

## **Analizy LCA dla dróg i mostów jako narzędzie do szczegółowej i kompleksowej oceny oddziaływania na środowisko**

**Agata Dąbal, Marcin Łyszczarz**

*Promost Consulting T.Siwowski Sp.J., e-mail: dabal@promost.pl, lyszczarz@promost.pl*

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono możliwości wykonywania analiz LCA w odniesieniu do dróg i mostów wraz z określeniem zasadniczych warunków brzegowych i ustaleniem jednostki funkcjonalnej. Na przykładach przeanalizowano charakterystyczne drzewa procesów stanowiące podstawę do dalszych analiz. Przedstawiono oparte na analizie LCA metody oceny oddziaływania obiektów drogowych i mostowych na takie elementy środowiska, jak klimat czy warstwa ozonowa. Opisano także wpływ warunków brzegowych i rozbudowy drzewa procesów na uzyskiwane wyniki, w odniesieniu do skali oddziaływania na środowisko, wskazując w jaki sposób interpretacja wyników umożliwia podjęcie optymalizacji przyjętych rozwiązań projektowych celem zmniejszenia oddziaływania na środowisko.

**Słowa kluczowe:** środowisko, drogi, mosty, LCA, ocena oddziaływania.

### **1. Wprowadzenie**

Oceny oddziaływania na środowisko na dobre wrosły w proces przygotowania inwestycji drogowych i mostowych. W chwili obecnej prawie każdy odcinek nowej drogi wymaga nie tylko posiadania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach, ale w większości przypadków uzyskanie takiej decyzji jest poprzedzone wieloaspektową i często długotrwałą procedurą oceny oddziaływania na środowisko w jego poszczególnych elementach oraz ich wzajemnym powiązaniu. Podstawowe składniki w ocenach oddziaływania dróg to analizy w zakresie oddziaływań przyrodniczych, emisji energii w postaci hałasu oraz emisji substancji do powietrza i wód. W ostatnim okresie, przede wszystkim w odniesieniu do obiektów mostowych, nabierają bardzo istotnego znaczenia oddziaływania związane z ingerencją w koryta cieków wodnych, w tym również z ich przekształcaniem wynikającym z konieczności zabezpieczenia stateczności konstrukcji wsporczych.

Powszechnie dostępne narzędzia, w postaci programów komputerowych, pozwalają na wykonywanie obliczeń poziomu zanieczyszczeń środowiska powstałych w wyniku konkretnych presji wywołanych mierzalnymi emisjami. W przypadku konieczności oceny wieloaspektowej na złożone komponenty środowiska takie jak klimat, przyroda, procesy eutrofizacji, oddziaływania na człowieka i jego warunki życia, oceny oddziaływania są najczęściej oparte na metodach podatnych na subiektywne podejście i trudnych do jednoznacznej weryfikacji takich jak metody opisowe, eksperckie, punktowe, czy też macierze, pokazujące zależności w ramach jednego projektu, ale trudne do zastosowania przy porównywaniu różnych obiektów. Autorzy opracowań sięgają wówczas najczęściej po analizy wielokryterialne, narzędzie bardzo przydatne, proste do interpretacji, ale wrażliwe na szczegółową metodykę ich opracowania. Przy zastosowaniu tych sposobów analizy trudno jest uwzględnić w sposób holistyczny zarówno środowisko, jak i dany obiekt, we wszystkich jego aspektach wynikających zarówno z zastosowanych materiałów, jak i kolejnych etapów realizacji, eksploatacji i likwidacji.

Poszukiwanie całościowych systemów oceny wpływu na środowisko, w ujęciu ilościowym i opartym o zasadę zrównoważonego rozwoju, zaowocowało powstaniem metod opartych na analizach cyklu życia (LCA, ang. Life Cycle Assessment).

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania tych technik w procesie analizy oddziaływania dróg i mostów na środowisko jako całość, a także w odniesieniu do poszczególnych komponentów. Zaprezentowano również przykładowe wyniki pozwalające na dokonywanie porównań skali oddziaływania różnych rozwiązań stosowanych w budownictwie komunikacyjnym.

