

XIII
KONFERENCJA

2025 DNI BETONU

TRADYCJA I NOWOCZESNOŚĆ

13-15 października 2025

MONOGRAFIE TECHNOLOGII BETONU - REFERATY



dnibetonu.com

Redakcja: **Jan Deja**
Bartosz Głowacz
Paulina Gos-Błaszczyk
Patryk Jóźwiak
Dariusz Konieczny
Grzegorz Krechowiecki
Zbigniew Pilch
Bożena Środa
Zespół SPC

Skład i łamanie tekstu,
opracowanie graficzne: **AD-LINE.PL**

Projekt: **Artur Darlak**

© Copyright by Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2025

ISBN: 978-83-61331-51-3

Wydawca:  **Stowarzyszenie Producentów Cementu**
ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków
tel. +48 12 423-33-55
e-mail: wydawnictwo@polskicement.pl
www.polskicement.pl

XIII
KONFERENCJA

2025.

DNI BETONU

T R A D Y C J A I N O W O C Z E S N O Ś Ć

13-15 października 2025

**MONOGRAFIE
TECHNOLOGII
BETONU**

- REFERATY



dnibetonu.com

DROGI BETONOWE

CONCRETE ROADS



municipal concrete roads

according to actual german standards

Dipl.-Ing. Martin Peck

Gütegemeinschaft Verkehrsflächen aus Beton e. V.

main standards for concrete roads

contractual documents:

- ZTV Beton-StB „Zusätzliche technische Vertragsbedingungen“
(additional terms of contract)
- TL Beton-StB „Technische Lieferbedingungen“
(terms of delivery of building materials“)

main standards for concrete roads

contractual documents:

- ZTV Beton-StB „Zusätzliche technische Vertragsbedingungen“
(additional terms of contract)
 - standards and regulations for the execution of concrete roads
- TL Beton-StB „Technische Lieferbedingungen“
(terms of delivery of building materials)
 - quality and technical properties of building materials

main standards for concrete roads



Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen



Arbeitsgruppe Betonbauweisen

**Zusätzliche Technische
Vertragsbedingungen und Richtlinien
für den Bau von Tragschichten
mit hydraulischen Bindemitteln
und Fahrbahndecken aus Beton**

R 1

ZTV Beton-StB 07

Ausgabe 2007

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen



Arbeitsgruppe Betonbauweisen

**Technische Lieferbedingungen
für Baustoffe und Baustoffgemische
für Tragschichten mit hydraulischen
Bindemitteln und Fahrbahndecken
aus Beton**

R 1

TL Beton-StB 07

Ausgabe 2007

main standards for concrete roads



.....composed mainly for concrete highways!







RHENUS
LOGISTICS
CO-PACKER
ALBINGSTRASSE 100

ab
albin borer ag

the outlet

café



2007: first german roundabout in concrete

...standards became an important issue!



2007: first german roundabout in concrete



...standards became an important issue!

- Roads outside of highways can also be heavy loaded (most roundabouts are heavy loaded!)
- The use of the more durable concrete instead of asphalt became more and more common in some regions of germany.
- Concrete was increasingly used in roundabouts, bus traffic areas, intersections and parking areas for heavy loaded Trucks.

2007: first german roundabout in concrete

...standards became an important issue!

Code of practice for the planning, design and construction of concrete traffic areas

Merkblatt
für
Planung, Konstruktion und Bau
von Verkehrsflächen aus Beton

M VaB

Teil 1
Kreisverkehre, Busverkehrsflächen
und Rastanlagen

R 2

2013:
roundabouts,
bus traffic areas,
service areas on highways

Ausgabe 2013

Merkblatt
für
Planung, Konstruktion und Bau
von Verkehrsflächen aus Beton

M VaB

Teil 2
Stadt- und Landstraßen
sowie plangleiche Knotenpunkte mit
Hinweisen zur Baulichen Erhaltung

R 2

2015:
city roads, country roads
intersections, structural
maintenance

Ausgabe 2015

concrete roads (not in highways)

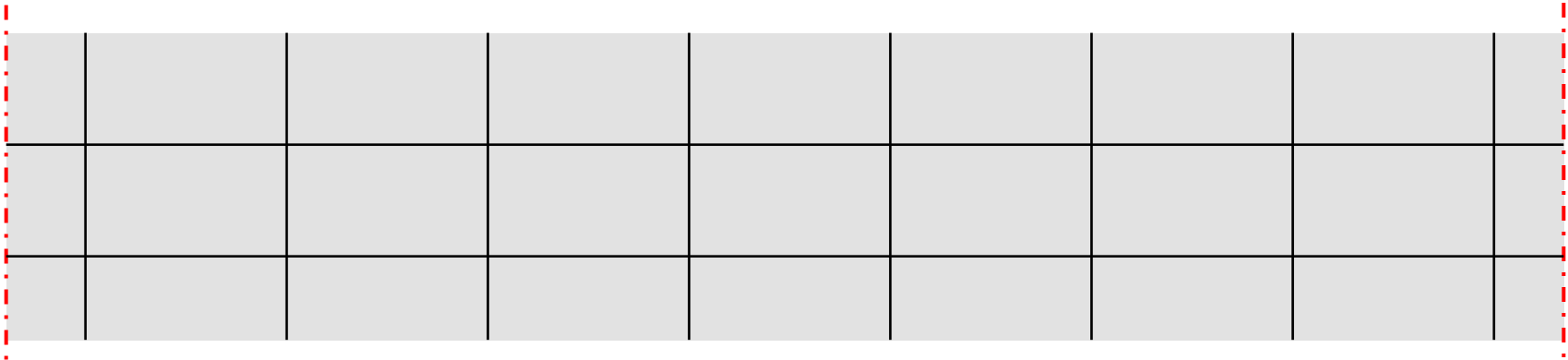
...revision and combination in 2026



highways and municipal roads in concrete - what is the difference?

➤ the design of the joint system can be much more complicated

joint system of a usual highway construction...



highways and municipal roads in concrete

- what is the difference?

- the design of the joint system can be much more complicated
- ...and in a random concrete roundabout...



highways and municipal roads in concrete - what is the difference?

- the design of the joint system can be much more complicated
- The designer has to deal with all kinds of sewer inlets, underground installations and proper height connections to surrounding levels

highways and municipal roads in concrete - what is the difference?

- the design of the joint system can be much more complicated
- The designer has to deal with all kinds of sewer inlets, underground installations and proper height connections to surrounding levels
- machinery and equipment are very different and must be properly tailored for every single project



highways and municipal roads in concrete

- what is the difference?

- the design of the joint system can be much more complicated
- The designer has to deal with all kinds of sewer inlets, underground installations and proper height connections to surrounding levels
- machinery and equipment are very different and must be properly tailored for every single project
- using readymixed concrete requires a special pattern of testing and contractual acceptance

highways and municipal roads in concrete - what is the difference?



- using readymixed concrete requires a special pattern of testing and contractual acceptance



highways and municipal roads in concrete

- what is the difference?

- the design of the joint system can be much more complicated
- The designer has to deal with all kinds of sewer inlets, underground installations and proper height connections to surrounding levels
- machinery and equipment are very different and must be properly tailored for every single project
- using readymixed concrete requires a special pattern of testing and contractual acceptance
- The number of designers and contractors with sufficient knowledge is still limited (technical guidance is necessary!)

highways and municipal roads in concrete - what is the difference?



- The number of designers and contractors with sufficient knowledge is still limited (technical guidance is necessary!)

Unfortunately this also applies to the technical representatives of the client!



main standards for concrete roads

use of Concrete instead of asphalt still increases

- The use of concrete in municipal roads is basically established and increasing.
- Standards and contractual documents are available.
- The coming new versions of
 - the main standards
 - and of the Leaflet „Code of practice for the planning, design and construction of concrete traffic areas”

Contain both coordinated instructions and regulations für concrete roads outside of highways.

dr inż., arch. Małgorzata Ruszczak
TPA Sp. z o.o.

Zastosowanie georadaru w celu planowania naprawy i monitorowania efektów remontu podbudowy nawierzchni betonowej

Application of ground-penetrating radar for planning repairs and monitoring the effects of concrete pavement rehabilitation

Streszczenie

Nawierzchnie betonowe stanowią istotny element infrastruktury drogowej, szczególnie na trasach o dużym natężeniu ruchu oraz tam, gdzie kluczowa jest odporność na obciążenia dynamiczne. Mimo wysokiej wytrzymałości, z czasem ulegają one różnorodnym formom degradacji – od spękań i ubytków powierzchniowych po głębsze defekty strukturalne, które mogą prowadzić do obniżenia nośności i bezpieczeństwa użytkowania. Skuteczna diagnostyka tych uszkodzeń, oparta na odpowiednio dobranych metodach badawczych, jest niezbędna dla racjonalnego planowania działań utrzymaniowych i modernizacyjnych.

W ostatnich latach georadar (GPR – Ground Penetrating Radar) zyskuje na znaczeniu jako narzędzie diagnostyczne w ocenie stanu nawierzchni drogowych, między innymi w zakresie wykrywania pustek i niedogęszczeń pod płytami betonowymi. Tego rodzaju defekty stanowią istotne zagrożenie dla trwałości nawierzchni, prowadząc do ich deformacji i pęknięcia. Tradycyjne metody wykrywania pustek, takie jak odwierty, są inwazyjne, kosztowne i utrudniają organizację ruchu. Technologia GPR umożliwia szybkie i nieniszczące pozyskiwanie informacji o strukturze podbudowy drogowej, opierając się na kontrastach właściwości dielektrycznych pomiędzy poszczególnymi warstwami.

W referacie przedstawiono przykład zastosowania georadaru do lokalizacji pustek pod betonową nawierzchnią drogową. Analizie poddano amplitudy fal odbitych na granicy nawierzchniowa płyta betonowa – podbudowa, przyjmując założenie, że kontrast dielektryczny (między betonem a powietrzem) odpowiada potencjalnym uszkodzeniom podbudowy. W celu kalibracji wyników wykonano odwierty punktowe, które umożliwiły określenie wartości progowych amplitud odpowiadającym niedogęszczeniom. Wytypowano fragmenty nawierzchni do działań remontowych, obejmujących iniekcje geopolimerowe, wymianę uszkodzonych płyt na prefabrykaty oraz betonowanie betonem szybkosprawnym.

Ocena efektywności napraw została przeprowadzona na podstawie pomiarów georadarowych wykonanych przed, bezpośrednio po oraz trzy lata po zakończeniu remontu. Zarejestrowano istotne zmniejszenie amplitud fal odbitych, co wskazuje na eliminację pustek

i poprawę warunków podparcia płyt. Dalszą poprawę stanu technicznego nawierzchni odnotowano po odbudowie odwodnienia. Kontynuacja monitoringu zaplanowana jest na bieżący rok.

Przeprowadzone analizy potwierdzają wysoką skuteczność wykorzystania georadaru zarówno w diagnostyce uszkodzeń, jak i w ocenie efektywności działań naprawczych. Technologia GPR stanowi cenne narzędzie wspierające zarządzanie infrastrukturą drogową, pozwalając na podejmowanie świadomych i skutecznych decyzji utrzymaniowych.

Abstract

Concrete pavements are a crucial component of road infrastructure, particularly on high-traffic routes and where resistance to dynamic loads is essential. Despite their high durability, they eventually suffer various forms of degradation — from surface cracking to deeper structural failures that can reduce load-bearing capacity and user safety. Effective diagnostics based on appropriate testing methods is crucial for rational planning of maintenance and modernization activities.

In recent years, Ground Penetrating Radar (GPR) has gained importance as a tool for diagnosing road pavements, especially in detecting voids and insufficient compaction beneath concrete slabs. Such defects pose a significant threat to pavement durability, often leading to deformation and cracking. Traditional void detection methods, like core drilling, are invasive, costly, and disruptive to traffic. GPR, on the other hand, enables fast, non-destructive acquisition of subsurface data based on dielectric property contrasts between layers.

This paper presents an example of using GPR to locate voids beneath a concrete road surface. The analysis focused on the amplitudes of waves reflected at the slab – subbase interface, based on the assumption that the highest dielectric contrast (between concrete and air) corresponds to potential subbase deterioration. To calibrate the data, core drilling was carried out, which helped define amplitude threshold values. Sections of the pavement were selected for repair using geopolymer injection, slab replacement with precast elements, and rapid-set concrete laying.

The effectiveness of the repairs was assessed using GPR surveys conducted before, after, and three years post-repair. A significant decrease in reflection amplitudes was recorded, indicating void elimination and improved slab support. Further improvement was observed after drainage rehabilitation. Continued monitoring is planned for the current year.

The analyses confirm the high effectiveness of GPR both in damage diagnostics and in evaluating the performance of repair interventions. GPR technology is a valuable tool for road infrastructure management, enabling informed and efficient maintenance decisions.

1. Przyczyny i konsekwencje utraty podparcia pod płytami betonowymi

Jednym z kluczowych czynników prowadzących do uszkodzeń nawierzchni drogowych betonowych jest niewłaściwe podparcie płyt, wynikające z uszkodzeń warstw podbudowy.

Do przyczyn wadliwości podbudowy zalicza się między innymi:

(1) Błędy projektowo- wykonawcze:

- Wady materiałowe – użycie materiałów o niewłaściwej frakcji lub składzie może utrudnić prawidłowe zagęszczanie podbudowy.

(2) Błędy wykonawcze:

- Nieodpowiednia technologia zagęszczania – użycie niewłaściwego sprzętu, zbyt słabe lub nierównomierne zagęszczenie podczas układania warstw materiału podbudowy;
- Złe warunki pogodowe – prace prowadzone podczas opadów, dużej wilgotności lub mrozu mogą uniemożliwić prawidłowe zagęszczenie;
- Nierównomierne rozłożenie materiału – zbyt grube lub nierówne warstwy podbudowy utrudniają skuteczne zagęszczenie;
- Brak kontroli jakości – niedostateczny nadzór oraz brak pomiarów zagęszczenia prowadzą do pozostawienia słabo zagęszczonych stref.

(3) Błędy utrzymaniowe:

- Niewłaściwe utrzymanie szczelin dylatacyjnych – zaniechanie napraw dylatacji prowadzi do ich uszkodzenia, co umożliwia wnikanie wody i wymywanie materiału podbudowy;
- nieskuteczne odwodnienie nawierzchni – brak efektywnego systemu odprowadzania wód opadowych i roztopowych powoduje podmywanie warstw podbudowy.

Brak właściwego podparcia płyt betonowych jest jedną z głównych przyczyn degradacji nawierzchni betonowych. Niezagęszczona lub słabo zagęszczona podbudowa, zawierająca pustki i nierówności, prowadzi do nierównomiernego przenoszenia obciążeń. W efekcie dochodzi do lokalnych przeciążeń, pękania płyt, ich osiadania, a w dalszej konsekwencji – degradacji całej konstrukcji nawierzchni.

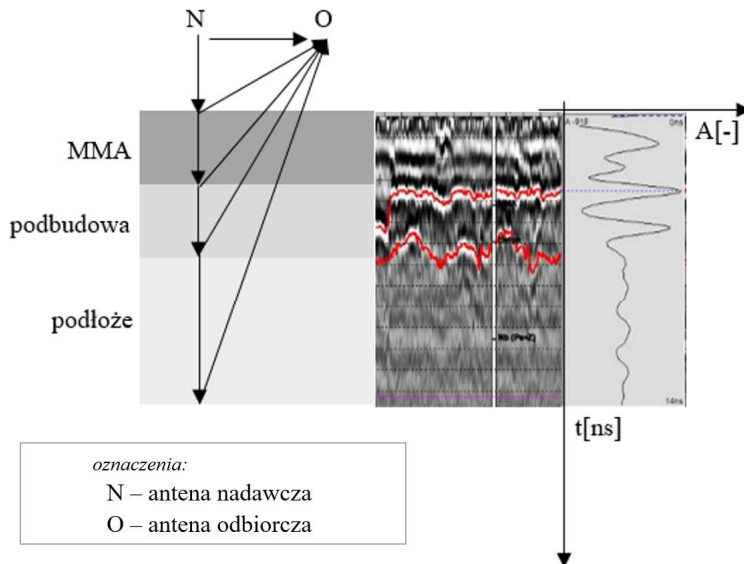
2. Diagnostyka nawierzchni drogowych z wykorzystaniem georadaru (GPR)

2.1 Podstawy metody GPR w inżynierii drogowej

Georadar (GPR – Ground Penetrating Radar) to nieinwazyjna metoda diagnostyczna wykorzystująca fale elektromagnetyczne do badania struktury materiałów. W inżynierii drogowej GPR umożliwia szybkie i bezinwazyjne pozyskiwanie danych o budowie konstrukcji drogi, co wspiera efektywne planowanie remontów oraz monitoring stanu technicznego dróg. Technologia ta znajduje zastosowanie m.in. do: oceny grubości i jednorodności materiałów [2], [3], wykrywania defektów takich jak niedogęszczenia i pustki [4], [5] identyfikacji osiadań, zawilgoceń [2], [6], [7], czy odspojień warstw [8].

Podstawą działania georadaru jest emisja fal elektromagnetycznych o wysokiej częstotliwości, które penetrują badaną konstrukcję [9]. Fale te ulegają odbiciu na granicach

materiałów o różnych właściwościach elektrycznych (Rys. 1), w szczególności o odmiennych wartościach stałej dielektrycznej.

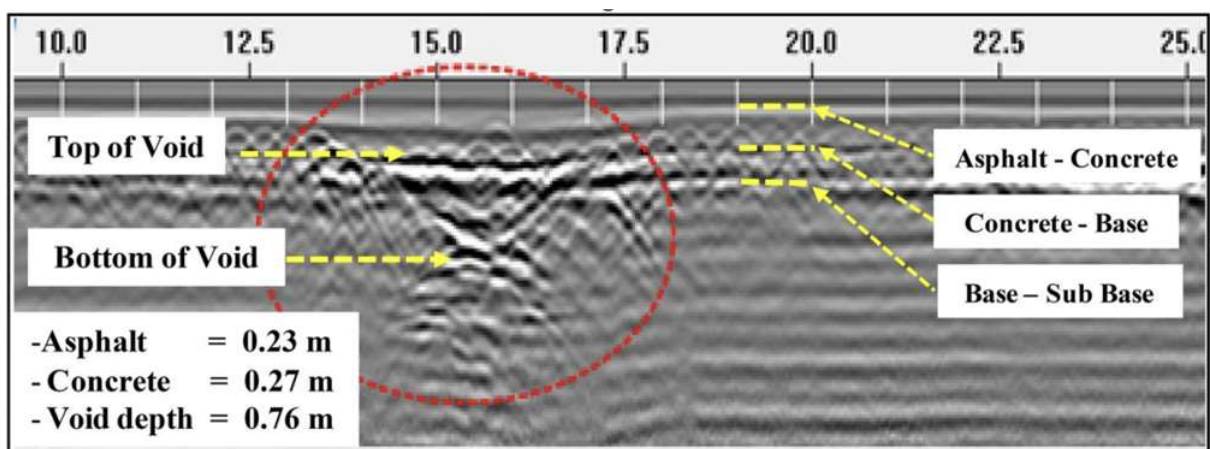


Rys. 1. Uproszczona metoda działania GPR (autor: M. Ruszczak)

Analiza sygnałów odbitych pozwala na tworzenie obrazów budowy wewnętrznej strukturalnej ośrodka oraz identyfikację nieciągłości.

2.2 Lokalizacja pustek pod płytami betonowymi metodą georadarową

Do lokalizowania pustek wewnętrznych metodą georadarową tradycyjnie wykorzystuje się analizę radarogramów pod kątem zmian przebiegu horyzontów refleksyjnych (Rys. 2) [10]. Obniżenie tych horyzontów w obrębie poszczególnych warstw może wskazywać na nieciągłości strukturalne, takie jak pustki czy rozluźnienia. Choć metoda ta jest skuteczna, jej stosowanie jest wysoce czasochłonne – wymaga ręcznej interpretacji sygnału wzdłuż całej trasy pomiarowej z gęstej siatki profili.



Rys. 2. Pustka zlokalizowana metodą georadarową (GPR). Obecność pustki potwierdzono poprzez wykonanie odwiertu. Źródło [10].

Zgodnie z informacją przedstawioną w punkcie 2.1, kluczową właściwością fizyczną materiałów, mającą wpływ na propagację fal elektromagnetycznych emitowanych przez georadar, jest ich stała dielektryczna. Na wartość stałej dielektrycznej wpływa szereg czynników, m. in. skład chemiczny i struktura krystaliczna minerałów ośrodka, jego zagęszczenie, zawilgocenie porowatość, temperatura, a nawet częstotliwość fali elektromagnetycznej, za pomocą której oznacza się przenikalność dielektryczną ośrodka. Mechanizm zmian stałych dielektrycznych w zależności od w/w czynników autorka szczegółowo opisała w [2]. Ze względu na mnogość czynników wpływającej na wartość stałej dielektrycznej należy obliczać ją każdorazowo dla ośrodka poddawanego analizie.

Orientacyjne wartości stałych dielektrycznych materiałów związanych z inżynierią nawierzchni drogowych podano w poniższej tabeli (Tab. 1) [11].

