

KOLANEK Czesław<sup>1</sup>  
ZAJĄC Mateusz<sup>1</sup>  
ZAJĄC Paweł<sup>1</sup>

## ANALIZA „CYKLU ŻYCIA” NAWIERZCHNI AUTOSTRADOWYCH W POLSCE

*Alternatywą dla nawierzchni mineralno-asfaltowych są nawierzchnie betonowo-cementowe, których historia rozwoju jest równie ciekawa co historia rozwoju nawierzchni asfaltowych. Prekursorami tej techniki budowy dróg byli Niemcy, którzy we Wrocławiu w 1888 roku wybudowali pierwszą nawierzchnię z makadamu cementowego. Współczesna technika budowy nawierzchni betonowych pozwala na sporządzanie gotowej mieszanki w zautomatyzowanych węzłach betoniarskich rozkładanych w pobliżu placu budowy. Referat dotyczy analizy cyklu życia nawierzchni autostradowych, poczynając od identyfikacji metod pozyskania surowców przez technologie budowy i naprawy, po unieszkodliwianie odpadów związanych z ich naprawą czy modernizacją.*

## ANALYSIS OF THE 'CYCLE OF LIFE' HIGHWAY SURFACE IN POLAND

*An alternative to asphalt pavement surfaces are concrete and cement, which the history of the development is as interesting as the history of the development of asphalt pavements. Precursors of this technique, the construction of roads were Germans, who in Wrocław in 1888 built the first surface of the cement makadamu. Modern technology allows the construction of concrete pavements in the preparation of ready-mixed concrete in automated folding nodes near the site. Of course, the great evolutionary leap has been made also in the area of paving. The paper concerns the analysis of highway pavement life cycle, from the identification of methods of obtaining raw materials for construction and repair technologies, and disposal of waste associated with their repair or modernization.*

### 1. WSTĘP

Narzędziem, które wykorzystano do analizy nawierzchni autostradowych jest metoda LCA. Pozwala ona na przeanalizowanie dowolnego produktu, którym w tym przypadku są nawierzchnie drogowe pod względem żywotności traktowanej jako „analiza od kołyski do grobu”.

Drogę transportową można podzielić na wiele rodzajów: drogę powiatową, krajową, czy też ekspresową. Każdy z tych podziałów dotyczy coraz bardziej zaawansowanych

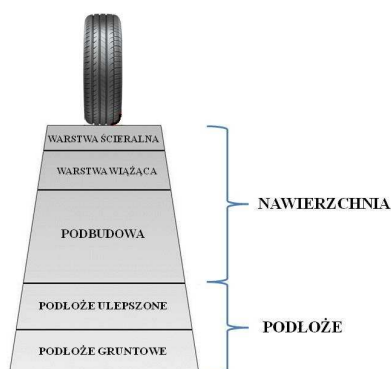
---

<sup>1</sup>Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny ul. I. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław

technologicznie przedsięwzięć budowlanych, których realizacja wymaga dużych nakładów materiałowych. W pracy rozważa się nawierzchnie autostradowe w Polsce.

## 2. NAWIERZCHNIE DROGOWE

Nawierzchnia drogowa to zespół warstw ściśle ze sobą oddziałujących, które są odpowiednio ułożone na naturalnym lub ulepszonym podłożu gruntowym [17]. Konstrukcje nawierzchni różnią się od siebie wieloma czynnikami. Zawsze jednak projektowane są w oparciu o normy. Rysunek 1 przedstawia ogólny schemat ułożenia kolejnych warstw konstrukcji drogowej.



Rys.1. Warstwy konstrukcji drogowej. [11].

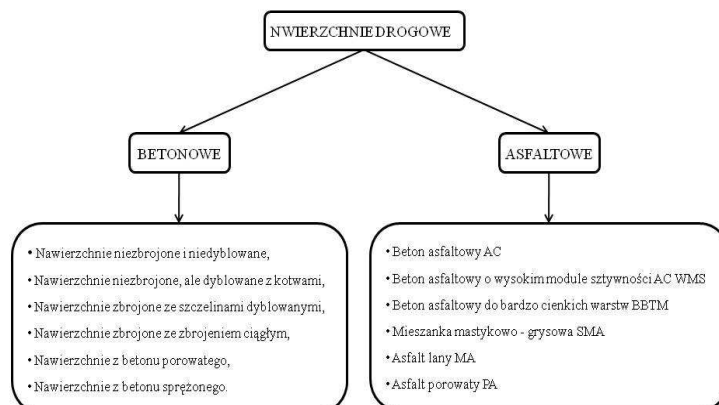
Podłoże ulepszone jest warstwą lub zespołem warstw znajdujących się bezpośrednio pod konstrukcją nawierzchni drogowej. Głównym zadaniem tej warstwy jest spełnienie funkcji nośnych, zabezpieczenie nawierzchni przed działaniem wody, mrozu i przenikania cząstek podłoża [11, 17]. Ułożenie tej warstwy uwarunkowane jest właściwościami podłoża gruntowego. Jeśli podłoże gruntowe nie jest w stanie sprostać wyżej wymienionym wymaganiom to wtedy układana jest warstwa ulepszona.