## **2. Geneza i charakterystyka środowiskowych ocen cyklu życia (LCA)**

Badania metody LCA zapoczątkowano w końcu lat 60-tych XX wieku [1, 10]. Dotyczyły one wówczas ograniczonego zasobu danych i analiz – najczęściej zużycia energii i materiałów. Informacje literaturowe dotyczące wykorzystywania tej techniki w szerszym zakresie pojawiły się w latach 90-tych ubiegłego stulecia. Analizowano wówczas przy jej pomocy negatywne oddziaływania dotyczące materiałów i energii przy produkowaniu i użytkowaniu wyrobów o określonych, porównywalnych parametrach. Dodatkowym impulsem do rozwoju tej techniki były szerokie badania zjawisk takich jak efekt cieplarniany, zanik warstwy ozonowej, kwaśne deszcze i smog. Efektem doskonalenia metody było wprowadzenie kolejnych stałych elementów, aż do oceny wpływu cyklu życia wyrobu na środowisko (LCIA, ang. Life Cycle Impact Assessment) i interpretacji wyników. Równocześnie znormalizowano stosowane pojęcia oraz technikę i w chwili obecnej stanowi ona kluczowy element zarządzania środowiskowego bazujący na systemie norm od 14040 do 14049. W chwili obecnej obserwuje się coraz szersze stosowanie technik LCA w odniesieniu do doskonalenia wyrobów pod kątem minimalizacji oddziaływania na środowisko jako całość, bez przenoszenia wzrostu niektórych oddziaływań między komponentami. Przejawem tego wykorzystania są także kolejne prace normalizacyjne, których efektem są najnowsze normy dotyczące np. oceny obiektów budowlanych [5].

LCA dotyczy aspektów środowiskowych oraz możliwych wpływów na środowisko (np. zużycie surowców i konsekwencje środowiskowe uwolnień) w okresie cyklu życia wyrobu począwszy od pozyskania surowców, przez produkcję, użytkowanie, przetwarzanie, po wycofanie z eksploatacji, recykling, aż do ostatecznej likwidacji (tj. „od kołyski do grobu”) [3]. Dzięki użyciu w ogólnej definicji pojęcia „wyrobu” jest możliwe zastosowanie tej metody zarówno w odniesieniu do produktu, jak i usługi czy procesu.

Badania mogą być wykonywane na trzech podstawowych poziomach szczegółowości [8]:

- 1) wariant koncepcyjny – wykorzystywany gdy nacisk jest położony na szybkość analizy,
- 2) wariant uproszczony – wykorzystywany w procesach decyzyjnych związanych z rozwojem wyrobu,
- 3) wariant szczegółowy – stosowany do pełnej oceny oraz badań porównawczych.

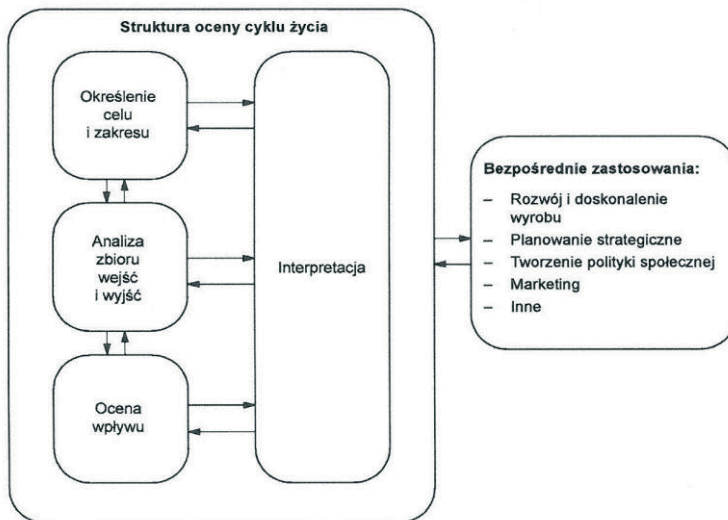
Wyróżnia się cztery fazy badania LCA:

