

Drogi betonowe a drogi asfaltowe w ujęciu metody oceny cyklu życia

WSTĘP

Każdy wytworzony produkt w mniejszym lub większym stopniu oddziałuje na środowisko naturalne. Każdy produkt ma swój cykl życia, w którym możemy wskazać poszczególne fazy jego istnienia, począwszy od fazy pozyskania surowców do jego wytworzenia, aż po ostatnią fazę, jaką jest jego utylizacja i zagospodarowanie wynikających z niej odpadów.

Przedstawiona w niniejszym artykule metoda LCA (ang. Life Cycle Assessment – ocena cyklu życia) służy do pomiaru wpływów na środowisko różnych procesów. Można sobie zadać pytanie, po co w ogóle mierzony jest wpływ na środowisko? Odpowiedź na to pytanie można przedstawić w dwóch wariantach:

- aby zidentyfikować kluczowe obszary procesu wymagające poprawy
- aby móc porównać wpływ różnych rozwiązań na środowisko naturalne.

Obydwie te odpowiedzi są sensem przeprowadzania analizy LCA dla różnych produktów, natomiast ta druga odpowiedź to jednocześnie treść niniejszego artykułu, czyli porównanie dwóch technologii budowy dróg – technologii betonowej i asfaltowej. Porównanie to będzie dotyczyło zarówno aspektu wpływów na środowisko (LCA), jak również części kosztowej całego procesu życia drogi, czyli porównania kosztów budowy, remontów i utrzymania drogi (LCCA).

UREGULOWANIA NORMOWE DOTYCZĄCE LCA

Mogłoby się wydawać, że ocena cyklu życia jest zagadnieniem bardzo nowym i jeszcze nierozpowszechnionym na szeroką skalę. Tak nie jest, gdyż ocena cyklu życia jest z powodzeniem stosowana już od lat 90. XX wieku [1], jako technika pozwalająca na śledzenie całego cyklu życia, począwszy od

wydobycia surowców potrzebnych do wytworzenia konkretnego produktu, aż do ostatecznego unieszkodliwienia odpadów powstałych przy jego recyklingu na końcu życia tego produktu. W latach 90. XX wieku pojawiły się pierwsze uregulowania normowe dotyczące LCA, które zostały wprowadzone w formie norm ISO i były systematycznie tłumaczone na język polski przez Komitet Techniczny ISO/TC 207 „Zarządzanie Środowiskowe” (PKN).

W polskich uregulowaniach normowych zasady, wymagania i wytyczne dotyczące oceny cyklu życia (LCA) opisane są w dwóch głównych normach związanych z zarządzaniem środowiskowym:

- PN-EN ISO 14040:2009, „Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura”. – Norma ta zawiera jasny obraz praktyk, zastosowań i ograniczeń LCA dla szerokiej grupy potencjalnych użytkowników oraz zainteresowanych stron
- PN-EN ISO 14044:2009, „Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne”. – Norma ta przeznaczona jest do przygotowania, prowadzenia oraz krytycznego przeglądu analizy zbioru wejść i wyjść w cyklu życia. To także wytyczne w sprawie oceny oddziaływania i interpretacji wyników LCA.

