

MARCIN ŚWITAŁA¹⁾
KATARZYNA REGULSKA²⁾

LIFE CYCLE COST ANALYSIS AS A TOOL FOR ROAD INFRASTRUCTURE MANAGEMENT – SELECTED ISSUES

ANALIZA KOSZTÓW CYKLU ŻYCIA JAKO NARZĘDZIE ZARZĄDZANIA INFRASTRUKTURĄ DROGOWĄ – WYBRANE ZAGADNIENIA

STRESZCZENIE. Artykuł ma charakter przeglądowny, a jego głównym celem jest opisanie problematyki analizy kosztów cyklu życia inwestycji drogowych (LCCA) oraz wskazanie korzyści, które płyną z zastosowania takiej analizy w zarządzaniu infrastrukturą drogową – ze szczególnym uwzględnieniem nawierzchni drogowych. Mimo iż omawiana koncepcja zyskuje na znaczeniu w światowej literaturze naukowej i praktyce inżynierskiej, rzadko wykorzystywana jest w pracach polskich specjalistów inżynierii drogowej. Ze względu na obszerność tematu oraz złożoność samej metody, w artykule ograniczono się do przedstawienia kilku wybranych problemów ilustrujących zagadnienie. Zdefiniowany został zakres zarządzania infrastrukturą drogową; zwrócono także uwagę na znaczenie podejścia charakterystycznego dla zarządzania projektami w przypadku infrastruktury nowo projektowanej. Opisany został przebieg cyklu życia drogi z uwzględnieniem aspektów związanych z gospodarką obiegu zamkniętego oraz zarządzaniem ryzykiem. Wskazano na użyteczność LCCA jako metody rozwiązywania problemów związanych z wyborem najlepszego wariantu kosztowego, z podziałem na główne kategorie kosztów, tj. koszty użytkowników dróg oraz koszty zarządców. Przedstawiono także przykłady wykorzystania LCCA w projektach infrastrukturalnych. Literatura przedmiotu wskazuje, iż metoda ta może być z powodzeniem wykorzystywana do różnych celów związanych z zarządzaniem aktywami drogowymi. Główne korzyści wynikające z jej użycia związane są z praktycznymi aspektami oceny efektywności kosztowej porównywanych wariantów inwestycji.

SŁOWA KLUCZOWE: analiza kosztów, cykl życia drogi, LCCA, zarządzanie infrastrukturą drogową.

ABSTRACT. The aim of this review article is to describe the problems of life cycle cost analysis (LCCA) of road projects and identify the benefits of using such analysis in road infrastructure management – with particular focus on pavement condition management. While the discussed concept becomes increasingly important in international scientific literature and engineering practice, it is still rarely used in the works of Polish road engineering specialists. Due to the broad scope of the subject matter and the complexity of the method itself, the article is limited to several chosen illustrative problems. The scope of road infrastructure management is defined; the importance of applying project management approach to newly designed infrastructure is also stressed. The presented description of the life cycle of a road includes aspects related to circular economy and risk management. It is also demonstrated that LCCA is useful in solving problems associated with selection of the best cost variant, taking into account the division into primary cost categories, i.e. road user costs and road agency costs. Examples of use of LCCA in infrastructural projects are also presented. Literature review indicates that this method may be successfully used in various applications related to road asset management. The primary benefits of its use are associated with practical aspects of cost-effectiveness assessment of the compared project variants.

KEYWORDS: costs analysis, LCCA, road life cycle, road infrastructure management.

DOI: 10.7409/rabdim.023.018

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mswitala@ibdim.edu.pl (✉)

²⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 3, 42-201 Częstochowa; katarzyna.regulska@pcz.pl

1. WPROWADZENIE

Koszty, obok jakości oraz dochodowości, stanowią bardzo ważny aspekt działalności każdej organizacji [1]. Trudno współcześnie przecenić ich znaczenie w zarządzaniu infrastrukturą drogową, która stanowi jeden z głównych zasobów majątkowych Skarbu Państwa [2]. Koszty stanowią kluczową determinantę kształtowania wyniku finansowego każdej inwestycji. Wpływają na wybór dostawców i podwykonawców, stopień wykorzystania nowych technologii, użyte rozwiązania materiałowe, a także na poziom świadczonych usług. Zarządcy dróg, podobnie jak menedżerowie przedsiębiorstw, powinni być w stanie wykazać decydentom, że podejmowane przez nich interwencje są racjonalne, zarówno z punktu widzenia ponoszonych kosztów, jak i wynikających z nich korzyści [3].

Działalność związana z budową dróg oraz ich utrzymaniem zaliczana jest do najbardziej kosztownych inwestycji publicznych i w praktyce obciążona jest wysokim ryzykiem ekonomicznym. W ostatnich latach głównym jego źródłem są rosnące ceny materiałów, robocizny kosztorysowej i kosztów pracy sprzętu budowlanego [4]. Z badań wynika, że inwestycje drogowe często nie spełniają postulatu efektywności kosztowej, a wręcz przeciwnie – eskalacja środków finansowych przeznaczonych na ich realizację staje się coraz powszechniejszym problemem [5]. W tym kontekście warto przytoczyć opinię Gillespie, który zaznacza, że najtańszym rozwiązaniem nie jest droga o najniższych kosztach, lecz ta, która posiada najwyższy wskaźnik zwrotu zainwestowanego kapitału [6].

Celem artykułu jest przybliżenie problematyki analizy kosztów cyklu życia inwestycji drogowych, określanej akronimem LCCA (ang. *Life-Cycle Cost Analysis*), jak również korzyści, które płyną z zastosowania takiej analizy w zarządzaniu infrastrukturą drogową – zwłaszcza w odniesieniu do nawierzchni drogowych. Mimo iż omawiana koncepcja zyskuje na znaczeniu w światowej literaturze naukowej i praktyce inżynierskiej, rzadko wykorzystywana jest w pracach polskich specjalistów inżynierii drogowej. Z badań wynika, że zdecydowana większość przedstawicieli zarządców dróg w mniejszym lub większym stopniu zmagają się z trudnościami związanymi z zarządzaniem przez siebie infrastrukturą drogową [7]. Badanie zrealizowane w 2022 r. dowodzi, że tylko jeden na stu krajowych zarządców używa omawianej metody do oceny efektywności inwestycji drogowych [8].

W pracy wykorzystano metodę „desk research” polegającą na krytycznej analizie literatury przedmiotu oraz badaniu dostępnych źródeł prezentujących wyniki analiz LCCA w sektorze drogowym. Materiał badawczy zgromadzony został z użyciem procedury systematycznego przeglądu literatury.

1. INTRODUCTION

Costs, along with quality and profitability, constitute a major aspect of activity of every organization [1]. Since roads belong to the primary assets of the National Treasury, the importance of costs in road infrastructure management cannot be overstated [2]. Moreover, costs comprise the key determinant of the financial balance of every investment. They influence the choice of suppliers and contractors, introduction of modern technologies, use of particular material solutions and the quality of services. Road administrators – not unlike managers in commercial enterprises – should be able to convince the decision-makers that the actions taken are rational, both in terms of costs and benefits [3].

Construction and maintenance of roads belong to the most costly public investments; in practice, they are associated with high economic risk. In recent years, this risk has been mostly related with growing material, labor and equipment costs [4]. Research indicates that road projects often display insufficient cost effectiveness; moreover, escalation of financial resources invested in their realization is an increasingly common problem [5]. In this context, it seems worthwhile to mention Gillespie's opinion that the least expensive road is not the one whose costs are the lowest, but the one which provides the highest return ratio [6].

The aim of this article is to acquaint the readers with the problems of life cycle cost analysis (LCCA) in the context of road projects and to identify the benefits of using such analysis in road infrastructure management - with particular focus on pavement condition management. While the discussed concept becomes increasingly important in international scientific literature and engineering practice, it is still rarely used in the works of Polish road engineering specialists. Research indicates that, in vast majority, road administrators struggle with various problems related to the road infrastructure they are responsible for [7]. Study from 2022 indicates that only one out of hundred road agencies in Poland uses the described method in road investment effectiveness assessment [8].

This article is based on desk research method, which consists in critical analysis of the available literature and sources presenting the results of LCCA analyses in road engineering. The research materials were collected through a systematic review of the literature.

The work presents the results of research that was partially realized under the research project “Optimization

Praca przedstawia wyniki badań, które częściowo zostały zrealizowane w ramach projektu badawczego o nazwie „Optymalizacja inwestycji drogowych w zakresie dostosowania sieci dróg krajowych do ruchu pojazdów ciężarowych o nacisku osi do 11,5 tony” finansowanego przez program „Gospostrateg” (NCBR). Celem realizacji projektu było zwiększenie zdolności administracji drogowej do wieloletniego planowania zabiegów w zakresie utrzymania okresowego.

2. ZARZĄDZANIE INFRASTRUKTURĄ DROGOWĄ

Zarządzanie infrastrukturą drogową, zgodnie z definicją Zofki, stanowi „skoordynowane działania organizacji dążące do uzyskania wartości z aktywów przy wypełnianiu celów organizacji” [9]. W nawiązaniu do klasycznych funkcji zarządzania można zaproponować definicję, według której zarządzanie infrastrukturą drogową oznacza planowanie, wdrażanie i kontrolę wszystkich działań związanych z rozwojem i utrzymaniem sieci drogowej oraz należących do niej drogowych obiektów inżynierskich. Chen i Bai stwierdzają, że pod pojęciem tym należy rozumieć systematyczne i skoordynowane działania, które w optymalny i zrównoważony sposób powinny przyczynić się do osiągnięcia efektywności ekonomicznej w zarządzaniu cyklem życia aktywów [10].

