jako zmienne zastępcze nastawienia i dojrzałości organizacji. Otwartość 46% firm na narzędzia cyfrowe wskazuje przy tym kanał, przez który dane z budów mogłyby trafiać do dostawcy. Po trzecie, analiza procesu wskazuje miejsca, w których powstają dane o przepływie – punkty styku między uczestnikami – i zarazem pokazuje, że część z nich nie jest dziś rejestrowana w systemach, lecz przekazywana e-mailem, telefonicznie lub ustnie. Sieć rekurencyjna prognozująca dostępność elementów i terminy zwrotów wymaga, aby zdarzenia te – zmiany statusu, odchylenia, braki – były zapisywane w sposób ustrukturyzowany. Mierniki zdefiniowane w macierzy odpowiedzialności są krokiem w tym kierunku, a jednoznaczne przypisanie odpowiedzialności za wprowadzanie danych jest warunkiem ich jakości – co potwierdza założenie podrozdziału 3.4, że warstwa kognitywna nie zastępuje zmiany sposobu zarządzania, lecz ją zakłada. Decyzje o elastyczności przepływu pozostają przy tym w rękach ludzi – pracowników LOK, mistrzów placowych i technologów – których sieć ma wspierać, a nie zastępować.

**Ograniczenia.** Wnioski rozdziału mają ograniczenia wynikające ze źródeł. Katalog normatywów nie opisuje próby i procedury pomiarowej, nie podaje miar rozproszenia i jest osadzony w niemieckim systemie organizacyjnym i obmiarowym. Badanie ankietowe objęło 50 firm, a dostępne były wyłącznie rozkłady brzegowe odpowiedzi, co wykluczyło analizy krzyżowe; błąd oszacowania frakcji dla populacji wynosi maksymalnie ok. ±14 p.p. przy poziomie ufności 95%. **Analiza procesu dotyczy jednego przedsiębiorstwa, a mapa (2023 r.) i macierz (2025 r.) odzwierciedlają różne momenty jego rozwoju. Z tych powodów wyniki rozdziału traktuje się jako przesłanki, które rozdział 5 weryfikuje na danych operacyjnych: z pojedynczej budowy (podrozdział 5.1), z parku dzierżawnego i centrów logistycznych (podrozdział 5.2) oraz z rynku pracy i prefabrykacji (podrozdział 5.3).**

# 5. Implementacja i weryfikacja metody FFF – budowa, park dzierżawny, uwarunkowania rynkowe i nowe technologie

Rozdział stanowi część wdrożeniową rozprawy. Obejmuje kolejne poziomy analizy, na których weryfikowana jest teza główna (podrozdział 3.3), uzupełniając poziomy zbadane w rozdziale 4 (operację, rynek wykonawców i proces obsługi zlecenia): poziom budowy – synchronizację potencjałów deskowań, ludzi i logistyki na przykładzie biurowca INDUSTRIAL w Poznaniu (podrozdział 5.1), poziom parku dzierżawnego i centrów logistycznych dostawcy (podrozdział 5.2), poziom uwarunkowań rynkowych – relację kosztu pracy i cen deskowań oraz ekspansję prefabrykacji (podrozdział 5.3) – oraz poziom technologii, czyli cyfrowy monitoring betonu i druk 3D (podrozdział 5.4). Na każdym z tych poziomów opisano rozwiązania, które w trakcie przygotowywania rozprawy wprowadzono do praktyki PERI Polska Sp. z o.o. lub oceniono na danych rzeczywistych. Podrozdział 5.5 zestawia wyniki, odnosząc je do metody FFF, tez szczegółowych TS1–TS3, hipotezy operacyjnej oraz warstwy uczącej opartej na sztucznych sieciach neuronowych.

## 5.1. Synchronizacja potencjałów deskowań, ludzi i logistyki na budowie – studium przypadku biurowca INDUSTRIAL w Poznaniu

Podrozdział dotyczy poziomu budowy i stanowi podstawę weryfikacji tezy szczegółowej TS1 w części dotyczącej łącznego rozwiązywania problemów technicznych i problemów zarządzania ludźmi, synchronizacji trzech potencjałów i zasobu krytycznego, a także prognozowania zapotrzebowania na podstawie danych dostawcy – na tych danych skalibrowano pierwszy model zapotrzebowania na poziomie pojedynczej budowy. Analiza wariantowa cyklu kondygnacji nawiązuje do planowania taktowego, w którym harmonogram robót podporządkowuje się stałemu taktowi produkcji; w przykładzie opisanym przez Frandsona i in. zastosowanie czterodniowego taktu pozwoliło skrócić harmonogram montażu elewacji obiektu służby zdrowia z 11 do 5,5 miesiąca (Frandson A. i in., 2013).

### 5.1.1. Wprowadzenie – cel, zakres i źródła danych

Podrozdziały 4.1–4.3 rozprawy opisywały nakłady pracochłonności na deskowania, obraz rynku wykonawców konstrukcji żelbetowych oraz proces obsługi zlecenia w PERI Polska, natomiast podrozdział 5.2 analizuje wykorzystanie parku dzierżawnego z perspektywy dostawcy deskowań. Brakującym ogniwem jest spojrzenie od strony konkretnej budowy: w jaki sposób potencjał deskowań, ludzi i czasu jest wykorzystywany przez firmę żelbetową w jej codziennej działalności. Niniejszy podrozdział wypełnia tę lukę analizą jednego, kompletnie udokumentowanego przedsięwzięcia – budowy biurowca INDUSTRIAL przy ul. Komedy w Poznaniu.

Obiekt jest budynkiem biurowym o 15 kondygnacjach nadziemnych (wysokość architektoniczna 60 m) i 2 kondygnacjach podziemnych garażu, o powierzchni zabudowy 1212 m². Konstrukcję stanowią monolityczne, krzyżowo zbrojone stropy żelbetowe oparte na ścianach nośnych i lokalnie na słupach, z obwodową belką krawędziową na kondygnacjach nadziemnych oraz głowicami (grzybkami) nad słupami. Inwestorem jest TMT Sp. z o.o., generalnym wykonawcą MROMONT Sp. z o.o. a wykonawcą konstrukcji żelbetowej: INTECH Sp. z o.o.; budowę rozpoczęto w 2023 r. Dostawcą systemów deskowań i rusztowań była PERI Polska Sp. z o.o. – na budowie stosowano m.in. deskowanie ramowe TRIO (ściany, słupy) i DOMINO, dźwigarowe deskowanie stropowe MULTIFLEX na dźwigarach VT 20K z podporami PEP i MULTIPROP, wieże stosu ST 100 do podparcia przewieszeń stropów oraz rusztowanie PERI UP (peri.com.pl, projekt INDUSTRIAL, Poznań).

Analiza opiera się wyłącznie na dokumentach źródłowych budowy i dostawcy: (1) rysunkach obmiarowych PERI dla poziomów 0–4, 5, 6–8 i 9–14 (potencjały deskowań stropów, grzybków, słupów, ścian i podciągów); (2) załączniku nr 1 do umowy z wykonawcą konstrukcji żelbetowej (plik „ANALIZA KOMEDY KOMPLETNA”) z ilościami betonu w wycenie wyjściowej i ilościami rzeczywiście wbudowanymi; (3) harmonogramie Gantta „Mromont Komedy” wraz z kalkulacją stawek dzierżawy; (4) pełnym wyciągu ruchów materiału PERI dla zlecenia 171473 (30.10.2023–08.09.2026, wycena w cenach 2024-01); (5) schematach i zestawieniach PERI CAD deskowania stropu kondygnacji powtarzalnej w systemie MULTIFLEX (stan rzeczywisty) i SKYDECK (wariant); (6) informacjach o organizacji pracy przekazanych przez kierownictwo budowy (skład brygad, czas cyklu, liczba dźwigów). Wszystkie tabele i wykresy podrozdziału zestawiono w zbiorczym pliku obliczeniowym Excel, w którym każdy wynik jest formułą odwołującą się do danych wejściowych; w tekście podawane są wyłącznie

wartości wynikające z tych danych. Tam, gdzie dane źródłowe są niejednoznaczne (co w dokumentach budowy nie jest rzadkością), przyjęte interpretacje opisano wprost w treści.



*Fot. 5.1. Budynek biurowy INDUSTRIAL, Poznań – realizacja konstrukcji żelbetowej kondygnacji nadziemnych. Źródło: Archiwum PERI Polska Sp. z o.o.*

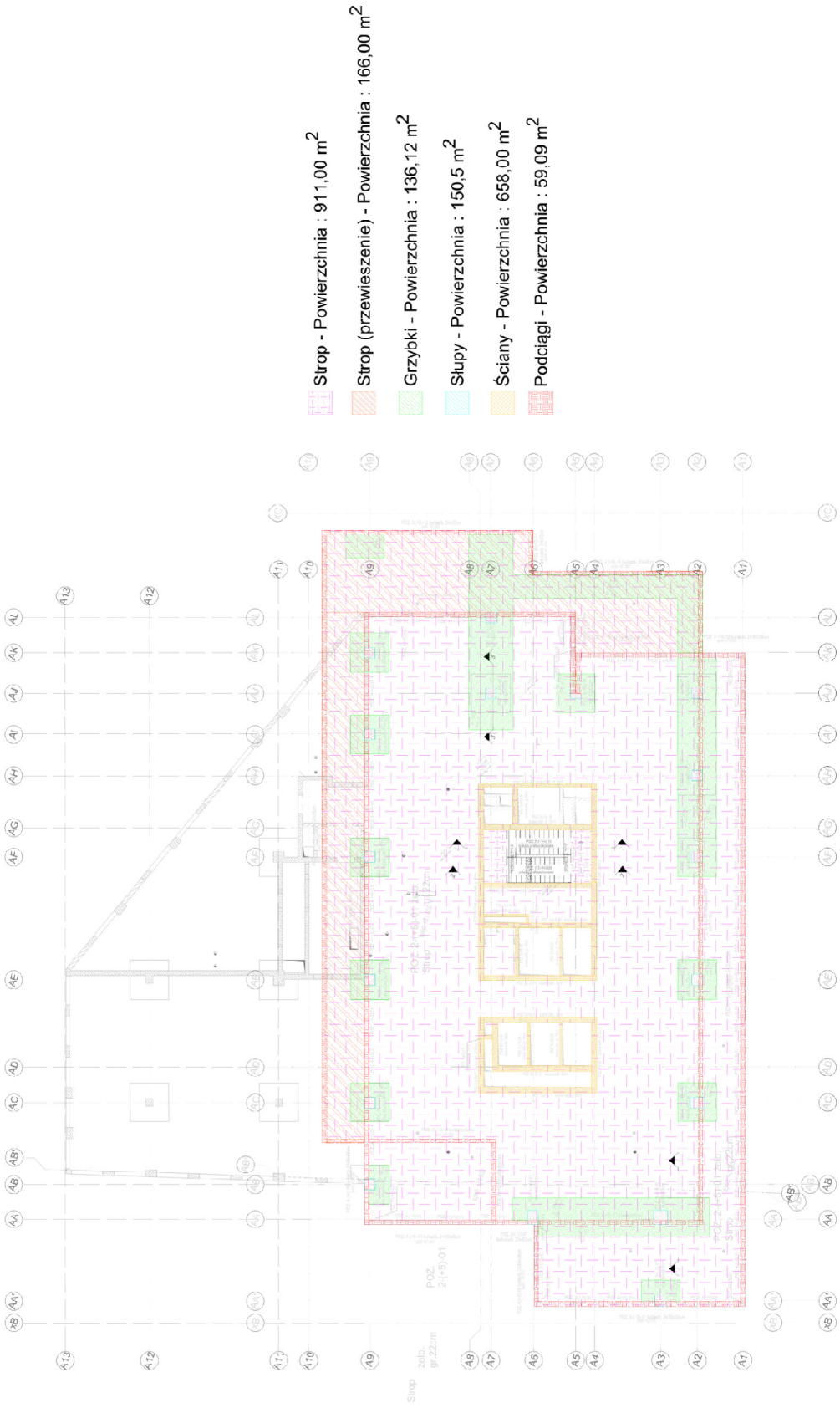


*Fot. 5.2. Budynek biurowy INDUSTRIAL, Poznań – realizacja konstrukcji żelbetowej kondygnacji nadziemnych. Źródło: Archiwum PERI Polska Sp. z o.o.*

### 5.1.2. Analiza konstrukcji kondygnacji nadziemnych – potencjał deskowań

Konstrukcja kondygnacji nadziemnych została podzielona przez projektanta deskowań na cztery grupy o powtarzalnym rzucie: poziomy 0–4, poziom 5, poziomy 6–8 oraz poziomy 9–14. Dla każdej grupy sporządzono rysunek obmiarowy z wyodrębnieniem powierzchni deskowania stropu, grzybków (głowic nad słupami o grubości 50 cm), słupów, ścian (deskowanie dwustronne) i podciągów. Rysunki te są

podstawą wyznaczenia potencjału deskowań, tj. powierzchni, którą w jednym cyklu musi obsłużyć komplet deskowania danego typu. Jako przykład przedstawiono rysunek obmiarowy poziomu 5 (rys. 5.1); potencjały wszystkich grup poziomów zestawiono w tabeli 5.1.




*Rys. 5.1. Rysunek obmiarowy poziomu 5: strop 911,00 m², strop – przewieszenie 166,00 m², grzybki 136,12 m², słupy 150,5 m², ściany 658,00 m², podciągi 59,09 m². Źródło: Opracowanie własne.*

Zestawienie potencjałów (tab. 5.1) pokazuje wyraźny podział budynku na dwie części. Poziomy 0–4 (podium o rzucie ok. 1154 m² stropu i 1319,5 m² ścian dwustronnych) wymagają łącznie ok. 2819 m² deskowań na kondygnację, natomiast część wieżowa (poziomy 6–14) – ok. 1600–1680 m². Poziom 5 jest kondygnacją przejściową: rzut stropu maleje do 911 m², ale pojawia się przewieszenie stropu o powierzchni 166 m² wykraczające poza obrys kondygnacji niższej. Analogiczne przewieszenie o powierzchni 179 m² występuje na poziomie 9. Oba przewieszenia nie mają podparcia w postaci stropu niższego i wymagały dostawy dodatkowych wież stosu ST 100 sięgających do najbliższej kondygnacji nośnej – harmonogram Gantta przewiduje dla nich odrębne pozycje „strop – przewieszenie – podparcie" o czasie trwania odpowiednio 184 i 122 dni (tab. 5.2), a więc wielokrotnie dłuższym niż 28-dniowy cykl kondygnacji. Oznacza to, że wieże ST 100 pozostają na budowie przez czas dojrzewania betonu i przenoszenia obciążeń przewieszenia na kondygnacje wyżej – jest to klasyczny przypadek materiału zaangażowanego bez rotacji.

*Tabela 5.1. Potencjał deskowań kondygnacji nadziemnych wg rysunków obmiarowych PERI [m²]*

| Grupa poziomów | Strop | Przewieszenie | Grzybki | Słupy | Słupy skośne | Ściany (2-str.) | Podciągi | Razem |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Poziom 5 | 911,00 | 166,00 | 136,12 | 150,50 | – | 658,0 | 59,09 | 2 080,71 |
| Poziomy 0-4 | 1 154,00 | – | 101,00 | 210,00 | – | 1 319,5 | 34,90 | 2 819,40 |
| Poziomy 6-8 | 725,82 | – | 115,00 | 129,50 | 17,5 | 658,0 | 30,55 | 1 676,37 |
| Poziomy 9-14 | 729,00 | 179,00 | 75,00 | 120,00 | – | 658,0 | 29,00 | 1 790,00 |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie rysunków obmiarowych PERI Polska. Przewieszenie 179 m² (grupa 9–14) występuje w harmonogramie jednorazowo na poziomie 9.*

Harmonogram wykonawcy zakłada dla każdej kondygnacji nadziemnej cykl 28 dni kalendarzowych, w którym ściany żelbetowe wykonywane są w 6 dni (równolegle słupy – 4 dni), następnie podciągi i belki obwodowe (9 dni) oraz strop z grzybkami (19 dni, z częściowym nakładaniem się na podciągi). Deskowanie ścian kolejnej kondygnacji rozpoczyna się dzień po zakończeniu stropu kondygnacji niższej (tab. 5.2). W pliku harmonogramu poziomy 3 i 4 mają identyczne daty (28.06–25.07.2024), co jest oczywistą pomyłką edycyjną; w dalszej analizie przyjęto konsekwentnie sekwencyjny cykl 28-dniowy, liczony od rozpoczęcia poziomu ±0 w dniu 05.04.2024, co daje zakończenie konstrukcji poziomu 14 w dniu 29.05.2025 (15 × 28 = 420 dni).

*Tabela 5.2. Harmonogram konstrukcji kondygnacji nadziemnych (plik Wykres Gantta „Mromont Komedy") oraz sekwencyjny cykl 28 dni przyjęty w analizie*

| Poziom | Ściany (start–stop) | Słupy | Podciągi i belki | Strop + grzybki | Przewieszenie – podparcie | Cykl 28 dni (start–stop) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ±0 | 05.04.2024–11.04.2024 | 05.04.2024–09.04.2024 | 12.04.2024–21.04.2024 | 13.04.2024–02.05.2024 | – | 05.04.2024–02.05.2024 |
| +1 | 03.05.2024–09.05.2024 | 03.05.2024–07.05.2024 | 10.05.2024–19.05.2024 | 11.05.2024–30.05.2024 | – | 03.05.2024–30.05.2024 |
| +2 | 31.05.2024–06.06.2024 | 31.05.2024–04.06.2024 | 07.06.2024–16.06.2024 | 08.06.2024–27.06.2024 | – | 31.05.2024–27.06.2024 |
| +3 | 28.06.2024–04.07.2024 | 28.06.2024–02.07.2024 | 05.07.2024–14.07.2024 | 06.07.2024–25.07.2024 | – | 28.06.2024–25.07.2024 |
| +4 | 28.06.2024–04.07.2024 | 28.06.2024–02.07.2024 | 05.07.2024–14.07.2024 | 06.07.2024–25.07.2024 | – | 26.07.2024–22.08.2024 |
| +5 | 26.07.2024–01.08.2024 | 26.07.2024–30.07.2024 | 02.08.2024–11.08.2024 | 03.08.2024–22.08.2024 | 02.07.2024–02.01.2025 | 23.08.2024–19.09.2024 |
| +6 | 23.08.2024–29.08.2024 | 23.08.2024–27.08.2024 | 30.08.2024–08.09.2024 | 31.08.2024–19.09.2024 | – | 20.09.2024–17.10.2024 |
| +7 | 20.09.2024–26.09.2024 | 20.09.2024–24.09.2024 | 27.09.2024–06.10.2024 | 28.09.2024–17.10.2024 | – | 18.10.2024–14.11.2024 |
| +8 | 18.10.2024–24.10.2024 | 18.10.2024–22.10.2024 | 25.10.2024–03.11.2024 | 26.10.2024–14.11.2024 | – | 15.11.2024–12.12.2024 |

| Poziom | Ściany (start–stop) | Słupy | Podciągi i belki | Strop + grzybki | Przewieszenie – podparcie | Cykl 28 dni (start–stop) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| +9 | 15.11.2024–21.11.2024 | 15.11.2024–19.11.2024 | 22.11.2024–01.12.2024 | 23.11.2024–12.12.2024 | 28.09.2024–28.01.2025 | 13.12.2024–09.01.2025 |
| +10 | 13.12.2024–19.12.2024 | 13.12.2024–17.12.2024 | 20.12.2024–29.12.2024 | 21.12.2024–09.01.2025 | – | 10.01.2025–06.02.2025 |
| +11 | 10.01.2025–16.01.2025 | 10.01.2025–14.01.2025 | 17.01.2025–26.01.2025 | 18.01.2025–06.02.2025 | – | 07.02.2025–06.03.2025 |
| +12 | 07.02.2025–13.02.2025 | 07.02.2025–11.02.2025 | 14.02.2025–23.02.2025 | 15.02.2025–06.03.2025 | – | 07.03.2025–03.04.2025 |
| +13 | 07.03.2025–13.03.2025 | 07.03.2025–11.03.2025 | 14.03.2025–23.03.2025 | 15.03.2025–03.04.2025 | – | 04.04.2025–01.05.2025 |
| +14 | 04.04.2025–10.04.2025 | 04.04.2025–08.04.2025 | 11.04.2025–20.04.2025 | 12.04.2025–01.05.2025 | – | 02.05.2025–29.05.2025 |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie pliku Wykres_Gantta – Mromont Komedy (arkusz „Arkusz2 (2)”).*

### 5.1.3. Porównanie ilości betonu z wyceny wyjściowej z ilościami rzeczywiście wbudowanymi

Załącznik nr 1 do umowy z wykonawcą konstrukcji żelbetowej zawiera dla każdej kondygnacji ilości betonu przyjęte do wyceny wyjściowej (kolumna D) oraz – uzupełnione w trakcie budowy – ilości rzeczywiście wbudowane (kolumna E). Porównanie wykonano wyłącznie dla pozycji, dla których podano wartości rzeczywiste; pozycje „słupy drobnowymiarowe (prefabrykat)” mają w kolumnie E znak „-” i zostały pominięte, podobnie jak pozycje zbrojenia (brak ilości rzeczywistych). Przy przepisywaniu danych ujawniły się trzy niespójności pliku źródłowego, które należy odnotować: (a) dla poziomów +8 oraz +11…+14 wartości kolumny E są przesunięte o jeden wiersz względem opisów (w tych kondygnacjach brak wiersza „słupy skośne”, a wartości wpisano wg wzorca kondygnacji sąsiednich – przyjęto przyporządkowanie zgodne z poziomami +6/+7 i +9/+10, tj. grzybki 57,5 lub 37,5 m³, podciągi 25 lub 23,2 m³, strop 160 m³); (b) przewieszenie 39,5 m³ ujęto pod poziomem +7, podczas gdy rysunek obmiarowy i harmonogram przypisują przewieszenie 179 m² poziomowi 9 – dla zachowania zgodności z plikiem pozostawiono je przy poziomie +7, co nie zmienia sumy; (c) poziom +15 (dach) pominięto, ponieważ wpisane wartości rzeczywiste powtarzają wzorzec poziomów +9…+13 i są sprzeczne z wyceną (np. 17 m³ słupów przy 0 m³ w wycenie). Wynik porównania dla poziomów ±0…+14 przedstawiają tab. 5.3 i 5.4 oraz rys. 5.2 i 5.3.

*Tabela 5.3. Ilości betonu wg kondygnacji – wycena wyjściowa (D) a rzeczywiste wbudowanie (E) [m³]*

| Poziom | Ściany D / E | Słupy D / E | Grzybki D / E | Podciągi D / E | Strop D / E | Przewiesz. E | Razem D | Razem E | Różnica | % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ±0 | 146 / 146 | 41 / 40 | 29 / 50,50 | 20 / 28 | 233 / 254 | – | 469,0 | 518,5 | 49,5 | 10,6% |
| +1 | 98 / 146 | 35 / 40 | 31 / 50,50 | 19 / 28 | 235 / 254 | – | 418,0 | 518,5 | 100,5 | 24,0% |
| +2 | 98 / 146 | 35 / 40 | 31 / 50,50 | 19 / 28 | 235 / 254 | – | 418,0 | 518,5 | 100,5 | 24,0% |
| +3 | 98 / 146 | 35 / 40 | 31 / 50,50 | 19 / 28 | 235 / 254 | – | 418,0 | 518,5 | 100,5 | 24,0% |
| +4 | 98 / 146 | 35 / 40 | 31 / 50,50 | 19 / 28 | 235 / 254 | – | 418,0 | 518,5 | 100,5 | 24,0% |
| +5 | 84 / 92 | 21 / 24 | 39 / 68 | 27 / 47 | 195 / 200,42 | 37,0 | 366,0 | 468,4 | 102,4 | 28,0% |
| +6 | 84 / 92 | 18 / 22 | 31 / 57,50 | 17 / 25 | 159 / 160 | – | 312,5 | 359,1 | 46,6 | 14,9% |
| +7 | 84 / 92 | 18 / 22 | 31 / 57,50 | 17 / 25 | 159 / 160 | 39,5 | 312,5 | 398,6 | 86,1 | 27,6% |
| +8 | 84 / 92 | 21 / 22 | 31 / 57,50 | 26 / 25 | 195 / 160 | – | 357,0 | 359,1 | 2,1 | 0,6% |
| +9 | 84 / 92 | 15 / 17 | 21 / 37,50 | 17 / 23,20 | 159 / 160 | – | 299,5 | 329,7 | 30,2 | 10,1% |
| +10 | 84 / 92 | 15 / 17 | 21 / 37,50 | 17 / 23,20 | 159 / 160 | – | 299,5 | 329,7 | 30,2 | 10,1% |

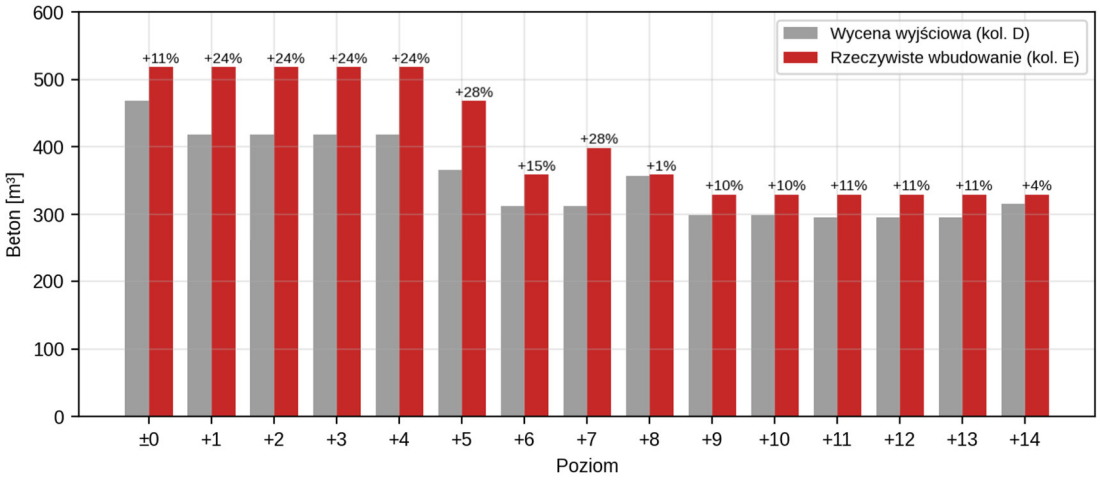
| Poziom | Ściany D / E | Słupy D / E | Grzybki D / E | Podciągi D / E | Strop D / E | Przewiesz. E | Razem D | Razem E | Różnica | % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| +11 | 84 / 92 | 15 / 17 | 21 / 37,50 | 17 / 23,20 | 159 / 160 | – | 296,0 | 329,7 | 33,7 | 11,4% |
| +12 | 84 / 92 | 15 / 17 | 21 / 37,50 | 17 / 23,20 | 159 / 160 | – | 296,0 | 329,7 | 33,7 | 11,4% |
| +13 | 84 / 92 | 15 / 17 | 21 / 37,50 | 17 / 23,20 | 159 / 160 | – | 296,0 | 329,7 | 33,7 | 11,4% |
| +14 | 84 / 92 | 15 / 17 | 21 / 37,50 | 15 / 23,20 | 181 / 160 | – | 316,0 | 329,7 | 13,7 | 4,3% |
| **Razem** | | | | | | | **5 291,8** | **6 155,8** | **863,9** | **16,3%** |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie pliku ANALI□A_KOMEDA_KOMPLETNA.xls. Słupy D/E dla poziomów +6, +7 i +8 obejmują dodatkowo słupy skośne (3,456 / 2,55 m³); dla poziomów +9 i +10 słupy skośne ujęto w wycenie (3,456 m³) bez wartości rzeczywistej.*

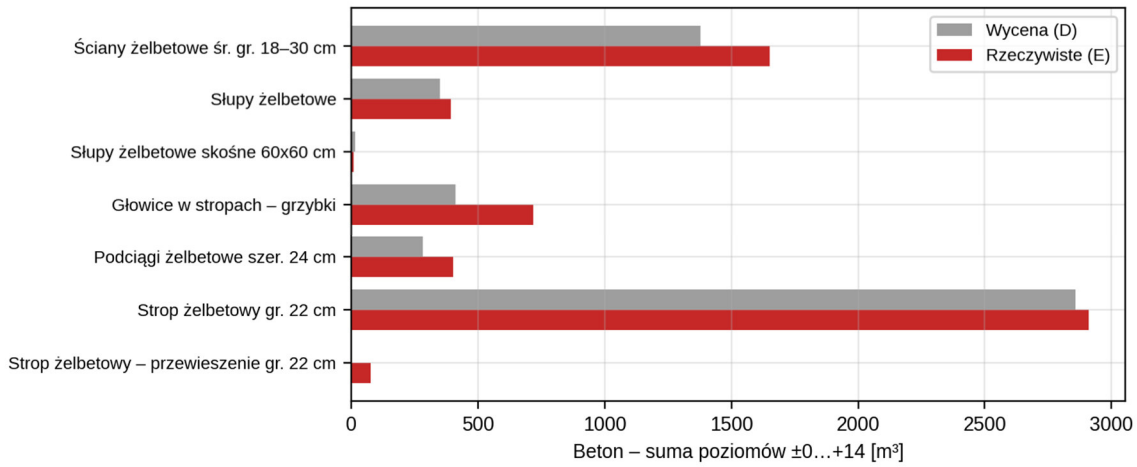
*Tabela 5.4. Beton wg rodzaju elementu – suma poziomów ±0…+14 [m³]*

| Element | Wycena D | Rzeczywiste E | Różnica | Różnica [%] |
|---|---|---|---|---|
| Ściany żelbetowe | 1 378,0 | 1 650,0 | 272,0 | 19,7% |
| Słupy żelbetowe | 349,0 | 392,0 | 43,0 | 12,3% |
| Słupy skośne | 13,8 | 7,6 | -6,2 | -44,7% |
| Grzybki (głowice) | 411,0 | 718,0 | 307,0 | 74,7% |
| Podciągi | 283,0 | 401,2 | 118,2 | 41,8% |
| Strop gr. 22 cm | 2 857,0 | 2 910,4 | 53,4 | 1,9% |
| Strop – przewieszenie | 0,0 | 76,5 | 76,5 | – |
| **Razem** | **5 291,8** | **6 155,8** | **863,9** | **16,3%** |

*Źródło: opracowanie własne.*




*Rys. 5.2. Ilość betonu wg kondygnacji: wycena wyjściowa (D) a rzeczywiste wbudowanie (E) [m³]. Źródło: opracowanie własne.*




*Rys. 5.3. Ilość betonu wg rodzaju elementu – suma kondygnacji ±0…+14 [m³]. Źródło: opracowanie własne.*

Łącznie na kondygnacjach ±0…+14 wbudowano 6 156 m³ betonu wobec 5 292 m³ w wycenie wyjściowej, czyli o 864 m³ (16,3%) więcej. Rozkład odchylenia nie jest jednak równomierny. Na poziomach +1…+4 rzeczywiste ilości przekraczają wycenę o 24% (518,5 wobec 418 m³), przy czym niemal całe odchylenie pochodzi ze ścian (146 wobec 98 m³, +49%) oraz grzybków (50,5 wobec 31 m³, +63%) – wycena przyjęła dla poziomów +1…+4 mniejszą ilość ścian niż dla poziomu ±0, mimo że rysunek obmiarowy poziomów 0–4 wykazuje dla wszystkich pięciu kondygnacji identyczny potencjał 1319,5 m². Na poziomie 5 odchylenie wynosi +28% i wynika w większości z przewieszenia (37 m³), którego wycena wyjściowa w ogóle nie zawierała jako odrębnej pozycji, oraz z grzybków i podciągów (68 i 47 m³ wobec 39 i 27 m³). W części wieżowej (poziomy +6…+14) odchylenie jest umiarkowane (+1% do +15%, z wyjątkiem poziomu +7 z przewieszeniem 39,5 m³) i pochodzi głównie z grzybków, których ilość rzeczywista (57,5 m³ na poziomach 6–8, 37,5 m³ na poziomach 9–14) jest niemal dwukrotnie większa od wycenionej (31 i 21 m³).

Istotne z punktu widzenia niniejszej rozprawy jest odniesienie ilości betonu do potencjału deskowań (tab. 5.5). Podzielenie rzeczywistej ilości betonu przez powierzchnię deskowania z rysunków obmiarowych daje dla stropów 0,220 m³/m² (grubość 22,0 cm – dokładnie zgodna z projektem), dla grzybków 0,500 m³/m² (50 cm – zgodnie z opisem „gr. 50 cm” na rysunku poziomu 5), dla przewieszeń 0,223 i 0,221 m³/m² oraz dla ścian 0,111 m³/m² na poziomach 0–4 (średnia grubość 22,1 cm przy deskowaniu dwustronnym) i 0,140 m³/m² na poziomach 5–14 (28,0 cm). Ta zbieżność potwierdza wiarygodność ilości rzeczywistych z kolumny E i pozwala wnioskować, że to wycena wyjściowa (kolumna D) była zaniżona względem geometrii, którą projektant deskowań odczytał z dokumentacji. Z perspektywy dostawcy deskowań ma to praktyczne znaczenie: potencjał deskowań ustalany na etapie oferty na podstawie rysunków był bliższy rzeczywistości niż przedmiar betonu wykonawcy, a więc to on – a nie przedmiar – powinien stanowić bazę planowania dostaw i rotacji.

*Tabela 5.5. Wskaźniki betonu rzeczywistego (E) w odniesieniu do potencjału deskowań*

| Poziomy | Ściany [m³/m²] | Śr. grubość ścian [cm] | Strop [m³/m²] | Grubość stropu [cm] | Grzybki [m³/m²] | Przewieszenie [m³/m²] | Beton E razem [m³] | Deskowania razem [m²] | m³ betonu / m² deskowań |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0–4 | 0,111 | 22,1 | 0,220 | 22,0 | 0,500 | – | 518,5 | 2 819,4 | 0,184 |
| +5 | 0,140 | 28,0 | 0,220 | 22,0 | 0,500 | 0,223 | 468,4 | 2 080,7 | 0,225 |
| 6, 8 | 0,140 | 28,0 | 0,220 | 22,0 | 0,500 | – | 359,1 | 1 676,4 | 0,214 |
| +7 | 0,140 | 28,0 | 0,220 | 22,0 | 0,500 | 0,221 (poz. 9) | 398,6 | 1 676,4 | 0,238 |
| +9 | 0,140 | 28,0 | 0,219 | 21,9 | 0,500 | – | 329,7 | 1 790,0 | 0,184 |
| 10–14 | 0,140 | 28,0 | 0,219 | 21,9 | 0,500 | – | 329,7 | 1 611,0 | 0,205 |

*Źródło: opracowanie własne. Grubość ścian = 2 × (m³/m²), gdyż potencjał ścian z rysunków obejmuje deskowanie dwustronne. Przewieszenie poziomu 7 (39,5 m³) odniesiono do powierzchni 179 m² przewieszenia poziomu 9 (patrz uwaga w tekście).*

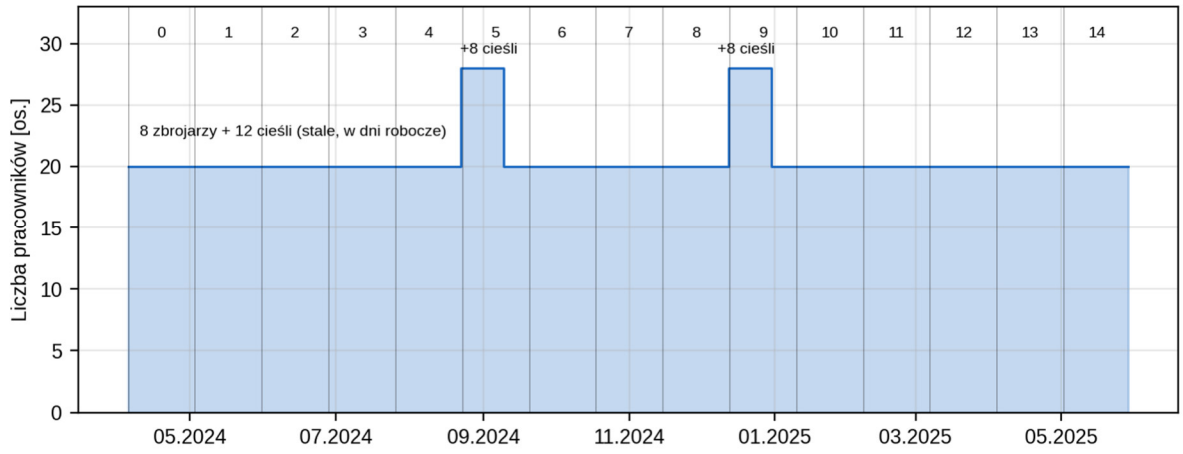
### 5.1.4. Potencjał ludzki w cyklu kondygnacji

Według informacji kierownictwa budowy na każdej kondygnacji konstrukcyjnej pracowało stale 8 zbrojarzy i 12 cieśli, a do montażu podparcia przewieszeń (poziomy 5 i 9) wykonawca kierował dodatkowo 8 cieśli przez 10–12 dni roboczych. Każda kondygnacja była wykonywana w 28 dni kalendarzowych, co odpowiada harmonogramowi z tab. 5.2. Przyjmując pracę w dni robocze (poniedziałek–piątek, 8 godzin), w cyklu 28-dniowym przypada 20 dni roboczych, a więc 160 roboczodni zbrojarzy i 240 roboczodni cieśli na kondygnację – łącznie 400 roboczodni (3200 roboczogodzin). Wsparcie przy przewieszeniach to dodatkowe 80–96 roboczodni na każdą z dwóch kondygnacji. Dla 15 kondygnacji daje to 6000 roboczodni załogi stałej i 160–192 roboczodni wsparcia (tab. 5.6, rys. 5.4).

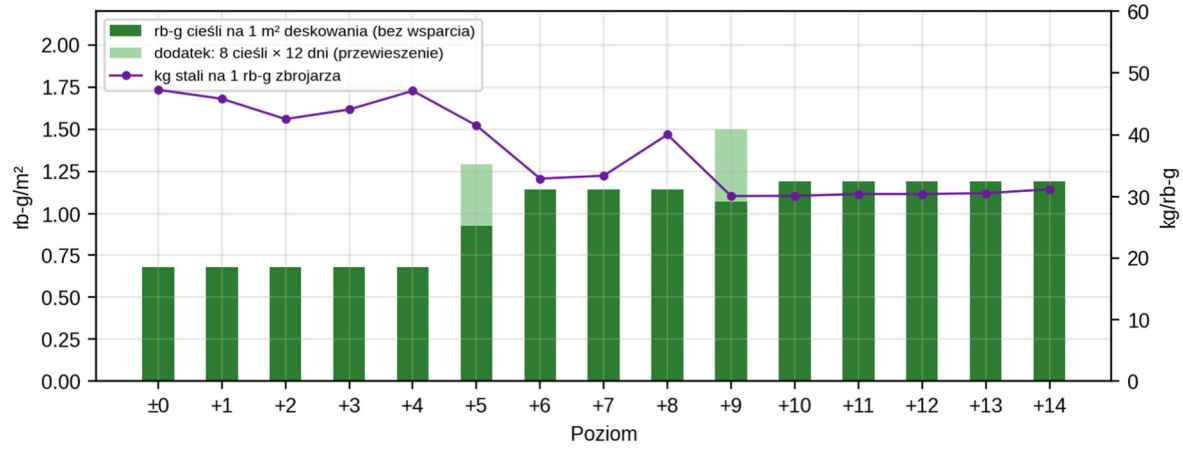
*Tabela 5.6. Potencjał ludzki na kondygnację (cykl 28 dni, 20 dni roboczych) i wskaźniki wydajności*

| Poziom | Zbrojarze / cieśle / wsparcie [os.] | rb-dni zbroj. | rb-dni cieśli | rb-dni wsparcia | Deskowania [m²] | Beton E [m³] | Stal (wycena) [kg] | rb-g cieśli / m² desk. | kg stali / rb-g zbroj. | rb-g / m³ betonu | m² desk. / dzień rob. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ±0 | 8 / 12 / – | 160 | 240 | – | 2 819,4 | 518,5 | 60 531 | 0,68 | 47,3 | 6,17 | 141 |
| +1 | 8 / 12 / – | 160 | 240 | – | 2 819,4 | 518,5 | 58 674 | 0,68 | 45,8 | 6,17 | 141 |
| +2 | 8 / 12 / – | 160 | 240 | – | 2 819,4 | 518,5 | 54 480 | 0,68 | 42,6 | 6,17 | 141 |
| +3 | 8 / 12 / – | 160 | 240 | – | 2 819,4 | 518,5 | 56 462 | 0,68 | 44,1 | 6,17 | 141 |
| +4 | 8 / 12 / – | 160 | 240 | – | 2 819,4 | 518,5 | 60 323 | 0,68 | 47,1 | 6,17 | 141 |
| +5 | 8 / 12 / 8 | 160 | 240 | 80–96 | 2 080,7 | 468,4 | 53 148 | 0,92 (1,29) | 41,5 | 6,83 | 104 |
| +6 | 8 / 12 / – | 160 | 240 | – | 1 676,4 | 359,1 | 42 181 | 1,15 | 33,0 | 8,91 | 84 |
| +7 | 8 / 12 / – | 160 | 240 | – | 1 676,4 | 398,6 | 42 783 | 1,15 | 33,4 | 8,03 | 84 |
| +8 | 8 / 12 / – | 160 | 240 | – | 1 676,4 | 359,1 | 51 270 | 1,15 | 40,1 | 8,91 | 84 |
| +9 | 8 / 12 / 8 | 160 | 240 | 80–96 | 1 790,0 | 329,7 | 38 583 | 1,07 (1,50) | 30,1 | 9,71 | 90 |
| +10 | 8 / 12 / – | 160 | 240 | – | 1 611,0 | 329,7 | 38 629 | 1,19 | 30,2 | 9,71 | 81 |
| +11 | 8 / 12 / – | 160 | 240 | – | 1 611,0 | 329,7 | 39 001 | 1,19 | 30,5 | 9,71 | 81 |
| +12 | 8 / 12 / – | 160 | 240 | – | 1 611,0 | 329,7 | 38 994 | 1,19 | 30,5 | 9,71 | 81 |
| +13 | 8 / 12 / – | 160 | 240 | – | 1 611,0 | 329,7 | 39 170 | 1,19 | 30,6 | 9,71 | 81 |
| +14 | 8 / 12 / – | 160 | 240 | – | 1 611,0 | 329,7 | 39 981 | 1,19 | 31,2 | 9,71 | 81 |
| **Razem / średnia** | | **2 400** | **3 600** | **160–192** | **31 051,8** | **6 155,8** | **714 209** | **0,93** | **37,2** | **7,80** | |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie informacji kierownictwa budowy, rysunków obmiarowych i pliku ANALI□A_KOMEDA_KOMPLETNA.xls (stal wg wyceny – brak ilości rzeczywistych). W nawiasie: wskaźnik z uwzględnieniem wsparcia 8 cieśli × 12 dni.*




*Rys. 5.4. Stan załogi konstrukcyjnej w czasie w cyklu 28-dniowym (zbrojarze + cieśle; wsparcie 8 cieśli w pierwszych 12 dniach roboczych cyklu poziomów 5 i 9). Źródło: opracowanie własne.*

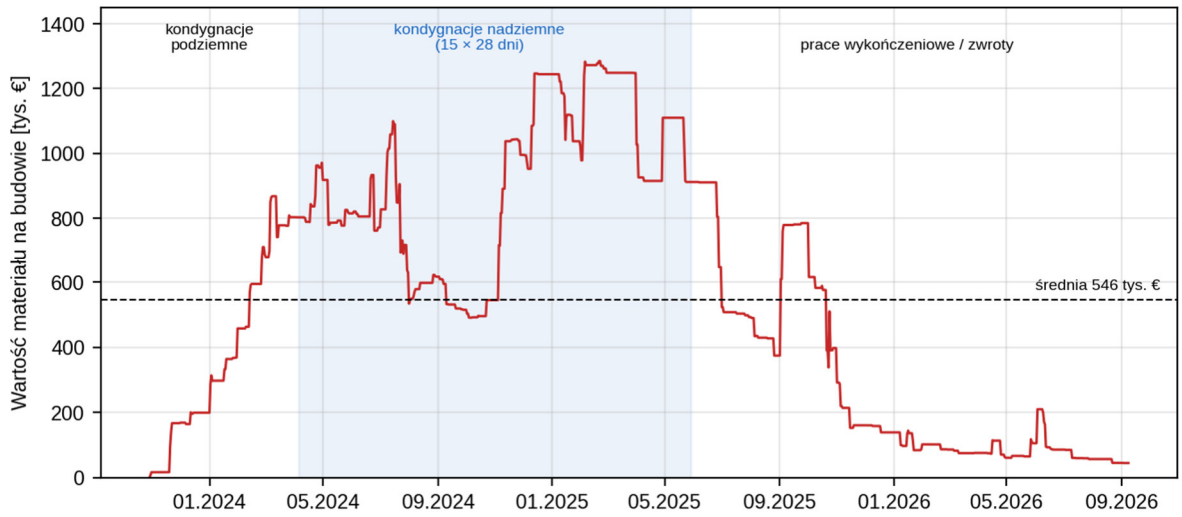



*Rys. 5.5. Nakład cieśli na 1 m² deskowania oraz masa stali na roboczogodzinę zbrojarza wg kondygnacji. Źródło: opracowanie własne.*

Stała liczebność brygad przy zmiennym potencjale deskowań prowadzi do znacząco różnej wydajności jednostkowej. Na poziomach 0–4, gdzie w cyklu należało obsłużyć 2819 m² deskowań, na 1 m² przypadało 0,68 rb-g cieśli (średnio 141 m² deskowań na dzień roboczy), natomiast w części wieżowej – 1,15 rb-g/m² na poziomach 6–8 i 1,19 rb-g/m² na poziomach 10–14 (81 m²/dzień). Innymi słowy, ta sama brygada 12 cieśli wykonywała w 28 dniach o 43% mniej deskowania niż na podium, a cykl kondygnacji nie uległ skróceniu. Analogicznie zbrojarze: 47,3 kg stali na roboczogodzinę na poziomie ±0 i 30,2 kg/rb-g na poziomach 10–14. Wskaźnik łącznej pracochłonności (cieśle + zbrojarze) rośnie z 6,17 do 9,71 rb-g na 1 m³ betonu. W kategoriach lean oznacza to, że w części wieżowej cykl 28 dni nie był determinowany potencjałem ludzkim ani ilością deskowań, lecz innym ograniczeniem – jak wykazano w podrozdziałach 5.1.4 i 5.1.7, był nim jeden dźwig wieżowy obsługujący jednocześnie deskowanie ścienne, podawanie zbrojenia i dostawy. Warto odnotować, że wskaźnik 0,68 rb-g/m² na podium jest zbieżny rzędem wielkości z nakładami katalogowymi omówionymi w podrozdziale 4.1 (0,34 rb-g/m² dla samego deskowania ramowego ścian bez transportu i czyszczenia), co pośrednio potwierdza, że w części wieżowej brygada dysponowała rezerwą wydajności.

### 5.1.5. Wykorzystanie materiału w czasie – analiza ruchów materiału PERI

Wyciąg ruchów materiału dla zlecenia 171473 obejmuje 1044 dni dzierżawy od 30.10.2023 do 08.09.2026, z których wynika dzienny stan wartości materiału PERI na budowie (wycena w cenach katalogowych 2024-01; zwrot liczony z kolejnym dniem). Przebieg tej wartości (rys. 5.6) jest najbardziej syntetycznym obrazem wykorzystania materiału w czasie. Średnia wartość materiału na budowie w całym okresie wyniosła 545,6 tys. €, maksimum 1 285,1 tys. € przypadło na 20.02.2025. W fazie kondygnacji podziemnych (do 04.04.2024) średnia wynosiła 390 tys. €, w fazie kondygnacji nadziemnych (05.04.2024–29.05.2025) – 905 tys. € (od 492 do 1 285 tys. €), a po zakończeniu konstrukcji – 274 tys. €, przy czym jeszcze we wrześniu 2025 r. wartość materiału na budowie wzrosła do ok. 785 tys. € (tab. 5.7).




*Rys. 5.6. Wartość materiału PERI na budowie w czasie (dzierżawa, ceny 2024-01) z zaznaczeniem fazy kondygnacji nadziemnych. Źródło: opracowanie własne na podstawie pliku Ruchy materiału 171473.*

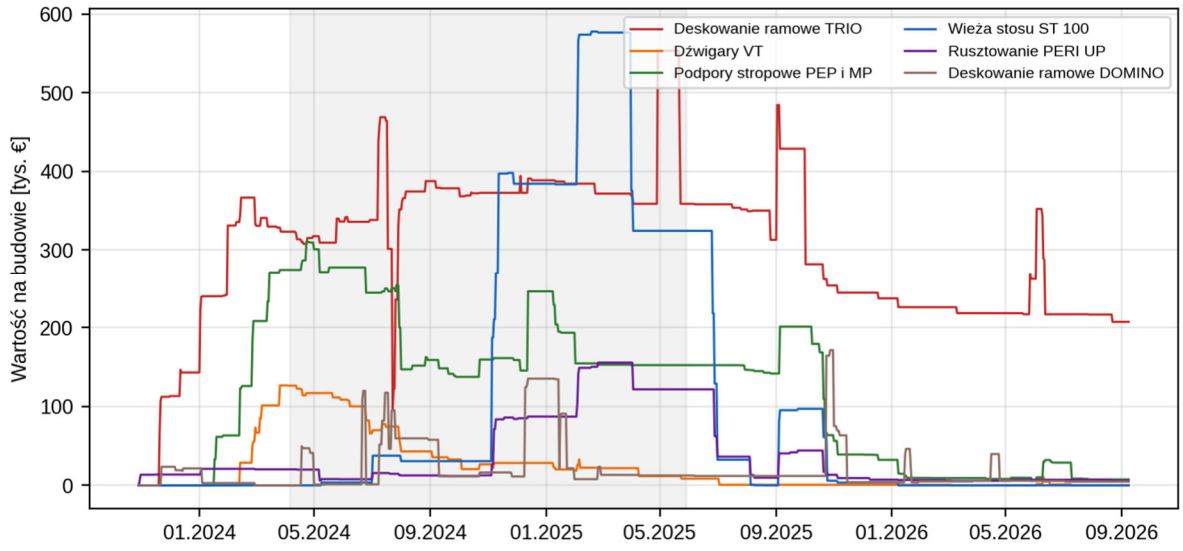
*Tabela 5.7. Statystyki wartości materiału na budowie wg faz realizacji*

| Faza | Dni | Średnia [tys. €] | Maksimum [tys. €] | Minimum [tys. €] | Wartość·dni [mln €·dni] |
|---|---|---|---|---|---|
| Kondygnacje podziemne (30.10.2023–04.04.2024) | 158 | 390,0 | 867,9 | 6,8 | 61,6 |
| Kondygnacje nadziemne – cykl 28 dni (05.04.2024–29.05.2025) | 420 | 905,4 | 1 285,1 | 491,6 | 380,3 |
| Po zakończeniu konstrukcji (30.05.2025–08.09.2026) | 467 | 273,6 | 911,8 | 44,3 | 127,8 |
| **Cały okres** | **1 044** | **545,6** | **1 285,1** | **0,0** | **569,6** |

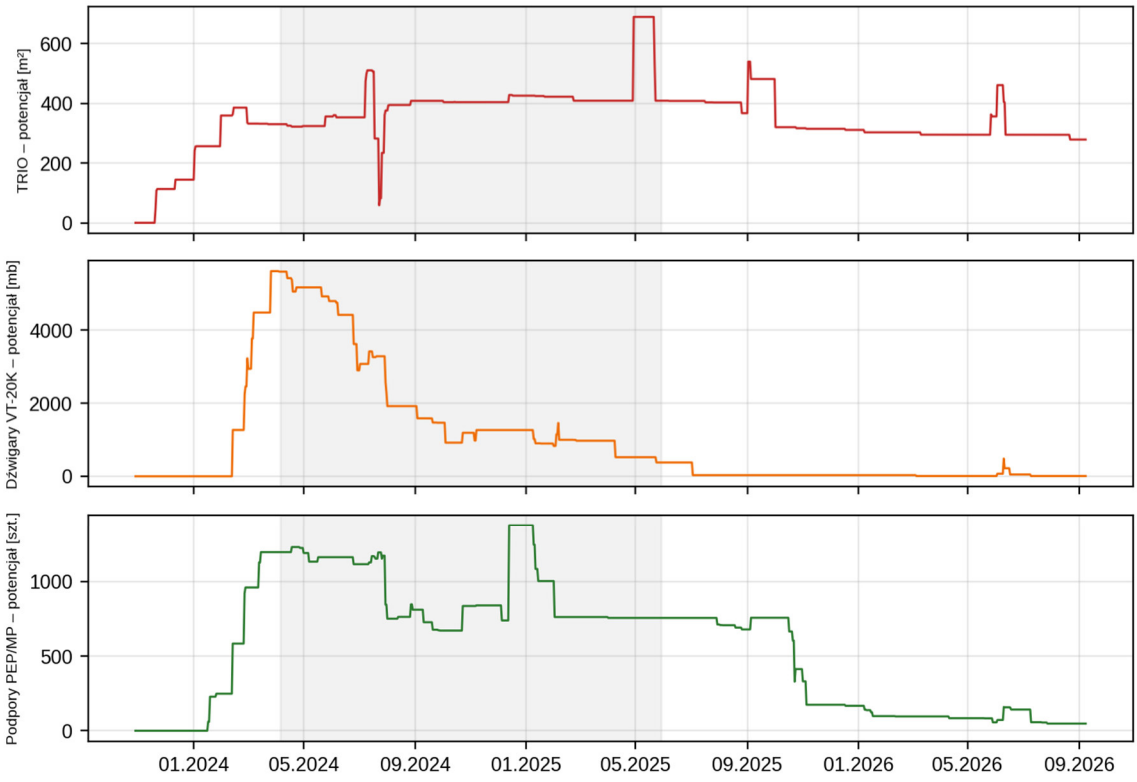
*Źródło: opracowanie własne na podstawie arkusza Proj(tab) pliku Ruchy materiału 171473 (statystyki na szeregu dziennym).*

Struktura wartości w fazie kondygnacji nadziemnych (rys. 5.7, tab. 5.8) pokazuje, że o obciążeniu budowy materiałem decydowały cztery grupy: deskowanie ramowe TRIO (średnio 372 tys. €, 41% wartości·dni fazy), wieże stosu ST 100 (średnio 214 tys. €, 24%, maksimum 578 tys. € w dniu 18.02.2025), podpory stropowe PEP i MULTIPROP (194 tys. €, 21%) oraz rusztowanie PERI UP (7%). Same dźwigary VT 20K stanowiły jedynie 5% wartości·dni. Przebiegi potencjałów (rys. 5.8) pokazują, że dźwigary VT osiągnęły maksimum 5 618 mb w marcu–kwietniu 2024 r. (stropy podium o powierzchni 1255 m² z grzybkami, przy dwóch kompletach w rotacji) i były systematycznie zwracane w miarę zmniejszania się rzutu, do ok. 1000 mb od października 2024 r.; podpory PEP/MP utrzymywały się na poziomie 1100–1380 szt., a deskowanie TRIO – średnio 407 m² (maksymalnie 690 m² w dniu

29.04.2025, po czym 613 m² TRIO przeszło w tym samym dniu z dzierżawy w zakup). Wieże ST 100 pojawiły się na budowie w istotnej ilości od 05.11.2024 (187 tys. €) i osiągnęły maksimum w lutym 2025 r.; okres ich pobytu jest przesunięty względem pozycji „przewieszenie – podparcie" w harmonogramie (02.07.2024–02.01.2025 dla poziomu 5), co wskazuje, że podparcie przewieszenia poziomu 5 wykonano w większości innym materiałem (w lipcu 2024 r. na budowę dostarczono ST 100 o wartości jedynie 37,7 tys. €), a główna dostawa wież była związana z przewieszeniem poziomu 9 i pozostawała na budowie do czerwca 2025 r. – niemal pięć miesięcy po terminie z harmonogramu.




*Rys. 5.7. Wartość głównych grup produktowych PERI na budowie w czasie (ceny 2024-01). Źródło: opracowanie własne.*



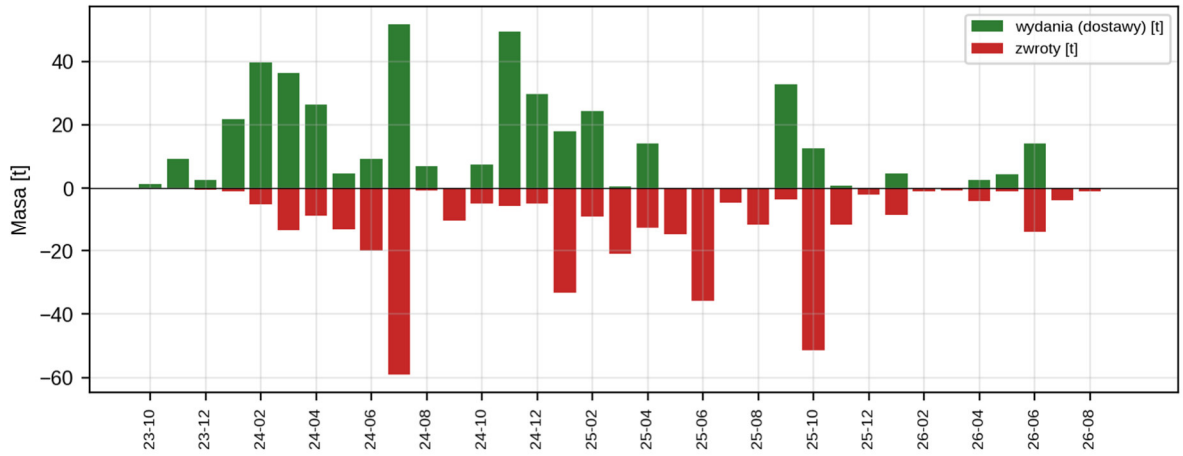

*Rys. 5.8. Potencjał deskowania ściennego TRIO [m²], dźwigarów VT 20K [mb] i podpór PEP/MULTIPROP [szt.] na budowie w czasie. Źródło: opracowanie własne.*

*Tabela 5.8. Główne grupy produktowe na budowie – faza kondygnacji nadziemnych (05.04.2024–29.05.2025) i cały okres*

| Grupa produktowa | Maks. wartość [tys. €] (data) | Śr. wartość – faza nadziemna [tys. €] | Udział w wartości·dniach fazy [%] | Potencjał maks. | Potencjał śr. – faza nadziemna |
|---|---|---|---|---|---|
| Deskowanie ramowe TRIO | 553,4 (29.04.2025) | 371,8 | 41,1 | 690 m² | 407 |
| Deskowanie ramowe DOMINO | 171,6 (28.10.2025) | 32,3 | 3,6 | 229 m² | 44 |
| Dźwigary VT | 126,8 (26.03.2024) | 46,3 | 5,1 | 5 618 mb | 2 053 |
| Dźwigary kratowe GT | 33,3 (20.02.2025) | 10,4 | 1,1 | 813 mb | 250 |
| Podpory stropowe PEP i MP | 309,8 (23.04.2024) | 193,7 | 21,4 | 1 382 szt. | 929 |
| Wieża stosu ST 100 | 577,7 (18.02.2025) | 214,0 | 23,6 | – | – |
| Rusztowanie PERI UP | 155,8 (25.02.2025) | 62,6 | 6,9 | – | – |
| Zastawki podciągów + palety | 72,9 (05.02.2025) | 49,6 | 5,5 | – | – |
| Zastrzały i rozpory | 54,1 (13.12.2024) | 37,3 | 4,1 | – | – |
| System ochronny PROKIT | 32,3 (27.07.2024) | 24,1 | 2,7 | – | – |
| Deskowanie stropowe SKYDECK (+AD) | 8,4 (04.09.2025) | 1,2 | 0,1 | – | – |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie arkusza GW (tab) pliku Ruchy materiału 171473.*

Ruch materiału był bardzo intensywny: w całym okresie wystawiono 168 dokumentów wydania (łącznie 425 t materiału o wartości 4,84 mln € w cenach katalogowych) i 186 dokumentów zwrotu (393 t), z czego na fazę kondygnacji nadziemnych przypadło 94 wydań (242 t) i 84 zwrotów (218 t). Miesięczny rozkład masy (rys. 5.9; pełne zestawienie w tab. 5.10 pliku Excel) pokazuje dwa szczyty dostaw: luty–kwiecień 2024 r. (rozpoczęcie kondygnacji nadziemnych) oraz listopad 2024–luty 2025 r. (wieże ST 100 i podpory pod przewieszenie poziomu 9), a także szczyty zwrotów w lipcu 2024 r. (zmiana rzutu z podium na wieżę: w ciągu miesiąca zwrócono 59 t, a dostarczono 52 t) i w czerwcu 2025 r. (rozdeskowanie po zakończeniu konstrukcji). Każdy z tych ruchów wymagał obsługi jedynym dźwigiem wieżowym na budowie.




*Rys. 5.9. Masa wydań i zwrotów materiału PERI wg miesięcy [t]. Źródło: opracowanie własne na podstawie listy dokumentów pliku Ruchy materiału 171473.*

Do interpretacji tego przebiegu przydatne jest rozróżnienie stosowane przez Radosława Drzewieckiego (założyciela Lean Passion) w polskiej praktyce lean: marnotrawstwo konieczne – czynności i stany nietworzące wartości, których w danych warunkach technologicznych nie da się wyeliminować, a jedynie

ograniczyć, oraz marnotrawstwo niekonieczne – stany, które można usunąć bez uszczerbku dla procesu. W gospodarce deskowaniami na analizowanej budowie marnotrawstwem koniecznym jest czas, w którym zmontowane deskowanie stropu oczekuje na ułożenie zbrojenia, oraz czas dojrzewania betonu przed rozdeskowaniem – oba wynikają z technologii i z sekwencji robót, a można je jedynie skracać (np. przez wczesne rozdeskowanie z głowicą opadową lub przez skrócenie cyklu zbrojenia). Marnotrawstwem niekoniecznym jest natomiast odłożenie deskowania bez jakiejkolwiek produkcji w oczekiwaniu na otwarcie kolejnego frontu – np. deskowania ściennego TRIO po zabetonowaniu ścian kondygnacji, gdy strop tej kondygnacji jest jeszcze deskowany i zbrojony, a ściany kolejnej kondygnacji nie mogą być rozpoczęte. Z przebiegu potencjału TRIO na rys. 5.8 wynika, że komplet ok. 400 m² pozostawał na budowie nieprzerwanie przez całą fazę nadziemną, niezależnie od tego, czy w danym tygodniu wykonywano ściany.

