

dr hab. inż. Agnieszka Leśniak, prof. PK^{1)*}

ORCID: 0000-0002-4811-5574

dr inż. Filip Janowiec¹⁾

ORCID: 0000-0002-1627-7181

Ocena ryzyka robót dodatkowych w budowie infrastruktury kolejowej

Risk assessment of additional works in the construction of railway infrastructure

DOI: 10.15199/33.2022.10.17

Streszczenie. Artykuł prezentuje autorskie podejście do oceny ryzyka robót dodatkowych w przedsięwzięciach kolejowych. Opracowana baza danych posłużyła do budowy i kalibracji modelu w postaci sieci bayesowskiej. Zdefiniowano kluczowe zdarzenia dotyczące robót dodatkowych. W przypadku każdego z nich określono warianty w węzłach sieci i prawdopodobieństwo ich wystąpienia. Zaproponowano 3 poziomy ryzyka. Przekroczenie przyjętego poziomu referencyjnego oznacza ryzyko nieakceptowalne i wymaga podjęcia działań zapobiegawczych. **Słowa kluczowe:** roboty dodatkowe; ocena ryzyka; infrastruktura kolejowa.

Abstract. This article presents a proprietary approach to the risk assessment of additional works in the railway construction projects. The developed database was used to build and calibrate the model as a Bayesian network. The key events causing additional works were defined. Variants in nodes of network and probability of occurrence were determined for each of them. Three levels of risk were proposed. Exceeding the defined reference level means an unacceptable risk and requires taking preventive actions.

Keywords: additional works; risk assessment; railway infrastructure.

Szczególną rolę w kształtowaniu polityki transportowej odgrywa transport kolejowy, który zgodnie z założeniami najważniejszych strategii unijnych powinien stanowić dopełnienie oraz odciążenie sieci drogowej [1]. Wraz z przystąpieniem Polski do Unii Europejskiej (UE) w 2004 r., przyjęty został plan dostosowania krajowej sieci drogowej oraz kolejowej do standardów wspólnotowych [2]. Obecnie realizowany, a jednocześnie największy, jest „Krajowy Program Kolejowy do 2023 r.” (KPK) [3]. Wykonanie KPK wiąże się z odpowiednim zaplanowaniem poszczególnych etapów budowlanego procesu inwestycyjnego, którego kluczowym etapem jest realizacja, charakteryzująca się najbardziej dynamicznymi procesami technologicznymi, logistycznymi oraz prawnymi [4]. Niejednokrotnie rzeczywistość zastana przez wykonawcę robót różni się od stanu przedstawionego w dokumentacji projektowej. Ogół sytuacji niespodziewanych inicjuje wiele następstw, które prowadzą zazwyczaj do nieujętego przez wykonawcę dodatkowego nakładu pracy, a w związku z nim wzrostu kosztów oraz czasu trwania

robót. Potocznie przyjęło się nazywać to zjawisko tzw. robotami dodatkowymi (w Kodeksie Cywilnym „prace dodatkowe”). **Roboty dodatkowe** mają duży wpływ na realizację prac budowlano-montażowych [5, 6]. Większość prac skupia się na regionalnym ujęciu robót dodatkowych, uwzględniającym krajowe warunki społeczno-ekonomiczne lub regulacje prawne [7]. Trudno odnaleźć opracowania, które identyfikują przyczyny i konsekwencje wystąpienia robót dodatkowych w przypadku inwestycji kolejowych. Tymczasem ich poznanie umożliwia kwantyfikację i ocenę ryzyka rozumianego jako sytuacja, w której w trakcie realizacji przedsięwzięcia ze znanym prawdopodobieństwem mogą wystąpić zdarzenia losowe, powodujące powstanie określonych skutków [8].

W artykule przedstawiono propozycję modelu oceny ryzyka robót dodatkowych, do budowy którego wykorzystano sieci bayesowskie (ang. *Bayesian Belief Networks* – BBN).