W ujęciu ogólnym zarządzanie infrastrukturą drogową ma na celu wspieranie organizacji w uzyskaniu większej efektywności działań, utrzymaniu stanu aktywów na pożądanym poziomie, przyjęciu systemowego podejścia z uwzględnieniem wszystkich faz cyklu życia, zapewnieniu spójności wewnątrzorganizacyjnej, a także w uzyskaniu akceptacji interesariuszy dla podejmowanych decyzji. Do głównych korzyści płynących z zarządzania aktywami zalicza się z kolei: uzyskanie większego zwrotu z zarządzanego majątku, większą rentowność w krótkiej i długiej perspektywie, poprawę satysfakcji interesariuszy oraz wzrost zaufania do organizacji. W praktyce odnotowuje się także pozytywne zmiany w obszarze bezpieczeństwa ruchu drogowego, oddziaływania na środowisko oraz jakości świadczonych usług [9].

W literaturze przedmiotu ważnym zagadnieniem jest koncepcja *pavement preservation*, związana z prewencją uszkodzeń nawierzchni drogowej, czyli podejmowaniem działań na rzecz zapewnienia i utrzymania sprawnej nawierzchni drogowej, z pominięciem nowo oddanych odcinków dróg oraz infrastruktury wymagającej gruntownej renowacji bądź rekonstrukcji. Ważne, aby wszystkie działania podejmowane były na wczesnym etapie wystąpienia uszkodzeń, zanim dojdzie do nieodwracalnego pogorszenia stanu nawierzchni i nieodczowne staną się kosztowne działania naprawcze [7, 9].

of investments in terms of adaptation of the national road network to heavy traffic with axle loads of up to 11.5 tons”, funded by the “Gospostrateg” program (The National Center for Research and Development). The aim of the project was to improve the capacity of road administration for long-term planning of road maintenance measures.

2. ROAD INFRASTRUCTURE MANAGEMENT

Road infrastructure management, according to the definition given by Zofka, consists in “coordinated actions taken by an organization to obtain value from its assets, while fulfilling its goals” [9]. With reference to the classic functions of management, one may propose a different definition – that road infrastructure management consists in planning, implementing and controlling all actions related to development and maintenance of the road network, including road engineering structures. According to Chen and Bai, this term should be understood as systematic and coordinated actions, which optimally and sustainably contribute to economic effectiveness in asset life cycle management [10].

In general perspective, road infrastructure management should enable the organization to: increase the effectiveness of the actions taken, maintain the condition of assets on the desired level, adopt a systemic approach incorporating every phase of the life cycle, ensure uniform internal organizational standards and obtain acceptance of the stakeholders for the organization's decisions. The primary benefits of asset management include: increased return obtained from the managed assets, greater short- and long-term profitability, increased stakeholder satisfaction and trust towards the organization. In practice, positive changes in traffic safety, environmental impact and service quality are observed as well [9].

An important subject described in the literature is the *pavement preservation* concept, associated with prevention of pavement distress, i.e. taking action to provide and maintain functional road pavements – excluding sections newly opened to traffic or requiring comprehensive repairs or reconstruction. It is vital to take all such actions in response to the earliest signs of distress, before irreversible deterioration of pavement occurs and costly repair measures become inevitable [7, 9].

Due to its high complexity and cost intensity, infrastructure management – especially in the case of newly designed infrastructure – often requires project management

Ze względu na swój wysoce złożony charakter i dużą kosztowność, zarządzanie infrastrukturą – zwłaszcza nowo projektowaną – w wielu przypadkach wymaga podejścia charakterystycznego dla zarządzania projektami. „Projekt”, w odróżnieniu od działań rutynowych, stanowi przedsięwzięcie o charakterze jednorazowym, które podejmowane jest w celu wytworzenia unikalnego produktu bądź dostarczenia unikalnej usługi w możliwie najbardziej efektywny sposób [11]. W klasycznym ujęciu zarządzanie projektami stanowi wystandardyzowany oraz (w zależności od przyjętej metodyki) uporządkowany zestaw działań i czynności ukierunkowanych na osiągnięcie założonych celów [12]. Stąd zarządzaniu projektowemu najczęściej towarzyszy podejście procesowe stanowiące syntezę wzajemnie dopełniających się czynności w zakresie: planowania, organizowania, przeprowadzenia oraz kontrolowania. W tym ujęciu zarządzanie infrastrukturą drogową to po prostu określony rodzaj aktywności, która zachodzi w sposób ciągły i oparta jest na logicznej sekwencji czynności wykonywanych w cyklu życia drogi [13].

3. CYKL ŻYCIA INWESTYCJI DROGOWEJ Z UWZGLĘDNIENIEM ASPEKTÓW ZARZĄDZANIA RYZYKIEM

Najczęściej w literaturze przedmiotu pojawiają się dwa sposoby rozumienia pojęcia „cykl życia”; można zaklasyfikować je jako „ujęcie wąskie” i „ujęcie szerokie”. W ujęciu wąskim główne fazy cyklu życia majątku drogowego obejmują okres upływający od momentu oddania inwestycji do użytku aż po chwilę, w której zostaje przekroczony stan graniczny [14]. W drugim przypadku cykl życia rozpoczyna się w momencie podjęcia działań przygotowawczych, a kończy w chwili zakończenia wszystkich czynności związanych z rozbiórką obiektu. Jeszcze inne ujęcie cyklu życia prezentuje Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, która utożsamia je z czasem realizacji procesu inwestycyjnego. Kluczowymi etapami są w tym przypadku prace związane z przygotowaniem i akceptacją dokumentacji inwestycyjnej, tj.: studium korytarzowego (SK), studium techniczno-ekonomiczno-środowiskowego wraz z koncepcją programową (STEŚ-R), decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach (DŚU), projektu budowlanego i wykonawczego, decyzji o zezwoleniu na realizację inwestycji drogowej (ZRID). Ostatni etap obejmuje wszystkie roboty budowlane związane z oddaniem inwestycji do użytkowania [15].

Rys. 1 ilustruje główne fazy cyklu życia drogi związane z jej budową, eksploatacją oraz późniejszą rozbiórką, przedstawione zarówno w ujęciu tradycyjnym (odnoszącym się do procesów produkcyjnych i logistycznych, w ramach których dochodzi do transformacji surowców i materiałów w półprodukty

approach. A “project”, in contrast to routine actions, is understood as an individual undertaking which is meant to deliver a unique product or service in the most effective manner [11]. In classical understanding, project management is a standardized and ordered (depending on the methodology) set of actions and activities focused on achieving the adopted aims [12]. Therefore, project management is typically supported by procedural approach, which synthesizes the complementary actions in the scope of planning, organizing, leading and controlling. With such perspective, road infrastructure management is a continuous activity based on a logical sequence of actions taken in the life cycle of the road [13].

3. LIFE CYCLE OF A ROAD PROJECT INCLUDING ASPECTS OF RISK MANAGEMENT

There are two most common approaches to the meaning of the term “life cycle” in the literature; they may be classified as “narrow” and “broad” definitions. In the narrow definition, the main phases of road asset life cycle encompass the period from the moment the structure is opened to traffic to the moment the limit condition is reached [14]. In the broad definition, the life cycle starts when preparatory actions start; it ends when all the actions related to demolition of the structure end. An altogether different approach is demonstrated by the Polish General Directorate of National Roads and Motorways, which treats life cycle as the period of realization of the investment process. In this case, the key elements are the activities associated with preparation and acceptance of documentation, i.e.: right-of-way study (SK), technical-economical-environmental study with program concept (STEŚ-R), decision on environmental conditions (DŚU), building permit design and execution design, decision on permission for realization of road project (ZRID). The last phase encompasses all the construction works related with opening the structure for service [15].

Fig. 1. illustrates the main road life cycle phases related to construction, service and final demolition, presented both in a traditional manner (based on production and logistic process, which transform resources and materials into semi-finished or ready products) and in a closed model, referred to as circular economy (which is essentially focused on minimization of demand for natural resources and generation of waste in the life cycle [16]). The primary actions taken in the circular model include: extraction and processing of mineral resources, transport, production, construction, use, demolition and recycling.

oraz wyroby gotowe), jak i w modelu obiegu zamkniętego, określanego mianem gospodarki cyrkularnej (którego istota sprowadza się do minimalizacji zużycia zasobów naturalnych oraz odpadów generowanych w trakcie całego cyklu życia drogi [16]). Do głównych podejmowanych tu działań zalicza się: wydobywanie i przetwarzanie surowców mineralnych, transport, produkcję, budowę, użytkowanie, rozbiórkę oraz recykling. W zakres tego ostatniego wchodzi: przetwarzanie, powtórne użycie oraz unieszkodliwianie odpadów [17]. Kluczową rolę pełni tu zasada 4R, wskazująca główne obszary koncentracji działań w cyklu życia, tj. reduce, reuse, recycle, recover [18].

The latter encompasses waste processing, reuse and disposal [17]. Key importance is attributed to the 4R principle, which indicates the primary areas of activity in the life cycle, i.e.: reduce, reuse, recycle, recover [18].