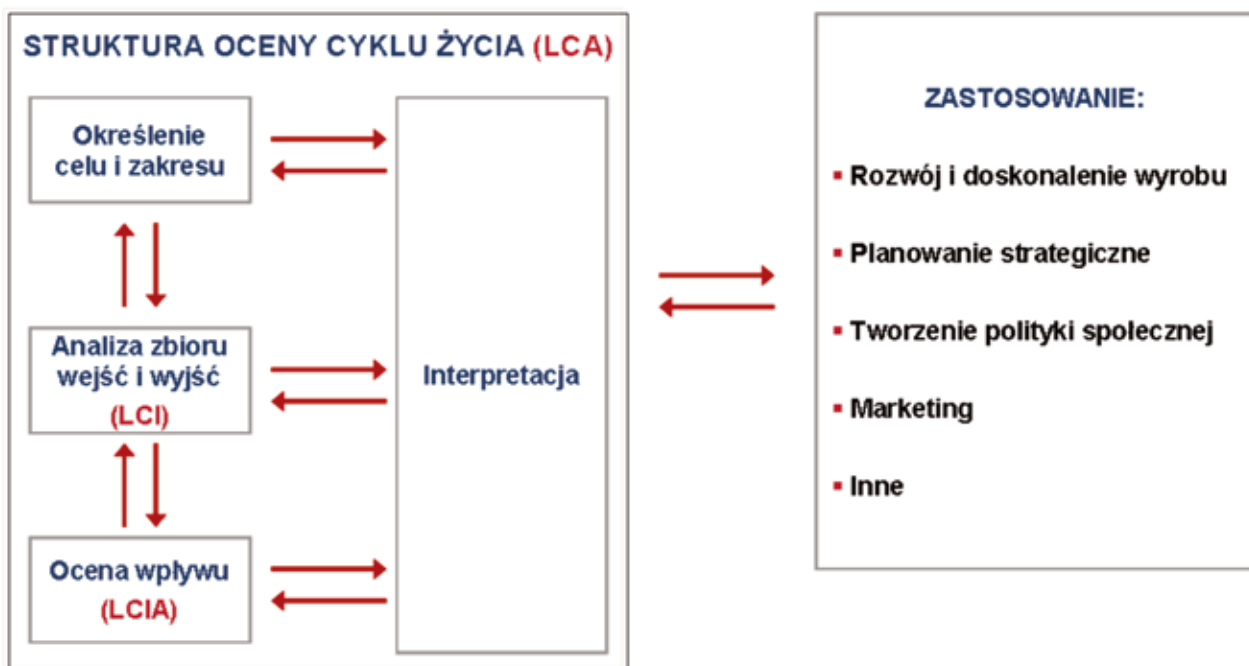
STRUKTURA OCENY CYKLU ŻYCIA

Ocena cyklu życia (LCA) jest oceną oddziaływania na środowisko danego produktu przez cały okres życia, na którą składają się następujące fazy (rys.1):

Określenie celu i zakresu:

- Cel badania – powinien jednoznacznie ustalać zamierzone zastosowanie wyników badań, powody prowadzenia badań oraz ich odbiorcę. Cel badań determinuje szczegółowość, wnikliwość i zakres badań, rodzaje danych potrzebnych do oceny cyklu życia.

Rys. 1. Fazy oceny cyklu życia (LCA) [3]





Rys. 2. Etapy cyklu życia drogi

Głównym celem LCA jest wytypowanie najlepszego produktu / procesu o jak najmniejszym szkodliwym oddziaływaniu na środowisko i zdrowie ludzkie [1].

- Granice systemu – w ramach zakresu badań definiowane są granice badań, założenia oraz ograniczenia systemu. Tutaj ważne jest określenie systemu wyrobu, czyli ustalenie wszystkich operacji związanych z produktem (ustalenie procesów jednostkowych) [1].

Analiza wejść i wyjść (LCI – z ang. Life Cycle Inventory): Analiza zbioru wejść i wyjść obejmuje w swoim zakresie zbieranie danych oraz procedury obliczeniowe, a także w sposób ilościowy określa wejścia i wyjścia dla danego systemu produktu / wyrobu w okresie jego cyklu życia. Dane zbierane są w celu stworzenia bilansu wszystkich elementów pobieranych ze środowiska, wchodzących do systemu oraz tych, które opuszczają system w postaci emisji do środowiska. Wejścia i wyjścia mogą obejmować wykorzystanie surowców naturalnych oraz emisje do powietrza, wody i ziemi, w trakcie całego cyklu życia produktu [1].

Ocena wpływu (LCIA – z ang. Life Cycle Impact

Assessment): Etap oceny wpływu cyklu życia ma za zadanie zrozumienie i ocenę wielkości oraz znaczenia potencjalnego wpływu systemu produktu na środowisko. W tej fazie brane są pod uwagę skutki ekologiczne, wpływ na zdrowie człowieka oraz na zużycie zasobów naturalnych.

W skrócie proces LCIA polega na wyborze kategorii wpływu i na przyporządkowaniu danych zbioru do danej kategorii wpływu na środowisko [1].