Przyczyny i konsekwencje powstawania robót dodatkowych

W celu pozyskania wiedzy i zgromadzenia danych na temat robót dodatkowych występujących podczas budowy infrastruktury

kolejowej w Polsce przeprowadzono badania własne [4]. Wykorzystano następujące metody pozyskania informacji: wywiady z ekspertami z branży budownictwa kolejowego; analiza dokumentów kontraktowych udostępnionych do badań pochodzących ze zrealizowanych przedsięwzięć; badania ankietowe, pozwalające na pozyskanie opinii od większej liczby uczestników procesu inwestycyjnego. W pierwszym kroku badań przystąpiono do identyfikacji czynników powodujących roboty dodatkowe, a następnie określono prawdopodobieństwo ich wystąpienia. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1.

Kolejnym krokiem było zebranie opinii na temat możliwości wystąpienia robót dodatkowych na skutek zaistnienia któregośkolwiek ze zidentyfikowanych czynników (tabela 2). Następnie poszukiwano odpowiedzi dotyczących skutków robót dodatkowych. W wyniku prowadzonych badań, opisanych szczegółowo w [4, 9], można przyjąć, że najważniejszymi z nich są zmiana czasu trwania realizacji inwestycji i zmiana kwoty umownej. Wyniki zaprezentowano na rysunku 1, na którym przedstawiono przedziały zmian wartości kwoty umownej i czasu (średnia wyników z wywiadów eksperckich, analizy do-

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

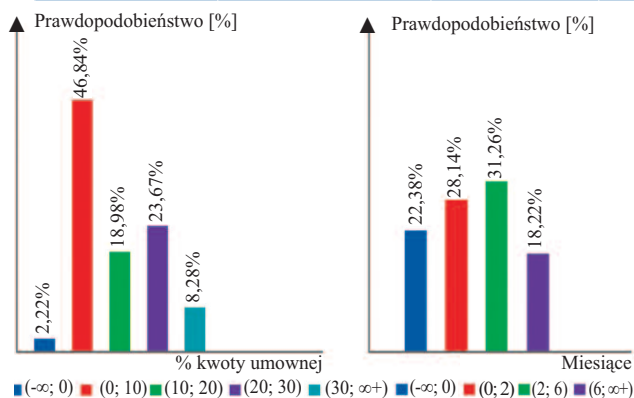
* Adres do korespondencji: agnieszka.lesniak@pk.edu.pl

Tabela 1. Czynniki wymuszające roboty dodatkowe i prawdopodobieństwo ich wystąpienia
Table 1. Factors causing additional works and the probability of their occurrence

Zidentyfikowane czynniki ryzyka	Prawdopodobieństwo wystąpienia poszczególnych czynników [%]			
	wywiady eksperckie (1)	dokumenty kontraktowe (2)	badania ankietowe (3)	wartość średnia z (1), (2), (3)
Opóźnienie dostaw	23,00	6,25	46,43	25,23
Zła organizacja	67,00	6,25	45,00	39,42
Infrastruktura podziemna	76,00	25,00	76,43	59,14
Błędna geologia	54,00	18,75	64,29	45,68
Zmiany rozwiązań	78,00	50,00	52,86	60,29
Błędy dokumentacji	97,00	87,50	65,71	83,40
Brak zamknięć	7,00	6,25	50,00	21,08
Problemy na stykach	32,00	0,00	46,43	26,14

Tabela 2. Prawdopodobieństwo wystąpienia robót dodatkowych na skutek zaistnienia wskazanych czynników
Table 2. Probability of additional works occurring as a result of the occurrence of factors

Prawdopodobieństwo wystąpienia robót dodatkowych [%]			
wywiady eksperckie (1)	dokumenty kontraktowe (2)	badania ankietowe (3)	wartość średnia z trzech czynników (1), (2), (3)
88,4	93,75	66,76	82,97



Rys. 1. Prawdopodobieństwo zmiany kwoty umownej i czasu inwestycji na skutek robót dodatkowych
Fig. 1. The probability of changing a contractual amount and the investment time as a result of additional works

kumentów kontraktowych i badań ankietowych). Efektem przeprowadzonych badań była baza danych, która posłużyła do budowy modelu oceny ryzyka w postaci sieci bayesowskiej.