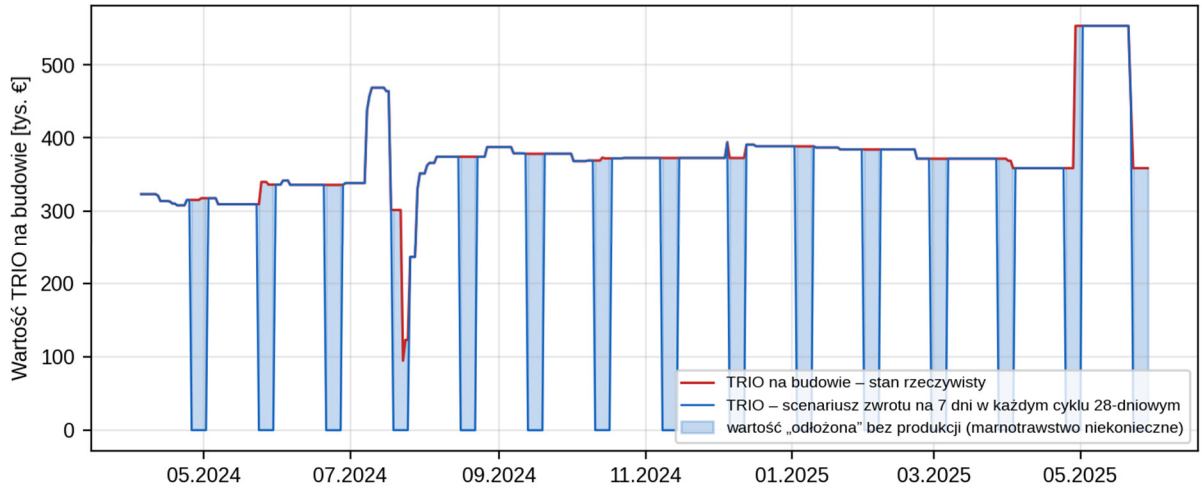
Na tej podstawie nałożono na rzeczywisty przebieg scenariusz, w którym deskowanie ścienne TRIO byłoby co kondygnację zwracane do magazynu na tydzień, w którym – zgodnie z informacją kierownictwa budowy – nie było używane (przyjęto ostatnie 7 dni każdego 28-dniowego cyklu, tj. bezpośrednio przed otwarciem frontu ścian kolejnej kondygnacji). Wynik (tab. 5.9, rys. 5.10) jest następujący: w fazie kondygnacji nadziemnych TRIO wygenerowało 156,2 mln €·dni dzierżawy (średnio 372 tys. € przez 420 dni), z czego 37,7 mln €·dni (24,1%) przypada na tygodnie bez produkcji. Przy stawce dzierżawy 1,7% wartości katalogowej tygodniowo, przyjętej w kalkulacji wykonawcy dla pierwszych sześciu miesięcy (0,244% dziennie), odpowiada to czynszowi ok. 91,9 tys. € z 381 tys. € łącznego czynszu TRIO w tej fazie. Cena tej oszczędności to jednak 30 dodatkowych operacji transportowych (15 zwrotów i 15 ponownych dostaw po ok. 24 t przy masie 59,8 kg/m² deskowania), 30 dodatkowych cykli załadunku i rozładunku jedynym dźwigiem, dwukrotne w każdym cyklu przekazywanie ilościowe i jakościowe materiału oraz ryzyko nieterminowej dostawy zwrotnej. W warunkach jednego dźwigu, który – jak wykazano niżej – był wąskim gardłem cyklu, scenariusz comiesięcznego zwrotu nie jest więc racjonalny: eliminowałby marnotrawstwo oczekiwania kosztem dodatkowego marnotrawstwa transportu i obciążenia zasobu krytycznego. Poprawnym kierunkiem lean jest raczej dopasowanie wielkości kompletu ściennego do rzeczywistego frontu robót lub takie przetaktowanie cyklu, aby deskowanie ścienne było wykorzystywane w większej liczbie dni cyklu (np. etapowanie ścian klatek i szachtów), a nie fizyczne usuwanie materiału z budowy.

*Tabela 5.9. Scenariusz zwrotu deskowania ściennego TRIO do magazynu na 7 dni w każdym cyklu 28-dniowym*

| Poziom | Cykl | Śr. wartość TRIO [tys. €] | Śr. potencjał TRIO [m²] | Tydzień bez produkcji | Wartość·dni odłożone [tys. €·dni] | Czynsz za tydzień odłożenia [€] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ±0 | 05.04.2024–02.05.2024 | 315,7 | 325 | 26.04.2024–02.05.2024 | 2 212 | 5 389 |
| +1 | 03.05.2024–30.05.2024 | 316,4 | 331 | 24.05.2024–30.05.2024 | 2 335 | 5 691 |
| +2 | 31.05.2024–27.06.2024 | 336,2 | 354 | 21.06.2024–27.06.2024 | 2 349 | 5 723 |
| +3 | 28.06.2024–25.07.2024 | 352,1 | 365 | 19.07.2024–25.07.2024 | 1 545 | 3 764 |
| +4 | 26.07.2024–22.08.2024 | 353,9 | 374 | 16.08.2024–22.08.2024 | 2 619 | 6 381 |
| +5 | 23.08.2024–19.09.2024 | 381,3 | 407 | 13.09.2024–19.09.2024 | 2 647 | 6 450 |
| +6 | 20.09.2024–17.10.2024 | 373,2 | 406 | 11.10.2024–17.10.2024 | 2 595 | 6 324 |
| +7 | 18.10.2024–14.11.2024 | 372,3 | 404 | 08.11.2024–14.11.2024 | 2 607 | 6 353 |
| +8 | 15.11.2024–12.12.2024 | 373,2 | 404 | 06.12.2024–12.12.2024 | 2 607 | 6 353 |
| +9 | 13.12.2024–09.01.2025 | 388,7 | 426 | 03.01.2025–09.01.2025 | 2 719 | 6 625 |
| +10 | 10.01.2025–06.02.2025 | 385,2 | 423 | 31.01.2025–06.02.2025 | 2 689 | 6 552 |
| +11 | 07.02.2025–06.03.2025 | 378,2 | 416 | 28.02.2025–06.03.2025 | 2 600 | 6 335 |
| +12 | 07.03.2025–03.04.2025 | 370,8 | 409 | 28.03.2025–03.04.2025 | 2 581 | 6 290 |
| +13 | 04.04.2025–01.05.2025 | 379,3 | 439 | 25.04.2025–01.05.2025 | 3 094 | 7 539 |

| Poziom | Cykl | Śr. wartość TRIO [tys. €] | Śr. potencjał TRIO [m²] | Tydzień bez produkcji | Wartość·dni odłożone [tys. €·dni] | Czynsz za tydzień odłożenia [€] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| +14 | 02.05.2025–29.05.2025 | 501,0 | 614 | 23.05.2025–29.05.2025 | 2 509 | 6 114 |
| **Razem** | | | | | **37 709** | **91 884** |

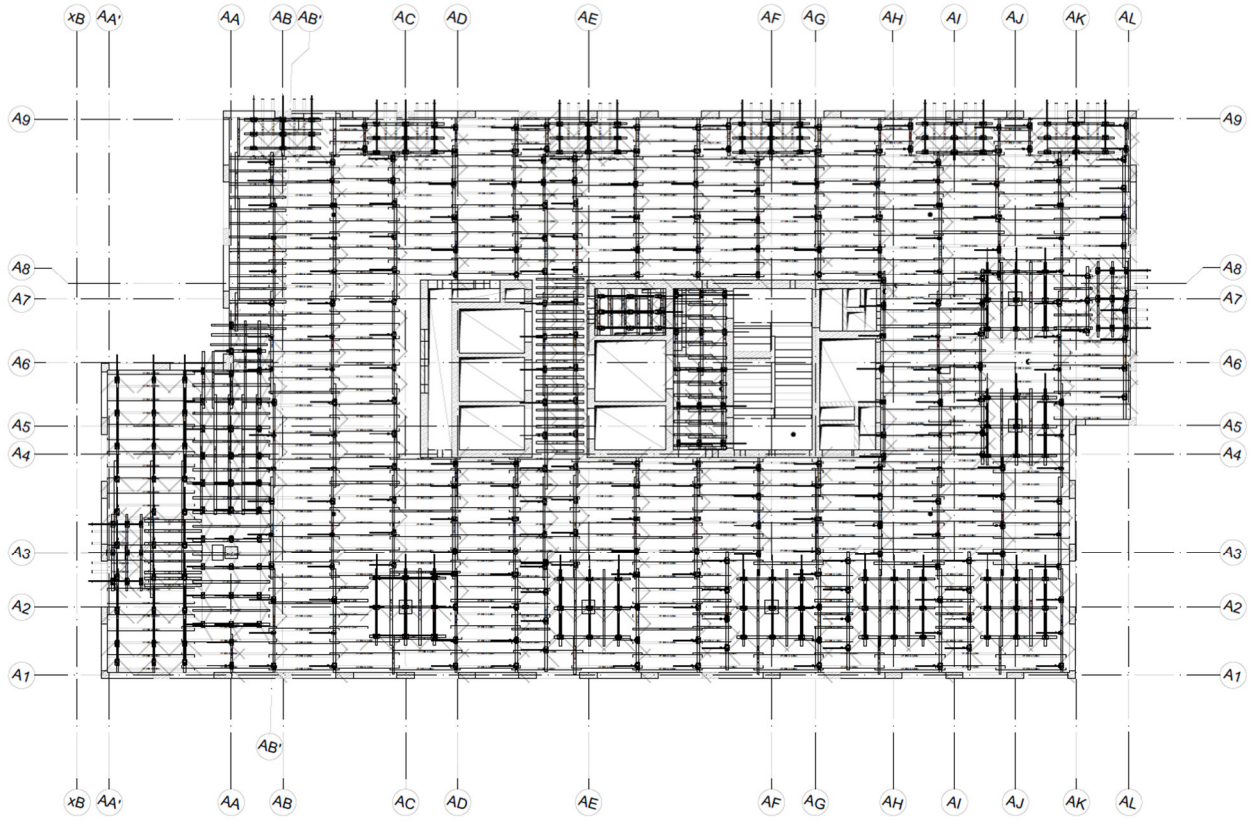
*Źródło: opracowanie własne na podstawie arkusza GW (tab) pliku Ruchy materiału 171473; stawka dzierżawy wg kalkulacji w pliku Wykres Gantta (1,7%/tydz.). Koszty transportu i przeładunku nie zostały odjęte.*




*Rys. 5.10. Wartość deskowania TRIO na budowie – stan rzeczywisty i scenariusz zwrotu na 7 dni w każdym cyklu kondygnacji. Źródło: opracowanie własne.*

### 5.1.6. Analiza wariantowa: deskowanie stropów w systemie SKYDECK zamiast MULTIFLEX

Stropy kondygnacji nadziemnych wykonano w dźwigarowym systemie MULTIFLEX (dźwigary VT 20K i GT 24, podpory PEP ERGO, poszycie ze sklejki). Dla kondygnacji powtarzalnej o rzucie odpowiadającym poziomom 6–8 (strop 725,82 m² i grzybki 115,00 m², łącznie 840,82 m²) dział techniczny PERI sporządził dwa równoważne schematy deskowania stropu: w systemie MULTIFLEX (Jarkas A. M., 2010), odpowiadający stanowi rzeczywistemu (rys. 5.11, zestawienie na tabeli 5.10), oraz w panelowym systemie SKYDECK z głowicą opadową, z dopełnieniami w strefach grzybków i krawędzi wykonanymi z dźwigarów VT 20K na głowicach SFK/SSK (rys. 5.12, zestawienie w tabeli 5.11). Oba zestawienia obejmują wyłącznie elementy systemowe („inne elementy"); poszycie ze sklejki (w MULTIFLEX cała powierzchnia, w SKYDECK jedynie dopełnienia o powierzchni szacowanej z ilości dźwigarów na ok. 182 m²) jest materiałem kupowanym i nie występuje w zestawieniach.

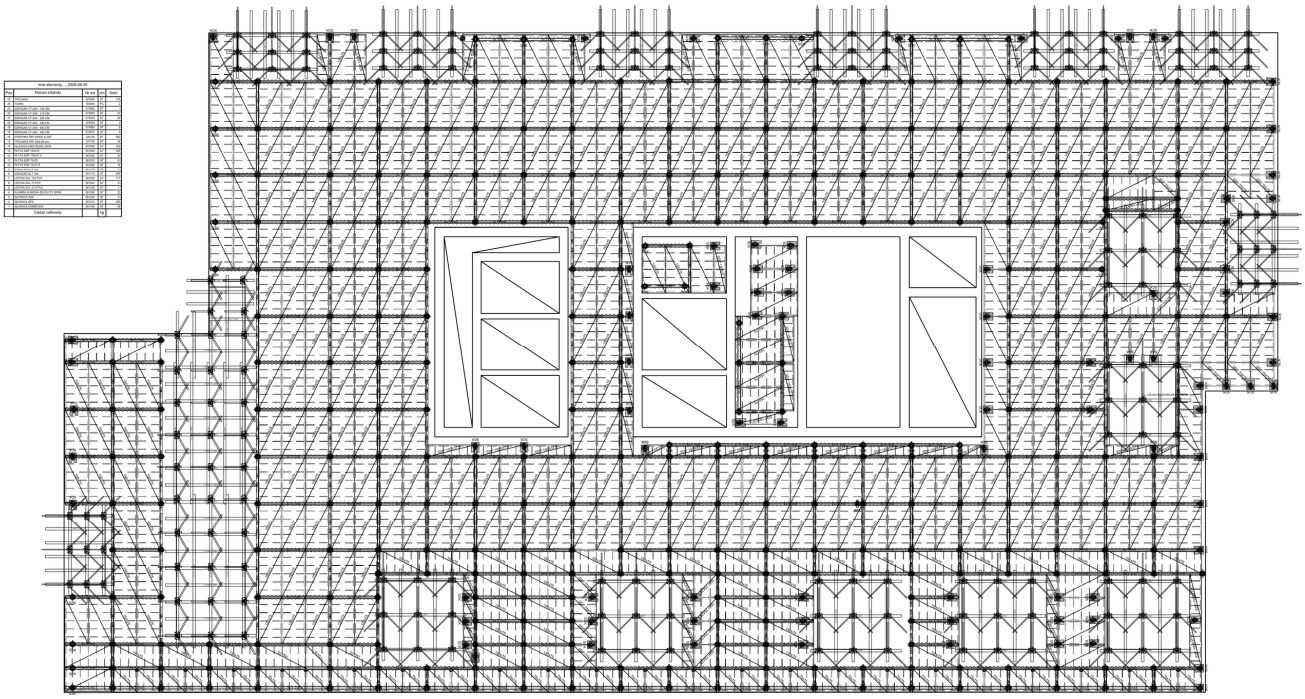



*Rys. 5.11. Schemat deskowania stropu kondygnacji powtarzalnej w systemie MULTIFLEX (dźwigary VT 20K / GT 24, podpory PEP ERGO) – stan rzeczywisty. Źródło: PERI Polska Sp. z o.o.,*

*Tabela 5.10. □estawienie materiału dla schematu MULTIFLEX (rys. 5.11): 2242 elementy, 26 960,66 kg, 170 839,90 € wg cennika.*

| Auto | Korekta | Suma | Jedn | Nazwa artykułu | Nr art | Ciężar[kg] | Razem Σ [kg] | Cena[€] | Razem Σ [€] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 159 | 0 | 159 | ST | TRÓJNÓG | 027860 | 8,98 | 1 427,82 | 82,40 | 13 101,60 |
| 22 | 0 | 22 | ST | DŹWIGAR GT24 - 180 CM | 075180 | 10,60 | 233,20 | 81,60 | 1 795,20 |
| 114 | 0 | 114 | ST | DŹWIGAR VT-20K - 145 CM | 074990 | 8,23 | 938,22 | 38,40 | 4 377,60 |
| 96 | 0 | 96 | ST | DŹWIGAR VT-20K - 215 CM | 074905 | 12,01 | 1 152,96 | 51,60 | 4 953,60 |
| 349 | 0 | 349 | ST | DŹWIGAR VT-20K - 265 CM | 074890 | 14,71 | 5 133,79 | 63,80 | 22 266,20 |
| 133 | 0 | 133 | ST | DŹWIGAR VT-20K - 290 CM | 074920 | 16,06 | 2 135,98 | 69,70 | 9 270,10 |
| 29 | 0 | 29 | ST | DŹWIGAR VT-20K - 330 CM | 074930 | 18,22 | 528,38 | 79,40 | 2 302,60 |
| 9 | 0 | 9 | ST | DŹWIGAR VT-20K - 360 CM | 074940 | 19,84 | 178,56 | 86,50 | 778,50 |
| 49 | 0 | 49 | ST | DŹWIGAR VT-20K - 390 CM | 074950 | 21,46 | 1 051,54 | 93,60 | 4 586,40 |
| 17 | 0 | 17 | ST | DŹWIGAR VT-20K - 450 CM | 074960 | 24,70 | 419,90 | 110,00 | 1 870,00 |
| 1 | 0 | 1 | ST | DŹWIGAR VT-20K - 490 CM | 074970 | 26,86 | 26,86 | 117,50 | 117,50 |
| 192 | 0 | 192 | ST | PODPORA PEP ERGO D-350 | 125130 | 19,40 | 3 724,80 | 135,50 | 26 016,00 |
| 294 | 0 | 294 | ST | PODPORA PEP ERGO D-350 PLUS | 131111 | 19,20 | 5 644,80 | 135,50 | 39 837,00 |
| 294 | 0 | 294 | ST | TRÓJNÓG UNIWERSALNY | 028000 | 9,19 | 2 701,86 | 85,60 | 25 166,40 |
| 33 | 0 | 33 | ST | TRÓJNÓG PEP D44-64 mm | 107152 | 5,81 | 191,73 | 55,10 | 1 818,30 |
| 451 | 0 | 451 | ST | GŁOWICA KRZYŻOWA 20/24 | 027890 | 3,26 | 1 470,26 | 27,90 | 12 582,90 |
| | | | | Sumuj zestawienie | | | 26 960,66 | | 170 839,90 |

*Źródło: PERI Polska Sp. z o.o.,*



*Rys. 5.12. Schemat deskowania stropu kondygnacji powtarzalnej w systemie SKYDECK (płyty SDP, dźwigary SLT, głowice opadowe, podpory PEP) z dopełnieniami VT 20K – wariant. Źródło: PERI Polska Sp. z o.o.,*

*Tabela 5.11. estawienie materiału dla schematu SKYDECK (rys. 5.12): 2618 elementów, 27 150,28 kg, 537 745,10 € wg cennika.*

| Auto | Korekta | Suma | Jedn | Nazwa artykułu | Nr art | Ciężar[kg] | Razem Σ [kg] | Cena[€] | Razem Σ [€] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 135 | 0 | 135 | ST | TRÓJNÓG | 027860 | 8,98 | 1 212,30 | 82,40 | 11 124,00 |
| 2 | 0 | 2 | PC | 103063 | 103063 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1 | 0 | 1 | ST | DŹWIGAR VT-20K - 145 CM | 074990 | 8,23 | 8,23 | 38,40 | 38,40 |
| 53 | 0 | 53 | ST | DŹWIGAR VT-20K - 215 CM | 074905 | 12,01 | 636,53 | 51,60 | 2 734,80 |
| 99 | 0 | 99 | ST | DŹWIGAR VT-20K - 290 CM | 074920 | 16,06 | 1 589,94 | 69,70 | 6 900,30 |
| 3 | 0 | 3 | ST | DŹWIGAR VT-20K - 330 CM | 074930 | 18,22 | 54,66 | 79,40 | 238,20 |
| 5 | 0 | 5 | ST | DŹWIGAR VT-20K - 450 CM | 074960 | 24,70 | 123,50 | 110,00 | 550,00 |
| 5 | 0 | 5 | ST | DŹWIGAR VT-20K - 490 CM | 074970 | 26,86 | 134,30 | 117,50 | 587,50 |
| 424 | 0 | 424 | ST | MULTIPROP MP 250 | 027289 | 15,40 | 6 529,60 | 356,50 | 151 156,00 |
| 169 | 0 | 169 | ST | PODPORA PEP ERGO D-350 | 125130 | 19,40 | 3 278,60 | 135,50 | 22 899,50 |
| 34 | 0 | 34 | ST | TRÓJNÓG PEP D44-64 mm | 107152 | 5,81 | 197,54 | 55,10 | 1 873,40 |
| 169 | 0 | 169 | ST | GŁOWICA KRZYŻOWA 20/24 | 027890 | 3,26 | 550,94 | 27,90 | 4 715,10 |
| 399 | 0 | 399 | ST | PŁYTA SDP 150x75 | 061000 | 15,50 | 6 184,50 | 359,50 | 143 440,50 |
| 31 | 0 | 31 | ST | PŁYTA SDP 150x37,5 | 061020 | 9,77 | 302,87 | 339,50 | 10 524,50 |
| 61 | 0 | 61 | ST | PŁYTA SDP 75x75 | 061010 | 8,60 | 524,60 | 267,50 | 16 317,50 |
| 16 | 0 | 16 | ST | PŁYTA SDP 75x37,5 | 061030 | 5,27 | 84,32 | 225,50 | 3 608,00 |
| 21 | 0 | 21 | ST | DŹWIGAR SLT 225 | 061100 | 15,60 | 327,60 | 379,50 | 7 969,50 |
| 264 | 0 | 264 | ST | DŹWIGAR SLT 150 | 061110 | 9,69 | 2 558,16 | 345,50 | 91 212,00 |
| 177 | 0 | 177 | ST | LISTWA SAL 150 PVC | 061026 | 1,58 | 279,66 | 36,60 | 6 478,20 |
| 91 | 0 | 91 | ST | LISTWA SAL 75 PVC | 061027 | 0,79 | 72,25 | 24,40 | 2 220,40 |
| 11 | 0 | 11 | ST | LISTWA SAL 37,5 PVC | 061038 | 0,40 | 4,40 | 12,70 | 139,70 |
| 23 | 0 | 23 | ST | KLAMRA KLINOWA DO PŁYTY SPKK | 061280 | 0,78 | 17,89 | 28,60 | 657,80 |
| 31 | 0 | 31 | ST | GŁOWICA SSK | 061200 | 3,96 | 122,76 | 80,80 | 2 504,80 |
| 299 | 0 | 299 | ST | GŁOWICA SFK | 061210 | 6,18 | 1 847,82 | 127,50 | 38 122,50 |
| 95 | 0 | 95 | ST | GŁOWICA COMBI SCK | 061180 | 5,34 | 507,30 | 123,50 | 11 732,50 |
| | | | | Sumuj zestawienie | | | 27 150,28 | | 537 745,10 |

*Źródło: PERI Polska Sp. z o.o.,*



*Fot. 5.3. Budynek biurowy INDUSTRIAL, Poznań – realizacja konstrukcji żelbetowej kondygnacji nadziemnych. Źródło: Archiwum PERI Polska Sp. z o.o.*



*Fot. 5.4. Budynek biurowy INDUSTRIAL, Poznań – realizacja konstrukcji żelbetowej kondygnacji adziemnych. Źródło: Archiwum PERI Polska Sp. z o.o.*

Porównanie ilościowe obu zestawień (tab. 5.10 i 5.11, rys. 5.13) prowadzi do kilku obserwacji. Masa materiału systemowego na 1 m² stropu jest niemal identyczna (32,1 kg/m² MULTIFLEX wobec 32,3 kg/m² SKYDECK), lecz SKYDECK wymaga o 17% więcej elementów (2 618 wobec 2 242) i o 22% więcej podpór (593 wobec 486), co wynika z gęstszej siatki podpór pod głowicami opadowymi (raster 150 × 225 cm) oraz z dopełnień VT. W zamian liczba dźwigarów VT spada z 2 122 do 459 mb, a płyty SDP (505 m² poszycia systemowego) i dźwigary SLT (443 mb) zastępują sklejkę na ok. 60% powierzchni. Zasadnicza różnica dotyczy wartości katalogowej: 537 745 € wobec 170 840 €, tj. 3,15-

krotnie więcej (640 wobec 203 €/m²). W zestawieniu SKYDECK aż 151 156 € (28%) stanowią aluminiowe podpory MULTIPROP MP 250 (424 szt. po 356,50 €), których w wariancie MULTIFLEX nie ma (podpory PEP ERGO po 135,50 €); płyty SDP to 173 891 €, a dźwigary SLT 99 182 €. Przy stawce 1,7% wartości katalogowej tygodniowo (kalkulacja wykonawcy) czynsz miesięczny kompletu na kondygnację powtarzalną wynosiłby ok. 39,3 tys. € dla SKYDECK wobec 12,5 tys. € dla MULTIFLEX, do czego w MULTIFLEX należy doliczyć zakup sklejki na ok. 841 m² poszycia. Różnica ta musi być zrekompensowana krótszym czasem dzierżawy lub mniejszą liczbą kompletów – i to jest przedmiotem analizy dostaw.

*Tabela 5.12. □estawienia materiałowe deskowania stropu kondygnacji powtarzalnej – podsumowanie (elementy systemowe)*

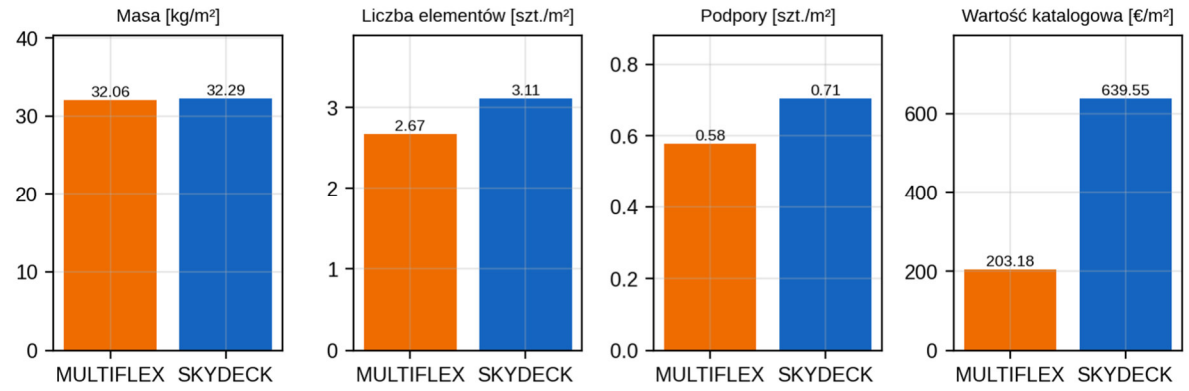
| Wielkość | MULTIFLEX (stan rzeczywisty) | SKYDECK (wariant) | SKYDECK / MULTIFLEX |
|---|---|---|---|
| Liczba elementów [szt.] | 2 242 | 2 618 | 1,17 |
| Masa [kg] | 26 960,66 | 27 149,96 | 1,01 |
| Wartość katalogowa [€] | 170 839,90 | 537 745,10 | 3,15 |
| Dźwigary VT 20K / GT 24 [szt.] / [mb] | 868 / 2 122,5 | 166 / 459,4 | 0,22 |
| Podpory PEP ERGO / MULTIPROP MP 250 [szt.] | 486 / – | 169 / 424 | 1,22 |
| Płyty SDP [szt.] / [m²] | – | 507 / 505,1 | – |
| Dźwigary SLT 225 / 150 [szt.] / [mb] | – | 21 / 264 / 443,25 | – |
| Głowice (krzyżowe 20/24; SFK / SSK / SCK) [szt.] | 451; – | 169; 299 / 31 / 95 | – |
| Trójnogi [szt.] | 159 + 294 + 33 | 135 + 34 | – |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie zestawień PERI CAD (rys. 5.11 i 5.12). Powierzchnia płyt SDP: 150×75 = 1,125 m², 150×37,5 i 75×75 = 0,5625 m², 75×37,5 = 0,281 m².*

*Tabela 5.13. Wskaźniki porównawcze na 1 m² stropu z grzybkami kondygnacji powtarzalnej (840,82 m²)*

| Wskaźnik | MULTIFLEX | SKYDECK | SKYDECK / MULTIFLEX |
|---|---|---|---|
| Masa [kg/m²] | 32,06 | 32,29 | 1,01 |
| Liczba elementów [szt./m²] | 2,67 | 3,11 | 1,17 |
| Dźwigary VT/GT [mb/m²] | 2,52 | 0,55 | 0,22 |
| Podpory [szt./m²] | 0,58 | 0,71 | 1,22 |
| Wartość katalogowa [€/m²] | 203,18 | 639,55 | 3,15 |
| Czynsz miesięczny przy 1,7%/tydz. [€/mies.] | 12 488 | 39 309 | 3,15 |
| Sklejka poszycia (zakup) [m²] – szacunek | ≈ 841 | ≈ 182 | – |

*Źródło: opracowanie własne.*




*Rys. 5.13. Wskaźniki materiałowe na 1 m² stropu kondygnacji powtarzalnej: MULTIFLEX a SKYDECK. Źródło: opracowanie własne.*

Analizę dostaw w wariancie SKYDECK przeprowadzono przy zachowaniu rzeczywistego cyklu 28 dni oraz sekwencji z harmonogramu (deskowanie stropu od 9. dnia cyklu), z uwzględnieniem obu przewieszeń podpieranych wieżami ST 100. Podstawowa różnica technologiczna polega na tym, że w systemie z głowicą opadową płyty i dźwigary rozdeskowuje się wcześnie, po osiągnięciu przez beton wytrzymałości określonej w instrukcji systemu, pozostawiając podpory z głowicami jako podparcie pośrednie; komplet płyt i dźwigarów może więc obsługiwać kolejną kondygnację, podczas gdy w MULTIFLEX cały komplet (dźwigary, sklejka i podpory) pozostaje pod stropem do rozdeskowania, a rotacja wymaga drugiego kompletu dźwigarów i poszycia. Z rzeczywistego przebiegu potencjału (rys. 5.10) wynika, że na podium na budowie znajdowało się ok. 5600 mb dźwigarów VT, tj. blisko dwa komplety dla stropu 1255 m² (wskaźnik 2,52 mb/m² z tab. 5.12 daje ok. 3160 mb na komplet). W wariancie SKYDECK wystarczyłby jeden komplet płyt, dźwigarów SLT i głowic oraz podpory na dwie kondygnacje (deskowana i podparcie pośrednie). Scenariusz dostaw i zwrotów zestawiono w tab. 5.14; w porównaniu ze stanem rzeczywistym (168 dokumentów wydań i 186 zwrotów w całym okresie) liczba ruchów materiału stropowego ogranicza się do dostawy początkowej, dwóch zwrotów nadwyżek przy zmianie rzutu, dwóch dostaw i dwóch zwrotów wież ST 100 oraz zwrotu końcowego.

*Tabela 5.14. Scenariusz dostaw i zwrotów deskowania stropowego w wariancie SKYDECK – cykl 28 dni (daty wg sekwencyjnego cyklu kondygnacji)*

| Data | Operacja | Zakres | Uwaga |
|---|---|---|---|
| 29.03.2024 | Dostawa | Komplet SKYDECK dla rzutu poziomów 0–4 (płyty SDP, dźwigary SLT, głowice SFK/SSK/SCK, dopełnienia VT-20K) – ok. 1,49 × zestawienie z rys. 5.14 (1255/841 m²); podpory MULTIPROP/PEP na 2 kondygnacje (deskowana + podparcie pośrednie) | przed rozpoczęciem deskowania stropu poziomu ±0 |
| 13.04.2024 | Montaż | Pierwszy montaż SKYDECK na poziomie ±0; rozdeskowanie płyt i dźwigarów z pozostawieniem głowic opadowych na podporach | cykl 1 |
| 09.08.2024 | Dostawa | Wieże ST 100 do podparcia przewieszenia 166 m² poziomu 5 (wg Gantta okres podparcia 02.07.2024–02.01.2025) | wsparcie 8 cieśli × 10–12 dni rob. |
| 20.09.2024 | Zwrot | Nadwyżka kompletu SKYDECK po przejściu z rzutu 0–5 (1255/1077 m²) na rzut powtarzalny 841 m² – ok. 22–33% płyt SDP i dźwigarów SLT | po rozdeskowaniu stropu poziomu 5 |
| 29.11.2024 | Dostawa | Wieże ST 100 do podparcia przewieszenia 179 m² poziomu 9 (wg Gantta 28.09.2024–28.01.2025) | wsparcie 8 cieśli × 10–12 dni rob. |
| 07.02.2025 | Zwrot | Wieże ST 100 spod przewieszenia poziomu 5 (po osiągnięciu wytrzymałości i rozparciu stropów wyższych) | wg Gantta 02.01.2025 |
| 07.03.2025 | Zwrot | Wieże ST 100 spod przewieszenia poziomu 9 | wg Gantta 28.01.2025 |
| 29.05.2025 | Zwrot | Komplet SKYDECK (płyty, dźwigary, głowice) po rozdeskowaniu stropu poziomu 14; podpory pośrednie pozostają do dojrzenia dwóch ostatnich stropów | koniec konstrukcji |

| Data | Operacja | Zakres | Uwaga |
|---|---|---|---|
| 26.06.2025 | Zwrot | Podpory MULTIPROP/PEP spod stropów poziomów 13–14 | ok. 4 tygodnie po ostatnim betonowaniu |

*Źródło: opracowanie własne (scenariusz planistyczny) na podstawie harmonogramu Gantta i zestawień PERI CAD. W cyklu 21 dni (tab. 5.13 pliku Excel) sekwencja operacji jest identyczna, a daty ulegają skróceniu proporcjonalnie do cyklu.*

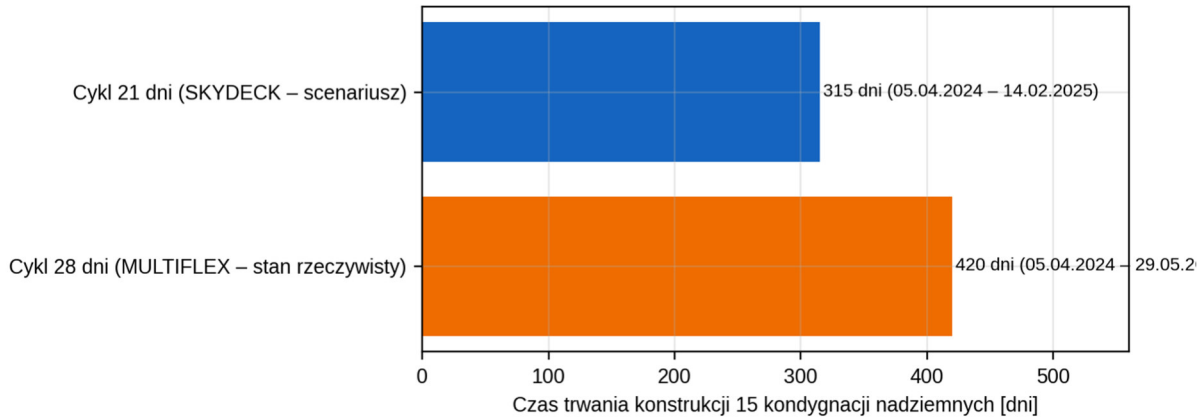
Druga analiza dotyczy skrócenia cyklu kondygnacji nadziemnej do 21 dni przy stropach w systemie SKYDECK. Wczesne rozdeskowanie z głowicą opadową i mniejsza liczba czynności na 1 m² (płyta zamiast układu dźwigar główny – dźwigar poprzeczny – sklejka) pozwalają skrócić etap „strop + grzybki" z 19 dni do ok. 12–13 dni przy niezmienionych etapach ścian, słupów i podciągów; cykl 21 dni daje 15 dni roboczych na kondygnację. Wpływ na wykorzystanie materiału jest bezpośredni: 15 kondygnacji zostałoby wykonanych w 315 dni (do 13.02.2025) zamiast 420 dni (do 29.05.2025), a więc o 105 dni (25%) krócej (rys. 5.14, tab. 5.15). Przy konserwatywnym założeniu, że średnia wartość materiału na budowie w fazie nadziemnej pozostałaby na rzeczywistym poziomie 905 tys. €, liczba wartość·dni spadłaby z 380 do 285 mln €·dni, co przy stawce 0,244% dziennie odpowiada czynszowi niższemu o ok. 232 tys. € (z 927 do 695 tys. €). Oszczędność ta jest tego samego rzędu co różnica czynszu między SKYDECK a MULTIFLEX dla kompletu stropowego (ok. 27 tys. €/mies. przez ok. 10,5 miesiąca ≈ 282 tys. €, pomniejszona o niekupowaną sklejkę), tak więc o opłacalności wariantu przesądzają korzyści poza samym deskowaniem: skrócenie czasu pracy pozostałych grup materiałowych (TRIO, PERI UP, PROKIT, wieże ST 100 – łącznie ponad 70% wartości·dni fazy), wcześniejsze udostępnienie frontu robót wykończeniowych i mniejsze koszty ogólne budowy przez 3,5 miesiąca.

Skrócenie cyklu do 21 dni nie jest jednak osiągalne samym zamianą systemu stropowego. Ta sama liczba roboczogodzin cieśli, którą na kondygnację wieżową zużywano w 20 dniach roboczych, musiałaby zostać wykonana w 15 dniach, co przy niezmienionej wydajności oznacza 16 zamiast 12 cieśli lub – co pokazała analiza wydajności w podrozdziale 5.1.4 – wykorzystanie istniejącej rezerwy brygady, która w części wieżowej pracowała z nakładem 1,15–1,19 rb-g/m² wobec 0,68 rb-g/m² na podium. Rezerwa ta nie mogła być spożytkowana, ponieważ ograniczeniem cyklu był jeden dźwig wieżowy obsługujący kolejno deskowanie ścienne, podawanie zbrojenia, dźwigary i podpory stropowe, wieże ST 100 oraz dostawy i zwroty. Wariant 21-dniowy wymaga zatem dwóch dźwigów: jednego dedykowanego deskowaniu ściennemu i słupowemu oraz zbrojeniu ścian, drugiego – deskowaniu stropowemu i zbrojeniu stropu. Tylko wówczas etap ścian (6 dni) i etap stropu mogą się nakładać bez wzajemnego blokowania, a przewaga systemu panelowego (mniej podnoszeń dźwigiem dzięki paletom płyt, brak sklejki) zostaje przełożona na czas cyklu.

*Tabela 5.15. Scenariusze czasu realizacji 15 kondygnacji nadziemnych: cykl 28 dni (MULTIFLEX, stan rzeczywisty) i 21 dni (SKYDECK, wariant)*

| Wielkość | Cykl 28 dni | Cykl 21 dni | Różnica |
|---|---|---|---|
| Czas łączny [dni] / zakończenie konstrukcji | 420 / 29.05.2025 | 315 / 13.02.2025 | –105 dni |
| Dni robocze na kondygnację | 20 | 15 | –5 |
| Średnia wartość materiału na budowie [tys. €] (założenie: równa) | 905 | 905 | 0 |
| Wartość·dni [mln €·dni] | 380,3 | 285,2 | -95,1 |
| Szacunkowy czynsz dzierżawy fazy nadziemnej przy 0,244%/dzień [tys. €] | 927 | 695 | –232 |
| Cieśle przy tej samej liczbie rb-g na kondygnację [os.] | 12 | 16 | +4 |
| Dźwigi wieżowe [szt.] | 1 | 2 | +1 |

*Źródło: opracowanie własne; stawka dzierżawy wg kalkulacji w pliku Wykres Gantta.*




*Rys. 5.14. Czas realizacji konstrukcji 15 kondygnacji nadziemnych w cyklu 28 dni (stan rzeczywisty) i 21 dni (wariant SKYDECK, 2 dźwigi). Źródło: opracowanie własne.*

**Wykres Gantta - czas realizacji konstrukcji 15 kondygnacji nadziemnych w cyklu 28 dni (stan rzeczywisty) jako wydruk całościowy stanowi załącznik nr 2 niniejszej rozprawy i jest wpięty na jej końcu.**

### 5.1.7. Wnioski

1. Potencjał deskowań ustalony przez dostawcę na podstawie rysunków obmiarowych okazał się wiarygodniejszą miarą zakresu robót niż przedmiar betonu wykonawcy: ilości rzeczywiście wbudowane (6 156 m³ na poziomach ±0…+14) są o 16,3% wyższe od wyceny wyjściowej, a odniesione do powierzchni deskowań odtwarzają dokładnie projektowe grubości stropów (22 cm), grzybków (50 cm) i ścian (22–28 cm). Największe zaniżenia wyceny dotyczą ścian poziomów +1…+4 (+49%), grzybków (+63% do +85%) oraz przewieszeń, których wycena nie zawierała. Dla dostawcy deskowań płynie stąd wniosek, że planowanie dostaw powinno opierać się na własnym potencjale z rysunków, a nie na przedmiarach klienta.
2. Stała załoga 8 zbrojarzy i 12 cieśli w cyklu 28 dni oznaczała spadek wykorzystania potencjału ludzkiego wraz ze zmniejszeniem rzutu: nakład cieśli wzrósł z 0,68 rb-g/m² deskowania na podium do 1,15–1,19 rb-g/m² w części wieżowej, a wydajność zbrojarzy spadła z 47 do 30 kg/rb-g. Cykl kondygnacji w części wieżowej nie był więc ograniczony ani ludźmi, ani ilością deskowania.
3. Ograniczeniem tym był jeden dźwig wieżowy. Obsługiwał on kolejno deskowanie ścienne TRIO, podawanie zbrojenia ścian i stropów, dźwigary i podpory MULTIFLEX, wieże ST 100 pod przewieszenia oraz 168 dostaw i 186 zwrotów materiału w całym okresie. Sekwencyjność tych operacji wymuszała 28-dniowy cykl niezależnie od rezerw wydajności brygad. Osiągnięcie cyklu 21 dni dla kondygnacji nadziemnej wymagałoby dwóch dźwigów, aby deskowanie ścienne i podawanie zbrojenia przebiegały sprawnie, bez zakłóceń i bez oczekiwania na obsługę deskowania stropowego.
4. Wykorzystanie materiału w czasie (średnio 546 tys. € przez 1044 dni, maksymalnie 1 285 tys. €) było zdominowane przez grupy niezwiązane bezpośrednio z rotacją stropów: TRIO, wieże ST 100, podpory i rusztowanie PERI UP odpowiadały za ponad 90% wartości·dni fazy nadziemnej, a same dźwigary VT – za ok. 5%. Wieże ST 100 pod przewieszenia pozostawały na budowie do czerwca 2025 r., blisko pięć miesięcy dłużej, niż zakładał harmonogram – to najistotniejsze pojedyncze źródło niewykorzystanego potencjału materiałowego na tej budowie.
5. W kategoriach marnotrawstwa koniecznego i niekoniecznego (Drzewiecki): oczekiwanie zmontowanego deskowania na zbrojenie i dojrzewanie betonu jest marnotrawstwem koniecznym, które można jedynie skracać (głowica opadowa, wcześniejsze rozdeskowanie), natomiast odłożenie deskowania ściennego bez produkcji przez tydzień w każdym cyklu jest marnotrawstwem niekoniecznym o wartości ok. 37,7 mln €·dni (ok. 92 tys. € czynszu, 24% czynszu TRIO fazy nadziemnej). Jego eliminacja przez comiesięczny zwrot do magazynu nie jest jednak racjonalna przy jednym dźwigu – 30 dodatkowych operacji transportowych i przeładunkowych obciążyłoby zasób krytyczny; właściwym rozwiązaniem jest dopasowanie kompletu i przetaktowanie frontu ścian.

6. Wariant SKYDECK dla stropów daje niemal identyczną masę materiału na 1 m² (32,1 wobec 32,3 kg/m²), lecz 3,15-krotnie wyższą wartość katalogową kompletu (640 wobec 203 €/m²), z czego 28% stanowią podpory MULTIPROP. Przy utrzymaniu cyklu 28 dni jego zaletą jest wyłącznie mniejsza liczba kompletów i ruchów materiału; opłacalność pojawia się dopiero przy skróceniu cyklu do 21 dni, które zmniejsza czas dzierżawy całego parku o 105 dni (szacunkowo ok. 232 tys. € czynszu przy niezmienionej wartości materiału) i uwalnia front robót o 3,5 miesiąca wcześniej – pod warunkiem drugiego dźwigu i zwiększenia lub lepszego wykorzystania brygady cieśli.
7. Studium przypadku potwierdza tezę rozprawy, że przewaga wynikająca z szybkości montażu systemu deskowania przekłada się na efektywność gospodarki deskowaniami po stronie firmy żelbetowej dopiero przy synchronizacji trzech potencjałów: materiału, ludzi i zasobów logistycznych (dźwig, transport).Dostawca deskowań, dysponując danymi o potencjale z rysunków, ruchach materiału i harmonogramie, jest w stanie zidentyfikować wąskie gardło budowy wcześniej niż wynika to z przedmiarów wykonawcy – i to właśnie ta zdolność, a nie katalog produktów, stanowi wartość dodaną w modelu Construction 5.0 opisanym w podrozdziale 3.1.

## 5.2. Przepływ deskowań w PERI Polska – wykorzystanie parku dzierżawnego, terminowość wydań i wydajność centrów logistycznych

Podrozdział dotyczy poziomu parku dzierżawnego i centrów logistycznych dostawcy. Stanowi podstawę weryfikacji tezy szczegółowej TS3 w części „przepływ zamiast wolumenu" oraz ustanawia linię bazową dla hipotezy operacyjnej H; w podrozdziale 5.2.4 weryfikuje tezę TS2 w części dotyczącej technologii wspierających pracownika. Teoretycznym zapleczem analizy jest prawo Little'a (Little J. D. C., 1961), stanowiące w teorii zarządzania produkcją podstawową zależność między produkcją w toku, przepustowością i czasem cyklu; ta sama teoria wskazuje, że zmienność w systemie produkcyjnym jest zawsze buforowana kombinacją zapasu, zdolności produkcyjnej i czasu (Hopp W. J., Spearman M. L., 2008). W odniesieniu do urządzeń wspomagających pracę fizyczną punktem odniesienia jest przegląd egzoszkieletów przemysłowych, w którym dla urządzeń pasywnych odnotowano redukcję aktywności mięśni grzbietu o 10–40%, a dla aktywnych – redukcję aktywności mięśni sięgającą 80%, wskazując zarazem bariery w postaci dyskomfortu, masy urządzeń i braku szczegółowych norm bezpieczeństwa (de Looze M. P. i in., 2016).

### 5.2.1. Cel, zakres, źródła danych i metodyka analizy

Podrozdział ma charakter empiryczny i obejmuje trzy mierzalne ogniwa przepływu deskowań systemowych w PERI Polska Sp. z o.o.: stan parku dzierżawnego (bieżące wykorzystanie materiałowe), wejście materiału na budowę (terminowość wydań) oraz zdolność centrów logistycznych do przyjmowania, obsługi i ponownego wydawania materiału (wydajność przeładunków). W metodzie FFF (Flexible Formwork Flow), sformułowanej w artykule (Majkowski Ł., Pasławski J., 2023), przepływ deskowań traktowany jest jako jeden ciągły strumień – od placu dostawcy, przez wydanie, transport, montaż, cykle betonowania i demontaż, aż po zwrot i ponowne wydanie na kolejną budowę – w którym niezawodność magazynu deskowań (perspektywa dostawcy) i zgodność planowania z realizacją (perspektywa wykonawcy) są dwiema stronami tego samego procesu. Zakłócenie w którymkolwiek ogniwie – brak artykułu na stanie, opóźniona kompletacja, nieobsadzona zmiana w centrum logistycznym, przedłużona dzierżawa – przenosi się na pozostałe jako opóźnienie dostawy, przerwanie rytmu cyklu deskowanie–zbrojenie–betonowanie–rozdeskowanie albo nadmiarowy zakup materiału. Celem podrozdziału jest ilościowa ocena stanu tych ogniw na danych operacyjnych oraz ustanowienie linii bazowej (ang. baseline), względem której weryfikowana jest główna teza rozprawy.

Podstawowym miernikiem stanu parku jest wskaźnik bieżącego wykorzystania materiałowego (ang. utilization). Park dzierżawny deskowań i rusztowań stanowi zasadniczy składnik majątku PERI Polska i generuje przychód wyłącznie wtedy, gdy znajduje się w dzierżawie u Klienta; każdy element leżący na placu magazynowym generuje natomiast koszty – kapitał zamrożony, powierzchnię składowania, obsługę logistyczną, przeglądy, remonty i amortyzację. Wskaźnik bezpośrednio łączy więc sferę techniczną (sprawność montażu, demontażu i rotacji elementów) ze sferą finansową (zwrot z zaangażowanego kapitału). W raportach wewnętrznych jest on wyznaczany na koniec każdego tygodnia kalendarzowego (TK) jako stosunek wartości elementów znajdujących się w dzierżawie do wartości parku dzierżawnego danej grupy produktowej. Poprawność arytmetyczną raportów

zweryfikowano – np. dla grupy „Dźwigary kratowe 24” w 35 TK 2025 iloraz obu wartości daje dokładnie raportowane 64,97%. W PERI Polska wykorzystanie grupy produktowej powyżej 60% uznaje się za poprawne, a poniżej tej wartości – za zbyt niskie; celem strategicznym jest poziom powyżej 75%, który – według informacji wewnętrznych koncernu – osiągnęła już w niektórych grupach produktowych spółka PERI Czechy, działająca w warunkach organizacyjnych i rynkowych zbliżonych do polskich.

Analizę oparto na czterech zbiorach danych, zestawionych w tabeli 5.16. Pierwszy stanowi 51 tygodniowych raportów wykorzystania od 35 TK 2025 do 36 TK 2026 (w zbiorze brak raportów dla 52 TK 2025, 1 TK 2026 i 28 TK 2026, co odpowiada okresowi świąteczno-noworocznemu i jednemu tygodniowi letniemu), a więc pełne 12 miesięcy od końca sierpnia 2025 r. do początku września 2026 r. Analizie poddano główne grupy produktowe, pomijając podgrupy. Spośród 26 głównych grup cztery („Handset Alpha”, „Deskowanie ramowe DUO”, „Akcesoria”, „Sklejka”) nie mają w raportach wyznaczanego wskaźnika wykorzystania, dlatego statystyki obliczono dla 22 grup oraz dla wiersza zbiorczego „Wszystkie grupy”. Operowano wyłącznie wartościami procentowymi wykorzystania i udziałami grup w majątku, bez podawania wartości majątku. Drugi zbiór to eksport z systemu magazynowo-logistycznego obejmujący 2353 pozycje (podzlecenia wydań) z pierwotnie zaplanowaną datą wydania od 16.03.2026 do 28.08.2026; dane zanonimizowano – nie podaje się nazw Klientów ani budów. Trzeci zbiór to wewnętrzna ewidencja przeładunków dwóch centrów logistycznych: Centrum Logistycznego Koninko (CL KO), obsługującego region poznański i północno-zachodni, oraz Centrum Logistycznego Kąty Wrocławskie (CL KW), obsługującego region dolnośląski i południowo-zachodni, za lata 2017–2026. Dane za 2026 r. obejmują okres do lipca i we wszystkich zestawieniach oznaczono je gwiazdką (2026*). Istotną informacją kontekstową jest odnotowana w ewidencji zmiana organizacji pracy – od 5 czerwca 2023 r. oba centra pracują na jedną zmianę. Czwarty zbiór obejmuje dane publiczne (płaca minimalna brutto według rozporządzeń Rady Ministrów, wskaźniki GUS dotyczące produkcji budowlano-montażowej) oraz jawnie sformułowane założenia symulacyjne.

*Tabela 5.16. □biory danych empirycznych wykorzystane w podrozdziale, ich zakres, mierniki i zastosowane metody analizy*

| Zbiór danych | Zakres i liczebność | Mierniki | Metody analizy |
|---|---|---|---|
| Raporty tygodniowe bieżącego wykorzystania materiałowego PERI Polska | 51 tygodni (35 TK 2025 – 36 TK 2026); 22 główne grupy produktowe oraz wiersz „Wszystkie grupy” | wykorzystanie [%]; udział grupy w majątku [%] | statystyki opisowe, podokresy 2025 i 2026, liczba tygodni ≥ 60% i ≥ 75%, klasyfikacja względem progów |
| Eksport odchyleń terminów wydań materiału z systemu magazynowo-logistycznego | 2353 pozycje (podzlecenia wydań), 409 Klientów; planowane daty wydań 16.03–28.08.2026 | odchylenie [dni]; kod powodu odchylenia; miesiąc | statystyki opisowe, rozkład klas odchyleń, tłumaczenie i klasyfikacja kodów przyczyn, ujęcie miesięczne |
| Ewidencja przeładunków CL Koninko i CL Kąty Wrocławskie | lata 2017–2026 (2026* – dane do lipca) | tonaż roczny [t]; średnioroczne zatrudnienie; wydajność [t/prac.] | dynamika r/r, porównanie średnich 2017–2022 i 2023–2025, indeksy (2017 = 100), symulacja kontrfaktyczna, analiza wrażliwości |
| Dane publiczne i założenia symulacyjne | płaca minimalna brutto 2017–2026; wskaźniki GUS; struktura czasu pracy cieśli i zbrojarzy (założenie autora) | koszt pracy [zł]; nakład robocizny [r-g] | wycena kosztu pracy, symulacja scenariuszowa S1–S3, próg opłacalności |

*Źródło: opracowanie własne.*

Dla każdej grupy produktowej wyznaczono wartość wskaźnika w pierwszym i ostatnim tygodniu obserwacji, zmianę w punktach procentowych (p.p.), średnią, medianę, minimum, maksimum, odchylenie standardowe, średnie w podokresach 2025 (35–51 TK) i 2026 (2–36 TK) oraz liczbę tygodni, w których wskaźnik był równy lub wyższy niż 60% i 75%. W analizie wydań przyjęto konwencję zgodną z kolumną „Różnica” systemu, zweryfikowaną dla wszystkich 2353 pozycji: odchylenie jest różnicą między datą żądaną przez Klienta a pierwotnie zaplanowaną datą wydania (w dniach kalendarzowych). Wartość ujemna oznacza więc opóźnienie, dodatnia – wydanie wcześniejsze niż żądano, a zero – zgodność z terminem żądanym. Kody powodów odchyleń, zapisane w systemie w języku angielskim (14 kodów oraz 36 pustych wpisów), przetłumaczono na język polski i przypisano do sześciu kategorii przyczyn: uzgodnienie z Klientem, zgodność z czasem realizacji (ang. lead time), zamówienie Klienta

złożone z wyprzedzeniem krótszym niż lead time, przyczyny nieustalone lub brak wpisu, przyczyny wewnętrzne PERI (magazyn, zaopatrzenie, dział handlowy) oraz transport.

Wpływ wdrożeń technicznych w centrach logistycznych oceniono za pomocą modelu bilansu pracy. Jeżeli dla udziału s czasu pracy fizycznej wydajność jednostkowa wzrosła o g, to ta sama praca wykonana bez urządzenia wymagałaby zatrudnienia $W' = W \cdot (1 + c \cdot s \cdot g)$, gdzie W jest rzeczywistą średniorocznią liczbą pracowników, a c – stopniem objęcia danego roku wdrożeniem (przyjęto c = 1,00). Różnica $W' - W$ jest liczbą pracowników, których należałoby dodatkowo zatrudnić, aby bez urządzeń przeładować ten sam tonaż; przy niezmienionej załodze tonaż możliwy do przeładowania spadłby natomiast o $T \cdot [1 - 1/(1 + c \cdot s \cdot g)]$. Na podstawie obserwacji operacyjnych PERI Polska przyjęto wzrost wydajności g = 45% dla prac wykonywanych z egzoszkieletem (CL KW) i g = 30% dla prac z dźwigiem obsługi ręcznej (CL KO), a udział prac wspieranych s = 100% w wariancie bazowym i 25–75% w analizie wrażliwości. Koszt etatu wyceniono publicznie dostępnym indeksem – płacą minimalną brutto z narzutem kosztów pracodawcy 1,20 – ponieważ rzeczywiste stawki pracowników fizycznych PERI Polska stanowią informację poufną; wycena ma więc charakter dolnego oszacowania. Symulację przeniesienia efektu egzoszkieletów na plac budowy oparto na analogicznej zależności, zgodnie z którą redukcja nakładu robocizny wynosi $1 - 1/(1 + s \cdot g \cdot k)$, gdzie k jest współczynnikiem przeniesienia efektu z centrum logistycznego na budowę. Wszystkie obliczenia wykonano w skoroszytach Excel, w których wyniki wyliczane są formułami odwołującymi się do danych źródłowych, a parametry o charakterze założeń wyróżniono kolorem – co pozwala je zastąpić danymi rzeczywistymi bez przebudowy modeli.

### 5.2.2. Bieżące wykorzystanie materiałowe parku dzierżawnego w latach 2025–2026

Punktem wyjścia jest struktura majątku, ponieważ waga poszczególnych grup produktowych dla łącznego wyniku spółki jest skrajnie zróżnicowana. Na koniec 36 TK 2026 trzy największe grupy – „Deskowanie ramowe TRIO” (23,4%), „PERI UP” (16,9%) i „Podpory stropowe PEP i MP” (10,3%) – stanowiły łącznie 50,5% majątku (elementy używane i nowe), a pięć największych, wraz z „Deskowaniem ramowym DOMINO” (7,9%) oraz „Zastawkami podciągów i paletami” (5,9%) – 64,2%. Kolejne grupy mają udziały od 4,6% („Deskowanie stropowe Skydeck”) do poniżej 1%. Wykorzystanie samego systemu TRIO ma zatem dla wskaźnika łącznego większe znaczenie niż wykorzystanie kilkunastu najmniejszych grup razem wziętych.

Łączne wykorzystanie parku (wiersz „Wszystkie grupy”) wahało się w okresie obserwacji od 54,2% (3 TK 2026) do 66,8% (35 TK 2025), przy średniej 59,1%, medianie 58,4% i odchyleniu standardowym 3,5 p.p. (rys. 5.15). Przebieg wskaźnika ma wyraźnie sezonowy charakter: poziom najwyższy przypadał na koniec sezonu budowlanego 2025 r., od 40 TK 2025 następował systematyczny spadek do minimum na przełomie roku, a następnie stopniowa odbudowa wiosną 2026 r. (do 60,5% w 12 TK 2026), ponowne osłabienie w drugim kwartale i wzrost pod koniec lata do 59,8% w 36 TK 2026. Kluczowa obserwacja jest następująca: próg 60% został osiągnięty lub przekroczony jedynie w 18 z 51 tygodni (35%) – wyłącznie od 35 do 49 TK 2025 oraz w trzech tygodniach wiosny 2026 r. (11–13 TK). Średnia dla podokresu 2025 wyniosła 62,7%, a dla podokresu 2026 – 57,3%, co wskazuje na pogorszenie wykraczające poza sezonowość; w ujęciu rok do roku (35 TK 2025 wobec 36 TK 2026) wykorzystanie łączne spadło o 7,0 p.p. Cel 75% nie został osiągnięty dla całego parku w żadnym tygodniu – luka do celu wynosi 15,2 p.p. względem stanu bieżącego i 15,9 p.p. względem średniej rocznej.




*Rys. 5.15. Łączne wykorzystanie parku dzierżawnego PERI Polska (wszystkie grupy) w ujęciu tygodniowym, 35 TK 2025 – 36 TK 2026*

*Źródło: opracowanie własne.*

Statystyki opisowe łącznego wykorzystania parku w całym okresie obserwacji oraz w podokresach zestawiono w tabeli 5.17.

*Tabela 5.17. Statystyki opisowe łącznego wykorzystania parku dzierżawnego PERI Polska („Wszystkie grupy"), 35 TK 2025 – 36 TK 2026*

| Miara | Wartość | Miara | Wartość |
|---|---|---|---|
| Liczba obserwacji tygodniowych | 51 | Odchylenie standardowe | 3,5 p.p. |
| Wykorzystanie w 35 TK 2025 | 66,8% | Średnia 2025 (35–51 TK) | 62,7% |
| Wykorzystanie w 36 TK 2026 | 59,8% | Średnia 2026 (2–36 TK) | 57,3% |
| Zmiana 35 TK 2025 → 36 TK 2026 | -7,0 p.p. | Liczba tygodni ≥ 60% | 18 z 51 |
| Średnia | 59,1% | Liczba tygodni ≥ 75% | 0 z 51 |
| Mediana | 58,4% | Luka do celu 75% (36 TK 2026) | 15,2 p.p. |
| Minimum (3 TK 2026) / maksimum (35 TK 2025) | 54,2% / 66,8% | Luka do celu 75% (średnia) | 15,9 p.p. |

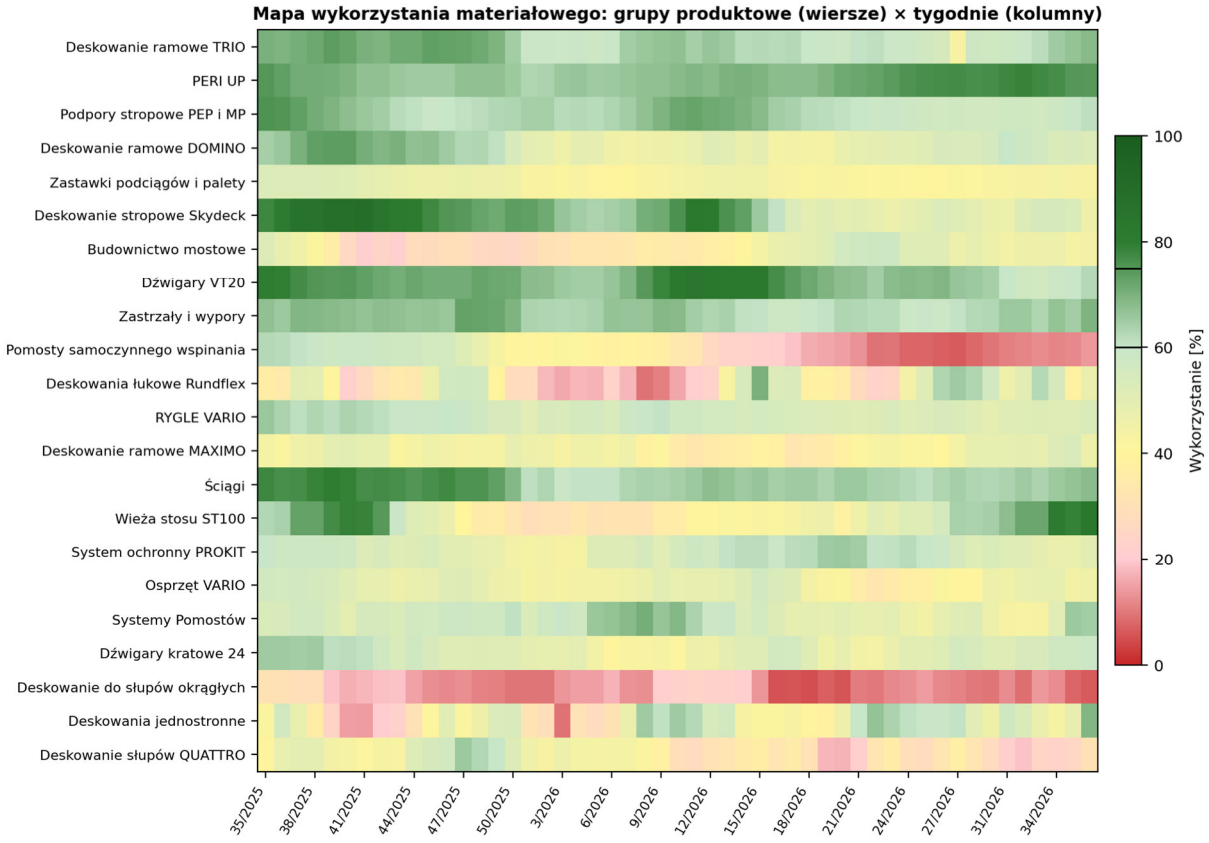
*Źródło: opracowanie własne.*

Statystyki opisowe dla 22 grup, uszeregowanych malejąco według udziału w majątku, zestawiono w tabeli 5.18, a przebieg wskaźnika w układzie grupa × tydzień przedstawia mapa wykorzystania na rys. 5.16, a średnie wykorzystanie i stan bieżący na tle progów – rys. 5.17. Wartości w ostatnim tygodniu oznaczono kolorem zgodnie z konwencją raportów PERI.