1. Faza określenia celu i zakresu
2. Faza analizy zbioru wejść i wyjść
3. Faza oceny wpływu
4. Faza interpretacji

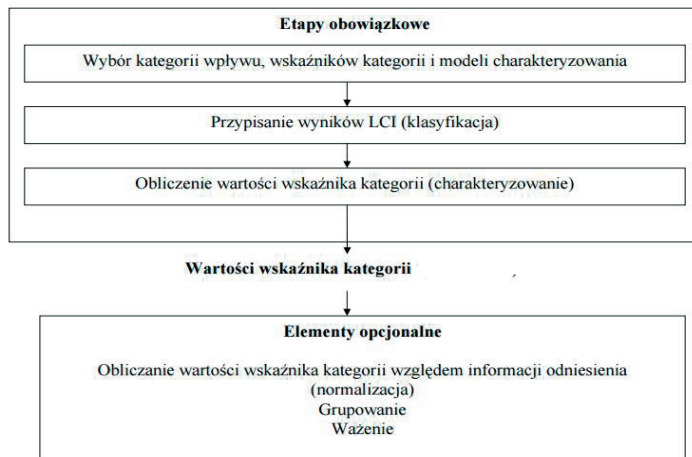
W ramach każdej fazy należy wykonać właściwe dla niej czynności określając kolejno cel działania i zakres prowadzonych badań, co determinuje zarówno jednostkę funkcjo-

nalną rozumianą jako ilościowy efekt systemu wyrobu stosowany jako jednostka odniesienia, jak i system wyrobu czyli zbiór procesów jednostkowych wraz ze strumieniami elementarnymi i strumieniami wyrobu, które spełniają jedną lub więcej określonych funkcji i modelują cykl życia wyrobu. Na tej podstawie dokonuje się analizy zbioru wejść, czyli wszystkich wyrobów, materiałów lub strumieni energii, które wchodzi do procesu jednostkowego, i wyjść rozumianych jako wyrób, materiał lub strumień energii opuszczający proces jednostkowy. W wyniku tej analizy otrzymujemy obraz przepływów przekraczających granice systemu, co z kolei stanowi punkt początkowy do oceny wpływu cyklu życia.

Ocena wpływu cyklu życia – LCIA – to trzecia faza LCA, faza oceny ukierunkowana na zrozumienie i ocenę wielkości oraz znaczenia możliwych wpływów systemu wyrobu na środowisko w całym cyklu życia wyrobu [3]. Celem tej fazy jest dostarczenie dodatkowych informacji pomocnych w ocenie wyników analizy zbioru wejść i wyjść systemu wyrobu w celu lepszego zrozumienia ich znaczenia środowiskowego [3].



Rys. 1. Fazy LCA wg [3]



Rys. 2. Elementy fazy LCIA wg [3]

Analizy cyklu życia są determinowane przez granice systemu, które określają, które procesy jednostkowe powinny być włączone do LCA. Z tego względu istotne jest, aby granice te były spójne z celem badania i nie zmieniały znacząco ogólnych wyników [4]. W cyklu życia obiektów budowlanych można wyróżnić metody oparte o analizę od etapu pozyskania surowców do likwidacji obiektu (rozbiórka) tzw. analizę „cradle to grave”. Ze względu na długotrwałe okresy użytkowania obiektów budowlanych, sięgające kilkudziesięciu, a nawet kilkuset lat, zasadne może być wykonanie analizy w określonej perspektywie czasowej, czyli analiza od pozyskania surowców do przyjętego czasu użytkowania zwana „cradle to gate”, ewentualnie analiza dla etapu budowy i użytkowania (tzw. analiza „gate to gate”).