Ośrodek	Stała dielektryczna (ϵ_r) [-]
powietrze	1
woda	81
lód	4
granit	5-7
torf	40-60
glina	25-40
muł	16-30
piasek pylasty	7-10
piasek	4-6
żwir	4-7
gliny zwałowe	8-18
beton	8-10
izolacja	2-2,5
mma	4-8
mma z żużlem	8-15
podbudowa związana cementem	8-10
podbudowa żwirowa	12-14
podbudowa z kruszywa	6-8
nowa konstrukcja nawierzchni, sucha	5
stara konstrukcja nawierzchni, mokra	7-8
droga żwirowa	7-9
nowa konstrukcja nawierzchni, zamarznięta	5
stara konstrukcja nawierzchni, zamarznięta	6

Tab. 1 Stałe dielektryczne wybranych ośrodków na podstawie [11].

Przykładowo, beton ma przenikalność elektryczną rzędu 8–10, podczas gdy powietrze ma wartość bliską 1. Tak duży kontrast dielektryczny skutkuje wyraźnym wzmocnieniem amplitudy odbicia sygnału GPR na granicy ośrodków płyta betonowa - pustka. Zjawisko to stanowi podstawę metody, która pozwala na bardziej zautomatyzowaną analizę danych GPR. Zamiast ręcznego przeglądania radarogramów profil po profilu, możliwe staje się szybkie wskazanie obszarów anomalnych na podstawie podwyższonych wartości amplitudy.

W opisanym niżej studium przypadku wykorzystano tę zależność fizyczną do opracowania podejścia umożliwiającego szybką i zautomatyzowaną detekcję pustek pod płytami betonowymi. Dzięki analizie rozkładu amplitud na zadanej głębokości możliwe jest

wygenerowanie mapy lokalizacji potencjalnych pustek wymagających dalszej diagnostyki lub interwencji.

3. Studium przypadku – georadar w planowaniu naprawy i ocenie efektów remontu nawierzchni betonowej

3.1 Stan nawierzchni przed przystąpieniem do remontu

Poddano diagnostyce odcinek o długości około 2,5 km składający się z około 500 płyt betonowych. Ocena wizualna nawierzchni betonowej wykazała obecność licznych uszkodzeń, takich jak pęknięcia (Rys. 3) oraz klawiszowanie płyt, które sugerowały możliwe defekty podbudowy, w tym potencjalne pustki pod płytami.



Rys. 3. Wybrane uszkodzenia nawierzchni betonowej – pęknięcia płyt (archiwum własne).

Dodatkowo zaobserwowano zły stan dylatacji – uszkodzone i niewłaściwie utrzymane szczeliny sprzyjały przenikaniu wody do warstw podbudowy. Zaniedbane rowy oraz niesprawny system odwodnienia prowadziły do podmywania podłoża, co mogło powodować dalsze rozluźnienie i degradację konstrukcji nawierzchni.

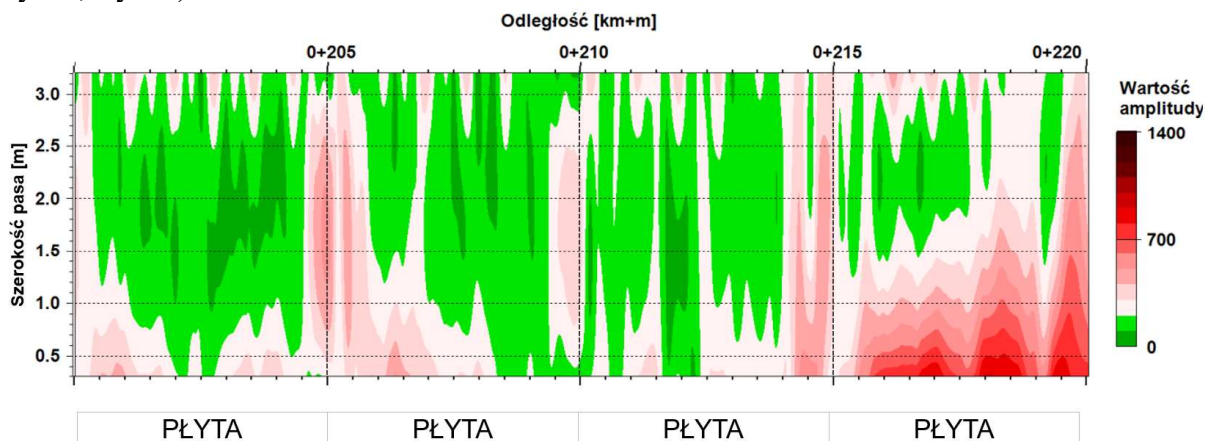
W związku z powyższymi obserwacjami podjęto decyzję o zastosowaniu metody georadarowej w celu weryfikacji obecności pustek oraz określenia ich lokalizacji. Badania georadarowe miały na celu potwierdzenie przypuszczeń wynikających z oceny wizualnej oraz dostarczenie dokładnych danych niezbędnych do zaplanowania skutecznych działań naprawczych.

3.2 Diagnostyka przedremontowa

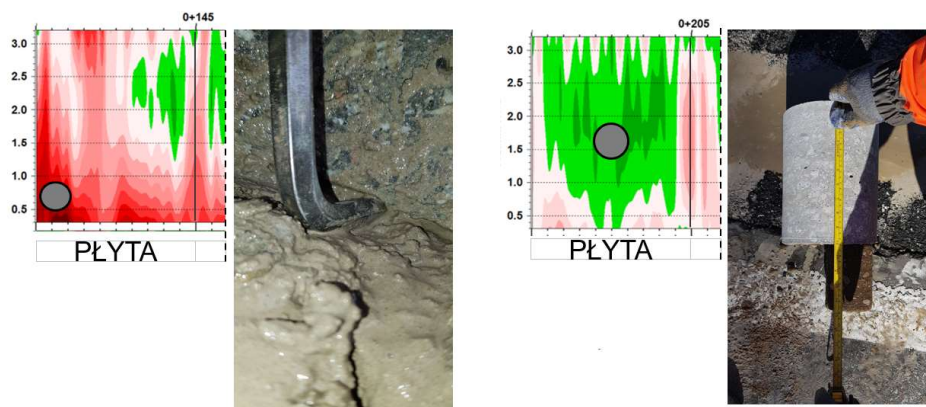
W ramach przygotowań do remontu nawierzchni betonowej wykonano pomiary georadarowe w układzie równoległych profili, rozmieszczonych co około 1 metr. Tak zaprojektowana siatka umożliwiła szczegółową ocenę stanu podbudowy pod płytami betonowymi.

Na podstawie analiz próbek rdzeniowych wyznaczono stałe dielektryczne materiałów: dla betonu – 9, a dla prawidłowo zagęszczonej podbudowy – 10. Dla porównania, jak podkreślono w punkcie 2.2, powietrze ma wartość bliską 1 (Tab. 1). Tak wyraźny kontrast dielektryczny skutkuje wzmocnieniem amplitudy sygnału odbitego na granicy płyta–pustka lub płyta–zdegradowana podbudowa. Zjawisko to stanowi podstawę identyfikacji obszarów pozbawionych właściwego podparcia.

Dzięki analizie rozkładu amplitud sygnału na zadanej głębokości możliwe było opracowanie map potencjalnych pustek, stanowiących narzędzie do wstępnej lokalizacji defektów. W celu zwiększenia wiarygodności wyników przeprowadzono kalibrację z wykorzystaniem odwiertów wykonanych w punktach o różnych poziomach amplitudy – niskim, średnim i wysokim. Pozwoliło to na precyzyjne określenie wartości progowych amplitudy odpowiadających rzeczywistemu występowaniu uszkodzeń podbudowy (Rys. 4, Rys. 5, Rys. 6).



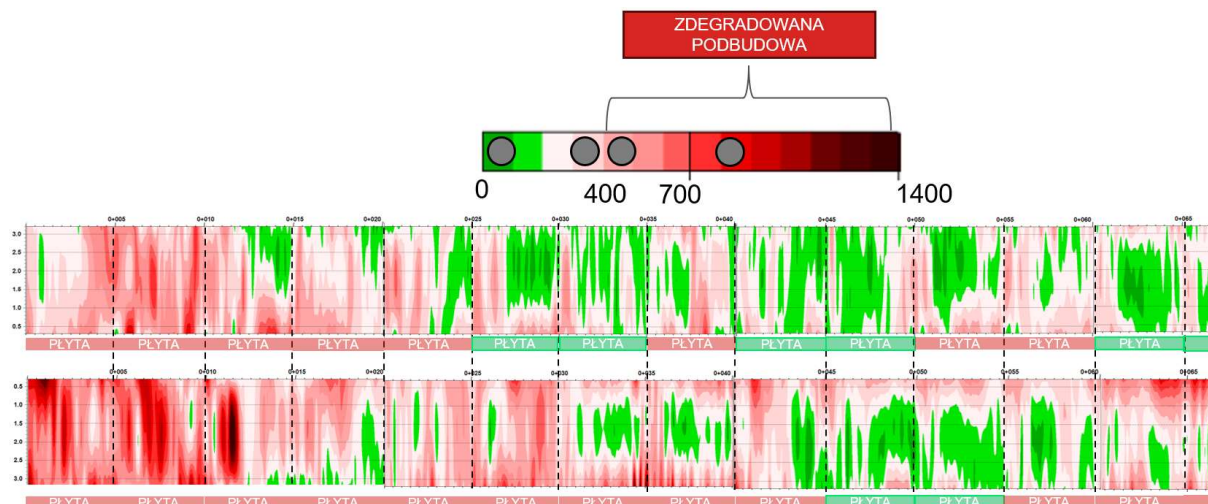
Rys. 4. Fragment mapy amplitud (pustek) przed kalibracją.



Rys. 5. Odwierty kontrolne w miejscu wysokich (strona lewa) i niskich (strona prawa) amplitud. Kropką zaznaczono lokalizację odwiertu. Wyniki odwiertów potwierdziły silną korelację między wysokimi amplitudami sygnału odbitego a obecnością pustek pod płytami betonowymi. Z kolei niskie amplitudy wskazywały na zachowane podparcie nawierzchni.

Uzupełnieniem diagnostyki georadarowej były badania HWD (Heavy Falling Weight Deflectometer), które pozwalają na określenie parametrów mechanicznych podbudowy (m.in.

wskaźnika LTE, ugięcia centralnego, modułu sprężystości). Wyniki tych badań nie są szczegółowo omawiane w niniejszym opracowaniu – głównym przedmiotem analiz jest zastosowanie metody GPR do oceny stanu podbudowy.



Rys. 6. Mapa amplitud (pustek) pod płytami betonowymi z ustaloną wartością progową amplitud odpowiadających zdegradowanej podbudowie.

3.3 Planowanie zabiegów naprawczych

Wytypowano 200 z około 500 płyt betonowych, które wykazały najniższą ocenę stanu technicznego i zostały zakwalifikowane do zabiegów naprawczych. Dobór konkretnej metody naprawy był zależny od charakterystyki dominujących uszkodzeń oraz ogólnego stanu technicznego danej płyty:

- w przypadkach, gdy głównym problemem była obecność pustek zlokalizowanych bezpośrednio pod płytą betonową, przy jednoczesnym braku istotnych uszkodzeń powierzchni, zastosowano iniekcje geopolimerowe. Metoda ta pozwalała na skuteczne przywrócenie podparcia bez konieczności ingerencji w konstrukcję płyty (Rys. 7);
- w sytuacjach, gdy pustki występowały głębiej – oraz towarzyszyły im widoczne uszkodzenia powierzchni, podjęto decyzję o odtworzeniu warstwy podbudowy oraz wymianie płyt na prefabrykowane elementy betonowe lub zastosowaniu napraw z użyciem betonu szybkosprawnego, w zależności od lokalnych uwarunkowań technologicznych i eksploatacyjnych.

Zróznicowane podejście projektowe umożliwiło precyzyjne dopasowanie technologii naprawczej do rodzaju i lokalizacji uszkodzeń, co znacząco wpłynęło na skuteczność oraz trwałość zrealizowanych prac remontowych.

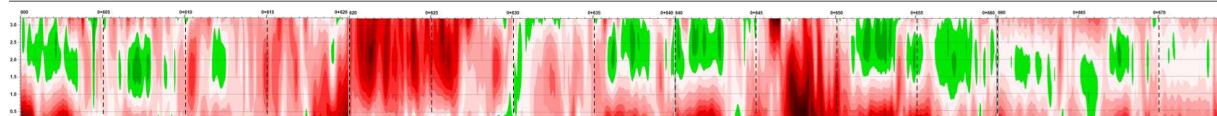


Rys. 7. Iniekcje geopolimerem pustek znajdujących się pod płytami betonowymi.

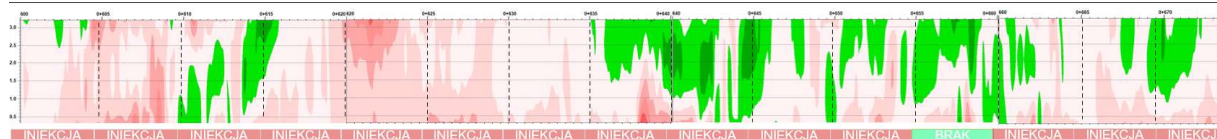
3.4 Monitoring efektów: bezpośrednio po remoncie, po 3 i 6 latach

Skuteczność zastosowanych metod naprawczych oceniano w oparciu o analizę wszystkich analizowanych kryteriów diagnostycznych. W niniejszym opracowaniu omówiono porównanie map amplitud fal elektromagnetycznych rejestrowanych przez georadar, obrazujących stan podparcia płyt betonowych.

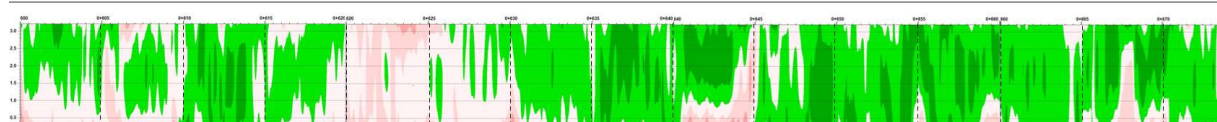
2019: STRONA LEWA, 15 PŁYT, PRZED NAPRAWAMI



2019: STRONA LEWA, 15 PŁYT, PO INIEKCJACH



2022: STRONA LEWA, 15 PŁYT, 3 LATA PO INIEKCJACH

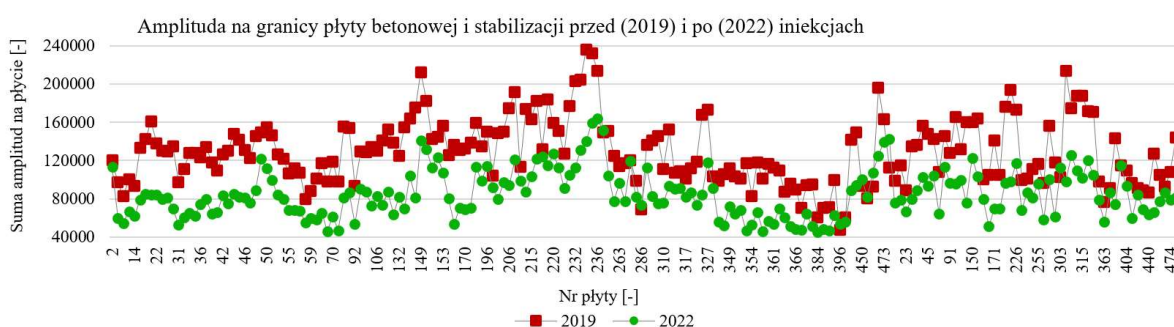


Rys. 8. Monitoring efektów naprawy nawierzchni betonowej na podstawie badania georadarem. U góry: mapa pustek pod płytami betonowymi przed naprawami. Na środku – mapa pustek bezpośrednio po wykonaniu iniekcji geopolimerem. Na dole – mapa pustek 3 lata po eksploatacji. Zaobserwowano zmniejszenie wartości amplitud (przywrócenie podparcia płyt) bezpośrednio po naprawie i jeszcze większe po 3 latach eksploatacji, co ma związek z przeprowadzoną dodatkowo renowacją rowów odwadniających.

Rys. 8 przedstawia wyniki dla 15 płyt betonowych zlokalizowanych po lewej stronie badanego odcinka drogi. Spośród nich 14 zakwalifikowano do iniekcji geopolimerowej. Mapa amplitud sprzed remontu (Rys. 8, u góry) wykazała liczne obszary o podwyższonych

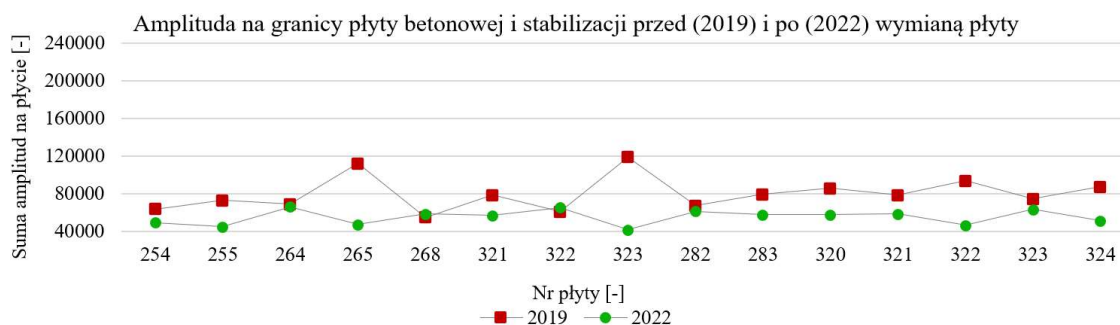
wartościach – szczególnie w zakresie barw ciemnoczerwonych – co wskazywało na obecność pustek i brak właściwego podparcia. Na kolejnych mapach przedstawiono wyniki pomiarów wykonanych bezpośrednio po iniekcji (Rys. 8, po środku) oraz po trzech latach eksploatacji (Rys. 8, na dole). Widoczny jest wyraźny spadek udziału wysokich amplitud już po wykonaniu zabiegu, a po trzech latach – dalsza poprawa. Redukcja pustek jest efektem zarówno skutecznej iniekcji, jak i dodatkowo przeprowadzonej renowacji rowów odwadniających, poprawiającej warunki wilgotnościowe w konstrukcji.

Analiza danych wykazała, że średnia wartość amplitud na granicy płyta–podbudowa po przeprowadzonych zabiegach iniekcji geopolimerowej zmniejszyła się o około 53% (Rys. 9) w stosunku do stanu pierwotnego, co potwierdza trwałość efektu wzmocnienia.



Rys. 9. Zmiana amplitud pod płytami betonowymi przed i po iniekcjach

Dla odcinków, na których przeprowadzono pełną wymianę konstrukcji – polegającą na usunięciu starej płyty, odtworzeniu podbudowy i wykonaniu nowej płyty z betonu szybkosprawnego – zaobserwowano średni spadek amplitud na poziomie ok. 51% (Rys. 10), co również potwierdza skuteczność zastosowanej technologii oraz poprawę warunków podparcia płyt betonowych.



Rys. 10. Zmiana amplitud pod płytami betonowymi przed remontem i po odtworzeniu stabilizacji oraz wymianie płyty na prefabrykat.

Kolejny etap monitoringu zaplanowano na przyszły rok i obejmie ocenę stanu nawierzchni po sześciu latach eksploatacji. Pozwoli to na kompleksową weryfikację długoterminowej trwałości zastosowanych metod naprawczych oraz ich wpływu na nośność i funkcjonalność konstrukcji drogowej.

4. Wnioski i rekomendacje dla praktyki inżynierskiej

Zastosowanie georadaru pozwoliło na skuteczne wykrycie miejsc braku podparcia płyt betonowych oraz efektywności przeprowadzonych napraw. Przeprowadzone analizy wykazały pozytywne efekty w postaci zmniejszenia amplitud fal elektromagnetycznych, co wskazuje na poprawę trwałości nawierzchni i skuteczność podjętych działań naprawczych. Na podstawie badań i obserwacji sformułowano następujące wnioski i rekomendacje:

(1) Skuteczna diagnostyka to podstawa planowania napraw

GPR umożliwia skuteczną lokalizację pustek pod płytami betonowymi na różnych głębokościach i precyzyjne wskazanie miejsc wymagających interwencji oraz wyboru odpowiedniej metody naprawy.

(2) Różne podejścia do detekcji uszkodzeń z wykorzystaniem GPR

Przydatność georadaru w detekcji miejsc degradacji podbudowy opiera się przede wszystkim na kontraście stałej dielektrycznej między ośrodkami (beton–powietrze). Natomiast w przypadku spękań płyty betonowej metoda ta nie znajduje zastosowania. GPR może jednak służyć do identyfikacji zarysowań i pęknięć przy wykorzystaniu innych sposobów analizy danych, m.in. poprzez ocenę dyfrakcji fal elektromagnetycznych na granicach nieciągłości materiałowych czy analizę zmian w charakterze odbić.

(3) Automatyzacja analizy danych GPR dzięki wykorzystaniu kontrastów dielektrycznych

Tradycyjna analiza radarogramów w celu lokalizacji pustek jest skuteczna, lecz czasochłonna i wymaga ręcznej interpretacji danych. Wykorzystanie różnic w stałych dielektrycznych między betonem a pustką umożliwia automatyzację procesu – poprzez analizę amplitud odbić fal elektromagnetycznych możliwe jest szybkie wskazanie anomalii oraz opracowanie map lokalizacji potencjalnych pustek. Tego rodzaju podejście znacznie usprawnia proces diagnostyczny i zwiększa jego efektywność operacyjną.

(4) Konieczność kalibracji danych GPR

Kalibracja z wykorzystaniem odwiertów pozwala określić wartości progowe amplitud odpowiadających obecności pustek, co warunkuje wiarygodną interpretację map diagnostycznych.