Kolejną warstwą jest podbudowa, która stanowi dolną część nawierzchni, jej głównymi zadaniami jest przenoszenie obciążeń pochodzących od ruchu na podłoże. Warstwa ta może być podzielona na podbudowę zasadniczą oraz podbudowę pomocniczą co uwarunkowane jest poprzez sposób przenoszenie obciążenia na podłoże.

Warstwa wiążąca służy do lepszego rozłożenia naprężeń w nawierzchni.

Ostatnią wierzchnią warstwą to warstwa ścieralna, jej zadanie to bezpośrednie odbieranie obciążeń generowanych przez ruch drogowy [11]. W przypadku tej warstwy ważne jest odpowiednie dobranie ilościowe i jakościowe składników budulcowych oraz określenie odpowiedniego dla danej konstrukcji typu mieszanki. Główne składniki tradycyjnych mieszanek mineralnych to kruszywo, wypełniacz i lepiszcze.

Nawierzchnie drogowe można podzielić na nawierzchnie wykonane z betonu cementowego oraz asfaltu. Rysunek 2 przedstawia podział nawierzchni drogowych ze względu na rodzaj materiału z jakiego są wytwarzane.



Rys. 2. Podział nawierzchni drogowych [11, 17].

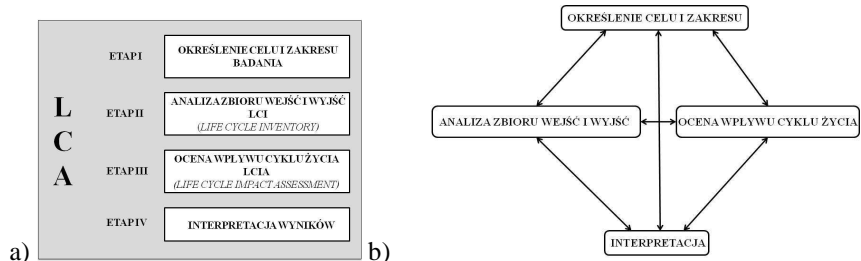
### 3. ROZPOZNANIE ZASAD ANALIZY CYKLU ŻYCIA

Podstawowym narzędziem wykorzystywanym do analizy cyklu życia jest metoda LCA (*ang. Life Cycle Assessment*), która stosowana jest od lat 90 tych XX wieku. Analiza LCA „jest procesem oceny efektów jaki dany wyrób wywiera na środowisko podczas całego życia. Poprzez wzrost efektywnego zużycia zasobów i zmniejszenie obciążeń środowiska. Ocena wpływu na środowisko może być prowadzona zarówno dla wyrobu jak i dla jego funkcji. LCA jest traktowana jako „analiza od kołyski do grobu” [9]. Podstawowymi elementami LCA są”:

- Zidentyfikowanie i ocena ilościowa obciążeń wprowadzanych do środowiska tj. zużytych materiałów, energii oraz emisji odpadów.
- Ocena potencjalnych wpływów tych obciążeń.
- Oszacowanie dostępnych opcji w celu zmniejszenia obciążeń.

Uniwersalność w tym przypadku polega na tym, że analiza cyklu życia LCA zastosowana może być do dowolnego wyrobu. LCA służy do określenia struktury powiązań pomiędzy procesami powstającymi w trakcie całego cyklu życia danego produktu. Poczynając od pozyskiwania surowców przez produkcję wyrobu oraz prace związane z jego wytworzeniem, aż do etapu, w którym następuje recykling materiałów lub ich utylizacja. Przedstawienie cyklu istnienia produktu w sposób widocznych powiązań pomiędzy wszystkimi procesami pozwala na łatwe określenie wpływów analizowanych czynników na środowisko. Aby możliwe było określenie poszczególnych powiązań niezbędna jest wnikliwa analiza cyklu powstawania produktu. Tylko takie podejście do zagadnienia LCA pozwoli na precyzyjne sformułowanie poszczególnych powiązań oraz określenie, w którym miejscu procesu powstają zagrożenia środowiskowe.