Wśród kategorii wpływu można wyróżnić: globalne ocieplenie, zubożenie warstwy ozonowej, zakwaszenie, zużycie zasobów naturalnych, zajęcie terenu, poziom eutrofizacji, ekotoksyczność. Każda z tych kategorii wpływu jest określana w jednostce właściwej dla danego komponentu. W kolejnym kroku dokonuje się klasyfikacji wyników i obliczenia wartości dla wskaźnika kategorii wpływu zamieniając przy pomocy parametru charakteryzowania jednostkę określonego wyniku na jednostkę ogólną danej kategorii wpływu. Dokonując agregacji przekształconych w ten sposób wyników otrzymujemy wartość wskaźnika kategorii, co jest ostatnim elementem obowiązkowym w ramach LCIA.

W kolejnych etapach (fakultatywnych) jest możliwe dokonanie porównania wyników. W tym celu niezbędne jest wykonanie dalszych etapów LCIA, a w szczególności grupowania i normalizowania, które polega na ustaleniu wartości liczbowej interpretowanej jako udział określonej kategorii wpływu w jednym z trzech głównych elementów środowiska: człowieka, jakości ekosystemu i zasobów. W najczęściej stosowanej metodzie ekowskaźnika (ECO-INDICATOR 99) grupowanie, a następnie normalizowanie obejmuje następujące kategorie wpływów [2]:

- zużycie surowców mineralnych i paliw mierzone w jednostce MJ definiowanej jako ilość dodatkowej energii potrzebnej do przyszłego wydobycia minerałów i paliw kopalnych,
- zajęcie terenu, eutrofizacja/zakwaszenie, ekotoksyczność – dla których jednostką jest  $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rok}$ , definiowany jako potencjalnie zanikająca ilość gatunków roślin (Potentially Disappeared Fraction of plant species),
- ubytek warstwy ozonowej, zmiany klimatu, rakotwórczość, smog, promieniowanie – mierzone w jednostkach DALY definiowanych jako skorygowana przez niepełnosprawność długość życia człowieka (Disability Adjusted Life Years).

W fazie oceny wpływu LCIA różne wartości wskaźnika kategorii mogą być ważone i sumowane, co umożliwia uzyskanie wielkości oddziaływania na środowisko w ujęciu całościowym.

Ostatnim etapem LCA jest interpretacja wyników obejmująca określenie elementów szczególnie istotnych, o dużym zagrożeniu, analizę wrażliwości tych elementów, określenie sposobu minimalizacji zagrożeń, czy też ustalenie priorytetów i możliwych zmian. Wyniki uzyskane w toku interpretacji mogą posłużyć do doskonalenia wyrobu pod kątem zmniejszenia wpływu na środowisko.

Narzędziem do wykonywania analiz LCA są programy komputerowe, w ramach których jest opracowany szereg baz danych dla materiałów i energii oraz procesów stosowanych w ramach produkcji, czy też realizacji usług i inwestycji. Prowadzone badania dotyczą rozwoju i precyzowania tych baz, co umożliwia coraz szersze i bardziej dokładne obliczenia wpływu wyrobu na środowisko, a przede wszystkim optymalizacji wyrobu pod kątem zapewnienia zrównoważonego rozwoju. Niemniej w przypadku analiz szczegółowych niezbędne jest weryfikowanie danych z ogólnodostępnych baz i stosowanie w możli-

wie najszerszym zakresie danych pierwotnych właściwych dla dostawców i producentów dla danego wyrobu.

W odniesieniu do dróg i mostów wykonanych zostało kilka analiz porównawczych LCA ukierunkowanych przede wszystkim na zużycie materiałów i optymalizację kosztów zarówno budowy, jak i utrzymania obiektów o różnej konstrukcji [6, 7, 9]. Wskazuje się, że zintegrowana ocena cyklu życia LCA staje się obecnie jedną z podstawowych technik wspomagających podejmowanie decyzji w projektach infrastrukturalnych, w tym mostowych [9].

### 3. Przykłady analiz LCA dla dróg i mostów

Przedmiotem wykonanych analiz środowiskowych były odcinki drogi o nawierzchni asfaltowej i betonowej oraz mosty o różnych konstrukcjach. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem programu komputerowego SimaPro 8.0. W obliczeniach dla dróg posłużono się bazą danych dostępną w ramach wykorzystanego oprogramowania, w przypadku mostów, pozyskano również dane wejściowe od producentów stosowanych materiałów.