Interpretacja: Jest to faza, w której rozpatrywane są wyniki analizy zbioru (LCI) oraz wyniki oceny wpływu (LCIA). Celem interpretacji cyklu życia jest analiza uzyskanych wyników, sformułowanie wniosków, wyjaśnianie ograniczeń i dostarczenie zaleceń opartych na wynikach z poprzednich faz LCA [1].

CYKL ŻYCIA DROGI

Ocena cyklu życia (LCA) polega na analizowaniu zagrożeń środowiskowych związanych z produktem w całym okresie jego życia, „od kotłyszki po grób”. Produktem w znaczeniu modelu LCA może być konkretny przedmiot, jak i cały proces produkcji czy też usługa [1].

LCA daje możliwość oceny wpływów środowiskowych powstających na wszystkich etapach życia produktu. W przypadku cyklu życia drogi poszczególne etapy wyglądają następująco:

- wydobycie i przetwarzanie surowców mineralnych
- transport
- produkcja wyrobu / produktu
- budowa
- użytkowanie
- rozbiórka
- recykling:
 - przeróbka
 - powtórne użycie
 - unieszkodliwianie odpadów.

ETAPY BUDOWY, NAPRAW I UTRZYMANIA DROGI

Do potrzeb przeprowadzenia analizy wpływów na środowisko (LCA) oraz analiz kosztowych (LCCA) firma CEMEX Polska Sp. z o.o. zleciła do biura projektów drogowych przygotowanie przykładowego projektu drogi budowanej w technologii asfaltowej

Tabela 1. Etapy budowy, napraw i utrzymania drogi

ETAP	BETON	ASFALT
BUDOWA DROGI	1 OCZYSZCZANIE TERENU USUWANIE HUMUSU WYKOPY	
	2 PODBUDOWA / STABILIZACJA WARSTWA POŚLIZGOWA NAWIERZCHNIA BETONOWA	PODBUDOWA POMOCNICZA PODBUDOWA ZASADNICZA WARSTWA WIĄZĄCA NAWIERZCHNIA ASFALTOWA
	3 BUDOWA POBOCZA / CHODNIKA OŚWIETLENIE I OZNAKOWANIE DROGI SPRZĄTANIE PLACU BUDOWY	
NAPRAWY DROGI	CZĘŚCIOWA WYMIANA NAWIERZCHNI CAŁKOWITA WYMIANA NAWIERZCHNI WYMIANA USZCZELNIEŃ SZCZOTKOWANIE POWIERZCHNI USZCZELNIANIE PĘKNIĘĆ MODERNIZACJA ZŁĄCZY	CZĘŚCIOWA WYMIANA NAWIERZCHNI CAŁKOWITA WYMIANA NAWIERZCHNI ŁATANIE ASFALTU WYRÓWNYWANIE NAWIERZCHNI
UTRZYMANIE DROGI	WYMIANA OŚWIETLENIA (ŻARÓWKI / ŚWIETLÓWKI) WYMIANA SŁUPÓW OŚWIETLENIOWYCH WYMIANA ZNAKÓW PIONOWYCH ZIMOWE UTRZYMANIE DROGI OŚWIETLENIE	

oraz w technologii betonowej. Jako referencyjny został przyjęty odcinek drogi o długości 1 km i szerokości 6 m. Poszczególne etapy budowy, napraw i utrzymania drogi, jakie zostały przyjęte w projekcie zawarte są w tabeli 1.

KATEGORIE PREZENTOWANIA WYNIKÓW

Do przeprowadzenia analizy oceny cyklu życia (LCA) zostały wytypowane 3 kategorie ruchu: KR3, KR4 i KR5, a okres przeprowadzonej analizy wynosił 30 lat.

Wyniki LCA prezentowane są w następujących kategoriach:

ZUBOŻENIE ZASOBÓW NATURALNYCH

- Zubożenie zasobów surowców:
 - źródła odnawialne – np. gazy atmosferyczne (tlen, azot), dwutlenek węgla
 - źródła nieodnawialne – np. surowce skalne (granit, bazalt, gabra, dolomit, baryt, etc.), ruda żelaza, gips, glina, grunty, etc.
- Zubożenie źródeł energii:
 - źródła odnawialne – np. biomasa, energia wodna, energia słoneczna, energia wiatrowa, energia geotermalna.
 - źródła nieodnawialne – np. ropa naftowa, gaz ziemny, węgiel kamienny i brunatny, uran.
- Zubożenie zasobów wody.