(5) Rekomendacja: stały monitoring oraz okresowa diagnostyka

Regularna ocena stanu podbudowy z wykorzystaniem georadaru pozwala wczesne wykrycie degradacji oraz precyzyjne planowanie napraw, zapobiegając kosztownym awariom.

(6) Zakres stosowalności wniosków

Przedstawione wyniki dotyczą skuteczności iniekcji geopolimerowych w podbudowie i oceny jej stanu za pomocą georadaru. Analiza nie uwzględnia czynnika obciążenia wynikającego z natężenia ruchu, dlatego wnioski mają charakter ogólny i odnoszą się wyłącznie do właściwości podbudowy, niezależnie od klasy drogi czy intensywności ruchu.

Podsumowanie:

Zastosowanie georadaru (GPR) umożliwia skuteczną i nieinwazyjną ocenę stanu podbudowy nawierzchni betonowych, w szczególności lokalizację miejsc braku podparcia płyt. Analiza amplitud fal elektromagnetycznych pozwala nie tylko wskazać obszary

wymagające interwencji naprawczej, ale również ocenić efektywność przeprowadzonych zabiegów. Metoda ta stanowi cenne narzędzie w planowaniu działań utrzymaniowych oraz w zapewnieniu długotrwałej trwałości konstrukcji drogowych.

5. Literatura

- [1] Jackiewicz-Rek W., Konopska-Piechurska M., Załęgowski K., Garbacz A., Nawierzchnie betonowe - uszkodzenia i naprawy, Izolacje, 2016.
- [2] Ruszczak M., Oznaczanie grubości warstw nawierzchni drogowych metodą georadarową, Rozprawa Doktorska, Politechnika Warszawska, 2021.
- [3] Saaranketo T., Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys, Thesis for the Degree of Philosophiae Doctor at Faculty of Science of the University of Oulu, Oulu, 2006, s. 1-127.
- [4] Lalagüe A., Hoff I., Determination of space behind pre-cast concrete elements in tunnels using GPR, Proceedings of the 13th International Conference on Ground Penetrating Radar, 21-25th of June 2010, Lecce, 2010, s. 1-5.
- [5] Pellinen T., Eskelinen S., Huuskonen-Snicker E., Hartikainen A., Assessment of air void content of asphalt using dielectric constant measurements by GPR and with VNA, Aalto University Publication Series Science and Technology, No. 9, Helsinki, 2015, s. 130-139.
- [6] Wutke M., Lejzerowicz A., Jackiewicz-Rek W., Garbacz A., Zastosowanie metody georadarowej do wykrywania nieszczelności obiektów wykonanych w technologii „białej wanny” – studium przypadku, X Jubileuszowa Konferencja Dni Betonu, 8-10 października 2018, Wisła, 2018, s. 1-7.
- [7] Wutke M., Lejzerowicz A., Jackiewicz-Rek W., Garbacz A., Influence of variability of water content in different states on electromagnetic waves parameters affecting accuracy of GPR measurements of asphalt and concrete pavements, 64 Konferencja Naukowej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej Polskiej Akademii Nauk oraz Komitetu Nauki Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa, MATEC Web of Conferences, Numer 262, 16-20 września 2018, Krynica Górská, 2018, s. 1-9.
- [8] Hammons M. I., Maser K., Nazarian S., Detection of stripping in hot mix asphalt, Project No. 16355 by Applied Research Associates, Gainesville, 2005, s. 1-256.
- [9] Daniels D. J., Ground Penetrating Radar – 2nd Edition, London, The Institution of Electrical Engineers, ISBN 0-86341-360-9, United Kingdom, 2004.
- [10] Thanop Thitimakorn, Natamon Kampananon, Napassapong Jongjaiwanichkit, Sasikan Kupongsak, Subsurface void detection under the road surface using ground penetrating radar (GPR), a case study :2, in the Bangkok metropolitan area, Thailand, Thitimakorn et al. Geo-Engineering 7:2, 2016.
- [11] Saaranketo T., Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys, Thesis for the Degree of Philosophiae Doctor at Faculty of Science of the University of Oulu, Oulu, 2006, s. 1-127.

prof. dr hab. inż. Władysław Gardziejczyk
dr inż. Paweł Gierasimiuk
dr inż. Marek Motylewicz
Politechnika Białostocka

Hałaśliwość betonowych nawierzchni drogowych

Noisiness of concrete road pavements

Streszczenie

W ostatnich kilkunastu latach nastąpił duży postęp w zakresie technologii wykonywania nawierzchni z betonu cementowego. Dotyczy to zarówno aspektu technologicznego i konstrukcyjnego jak i techniki teksturowania ich powierzchni. W Europie najczęściej stosowaną techniką teksturowania nawierzchni betonowych jest metoda „odkrytego kruszywa”, polegająca na usunięciu niezwiązanego zaczynu cementowego i tym samym odkrycia ziaren kruszywa grubego. Innowacyjną metodą nadawania tekstury opracowaną w Stanach Zjednoczonych, początkowo stosowaną jako metoda poprawiająca równość podłużną, jest grinding&grooving. Poprzez system tarcz diamentowych wykonywane są rowki w stwardniałym betonie oraz nadawana jest mikrotekstura w celu poprawienia właściwości przeciwpoślizgowych. Uzyskana w taki sposób tekstura redukuje także hałas w rejonie kontaktu opon samochodowych z nawierzchnią. W referacie przedstawiono wyniki badań i analiz poziomów hałasu toczenia pojazdów osobowych i wielocłonowych pojazdów ciężarowych na nawierzchniach betonowych teksturowanych metodą odkrytego kruszywa, metodą szczotkowania i techniką grinding&grooving. Na odcinkach testowych o nawierzchni betonowej wykonano pomiary maksymalnego poziomu dźwięku metodą statystycznego przejazdu (SPB). Wyniki badań i analiz poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych porównano z wynikami ustalonymi na nawierzchniach asfaltowych. Oceniono wpływ makrotekstury nawierzchni na hałas od jadących pojazdów samochodowych. Emitowane dźwięki przeanalizowano zarówno w odniesieniu do wartości całkowitych maksymalnego poziomu dźwięku jak i ich widm. Na podstawie wyników uzyskanych w 2024 roku z wynikami badań we wcześniejszych okresach określono trwałość akustyczną badanych nawierzchni.

Abstract

In the last several years, there have been major advances in cement concrete pavement technology. This applies to both the technological and constructional aspects as well as to the technique of texturing their surfaces. In Europe, the most commonly used texturing technique for concrete pavements is the ‘exposed aggregate’ method, which involves removing the unbound cement slurry and thus uncovering the coarse aggregate grains. An innovative texturing method developed in the United States, initially used as a method to improve longitudinal evenness, is

grinding&grooving. Through a system of diamond discs, grooves are made in the hardened concrete and a micro-texture is imparted to improve the skid resistance. The texture obtained in this way also reduces noise in the region of contact between the car tyres and the road pavement. The paper presents the results of tests and analyses of the rolling noise levels of passenger vehicles and multi-vehicle trucks on concrete pavements textured using the exposed aggregate method, the brushing method and the grinding&grooving technique. Maximum sound levels were measured on the test sections with concrete pavements using the Statistical Pass-By method (SPB). The results of the tests and analyses of the rolling noise of vehicles were compared with those established on asphalt pavements. The influence of pavement macro-texture on noise from moving vehicles was assessed. The emitted sound levels were analysed in relation to both the total maximum sound level values and their spectra. The acoustic durability of the tested pavements was determined on the basis of the results obtained in 2024 with the results of tests in earlier periods.

1. Wprowadzenie

W technologii budowy nawierzchni betonowych w Polsce i na świecie wyróżnia się trzy rozwiązania: beton wałowany, beton porowaty i beton nawierzchniowy. Beton wałowany (z ang. Roller Concrete Compacted - RCC) może być stosowany jako górna warstwa nawierzchni dróg lokalnych niskich kategorii ruchu (np. KR1 – KR4), jako warstwa podbudowy oraz jako nawierzchnie placów składowych, parkingów, placów manewrowych, gdzie wymagana jest odporność i trwałość na duże obciążenia przy niskich prędkościach [1, 2, 3]. Wymagania materiałowe mieszanki betonowej nie są rygorystyczne pod względem jakości wykorzystywanych kruszyw, a ilość cementu jest mniejsza w porównaniu do tradycyjnych betonów nawierzchniowych, co zasadniczo wpływa na ograniczenie kosztów wytworzenia i wykonania nawierzchni drogowej. Dużym atutem jest możliwość użytkowania drogi z betonu wałowanego już po 48 godzinach od jej wykonania. Istotną wadą technologii jest uzyskanie zadowalającej równości podłużnej. Zawałowana mieszanka jest gładka i bez wyraźnej tekstury. W celu poprawy właściwości przeciwpoślizgowych takich nawierzchni są prowadzone prace wdrożeniowe nad teksturowaniem powierzchni poprzez przecieranie poprzeczne szczotką [3].

Beton porowaty określany w literaturze również jako przepuszczalny lub jamisty (z ang. porous concrete, permeability concrete lub pervious concrete) charakteryzuje się dużą zawartością wolnych przestrzeni (od 15 do 30%) wzajemnie ze sobą połączonych co wpływa na bardzo dobrą przepuszczalność wód opadowych oraz redukcję hałasu drogowego. Dodatkowo nawierzchnie z betonu porowatego redukują efekt „miejskich wysp ciepła”. Dzięki tym zaletom nawierzchnia ta jest uważana jako przyjazna dla środowiska [4, 5]. Mieszanka betonu porowatego składa się z kruszywa grubego, najczęściej jedno- dwufrakcyjnego np. 8/16 mm, którego ziarna są ze sobą połączone zaprawą cementową o odpowiedniej konsystencji. W „ulepszonym” betonie porowatym (z ang. enhanced porosity concrete - EPC) głównym założeniem jest wykorzystanie trzech frakcji kruszyw grubych, których zastosowanie w mieszance betonowej ma zapewnić spełnienie zarówno właściwości strukturalnych (trwałość i wytrzymałość) i funkcjonalnych (hałas, właściwości

przeciwpoślizgowe) [6]. Prowadzone są badania nad zwiększeniem trwałości nawierzchni z betonu porowatego poprzez modyfikację mieszanki betonowej, np. lateksem kauczuku styrenowo-butadienowego (z ang. styrene-butadiene rubber – SBR) lub kruszywem polimerowo-gumowym, częściowo zastępując cement [4, 7]. Do wad tej technologii należy zaliczyć problemy z rozwarstwianiem, odpornością na zamrażanie i rozmrażanie oraz błędy wykonawcze. Istotnym elementem prac wykonawczych jest zadanie odpowiedniej energii zagęszczania, co wpływa na późniejszą przepuszczalność i trwałość nawierzchni w trakcie jej użytkowania.

Beton nawierzchniowy jest to najpopularniejsze i najczęściej stosowane rozwiązanie nawierzchni betonowych. Zgodnie z [8] jest to „beton napowietrzony o określonej wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie przy zginaniu oraz mrozoodporności, wbudowany w nawierzchnię”. Tego typu rozwiązanie jest stosowane na drogach krajowych, w tym w dużej części na drogach szybkiego ruchu (drogi ekspresowe i autostrady), na placach manewrowych i składowych oraz jako nawierzchnie lotniskowe. Niewątpliwą zaletą tego typu nawierzchni jest odporność na deformacje trwałe i wysoka trwałość oraz możliwość uzyskania zadowalających cech eksploatacyjnych, m.in. równości podłużnej, właściwości przeciwpoślizgowych jak również hałaśliwości nawierzchni. Pod względem zastosowanego połączenia płyt betonowych wyróżnia się: nawierzchnie dyblowane i kotwione, o zbrojeniu ciągłym, z włóknami rozproszonymi, zbrojone ze szczelinami dylatacyjnymi oraz rzadziej już występujące nawierzchnie niezbrojone i niedyblowane [9, 10]. Nawierzchnie z betonu cementowego mogą być budowane jako jednowarstwowe lub dwuwarstwowe. Wybór technologii zależy od przewidywanego wyboru rozwiązania techniki teksturowania, którą można stosować na świeżo zagęszczanej mieszance betonowej lub na stwardniałym betonie.

Technika teksturowania powierzchni nawierzchni betonowej determinuje uzyskaną makrotekturę, co bezpośrednio wpływa na właściwości przeciwpoślizgowe, generowany hałas w płaszczyźnie opona/nawierzchnia oraz zużycie paliwa (opór toczenia pojazdów) [11]. Do metod teksturowania świeżej mieszanki betonowej należy zaliczyć: rowkowanie podłużne i poprzeczne, ciągnięcie tkaniny jutowej lub sztucznej trawy, przecieranie szczotką, metodę odkrytego kruszywa [8, 12, 13]. W Europie najczęściej stosowaną metodą teksturowania nawierzchni betonowej jest metoda odkrytego kruszywa (z ang. exposed aggregate concrete, EAC). Została ona opracowana w latach 90-tych XX wieku i początkowo stosowano ją w Austrii, Belgii i Niemczech [14]. Zaletami tej metody są dobre właściwości akustyczne uzyskiwane przy odpowiedniej makroteksturze oraz właściwości przeciwpoślizgowe utrzymywane na wysokim poziomie w długoterminowym okresie użytkowania nawierzchni [15, 16]. Nawierzchnie betonowe z odkrytym kruszywem najczęściej są wykonywane w technologii dwuwarstwowej. Górną warstwę wykonuje się z mieszanki betonowej o zawartości jednofrakcyjnego kruszywa grubego w ilości około 70% [8]. Proces odkrywania kruszywa polega na spryskaniu świeżo zagęszczanej mieszanki betonowej powierzchniowym środkiem opóźniającym hydratację cementu, a następnie na usunięciu niezwiązanej zaprawy cementowej. Czas po którym należy rozpocząć proces odsłaniania kruszywa zależy m.in. od temperatury powietrza, wilgotności i zastosowanych środków chemicznych [17]. Najczęściej stosowane maksymalne wymiary ziaren kruszywa w mieszance betonowej to 8 mm i 11 mm [18, 19]. Nawierzchnie EAC11 generują o około 2 dB(A) wyższe maksymalne poziomy dźwięku od samochodów osobowych w porównaniu do

EAC8. Jednocześnie najkorzystniejsze jego wartości uzyskuje się przy makroteksturze na poziomie 0,8 mm [15, 20].

Do teksturowania nawierzchni betonowych w stwardniałym betonie wykorzystywane są tarcze diamentowe ustawiane w różnorodnych konfiguracjach. Początkowo metoda ta była wykorzystywana do poprawy równości podłużnej, dodatkowo zaobserwowano korzystne właściwości redukujące hałas [21]. Z samego procesu szlifowania (z ang. grinding), np. Conventional Diamond Grinding (CDG), nastąpiła ewolucja do szlifowania i rowkowania powierzchni nawierzchni betonowej (G&G – grinding&grooving), a najpowszechniej stosowanym ustawieniem tarcz diamentowych charakteryzuje się metoda nazwana Next Generation Concrete Surface (NGCS) [21, 22]. Została ona opracowana w Uniwersytecie Purdue w stanie Indiana (USA) we współpracy z Portland Cement Association (PCA) i American Concrete Pavement Association (ACPA). Metoda ta jest również rekomendowana w Ogólnych Specyfikacjach Technicznych Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad dotyczących nawierzchni z betonu cementowego [8]. Technologię szlifowania i rowkowania powierzchni betonowej można stosować na nowo wybudowanych odcinkach drogowych lub jako zabieg renowacyjny tekstury nawierzchni betonowej o niskich parametrach eksploatacyjnych (równość podłużna, właściwości przeciwoślizgowe, hałaśliwość). Cały proces jest przeprowadzany wzdłuż osi trasy, przy wykorzystaniu odpowiedniego zestawu urządzeń, które szlifują i nacinają nawierzchnię, jednocześnie usuwając powstające odpady i nieczystości. Układ tarcz diamentowych zapewnia optymalną teksturę redukującą hałas toczenia pojazdów samochodowych przy uzyskaniu dobrych właściwości przeciwoślizgowych. Przeprowadzone do tej pory testy potwierdzają dobre właściwości akustyczne oraz długotrwałość tekstury nawierzchni bez obniżenia parametrów eksploatacyjnych [12, 23]. Badania niemieckie wskazują, że lepsze właściwości redukujące hałas mają nawierzchnie o mniejszych odstępach pomiędzy rowkami, tj. odstęp 2,8 mm jest korzystniejszy niż ten o szerokości 3,2 mm [21]. Dodatkowo, w tej technologii nie stwierdzono wpływu przekruszenia stosowanego kruszywa grubego w mieszance betonowej na właściwości betonu i teksturowanie metodą G&G [21].

W referacie analizie poddano wartości maksymalnego poziomu dźwięku oraz jego widma ustalone metodą statystycznego przejazdu (SPB – ang. Statistical Pass-By method) [24] na nawierzchniach betonowych teksturowanych metodami: odkrytego kruszywa, szczotkowania i grinding&grooving (G&G) na drogach w Polsce. Zbadano wpływ makrotekstury nawierzchni na poziom hałasu od jadących pojazdów. Ustalono wartości maksymalnego poziomu dźwięku L_{Amax} na nawierzchniach betonowych porównano z wynikami na nawierzchniach asfaltowych typu SMA8 i SMA11. Wykorzystując wyniki pomiarów poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych z lat wcześniejszych określono trwałość akustyczną wybranych nawierzchni.

2. Metoda pomiarów i zakres badań

W ramach projektu badawczego INREH – Innowacyjne metody redukcji hałasu drogowego i zasady ich stosowania (grant RID-II nr RID2/0015/2022, finansowany przez NCBiR i GDDKiA) realizowanego przez konsorcjum: Politechnika Krakowska (lider), Politechnika Białostocka, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Warszawska i Politechnika Wrocławska, w 2024 roku wykonano pomiary maksymalnego poziomu

dźwięku od jadących pojazdów samochodowych metodą statystycznego przejazdu SPB) na wybranych drogach w Polsce o nawierzchni betonowej i nawierzchni asfaltowej. Zgodnie z założeniami metody SPB mikrofon był zlokalizowany w odległości 7,5 m od osi toru jazdy pojazdów na wysokości 1,2 m nad poziomem nawierzchni jezdni (rys. 1). Pomiary maksymalnego poziomu dźwięku od pojedynczo jadących pojazdów wraz z pomiarem ich prędkości wykonywano w odniesieniu do pojazdów osobowych (kategoria P) i wieloczołowych pojazdów ciężarowych (kategoria H3+) na 13 nawierzchniach asfaltowych i na 11 nawierzchniach betonowych. W grupie nawierzchni betonowych w dwóch przekrojach powierzchnia nawierzchni była teksturowana metodą grooving & grinding (G&G), w dwóch przekrojach metodą szczotkowania (BuD) i w siedmiu przekrojach metodą odkrytego kruszywa (EAC). W tabeli 1 zestawiono informacje o badanych nawierzchniach, a w tabeli 2 pokazano widok przykładowych nawierzchni. W referacie wyniki badań wykonanych na nawierzchniach betonowych w 2024 r. porównano z wynikami ustalonymi na wybranych dwóch nawierzchniach asfaltowych typu SMA11 (przedstawionych w tabelach 1 i 2) oraz z wynikami pomiarów hałasu przeprowadzonymi we wcześniejszych latach. Podane wartości MPD (z ang. Mean Profile Depth - średnia głębokość profilu tekstury) i IRI (z ang. International Roughness Index – Międzynarodowy Współczynnik Równości) ustalono na podstawie danych z GDDKiA oraz danych uzyskanych przez autorów w ramach badań realizowanych w ramach innych projektów.