W pierwszym etapie określono cele analiz i zakres systemu. W każdym przypadku podjęto próbę porównania skali oddziaływania na środowisko w odniesieniu do konstrukcji i zastosowanych materiałów. Jako jednostkę funkcjonalną ustalono odpowiednio odcinek drogi lub obiekt o określonych parametrach.

Granice systemu stanowiły odcinki drogi lub obiekty w określonych lokalizacjach i perspektywach czasowych. W odniesieniu do dróg analizowano odcinek drogi z uwzględnieniem możliwości powtórnego wykorzystania materiałów do budowy nawierzchni lub podbudowy (analiza „cradle to grave”). W przypadku obiektów mostowych analizowano całe obiekty o analogicznych parametrach. Analizę dla mostów wykonano do okresu rozbiórki, przy uwzględnieniu wymaganych remontów i robót utrzymaniowych (analiza „cradle to gate”). W przypadku dróg uwzględniono także etap likwidacji nawierzchni drogowej oraz możliwość powtórnego wykorzystania materiałów.

Dane te determinowały również drogi transportu materiałów, w tym zużycie energii i paliw. Zarówno w odniesieniu do dróg, jak i obiektów mostowych analizy dotyczyły konkretnych odcinków drogi i obiektów, dla których posiadano możliwie pełne dane konstrukcyjne.

W kolejnym etapie w każdym przypadku przeanalizowano wejścia i wyjścia, w tym pod kątem odpadów. W ramach tego etapu sporządzono drzewa procesów przedstawiające przepływy materiałów i energii w ramach całego cyklu życia objętego analizą. W każdym przypadku ograniczono poziom wpływu prezentowanych składowych uwzględnionych w procesach, odpowiednio do 5% w przypadku drogi o nawierzchni asfaltowej i 1% w przypadku obiektów mostowych. Poprzez ograniczenie poziomu wpływu prezentowanych składowych uwzględnionych w procesach należy rozumieć przedstawienie wejść i wyników, dla których oddziaływania są większe od zdanej procentowej wielkości wpływu. Przykładowe drzewo procesów dla podanych powyżej założeń nawierzchni asfaltowej przedstawia rysunek 3, a dla jednego z mostów rysunek 4.

Zmiana procentowego poziomu wpływu dla składowych może wywierać istotne znaczenie dla konstrukcji drzewa procesów i jego czytelności, ale nie ma znaczenia dla otrzymanych wyników. Procedury obliczeniowe uwzględniają wszystkie wejścia i wyjścia. Niemniej w toku prezentacji danych, wysoki lub nieodpowiednio dobrany poziom tego ograniczenia, może w skrajnym przypadku sugerować pominięcie pewnych procesów. Przykłady drzewa procesów dla mostów o różnej konstrukcji przy ograniczeniu procentowym poziomem wpływu składowych wynoszącym 10% przedstawiono na rysunku 5.

W przypadku mostu o konstrukcji typu K wpływ robót utrzymaniowych wyniósł 2,29% i został pominięty przy zastosowaniu ograniczenia poziomu wpływu rzędu 10% dla każdej ze składowych.