Norma ISO dzieli metodę LCA na 4 podstawowe etapy, których realizacja jest niezbędna do prawidłowego przeprowadzenia analizy. Rysunek 3a przedstawia strukturę analizy LCA.



Rys. 3. a) Struktura analizy LCA [opracowanie własne na podstawie 9],  
 b) Etapy LCA i relacje pomiędzy nimi [opracowanie własne na podstawie 5]

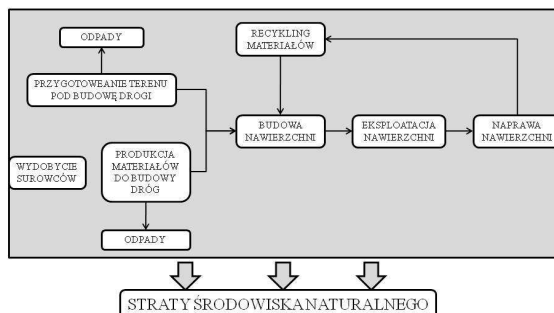
Rysunek 3b pokazuje, że pomiędzy relacjami poszczególnych etapów analizy LCA nie ma sztywnej struktury i występuje wiele sprzężeń zwrotnych co pozwala na modyfikację założeń w dowolnym stadium wykonywania analizy.

#### 4. ANALIZA CYKLU ŻYCIA NAWIERZCHNI AUTOSTRADOWYCH

Jedną z możliwości, jaką daje środowiskowa ocena cyklu życia, jest ocenienie techniki budowy oraz skutków eksploatacji produktu z punktu widzenia oddziaływania na środowisko. Badanie LCA posłużyło do określenia, czy istnieją różnice w poziomie oddziaływania na środowisko w odniesieniu do różnych nawierzchni autostradowych. Analiza LCA pozwala określić skutki ekologiczne podczas całego cyklu życia nawierzchni autostradowych. Informacje zawarte w tym badaniu dotyczą technik budowy i eksploatacji nawierzchni autostradowych. Tezą referatu jest, że nawierzchnie wykonane z betonu cementowego w mniejszym stopniu wpływają na degradację środowiska niż nawierzchnie asfaltowe. Aby możliwe było sprawdzenie tego założenia, poziom badania obejmował wpływ na środowisko związany z :

- pozyskiwaniem surowców do budowy autostrad,
- przetwarzaniem materiałów mineralnych do postaci gotowego produktu budowlanego,
- technologią budowy nawierzchni autostradowych,
- oddziaływaniem pojazdów.

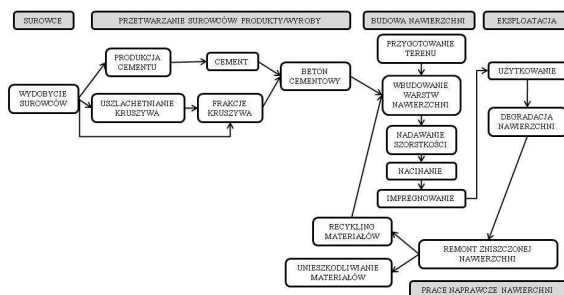
Schemat cyklu życia nawierzchni autostradowej przedstawiony jest na rysunku 4. Jest to rysunek poglądowy, który pozwala na zobrazowanie całego cyklu życia nawierzchni.



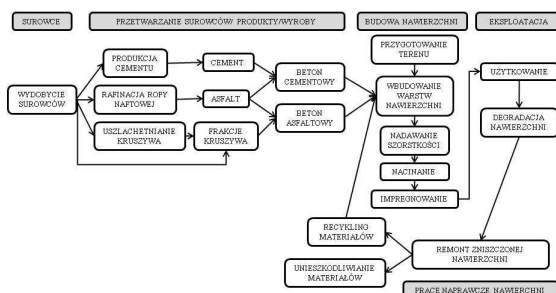
Rys. 4. Poglądowy schemat cyklu życia nawierzchni autostradowej [opracowanie własne]

Zakres badań dotyczy nawierzchni autostradowych występujących na terenie Polski. Wszystkie procesy realizowane w oparciu o etap cyklu życia tego wyrobu, takie jak produkcja, eksploatacja i końcowe zagospodarowanie, następuje na terenie Polski. Niektóre produkty oraz wyroby (nawierzchnie autostradowe) rozpatrywane będą w relacji lokalnej.