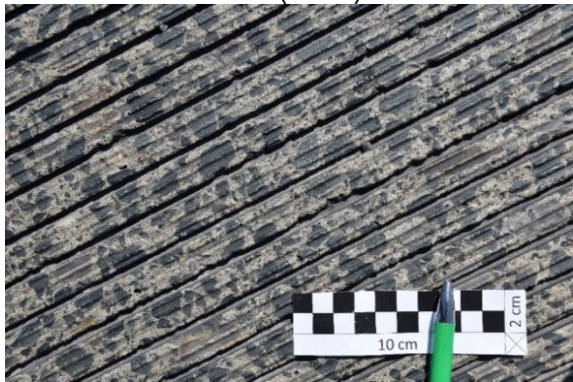
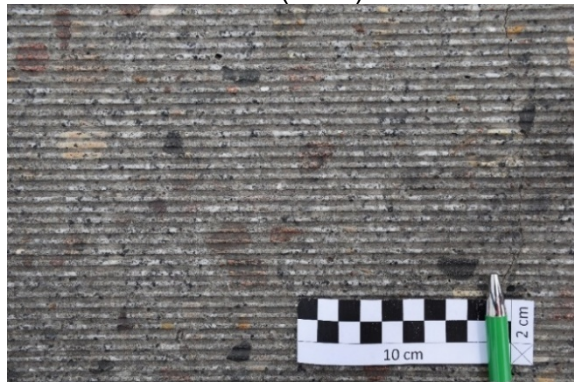
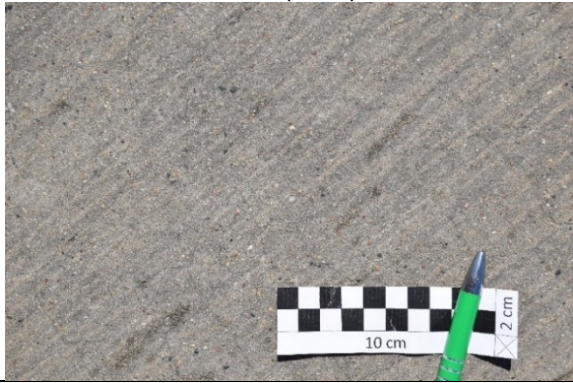
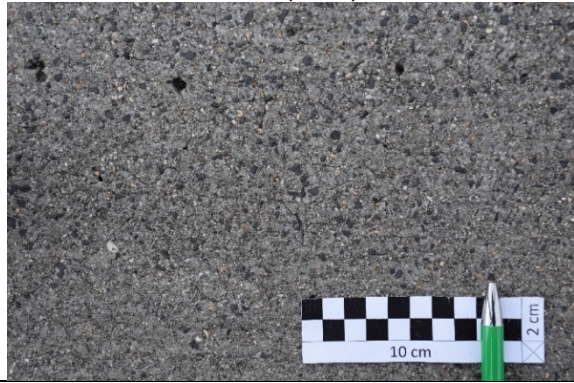


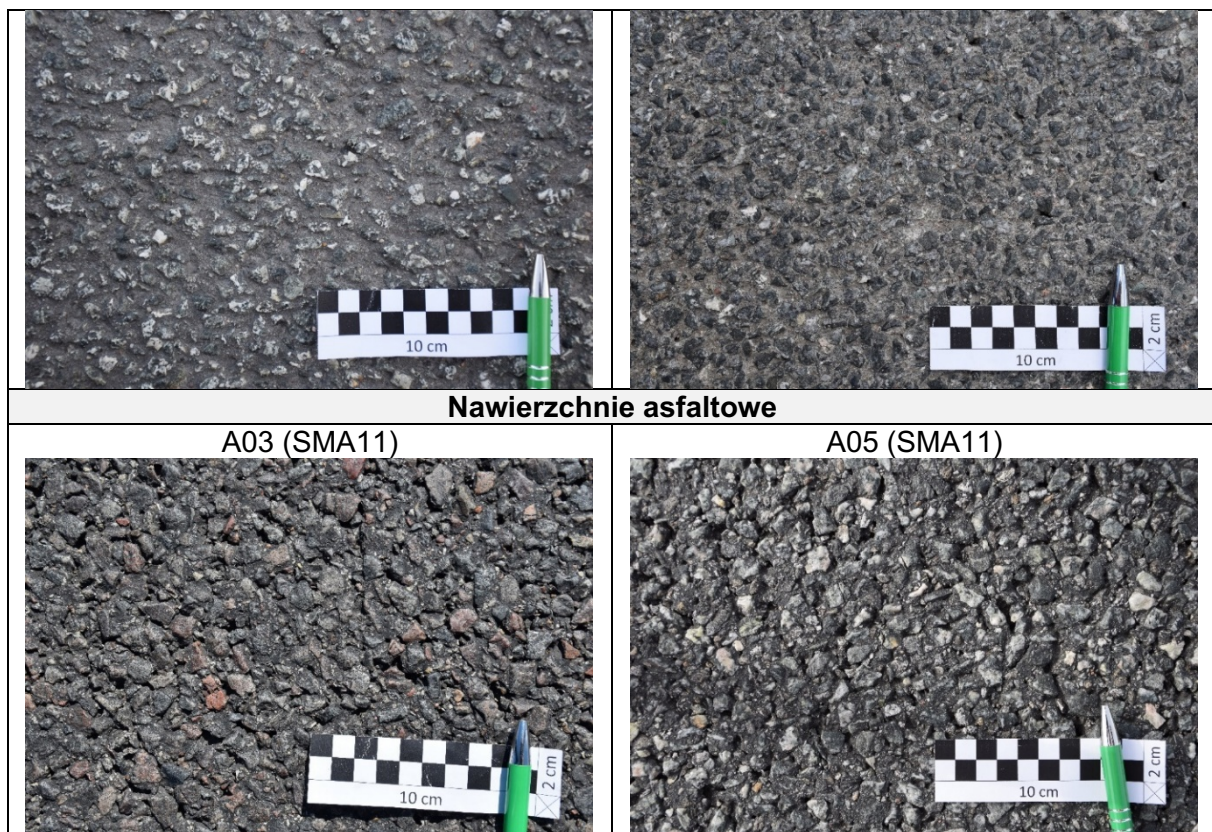
Rys. 1. Widok stanowiska badawczego pomiaru hałaśliwości nawierzchni metodą SPB.

Tabela 1. Wykaz przekrojów do badań hałaśliwości nawierzchni.

Lp.	Nr drogi	Nawierzchnia	Rok oddania	Oddział GDDKiA	Lokalizacja przekroju badawczego SPB	MPD±s [mm]	IRI±s [mm/m]
Nawierzchnie betonowe							
B01	S8	G&G	2020	Łódź	km 345+950L	0,59±0,067	2,83±1,244
B02	DK50	G&G	2021	Warszawa	km 74+400P	0,34±0,048	1,36±0,593
B03	S8	BuD	>10	Łódź	km 339+000P	0,26±0,071	2,19±0,962
B04	A18	BuD	>10	Wrocław	km 66+550L	0,39±0,050	0,94±0,260
B05	S8	EAC	2017	Łódź	km 334+220L	1,57±0,174	1,36±0,336
B06	S8	EAC	2018	Warszawa	km 529+380L	0,96±0,148	1,05±0,264
B07	S8	EAC	2018	Warszawa	km 542+400P	0,74±0,116	1,44±0,277
B08	A18	EAC	2023	Wrocław	km 56+800P	1,05±0,132	0,77±0,225
B09	A18	EAC	2023	Wrocław	km 66+780P	0,95±0,147	0,79±0,263
B10	S7	EAC + hydr.	2022	Warszawa	km 56+750L	1,28±0,189	1,08±0,362
B11	S7	EAC + śrut.	2022	Warszawa	km 89+020L	1,27±0,183	1,32±0,402
Nawierzchnie asfaltowe							
A03	S8	SMA11	2017	Białystok	km 569+850L	0,98±0,083	0,67±0,191
A05	S51	SMA11	2018	Olsztyn	km 7+830L	1,03±0,077	0,73±0,372

Tabela 2. Widok przykładowych nawierzchni.

Nawierzchnie betonowe	
B01 (G&G) 	B02 (G&G) 
B03 (BuD) 	B04 (BuD) 
B05 (EAC8)	B07 (EAC8)



Nawierzchnie asfaltowe

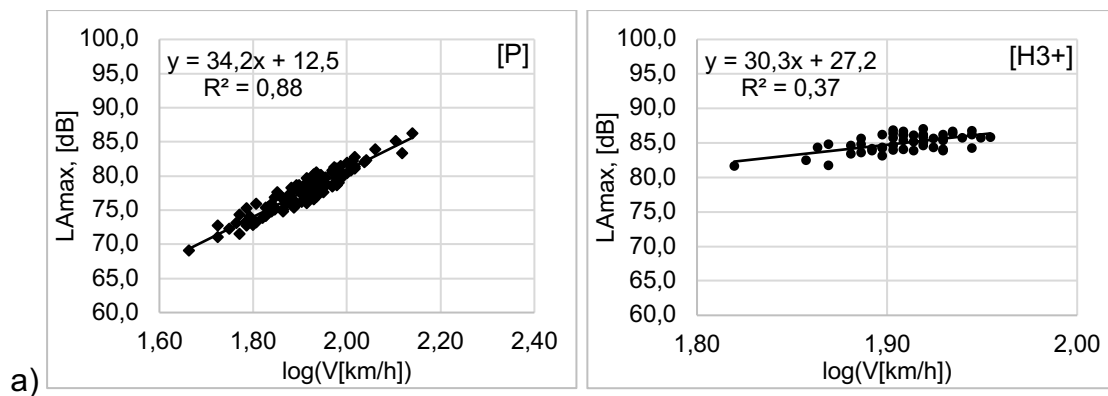
A03 (SMA11)

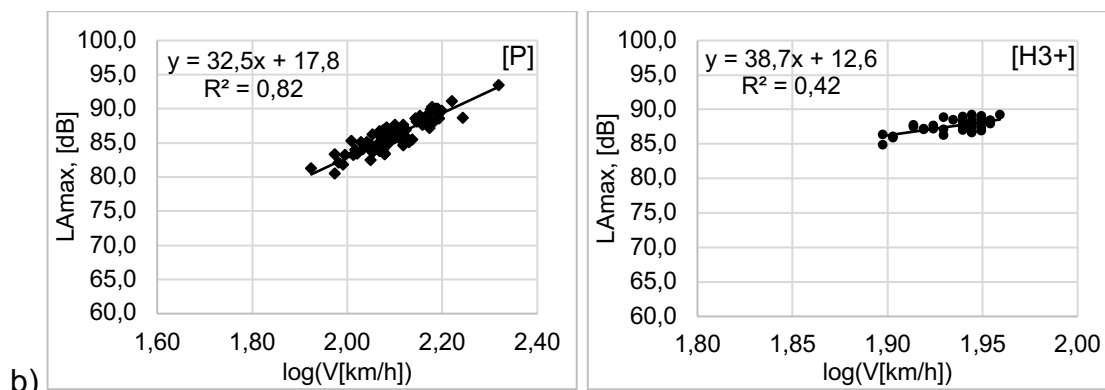
A05 (SMA11)

3. Wyniki pomiarów

3.1. Hałaśliwość badanych nawierzchni drogowych

Na rysunku 2 pokazano wyniki pomiarów na przykładowych nawierzchniach betonowych, a w tabeli 3 podano ustalone zależności pomiędzy maksymalnym poziomem dźwięku od pojedynczo jadących pojazdów osobowych (kategoria P) i wielocłonowych pojazdów ciężarowych (kategoria H3+) a logarytmem ich prędkości. Przedstawiono także wartości poziomu hałasu toczenia statystycznego pojazdu osobowego jadącego z prędkością 110 km/h i wielocłonowego pojazdu ciężarowego z prędkością 85 km/h.





Rys. 2. Wyniki pomiarów poziomu hałasu toczenia pojazdów osobowych (P) i wielośladowych pojazdów ciężarowych (H3+) na przykładowych nawierzchniach betonowych: a) B02 (G&G), b) B09 (EAC).

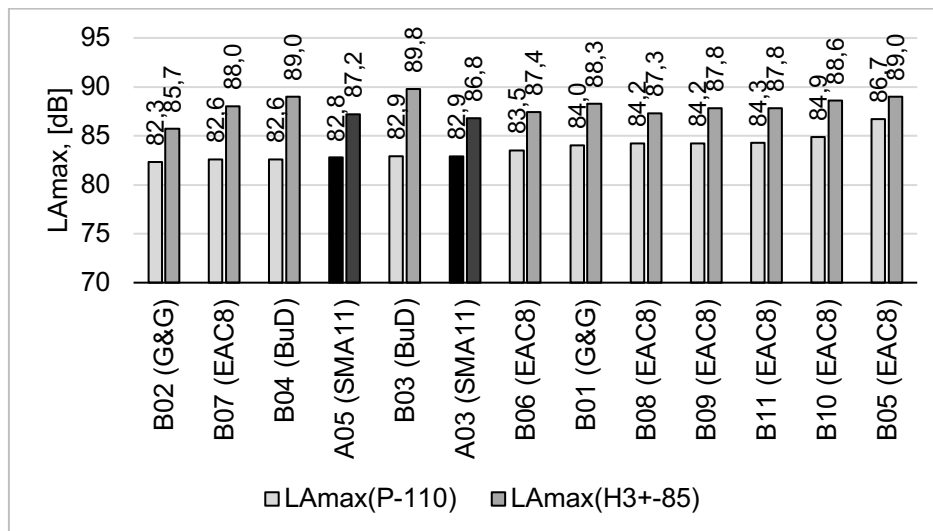
Tabela 3. Zależności pomiędzy maksymalnym poziomem dźwięku i logarytmem prędkości pojazdów oraz przekrojów do badań hałaśliwości nawierzchni.

Lp.	Nr drogi	Nawierzchnia	Lokalizacja przekroju	LAmax(P)=	LAmax(H3+)=	LAmax (P-110)	LAmax (H3+-85)
B01	S8	G&G	km 345+950L	29,7logV+23,4 (105)*	38,1logV+14,8 (65)*	84,0	88,3
B02	DK50	G&G	km 74+400P	34,2logV+12,5 (128)*	30,3logV+27,2 (51)*	82,3	85,7
B03	S8	BuD	km 339+000P	34,9logV+11,7 (112)*	26,2logV+39,2 (69)*	82,9	89,8
B04	A18	BuD	km 66+550L	30,2logV+20,9 (128)*	23,3logV+44,0 (80)*	82,6	89,0
B05	S8	EAC	km 334+220L	33,4logV+18,5 (123)*	33,6logV+24,2 (62)*	86,7	89,0
B06	S8	EAC	km 529+380L	30,8logV+20,6 (105)*	37,8logV+14,5 (31)*	83,5	87,4
B07	S8	EAC	km 542+400P	29,9logV+21,6 (110)*	24,7logV+40,3 (74)*	82,6	88,0
B08	A18	EAC	km 56+800P	32,5logV+17,8 (78)*	38,7logV+12,6 (41)*	84,2	87,3
B09	A18	EAC	km 66+780P	32,7logV+17,4 (118)*	22,0logV+45,4 (68)*	84,2	87,8
B10	S7	EAC	km 56+750L	33,9logV+15,7 (142)*	26,6logV+37,3 (74)*	84,9	88,6
B11	S7	EAC	km 89+020L	32,0logV+19,0 (168)*	27,1logV+35,5 (55)*	84,3	87,8
A03	S8	SMA11	km 569+850L	24,6logV+32,7 (156)*	31,8logV+25,4 (69)*	82,9	86,8
A05	S51	SMA11	km 7+830L	20,8logV+40,3 (135)*	24,6logV+39,7 (62)*	82,8	87,2

(...)* – liczba wyników uwzględnionych w analizie statystycznej po usunięciu wartości odstających

Ranking wartości maksymalnego poziomu dźwięku od jadącego statystycznego pojazdu osobowego (kategoria P) z prędkością 110 km/h na badanych nawierzchniach pozwala porównać ich hałaśliwość (rys. 3). Pokazanie przy tym wartości LAmax w odniesieniu do statystycznego wielośladowego pojazdu

ciężarowego (kategoria H3+) jadącego z prędkością 85 km/h wykazało, że ranking nawierzchni w tej sytuacji wygląda inaczej.



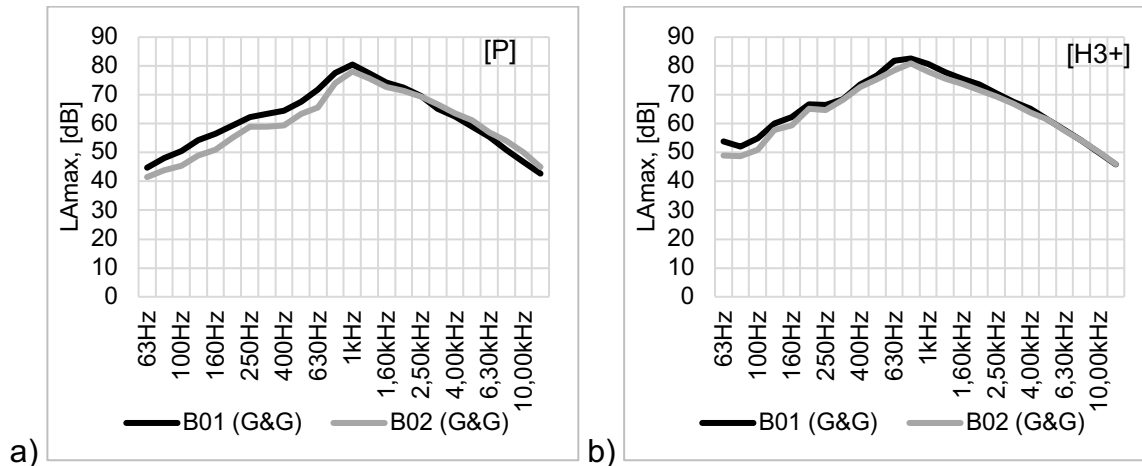
Rys. 3. Porównanie L_{Amax} na nawierzchniach betonowych.

W przypadku pojazdu osobowego najkorzystniejszym rozwiązaniem okazały się: nawierzchnia teksturowana techniką G&G na drodze krajowej DK50, nawierzchnia teksturowana metodą szczotkowania na autostradzie A18 i drodze ekspresowej S8 oraz nawierzchnia EAC8 na drodze S8 o wartości MPD = 0,74 mm. Wartości poziomu hałasu toczenia na tych nawierzchniach są porównywalne z poziomem hałasu na nawierzchniach typu SMA11. Pozostałe nawierzchnie typu EAC8 i nawierzchnia G&G na drodze S8 charakteryzowały się wartościami wyższymi co najmniej o 0,6 dB(A) w porównaniu z nawierzchnią typu SMA11. Najgorsze wartości ustalono na nawierzchni EAC8 o makroteksturze MPD=1,57 mm. Należy zwrócić uwagę na różnicę 1,7 dB(A) pomiędzy nawierzchniami typu G&G. Wpływa na to charakterystyka wykonanego rowkowania (tabela 2). W grupie badanych nawierzchni betonowych w przypadku pojazdu osobowego różnica pomiędzy hałaśliwością wyniosła 4,4 dB(A), co należy uznać za wartość istotną.

Nieco inaczej wyglądają różnice w poziomach hałasu toczenia wielocłonowego pojazdu ciężarowego jadącego z prędkością 85 km/h. Najgłośniejszymi okazały się nawierzchnie teksturowane metodą szczotkowania i nawierzchnia z odkrytym kruszywem o makroteksturze powyżej 1,50 mm, a najkorzystniejszym rozwiązaniem – nawierzchnia EAC8 o makroteksturze 0,74 mm.

Widma dźwięków ustalone na przykładzie dwóch nawierzchni G&G wyjaśniają różnice pomiędzy hałaśliwością nawierzchni tego samego typu wykonanych w dwóch różnych lokalizacjach (rys. 4). W przypadku pojazdu osobowego istotne różnice występują w zakresie częstotliwości niższych od 1000 Hz. Jest to związane z makroteksturą nawierzchni B01, decydującą o wpływie tzw. mechanizmu mechanicznego (związanego z uderzeniami bieżnika o nawierzchnię). W zakresie częstotliwości powyżej 4 000 Hz poziomy dźwięków przy nawierzchni B02 okazały się nieco wyższe niż na nawierzchni B01, jest to wpływ tzw. mechanizmu aerodynamicznego. Widma dźwięków w przypadku pojazdu ciężarowego są

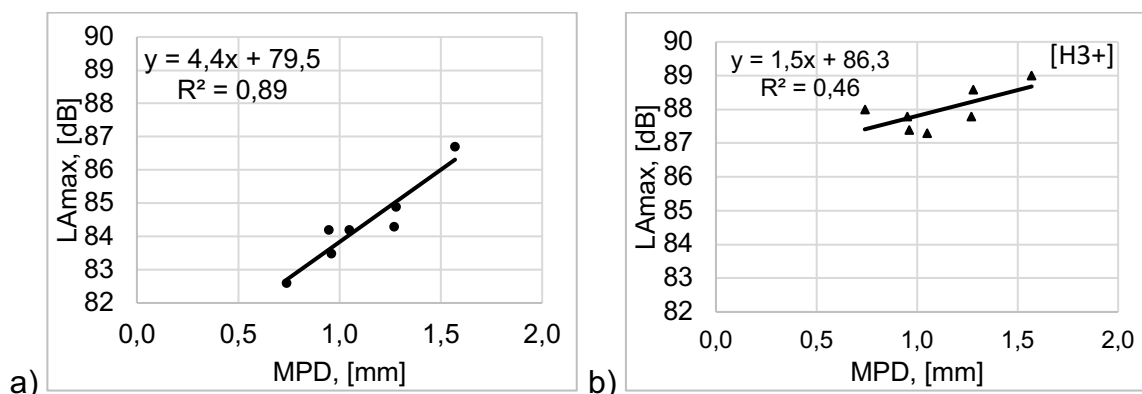
zbliżonego, a wynika to z faktu, że nawierzchnia o drobniejszej makroteksturze jest mniej korzystnym rozwiązaniem w przypadku pojazdu ciężarowego.



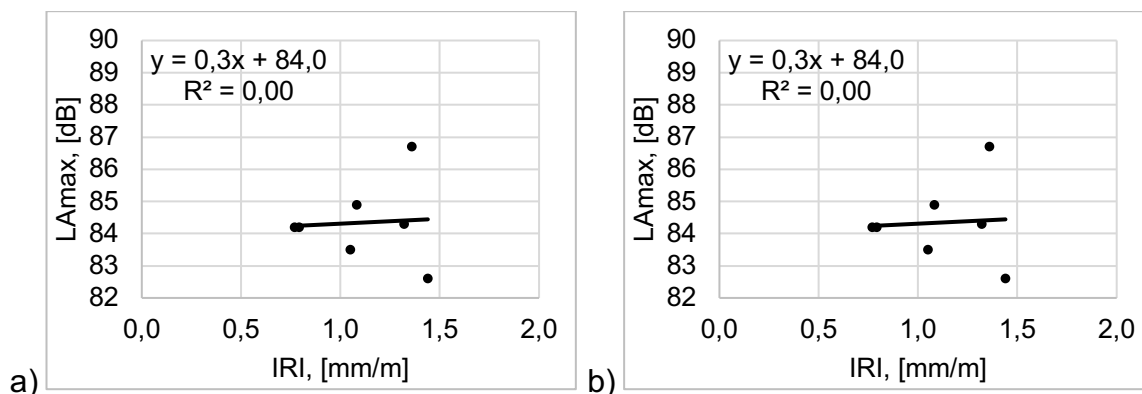
Rys. 4. Porównanie widm dźwięków od jadących pojazdów na nawierzchniach betonowych teksturowanych metodą G&G: a) pojazdy osobowe, b) wielocznionowe pojazdy ciężarowe.