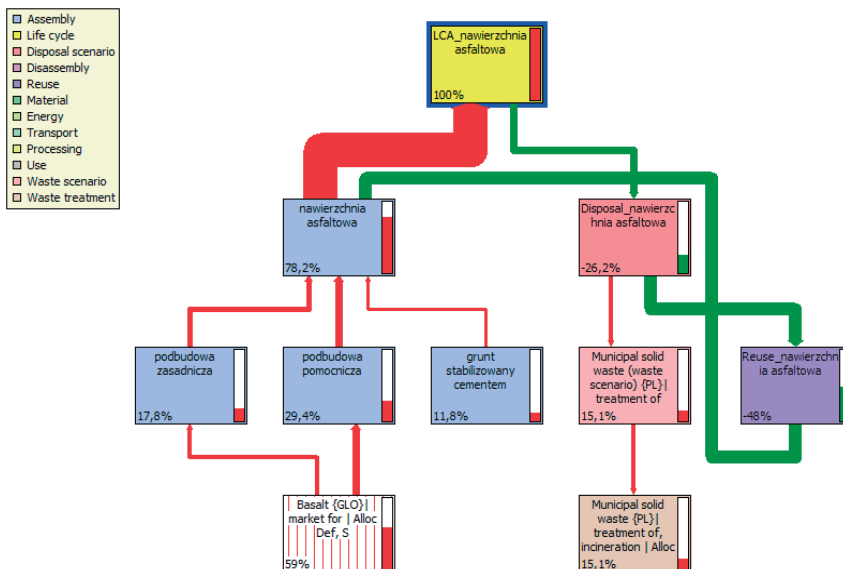
Na tym przykładzie jest widoczne, że z jednej strony rozbudowa drzewa procesów pozwala na uwzględnienie wszystkich analizowanych procesów jednostkowych, a tym samym uzyskanie możliwie pełnych wyników, a z drugiej strony, w przypadku niektórych konstrukcji, na przykład tych o większej trwałości, pewne procesy mogą oddziaływać w sposób pomijalnie mały. Intuicyjnie można wnioskować o takiej skali oddziaływania na podstawie metod opisowych. Analiza LCA dostarcza tego typu informacji w sposób liczbowy, jasny i łatwy do interpretacji.

W trzecim etapie obejmującym analizę LCIA obliczono wartości kategorii wpływu dla każdego z mostów i porównano je. Wyniki prezentuje rysunek 6. Interpretacja wskazuje na różną skalę oddziaływania w odniesieniu do poszczególnych kategorii wpływu.

Przedstawione dane dla poszczególnych kategorii wpływu umożliwiają szczegółowe, liczbowe określenie skali oddziaływania na takie elementy jak: klimat, warstwa ozonowa, ekotoksyczność, które są trudno mierzalne innymi metodami. Ponadto możliwe jest określenie tego oddziaływania nie tylko w odniesieniu do procesu budowy, ale w ujęciu całościowym – pełnego cyklu życia, przy uwzględnieniu oddziaływań wynikających z przebiegu procesu produkcji, stosowanych materiałów, transportu na plac budowy, a także późniejszej rozbiórki i możliwości wtórnego wykorzystania.

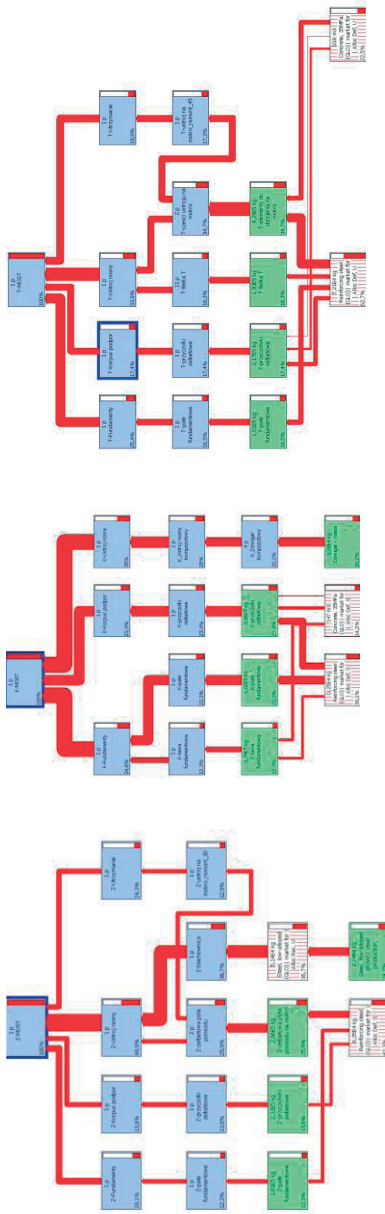
Pogrupowanie, a następnie normalizacja umożliwiają określenie oddziaływania w jednolitej skali punktów wskaźnikowych Pt na środowisko jako całość oraz w podziale na trzy główne elementy: człowieka, jakość ekosystemu i dostępność zasobów dla przyszłych pokoleń. Etap ten opracowano przy wykorzystaniu metody ekowskaźnika (ECO-INDICATOR 99). Wyniki w tej formie zaprezentowano dla jednego z obiektów mostowych na rysunku 7.