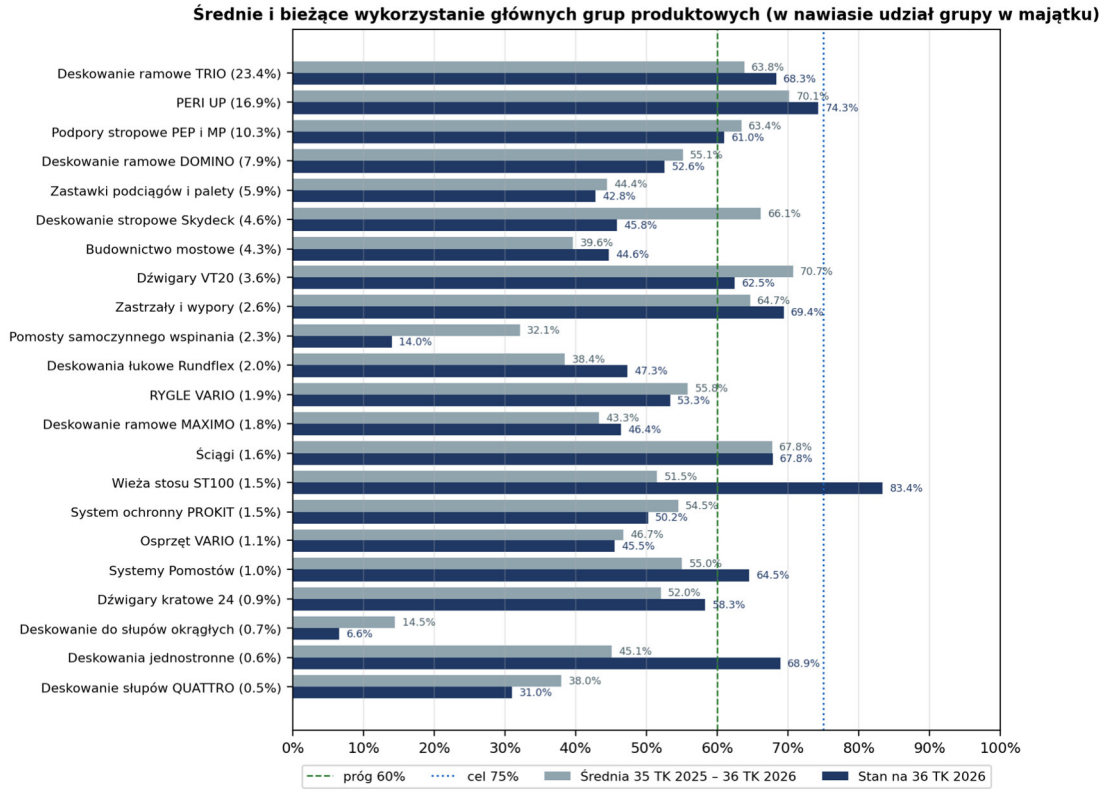
*Tabela 5.18. Statystyki opisowe wykorzystania materiałowego głównych grup produktowych PERI Polska, 35 TK 2025 – 36 TK 2026 (51 tygodni; U+N – elementy używane i nowe; kolor w kolumnie 36 TK 2026: ciemnozielony ≥ 75%, zielony 60–75%, czerwony < 60%)*

| Grupa produktowa | Udział w majątku (U+N) | 35 TK 2025 | 36 TK 2026 | Zmiana [p.p.] | Średnia | Min. | Maks. | Odch. std. [p.p.] | Tyg. ≥ 60% | Tyg. ≥ 75% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Deskowanie ramowe TRIO | 23,4% | 70,2% | 68,3% | -1,9 | 63,8% | 42,6% | 73,7% | 6,2 | 34 | 0 |
| PERI UP | 16,9% | 75,0% | 74,3% | -0,7 | 70,1% | 63,2% | 78,6% | 4,4 | 51 | 10 |
| Podpory stropowe PEP i MP | 10,3% | 75,6% | 61,0% | -14,6 | 63,4% | 56,0% | 75,6% | 5,4 | 36 | 2 |
| Deskowanie ramowe DOMINO | 7,9% | 64,4% | 52,6% | -11,9 | 55,1% | 43,1% | 73,7% | 9,2 | 15 | 0 |
| Zastawki podciągów i palety | 5,9% | 52,8% | 42,8% | -10,1 | 44,4% | 39,2% | 52,8% | 3,8 | 0 | 0 |
| Deskowanie stropowe Skydeck | 4,6% | 78,1% | 45,8% | -32,3 | 66,1% | 45,8% | 89,1% | 13,9 | 32 | 16 |
| Budownictwo mostowe | 4,3% | 52,5% | 44,6% | -7,8 | 39,6% | 21,0% | 57,7% | 10,5 | 0 | 0 |
| Dźwigary VT20 | 3,6% | 80,0% | 62,5% | -17,6 | 70,7% | 56,5% | 83,8% | 7,0 | 47 | 12 |
| Zastrzały i wypory | 2,6% | 67,0% | 69,4% | +2,4 | 64,7% | 57,5% | 72,8% | 3,7 | 45 | 0 |
| Pomosty samoczynnego wspinania | 2,3% | 62,3% | 14,0% | -48,2 | 32,1% | 6,5% | 62,3% | 19,2 | 3 | 0 |
| Deskowania łukowe Rundflex | 2,0% | 36,7% | 47,3% | +10,6 | 38,4% | 9,2% | 70,1% | 16,2 | 5 | 0 |
| RYGLE VARIO | 1,9% | 65,7% | 53,3% | -12,4 | 55,8% | 49,6% | 65,7% | 4,1 | 10 | 0 |
| Deskowanie ramowe MAXIMO | 1,8% | 43,9% | 46,4% | +2,5 | 43,3% | 32,8% | 53,7% | 5,1 | 0 | 0 |
| Ściągi | 1,6% | 77,9% | 67,8% | -10,1 | 67,8% | 59,3% | 80,0% | 6,3 | 50 | 14 |
| Wieża stosu ST100 | 1,5% | 62,7% | 83,4% | +20,6 | 51,5% | 29,4% | 83,4% | 16,7 | 17 | 6 |
| System ochronny PROKIT | 1,5% | 59,5% | 50,2% | -9,3 | 54,5% | 42,9% | 65,3% | 5,9 | 12 | 0 |
| Osprzęt VARIO | 1,1% | 56,4% | 45,5% | -10,9 | 46,7% | 33,1% | 56,5% | 5,6 | 0 | 0 |
| Systemy Pomostów | 1,0% | 53,2% | 64,5% | +11,3 | 55,0% | 42,3% | 70,4% | 6,9 | 10 | 0 |
| Dźwigary kratowe 24 | 0,9% | 65,0% | 58,3% | -6,7 | 52,0% | 40,4% | 65,2% | 6,4 | 7 | 0 |
| Deskowanie do słupów okrągłych | 0,7% | 31,1% | 6,6% | -24,6 | 14,5% | 4,9% | 31,1% | 6,6 | 0 | 0 |
| Deskowania jednostronne | 0,6% | 41,1% | 68,9% | +27,8 | 45,1% | 9,2% | 68,9% | 14,8 | 9 | 0 |
| Deskowanie słupów QUATTRO | 0,5% | 40,5% | 31,0% | -9,5 | 38,0% | 17,1% | 65,4% | 11,7 | 2 | 0 |
| **Wszystkie grupy** | **100%** | **66,8%** | **59,8%** | **-7,0** | **59,1%** | **54,2%** | **66,8%** | **3,5** | **18** | **0** |

*Źródło: opracowanie własne.*



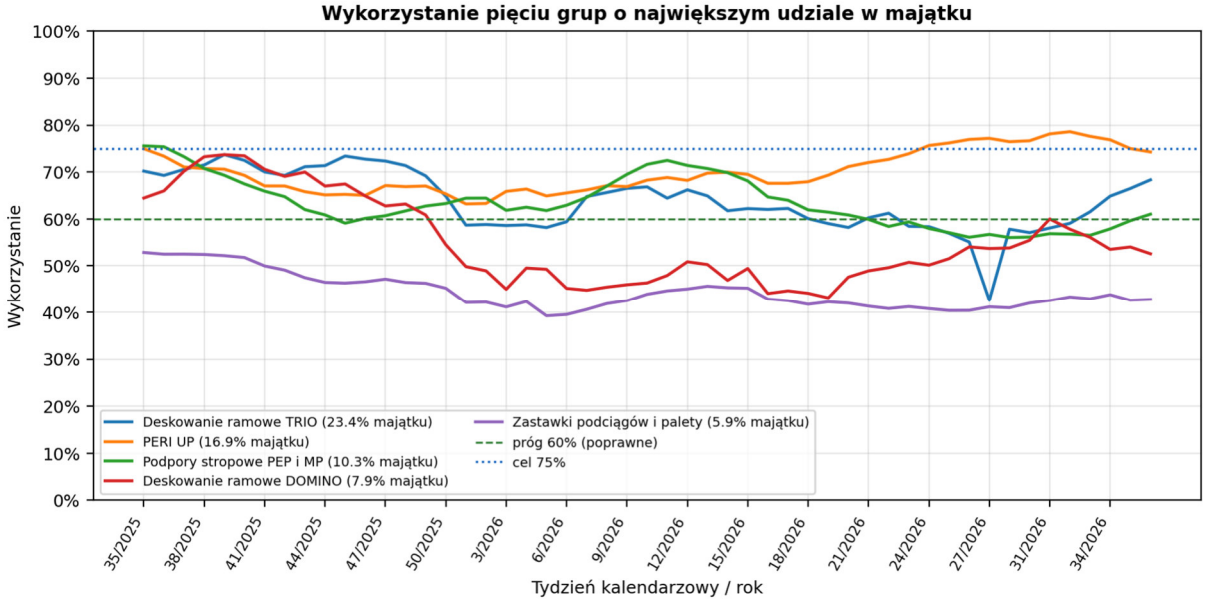

*Rys. 5.16. Mapa wykorzystania materiałowego: grupy produktowe (wiersze, malejąco według udziału w majątku) × tygodnie kalendarzowe (kolumny); czarne linie na skali oznaczają próg 60% i cel 75%. Źródło: opracowanie własne.*




*Rys. 5.17. Średnie wykorzystanie w okresie obserwacji oraz stan na 36 TK 2026 w głównych grupach produktowych (w nawiasie udział grupy w majątku). Źródło: opracowanie własne.*

Z tabeli 5.18 oraz rys. 5.16 i 5.17 wynikają cztery istotne prawidłowości. Po pierwsze, tylko jedna grupa – „PERI UP” – utrzymała wykorzystanie ≥ 60% we wszystkich 51 tygodniach (średnia 70,1%, minimum 63,2%), a cel 75% osiągała w 10 tygodniach. Po drugie, pięć grup ani razu nie osiągnęło progu 60%: „Zastawki podciągów i palety” (maksimum 52,8%), „Budownictwo mostowe” (57,7%), „Deskowanie ramowe MAXIMO” (53,7%), „Osprzęt VARIO” (56,5%) oraz „Deskowanie do słupów okrągłych” (31,1%); grupy te reprezentują łącznie 13,7% majątku. Po trzecie, średnie wykorzystanie w okresie obserwacji przekroczyło 60% jedynie w siedmiu grupach (TRIO, PERI UP, PEP i MP, Skydeck, dźwigary VT20, zastrzały i wypory oraz ściągi), które reprezentują 62,8% majątku. Po czwarte, zmienność wskaźnika w czasie jest bardzo zróżnicowana: dla dużych, uniwersalnych systemów (TRIO, PERI UP, PEP i MP, palety, zastrzały) odchylenie standardowe wynosi 3,7–6,2 p.p., natomiast dla systemów specjalistycznych o małym udziale w majątku („Deskowania jednostronne”, „Deskowania łukowe Rundflex”, „Wieża stosu ST100”, „Pomosty samoczynnego wspinania”) sięga 14,8–19,2 p.p. Jest to zjawisko naturalne – wykorzystanie systemów specjalistycznych zależy od pojedynczych, dużych kontraktów (np. jednego obiektu mostowego lub wysokiego budynku), podczas gdy systemy uniwersalne obsługują jednocześnie dziesiątki budów i ich wskaźnik jest statystycznie „wygładzony”. Z punktu widzenia zarządzania oznacza to jednak, że w grupach specjalistycznych decyzje o wielkości parku i zakupach są obarczone znacznie większym ryzykiem.

Przebieg pięciu grup o największym udziale w majątku, decydujących o wyniku całego parku, przedstawia rys. 5.18. Deskowanie ramowe TRIO utrzymywało w 2025 r. wykorzystanie w przedziale 64–74% (średnia 70,1%, maksimum 73,7% w 39 TK 2025), po czym w 2026 r. spadło do minimum 42,6% (27 TK 2026) i przez znaczną część roku pozostawało poniżej progu (średnia 2026: 60,7%). Na koniec okresu wskaźnik wynosił 68,3% – powyżej progu, lecz 6,7 p.p. poniżej celu, którego grupa nie osiągnęła ani razu. PERI UP jest najlepiej wykorzystywaną dużą grupą i jedyną spośród pięciu największych, której średnia w 2026 r. (71,2%) przewyższyła średnią z 2025 r. (67,9%); na koniec okresu (74,3%) dzieliło ją od celu zaledwie 0,7 p.p. Wykorzystanie podpór stropowych PEP i MP spadło z 75,6% do minimum 56,0% (29 TK 2026), a na koniec okresu wynosiło 61,0%; spadek o 14,6 p.p. jest – ze względu na wielkość grupy – jednym z najbardziej dotkliwych dla wyniku spółki. Wykorzystanie deskowania DOMINO pogorszyło się najsilniej spośród dużych systemów ramowych: z 64,4% do 52,6% (−11,9 p.p.), przy średniej 2026 r. (49,7%) niższej o 16,2 p.p. od średniej 2025 r. (65,9%); próg 60% osiągano wyłącznie w 2025 r. Zastawki podciągów i palety są grupą strukturalnie niedostatecznie wykorzystaną (średnia 44,4%, stan bieżący 42,8%), co w dużej mierze wynika z natury nośników logistycznych, których część zawsze musi pozostawać w magazynie – niemniej wartość ta wskazuje na potencjał redukcji parku nośników.




*Rys. 5.18. Wykorzystanie pięciu grup produktowych o największym udziale w majątku PERI Polska, 35 TK 2025 – 36 TK 2026. Źródło: opracowanie własne.*

Wśród pozostałych 17 grup zwracają uwagę przypadki skrajne. Deskowanie stropowe Skydeck (4,6% majątku) było w 2025 r. jedną z najlepiej wykorzystanych grup (średnia 80,2%, maksimum 89,1% w 41 TK 2025, cel osiągnięty w 16 tygodniach), lecz od 17 TK 2026 utrzymuje się poniżej progu i na koniec

okresu osiągnęło zaledwie 45,8% – najgłębszy spadek rok do roku wśród grup o udziale w majątku powyżej 4% (−32,3 p.p.). Najbardziej niepokojący przebieg mają pomosty samoczynnego wspinania (2,3%): z 62,3% na początku okresu do 6,5% w 27 TK 2026 i 14,0% na koniec (−48,2 p.p.), przy czym od 13 TK 2026 wykorzystanie nie przekraczało 25%. Deskowanie do słupów okrągłych (0,7%) ma najniższe wykorzystanie w całym parku (średnia 14,5%, na koniec 6,6%) i stanowi modelowy przykład asortymentu, dla którego należałoby rozważyć redukcję parku lub zmianę modelu obsługi. Budownictwo mostowe (4,3%) poprawiło wprawdzie średnią z 31,4% w 2025 r. do 43,7% w 2026 r., lecz w żadnym tygodniu nie osiągnęło progu. Stabilnie powyżej progu utrzymywały się natomiast ściągi (50 z 51 tygodni, średnia 67,8%) oraz zastrzały i wypory (45 tygodni, odchylenie standardowe zaledwie 3,7 p.p.), a dźwigary VT20 osiągały cel w 12 tygodniach (maksimum 83,8% w 11 TK 2026). Wzrosty odnotowane na koniec okresu w grupach „Wieża stosu ST100” (83,4% – jedyna grupa powyżej celu, przy średniej 51,5%), „Deskowania jednostronne” (+27,8 p.p.) i „Systemy Pomostów” (+11,3 p.p.) wynikają z aktualnie realizowanych kontraktów, a nie ze stabilnego trendu.

Syntetyczną ocenę parku względem progu 60% i celu 75% zawiera tabela 5.19. Na początku okresu próg osiągało 12 z 22 grup, reprezentujących 75,6% majątku, a cel – cztery grupy. Na koniec okresu próg osiągało już tylko 9 grup (61,3% majątku), a cel – jedna („Wieża stosu ST100”, 1,5% majątku). Innymi słowy, ponad jedna trzecia majątku parku dzierżawnego (35,2%) znajduje się w grupach o wykorzystaniu uznawanym w PERI Polska za zbyt niskie, a niemal cały majątek – w grupach nieosiągających celu strategicznego.

*Tabela 5.19. Liczba grup produktowych i udział w majątku według klasy wykorzystania – porównanie początku i końca okresu obserwacji (udział liczony dla elementów używanych i nowych; pozostała część majątku przypada na grupy bez wskaźnika wykorzystania)*

| Klasa wykorzystania | Liczba grup – 35 TK 2025 | Udział w majątku – 35 TK 2025 | Liczba grup – 36 TK 2026 | Udział w majątku – 36 TK 2026 |
|---|---|---|---|---|
| ≥ 75% (cel osiągnięty) | 4 | 20,4% | 1 | 1,5% |
| 60–75% (poprawne) | 8 | 55,1% | 8 | 59,9% |
| < 60% (za niskie) | 10 | 20,8% | 13 | 35,2% |
| **Razem (grupy ze wskaźnikiem)** | **22** | **96,4%** | **22** | **96,5%** |

*Źródło: opracowanie własne.*

Spośród 13 grup poniżej progu w 36 TK 2026 w ujęciu wagowym najważniejsze dla poprawy wyniku spółki są DOMINO (52,6%), zastawki podciągów i palety (42,8%), Skydeck (45,8%) i budownictwo mostowe (44,6%), reprezentujące łącznie 22,6% majątku. Jednocześnie luka do celu w największej grupie TRIO (6,7 p.p. przy 23,4% udziału w majątku) ma dla wskaźnika łącznego wagę porównywalną z luką w kilku mniejszych grupach razem wziętych. Analiza wykorzystania prowadzi więc do trzech wniosków cząstkowych. Łączne wykorzystanie parku (średnio 59,1%) pozostaje na granicy progu poprawności i 15–16 p.p. poniżej celu, a spadek średniej z 62,7% do 57,3% wskazuje na pogorszenie wykraczające poza sezonowość. Wynik jest zdominowany przez trzy grupy obejmujące połowę majątku, z których tylko PERI UP utrzymuje się trwale powyżej progu, TRIO i PEP i MP oscylują wokół niego, a DOMINO od początku 2026 r. pozostaje poniżej. Pięć grup (13,7% majątku), które nie osiągnęły progu w żadnym tygodniu, to kandydaci do decyzji o redukcji parku, zmianie polityki zakupowej lub aktywnej sprzedaży nadwyżek, a wysoka zmienność grup specjalistycznych potwierdza, że planowanie materiałowe jest w nich szczególnie wrażliwe na przesunięcia pojedynczych kontraktów – co bezpośrednio łączy się z problematyką terminów wydań i zwrotów.

### 5.2.3. Terminowość wydań materiału i luka pomiarowa w zakresie terminów zwrotów

Drugim mierzalnym ogniwem przepływu są odchylenia terminów wydań (dostaw) materiału względem terminów żądanych przez Klientów. Analizowane 2353 pozycje (2190 unikatowych numerów podzleceń) dotyczyły 409 Klientów, a daty żądane przez Klientów mieściły się w przedziale od 13.03.2026 do

01.09.2026. Średnie odchylenie jest bliskie zeru (−0,08 dnia), mediana wynosi 0, a średnia wartość bezwzględna odchylenia – 1,38 dnia. Rozkład jest jednak wyraźnie „gruboogonowy": odchylenie standardowe wynosi 3,27 dnia, a skrajne wartości sięgają −40 dni (największe opóźnienie) i +35 dni (największe przyspieszenie). Podstawowe statystyki odchyleń zestawiono w tabeli 5.20.

*Tabela 5.20. Statystyki opisowe odchyleń terminów wydań materiału (n = 2353)*

| Miara | Wartość | Miara | Wartość |
|---|---|---|---|
| Liczba pozycji (podzleceń wydań) | 2353 | Pozycje zgodne z terminem (0 dni) | 1201 (51,0%) |
| Liczba Klientów | 409 | Pozycje opóźnione (< 0 dni) | 469 (19,9%) |
| Średnie odchylenie | -0,08 dnia | Pozycje wydane wcześniej (> 0 dni) | 683 (29,0%) |
| Mediana odchylenia | 0 dni | Pozycje w przedziale ±1 dnia | 1837 (78,1%) |
| Odchylenie standardowe | 3,27 dnia | Pozycje w przedziale ±3 dni | 2121 (90,1%) |
| Średnia wartość bezwzględna odchylenia | 1,38 dnia | Pozycje opóźnione o 8 dni i więcej | 49 (2,1%) |
| Największe opóźnienie | -40 dni | Śr. opóźnienie wśród opóźnionych | -3,64 dnia |
| Największe przyspieszenie | +35 dni | Śr. przyspieszenie wśród wcześniejszych | +2,24 dnia |

*Źródło: opracowanie własne.*

W przedziale ±1 dnia mieści się 78,1% pozycji, a w przedziale ±3 dni – 90,1%, co ilustruje rozkład klas odchyleń w tabeli 5.21. Nieco ponad połowa pozycji (1201; 51,0%) została wydana dokładnie w terminie żądanym przez Klienta. Wydania wcześniejsze niż żądane (683; 29,0%) są liczniejsze niż opóźnienia (469; 19,9%), przy czym dominują niewielkie przyspieszenia o 1–3 dni (616 pozycji; 26,2%), które – sądząc po dominującym w tej klasie kodzie „harmonogram uzgodniony z Klientem" – są w większości efektem obustronnie uzgodnionego przesunięcia terminu, a nie błędu planowania. Wśród opóźnień przeważają krótkie, 1–3-dniowe (304; 12,9%), natomiast opóźnienia o 8 dni i więcej dotyczą 49 pozycji (2,1%). Odchylenia są rozłożone asymetrycznie: opóźnienia występują rzadziej niż przyspieszenia, ale są większe – średnie opóźnienie wśród pozycji opóźnionych wynosi 3,64 dnia, a średnie przyspieszenie wśród pozycji wcześniejszych 2,24 dnia. Każde z 49 długich opóźnień (sięgających 40 dni) oznacza z punktu widzenia harmonogramu budowy przesunięcie montażu deskowania i potencjalne przestoje brygad.

*Tabela 5.21. Rozkład wielkości odchylenia terminu wydania materiału względem daty żądanej przez Klienta (n = 2353)*

| Klasa odchylenia | Liczba pozycji | Udział | Udział skumulowany |
|---|---|---|---|
| ≤ −8 dni (opóźnienie) | 49 | 2,1% | 2,1% |
| −7 … −4 dni | 116 | 4,9% | 7,0% |
| −3 … −1 dni | 304 | 12,9% | 19,9% |
| 0 dni (zgodnie z terminem żądanym) | 1201 | 51,0% | 71,0% |
| +1 … +3 dni | 616 | 26,2% | 97,2% |
| +4 … +7 dni | 44 | 1,9% | 99,0% |
| ≥ +8 dni (wydanie wcześniejsze) | 23 | 1,0% | 100,0% |

| Klasa odchylenia | Liczba pozycji | Udział | Udział skumulowany |
|---|---|---|---|
| **Razem** | **2353** | **100,0%** | **–** |

*Źródło: opracowanie własne.*

Dwa kody – „Harmonogram dostawy uzgodniony z Klientem” (1299 pozycji; 55,2%) oraz „Na czas – zgodnie z czasem realizacji (lead time)” (875; 37,2%) – obejmują łącznie 92,4% wszystkich pozycji. Są to w istocie kody „neutralne”, co potwierdza bliskie zeru średnie odchylenie w obu kategoriach (odpowiednio 0,01 i +0,20 dnia) oraz przewaga pozycji wydanych wcześniej nad opóźnionymi. Nawet w tych kategoriach występują jednak skrajne odchylenia (od −40 do +31 dni), a łącznie 365 pozycji jest opóźnionych, średnio o ok. 3,4 dnia. Właściwe przyczyny odchyleń, wskazujące na konkretny problem, dotyczą pozostałych 179 pozycji (7,6%). Najczęstsze są wśród nich: „Zbyt krótki czas realizacji (lead time)” (49 pozycji – zamówienie złożone z wyprzedzeniem krótszym niż standardowy czas realizacji; 33 z nich to opóźnienia), „Nie ustalono przyczyny odchylenia” (39) oraz brak wpisu (36, z czego aż 30 to opóźnienia – średnio o 3,9 dnia). Przyczyny leżące po stronie PERI obejmują łącznie 52 pozycje (2,2%), w tym najczęściej „Artykuł niedostępny (brak na stanie)” (26 pozycji; średnie opóźnienie wśród opóźnionych 5,7 dnia) i „Niewykonane wewnętrzne przesunięcia magazynowe” (13), a także opóźnione zamówienia zakupu, konieczność zamiennika, zbyt małą zdolność kompletacji i załadunku, błąd handlowy, zbyt długi czas produkcji lub zaopatrzenia oraz zamknięcie magazynu. Opóźnienia transportowe są marginalne (2 pozycje, obie bez odchylenia). Szczegółową strukturę powodów zapisanych w systemie przedstawia tabela 5.22, a zestawienie według kategorii przyczyn – tabela 5.23.

*Tabela 5.22. Struktura powodów odchyleń terminów wydań materiału zapisanych w systemie PERI (tłumaczenie kodów – opracowanie własne)*

| Powód odchylenia (tłumaczenie kodu systemowego) | Liczba pozycji | Udział | Śr. odchylenie [dni] | Opóźnione (< 0) | Wcześniejsze (> 0) | Zgodne (= 0) | Śr. opóźnienie wśród opóźnionych [dni] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Harmonogram dostawy uzgodniony z Klientem | 1299 | 55,2% | 0,01 | 228 | 385 | 686 | -3,57 |
| Na czas – zgodnie z czasem realizacji (lead time) | 875 | 37,2% | 0,20 | 137 | 276 | 462 | -3,21 |
| Zbyt krótki czas realizacji (lead time) | 49 | 2,1% | -1,84 | 33 | 6 | 10 | -3,88 |
| Nie ustalono przyczyny odchylenia | 39 | 1,7% | -0,92 | 10 | 5 | 24 | -4,50 |
| Brak wpisu (powód nieuzupełniony) | 36 | 1,5% | -2,81 | 30 | 6 | 0 | -3,90 |
| Artykuł niedostępny (brak na stanie) | 26 | 1,1% | -2,58 | 15 | 2 | 9 | -5,73 |
| Niewykonane wewnętrzne przesunięcia magazynowe | 13 | 0,6% | -2,92 | 8 | 0 | 5 | -4,75 |
| Opóźnione zamówienie zakupu | 4 | 0,2% | -3,25 | 3 | 1 | 0 | -5,33 |
| Konieczny zamiennik / wymiana artykułu | 3 | 0,1% | 0,33 | 2 | 1 | 0 | -1,00 |
| Zbyt mała zdolność kompletacji / załadunku | 2 | 0,1% | -6,00 | 1 | 0 | 1 | -12,00 |
| Błąd handlowy | 2 | 0,1% | 0,00 | 0 | 0 | 2 | – |
| Opóźnienie transportu (samochodu) | 2 | 0,1% | 0,00 | 0 | 0 | 2 | – |
| Magazyn zamknięty | 1 | 0,0% | -5,00 | 1 | 0 | 0 | -5,00 |
| Odchylenie nieistotne | 1 | 0,0% | 1,00 | 0 | 1 | 0 | – |

| Powód odchylenia (tłumaczenie kodu systemowego) | Liczba pozycji | Udział | Śr. odchylenie [dni] | Opóźnione (< 0) | Wcześniejsze (> 0) | Zgodne (= 0) | Śr. opóźnienie wśród opóźnionych [dni] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zbyt długi czas produkcji lub zaopatrzenia | 1 | 0,0% | -5,00 | 1 | 0 | 0 | -5,00 |
| **Razem** | **2353** | **100,0%** | **-0,08** | **469** | **683** | **1201** | **-3,64** |

*Źródło: opracowanie własne.*

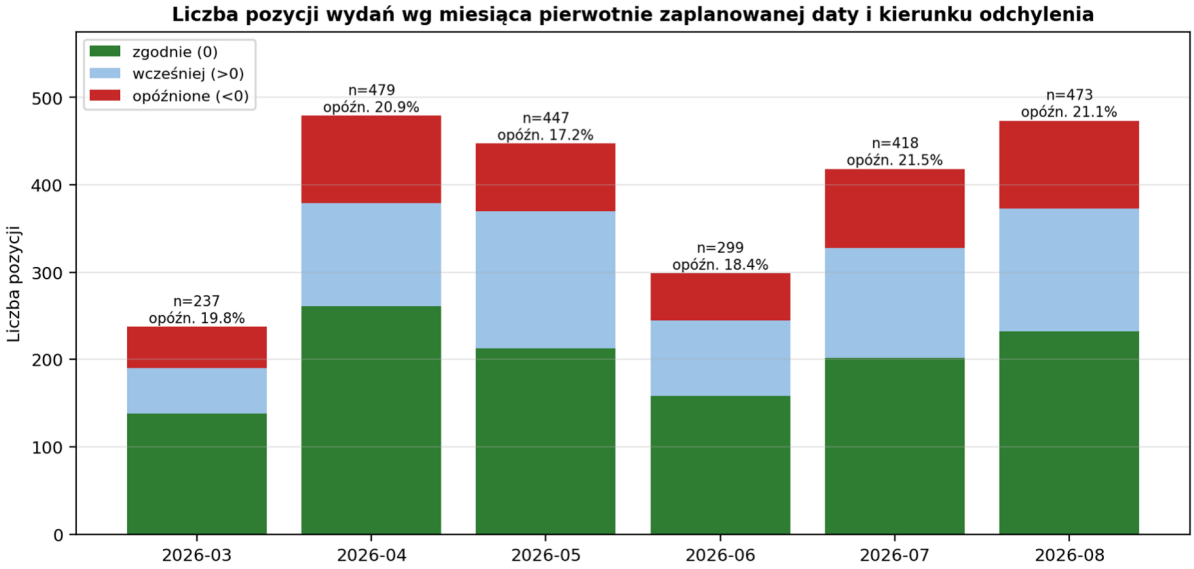
*Tabela 5.23. Kategorie przyczyn odchyleń terminów wydań materiału (klasyfikacja własna kodów zapisanych w systemie PERI)*

| Kategoria przyczyny | Liczba pozycji | Udział | Śr. odchylenie [dni] | Liczba opóźnionych (< 0) | Udział opóźnionych w kategorii |
|---|---|---|---|---|---|
| Uzgodnienie z Klientem | 1299 | 55,2% | 0,01 | 228 | 17,6% |
| Zgodnie z czasem realizacji (lead time) | 875 | 37,2% | 0,20 | 137 | 15,7% |
| Nieustalone / brak wpisu | 76 | 3,2% | -1,79 | 40 | 52,6% |
| Przyczyny wewnętrzne PERI (magazyn, zaopatrzenie, handel) | 52 | 2,2% | -2,67 | 31 | 59,6% |
| Zamówienie Klienta poniżej lead time | 49 | 2,1% | -1,84 | 33 | 67,3% |
| Transport | 2 | 0,1% | 0,00 | 0 | 0,0% |
| **Razem** | **2353** | **100,0%** | **-0,08** | **469** | **19,9%** |

*Źródło: opracowanie własne.*

Z tabeli 5.23 wynika istotny wniosek diagnostyczny. O ile w kategoriach „neutralnych” opóźnionych jest 16–18% pozycji, o tyle w kategoriach wskazujących na problem udział opóźnień jest kilkukrotnie wyższy – 67% dla zamówień poniżej lead time, 60% dla przyczyn wewnętrznych PERI i 53% dla pozycji nieustalonych lub bez wpisu. Ta ostatnia kategoria (76 pozycji; 3,2%) zasługuje na szczególną uwagę, ponieważ mimo braku przyczyny charakteryzuje się średnim odchyleniem −1,79 dnia; system ewidencji powodów jest więc niekompletny właśnie tam, gdzie informacja byłaby najbardziej potrzebna. Rzeczywista diagnostyka przyczyn jest możliwa tylko dla ok. 4,4% pozycji. Przyczyny wewnętrzne PERI stanowią zaledwie 2,2% pozycji, lecz generują opóźnienia w 60% przypadków; są to odchylenia najbardziej podatne na działania usprawniające i zarazem bezpośrednio powiązane z dostępnością materiału, a więc z jego wykorzystaniem.

Rozkład pozycji według miesiąca pierwotnie zaplanowanej daty wydania (rys. 5.19) odzwierciedla sezonowość robót żelbetowych: najwięcej wydań przypadło na kwiecień (479), sierpień (473) i maj (447), a marzec (237) obejmuje jedynie drugą połowę miesiąca. Udział pozycji opóźnionych jest w poszczególnych miesiącach stabilny i mieści się w przedziale od 17,2% (maj) do 21,5% (lipiec), a średnia wartość bezwzględna odchylenia waha się od 0,85 dnia (marzec) do 1,85 dnia (czerwiec). W analizowanym półroczu nie stwierdzono zatem ani wyraźnej poprawy, ani pogorszenia terminowości – odchylenia mają charakter strukturalny, a nie incydentalny.




*Rys. 5.19. Liczba pozycji wydań materiału według miesiąca pierwotnie zaplanowanej daty wydania i kierunku odchylenia (2026 r.). Źródło: opracowanie własne.*

Najważniejszym wnioskiem systemowym tej części analizy, wykraczającym poza same liczby, jest identyfikacja luki w systemie pomiaru. W PERI Polska – jak i w całym koncernie PERI SE – nie są prowadzone statystyki odchyleń terminów zwrotów materiału zadeklarowanych wcześniej przez Klienta; mierzony jest wyłącznie jeden koniec cyklu dzierżawy, tj. wydanie. Mechanizm jest następujący. Klient, zamawiając materiał, deklaruje okres dzierżawy – przykładowo od 1 czerwca do 31 grudnia 2026 r. Jeżeli materiał pozostaje na budowie dłużej, np. do 31 marca 2027 r., fakt ten jest odnotowywany w systemie dopiero z upływem pierwotnego terminu, zazwyczaj jako przedłużenie o kolejny miesiąc, a następnie kolejne – aż do faktycznego zwrotu. System nie rejestruje więc ani wielkości odchylenia (w przykładzie 90 dni), ani jego przyczyny, ani momentu, w którym Klient dowiedział się o konieczności przedłużenia, a który z reguły jest znacznie wcześniejszy niż zadeklarowany termin zwrotu.

Konsekwencje dla planowania materiałowego są fundamentalne, ponieważ plan dostępności opiera się na zadeklarowanych, a nie rzeczywistych terminach zwrotów. Jeżeli w styczniu 2027 r. dany asortyment jest potrzebny innemu Klientowi, a system nadal wykazuje go jako „wracający 31 grudnia", spółka musi dokupić go z fabryki; gdy po dwóch miesiącach ten sam asortyment wraca, nowo zakupione elementy zalegają na placu, obniżając wskaźnik wykorzystania. Brak jednej statystyki przekłada się zatem bezpośrednio na nadmierne zakupy, wzrost parku i spadek jego wykorzystania – w szczególności w grupach specjalistycznych o wysokiej zmienności, w których pojedynczy przedłużony kontrakt może wymusić zakup całego kompletu systemu. Mechanizm ten wyjaśnia pozorny paradoks wyników podrozdziałów 5.2.2 i 5.2.3: przy wykorzystaniu na poziomie ok. 59% park jest nominalnie większy niż bieżący popyt, co teoretycznie powinno gwarantować pełną dostępność materiału, a mimo to występują odchylenia wydań z powodu braku artykułu na stanie lub niewykonanych przesunięć międzymagazynowych. Problem nie leży więc w wielkości parku, lecz w jego strukturze i w jakości planowania: nadwyżki występują w jednych grupach (np. palety, MAXIMO, deskowanie do słupów okrągłych), a niedobory – w innych grupach lub lokalizacjach. Materiał nie przepływa – zalega tam, gdzie nie jest potrzebny i brakuje go tam, gdzie jest potrzebny. Na tym tle formułuje się postulat wprowadzenia w systemie magazynowo- logistycznym rejestru odchyleń terminów zwrotów o strukturze analogicznej do rejestru wydań: termin zwrotu zadeklarowany przez Klienta i rzeczywisty, różnica w dniach, kod przyczyny (np. przedłużenie robót, zmiana harmonogramu budowy, opóźnienie inwestora, warunki atmosferyczne, decyzja handlowa PERI) oraz – co kluczowe – data pozyskania informacji o przesunięciu. Dopiero taki rejestr pozwoli planować na podstawie prawdopodobieństwa zwrotu, a nie deklaracji.

### 5.2.4. Wydajność centrów logistycznych w latach 2017–2026 i efekty wdrożeń wspomagających pracę fizyczną – od magazynu do placu budowy

Trzecim ogniwem przepływu są centra logistyczne dostawcy, w których materiał jest przyjmowany z budów, kontrolowany ilościowo i jakościowo, czyszczony, naprawiany, kompletowany i ponownie wydawany. Oba analizowane centra wykonują ten sam zestaw procesów. Podstawową miarą ich pracy jest tonaż przeładowany w skali roku (suma przyjęć i wydań), a miarą wydajności – tonaż przypadający na jednego pracownika fizycznego (t/prac.), obliczany jako iloraz tonażu rocznego i średniorocznej liczby pracowników (tabela 5.24).

*Tabela 5.24. Tonaż roczny, średnioroczne zatrudnienie i wydajność przeładunków w CL Koninko (KO) i CL Kąty Wrocławskie (KW) w latach 2017–2026 (2026* – dane do lipca)*

| Rok | KO: tonaż [t] | KO: śr. liczba prac. | KO: wydajność [t/prac.] | KW: tonaż [t] | KW: śr. liczba prac. | KW: wydajność [t/prac.] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2017 | 48 300 | 55 | 878,2 | 45 085 | 46 | 980,1 |
| 2018 | 44 741 | 46 | 972,6 | 43 085 | 41 | 1050,9 |
| 2019 | 35 700 | 40 | 892,5 | 33 738 | 39 | 865,1 |
| 2020 | 31 673 | 36 | 879,8 | 30 897 | 34 | 908,7 |
| 2021 | 40 902 | 34 | 1203,0 | 37 986 | 35 | 1085,3 |
| 2022 | 39 396 | 37 | 1064,8 | 40 126 | 40 | 1003,2 |
| 2023 | 26 620 | 31 | 858,7 | 30 065 | 34 | 884,3 |
| 2024 | 29 909 | 28 | 1068,2 | 33 732 | 30 | 1124,4 |
| 2025 | 26 172 | 27 | 969,3 | 29 724 | 30 | 990,8 |
| 2026* | 14 039 | 25 | 561,6 | 18 732 | 29 | 645,9 |
| **Śr. 2017–2022** | **40 119** | **41,3** | **981,8** | **38 486** | **39,2** | **982,2** |
| **Śr. 2023–2025** | **27 567** | **28,7** | **965,4** | **31 174** | **31,3** | **999,8** |
| **Zmiana średnich** | **-31,3%** | **-30,6%** | **-1,7%** | **-19,0%** | **-20,0%** | **+1,8%** |

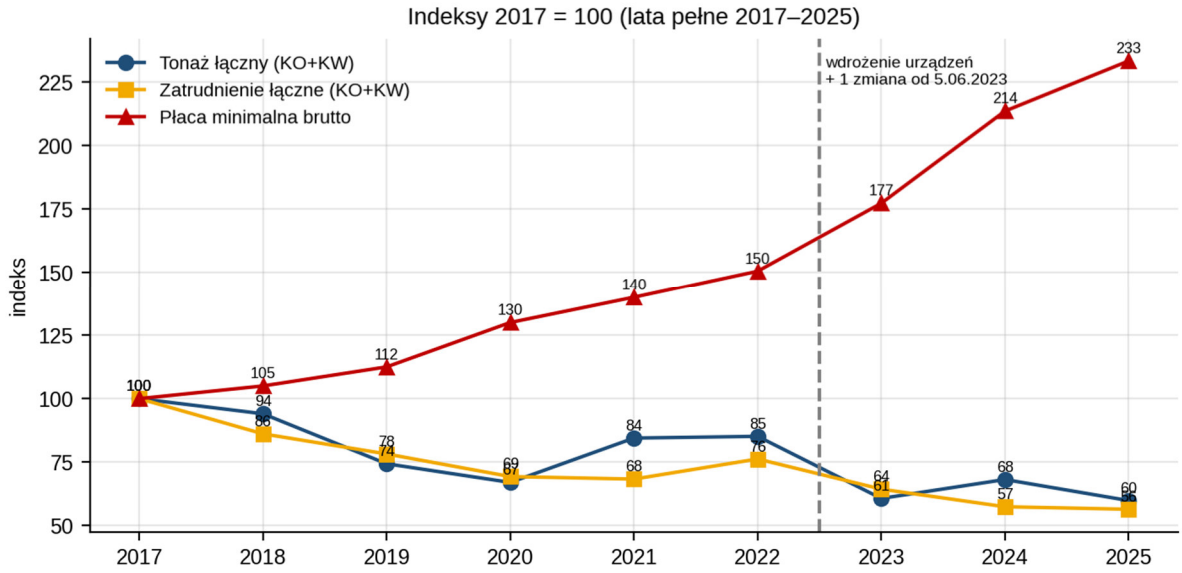
*Źródło: opracowanie własne.*

W obu centrach rok 2017 był rokiem najwyższego tonażu w całym analizowanym okresie (48 300 t w Koninku i 45 085 t w Kątach Wrocławskich) i jednocześnie najwyższego zatrudnienia (odpowiednio 55 i 46 pracowników). W latach 2018–2020 tonaż obniżał się w obu lokalizacjach – najsilniej w 2019 r. (−20% r/r w Koninku i −22% r/r w Kątach Wrocławskich) – do 31 673 t i 30 897 t w roku pandemicznym 2020. Rok 2021 przyniósł wyraźne odbicie (+29% i +23% r/r), a 2022 r. – stabilizację na poziomie ok. 39–40 tys. t w każdym z centrów. Rok 2023 stanowi wyraźną cezurę: tonaż obniżył się o 32% r/r w Koninku i o 25% r/r w Kątach Wrocławskich, a zatrudnienie – do 31 i 34 osób. Nałożyły się tu trzy zjawiska: osłabienie popytu na deskowania w segmencie kubaturowym, przejście obu centrów na pracę jednozmianową oraz wdrożenie urządzeń wspomagających pracę fizyczną. W 2024 r. tonaż wzrósł o 12% r/r w obu centrach przy dalszej redukcji zatrudnienia (do 28 i 30 osób), dzięki czemu wydajność osiągnęła 1 068 t/prac. w Koninku i 1 124 t/prac. w Kątach Wrocławskich – w Kątach Wrocławskich był to najwyższy wynik w całym okresie, a w Koninku drugi po 2021 r. W 2025 r. tonaż ponownie obniżył się o 12% r/r, a wydajność powróciła do ok. 970–990 t/prac. Dane za siedem miesięcy 2026 r. wskazują – po orientacyjnym uroczeniu proporcjonalnym – na poziom zbliżony do 2025 r. w Koninku i nieco wyższy w Kątach Wrocławskich.

Najważniejsza obserwacja wynika z porównania średnich dla okresu przed wdrożeniem urządzeń (2017–2022) i po nim (2023–2025). W Koninku średni tonaż roczny obniżył się o 31% (z 40 119 t do 27

567 t), a średnie zatrudnienie również o 31% (z 41,3 do 28,7 osoby), w rezultacie czego wydajność pozostała praktycznie niezmieniona (−1,7%). W Kątach Wrocławskich tonaż obniżył się o 19%, zatrudnienie o 20%, a wydajność wzrosła o 1,8%. Oba centra dostosowały więc zasób pracy do malejącego wolumenu proporcjonalnie – nie tracąc wydajności mimo przejścia na jedną zmianę, mimo mniejszej skali pozwalającej „rozłożyć" prace stałe (utrzymanie placu, inwentaryzacje, naprawy) na duży tonaż oraz mimo rosnącego udziału prac naprawczych i kompletacyjnych w strukturze pracy.

Dynamikę przeładunków należy odczytywać na tle koniunktury, ponieważ centrum logistyczne dostawcy deskowań jest ogniwem popytowo zależnym: tonaż odzwierciedla – z opóźnieniem wynikającym z cyklu wynajmu – liczbę i wielkość realizowanych konstrukcji żelbetowych. Spadek w latach 2018–2020 pokrywa się ze schłodzeniem rynku po szczycie 2017–2018 i z ograniczeniami pandemicznymi, odbicie 2021 r. – z odłożonym popytem, a stabilizacja 2022 r. – z szokiem kosztowym opisanym w podrozdziale 5.3. Według GUS produkcja budowlano-montażowa w okresie styczeń–październik 2024 r. była o 12,2% niższa niż przed rokiem, a w grudniu 2024 r. – o 8,0%. W 2025 r. sytuacja zaczęła się poprawiać (grudzień 2025 r.: +4,5% r/r), jednak liczba mieszkań, których budowę rozpoczęto w 2025 r., była o 9,2% niższa niż przed rokiem; obniżenie tonażu w 2025 r. jest więc spójne z opóźnionym efektem spadku liczby rozpoczynanych inwestycji. Rysunek 5.20 zestawia w formie indeksów (2017 = 100) łączny tonaż obu centrów, łączne zatrudnienie oraz płacę minimalną brutto, przyjętą jako publicznie dostępny indeks kosztu pracy. W 2025 r. łączny tonaż stanowił 59,9%, a łączne zatrudnienie 56,4% poziomu z 2017 r., podczas gdy płaca minimalna wzrosła do 233,3% (z 2000 zł do 4666 zł miesięcznie; w 2026 r. – 4806 zł). Rozwarcie tych nożyc jest istotą problemu kosztowego analizowanego w podrozdziale 5.3: przy malejącym wolumenie i ponaddwukrotnie wyższym koszcie jednostkowym pracy każdy etat, którego udało się uniknąć bez utraty przepustowości, ma wielokrotnie większą wartość ekonomiczną niż w 2017 r.




*Rys. 5.20. Indeksy (2017 = 100) łącznego tonażu i łącznego zatrudnienia w CL Koninko i CL Kąty Wrocławskie oraz płacy minimalnej brutto w Polsce w latach 2017–2025*

*Źródło: opracowanie własne.*

W 2023 r. w obu centrach wdrożono – niezależnie od siebie – rozwiązania wspomagające pracę fizyczną, które można zaliczyć do narzędzi paradygmatu Industry 5.0: technika ma wspierać człowieka, a nie go zastępować. W CL Kąty Wrocławskie pracownicy fizyczni zostali wyposażeni w aktywne egzoszkielety German Bionic Cray X (Fot. 5.5a), wspomagające odcinek lędźwiowy kręgosłupa przy podnoszeniu i przenoszeniu ładunków. Według producenta urządzenie zapewnia wsparcie do 30 kg na jeden ruch podnoszenia, w piątej generacji posiada aktywne wspomaganie chodu, klasę ochrony IP54 oraz łączność z platformą chmurową German Bionic IO, umożliwiającą monitorowanie parametrów ergonomicznych pracy. W artykule (Majkowski Ł., Pasławski J., 2023) podano, że po ponad dwóch latach użytkowania egzoszkieletów zaobserwowano wzrost wydajności o 47%; na podstawie zaktualizowanych obserwacji obejmujących dłuższy okres przyjęto w analizie ostrożniejszą wartość

45%, co nie zmienia jakościowo wniosków. W CL Koninko pracownicy otrzymali dźwig obsługi ręcznej (ergonomiczny podnośnik) systemu Binar Handling (Fot. 5.5b), złożony z ramienia manipulatora lub systemu suwnicowego Quick-Lift oraz uchwytu sterującego, który przekształca ruch ręki operatora w sygnał elektryczny i pozwala płynnie podnosić lub opuszczać ładunki o masie – zależnie od wykonania – 50, 100, 200 lub 300 kg przy minimalnej sile operatora. Urządzenie jest szczególnie użyteczne przy ciężkich elementach o powtarzalnej geometrii (płyty deskowań ramowych, dźwigary, podpory, palety z akcesoriami), tj. tam, gdzie wcześniej praca odbywała się w dwie osoby lub z użyciem wózka widłowego; według obserwacji operacyjnych wydajność prac wykonywanych z jego użyciem wzrosła o 30%. Oba wdrożenia różnią się charakterem: egzoszkielet towarzyszy pracownikowi przez całą zmianę we wszystkich czynnościach wymagających podnoszenia, a dźwig jest urządzeniem stanowiskowym, którego efekt dotyczy czynności wykonywanych w jego zasięgu – dlatego udział czasu pracy objęty wsparciem (s) należy w praktyce kalibrować odrębnie dla każdego centrum.



*Fot. 5.5. Urządzenia wspomagające pracę fizyczną wdrożone w 2023 r.: a) egzoszkielet aktywny German Bionic Cray X w CL Kąty Wrocławskie, b) dźwig obsługi ręcznej systemu Binar Handling w CL Koninko. Źródło: Archiwum PERI Polska Sp. z o.o.*

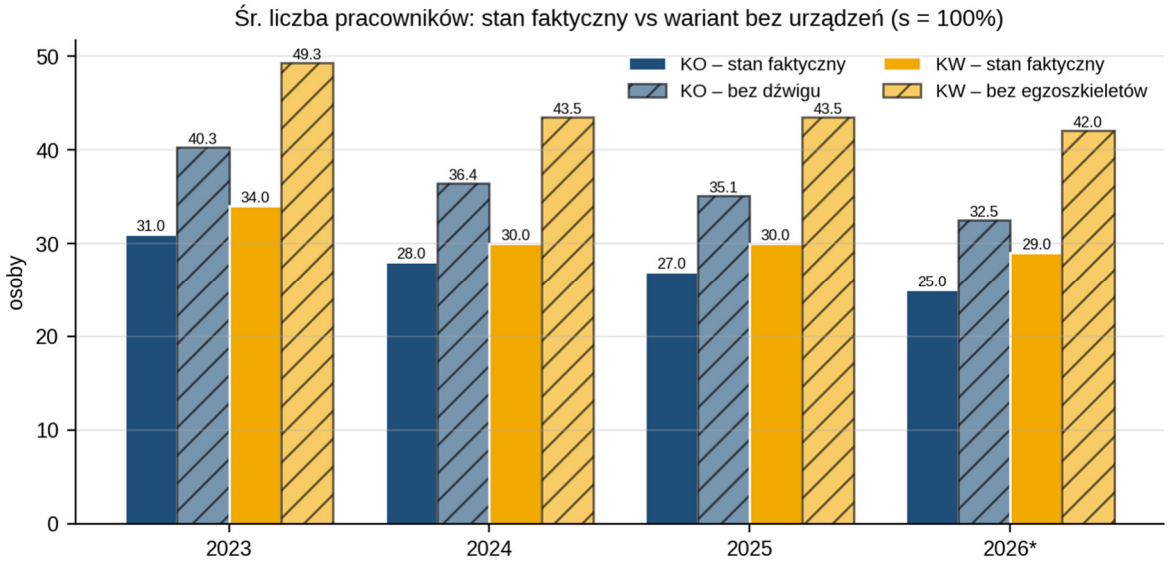
Wyniki symulacji kontrfaktycznej (tabela 5.25, rys. 5.21) pokazują, że gdyby w 2023 r. nie wdrożono urządzeń, przeładowanie tego samego tonażu wymagałoby w CL Koninko zatrudnienia 40,3 zamiast 31 pracowników w 2023 r., 36,4 zamiast 28 w 2024 r. i 35,1 zamiast 27 w 2025 r. – tj. o 8–9 pracowników fizycznych więcej w każdym roku. W CL Kąty Wrocławskie różnica jest większa ze względu na wyższy parametr g: 49,3 zamiast 34 pracowników w 2023 r. oraz 43,5 zamiast 30 w latach 2024 i 2025 – o 13–15 osób więcej. Łącznie oba centra musiałyby utrzymywać o ok. 22 pracowników więcej, niż faktycznie zatrudniały, co odpowiadałoby powrotowi do stanu zatrudnienia z lat 2019–2020 przy tonażu o kilkanaście do trzydziestu procent niższym. Równie wymowne jest ujęcie odwrotne: przy faktycznej liczbie pracowników, lecz bez wsparcia urządzeń, wydajność wyniosłaby w Koninku 661, 822 i 746 t/prac. w latach 2023–2025, a w Kątach Wrocławskich – 610, 775 i 683 t/prac. Wszystkie te wartości leżą poniżej najniższego wyniku zaobserwowanego w całej historii ewidencji przed 2023 r. (865 t/prac. w Kątach Wrocławskich w 2019 r.). Tonaż, którego nie udałoby się przeładować przy niezmienionej załodze, wyniósłby w latach 2023–2026 łącznie ok. 57 tys. t (22 325 t w Koninku i 34 837 t w Kątach Wrocławskich), czyli równowartość rocznego tonażu obu centrów w 2025 r. W praktyce oznaczałoby to konieczność wydłużenia czasu kompletacji zamówień, powrotu do pracy dwuzmianowej lub odmowy części dostaw – każde z tych rozwiązań uderzałoby bezpośrednio w zgodność planowania i realizacji na budowach, czyli w cel metody FFF.

*Tabela 5.25. Symulacja kontrfaktyczna zatrudnienia, wydajności i tonażu w wariancie bez urządzeń wspomagających pracę fizyczną (s = 100%; 2026* – dane do lipca)*

| Rok | CL | Tonaż [t] | Pracownicy – stan faktyczny | Pracownicy – bez urządzeń | Dodatkowi pracownicy | t/prac. – stan faktyczny | t/prac. – bez urządzeń | Tonaż utracony przy stałej załodze [t] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2023 | KO | 26 620 | 31 | 40,3 | 9,3 | 858,7 | 660,5 | 6143 |

| Rok | CL | Tonaż [t] | Pracownicy – stan faktyczny | Pracownicy – bez urządzeń | Dodatkowi pracownicy | t/prac. – stan faktyczny | t/prac. – bez urządzeń | Tonaż utracony przy stałej załodze [t] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2023 | KW | 30 065 | 34 | 49,3 | 15,3 | 884,3 | 609,8 | 9331 |
| 2024 | KO | 29 909 | 28 | 36,4 | 8,4 | 1068,2 | 821,7 | 6902 |
| 2024 | KW | 33 732 | 30 | 43,5 | 13,5 | 1124,4 | 775,4 | 10 469 |
| 2025 | KO | 26 172 | 27 | 35,1 | 8,1 | 969,3 | 745,6 | 6040 |
| 2025 | KW | 29 724 | 30 | 43,5 | 13,5 | 990,8 | 683,3 | 9225 |
| 2026* | KO | 14 039 | 25 | 32,5 | 7,5 | 561,6 | 432,0 | 3240 |
| 2026* | KW | 18 732 | 29 | 42,1 | 13,1 | 645,9 | 445,5 | 5813 |
| **Σ 2023–26** | **KO** | **–** | **–** | **–** | **–** | **–** | **–** | **22 325** |
| **Σ 2023–26** | **KW** | **–** | **–** | **–** | **–** | **–** | **–** | **34 837** |

*Źródło: opracowanie własne.*




*Rys. 5.21. Średnioroczna liczba pracowników fizycznych w CL Koninko i CL Kąty Wrocławskie: stan faktyczny (z urządzeniami) i wariant bez urządzeń w latach 2023–2026 (2026* – dane do lipca)*

*Źródło: opracowanie własne.*

Wyniki te wyjaśniają, dlaczego wzrost wydajności czynności rzędu 30–45% nie jest widoczny wprost w zagregowanych wskaźnikach t/prac. Centrum logistyczne dostawcy deskowań jest ogniwem ograniczonym popytowo – nie może przeładować więcej, niż budowy zwracają i zamawiają. Wzrost wydajności jednostkowej przekłada się więc nie na większy tonaż, lecz na możliwość obsłużenia danego wolumenu mniejszą załogą, na jednej zmianie, z większym zapasem czasu na prace naprawcze i kompletacyjne, a także na absorpcję dodatkowych zadań. Przykładem tych ostatnich są wyodrębnione od 2021 r. w ewidencji CL Kąty Wrocławskie strumienie przeładunków oznaczone jako RDC, BUES i DUO (nomenklatura wewnętrzna PERI Polska): strumień RDC występuje w każdym roku (od 882 t w 2021 r. do 4 697 t w siedmiu miesiącach 2026 r.), strumień DUO – jednorazowo w 2024 r. (4 185 t), a strumień BUES – od 2025 r. Ich łączny udział w tonażu centrum (tabela 5.26) wzrósł z 2,3% w 2021 r. do 16,8% w 2024 r. i do 30,3% w okresie do lipca 2026 r., przy zatrudnieniu obniżonym do 29–30 osób, co jakościowo potwierdza zwiększoną elastyczność zasobu pracy – cechę, którą metoda FFF stawia na pierwszym miejscu.

*Tabela 5.26. Dodatkowe strumienie przeładunków w CL Kąty Wrocławskie ujęte w ewidencji jako RDC, BUES i DUO w latach 2021–2026 (2026* – dane do lipca)*

| Rok | RDC [t] | BUES [t] | DUO [t] | Łącznie [t] | Udział w tonażu rocznym CL KW |
|---|---|---|---|---|---|
| 2021 | 882 | 0 | 0 | 882 | 2,3% |
| 2022 | 1778 | 0 | 0 | 1778 | 4,4% |
| 2023 | 1493 | 0 | 0 | 1493 | 5,0% |
| 2024 | 1489 | 0 | 4185 | 5674 | 16,8% |
| 2025 | 1122 | 600 | 0 | 1722 | 5,8% |
| 2026* | 4697 | 975 | 0 | 5672 | 30,3% |

*Źródło: opracowanie własne.*

Analiza wrażliwości (tabela 5.27) pokazuje, jak wynik zależy od parametru s: nawet przy konserwatywnym założeniu, że wsparcie obejmuje tylko połowę czasu pracy fizycznej (s = 50%), wariant bez urządzeń wymagałby w 2025 r. o ok. 4 pracowników więcej w Koninku i o prawie 7 w Kątach Wrocławskich, tj. łącznie o ok. 11 osób, co odpowiada dodatkowemu kosztowi pracy rzędu 0,73 mln zł rocznie; przy s = 100% wartości te rosną do ok. 22 osób i 1,45 mln zł.

*Tabela 5.27. Analiza wrażliwości wyniku symulacji kontrfaktycznej na udział prac wspieranych s (rok 2025 – ostatni pełny rok; koszt pracy według płacy minimalnej z narzutem 1,20)*

| Udział prac wspieranych s | KO: efektywny wzrost | KO: dodatkowi pracownicy | KO: koszt 2025 [zł] | KW: efektywny wzrost | KW: dodatkowi pracownicy | KW: koszt 2025 [zł] | Razem pracownicy | Razem koszt [zł] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 25% | 7,5% | 2,0 | 136 061 | 11,3% | 3,4 | 226 768 | 5,4 | 362 828 |
| 50% | 15,0% | 4,1 | 272 121 | 22,5% | 6,8 | 453 535 | 10,8 | 725 656 |
| 75% | 22,5% | 6,1 | 408 182 | 33,8% | 10,1 | 680 303 | 16,2 | 1 088 484 |
| 100% | 30,0% | 8,1 | 544 242 | 45,0% | 13,5 | 907 070 | 21,6 | 1 451 313 |

*Źródło: opracowanie własne.*

Przeliczenie wyniku symulacji na koszt pracy przedstawia tabela 5.28. Przy wycenie dodatkowego etatu według płacy minimalnej brutto z narzutem 20% (4 254 zł miesięcznie w 2023 r., 5 125 zł w 2024 r., 5 599 zł w 2025 r. i 5 767 zł w 2026 r.) dodatkowy koszt pracy w wariancie bez urządzeń wyniósłby w latach 2023–2026 (do lipca) ok. 1,84 mln zł w Koninku i ok. 3,05 mln zł w Kątach Wrocławskich, łącznie ok. 4,88 mln zł. Jest to szacunek dolny: płaca minimalna jest niższa niż rzeczywisty koszt etatu doświadczonego pracownika fizycznego, a wzrost tego kosztu (indeks 177 w 2023 r. i 240 w 2026 r. względem 2017 r.) sprawia, że wartość unikniętego etatu rośnie z każdym rokiem. Drugim, trudniejszym do skwantyfikowania efektem jest obniżenie rotacji pracowników fizycznych. Praca przeładunkowa jest ciężka, monotonna i narażona na urazy, a jej alternatywą na lokalnym rynku pracy są stanowiska w magazynach handlu elektronicznego i przemysłu, konkurujące o tę samą grupę pracowników. Według obserwacji kierownictwa obu centrów po wdrożeniu urządzeń rotacja zmniejszyła się znacząco w porównaniu z centrami, w których ich nie stosowano – co tłumaczy się mniejszym zmęczeniem, mniejszym ryzykiem urazów przeciążeniowych, poczuciem inwestowania przez pracodawcę w warunki pracy oraz wyższą atrakcyjnością stanowiska. Wobec braku ujawnialnych danych HR efekt ten ujęto wyłącznie parametrycznie (rotacja 30% rocznie bez urządzeń i 10% z urządzeniami, koszt zastąpienia pracownika równy trzem miesięcznym kosztom pracy – wartości przykładowe): uniknięty koszt rotacji wyniósłby ok. 1,01 mln zł, co podnosi łączny efekt obu wdrożeń do ok. 5,9 mln zł. Przy rocznym efekcie kosztowym rzędu 0,5–0,9 mln zł na centrum i typowych cenach rynkowych egzoszkieletów przemysłowych oraz manipulatorów ręcznych okres zwrotu obu wdrożeń jest krótszy niż okres, jaki upłynął od ich uruchomienia.

*Tabela 5.28. Dodatkowy koszt pracy i uniknięty koszt rotacji w wariancie bez urządzeń w latach 2023–2026 (koszt pracy według płacy minimalnej z narzutem 1,20; rotacja według parametrów przykładowych; 2026* – 7 miesięcy)*

| Rok | CL | Liczba miesięcy | Mies. koszt pracy 1 etatu [zł] | Dodatkowi pracownicy | Dodatkowy koszt pracy bez urządzeń [zł] | Uniknięty koszt rotacji [zł] (parametry przykładowe) | Łączny efekt [zł] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2023 | KO | 12 | 4254 | 9,3 | 474 746 | 114 730 | 589 477 |
| 2023 | KW | 12 | 4254 | 15,3 | 781 034 | 145 359 | 926 394 |
| 2024 | KO | 12 | 5125 | 8,4 | 516 620 | 124 850 | 641 470 |
| 2024 | KW | 12 | 5125 | 13,5 | 830 282 | 154 525 | 984 807 |
| 2025 | KO | 12 | 5599 | 8,1 | 544 242 | 131 525 | 675 767 |
| 2025 | KW | 12 | 5599 | 13,5 | 907 070 | 168 816 | 1 075 886 |
| 2026* | KO | 7 | 5767 | 7,5 | 302 778 | 73 171 | 375 949 |
| 2026* | KW | 7 | 5767 | 13,1 | 526 834 | 98 050 | 624 883 |
| **Σ** | **KO** | **–** | **–** | **–** | **1 838 387** | **444 277** | **2 282 664** |
| **Σ** | **KW** | **–** | **–** | **–** | **3 045 221** | **566 749** | **3 611 970** |
| **Σ** | **KO+KW** | **–** | **–** | **–** | **4 883 608** | **1 011 026** | **5 894 634** |

*Źródło: opracowanie własne.*

Wyniki uzyskane w CL Kąty Wrocławskie skłaniają do pytania, czy analogiczny efekt można uzyskać na placu budowy – w tej części przepływu deskowań, której metoda FFF dotyczy w sensie ścisłym. Według wiedzy autora na dzień opracowania rozprawy żadne przedsiębiorstwo wykonujące roboty żelbetowe nie wdrożyło egzoszkieletów w brygadach ciesielskich i zbrojarskich w skali produkcyjnej; dostępne są jedynie deklaracje producentów i doniesienia o testach w innych branżach budowlanych (instalacje, suche zabudowy, prace ponad głową). Poniższa analiza jest więc symulacją opartą na jawnych założeniach, której celem jest wyznaczenie rzędu wielkości efektu i progu opłacalności, a tym samym uzasadnienie (lub nie) podjęcia pilotażu. Rynek oferuje dwie wyraźnie różne klasy urządzeń. Egzoszkielety aktywne (zasilane), wspomagające odcinek lędźwiowy przy podnoszeniu, przenoszeniu i pracy w pochyleniu – np. użytkowany w CL Kąty Wrocławskie Cray X oraz jego następca Exia (wsparcie do 38 kg, konstrukcja pyło- i wodoszczelna, oferowane w modelu Robotics-as-a-Service bez publicznego cennika) – adresują ręczny transport i pracę zbrojarzy w pochyleniu. Egzoszkielety pasywne (mechaniczne), wspomagające barki i szyję przy pracy ponad głową – np. Hilti EXO-S o masie 2,3 kg – oraz plecakowy wyciąg narzędziowy Hilti EXO-T-22 (masa 7,75 kg, obciążenie do 17 kg) adresują prace cieśli przy deskowaniach stropowych (podpory, głowice opadowe, dźwigary, rozdeskowanie); dla wcześniejszego modelu Hilti EXO-O1, opracowanego we współpracy z firmą Ottobock, podawano cenę referencyjną na rynku amerykańskim 1 599 USD lub 60 USD miesięcznie w abonamencie z serwisem.