WPŁYWY NA ŚRODOWISKO W PODZIALE NA KATEGORIE:

- **Globalne ocieplenie** – Na klimat na Ziemi wpływa temperatura powietrza, wód oraz powierzchni Ziemi, opady i promieniowanie słoneczne. Energia słoneczna docierająca do powierzchni Ziemi jest pochłaniana i przekazywana do atmosfery w wyniku parowania oraz jako strumień ciepły promieniowania podczerwonego. Mechanizm efektu cieplarnianego w małej skali można zaobserwować np. w mieszkaniu, gdzie dochodzące krótkofalowe promieniowanie słoneczne może przepływać przez przegrodę transparentną (np. ze szkła) prawie bez przeszkód, natomiast gdy trafia na przegrodę nieprzezroczystą budynku (np. ściana) lub przedmioty, powoduje ich nagrzanie. Nagrzane przedmioty, ściany etc. mogą emitować promieniowanie długofalowe, które tylko częściowo może opuścić pomieszczenie. W wyniku tego energia promieniowania dopływająca do mieszkania jest większa niż energia odprowadzana, co prowadzi do wzrostu temperatury w tym pomieszczeniu [2].

Substancje: dwutlenek węgla (CO_2), metan (CH_4), podtlenek azotu (N_2O), freony (CFC, HFC), sześćo-fluorek siarki (SF_6)

Substancja referencyjna: ekwiwalent DWUTLENI-KU WĘGLA (CO_2)

Zakwaszenie – Zakwaszenie gleby i wód powierzchniowych odbywa się głównie na drodze przekształcania zanieczyszczeń powietrza w kwasy. Tlenki azotu i siarki ulegają uwodnieniu w atmosferze i opadają na powierzchnię Ziemi w postaci kwasów zawartych w deszczu, śniegu i mgie oraz w postaci suchych cząstek – są to tak zwane kwaśne deszcze. Obecność kwasów w środowisku jest przyczyną uszkodzeń bezpośrednich i pośrednich takich jak: wymywanie składników odżywczych z gleby oraz zwiększanie rozpuszczalności metali ciężkich. Zakwaszenie gleby powoduje zaburzenia procesów wegetacji [2].

Substancje: dwutlenek siarki (SO_2), tlenki azotu (NO_x), amoniak (NH_3), lotne związki organiczne (VOC).

Substancja referencyjna: ekwiwalent DWUTLENI-KU SIARKI (SO_2)

Eutrofizacja – Eutrofizacja oznacza proces wzbogacania w substancje odżywcze (nutrienty). Termin ten jest stosowany najczęściej w odniesieniu do jezior, ale dotyczy również cieków wodnych. Widocznymi objawami eutrofizacji są duży porost roślin wodnych, duża ilość mułu, mętnienie wody oraz jej nieprzyjemny zapach i smak. Istotny wpływ na eutrofizację mają nawozy sztuczne stosowane w rolnictwie. Natomiast głównym objawem eutrofizacji jest przyspieszony rozwój glonów w wodzie, co zmniejsza ilość energii przenikającej do głębszych warstw wody, a to w konsekwencji obniża intensywność zjawiska fotosyntezy [2].

Substancje: fosforany, tlenki azotu (NO_x), amoniak (NH_3)
Substancja referencyjna: ekwiwalent FOSFORA-NÓW (PO4-3)

Fotochemiczne tworzenie ozonu – Podczas gdy ozon stratosferyczny pełni funkcję ochronną dla Ziemi, to w warstwie troposfery jest gazem działającym destrukcyjnie. Synteza ozonu w troposferze określaną jest często jako powstawanie letniego smogu oraz prowadzi ona do niszczenia roślinności i materiałów. Objawem jest powstanie gryzącego smogu fotochemicznego, który podrażnia oczy, nos i gardło oraz powoduje u ludzi, zwierząt i roślin efekty toksyczne. Istnieje również pojęcie smogu zimowego, który jest mieszaniną mgły, dymu i spalin, który działa szkodliwie na układ oddechowy [2].