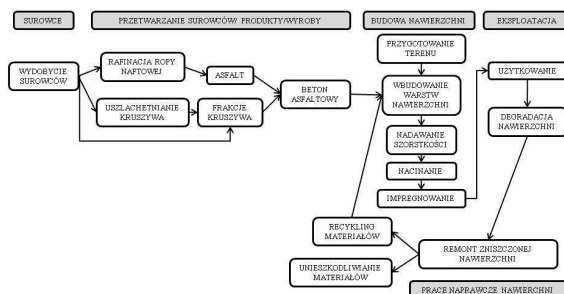
Sporządzone schematy modeli uwzględniają wejścia i wyjścia bez określenia ich znaczenia. Na rysunkach 5, 6, 7 przedstawiono schematycznie modele cyklu życia nawierzchni cementowych i asfaltowych. Ze względu na różnorodność nawierzchni autostradowych niezbędne jest sporządzenie trzech modeli LCA.



Rys. 5. Schemat modelu LCA dla nawierzchni cementowych NC1 i NC2 [opracowanie własne]



Rys. 6. Schemat modelu LCA dla nawierzchni cementowych NC3 i NC4 [opracowanie własne]



Rys. 7. Schemat modelu LCA dla nawierzchni asfaltowych NA1, NA2, NA3 i NA4 [opracowanie własne]

Wszystkie wyłączenia wejść i wyjść z modelu LCA nawierzchni autostradowych wynikają z postawionych celów i dotyczą etapów mających niewielkie znaczenie dla prowadzonego badania.

Wyłączenia dotyczą etapu zagospodarowywania terenu pod budowę drogi, ze względu na brak odpowiednich danych.

Pominięto informacje związane z transportem materiału budowlanego na miejsce wbudowywania nawierzchni, ponieważ transport prowadzony w ramach dostarczania materiałów budowlanych ma niewielkie znaczenie w ekologicznym odniesieniu do całego cyklu życia nawierzchni. Ponadto nie uwzględniono informacji nt. składników betonu cementowego i asfaltowego zakładając iż mają niewielki udział procentowy w całej mieszance mineralnej.

Przyporządkowanie danych do procesów jednostkowych pozwoliło na przedstawienie wyników w przejrzysty sposób. Głównymi częściami cyklu życia nawierzchni autostradowych, które zostaną uwzględnione w tablicy inwentarzowej, są etapy wydobywania i produkcji materiałów oraz okres eksploatacji nawierzchni. Elementy te stanowią główne strumienie powodujące degradację środowiska. Tabela 1 przedstawia wejścia i wyjścia rozumiane jako energia i materiały określonych procesów jednostkowych.

Tab. 1. Tabela inwentarzowa wejść i wyjść procesów jednostkowych [opracowanie własne]

1	Kruszywo		m <sup>3</sup>	
	Wejście		Wyjście	
	Zapotrzebowanie energii:		Emisje zanieczyszczeń:	
	Energia elektryczna	0,05 kWh	Dwutlenek węgla (CO <sub>2</sub> )	0,05 kg
2	Beton asfaltowy		m <sup>3</sup>	