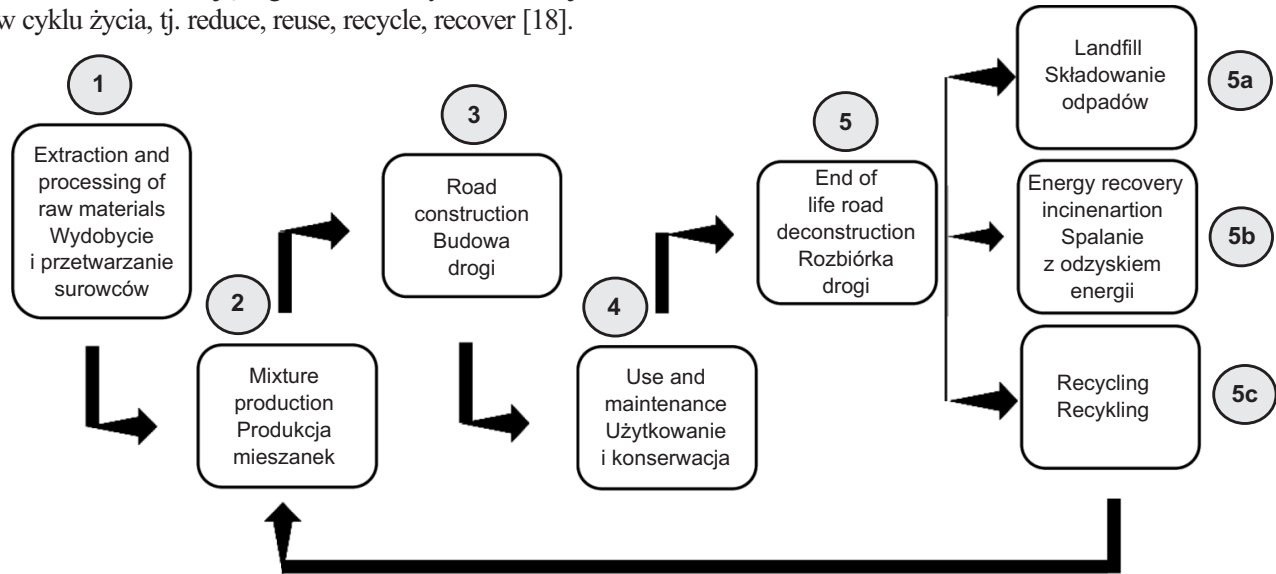


Fig. 1. The main stages of the life cycle of a road [18]
Rys. 1. Główne etapy cyklu życia drogi [18]

Pierwsze ujęcie nawiązuje do klasycznych przepływów fizycznych zachodzących w cyklu życia drogi, które rozpoczynają się od etapu wydobywania i przetworzenia surowców (1), a kończą na składowaniu odpadów (5a) bądź ich spalaniu z odzyskiem energii (5b). Wszystkie przepływy są linearne, co oznacza, że przebiegają one w sposób sekwencyjny między kolejnymi etapami cyklu życia, w ramach których dostawcy i wykonawcy realizują określone czynności usługowe i wytwórcze. Jednocześnie, wraz z zakończeniem etapu 5, dochodzi do ponownego przepływu materiałów pochodzących ze źródeł pierwotnych w związku z potrzebą ich powtórnego zakupu. Drugie ujęcie zakłada stosowanie obiegu zamkniętego i odnosi się do wykorzystania w budownictwie drogowym materiałów pochodzących z recyklingu (5c).

W literaturze przedmiotu dużą uwagę poświęca się zarządzaniu bezpieczeństwem infrastruktury drogowej (ang. *road infrastructure safety management*). Tak rozumiane zarządzanie ma na celu identyfikację na etapie planowania inwestycji czynników ryzyka, które mogą wystąpić na dalszych etapach cyklu

The first approach is based on classical flow of physical matter in the life cycle, which commences with extraction and processing (1) and ends with waste landfilling (5a) or energy recovery by incineration (5b). All the flows are linear, which means that successive phases occur sequentially, with suppliers and contractors realizing certain services and production activities. However, upon completion of phase 5, the material flow is again started from the original sources (1) due to the need for repeated purchase of materials. The second approach assumes circular flow of material and reuse of recycled material in road construction (5c).

Considerable attention is given in the literature to road infrastructure safety management. The aim of such approach is to identify potential future risk factors at the stage of project planning. Therefore, adoption of risk management principles is postulated; in practice, it consists in early identification of the major risk areas and effective implementation of safety procedures to increase resilience (Fig. 2) [19, 20].

życia projektu drogowego. Z tym wiąże się z kolei postulat przyjęcia zasad zarządzania ryzykiem, co w praktyce sprowadza się do wczesnej identyfikacji najważniejszych obszarów zagrożeń, a następnie skutecznej implementacji procedur bezpieczeństwa, w celu wzmocnienia ich odporności (Rys. 2) [19, 20].

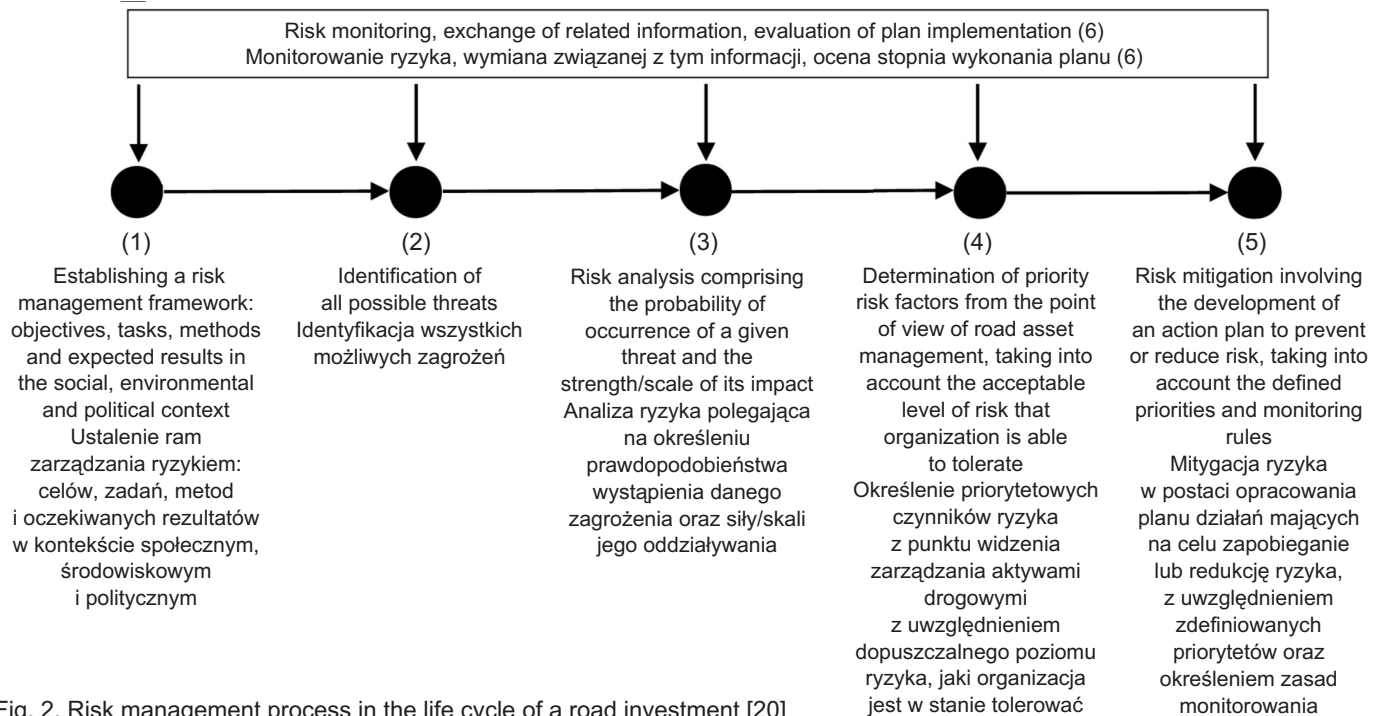


Fig. 2. Risk management process in the life cycle of a road investment [20]
Rys. 2. Proces zarządzania ryzykiem w cyklu życia inwestycji drogowej [20]

Występujące tu ryzyka można określić jako zagrożenia dla prawidłowego przebiegu procesów w całym cyklu życia, które mogą być wywołane zdarzeniami ekstremalnymi lub innymi zdarzeniami zewnętrznymi i wewnętrznymi, w wyniku których dochodzi do zakłóceń i utrudnień w osiąganiu celów; zarówno na etapie przygotowania, wykonania, użytkowania, jak i likwidacji danej inwestycji. Do głównych zagrożeń zaliczyć można ryzyka związane z zapewnieniem bezpieczeństwa ruchu, świadczeniem wysokiej jakości usług zgodnie z obowiązującymi regulacjami, zarządzaniem projektami, a także z efektami obsługi w obszarze performance, reputacją oraz ochroną środowiska. Co oczywiste, identyfikacja ryzyka wymaga gromadzenia informacji na temat źródeł jego powstania. Ważną rolę można tu przypisać wynikom badań geologicznych, prognozom warunków atmosferycznych, analizom kosztów materiałów budowlanych oraz kosztów pracy, danym dotyczącym bezpieczeństwa ruchu drogowego, a także wynikom kontroli finansowej danych historycznych (np. kosztów dodatkowych poniesionych na skutek przedłużenia czasu realizacji inwestycji z analizą czasu trwania poszczególnych etapów oraz przyczyn opóźnień).

The risks that occur can be seen as threats to the correct realization of processes in the entire life cycle. They may result from extreme incidents or other external and internal events, which disrupt and hinder goal attainment during preparation, construction, use and end-of-life deconstruction of a given project. Major risks include those related to assurance of road safety, provision of high-quality services in accordance with current regulations, project management, as well as maintaining good performance, reputation and environmental protection. Obviously, identification of risks requires collection of information on their potential sources. Important information may include: geological survey results, weather forecasts, labor and material cost analyses, data on road traffic safety and historical results of financial audits (e.g. extra costs resulting from past delays in project realization, with breakdown including individual project phases and causes of delays).

W ujęciu praktycznym zarządzanie bezpieczeństwem infrastruktury drogowej odnosi się do zestawu procedur wspierających zarządców dróg w podejmowaniu decyzji związanych z poprawą bezpieczeństwa sieci drogowej. Najczęściej przytaczane są następujące procedury: *Road Safety Impact Assessment* (RIA), *Efficiency Assessment Tools* (EAT), *Road Safety Audit* (RSA), *Network Operation* (NO), *Road Infrastructure Safety Performance Indicators* (SPI), *Network Safety Ranking* (NSR), *Road Assessment Programs* (RAP), *Road Safety Inspection* (RSI) oraz *High Risk Sites* (HRS). Niektóre z nich mają charakter reaktywny, co oznacza, że mogą zostać zastosowane w odniesieniu do infrastruktury już istniejącej. Inne służą natomiast podejmowaniu działań na wczesnych etapach realizacji inwestycji, pozwalają więc na przyjęcie podejścia proaktywnego. Wyniki badań przeprowadzone wśród członków grupy IRTAD (International Traffic Safety Data and Analysis Group) wskazują, że 68% krajów posiada wdrożoną procedurę HRS, 64% stosuje regulacje RSI, a 59% i 55% – odpowiednio procedury RSA oraz RIA [21].