3.2. Wpływ makrotekstury i równości podłużnej na poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych

Z przedstawionych danych w punkcie 3.1 wynika, że przyczyną różnic w hałaśliwości nawierzchni betonowych jest sposób teksturywania ich powierzchni, a w grupie nawierzchni z odkrytym kruszywem ich makrotekstura. Na rysunku 5 pokazano zależności pomiędzy maksymalnym poziomem dźwięku a makroteksturą, a na rysunku 6 – zależności pomiędzy maksymalnym poziomem dźwięku i równością podłużną na siedmiu odcinkach badawczych o nawierzchni EAC8 (każda wartość L_{Amax} została ustalona na ilościach pomiarów podanych w tabeli 1). Z analizy wyłączono nawierzchnie G&G gdyż charakteryzują się one teksturą anizotropową, w odróżnieniu od nawierzchni teksturyowanych metodą odkrytego kruszywa o teksturze izotropowej.



Rys. 5. Zależności pomiędzy maksymalnym poziomem dźwięku i makroteksturą na nawierzchniach EAC: a) pojazd osobowy, V=110km/h, b) wielocznionowy pojazd ciężarowy, V=85km/h.

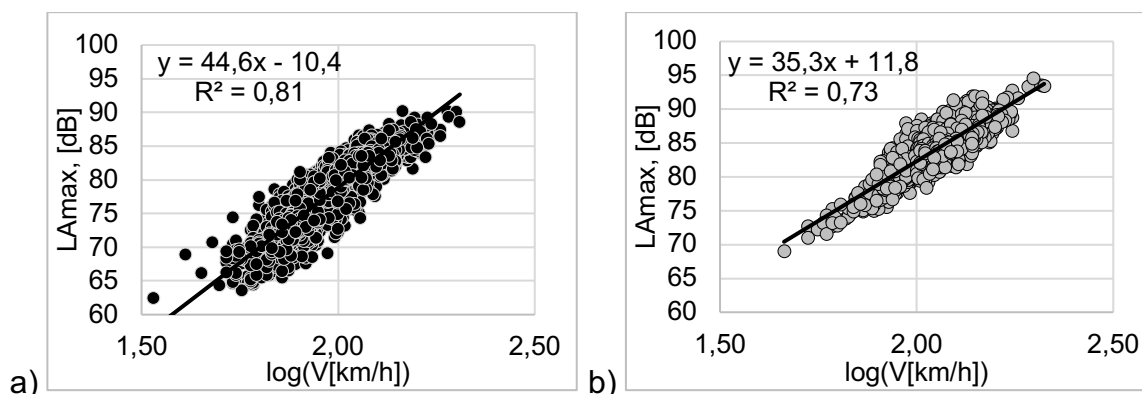


Rys. 6. Zależności pomiędzy maksymalnym poziomem dźwięku i równością podłużną na nawierzchniach EAC: a) pojazd osobowy, V=110km/h, b) wielocłonowy pojazd ciężarowy, V=85km/h.

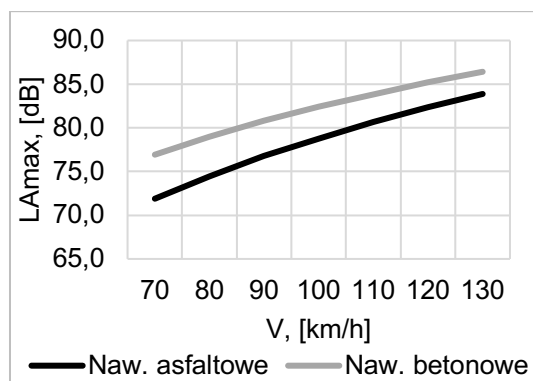
Ustalono, że w przypadku pojazdu osobowego o hałasie toczenia na nawierzchni typu EAC decyduje jej makrotekstura, a wpływ równości podłużnej jest nieistotny. Makrotekstura i równość podłużna wpływa na hałas toczenia wielocłonowych pojazdów ciężarowych, chociaż wpływ makrotekstury w tej sytuacji jest mniejszy niż w przypadku pojazdu osobowego.

3.3. Analiza porównawcza hałaśliwości nawierzchni asfaltowych i nawierzchni betonowych

W literaturze stosunkowo często pojawia się informacja o zwiększonej hałaśliwości nawierzchni betonowych. Ma to uzasadnienie jeżeli porównamy hałaśliwość wszystkich stosowanych technologii łącznie. Na rysunku 7 pokazano wyniki pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku od jadących pojedynczo pojazdów osobowych przeprowadzonych w 2024 roku na 13 nawierzchniach asfaltowych (AC, SMA11, SMA8, SMA8 LA, BBTM8) i na 11 nawierzchniach betonowych (G&G, EAC8, CC), a na rysunku 8 wartości LAmax w zakresie prędkości 70 – 130 km/h od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego.

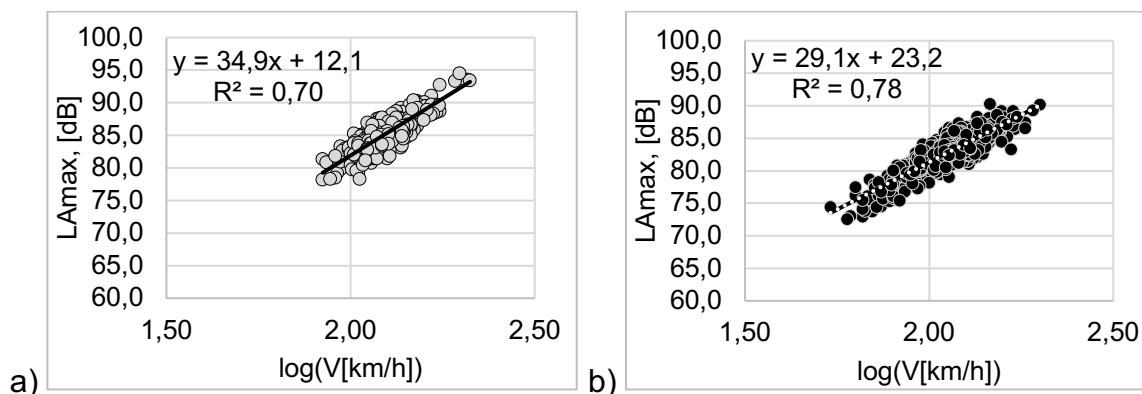


Rys. 7. Wyniki pomiarów hałasu toczenia pojazdów osobowych na nawierzchniach: a) asfaltowych, b) betonowych.

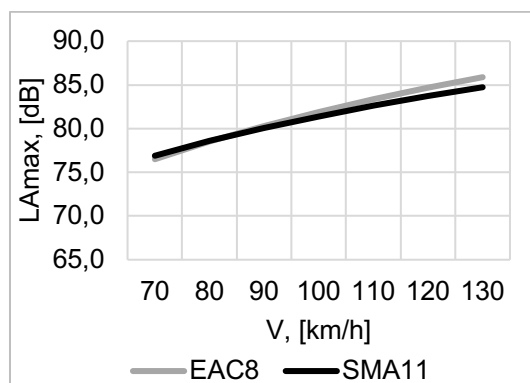


Rys. 8. Porównanie maksymalnych poziomów dźwięku na nawierzchniach asfaltowych i betonowych.

Pokazane powyżej różnice potwierdzają zdecydowanie wyższą głośność nawierzchni betonowych i przy prędkości 70 km/h wynoszą one 5 dB(A), a przy prędkości 130 km/h 2,5 dB(A). Jeżeli jednak porówna się hałaśliwość nawierzchni SMA11 i EAC8, rozwiązań standardowych odpowiednio w grupie nawierzchni asfaltowych i betonowych, różnice pomiędzy ich hałaśliwością są mniejsze niż 1 dB(A) (rys. 9, rys. 10).



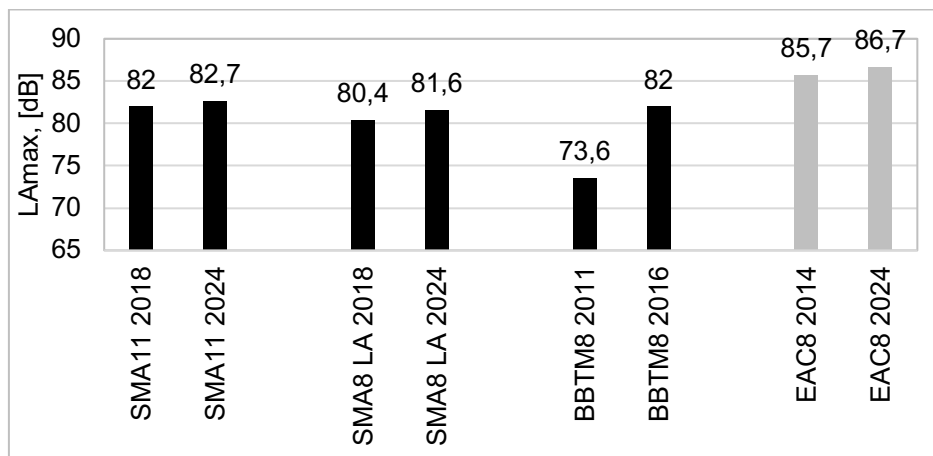
Rys. 9. Wyniki pomiarów hałasu toczenia pojazdów osobowych na nawierzchniach:
a) EAC8, b) SMA11.



Rys. 10. Porównanie maksymalnych poziomów dźwięku na nawierzchniach EAC8 i SMA11.

3.4. Trwałość akustyczna nawierzchni drogowych

Problem wpływu okresu eksploatacji nawierzchni na ich trwałość akustyczną zbadano na podstawie wyników badań maksymalnego poziomu dźwięku od przejeżdżającego statystycznego pojazdu osobowego z prędkością 110 km/h. Na rysunku 11 podano wartości L_{Amax} ustalone na nawierzchni SMA11 na drodze S51 w latach 2018 i 2024, na nawierzchni SMA8 LA na drodze S51 w latach 2018 i 2024, na nawierzchni BBTM8 na drodze wojewódzkiej DW780 w latach 2011 i 2016 oraz na nawierzchni EAC8 teksturowanej metodą odkrytego kruszywa na drodze S8 w latach 2014 i 2024.



Rys. 11. Wpływ okresu eksploatacji nawierzchni betonowych na ich trwałość akustyczną.

Ustalono, że w przypadku warstwy ścieralnej z SMA11 roczny wzrost poziomu hałasu toczenia statystycznego pojazdu osobowego jadącego z prędkością 110 km/h wynosi 0,12 dB. W przypadku nawierzchni SMA8 LA wartość ta wynosi 0,20 dB, w przypadku BBTM8 – 1,68 dB, a w przypadku EAC8 – 0,10 dB. Przedstawione wartości L_{Amax} wskazują, że nawierzchnia betonowa charakteryzuje się najkorzystniejszą trwałością akustyczną.

4. Podsumowanie

Wyniki pomiarów i analiz maksymalnego poziomu dźwięku od przejeżdżających pojazdów według metody SPB wykazały, że w przypadku nawierzchni betonowych istotny wpływ ma technika teksturowania ich powierzchni. W przypadku pojazdu osobowego najkorzystniejszym rozwiązaniem są nawierzchnie o drobnej teksturze, uzyskanej m.in. przy zastosowaniu metody szczotkowania. Tak teksturowane nawierzchnie są jednocześnie najbardziej „głośnym” rozwiązaniem przy przejeździe wielocłonowego pojazdu ciężarowego. Biorąc pod uwagę dwie analizowane kategorie pojazdów dobrym rozwiązaniem są nawierzchnie betonowe teksturowane metodą odkrytego kruszywa o makroteksturze (MPD) około 0,8 mm. Makrotekstura o wartości około 1,5 mm przyczynia się do wzrostu poziomu hałasu toczenia pojazdów o ponad 3 dB. Stwierdzono, że nawierzchnie betonowe z odkrytym kruszywem EAC8 i nawierzchnie asfaltowe SMA11 charakteryzują się zbliżoną hałaśliwością. Ustalono także, że nawierzchnia betonowa teksturowana metodą odkrytego kruszywa charakteryzuje się najkorzystniejszą trwałością akustyczną.

Przedstawione w artykule wyniki badań i analiz powstały w ramach realizacji projektu badawczego „INREH – Innowacyjne metody redukcji hałasu drogowego i zasady ich stosowania” (grant RID-II nr RID2/0015/2022, finansowanego przez NCBiR i GDDKiA).

5. Literatura

- [1] B. Wojewódzki, P. Przybylski: Ocena właściwości betonu wałowanego do wykonywania nawierzchni drogowych. *Drognictwo*, 1, 2017, 29-33.
- [2] F. Keleş, M. V. Akpınar: Strength properties of roller compacted concrete pavement (RCCP) under different curing methods. *Construction and Building Materials*, 324, 2022.
- [3] M. Hebdaś: Beton wałowany – przykłady zastosowania na drogach w Polsce. *Drognictwo*, 5, 2019, 153 – 158.
- [4] A. Ab Latif, R. Putrajaya, D. Shu Ing: A Review of Porous Concrete Pavement: Compressive Strength and Clogging Investigation. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 29, 3, 2023, 128–138.
- [5] Y. Zhang, H. Li, A. Abdelhady, J. Yang, H. Wang: Effects of specimen shape and size on the permeability and mechanical properties of porous concrete. *Construction and Building Materials*, 266, 2011.
- [6] N. Neithalath, R. Garcia, J. Weiss, J. Olek: Tire-Pavement Interaction Noise: Recent Research on Concrete Pavement Surface Type and Texture. 8th International Conference on Concrete Pavements, Colorado Springs, Colorado, USA, 2005.
- [7] W. Shen, L. Shan, T. Zhang, H. Ma, Z. Cai, H. Shi: Investigation on polymer–rubber aggregate modified porous concrete. *Construction and Building Materials*, 38, 2013, 667-674.
- [8] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad: Warunki wykonania i odbioru robót budowlanych, D-05.03.04 v03, NAWIERZCHNIA Z BETONU CEMENTOWEGO, 2015.
- [9] A. Szydło: Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Teoria, Wymiarowanie, Realizacja. Polski Cement, Kraków, 2004.
- [10] M.A. Glinicki: Inżynieria betonowych nawierzchni drogowych. PWN, Warszawa, 2023.
- [11] PIARC Technical Committee on Surface Characteristics (C1): International Experiment to Compare and Harmonize Skid Resistance and Texture Measurements. PIARC, 1995, 423.
- [12] Z. Leng, Z. Fan, P. Liu, J. Kollmann, M. Oeser, D. Wang, X. Jiang: Texturing and evaluation of concrete pavement surface: A state-of-the-art review. *Journal of Road Engineering*, 3, 3, 2023, 252-265.
- [13] P. Gierasimiuk, M. Wasilewska, W. Gardziejczyk: A Comparative Study on Skid Resistance of Concrete Pavements Differing in Texturing Technique. *Materials*, 14, 1, 2021.
- [14] O. Šernas, A. Zofka, A. Vaitkus, J. Gražulytė: The effect of exposed aggregate concrete gradation on the texture characteristics and durability. *Construction and Building Materials*, 261, 2020.
- [15] W. Gardziejczyk, P. Gierasimiuk, M. Motylewicz, M. Wasilewska: Evaluation of noisiness of exposed aggregate cement concrete pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 22, 2021.

- [16] M. Rith, Y. K. Kim, S. W. Lee: Characterization of long-term skid resistance in exposed aggregate concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 256, 2020.
- [17] M. Dąbrowski, A. Brachaczek, K. Bogusz, M. A. Glinicki: Experimental assessment of appropriate time for aggregate exposure at the surface of cement concrete pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 25, 2024.
- [18] M. Haider, R. Wehr, M. Conter, M. Kriegisch, S. Gasparoni: Texture and Noise Characteristics of Exposed Aggregate Concrete Road Surfaces. 12th international symposium on concrete roads 2014, Praga.
- [19] W. Gardziejczyk, P. Gierasimiuk: Influence of texturing method on tyre/road noise of cement concrete pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 19, 2018.
- [20] W. Gardziejczyk: Hałaśliwość nawierzchni drogowych, Politechnika Białostocka. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2018
- [21] J. Skarabis, U. Stockert, U. Stöckert, Noise emission of concrete pavement surfaces produced by diamond grinding, *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, 2, 2015, 81–92.
- [22] L. Scofield: Development and Implementation of the Next Generation Concrete Surface. Final Report. American Concrete Pavement Association, 2012.
- [23] A. Bergiers, B. Vanhooreweder: Test section with Next Generation Concrete Surface (NGCS) in Belgium: Rolling resistance and noise. Opublikowano w ramach 9th Symposium on Pavement Surface Characteristics (SURF 2022, 12 – 14 Września 2022, Mediolan, Włochy).
- [24] ISO 11819-1:2023 Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise.

Piotr Molenda,
Cement Ożarów S.A.

Artur Paszkowski,
Cement Ożarów S.A.

Krzysztof Pytel,
Cement Ożarów S.A.

Krzysztof Zadrożny,
Strabag Sp. z o.o.

Krzysztof Pelc,
Strabag Sp. z o.o.

Łukasz Hirszfeld
TPA Sp. z o.o.

Doświadczenia z realizacji nawierzchni betonowej o obniżonym śladzie węglowym

Experience from the implementation of low-carbon concrete pavement

Streszczenie

Nawierzchnie betonowe, szczególnie na drogach o dużym natężeniu ruchu, stają się coraz bardziej popularne ze względu na swoje wyjątkowe właściwości, takie jak odporność na duże obciążenia i długowieczność. Choć w Polsce nadal dominują nawierzchnie asfaltowe, betonowe zyskują uznanie, szczególnie na drogach ekspresowych i autostradach, gdzie wymagania dotyczące wytrzymałości i trwałości są szczególnie wysokie. Nawierzchnie betonowe charakteryzują się również większą odpornością na warunki atmosferyczne oraz mniejszymi kosztami utrzymania, co sprawia, że stają się preferowanym rozwiązaniem.

Strabag i Cement Ożarów, jako odpowiedzialne organizacje, wdrażają nowe podejście do budowy nawierzchni betonowych na drogach autostradowych, wykorzystując cement CEM II/B-S 42,5 R-NA, który charakteryzuje się obniżonym śladem węglowym. To rozwiązanie zostało po raz pierwszy zastosowane w Polsce na odcinku autostrady A2 (Siedlce Południe – Malinowiec) o długości 18,75 km. Realizacja tej inwestycji miała na celu redukcję emisji CO₂ oraz poprawę trwałości nawierzchni przez zastosowanie cementu portlandzkiego żuźlowego.

Celem artykułu jest przedstawienie doświadczeń zdobytych podczas realizacji przez Strabag i Cement Ożarów przy udziale TPA Sp. z o.o. innowacyjnego rozwiązania z wykorzystaniem cementu o obniżonym śladzie węglowym – JASNY CEM II/B-S 42,5 R-NA, stosowanego przy budowie nawierzchni betonowej. W ramach tego przedsięwzięcia przeanalizowano wyniki badań wytrzymałościowych oraz

trwałościowych górnej i dolnej warstwy nawierzchni. Ponadto, dokonano obliczeń śladu węglowego, porównując go z tradycyjnym rozwiązaniem opartym na cemencie portlandzkim.

Abstract

Concrete pavements, especially on roads with heavy traffic, are becoming increasingly popular due to their exceptional properties, such as resistance to heavy loads and long lifespan. Although asphalt surfaces still dominate in Poland, concrete ones are gaining recognition, particularly on expressways and motorways, where the requirements for strength and durability are especially high. Concrete pavements also offer greater resistance to weather conditions and lower maintenance costs, making them a preferred solution.

Strabag and Cement Ożarów, as responsible organizations, are implementing a new approach to the construction of concrete pavements on motorway roads by using CEM II/B-S 42.5 R-NA cement, which is characterized by a reduced carbon footprint. This solution was applied for the first time in Poland on a section of the A2 motorway (Siedlce Południe – Malinowiec), with a length of 18.75 km. The aim of this investment was to reduce CO₂ emissions and improve pavement durability through the use of slag Portland cement.

The aim of this article is to present the experience gained during the implementation of an innovative solution by Strabag and Cement Ożarów, with the participation of TPA Sp. z o.o., involving the use of low-carbon cement – LIGHT CEM II/B-S 42.5 R-NA in the construction of concrete pavement. As part of this project, strength and durability test results of the upper and lower pavement layers were analyzed. Additionally, a carbon footprint calculation was performed and compared with a traditional solution based on Portland cement.

1. Wprowadzenie

Beton jest drugim po wodzie najczęściej stosowanym materiałem na świecie. To nie jego emisyjność, a skala zastosowania powoduje, że dzisiaj odpowiada za 8-10% antropogenicznej emisji CO₂, dlatego nawet najmniejsze podjęte działania przekładają się na duże liczby. Branża cementowo-betonowa podąża drogą do neutralności emisyjnej. Liczne działania podejmowane są w wielu obszarach, począwszy od działań na etapie produkcji klinkieru i cementu skończywszy na działaniach związanych z konstrukcją budowlaną i jej ewentualną rozbiórką czy recyklingiem, mające na celu obniżenie śladu węglowego w całym łańcuchu wartości.