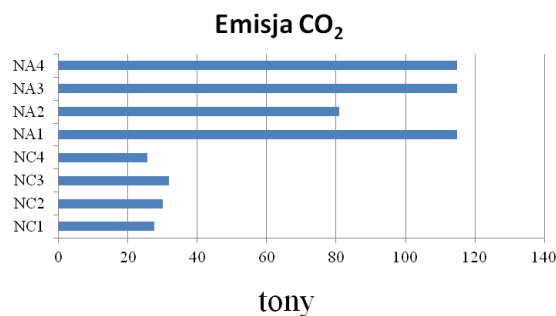
Wejście		Wyjście	
Zapotrzebowanie energii:		Emisje zanieczyszczeń:	
Gaz ziemny	1,83 m <sup>3</sup>	Dwutlenek węgla (CO <sub>2</sub> )	6,9 kg
Surowce:		Dwutlenek siarki (SO <sub>2</sub> )	1,39E-02 kg
Kruszywo	0,87 m <sup>3</sup>	Tlenki azotu w przeliczeniu na NO <sub>2</sub>	3,24E-02 kg
Wypełniacz	0,07 m <sup>3</sup>	Tlenki węgla (CO)	1,69E-03 kg
Asfalt	0,06 m <sup>3</sup>	Pył krzemowy	5,05E-03 kg
		Pył wapienny	1,40E-05 kg
		Węglowodory aromatyczne-naftalen	2,71E-05 kg
		Węglowodory aromatyczne-fenol	2,64E-06 kg
		Benzoapiren	1,94E-08 kg
<b>3</b>	<b>Beton cementowy</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	
Wejście		Wyjście	
Zapotrzebowanie energii		Emisje zanieczyszczeń:	
Energia elektryczna	11,4 kWh	Dwutlenek węgla (CO <sub>2</sub> )	4,4 kg
Surowce:		Pył cementowy	0,0012 kg
Kruszywo	0,56 m <sup>3</sup>		
Cement	0,30 m <sup>3</sup>		
Woda	0,14 m <sup>3</sup>		
<b>4</b>	<b>Eksploatacja nawierzchni autostradowych</b>	<b>1 rok</b>	
Wejście		Wyjście	
Benzyna	Pb	Emisje zanieczyszczeń:	
Olej napędowy	On	Tlenki węgla (CO)	12557 ton

	Węglowodory (HC)	585 ton
	Tlenki azotu (NO <sub>x</sub> )	1206 ton
	HC+NO <sub>x</sub>	3294 ton
	Cząstki stałe (PM)	180 ton

## 5. OCENA WPŁYWU CYKLU ŻYCIA NAWIERZCHNI AUTOSTRADOWYCH NA ŚRODOWISKO (FAZA LCIA)

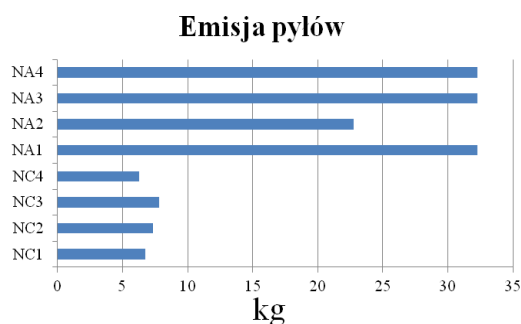
Etap analizy cyklu życia związany z oceną wpływu na środowisko naturalne w pierwszej fazie związany jest z określeniem odpowiednich kategorii wpływu, które odpowiadają emitowanym zanieczyszczeniom określonym w fazie badania LCI.

Emisja CO<sub>2</sub> przedstawiona na rysunku 8 ilustruje przekaz tego gazu do atmosfery podczas produkcji materiału potrzebnego na budowę nawierzchni autostradowych.



Rys. 8. Emisja CO<sub>2</sub> podczas budowy danej nawierzchni autostradowych na odcinku jednego kilometra [opracowanie własne]

Podczas produkcji nawierzchni autostradowych uwalniane są także pyły do atmosfery. Rysunek 9 przedstawia ilość emitowanych pyłów do atmosfery podczas produkcji materiału potrzebnego do wybudowania jednego km nawierzchni autostradowej.

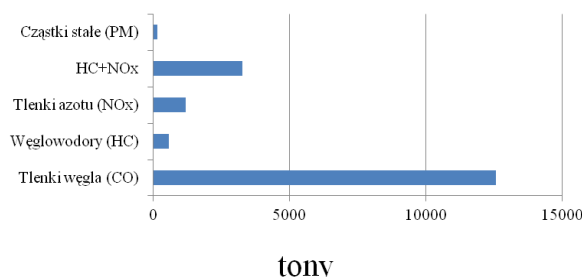


Rys. 9. Emisja pyłów podczas budowy nawierzchni autostradowych na odcinku jednego kilometra [opracowanie własne]



Etap cyklu życia związany z eksploatacją nawierzchni autostradowych to najdłuższa część żywotności nawierzchni. Dla nawierzchni wykonanych z betonu cementowego i asfaltowego, podczas eksploatacji emitowane są te same zanieczyszczenia. Rysunek 10 pokazuje ilość emitowanych zanieczyszczeń podczas roku eksploatacji nawierzchni autostradowych w Polsce.