4. ANALIZA I KONTROLA KOSZTÓW CYKLU ŻYCIA DROGI

W literaturze przedmiotu dobrze znane jest powiedzenie, że jeśli jakieś działanie nie może zostać zmierzone, to nie może być też właściwie zarządzane [22]. Stąd też, zarówno w teorii, jak i w praktyce, istnieje wiele metod analizy i kontroli kosztów. Analiza LCCA stanowi obecnie jedną ze skuteczniejszych metod wykorzystywanych do oceny efektywności zarządzania infrastrukturą drogową. Jej zakres przedmiotowy obejmuje wszystkie istotne czynniki ekonomiczne związane zarówno z kosztami początkowymi danego przedsięwzięcia, jak i jego dalszej eksploatacji. Federalna Agencja Autostrad USA (Federal Highway Administration) definiuje LCCA jako proces oceny całkowitej wartości ekonomicznej ukończonego odcinka inwestycji drogowej, a więc takiego, który może zostać oddany do użytkowania niezależnie od prac prowadzonych na innych odcinkach. Zakres oceny obejmuje analizę kosztów początkowych oraz zdyskontowanych przyszłych kosztów, takich jak koszty utrzymania, odbudowy i odnawiania nawierzchni drogowej, czy koszty napraw przywracających parametry wyjściowe w cyklu życia [23]. Stowarzyszenie Producentów Cementu definiuje natomiast LCCA jako technikę analizy ekonomicznej, która wykorzystywana jest do oceny długoterminowej ekonomicznej efektywności konkurencyjnych, alternatywnych możliwości inwestycyjnych [24]. Warto nadmienić, że największe korzyści z tytułu LCCA osiąga się, gdy jest ona przeprowadzana na stosunkowo wczesnym etapie procesu projektowania, a więc wtedy, gdy istnieje jeszcze możliwość wprowadzenia zmian skutkujących redukcją kosztów cyklu życia [25, 26].

In practical terms, road infrastructure safety management is based on a set of procedures that support road administrators in making decisions that improve road safety. The most frequently mentioned procedures include: Road Safety Impact Assessment (RIA), Efficiency Assessment Tools (EAT), Road Safety Audit (RSA), Network Operation (NO), Road Infrastructure Safety Performance Indicators (SPI), Network Safety Ranking (NSR), Road Assessment Programs (RAP), Road Safety Inspection (RSI) and High Risk Sites (HRS). Some procedures are reactive, which means they can be applied to existing infrastructure. Other procedures are intended for use at the early stages of a project and enable proactive approach. Surveys performed among the members of the International Traffic Safety Data and Analysis Group (IRTAD) indicate that 68% of countries have implemented the HRS procedure, 64% use RSI regulations, while 59% and 55% use RSA and RIA procedures, respectively [21].

4. ANALYSIS AND CONTROL OF ROAD LIFE CYCLE COSTS

A saying that is often quoted in the literature states that if a given action cannot be measured, it cannot be adequately managed [22]. Therefore, there are numerous theoretical and practical methods for cost analysis and control. The LCCA analysis is currently one of the most effective methods for assessment of road infrastructure management effectiveness, encompassing all the important economic factors related both to the initial costs and further service of the structure. The American Federal Highway Administration defines LCCA as a process of evaluation of the total economic value of a finished road section – i.e. a section that may be opened to traffic regardless of the ongoing works on other sections. The evaluation encompasses analysis of initial costs and discounted future costs such as maintenance, reconstruction, rehabilitation or repairs that restore the initial pavement parameters [23]. The Polish Association of Cement Producers defines LCCA as an economic analysis technique used for assessment of long-term economic effectiveness of mutually exclusive investment possibilities [24]. It is noteworthy that the greatest benefits of LCCA are obtained when the analysis is performed relatively early in the design process, when it is still possible to introduce modifications resulting in reduction of life cycle costs [25, 26].

W założeniach koncepcyjnych analizy LCCA wyróżnia się dwie główne kategorie kosztów, a mianowicie: koszty użytkowników dróg oraz koszty zarządców. Koszty użytkowników obejmują zarówno straty wynikające z opóźnień, jak i koszty eksploatacji pojazdów oraz koszty wypadków drogowych. Warto zauważyć, że na co dzień prowadzonymi pracami drogowymi towarzyszą różnego rodzaju utrudnienia w ruchu, takie jak zężenie jednostronne, ruch wahadłowy oraz ograniczenie prędkości, co także bezpośrednio wpływa na koszty użytkowników. Drugą kategorię stanowią koszty zarządców, do których zalicza się: (a) koszty kapitałowe ponoszone we wczesnych etapach realizacji inwestycji, w tym m.in. koszty projektowe; (b) koszty utrzymania infrastruktury w należytym stanie, które obejmują wszystkie wydatki ponoszone na rzecz wydłużenia jej cyklu życia, przy zapewnieniu odpowiednich parametrów techniczno-eksploatacyjnych, zgodnych ze standardem obowiązującym dla danej klasy drogi; (c) koszty związane z konserwacją drogi, która w praktyce ma charakter działań prewencyjnych. Do kosztów zarządzania infrastrukturą drogową zalicza się także koszty odtworzeniowe, w przypadku których pod uwagę bierze się wydatki rehabilitacyjne ponoszone na rzecz przywrócenia infrastrukturze drogowej jej stanu wyjściowego. Koszty te cechuje wysoki udział w łącznych kosztach całego cyklu życia danego projektu drogowego. Należy mieć na uwadze, że wraz ze starzeniem się majątku koszty jego utrzymania zazwyczaj gwałtownie wzrastają [27, 28]. W tej kwestii warto przytoczyć wyniki badań Dąbrowskiego, dotyczących zabiegów utrzymaniowych uszczelniających nawierzchnie asfaltowe. W opinii autora, zgodnie z zasadą Pareto, około 20% nawierzchni drogowych, w przypadku których będzie następować przyspieszony proces degradacji, będzie odpowiadało za około 80% wszystkich kosztów utrzymaniowych [29].

Obliczenia prowadzone w ramach LCCA opierają się na metodzie szacowania efektywności kosztowej z zastosowaniem metody NPV (Net Present Value), oznaczającej zaktualizowaną (bieżącą) wartość netto [30, 31]. Ważną część analizy stanowią kalkulacje związane z określeniem wartości rezydualnej rozpatrywanych rozwiązań, które wykonywane są dla ostatniego roku analizy. W ujęciu ekonomicznym, wartość rezydualna informuje o zdolności do generowania przyszłych przychodów netto przez środki trwałe, których użyteczność ekonomiczna nie została jeszcze zupełnie wyczerpana. Wyjątek stanowi tu sytuacja, w której horyzont czasowy uwzględniony w LCCA będzie równy okresowi życia majątku drogowego – w takim przypadku wartość rezydualna wyniesie zero lub będzie nieznacząca [32].

W analizie LCCA stosuje się zarówno podejście deterministyczne, jak i probabilistyczne. W pierwszym przypadku LCCA wymaga przyjęcia z góry określonych, sztywnych

The LCCA concept distinguishes two primary cost categories, i.e. road user costs and road agency costs. User costs include vehicle operation costs, road accident costs, as well as costs resulting from delays. One should bear in mind that ongoing road works engender various traffic disruptions, including road narrowing, temporary alternating traffic and speed reductions, directly affecting road user costs. The other category, road agency costs, includes: (a) capital expenditures at the early stages of the project, including design costs; (b) costs of maintenance, encompassing all expenditures that extend the life cycle and provide technical-functional parameters adequate to the requirements for the given road class; (c) costs of ongoing conservation measures, whose character is practically preventive. Road infrastructure management costs include restoration costs, such as rehabilitation expenditures made in order to restore road infrastructure to its initial condition. They are characterized by their high share in the overall life cycle costs of a given road project. One should bear in mind that usually maintenance costs increase rapidly as the assets age [27, 28]. Research by Dąbrowski on maintenance measures consisting in asphalt pavement sealing is worth mentioning in this context. According to Dąbrowski, the Pareto principle is valid in this case – about 20% of road pavements will generate about 80% of maintenance costs [29].

Calculations performed in LCCA are based on the cost-effectiveness evaluation method using Net Present Value (NPV), which represents the updated (current) net value [30, 31]. An important part of the analysis consists in calculation of the residual value of the analyzed solutions in the last year of the analyzed period. In economic context, residual value represents the ability of an asset (whose economic usability has not yet been depleted) to generate future net revenue. An exception is the situation in which the period encompassed by LCCA is equal to the life of the asset – then the residual value will be zero or negligible [32].

LCCA analyses use both deterministic and probabilistic approaches. In the case of deterministic approach, LCCA requires adoption of predetermined fixed assumptions and the so-called input variables, also referred to as discrete values. Probabilistic approach is more time-consuming and requires broader analysis, incorporating the elements of uncertainty and risk as well [33]. The effects of uncertainty and risk on life cycle costs are studied using various quantitative methods; however, computer simulation tools that enable modeling of various scenarios and their probability are the most popular [34].

założeń oraz tzw. zmiennych wejściowych, określanych również mianem wartości dyskretnych. Podejście probabilistyczne jest bardziej czasochłonne, wymaga szerszej i bardziej pogłębionej analizy uwzględniającej również elementy związane z niepewnością i ryzykiem [33]. Wpływ niepewności i ryzyka na koszty cyklu życia projektu drogowego bada się z pomocą różnych metod ilościowych, jednak najczęściej wykorzystuje się narzędzia symulacji komputerowej pozwalające na modelowanie różnych scenariuszy zdarzeń oraz przewidywanie prawdopodobieństwa ich wystąpienia [34].