Podstawowym problemem przeniesienia wyniku na budowę jest odmienna struktura czynności. Pracownik centrum logistycznego niemal cały czas poświęca na podnoszenie, przenoszenie, sortowanie i układanie elementów, natomiast cieśla i zbrojarz wykonują czynności o różnym charakterze: znaczna część elementów deskowań jest przemieszczana żurawiem, a część czasu pochłaniają pomiary, komunikacja, oczekiwanie na żuraw i mieszankę betonową oraz przerwy technologiczne. W tabeli 5.29 przyjęto zatem – jako założenie oparte na obserwacjach budów obsługiwanych przez PERI Polska, lecz niepotwierdzone chronometrażem – strukturę czasu pracy obu zawodów w podziale na pięć grup czynności, przypisano im typ wsparcia i zdefiniowano trzy scenariusze: S1 optymistyczny (wspierane są wszystkie czynności fizyczne, także precyzyjne, co odpowiada założeniu, że zmniejszenie zmęczenia poprawia tempo również czynności niewymagających siły), S2 bazowy (transport, praca w pochyleniu i praca ponad głową) oraz S3 konserwatywny (wyłącznie ręczny transport elementów).

*Tabela 5.29. Przyjęta struktura czasu pracy cieśli i zbrojarzy, przypisanie typu wsparcia oraz kwalifikacja czynności do scenariuszy S1–S3 (założenie własne do symulacji)*

| Grupa czynności | Cieśla – udział czasu | Zbrojarz – udział czasu | Typ wsparcia | S1 | S2 | S3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ręczny transport i podnoszenie elementów (płyty, podpory, dźwigary, pręty, siatki) | 30% | 25% | aktywny – wsparcie odcinka lędźwiowego (np. German Bionic Cray X / Exia) | tak | tak | tak |
| Praca w pochyleniu / na kolanach (wiązanie zbrojenia, mocowanie przy podłożu) | 10% | 40% | aktywny – wsparcie pleców w pozycji pochylonej | tak | tak | nie |
| Praca ponad głową (podpory stropowe, głowice, dźwigary, rozdeskowanie stropów) | 20% | 5% | pasywny – wsparcie barków (np. Hilti EXO-S) lub wyciąg narzędziowy (EXO-T-22) | tak | tak | nie |
| Prace precyzyjne i narzędziowe (ustawianie, kotwienie, cięcie, gięcie, ściągi) | 20% | 15% | brak / częściowo wyciąg narzędziowy | tak | nie | nie |
| Pomiary, komunikacja, oczekiwanie na żuraw i beton, przerwy technologiczne | 20% | 15% | brak | nie | nie | nie |
| **Udział czasu objęty wsparciem s – cieśla** | | | | **80%** | **60%** | **30%** |
| **Udział czasu objęty wsparciem s – zbrojarz** | | | | **85%** | **70%** | **25%** |

*Źródło: opracowanie własne.*

Przy wzroście wydajności czynności wspieranych g = 45%, analogicznym do zaobserwowanego w CL Kąty Wrocławskie, i współczynniku przeniesienia k = 1,00 redukcja nakładu robocizny cieśli wynosi 26,5% (S1), 21,3% (S2) i 11,9% (S3), a zbrojarzy – 27,7%, 24,0% i 10,1%. Nawet w scenariuszu optymistycznym wynik jest wyraźnie niższy od nominalnych 45%, ponieważ egzoszkielet nie przyspiesza pomiarów, oczekiwania na żuraw ani dojrzewania betonu – jest to ta sama prawidłowość, którą zaobserwowano w centrach logistycznych. Procentowa redukcja nakładu nie zależy od przyjętej normy, lecz wyłącznie od s, g i k. W odniesieniu do przykładowej kondygnacji powtarzalnej (1 200 m² deskowań ściennych, 1 500 m² stropowych, 300 m² deskowań słupów i belek oraz 60 t zbrojenia; nakłady bazowe 0,60, 0,50 i 0,90 r-g/m² oraz 30 r-g/t – wartości przykładowe, do zastąpienia normami KNR 2-02 / KNNR 2 lub normami zakładowymi wykonawcy) łączny nakład robocizny maleje z 3 540 r-g do 2 581, 2 739 i 3 151 r-g, tj. o 27,1%, 22,6% i 11,0% (tabela 5.30). Przy koszcie roboczogodziny ok. 34 zł (płaca minimalna 2026 r. × 1,20 / 168 h – dolne ograniczenie rzeczywistej stawki cieśli i zbrojarzy) oszczędność w scenariuszu bazowym wynosi ok. 27,5 tys. zł na kondygnację, z czego ponad połowa przypada na roboty zbrojarskie, co wynika z wysokiego udziału pracy w pochyleniu w strukturze czasu zbrojarza. W ujęciu harmonogramowym przy brygadzie 20 osób (8 h/dzień) cykl kondygnacji skraca się z 22,1 do 16,1–19,7 dni roboczych (17,1 dnia w S2), a przy utrzymaniu stałego cyklu 10-dniowego brygada równoważna maleje z ok. 44 do 32–39 osób.

*Tabela 5.30. Nakład robocizny i koszt pracy dla przykładowej kondygnacji powtarzalnej w wariancie bez egzoszkieletów i w scenariuszach S1–S3 (ilości i nakłady bazowe przykładowe; koszt r-g według płacy minimalnej 2026 r. × 1,20)*

| Rodzaj robót | Jedn. | Ilość | Nakład bez egzo [r-g] | S1 [r-g] | S2 [r-g] | S3 [r-g] | Koszt bez egzo [zł] | Koszt S2 [zł] | Oszczędność S2 [zł] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Deskowanie ścian – system ramowy (montaż + demontaż) | m² | 1200 | 720 | 529 | 567 | 634 | 24 717 | 19 462 | 5255 |

| Rodzaj robót | Jedn. | Ilość | Nakład bez egzo [r-g] | S1 [r-g] | S2 [r-g] | S3 [r-g] | Koszt bez egzo [zł] | Koszt S2 [zł] | Oszczędność S2 [zł] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Deskowanie stropów – system dźwigarowy/panelowy (montaż + demontaż) | m² | 1500 | 750 | 551 | 591 | 661 | 25 746 | 20 273 | 5474 |
| Deskowanie słupów i belek (montaż + demontaż) | m² | 300 | 270 | 199 | 213 | 238 | 9269 | 7298 | 1971 |
| Przygotowanie i montaż zbrojenia (pręty + siatki) | t | 60 | 1800 | 1302 | 1369 | 1618 | 61 791 | 46 990 | 14 802 |
| **Razem kondygnacja** | | | **3540** | **2581** | **2739** | **3151** | **121 523** | **94 023** | **27 501** |
| **Redukcja nakładu względem wariantu bez egzoszkieletów** | | | | **27,1%** | **22,6%** | **11,0%** | | | |

*Źródło: opracowanie własne.*

Odniesienie empiryczne stanowi budowa S01 CBR OSM Piątnica, na której – jak wykazano w artykule (Majkowski Ł., Pasławski J., 2023) – liczba cieśli w okresie od listopada 2022 r. do sierpnia 2023 r. zmieniała się niemal codziennie w przedziale 18–24 osób, przy stałym w poszczególnych okresach potencjale deskowań na budowie. Dla stanu średniego 21 cieśli brygada równoważna przy pracy z egzoszkieletami wynosi 15,4 osoby w S1, 16,5 w S2 i 18,5 w S3 (dla 18 i 24 cieśli w scenariuszu S2 – odpowiednio 14,2 i 18,9 osoby), a więc w scenariuszu bazowym jest mniejsza o ok. 4–5 cieśli. Tabela 5.31 konfrontuje roczny koszt pracy brygady 21 cieśli (ok. 1,45 mln zł według kosztu pracy 2026 r.) z przykładowym rocznym kosztem urządzeń: 3 tys. zł na pracownika dla egzoszkieletów pasywnych (rząd wielkości ceny referencyjnej EXO-O1 rozłożonej na trzy lata z serwisem) oraz 15 tys. zł na pracownika dla egzoszkieletów aktywnych w abonamencie (wartość przykładowa, ponieważ producent nie publikuje cennika).

*Tabela 5.31. Roczny koszt pracy brygady 21 cieśli oraz efekt netto zastosowania egzoszkieletów pasywnych i aktywnych (koszt pracy 2026 r.; koszty urządzeń przykładowe)*

| Wariant | Liczba cieśli | Koszt roczny pracy [zł] | Egzoszkielety pasywne [zł/rok] | Egzoszkielety aktywne [zł/rok] | Efekt netto – pasywne [zł/rok] | Efekt netto – aktywne [zł/rok] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Bez egzoszkieletów | 21,0 | 1 453 334 | 0 | 0 | – | – |
| S1 optymistyczny | 15,4 | 1 068 628 | 46 324 | 231 618 | 338 383 | 153 089 |
| S2 bazowy | 16,5 | 1 144 358 | 49 606 | 248 031 | 259 370 | 60 945 |
| S3 konserwatywny | 18,5 | 1 280 471 | 55 507 | 277 533 | 117 357 | -104 669 |

*Źródło: opracowanie własne.*

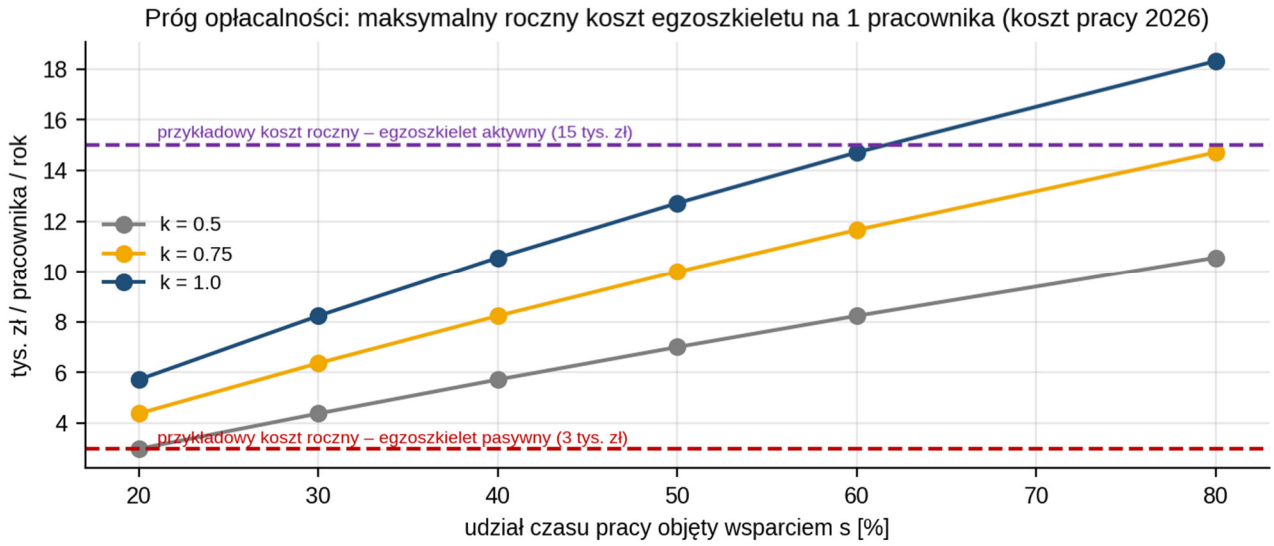
Efekt netto w scenariuszu bazowym S2 wynosi ok. 259 tys. zł rocznie przy egzoszkieletach pasywnych i ok. 61 tys. zł przy aktywnych; w scenariuszu konserwatywnym S3 egzoszkielety aktywne przestają się bilansować (ok. −105 tys. zł), natomiast pasywne pozostają opłacalne (ok. +117 tys. zł). Ponieważ wynik jest wrażliwy na koszt urządzeń, w tabeli 5.32 i na rys. 5.22 wyznaczono próg opłacalności, tj. maksymalny roczny koszt egzoszkieletu na jednego pracownika, przy którym efekt netto pozostaje nieujemny. W całym badanym zakresie parametrów (s = 20–80%, k = 0,50–1,00) redukcja nakładu robocizny wynosi od 4,3% do 26,5%, a próg opłacalności – od ok. 3,0 do 18,3 tys. zł rocznie. W obszarze uznanym za najbardziej prawdopodobny dla brygad ciesielskich (s = 40–60%, k = 0,75) redukcja nakładu wynosi 12–17%, a próg – ok. 8–12 tys. zł rocznie na pracownika (przy koszcie pracy na poziomie płacy minimalnej z narzutem; przy rzeczywistych stawkach próg jest proporcjonalnie wyższy). Egzoszkielety pasywne o rocznym koszcie rzędu 3 tys. zł mieszczą się więc pod progiem praktycznie w całym badanym zakresie, natomiast egzoszkielety aktywne w abonamencie rzędu 15 tys. zł wymagają

udziału wspieranego s powyżej ok. 60% przy pełnym przeniesieniu efektu – warunku spełnianego w centrum logistycznym, a na budowie tylko w brygadach zbrojarskich o dużym udziale pracy w pochyleniu lub w brygadach dedykowanych do ręcznego montażu deskowań lekkich (np. systemów typu DUO, w których wszystkie elementy przenoszone są bez żurawia).

*Tabela 5.32. Redukcja nakładu robocizny 1 − 1/(1 + s·g·k) oraz próg opłacalności – maksymalny roczny koszt egzoszkieletu na jednego pracownika przy koszcie pracy 2026 r. – w zależności od udziału wspieranego s i współczynnika przeniesienia k (g = 45%)*

| s \ k | Redukcja nakładu – k = 0,50 | Redukcja nakładu – k = 0,75 | Redukcja nakładu – k = 1,00 | Próg [zł/rok] – k = 0,50 | Próg [zł/rok] – k = 0,75 | Próg [zł/rok] – k = 1,00 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20% | 4,3% | 6,3% | 8,3% | 2980 | 4376 | 5714 |
| 30% | 6,3% | 9,2% | 11,9% | 4376 | 6363 | 8232 |
| 40% | 8,3% | 11,9% | 15,3% | 5714 | 8232 | 10 557 |
| 50% | 10,1% | 14,4% | 18,4% | 6998 | 9992 | 12 711 |
| 60% | 11,9% | 16,8% | 21,3% | 8232 | 11 654 | 14 713 |
| 80% | 15,3% | 21,3% | 26,5% | 10 557 | 14 713 | 18 319 |

*Źródło: opracowanie własne.*




*Rys. 5.22. Próg opłacalności egzoszkieletu na jednego pracownika w funkcji udziału czasu pracy objętego wsparciem s i współczynnika przeniesienia k na tle przykładowych kosztów rocznych urządzeń pasywnych i aktywnych. Źródło: opracowanie własne.*

Symulacja wskazuje na następujące uwarunkowania ewentualnego pilotażu. Największy potencjał – zarówno ze względu na strukturę czynności, jak i ryzyko urazów przeciążeniowych – mają brygady zbrojarskie, w których praca w pochyleniu i ręczny transport prętów stanowią większość czasu pracy, a właściwym urządzeniem jest sprawdzony w CL Kąty Wrocławskie egzoszkielet aktywny. W brygadach ciesielskich najbardziej obiecujące jest połączenie egzoszkieletu pasywnego barkowego (prace ponad głową przy deskowaniach stropowych) z egzoszkieletem aktywnym u pracowników wyznaczonych do transportu ręcznego, przy czym dobór powinien wynikać z chronometrażu, a nie z założeń tabeli 5.29. Warunkiem uzyskania efektu jest zgodność urządzeń z pozostałymi środkami ochrony indywidualnej (szelki bezpieczeństwa, odzież ochronna), odporność na pył, wilgoć i temperaturę oraz organizacja

ładowania baterii w urządzeniach aktywnych; wymagania te są łagodniejsze dla urządzeń pasywnych, co przemawia za rozpoczęciem pilotażu od tej klasy. Pilotaż powinien mieć formę eksperymentu porównawczego (brygada z urządzeniami i brygada referencyjna na tym samym obiekcie lub na kolejnych kondygnacjach) z pomiarem nakładu robocizny w r-g na jednostkę robót, liczby dni absencji i rotacji, tak aby po raz pierwszy zastąpić założenia s, g i k wartościami zmierzonymi. Wielkość efektu na poziomie kilkunastu do dwudziestu kilku procent nakładu robocizny – składnika stanowiącego, jak wskazano w artykule autora, ok. 50% kosztu wytworzenia konstrukcji monolitycznej – czyni taki pilotaż uzasadnionym ekonomicznie nawet przy założeniu, że rzeczywisty efekt okaże się o połowę mniejszy od symulowanego.

### 5.2.5. Synteza wyników w świetle metody Flexible Formwork Flow – wnioski i rekomendacje

W ujęciu lean deskowanie jest w łańcuchu dostawca – budowa odpowiednikiem produkcji w toku (ang. work in process, WIP): tworzy wartość wyłącznie wtedy, gdy „płynie", tj. znajduje się w cyklu montaż–betonowanie–demontaż, a każde zatrzymanie – leżenie na placu dostawcy, oczekiwanie na budowie na kolejny takt, oczekiwanie na transport zwrotny – jest marnotrawstwem typu „zapas" lub „oczekiwanie". Przeprowadzone analizy należy zatem odczytywać jako pomiar stanu przepływu deskowania w PERI Polska przed pełnym wdrożeniem rozwiązań postulowanych w rozprawie. Związek między wykorzystaniem materiałowym a przepływem ma charakter ilościowy i wynika z prawa Little'a (Little J. D. C., 1961), zgodnie z którym średnia liczba jednostek w systemie (L) równa się iloczynowi średniej intensywności przepływu (λ) i średniego czasu przebywania jednostki w systemie (W): $L = \lambda \cdot W$. W odniesieniu do parku dzierżawnego wartość materiału pozostającego poza dzierżawą jest iloczynem strumienia zwrotów i średniego czasu, jaki element spędza na placu między zwrotem a kolejnym wydaniem. Wykorzystanie równe 59,8% oznacza, że w ujęciu wartościowym 40,2% parku znajduje się w tej „kolejce". Podniesienie wskaźnika do celu 75% przy tej samej wielkości parku i tym samym popycie wymaga skrócenia średniego czasu przebywania elementu poza dzierżawą o ok. 38% (z 40,2% do 25% czasu cyklu) – co jest zadaniem przepływowym, a nie inwestycyjnym.

Wyniki trzech analiz wskazują na trzy bariery przepływu, na które odpowiada metoda FFF. Pierwszą jest bariera po stronie budowy – długość cyklu deskowaniowego. Czas, jaki komplet deskowania spędza na budowie, jest sumą cykli montaż–betonowanie–demontaż oraz przestojów między nimi; usprawnienia montażu i demontażu badane w rozprawie (innowacje technologiczne, organizacyjne i procesowe, standaryzacja pracy, Takt Planning oparty na cyklu deskowaniowym, a potencjalnie także wsparcie brygad egzoszkieletami) skracają ten czas, a więc – przy tym samym strumieniu zamówień – zmniejszają park potrzebny do obsługi tego samego programu robót. Najsilniej dotyczy to grup o najwyższej zmienności wykorzystania (pomosty samoczynnego wspinania, ST100, Rundflex, deskowania jednostronne), w których pojedynczy przedłużony cykl natychmiast unieruchamia znaczną część parku. Drugą jest bariera informacyjna – planowanie na podstawie deklarowanego zamiast rzeczywistego terminu zwrotu. Brak rejestru odchyleń zwrotów oznacza, że system planowania działa w logice „push" od zadeklarowanych dat, a nie „pull" od rzeczywistego zapotrzebowania i rzeczywistej dostępności; skutkiem są zakupy z fabryki przy jednoczesnych nadwyżkach na placu, czyli klasyczne marnotrawstwo nadprodukcji parku. Metoda FFF wymaga, aby przepływ informacji wyprzedzał przepływ materiału – rejestr odchyleń zwrotów jest więc jej warunkiem koniecznym, a nie uzupełnieniem. Trzecią jest bariera po stronie wydań – zmienność zamiast stabilności. Przepływ na wejściu jest w większości stabilny (78,1% pozycji w przedziale ±1 dnia), lecz 49 opóźnień o 8 dni i więcej oraz 2,2% pozycji z przyczynami wewnętrznymi dowodzą, że nawet przy nadmiarowym parku dostępność właściwego asortymentu we właściwym miejscu nie jest zapewniona. Elastyczność w rozumieniu FFF oznacza zdolność do przekierowania materiału między budowami i magazynami bez sięgania po zakup, co wymaga zarówno informacji, jak i standaryzacji asortymentu oraz procesów kompletacji.

Warunkiem brzegowym przepływu jest ponadto stabilność zasobu pracy w ogniwie logistycznym i wykonawczym. Przy tonażu zależnym od koniunktury i ponaddwukrotnym wzroście kosztu pracy niezawodność magazynu deskowań – pierwszy z dwóch warunków metody FFF– wymaga załogi stabilnej, elastycznej i odciążonej fizycznie. Wdrożenia z 2023 r. pokazały, że urządzenia wspomagające pracę fizyczną pozwalają utrzymać przepustowość obu centrów przy załodze mniejszej o ok. 22 osoby, na jednej zmianie i z rezerwą na dodatkowe strumienie przeładunków. Wdrożenie egzoszkieletów w CL Kąty Wrocławskie oraz dźwigu obsługi ręcznej w CL Koninko należy zatem uznać za jedno z udanych wdrożeń nawiązujących do metody FFF. Choć nie ma ono bezpośredniego związku z gospodarką deskowaniami na placu budowy, realnie podwyższa poziom bieżącej działalności operacyjnej dostawcy i realizuje wprost strategie Industry 5.0 – wsparcie pracownika przez urządzenia współpracujące (cobotykę), elastyczność i adaptację, cyfryzację i analizę danych (platforma German Bionic IO), rozwój

pracowników i minimalizację marnotrawstwa (przestoje, nadmierny transport, urazy) – wpisując się jednocześnie w kształtujące się paradygmaty Construction 5.0 oraz Industry 6.0, rozumianego jako kolejny etap integracji człowieka, sztucznej inteligencji i systemów fizycznych w samoadaptujące się łańcuchy wartości. Skoro elastyczność przepływu zależy od stabilności zasobu ludzkiego w centrum logistycznym, to w równym stopniu zależy od stabilności brygad ciesielskich i zbrojarskich, których liczebność zmienia się na budowie niemal codziennie przy stałym potencjale deskowań; narzędzie pozwalające tę samą pracę wykonać mniejszą, mniej zmęczoną i stabilniejszą brygadą zmniejsza rozbieżność między planem a realizacją, a więc działa dokładnie w kierunku wyznaczanym przez metodę FFF.

Doświadczenia innych branż pokazują, że radykalna poprawa wskaźników wykorzystania majątku jest możliwa w krótkim czasie, o ile stanie się priorytetem zarządczym mierzonym systematycznie. Klasycznym przykładem jest Apple Inc. po zatrudnieniu w 1998 r. Tima Cooka jako wiceprezesa ds. operacji światowych. Cook przeniósł produkcję z własnych fabryk do wykonawców kontraktowych, ograniczył liczbę kluczowych dostawców komponentów z ok. 100 do 24, zamknął 10 z 19 magazynów, a zapasy wyrobów – określane przez niego jako „fundamentalnie złe” – zredukował w ciągu kilku miesięcy z poziomu odpowiadającego około miesiącowi sprzedaży do zaledwie kilku dni (Lashinsky A., 2012). Materiał dzierżawny leżący na placu jest odpowiednikiem zapasu wyrobów gotowych: zamraża kapitał, generuje koszty i traci wartość (zużycie, korozja, starzenie technologiczne systemów). O sukcesie Apple nie zadecydowała pojedyncza innowacja techniczna, lecz konsekwentne uczynienie ze wskaźników rotacji zapasów głównego miernika pracy całej organizacji. W warunkach PERI Polska oznacza to, że wskaźnik bieżącego wykorzystania materiałowego powinien być nie tylko mierzony tygodniowo, ale także powiązany z odpowiedzialnością poszczególnych obszarów: sprzedaży (za wykorzystanie i terminowość zwrotów), logistyki (za odchylenia wydań i przesunięcia międzymagazynowe), zakupów (za decyzje o dokupieniu materiału na tle rzeczywistego, a nie deklarowanego harmonogramu zwrotów) oraz działu technicznego (za projektowanie rozwiązań wykorzystujących asortyment o niskim wykorzystaniu).

Z przeprowadzonej analizy wynika, że metoda FFF wymaga własnego, trójelementowego systemu pomiaru, obejmującego wykorzystanie materiałowe jako miarę stanu przepływu (odpowiednik rotacji zapasów w przykładzie Apple), odchylenia terminów wydań jako miarę zmienności przepływu na wejściu oraz odchylenia terminów zwrotów jako miarę zmienności przepływu na wyjściu – przy czym trzeci element dziś nie istnieje. Uzupełnieniem tego systemu jest wydajność przeładunków w centrach logistycznych, mierząca zdolność ogniwa magazynowego. Dopiero komplet tych miar pozwala ocenić, czy usprawnienia montażu i demontażu przekładają się na przepływ całego systemu, a nie tylko na lokalną wydajność brygady. Zebrane w podrozdziale dane – 51 tygodni wykorzystania, 2353 pozycje wydań i dziesięcioletnie szeregi przeładunków – stanowią linię bazową do weryfikacji tezy rozprawy. Hipotezą operacyjną jest, że wdrożenie rozwiązań FFF pozwoli podnieść łączne wykorzystanie parku z ok. 59% w kierunku celu 75% bez zwiększania majątku i jednocześnie ograniczyć udział opóźnień wydań wynikających z przyczyn wewnętrznych.

Najważniejsze wnioski z podrozdziału są następujące. Łączne wykorzystanie parku PERI Polska wynosiło w okresie 12 miesięcy średnio 59,1%, tylko w 18 z 51 tygodni przekraczało próg 60% i ani razu nie osiągnęło celu 75%, a na koniec okresu 35,2% majątku znajdowało się w grupach o zbyt niskim wykorzystaniu. Terminowość wydań jest w ujęciu statystycznym wysoka (78,1% pozycji w przedziale ±1 dnia, mediana odchylenia 0), lecz rozkład ma „grube ogony”, a ewidencja przyczyn pozwala na rzeczywistą diagnostykę jedynie ok. 4,4% pozycji; przyczyny wewnętrzne PERI stanowią 2,2% pozycji, ale generują opóźnienia w 60% przypadków. Brak rejestru odchyleń terminów zwrotów jest najpoważniejszą luką systemu pomiaru, prowadzącą bezpośrednio do nadmiernych zakupów i spadku wykorzystania. W centrach logistycznych tonaż jest wielkością pochodną koniunktury (w 2025 r. ok. 60% poziomu z 2017 r.), a oba centra utrzymały wydajność ok. 970–1 000 t/prac. mimo przejścia na jedną zmianę; bez egzoszkieletów i dźwigu obsługi ręcznej wymagałoby to ok. 22 dodatkowych etatów, a uniknięty koszt pracy w latach 2023–2026 wynosi co najmniej ok. 4,9 mln zł (ok. 5,9 mln zł z parametrycznie oszacowanym efektem obniżonej rotacji) i rośnie wraz z każdym kolejnym wzrostem stawek wynagrodzeń. Symulacja przeniesienia efektu egzoszkieletów na budowę wskazuje na redukcję nakładu robocizny cieśli i zbrojarzy od ok. 10–12% w scenariuszu konserwatywnym do ok. 27–28% w optymistycznym (w bazowym ok. 21% dla cieśli i 24% dla zbrojarzy), co uzasadnia przeprowadzenie pilotażu porównawczego.

Na tej podstawie formułuje się następujące rekomendacje. Należy wdrożyć rejestr odchyleń terminów zwrotów (termin zadeklarowany i rzeczywisty, wielkość odchylenia, kod przyczyny, data pozyskania informacji) i raportować go co tydzień łącznie z wykorzystaniem materiałowym i odchyleniami wydań.

Równolegle należy uszczelnić ewidencję powodów odchyleń wydań – wyeliminować puste wpisy (36 pozycji) i kod „nie ustalono przyczyny” (39 pozycji) przez obowiązkowe pole z zamkniętą listą kodów oraz rozdzielić kody „neutralne” od „problemowych”. W pięciu grupach, które w żadnym tygodniu nie osiągnęły progu 60% (zastawki podciągów i palety, budownictwo mostowe, MAXIMO, osprzęt VARIO, deskowanie do słupów okrągłych), wskazany jest przegląd wielkości parku i decyzje o sprzedaży nadwyżek, wstrzymaniu zakupów lub przesunięciach do innych spółek koncernu, a priorytetowe działania handlowo-techniczne powinny objąć grupy o największym wpływie na wynik – TRIO, PEP i MP, DOMINO i Skydeck (łącznie 46,0% majątku). W centrach logistycznych należy kontynuować wsparcie pracy fizycznej i skalibrować modele na rzeczywistych danych kosztowych i HR, a na budowie – przeprowadzić pilotaż egzoszkieletów, rozpoczynając od urządzeń pasywnych w brygadach ciesielskich i aktywnych w brygadach zbrojarskich. Wreszcie skrócenie cykli montażu i demontażu deskowań – główny przedmiot rozprawy i rdzeń metody FFF – należy traktować jako bezpośrednią dźwignię wskaźnika wykorzystania: każdy dzień skrócenia cyklu zwiększa liczbę rotacji tego samego kompletu w sezonie, a tym samym przychód z dzierżawy przy niezmienionym majątku.

Podsumowując, doprowadzenie wykorzystania parku PERI Polska do celu 75% – poziomu osiągniętego już przez PERI Czechy w niektórych grupach – wymaga podniesienia wskaźnika łącznego o ok. 15 p.p. względem stanu na 36 TK 2026. Skala tego wyzwania jest porównywalna ze zmianą, jaką Apple przeprowadziło w gospodarce zapasami w latach 1998–1999, i – jak pokazuje ten przykład – jest osiągalna przede wszystkim przez zmianę sposobu zarządzania przepływem materiału, informacją, zasobem pracy i odpowiedzialnością, a nie przez inwestycje w majątek. **Taką właśnie zmianę – od parku, który „leży”, do deskowania, które „płynie” – opisuje metoda Flexible Formwork Flow. Przedstawione modele symulacyjne mają charakter otwarty: po zastąpieniu założeń danymi operacyjnymi, kosztorysowymi i HR mogą zostać włączone – jako moduły „zasób pracy w centrum logistycznym” oraz „zasób pracy brygady na budowie” – do modelu symulacyjnego przepływu deskowań, wskazanego jako kierunek dalszych badań.**

## 5.3. Rynkowe uwarunkowania metody FFF – koszt pracy, ceny deskowań i ekspansja prefabrykacji żelbetowej

Podrozdział dotyczy uwarunkowań rynkowych i dostarcza ekonomicznego uzasadnienia problemu badawczego rozprawy. Weryfikuje tezę szczegółową TS2 w części dotyczącej rosnącej opłacalności rozwiązań ograniczających pracochłonność wraz ze wzrostem kosztu pracy, a zarazem identyfikuje prefabrykację żelbetową jako strukturalne zagrożenie dla rynku deskowań systemowych, wynikające z tego samego mechanizmu kosztowego.

### 5.3.1. Cel, zakres, źródła danych i metodyka analizy

Celem podrozdziału jest empiryczna analiza tych aspektów rynkowych, które w największym stopniu kształtują warunki rozwoju i wdrażania metody Flexible Formwork Flow (FFF). Analizie poddano dwa powiązane ze sobą zjawiska. Pierwszym jest zmiana relacji pomiędzy kosztem pracy a kosztem udostępnienia deskowań systemowych w latach 2015–2025, a więc zmiana struktury kosztu wytworzenia monolitycznej konstrukcji żelbetowej. Drugim jest rozwój rynku prefabrykacji żelbetowej w Polsce i w Europie, oceniany z perspektywy jego wpływu na rynek deskowań w trzech segmentach, w których – z uwzględnieniem wieloletniego doświadczenia w PERI Polska Sp. z o.o. – w ostatniej dekadzie doszło do najgłębszej zmiany technologicznej: hal wielkopowierzchniowych (magazynowych i produkcyjnych), drogowych obiektów mostowych o małych i średnich rozpiętościach oraz instalacji termicznego przekształcania odpadów komunalnych (ITPOK) i pokrewnych bloków energetycznych opalanych paliwem z odpadów.

Punktem wyjścia jest obserwacja, że o ile ceny dzierżawy i sprzedaży deskowań systemowych rosły w badanym okresie w tempie umiarkowanym – według obserwacji rynkowych średnio o około 3–4% w skali roku – o tyle koszty pracy w polskiej gospodarce, w tym w budownictwie, rosły dwu-, a nawet trzykrotnie szybciej. Dziesięć lat temu koszt dzierżawy deskowania i koszt robocizny związanej z jego montażem oraz demontażem były wielkościami zbliżonego rzędu; obecnie to nakład pracy ludzkiej staje się składnikiem dominującym i najszybciej drożejącym. Rynek reaguje na tę zmianę dwojako. Z jednej strony rośnie znaczenie rozwiązań ograniczających pracochłonność montażu i demontażu deskowań, nawet jeżeli są one droższe w najmie lub zakupie. Z drugiej strony – zgodnie z logiką substytucji czynników produkcji – rynek poszukuje technologii, które pracę na budowie eliminują lub przenoszą do środowiska fabrycznego; taką technologią jest prefabrykacja żelbetowa. Obie reakcje mają to samo

źródło, lecz prowadzą do przeciwstawnych skutków dla dostawcy deskowań i wyznaczają ekonomiczne tło, w którym funkcjonuje metoda FFF.

Analizę oparto na czterech grupach źródeł. Pierwszą stanowią oficjalne dane Głównego Urzędu Statystycznego – komunikaty i obwieszczenia Prezesa GUS dotyczące wynagrodzeń i inflacji oraz informacje sygnalne o wskaźnikach cen produkcji budowlano-montażowej (GUS, 2025) – a także akty prawne określające wysokość minimalnego wynagrodzenia za pracę i publikowane analizy systemu Sekocenbud dotyczące stawek robocizny kosztorysowej. Drugą grupę tworzą ogólnodostępne raporty i komunikaty firm badawczych (Spectis, Grand View Research i inne), federacji branżowych (BIBM – Bureau International du Béton Manufacturé) i firm doradczych rynku nieruchomości (Cushman & Wakefield, AXI IMMO, JLL) oraz – pomocniczo – cenniki rynkowe najmu deskowań i sprzedaży betonu towarowego. Trzecią grupą są komunikaty inwestorów i wykonawców dotyczące konkretnych realizacji: drogi ekspresowej S10 Szczecin–Piła (GDDKiA, Ministerstwo Infrastruktury), Parku Zielonej Energii w Gliwicach (PEC-Gliwice, Mostostal Zabrze GPBP) oraz Centrum Energii Włocławek (PreZero, PORR), w tym artykuł J. Kowalczyka, B. Ruszela i D. Skorupskiego opublikowany we wrześniu 2026 r. w „Inżynierze Budownictwa" (Kowalczyk J. i in., 2026). Czwartą grupą są obserwacje własne oraz dane wewnętrzne i archiwum fotograficzne PERI Polska Sp. z o.o.

Wszystkie wielkości o charakterze szacunkowym i przyjęte założenia zostały w tekście, tabelach i na rysunkach wyraźnie oznaczone i oddzielone od danych źródłowych. Dotyczy to w szczególności dynamiki cen deskowań (w polskiej statystyce publicznej nie jest publikowany odrębny wskaźnik cen deskowań), parametrów modelu poglądowego kosztu robót deskowaniowych, udziałów prefabrykacji w analizowanych segmentach oraz udziałów tych segmentów w obrocie PERI Polska. Tabele i wykresy dotyczące rynku prefabrykacji zestawiono ponadto w niezależnym pliku Excel, w którym wielkości pochodne (indeksy, dynamiki, wyniki modelu) obliczane są formułami z jawnie podanych danych wejściowych.

W praktyce kosztorysowej koszt wytworzenia monolitycznej konstrukcji żelbetowej dekomponuje się na robociznę (R), materiały (M) oraz pracę sprzętu (S), powiększone o koszty pośrednie i zysk wykonawcy. Deskowanie – w zależności od przyjętego modelu (własność wykonawcy, dzierżawa, zakup jednorazowy) – ujmowane jest jako materiał pomocniczy wielokrotnego użycia, praca sprzętu lub odrębna pozycja kosztów najmu. Na potrzeby analizy przez „koszt deskowania" rozumie się koszt udostępnienia kompletnego systemu deskowaniowego (dzierżawa albo amortyzacja zakupu wraz z logistyką), natomiast robocizna związana z montażem, demontażem, czyszczeniem i konserwacją deskowań zaliczana jest do kosztów pracy. Takie rozgraniczenie pozwala uchwycić kluczowe dla rozprawy zjawisko rozchodzenia się w czasie ścieżek cenowych składnika sprzętowo-materiałowego i składnika osobowego. Deskowanie jest przy tym elementem szczególnym: nie pozostaje w konstrukcji, lecz jest wielokrotnie obracane pomiędzy taktami betonowania, a o jego rzeczywistym koszcie jednostkowym decyduje liczba rotacji w danym czasie, zależna wprost od sprawności montażu i demontażu. Im droższa staje się praca, tym większa część kosztu „deskowaniowego" sensu largo przypada w rzeczywistości na robociznę – i tym silniejsza jest presja na skracanie czasu operacji deskowaniowych.

Podrozdział weryfikuje dwie tezy. Pierwsza brzmi: koszt pracy – a nie koszt samego deskowania – stał się dominującym i najszybciej rosnącym składnikiem kosztów robót deskowaniowych, co zmienia kryteria wyboru systemów deskowaniowych i stanowi ekonomiczne uzasadnienie problemu badawczego rozprawy. Druga brzmi: rozwój prefabrykacji żelbetowej – w Polsce i na świecie – jest obecnie największym strukturalnym zagrożeniem dla dalszego wzrostu rynku deskowań systemowych i ma realny wpływ na kierunek, w jakim branża deskowaniowa musi rozwijać nowe produkty i usługi, aby odnaleźć swoje miejsce w paradygmatach Construction 5.0 i Industry 6.0 opisanych w podrozdziale 3.1.

### 5.3.2. Koszt pracy a koszt deskowań w latach 2015–2025

Podstawowym oficjalnym miernikiem poziomu kosztów pracy w Polsce jest przeciętne miesięczne wynagrodzenie w gospodarce narodowej, ogłaszane corocznie w komunikacie Prezesa GUS na podstawie art. 20 ustawy o emeryturach i rentach z Funduszu Ubezpieczeń Społecznych. Dla przedsiębiorstw budowlanych, zatrudniających znaczną liczbę pracowników fizycznych o wynagrodzeniach zbliżonych do dolnych stawek rynkowych, silnym impulsem kosztowym są ponadto kolejne podwyżki minimalnego wynagrodzenia za pracę, ustalanego rozporządzeniami Rady Ministrów. Oba szeregi, zestawione ze średnioroczną inflacją konsumencką (CPI), przedstawiono w tabeli 5.33.

*Tabela 5.33. Przeciętne i minimalne wynagrodzenie za pracę na tle średniorocznej inflacji CPI w latach 2015–2025*

| Rok | Przeciętne wynagr. brutto [zł/mies.] | Dyn. r/r [%] | Indeks (2015 = 100) | Minimalne wynagr. brutto [zł/mies.] | Dyn. r/r [%] | Indeks (2015 = 100) | Inflacja CPI [%] | Realna zmiana przeciętnego wynagr. [p.p.] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2015 | 3899,78 | – | 100,0 | 1750 | – | 100,0 | -0,9 | – |
| 2016 | 4047,21 | 3,8 | 103,8 | 1850 | 5,7 | 105,7 | -0,6 | 4,4 |
| 2017 | 4271,51 | 5,5 | 109,5 | 2000 | 8,1 | 114,3 | 2,0 | 3,5 |
| 2018 | 4585,03 | 7,3 | 117,6 | 2100 | 5,0 | 120,0 | 1,6 | 5,7 |
| 2019 | 4918,17 | 7,3 | 126,1 | 2250 | 7,1 | 128,6 | 2,3 | 5,0 |
| 2020 | 5167,47 | 5,1 | 132,5 | 2600 | 15,6 | 148,6 | 3,4 | 1,7 |
| 2021 | 5662,53 | 9,6 | 145,2 | 2800 | 7,7 | 160,0 | 5,1 | 4,5 |
| 2022 | 6346,15 | 12,1 | 162,7 | 3010 | 7,5 | 172,0 | 14,4 | -2,3 |
| 2023 | 7155,48 | 12,8 | 183,5 | 3490 / 3600* | 19,6 | 205,7 | 11,4 | 1,4 |
| 2024 | 8181,72 | 14,3 | 209,8 | 4242 / 4300* | 19,4 | 245,7 | 3,6 | 10,7 |
| 2025 | 8903,56 | 8,8 | 228,3 | 4666 | 8,5 | 266,6 | – | – |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie komunikatów Prezesa GUS w sprawie przeciętnego wynagrodzenia w gospodarce narodowej oraz średniorocznego wskaźnika cen towarów i usług konsumpcyjnych (stat.gov.pl; M.P.), a także rozporządzeń Rady Ministrów w sprawie wysokości minimalnego wynagrodzenia za pracę (Dz.U. z lat 2014–2024; zestawienie □US). * W latach 2023 i 2024 minimalne wynagrodzenie podwyższano dwukrotnie (od 1 stycznia i od 1 lipca); w kolumnach dynamiki i indeksu przyjęto wartość z drugiego półrocza. Realną zmianę podano w przybliżeniu jako różnicę dynamik; zestawienie inflacji obejmuje lata 2015–2024.*

Przeciętne wynagrodzenie wzrosło z 3 899,78 zł w 2015 r. do 8 903,56 zł w 2025 r., tj. o 128,3%, co odpowiada średniorocznemu tempu wzrostu (CAGR) około 8,6%. Wyraźne jest przyspieszenie w drugiej połowie okresu: w latach 2016–2020 roczne wzrosty mieściły się w przedziale 3,8–7,3%, od 2021 r. były dwucyfrowe lub bliskie dwucyfrowym (z rekordowym 14,3% w 2024 r.), a w 2025 r. dynamika obniżyła się do wciąż wysokiego poziomu 8,8%. Minimalne wynagrodzenie wzrosło w tym samym czasie z 1 750 zł do 4 666 zł, tj. o 166,6% (CAGR około 10,3%). Skokowe podwyżki – w szczególności o 15,6% w 2020 r. oraz o 19,6% i 19,4% w latach 2023 i 2024 – były wielokrotnie wskazywane w analizach branżowych jako czynnik „podciągający" całą siatkę płac w wykonawstwie budowlanym, ponieważ wymuszały utrzymanie odstępów płacowych pomiędzy pracownikami niewykwalifikowanymi a wykwalifikowanymi cieślami, zbrojarzami i betoniarzami. Stawki pracowników wykonujących montaż i demontaż deskowań należą do najbardziej wrażliwych na te podwyżki.

Dane sektorowe GUS potwierdzają, że budownictwo uczestniczyło w opisanym wzroście w stopniu zbliżonym do całej gospodarki. Przeciętne wynagrodzenie w sektorze przedsiębiorstw wyniosło w 2015 r. 4 121,41 zł, w 2023 r. 7 444,39 zł, a w marcu 2024 r. 8 408,79 zł (nominalnie o 12,0% więcej niż rok wcześniej); w dziale „budownictwo" wyniosło ono w marcu 2024 r. 7 781 zł, nieznacznie poniżej średniej sektora przedsiębiorstw, lecz przy analogicznej dynamice. Ponieważ nie ma pełnych, jednorodnych szeregiem rocznym wynagrodzeń w dziale budownictwo za lata 2015–2025, w analizach ilościowych konsekwentnie wykorzystywany jest szereg przeciętnego wynagrodzenia w gospodarce narodowej; dostępne obserwacje punktowe wskazują, że prowadzi to raczej do ostrożnego niż zawyżonego oszacowania dynamiki kosztów pracy w budownictwie. Obraz uzupełniają kwartalne analizy systemu Sekocenbud: w pierwszym półroczu 2024 r. stawki robocizny kosztorysowej netto wzrosły o 5,7–6,6%, a w ujęciu rok do roku (IV kwartał) notowano wzrosty rzędu 7,0–7,8%. Od 2021 r. stawki brutto (z narzutami) rosły szybciej niż stawki netto, a wzrosty stawek przekraczały zarówno inflację konsumencką, jak i dynamikę przeciętnego wynagrodzenia ogłaszaną przez GUS – koszt godziny pracy „sprzedawanej" w kosztorysach rósł więc co najmniej tak szybko, jak płace w całej gospodarce.

Zestawienie z inflacją pokazuje, że poza epizodem lat 2022–2023, kiedy realna wartość płac przejściowo malała, wynagrodzenia rosły szybciej niż ceny konsumpcyjne – w latach 2016–2021 przeciętnie o 3–5 punktów procentowych rocznie, a w 2024 r. o około 10,7 punktu procentowego. Według analiz Sekocenbud od sierpnia 2023 r. dynamika wynagrodzeń trwale przewyższa inflację; w lutym 2025 r. wzrost wynagrodzenia w sektorze przedsiębiorstw wyniósł 7,9% r/r i był o 3,0 punktu procentowego wyższy od równoczesnej inflacji. Skumulowana inflacja CPI za lata 2016–2024 wyniosła około 50%, podczas gdy skumulowany wzrost przeciętnego wynagrodzenia przekroczył w tym okresie 109%. Drożenie pracy nie było więc zjawiskiem jedynie nominalnym – czynnik pracy drożał również względem ogólnego poziomu cen, a tym bardziej względem cen deskowań, które w ujęciu realnym (deflowanym CPI) pozostały w praktyce na niezmienionym poziomie albo wręcz się obniżyły.

Rynek deskowań systemowych w Polsce jest rynkiem dojrzałym i silnie konkurencyjnym. Obok globalnych dostawców (m.in. PERI, Doka, ULMA, MEVA, Hünnebeck, Harsco/Altrad) działa na nim liczna grupa krajowych producentów oraz wypożyczalni oferujących sprzęt nowy i używany. Wykonawca może pozyskać deskowanie na własność (z wieloletnią amortyzacją i wysoką wartością rezydualną), w dzierżawie (rozliczanej zwykle w zł/m² za dobę lub za miesiąc) albo w modelach mieszanych. Wysoka konkurencja podażowa, trwałość elementów (ramy stalowe i aluminiowe eksploatowane przez kilkanaście lat) oraz rozwinięty rynek wtórny sprawiają, że ceny najmu i sprzedaży deskowań cechują się znacznie mniejszą elastycznością wzrostową niż ceny pracy. Na podstawie wieloletnich obserwacji ofert dzierżawy i sprzedaży deskowań, prowadzonych w praktyce inżynierskiej, przyjęto, że średni koszt dzierżawy lub zakupu deskowań systemowych rósł w ostatnim dziesięcioleciu w tempie około 3–4% rocznie. Jest to założenie autorskie – cenniki dostawców mają charakter negocjowalny i zależą od skali zamówienia, czasu najmu oraz stanu technicznego sprzętu – spójne jednak z ogólnym obrazem rynku: mieści się poniżej dynamiki zagregowanych cen produkcji budowlano-montażowej w drugiej połowie badanego okresu i odpowiada stabilności nominalnych stawek najmu obserwowanych w publikowanych cennikach wypożyczalni. W obliczeniach modelowych stosowany jest wariant środkowy 3,5% rocznie, a w analizach wrażliwości warianty 3,0% i 4,0%, które dają skumulowany wzrost cen deskowań w latach 2015–2025 odpowiednio o 41,1%, 34,4% i 48,0%. Przykładowe aktualne stawki najmu zestawiono w tabeli 5.34.

*Tabela 5.34. Przykładowe rynkowe stawki najmu deskowań systemowych (lata 2024–2026)*

| Pozycja | Orientacyjna stawka netto | Uwagi | Źródło (cennik rynkowy) |
|---|---|---|---|
| Deskowanie stropowe – najem miesięczny | 21,00 zł/m²/30 dni | stawka przykładowa, pełny system z podporami | Sambor (sambor.com.pl), 2024/2025 |
| Deskowanie stropowe – najem miesięczny | 30–39 zł/m²/mies. | stawka degresywna: 39 zł do 100 m², 30 zł powyżej 600 m² | Szaler (szaler.pl), 2025 |
| Deskowanie ścienne jednostronne | ok. 2,20 zł/m²/dzień | wg cennika przykładowego | Sambor; szalunki-rusztowanie.pl, 2025/2026 |
| Deskowanie ścienne dwustronne | ok. 4,30 zł/m²/dzień | wg cennika przykładowego | Sambor; szalunki-rusztowanie.pl, 2025/2026 |
| Deskowanie ścienne – najem miesięczny | 45–75 zł/m²/mies. | 45 zł powyżej 200 m², 75 zł do 50 m² | Makra-MET (makra-met.com.pl), 2025 |

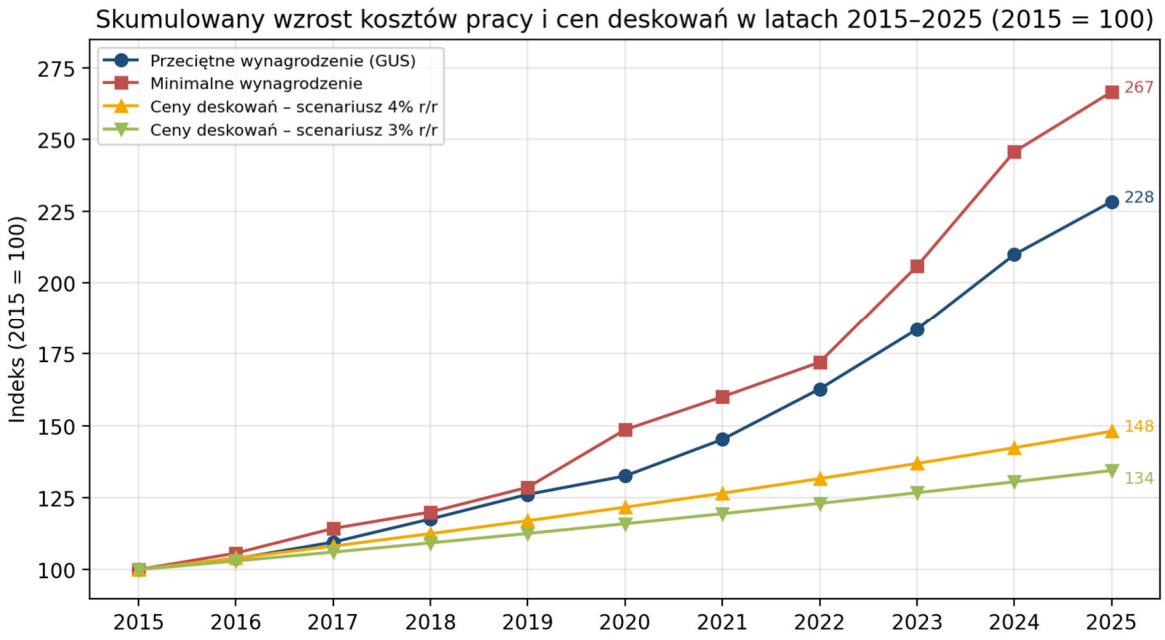
*Źródło: opracowanie własne na podstawie ogólnodostępnych cenników wypożyczalni deskowań (stan: 2024–2026). Stawki netto, orientacyjne; rzeczywiste warunki podlegają negocjacjom.*

Stawka rzędu 21–39 zł/m² miesięcznie za kompletny system stropowy odpowiada – przy koszcie roboczogodziny wyznaczonym w podrozdziale 5.3.3 na około 64 zł – równowartości zaledwie 20–37 minut pracy jednego pracownika, podczas gdy dekadę temu analogiczna stawka odpowiadała około 45–60 minutom pracy. Umiarkowana dynamika cen dotyczy obu podstawowych modeli pozyskania deskowania. Przy zakupie jednorazowy wzrost ceny rozkłada się na wiele lat eksploatacji elementów o bardzo długiej żywotności (dla ram stalowych systemów ściennych liczonej w setkach cykli) i tylko w niewielkim stopniu przekłada się na koszt pojedynczego cyklu. Przy dzierżawie park deskowań kupowany był po cenach historycznych, a konkurencja pomiędzy licznymi wypożyczalniami ogranicza możliwość przenoszenia bieżących wzrostów kosztów na stawki najmu. Koszt udostępnienia deskowania ma zatem charakter kapitałowy i „rozmywa się" w czasie, natomiast koszt pracy przy deskowaniu jest kosztem bieżącym, ponoszonym w całości w każdym cyklu i indeksowanym na bieżąco

do sytuacji na rynku pracy. Tłumaczy to, dlaczego ceny deskowań mogły rosnąć o 3–4% rocznie, podczas gdy koszt roboczogodziny ich montażu rósł średnio o 8–10% rocznie, i dlaczego decyzja „kupić czy dzierżawić" – istotna dla płynności finansowej wykonawcy – ma dziś dla łącznego kosztu robót deskowaniowych znaczenie drugorzędne wobec decyzji o wyborze systemu determinującego pracochłonność montażu i demontażu.

Pozostałe składniki kosztu konstrukcji żelbetowej rosły wolniej niż praca, a ich wzrost skoncentrowany był w epizodzie lat 2021–2023. Ceny betonu towarowego, zróżnicowane regionalnie i zależne od klasy, domieszek, transportu i pompowania, kształtowały się w latach 2024–2026 orientacyjnie od 260–300 zł/m³ netto (C12/15, z wytwórni) do 380–620 zł/m³ (C30/37), przy czym beton C25/30 z domieszkami w dużych miastach przekraczał 600 zł/m³ (Mix-Bet Beton, cennikibudowlane.com.pl, planetabudowa.pl, zainspiruj.pl, domonline.pl). Po skokowych podwyżkach lat 2021–2023, związanych ze wzrostem cen energii, cementu i transportu, dynamika cen betonu ustabilizowała się: w 2026 r. raportowano wzrost rzędu 6% r/r przy prognozach 3–6% rocznie, a w 2025 r. w dużych aglomeracjach notowano wzrosty 8–15% r/r dla betonów z domieszkami i transportem. Wśród przyczyn wzrostu cen betonu źródła branżowe wymieniają wprost rosnące koszty pracy w wytwórniach – drożenie pracy „przenika" więc również do cen materiałów. Wskaźnik cen produkcji budowlano-montażowej GUS miał w badanym okresie przebieg dwufazowy: nieznaczne spadki w latach 2015–2016, umiarkowane wzrosty w latach 2017–2020 i silne przyspieszenie od 2021 r. z kulminacją w latach 2022–2023; jeszcze w marcu 2024 r. ceny były o 7,3% wyższe niż przed rokiem (budowa obiektów inżynierii lądowej i wodnej +8,2%, roboty specjalistyczne +7,0%, budowa budynków +6,4%). Fakt, że wskaźnik agregujący materiały, sprzęt i robociznę rósł w szczycie w tempie zbliżonym do dynamiki wynagrodzeń, a wyraźnie szybciej niż przyjęte 3–4% dla deskowań, pośrednio potwierdza, że to składnik pracy był głównym motorem drożenia robót budowlanych. Ceny stali zbrojeniowej, cechujące się bardzo wysoką zmiennością (gwałtowny wzrost w latach 2021–2022 w następstwie zaburzeń łańcuchów dostaw po pandemii COVID-19, wzrostu cen energii i wojny w Ukrainie, a następnie korekta), celowo nie zostały włączone do modelu ilościowego – zaciemniałyby długookresową relację praca–deskowanie, a sama stal nie jest przedmiotem decyzji technologicznych badanych w rozprawie. Epizody drożenia stali i betonu dodatkowo zawężały jednak marże wykonawców i wzmacniały presję na szukanie oszczędności w organizacji robót deskowaniowych.

W badanej dekadzie ukształtowała się zatem wyraźna hierarchia tempa wzrostu kosztów. Najszybciej rosły koszty pracy: minimalne wynagrodzenie średnio o 10,3% rocznie, przeciętne wynagrodzenie o 8,6% rocznie, a rynkowe stawki robocizny kosztorysowej w latach 2024–2025 o 6–8% rocznie nawet w warunkach opadającej inflacji. Wolniej, i to głównie w epizodzie 2021–2023, rosły ceny materiałów podstawowych oraz zagregowane ceny produkcji budowlano-montażowej. Najwolniej – szacunkowo o 3–4% rocznie – rosły ceny udostępnienia deskowań systemowych. Skumulowany efekt ilustruje rysunek 5.23: po dziesięciu latach indeks kosztów pracy osiąga poziom 228 (wynagrodzenie przeciętne) lub 267 (wynagrodzenie minimalne) wobec poziomu 134–148 dla cen deskowań. Dynamika przeciętnego wynagrodzenia w żadnym roku nie spadła poniżej przyjętego pasma wzrostu cen deskowań (w 2016 r. – 3,8% – mieściła się w nim), a od 2021 r. przewyższała jego górną granicę dwu-, trzy-, a w 2024 r. blisko czterokrotnie.




*Rys. 5.23. Skumulowany wzrost kosztów pracy i cen deskowań w latach 2015–2025 (2015 = 100). Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS i Dz.U.; ceny deskowań – założenie (3–4% r/r).*

### 5.3.3. Model poglądowy relacji kosztu robocizny i dzierżawy deskowania oraz uwarunkowania podażowe rynku pracy

Aby przełożyć powyższe indeksy na wielkości bezpośrednio czytelne dla praktyki wykonawczej, zbudowano uproszczony model kosztu jednostkowego robót deskowaniowych, odniesiony do 1 m² deskowanej powierzchni stropu monolitycznego. Koszt pracy wyznaczono na podstawie przeciętnego wynagrodzenia w gospodarce narodowej (GUS), powiększonego o narzuty pracodawcy w łącznej wysokości 20,48% (składki emerytalne 9,76%, rentowe 6,50%, wypadkowa ok. 1,67%, FP 2,45%, FGŚP 0,10%), przy nominalnym czasie pracy 168 godzin miesięcznie; pełny miesięczny koszt pracodawcy wzrósł w ten sposób z ok. 4 699 zł w 2015 r. do ok. 10 727 zł w 2025 r. Łączną pracochłonność montażu i demontażu systemowego deskowania stropowego przyjęto na poziomie 0,75 r-g/m² jako wartość środkową typowego przedziału 0,5–1,0 r-g/m², zależnego od systemu, geometrii stropu i wysokości kondygnacji (założenie autora). Koszt dzierżawy deskowania stropowego w 2025 r. przyjęto na poziomie 30 zł/m² za miesięczny cykl (środek widełek 21–39 zł/m²/mies. z tabeli 5.34), a wartości dla lat wcześniejszych odtworzono wstecznie przy dynamice 3,5% rocznie. Model celowo pomija koszty betonu, stali, sprzętu dźwigowego i koszty pośrednie – jego przedmiotem jest wyłącznie relacja dwóch składników: robocizny deskowaniowej i udostępnienia deskowania. Wyniki zestawiono w tabeli 5.35 i na rysunku 5.24.

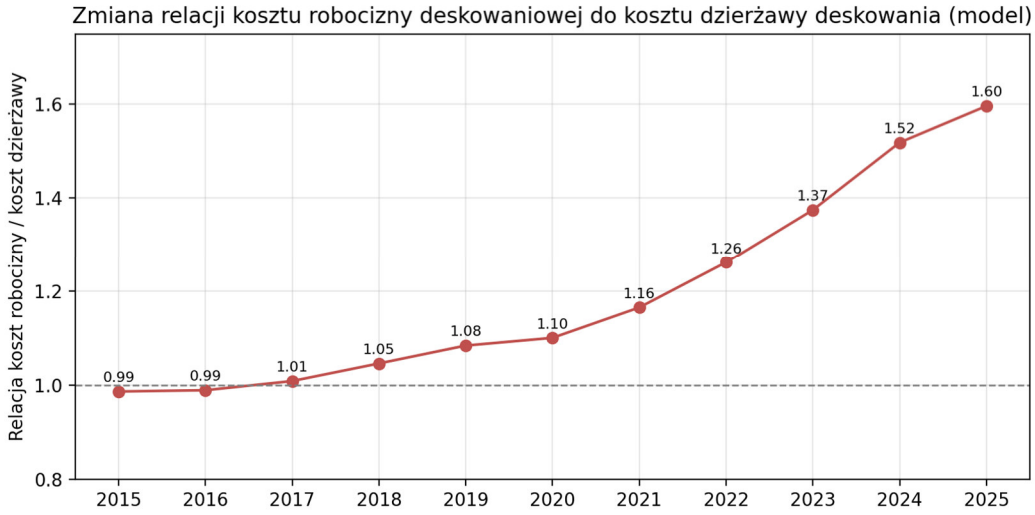
*Tabela 5.35. Model poglądowy: koszt roboczogodziny, robocizny deskowaniowej i dzierżawy deskowania stropowego w przeliczeniu na 1 m² w latach 2015–2025*

| Rok | Koszt 1 r-g [zł] | Robocizna 0,75 r-g/m² [zł/m²] | Dzierżawa 1 m²/mies. [zł] | Relacja robocizna / dzierżawa [–] | Równowartość dzierżawy w minutach pracy [min] |
|---|---|---|---|---|---|
| 2015 | 27,97 | 20,98 | 21,27 | 0,99 | 46 |
| 2016 | 29,02 | 21,77 | 22,01 | 0,99 | 46 |
| 2017 | 30,63 | 22,97 | 22,78 | 1,01 | 45 |
| 2018 | 32,88 | 24,66 | 23,58 | 1,05 | 43 |
| 2019 | 35,27 | 26,45 | 24,41 | 1,08 | 42 |

| Rok | Koszt 1 r-g [zł] | Robocizna 0,75 r-g/m² [zł/m²] | Dzierżawa 1 m²/mies. [zł] | Relacja robocizna / dzierżawa [–] | Równowartość dzierżawy w minutach pracy [min] |
|---|---|---|---|---|---|
| 2020 | 37,06 | 27,79 | 25,26 | 1,10 | 41 |
| 2021 | 40,61 | 30,46 | 26,14 | 1,16 | 39 |
| 2022 | 45,51 | 34,13 | 27,06 | 1,26 | 36 |
| 2023 | 51,32 | 38,49 | 28,01 | 1,37 | 33 |
| 2024 | 58,67 | 44,01 | 28,99 | 1,52 | 30 |
| 2025 | 63,85 | 47,89 | 30,00 | 1,60 | 28 |
| Zmiana 2015–2025 | +128,3% | +128,3% | +41,1% | +62% | –39% |

*Źródło: obliczenia własne na podstawie danych GUS oraz założeń opisanych w tekście (narzuty 20,48%, 168 h/mies., 0,75 r-g/m², dzierżawa 30 zł/m²/mies. w 2025 r., wsteczna dynamika cen deskowań 3,5% r/r). Wartości orientacyjne, służące analizie relacji, a nie kosztorysowaniu.*

Wymowa modelu jest jednoznaczna. W 2015 r. koszt robocizny związanej z jednym cyklem deskowania stropu (ok. 21 zł/m²) był praktycznie równy kosztowi miesięcznej dzierżawy samego deskowania (ok. 21 zł/m²), a relacja obu składników wynosiła 0,99. W 2025 r. koszt robocizny (ok. 48 zł/m²) przewyższa koszt dzierżawy (30 zł/m²) już o 60%, a relacja wzrosła do 1,60. Szczególnie obrazowa jest ostatnia kolumna tabeli 5.35: w 2015 r. miesiąc dzierżawy 1 m² deskowania stropowego „kosztował" około 46 minut pracy jednego pracownika, w 2025 r. – około 28 minut. Mierzone pracą ludzką deskowanie staniało zatem w ciągu dekady o blisko 40%; z punktu widzenia wykonawcy sprzęt deskowaniowy staje się relatywnie coraz tańszy, a człowiek – coraz droższy, a „środek ciężkości" kosztów robót deskowaniowych przesunął się wyraźnie ze sprzętu na człowieka. Przyjęte przeciętne wynagrodzenie GUS jest przy tym miarą ostrożną – przy wycenie pracy wykwalifikowanych brygad ciesielskich według rynkowych stawek robocizny kosztorysowej (Sekocenbud) dysproporcja byłaby jeszcze większa.