Pierwsza nawierzchnia betonowa powstała w 1888 roku na placu Bluechera (obecnie Plac Solny) we Wrocławiu. Początki technologii nawierzchni betonowych rozpoczęły się w latach 30. XX wieku, kiedy to budowano autostradę A4, łączącą zagłębie Ruhry z zagłębiem górnośląskim [12].

Po II Wojnie Światowej nawierzchnie betonowe wykonywano głównie na drogach o znaczeniu strategicznym. W latach 1918-1939, budowano nawierzchnie dróg

krajowych głównie z kostki kamiennej, kostki klinkierowej i betonu cementowego. Współczesne drogi betonowe w Polsce są wynikiem wieloletniego rozwoju i doświadczeń, które obejmują zarówno konstrukcję, jak i technologię wykonania nawierzchni betonowych. W 1995 roku wybudowano pierwszy odcinek autostrady o nawierzchni betonowej, co było współczesnym przełomem w historii polskich dróg betonowych.

Budowa dróg betonowych w Polsce jest wynikiem rozwoju technologii oraz wykorzystania doświadczeń europejskich i światowych.

W Polsce kierowcy mają do dyspozycji łącznie 5115,6 km dróg szybkiego ruchu w podziale 1849,2 km autostrad i 3266,4 km dróg ekspresowych. Z roku na rok przybywa dróg betonowych, zgodnie z statystykami na koniec 2023 r. było 1168,19 km dróg ekspresowych i autostrad z nawierzchnią betonową, co stanowi 22,8% sieci dróg szybkiego ruchu w Polsce [9].

Według danych EUPAVE (Europejskie Stowarzyszenie Nawierzchni Betonowych) nawierzchnia betonowa była także na 45,4 km (0,16%) dróg wojewódzkich, 600 km (0,5%) dróg powiatowych i 1200 km (0,5%) dróg gminnych [10].

Nawierzchnie betonowe w Europie występują na autostradach w ilości – Austria > 50%, Belgia – około 40% i Niemcy > 50%, Wielka Brytania – około 50%, Czechy > 65%.

Drogi te mają liczne zalety, są tańsze i zdecydowanie trwalsze w porównaniu z nawierzchniami z mieszanek mineralno-asfaltowymi, nie występuje na nich efekt koleinowania i posiadają lepszą widoczność podczas jazdy z uwagi na ich jasny kolor [11].

Nawierzchnie betonowe w Polsce – wymagania

W Polsce dotychczas budowane drogi betonowe były układane na podbudowie z mieszanek związanych cementem o grubości około 18-20 cm, warstwa ta w zasadzie jest pierwszą betonową warstwą konstrukcji drogi ekspresowej. Następnie na podbudowie z mieszanki związanej cementem rozkłada się geowłókninę i dopiero wtedy przystępuje się do wykonania ostatniej warstwy czyli nawierzchni betonowej. W ostatnich latach wykonano w naszym kraju również kilka dróg ekspresowych z konstrukcją z podbudowy zasadniczej z mieszanki niezwiązanej 0/31,5 grubości 27 cm zamiast warstwy chudego betonu i co za tym idzie grubszą warstwą betonu nawierzchniowego – 32cm. Wymagania dotyczące cementów obowiązujące od 2025 roku na drogach szybkiego ruchu WWiORB D.05.03.04v03 Nawierzchnia z betonu cementowego (dokument wzorcowy) [8].

Należy stosować cementy klasy wytrzymałości 32,5 lub 42,5 o normalnej wczesnej wytrzymałości N lub wysokiej wczesnej wytrzymałości R. Do betonu dolnej i górnej warstwy należy stosować ten sam rodzaj i klasę cementu.

Tabela 1. Cementy do betonowych nawierzchni drogowych w kategoriach ruchu od KR5 do KR7, kategoria środowiska E3 [8].

Rodzaje nawierzchni	Rodzaj cementu	Wymagania normowe	Wymagania dodatkowe
1	2	3	4
Nawierzchnia dwuwarstwowa, gdy górna i dolna warstwa są z różnych mieszanek, a górna warstwa jest z kruszywem odkrytym.	Cement portlandzki: CEM I 32,5 R CEM I 32,5 N	PN-EN 197-1	początek wiązania wg PN-EN 196-3: ≥ 120 minut stopień zmielenia wg PN-EN 196-6 : $\leq 3500\text{cm}^2/\text{g}$
	Cement portlandzki : CEM I 42,5 R CEM I 42,5 N		początek wiązania wg PN-EN 196-3: ≥ 90 minut stopień zmielenia wg PN-EN 196-6 : $\leq 3800\text{cm}^2/\text{g}$
Nawierzchnia dwuwarstwowa gdy górna i dolna warstwa są z tej samej mieszanki.	Cement portlandzki żuźłowy CEM II/A-S	PN-EN 197-1	początek wiązania wg PN-EN 196-3: ≥ 120 minut
Nawierzchnia jednowarstwowa	Cement portlandzki żuźłowy CEM II/B-S	PN-EN 197-1	początek wiązania wg PN-EN 196-3: ≥ 120 minut

Do obliczania zawartości alkaliów aktywnych dla cementów przedstawionych w tabeli 1 należy przyjmować następujące wielkości współczynników w_i przedstawione w [8]:

- 85% całkowitej zawartości alkaliów w przeliczeniu na $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w cemencie portlandzkim CEM I, CEM I - NA lub cemencie portlandzkim wapiennym CEM II/A-LL, CEM II/A-LL - NA;
- 80 % całkowitej zawartości alkaliów w przeliczeniu na $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w cemencie portlandzkim żuźłowym CEM II/A-S, CEM II/A-S - NA, cemencie portlandzkim wieloskładnikowym CEM II/A-M (S-LL), CEM II/A-M (S-LL) – NA;
- 70% całkowitej zawartości alkaliów w przeliczeniu na $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w cemencie portlandzkim popiołowym CEM II/A-V, CEM II/A-V - NA, cemencie portlandzkim żuźłowym CEM II/B-S, CEM II/B-S - NA, cemencie portlandzkim wieloskładnikowym CEM II/A-M (S-V), CEM II/A-M (S-V) - NA;
- 60% całkowitej zawartości alkaliów w przeliczeniu na $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w cemencie portlandzkim popiołowym CEM II/B-V, CEM II/B-V - NA, cemencie portlandzkim wieloskładnikowym CEM II/B-M (S-V), CEM II/B-M (S-V) - NA, cemencie hutniczym CEM III/A, CEM III/A - NA;
- 100% zawartość alkaliów w przeliczeniu na $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w domieszkach do betonu;
- 100% zawartość alkaliów w przeliczeniu na $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w wodzie zarobowej (nie dotyczy wody wodociągowej).

- w przypadku kruszyw naturalnych ze złóż krajowych ze skał litych i okruszowych nie stwierdza się znaczącego wymywania alkaliów, a co za tym idzie, alkalia wymywalne z kruszywa pomija się w bilansie $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w betonie.

Doświadczenia krajowe w zakresie doboru cementu do nawierzchni betonowych dotychczas koncentrowały się na stosowaniu cementu CEM I 42,5 R(N), spełniającego dodatkowe wymagania określone w dokumentacji technicznej [1]. W celu zmniejszenia obciążenia środowiskowego oraz zmniejszenia ryzyka wystąpienia reakcji alkalia–krzemionka, zdecydowano się na zastosowanie cementu CEM II/B-S 42,5 R-NA. JASNY CEM II/B-S 42,5 R-NA to cement portlandzki żużlowy o klasie wytrzymałości 42,5 i wysokiej wytrzymałości wczesnej (R), zgodny z normą PN-EN 197-1 oraz charakteryzujący się niską zawartością alkaliów, zgodnie z PN-B-19707. Cement ten przeznaczony jest do specjalistycznych zastosowań, w tym do infrastruktury drogowej i mostowej. Głównym składnikiem nieklinkierowym w tym cemencie jest mielony granulowany żużel wielkopiecowy, który odgrywa kluczową rolę w ograniczaniu reakcji alkalia–kruszywo. Skuteczność tego składnika została potwierdzona w badaniach nad wpływem zawartości alkaliów całkowitych, rozpuszczalnych i aktywnych w cemencie na reakcje z silnie reaktywnym kruszywem ze szkła borowo-krzemionkowego, zgodnie z normą ASTM. Wyniki badań wykazały, że cement CEM II/B-S 42,5 R-NA skutecznie hamuje reakcję alkalia–krzemionka, co pozwala zakwalifikować go jako materiał niewywołujący tej reakcji w przypadku podatnych kruszyw.

Dodatkowo elementy wykonane na cemencie JASNY CEM II/B-S 42,5 R-NA mają jaśniejszy kolor, co przyczynia się do wielu pozytywnych aspektów. Z perspektywy nawierzchni betonowych można wymienić m.in.: przeciwdziałanie globalnemu ociepleniu, redukcja efektu miejskiej wyspy ciepła, oszczędność kosztów i energii na oświetlenie dróg, poprawa widoczności, szczególnie w trudnych warunkach atmosferycznych co jest kluczowe dla bezpieczeństwa drogowego [4, 5].

2. Parametry wytrzymałościowe i trwałościowe betonu nawierzchniowego

Beton zastosowany na realizowanym odcinku VI autostrady A2 został poddany weryfikacji zgodnie z wymaganiami dla betonu nawierzchniowego, określonymi w Tabeli 15 dokumentu D-05.03.04v02 [1]. Receptury zarówno górnej warstwy betonu (GWB), jak i dolnej warstwy betonu (DWB) zostały opracowane przez TPA Sp. z o.o. wraz ze wsparciem Cement Ożarów na bazie cementu CEM II/B-S 42,5 R-NA. Wybrane średnie wyniki wytrzymałościowe i trwałościowe uzyskane przez laboratorium GDDKiA, TPA Sp. z o.o. oraz Cement Ożarów przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki wytrzymałościowe oraz trwałościowe dla GWB i DWB (wartości średnie).

Właściwości betonu	Jednostka	Wymagania	GWB	DWB
Wytrzymałość na ściskanie po 56 dniach ¹⁾ , nie niższa niż:	MPa	C35/45	65,1	63,4
Wytrzymałość betonu na zginanie po 56 dniach ¹⁾ , nie niższa niż:	MPa	5,5	7,8	7,7
Wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu po 56 dniach ¹⁾ , nie niższa niż:	MPa	3,5	5,0	4,8
Charakterystyka porów powietrznych w betonie - zawartość mikroporów o średnicy poniżej 0,3 mm (A300), - wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie L,	% mm	$\geq 1,5$ $\leq 0,200$	2,94 0,120	2,84 0,140
Kategoria mrozoodporności po 56 dniach ¹⁾ dla GWB, nie niższa niż:	----	FT2	FT2	----
Mrozoodporność F150, przy badaniu na działanie mrozu w 56 dniu ¹⁾ dla DWB - ubytek masy, nie więcej niż: - spadek wytrzymałości na ściskanie, nie więcej niż: - próbki nie wykazują pęknięć	% % ----	5 20 brak spękań	---- ---- ----	0,0 3,2 brak

¹⁾ Zgodnie z czasem równoważnym wynikającym z charakterystyki użytego cementu wg tabeli 16 [1].

Uzyskane i przedstawione wyniki dotyczące wytrzymałości oraz trwałości potwierdzają bardzo wysokie parametry betonu nawierzchniowego na bazie cementu CEM II/B-S 42,5 R-NA. W trakcie realizacji inwestycji parametry betonu zarówno warstwy górnej, jak i dolnej, cechowały się stabilnością i powtarzalnością.

W ramach dalszych działań mających na celu ograniczenie śladu węglowego w realizowanym projekcie, zespół STRABAG oraz CEMENT OŻARÓW zaproponowali Zamawiającemu innowacyjne rozwiązanie materiałowe. Polegało ono na zastosowaniu cementu hutniczego CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA w dolnej warstwie nawierzchni betonowej. W warstwie górnej pozostawiono sprawdzone rozwiązanie oparte na cemencie JASNY CEM II/B-S 42,5 R-NA. Przedstawiono program odcinka doświadczalnego o długości około 1 km. Odcinek próbny został wykonany w VII 2025.

W marcu 2025 roku, na Wytwórni Betonu Towarowego STRABAG, wraz z Generalną Dyrekcją Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA), przeprowadzono zaroby próbne, które umożliwiły zatwierdzenie receptury dolnej warstwy betonu opartej na cemencie CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA. Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki dolnej warstwy na bazie CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA

Właściwości betonu	Jednostka	Wymagania	DWB
Wytrzymałość na ściskanie po 90 dniach ¹⁾ , nie niższa niż:	MPa	C35/45	56,2
Wytrzymałość betonu na zginanie po 90 dniach ¹⁾ , nie niższa niż:	MPa	5,5	7,3
Wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu po 90 dniach ¹⁾ , nie niższa niż:	MPa	3,5	5,1
Charakterystyka porów powietrznych w betonie			
- zawartość mikroporów o średnicy poniżej 0,3 mm (A300),	%	≥ 1,5	2,47
- wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie L,	mm	≤ 0,200	0,120
Mrozoodporność F150, przy badaniu na działanie mrozu w 90 dniu ¹⁾ dla DWB			
- ubytek masy, nie więcej niż:	%	5	0,1
- spadek wytrzymałości na ściskanie, nie więcej niż:	%	20	3,5
- próbki nie wykazują pęknięć	----	brak spękań	brak spękań

¹⁾ Zgodnie z czasem równoważnym wynikającym z charakterystyki użytego cementu wg tabeli 16 [1].

Przedstawione wyniki jednoznacznie potwierdzają możliwość zastosowania tego rodzaju cementu w analizowanej aplikacji. Uzyskane parametry techniczne, zarówno pod względem wytrzymałości, jak i trwałości, wskazują na pełną zgodność z wymaganiami stawianymi materiałom stosowanym w nawierzchniach betonowych. Tym samym cement ten może być bezpiecznie i efektywnie wykorzystywany w realizacjach infrastrukturalnych, spełniając zarówno kryteria jakościowe, jak i środowiskowe.

3. Ślad węglowy betonu nawierzchniowego

Zastosowanie mielonego granulowanego żużla wielkopiecowego w cemencie JASNY CEM II/B-S 42,5 R-NA pozwala znacząco ograniczyć jego ślad węglowy — aż o około 30% w porównaniu do cementu CEM I 42,5 R. Tak istotna redukcja emisji przekłada się bezpośrednio na zmniejszenie śladu węglowego betonowych nawierzchni.

Przeprowadzono szereg testów potwierdzających przydatność cementu CEM II/B-S 42,5 R-NA o obniżonym śladzie węglowym do zastosowań w nawierzchniach betonowych. Dla opracowanych receptur oszacowano ślad węglowy betonu (CO₂eq) w zakresie faz A1–A3, zgodnie z metodyką oceny cyklu życia (LCA – Life Cycle Assessment) według normy PN-EN 15804+A2:2020-03 [2]. Ocena cyklu życia obejmuje kilka etapów, które przedstawiono w poniższej tabeli 4. Do obliczeń śladu węglowego betonu [kg CO₂eq/m³ mieszanki betonowej] uwzględniono produkcję

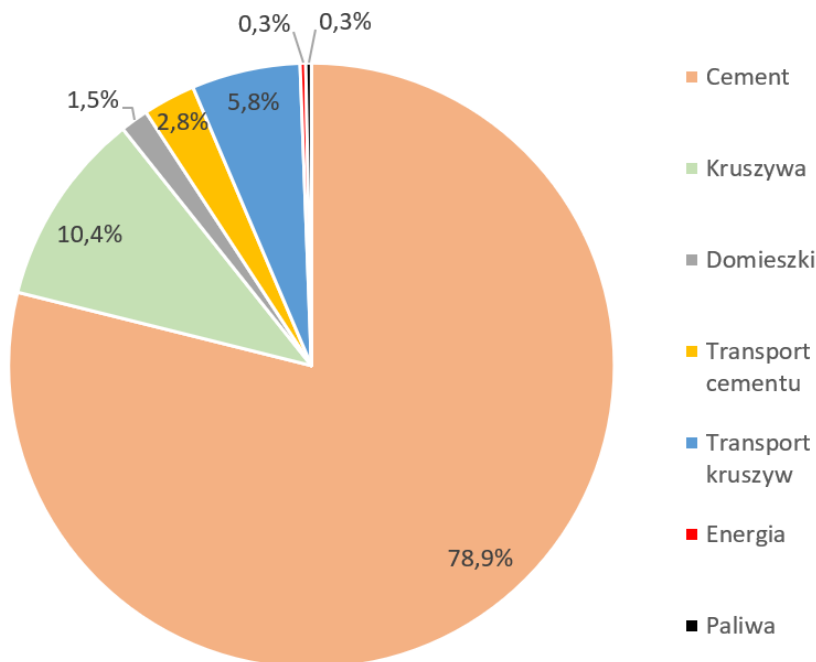
poszczególnych składników, ich transport na miejsce wbudowania oraz proces wytworzenia 1 m³ betonu [2].

Tabela 4. Cykl życia i fazy cyklu życia obiektów budowlanych według PN-EN 15804+A2:2020-03 [2]

FAZA WYROBU	A1	Wydobycie i wytwarzanie surowców
	A2	Transport surowców
	A3	Produkcja wyrobów
FAZA WBUDOWANIA	A4	Transport
	A5	Wbudowanie
FAZA UŻYTKOWANIA	B1	Użytkowanie
	B2	Konserwacja
	B3	Naprawa
	B4	Wymiana
	B5	Renowacja
	B6	Zużycie energii
	B7	Zużycie wody
FAZA KOŃCA CYKLU ŻYCIA	C1	Rozbiórka
	C2	Transport
	C3	Utylizacja/ponowne użycie
	C4	Składowanie
POZA CYKLEM ŻYCIA	D	Ponowne wykorzystanie/Recykling

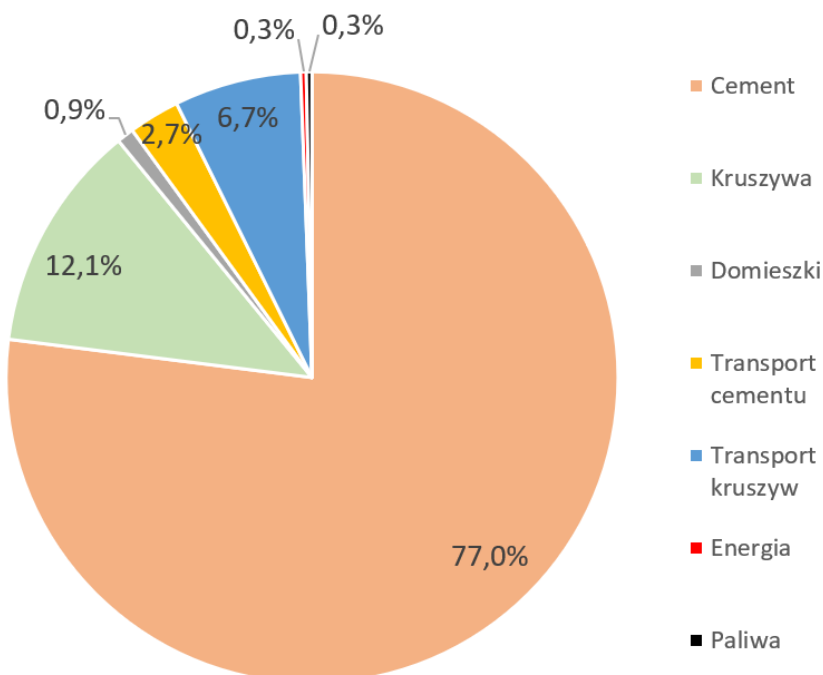
W tradycyjnym i powszechnie stosowanym rozwiązaniu, cement odpowiedzialny jest za około 77% śladu węglowego betonu w fazie wyrobu A1-A3 (przyjęto wartość śladu węglowego dla CEM I 42,5 R (N) podaną w Deklaracji Środowiskowej III Typu opublikowaną przez Stowarzyszenie Producentów Cementu) [3]. Wartości nieznacznie się różnią w zależności od warstwy betonu: górna czy dolna, co przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

Udział składników w GWB na bazie CEM I 42,5 R



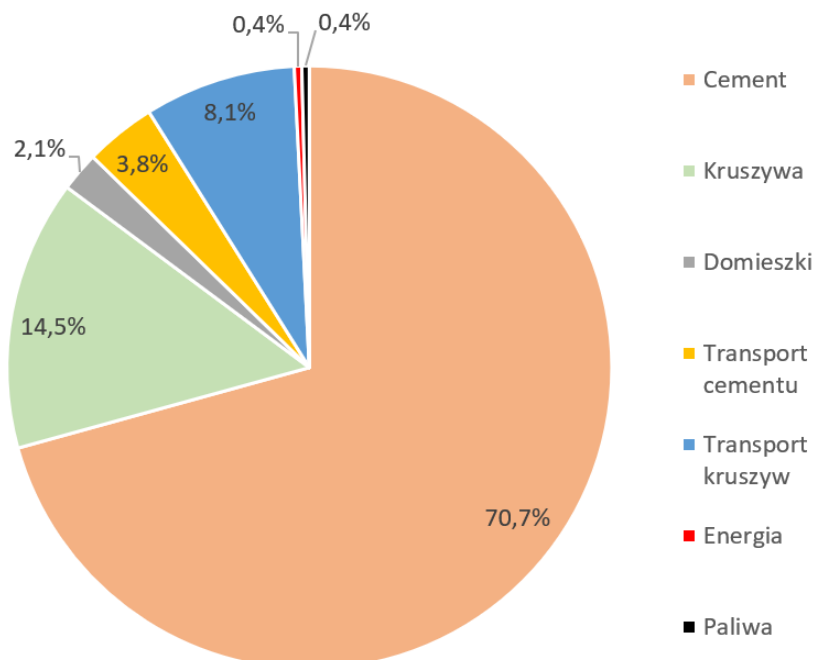
Rysunek 1. Udział w śladzie węglowym betonu warstwy GWB poszczególnych składników dla CEM I 42,5 R.