Wśród różnych wersji LCCA warto wskazać na model hybrydowy, łączący metodę oceny efektywności ekonomicznej z oceną środowiskową (LCA). W praktyce stosuje się również metodę LCCA mającą na celu optymalizację korzyści przy ograniczonych zasobach, a także metodę probabilistyczną z zasadami rachunku optymalizacyjnego, która uwzględni niepewność parametrów wejściowych. Praktyczne zastosowanie LCCA, jak podkreślają Moins i in., zależy jednak od wielu czynników, m.in. od dostępności danych drogowych, wyników analiz stopnia degradacji nawierzchni dróg (do prognozowania dalszych zmian) oraz znajomości wytycznych dotyczących samej metody szacowania kosztów [35].

5. PRZYKŁADY LCCA

Metoda LCCA stanowi cenne narzędzie dla badaczy i praktyków zajmujących się oceną efektywności ekonomicznej przedsięwzięć drogowych. W literaturze zagranicznej można znaleźć bogatą egzemplifikację sposobów jej wykorzystania w ekonomice budownictwa drogowego. Badacze Batouli i in. przedstawiają przykład analizy kosztów cyklu życia wykonanej na potrzeby wyboru odpowiedniej strategii projektowania nawierzchni drogi ekspresowej SR 836-Southwest w Miami na Florydzie z udziałem ruchu pojazdów ciężkich wynoszącym 3% oraz prędkością dopuszczalną 70 mph (112 km/h) [36].

Inwestycja dotyczyła dwujezdniowego odcinka drogi (po dwa pasy w każdym kierunku). Szerokość pasów ruchu wynosiła po 3,65 m, poboczy wewnętrznych po 2,5 m, zaś poboczy zewnętrznych – 3,65 m. W ramach badania analizie poddano trzy typy nawierzchni, tj.: (1) nawierzchnię podatną opartą na podłożu „Florida Department of Transportation (FDOT) Flexible Pavement Design Manual” do projektowania nawierzchni podatnych z mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA), składającą się z warstwy wiążącej o grubości 10 cm i warstwy ścieralnej grubości 2 cm; (2) nawierzchnię sztywną wykonaną w technologii płyt betonowych (JPCP), opartą na podłożu „FDOT Rigid Pavement”, o grubości nawierzchni wynoszącej 28 cm; (3) nawierzchnię sztywną o grubości 24 cm opartą na podłożu „American Concrete Pavement

Among different versions of LCCA, the hybrid model is worth mentioning, as it combines economic effectiveness evaluation with environmental evaluation (LCA). LCCA versions used in practice also include the LLCA method for benefit optimization with limited resources and the probabilistic method with optimization incorporating the uncertainty of input parameters. As stressed by Moins et al., practical application of LCCA is affected by multiple factors, including availability of road data, results of analyses of pavement degradation (for prediction of further changes) and knowledge of guidelines regarding the cost estimation method itself [35].

5. EXAMPLES OF LCCA

The LCCA method is a valuable tool for researchers and engineers dealing with evaluation of economic effectiveness of road projects. International literature presents a wide range of examples of usage of LCCA in road engineering economics. Batouli et al. present an example life cycle cost analysis performed in order to support selection of the proper pavement design strategy for the SR 836-Southwest Extension Project in Miami, Florida, with 3% share of heavy traffic and 70 mph (112 km/h) speed limit [36].

The project was a four-lane divided roadway, with four 12-ft lanes (two in each direction), two 8-ft inside shoulders and two 12-ft outside shoulders. The analysis encompassed three pavement types: (1) flexible pavement based on the “Florida Department of Transportation (FDOT) Flexible Pavement Design Manual”, consisting of 10-cm binder course and 2-cm wearing course; (2) a 28-cm-thick JPCP rigid pavement based on the “FDOT Rigid Pavement Manual”; (3) a 24-cm-thick rigid pavement based on the “American Concrete Pavement Association (ACPA) Manual” and the “StreetPave” design software.

The research included road user costs as well as road agency costs (with pavement life costs). A 50-year analysis period was adopted, to include at least one full life cycle of each pavement variant. The research pertained to interesting source data that stressed the significant cost differences between the compared variants. It was shown that the calculated costs were affected by the adopted project analysis period. For a 20-year period, the results indicated that the most beneficial variant was the flexible asphalt pavement, characterized by the lowest initial construction costs (and the highest ratio of the initial construction costs to the total cost). They proved to be lower by 48% and 45% than those of the FDOT and ACPA variants,

Association (ACPA)” oraz programie do projektowania „street-Pave”.

W badaniu wzięto pod uwagę koszty zarządcy, w tym koszty cyklu eksploatacji nawierzchni, jak również koszty użytkowników. Do analizy przyjęto 50-letni okres obejmujący co najmniej jeden pełny cykl życia wszystkich wariantów nawierzchni. Badania dostarczyły ciekawego materiału źródłowego, akcentującego istotne różnice kosztowe porównywanych wariantów. Czynnikiem wpływającym na zmianę kosztów okazał się okres trwania inwestycji przyjęty do analizy. Wyniki dla 20-letniego horyzontu czasowego wskazują, że najkorzystniejszym wariantem realizacji rozpatrywanej inwestycji okazała się nawierzchnia podatna MMA, którą cechują najniższe koszty pierwotnej budowy, mające jednocześnie najwyższy udział w kosztach całkowitych. W porównaniu do wariantu FDOT są one niższe o 48%, a wariantu ACPA – o 45%. Rozwiązanie to nie jest jednak korzystne dla cyklu 50-letniego [36].

Podobne wnioski można sformułować na podstawie wyników analizy kosztów cyklu życia dla inwestycji związanej z przebudową nawierzchni autostrady w Portland w Colorado [37]. Realizowana inwestycja składa się z czterech pasów ruchu w każdym kierunku jazdy oraz z poboczy. Badaniu poddano dwa typy nawierzchni, tj. (1) nawierzchnię podatną składającą się z pakietu warstw asfaltowych (MMA) o grubości 20,3 cm na podbudowie z kruszywa o grubości 15,2 cm oraz gruncie nasypu poniżej podbudowy o grubości 61 cm, (2) nawierzchnię z betonu cementowego (PCC), składającą się z warstwy PCC o grubości 33 cm na podbudowie z kruszywa o grubości 15,2 cm oraz gruncie nasypu poniżej podbudowy o grubości 61 cm, z klasyfikacją minimum AASHTO A-1. Przyjęto projektowe obciążenia jednoosiowe wynoszące 81 kN. W tym przypadku założono 40-letni okres analizy, chociaż – podobnie jak wcześniej – rozpatrywano również wysokość kosztów w 20-letnim okresie dla MMA i 30-letnim dla PCC.

Z badań wynika, że 20-letni horyzont czasowy cechują znaczne różnice w wysokości kosztów dla obu analizowanych typów nawierzchni. Z ekonomicznego punktu widzenia rozwiązaniem korzystniejszym okazała się nawierzchnia z MMA, której koszty cyklu życia okazały się niższe o 7,4% w porównaniu do drugiego rozwiązania. Badania LCCA uzupełniono badaniami środowiskowymi typu LCA. Wykazano, iż nawierzchnia PCC, w porównaniu do konstrukcji MMA, cechuje się: wyższą efektywnością środowiskową w fazie użytkowania, wyższą odpornością na uszkodzenia, o 26% niższą emisją gazów cieplarnianych, a także niższymi kosztami użytkowników. Fakt ten bezpośrednio przekłada się na całkowite rzeczywiste koszty cyklu życia obejmującego 40 lat, uzasadniając przewagę badanego rozwiązania nawierzchni z betonu cementowego [37].

respectively. However, this variant was not the most advantageous for a 50-year cycle [36].

Similar conclusions may be drawn from the results of life cycle analysis performed for highway pavement reconstruction in Portland, Colorado [37]. The roadway section included four traffic lanes in each direction, plus shoulders. Two pavement types were analyzed: (1) flexible pavement with the total thickness of asphalt courses amounting to 20.3 cm, placed on a 15.2-cm-thick aggregate base and 61 cm of embankment fill material; (2) rigid pavement comprising of 33-cm Portland cement concrete (PCC) slab over a 15.2-cm-thick aggregate base and 61 cm of embankment fill material, with minimum A-1 group in the AASHTO classification. The design loads equaled 81 kN per axle. In this case, a 40-year analysis period was adopted; however, 20-year costs for the asphalt pavement and 30-year costs for the PCC pavement were also taken into consideration.

The research indicated that a 20-year analysis period yielded only slight differences in the costs of the two analyzed pavement types. From economic point of view, the asphalt pavement proved more beneficial, as its life cycle costs were lower by 7.4%. The LCCA analysis was supplemented by an LCA environmental analysis. It was demonstrated that the PCC pavement displayed the following advantages over the asphalt pavement: higher environmental effectivity during service, greater resistance to damage, greenhouse gas emissions lower by 26%, lower road user costs. This fact directly affected the actual total costs in the 40-year life cycle, substantiating the advantage of the analyzed PCC pavement [37].