Wykorzystanie jednolitej skali punktów wskaźnikowych umożliwia dokonywanie porównań pomiędzy jednostkami odniesienia w szerokim zakresie wpływu na środowisko jako całość i oddziaływań na trzy wymienione powyżej główne elementy.

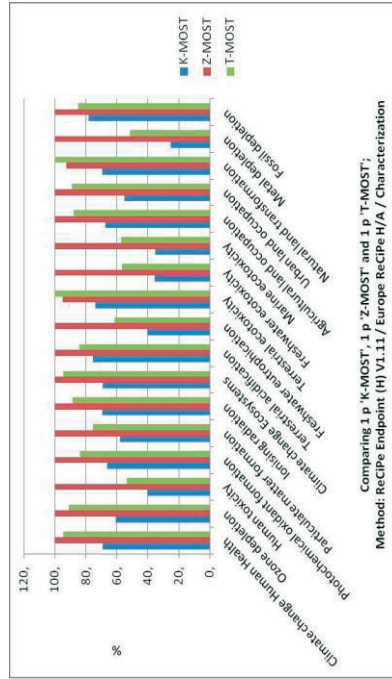


Rys. 3. Drzewo procesów – nawierzchnia asfaltowa – składowe wywierające więcej niż 5% wpływu [11]





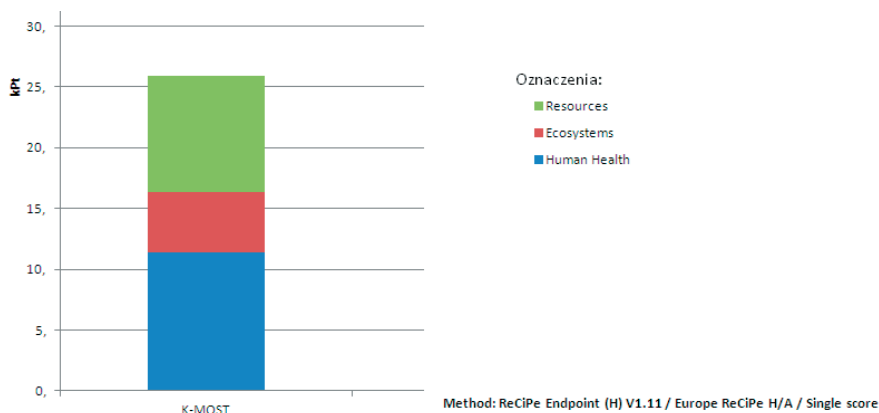
Rys. 5. Porównanie drzewa procesów – mosty Z, T, K - składowe wywierające więcej niż 10% wpływu (oprac. własne)



Comparing 1 p 'K-MOST', 1 p 'Z-MOST' and 1 p 'T-MOST'; Method: ReCiPe Endpoint (H) V1.11 / Europe ReCiPe H/A / Characterization

Rys. 6. Wielkość kategorii wpływu dla mostów K, Z, T (oprac. własne)





Rys. 7. Oddziaływanie mostu K w jednolitej skali punktów wskaźnikowych Pt (oprac. własne)

## 4. Podsumowanie

Analizy cyklu życia umożliwiają dokonanie analiz oddziaływania na środowisko i wskazują możliwości działania przy zapewnieniu zrównoważonego rozwoju. Analiza oddziaływania LCIA jest bowiem jednym z etapów analizy LCA. Wykonanie pełnej analizy umożliwia liczbowe określenie skali oddziaływania, porównanie różnych wyrobów i zidentyfikowanie obszarów możliwych, a równocześnie najbardziej celowych działań minimalizujących oddziaływanie.