Zasady oceny ryzyka robót dodatkowych

W literaturze można odnaleźć kilkanaście definicji ryzyka. Zgodnie z jedną z nich jest to sytuacja, w której ze znanym prawdopodobieństwem mogą wystąpić zdarzenia losowe, powodujące powstanie określonych skutków [8]. **Zjawisko ryzyka łączy się z prawdopodobieństwem wystąpienia pewnego zdarzenia oraz jego skutkami, a samo ryzyko może być przedstawione jako kombinacja tych dwóch parametrów [10].**

Podstawowym aktem prawnym, stosowanym na całym świecie, przedstawiającym ryzyko oraz strategię zarządzania nim jest

PN-ISO 31000:2018 [11]. Zgodnie z [11] w procesie zarządzania ryzykiem występują 3 kluczowe fazy: ustalenie kontekstu; ocena ryzyka i postępowanie z ryzykiem. Ocena ryzyka jako druga faza procesu obejmuje trzy etapy (rysunek 2). W pierwszym etapie celem prowadzonych działań jest rozpoznanie wszystkich możliwych ryzyk mogących pojawić się podczas trwania realizacji przedsięwzięcia kolejowego. Następnie przystępuje się do etapu analizy ryzyka, czyli przyczyn i źródeł ryzyka, ich pozytywnych i negatywnych następstw oraz prawdopodobieństwa wystąpienia tych zjawisk. To prowadzi do wyznaczenia zależności przyczynowo-skutkowych określonych za pomocą prawdopodobieństw. Etap trzeci stanowi ewaluację ryzyka. Uzyskanie wartości liczbowych poziomów ryzyka pozwala na przeprowadzenie jego ewaluacji. W praktyce, otrzymane wartości skwantyfikowanego ryzyka kwalifikuje się do jednego z określonych przedziałów i na podstawie przyjętego poziomu referencyjnego ryzyka decyduje, które z ryzyk wymagają reakcji.

Norma ISO 31010 [12], jako jedną z możliwych metod zarządzania ryzykiem sugeruje sieci Bayesa, które są acyklicznymi grafami skierowanymi,



Rys. 2. Etapy oceny ryzyka wg normy PN-ISO 31000:2018
Fig. 2. Risk assessment stages according to the PN-ISO 31000:2018 standard

w których wierzchołki reprezentują zdarzenia, a łuki (krawędzie) związki przyczynowe (rozkłady zmiennych) między tymi zdarzeniami. Zdarzenia w węzłach nazywane są również „stanami”. Podstawową zależnością wykorzystywaną przy budowie sieci bayesowskiej jest twierdzenie Thomasa Bayesa, wiążące prawdopodobieństwa warunkowe dwóch zdarzeń warunkujących się nawzajem.

Twierdzenie Bayesa przedstawia wzór (1), natomiast twierdzenie o prawdopodobieństwie warunkowym wzór (2) [13].

$$P(A|B) = (P(B|A) \cdot P(A)/P(B)) \quad (1)$$

gdzie:

A i B – zdarzenia oraz $P(B) > 0$;

$P(A|B)$ – prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia A, o ile zajdzie zdarzenie B;

$P(B|A)$ – prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia B, o ile zajdzie zdarzenie A.

$$P(A \cap B) = (P(A|B) \cdot P(B)) \quad (2)$$

gdzie:

$P(A \cap B)$ – prawdopodobieństwo części wspólnej zdarzeń A i B.

Budowa sieci Bayesa, zaproponowanej jako model oceny ryzyka, przebiegała etapowo. Badania własne pozwoliły na identyfikację ośmiu czynników prowadzących do powstawania robót dodatkowych. Czynniki te, będące źródłami ryzyka, zostały zamodelowane jako oddzielne węzły sieci. Następnie zaproponowano węzeł opisujący zdarzenie wystąpienia robót dodatkowych. Kolejno przystąpiono do określenia następstw utworzonego węzła. Zdefiniowano dwie konsekwencje wystąpienia robót dodatkowych, a mianowicie zmianę czasu oraz zmianę kwoty kontraktowej. Zostały one wprowadzone do modelu jako dwa wierzchołki sieci. Etap identyfikacji ryzyka zakończył zaproponowany układ sieci zawierający wierzchołki określające źródła, zdarzenia oraz konsekwencje ryzyka, w myśl zapisów normy ISO 31000 [11].