Use of LCAA for comparison of different variants of road pavement reconstruction measures was presented by Riekstins et al. [38]. The aim of the research was to evaluate the possibility of use of various types of asphalt mixtures for very thin layers (BBTM) and compare them with standard pavements, based on the case of P5 Ulbroka-Orage road in Latvia. A 3% share of heavy vehicle traffic was assumed, like in the example discussed previously. Three material solutions of the wearing course were selected for the analysis: SMA11 – 3.5 cm (stone mastic asphalt), BBTM11 – 2.5 cm (asphalt mixture for very thin layers) and AC11 – 4 cm (asphalt concrete), as reference. The first three pavement variants included 6-cm-thick AC22 binder course; other three variants included an alternative 5-cm binder course of high-modulus asphalt concrete (HMAC). The analysis encompassed 40 years of service. The results indicate that the most economically substantiated solution is the

Wykorzystanie LCCA do porównania różnych wariantów remontu drogi obejmującego zmianę konstrukcji nawierzchni przedstawili badacze Riekstins i in. [38]. Badanie miało na celu ocenę możliwości stosowania różnych rodzajów mieszanek mineralno-asfaltowych do bardzo cienkich warstw (BBTM) i porównanie ich z konstrukcjami standardowymi na przykładzie drogi P5 Ulbroka-Orage na Łotwie. Podobnie jak w pierwszym analizowanym przypadku, przyjęto udział pojazdów ciężkich wynoszący 3%. Do analizy wybrano trzy następujące rozwiązania materiałowe warstwy ścieralnej: SMA11 – 3,5 cm (mieszanke mastykowo-grysową), BBTM11 – 2,5 cm (mieszanke mineralno-asfaltową do bardzo cienkich warstw) i porównawczo AC11 – 4 cm (beton asfaltowy). W pierwszych trzech wariantach zastosowano warstwę wiążącą typu AC22 o grubości układanej wynoszącej 6 cm, w kolejnych trzech przypadkach użyto natomiast rozwiązania alternatywnego typu AC WMS, tj. betonu asfaltowego o wysokim module sztywności, o grubości 5 cm. Analizą objęto 40-letni okres eksploatacji rozpatrywanych nawierzchni. Wyniki badań wskazują, że najbardziej ekonomicznym rozwiązaniem jest opcja składająca się z warstwy ścieralnej BBTM11 i warstwy wiążącej AC22, której łączne koszty cyklu życia okazały się o 13% niższe od kosztów drugiej w kolejności konstrukcji – składającej się z warstwy ścieralnej BBTM11 oraz warstwy wiążącej AC WMS [38].

Kolejny przykład wykorzystania LCCA w projektach drogowych może stanowić praca Hasana i in., poświęcona analizie kosztów cyklu życia nawierzchni asfaltowych pochodzących z recyklingu [39]. Należy podkreślić, że rosnące zapotrzebowanie na infrastrukturę drogową oraz większa wrażliwość na problemy środowiskowe odpowiadają za wzrost popytu na materiały wtórne w budownictwie drogowym. Działania takie wynikają również z ograniczeń budżetowych. Analizowane badanie opierało się na studium przypadku w zakresie oceny rzeczywistych kosztów robót drogowych wykonywanych na odcinku 3,5 km autostrady E10 w Abu Zabi (Zjednoczone Emiraty Arabskie). W swoich badaniach autorzy skupili się na dwóch problemach, tj. kosztach początkowej budowy nawierzchni i kosztach zarządzania cyklem życia aktywów w 30-letnim horyzoncie czasowym. Dla celów porównawczych przeprowadzono analizę kosztów robót drogowych w przypadku użycia materiałów pozyskanych z rynku pierwotnego, którą następnie zestawiono z kosztami robót realizowanych z użyciem materiałów pochodzących z recyklingu. Rozwiązanie projektowe drogi w przekroju poprzecznym składa się z podłoża niewysadzinowego, podbudowy tłuczniowej, podbudowy z mieszanki mineralno-asfaltowej, warstwy wiążącej oraz warstwy ścieralnej (składających się w analizowanych wariantach z MMA zawierających destrukta asfaltowy

option incorporating a BBTM11 wearing course and an AC22 binder course, whose total life cycle costs were lower by 13% than those of the second-best solution – with a BBTM11 wearing course and a HMAC binder course [38].

Another example of LCCA in road projects is the work by Hasan et al., devoted to life cycle cost analysis of recycled asphalt pavements [39]. The growing need for road infrastructure and greater sensibility to environmental problems result in an increased demand for recycled materials in road engineering. This tendency is also due to budget constraints. The discussed research was based on a case study encompassing evaluation of real costs of roadworks on a 3.5-km section of the E10 highway in Abu Dhabi (United Arab Emirates). The authors focused on two problems, i.e.: the initial pavement construction costs and the life cycle asset management costs in a 30-year period. For the sake of comparison, costs were analyzed for a variant incorporating only virgin materials and alternative variants incorporating recycled materials. Pavement structure comprised of subgrade, aggregate base course, asphalt base course, asphalt binder course and asphalt wearing course (incorporating various percentages of RAP in the analyzed variants). The width of the highway, including two lanes in each direction and two shoulders, equals 13.3 m. The base variant, incorporating virgin materials and traditional asphalt mixtures, served as reference for comparisons with the alternative pavement solutions in which chosen courses included 10% to 25% of reclaimed asphalt pavement (RAP) in the asphalt mixtures. After preliminary studies, the selected optimum material variant was compared with the base variant. The authors noted significant differences in the environmental impact of the compared cases, in favor of the optimum variant. The differences included: land use, energy consumption, ozone depletion, ionizing radiation, particulate matter generation and global warming potential. A 16% reduction in the life cycle costs was noted for the variant with recycled material (in comparison to the base variant). In the analyzed case, the greatest savings due to the use of RAP were possible in the group of maintenance and rehabilitation costs [39].

Polish research works on LCCA used in local case studies are scarce. A detailed presentation of such results was provided by Król and Kowalski in their work devoted to comparative analysis of construction and service costs of an express road with flexible (asphalt) and rigid (PCC) pavement variants [40]. The authors compared the costs of the analyzed project for two chosen locations, i.e.

w różnych proporcjach). Szerokość autostrady, obejmującej dwa pasy ruchu w każdym kierunku oraz dwa pobocza, wynosi 13,3 m. Wariant bazowy oparty na materiałach pierwotnych i tradycyjnej mieszance asfaltowej do robót nawierzchniowych stanowił punkt odniesienia dla porównań z alternatywnymi konstrukcjami, w których zastosowano mieszanki asfaltowe o zawartości 10%-25% RAP (ang. *Reclaimed Asphalt Pavement*). Optymalny scenariusz materiałowy wytypowany po wstępnych badaniach został poddany analizie porównawczej z przypadkiem podstawowym. Autorzy odnotowali znaczące różnice między oddziaływaniami środowiskowymi porównywanych przypadków na korzyść wariantu optymalnego w zakresie: użytkowania gruntów, zużycia energii, zubożenia warstwy ozonowej, promieniowania jonizującego, tworzenia cząstek stałych i potencjału globalnego ocieplenia. Odnotowano także redukcję o 16% kosztów cyklu życia inwestycji realizowanej przy wykorzystaniu materiałów odpadowych (względem wariantu podstawowego). Jak się okazało, w analizowanym przypadku największe oszczędności z tytułu stosowania recyklingu można było uzyskać w grupie kosztów obejmujących zabiegi utrzymaniowe i naprawy [39].

Znane są nieliczne opracowania dotyczące analiz LCCA przeprowadzonych na gruncie krajowym. Szczegółowe wyniki badań w tym zakresie przedstawili Król i Kowalski w pracy poświęconej analizie porównawczej kosztów budowy i eksploatacji drogi ekspresowej w technologii asfaltowej i betonowej [40]. W ramach przeprowadzonych badań autorzy dokonali zestawienia kosztów analizowanej inwestycji dla dwóch wybranych lokalizacji drogi, tj. Częstochowa/Jędrzejów oraz Białystok, z uwzględnieniem wariantu bezinwestycyjnego oraz dwóch wariantów inwestycyjnych, odnoszących się odpowiednio do wariantu „asfaltowego” i „cementowego”. W każdym wariancie rozpatrywano dwa scenariusze utrzymaniowe, opisujące zmiany stanu nawierzchni w trakcie eksploatacji. Analizą objęto 30-letni horyzont czasowy kilometrowego odcinka drogi dwujezdniowej obsługującej ruch gospodarczy z dopuszczalnym obciążeniem osi pojedynczej wynoszącym 115 kN. Zakres prowadzonych badań był szeroki i obejmował analizy wszystkich najważniejszych kategorii kosztów, tj.: nakładów drogowo-mostowych, kosztów eksploatacji pojazdów, kosztów czasu w przewozach pasażerskich i towarowych, kosztów wypadków drogowych oraz kosztów środowiskowych. Przeprowadzono również analizę efektywności ekonomicznej, obejmującą trzy główne wskaźniki finansowe: ekonomiczną wartość bieżącą netto (ENPV), wskaźnik korzyści-koszty (BCR) oraz ekonomiczną wewnętrzną stopę zwrotu (EIRR).

Wyniki badań wykazały, że preferowany wariant inwestycyjny stanowi projekt wykonany w technologii asfaltowej, niezależnie od rozpatrywanej lokalizacji drogi oraz scenariusza

Częstochowa/Jędrzejów and Białystok, including a no-investment variant and two investment variants, pertaining to the flexible and rigid pavement. Each variant encompassed analysis of two maintenance scenarios, describing the changes in pavement condition during service. The analysis was performed for a 30-year period on a 1-km-long dual carriageway road section designed for the maximum single axle load of 115 kN. The scope of the study was broad, encompassing analyses of the major cost categories: road-bridge expenditures, vehicle operation costs, value of travel time in passenger and freight transportation, road accident costs and environmental costs. Economic effectiveness was also analyzed, using three primary financial indicators: economic net present value (ENPV), benefit-cost ratio (BCR) and the economic internal rate of return (EIRR).

The results indicated that the asphalt road structure was the preferred investment variant, regardless of the analyzed location and maintenance scenario. In comparison with the Portland cement concrete structure variant, asphalt structure demonstrated more advantageous values of BCR, ENPV and EIRR [40].

Kaleta and Macheta presented the results of comparative analysis of various types of life cycle costs estimated for a bridge structure carrying the 1141R county road over the Ryjak river in Białystok [33]. This case study was selected due to the fact that, apart from typical elements of linear infrastructure, it encompassed other structures as well, including bridges with a high share in the value of the entire project.