Udział składników w DWB na bazie CEM I 42,5 R



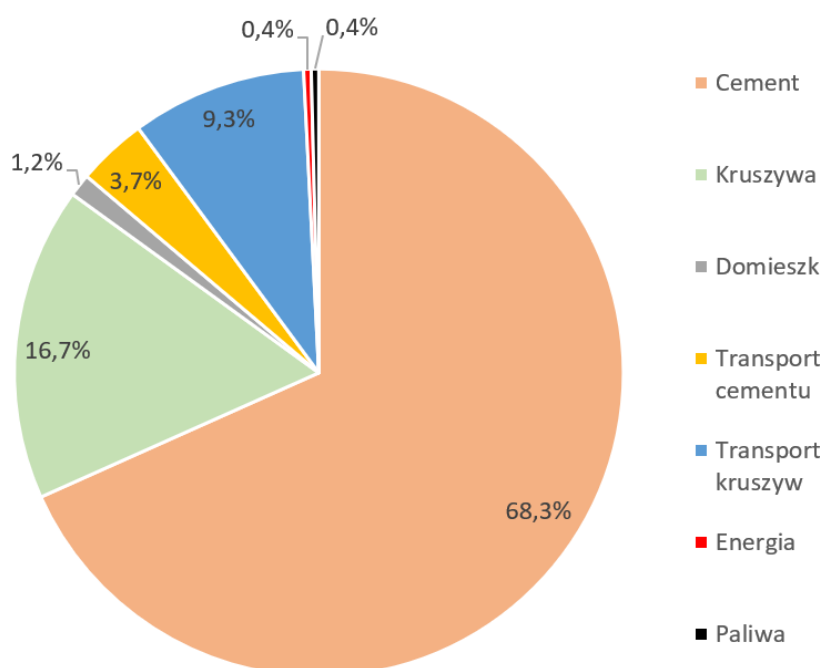
Rysunek 2. Udział w śladzie węglowym betonu warstwy DWB poszczególnych składników dla CEM I 42,5 R.

Udział składników w GWB na bazie CEM II/B-S 42,5 R-NA



Rysunek 3. Udział w śladzie węglowym betonu warstwy GWB poszczególnych składników dla CEM II/B-S 42,5 R-NA.

Udział składników w DWB na bazie CEM II/B-S 42,5 R-NA



Rysunek 4. Udział w śladzie węglowym betonu warstwy DWB poszczególnych składników dla CEM II/B-S 42,5 R-NA.

Zastosowanie cementu CEM II/B-S 42,5 R-NA o obniżonym śladzie węglowym, jako zamiennika dla cementu CEM I 42,5 R (N), spowodowało zmianę proporcji udziału poszczególnych składników w całkowitym śladzie węglowym betonu. W nowym rozwiązaniu cement odpowiada za około 70% emisji CO₂eq w fazie wyrobu (A1–A3), co przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Wartość śladu węglowego dla cementu CEM II/B-S 42,5 R-NA przyjęto na podstawie Deklaracji Środowiskowej III typu opracowanej dla Cementu Ożarów [6].

W tabeli 5 przedstawiono ślad węglowy betonu [kg CO₂eq/m³] dla fazy wyrobu A1-A3 w zależności od warstwy nawierzchni oraz wykorzystanego cementu w przeliczeniu na wyprodukowanie 1m³ betonu.

Tabela 5. Ślad węglowy dla GWB i DWB w zależności od rodzaju cementu

Warstwa nawierzchni	Rodzaj cementu	Ślad węglowy 1 m ³ betonu [kg CO ₂ eq/m ³]
GWB	CEM I 42,5 R,N ¹⁾	386,9
	CEM II/B-S 42,5 R-NA ²⁾	278,1
DWB	CEM I 42,5 R,N ¹⁾	359,7
	CEM II/B-S 42,5 R-NA ²⁾	261,1
	CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA ²⁾	206,3

¹⁾ Wartości śladu węglowego cementu zgodnie z Deklaracją Środowiskową III Typu Stowarzyszenia Producentów Cementu [3].

2) Wartości śladu węglowego cementu zgodnie z Deklaracją Środowiskową III Typu Cement Ożarów [6,7].

Na odcinku A2 Siedlce Południe (dawniej Swoboda) – Malinowice (odcinek VI) powstanie 360 000 m² nawierzchni wykonanej w technologii betonowej. Górna warstwa betonu (GWB) będzie miała grubość 5 cm, a dolna warstwa (DWB) – 22 cm. Na podstawie tych parametrów oszacowano zapotrzebowanie na beton: 18 000 m³ dla warstwy GWB oraz 79 200 m³ dla warstwy DWB.

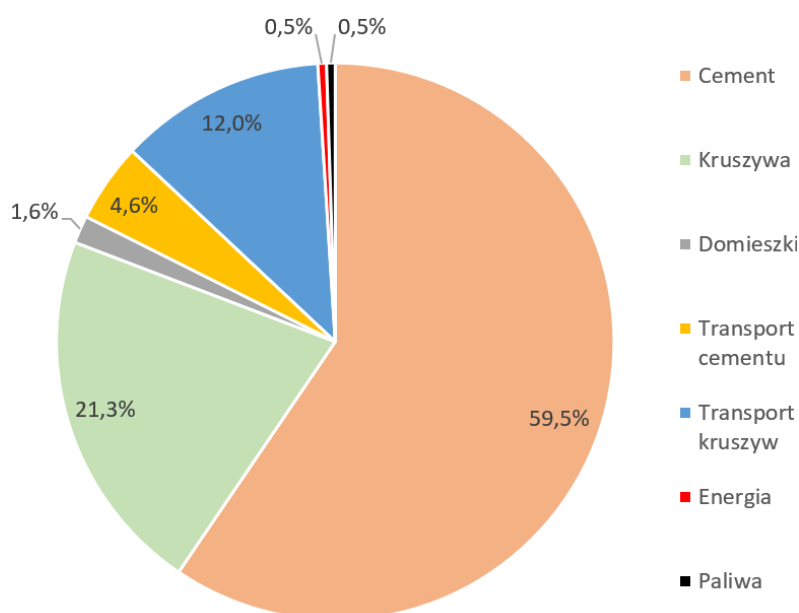
Zastąpienie cementu CEM I 42,5 R (N) cementem CEM II/B-S 42,5 R-NA produkcji Cement Ożarów pozwoliło na redukcję śladu węglowego betonu w fazie wyrobu (A1–A3) o 9 767 520 kg CO₂eq, co stanowi około 28% w porównaniu do tradycyjnego rozwiązania.

Państwa Europy Zachodniej poszły o krok dalej w ograniczaniu śladu węglowego nawierzchni betonowych. W ich specyfikacjach technicznych nie występuje wymóg stosowania tego samego rodzaju i klasy cementu w obu warstwach betonu – górnej i dolnej. W ostatnich latach w Niemczech standardem stało się rozwiązanie polegające na zastosowaniu cementu CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA w dolnej warstwie oraz cementu CEM I 42,5 R(N) w warstwie górnej. Takie podejście, choć powszechnie stosowane za granicą, jest obecnie niedopuszczalne w świetle polskich przepisów.

Warto zadać pytanie, czy to ograniczenie jest rzeczywiście uzasadnione? Odpowiedzią może być przytoczony w niniejszym referacie doświadczalny odcinek na kontrakcie A2 odc.VI, w którym zastosowano cement HUTNICZY CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA w dolnej warstwie nawierzchni betonowej a w górnej cement JASNY CEM II/B-S 42,5 R-NA.

Ślad węglowy 1 m³ betonu dolnej warstwy w fazie wyrobu [A1-A3] na bazie cementu CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA wynosi 206,3 [kg CO₂eq/m³] (Wartości śladu węglowego cementu zgodnie z Deklaracją Środowiskową III Typu Cement Ożarów [7]). Układ w śladzie węglowym poszczególnych składowych dla warstwy DWB przedstawia poniższy rysunek.

Udział składników w DWB na bazie CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA



Rysunek 5. Udział w śladzie węglowym betonu warstwy DWB poszczególnych składników dla CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA.

Porównując wcześniejsze obliczenia dotyczące zastosowania cementów CEM I 42,5 R(N) oraz CEM II/B-S 42,5 R-NA Cement Ożarów dla deklarowanej ilości betonu nawierzchniowego na analizowanym kontrakcie z obecnie stosowanym rozwiązaniem opartym na cemencie CEM II/B-S 42,5 R-NA oraz z wariantem doświadczalnym, w którym w dolnej warstwie zastosowano cement CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA Cement Ożarów, można wykazać dodatkowy potencjał redukcji emisji.

W odniesieniu do rozwiązania zastosowanego na kontrakcie A2, odcinek VI, gdzie zarówno górna (GWB), jak i dolna warstwa betonu (DWB) oparta jest na cemencie CEM II/B-S 42,5 R-NA, zastosowanie wariantu doświadczalnego – z cementem CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA w dolnej warstwie – pozwala na dodatkową redukcję śladu węglowego betonu w fazie wyrobu (A1–A3) o 4 340 160 kg CO₂eq, co stanowi około 17%. W porównaniu do tradycyjnego rozwiązania opartego na cemencie CEM I 42,5 R(N), redukcja emisji wynosi aż 14 107 680 kg CO₂eq, czyli około 40%.

4. Podsumowanie

STRABAG wspólnie z CEMENT OŻARÓW wprowadził rozwiązanie pozwalające znacznie zredukować ślad węglowy nawierzchni betonowej, co w dużym stopniu pozytywnie wpływa na środowisko, w którym żyjemy i pracujemy. W ramach dążeń do zwiększenia trwałości nawierzchni drogowych oraz jeszcze większego ograniczenia śladu węglowego w budownictwie infrastrukturalnym, podjęto dalsze działania mające na celu praktyczną weryfikację przydatności cementu CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA w dolnej warstwie nawierzchni betonowej autostrady.

Po uzyskaniu akceptacji Zamawiającego wykonano odcinek doświadczalny o długości ok 1 km na jezdni zasadniczej autostrady A2 z zastosowaniem różnego rodzaju spoiw w GWB i DWB. Zakres badań obejmował zarówno kontrolę parametrów mieszanek betonowych w trakcie wbudowania, jak i kompleksową ocenę nawierzchni w procesie hydratacji bezpośrednio po jej ułożeniu. Ciągły nadzór technologiczny nad produkcją mieszanek betonowych i wykonawstwem nawierzchni z betonu cementowego sprawowało laboratorium TPA Sp. z o.o.

Przeprowadzone analizy potwierdziły:

- Właściwą urabialność mieszanek przy zachowaniu wymaganych czasów wiązania i twardnienia.
- Zgodność parametrów mieszanek betonowych w procesie układania z wymaganiami Specyfikacji.
- Niską podatność na powstawanie spękań powierzchniowych i skurcz plastyczny.

Wspólna strategia i determinacja firmy Cement Ożarów, jako producenta cementu oraz przedsiębiorstwa Strabag jako producenta mieszanek i wykonawcy nawierzchni betonowej, jak i doświadczenie zdobyte na etapie realizacji odcinka testowego stanowią bez wątpienia solidną podstawę do szerszego wdrażania nowoczesnych, trwałych nawierzchni betonowych w przyszłych projektach drogowych, zgodnie z kierunkiem zrównoważonego rozwoju budownictwa infrastrukturalnego w Polsce.

5. Literatura

- [1] Warunki wykonania i odbioru robót budowlanych D-05.03.04v02 Nawierzchnia z betonu cementowego, GDDKiA, Warszawa 2019
- [2] PN-EN 15804+A2:2020-03 Zrównoważenie obiektów budowlanych -- Deklaracje środowiskowe wyrobu -- Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych
- [3] Deklaracja Środowiskowa III Typu – EPD, Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2020
- [4] Wysokie albedo – arkusz informacyjny, EUPAVE i SPC, 2020
- [5] Mniejsze zużycie paliwa – arkusz informacyjny, EUPAVE i SPC, 2020
- [6] Deklaracja Środowiskowa III Typu – EPD dla CEM II/B-S 42,5 R-NA, Cement Ożarów, 2024
- [7] Deklaracja Środowiskowa III Typu – EPD dla CEM II/B-S 42,5 R-NA, Cement Ożarów, 2024
- [8] Warunki wykonania i odbioru robót budowlanych D-05.03.04v03 Nawierzchnia z betonu cementowego, GDDKiA, Warszawa 2025
- [9] Podsumowanie 2023 roku, Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad; <https://www.gov.pl/web/gddkia/podsumowanie-2023-roku>

- [10] Drogi betonowe – jest ich w Polsce coraz więcej. Są lepsze od asfaltowych., Stowarzyszenie Producentów Cementu, Murator Plus, 2022
- [11] Drogi betonowe są tańsze od asfaltowych, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Piotr Pietrzyński, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, 2016
- [12] Doświadczenia z budowy i utrzymania nawierzchni betonowych w Polsce, Prof. dr hab. inż. Antoni Szydło, Politechnika Wrocławska, 2017

inż. Mariusz Sumionka, AG-CEL Laboratorium
mgr inż. Ireneusz Trzynski, AG-CEL Laboratorium
mgr inż. Piotr Rydygier, AG-CEL Laboratorium

Zastosowanie cementu niskoemisyjnego CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5R do produkcji mieszanek związanych cementem wg PN-EN 14227-1 i WT-5 z wykorzystaniem produktu uzyskanego w ramach gospodarki obiegu zamkniętego z kopalni kruszyw.

Application of low-emission cement CEM II/C-M (V-F-LL) 32.5R for the production of cement-bound mixtures according to PN-EN 14227-1 and WT-5 using a product obtained in a closed-loop economy from aggregate mines.

Streszczenie

Mieszanki związane cementem są powszechnie stosowane do budowy nawierzchni drogowych na warstwy ulepszonego podłoża oraz podbudowy. Ich producenci, podobnie jak w przypadku betonu towarowego, stoją przed wyzwaniami związanymi z dekarbonizacją sektora budownictwa. Wśród działań zmierzających do obniżenia śladu węglowego produkowanych mieszanek wymienić można zastosowanie cementu o niższej emisyjności oraz wykorzystanie materiałów odpadowych powstających podczas produkcji kruszyw naturalnych. Jednocześnie należy mieć na uwadze spełnienie wymagań stawianych mieszankom związanym cementem przez dokumenty stosowane w budownictwie. W referacie przedstawiono wyniki badań mieszanek związanych cementem wytworzonych z zastosowaniem cementu niskoemisyjnego CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5R oraz produktu uzyskanego w ramach gospodarki obiegu zamkniętego z odpadów powstających przy produkcji kruszyw naturalnych. Na podstawie uzyskanych wyników określono wpływ podjętych działań na obniżenie śladu węglowego analizowanych mieszanek związanych cementem.

Abstract

Cement-bound mixtures are commonly used for the construction of road surfaces for improved subgrade and base layers. Their producers, similarly to ready-mix concrete, face challenges related to the decarbonization of the construction sector. Among the actions aimed at reducing the carbon footprint of produced mixtures, one can mention the use of cement with lower emission and the use of waste materials generated during the production of natural aggregates. At the same time, it is necessary to take into account the compliance with the requirements set for cement-bound mixtures by documents used in construction. The paper presents the results of

tests of cement-bound mixtures manufactured using low-emission cement CEM II/C-M (V-F-LL) 32.5R and a product obtained within the framework of the closed-loop economy from waste generated during the production of natural aggregates. Based on the obtained results, the impact of the actions taken on reducing the carbon footprint of the analyzed cement-bound mixtures was determined.

1. Wprowadzenie

Powszechnie uważa się, że zmiany klimatu to najważniejsze wyzwanie naszych czasów [1]. Wychodząc im naprzeciw przyjęto ambitne cele mające prowadzić do dekarbonizacji gospodarki, w tym również sektora budownictwa. Producenci wyrobów budowlanych, w tym także mieszanek związanych cementem, stoją przed wyzwaniami związanymi ze zmniejszeniem śladu węglowego produkowanych przez nich materiałów przy jednoczesnym spełnieniu wymagań użytkowych. W tym celu poszukuje się nowych rozwiązań materiałowych, polegających m.in. na aplikowaniu surowców niskoemisyjnych oraz zagospodarowaniu odpadów. Branża cementowa oferuje coraz szerszą gamę cementów charakteryzujących się niższym śladem węglowym, głównie poprzez ograniczenie zawartości klinkieru portlandzkiego na rzecz innych składników. Jedną z takich propozycji jest cement CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R zgodny z normą PN-EN 197-6 [2] zawierający w swym składzie pyły pochodzące z recyklingu betonu. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań mieszanek związanych cementem, wykonanych w warunkach laboratoryjnych z zastosowaniem ww. cementu oraz różnych układów kruszyw.

2. Mieszanki związane cementem

Mieszanka związana cementem (CBGM, od ang. „cement bound granular mixtures”) jest to mieszanka, w której następuje wiązanie i twardnienie na skutek reakcji hydraulicznych [5, 6]. Normą wyrobu jest norma klasyfikacyjna PN-EN 14227-1 [5], natomiast dokumentami aplikującymi jej postanowienia do potrzeb naszego kraju są Wymagania Techniczne WT-5 2010 [6] oraz w postępowaniach przetargowych Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (WWIORB) [13]. Mieszanki CBGM są powszechnie stosowane do wykonywania warstw konstrukcji nawierzchni drogowych [6, 13]. W tabeli 1 przedstawiono układ warstw konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych zgodnie z KTKN PiP [11], natomiast w tabeli 2 – układ warstw konstrukcji nawierzchni sztywnych zgodnie z KTKNS [12]. Odcieniem szarości oznaczono warstwy, do budowy których zgodnie z odpowiednimi dokumentami [6, 11, 12, 13] można stosować mieszanki związane cementem.

Tabela 1. Układ warstw konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych.

Konstrukcja nawierzchni (nawierzchnia)	Warstwy górne konstrukcji nawierzchni	Warstwa ścieralna	
		Warstwa wiążąca	
		Podbudowa zasadnicza	Górna warstwa podbudowy zasadniczej
			Dolna warstwa podbudowy zasadniczej
	Warstwy dolne konstrukcji nawierzchni	Podbudowa pomocnicza	
		Warstwa mrozochronna	
Podłoże gruntowe nawierzchni	Warstwa ulepszanego podłoża		
	Grunt rodzimy w wykopie lub grunt nasypowy w nasypie		

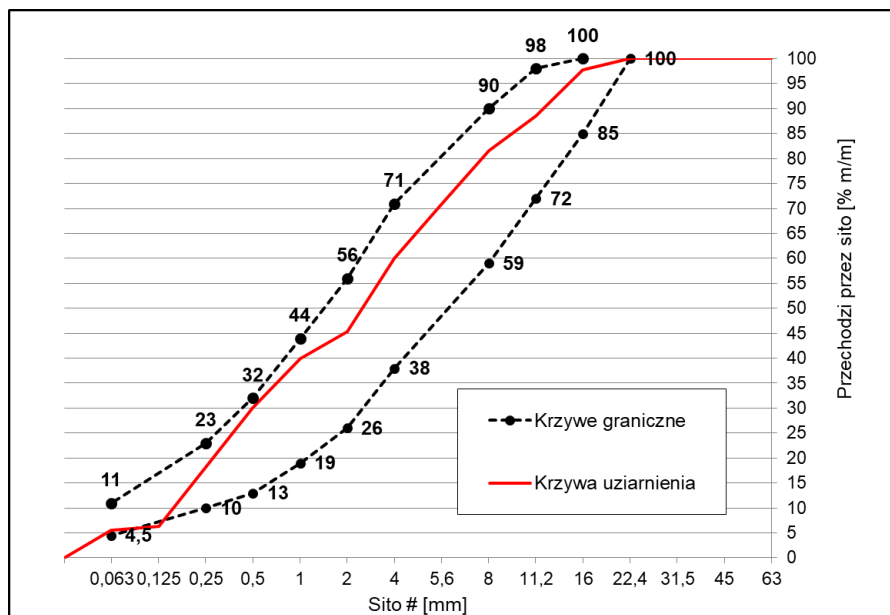
Tabela 2. Układ warstw konstrukcji nawierzchni sztywnych.

Konstrukcja nawierzchni (nawierzchnia)	Warstwy górne konstrukcji nawierzchni	Warstwa nawierzchniowa
		Warstwa poślizgowa
		Podbudowa zasadnicza
	Warstwy dolne konstrukcji nawierzchni	Podbudowa pomocnicza
		Warstwa mrozochronna
Podłoże gruntowe nawierzchni	Warstwa ulepszanego podłoża	
	Grunt rodzimy w wykopie lub grunt nasypowy w nasypie	

Do produkcji mieszanek CBGM stosowane są kruszywa (naturalne, sztuczne bądź z recyklingu) zgodne z normą PN-EN 12522 [10], cement pełniący funkcję spoiwa, woda oraz ewentualne dodatki i domieszki.