*Rys. 5.24. Relacja kosztu robocizny deskowaniowej do kosztu dzierżawy deskowania stropowego w latach 2015–2025 (model poglądowy). Źródło: obliczenia własne (założenia jak w tabeli 5.35).*

Obok cenowego wymiaru drożenia pracy na sytuację wykonawców konstrukcji żelbetowych oddziałuje wymiar ilościowy – ograniczona i strukturalnie kurcząca się podaż wykwalifikowanych pracowników fizycznych. Starzenie się kadry rzemieślniczej (cieśli, zbrojarzy, betoniarzy), niedostateczny napływ absolwentów szkolnictwa zawodowego, konkurencja płacowa ze strony innych sektorów gospodarki oraz emigracja zarobkowa sprawiły, że luka kadrowa stała się jedną z głównych

barier rozwoju przedsiębiorstw wykonawczych. Częściową odpowiedzią rynku było szerokie zatrudnianie pracowników migrujących, jednak podaż ta okazała się wrażliwa na czynniki zewnętrzne – pandemię COVID-19 oraz wojnę w Ukrainie, która z jednej strony zwiększyła migrację ogółem, z drugiej odciągnęła część mężczyzn w wieku produkcyjnym z polskich budów. Ograniczona podaż pracy jest samodzielnym mechanizmem podtrzymującym wysoką dynamikę płac – opisane w podrozdziale 5.3.2 wzrosty nie były więc jedynie efektem regulacyjnym, lecz także rynkowym, co czyni je trwałymi. Ponadto nawet przy gotowości poniesienia wyższych kosztów wykonawca nie zawsze jest w stanie zwiększyć liczebność brygad deskowaniowych; czas i pracochłonność operacji deskowaniowych stają się więc ograniczeniem nie tylko kosztowym, ale i przepustowym. Rozwiązania zmniejszające zapotrzebowanie na pracę zyskują w tych warunkach podwójne uzasadnienie: obniżają koszty i uniezależniają harmonogram budowy od niedoborów kadrowych.

Opisana zmiana relacji cen czynników produkcji ma bezpośrednie konsekwencje decyzyjne dla wykonawców. Po pierwsze, zmienia się kryterium wyboru systemu deskowaniowego. Gdy praca była względnie tania, racjonalne było minimalizowanie kosztu najmu (wybór systemów tańszych, choć bardziej pracochłonnych, np. drobnowymiarowych składanych ręcznie); obecnie o łącznym koszcie decyduje przede wszystkim pracochłonność montażu i demontażu, a systemy droższe w najmie, lecz szybsze w obrocie (wielkowymiarowe, przestawiane żurawiem, ze zintegrowanymi pomostami, stoliki stropowe, systemy ze zrzutem głowicowym) stają się ekonomicznie uzasadnione w coraz szerszym spektrum obiektów. Po drugie, roboczogodzina zaoszczędzona na 1 m² deskowania była w 2015 r. warta ok. 28 zł, a w 2025 r. ok. 64 zł, co oznacza, że próg opłacalności rozwiązań redukujących pracochłonność (prefabrykacja zestawów, optymalizacja podziału na takty, cyfrowe planowanie rotacji, szkolenie brygad) obniżył się ponad dwukrotnie. Po trzecie, skoro miesiąc dzierżawy 1 m² deskowania stropowego kosztuje tyle, co ok. 30 minut pracy, wydłużenie najmu bywa tańsze niż intensyfikacja pracy w nadgodzinach, a jednocześnie szybsza rotacja mniejszego kompletu deskowań pozwala ograniczyć oba składniki naraz. Po czwarte, utrzymujący się wysoki wzrost płac w połączeniu z niedoborem wykwalifikowanych cieśli czyni racjonalnymi rozwiązania jeszcze niedawno uznawane za nadmiarowe: deskowania samowznoszące, systemy o zredukowanej liczbie luźnych elementów, elementy lekkie umożliwiające pracę mniej licznych brygad oraz narzędzia wspomagające planowanie robót deskowaniowych.

Przesunięcie kosztowe wzmacnia również zasadność stosowania w robotach deskowaniowych narzędzi szczupłego zarządzania (LEAN Management). W warunkach taniej pracy marnotrawstwo czasu brygad (oczekiwanie na żuraw, zbędny transport elementów, poprawki, poszukiwanie drobnych akcesoriów) miało ograniczony wymiar finansowy; przy koszcie roboczogodziny przekraczającym 60 zł każda godzina pracy nieprzynoszącej wartości staje się wymiernym kosztem. Planowanie taktowe (Takt Planning), system Last Planner, standaryzacja stanowisk (5S) i mapowanie strumienia wartości procesu deskowania pozwalają ten koszt systematycznie identyfikować i redukować, a ich efekt ekonomiczny w przeliczeniu na jedną zaoszczędzoną roboczogodzinę jest dziś nominalnie ponad dwukrotnie większy niż dekadę temu. Analogicznie rośnie znaczenie poprawnie zaplanowanej rotacji deskowań: skrócenie cyklu obrotu kompletu redukuje równocześnie koszt dzierżawy (mniej sprzęto-miesięcy), koszt pracy (mniej przestojów brygad) i koszty pośrednie budowy (krótszy czas realizacji stanu surowego).

Przedstawiona analiza ma świadomie przyjęte ograniczenia. Dynamika cen deskowań (3–4% rocznie) jest założeniem eksperckim, niepodpartym oficjalnym wskaźnikiem statystyki publicznej, ponieważ taki wskaźnik nie jest w Polsce publikowany; przyjęcie pasma scenariuszy łagodzi, lecz nie eliminuje tego ograniczenia. Miarą kosztu pracy jest przeciętne wynagrodzenie w gospodarce narodowej, a nie jednorodny szereg płac w budownictwie, którym nie jest dostępny dla całego okresu. Model operuje wartościami uśrednionymi i pomija zmienność regionalną, sezonową oraz efekty skali – jego celem jest ilustracja relacji, a nie kalkulacja kosztorysowa konkretnego obiektu. Ceny rynkowe najmu deskowań i betonu przytoczono z ogólnodostępnych cenników o charakterze ofertowym, od których ceny transakcyjne mogą odbiegać.

### 5.3.4. Rozwój prefabrykacji żelbetowej w Europie i w Polsce oraz jego skutki w segmentach hal wielkopowierzchniowych, obiektów mostowych i ITPOK

Rynek prefabrykacji betonowej jest w skali globalnej rynkiem dużym i rosnącym w stabilnym tempie. Komercyjne raporty rynkowe, choć różnią się definicjami i metodyką, są zgodne co do kierunku i rzędu wielkości: wartość globalnego rynku prefabrykatów betonowych szacowana jest na około 115–130 mld USD (lata 2021–2024), a prognozowane średnioroczne tempo wzrostu mieści się w przedziale 5,0–6,3% (tabela 5.36). W kolejnych edycjach prognoz horyzont przesuwał się w przód, a poziom

prognozowanej wartości pozostawał zbliżony lub rósł, co świadczy o trwałości trendu mimo pandemii COVID-19 i szoku cenowego lat 2021–2023. Przy stałej stopie wzrostu rzędu 5–6% rocznie wartość rynku podwaja się co 12–14 lat. Najszybciej rosnącym segmentem zastosowań jest infrastruktura (CAGR 6,9% w prognozie Grand View Research z 2020 r. (Grand View Research, 2025)), a największym segmentem produktowym pozostają konstrukcyjne elementy budynków – belki, słupy, pale i elementy fundamentowe, a więc dokładnie te elementy, które w technologii monolitycznej wymagają deskowań.

*Tabela 5.36. Wartość globalnego rynku prefabrykacji betonowej według wybranych raportów rynkowych*

| Źródło (rok publikacji) | Rok bazowy | Wartość w roku bazowym [mld USD] | Rok prognozy | Wartość prognozowana [mld USD] | Deklarowany CAGR [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| Grand View Research (2018) | 2017 | b.d. | 2025 | 130,11 | 6,1 |
| Grand View Research (2020) | 2019 | b.d. | 2027 | 145,91 | 6,3 |
| Grand View Research (2021) | 2020 | b.d. | 2028 | 139,33 | 5,3 |
| Grand View Research (2022) | 2021 | b.d. | 2030 | 156,13 | 5,5 |
| Inkwood Research (2022) | 2021 | 115,61 | 2030 | 186,23 | 5,45 |
| The Business Research Company (2024) | 2023 | 120,39 | 2028 | 153,05 | 5,0 |
| Expert Market Research (2025) | 2024 | 115,48 | 2034 | 188,10 | 5,0 |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie komunikatów prasowych wymienionych raportów rynkowych. b.d. – wartość bazowa nie została podana w komunikacie. Raporty stosują różne definicje rynku, dlatego wartości nie są w pełni porównywalne; zgodny jest kierunek – wszystkie źródła prognozują CAGR rzędu 5–6% rocznie.*

W Europie przemysł prefabrykacji betonowej reprezentowany jest przez federację BIBM, zrzeszającą 15 federacji krajowych. Według danych BIBM europejska produkcja prefabrykatów betonowych była warta około 24 mld EUR w 2014 r. i około 28 mld EUR w 2016 r., przy zatrudnieniu około 164 tys. osób w około 8 tys. zakładów; w najnowszych materiałach federacji mowa jest o około 165 tys. zatrudnionych w około 7 tys. zakładów i około 5 tys. przedsiębiorstw. Raport Grand View Research szacuje europejski rynek na 25,5 mld USD w 2023 r. (24,1% rynku globalnego) i prognozuje CAGR 4,0% w latach 2024–2030 (Grand View Research, 2024a). Jest to rynek dojrzały, o ugruntowanej pozycji w krajach skandynawskich, Niemczech, Holandii i Belgii, gdzie prefabrykacja od dziesięcioleci dominuje w budownictwie przemysłowym i znaczącej części mieszkaniowego; polski rynek dopiero zbliża się do tego modelu, co oznacza, że potencjał substytucji technologii monolitycznej w Polsce jest wciąż daleki od wyczerpania. Przemysł prefabrykacji w Europie jest ponadto silnie zaangażowany w agendę dekarbonizacji (BIBM Decarbonisation Pledge z 2023 r.), co – w warunkach zaostrzających się wymagań środowiskowych opisanych w podrozdziale 3.1 – daje mu dodatkowy argument w konkurencji z technologią monolityczną, obarczoną większym zużyciem materiału, większą ilością odpadów oraz koniecznością wielokrotnego transportu i przeładunku deskowań.

Najbardziej systematyczne dane o polskim rynku publikuje firma badawcza Spectis w cyklicznym raporcie „Rynek ciężkiej prefabrykacji betonowej w Polsce”, obejmującym elementy z betonu zbrojonego i sprężonego produkowane w specjalistycznych zakładach – prefabrykaty konstrukcyjne (fundamenty, słupy, belki, stropy, ściany, schody, moduły łazienkowe, doki) oraz inżynieryjne (belki mostowe, pale, płyty drogowe i tramwajowe, podkłady kolejowe, ściany oporowe, ekrany akustyczne, tubingi tunelowe, słupy i żerdzie, zbiorniki) (Sosna B., 2026). Wartości rynku według kolejnych edycji raportu zestawiono w tabeli 5.37.

*Tabela 5.37. Rynek ciężkiej prefabrykacji betonowej w Polsce w latach 2021–2026 według raportów Spectis*

| Rok | Wartość rynku [mld zł] | Dynamika r/r [%] | Indeks (2021 = 100) | Udział w produkcji bud.-mont. firm >9 prac. [%] | Baza raportu (liczba producentów) | Status danych |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2021 | 3,5 | – | 100,0 | b.d. | 50 | dane |
| 2022 | 4,2 | 20,0 | 120,0 | 3,0 | 50 | szacunek |
| 2023 | 3,7 | -11,9 | 105,7 | 2,3 | 50 | dane |
| 2024 | 4,5 (3,8)* | 21,6* | 128,6 | 2,8 (2,4)* | 80 (50)* | dane |
| 2025 | 4,9 | 8,9 | 140,0 | 2,9 | 80 | szacunek |
| 2026 | 5,5 | 12,2 | 157,1 | b.d. | 80 | prognoza |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie raportów Spectis. * Od edycji 2026–2031 Spectis rozszerzył bazę z 50 do 80 największych producentów; w nawiasach podano wartości dla 2024 r. według edycji 2025–2030 (baza 50 firm), dynamika 2023/2024 jest więc częściowo efektem zmiany bazy. Rekordowy udział prefabrykacji w produkcji budowlano-montażowej odnotowano w 2022 r.: 3,6% (baza 80 firm) lub 3,0% (baza 50 firm).*

Rynek ciężkiej prefabrykacji osiągnął 3,5 mld zł w 2021 r. i 4,2 mld zł w 2022 r., po czym w latach 2023–2024 przeszedł korektę wynikającą z ograniczenia wolumenu zamówień (spowolnienie w budownictwie przemysłowo-magazynowym i mieszkaniowym) oraz spadku średniej ceny prefabrykatów w ślad za korektą cen stali, stanowiącej 65–75% kosztów materiałowych tej branży. Analitycy Spectis oceniają, że rynek „znajduje się obecnie w fazie ponownego przyspieszenia po okresie korekty w latach 2023–2024, co oznacza powrót na ścieżkę dynamicznego rozwoju" i prognozują rekordowe 5,5 mld zł w 2026 r. (SPECTIS, 2026). Samo rozszerzenie bazy raportu z 50 do 80 producentów jest sygnałem rozwoju: rynek stał się na tyle liczny i istotny, że dotychczasowa próba przestała go reprezentować. Dłuższą perspektywę daje szerszy agregat – rynek wyrobów betonowych (beton zbrojony, sprężony, wirowany i wibroprasowany), również monitorowany przez Spectis (tabela 5.38). Jego wartość w ciągu dekady uległa podwojeniu – przy czym część wzrostu to efekt drożenia stali, cementu, kruszyw, energii i pracy – a udział w produkcji budowlano-montażowej ogółem wzrósł z około 3% (2011–2013) do ponad 4% (2021–2022), co oznacza, że prefabrykacja rosła szybciej niż całe budownictwo.

*Tabela 5.38. Rynek wyrobów betonowych w Polsce – wartość i udział w produkcji budowlano-montażowej według Spectis*

| Rok | Wartość rynku [mld zł] | Indeks (2011 = 100) | Udział w produkcji bud.-mont. [%] | Charakter danych |
|---|---|---|---|---|
| 2011 | ok. 5,0 | 100 | <3 (ogółem) | szacunek („dwa razy więcej niż 10 lat wcześniej") |
| 2013 | b.d. | – | 3 (ogółem) | dane |
| 2019 | 9,2 | 184 | 8,2 (firmy >9 prac.) | dane |
| 2020 | 9,3 | 186 | 8,5 (firmy >9 prac.) | prognoza z 2020 r. |
| 2021 | 10,6 | 212 | >4 (ogółem) | dane (+14% r/r) |
| 2022 | 11,7 | 234 | >4 (ogółem) | prognoza z 2022 r. |
| 2024 | 12,1 | 242 | b.d. | prognoza z 2024 r. |
| 2025 | >13,0 | 260 | b.d. | prognoza z 2024 r. |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie komunikatów Spectis. Udziały podawane w relacji do produkcji budowlano-montażowej ogółem i do produkcji firm zatrudniających powyżej 9 pracowników nie są ze sobą porównywalne; każda z par pokazuje jednak wzrost udziału.*

Polski rynek prefabrykacji rośnie więc w długim okresie w tempie odpowiadającym stałej, dodatniej stopie rzędu 7–10% nominalnie, co – po odjęciu efektów cenowych – oznacza realny wzrost szybszy niż wzrost całego budownictwa. Przebieg ma charakter zbliżony do wykładniczego w tym sensie, że przyrosty bezwzględne w kolejnych latach są coraz większe, choć nie jest wolny od korekt koniunkturalnych. Udział rzędu 3–4% wartości produkcji budowlano-montażowej nie oddaje przy tym znaczenia prefabrykacji dla rynku deskowań: prefabrykaty zastępują wyłącznie tę część robót, która w technologii monolitycznej byłaby deskowana, a nie roboty ziemne, drogowe, instalacyjne czy wykończeniowe; w relacji do robót żelbetowych – jedynego rynku istotnego dla dostawcy deskowań – udział ten jest wielokrotnie wyższy. O strukturalnym charakterze zmiany świadczą także czynniki jakościowe raportowane przez Spectis. W segment prefabrykacji inwestują podmioty z sąsiednich ogniw łańcucha wartości: producenci betonu towarowego (Holcim Polska, Thomas Beton, Betard), firmy wykonawcze (Goldbeck, Depenbrock, Dekpol) i deweloperzy mieszkaniowi (WPBM Mój Dom, Moderna Holding); firma wykonawcza posiadająca własną wytwórnię przestaje być klientem dostawcy deskowań na budowie i staje się co najwyżej klientem dostawcy form stalowych do zakładu. Popyt na prefabrykaty inżynieryjne będzie napędzany przez inwestycje kolejowe (blisko 400 największych inwestycji kolejowych i tramwajowych o łącznej wartości ponad 280 mld zł, z czego nawet 10% może przypaść na prefabrykaty) i energetyczne (ponad 400 inwestycji o wartości ponad 600 mld zł). Czwartym pod względem wartości segmentem rynku stały się ściany kubaturowe, których znaczenie rośnie wraz z popularnością budynków modułowych – prefabrykacja wkracza zatem także w budownictwo mieszkaniowe i użyteczności publicznej, dotąd będące domeną monolitu (przedszkole na osiedlu Janów w Łodzi, biblioteka na Białołęce, osiedla we Włocławku realizowane przez Pekabex).

Hale magazynowe, logistyczne i produkcyjne były w ostatniej dekadzie najszybciej rosnącym segmentem polskiego budownictwa kubaturowego. Według raportów Cushman & Wakefield, AXI IMMO i innych firm doradczych całkowite zasoby nowoczesnej powierzchni magazynowo-przemysłowej w Polsce wzrosły z około 13 mln m² na koniec 2017 r. do około 36,6 mln m² na koniec 2025 r. (Cushman & Wakefield, 2017), co daje niemal potrojenie zasobów w ciągu ośmiu lat (tabela 5.39). Polska jest obecnie piątym rynkiem magazynowym w Europie po Niemczech, Francji, Holandii i Wielkiej Brytanii. Po rekordowych latach 2021–2022 rynek wszedł w fazę stabilizacji: w 2025 r. oddano około 1,7 mln m², najmniej od 2016 r., a deweloperzy uzależniają start inwestycji od umów przednajmu.

*Tabela 5.39. □asoby nowoczesnej powierzchni magazynowo-przemysłowej w Polsce w latach 2017–2025 oraz konsekwencje dla dostawcy deskowań*

| Rok (koniec) | Zasoby [mln m²] | Średnioroczna dynamika od poprzedniego punktu [%] | Indeks (2017 = 100) | Udział konstrukcji prefabrykowanych w nowych halach [%] (założenie autora) | Udział segmentu hal w obrocie PERI Polska [%] (dane wewnętrzne) |
|---|---|---|---|---|---|
| 2017 | 13,0 | – | 100,0 | b.d. | 2–3 |
| 2019 | 18,6 | 19,6 | 143,1 | b.d. | 2–3 |
| 2021 | 24,3 | 14,3 | 186,9 | ok. 90 | 2–3 |
| 2024 | 34,6 | 12,5 | 266,2 | ok. 95 | b.d. |
| 2025 | 36,6 | 5,8 | 281,5 | ok. 95 | bliski 0 |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie raportów Cushman & Wakefield i AXI IMMO; udział konstrukcji prefabrykowanych oraz udział segmentu w obrocie – szacunki i dane wewnętrzne PERI Polska Sp. z o.o., niepochodzące ze statystyki publicznej.*

Paradoks tego segmentu z punktu widzenia dostawcy deskowań polega na tym, że ponad 20 mln m² nowych hal w ciągu ośmiu lat nie przełożyło się na proporcjonalny popyt na deskowania. Według obserwacji autora konstrukcje nośne hal wielkopowierzchniowych w Polsce są obecnie w około 95% realizowane z prefabrykatów: słupów żelbetowych ze stopami kielichowymi, sprężonych dźwigarów dachowych i podciągów, belek podsuwnicowych, prefabrykowanych ścian i podwalin, a coraz częściej także prefabrykowanych stóp fundamentowych. Roboty monolityczne ograniczają się do posadzek przemysłowych (które nie wymagają deskowań systemowych), fragmentów fundamentów i sporadycznie części biurowo-socjalnych, a na rynku dominują wykonawcy dysponujący własnym zapleczem prefabrykacji lub stałą kooperacją z wytwórniami (m.in. Goldbeck, Panattoni z partnerami, Pekabex, Depenbrock), dla których technologia prefabrykowana jest domyślna, a nie alternatywna.

Jeszcze około pięciu lat temu segment hal generował 2–3% rocznego obrotu PERI Polska (głównie deskowania fundamentów, ścian oporowych, doków i części biurowych); obecnie udział ten jest bliski zeru. Hale były segmentem o bardzo powtarzalnej geometrii, dużych seriach i krótkich cyklach, w którym systemowe deskowania słupowe i ścienne osiągały najwyższe rotacje – ich utrata jest wzorcowym przykładem mechanizmu, który w kolejnych latach powtórzył się w segmentach mostowym i energetycznym.

Drogowe obiekty mostowe o małych i średnich rozpiętościach (wiadukty nad drogami i liniami kolejowymi, mosty nad ciekami, przejścia dla zwierząt) stanowią liczebnie największą grupę obiektów inżynierskich powstających w ramach programu budowy dróg ekspresowych. W technologii monolitycznej ich ustroje niosące (płytowe, płytowo-belkowe, skrzynkowe) wymagają pełnego deskowania i rusztowania podporowego, a więc angażują bardzo duże ilości sprzętu deskowaniowego na stosunkowo długi czas (fot. 5.7). Alternatywą jest ustrój zespolony z prefabrykowanych belek strunobetonowych – typu T (wg dokumentacji Mosty-Łódź, rozpiętości 12–27 m), Kujan i Kujan NG (wg dokumentacji Transprojekt, rozpiętości 9–18 m i większe), MG-T, DS i pochodnych – układanych żurawiem na przyczółkach i filarach, a następnie zespalanych monolityczną płytą pomostową (fot. 5.6). Kształt półki górnej belek T i MG-T oraz ułożenie belek Kujan „jedna obok drugiej” eliminują potrzebę deskowania pod płytę pomostową. Belki produkuje w Polsce kilku dużych wytwórców (Pekabex, Betard, Fabud WKB, IMB-Podbeskidzie, Fabet i inni), co zapewnia konkurencję cenową i dostępność.



*Fot. 5.6. Budowa drogi ekspresowej S11 Koszalin – □egrze Pomorskie: obiekt mostowy z ustrojem niosącym z prefabrykowanych belek strunobetonowych ułożonych na monolitycznych przyczółkach; deskowanie ograniczone do podpór, przyczółków i skrzydeł. Źródło: Archiwum PERI Polska Sp. z o.o.*



*Fot. 5.7. Obwodnica Bolkowa w ciągu dróg krajowych nr 3 i 5: obiekt mostowy z monolitycznym ustrojem niosącym na pełnym deskowaniu dźwigarowym i rusztowaniu podporowym. Źródło: Archiwum PERI Polska Sp. z o.o.*

Studium przypadku stanowi droga ekspresowa S10 na odcinku Szczecin–Piła – jedna z największych, jednorodnych technologicznie inwestycji drogowych realizowanych obecnie w Polsce, prowadzona równolegle na ośmiu odcinkach przez kilku wykonawców (GDDKiA, 2024). Jej charakterystykę zestawiono w tabeli 5.40. Na przykład na odcinku Suchań–Recz (19,6 km) przewidziano 14 obiektów mostowych: 11 wiaduktów, dwie estakady i most, a na odcinku Recz–Cybowo – sześć wiaduktów, most oraz siedem przejść dla dużych zwierząt.

*Tabela 5.40. Droga ekspresowa S10 Szczecin–Piła – charakterystyka zadania inwestycyjnego*

| Parametr | Wartość |
|---|---|
| Długość realizowanego odcinka | ok. 113 km, 8 odcinków realizacyjnych |
| Formuła realizacji i harmonogram | projektuj i buduj: 10 mies. na projekt budowlany, ok. 7 mies. procedura ZRID, 22 mies. robót; zakończenie w 2028 r. |
| Węzły drogowe / wiadukty / estakady / górne przejścia dla zwierząt | 13 / 56 / 8 / 20 |
| Łącznie obiektów mostowych (bez przepustów i przejść dolnych) | 84 |
| Wykonawcy wybranych odcinków | Budimex (Stargard–Suchań, Piecnik–Wałcz); konsorcjum Kobylarnia i Mirbud (Suchań–Recz, Recz–Cybowo) |
| Suma najniższych ofert dla sześciu odcinków Suchań–Piła | ok. 3,72 mld zł |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie komunikatów GDDKiA i Ministerstwa Infrastruktury.*

Na podstawie doświadczeń PERI Polska z obsługi wykonawców obiektów mostowych S10 autor szacuje, że ustroje niosące obiektów o typowych rozpiętościach (wiadukty i mosty jedno- i wieloprzęsłowe do około 30 m rozpiętości przęsła) są na tej inwestycji realizowane w około 85% z prefabrykowanych belek strunobetonowych, a jedynie w około 15% jako monolityczne na deskowaniu i rusztowaniu podporowym; monolit pozostaje domeną estakad, obiektów w łukach o skomplikowanej geometrii oraz przejść dla zwierząt o dużych szerokościach. Jeszcze około 2015 r. – w ocenie autora opartej na realizacjach PERI Polska z lat 2014–2016 – udział prefabrykowanych ustrojów niosących nie

przekraczał 40%. W ciągu dekady rynek deskowań ustrojów niosących w tej klasie obiektów skurczył się więc o około trzy czwarte, przy jednoczesnym wzroście liczby realizowanych obiektów. Zmiana ta dobrze koresponduje z ustaleniami podrozdziałów 5.3.2–5.3.3: ułożenie kompletu belek na jednym przęśle zajmuje brygadzie montażowej z żurawiem jeden do dwóch dni, podczas gdy zadeskowanie, zazbrojenie, zabetonowanie i rozdeskowanie równoważnego ustroju monolitycznego to kilka tygodni pracy brygad ciesielskich, zbrojarskich i betoniarskich, których koszt roboczogodziny wzrósł w dekadzie o ponad 128%. Formuła „projektuj i buduj" z 22-miesięcznym oknem na roboty oraz kryteria przetargowe premiujące wydłużenie gwarancji na obiekty mostowe dodatkowo skłaniają wykonawców do technologii o krótkim cyklu i powtarzalnej jakości fabrycznej. Dla dostawcy deskowań pozostają deskowania fundamentów, przyczółków, filarów i skrzydeł, deskowania gzymsów oraz – w części monolitycznej – rusztowania podporowe i dźwigary: zakres istotny, lecz nieporównanie mniejszy i o krótszym czasie zaangażowania sprzętu.

Instalacje termicznego przekształcania odpadów komunalnych są obiektami, których żelbetowa część konstrukcyjna – bunkier (fosa) na odpady o głębokości kilkunastu metrów, ściany magazynu paliwa o wysokości 25–30 m, fundamenty kotłów i turbozespołów, konstrukcje wsporcze instalacji oczyszczania spalin – była do niedawna w Polsce realizowana w całości w technologii monolitycznej. Obiekty te wymagają deskowań ścian wysokich, jednostronnych i konstrukcji masywnych, rusztowań podporowych dużej nośności oraz systemów wspinających, a czas zaangażowania sprzętu liczony jest w wielu miesiącach (fot. 5.8). Do około 2023 r. wszystkie polskie realizacje ITPOK (m.in. Kraków 2013–2016, Gdańsk, Warszawa 2021–2025) były w 100% monolityczne, a segment stanowił średnio 5–7% rocznego obrotu PERI Polska. Otoczenie rynkowe segmentu jest przy tym wyjątkowo korzystne: od 2022 r. NFOŚiGW prowadzi program wsparcia budowy ITPOK z budżetem 6 mld zł (2 mld zł dotacji i 4 mld zł instrumentów zwrotnych), w trzecim naborze na liście dotacyjnej znalazło się 39 projektów, liczba działających instalacji wzrosła w latach 2025–2026 z ośmiu do dziesięciu, a Centrum Energii Włocławek będzie dwunastą instalacją tego typu w Polsce. Właśnie w momencie, gdy segment wchodzi w fazę wzrostu, technologia jego realizacji zmienia się na niekorzyść deskowań, co ilustrują dwie realizowane obecnie inwestycje (tabela 5.41).



*Fot. 5.8. Budowa □akładu Termicznego Przekształcania Odpadów Komunalnych w Gdańsku: monolityczny bunkier na odpady realizowany na deskowaniach ściennych z pomostami i rusztowaniu podporowym dużej nośności. Źródło: Archiwum PERI Polska Sp. z o.o.*

*Tabela 5.41. Realizowane instalacje w Gliwicach i we Włocławku – charakterystyka*

| Parametr | Gliwice – Park Zielonej Energii (blok parowy z kotłem wielopaliwowym) | Włocławek – Centrum Energii Włocławek (ITPOK) |
|---|---|---|
| Inwestor | PEC-Gliwice Sp. z o.o. | PreZero Polska (spółka EnergiaNova) |
| Wykonawca | konsorcjum: Mostostal Zabrze GPBP S.A. (lider), PRUiM S.A., Oschatz Power GmbH | konsorcjum: PORR S.A. (lider), TM.E. S.p.A. – Termomeccanica Ecologia |
| Umowa / start budowy | 09.05.2025 | 04.12.2025 (pierwsza łopata); maj 2026 (kamień węgielny) |
| Przepustowość | ok. 40 tys. t odpadów/rok | ok. 90 tys. t odpadów/rok |
| Produkcja ciepła i energii elektrycznej | ok. 490 tys. GJ; ponad 20 GWh | ok. 650–700 tys. GJ; ok. 45 tys. MWh |
| Wartość / termin | ponad 475 mln zł (cały Park Zielonej Energii); termin – b.d. | wartość – b.d.; uruchomienie – połowa 2028 r. |
| Technologia konstrukcji nadziemnej | ustrój nośny magazynu paliwa (wys. ok. 28 m) w przeważającej części żelbetowy prefabrykowany; roboty monolityczne poniżej poziomu terenu | ściany szczelinowe (16–17 m) i fundamenty monolityczne; dalszy etap: „konstrukcje żelbetowe oraz montaż elementów prefabrykowanych” |
| Szacowany udział prefabrykacji w konstrukcji nadziemnej (obserwacja autora) | ok. 90% | ok. 90% |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie komunikatów inwestorów i wykonawców; udział prefabrykacji (dane wewnętrzne PERI Polska Sp. z o.o.).*

Szczególnie cenne jest świadectwo samego wykonawcy. W artykule opublikowanym we wrześniu 2026 r. w „Inżynierze Budownictwa” kierownik budowy z Mostostalu Zabrze GPBP oraz projektanci z B-Project opisują, że magazyn paliwa gliwickiego bloku – obiekt kubaturowy o wysokości blisko 28 m – ma ustrój nośny wykonany w przeważającej części jako żelbetowy prefabrykowany, a decyzję tę podjęto na podstawie doświadczeń z dwóch największych ITPOK w Polsce (Kraków 2013–2016, Warszawa 2021–2025), gdzie analogiczny magazyn paliwa wykonano jeszcze w technologii monolitycznej (Kowalczyk J. i in., 2026). Jako zalety projektowe autorzy wskazują przegubowe ukształtowanie połączeń na łożyskach elastomerowych i tulejach, zrealizowanie znacznej części skurczu betonu w zakładzie przed montażem oraz ograniczenie zarysowań termiczno-skurczowych typowych dla rozległych konstrukcji monolitycznych, a jako wyzwanie – zapewnienie szczelności powłoki, rozwiązane na poziomie połączeń. Jako zalety wykonawcze wymieniają równoległość produkcji prefabrykatów z robotami monolitycznymi poniżej terenu, skrócenie czasu realizacji wobec betonowania in situ, „które wiąże się z montażem i przestawianiem deskowań, rusztowań oraz przerwami technologicznymi”, niezależność od pogody i niskich temperatur, wyższą dokładność wymiarową oraz zmniejszenie pracochłonności i liczby operacji na wysokości dzięki montażowi prowadzonemu przez wyspecjalizowaną ekipę. Jest to niemal kompletny katalog argumentów, którymi prefabrykacja wypiera technologię monolityczną – i tym samym deskowania – z kolejnego segmentu. Według obserwacji autora obie inwestycje są w części nadziemnej w około 90% prefabrykowane, a monolit ograniczony jest do robót poniżej poziomu terenu (ściany szczelinowe, płyty fundamentowe, dolne części bunkrów), fundamentów urządzeń oraz zespoleń; w nowych inwestycjach segment nie generuje już istotnych przychodów z deskowań. Widoczny jest przy tym efekt uczenia się: wykonawca, który raz zrealizował magazyn paliwa w prefabrykacji, w kolejnych przetargach będzie oferował tę technologię jako domyślną, a jego konkurenci – aby utrzymać konkurencyjność cenową i terminową – będą musieli podążyć tą samą drogą.

### 5.3.5. Synteza – koszt pracy jako wspólny mechanizm zmian, konsekwencje dla rynku deskowań i metody FFF oraz wnioski

Przesunięcia technologiczne opisane w podrozdziale 5.3.4 nie są zjawiskami niezależnymi; łączy je wspólny mechanizm ekonomiczny, którego ilościową podstawę dostarczają podrozdziały 5.3.2 i 5.3.3. Zestawienie w tabeli 5.42 pokazuje, że dynamika rynku prefabrykacji (7–10% rocznie nominalnie) jest zbieżna z dynamiką kosztów pracy (8,6–10,3%), a obie wyraźnie przewyższają dynamikę cen deskowań (3–4%).

*Tabela 5.42. Skumulowany wzrost kosztów pracy i cen deskowań na tle dynamiki rynku prefabrykacji*

| Kategoria | Skumulowany wzrost [%] | CAGR [%] | Okres i źródło |
|---|---|---|---|
| Przeciętne wynagrodzenie w gospodarce narodowej | +128,3 | 8,6 | 2015–2025; GUS (tab. 5.33) |
| Minimalne wynagrodzenie za pracę | +166,6 | 10,3 | 2015–2025; rozporządzenia RM (tab. 5.33) |
| Ceny dzierżawy/sprzedaży deskowań – scenariusz 4% | +48,0 | 4,0 | 2015–2025; założenie autora (podrozdz. 5.3.2) |
| Ceny dzierżawy/sprzedaży deskowań – scenariusz 3% | +34,4 | 3,0 | 2015–2025; założenie autora (podrozdz. 5.3.2) |
| Rynek ciężkiej prefabrykacji w Polsce (Spectis) | +57,1 | 9,5 | 2021–2026F; tab. 5.37 (uwaga na zmianę bazy raportu) |
| Rynek wyrobów betonowych w Polsce (Spectis) | +160 (2011→2025F) | ok. 7,1 | 2011–2025F; tab. 5.38 |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS, Dz.U., raportów Spectis..*

Nie jest to przypadek. Prefabrykacja jest w istocie sposobem przeniesienia roboczogodzin z placu budowy do hali produkcyjnej, gdzie praca jest wydajniejsza (formy stacjonarne, stanowiskowa organizacja pracy, mechanizacja i automatyzacja zbrojenia i betonowania, brak strat czasu na transport pionowy i warunki pogodowe) oraz łatwiejsza do obsadzenia. Im droższa i trudniej dostępna jest roboczogodzina na budowie, tym większą wartość ma każda roboczogodzina, którą prefabrykacja z budowy eliminuje. Aby to zilustrować, model poglądowy z podrozdziału 5.3.3 (1 m² deskowanej powierzchni stropu, 0,75 r-g/m²) zastosowano do trzech scenariuszy redukcji robocizny na budowie w wyniku prefabrykacji: 30%, 50% i 70% (tabela 5.43). Wysokość redukcji jest założeniem autora; model celowo pomija koszt samego prefabrykatu, transportu i dźwigu, ponieważ jego przedmiotem nie jest pełny rachunek opłacalności prefabrykacji, lecz wyłącznie wpływ drożenia pracy na wartość oszczędności.

*Tabela 5.43. Model poglądowy: nominalna wartość oszczędności robocizny na budowie dzięki prefabrykacji w latach 2015 i 2025*

| Scenariusz redukcji robocizny na budowie | Robocizna monolit [zł/m²] 2015 / 2025 | Robocizna po prefabrykacji [zł/m²] 2015 / 2025 | Oszczędność [zł/m²] 2015 / 2025 | Oszczędność 2025 jako % miesięcznej dzierżawy deskowania (30 zł/m²) | Wzrost nominalnej oszczędności 2025/2015 [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| zachowawczy – 30% | 20,98 / 47,89 | 14,69 / 33,52 | 6,29 / 14,37 | 47,9 | +128,3 |
| umiarkowany – 50% | 20,98 / 47,89 | 10,49 / 23,95 | 10,49 / 23,94 | 79,8 | +128,3 |
| wysoki – 70% | 20,98 / 47,89 | 6,29 / 14,37 | 14,69 / 33,52 | 111,7 | +128,3 |

*Źródło: obliczenia własne na podstawie danych GUS i założeń z podrozdziału 5.3.3 (koszt roboczogodziny 27,97 zł w 2015 r. i 63,85 zł w 2025 r.; 0,75 r-g/m²). Stopień redukcji robocizny na budowie.*

Wniosek z modelu jest prosty, lecz doniosły: ta sama procentowa redukcja robocizny na budowie jest w 2025 r. warta nominalnie o 128,3% więcej niż w 2015 r. W scenariuszu wysokim oszczędność robocizny na 1 m² (33,52 zł) przewyższa już miesięczny koszt dzierżawy deskowania stropowego (30 zł/m²), a więc sama redukcja pracy na budowie „finansuje" rezygnację z deskowania niezależnie od kosztu prefabrykatu. Próg opłacalności prefabrykacji obniżył się zatem w dekadzie ponad dwukrotnie – dokładnie tak samo, jak obniżył się próg opłacalności inwestycji w skracanie cyklu deskowania (podrozdział 5.3.3). Obie tendencje wynikają z tego samego źródła, lecz prowadzą do przeciwstawnych skutków dla dostawcy deskowań: skracanie cyklu zwiększa popyt na lepsze, szybsze deskowania, a prefabrykacja eliminuje deskowania w ogóle.

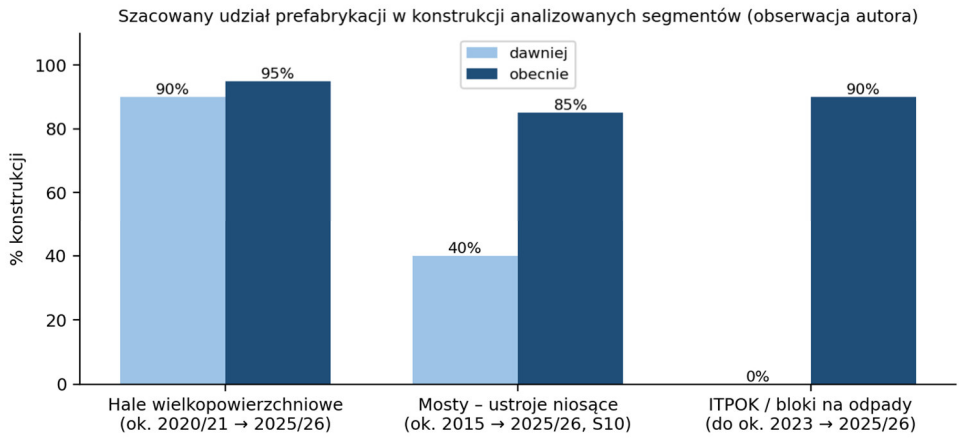
Drugi wymiar tego mechanizmu jest jakościowy i dotyczy podaży pracy. Montaż prefabrykatów na budowie – ustawianie, rektyfikacja i monolityzacja gotowych elementów przez niewielką brygadę montażową z żurawiem – jest w branży postrzegany jako tzw. „czysta praca": o wyższym stopniu mechanizacji, mniejszym wysiłku fizycznym, mniejszej ekspozycji na czynniki atmosferyczne, mniejszej liczbie operacji na wysokości i mniejszym kontakcie z mokrym betonem, olejami antyadhezyjnymi, zbrojeniem i ciężkimi elementami deskowań. Roboty żelbetowe w technologii monolitycznej pozostają natomiast pracą ciężką, brudną, sezonową i obarczoną wysokim ryzykiem wypadkowym. W warunkach opisanych w podrozdziale 5.3.3 niedoborów kadrowych brygady montażowe prefabrykacji są łatwiejsze do skompletowania i utrzymania niż brygady ciesielskie, a wykonawca, który ogranicza udział monolitu, ogranicza jednocześnie swoją ekspozycję na najbardziej deficytowy i najszybciej drożejący zasób. Zjawisko to zaostrzy się wraz z wejściem w życie kolejnych wymagań ergonomicznych i BHP – co stanowi jedno z uzasadnień dla analizowanych w podrozdziale 5.2.4 egzoszkieletów i systemów wspomagania przeładunków jako narzędzi obrony atrakcyjności pracy w technologii monolitycznej.

Syntezę skutków w badanych segmentach zawierają tabela 5.44 i rysunek 5.25. We wszystkich trzech segmentach udział prefabrykacji w konstrukcji obiektów wzrósł w ciągu ostatniej dekady do 85–95%, a udział tych segmentów w obrocie dostawcy deskowań spadł z łącznie około 7–10% do wartości bliskiej zeru. Nie są to przy tym segmenty kurczące się – zasoby hal niemal się potroiły, program budowy dróg ekspresowych trwa, a liczba ITPOK rośnie wraz z sześciomiliardowym programem wsparcia. Rynek deskowań traci więc nie z powodu spadku liczby inwestycji, lecz z powodu zmiany technologii ich realizacji. Jest to zagrożenie strukturalne, a nie koniunkturalne, i w ocenie autora największe spośród wszystkich zagrożeń dla dalszego rozwoju rynku deskowań systemowych – większe niż cykliczne wahania koniunktury, presja cenowa konkurencji czy substytucja przez konstrukcje stalowe.

*Tabela 5.44. Przesunięcie analizowanych segmentów rynku w kierunku prefabrykacji i jego skutek dla obrotu dostawcy deskowań*

| Segment rynku | Okres odniesienia | Udział prefabrykacji – dawniej [%] | Udział prefabrykacji – obecnie [%] | Zmiana [p.p.] | Udział segmentu w obrocie PERI Polska – dawniej → obecnie [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| Hale wielkopowierzchniowe | ok. 2020/2021 → 2025/2026 | ok. 90 | ok. 95 | +5 | 2–3 → bliski 0 |
| Obiekty mostowe – ustroje niosące małych i średnich rozpiętości | ok. 2015 → 2025/2026 (S10) | ≤ 40 | ok. 85 | +45 | b.d. |
| ITPOK / bloki energetyczne na paliwo z odpadów | do ok. 2023 → 2025/2026 (Gliwice, Włocławek) | 0 | ok. 90 | +90 | 5–7 → bliski 0 |

*Źródło: opracowanie własne; wszystkie udziały są szacunkami eksperckimi (dane wewnętrzne PERI Polska Sp. z o.o.).*




*Rys. 5.25. Szacowany udział prefabrykacji w konstrukcji obiektów w analizowanych segmentach – dawniej i obecnie [%. Źródło: opracowanie własne.*

Zagrożenie to ma wymiar ogólnoświatowy i jest zgodne z kierunkiem, jaki literatura przypisuje paradygmatom Construction 4.0 i 5.0. Według Casiniego (Casini M., 2022) prefabrykacja, robotyka i druk 3D należą do technologii, które reorganizują fazę wykonawstwa w kierunku produkcji przemysłowej (offsite construction, Design for Manufacturing and Assembly), a raporty McKinsey wskazują przeniesienie robót z placu budowy do fabryki jako jedną z głównych dźwigni przełamania stagnacji produktywności budownictwa (podrozdział 3.1). Construction 5.0, rozumiane jako rozwinięcie Industry 5.0, dodaje do tego wymiar humanocentryczny, odporność i zrównoważenie: technologia, która ogranicza ciężką pracę fizyczną na wysokości i w warunkach atmosferycznych, zmniejsza odpady i zużycie materiałów oraz uniezależnia harmonogram od zakłóceń, jest z definicji bliższa temu paradygmatowi niż technologia monolityczna. Industry 6.0, oparte na zdecentralizowanym, sterowanym sztuczną inteligencją wytwarzaniu, znajduje naturalne środowisko właśnie w zakładzie prefabrykacji – sterowanym cyfrowo, zrobotyzowanym, połączonym z modelem BIM obiektu – a nie na placu budowy, który z natury pozostaje środowiskiem jednostkowym, zmiennym i trudnym do zautomatyzowania. **Prefabrykacja nie tylko wypiera deskowania z kolejnych segmentów, ale wyznacza także trendy, do których branża deskowaniowa musi się dostosować, jeżeli chce uczestniczyć w transformacji budownictwa, a nie być jej ofiarą.**

Rozpoznanie tego zagrożenia nie oznacza, że rynek deskowań zniknie. Technologia monolityczna pozostanie niezastąpiona tam, gdzie decyduje jednostkowość geometrii, ciągłość konstrukcji, szczelność lub wielkie wymiary: w fundamentach i częściach podziemnych (ściany szczelinowe, płyty fundamentowe, bunkry poniżej terenu – jak w obu analizowanych ITPOK), w trzonach i stropach budynków wysokich, w obiektach mostowych o dużych rozpiętościach, estakadach, tunelach, budowlach hydrotechnicznych i energetycznych o dużych obciążeniach (np. masywny fundament na budowie bloku gazowo-parowego CCGT w Grudziądzu, opisany w podrozdziale 5.4), a także w licznych obiektach mieszkaniowych i użyteczności publicznej o indywidualnej architekturze.

Analiza wskazuje jednak wyraźnie kierunki, w jakich powinna ewoluować oferta dostawcy deskowań, aby zachować i rozwijać rynek. Najważniejszym z nich jest skrócenie cyklu i ograniczenie pracochłonności montażu i demontażu deskowań – będące głównym przedmiotem niniejszej rozprawy – jako jedyna droga obrony konkurencyjności technologii monolitycznej w segmentach „granicznych", w których o wyborze technologii decyduje dziś koszt i dostępność pracy; koncepcje Flexible Formwork Choice i Flexible Formwork Flow (Majkowski Ł., Pasławski J., 2023) należy zatem traktować nie tylko jako narzędzia optymalizacji, lecz jako narzędzia utrzymania rynku. Drugim kierunkiem jest wejście dostawcy deskowań w łańcuch wartości prefabrykacji – dostawa form i systemów deskowań stacjonarnych, stołów uchylnych, form bateryjnych i wielkoformatowych deskowań do wytwórni oraz systemów deskowań do zespoleń, styków i monolityzacji na budowie; koncern PERI dysponuje w tym zakresie ofertą, której znaczenie w Polsce będzie rosło proporcjonalnie do opisanej substytucji. Trzecim są rozwiązania hybrydowe łączące prefabrykaty z deskowaniem systemowym (np. prefabrykowane belki mostowe z systemowym deskowaniem gzymsów i płyt przejściowych, prefabrykowane słupy hal z systemowymi deskowaniami fundamentów i ścian oporowych) oraz aktywne uczestnictwo w projektowaniu obiektów na etapie koncepcji, kiedy zapada decyzja o technologii. Czwartym jest cyfryzacja i automatyzacja usługi deskowaniowej – cyfrowe planowanie rotacji, monitoring dojrzewania betonu skracający czas do rozdeskowania (system InSite opisany w podrozdziale 5.4), roboty i

egzoszkielety ograniczające ciężką pracę fizyczną (podrozdział 5.2.4), druk 3D form i elementów (podrozdział 5.4) – jako sposób nadania technologii monolitycznej cech „czystej pracy" i przemysłowej powtarzalności, które dziś są przewagą prefabrykacji. Piątym jest systematyczny monitoring rynku prefabrykacji jako element strategii przedsiębiorstwa deskowaniowego, w tym prowadzenie własnego indeksu udziału prefabrykacji w kluczowych segmentach, aby decyzje o inwestycjach w park sprzętowy podejmować na podstawie danych, a nie dopiero po utracie segmentu.

Przeprowadzona analiza empiryczna pozwala sformułować następujące wnioski. W latach 2015–2025 przeciętne wynagrodzenie w gospodarce narodowej wzrosło z 3 899,78 zł do 8 903,56 zł, tj. o 128,3% (średnio 8,6% rocznie), a minimalne wynagrodzenie za pracę z 1 750 zł do 4 666 zł, tj. o 166,6% (średnio 10,3% rocznie); dane sektorowe i analizy stawek robocizny kosztorysowej potwierdzają, że budownictwo w pełni uczestniczyło w tym wzroście. Ceny dzierżawy i sprzedaży deskowań systemowych rosły w tym samym okresie – według przyjętego, uzasadnionego obserwacją rynku założenia – w tempie około 3–4% rocznie, co daje skumulowany wzrost jedynie 34–48%. Koszty pracy rosły zatem od dwóch do ponad trzech razy szybciej niż koszty deskowań, a w ujęciu modelowym relacja kosztu robocizny deskowaniowej do kosztu dzierżawy deskowania stropowego wzrosła z ok. 1,0 do ok. 1,6. Koszt pracownika stał się względem kosztu deskowania zdecydowanie większym obciążeniem niż dziesięć lat temu, co bezpośrednio zmienia proces wyboru systemów deskowaniowych: kryterium najniższej ceny najmu ustępuje kryterium najniższej pracochłonności i najkrótszego cyklu.

Równolegle rynek prefabrykacji betonowej rośnie na świecie w stałym tempie 5–6% rocznie, w Europie stanowi dojrzały przemysł o wartości 25–30 mld EUR, zatrudniający około 165 tys. osób w 7–8 tys. zakładów, a w Polsce – po podwojeniu wartości rynku wyrobów betonowych w ciągu dekady (z około 5 mld zł w 2011 r. do ponad 13 mld zł w 2025 r.) i korekcie lat 2023–2024 – wchodzi w fazę ponownego przyspieszenia (rynek ciężkiej prefabrykacji: z 3,5 mld zł w 2021 r. do prognozowanych 5,5 mld zł w 2026 r.), napędzaną inwestycjami kolejowymi, energetycznymi i budownictwem modułowym. W segmencie hal wielkopowierzchniowych (zasoby wzrosły z około 13 do około 36,6 mln m² w latach 2017–2025) udział prefabrykacji sięga około 95%, w drogowych obiektach mostowych małych i średnich rozpiętości wzrósł z nie więcej niż 40% do około 85% (S10 Szczecin–Piła), a w ITPOK – ze 100% realizacji monolitycznych do około 90% prefabrykacji części nadziemnej w obiektach w Gliwicach i we Włocławku. Segmenty, które łącznie generowały 7–10% obrotu PERI Polska, nie generują już istotnych przychodów z deskowań, mimo że liczba inwestycji w nich rośnie.

Głównym wnioskiem podrozdziału jest stwierdzenie, że kluczowe rynkowe uwarunkowania rozwoju metody FFF mają wspólne źródło – drożejącą i coraz trudniej dostępną pracę na budowie – lecz działają w dwóch przeciwstawnych kierunkach. Z jednej strony wzrost kosztu pracy względem kosztu deskowań sprawia, że każda usprawniona operacja montażu i demontażu deskowań przekłada się obecnie na oszczędności ponad dwukrotnie większe (w ujęciu nominalnym) niż w 2015 r., co stanowi ekonomiczne uzasadnienie problemu badawczego rozprawy. Z drugiej strony ten sam mechanizm obniża próg opłacalności prefabrykacji, która stanowi obecnie największe strukturalne zagrożenie dla rynku deskowań systemowych: rynek ten traci kolejne segmenty nie wskutek spadku liczby inwestycji, lecz wskutek zmiany technologii ich realizacji, a prefabrykacja jest technologią naturalnie bliższą paradygmatom Construction 5.0 i Industry 6.0. Skoro o wyborze pomiędzy technologią monolityczną a prefabrykowaną coraz częściej decyduje pracochłonność i czas robót na budowie, to usprawnianie montażu i demontażu deskowań przestaje być wyłącznie kwestią optymalizacji kosztów wykonawcy, a staje się warunkiem utrzymania rynku, na którym dostawca deskowań w ogóle może funkcjonować.

Naturalnymi kierunkami dalszych badań są: zbudowanie i systematyczne prowadzenie branżowego indeksu cen deskowań (dzierżawy i sprzedaży), opartego na cyklicznym badaniu ankietowym dostawców i wypożyczalni – analogicznie do metodyki stosowanej przez Sekocenbud dla stawek robocizny – który zastąpiłby przyjęte założenie eksperckie (3–4% rocznie) twardym szeregiem empirycznym; zbudowanie ilościowego modelu granicznego kosztu robocizny, powyżej którego – dla danej klasy obiektów i danej geometrii – prefabrykacja staje się korzystniejsza od technologii monolitycznej; oraz systematyczne, coroczne badanie udziału prefabrykacji w kluczowych dla rynku deskowań segmentach budownictwa. Niezależnie od dokładnej wartości dynamiki cen deskowań, kierunek i skala opisanej zmiany relacji cen pracy i deskowań pozostają – w świetle danych GUS – bezsporne.

## 5.4. Cyfrowy monitoring betonu i druk 3D w ofercie PERI – technologie wspierające metodę FFF

Podrozdział dotyczy poziomu technologii. Dokumentuje wdrożenia systemu czujników PERI InSite, które przenoszą decyzje o tempie betonowania i momencie rozdeskowania z kalendarza na dane pomiarowe (ASTM, 2019) z konstrukcji (teza TS2), i zarazem stanowią przykład źródła danych dla warstwy uczącej metody FFF (teza TS1). Estymacja wytrzymałości in situ wykorzystana w tych wdrożeniach opiera się na metodzie dojrzałości, której podstawą jest funkcja Nurse'a–Saula, wiążąca przyrost wytrzymałości betonu z historią jego temperatury w czasie (Saul A. G. A., 1951) – podręcznikowe (Neville A. M., 2000) i przeglądowe (Carino N. J., Lew H. S., 2001) ujęcie metody dojrzałości.

Podrozdział przedstawia dwa obszary innowacji rozwijane w ostatnich latach przez grupę PERI, które wykraczają poza tradycyjny zakres oferty producenta deskowań i rusztowań: cyfrowy monitoring parametrów świeżego i dojrzewającego betonu (produkty spółki VEMAVENTURI GmbH) oraz addytywne wytwarzanie konstrukcji betonowych (drukarki COBOD w ofercie PERI 3D Construction GmbH). Obie technologie zostały omówione z perspektywy gospodarki deskowaniami na placu budowy, a więc w kontekście rozwijanej w niniejszej pracy koncepcji Flexible Formwork Flow (FFF). W podrozdziale wykorzystano: publikacje (Majkowski Ł., 2025) oraz (Byrka G., 2025) dotyczące pierwszych polskich pomiarów parcia mieszanki betonowej sensorami PERI InSite, bieżące raporty i eksporty danych z platformy InSite z budowy bloku gazowo-parowego CCGT w Grudziądzu (wrzesień 2026), kartę zarobu próbnego betonu masywnego oraz ogólnodostępne materiały producentów i organizacji branżowych. Wszystkie tabele i wykresy zestawiono dodatkowo w zbiorczym arkuszu kalkulacyjnym stanowiącym załącznik do podrozdziału.

### 5.4.1. Narzędzia monitoringu betonu oferowane przez VEMAVENTURI (grupa PERI)

VEMAVENTURI GmbH z siedzibą w Weißenhorn (Niemcy) jest spółką zależną grupy PERI, wyspecjalizowaną w rozwoju czujników i platformy chmurowej do monitorowania betonu. System sprzedawany w Polsce pod nazwą PERI InSite Construction (ISC) składa się z czujników, węzłów pomiarowych (Node), jednostki centralnej (Hub) oraz aplikacji internetowej dostępnej pod adresem insite.peri.app. Jednostka Node zbiera dane z podłączonych czujników i przekazuje je bezprzewodowo do jednostki Hub (zasięg do ok. 100 m w warunkach bez przeszkód, w trybie mesh do ok. 800 m przez kolejne węzły), która komunikuje się z chmurą przez Wi-Fi lub LTE. Do jednej jednostki Hub zaleca się podłączanie nie więcej niż 8 węzłów; Hub ma klasę szczelności IP66. Nowsza generacja urządzeń (TEMO Link oraz LINK) ma wbudowaną łączność komórkową i nie wymaga stacji bazowej, co istotnie upraszcza logistykę na rozproszonych budowach (Vemaventuri, 2025).

Portfolio obejmuje obecnie sześć zasadniczych rozwiązań, których zestawienie przedstawiono w tabeli 5.45. Z punktu widzenia gospodarki deskowaniami kluczowe są dwa z nich. Czujniki PREMO mierzą parcie świeżej mieszanki na deskowanie – ciśnienie hydrostatyczne przenoszone jest przez membranę wypełnioną gliceryną na przetwornik ciśnienia; czujnik montuje się w otworze wywierconym w płycie deskowania (wersje dla sklejki 21 i 42 mm) i mocuje trzema wkrętami, a zapis następuje przy każdej zmianie ciśnienia o co najmniej 1 kPa lub co minutę. Czujniki TEMO to termopary typu T rejestrujące temperaturę betonu w rdzeniu i w strefach przypowierzchniowych; na ich podstawie platforma wyznacza wskaźnik dojrzałości (funkcje Nurse–Saula wg ASTM C1074 oraz Arrheniusa) i szacuje bieżącą wytrzymałość na ściskanie (Mariak A., Wilde K., 2015), pod warunkiem wprowadzenia do aplikacji skalibrowanej laboratoryjnie receptury betonu. Czujnik TEMO pozostaje w betonie na stałe, natomiast PREMO jest wielokrotnego użytku (wymiany wymaga jedynie membrana i gliceryna). Uzupełnieniem są: PHONO – piezoelektryczny czujnik obecności betonu i kontroli zagęszczenia, rozróżniający w punkcie montażu powietrze, ciecz i beton oraz rejestrujący energię drgań wibratora; SONO Hub – ręczny miernik zawartości wody i wskaźnika w/c w świeżej mieszance (technologia TRIME – Time Domain Reflectometry).

Warto podkreślić, że rozwiązania te są obecnie wdrażane globalnie: w styczniu 2025 r. zaprezentowano je na targach World of Concrete w Las Vegas, a w sierpniu 2026 r. PERI UK i VEMAVENTURI ogłosiły ofertę monitoringu dla wykonawców brytyjskich, opisując m.in. realizację, w której 24 czujniki PHONO nadzorowały trzydniowe betonowanie, oraz popyt na SONO Hub w Korei Południowej, gdzie po serii awarii konstrukcji wprowadzono obowiązkowe badanie zawartości wody w świeżym betonie. Producent otwarcie wskazuje przy tym barierę komercyjną: część wykonawców traktuje monitoring jako dodatkowy koszt tam, gdzie nie wymagają go przepisy. Fotografia 5.9

przedstawia węzły pomiarowe systemu InSite z termoparami TEMO zamocowane do zbrojenia na budowie w Grudziądzu, opisanej szczegółowo w podrozdziale 5.4.3).