The analyzed structure was the first Polish FRP composite bridge with light concrete deck slab. Three variants were analyzed, differing mainly in the composition of the span superstructure. The following options were taken into consideration: (1) FRP composite beams fixed to light concrete slab reinforced with FRP bars; (2) span of prefabricated reinforced concrete “T-beams” with deck slab of steel-reinforced concrete; (3) span structure with steel girders fixed to steel-reinforced concrete deck. Life of the structure was assumed as 75 years, with rehabilitation works performed every 15 years. Maintenance strategies differed depending on the structure variant. The analysis encompassed three categories of costs, divided according to the “payer”: agency costs (including construction, ongoing maintenance and rehabilitation), user costs (including vehicle operation, extra fuel consumption, road accidents) and social costs (emission of toxic combustion gases and noise). The analysis also included

utrzymaniowego. W porównaniu z technologią betonu cementowego, wariant ten charakteryzuje się korzystniejszym stosunkiem kosztów do korzyści (BCR) oraz wyższymi wartościami wskaźników ENPV i EIRR [40].

Kaleta i Macheta przedstawili wyniki analizy porównawczej różnych rodzajów kosztów cyklu życia oszacowanych dla obiektu mostowego w ciągu drogi powiatowej nr 1141R w miejscowości Błazowa nad rzeką Ryjak [33]. Studium przypadku zostało wytypowane z uwagi na fakt, że w zakres inwestycji drogowych, oprócz podstawowych elementów infrastruktury liniowej, weszły także inne obiekty inżynieryjne, w tym mosty, charakteryzujące się szczególnie wysokim udziałem procentowym w wartości całego zadania.

Analizowany most był pierwszym w Polsce obiektem o dźwigarce z kompozytów włóknistych o osłonie polimerowej (FRP, ang. *fiber-reinforced polymer*) i płycie z betonu lekkiego zbrojonego prętami FRP. Analizie poddano trzy warianty, które różniły się głównie budową ustroju nośnego przęsła mostu. Rozpatrywano: (1) wariant dźwigara kompozytowego FRP zespolonego z płytą pomostu z betonu lekkiego zbrojonego prętami FRP, (2) obiekt o konstrukcji przęsła z belek prefabrykowanych typu „T” z żelbetową płytą pomostu oraz (3) wariant opierający się na wykorzystaniu konstrukcji przęsła z belek stalowych zespolonych z żelbetową płytą pomostu. Trwałość obiektu przewidziano na 75 lat, z wykonywaniem prac remontowych co 15 lat. Strategie utrzymaniowe obiektu były zróżnicowane dla każdego z rozpatrywanych wariantów. Analizie poddano trzy kategorie kosztów, określonych mianem kosztów „płatnika”, tj. koszty inwestora (m.in. koszty budowy, bieżącego utrzymania i przebudowy), koszty użytkowników (m.in. koszty eksploatacji pojazdów, dodatkowego zużycia paliwa, wypadków drogowych) i koszty społeczne (koszty emisji toksycznych składników spalin i hałasu drogowego), a także trzy fazy cyklu życia: budowy mostu, jego utrzymania/administrowania oraz rozbiorczy [33].

Wyniki analiz kosztowych zostały przedstawione w trzech ujęciach, tj. ogółem dla całego cyklu życia, z uwzględnieniem głównych jego faz, a także w podziale według kosztów płatnika. W kontekście całkowitego czasu trwania cyklu życia, inwestycją najkorzystniejszą okazał się wariant związany z budową mostu kompozytowego. Mimo iż cechują go najwyższe koszty budowy oraz koszty występujące po stronie inwestora, całkowite koszty cyklu jego życia okazały się najniższe w porównaniu do wariantów alternatywnych. Okazuje się, że największe oszczędności z tytułu budowy mostu kompozytowego można uzyskać w grupie kosztów obejmujących koszty jego utrzymania oraz koszty ponoszone przez użytkowników drogi [33].

division by life cycle phases: construction, maintenance/administration and demolition [33].

The cost analyses were presented in three perspectives, i.e.: for the entire life cycle in general, according to life cycle phases and according to the payer. In terms of the entire life cycle costs, the FRP composite variant proved the most advantageous. Despite the fact that its construction costs and agency costs were the highest, the total life cycle costs proved lower than those of the other solutions. In terms of individual cost categories, it was demonstrated that the greatest savings due to the selection of the FRP composite bridge were possible in the group of maintenance costs and road user costs [33].

6. SUMMARY AND CONCLUSIONS

1. In the authors' opinion, road infrastructure management, especially in long-term perspective, still poses a considerable challenge for road engineers. Other researchers, including Molinari et al., point out that many countries still lack a long-term vision for road infrastructure management and guidelines to support its development [41].
2. Actions related to road infrastructure management should be taken within the individual life cycles of the structures. When decisions are made regarding the choice of investment variant, up-to-date and reliable economic studies are of key importance.
3. The literature review proves that the LCCA method may be used in practice to support the efforts of road infrastructure administrators. Mikołaj and Remek point out that LCCA is an integral part of road network management system, enabling the agencies to concentrate on road sections with the highest repair priority [42].
4. The LCCA method may be used for various purposes – both during analyses of ongoing road maintenance measures and in situations when the considered actions are supposed to increase the standard of the road to a level that cannot be provided by routine maintenance actions. LCCA requires implementation of advanced data analytics, encompassing the life cycle costs starting from the conception-design phase and ending with disposal, including the breakdown into costs generated in successive phases and during particular actions [14].
5. The studies suggest that the primary benefits of LCCA are associated with practical aspects of cost-effectiveness assessment of the compared project variants; this should result in selection of the variant with the lowest

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. W ocenie autorów niniejszego artykułu zarządzanie infrastrukturą drogową, zwłaszcza w długim horyzoncie czasowym, nadal stanowi duże wyzwanie dla środowiska drogowców. Inni badacze, np. Molinari i in., zwracają uwagę, że w wielu krajach w dalszym ciągu brakuje długoterminowej wizji zarządzania infrastrukturą drogową oraz wytycznych wspierających jej rozwój [41].
2. Działania związane z zarządzaniem infrastrukturą drogową powinny być podejmowane w ramach indywidualnych cykli życia obiektów. Z kolei podczas podejmowania decyzji dotyczących wyboru konkretnego wariantu inwestycyjnego kluczową rolę powinny odgrywać aktualne i wiarygodne wyniki badań ekonomicznych.
3. Analiza literatury przedmiotu dowodzi, że metoda LCCA może być wykorzystywana w praktyce jako narzędzie wspierające działania zarządców infrastruktury drogowej. Mikolaj i Remek wskazują, że stanowi ona integralną część systemu zarządzania siecią drogową, co powoduje, że uwaga zarządców koncentruje się na odcinkach dróg o najwyższym priorytecie naprawczym [42].
4. Metoda LCCA może być wykorzystywana do różnych celów – zarówno podczas poddawania drogi zabiegom utrzymaniowym, jak i wtedy, gdy podejmowane działania mają na celu podwyższenie jej standardu do poziomu, którego nie mogą zapewnić rutynowe czynności. LCCA wymaga prowadzenia zaawansowanej analityki danych, w której badane są koszty ponoszone w całym cyklu, począwszy od fazy koncepcyjno-projektowej, a skończywszy na etapie likwidacji, z podziałem na wydatki generowanych w kolejnych fazach i w trakcie wykonywania poszczególnych czynności [14].
5. Przeprowadzone badania sugerują, że główne korzyści wynikające z użycia LCCA związane są z praktycznymi aspektami oceny efektywności kosztowej porównywanych wariantów inwestycji. Powinno to stanowić podstawę wyboru wariantu z najniższym łącznym kosztem cyklu życia. LCCA należałoby przeprowadzić dla długiego horyzontu czasowego w fazie przygotowawczej (projektowania), aby umożliwić określenie alternatywnych ścieżek rozwoju oraz wdrożenie działań sprzyjających optymalizacji kosztów. Wyniki wskazują, że zakres czasowy analizy LCCA powinien mieścić się w granicach 40-50 lat dla inwestycji drogowych oraz 75 lat dla inwestycji mostowych, czyli najczęściej – wynosić więcej niż jeden pełny cykl życia rozpatrywanych obiektów.
6. W przypadku stosowania różnych technologii wykonywania nawierzchni drogowych, ważną rolę odgrywa ich

total life cycle cost. In order to enable determination of alternative development schemes and implementation of actions supporting cost optimization, a long-term LCCA analysis should be performed at the preparatory (design) stage of the project. The results indicate that the time period taken into account in LCCA should be about 40-50 years for road projects and about 75 years for bridge projects. In most cases, the analyzed period should exceed one full life cycle of the analyzed structure.

6. When various road construction technologies are used, it is important to consider their susceptibility to aging, which logically affects the service and maintenance scenarios in the life cycle. Frequency of maintenance works becomes crucial to provision of continuous functionality of pavement during the service phase. However, differences in the adopted intervals between the planned rehabilitation works may result from varying initial assumptions.
7. The need for unified research methodology becomes an increasingly important issue. In the case of LCCA, there is no universally accepted scheme that would standardize the assumptions of the method, especially the input data and analysis periods, which greatly affect the ultimate result of the analysis.
8. Based on the above observations, a conclusion may be formulated that the LCCA analysis results should influence practical actions taken by the road administrators and serve as an important criterion in road infrastructure cost management. However, this will be truly possible only when the applied methodology provides objective conditions for comparisons of different solution variants.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work presents the results of research that was partially realized under the research project “Optimization of investments in terms of adaptation of the national road network to heavy traffic with axle loads of up to 11.5 tons”, funded by the “Gospostrateg” program (The National Center for Research and Development).

podatność na starzenie, mająca swoje logiczne przełożenie na scenariusze eksploatacji i utrzymania nawierzchni drogowych w ramach cyklu ich życia. Istotną staje się optymalna częstotliwość wykonywania prac utrzymaniowych dla zapewnienia ciągłości eksploatacyjnej nawierzchni w fazie użytkowania. Należy jednak zauważyć, że różnice dotyczące horyzontu czasowego planowanych remontów mogą mieć swoje źródło w odmiennym charakterze przyjętych założeń wejściowych.