Etap II, tj. etap analizy ryzyka, obejmował definiowanie typologii sieci. Każdy zdefiniowany wierzchołek sieci ma minimum dwa stany opisujące zdarzenie. Mogą one przedstawiać sytuacje przeciwne

(wystąpi/nie wystąpi) lub wariant założonych przedziałów. W przypadku każdego z węzłów określono zdarzenia, przypisując im wartość prawdopodobieństwa wystąpienia danego stanu. Na podstawie wyników badań przyjęto, że stany opisujące wierzchołki źródeł oraz zdarzenia ryzyka robót dodatkowych będą zamodelowane jako przeciwne, podczas gdy dla wierzchołków opisujących konsekwencje ryzyka założono kilka wariantów opisanych przedziałami (rysunek 1). Sieć zbudowaną na podstawie wyników pochodzących z wywiadów eksperckich zaprezentowano na rysunku 3.

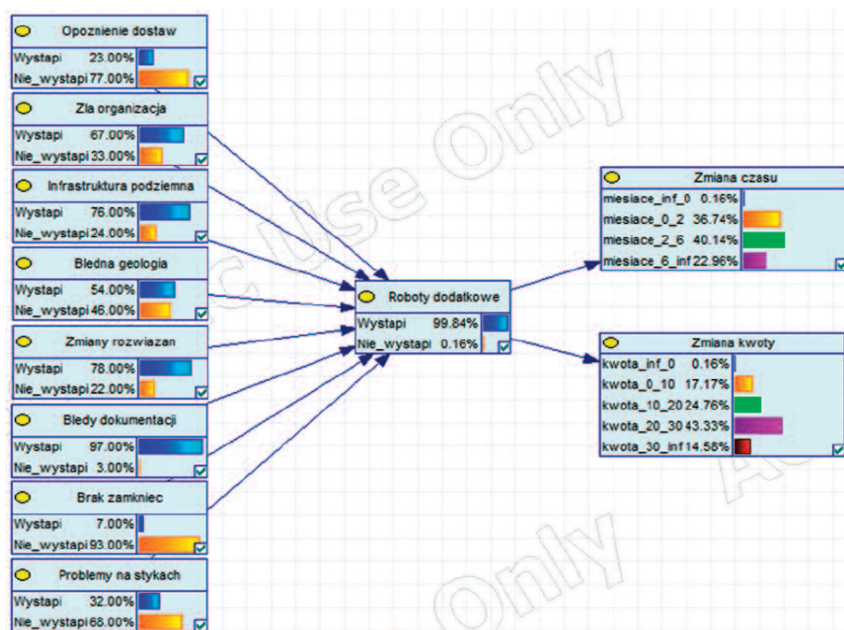
Dalsze działania związane z budową sieci obejmowały kalibrację modelu przez wykorzystanie informacji o robotach dodatkowych pochodzących z analizy dokumentów kontraktowych oraz wyników badań ankietowych. Implementacja danych do programu GeNie umożliwiła ponowną naukę sieci. W efekcie zbudowano ostateczny jej model i zakończono etap analizy ryzyka.

Ewaluacja ryzyka (etap III) polegała na skwantyfikowaniu ryzyka robót dodatkowych, co w przypadku opracowanego modelu wymagało wyznaczenia dwóch ryzyk: zmiany czasu trwania inwestycji (R_{zc}) oraz zmiany kwoty kontraktowej (R_{zk}). Określono odrębne wartości liczbowe ryzyka w przypadku po-

szczególnych wariantów konsekwencji (4 warianty zmiany czasu, 5 wariantów zmiany kwoty). Przyjęto, że suma obu ryzyk stanowi „ryzyko robót dodatkowych”. Założono, że im większa zmiana, tym wyższa wartość liczbowa. Pierwszy wariant konsekwencji (zmniejszenie lub brak zmian) odpowiada zatem wartości 0, natomiast kolejne przypisane są kolejnym liczbom całkowitym. W przypadku tego założenia wartość ryzyka będzie w przedziale $0 \div 7$. Zaproponowano 3 poziomy ryzyka wg powszechnie stosowanych podejść [14, 15] i odpowiadającą im akceptowalność ryzyka (tabela 4). Dalsze postępowanie z ryzykiem uzależnione jest od jego charakteru. W przypadku rozważanego problemu wartość 4,67 określono jako poziom referencyjny ryzyka. Ryzyko małe i średnie ($<4,67$) proponuje się klasyfikować jako akceptowalne, natomiast ryzyko duże nie może zostać zaakceptowane i wymaga dalszej analizy wraz z poszukiwaniem odpowiednich sposobów mitygacji.