Tabela 5.45. Narzędzia monitoringu betonu VEMAVENTURI GmbH (grupa PERI) – stan na wrzesień 2026 r.

| Narzędzie | Mierzona wielkość | Zasada działania i cechy techniczne | Uwagi eksploatacyjne | Główne zastosowania |
|---|---|---|---|---|
| TEMO | Temperatura i dojrzałość (estymacja wytrzymałości) | Termopara typu T (−250…+350 °C); czujnik pozostaje w betonie; transmisja Node → Hub → chmura | Wymaga skalibrowanej receptury w WebApp; alarmy e-mail/WebApp; eksport CSV/PDF | Skrócenie cykli deskowania, kontrola gradientów termicznych, dokumentacja jakości |
| TEMO Link | Temperatura i dojrzałość | Wbudowana łączność komórkowa – bez Hub/Node; funkcje Nurse–Saul (ASTM C1074) i Arrhenius | Praca bez stacji bazowej | Jak TEMO; obiekty rozproszone |
| LINK | Parcie + temperatura + dojrzałość | Jedno urządzenie z łącznością komórkową; cyfrowe czujniki temperatury ±0,5 °C (ASTM C1074 wymaga ±1 °C); czujnik parcia wielokrotnego użytku | Brak bramki; dashboard z alarmami | Wysokie ściany i słupy, deskowania jednostronne, SCC, tunele, mosty, beton masywny |
| PREMO | Parcie mieszanki na deskowanie | Membrana z gliceryną (−20…+60 °C) i przetwornik ciśnienia; obudowa drukowana 3D ze stalowymi dźwigniami; wersje 21 i 42 mm; montaż w otworze na 3 wkręty | Zapis przy zmianie ≥1 kPa lub co 1 min; wielokrotnego użytku; pozostawia odcisk na powierzchni betonu | Sterowanie tempem betonowania, ochrona deskowań, optymalizacja projektu deskowań |
| PHONO | Obecność betonu i zagęszczenie | Element piezoelektryczny (2–14 kHz) rozróżnia powietrze / ciecz / beton (sygnalizacja czerwony / żółty / zielony); rejestruje energię drgań wibratora; montaż opaską do zbrojenia | Bez kalibracji; detekcja lokalna w punkcie czujnika, nie obrazowanie pustek | Gęste zbrojenie, elementy wbudowane, betonowanie do istniejącej konstrukcji, pompowanie od dołu |
| SONO / SONO Hub | Zawartość wody i w/c | Technologia TRIME (TDR); pomiar w kilka sekund, zalecane 5 pomiarów; obliczenie w/c na urządzeniu; IP66; −5…+45 °C | Wynik w l/m³ w ciągu 1–2 min | Kontrola mieszanki przed wbudowaniem (prefabrykacja, budowa) |
| Hub / Node | Infrastruktura transmisji | Node ↔ Hub: do ~100 m, mesh do ~800 m; ≤8 Node na Hub; Hub IP66; chmura Wi-Fi/LTE | Jeden Hub = jeden projekt (wiele pulpitów) | Wspólna platforma TEMO / PREMO / PHONO |
| InSite Web Application | Platforma chmurowa | Wizualizacja on-line, wartości graniczne i alarmy, raporty PDF, eksport CSV, mapa czujników | Dostęp z przeglądarki | Dokumentacja jakości, zdalne decyzje technologiczne |

*Źródło: opracowanie własne.*



*Fot. 5.9. Węzły pomiarowe systemu PERI InSite z podłączonymi termoparami TEMO zamocowane do zbrojenia ściany fundamentu – CCGT Grudziądz, wrzesień 2026 r.*

*Źródło: Archiwum PERI Polska Sp. z o.o.*

### 5.4.2. Pierwsze polskie pomiary parcia i dojrzewania betonu sensorami PERI InSite – synteza publikacji

Pierwsze w Polsce zastosowania systemu InSite zostały udokumentowane w dwóch w/w publikacjach. Pierwsze z opisanych wdrożeń miało miejsce w marcu 2022 r. na projekcie drogowym S7 Rdzawka, gdzie w dolnym, zewnętrznym narożniku deskowania ustroju nośnego realizowanego metodą nasuwania podłużnego (system PERI VIL) zamontowano czujniki PREMO, a równolegle rejestrowano temperaturę betonu klasy C50/60 (PKN, 2021) przy temperaturze otoczenia ok. −1 °C. W pierwszym etapie betonowania (płyta dolna) zarejestrowano ciśnienia 1,8–6,9 kN/m², a w drugim (środnik, 40 minut później) 28–36 kN/m² w zależności od punktu pomiarowego. Monitoring temperatury wykazał, że wewnętrzne deskowanie środnika rozszalowano po 11 godzinach, a montaż wsporników VIL rozpoczęto po 12 godzinach, gdy beton osiągnął jedynie ok. 17,5 N/mm² wobec wymaganych 25 N/mm² – system pozwolił więc wychwycić przedwczesne rozpoczęcie robót. Z perspektywy niniejszej pracy jest to przykład o tyle istotny, że dotyczy wprost decyzji o rozdeskowaniu i obciążeniu konstrukcji, a więc czynności determinujących rotację zestawu deskowań.

Drugie wdrożenie, opisane w obu publikacjach, dotyczyło betonowania ściany konstrukcyjnej o wysokości blisko 10 m w deskowaniu ramowym PERI TRIO w dniu 25 lutego 2025 r. Pierwszy transport mieszanki dostarczono ok. godz. 9:15 przy temperaturze otoczenia ok. +4 °C, po intensywnych opadach deszczu dnia poprzedniego. Zastosowano beton towarowy C35/45 W8 XC2 XD2 XA2 XM3 o konsystencji S2, z dodatkami mineralnymi typu II, plastyfikatorami i domieszką przyspieszającą wiązanie, o maksymalnym uziarnieniu 16 mm. Betonowanie prowadzono warstwami 80–150 cm, wbudowując 17 transportów po 11,5 m³ w sekwencji 6 + przerwa ok. 45 min + 6 + przerwa ok. 45 min + 5. Aparaturę stanowiły dwa zestawy PREMO (numery seryjne BNVXGU i BSRIAB) po cztery czujniki (pozycje PREMO A–D) rozmieszczone na wysokościach od 0,42 do 9,72 m od podstawy oraz trzy tradycyjne siłomierze analogowe o nośności 160 kN montowane pod nakrętkami przegubowymi

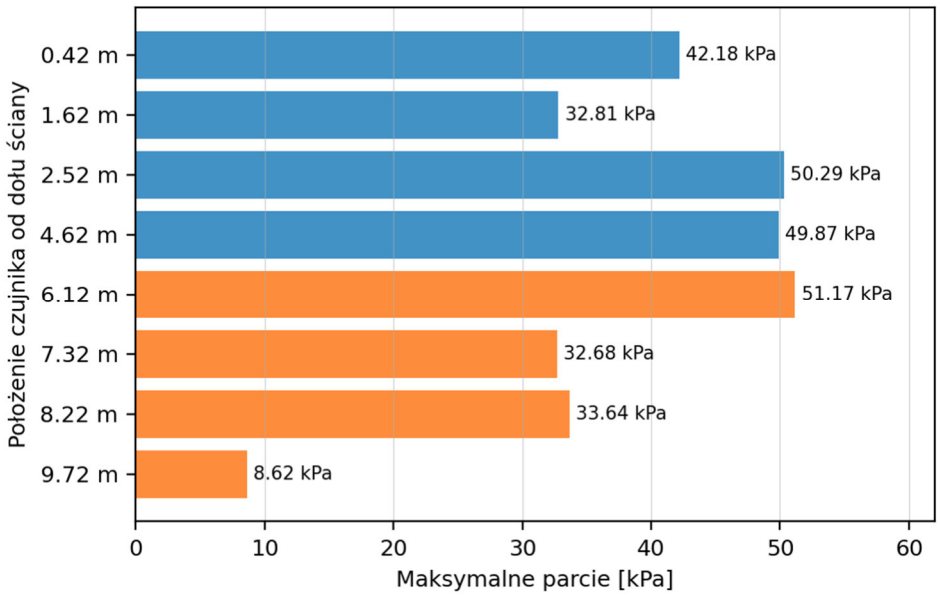
ściągów. Parcie świeżej mieszanki betonowej na deskowania pionowe wyznacza się w praktyce projektowej według (DIN, 2010) , wytycznych CIRIA (Clear C. A., Harrison T. A., 1985) lub (ACI, 2014), a zagadnienie to było przedmiotem badań teoretycznych (Gardner N. J., 1985) i pomiarów terenowych (Harrison T. A., 1983).

Wyniki pomiarów parcia zestawiono w tabeli 5.46 i na rysunku 5.26.

*Tabela 5.46. Pomiar parcia mieszanki betonowej sensorami PREMO – ściana C35/45, 25.02.2025 r.*

| Urządzenie | Pozycja | Wysokość od dołu [m] | Kontakt czujnika z betonem [godz.] | Parcie max [kPa] i czas | Możliwa różnica [kPa] |
|---|---|---|---|---|---|
| BNVXGU | PREMO A | 0,42 | 09:23 | 42,18 (09:50) | −0,4 |
| BNVXGU | PREMO B | 1,62 | 09:39 | 32,81 (12:41) | −0,3 |
| BNVXGU | PREMO C | 2,52 | 10:31 | 50,29 (12:37) | −0,5 |
| BNVXGU | PREMO D | 4,62 | 12:00 | 49,87 (14:58) | 0,2 |
| BSRIAB | PREMO A | 6,12 | 13:00 | 51,17 (15:03) | −0,1 |
| BSRIAB | PREMO B | 7,32 | 14:23 | 32,68 (15:43) | 0,5 |
| BSRIAB | PREMO C | 8,22 | 14:38 | 33,64 (15:42) | −0,4 |
| BSRIAB | PREMO D | 9,72 | 15:35 | 8,62 (15:36) | 0,7 |

*Źródło: Opracowanie własne na podstawie pomiarów Vemaventuri.*




*Rys. 5.26. Maksymalne wartości parcia zarejestrowane przez czujniki PREMO w funkcji wysokości położenia czujnika (zestaw niski – kolor niebieski, zestaw wysoki – kolor pomarańczowy), ściana C35/45, 25.02.2025 r. Źródło: opracowanie własne na podstawie pomiarów Vemaventuri.*

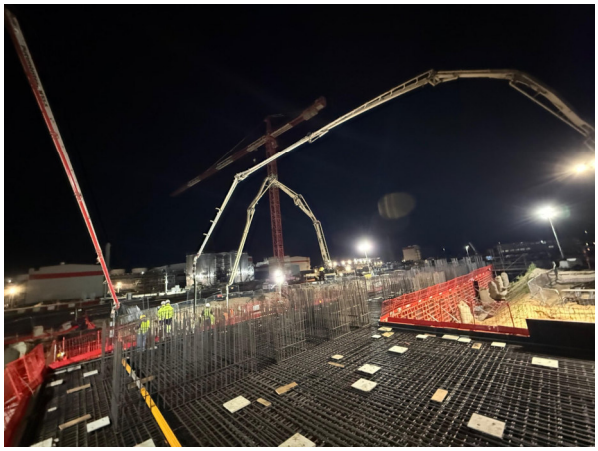
Najistotniejsze wnioski z tego pomiaru są następujące. Po pierwsze, maksymalne parcie w sekcji dolnej (0,42–4,62 m) mieściło się w przedziale 32,8–50,3 kPa, przy czym najwyższe wartości wystąpiły na wysokości ok. 2,5–4,6 m, a w sekcji górnej (6,12–9,72 m) było bardziej zróżnicowane – od 8,6 do 51,2 kPa – co potwierdza nierównomierny rozkład parcia w wysokich elementach, zależny od tempa układania, wibrowania i lokalnej konsystencji mieszanki. Po drugie, odchylenia międzykanałowe (możliwa różnica) nie przekroczyły ±0,7 kPa, co przy wartościach rzędu 51 kPa odpowiada błędowi poniżej ok. 1,5% i potwierdza stabilność kalibracji w warunkach budowy. Po trzecie, sensory InSite reagowały natychmiast po podaniu mieszanki, podczas gdy siłomierze wykazywały opóźnienie i

tłumioną odpowiedź z utrzymującymi się siłami resztkowymi w ściągach; po przerwach technologicznych wyraźny wzrost parcia rejestrowano dopiero w trakcie wibrowania, a w jednym przypadku samo zagęszczanie bez dolewki betonu spowodowało istotny wzrost parcia w dolnych partiach, zarejestrowany przez dwa czujniki położone najbliżej aktualnego poziomu mieszanki. Po czwarte, w miarę tężenia mieszanki odczyty sensorów spadały zgodnie z utratą płynności betonu, natomiast spadek siły w ściągach był znacznie wolniejszy z uwagi na tarcie i blokowanie sił w układzie deskowania; oznacza to, że siłomierze są niemiarodajne do oceny stanu mieszanki i decyzji o wznowieniu betonowania, które w praktyce podejmowane były dotąd na podstawie doświadczenia zespołu. W obu publikacjach wskazano, że pomiar bezpośredni parcia stanowi istotne uzupełnienie klasycznych modeli teoretycznych (np. DIN 18218) i pozwala redukować nadmierne naddatki bezpieczeństwa w projektowaniu deskowań oraz skracać czas betonowania przez bieżącą kontrolę rzeczywistych obciążeń.

Praca (Byrka G., 2025) porządkuje ponadto podstawy teoretyczne metody dojrzałości, która jest wykorzystywana przez czujniki TEMO i której zastosowanie zostanie zilustrowane w podrozdziale 5.4.3). Norma ASTM C1074 opiera się na hipotezie równoważności: dla danej mieszanki ta sama wytrzymałość zostaje osiągnięta zawsze wtedy, gdy beton uzyska tę samą wartość wskaźnika dojrzałości, niezależnie od historii temperatury. Norma przewiduje dwa modele: liniowy Nurse–Saula, w którym wskaźnik dojrzałości $M(t) = \Sigma(Ta - T0)\cdot\Delta t$ wyrażany jest w stopniogodzinach (T0 – temperatura odniesienia, poniżej której hydratacja nie postępuje), oraz nieliniowy model Arrheniusa, przeliczający czas w danej temperaturze na wiek równoważny w temperaturze referencyjnej (zwykle 20 °C) z użyciem energii aktywacji Q charakterystycznej dla mieszanki. Procedura obejmuje kalibrację laboratoryjną (próbki z czujnikami temperatury badane np. po 1, 3, 7, 14, 28 dniach i dopasowanie zależności $fc = a + b\cdot\ln(M)$), monitoring in situ oraz walidację – jeżeli różnica między wartością zmierzoną a oszacowaną przekracza ustalony próg (np. ±10%), krzywa powinna zostać skorygowana. Model Arrheniusa zalecany jest w szczególności dla konstrukcji masywnych (Witakowski P., 2009), dużych wahań temperatury otoczenia, obiektów strategicznych (mosty, tunele, elektrownie) oraz mieszanek z dodatkami mineralnymi – a więc dokładnie w warunkach omawianej dalej budowy w Grudziądzu.

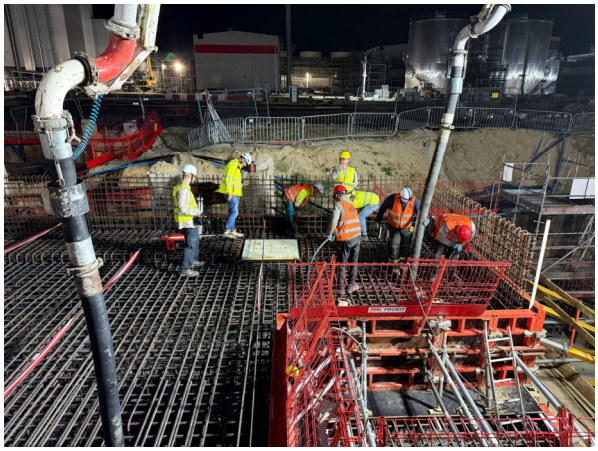
### 5.4.3. Monitoring dojrzewania betonu masywnego na budowie Elektrowni Gazowej CCGT w Grudziądzu (wrzesień 2026 r.)

Najnowszym i najbardziej rozbudowanym wdrożeniem systemu InSite w Polsce jest monitoring temperatury i wytrzymałości betonu masywnego fundamentu na budowie bloku gazowo-parowego CCGT w Grudziądzu. Wykonawca robót żelbetowych (AGMA) wykorzystał system Vemaventuri Data Acquisition System na pulpicie projektowym UMC_FUNDAMENT_ETAP I; raport z platformy wygenerowano 11 września 2026 r., a równolegle wyeksportowano surowe dane pomiarowe w plikach XLSX. W monitoringu użyto siedmiu jednostek pomiarowych (TOYFLC, TRKAYO, TIZJNT, TTBTJR, TBCGBO, TASIML, TLTRZI) tworzących cztery punkty pomiarowe T1–T4 rozmieszczone wzdłuż fundamentu (mapa czujników w raporcie); w punktach T1–T3 zainstalowano po trzy termopary (TOP – strefa górna, MIDDLE – rdzeń, BOTTOM – strefa dolna), a w punkcie T4 dwie (TOP, BOTTOM). Dla jednostek TTBTJR i TBCGBO (punkt T1) uruchomiono dodatkowo moduł estymacji wytrzymałości na ściskanie z przypisaną recepturą MASYW, (XA1) XC2. Betonowanie fundamentu prowadzono w sposób ciągły, również w porze nocnej, z użyciem pomp samojezdnych (fot. 5.10–5.13). Zabezpieczenia krawędzi i pomosty robocze wykonano w systemie PERI PROKIT, a ściany fundamentu deskowano systemem ramowym PERI TRIO (fot. 5.11 i 5.12). Przegląd metod zaczerpnięto ze Współczesnych metod diagnostyki masywnych konstrukcji betonowych (Kilian W., 2007).



*Fot. 5.10. Betonowanie fundamentu UMC etap I w porze nocnej – dwie pompy do betonu i żuraw wieżowy; na pierwszym planie górna siatka zbrojenia płyty, CCGT Grudziądz, wrzesień 2026 r.*

*Źródło: Archiwum PERI Polska Sp. z o.o.*



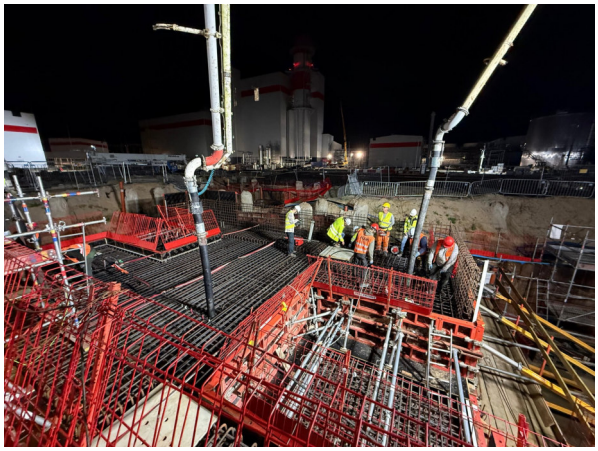
*Fot. 5.11. Układanie mieszanki rurociągiem pompy w strefie ściany fundamentu; na pierwszym planie zabezpieczenie krawędzi PERI PROKIT, CCGT Grudziądz, wrzesień 2026 r.*

*Źródło: Archiwum PERI Polska Sp. z o.o.*



*Fot. 5.12. Deskowanie ramowe PERI ścian fundamentu z pomostami roboczymi i barierami PERI PROKIT przed betonowaniem nocnym, CCGT Grudziądz, wrzesień 2026 r.*

*Źródło: Archiwum PERI Polska Sp. z o.o.*



*Fot. 5.13. Widok ogólny frontu betonowania – rurociągi dwóch pomp, zbrojenie płyty i ścian, zabezpieczenia PERI PROKIT; w tle istniejący blok, CCGT Grudziądz, wrzesień 2026 r.*

*Źródło: Archiwum PERI Polska Sp. z o.o.*

Beton do fundamentu zaprojektowano jako beton masywny klasy C30/37 w klasach ekspozycji XA1 i XC2 (oznaczenie receptury MASYW, (XA1) XC2). Zarób próbny ZP 2025/CK/GR04 wykonano w laboratorium Thomas Beton (MC Środa) 24 czerwca 2026 r.; karta zarobu została zatytułowana jako dotycząca fundamentu etapu II, jednak oznaczenie receptury jest tożsame z recepturą przypisaną w platformie InSite do monitoringu etapu I. Skład receptury podano w tabeli 5.47. Zastosowano cement hutniczy CEM III/A 42,5 N – LH/HSR/NA (Dyckerhoff Nowiny) w ilości 280 kg/m³ oraz popiół lotny (Opole) 60 kg/m³, przy 154 kg/m³ wody, co daje wskaźnik w/c = 0,507 podany na karcie (odpowiadający relacji w/(c + 0,4·popiół); prosty stosunek woda/cement wynosi 0,55) oraz udział popiołu w spoiwie ok. 18%. Dobór cementu o niskim cieple hydratacji (LH) i wysokiej odporności siarczanowej (HSR) jest typowy dla elementów masywnych narażonych na agresję chemiczną i ma na celu ograniczenie temperatury maksymalnej oraz gradientów termicznych w przekroju (Zieliński K., 2010). Zastosowano dwie domieszki (P20 i 7175) po 0,600% masy spoiwa, zakładaną zawartość powietrza 3,0% i gęstość teoretyczną 2323 kg/m³.

*Tabela 5.47. Receptura betonu MASYW, (XA1) XC2, C30/37 – zarób próbny □P 2025/CK/GR04*

| Składnik | Dostawca / źródło | Gęstość [kg/dm³] | Ilość [kg/m³] |
|---|---|---|---|
| CEM III/A 42,5 N – LH/HSR/NA | Dyckerhoff Nowiny | 3,00 | 280 |
| Popiół lotny | Opole | 2,05 | 60 |
| Woda | wodociąg | 1,00 | 154 |
| Piasek 0/2 | ZPK Snake | 2,65 | 690 |
| Żwir 2/8 | Direx Żabiny II | 2,65 | 435 |
| Żwir 8/16 | Direx Żabiny II | 2,65 | 700 |
| Domieszka 1 – P20 (0,600% m.s.) | – | – | 2,04 |
| Domieszka 2 – 7175 (0,600% m.s.) | – | – | 2,04 |
| w/c = 0,507; z.p.t = 3,0%; ρt = 2323 kg/m³ | | | |

Źródło: *Karta zarobu próbnego □P 2025/CK/GR04, receptura MASYW, (XA1) XC2, C30/37, Thomas Beton, laboratorium MC Środa.*

Wyniki badań mieszanki i stwardniałego betonu z zarobu próbnego zestawiono w tabelach 5.48 i 5.49 oraz na rysunkach 5.27 i 5.28. Opad stożka zmniejszył się z 210 mm po 10 minutach do 170 mm po godzinie i 100 mm po dwóch godzinach od zarobu (utrata 110 mm, tj. ok. 52%), przy temperaturze mieszanki 21,0–20,5 °C; gęstość mieszanki wyniosła 2366–2384 kg/m³, a zawartość powietrza 2,6–2,8%. W uwagach do karty technolog zalecił zwiększenie ilości domieszki PCE, co należy wiązać właśnie z obserwowaną utratą konsystencji. Wytrzymałość na ściskanie kostek 150 mm wyniosła średnio 14,1 MPa po 2 dniach, 26,0 MPa po 7 dniach i 48,5 MPa po 28 dniach (fc2/fc28 = 29%, fc7/fc28 = 54%), a więc o 11,5 MPa powyżej wymaganej wytrzymałości charakterystycznej fck,cube = 37 MPa dla klasy C30/37. Stosunkowo wolny przyrost wczesnej wytrzymałości (29% po 2 dniach) jest cechą charakterystyczną spoiw żużlowo-popiołowych dojrzewających w 20 °C i – jak pokazano dalej – zostaje w konstrukcji masywnej w dużej mierze skompensowany przez ciepło hydratacji.

*Tabela 5.48. Wyniki badań mieszanki betonowej – zarób próbny □P 2025/CK/GR04 (start 15:00, 24.06.2026 r.)*

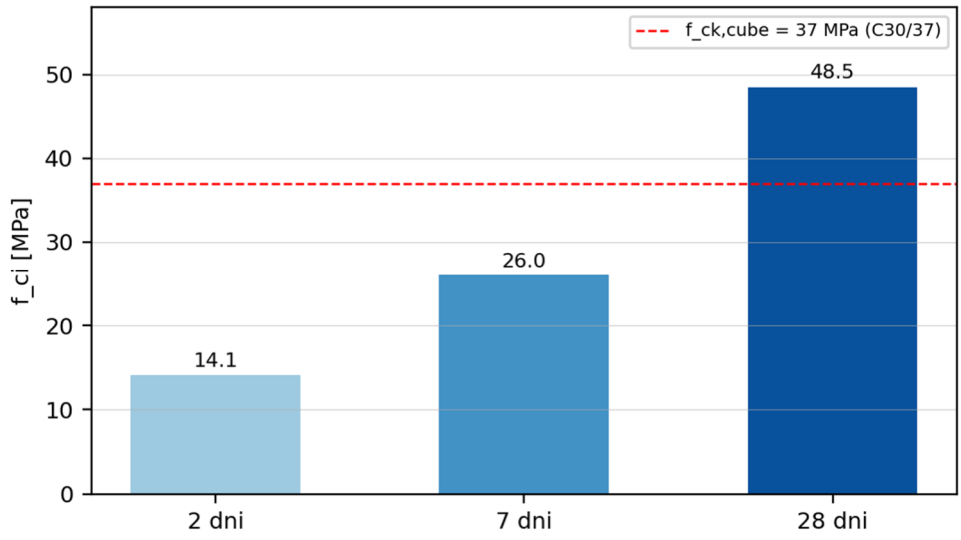
| *Czas od zarobu* | *T otoczenia [°C]* | *T mieszanki [°C]* | *Opad stożka SA [mm]* | *Gęstość [kg/m³]* | *Zawartość powietrza [%]* |
|---|---|---|---|---|---|
| *00:10* | *20,0* | *21,0* | *210* | *2366* | *2,6* |
| *01:00* | *20,0* | *20,6* | *170* | *–* | *–* |
| *02:00* | *20,0* | *20,5* | *100* | *2384* | *2,8* |

*Źródło: Karta zarobu próbnego □P 2025/CK/GR04, receptura MASYW, (XA1) XC2, C30/37, Thomas Beton, laboratorium MC Środa.*

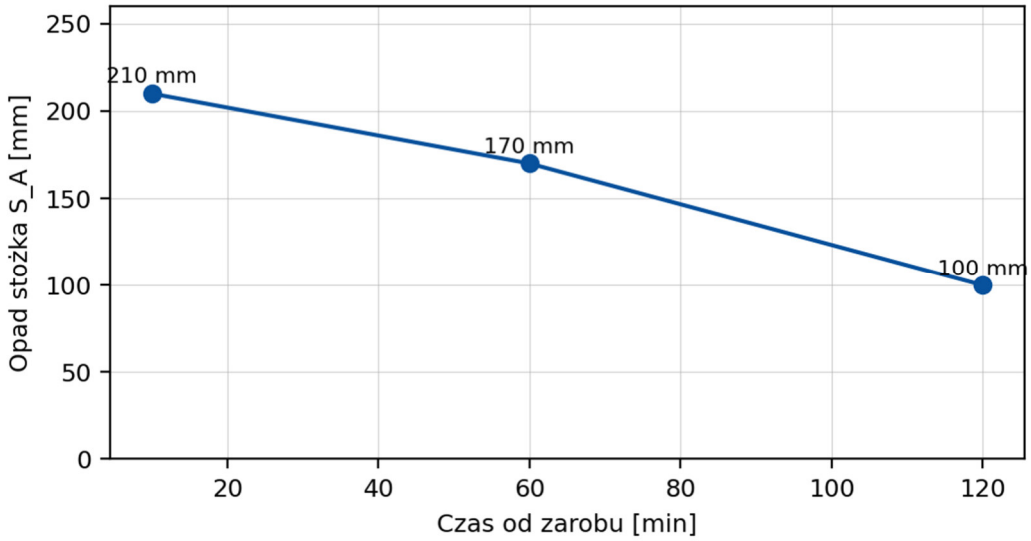
*Tabela 5.49. Wytrzymałość na ściskanie próbek sześciennych 150 mm – zarób próbny □P 2025/CK/GR04*

| Data badania | Wiek [dni] | Masa [g] | Siła niszcząca [kN] | Gęstość [kg/m³] | fci [MPa] | fcm [MPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 26.06.2026 | 2 | 7892 / 7838 | 321,3 / 313,3 | 2338 / 2322 | 14,3 / 13,9 | 14,1 |
| 01.07.2026 | 7 | 7925 / 7923 | 594,5 / 577,2 | 2348 / 2347 | 26,4 / 25,7 | 26,0 |
| 22.07.2026 | 28 | 7946 / 7868 | 1124,7 / 1056,7 | 2354 / 2331 | 50,0 / 47,0 | 48,5 |

*Źródło: Karta zarobu próbnego □P 2025/CK/GR04, receptura MASYW, (XA1) XC2, C30/37, Thomas Beton, laboratorium MC Środa*



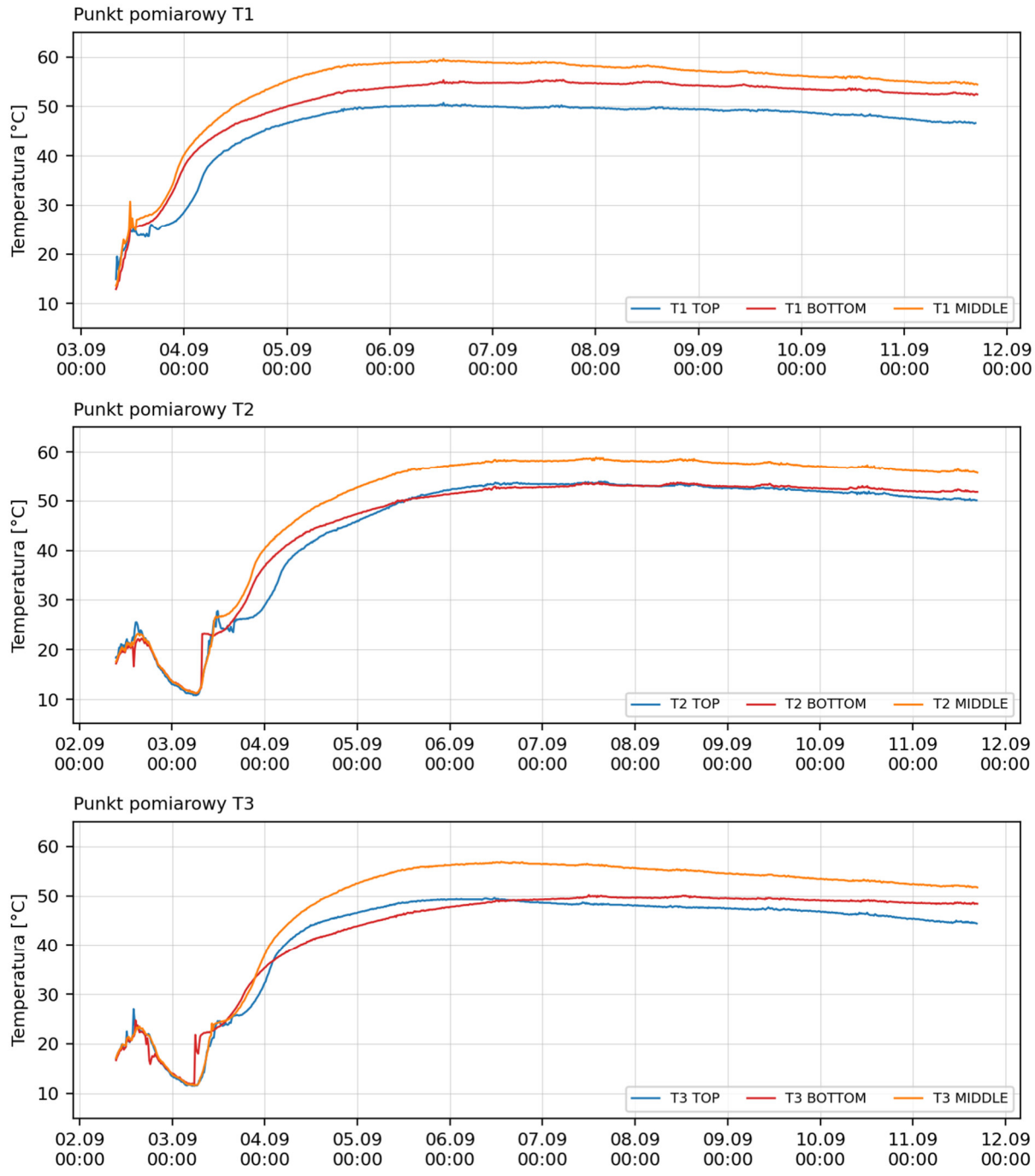

*Rys. 5.27. Rozwój wytrzymałości na ściskanie próbek laboratoryjnych betonu MASYW, (XA1) XC2 na tle wymagania fck,cube = 37 MPa. Źródło: opracowanie własne.*




*Rys. 5.28. Utrata opadu stożka mieszanki betonowej w czasie – zarób próbny □P 2025/CK/GR04*

*Źródło: opracowanie własne.*

Przebieg temperatur w betonie przedstawiono na rysunku 5.29, a ich zestawienie w tabeli 5.50. Jednostki punktów T2–T4 aktywowano już 2 września 2026 r. między 8:00 a 12:30, a punktu T1 – 3 września o 8:07. Analiza danych surowych pokazuje, że w punktach T2 i T3 czujniki przez pierwszą dobę rejestrowały temperaturę powietrza (spadek do ok. 11 °C nad ranem 3 września), a skokowy wzrost odczytów około godziny 8:00 w dniu 3 września odpowiada kontaktowi termopar ze świeżą mieszanką; wartości minimalne podane w raporcie dla tych punktów (10,8–11,7 °C) dotyczą zatem okresu przed betonowaniem, a nie betonu. Z tego względu wszystkie obliczenia własne w dalszej części odniesiono do godziny 8:00 dnia 3 września jako początku hydratacji. Temperatura początkowa mieszanki w chwili kontaktu z czujnikami wynosiła 13–18 °C.




*Rys. 5.29. Przebieg temperatury betonu w punktach pomiarowych T1, T2 i T3 (kanały TOP, MIDDLE, BOTTOM) – fundament UMC etap I, CCGT Grudziądz, 02–11.09.2026 r.; dla punktów T2 i T3 pokazano również okres przed betonowaniem. Źródło: opracowanie własne.*

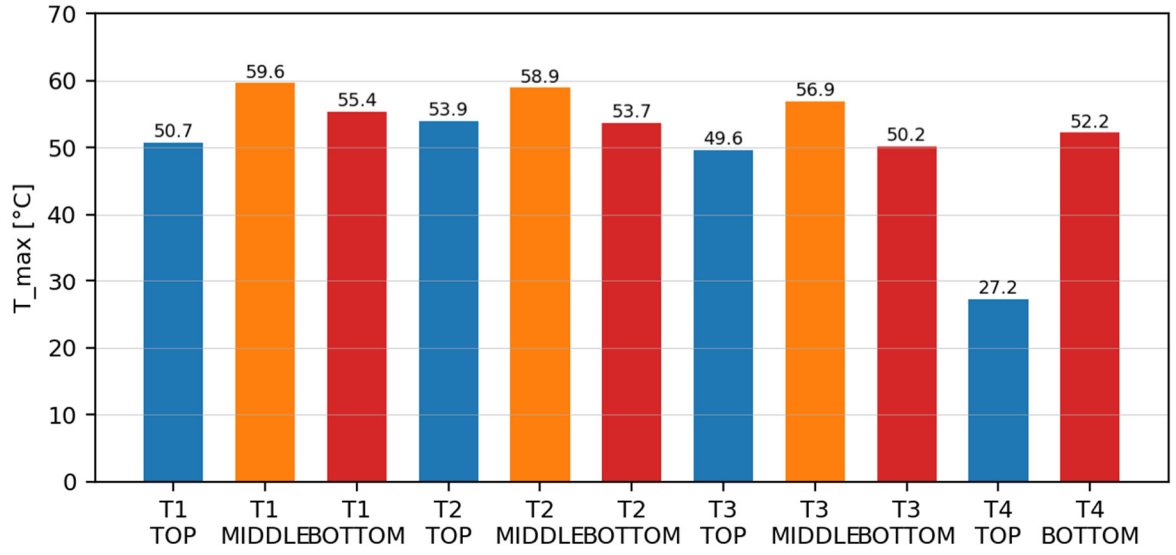
*Tabela 5.50. □estawienie temperatur betonu – fundament UMC etap I, CCGT Grudziądz (03–11.09.2026 r.)*

| Punkt | Kanał | Jednostka | Tmax [°C] | Czas Tmax | Czas do Tmax od 03.09 8:00 [h] | T w dniu 11.09 [°C] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| T1 | TOP | TTBTJR | 50,7 | 06.09 12:30 | 76 | 46,6 |
| T1 | MIDDLE | TBCGBO | 59,6 | 06.09 12:30 | 76 | 54,4 |
| T1 | BOTTOM | TBCGBO | 55,4 | 07.09 16:23 | 104 | 52,4 |
| T2 | TOP | TASIML | 53,9 | 07.09 14:42 | 103 | 50,1 |

| Punkt | Kanał | Jednostka | Tmax [°C] | Czas Tmax | Czas do Tmax od 03.09 8:00 [h] | T w dniu 11.09 [°C] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| T2 | MIDDLE | TLTRZI | 58,9 | 07.09 13:57 | 102 | 55,7 |
| T2 | BOTTOM | TLTRZI | 53,7 | 08.09 11:01 | 123 | 51,8 |
| T3 | TOP | TRKAYO | 49,6 | 06.09 11:33 | 76 | 44,4 |
| T3 | MIDDLE | TIZJNT | 56,9 | 06.09 13:17 | 77 | 51,7 |
| T3 | BOTTOM | TIZJNT | 50,2 | 07.09 12:01 | 100 | 48,4 |
| T4 | TOP | TOYFLC | 27,2* | 02.09 14:02 | – | – |
| T4 | BOTTOM | TOYFLC | 52,2 | 07.09 12:22 | – | – |

* wartość zarejestrowana przed betonowaniem (czujnik w powietrzu). Temperatura powietrza wg raportu: max 27,1 °C (08.09 16:00), min 7,4 °C (11.09 6:00). Źródło: opracowanie własne.

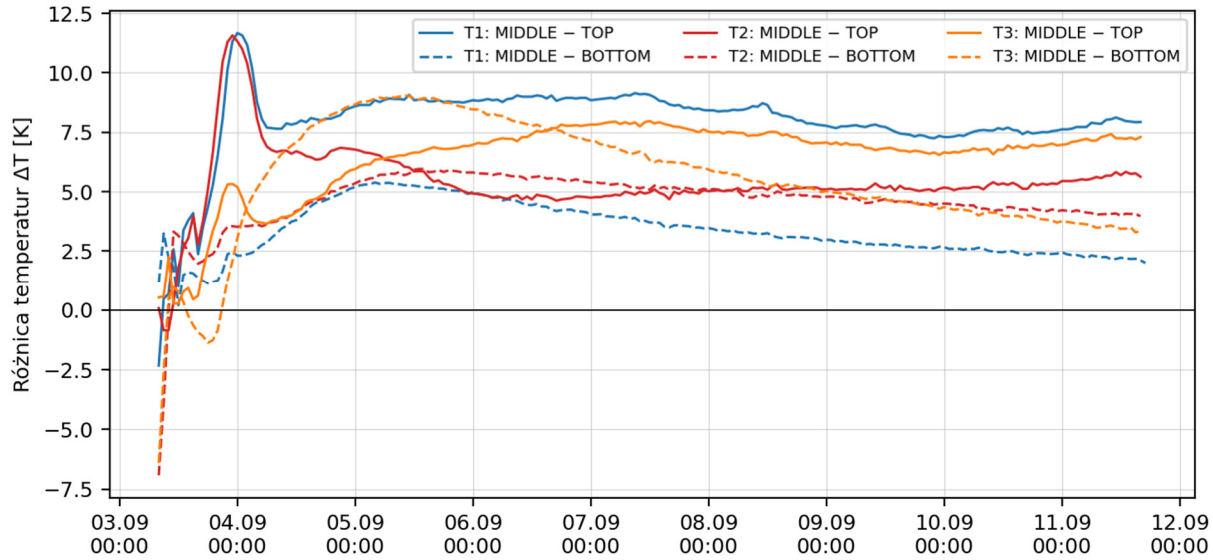
Przebieg temperatur jest charakterystyczny dla betonu masywnego na spoiwie o niskim cieple hydratacji: temperatura rdzenia rosła w sposób ciągły przez ponad trzy doby, osiągając maksimum 59,6 °C w punkcie T1 (6 września, 12:30, ok. 76 h od ułożenia), 58,9 °C w punkcie T2 (7 września, ok. 102 h) i 56,9 °C w punkcie T3 (6 września, ok. 77 h); w kanałach dolnych maksimum wystąpiło później (100–123 h), co należy wiązać z odprowadzaniem ciepła do podłoża i większą masą betonu poniżej czujnika. Oznacza to przyrost temperatury o ok. 40–45 °C względem temperatury początkowej mieszanki (rys. 5.30). Po osiągnięciu maksimum beton stygł bardzo wolno – po ośmiu dobach od ułożenia temperatura rdzenia nadal wynosiła 51,7–55,7 °C, a stref przypowierzchniowych 44,4–50,1 °C, mimo spadku temperatury powietrza do 7,4 °C w nocy 11 września. Tak powolne stygnięcie jest korzystne z punktu widzenia ograniczania naprężeń termicznych, ale oznacza, że reżim pielęgnacji (osłony termiczne, ograniczenie chłodzenia powierzchni) należy utrzymywać znacznie dłużej niż w elementach cienkościennych.




*Rys. 5.30. Maksymalne temperatury betonu zarejestrowane w kanałach pomiarowych punktów T1–T4 (T4 TOP – wartość sprzed betonowania). Źródło: opracowanie własne.*

Z punktu widzenia ryzyka zarysowań termicznych kluczowa jest różnica temperatur w przekroju. Na rysunku 5.31 przedstawiono przebieg różnic MIDDLE − TOP (rdzeń – strefa górna) i MIDDLE − BOTTOM (rdzeń – strefa dolna) wyznaczonych z danych zagregowanych do kroku godzinowego, a ich wartości ekstremalne zestawiono w tabeli 5.51. Największe różnice rdzeń – powierzchnia górna wystąpiły w pierwszej dobie po ułożeniu (noc 3/4 września), gdy powierzchnia stygła, a rdzeń już się nagrzewał: 11,7 K w punkcie T1 i 11,6 K w punkcie T2; w punkcie T3 różnica ta była mniejsza (8,0 K, 7 września), natomiast większa okazała się różnica rdzeń – strefa dolna (9,0 K, 5 września). Raport platformy podaje odpowiadające im maksymalne bezwzględne różnice względem kanału BOTTOM w przedziale od −9,2 do −10,4 K. W fazie ustalonej (od 6 do 11 września) różnica rdzeń – powierzchnia

górna utrzymywała się na poziomie 5–8 K. Wszystkie zarejestrowane wartości pozostały wyraźnie poniżej 20 K – wartości przyjmowanej powszechnie w praktyce jako orientacyjna granica ryzyka rys termicznych w betonie masywnym (o ile specyfikacja projektowa nie stanowi inaczej), co należy uznać za potwierdzenie poprawności doboru spoiwa i pielęgnacji. Istotne jest również, że zarówno wartości ekstremalne, jak i moment ich wystąpienia (pierwsza noc po betonowaniu) były dostępne dla nadzoru w czasie rzeczywistym w aplikacji InSite wraz z możliwością ustawienia alarmów, co pozwala reagować (np. dodatkowym okryciem powierzchni) zanim gradient osiągnie wartość krytyczną.




*Rys. 5.31. Różnice temperatur w przekroju fundamentu: rdzeń − strefa górna (linie ciągłe) i rdzeń − strefa dolna (linie przerywane) w punktach T1–T3, wartości godzinowe, 03–11.09.2026 r. Źródło: opracowanie własne.*

*Tabela 5.51. Maksymalne różnice temperatur w przekroju fundamentu (obliczenia własne z danych godzinowych) oraz wartości podane w raporcie platformy*

| Punkt | ΔT max MIDDLE − TOP [K] | Czas wystąpienia | ΔT max MIDDLE − BOTTOM [K] | ΔT MIDDLE − TOP w dniu 11.09 [K] | Maks. bezwzgl. różnica wg raportu TOP vs BOTTOM [K] | Maks. bezwzgl. różnica wg raportu MIDDLE vs BOTTOM [K] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| T1 | 11,7 | 04.09 0:00 | 5,4 | 7,8 | −9,5 | 5,7 |
| T2 | 11,6 | 03.09 23:00 | 6,0 | 5,6 | −9,2 | −9,8 |
| T3 | 8,0 | 07.09 12:00 | 9,0 | 7,3 | −10,2 | −10,1 |
| T4 | – | – | – | – | −10,4 | – |

*Źródło: opracowanie własne.*

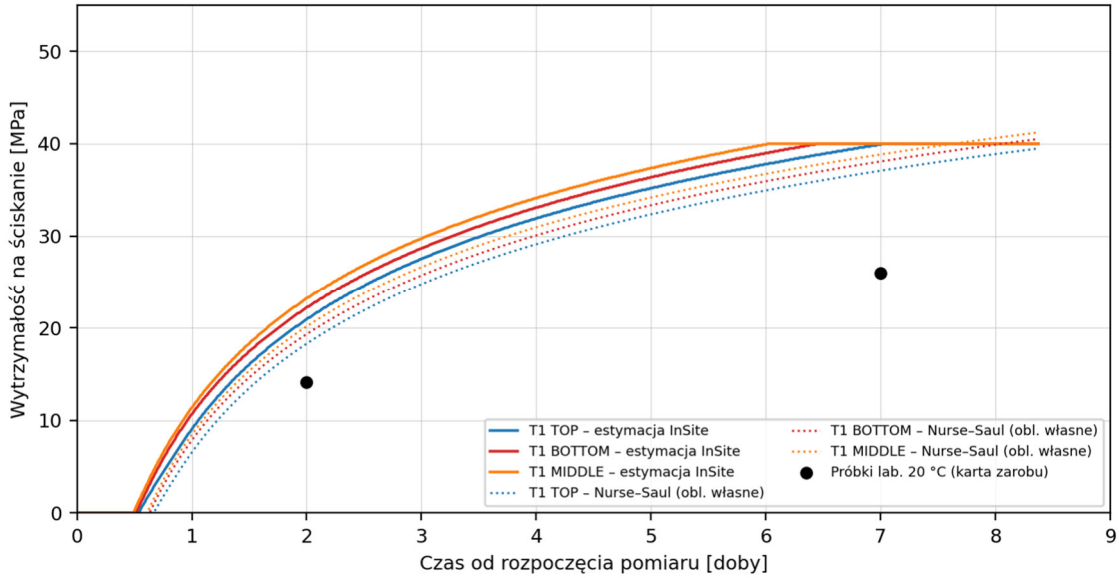
Najbardziej interesującym z punktu widzenia gospodarki deskowaniami elementem wdrożenia jest estymacja wytrzymałości in situ. Platforma InSite, na podstawie historii temperatury z termopar punktu T1 i przypisanej receptury, szacowała bieżącą wytrzymałość na ściskanie betonu w trzech strefach przekroju (rys. 5.32). Czasy osiągnięcia kolejnych progów wytrzymałości zestawiono w tabeli 5.52. Według estymacji platformy beton w rdzeniu osiągnął 10 MPa po ok. 22 h, 20 MPa po ok. 40 h, 30 MPa po ok. 73 h i wartość końcową modelu 40 MPa po ok. 144 h (6 dób); w strefie górnej odpowiednio po 25, 45, 84 i 168 h. Różnica między rdzeniem a powierzchnią wynosiła zatem od ok. 3 h dla niskich progów do ok. 24 h dla progu 40 MPa. Należy podkreślić, że 40 MPa jest wartością „wytrzymałości końcowej" ustawioną w modelu, do której estymacja jest ograniczona (plateau na wykresie); wynik laboratoryjny fcm,28 = 48,5 MPa wskazuje, że rzeczywisty przyrost trwa dalej, a ustawienie to należy traktować jako konserwatywne.

*Tabela 5.52. Czas osiągnięcia progów estymowanej wytrzymałości na ściskanie in situ (InSite/TEMO, punkt T1), liczony od 03.09.2026 r. godz. 8:07*

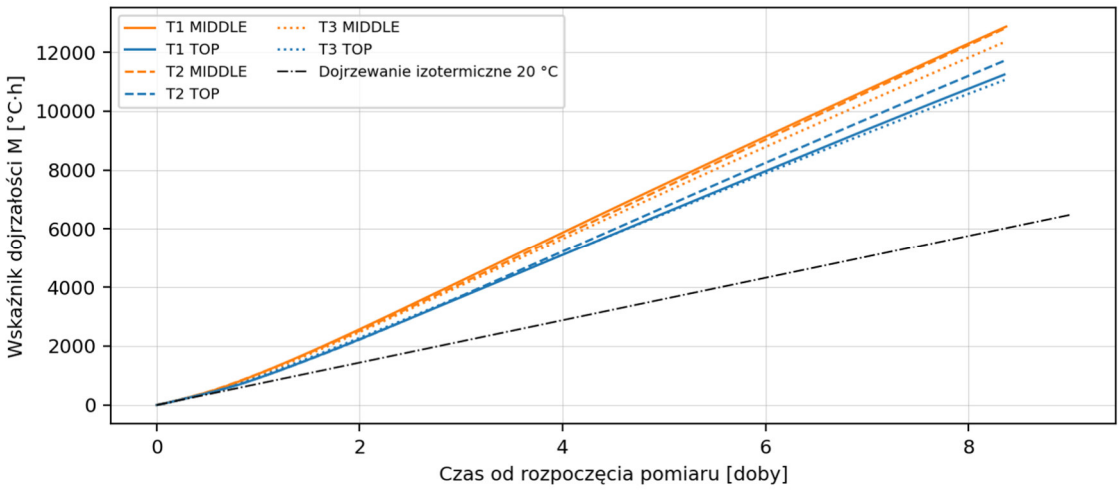
| Próg fc [MPa] | T1 TOP [h] | T1 BOTTOM [h] | T1 MIDDLE [h] | T1 MIDDLE [doby] | Różnica TOP − MIDDLE [h] |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 18,8 | 17,2 | 16,5 | 0,7 | 2,3 |
| 10 | 25,4 | 23,1 | 22,3 | 0,9 | 3,1 |
| 15 | 34,0 | 31,0 | 29,7 | 1,2 | 4,3 |
| 20 | 45,4 | 42,1 | 39,9 | 1,7 | 5,5 |
| 25 | 61,3 | 57,1 | 53,5 | 2,2 | 7,8 |
| 30 | 84,4 | 78,4 | 73,1 | 3,0 | 11,3 |
| 35 | 118,1 | 109,1 | 101,7 | 4,2 | 16,4 |
| 40 (plateau modelu) | 168,3 | 154,5 | 144,4 | 6,0 | 23,9 |

*Źródło: opracowanie własne.*

W celu niezależnej weryfikacji estymacji platformy wykonano obliczenie własne metodą Nurse–Saula. Wskaźnik dojrzałości wyznaczono z zarejestrowanych historii temperatury przy temperaturze odniesienia T0 = −10 °C (wartość domyślna ASTM C1074 przy braku badań własnych), a krzywą kalibracyjną fc = a + b·ln(M) dopasowano do trzech wyników z karty zarobu próbnego (2, 7 i 28 dni) przy założeniu pielęgnacji próbek w 20 °C, uzyskując a = −82,66, b = 13,09 i $R^2$ = 0,979. Obliczenie ma charakter orientacyjny, ponieważ kalibracja nie została wykonana według pełnej procedury normowej (nie rejestrowano temperatury próbek laboratoryjnych, a dla spoiwa żużlowo-popiołowego zalecany jest model Arrheniusa z wyznaczoną doświadczalnie energią aktywacji [11.2]). Wyniki zestawiono na rysunkach 5.32 i 5.33 oraz w tabeli 5.53. Przebiegi obu estymacji są bardzo zbliżone: obliczenie własne daje wartości o 1–3 MPa niższe od estymacji platformy w przedziale 2–5 dób, a po 8,4 dobach wskaźnik dojrzałości rdzenia (12 870 °C·h) odpowiada wiekowi równoważnemu ok. 17,9 doby w 20 °C i wytrzymałości ok. 41 MPa; dla strefy górnej odpowiednio 11 240 °C·h, 15,6 doby i ok. 39,5 MPa. Innymi słowy, w konstrukcji masywnej beton po tygodniu osiąga poziom dojrzałości, który próbki laboratoryjne osiągnęłyby dopiero po ponad dwóch tygodniach – po 2 dobach estymowana wytrzymałość rdzenia (ok. 20 MPa) była już o ponad 40% wyższa niż wytrzymałość próbek laboratoryjnych w tym samym wieku (14,1 MPa), a po 7 dobach (ok. 39 MPa) półtorakrotnie wyższa (26,0 MPa).




*Rys. 5.32. Estymowana wytrzymałość na ściskanie betonu in situ w punkcie T1: estymacja platformy InSite (linie ciągłe), obliczenie własne metodą Nurse–Saula (linie kropkowane) oraz wyniki próbek laboratoryjnych dojrzewających w 20 °C (punkty). Źródło: opracowanie własne.*




*Rys. 5.33. Wskaźnik dojrzałości Nurse–Saula (T0 = −10 °C) wyznaczony z zarejestrowanych temperatur dla kanałów MIDDLE i TOP punktów T1–T3 na tle dojrzewania izotermicznego w 20 °C. Źródło: opracowanie własne.*

*Tabela 5.53. Porównanie wytrzymałości betonu: próbki laboratoryjne (20 °C), estymacja platformy InSite oraz obliczenie własne Nurse–Saula – punkt T1*

| Wiek [doby] | Próbki lab. fcm [MPa] | InSite T1 MIDDLE [MPa] | InSite T1 TOP [MPa] | Nurse–Saul T1 MIDDLE [MPa] | Nurse–Saul T1 TOP [MPa] | Wiek równoważny w 20 °C, T1 MIDDLE [doby] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | – | 11,7 | 9,4 | 9,1 | 7,1 | 1,5 |
| 2 | 14,1 | 23,3 | 21,0 | 20,4 | 18,5 | 3,6 |
| 3 | – | 29,8 | 27,6 | 26,8 | 24,9 | 5,9 |
| 5 | – | 37,4 | 35,2 | 34,3 | 32,4 | 10,5 |
| 7 | 26,0 | 40,0 | 40,0 | 38,9 | 37,1 | 15,0 |
| 8 | – | 40,0 | 40,0 | 40,7 | 38,9 | 17,1 |

*Uwaga: wartości InSite/Nurse–Saul odczytane z serii godzinowych; estymacja InSite ograniczona do 40 MPa. Źródło: opracowanie własne.*

Dla praktyki wykonawczej wynika z tego kilka wniosków:

1. warunek osiągnięcia wytrzymałości np. 15 MPa (typowej dla rozdeskowania ścian fundamentu) był w rdzeniu spełniony po ok. 30 h, a w strefie przypowierzchniowej po ok. 34 h – a więc znacznie wcześniej niż wynikałoby to z ekstrapolacji wyników laboratoryjnych (14,1 MPa po 48 h).
2. informacja o wytrzymałości in situ pozwala racjonalnie planować roboty następcze, w tym betonowanie etapu II fundamentu i obciążanie konstrukcji, w oparciu o dane, a nie o sztywne terminy kalendarzowe.
3. monitoring dostarcza cyfrowej dokumentacji przebiegu temperatur i dojrzewania, która – zgodnie z uwagą G. Byrki – stanowi dowód spełnienia wymagań przed inwestorem i nadzorem.
4. dla pełnego wykorzystania potencjału metody należałoby w kolejnych etapach wykonać kalibrację zgodną z ASTM C1074 (rejestracja temperatury próbek, więcej terminów badań, wyznaczenie energii aktywacji) oraz zwalidować estymację badaniem próbek pobranych z konstrukcji lub dojrzewających w warunkach zbliżonych do konstrukcji.

### 5.4.4. Druk 3D z betonu – drukarki COBOD w ofercie PERI 3D Construction

Drugim obszarem, w którym koncern PERI wykroczył poza tradycyjną ofertę deskowań, jest addytywne wytwarzanie konstrukcji betonowych (Buswell R. A. i in., 2018). W 2018 r. grupa PERI nabyła pakiet udziałów duńskiej spółki COBOD International – producenta drukarek bramowych BOD2, która

rok wcześniej wydrukowała w Kopenhadze pierwszy w Europie budynek w tej technologii („The BOD"). Współpraca była następnie rozszerzana: PERI uzyskało wyłączną dystrybucję drukarek COBOD w Niemczech, Austrii i Szwajcarii, a w kolejnym etapie objęto nią także Polskę, kraje Beneluksu, Francję oraz wybrane stany USA. W 2020 r. PERI sprzedało pierwszą drukarkę BOD2 niemieckiemu producentowi prefabrykatów Röser, a w Wallenhausen wydrukowano z jej użyciem pierwszy trzykondygnacyjny budynek mieszkalny; wcześniej w Beckum powstał pierwszy w Niemczech budynek drukowany dopuszczony do użytkowania. Działalność tę prowadzi obecnie wyodrębniona spółka PERI 3D Construction GmbH z siedzibą w Weißenhorn, która deklaruje ponad 15 projektów zrealizowanych dla klientów, z klientami i przez klientów w Niemczech, Austrii, Szwajcarii i USA, a wśród najnowszych realizacji wymienia m.in. biurowiec w Selsingen (pierwszy projekt drukowany w północnych Niemczech, wykonawca Matthäi, który następnie zainwestował we własny system drukujący) oraz trzy budynki w koncepcie DREIHAUS w Heidelbergu, prezentowanym jako start seryjnego budownictwa mieszkaniowego z drukarki.

Oferta PERI 3D Construction ma charakter kompleksowy: obejmuje drukarkę COBOD BOD2 wraz z silosem i pompą mieszającą, system asystujący 3D MATCONTROL (zestaw czujników zapewniających powtarzalność wydruku przy zmiennych warunkach na budowie), w pełni zaprojektowany, modułowy koncept budynku DREIHAUS, dwutygodniowe szkolenia (od planowania i montażu po druk i konserwację), wsparcie w procesie uzyskiwania pozwoleń oraz doświadczony personel na budowie w trakcie pierwszych projektów; dodatkowe moduły drukarki można wynajmować. Charakterystykę techniczną drukarki zestawiono w tabeli 5.54. BOD2 jest modułową drukarką bramową montowaną wokół pola druku; głowica porusza się w trzech osiach, a maksymalne wymiary obiektu w największej konfiguracji to 13,5 m szerokości i 9 m wysokości przy praktycznie nieograniczonej długości. Prędkość druku sięga 1 m/s (do 25 cm/s przy jednoczesnej pracy ręcznej w polu druku), co pozwala wydrukować 1 m² ściany dwuwarstwowej w ok. 5 minut; system jest otwarty na dowolny materiał drukowalny o uziarnieniu do 10 mm, a warstwy mają wysokość 1–4 cm i szerokość 3–10 cm. Montaż drukarki dla budynku wielorodzinnego (13,5 × 17 × 9 m) zajmuje ok. 1,5–2 dni, a obsługa wymaga dwóch–trzech pracowników nadzorujących proces. Drukarka jest oferowana do zakupu przez PERI 3D Construction w Niemczech, Austrii, Szwajcarii, Francji i w Polsce.

*Tabela 5.54. Charakterystyka drukarki COBOD BOD2 w ofercie PERI 3D Construction*

| Parametr | Wartość / opis |
|---|---|
| Producent / dystrybucja | COBOD International (Dania); PERI 3D Construction GmbH (Weißenhorn) – zakup w DE, AT, CH, FR i PL |
| System | Modułowa drukarka bramowa, głowica w 3 osiach; rozbudowa o wynajmowane moduły |
| Maks. wymiary wydruku | 13,5 m szerokości, 9 m wysokości, długość praktycznie nieograniczona |
| Prędkość druku | do 1 m/s (do 25 cm/s przy pracy ręcznej w polu druku); 1 m² ściany dwuwarstwowej w ok. 5 min |
| Materiał | dowolny materiał drukowalny o uziarnieniu do 10 mm |
| Warstwy | wysokość 1–4 cm, szerokość 3–10 cm; obrotowa dysza, automatyczne wygładzanie, wiele dysz |
| Montaż | 1,5–2 dni dla konfiguracji 13,5 × 17 × 9 m; kotwienie do płyty lub bloków betonowych; usługa montażu |
| Formaty danych | .STP, .IGS, .BREP, .OCC |
| Bezpieczeństwo | certyfikat CE, okablowanie IP67, ocynkowane liny stalowe; opcjonalny monitoring kamerowy |
| Wyposażenie dodatkowe | silos i pompa mieszająca w komplecie; 3D MATCONTROL; koncept DREIHAUS; szkolenia 2-tygodniowe; wsparcie na budowie |

*Źródło: opracowanie własne.*

W Polsce najgłośniejszym dotychczas zastosowaniem drukarki COBOD jest zbiornik na wodę pitną w Barczewku koło Olsztyna, wydrukowany jesienią 2024 r. dla Zakładu Wodociągów i Kanalizacji w Barczewie w ramach kontraktu „zaprojektuj i wybuduj" realizowanego przez firmę EKO-WOD z Kętrzyna, we współpracy Holcim Polska, Globtank i COBOD; według komunikatu Holcim Polska jest to pierwszy na świecie zbiornik na wodę pitną i pierwszy w Europie betonowy zbiornik na ciecze wykonany

w tej technologii. Obiekt o wysokości 7 m i średnicy wewnętrznej 7,6 m wydrukowano z materiału TectorPrint w ciągu 38 godzin aktywnego drukowania rozłożonych na 5 dni; druk pozwolił na zastosowanie największej grubości ścian u dołu i jej stopniową redukcję z wysokością, co przyniosło oszczędność materiału rzędu 25% i dwukrotne przyspieszenie wykonania ścian w stosunku do metod tradycyjnych. Inwestycję współfinansowano ze środków Europejskiego Funduszu Rolnego (PROW 2014–2020) przy wsparciu Samorządu Województwa Warmińsko-Mazurskiego. Podstawowe dane zestawiono w tabeli 5.55. Należy zaznaczyć, że sam druk został wykonany przez COBOD, a publiczne komunikaty o projekcie nie wymieniają PERI jako uczestnika – realizacja ta jest jednak referencją dla technologii, którą PERI 3D Construction oferuje na rynku polskim.

*Tabela 5.55. biornik na wodę pitną w Barczewku – pierwszy w Polsce obiekt wydrukowany drukarką COBOD*

| Parametr | Wartość / opis |
|---|---|
| Lokalizacja / inwestor | Barczewko k. Olsztyna; Zakład Wodociągów i Kanalizacji w Barczewie |
| Formuła realizacji | „zaprojektuj i wybuduj"; generalny wykonawca EKO-WOD (Kętrzyn); partnerzy: Holcim Polska, Globtank, COBOD |
| Wymiary | wysokość 7 m, średnica wewnętrzna 7,6 m; zmienna grubość ścian (największa u dołu) |
| Materiał | TectorPrint (COBOD) |
| Czas druku | 38 h aktywnego drukowania w ciągu 5 dni |
| Efekty | oszczędność materiału ok. 25%; dwukrotne przyspieszenie wykonania ścian |
| Finansowanie | EFRROW – PROW 2014–2020, Samorząd Woj. Warmińsko-Mazurskiego |
| Data informacji | listopad 2024 r. |

*Źródło: opracowanie własne.*

Rozwój technologii w Polsce wspiera instytucjonalnie Polskie Stowarzyszenie Druku 3D w Budownictwie (PL-3DPC, KRS 0001120665), zarejestrowane w 2024 r. Celem statutowym Stowarzyszenia jest promowanie i rozwój technologii druku 3D w branży budowlanej, integracja środowiska naukowego, przemysłowego i instytucji publicznych w celu wymiany wiedzy i najlepszych praktyk w kraju i za granicą oraz ugruntowanie pozycji druku 3D jako integralnej części procesów projektowania i wytwarzania elementów budowlanych. Cele te realizowane są m.in. przez pracę naukowo-techniczną i działalność oświatową, tworzenie platformy wymiany wiedzy, inicjowanie zapisów legislacyjnych wspierających stosowanie nowoczesnych produktów budowlanych, współpracę z instytucjami finansowymi i branżą w zakresie finansowania technologii, współpracę międzynarodową, działalność medialną i wydawniczą, organizację warsztatów, szkoleń i wydarzeń networkingowych oraz konkursów promujących budownictwo w technologii przyrostowej. Stowarzyszenie skupia obecnie 19 członków, w większości pracowników naukowych polskich uczelni technicznych i praktyków; zarząd tworzą Paweł Sikora (prezes), Arkadiusz Andrzejuk (wiceprezes), Aleksandra Ludwiczak-Sarzała (skarbnik) i Mateusz Techman (sekretarz). Dla producenta deskowań tak zorganizowane środowisko stanowi naturalnego partnera w tworzeniu krajowych wytycznych i podstaw normowych dla obiektów drukowanych – czyli obszaru, który obecnie jest główną barierą upowszechnienia technologii.

Z perspektywy koncepcji FFF druk 3D należy postrzegać jako skrajny przypadek uelastycznienia przepływu deskowań: konstrukcja ściany powstaje bez deskowania, a więc znikają operacje montażu, demontażu, czyszczenia i transportu zestawów, które stanowią rdzeń analizowanych w pracy marnotrawstw. Jednocześnie technologia ta nie eliminuje deskowań całkowicie – stropy, nadproża, fundamenty i elementy o skomplikowanej geometrii nadal wymagają form tradycyjnych, a drukowane ściany pełnią często rolę deskowania traconego wypełnianego betonem konstrukcyjnym. Właśnie ta komplementarność uzasadnia strategię PERI, w której drukarka nie zastępuje, lecz uzupełnia system deskowań, a wspólnym mianownikiem obu obszarów jest cyfryzacja procesu betonowania.