Substancje: węglowodory, tlenki azotu (NO_x)

Substancja referencyjna: ekwiwalent ETYLENU (C_2H_4)

Zubożenie warstwy ozonowej – Warstwa ozonu rozciągająca się w zakresie wysokości 10-60 km nad powierzchnią Ziemi pochłania promieniowanie nadfioletowe. Ozon maksymalną koncentrację osiąga w stratosferze na wysokości około 25 km. Promieniowanie słoneczne, zanim dotrze do powierzchni Ziemi, ulega filtracji w warstwie ozonowej, dzięki temu troposfera, która znajduje się poniżej warstwy ozonowej jest chroniona przed promieniowaniem nadfioletowym. Jednym z efektów zmniejszania ilości ozonu w stratosferze jest również większe nagrzewanie powierzchni Ziemi, a w konsekwencji zmniejszenie zbiorów (zaburzenia fotosyntezy), wzrost chorób nowotworowych skóry, choroby oczu oraz zmniejszenie planktonu w morzach i oceanach, które wpływają na łańcuch pokarmowy [2].

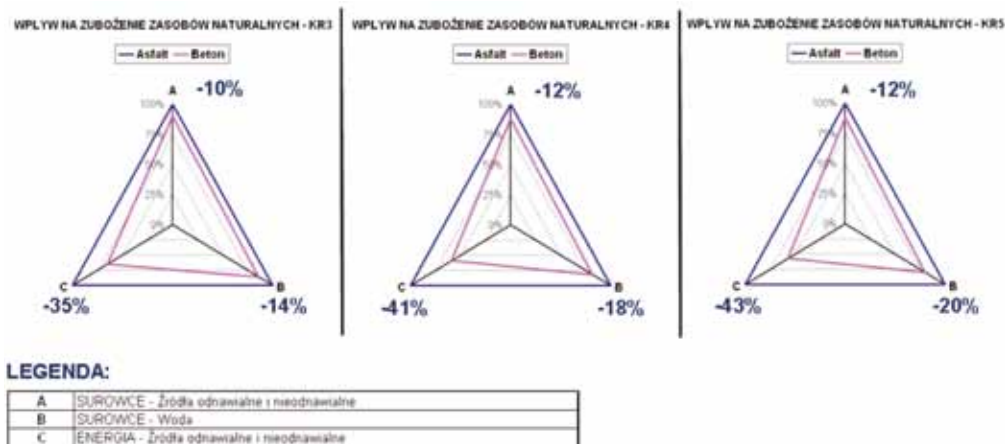
Substancje: freony (CFC, HCFC), halony, bromek metylu (CH_3Br), tetrachlorek węgla, chloroform metylowy

Substancja referencyjna: ekwiwalent TRÓJCHLOROFLUORO-METANU (CFC-11)

Wpływ na środowisko człowieka i na jakość środowiska naturalnego – Ludzie zamieszkujący obszary w pobliżu ruchliwych dróg są narażeni na duże ryzyko chorób układu oddechowego. Szczególnie niebezpieczny jest benzen i cząsteczki powstające przy spalaniu oleju napędowego. Nawet najniższy poziom zanieczyszczenia benzenem powoduje zwiększenie ryzyka zapadalności na nowotwory.

Metale emitowane do atmosfery w postaci pyłów mogą przemieszczać się w powietrzu w zależno-

Rys. 3. Wyniki LCA – Wpływ na zużycie zasobów naturalnych dla kategorii ruchu KR3-KR5
* – Na podstawie obliczeń dla wariantu z nawierzchnią betonową na cemencie CEM III/A 42,5 LH/HSR/NA