W procesie analiz bardzo istotne jest prawidłowe określenie jednostki funkcjonalnej, którą w przypadku obiektów składających się z powtarzalnych elementów może to być jeden taki element – w odniesieniu do dróg na przykład 1 km drogi o określonej konstrukcji. Porównanie dla takich obiektów jest możliwe na podstawie analizy wykonanej dla elementu powtarzalnego. W przypadku obiektów, których konstrukcja wynika z indywidualnych rozwiązań projektowych jednostką funkcjonalną powinien być cały obiekt – nie można dokonywać porównań całego mostu na podstawie analizy opracowanej dla 1 m mostu.

Wykonywanie analiz dla obiektu wiąże się z określonymi trudnościami związanymi z definiowaniem granic systemu i poziomu rozbudowy drzewa procesów, a także z poziomem wpływów dla poszczególnych składowych w ramach analizy wejść i wyjść.

Analizy LCA można wykonywać na różnych poziomach szczegółowości, ale w każdym przypadku poziom ten musi być dostosowany do celu, któremu służy analiza, a dodatkowo w ramach analizy powinna być przeprowadzona analiza wrażliwości co najmniej dla zagadnień kluczowych.

Metody oparte na analizach LCA mogą mieć zastosowanie nie tylko w procesach oceny oddziaływania na środowisko, ale także przy podejmowaniu działań inwestycyjnych, bowiem pozwalają na całościowe podejście do obiektów budowlanych uwzględniające wszystkie etapy ich egzystencji.

## Literatura

- 1 Kowalski Z., Kulczycka J., Góralczyk M., Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych, PWN, Warszawa, 2007.
- 2 Goedkoop M., Oele M., Vieira M., Leijting J., Ponsioen T., Meijer E., SimaPro Tutorial, 2014
- 3 SimaPro 5, Batabase Manual, 2001.

- 4 PN-EN ISO 14040, Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura, PKN, Warszawa, 2009.
- 5 PN-EN ISO 14044, Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne, PKN, Warszawa, 2009.
- 6 PN-EN 15804, Zrównoważoność obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobów – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych, PKN, Warszawa, 2012.
- 7 Rantala T., Life cycle analysis of three finnish standard bridges, Liikennevirasto, Helsinki 2010.
- 8 Sagemo A., Strock L., Comparative study of bridge concepts based on life-cycle cost analysis and life-cycle assessment, Chalmers University of technology, Goteborg, 2013.
- 9 Samson-Bręk I., Zastosowanie metody oceny cyklu życia LCA do oszacowania wpływu na środowisko wytwarzania paliwa biogazowego do silników spalinowych, Archiwum motoryzacji, Przemysłowy Instytut Motoryzacji, Nr 2/2011 (53) s. 69-79.
- 10 Siwowski T., Zintegrowana analiza cyklu życia w utrzymaniu mostów, Awarie budowlane, XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna, Międzyzdroje, 2013.
- 11 Strykowski W., Lewandowska M., Wawrzynkiewicz Z., Noskowiak A., Cichy W., Środowiskowa ocena cyklu życia (LCA) wyrobów drzewnych, WITD, Poznań 2006.
- 12 Wdowiarz W., Środowiskowa ocena cyklu życia (LCA) nawierzchni w drogownictwie- metodyka i przykłady zastosowań, Praca magisterska, Politechnika Rzeszowska, 2015.

## **LCA analyses for roads and bridges as a tool for detailed and comprehensive environmental impact assessment**

**Agata Dąbal, Marcin Łyszczarz**

*Promost Consulting T.Siwowski Sp.J., e-mail: dabal@promost.pl, lyszczarz@promost.pl*

**Abstract:** The article presents possibilities of using LCA analyses for roads and bridges determining core boundary conditions and functional unit. The examples of characteristic process trees were studied and fundamental for further analyses. The environmental impact assessment methods, based on LCA analyses, illustrating roads and bridges influence on environmental elements such as climate or ozone layer, were presented. The influence of boundary conditions and the process tree expansion on the results obtained was described with its reference to the scale on environmental impact. It showed how the interpretation of the results make an optimization of a design possible in order to minimize the environmental impact.

**Keywords:** environment, roads, bridges, LCA, impact assessment.