### 5.4.5. Podsumowanie – nowe technologie PERI a koncepcja Flexible Formwork Flow

Zestawienie trzech opisanych w podrozdziale wdrożeń systemu InSite w Polsce przedstawiono w tabeli 5.56. Łączy je wspólna logika: zastąpienie decyzji technologicznych opartych na doświadczeniu i sztywnych terminach decyzjami opartymi na danych pomiarowych z konstrukcji. W pomiarach parcia

(S7 Rdzawka, ściana wysoka 2025) dane te dotyczą bezpośrednio obciążenia deskowania i tempa betonowania, w monitoringu dojrzewania (S7 Rdzawka, CCGT Grudziądz) – momentu, w którym deskowanie może zostać zdjęte, a konstrukcja obciążona lub włączona do kolejnego etapu robót.

*Tabela 5.56. □estawienie wdrożeń systemu InSite/VEMAVENTURI w Polsce opisanych w podrozdziale*

| Wdrożenie | Element / technologia | Czujniki | Beton / warunki | Kluczowe wyniki |
|---|---|---|---|---|
| S7 Rdzawka (03.2022) | Ustrój nośny mostu – nasuwanie podłużne (PERI VIL) | PREMO, TEMO | C50/60, ok. −1 °C | Parcie: etap 1 – 1,8–6,9 kN/m²; etap 2 – 28–36 kN/m²; po 12 h ok. 17,5 N/mm² (< 25 N/mm² wymagane) |
| Ściana wysoka (25.02.2025) | Ściana konstrukcyjna do 9,72 m, deskowanie PERI TRIO | PREMO (8 czujników, 2 zestawy) + 3 siłomierze analogowe | C35/45 W8 XC2 XD2 XA2 XM3, S2, +4 °C, 17 × 11,5 m³ | Parcie max 51,17 kPa; różnica międzykanałowa ≤ ±0,7 kPa (<~1,5%); wzrost parcia przy wibrowaniu; opóźniona odpowiedź siłomierzy |
| CCGT Grudziądz (09.2026) | Fundament masywny UMC etap I | TEMO – 7 jednostek, 4 punkty (T1–T4) po 2–3 kanały; estymacja wytrzymałości | MASYW, (XA1) XC2, C30/37, CEM III/A 42,5 N LH/HSR/NA, w/c 0,507 | Tmax 59,6 °C (rdzeń T1, 76 h); ΔT rdzeń–powierzchnia max 11,7 K; 20 MPa po ok. 40 h, 40 MPa (plateau modelu) po ok. 6 dobach |

*Źródło: opracowanie własne.*

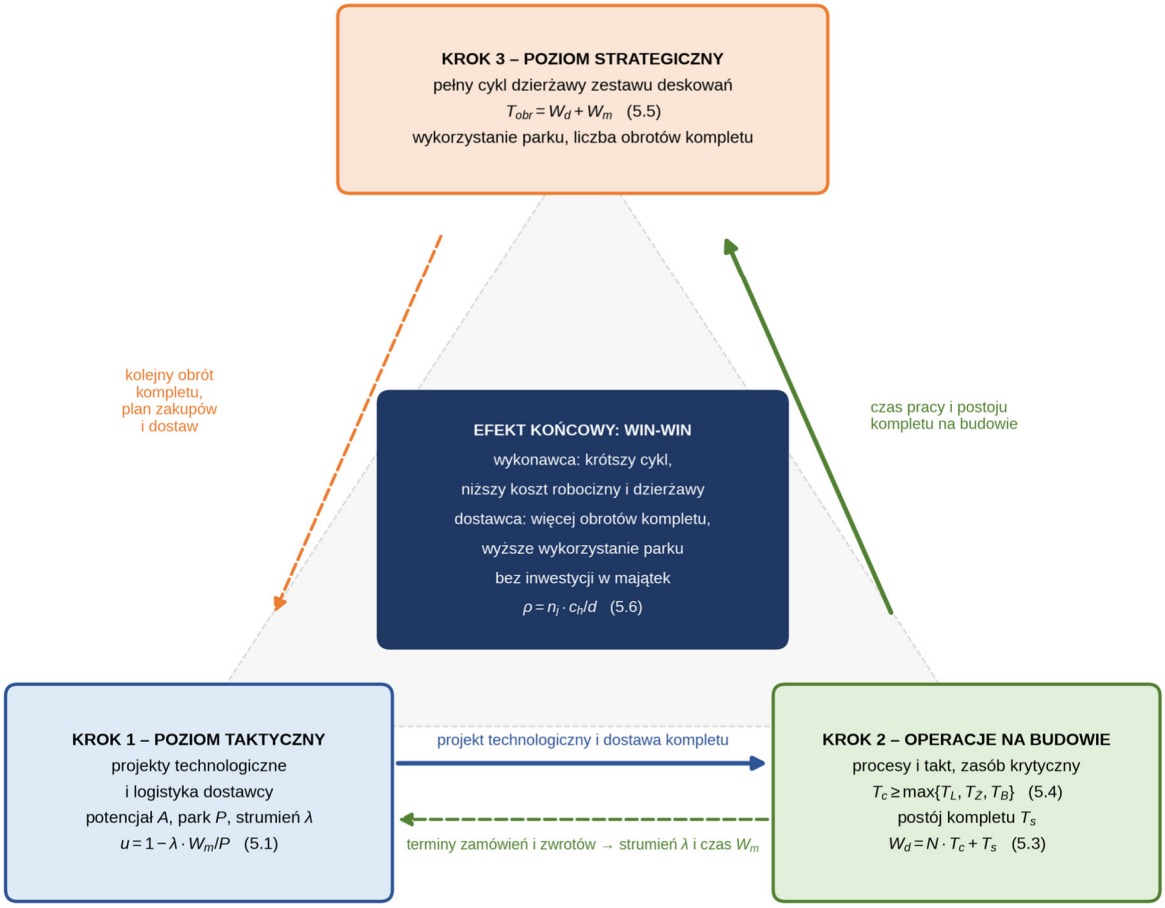
Na tym tle sformułować można główny wniosek podrozdziału: wdrożenie systemu czujników InSite/VEMAVENTURI na budowie CCGT w Grudziądzu jest jednym z trzech udanych wdrożeń nawiązujących do rozwijanej w niniejszej pracy koncepcji Flexible Formwork Flow. Koncepcja FFF zakłada, że przepływ zestawów deskowań przez kolejne takty robót powinien być sterowany rzeczywistym stanem konstrukcji (parcie w trakcie betonowania, dojrzałość i wytrzymałość po betonowaniu), a nie wyłącznie harmonogramem kalendarzowym i zapasami bezpieczeństwa. Czujniki PREMO odpowiadają na pierwszą z tych potrzeb, czujniki TEMO na drugą. Mając jednocześnie świadomość, że zastosowanie czujników TEMO w fundamencie masywnym nie ma bezpośredniego związku z gospodarką deskowaniami na budowie – w elemencie tego typu deskowanie krawędziowe nie jest elementem krytycznym, a ciepło hydratacji i gradienty termiczne są zagadnieniem technologii betonu, nie organizacji robót. Wdrożenie to stanowi jednak idealne uzupełnienie portfolio PERI dla rynku żelbetowego w Polsce i na świecie: ten sam sprzęt, ta sama platforma i te same procedury, które w Grudziądzu nadzorują beton masywny, na obiekcie kubaturowym pozwalają skrócić cykl deskowania stropu czy ściany o czas, który dotąd był rezerwą bezpieczeństwa. Dane z Grudziądza pokazują skalę tej rezerwy: po dwóch dobach beton w konstrukcji miał estymowaną wytrzymałość o ok. 40% wyższą niż próbki laboratoryjne, a po tygodniu – półtorakrotnie wyższą.

W szerszej perspektywie opisane technologie wpisują się w kształtujące się obecnie paradygmaty Construction 5.0 i Industry 6.0, w których cyfryzacja i automatyzacja (czujniki, chmura, druk 3D) są podporządkowane współpracy człowieka z technologią, odporności procesów i zrównoważeniu. Monitoring betonu w czasie rzeczywistym przenosi decyzje z poziomu intuicji na poziom danych, ale pozostawia je człowiekowi – kierownikowi budowy i technologowi – dostarczając im narzędzi do bezpiecznego skracania cykli; druk 3D z kolei automatyzuje najbardziej pracochłonną część robót żelbetowych i ogranicza zużycie materiału. Koncern PERI, oferując oba te rozwiązania obok klasycznych systemów deskowań, ma realny wpływ na tworzenie nowych trendów na rynku żelbetowym i na to, w jakim kierunku będzie ewoluować gospodarka deskowaniami na placach budowy w najbliższej dekadzie. Dalsze prace badawcze powinny objąć pełną kalibrację i walidację metody dojrzałości dla mieszanek stosowanych na budowie CCGT (etap II fundamentu), a także pilotażowe zastosowanie czujników TEMO w elementach kubaturowych, w których skrócenie cyklu deskowania przekłada się bezpośrednio na mierzalne wskaźniki FFF.

## 5.5. Podsumowanie części wdrożeniowej – weryfikacja tez, metoda FFF i przesłanki dla warstwy uczącej SSN

### 5.5.1. Model przepływu FFF – synteza części badawczej i wdrożeniowej

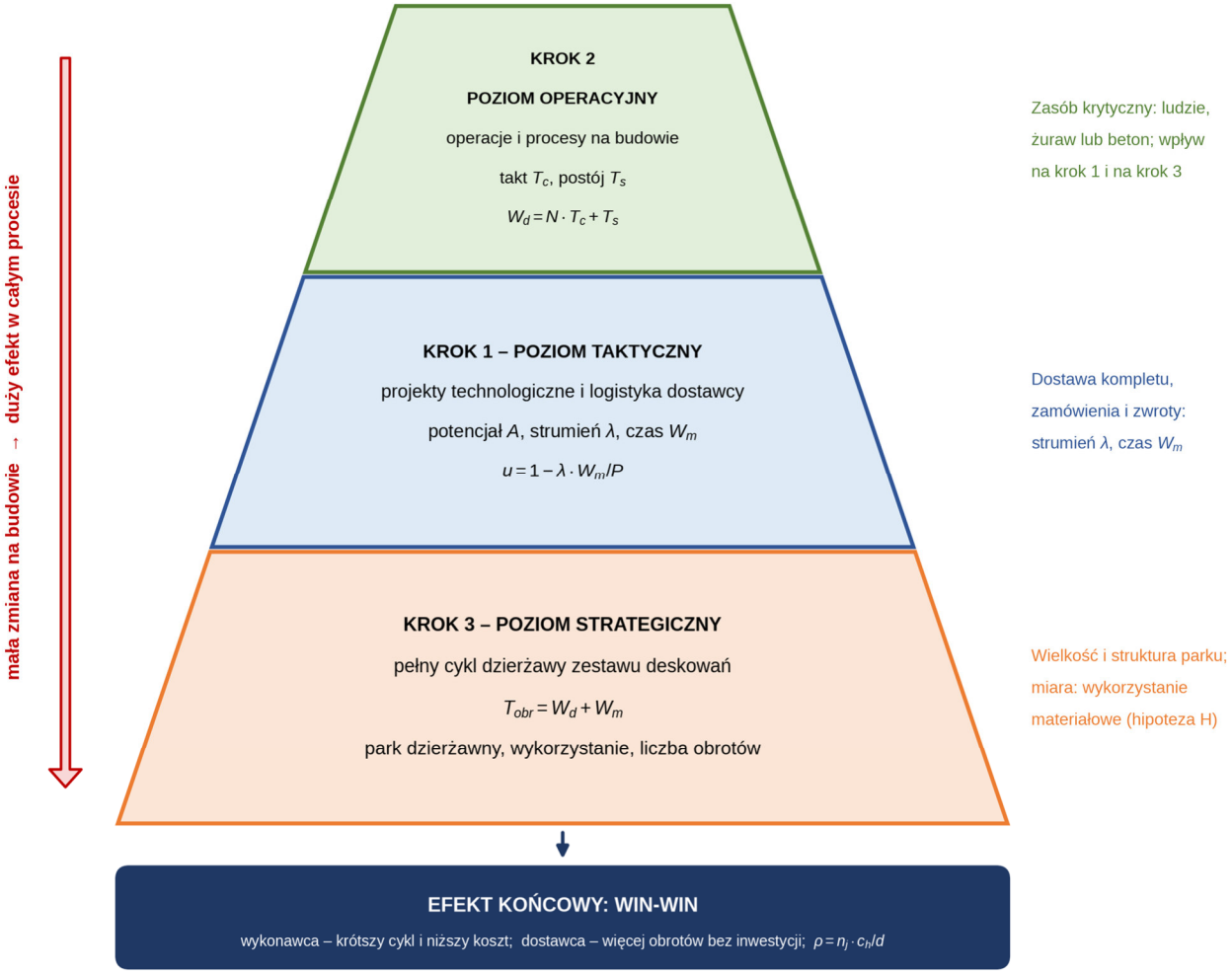
Wyniki rozdziałów 4 i 5 można ująć w prostym modelu matematycznym, który opisuje pełny obieg kompletu deskowania w łańcuchu dostawca–budowa–dostawca i pokazuje, od czego zależy jego efektywność. Model nie wprowadza nowych praw, lecz składa w jedną całość zależności, które w rozprawie zostały już wykorzystane i częściowo skalibrowane na danych: prawo Little'a (Little J. D. C., 1961), zasadę ogniwa krytycznego z teorii ograniczeń (Goldratt E. M., Cox J., 1984), model bilansu pracy z podrozdziału 5.2.4 oraz model poglądowy relacji kosztu robocizny i dzierżawy z podrozdziału 5.3.3. Wyprowadzenie przebiega w trzech krokach, odpowiadających trzem poziomom zarządzania przepływem deskowań: poziomowi taktycznemu (projekty technologiczne i logistyka dostawcy), poziomowi operacyjnemu (operacje i procesy na budowie) oraz poziomowi strategicznemu (pełny cykl dzierżawy zestawu deskowań). Kroki te wynikają kolejno jeden z drugiego, a ich wspólnym rezultatem jest efekt końcowy o charakterze korzyści obustronnej – dla wykonawcy i dla dostawcy (rys. 5.34).




*Rys. 5.34. Model przepływu FFF – trzy poziomy zarządzania przepływem deskowań (taktyczny, operacyjny, strategiczny) i efekt końcowy o charakterze korzyści obustronnej (win-win). Źródło: opracowanie własne.*

Te same trzy kroki można przedstawić w układzie piramidy (rys. 5.35). Numeracja kroków pozostaje przy tym taka sama jak w modelu: kolejność 1–2–3 wyraża logikę wynikania – od projektu technologicznego i dostawy kompletu, przez operacje na budowie, do pełnego cyklu dzierżawy zestawu – natomiast układ piramidy wyraża zasięg oddziaływania poszczególnych poziomów. Na wierzchołku umieszczono krok 2 – poziom operacyjny, najwęższy zakresowo, obejmujący pojedyncze takty i operacje na budowie – ponieważ to on wpływa zarówno na krok 1, jak i na krok 3. Niżej leży krok 1 – poziom taktyczny, wiążący budowę z projektem technologicznym i logistyką dostawcy, a u podstawy

krok 3 – poziom strategiczny, obejmujący pełny cykl dzierżawy zestawów i cały park dzierżawny. Układ ten obrazuje efekt dźwigni: niewielka zmiana postępowania na budowie, u wierzchołka piramidy, przenosi się na coraz szersze poziomy i w efekcie kształtuje wynik całego parku. Podstawą całej konstrukcji jest efekt końcowy – korzyść obustronna wykonawcy i dostawcy.




*Rys. 5.35. Piramida zasięgu oddziaływania kroków modelu przepływu FFF – od kroku 2 (poziom operacyjny, budowa), przez krok 1 (poziom taktyczny), do kroku 3 (poziom strategiczny, pełny cykl dzierżawy zestawu) – i efekt końcowy o charakterze korzyści obustronnej (win-win). Źródło: opracowanie własne.*

**Krok 1 – poziom taktyczny: projekty technologiczne i logistyka dostawcy.** Punktem wyjścia jest projekt technologiczny przygotowany przez dostawcę – rysunki obmiarowe i schematy deskowań, wyznaczające potencjał deskowań, czyli powierzchnię $A$, którą w jednym takcie musi obsłużyć komplet danego typu. Studium budowy INDUSTRIAL wykazało, że potencjał wyznaczony przez dostawcę z rysunków jest wiarygodniejszą miarą zakresu robót niż przedmiar wykonawcy (podrozdział 5.1), dlatego to on powinien stanowić podstawę planowania dostaw. Na tym samym poziomie działa logistyka dostawcy. Niech $P$ oznacza wartość parku dzierżawnego danej grupy produktowej, $\lambda$ – średnią intensywność przepływu materiału (wartość wydawaną i zwracaną w jednostce czasu), $W_d$ – średni czas przebywania elementu w dzierżawie, a $W_m$ – średni czas przebywania elementu poza dzierżawą, obejmujący zwrot, przyjęcie, czyszczenie, sortowanie, naprawę, składowanie, kompletację i wydanie. Zgodnie z prawem Little'a średnia wartość materiału w dzierżawie wynosi $L_d = \lambda \cdot W_d$, a poza dzierżawą $L_m = \lambda \cdot W_m$. W stanie ustalonym $P = L_d + L_m$, a zatem wskaźnik wykorzystania materiałowego $u = L_d / P$ można zapisać w dwóch równoważnych postaciach:

$$u = \frac{W_d}{W_d + W_m} = 1 - \frac{\lambda \cdot W_m}{P} \tag{5.1}$$

Druga postać wzoru (5.1) pokazuje, że przy danej wielkości parku i danym strumieniu materiału o wykorzystaniu decyduje czas, jaki element spędza poza dzierżawą. Aby podnieść wykorzystanie ze stanu wyjściowego $u_0$ do wartości docelowej $u^*$, czas ten musi zmaleć do wartości:

$$W_m^* = W_m \cdot \frac{1 - u^*}{1 - u_0} \tag{5.2}$$

Dla stanu wyjściowego $u_0$ = 59,8% i celu $u^*$ = 75% (podrozdział 5.2) iloraz $(1 - u^*)/(1 - u_0)$ wynosi 0,25/0,402 ≈ 0,62. Oznacza to konieczność skrócenia średniego czasu przebywania elementu poza dzierżawą o ok. 38% – co jest zgodne z wynikiem podrozdziału 5.2.5 i hipotezą operacyjną sformułowaną w podrozdziale 3.3. Na czas $W_m$ oddziałują ustalenia podrozdziału 4.3 (punkty styku między uczestnikami procesu i nieformalna obsługa ścieżek wyjątkowych) oraz podrozdziału 5.2 (brak rejestru odchyleń terminów zwrotów i „grube ogony" rozkładu odchyleń wydań).

**Krok 2 – poziom operacyjny: operacje i procesy na budowie.** Projekt technologiczny i dostarczony komplet uruchamiają operacje na budowie. To one wiążą oba pozostałe poziomy: od nich zależy, ile czasu komplet spędzi w dzierżawie (krok 3), a także kiedy zostanie zamówiony i zwrócony, a więc jaki będzie strumień $\lambda$ i czas $W_m$ po stronie dostawcy (krok 1). Czas, jaki komplet deskowania spędza w dzierżawie na budowie, jest sumą czasów taktów, w których komplet pracuje, oraz czasu, w którym leży bez produkcji:

$$W_d = N \cdot T_c + T_s \tag{5.3}$$

gdzie $N$ – liczba taktów (użyć kompletu) na budowie, $T_c$ – czas taktu, $T_s$ – łączny czas postoju kompletu bez produkcji. Czas taktu nie może być krótszy niż czas wymagany przez najbardziej obciążony z zasobów, które biorą w nim udział. W rozprawie wyróżniono trzy takie zasoby – ludzi, logistykę (w szczególności żuraw) oraz beton, którego dojrzewanie wyznacza najwcześniejszy termin rozdeskowania – stąd:

$$T_c \geq \max\{T_L, T_{\dot{Z}}, T_B\}, \quad T_L = \frac{A \cdot n_j}{Z \cdot h \cdot (1 + s \cdot g \cdot k)} \tag{5.4}$$

gdzie $T_L$, $T_{\dot{Z}}$ i $T_B$ oznaczają czas taktu wymagany odpowiednio przez potencjał ludzi, potencjał logistyczny i proces technologiczny betonu, $A$ – powierzchnię deskowania w takcie [m²], $n_j$ – nakład jednostkowy [rb-g/m²], □ – liczbę pracowników brygady, $h$ – liczbę godzin pracy jednego pracownika w takcie, a czynnik $(1 + s \cdot g \cdot k)$ – efekt urządzeń wspomagających pracę, zgodnie z modelem z podrozdziału 5.2.4 ($s$ – udział prac wspieranych, $g$ – wzrost wydajności tych prac, $k$ – współczynnik przeniesienia efektu na budowę). W przepływie zsynchronizowanym nierówność (5.4) przechodzi w równość: takt jest równy czasowi zasobu krytycznego.

Wpływ operacji na budowie na poziom taktyczny jest bezpośredni. Zamówienia składane z wyprzedzeniem krótszym niż standardowy czas realizacji oraz terminy zwrotów deklarowane, a nie rzeczywiste (podrozdział 5.2), przenoszą zmienność z budowy do logistyki dostawcy i wydłużają czas $W_m$.

**Krok 3 – poziom strategiczny: pełny cykl dzierżawy zestawu deskowań.** Wynik obu poprzednich kroków składa się na pełny cykl dzierżawy zestawu – od wydania, przez pracę i postój na budowie, po zwrot, przygotowanie i ponowne wydanie. Łącząc wzory (5.1), (5.3) i (5.4), otrzymuje się czas pełnego obiegu kompletu deskowania w łańcuchu dostawca–budowa–dostawca, nazywany dalej wzorem przepływu FFF:

$$T_{obr} = W_d + W_m = N \cdot \max\left\{\frac{A \cdot n_j}{Z \cdot h \cdot (1 + s \cdot g \cdot k)}, T_{\dot{Z}}, T_B\right\} + T_s + W_m \tag{5.5}$$

Wykorzystanie materiałowe parku wynosi wówczas $u = (N \cdot T_c + T_s)/T_{obr}$, a liczba obrotów tego samego kompletu w roku jest odwrotnie proporcjonalna do $T_{obr}$.

Na tym poziomie zapadają decyzje o wielkości i strukturze parku dzierżawnego, a miarą wyniku jest wykorzystanie materiałowe całego parku, którego dotyczy hipoteza operacyjna rozprawy. Krótszy czas $T_{obr}$ oznacza więcej obrotów tego samego kompletu, a więc możliwość obsłużenia większej liczby budów bez zakupu nowego sprzętu.

**Efekt końcowy – korzyść obustronna (win-win).** Skrócenie składników czasu $T_{obr}$ przynosi korzyść obu stronom. Dla wykonawcy koszt taktu robót deskowaniowych składa się z kosztu robocizny i kosztu

dzierżawy kompletu. Relację obu składników dla 1 m² deskowania, przy jednomiesięcznym okresie dzierżawy przypadającym na cykl – jak w modelu poglądowym z podrozdziału 5.3.3 – opisuje wskaźnik:

$$\rho = \frac{n_j \cdot c_h}{d} \tag{5.6}$$

gdzie $c_h$ – koszt roboczogodziny [zł/rb-g], a $d$ – miesięczna stawka dzierżawy deskowania [zł/m²]. Według modelu z podrozdziału 5.3.3 (nakład 0,75 rb-g/m², koszt roboczogodziny 27,97 zł w 2015 r. i 63,85 zł w 2025 r.) wskaźnik $\rho$ wzrósł z ok. 1,0 do ok. 1,6 – robocizna stała się dominującym składnikiem kosztu cyklu deskowaniowego.

Ponieważ robocizna jest dziś dominującym składnikiem kosztu cyklu, każdy dzień skrócenia taktu lub postoju oznacza dla wykonawcy oszczędność przede wszystkim kosztu pracy, a dopiero w drugiej kolejności – kosztu dzierżawy. Dla dostawcy ten sam dzień oznacza uwolnienie kompletu, który przy krótkim czasie $W_m$ może zostać niezwłocznie wydany na kolejną budowę. Wykonawca zyskuje krótszy cykl i niższy koszt, dostawca – więcej obrotów tego samego kompletu i wyższe wykorzystanie parku bez inwestycji w majątek, a na rynku, traktowanym jako układ naczyń połączonych, rośnie dostępność sprzętu dla pozostałych budów. Tak rozumiany efekt win-win jest kwintesencją metody FFF.

**Interpretacja składników.** Każdy składnik wzoru (5.5) został w rozprawie zbadany na danych i każdy wskazuje inną dźwignię usprawnień. Nakład jednostkowy $n_j$ zależy od systemu deskowania, ale w porównywalnym stopniu od organizacji pracy: praca zestawami obniża go z 0,34 do 0,30 rb-g/m², a rozstęp między systemami wynosi ok. 18% (podrozdział 4.1). Czynnik $(1 + s \cdot g \cdot k)$ reprezentuje wsparcie pracownika: w centrach logistycznych przyjęto $g$ = 45% dla egzoszkieletów i $g$ = 30% dla dźwigu obsługi ręcznej, a symulacja dla budowy wskazuje na redukcję nakładu robocizny cieśli i zbrojarzy o ok. 10–28% (podrozdział 5.2.4). Liczba pracowników □ jest ograniczona dostępnością wykwalifikowanych cieśli, którą 76% wykonawców ocenia jako słabą lub krytyczną (podrozdział 4.2). Czas logistyczny $T_Ż$ okazał się zasobem krytycznym na budowie INDUSTRIAL: jeden żuraw wymuszał takt 28 dni pomimo rezerwy wydajności brygady, a skrócenie taktu do 21 dni – czyli realizacji 15 kondygnacji z 420 do 315 dni – wymaga drugiego żurawia (podrozdział 5.1). Czas technologiczny $T_B$ można skrócić, rozdeskowując według zmierzonej, a nie kalendarzowej dojrzałości betonu: na budowie CCGT w Grudziądzu estymowana wytrzymałość betonu w konstrukcji po dwóch dobach była o ok. 40% wyższa od wytrzymałości próbek laboratoryjnych (podrozdział 5.4). Czas postoju $T_s$ odpowiada marnotrawstwu na budowie – na budowie INDUSTRIAL był to tydzień przestoju deskowania ściennego w każdym cyklu (ok. 92 tys. € czynszu) oraz wieże podporowe przetrzymane blisko pięć miesięcy dłużej, niż zakładał harmonogram – a wykonawcy aż w 68% lokalizują straty czasu właśnie wokół deskowania, a nie w samym montażu (podrozdział 4.2). Czas $W_m$ opisuje wreszcie przepływ po stronie dostawcy, w którym o ciągłości decydują punkty styku i informacja o rzeczywistych terminach zwrotów (podrozdziały 4.3 i 5.2).

**Uzasadnienie metody FFF.** Z wzoru (5.5) wynikają trzy wnioski, które stanowią formalne uzasadnienie metody FFF. Po pierwsze, ze względu na operator maksimum usprawnienie jednego zasobu skraca takt tylko wtedy, gdy zasób ten jest krytyczny. Poprawa wydajności brygady lub zmiana systemu deskowania, które skracają wyłącznie T_L, nie przyniosą efektu, jeżeli o takcie decyduje żuraw lub beton – co jest matematycznym wyrazem pierwszego twierdzenia tezy głównej: szybkość montażu systemu przekłada się na skrócenie cyklu tylko wtedy, gdy montaż jest zasobem krytycznym (teza TS1).. Efekt daje dopiero synchronizacja trzech potencjałów, a więc łączne projektowanie techniki i organizacji pracy. Po drugie, rosnący wskaźnik $\rho$ sprawia, że składniki zależne od pracy ludzi – $n_j$, □ i czynnik wsparcia – mają coraz większą wagę ekonomiczną, co uzasadnia przesunięcie punktu ciężkości usprawnień z ceny najmu na organizację i wsparcie pracy (teza TS2). Po trzecie, wzór (5.1) pokazuje, że skrócenie czasu na budowie ($N \cdot T_c + T_s$) nie podnosi samo przez się wykorzystania parku – przy niezmienionym $W_m$ wykorzystanie wręcz maleje. Uwolniony materiał zwiększa przychód dostawcy dopiero wtedy, gdy zostanie niezwłocznie wydany na kolejną budowę, a więc gdy krótki jest czas $W_m$. Usprawnienia na budowie i u dostawcy muszą więc być sprzężone informacją o rzeczywistym stanie elementów – co jest treścią tezy TS3 i istotą elastyczności w rozumieniu metody FFF. W tym ujęciu metoda FFF jest zestawem działań skracających jednocześnie wszystkie składniki $T_{obr}$, a nie optymalizacją pojedynczego z nich.

Wzór przepływu FFF porządkuje także zadania warstwy uczącej opisanej w podrozdziale 3.4. Jego struktura – prawo Little'a, operator maksimum i model bilansu pracy – jest jawna i interpretowalna, natomiast poszczególne składniki są wielkościami, które można prognozować na podstawie danych: nakład $n_j$ i czas taktu – siecią jednokierunkową uczącą się na próbie budów, czas $T_B$ – modelem hybrydowym łączącym metodę dojrzałości z korektą uczoną na danych z czujników, a czas $W_m$ i terminy zwrotów – siecią rekurencyjną uczącą się na szeregach tygodniowych. Takie połączenie jawnej struktury

z uczonymi składnikami odpowiada przyjętemu w rozprawie postulatowi, by w decyzjach o wysokiej stawce preferować modele interpretowalne (Rudin C., 2019) i łączyć modele statystyczne z komponentami sieci neuronowych (Lim B., Zohren S., 2021). Zadania uczenia omówiono szczegółowo w podrozdziale 5.5.5.

### 5.5.2. Wyniki na czterech poziomach wdrożeń

Rozdział objął cztery poziomy analizy, na których rozwiązania metody FFF wprowadzono do praktyki lub oceniono na danych rzeczywistych: pojedynczą budowę, park dzierżawny wraz z centrami logistycznymi, rynek oraz technologię. Łącznie z rozdziałem 4 obejmują one wszystkie sześć poziomów, na których w rozprawie weryfikowana jest teza główna: operację (podrozdział 4.1), rynek (podrozdziały 4.2 i 5.3), proces dostawcy (podrozdział 4.3), budowę (podrozdział 5.1), park dzierżawny (podrozdział 5.2) i technologię (podrozdział 5.4). Wyniki czterech podrozdziałów zestawiono w tabeli 5.57, wskazując zarazem składniki wzoru (5.5), których dotyczą.

Na poziomie budowy (podrozdział 5.1) potencjał deskowań wyznaczony przez dostawcę z rysunków obmiarowych okazał się wiarygodniejszą miarą zakresu robót niż przedmiar wykonawcy: ilości betonu rzeczywiście wbudowane były o 16,3% wyższe od wyceny wyjściowej. Stała załoga 12 cieśli w cyklu 28 dni oznaczała wzrost nakładu z 0,68 rb-g/m² na podium do 1,15–1,19 rb-g/m² w części wieżowej, a więc cykl nie był ograniczony ani ludźmi, ani ilością deskowania, lecz jednym żurawiem wieżowym, obsługującym sekwencyjnie wszystkie operacje oraz 168 dostaw i 186 zwrotów materiału. Wariant stropów SKYDECK okazał się opłacalny dopiero przy skróceniu cyklu do 21 dni – czyli skróceniu realizacji 15 kondygnacji o 105 dni i obniżeniu czynszu o szacunkowo ok. 232 tys. € – pod warunkiem drugiego żurawia i lepszego wykorzystania brygady. Odkładanie deskowania ściennego bez produkcji przez tydzień w każdym cyklu zidentyfikowano jako marnotrawstwo niekonieczne o wartości ok. 92 tys. € czynszu.

Na poziomie parku dzierżawnego (podrozdział 5.2) łączne wykorzystanie materiałowe wynosiło w okresie 51 tygodni średnio 59,1%, próg 60% przekroczono w 18 tygodniach, a cel 75% nie został osiągnięty ani razu. Terminowość wydań jest w ujęciu statystycznym wysoka (78,1% pozycji w przedziale ±1 dnia), lecz rozkład odchyleń ma „grube ogony", ewidencja przyczyn pozwala na rzeczywistą diagnostykę jedynie ok. 4,4% pozycji, a rejestr odchyleń terminów zwrotów nie istnieje. W centrach logistycznych urządzenia wspomagające pracę fizyczną pozwoliły utrzymać wydajność przeładunków przy załodze mniejszej o ok. 22 osoby niż w wariancie bez urządzeń; uniknięty koszt pracy w latach 2023–2026 wynosi co najmniej ok. 4,9 mln zł, a symulacja przeniesienia efektu egzoszkieletów na budowę wskazuje na redukcję nakładu robocizny cieśli i zbrojarzy od ok. 10–12% w scenariuszu konserwatywnym do ok. 27–28% w optymistycznym.

Na poziomie rynku (podrozdział 5.3) w latach 2015–2025 przeciętne wynagrodzenie wzrosło o 128,3%, a minimalne o 166,6%, podczas gdy ceny dzierżawy i sprzedaży deskowań – według przyjętego założenia eksperckiego – rosły o ok. 3–4% rocznie; w ujęciu modelowym relacja kosztu robocizny deskowaniowej do kosztu dzierżawy deskowania stropowego wzrosła z ok. 1,0 do ok. 1,6. Ten sam mechanizm obniża próg opłacalności prefabrykacji: w segmentach hal wielkopowierzchniowych, drogowych obiektów mostowych małych i średnich rozpiętości oraz instalacji termicznego przekształcania odpadów udział prefabrykacji w konstrukcji wzrósł do ok. 85–95%, a segmenty te, generujące wcześniej łącznie ok. 7–10% obrotu dostawcy, nie przynoszą już istotnych przychodów z deskowań. Na poziomie technologii (podrozdział 5.4) wdrożenia systemu InSite pokazały, że decyzje dotyczące tempa betonowania i momentu rozdeskowania można opierać na pomiarach z konstrukcji; na budowie CCGT w Grudziądzu po dwóch dobach estymowana wytrzymałość betonu w konstrukcji była o ok. 40% wyższa niż wytrzymałość próbek laboratoryjnych, a po tygodniu – półtorakrotnie wyższa, co obrazuje skalę rezerwy czasu utrzymywanej dotąd w harmonogramach jako margines bezpieczeństwa.

*Tabela 5.57. Synteza wyników części wdrożeniowej – wynik, składnik wzoru przepływu FFF, teza, stan weryfikacji i znaczenie dla warstwy uczącej SSN*

| Poziom (podrozdział) | Kluczowy wynik | Składnik wzoru (5.5) | Teza szczegółowa | Stan weryfikacji | Znaczenie dla warstwy uczącej SSN |
|---|---|---|---|---|---|
| Budowa (5.1) | Takt 28 dni ograniczony jednym żurawiem; nakład cieśli 0,68 → 1,15–1,19 rb-g/m²; beton rzeczywisty +16,3% względem wyceny; SKYDECK opłacalny przy takcie 21 dni i drugim żurawiu | $T_Ż$, $T_L$, $T_s$, $N$ | TS1 | Potwierdzona w studium jednej budowy | Bilans potencjałów budowy jako model odniesienia; dane dostawcy z rysunków jako wejście; zasób krytyczny (żuraw) jako zmienna |
| Park dzierżawny i centra logistyczne (5.2) | Wykorzystanie parku średnio 59,1%, cel 75% nieosiągnięty; 78,1% wydań w przedziale ±1 dnia, brak rejestru zwrotów; ok. 22 etaty i ≥ 4,9 mln zł unikniętego kosztu pracy w CL | $W_m$, $u$, $(1 + s{\cdot}g{\cdot}k)$ | TS3 i H; TS2; TS1 | TS3 – potwierdzona w części „przepływ zamiast wolumenu"; H – ustanowiona linia bazowa; TS2 – potwierdzona w CL, na budowie symulacyjnie | 51 tygodni × 22 grupy produktowe (szeregi dla LSTM); 2353 pozycje wydań z kodami przyczyn; model $W' = W{\cdot}(1 + c{\cdot}s{\cdot}g)$ jako model odniesienia |
| Rynek (5.3) | Płace +128,3% (minimalne +166,6%) wobec ok. 3–4% rocznie dla deskowań; relacja robocizna/dzierżawa ok. 1,0 → 1,6; prefabrykacja 85–95% w trzech segmentach | $\rho$, $c_h$ | TS2 | Potwierdzona na danych GUS; dynamika cen deskowań – założenie eksperckie | Koszt roboczogodziny jako parametr funkcji celu; indeks cen deskowań i udział prefabrykacji jako przyszłe szeregi danych |
| Technologia (5.4; 5.2.4) | InSite: decyzje o betonowaniu i rozdeskowaniu na podstawie pomiarów; w CCGT Grudziądz wytrzymałość in situ ok. 40% wyższa od laboratoryjnej po 2 dobach. Egzoszkielety i dźwig obsługi ręcznej: wzrost wydajności prac wspieranych o 45% i 30%; symulacja dla budowy – redukcja nakładu robocizny cieśli i zbrojarzy o ok. 10–28% | $T_B$; $(1 + s{\cdot}g{\cdot}k)$ | TS2; TS1 | InSite – potwierdzona w zakresie wdrożeń, kalibracja metody dojrzałości w toku; egzoszkielety – potwierdzone w CL, na budowie symulacyjnie | Ciągłe szeregi temperatur i parcia – źródło danych do prognozy terminu rozdeskowania; metoda dojrzałości jako model fizyczny w modelu hybrydowym; wzrost wydajności g jako parametr modelu pracochłonności |

*Źródło: opracowanie własne.*

### 5.5.3. Odniesienie do metody FFF

Rozdział dokumentuje większość wdrożeń, na których opiera się wdrożeniowy charakter rozprawy: metodykę analizy wykorzystania potencjału deskowań na budowie (podrozdział 5.1), cotygodniowe raportowanie wykorzystania materiałowego i ewidencję odchyleń terminów wydań (podrozdział 5.2), egzoszkielety w Centrum Logistycznym Kąty Wrocławskie i dźwig obsługi ręcznej w Centrum Logistycznym Koninko (podrozdział 5.2.4) oraz system czujników InSite na budowach S7 Rdzawka i CCGT Grudziądz (podrozdział 5.4); uzupełnia je mapa procesu i macierz odpowiedzialności opisane w podrozdziale 4.3. Wdrożenia te realizują strategie składowe metody FFF (Majkowski Ł., Pasławski J., 2023): wsparcie pracowników przez urządzenia (egzoszkielety, dźwig obsługi ręcznej), elastyczność i

adaptację do zmiennych warunków (rozdeskowanie według rzeczywistej dojrzałości betonu zamiast kalendarza), cyfryzację i analizę danych (raporty wykorzystania, platforma InSite), zrównoważony rozwój (rotacja istniejącego parku zamiast zakupów) oraz minimalizację marnotrawstwa (wieże podporowe przetrzymywane na budowie blisko pięć miesięcy dłużej niż zakładał harmonogram, tydzień przestoju deskowania ściennego w każdym cyklu). Najważniejszym wynikiem na poziomie metody jest jednak trójelementowy system pomiaru przepływu, wskazany w podrozdziale 5.2: wykorzystanie materiałowe jako miara stanu przepływu, odchylenia terminów wydań jako miara zmienności na wejściu i odchylenia terminów zwrotów jako miara zmienności na wyjściu, uzupełnione wydajnością przeładunków w centrach logistycznych. Pierwsze dwa elementy funkcjonują, trzeci należy dopiero wprowadzić – i jest on warunkiem, by metoda FFF mogła przejść od planowania „push" od dat deklarowanych do planowania „pull" od rzeczywistego zapotrzebowania i rzeczywistej dostępności.

### 5.5.4. Weryfikacja tez rozprawy

Wyniki rozdziału potwierdzają tezę szczegółową TS1 na poziomie budowy: o długości cyklu decydował zasób krytyczny, którym nie była ani brygada, ani ilość deskowania, a skrócenie cyklu wymagało łącznej zmiany techniki (system stropowy, drugi żuraw) i organizacji pracy (wykorzystanie rezerwy brygady). Część predykcyjna tezy TS1 została potwierdzona na poziomie modeli interpretowalnych, skalibrowanych na danych budowy i centrów logistycznych. Teza TS2 została potwierdzona na danych operacyjnych centrów logistycznych, danych rynkowych i danych z wdrożeń InSite; w odniesieniu do budowy efekt egzoszkieletów oszacowano symulacyjnie, co uzasadnia pilotaż porównawczy. Teza TS3 została potwierdzona w części „przepływ zamiast wolumenu": park o wykorzystaniu ok. 59% nie osiąga celu 75%, a z prawa Little'a wynika, że zadanie to ma charakter przepływowy, a nie inwestycyjny; wraz z analizą punktów styku z podrozdziału 4.3 daje to pełną weryfikację tej tezy. Hipoteza operacyjna H nie została zweryfikowana w pełni, ponieważ okres obserwacji obejmuje stan sprzed pełnego wdrożenia rozwiązań FFF; rozdział ustanawia dla niej linię bazową i system pomiaru. Zbieżność wyników na sześciu poziomach analizy wspiera tezę główną: przewaga wynikająca z szybkości montażu systemów deskowań przekłada się na ekonomiczniejszą, szybszą i bezpieczniejszą pracę na budowie oraz na efektywność przedsiębiorstwa dopiero przy ciągłym i elastycznym przepływie w łańcuchu dostawca–budowa–dostawca. Wzór przepływu FFF (5.5) ujmuje te wyniki w jednej zależności: teza TS1 odpowiada operatorowi maksimum i synchronizacji zasobów, teza TS2 – składnikom zależnym od pracy ludzi i ich wadze ekonomicznej $\rho$, a teza TS3 – czasowi $W_m$ i jego sprzężeniu z czasem na budowie.

### 5.5.5. Przesłanki dla warstwy uczącej SSN

Z perspektywy koncepcji przedstawionej w podrozdziale 3.4 rozdział wnosi trzy elementy. Po pierwsze, gromadzi zbiory danych, na których warstwa ucząca może zostać zbudowana: pełny wyciąg ruchów materiału dla jednej budowy w okresie 1044 dni, 51 tygodniowych raportów wykorzystania dla 22 grup produktowych (1122 obserwacje grupa–tydzień), 2353 pozycje wydań z kodami przyczyn odchyleń, dziesięcioletnie szeregi przeładunków dwóch centrów logistycznych oraz ciągłe szeregi temperatur i parcia z czujników InSite. Po drugie, kalibruje modele interpretowalne stanowiące pierwszy etap uczenia: bilans potencjałów budowy, model bilansu pracy $W' = W\cdot(1 + c\cdot s\cdot g)$ wraz z modelem redukcji nakładu robocizny $1 - 1/(1 + s\cdot g\cdot k)$, zależność wynikającą z prawa Little'a oraz model poglądowy relacji kosztu robocizny i dzierżawy. Z nimi – zgodnie z przyjętym w rozprawie porządkiem – należy porównywać przyszłe sieci neuronowe. Po trzecie, wskazuje ograniczenia danych, które dziś uniemożliwiają trenowanie sieci głębokich: brak rejestru odchyleń zwrotów wyklucza prognozowanie terminów zwrotów siecią rekurencyjną, niska jakość kodów przyczyn ogranicza wartość etykiet dla klasyfikacji ryzyka opóźnień, szeregi roczne centrów logistycznych są zbyt krótkie dla uczenia głębokiego, a studium budowy obejmuje jeden obiekt.

Na tej podstawie można wskazać cztery zadania uczenia, dla których rozdział przygotował dane lub model odniesienia. Pierwszym jest prognoza nakładu pracy i czasu cyklu kondygnacji siecią typu MLP, ucząca się na próbie budów analizowanych metodyką z podrozdziału 5.1, z uwzględnieniem zasobu krytycznego jako zmiennej wejściowej. Drugim jest prognoza wykorzystania materiałowego grup produktowych siecią rekurencyjną (LSTM) na szeregach tygodniowych, po ich wydłużeniu i uzupełnieniu o rejestr odchyleń zwrotów. Trzecim jest klasyfikacja ryzyka opóźnienia wydania na podstawie cech pozycji wydań, dla której warunkiem jest uszczelnienie ewidencji przyczyn – przyczyny wewnętrzne stanowią dziś 2,2% pozycji, lecz w 60% przypadków skutkują opóźnieniem. Czwartym jest prognoza terminu osiągnięcia wytrzymałości wymaganej do rozdeskowania na podstawie szeregów temperatur z czujników InSite – zadanie, w którym metoda dojrzałości może pełnić rolę modelu fizycznego w modelu hybrydowym, a sieć neuronowa – korygować jego błąd dla konkretnej mieszanki i warunków budowy. We wszystkich tych zadaniach decyzja pozostaje przy człowieku – kierowniku budowy, technologu,

pracowniku logistyki – którego model ma wspierać, co odpowiada założeniu Construction 5.0 przyjętemu w podrozdziale 3.1.

### 5.5.6. Ograniczenia i przejście do wniosków końcowych

Wyniki rozdziału mają ograniczenia wynikające z zakresu danych: studium budowy dotyczy jednego obiektu, szeregi wykorzystania obejmują 12 miesięcy, część parametrów modeli (m.in. udział prac wspieranych, współczynnik przeniesienia efektu egzoszkieletów na budowę, dynamika cen deskowań) ma charakter założeń wymagających zastąpienia danymi rzeczywistymi, a kalibracja metody dojrzałości dla mieszanek stosowanych na budowie CCGT nie została zakończona. Modele przedstawione w rozdziale mają jednak charakter otwarty – po podstawieniu danych operacyjnych, kosztowych i kadrowych mogą zostać włączone do modelu symulacyjnego przepływu deskowań i stać się zbiorami uczącymi dla sieci neuronowej.

Najważniejsze ograniczenie ma jednak charakter nie danych, lecz kultury zarządzania po stronie wykonawców. **Skuteczność metody FFF – podobnie jak każdej innej metody zarządzania przepływem – zależy od tego, czy kierownictwo budowy planuje zapotrzebowanie na deskowania z wyprzedzeniem, czy zgłasza je „na wczoraj”**. **Wyniki rozprawy pokazują skalę tego zjawiska**. Wśród pozycji wydań, dla których ewidencja pozwala wskazać konkretną przyczynę odchylenia, najczęstsza jest „zbyt krótki czas realizacji”, czyli zamówienie złożone z wyprzedzeniem krótszym niż standardowy czas realizacji (49 pozycji, z czego 33 zakończyły się opóźnieniem; podrozdział 5.2). Plan dostępności materiału opiera się przy tym na terminach zwrotów deklarowanych przez klienta, a nie na rzeczywistych – choć o konieczności przedłużenia dzierżawy klient dowiaduje się z reguły znacznie wcześniej niż przekazuje tę informację dostawcy (podrozdział 5.2). W procesie obsługi zlecenia pilność należy do ścieżek wyjątkowych obsługiwanych nieformalnie (podrozdział 4.3). Ze strony rynku jest to obraz spójny z badaniem ankietowym: 44% firm wykonawczych w ogóle nie mierzy czasów montażu i demontażu, a 92% nie stosuje w praktyce narzędzi LEAN (podrozdział 4.2). W takich warunkach nawet najlepiej zorganizowany dostawca może jedynie łagodzić skutki braku planowania – kosztem nadmiarowego parku, pilnych transportów i przestojów na budowie. Równolegle z dalszym rozwojem metody FFF konieczna jest więc praca z właścicielami i kadrą zarządzającą firm żelbetowych, ukierunkowana na przekonanie ich, że planowanie z wyprzedzeniem nie jest dodatkowym obowiązkiem administracyjnym, lecz warunkiem skrócenia cyklu, obniżenia kosztu dzierżawy i robocizny oraz stabilnej pracy brygad. Punktem odniesienia może być system Last Planner, w którym niezawodność realizacji planów mierzy się odsetkiem wykonanych zadań (Ballard H. G., 2000). Naturalnym narzędziem takiej pracy jest opisana w podrozdziale 5.1 metodyka analizy budowy. Pokazuje ona wykonawcy na jego własnych danych, ile kosztuje go przestój kompletu, nadmiar sprzętu lub nieprzygotowany takt. Bez tej zmiany po stronie wykonawców ani metoda FFF, ani żadna inna metoda zarządzania przepływem deskowań nie przyniesie w pełni zakładanych efektów.

Syntezę wyników całej rozprawy, ocenę wdrożeń i kierunki dalszych prac zawierają rozdziały 6 i 7.

# 6. Podsumowanie i dyskusja

Celem rozprawy było sformułowanie, empiryczne uzasadnienie i wdrożenie metody FFF – Flexible Formwork Flow – jako narzędzia usprawnienia procesu montażu i demontażu deskowań systemowych oraz przygotowania deskowania do betonowania. Proces ten rozpatrywano nie na poziomie pojedynczej brygady czy pojedynczej budowy, lecz na poziomie ciągłego, wielobudowlanego przepływu deskowań w łańcuchu dostawca–budowa–dostawca. Metoda, zarysowana koncepcyjnie w artykule autora i promotora z 2023 r. (Majkowski Ł., Pasławski J., 2023), została w pracy rozwinięta, uzasadniona ilościowo i częściowo wdrożona w PERI Polska Sp. z o.o. Droga do realizacji celu przebiegała w trzech etapach: przeglądu literatury i sformułowania tez (rozdziały 2 i 3), badań własnych na poziomie operacji, rynku wykonawców i procesu dostawcy (rozdział 4) oraz wdrożeń i ich weryfikacji na poziomie budowy, parku dzierżawnego, uwarunkowań rynkowych i technologii (rozdział 5).

Przegląd ośmiu kluczowych pozycji literatury z zakresu zarządzania deskowaniami (rozdział 2) ujawnił wyraźną asymetrię: piśmiennictwo jest bogate w metody doboru systemu deskowania, lecz ubogie w metody zarządzania jego przepływem w trakcie realizacji i w łańcuchu dostaw; narzędzia LEAN Management są w nim niemal nieobecne, a poziom floty dostawcy – na którym wzrost wykorzystania u jednego wykonawcy zmniejsza dostępność sprzętu dla pozostałych – pozostaje nieopisany. W rozdziale 3 osadzono problematykę deskowań w przejściu od Construction 4.0, przez Construction 5.0, do kształtującej się koncepcji Industry 6.0, wskazując, że żaden z tych etapów nie jest wobec niej samowystarczalny, a metoda FFF łączy ich warstwę technologiczną, ludzką i kognitywną (podrozdział 3.1). Uzasadniono zmianę paradygmatu zarządzania deskowaniami z ujęcia technicznego na socjotechniczne (podrozdział 3.2), rozwinięto tezę główną i hipotezę operacyjną w trzy tezy szczegółowe TS1–TS3 z miernikami (podrozdział 3.3) oraz zdefiniowano warstwę uczącą metody FFF, opartą docelowo na sztucznych sieciach neuronowych (podrozdział 3.4).

Część badawcza (rozdział 4) dostarczyła obrazu problemu na trzech poziomach. Na poziomie operacji analiza niemieckiego katalogu normatywów pracochłonności zdekomponowała cykl deskowania ścian na mierzalne operacje i wykazała, że samo przejście z pracy pojedynczymi elementami na pracę zestawami obniża nakład z 0,34 do 0,30 rb-g/m² (podrozdział 4.1). Na poziomie rynku badanie ankietowe 50 firm wykonawczych pokazało, że 76% z nich ocenia dostępność cieśli jako słabą lub krytyczną, 68% lokalizuje główne straty czasu wokół deskowania, a tylko 14% w samym montażu i demontażu, przy bardzo niskiej dojrzałości procesowej – 92% firm nie stosuje w praktyce narzędzi LEAN (podrozdział 4.2). Na poziomie procesu dostawcy analiza mapy BPMN i macierzy odpowiedzialności wykazała, że przepływ jest przerywany w punktach styku między działami, a Logistyczna Obsługa Klienta uczestniczy w 11 z 18 interfejsów (podrozdział 4.3).

Część wdrożeniowa (rozdział 5) przeniosła analizę na kolejne poziomy. Studium biurowca INDUSTRIAL w Poznaniu pokazało, że o 28-dniowym cyklu kondygnacji decydował jeden żuraw wieżowy, a nie brygada czy ilość deskowania (podrozdział 5.1). Na poziomie parku dzierżawnego ustalono linię bazową – łączne wykorzystanie materiałowe wynosiło średnio 59,1% wobec celu strategicznego 75%, a system pomiaru nie obejmuje odchyleń terminów zwrotów – oraz oceniono wdrożenia urządzeń wspomagających pracę fizyczną w centrach logistycznych (podrozdział 5.2). Analiza uwarunkowań rynkowych wykazała, że w latach 2015–2025 koszty pracy rosły od dwóch do ponad trzech razy szybciej niż ceny deskowań, a ten sam mechanizm napędza ekspansję prefabrykacji żelbetowej (podrozdział 5.3). Na poziomie technologii udokumentowano wdrożenia cyfrowego monitoringu parcia i dojrzałości betonu systemem PERI InSite oraz omówiono druk 3D jako skrajny przypadek uelastycznienia przepływu, w którym element powstaje bez deskowania (podrozdział 5.4).

Wyniki obu części zespolono w modelu przepływu FFF (podrozdział 5.5.1). Opisuje on czas pełnego obiegu kompletu deskowania w łańcuchu dostawca–budowa–dostawca jako sumę czasu pracy kompletu na budowie – wyznaczanego przez zasób krytyczny spośród potencjału ludzi, zasobów logistycznych i procesu technologicznego betonu – czasu postoju kompletu bez produkcji oraz czasu przebywania elementów poza dzierżawą. Model nie wprowadza nowych praw, lecz łączy zależności wykorzystane w rozprawie: prawo Little'a (Little J. D. C., 1961), zasadę ogniwa krytycznego (Goldratt E. M., Cox J., 1984), model bilansu pracy centrum logistycznego oraz relację kosztu robocizny i dzierżawy deskowania. Każdy składnik modelu został w pracy zbadany na danych, a każdy wskazuje inną dźwignię usprawnień. Model obejmuje trzy poziomy zarządzania przepływem – taktyczny (projekty technologiczne i logistyka dostawcy), operacyjny (operacje i procesy na budowie) oraz strategiczny (pełny cykl dzierżawy zestawu) – a jego efektem końcowym jest korzyść obustronna wykonawcy i dostawcy.

Wdrożeniowy charakter rozprawy wyraża się w pięciu rozwiązaniach, które w trakcie przygotowywania pracy wprowadzono do bieżącej działalności PERI Polska i poddano ocenie na danych rzeczywistych. Pierwszym jest macierz odpowiedzialności (kompetencji) obejmująca 189 kroków w 21 procesach, z 16 przepływami informacji i 20 miernikami (podrozdział 4.3). Drugim jest cotygodniowe raportowanie bieżącego wykorzystania materiałowego wraz z ewidencją odchyleń terminów wydań, któremu rozprawa nadała interpretację miar stanu i zmienności przepływu (podrozdział 5.2). Trzecim jest metodyka analizy wykorzystania potencjału deskowań, ludzi i zasobów logistycznych na budowie, oparta wyłącznie na danych, którymi dostawca już dysponuje, zastosowana do budowy INDUSTRIAL (podrozdział 5.1). Czwartym są pomiary systemem czujników PERI InSite – pierwszy w Polsce pomiar parcia mieszanki betonowej na budowie S7 Rdzawka, pomiar parcia na ścianie w deskowaniu TRIO oraz monitoring dojrzewania masywnego fundamentu bloku CCGT w Grudziądzu (podrozdział 5.4). Piątym są egzoszkielety German Bionic Cray X w Centrum Logistycznym Kąty Wrocławskie i dźwig obsługi ręcznej w Centrum Logistycznym Koninko, ocenione na szeregach danych z lat 2017–2026 (podrozdział 5.2.4). Łącznie wdrożenia te obejmują trzy warstwy metody FFF: organizacyjną, pomiarową i technologiczną. Żadne z nich nie osiągnęło stanu docelowego, co jest zgodne z logiką ciągłego doskonalenia, lecz każde funkcjonuje w przedsiębiorstwie i dostarcza danych do kolejnych iteracji.

Uzupełnieniem analiz jest pierwszy, interpretowalny etap warstwy uczącej metody FFF. Zgromadzono i zweryfikowano dane operacyjne oraz skalibrowano na nich modele prognostyczne: bilans trzech potencjałów budowy (podrozdział 5.1), statystyki szeregów wykorzystania wraz z prawem Little'a (podrozdział 5.2) oraz model bilansu pracy centrum logistycznego z parametrami wzrostu wydajności wyznaczonymi z danych – 45% dla egzoszkieletów i 30% dla dźwigu obsługi ręcznej (podrozdział 5.2.4). Zdefiniowano także zmienne wejściowe i wyjściowe przyszłej sieci neuronowej, w tym nową względem literatury grupę zmiennych opisujących potencjał ludzi i sposób zarządzania (podrozdział 3.4), a w podrozdziale 5.5 wskazano konkretne zadania uczenia, dla których rozprawa przygotowała dane lub model odniesienia.

**Nowości technologiczne.** Rozprawa dokumentuje wprowadzenie do praktyki kilku rozwiązań, które na polskim rynku deskowań mają charakter nowości. System czujników PERI InSite umożliwił pierwszy w Polsce pomiar parcia mieszanki betonowej na budowie (S7 Rdzawka) oraz monitoring dojrzewania masywnego fundamentu bloku CCGT w Grudziądzu, gdzie estymowana wytrzymałość betonu w konstrukcji po dwóch dobach była o ok. 40% wyższa od wytrzymałości próbek laboratoryjnych; decyzje o tempie betonowania i momencie rozdeskowania mogą więc opierać się na pomiarach, a nie na kalendarzu (podrozdział 5.4). Egzoszkielety German Bionic Cray X i dźwig obsługi ręcznej w centrach logistycznych PERI Polska zwiększyły wydajność prac wspieranych odpowiednio o 45% i 30% (podrozdział 5.2.4). Druk 3D z betonu, oferowany przez PERI 3D Construction z wykorzystaniem drukarek COBOD, wyznacza skrajny kierunek uelastycznienia przepływu, w którym element powstaje bez deskowania (podrozdział 5.4). Nowością metodyczną jest model przepływu FFF, który łączy te technologie z logistyką dostawcy w jednej zależności, oraz warstwa ucząca, dla której zgromadzono dane i skalibrowano pierwsze modele prognostyczne.

**Problemy rynkowe.** Równolegle rozprawa ujawniła problemy rynkowe, które ograniczają efektywność gospodarki deskowaniami niezależnie od jakości sprzętu. W latach 2015–2025 przeciętne wynagrodzenie wzrosło o 128,3%, a minimalne o 166,6%, podczas gdy ceny deskowań – według przyjętego założenia eksperckiego – rosły o ok. 3–4% rocznie; relacja kosztu robocizny deskowaniowej do kosztu dzierżawy wzrosła w tym czasie z ok. 1,0 do ok. 1,6 (podrozdział 5.3). 76% wykonawców ocenia dostępność wykwalifikowanych cieśli jako słabą lub krytyczną, 92% nie stosuje w praktyce narzędzi LEAN, a 44% w ogóle nie mierzy czasów montażu i demontażu (podrozdział 4.2). W trzech segmentach rynku – halach wielkopowierzchniowych, drogowych obiektach mostowych małych i średnich rozpiętości oraz instalacjach termicznego przekształcania odpadów – udział prefabrykacji wzrósł do ok. 85–95%, a segmenty te przestały przynosić dostawcy istotne przychody z deskowań (podrozdział 5.3). Po stronie przepływu problemem pozostaje planowanie „na wczoraj” – najczęstszą zidentyfikowaną przyczyną odchyleń wydań jest zamówienie złożone z wyprzedzeniem krótszym niż standardowy czas realizacji – oraz oparcie planu dostępności na deklarowanych, a nie rzeczywistych terminach zwrotów (podrozdziały 5.2 i 5.5.6). W tych warunkach łączne wykorzystanie parku dzierżawnego wynosiło średnio 59,1% wobec celu 75%.

Wyniki te otwierają trzy zagadnienia, które wykraczają poza weryfikację tez i wymagają dyskusji: miejsce zarządzania przepływem wśród modeli biznesowych opartych na usłudze i pełnym cyklu życia zasobu (podrozdział 6.1), rolę zaufania i korzyści obustronnej w relacji wykonawcy z dostawcą (podrozdział 6.2) oraz perspektywy rynku, na którym metoda FFF będzie rozwijana w najbliższych dekadach (podrozdział 6.3).

## 6.1. PERI jako pionier zarządzania przepływem – analogia Apple i specyfika modelu dzierżawnego

Punktem wyjścia rozprawy było podważenie przeświadczenia, że o wyniku dostawcy decyduje wolumen wydanego sprzętu. We wstępie przywołano przykład Apple Inc., gdzie w latach 1998–1999 radykalna redukcja zapasów – z poziomu odpowiadającego około miesiącowi sprzedaży do kilku dni – i uczynienie ze wskaźników rotacji głównego miernika pracy całej organizacji przekształciły firmę przynoszącą straty w lidera efektywności operacyjnej (Lashinsky A., 2012). Wyniki rozprawy pozwalają przenieść tę analogię z poziomu deklaracji na poziom mierników. W gospodarce deskowaniami odpowiednikiem rotacji zapasów jest wykorzystanie materiałowe parku i liczba obrotów tego samego kompletu, a model przepływu FFF wskazuje, które składniki czasu obiegu kompletu należy skracać. PERI Polska dysponuje już dwoma z trzech elementów systemu pomiaru przepływu – cotygodniowym raportowaniem wykorzystania i ewidencją odchyleń wydań – a wdrożenie rejestru odchyleń zwrotów domknie ten system. Dostawca, który jako pierwszy na rynku uczyni wykorzystanie parku i rotację kompletów głównym miernikiem pracy całej organizacji – od sprzedaży, przez logistykę i zakupy, po dział techniczny – może zbudować przewagę konkurencyjną analogiczną do tej, którą Apple uzyskało w zarządzaniu zapasami. PERI Polska ma do tego przesłanki: własny park dzierżawny, sieć centrów logistycznych, dane operacyjne z obsługiwanych budów oraz wdrożenia opisane w rozprawie.

Biznes dzierżawny ma przy tym specyfikę, która odróżnia go zarówno od sprzedaży, jak i od klasycznego zarządzania zapasami. Sprzęt pozostaje własnością dostawcy i generuje przychód wyłącznie w czasie dzierżawy, a koszt – w każdym dniu. Ten sam komplet przechodzi wielokrotnie przez pełny cykl: projekt technologiczny, dostawę, pracę na budowie, zwrot, przyjęcie, czyszczenie i naprawę, kompletację oraz ponowne wydanie. O jego wyniku decydują więc nie pojedyncze transakcje, lecz czas każdego etapu cyklu i zmienność terminów, które po stronie zwrotów nie są dziś w ogóle mierzone (podrozdział 5.2). Dostawca ponosi też ryzyko, na które nie ma bezpośredniego wpływu: to organizacja pracy na budowie wyznacza czas, w którym komplet pracuje lub leży bez produkcji (podrozdział 5.5.1).