ści od rozmiarów cząstek i warunków atmosferycznych. Pyły zawieszone w powietrzu mogą być wdychane przez ludzi, a następnie dostają się do układu krwionośnego. Podobnie jest w przypadku roślin, gdzie są wchłaniane przez liście i dostają się do ich tkanek. Pyły opadające bezpośrednio do wód albo za pośrednictwem wód opadowych mogą reagować z substancjami zawartymi w wodzie lub osadzać się na dnie, gdzie wchodzi w reakcję z osadami [2].
Substancje: związki chlorowcoorganiczne, metale ciężkie, polichlorowane bifenyle (PCB), DCB, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (PAH)
Substancja referencyjna: ekwiwalent 1,4-DICHLOROBENZENU (DCB, C₆H₄Cl₂)

WYNIKI OCENY CYKLU ŻYCIA

ZUBOŻENIE ZASOBÓW NATURALNYCH

Wyniki analizy LCA w zakresie wpływu na zużycie surowców naturalnych zostały przedstawione na rys. 3. Jeżeli przyjmiemy, że układem odniesienia jest wpływ, jaki wywiera droga asfaltowa (100%), to będziemy mogli zobaczyć, jak procentowo plasuje się w danej kategorii droga betonowa. Jak można zaobserwować w każdej z kategorii wpływu na zużycie zasobów naturalnych droga betonowa wywiera mniejszy wpływ na środowisko:
A) SUROWCE – Źródła odnawialne i nieodnawialne – mniejszy wpływ na środowisko drogi betonowej w stosunku do drogi asfaltowej o 10-12% (w zależności od kategorii ruchu)
B) SUROWCE – Woda nieodnawialna – mniejszy wpływ na środowisko drogi betonowej w stosunku

ku do drogi asfaltowej o 14-20% (w zależności od kategorii ruchu)

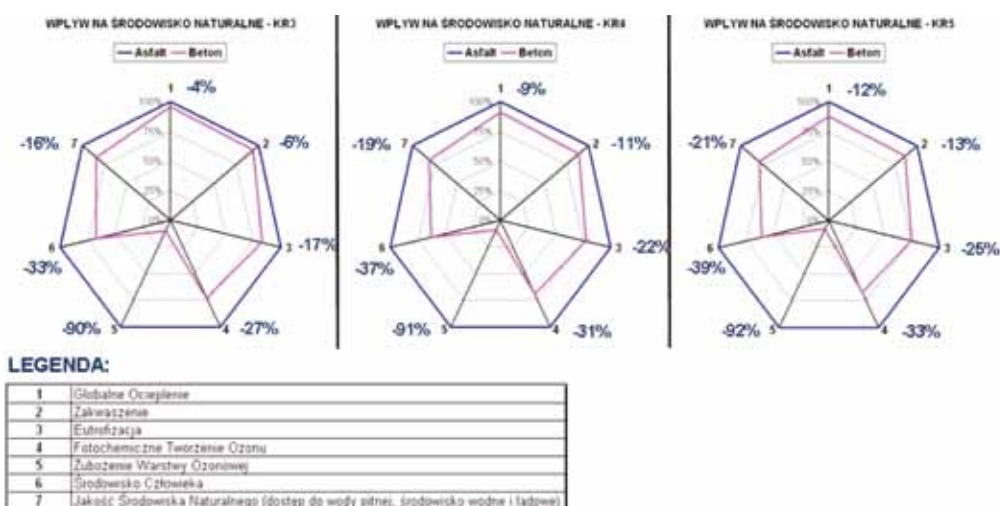
C) SUROWCE – Źródła odnawialne i nieodnawialne – mniejszy wpływ na środowisko drogi betonowej w stosunku do drogi asfaltowej o 35-43% (w zależności od kategorii ruchu).