Tabela 4. Poziomy ryzyka robót dodatkowych
Table 4. Risk levels of additional works

Wartość liczbowa	Poziom ryzyka	Akceptowalność ryzyka
0 – 2,33	mały	pomijalne
2,33 – 4,67	średni	akceptowalne
4,67 – 7	duży	nieakceptowalne



Rys. 3. Sieć bayesowska z uwzględnieniem danych z wywiadów eksperckich

Opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania GeNie

Fig. 3. Bayesian network including data from expert interviews

Own elaboration with the use of GeNie software

Podsumowanie

Podczas tworzenia sieci bayesowskiej uwzględniono specyfikę robót dodatkowych, przyczyny ich powstawania oraz konsekwencje wystąpienia. Najistotniejszym elementem zbudowanej sieci bayesowskiej jest komponent oceny ryzyka. Zamodelowanie węzła decyzyjnego, informującego o akceptacji lub jej braku w przypadku wyznaczonego poziomu ryzyka, zakończyło budowę sieci bayesowskiej. Przygotowaną sieć można traktować jako sieć bazową, która posłuży do analizy możliwych scenariuszy zdarzeń, a także podejmowania decyzji związanych z zarządzaniem ryzykiem.

Literatura

[1] Umowa Europejska o ważnych międzynarodowych liniach transportu kombinowanego i obiektach towarzyszących (AGTC), sporządzona w Genewie 1 lutego 1991 r.
 [2] Master plan dla transportu kolejowego w Polsce do 2030 r. Ministerstwo Infrastruktury, Warszawa 2008.
 [3] Uchwała Rady Ministrów nr 110/2019 z 17 września 2019 r. zmieniająca uchwałę w sprawie ustanowienia Krajowego Programu Kolejowego do 2023 r.
 [4] Janowiec F. Zarządzanie ryzykiem robót dodatkowych w przedsięwzięciach budowy infrastruktury kolejowej. Praca doktorska. Politechnika Krakowska. Repozytorium Politechniki Krakowskiej. 2022.
 [5] Juszczyk M, Zima K, Leśniak A. Zamówienia na roboty dodatkowe w drogowych inwestycjach publicznych. Magazyn Autostrady. 2013; 7, 60 – 63.
 [6] Czemplik A. Zarządzanie procesem budowlanym z uwzględnieniem ryzyka robót dodatkowych. Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej. 2012; 13: 45 – 50.
 [7] Msallam M, Abojaradeh M, Jew B, Zaki I. Controlling of variation orders in highway projects in Jordan. Journal of Engineering and Architecture. 2015; 3 (2): 95 – 104.
 [8] Knight FH. Risk, uncertainty, and profit. Boston: Schaffner & Marx; Houghton Mifflin Co., 1921.
 [9] Leśniak A, Janowiec F. Roboty dodatkowe w kolejowych przedsięwzięciach budowlanych. Acta Scientiarum Polonorum. Architectura. 2019; 18 (2): 33 – 44.
 [10] Kerzner H. Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.
 [11] PN-ISO 31000:2018 Zarządzanie ryzykiem – Zasady i wytyczne, 2018.
 [12] PN-EN IEC 31010:2020-01 Zarządzanie ryzykiem – Techniki oceny ryzyka.
 [13] Bayes T. (1763). LII. An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. By the late Rev. Mr. Bayes, FRS communicated by Mr. Price, in a letter to John Canton, AMFR S. Philosophical transactions of the Royal Society of London, (53), 370-418.
 [14] Połoński M, Pruszyński K. Problematyka ryzyka w projektowaniu realizacji robót budowlanych (cz. 1). Przegląd Budowlany. 2006; 77: 46 – 49.
 [15] Dziadosz A, Kapliński O, Tomczyk A, Rejment M. Analiza i ocena ryzyka finansowego w przedsięwzięciach budowlanych. Materiały Budowlane. 2016; (8): 112 – 113.

Przyjęto do druku: 22.09.2022 r.