Modele, w których dostawca zachowuje własność zasobu lub odpowiada za jego pełny cykl życia, są w gospodarce światowej dobrze opisane. W literaturze zarządzania proces przechodzenia od sprzedaży produktów do oferowania pakietów łączących produkt, usługę, wsparcie i wiedzę nazwano serwicyzacją (servitization) (Vandermerwe S., Rada J., 1988), a systemy produktowo-usługowe sklasyfikowano w grupy zorientowane na produkt, na użytkowanie – do których należą m.in. leasing i najem – oraz na rezultat (Tukker A., 2004). Klasycznym przykładem jest program „Power-by-the-Hour" firmy Rolls-Royce, zapoczątkowany w 1962 r.: kompletną usługę wymiany silnika i osprzętu rozliczano według stałej stawki za godzinę lotu, co zrównało interesy producenta i użytkownika, ponieważ użytkownik płacił wyłącznie za silniki, które działały. W rozwinięciu programu wprowadzono monitorowanie stanu silników za pomocą czujników pokładowych oraz dostęp do silników zastępczych na czas obsługi (Rolls-Royce, 2012). Bliższym budownictwu przykładem jest program Hilti Fleet Management, w którym wykonawca zamiast kupować elektronarzędzia płaci stałą miesięczną opłatę obejmującą narzędzia, serwis i naprawy, może śledzić przypisanie narzędzi do budów i brygad, a po zakończeniu umowy narzędzia są wymieniane na nową generację (Hilti, 2026).

Wspólnym mianownikiem tych przykładów jest przeniesienie wartości z pojedynczej transakcji na dostępność i działanie zasobu przez cały cykl – projektowanie, dostawę, użytkowanie, zwrot i serwis – oraz takie ukształtowanie modelu rozliczeń, by dostawca zarabiał wtedy, gdy zasób dobrze pracuje u klienta. Gospodarka deskowaniami ma już wszystkie elementy takiego modelu: projekt technologiczny, logistykę, dzierżawę, serwis i ponowne wydanie. Brakowało jej spójnej miary i metody zarządzania

przepływem całego cyklu – tę lukę wypełnia metoda FFF. Jej naturalnym rozwinięciem mogłyby być formy rozliczeń nagradzające skrócenie cyklu i terminowe zwroty; ich opracowanie wykracza poza zakres rozprawy i stanowi kierunek dalszych prac.

## 6.2. Zaufanie i korzyść obustronna – partnerstwo wykonawcy i dostawcy w ujęciu Deminga

Model przepływu FFF prowadzi do efektu końcowego o charakterze korzyści obustronnej (podrozdział 5.5.1). Jego osiągnięcie nie jest jednak kwestią techniki ani samych mierników, lecz relacji między wykonawcą a dostawcą. Najpełniej opisał to W. E. Deming, którego czwarty z czternastu punktów programu zarządzania postuluje zaprzestanie przyznawania zamówień wyłącznie na podstawie ceny, minimalizowanie kosztu całkowitego i dążenie do jednego dostawcy danej pozycji, w oparciu o długotrwałą relację lojalności i zaufania; dziewiąty punkt postuluje z kolei usuwanie barier między działami, tak aby wspólnie przewidywały problemy produkcji i użytkowania (Deming W. E., 1986). W późniejszej pracy Deming podkreślał, że konkurencja wewnątrz systemu jest destrukcyjna, a lepiej, by wszyscy współpracowali jako system, którego celem jest to, by wygrał każdy z jego uczestników (Deming W. E., 1993).

W gospodarce deskowaniami oznacza to odejście od wyboru dostawcy według najniższej stawki najmu na rzecz kryterium kosztu całkowitego – robocizny, czasu cyklu, dzierżawy i przestojów – który, jak pokazała relacja kosztu robocizny do kosztu dzierżawy, jest dziś zdominowany przez koszt pracy (podrozdział 5.3). Wykonawca może mieć jednego dostawcę-partnera, który w imię metody FFF towarzyszy mu na każdym etapie: przy projekcie technologicznym i wyznaczeniu potencjału deskowań, przy planowaniu taktu i dostaw, przy montażu i monitorowaniu dojrzewania betonu, a także przy zwrotach, serwisie i ponownym wydaniu. Warunkiem takiej współpracy jest wymiana informacji, której nie da się uzyskać w relacji czysto transakcyjnej: po stronie wykonawcy – planowanie z wyprzedzeniem, wczesna informacja o zmianach harmonogramu i rzetelne terminy zwrotów, po stronie dostawcy – przejrzyste mierniki i wsparcie techniczne.

Z tej perspektywy najważniejsze przesłanie rozprawy można ująć następująco: nie sztuką jest zawalić budowę sprzętem – sztuką jest zarządzać nim tak, aby wygrali wszyscy. Nadmiar sprzętu na budowie przerzuca koszt nieprzygotowanego planu na dostawcę i na jego pozostałych klientów, a jednocześnie ukrywa rzeczywiste przyczyny strat po stronie wykonawcy. Zarządzanie przepływem oparte na zaufaniu daje wykonawcy krótszy cykl i niższy koszt, dostawcy – więcej obrotów kompletu bez inwestycji w majątek, a rynkowi – większą dostępność sprzętu. Zaufanie nie zastępuje przy tym pomiaru: jego podstawą powinny być wspólnie monitorowane mierniki – wykorzystanie materiałowe, terminowość wydań i zwrotów oraz zgodność planu z realizacją – co wprost nawiązuje do trójelementowego systemu pomiaru przepływu zaproponowanego w rozprawie.

## 6.3. Rynek w najbliższych dekadach – energetyka, obronność i systemy o niskiej pracochłonności

Struktura popytu na roboty żelbetowe w Polsce będzie się w najbliższych dekadach zmieniać. Rządowy Program Budowy Dróg Krajowych do 2030 r. (z perspektywą do 2033 r.) zakłada budowę ok. 2,5 tys. km nowych dróg szybkiego ruchu, dokończenie trwających inwestycji i utworzenie pełnej sieci autostrad i dróg ekspresowych, a nakłady na program przekraczają 290 mld zł (Rada Ministrów RP, 2022). Po domknięciu tej sieci budownictwo drogowe będzie w coraz większym stopniu przesuwać się od budowy nowych tras w stronę rozbudowy i utrzymania istniejących, a w segmencie mniejszych obiektów mostowych prefabrykacja osiągnęła już udział rzędu 85–95% (podrozdział 5.3).

Jednocześnie zapowiadane są duże inwestycje w energetykę i obronność. Pierwsza polska elektrownia jądrowa w lokalizacji Lubiatowo-Kopalino ma składać się z trzech bloków AP1000, realizowanych przez konsorcjum Westinghouse–Bechtel; wylanie betonu pod pierwszy reaktor zaplanowano na 2028 r., rozpoczęcie eksploatacji pierwszego bloku – na ok. 2036 r., a pracę całej elektrowni z zakładaną mocą

– od 2038 r. (PAP, 2026). W przypadku konstrukcji wyspy jądrowej obowiązywać mają amerykańskie standardy jakości, m.in. system NQA-1 i norma projektowa ACI 349 (Technologia i Budownictwo, 2026). Do tej grupy inwestycji należą także bloki gazowo-parowe, takie jak CCGT w Grudziądzu, gdzie w rozprawie monitorowano dojrzewanie masywnego fundamentu (podrozdział 5.4). W obszarze obronności łączne wydatki na obronność w 2026 r. zaplanowano na ok. 201 mld zł, tj. ok. 4,83% PKB (Portal Militarny, 2026), wobec 2,22% PKB w 2022 r. (money.pl, 2026); zgodnie z deklaracją kierownictwa resortu obrony poziom ten pozwala prowadzić równolegle modernizację techniczną i rozwój infrastruktury wojskowej (wnp.pl, 2026).

W tych segmentach prefabrykacja nie będzie stanowić tak dużego zagrożenia dla technologii monolitycznej jak w halach, mniejszych obiektach mostowych czy instalacjach termicznego przekształcania odpadów. Obiekty energetyki jądrowej i konwencjonalnej oraz infrastruktury wojskowej mają w znacznej części charakter jednostkowy i masywny oraz podlegają szczególnym wymaganiom projektowym i jakościowym, co sprzyja wykonawstwu monolitycznemu. Nie oznacza to jednak łatwiejszych warunków dla wykonawców: te same inwestycje będą konkurować o ograniczone zasoby wykwalifikowanej siły roboczej, której dostępność już dziś 76% wykonawców ocenia jako słabą lub krytyczną (podrozdział 4.2), przy koszcie pracy rosnącym od dwóch do ponad trzech razy szybciej niż ceny deskowań (podrozdział 5.3).

W tych warunkach szczególny nacisk należy położyć na rozwój systemów wspomagających wydajność pracowników na budowach, których jest coraz mniej. Wiodące będą systemy deskowań o niskiej pracochłonności – rozstęp nakładów między porównywalnymi systemami producenckimi wynosi ok. 18%, a sama praca zestawami obniża nakład o ok. 11,8% (podrozdział 4.1) – oraz rozwiązania, które zmniejszają obciążenie fizyczne i uniezależniają cykl od liczby cieśli: egzoszkielety, dla których symulacja wskazuje redukcję nakładu robocizny cieśli i zbrojarzy o ok. 10–28% (podrozdział 5.2.4), rozwiązania organizacyjne i techniczne odciążające żuraw, który na budowie INDUSTRIAL okazał się zasobem krytycznym (podrozdział 5.1), oraz monitoring dojrzałości betonu skracający czas do rozdeskowania (podrozdział 5.4). Dla dostawcy deskowań oznacza to przesunięcie oferty z roli dostawcy sprzętu w stronę partnera odpowiedzialnego za wydajność pracy i przepływ na budowie – czyli dokładnie w kierunku wyznaczonym przez metodę FFF.

# 7. Wnioski

## 7.1. Wnioski ogólne

Teza rozprawy głosi, że **przewaga dostawcy deskowań systemowych, wynikająca z szybkości montażu jego systemów, przekłada się na ekonomiczniejszą, szybszą i bezpieczniejszą pracę na budowie oraz na efektywność przedsiębiorstwa dopiero wtedy, gdy zapewniona jest ciągłość i elastyczność przepływu deskowań w łańcuchu dostawca–budowa–dostawca, czyli synchronizacja potencjałów materiału, ludzi i zasobów logistycznych, wspierana wiarygodną informacją o rzeczywistym stanie elementów i konstrukcji.** Teza ta nie została zweryfikowana jednym eksperymentem, lecz zbieżnością wyników uzyskanych niezależnie na sześciu poziomach: operacji (podrozdział 4.1), rynku (podrozdziały 4.2 i 5.3), procesu dostawcy (podrozdział 4.3), budowy (podrozdział 5.1), parku dzierżawnego (podrozdział 5.2) i technologii (podrozdział 5.4). Na każdym z tych poziomów o tym, czy przewaga wynikająca z szybkości montażu systemów przekładała się na wynik, rozstrzygał przepływ i jego organizacja.

Model przepływu FFF nadaje temu wnioskowi postać formalną. Ze względu na operator maksimum usprawnienie jednego zasobu skraca takt tylko wtedy, gdy zasób ten jest krytyczny – poprawa wydajności brygady lub zmiana systemu deskowania nie przyniosą efektu, jeżeli o takcie decyduje żuraw lub dostawa betonu. Rosnąca relacja kosztu robocizny do kosztu dzierżawy (z ok. 1,0 w 2015 r. do ok. 1,6 w 2025 r.) sprawia, że składniki zależne od pracy ludzi mają coraz większą wagę ekonomiczną. Wreszcie skrócenie czasu pracy kompletu na budowie nie podnosi samo przez się wykorzystania parku: uwolniony materiał zwiększa przychód dostawcy dopiero wtedy, gdy zostanie niezwłocznie wydany na kolejną budowę. Usprawnienia na budowie i u dostawcy muszą więc być sprzężone informacją o rzeczywistym stanie elementów – i właśnie takie sprzężenie jest istotą elastyczności w rozumieniu metody FFF.

Głównym wnioskiem rozprawy jest stwierdzenie, że metoda Flexible Formwork Flow uzyskała w niniejszej pracy ilościowe uzasadnienie, została częściowo wdrożona w PERI Polska i powinna być dalej rozwijana jako podstawowy model zarządzania przepływem deskowań przez dostawcę systemów deskowaniowych, wspierający realizację misji PERI: bardziej efektywnej ekonomicznie, szybszej i bezpieczniejszej pracy na budowie. Uzasadnienie tego wniosku jest trojakie. **Uzasadnienie ekonomiczne** wynika z podrozdziału 5.3: w warunkach ponad dwukrotnego wzrostu kosztu pracy względem kosztu deskowań, deficytu cieśli i wypierania technologii monolitycznej przez prefabrykację skracanie cykli i eliminacja marnotrawstwa w przepływie deskowań przestają być wyłącznie kwestią optymalizacji kosztów wykonawcy, a stają się warunkiem utrzymania rynku, na którym dostawca deskowań w ogóle może funkcjonować. **Uzasadnienie poznawcze** polega na tym, że metoda FFF wypełnia zidentyfikowaną w literaturze lukę – brak zastosowań LEAN Management do przepływu deskowań oraz brak ujęcia poziomu floty dostawcy – i operacjonalizuje zmianę paradygmatu, w którym problemy techniczne i problemy zarządzania ludźmi rozwiązuje się łącznie, a wynik mierzy się zgodnością planu z realizacją, czasem cyklu i wykorzystaniem parku, a nie ceną najmu i wolumenem wydań. **Uzasadnienie wdrożeniowe** stanowi pięć zrealizowanych wdrożeń, które dowodzą, że poszczególne składowe metody są wykonalne w warunkach rzeczywistego przedsiębiorstwa i dają mierzalne efekty.

Najważniejsze przesłanie praktyczne pracy, wynikające z wieloletniego doświadczenia zawodowego po stronie dostawcy systemów deskowań, brzmi: przy optymalnym doborze deskowań nie można patrzeć wyłącznie na warunki panujące na danej budowie – należy patrzeć na cały rynek jako na układ naczyń połączonych. Komplet deskowania przetrzymany na jednej budowie bez rotacji jest kompletem niedostępnym dla innej budowy. Nadmiarowy park kupiony pod naciskiem realizacji nierzetelnych wykonawców robót żelbetowych, a nie rzeczywisty harmonogram zwrotów obciąża kosztem wszystkich klientów dostawcy, a skrócenie cyklu na jednym obiekcie zwiększa dostępność materiału na całym rynku. Dlatego metoda FFF definiuje elastyczność na poziomie przepływu między parkiem dostawcy a wszystkimi budowami, które z niego korzystają, a jej miarą jest wykorzystanie materiałowe całego parku, a nie wolumen wydań na pojedynczy kontrakt. **Tym samym rozprawa podważa powszechne przeświadczenie, że im więcej sprzętu dostawca wyda na budowy, tym więcej zarobi.**

## 7.2. Wnioski szczegółowe

Z przeprowadzonych analiz i wdrożeń wynikają następujące wnioski szczegółowe, uporządkowane według tez szczegółowych rozprawy:

1. **Teza TS1 – synchronizacja trzech potencjałów.** Na budowie INDUSTRIAL o 28-dniowym cyklu realizacji kondygnacji decydował jeden żuraw wieżowy, obsługujący sekwencyjnie wszystkie operacje oraz 168 dostaw i 186 zwrotów materiału, a nie brygada ani ilość deskowania: przy stałej załodze nakład cieśli wzrósł z 0,68 rb-g/m² na podium do 1,15–1,19 rb-g/m² w części wieżowej. Wariant stropów SKYDECK okazał się opłacalny dopiero przy skróceniu cyklu do 21 dni – skróceniu realizacji 15 kondygnacji o 105 dni i obniżeniu czynszu o szacunkowo ok. 25% – pod warunkiem drugiego żurawia i lepszego wykorzystania brygady. Efekt dają więc wyłącznie rozwiązania łączące technikę i organizację pracy (podrozdział 5.1).
2. **Teza TS1 – wiarygodność danych dostawcy.** Potencjał deskowań wyznaczony przez dostawcę z rysunków obmiarowych okazał się bardziej wygodną miarą zakresu robót niż przedmiar wykonawcy: ilości betonu rzeczywiście wbudowane były o 16,3% wyższe od wyceny ilości planowanych. Planowanie dostaw powinno zatem opierać się na własnym potencjale z rysunków, a nie na przedmiarach klienta (podrozdział 5.1).
3. **Teza TS1 – uczenie się przepływu.** Część predykcyjna tezy została potwierdzona na poziomie modeli interpretowalnych – bilansu potencjałów budowy, modelu bilansu pracy i zależności wynikającej z prawa Little'a – skalibrowanych na danych operacyjnych; sieć neuronowa pozostaje przedmiotem dalszych prac (podrozdziały 3.4 i 5.5).
4. **Teza TS2 – organizacja pracy.** Według katalogu normatywów samo przejście z pracy pojedynczymi elementami na pracę zestawami obniża nakład robocizny z 0,34 do 0,30 rb-g/m² (o ok. 11,8%), podczas gdy zróżnicowanie pracochłonności między porównywalnymi systemami wynosi ok. 18%. Organizacja pracy jest więc dźwignią tego samego rzędu co dobór systemu; wniosek wymaga potwierdzenia chronometrażem w warunkach polskich (podrozdział 4.1).
5. **Teza TS2 – lokalizacja strat.** 68% wykonawców lokalizuje główne straty czasu wokół deskowania – w transporcie wewnętrznym, przestojach żurawia, składowaniu, czyszczeniu, sortowaniu i zwrotach – a tylko 14% w samym montażu i demontażu. Jednocześnie 76% firm ocenia dostępność wykwalifikowanych cieśli jako słabą lub krytyczną, 92% nie stosuje w praktyce narzędzi LEAN, a 44% w ogóle nie mierzy czasów montażu i demontażu (podrozdział 4.2).
6. **Teza TS2 – technologie wspierające człowieka.** Egzoszkielety w Centrum Logistycznym Kąty Wrocławskie i żurawik obsługi ręcznej w Centrum Logistycznym Koninko pozwoliły utrzymać wydajność przeładunków przy załodze mniejszej o ok. 27% niż w wariancie bez urządzeń (o ok. 23% w CL Koninko i ok. 31% w CL Kąty Wrocławskie) oraz obniżyć koszty pracy fizycznej co najmniej w tej samej proporcji. Symulacja przeniesienia efektu egzoszkieletów na budowę wskazuje na redukcję nakładu robocizny cieśli i zbrojarzy od ok. 10–12% w scenariuszu zachowawczym do ok. 27–28% w optymistycznym (podrozdział 5.2.4).
7. **Teza TS2 – koszt pracy.** W latach 2015–2025 przeciętne wynagrodzenie wzrosło o 128,3%, a minimalne o 166,6%, podczas gdy ceny dzierżawy i sprzedaży deskowań – według przyjętego założenia eksperckiego – rosły o ok. 3–4% rocznie. Wartość roboczogodziny zaoszczędzonej na 1 m² deskowania wzrosła z ok. 28 zł do ok. 64 zł, a kryterium najniższej ceny najmu ustępuje kryterium najniższej pracochłonności i najkrótszego cyklu (podrozdział 5.3).
8. **Teza TS2 – decyzje oparte na pomiarach.** Wdrożenia systemu InSite pokazały, że decyzje o tempie betonowania i momencie rozdeskowania można opierać na pomiarach z konstrukcji, a nie na kalendarzu: na budowie CCGT w Grudziądzu po dwóch dobach estymowana wytrzymałość betonu w konstrukcji była o ok. 40% wyższa niż wytrzymałość próbek laboratoryjnych, a po tygodniu – półtorakrotnie wyższa (podrozdział 5.4).
9. **Teza TS3 – punkty styku i przypisanie decyzji.** W procesie obsługi zlecenia Logistyczna Obsługa Klienta uczestniczy w 11 z 18 interfejsów, a ścieżki wyjątkowe – braki fizyczne, zmiany po akceptacji, blokady, pilność – są obsługiwane nieformalnie, przez ludzi, a nie przez system. Macierz odpowiedzialności obejmująca 189 kroków w 21 procesach jest pierwszym krokiem do formalizacji tych punktów styku (podrozdział 4.3).
10. **Teza TS3 – przepływ zamiast wolumenu.** Łączne wykorzystanie parku PERI Polska wynosiło w okresie 51 tygodni średnio 59,1%, próg 60% przekroczono w 18 tygodniach, a cel 75% nie został osiągnięty ani razu; na koniec okresu 35,2% majątku znajdowało się w grupach o zbyt niskim wykorzystaniu. Z prawa Little'a wynika, że podniesienie wskaźnika z 59,8% do 75% przy tej samej wielkości parku i tym samym popycie wymaga skrócenia średniego czasu przebywania elementu poza dzierżawą o ok. 38% – jest to zadanie przepływowe, a nie inwestycyjne (podrozdział 5.2).

11. **Teza TS3 – informacja o przepływie.** Terminowość wydań jest w ujęciu statystycznym wysoka (78,1% pozycji w przedziale ±1 dnia), lecz rozkład odchyleń ma „grube ogony”, ewidencja przyczyn pozwala na rzeczywistą diagnostykę jedynie ok. 4,4% pozycji, a przyczyny wewnętrzne stanowią 2,2% pozycji, lecz w 60% przypadków skutkują opóźnieniem. Brak rejestru odchyleń terminów zwrotów jest najpoważniejszą luką systemu pomiaru, prowadzącą bezpośrednio do nadmiernych zakupów i spadku wykorzystania (podrozdział 5.2).
12. **Uwarunkowania rynkowe.** W segmentach hal wielkopowierzchniowych, drogowych obiektów mostowych małych i średnich rozpiętości oraz instalacji termicznego przekształcania odpadów udział prefabrykacji w konstrukcji wzrósł do ok. 85–95%, a segmenty te, generujące wcześniej łącznie ok. 7–10% obrotu dostawcy, nie przynoszą już istotnych przychodów z deskowań. Jest to zagrożenie strukturalne, a nie koniunkturalne; skracanie cyklu i ograniczanie pracochłonności deskowań jest główną drogą obrony konkurencyjności technologii monolitycznej (podrozdział 5.3).
13. **Hipoteza operacyjna.** Hipoteza podniesienia łącznego wykorzystania parku z ok. 59% w kierunku 75% bez zwiększania majątku nie mogła zostać w ramach rozprawy zweryfikowana w pełni, ponieważ okres obserwacji obejmuje stan sprzed pełnego wdrożenia rozwiązań FFF na budowach. Rozprawa dostarczyła jednak aparatu do jej weryfikacji: trójelementowego systemu pomiaru (wykorzystanie materiałowe, odchylenia terminów wydań, odchylenia terminów zwrotów), ilościowo wyznaczonej skali zadania oraz wskazania grup produktowych o największym wpływie na wynik. Przykład PERI Czechy, gdzie cel 75% osiągnięto w niektórych grupach produktowych, wskazuje, że jest on osiągalny w zbliżonych warunkach organizacyjnych (podrozdział 5.2).

## 7.3. Perspektywy

Wyniki rozprawy wyznaczają program dalszego rozwoju metody FFF. Obejmuje on cztery warstwy – pomiarową i procesową, technologiczną, analityczną oraz rynkową – a jego wspólnym celem jest przejście od metody, której składowe wdrożono punktowo, do standardu zarządzania przepływem deskowań w całym łańcuchu dostawca–budowa–dostawca.

**1. Warstwa pomiarowa i procesowa.** Pierwszym krokiem jest domknięcie trójelementowego systemu pomiaru przez wdrożenie rejestru odchyleń terminów zwrotów, obejmującego termin zadeklarowany i rzeczywisty, wielkość odchylenia, kod przyczyny i datę pozyskania informacji, raportowanego co tydzień łącznie z wykorzystaniem materiałowym i odchyleniami wydań. Równolegle należy uszczelnić ewidencję powodów odchyleń wydań – wyeliminować puste wpisy i kod „nie ustalono przyczyny” przez obowiązkowe pole z zamkniętą listą kodów (podrozdział 5.2). W procesie obsługi zlecenia należy uzupełnić mapę BPMN o proces zwrotu i remontu, sformalizować ścieżki wyjątkowe oraz interfejs między Logistyczną Obsługą Klienta a magazynem (podrozdział 4.3), a następnie przejść z planowania w logice „push” od deklarowanych terminów do logiki „pull”, opartej na automatycznie aktualizowanym statusie każdego elementu. Wskaźnik wykorzystania materiałowego powinien przy tym zostać powiązany z odpowiedzialnością poszczególnych obszarów przedsiębiorstwa – sprzedaży, logistyki, zakupów i działu technicznego.

**2. Warstwa technologiczna – egzoszkielety na budowach.** Najważniejszym kierunkiem technologicznym jest przeniesienie wsparcia pracy fizycznej z centrów logistycznych na plac budowy. Rozprawa wykazała efekt egzoszkieletów i dźwigu obsługi ręcznej w centrach logistycznych, natomiast efekt na budowie oszacowała wyłącznie symulacyjnie. Następnym krokiem powinien być pilotaż porównawczy egzoszkieletów w brygadach ciesielskich i zbrojarskich – rozpoczęty od urządzeń pasywnych w brygadach ciesielskich i aktywnych w brygadach zbrojarskich – połączony z chronometrażem, który zastąpi przyjęte w symulacji założenia (udział prac wspieranych, wzrost wydajności, współczynnik przeniesienia efektu) wartościami zmierzonymi (podrozdział 5.2.4). Pilotaż powinien uwzględnić bariery wskazywane przez przedstawicieli branży budowlanej – obawy dotyczące zdrowia, bezpieczeństwa, użyteczności i zwrotu z inwestycji (Kim S. i in., 2019) – oraz ograniczenia wynikające z przeglądu egzoszkieletów przemysłowych: dyskomfort, masę urządzeń i brak szczegółowych norm bezpieczeństwa (de Looze M. P. i in., 2016). Wsparcie pracy fizycznej na budowie ma przy tym znaczenie wykraczające poza wydajność: jest narzędziem obrony atrakcyjności pracy w technologii monolitycznej wobec „czystej pracy” w prefabrykacji, a przez obniżenie rotacji i stabilizację składu brygad – zmniejsza rozbieżność między planem a realizacją, a więc działa w kierunku wyznaczanym przez metodę FFF (podrozdziały 5.2.4 i 5.3).

W tej samej warstwie wskazane są pilotażowe zastosowanie czujników dojrzałości betonu w stropach i ścianach obiektów kubaturowych, gdzie skrócenie czasu do rozdeskowania przekłada się bezpośrednio

na rotację deskowań, oraz kalibracja i walidacja metody dojrzałości dla mieszanek stosowanych na budowie CCGT w Grudziądzu (podrozdział 5.4). Kierunkiem wskazanym na podstawie obserwacji rynku, niebędącym przedmiotem badań empirycznych rozprawy, jest także integracja systemów dostawcy z cyfrowymi platformami zarządzania budową używanymi przez generalnych wykonawców.

**3. Warstwa analityczna i warstwa ucząca.** Metodykę analizy wykorzystania potencjału deskowań, ludzi i zasobów logistycznych zastosowaną na budowie INDUSTRIAL należy przenieść na reprezentatywną próbę budów i rozwinąć w usługę doradczą dla wykonawców (podrozdziały 4.2 i 5.1). Model przepływu FFF powinien stać się szkieletem modelu symulacyjnego wielobudowlanego przepływu deskowań w środowisku AnyLogic, a jego składniki – przedmiotem kolejnych etapów warstwy uczącej: sieci typu MLP prognozującej nakład pracy i czas taktu na podstawie próby budów, sieci rekurencyjnej LSTM prognozującej wykorzystanie grup produktowych i terminy zwrotów na szeregach tygodniowych, klasyfikacji ryzyka opóźnienia wydania na podstawie cech pozycji wydań oraz modelu hybrydowego łączącego metodę dojrzałości z korektą uczoną na danych z czujników do prognozy terminu rozdeskowania (podrozdziały 3.4 i 5.5). Zgodnie z przyjętym w rozprawie porządkiem sieci te powinny być porównywane z modelami interpretowalnymi skalibrowanymi w rozprawie i przyjmowane do użytku tylko wtedy, gdy je przewyższają (Rudin C., 2019); uzasadnione jest przy tym łączenie modeli statystycznych z komponentami sieci neuronowych (Lim B., Zohren S., 2021). **We wszystkich tych zadaniach decyzja powinna być podejmowana przez ludzi – kierownika budowy, technologa, pracownika logistyki – których model ma wspierać, a nie zastępować.**

**4. Warstwa rynkowa.** Oferta dostawcy deskowań powinna być dostosowywana do trendów wyznaczanych przez prefabrykację: przez wejście w łańcuch wartości prefabrykacji (formy i deskowania do wytwórni, systemy do zespoleń i monolityzacji na budowie), rozwiązania hybrydowe łączące prefabrykaty z deskowaniem systemowym, udział w projektowaniu obiektów na etapie koncepcji oraz cyfryzację i automatyzację usługi deskowaniowej. Podstawą decyzji inwestycyjnych w park sprzętowy powinny być branżowy indeks cen deskowań (dzierżawy i sprzedaży), zastępujący przyjęte w rozprawie założenie eksperckie, systematyczne badanie udziału prefabrykacji w kluczowych segmentach budownictwa oraz ilościowy model granicznego kosztu robocizny, powyżej którego – dla danej klasy obiektów – prefabrykacja staje się korzystniejsza od technologii monolitycznej (podrozdział 5.3). Zgodnie z dyskusją w podrozdziale 6.3 priorytetem powinny być przy tym systemy o niskiej pracochłonności i rozwiązania wspierające pracowników na budowach, dostosowane do inwestycji energetycznych i obronnych. Zgodnie z czwartym punktem programu Deminga, **dostawca deskowań powinien dążyć do roli jedynego, długoterminowego partnera wykonawcy – dostawcy, na którego można zawsze liczyć, wybieranego ze względu na koszt całkowity i niezawodność przepływu, a nie wyłącznie cenę dzierżawy** (Deming W. E., 1986). Taka relacja, oparta na zaufaniu i wspólnie monitorowanych miernikach przepływu, realizuje zasadę korzyści obustronnej (win-win): **wykonawca zyskuje pewność dostaw i krótszy cykl, a dostawca – przewidywalność zapotrzebowania i wyższe wykorzystanie parku bez inwestycji w majątek**.

**Ograniczenia jako program badań.** Interpretując wyniki, należy uwzględnić ograniczenia pracy. Analizy empiryczne oparto na danych jednego przedsiębiorstwa i jednego rynku, studium przypadku obejmuje jedną budowę, a badanie ankietowe – próbę 50 firm. Okres obserwacji wykorzystania materiałowego (51 tygodni) pozwala ustanowić linię bazową, lecz nie pozwala jeszcze ocenić efektu pełnego wdrożenia FFF na budowach. Część wielkości ekonomicznych, w tym tempo wzrostu cen deskowań, udziały prefabrykacji w segmentach rynku i parametry symulacji egzoszkieletów na budowie, ma charakter założeń, wyraźnie oznaczonych w tekście. Wartości normatywne pracochłonności pochodzą ze źródła niemieckiego i wymagają weryfikacji chronometrażem w warunkach polskich, a koncepcje Construction 5.0 i Industry 6.0 pozostają ramami wschodzącymi o nieustalonych granicach definicyjnych. Człon tezy głównej dotyczący bezpieczeństwa pracy zweryfikowano pośrednio – przez efekty urządzeń wspomagających pracę fizyczną i rotację pracowników – bez analizy wskaźników wypadkowości. Ograniczenia te nie podważają wniosków rozprawy, lecz wyznaczają – wraz ze wskazanymi kierunkami – program dalszych badań, w tym powtórzenie pomiarów po pełnym wdrożeniu rozwiązań FFF, które pozwoli rozstrzygnąć hipotezę operacyjną.

Wspólnym mianownikiem wszystkich ustaleń jest przejście od parku, który „leży", do deskowania, które „płynie" – od zarządzania majątkiem do zarządzania przepływem materiału, informacji, pracy i odpowiedzialności. Luka ok. 15 punktów procentowych dzieląca obecne wykorzystanie parku od celu strategicznego **jest osiągalna przede wszystkim przez zmianę sposobu zarządzania, a nie przez inwestycje – i właśnie taką zmianę opisuje i operacjonalizuje metoda Flexible Formwork Flow**.

## Bibliografia


Abioye S. O., Oyedele L. O., Akanbi L., Ajayi A., Davila Delgado J. M., Bilal M., Akinade O. O., Ahmed A., 2021. Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges. *Journal of Building Engineering*. doi:10.1016/j.jobe.2021.103299

ACI, 2014. ACI 347R-14 Guide to Formwork for Concrete. Farmington Hills: American Concrete Institute.

ASTM C1074-19e1 Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. West Conshohocken: ASTM International.

Bajorek G., Słonina S., 2023. Znaczenie deskowania w formowaniu monolitycznych konstrukcji betonowych. *Inżynier Budownictwa*, 49-55.

Ballard H. G., 2000. The Last Planner System of Production Control. Rozprawa doktorska. . Birmingham: The University of Birmingham.

Barbosa F., Woetzel J., 2017. *Reinveinting Construction: A Route to Higher Productivity.* McKinsey & Company.

Baskova R., Tazikova A., Strukova Z., Kozlovska M., Cabala J., 2023. A Dynamic Model for Effective and Optimal Planning of Formwork in Construction Projects. *Buildings*, 1-20.

Biruk S., Jaśkowski P., 2017. Optimization of Vertical Formwork Layout Plans Using Mixed Integer Linear Programming. . *International Journal of Civil Engineering*, 125-133.

Breque M., De Nul L., Petridis A., 2021. *Industry 5.0 Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry.* European Commission Directorate-General for Research and Innovation.

Buswell R. A., Leal de Silva W. R., Jones S. Z., Dirrenberger J., 2018. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 37-49. doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.006

Byrka G., 2025. ASTM C1074 jako standard oceny wytrzymałości betonu in situ w realizacji konstrukcji sprężonych z wykorzystaniem systemu INSITE. *Wrocławskie Dni Mostowe*, (strony 1-12). Wrocław.

Carino N. J., Lew H. S., 2001. The maturity method: from theory to application. *Proceedings of the 2001 Structrures Congress & Exposition.* Washington D. C.: Reston ASCE.

Casini M., 2022. *Construction 4.0 — Advanced Technology, Tools and Materials for the Digital Transformation of the Construction Industry.* Elsevier: Woodhead Publishing.

Chao L.-C., Skibniewski M. J., 1995. Neural network method of estimating construction technology acceptability. . *Journal of Construction Engineering and Management*, 130-142.

Clear C. A., Harrison T. A., 1985. *Concrete pressure on formwork.* Londyn: CIRIA.

Cushman & Wakefield, 2017. *Marketbaet III kw. 2017.* Pobrano z lokalizacji https://eurobuildcee.com/news/30650-coraz-wiekszy-popyt-na-magazyny

Deming W. E., 1986. *Out of the Crisis.* Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study.

Deming W. E., 1993. *The New Economics for Industry, Government, Education.* Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study.

Dikmen S., Sonmez M., 2011. An artificial neural networks model for the estimation of formwork labour. *Journal of Civil Engineering and Management*, 340-347. doi:10.3846/13923730.2011.594154

Dillman D. A., Smyth J. D., Christian L. M., 2014. *Internet, Phone, Mail, and Mixed-Mode Surveys: The Tailored Design Method .* Nowy Jork: Hoboken.

DIN, 2010. DIN 18218:2010-01 Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen (Pressure of fresh concrete on vertical formwork). Berlin.

Duggal A. S., Malik P. K., Gehlot A., Singh R., Gaba G. S., Masud M., Al-Amri J. F., 2022. A sequential roadmap to Industry 6.0: Exploring future manufacturing trends. . *IET Communications,* , 521-531. doi:10.1049/cmu2.12284

Elazouni A. M., Ali A. E., Abdel-Razek R. H., 2005. Estimating the acceptability of new formwork systems using neural networks. . *Journal of Construction Engineering and Management*, 33-41.

Enang E., Bashiri M., Jarvis D., 2023. Exploring the transition from techno centric industry 4.0 towards value centric industry 5.0: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 7866–7902.

Fernández-Miguel A., 2025. Toward the Theoretical Foundations of Industry 6.0: A Framework for AI-Driven Decentralized Manufacturing Control. *Future interner*, 1-27. doi:10.3390/fi17100455

Forcael E., Ferrari I., Opazo-Vega A., Pulido-Arcas J. A., 2020. Construction 4.0: A Literature Review. Sustainability, 12(22), 9755. doi:10.3390/su12229755. *Sustainability*, 33-41. doi:10.3390/su12229755

Frandson A., Berghede K., Tommelein I. D., 2013. Takt Time Planning for Construction of Exterior Cladding. . *21st Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, (strony 527-536). Fortaleza.

Gardner N. J., 1985. Pressure of concrete on formwork. *ACI Journal*, 744-753.

GDDKiA, 2024. *Budowa S10 Piła Szczecin - podpisane umowy.* Szczecin. Pobrano z lokalizacji https://www.gov.pl/web/gddkia-szczecin/podpisalismy-umowe-na-pierwsze-odcinki-drogi-ekspresowej-s10-szczecin-pila

German Bionic GmbH, b.r.. *German Bionic | Exia | The World's Most Powerful Exoskeleton*. Pobrano z lokalizacji https://www.germanbionic.com/

Goldratt E. M., Cox J., 1984. The Goal: A Process of Ongoing Improvement. *Great Barrington: North River Press.*

Golnaraghi S., Moselhi O., Alkass S., Zangenehmadar Z., 2020. Predicting construction labor productivity using lower upper decomposition radial base function neural network. . *Engineering Report*.

Golnaraghi S., Zangenehmadar Z., Moselhi O., Alkass S., Vosoughi A. R., 2019. Application of Artificial Neural Network(s) in Predicting Formwork Labour Productivity. *Advances in Civil Engineering*.

Goodfellow I., Bengio Y., Courville A., 2016. *Deep Learning. .* Cambridge: MIT Press.

Grand View Research, 2024a. *Industry Report 2024-2030.* Pobrano z lokalizacji https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/europe-precast-concrete-market-report

Grand View Research, 2024b. Precast Conrete Market. Pobrano z lokalizacji https://www.prnewswire.co.uk/news-releases/precast-concrete-market-size-worth-145-91-billion-by-2027-cagr-6-3-grand-view-research-inc--87

Grand View Research, 2025. *Precast Conrete Market.*

GUS, 2025. *Komunikaty Prezesa Głównego Urzędu Statystycznego.* Monitor Polski / stat.gov.pl.

Hanna A. S., Sanvido V. E., 1990. Interactive vertical formwork selection system. . *Concrete International*, 26-32.

Hanna A. S., Senouci A., 1997. Material cost minimization of concrete wall forms. *Building and Environment*, 57-67.

Harrison T. A., 1983. Form pressures: theory and field measurements. *Concrete International*, 23-28.

Hilti, 2026. *https://www.hilti.fi/content/hilti/E1/FI/en/business/business/equipment/fleet-management.html.*

Hochreiter S., Schmidhuber J., 1997. Long Short-Term Memory. . *Neural Computation*, 1735–1780.

Hopp W. J., Spearman M. L., 2008. *Factory Physics (wyd. 3).* Nowy Jork: McGraw-Hill/Irwin.

Hornik K., Stinchcombe M., White H., 1989. Multilayer feedforward networks are universal approximators. . *Neural Networks*, 359-366.

Ivanov D., 2023. The Industry 5.0 framework: viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives. *International Journal of Production Research*. doi:10.1080/00207543.2022.2118892

Jarkas A. M., 2010. Analysis and measurement of buildability factors affecting edge formwork labour productivity. *Journal of Engineering Science and Technology Review, 3(1), 142–150.*, 142-150.

Kamarthi S. V., Sanvido V. E., Kumara S. R. T., 1990. Neuroform – Neural Network System for Vertical Formwork Selection. . *Journal of Computing in Civil Engineering*, 179-199.

Karłowski A., Pasławski J., 2015. Flexible construction process management using robust strategy. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2015).*

Kersting M., 2012. Prozessmodell für die optimale projektspezifische Schalungssystemauswahl. *„Prozessmodell für die optimale projektspezifische Schalungssystemauswahl", Doctoral Thesis,*. Zurich: ETH Zurich. doi:10.3929/ethz-a-007089737

Kilian W., 2007. Współczesne metody diagnostyki masywnych konstrukcji betonowych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 77-85.

Kim S., Moore A., Srinivasan D., Akanmu A., Barr A., Harris-Adamson C., Rempel D. M., Nussbaum M. A., 2019. Potential of Exoskeleton Technologies to Enhance Safety, Health, and Performance in Construction: Industry Perspectives and Future Research Directions. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*. doi:0.1080/24725838.2018.1561557

Klinc R., Turk Ž., 2019. Construction 4.0 – Digital Transformation of One of the Oldest Industries. *Economic and Business Review*. doi:10.15458/ebr.92

Koskela L., 1992. *Application of the New Production Philosophy to Construction.* Stanford University.

Koskela L., 2000. *An exploration towards a production theory and its application to construction. .* VTT Publications 408. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland.

Kowalczyk J., Skorupski D., Ruszel B., 2026. Prefabrykacja betonowa w budownictwie energetycznym – magazyn paliwa bloku wielopaliwowego. *Inżynier Budownictwa*. Pobrano z lokalizacji https://inzynierbudownictwa.pl/prefabrykacja-betonowa-w-budownictwie-energetycznym-magazyn-paliwa-bloku-wielopaliwowego/

Ko C.-H., Kuo J.-D., 2015. Making Formwork Contruction LEAN. *Journal of Civil Engineering & Management*, 444-458. doi:10.3846/13923730.2014.890655

Ko C.-H., Kuo J.-D., 2019. Making Formwork Design Lean. *Journal of Engineering, Project, and Production Management*, 29-47.

Krawczyńska-Piechna A., 2016. Comprehensive Approach to Efficient Planning of Formwork Utilization on the Construction Site. *7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management* (strony 366-372). Procedia Engineering 182 (2017).

Kuhn T. S., 1962. *The Structure of Scientific Revolutions.* Chicago: The University of Chicago.

Lashinsky A., 2012. *Inside Apple: How America's Most Admired – and Secretive – Company Really Works.* Nowy Jork: Business Plus.

LeCun Y., Bengio Y., Hinton G., 2015. Deep learning. *Nature*, 436-444. doi:10.1038/nature14539

Lim B., Zohren S., 2021. Time-series forecasting with deep learning: a survey. . *Philosophical Transactions of the Royal Society*. doi:10.1098/rsta.2020.0209

Little J. D. C., 1961. A Proof for the Queuing Formula: L = λW. *Operations Research*, 383-387.

de Looze M. P., Bosch T., Krause F., Stadler K. S., O'Sullivan L. W., 2016. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 671-681. doi:10.1080/00140139.2015.1081988

Lykov A., Altamirano Cabrera M., Konenkov M., Serpiva V., Gbagbe K. F., Alabbas A., Fedoseev A., Moreno L., Khan M. H., Guo Z., Tsetserukou D., 2024. Industry 6.0: New Generation of Industry driven by Generative AI and Swarm of Heterogeneous Robots. doi:10.48550/arXiv.2409.10106

Maddikunta P. K. R., Pham Q.-V., Prabadevi B., Deepa N., Dev K., Gadekallu T. R., Ruby R., Liyanage M., 2022. Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. *Journal of Industrial Information Integration*. doi:10.1016/j.jii.2021.100257

Majkowski Ł., Pasławski J., 2023. Elastyczny dobór deskowań. Elastyczna gospodarka deskowaniami. FFC – Flexible Formwork Choice. FFF – Flexible Formwork Flow. *Inżynieria i Budownictwo*, 694-702. doi:10.5604/01.3001.0054.1392

Majkowski Ł., 2025. Pierwszy w Polsce pomiar parcia mieszanki betonowej z zastosowaniem sensorów PERI InSite. *Przegląd Budowlany*, 169-173. doi:10.5604/01.3001.0055.3024

Makridakis S., Spiliotis E., Assimakopoulos V., 2018. Statistical and Machine Learning forecasting methods: Concerns and ways forward. *PLoS ONE*. doi:10.1371/journal.pone.0194889

Mariak A., Wilde K., 2015. Wyznaczanie wytrzymałości betonu na podstawie funkcji dojrzałości wg amerykańskiej normy ASTM C1074-11. *Materiały Budowlane*, 68-71.

Marinelli M., 2022. Human–Robot Collaboration and Lean Waste Elimination: Conceptual Analogies and Practical Synergies in Industrialized Construction. . *Buildings*. doi:10.3390/buildings12122057

Marinelli M., 2023. From Industry 4.0 to Construction 5.0: Exploring the Path towards Human–Robot Collaboration in Construction. *Systems*. doi:10.3390/systems11030152

Martinez E., Tommelein I. D., Alvear A., 2016. Formwork System Selection Using Choosing by Advantages. *Construction Research Congress* (strony 1700-1709). ASCE (American Society of Civil Engineers). doi:10.1061/9780784479827.170.

Matejević-Nikolić B., Živković L., 2022. Comparative representation of two models for predicting the productivity of column and wall concreting process. *Buildings*. doi:10.3390/buildings12111809

Mayo E., 1933. *The human problems of an industrial civilization.* New York: Viking Press.

money.pl, 2026. *200 mld zł na obronność w 2026 r. Wydatki rosną szybciej niż możliwości produkcji.* money.pl. Pobrano z lokalizacji money.pl (2026). 200 mld zł na obronhttps://www.money.pl/biznes/200-mld-zl-na-obronnosc-w-2026-r-wydatki-rosna-szybciej-niz-mozliwosci-produkcji-7315444793591808a.html

Moselhi O., Khan Z., 2010. Analysis of labour productivity of formwork operations in building construction. *Construction Innovation*, 286-303.

Nahavandi S., 2019. Industry 5.0 – A Human-Centric Solution. . *Sustainability*. doi:10.3390/su11164371

Neville A. M., 2000. *Właściwości betonu.* Kraków: Polski Cement.

Nowotarski P., Pasławski J., Matyja J., 2016. Improving construction processes using lean management methodologies – cost case study. *Procedia Engineering*, 1037-1042. doi:10.1016/j.proeng.2016.08.845

Nowotarski P., 2016. Lean and agile management synergy in construction of high-rise office building. *Archives of Civil Engineering*, 133-147.

Oesterreich T. D., Teuteberg F., 2016. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry, 83, 12*, 121-139.

Ohno T., 1988. *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production.*

OMG, 2011. *Business Process Model and Notation (BPMN), Version 2.0. OMG Document Number formal/2011-01-03.* Object Management Group.

Orłowski Z., 2010. *Podstawy technologii betonowego budownictwa monolitycznego.* Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

Pan Y., Zhang L., 2021. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. . *Automation in Construction*.

PAP, 2026. *Kiedy powstanie pierwsza polska elektrownia jądrowa? „Harmonogram jest ambitny".* Forsal.pl. Pobrano z lokalizacji https://forsal.pl/gospodarka/inwestycje/artykuly/9881354,kiedy-powstanie-pierwsza-polska-elektrownia-jadrowa-harmonogram-jest.html

Pasławski J., 2008. Flexibility approach in construction process engineering. *Technological and Economic Development of Economy*, 518-530. doi:10.3846/1392-8619.2008.14.518-530

Pasławski J., 2008. Flexibility approach in the runway pavement using FLEMANCO method. *Transport*, 341-350. doi:10.3846/1648-4142.2008.23.341-350

Pasławski J., 2009. *Elastyczność w zarządzaniu realizacją procesów budowlanych.* Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej (seria Rozprawy, nr 437).

PKN, 2011. PN-EN 13670:2011 Wykonywanie konstrukcji z betonu. . Warszawa.

PKN, 2021. PN-EN 206+A2:2021-08 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność. . Warszawa: PKN.

Portal Militarny, 2026. *Budżet obronny Polski na 2026 rok*. Portal Militarny. Pobrano z lokalizacji https://portalmilitarny.pl/artykuly/budzet-obronny-polski-na-2026-rok/

Portas J., AbouRizk S., 1997. Neural network model for estimating construction productivity. . *Journal of Construction Engineering and Management*, 399-410.

Proverbs D., Holt G., 1999a. Factors impacting construction project duration: a comparison between France, Germany and the UK. *Building and Environment*.

Proverbs D., Holt G., 1999b. Productivity rates and construction methods for high rise concrete construction: a comparative evaluation of UK, German and French contractors. *Construction Management and Economics*, 45-52.

Proverbs D., 1999. Construction resource/method factors influencing productivity for high rise concrete construction. *Construction Management and Economics*, 577-587. doi:10.1080/014461999371196

Rada Ministrów RP, 2022. Uchwała w sprawie ustanowienia programu wieloletniego pod nazwą „Rządowy Program Budowy Dróg Krajowych do 2030 r. (z perspektywą do 2033 r.). Pobrano z lokalizacji https://www.gov.pl/web/premier/uchwala-w-sprawie-ustanowienia-programu-wieloletniego-pod-nazwa-rzadowy-program-budowy-drog-krajowych-do-2030-r-z-perspektywa-do-2033-r-przedlozona-przez-ministra-infrastruktury

Rane N. L., Achari A., Kadam D., 2023. Evaluating the Selection Criteria of Formwork System (FS) for RCC Building Construction. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 197-205.

Rolls-Royce, 2012. *Rolls-Royce celebrates 50th anniversary of Power-by-the-Hour [komunikat prasowy].* Pobrano z lokalizacji https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/yr-2012/121030-the-hour.aspx

Rother M., Shook J., 1999. *Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda.* MA: Lean Enterprise Institute.

Rowiński L., Kobiela M., Skarżyński A., 1980. *Technologia monolitycznego budownictwa betonowego.* Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe (wyd. 2 poprawione: 1986).

Rudin C., 2019. Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nature Machine Intelligence*, 206-215. doi:10.1038/s42256-019-0048-x

Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J., 1986. Learning representations by back-propagating errors. . *Nature*, 533-536.

Sacks R., Brilakis I., Pikas E., Xie H. S., Girolami M., 2020. Construction with digital twin information systems. , 1, e14. doi:10.1017/dce.2020.16. *Data-Centric Engineering*, 968-980. doi:10.1017/dce.2020.16

Saul A. G. A., 1951. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. . *Magazine of Concrete Research*, 127-140.

Skarżyński A., 1992. *Technologiczno-organizacyjne podstawy realizacji wielokondygnacyjnego budownictwa monolitycznego w przestawnych urządzeniach formujących.* Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej (seria Rozprawy, nr 263).

Sonmez R., Rowings J. E., 1998. Construction labor productivity modeling with neural networks. . *Journal of Construction Engineering and Management*, 498-504.

Sosna B., 2026. *Rynek prefabrykacji betonowej napędzany inwestycjami kolejowymi i energetycznymi.* Pobrano z lokalizacji https://inzynierbudownictwa.pl/rynek-prefabrykacji-betonowej-napedzany-inwestycjami-kolejowymi-i-energetycznymi/

SPECTIS, 2026. *Rynek ciężkiej prefabrykacji betonowej w Polsce.* Pobrano z lokalizacji https://spectis.pl/blog/rynek-ciezkiej-prefabrykacji-betonowej-w-polsce-z-potencjalem-do-dalszej-konsolidacji

Sutton R. S., Barto A. G., 2018. *Reinforcement Learning: An Introduction.* Cambridge: MIT Press.

Tam C. M., Tong T., Lau T., Chan K. K., 2005. Selection of vertical formwork system by probabilistic neural networks models. *Construction Management and Economics*, 245-254. doi:10.1080/0144619042000205912

Technologia i Budownictwo, 2026. *Harmonogram budowy elektrowni jądrowej w Polsce.* Pobrano z lokalizacji https://technologieibudownictwo.pl/artykul/pierwsza-elektrownia-jadrowa-w-polsce/

Terzioglu T., Polat G., Turkoglu H., 2021. Analysis of Formwork System Selection Criteria for Building Construction Projects: A Comparative Study. *Buildings*, strony 1-28. doi:10.3390/buildings11120618

Terzioglu T., Polat G., Turkoglu H., 2022. Analysis of Industrial Formwork Systems Supply Chain Using Value Stream Mapping. 47-61. doi:10.32738/JEPPM-2022-0005

Thomas H. R., Maloney W. F., Horner R. M. W., Smith G. R., Handa V. K., Sanders S. R., 1990. Modeling Construction Labor Productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(1990)116:4(705)

Thomas H. R., Yiakoumis I., 1987. Factor Model of Construction Productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(1987)113:4(623)

Trist E. L., Bamforth K. W., 1951. Some Social and Psychological Consequences of the Longwall Method of Coal-Getting. *Human Relations, 4*. doi:10.1177/001872675100400101

Tukker A., 2004. Eight types of product–service system: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet. *Business Strategy and the Environment*, 246-260.

Vandermerwe S., Rada J., 1988. Servitization of business: Adding value by adding services. *European Management Journal*, 314–324.

Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I., 2017. Attention is All you Need. *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017).*

Vemaventuri, 2025. *Concrete Pressure, Temperature and Maturity Monitoring.* Weissenhorn. Pobrano z lokalizacji https://vemaventuri.io/link-concrete-pressure-temperature-and-maturity-monitoring

Witakowski P., 2009. *Technologia konstrukcji masywnych z betonu.* Puławy: Problemy przygotowania i realizacji inwestycji budowlanych. Puławy: PZITB.

wnp.pl, 2026. *Rekordy w wydatkach na polską armię. Rok 2026 będzie przełomowy.* wnp.pl. Pobrano z lokalizacji https://www.wnp.pl/bezpieczenstwo/rekordy-w-wydatkach-na-polska-armie-rok-2026-ma-byc-przelomowy,1020747.html

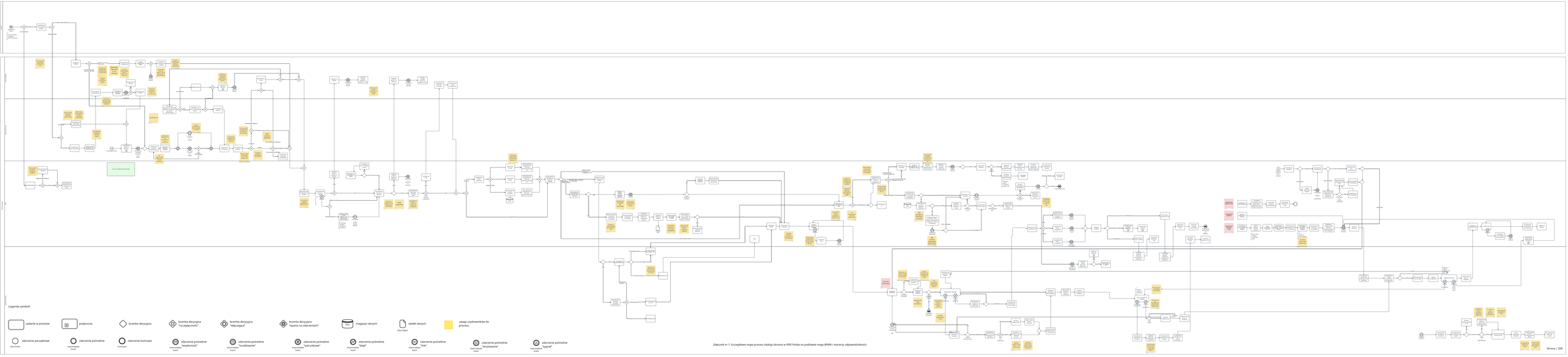
Womack J. P., Jones D. T., 1996. Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation. . *New York: Simon & Schuster.*

Xu X., Lu Y., Vogel-Heuser B., Wang L., 2021. Industry 4.0 and Industry 5.0 – Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 530-535. doi:10.1016/j.jmsy.2021.10.006

Zeittechnik-Verlag, 2019. *Handbuch Arbeitsorganisation Bau - Schalarbeiten Rahmenschalung Wande Stutzen.* Institut fur Zeitwirtschat und Betriebsberatung Bau.

Zieliński K., 2010. *Podstawy technologii betonu.* Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.

Zou G., 2026. Contruction 5.0. *Journal of Information Technology in Contruction (ITcon)*(doi:10.36680/j.itcon.2026.017), 394-397.




*Załącznik nr 1: Szczegółowa mapa procesu obsługi zlecenia w PERE Polska na podstawie mapy BPMN i macierzy odpowiedzialności*

| Poziom konstrukcji | Element | Start konstrukcji | Stop konstrukcji | Zakładany czas realizacji konstrukcji | Ilość: |
|---|---|---|---|---|---|
| Poziom 0 | Ściany żelbetowe | 4/5/2024 | 4/11/2024 | 6 dni | 1319.50 m2 |
| Poziom 0 | Słupy żelbetowe | 4/5/2024 | 4/8/2024 | 4 dni | 22 szt. |
| Poziom 0 | Podciągi i belki obwodowe | 4/12/2024 | 4/21/2024 | 9 dni | 148 mb. |
| Poziom 0 | Strop – grzybki | 4/13/2024 | 5/2/2024 | 19 dni | 1255.00 m2 |
| Poziom 1 | Ściany żelbetowe | 5/3/2024 | 5/9/2024 | 6 dni | 1319.50 m2 |
| Poziom 1 | Słupy żelbetowe | 5/3/2024 | 5/7/2024 | 4 dni | 22 szt. |
| Poziom 1 | Podciągi i belki obwodowe | 5/10/2024 | 5/19/2024 | 9 dni | 148 mb. |
| Poziom 1 | Strop – grzybki | 5/11/2024 | 5/30/2024 | 19 dni | 1255.00 m2 |
| Poziom 2 | ciany żelbetowe | 5/31/2024 | 6/6/2024 | 6 dni | 1319.50 m2 |
| Poziom 2 | Słupy żelbetowe | 5/31/2024 | 6/4/2024 | 4 dni | 22 szt. |
| Poziom 2 | Podciągi i belki obwodowe | 6/7/2024 | 6/16/2024 | 9 dni | 148 mb. |
| Poziom 2 | Strop – grzybki | 6/8/2024 | 6/27/2024 | 19 dni | 1255.00 m2 |
| Poziom 3 | Ściany żelbetowe | 6/28/2024 | 7/4/2024 | 6 dni | 1319.50 m2 |
| Poziom 3 | Słupy żelbetowe | 6/28/2024 | 7/2/2024 | 4 dni | 22 szt. |
| Poziom 3 | Podciągi i belki obwodowe | 7/5/2024 | 7/14/2024 | 9 dni | 148 mb. |
| Poziom 3 | Strop – grzybki | 7/6/2024 | 7/25/2024 | 19 dni | 1255.00 m2 |
| Poziom 4 | Ściany żelbetowe | 8/28/2024 | 7/4/2024 | 6 dni | 1319.50 m2 |
| Poziom 4 | Słupy żelbetowe | 6/28/2024 | 7/2/2024 | 4 dni | 22 szt. |
| Poziom 4 | Podciągi i belki obwodowe | 7/5/2024 | 7/14/2024 | 9 dni | 148 mb. |
| Poziom 4 | Strop – grzybki | 7/6/2024 | 7/25/2024 | 19 dni | 1255.00 m2 |
| Poziom 5 | Ściany żelbetowe | 7/26/2024 | 8/1/2024 | 6 dni | 658.00 m2 |
| Poziom 5 | Słupy żelbetowe | 7/26/2024 | 7/30/2024 | 4 dni | 17 szt. |
| Poziom 5 | Podciągi i belki obwodowe | 8/2/2024 | 8/11/2024 | 9 dni | 243 mb. |
| Poziom 5 | Strop – grzybki | 8/3/2024 | 8/22/2024 | 19 dni | 911.00 m2 |
| Poziom 5 | Strop - przewiercone - podparcie | 7/2/2024 | 1/2/025 | 184 dni | 166.00 m2 |
| Poziom 6 | Ściany żelbetowe | 8/23/2024 | 8/29/2024 | 6 dni | 658.00 m2 |
| Poziom 6 | Słupy żelbetowe | 8/23/2024 | 8/27/2024 | 4 dni | 15 szt. |
| Poziom 6 | Podciągi i belki obwodowe | 8/30/2024 | 9/8/2024 | 9 dni | 122.00 m2 |
| Poziom 6 | Strop – grzybki | 8/31/2024 | 9/19/2024 | 19 dni | 840.00 m2 |
| Poziom 7 | Ściany żelbetowe | 9/20/2024 | 9/26/2024 | 6 dni | 658.00 m2 |
| Poziom 7 | Słupy żelbetowe | 9/20/2024 | 9/24/2024 | 4 dni | 15 szt. |
| Poziom 7 | Podciągi i belki obwodowe | 9/27/2024 | 10/6/2024 | 9 dni | 122.00 m2 |
| Poziom 7 | Strop – grzybki | 9/28/2024 | 10/17/2024 | 19 dni | 840.00 m2 |
| Poziom 8 | Ściany żelbetowe | 10/18/2024 | 10/24/2024 | 6 dni | 658.00 m2 |
| Poziom 8 | Słupy żelbetowe | 10/18/2024 | 10/22/2024 | 4 dni | 15 szt. |
| Poziom 8 | Podciągi i belki obwodowe | 10/25/2024 | 11/3/2024 | 9 dni | 122.00 m2 |
| Poziom 8 | Strop – grzybki | 10/26/2024 | 11/14/2024 | 19 dni | 840.00 m2 |
| Poziom 9 | Ściany żelbetowe | 11/15/2024 | 11/21/2024 | 6 dni | 658.00 m2 |
| Poziom 9 | Słupy żelbetowe | 11/15/2024 | 11/19/2024 | 4 dni | 15 szt. |
| Poziom 9 | Podciągi i belki obwodowe | 11/22/2024 | 12/1/2024 | 9 dni | 120.00 m2 |
| Poziom 9 | Strop – grzybki | 11/23/2024 | 12/12/2024 | 19 dni | 804.00 m2 |
| Poziom 9 | Strop - przewiercone - podparcie | 9/26/2024 | 1/26/025 | 122 dni | 179.00 m2 |
| Poziom 10 | Ściany żelbetowe | 12/13/2024 | 12/19/2024 | 6 dni | 658.00 m2 |
| Poziom 10 | Słupy żelbetowe | 12/13/2024 | 12/17/2024 | 4 dni | 15 szt. |
| Poziom 10 | Podciągi i belki obwodowe | 12/20/2024 | 12/29/2024 | 9 dni | 120 mb. |
| Poziom 10 | Strop – grzybki | 12/21/2024 | 1/9/2025 | 19 dni | 804.00 m2 |
| Poziom 11 | Ściany żelbetowe | 1/16/2025 | 1/16/2025 | 6 dni | 658.00 m2 |
| Poziom 11 | Słupy żelbetowe | 1/10/2025 | 1/14/2025 | 4 dni | 15 szt. |
| Poziom 11 | Podciągi i belki obwodowe | 1/17/2025 | 1/26/2025 | 9 dni | 120 mb. |
| Poziom 11 | Strop – grzybki | 1/18/2025 | 1/6/2025 | 19 dni | 804.00 m2 |
| Poziom 12 | Ściany żelbetowe | 2/7/2025 | 2/13/2025 | 6 dni | 658.00 m2 |
| Poziom 12 | Słupy żelbetowe | 2/7/2025 | 2/11/2025 | 4 dni | 15 szt. |
| Poziom 12 | Podciągi i belki obwodowe | 2/14/2025 | 2/23/2025 | 9 dni | 120 mb. |
| Poziom 12 | Strop – grzybki | 2/15/2025 | 3/6/2025 | 19 dni | 804.00 m2 |
| Poziom 13 | Ściany żelbetowe | 3/7/2025 | 3/13/2025 | 6 dni | 658.00 m2 |
| Poziom 13 | Słupy żelbetowe | 3/7/2025 | 3/11/2025 | 4 dni | 15 szt. |
| Poziom 13 | Podciągi i belki obwodowe | 3/14/2025 | 3/23/2025 | 9 dni | 120 mb. |
| Poziom 13 | Strop – grzybki | 3/15/2025 | 4/3/2025 | 19 dni | 804.00 m2 |
| Poziom 14 | Ściany żelbetowe | 4/4/2025 | 4/10/2025 | 6 dni | 658.00 m2 |
| Poziom 14 | Słupy żelbetowe | 4/4/2025 | 4/8/2025 | 4 dni | 15 szt. |
| Poziom 14 | Podciągi i belki obwodowe | 4/11/2025 | 4/20/2025 | 9 dni | 120 mb. |
| Poziom 14 | Strop – grzybki | 4/12/2025 | 5/1/2025 | 19 dni | 804.00 m2 |