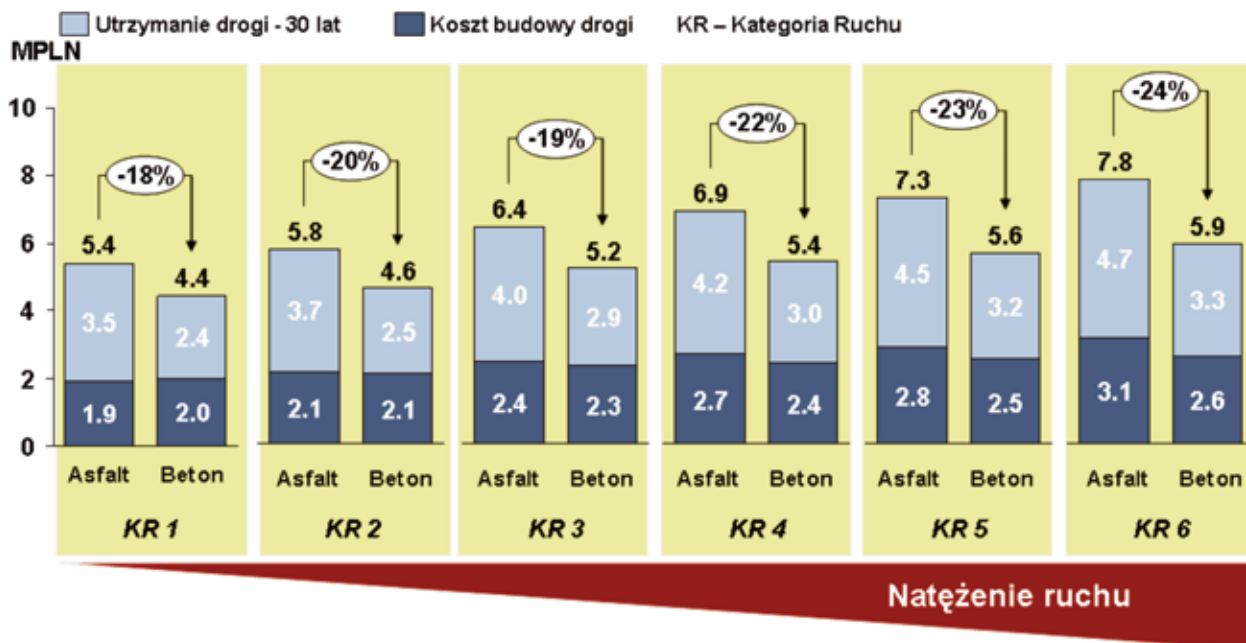
WPŁYWY NA ŚRODOWISKO

Wyniki analizy LCA w zakresie wpływu na środowisko naturalne zostały przedstawione na rys. 4. Jak można zaobserwować również w tym przypadku droga betonowa wypada korzystniej w stosunku do drogi asfaltowej:

- 1) globalne ocieplenie – mniejszy wpływ na środowisko drogi betonowej w stosunku do drogi asfaltowej o 4-12% (w zależności od kategorii ruchu)
- 2) zakwaszenie – mniejszy wpływ na środowisko drogi betonowej w stosunku do drogi asfaltowej o 6-13% (w zależności od kategorii ruchu)
- 3) eutrofizacja – mniejszy wpływ na środowisko drogi betonowej w stosunku do drogi asfaltowej o 17-25% (w zależności od kategorii ruchu)
- 4) fotochemiczne tworzenie ozonu – mniejszy wpływ na środowisko drogi betonowej w stosunku do drogi asfaltowej o 27-33% (w zależności od kategorii ruchu)
- 5) zużycie warstwy ozonowej – mniejszy wpływ na środowisko drogi betonowej w stosunku do drogi asfaltowej o 90-92% (w zależności od kategorii ruchu)
- 6) środowisko człowieka – mniejszy wpływ na środowisko drogi betonowej w stosunku do drogi asfaltowej o 33-39% (w zależności od kategorii ruchu)

Rys. 4. Wyniki LCA – Wpływ na środowisko dla kategorii ruchu KR3-KR5
* – Na podstawie obliczeń dla wariantu z nawierzchnią betonową na cemencie CEM III/A 42,5 LH/HSR/NA





Rys. 5. Łączny koszt budowy, utrzymania i remontów drogi dla kategorii ruchu KR1-KR6 w okresie 30 lat eksploatacji

7) jakość środowiska naturalnego – mniejszy wpływ na środowisko drogi betonowej w stosunku do drogi asfaltowej o 16-21% (w zależności od kategorii ruchu). W przypadku analizy LCA można zaobserwować następującą zależność: im wyższa kategoria ruchu, tym mniejszy wpływ na zubożenie surowców i środowisko naturalne drogi betonowej w porównaniu do drogi asfaltowej.