7. Ważnym zagadnieniem staje się konieczność przyjęcia jednolitej metodyki badawczej. W przypadku badań opartych na analizie LCCA brakuje powszechnie uznanego wzorca normującego założenia badawcze tej metody, szczególnie w kontekście danych wejściowych i ustalonych horyzontów czasowych, mających kluczowy wpływ na ostateczny wynik analizy.
8. Reasumując powyższe spostrzeżenia, można sformułować wniosek, iż wyniki LCCA powinny realnie przekładać się na działalność zarządców dróg, w tym stanowić ważne kryterium decyzyjne w zarządzaniu kosztami infrastruktury drogowej. Będzie to jednak możliwe wówczas, gdy zastosowana metodyka stwarzać będzie obiektywne warunki dla porównania różnych wariantów rozwiązania problemu.

INFORMACJE DODATKOWE

Praca przedstawia wyniki badań, które częściowo zostały zrealizowane w ramach projektu badawczego o nazwie „Optymalizacja inwestycji drogowych w zakresie dostosowania sieci dróg krajowych do ruchu pojazdów ciężarowych o nacisku osi do 11,5 tony” finansowanego przez program „Gospostrateg” (NCBR).

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Nowak E.*: Analiza i kontrola kosztów przedsiębiorstwa. Wydawnictwo CeDeWu, Warszawa, 2019
- [2] Sprawozdanie o stanie mienia Skarbu Państwa – stan na dzień 31 grudnia 2021 r. Prezes Prokuratury Generalnej Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa, 2023
- [3] *Zalewski W.*: Rachunek kosztów działań w zarządzaniu przedsiębiorstwem transportu drogowego. Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń, 2016
- [4] *Urbański M., Świtata M., Liszewski W., Ślusarczyk B., Piechowicz K.*: Road and bridge construction price indexation illustrated with an example of a selected project. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **21**, 4, 2022, 365-378, DOI: 10.7409/rabdim.022.021
- [5] *Flyvbjerg B., Skamris holm M.K., Buhl S.L.*: How common and how large are cost overruns in transport infrastructure projects? *Transport Reviews*, **23**, 1, 2003, 71-88, DOI: 10.1080/01441640309904
- [6] *Gillespie W.M.*: A manual of the principles and practice of road-making: comprising the location, construction, and improvement of roads and rail-roads. A.S. Barnes & CO, New York and London, 1872
- [7] *Świtata M.*: Road infrastructure management. The perspective of local roads authority. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, **120**, 2023, 269-283, DOI: 10.20858/sjstut.2023.120.17
- [8] *Świtata M., Ledwolorz A.*: Identifying and assessing the functionality of IT systems for the maintenance and development of the road network. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, **18**, 4, 2023, (in print)
- [9] *Zofka A.*: Proaktywna strategia zarządzania elementami infrastruktury drogowej. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Seria „S” nr 82, Warszawa, 2019
- [10] *Chen L., Bai Q.*: Optimization in decision making in infrastructure asset management: A review. *Applied Science*, **9**, 7, 2019, ID article: 1380, DOI: 10.3390/app9071380
- [11] *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*. Project Management Institute, Newtown Square, 2013
- [12] *Nogalski B., Szpitter A.A., Jabłoński M.*: Zarządzanie projektami w kształtowaniu elastycznych modeli biznesu operatorów systemu dystrybucyjnego. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, 2016
- [13] *Filipiak B., Panasiuk A.*: Przedsiębiorstwo usługowe. Zarządzanie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2008
- [14] *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine: Consequences of Delayed Maintenance of Highway Assets*. The National Academies Press, Washington, 2017, DOI: 10.17226/24933
- [15] *Cykl życia inwestycji drogowej*. GDDKiA, 2019, <http://www.nbi.com.pl/gddkia-cykl-zycia-inwestycji-drogowej> (10.07.2023 r.)
- [16] *Szadziewska A., Majchrzak I., Remlein M., Szychta A.*: Rachunkowość zarządcza a zrównoważony rozwój przedsiębiorstwa. Wydawnictwo IUS PUBLICUM Instytut Prawa Gospodarczego, Katowice, 2021
- [17] *Szabat Ł.*: Drogi betonowe a drogi asfaltowe w ujęciu metody oceny cyklu życia. *Budownictwo, Technologie, Architektura*, **2**, 2011, 31-35
- [18] *Alvarez C.M., Lighthart T.A.*: A social panorama within the life cycle thinking and the circular economy: a literature review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, **26**, 2021, 2278-2291, DOI: 10.1007/s11367-021-01979-x
- [19] *AASHTO Transportation Asset Management Guide*. US Department of Transportation, Federal Transit Administration, <https://www.transit.dot.gov/regulations-and-programs/asset-management/aashto-transportation-asset-management-guide> (05.07.2023)

- [20] Dvořák Z., Sventeková E., Řehák D., Čekerevac Z.: Assessment of critical infrastructure elements in transport. *Procedia Engineering*, **187**, 2017, 548-555, DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.413
- [21] Persia L., Usami D.S., e Simone F., De La Beaumelle V.F., Yannis G., Laiou A., Han S., Machata K., Pennisi L., Marchesini P., Salathè M.: Management of road infrastructure safety. *Transportation Research Procedia*, **14**, 2016, 3436-3445, DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.303
- [22] Kempny D.: Obsługa logistyczna. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Katowicach, Katowice, 2008
- [23] Walls III J., Smith M.R.: Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design – In Search of Better Investment Decisions. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, 1998
- [24] Diependaele M.: Przewodnik po podstawowych zasadach analizy kosztu cyklu eksploatacji (LCCA) nawierzchni. Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2019
- [25] Fuller S.: Life-cycle cost analysis (LCCA), <https://www.wbdg.org/resources/life-cycle-cost-analysis-lcca> (20.06.2023)
- [26] Altaf M., Alaloul W.S., Musarat M.A., Qureshi A.H.: Life cycle cost analysis (LCCA) of construction projects: sustainability perspective. *Environment, Development and Sustainability*, **25**, 2023, 12071-12118, DOI: 10.1007/s10668-022-02579-x
- [27] Archutowska J., Kiwił A., Giziński D., Witaszek W., Lorczyk M.: Analiza kosztów i korzyści projektów transportowych współfinansowanych ze środków Unii Europejskiej. Centrum Unijnych Projektów Transportowych, Warszawa, 2016
- [28] Dąbrowski W.: Zabiegi utrzymaniowe uszczelniające nawierzchnie asfaltowe. *Drogownictwo*, **70**, 1, 2015, 15-21
- [29] Śleszyńska E.: Obowiązki właścicieli obiektów budowlanych oraz inwestorów: przegląd, konserwacja, roboty budowlane. Wolters Kluwer Polska, Warszawa, 2022
- [30] Babashamsi P., Yusoff N.I.M., Ceylan H., Nor N.G.M., Jenatabadi H.S.: Evaluation of pavement life cycle cost analysis: review and analysis. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **9**, 4, 2016, 241-254, DOI: 10.1016/j.ijprt.2016.08.004
- [31] Niebieska księga: infrastruktura drogowa. Jaspers, Warszawa, 2023, https://www.cupt.gov.pl/wp-content/uploads/2023/06/upload_blue-book_roads_150623-final_3610_132.pdf
- [32] Kaleta D., Macheta D.: Analiza porównawcza LCCA mostu kompozytowego i obiektów konwencjonalnych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej”, **24**, 2017, 125-140
- [33] Nabawy M., Khodeir L.M.: A systematic review of quantitative risk analysis in construction of mega projects. *Ain Shams Engineering Journal*, **11**, 4, 2020, 1403-1410, DOI: 10.1016/j.asej.2020.02.006
- [34] Moins B., France C., Van den Bergh W., Audenaert A.: Implementing life cycle cost analysis in road engineering: A critical review on methodological framework choices. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **133**, 2020, DOI: 10.1016/j.rser.2020.110284
- [35] Batouli M., Bienvenu M., Mostafavi A.: Putting sustainability theory into roadway design practice: Implementation of LCA and LCCA analysis for pavement type selection in real world decision making. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **52**, part A, 2017, 289-302, DOI: 10.1016/j.trd.2017.02.018
- [36] Liu R., Smartz B.W., Descheneaux B.: LCCA and environmental LCA for highway pavement selection in Colorado. *International Journal of Sustainable Engineering*, **8**, 2, 2015, 102-110, DOI: 10.1080/19397038.2014.958602
- [37] Riekstins A., Haritonovs V., Abolins V., Straupe V., Tihonovs J.: Life cycle cost analysis of BBTM and traditional asphalt concretes in Latvia. 18th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, Jelgava, 2019, DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N400
- [38] Hasan A., Hasan U., Whyte A., Al Jassmi H.: Lifecycle Analysis of recycled asphalt pavements: case study scenario analyses of an urban highway. *Civil Engineering*, **3**, 2, 2022, 242-262, DOI: 10.3390/civileng3020015
- [39] Król J., Kowalski K.J.: Analiza porównawcza kosztów budowy i eksploatacji drogi ekspresowej w technologii asfaltowej i betonowej. ABAKK Sp. z o.o., Warszawa, 2015
- [40] Molinari L., Haezendonck E., Hensmans M.: A Strategic asset management framework for improving transport infrastructure: Analysis for Belgian land transport modes. In: Pinto J.O.P., Kimpara M.L.M., Reis R.R., Secharan T., Upadhyaya B.R., Amadi-Echendu J. (eds.): 15th WCEAM Proceedings, Springer, Cham, 2022, DOI: 10.1007/978-3-030-96794-9_4
- [41] Mikolaj J., Remek L.: Life Cycle Cost Analysis – Integral Part of Road Network Management System. *Procedia Engineering*, **91**, 2014, 487-492, DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.031