### Zanieczyszczenia emitowane przez samochody



Rys. 10. Ilość emitowanych zanieczyszczeń podczas roku eksploatacji nawierzchni autostradowych w Polsce [opracowanie własne]

## 6. WNIOSKI

Analiza cyklu życia nawierzchni autostradowych w Polsce dostarczyła istotnych informacji na temat emitowanych zanieczyszczeń. Analizie poddane zostały nawierzchnie proponowane przez Katalog Typowych Nawierzchni sztywnych i półsztywnych dla kategorii ruchu KR6. Głównymi zanieczyszczeniami emitowanymi w czasie cyklu życia nawierzchni autostradowych są pyły, dwutlenek węgla oraz zanieczyszczenia powstające podczas eksploatacji nawierzchni generowane głównie przez samochody.

Podczas porównania wybranych typów nawierzchni, rozbieżności dotyczyły głównie ilości emitowanego zanieczyszczenia. Okazuje się, że podczas produkcji betonu asfaltowego emisja dwutlenku węgla jest 369% większa niż ma to miejsce podczas produkcji betonu cementowego.

Istotnymi zanieczyszczeniami okazały się także emitowane pyły, których emisja przy produkcji nawierzchni autostradowych jest także znacząco większa niż podczas produkcji nawierzchni betonowych.

Ostatni wniosek, który wynika z przeprowadzonej analizy cyklu życia nawierzchni autostradowych, dotyczy etapu eksploatacji nawierzchni. Podczas trwania tego etapu cyklu życia nawierzchni, generowane są największe ilości zanieczyszczeń.

Rozpoznanie i analiza sytuacji związanej z degradacją środowiska naturalnego podczas cyklu życia autostrad pozwala na zaproponowanie kilku rozwiązań. Pierwszym działaniem które powinno być zastosowane podczas podejmowania dalszych działań jest przeprowadzenie analizy LCC. Jest to analiza kosztów życia i być może właśnie w tej dziedzinie należy szukać odpowiedzi dlaczego w Polsce buduje się znacznie więcej autostrad asfaltowych mimo, że podczas ich budowy generowanych jest znacznie więcej zanieczyszczeń.

Rozwiązaniem dla zmniejszenia dużej emisji CO<sub>2</sub> podczas produkcji mas asfaltowych może być zmniejszenie temperatury produkcji mas bitumicznych. Produkcja tego materiału przy obniżonych temperaturach możliwa jest poprzez wprowadzanie do produkcji dodatków takich jak asfalt spieniony lub specjalne lepiszcze. Obniżenie temperatury produkcji mas asfaltowych o kilkanaście stopni spowodować może wiele korzyści takich jak mniejsze zużycie paliwa, szybsze stygnięcie wbudowanej mieszanki, zmniejszenie emisji gazów.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Dołbik M.: „Analiza „cyklu życia” nawierzchni autostradowych w Polsce”, Praca Politechniki Wrocławskiej nie publikowana, Wrocław, 2011.
- [2] Lewandowski, A.: „Środowiskowa ocena cyklu życia produktu na przykładzie wybranych typów pomp przemysłowych”, Akademia Ekonomiczna w Poznaniu, Poznań 2006.
- [3] Opoczyński, K.: Synteza wyników pomiaru ruchu na drogach wojewódzkich w 2010 roku.
- [4] Piłat, J., Radziszewski, R.: „Nawierzchnie asfaltowe”, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności sp. ZO.O., Warszawa 2004, 2010.
- [5] Raport o stanie technicznym dróg krajowych administrowanych przez Generalną Dyрекcją Dróg Krajowych i Autostrad”, Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2010.
- [6] Rolla, M.: "Stan dróg publicznych w Polsce", Dyrektor Departamentu Studiów, Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Kraków 17 luty 2010.
- [7] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie.
- [8] Stefańczyk, B., Mieczkowski, P.: „Mieszanki mineralno-asfaltowe wykonawstwo i budowa”, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności sp. ZO.O., Warszawa 2008, 2009.
- [9] Szrejbel, J.: "Uproszczona metoda oceny efektywności ekonomicznej przedsięwzięć drogowych i mostowych dla dróg wojewódzkich, powiatowych i gminnych", Instytut Budowy Dróg i Mostów, Warszawa 2010.
- [10] Szydło, A.: „Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego”, Polski Cement Sp. ZO.O., Kraków 2004.
- [11] Transport- Wyniki Działalności w 2009”, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2009. <http://www.gddkia.gov.pl/article/6848/siec-drog-krajowych-w-polsce>