KOSZTY BUDOWY, REMONTÓW I UTRZYMANIA DRÓG

Dla wszystkich kategorii ruchu (od KR1 do KR6) zostały obliczone również koszty budowy, utrzymania i napraw drogi w technologii betonowej i asfaltowej w okresie 30 lat eksploatacji. Do kalkulacji zostały przyjęte średnie ceny z Sekocenbud za III kwartał 2010, a wyniki przeprowadzonej analizy przedstawione są na rys. 5. Można zaobserwować, że im wyższa kategoria ruchu, tym wyższy koszt budowy, remontów i utrzymania drogi asfaltowej w porównaniu do wydatków ponoszonych na budowę, remonty i utrzymanie drogi betonowej. Różnica w całkowitych kosztach to wielkość od 18 do 24% na korzyść drogi betonowej. Na rys. 6 i rys. 7 można zobaczyć porównanie kosztów w rozbiciu na koszt budowy oraz na koszt remontów i utrzymania drogi. Począwszy od kategorii ruchu KR2 koszty wybudowania drogi betonowej jest niższy niż drogi asfaltowej i zawiera się po-

między 2% (KR 2) a 17% (KR 6). Natomiast koszty utrzymania i remontów drogi betonowej jest około 28-30% niższy niż drogi o nawierzchni asfaltowej.

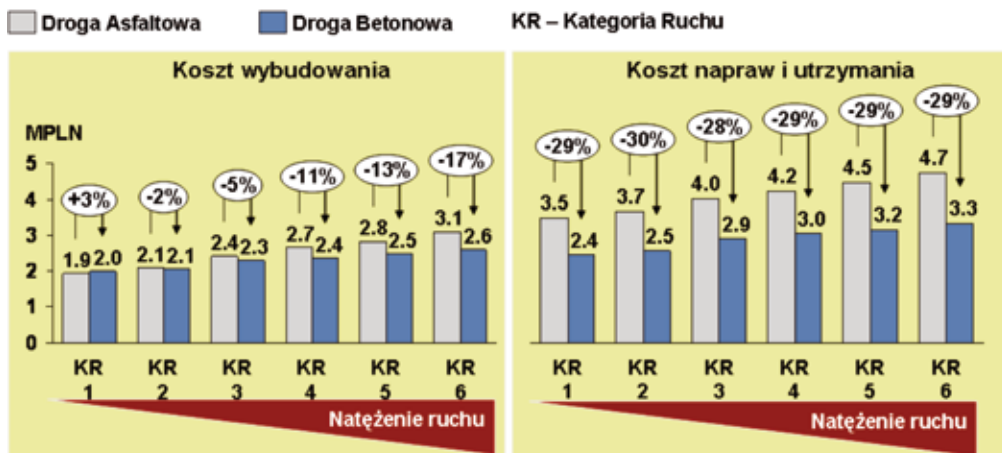
PODSUMOWANIE

Podsumowując uzyskane wyniki, powinniśmy sobie zadać pytanie, czy nas, jako społeczeństwo, stać na niebudowanie dróg betonowych i to zarówno pod kątem kosztowym jak i pod kątem naszego wpływu na środowisko naturalne.

mgr inż. Łukasz Szabat
CEMEX Polska Sp. z o.o.
Dział Jakości Betonu i Kruszywy

LITERATURA:

- 1 Katarzyna Grzesik, *Wprowadzenie do oceny cyklu życia (LCA) – nowej techniki w ochronie środowiska*. Kraków, *Inżynieria Środowiska* – 2006, tom 11, zeszyt 1, str. 101-113
- 2 Jan Górzniński, *Podstawy analizy środowiskowej wyrobów i elementów*. Warszawa, *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, 2007
- 3 PN-EN ISO 14040:2009, *Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura*. Warszawa, PKN, 2009
- 4 PN-EN ISO 14044:2009, *Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne*. Warszawa, PKN, 2009



Rys. 6. Łączny koszt budowy drogi

Rys. 7. Koszty utrzymania i remontów drogi dla kategorii ruchu KR1-KR6 w okresie 30 lat eksploatacji.