Należy zwrócić uwagę, że w świetle przepisów [5, 6, 13] do produkcji mieszanek CBGM należy stosować cement zgodny z normą PN-EN 197-1 [4]. Poszukiwanie rozwiązań niskoemisyjnych spowodowało, że opracowane zostały kolejne normy [2, 3] dotyczące nowych rodzajów cementów, w tym cementów zawierających pył z recyklingu betonu [2]. W związku z powyższym dokumenty odnoszące się do mieszanek związanych hydraulicznie, w tym mieszanek związanych cementem, wymagają aktualizacji, by umożliwić w zgodzie z nimi produkcję mieszanek w oparciu o nowe, niskoemisyjne rozwiązania materiałowe.

Dobór kruszyw do mieszanek CBGM polega nie tylko na weryfikacji ich cech w kontekście wymagań stawianych przez WT-5 czy WWIORB [6, 13], ale także na skomponowaniu odpowiedniej krzywej uziarnienia mieszanki mineralnej, pozwalającej uzyskać odpowiednią szczelność zagęszczonej mieszanki CBGM. Na rys. 1 przedstawiono przykład uziarnienia mieszanki mineralnej na tle krzywych granicznych dla mieszanki 0/16 mm wg WT-5.



Rys. 1. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej 0/16 mm.

Jednym z wymogów jest zapewnienie odpowiedniej ilości frakcji o wymiarze $<0,063$ mm. W praktyce uzyskuje się to przez zastosowanie dodatków np. popiołu lotnego, który spełnia w mieszance rolę mikrokruszywa, bądź zastosowanie kruszyw o podwyższonej zawartości pyłów w porównaniu do kruszyw płukanych. Alternatywą jest również wykorzystanie materiałów odpadowych powstających w wyniku wydobywania i przeróbki kruszyw naturalnych, np. w procesie płukania.

Procedura projektowania mieszanek CBGM oparta jest o badania laboratoryjne, przeprowadzone na tych samych składnikach, które mają być docelowo stosowane podczas produkcji. Po ustaleniu składu mieszanki spełniającego wymagania w zakresie uziarnienia oraz minimalnej zawartości cementu, wykonuje się badanie zagęszczalności metodą Proctora zgodnie z PN-EN 13286-2 [7] celem określenia maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu mieszanki oraz optymalnej zawartości wody, przy której uzyskuje się największe zagęszczenie. Podstawą określenia przydatności mieszanki jest wynik badania wytrzymałości na ściskanie wg PN-EN 13286-41 [8] po 28 dniach pielęgnacji, przeprowadzonego na próbkach walcowych wykonanych zgodnie z PN-EN 13286-50 [9]. Zasady pielęgnacji próbek do badań określają zapisy WT-5. Badanie wytrzymałości można dodatkowo wykonywać w celach kontrolnych po innym czasie pielęgnacji, jednak w procesie oceny zgodności wyrobu wiążące pozostają wymagania dotyczące wytrzymałości po 28 dniach pielęgnacji. Dodatkowym wymaganiem stawianym mieszankom CBGM w zależności od przeznaczenia w konstrukcji nawierzchni drogowej jest mrozoodporność, charakteryzowana przez wskaźnik mrozoodporności, który określa się przez porównanie wytrzymałości na ściskanie próbek po 28 dniach pielęgnacji oraz próbek poddanych po tym okresie dodatkowo 14 cyklom zamrażania i odmrażania, zgodnie z zapisami WT-5.

3. Program i wyniki badań

Z uwagi na kwestie ekonomiczne, do produkcji mieszanek CBGM najczęściej stosowany jest cement portlandzki popiołowy CEM-II/B-V 32,5R. Na potrzeby niniejszej pracy posłużył on jako cement referencyjny. W celu oceny możliwości zastosowania cementu niskoemisyjnego CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5R jako alternatywnego spoiwa do produkcji mieszanek CBGM, przeprowadzono badania na trzech seriach mieszanek (oznaczonych jako seria 1, seria 2 oraz seria 3) o różnym składzie kruszywowym. W składzie mieszanek serii 1 zastosowano kruszywa polodowcowe frakcji 0/2, 2/8 i 8/16 mm, pochodzące z Żwirowni Ostrowite. W składzie mieszanek serii 2, część kruszywa drobnego 0/2 mm zastąpiono kruszywem wapiennym 0/4 mm pochodzącym z kopalni Wapienno, w celu uzupełnienia wymaganej przez WT-5 zawartości frakcji <0,063 mm (zawartość pyłów w kruszywie wapiennym 0/4 mm wynosiła 15% m/m). W mieszankach serii 3, część kruszywa drobnego 0/2 mm zastąpiono produktem uzyskanym z płukania nadawy w ramach gospodarki obiegu zamkniętego w kopalni kruszyw Głazica. Produkt ten, stanowiący kruszywo drobne frakcji 0/0,5 mm o zawartości pyłów 30% m/m, zastosowano analogicznie jak kruszywo wapienne w celu uzupełnienia wymaganej przez WT-5 zawartości frakcji <0,063 mm. Dla każdej z trzech serii mieszanek opracowano dwa warianty różniące się rodzajem zastosowanego cementu: wariant B z zastosowaniem cementu CEM-II/B-V 32,5 R-HSR/NA oraz wariant F z zastosowaniem cementu CEM II/C-M (V-F-LL) 32,5R. W tabelach 1÷3 przedstawiono składy receptur badanych mieszanek.

Tabela 1. Skład mieszanek serii 1

Mieszanka CBGM 0/16 - seria 1		
Składniki	Wariant 1-B	Wariant 1-F
Piasek 0/2 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	41,4%	41,4%
Żwir 2/8 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	39,0%	39,0%
Żwir 8/16 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	15,0%	15,0%
Kruszywo wapienne 0/4 mm (Kopalnia Wapienno, HOLCIM)	0,0%	0,0%
Kruszywo drobne 0/0,5 mm (Kopalnia Głazica)	0,0%	0,0%
Cement CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (Cementownia Kujawy, HOLCIM)	4,6%	0,0%
Cement CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (Cementownia Kujawy, HOLCIM)	0,0%	4,6%

Tabela 2. Skład mieszanek serii 2

Mieszanka CBGM 0/16 - seria 2		
Składniki	Wariant 2-B	Wariant 2-F
Piasek 0/2 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	16,4%	16,4%
Żwir 2/8 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	39,0%	39,0%
Żwir 8/16 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	15,0%	15,0%
Kruszywo wapienne 0/4 mm (Kopalnia Wapienno, HOLCIM)	25,0%	25,0%
Kruszywo drobne 0/0,5 mm (Kopalnia Głazica)	0,0%	0,0%
Cement CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (Cementownia Kujawy, HOLCIM)	4,6%	0,0%
Cement CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (Cementownia Kujawy, HOLCIM)	0,0%	4,6%

Tabela 3. Skład mieszanek serii 3

Mieszanka CBGM 0/16 - seria 3		
Składniki	Wariant 3-B	Wariant 3-F
Piasek 0/2 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	29,4%	29,4%
Żwir 2/8 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	39,0%	39,0%
Żwir 8/16 (Żwirownia Ostrowite, HOLCIM)	15,0%	15,0%
Kruszywo wapienne 0/4 mm (Kopalnia Wapienno, HOLCIM)	0,0%	0,0%
Kruszywo drobne 0/0,5 mm (Kopalnia Głazica)	12,0%	12,0%
Cement CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (Cementownia Kujawy, HOLCIM)	4,6%	0,0%
Cement CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (Cementownia Kujawy, HOLCIM)	0,0%	4,6%

Dla każdej receptury wykonano zaroby mieszanek w warunkach laboratoryjnych. W pierwszej kolejności określono maksymalną gęstość objętościową szkieletu mieszanek oraz optymalną zawartość wody wg PN-EN 13286-2. Wyniki badania przedstawiono w tabelach 1÷3.

Tabela 4. Wyniki badań maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu mieszanki i optymalnej zawartości wody – seria 1.

Mieszanka CBGM 0/16 - seria 1		
Cecha	Wariant 1-B	Wariant 1-F
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu mieszanki [g/cm ³]	2175	2,174
Optymalna zawartość wody [%]	5,6	5,4

Tabela 5. Wyniki badań maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu mieszanki i optymalnej zawartości wody – seria 2.

Mieszanka CBGM 0/16 - seria 2		
Cecha	Wariant 2-B	Wariant 2-F
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu mieszanki [g/cm ³]	2,194	2,198
Optymalna zawartość wody [%]	6,0	5,7

Tabela 6. Wyniki badań maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu mieszanki i optymalnej zawartości wody – seria 3.

Mieszanka CBGM 0/16 - seria 3		
Cecha	Wariant 3-B	Wariant 3-F
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu mieszanki [g/cm ³]	2,190	2,186
Optymalna zawartość wody [%]	6,7	6,4

Następnie, dla każdego wariantu zaformowano po 9 próbek w stalowych formach walcowych o wymiarach nominalnych $H = 120$ mm i $D = 100$ mm, zgodnie z PN-EN 13286-50 w celu określenia następujących cech:

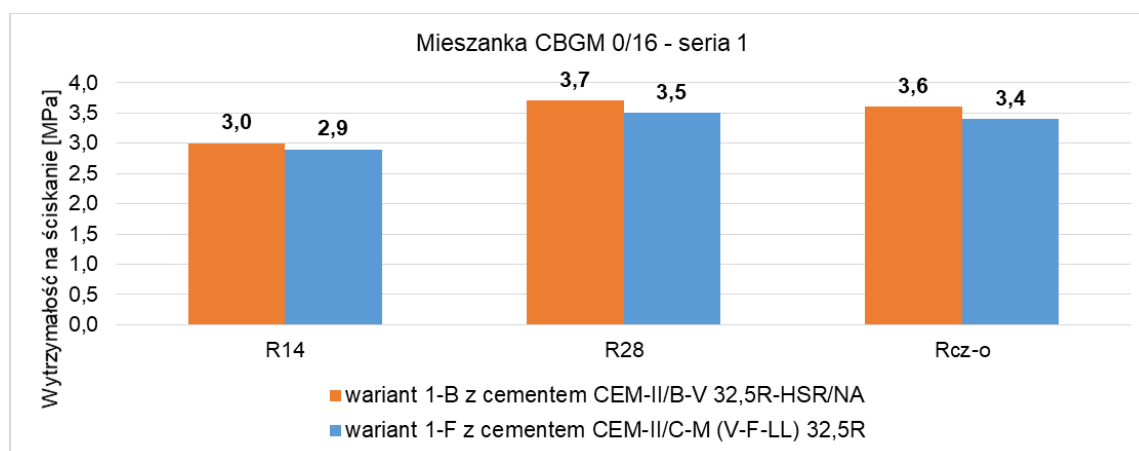
- wytrzymałości na ściskanie po 14 dniach pielęgnacji R_{14} ,
- wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach pielęgnacji R_{28} ,
- wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach pielęgnacji oraz po 14 cyklach zamrażania i odmrażania R_c^{Z-0} .

WT-5 określa sposób pielęgnacji próbek przeznaczonych do badania wytrzymałości R_{28} oraz $R_{c^{z-o}}$, nie określa natomiast procedury postępowania z próbkami przeznaczonymi do badania wytrzymałości na ściskanie po innym okresie pielęgnacji. Dla potrzeb niniejszych badań, kierując się literaturą przedmiotu [14], próbki przeznaczone do badania wytrzymałości R_{14} przechowywano do momentu badania w komorze klimatycznej, w wilgotności 95% - 100% i temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie po 14 i 28 dniach pielęgnacji oraz po 14 cyklach zamrażania i odmrażania przedstawiono w tabelach 7÷9 oraz graficznie na rysunkach 2÷4.

Tabela 7. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie próbek mieszanek serii 1.

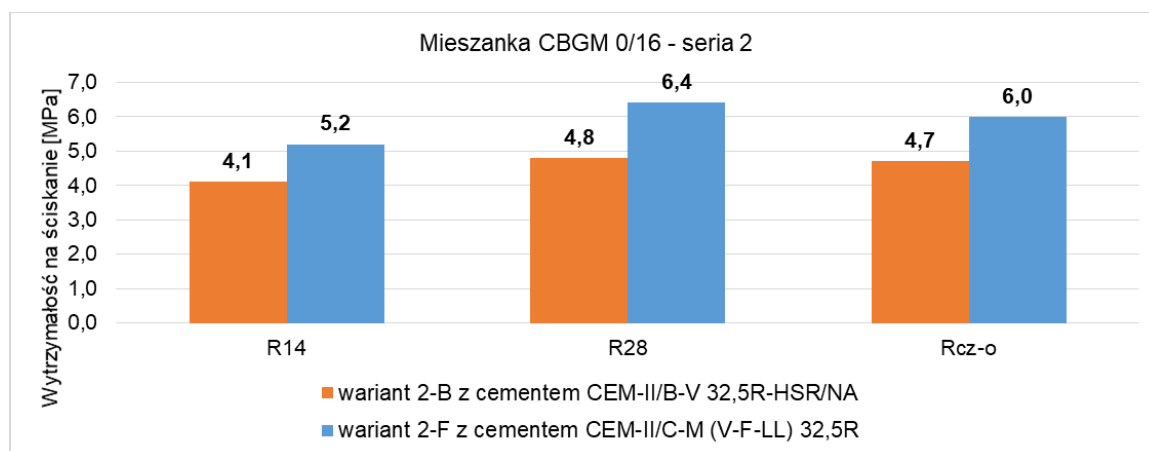
Wyniki badań mieszanki CBGM 0/16 - seria 1		
Cecha	Wariant 1-B	Wariant 1-F
	CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA	CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R
R_{14} [MPa]	3,0	2,9
R_{28} [MPa]	3,7	3,5
$R_{c^{z-o}}$ [MPa]	3,6	3,4
$R_{c^{z-o}} / R_{28}$ [-]	0,97	0,97



Rys. 2. Porównanie wytrzymałości na ściskanie mieszanek w wariantach 1-B i 1-F.

Tabela 8. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie próbek mieszanek serii 2.

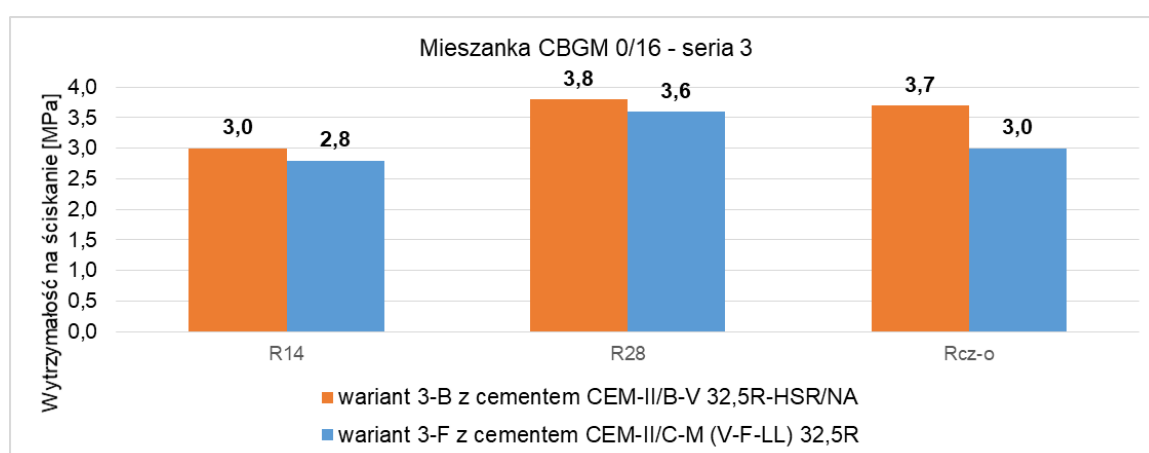
Wyniki badań mieszanki CBGM 0/16 - seria 2		
Cecha	Wariant 2-B	Wariant 2-F
	CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA	CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R
R_7 [MPa]	4,1	5,2
R_{28} [MPa]	4,8	6,4
$R_{c^{z-o}}$ [MPa]	4,7	6,0
$R_{c^{z-o}} / R_{28}$ [-]	0,98	0,94



Rys. 3. Porównanie wytrzymałości na ściskanie mieszanek w wariantach 2-B i 2-F.

Tabela 9. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie próbek mieszanek serii 3.

Wyniki badań mieszanki CBGM 0/16 - seria 3		
Cecha	Wariant 3-B	Wariant 3-F
	CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA	CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R
R ₇ [MPa]	3,0	2,8
R ₂₈ [MPa]	3,8	3,6
R _{c^{Z-o}} [MPa]	3,7	3,0
R _{c^{Z-o}} / R ₂₈ [-]	0,97	0,83



Rys. 4. Porównanie wytrzymałości na ściskanie mieszanek w wariantach 3-B i 3-F.

W przypadku mieszanek serii 1, wytrzymałość wczesna R₁₄ mieszanki wykonanej z zastosowaniem cementu CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (wariant 1-F) była o 3,3% niższa niż wytrzymałość R₁₄ mieszanki wykonanej z zastosowaniem cementu CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (wariant 1-B). Dla wytrzymałości normowej R₂₈ różnica ta wyniosła 5,4% na korzyść mieszanki z zastosowaniem cementu CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (wariant 1-B). Oba warianty mieszanki, niezależnie od rodzaju

zastosowanego cementu, spełniły wymagania dla klasy wytrzymałości C1,5/2. Wskaźnik mrozoodporności, czyli stosunek $R_{c^{Z-O}}$ do R_{28} , dla obu wariantów wyniósł 0,97. Wartość wskaźnika mrozoodporności spełniła wymagania WT-5 zarówno dla podbudowy pomocniczej ($\geq 0,6$) jak i podbudowy zasadniczej ($\geq 0,7$).

W przypadku mieszanek serii 2, wytrzymałość wczesna R_{14} mieszanki wykonanej z zastosowaniem cementu CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (wariant 2-F) była o 26,8% wyższa niż wytrzymałość R_{14} mieszanki wykonanej z zastosowaniem cementu CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (wariant 2-B). Dla wytrzymałości normowej R_{28} różnica ta wyniosła 33,3% na korzyść mieszanki z zastosowaniem cementu CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (wariant 2-F). Mieszanka z cementem CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA spełniła wymagania dla klasy wytrzymałości C3/4, natomiast mieszanka z cementem CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R spełniła wymagania dla klasy wytrzymałości C5/6. Wskaźnik mrozoodporności wyniósł 0,98 dla wariantu 2-B oraz 0,94 dla wariantu 2-F. Wartość wskaźnika mrozoodporności dla obu wariantów spełniła wymagania WT-5 zarówno dla podbudowy pomocniczej ($\geq 0,6$) jak i podbudowy zasadniczej ($\geq 0,7$).

W przypadku mieszanek serii 3, wytrzymałość wczesna R_{14} mieszanki wykonanej z zastosowaniem cementu CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (wariant 3-F) była o 6,7% niższa niż wytrzymałość R_{14} mieszanki wykonanej z zastosowaniem cementu CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (wariant 3-B). Dla wytrzymałości normowej R_{28} różnica ta wyniosła 5,3% na korzyść mieszanki z zastosowaniem cementu CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (wariant 3-B). Oba warianty mieszanki, niezależnie od rodzaju zastosowanego cementu, spełniły wymagania dla klasy wytrzymałości C1,5/2. Wskaźnik mrozoodporności wyniósł 0,97 dla wariantu 3-B oraz 0,83 dla wariantu 3-F. Wartość wskaźnika mrozoodporności dla obu wariantów spełniła wymagania WT-5 zarówno dla podbudowy pomocniczej ($\geq 0,6$) jak i podbudowy zasadniczej ($\geq 0,7$).

Zastąpienie części kruszywa drobnego 0/2 mm kruszywem 0/0,5 mm nie spowodowało istotnych różnic w wytrzymałości R_{28} , zarówno w układzie z cementem CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA jak i CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R. Natomiast zastosowanie kruszywa wapiennego 0/4 mm istotnie zwiększyło wytrzymałość R_{28} w stosunku do wariantu bazowego (seria 1) zarówno przy zastosowaniu CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (wzrost R_{28} o 29,7%) jak i CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (wzrost R_{28} o 82,8%).

4. Podsumowanie i wnioski

Mimo wyższej wodożądności cementu CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R (29,6% wg danych producenta) w porównaniu z cementem CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA (26,5%), wyższą optymalną zawartość wody w próbie Proctora uzyskano dla mieszanek z cementem portlandzkim popiołowym. Różnice na poziomie $0,2 \div 0,3\%$ należy uznać jednak za pomijalne, wynikające z dokładności metody badawczej. Większe znaczenie w tej materii ma rodzaj zastosowanego kruszywa drobnego. Najwyższą wilgotnością optymalną charakteryzowały się mieszanki serii 3 za zastosowaniem kruszywa 0/0,5 mm.

Mieszanki serii 1 i 3 z zastosowaniem cementu CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R osiągnęły bardzo zbliżoną wytrzymałość na ściskanie, zarówno wczesną po 14 dniach pielęgnacji jak i normową po 28 dniach pielęgnacji w porównaniu do mieszanek z cementem CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA. Mieszanka serii 2 z zastosowaniem cementu CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R osiągnęła znacznie wyższą

wytrzymałość w porównaniu do mieszanki z cementem CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA. Wyniki wytrzymałości normowej w tym przypadku pozwoliły osiągnąć wyższą klasę wytrzymałości w porównaniu do mieszanki z cementem referencyjnym. Można przypuszczać, że cement CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R zawierający w swoim składzie wapien (LL) będzie wykazywał szczególną przydatność w zestawieniu z pyłami pochodzącymi z kruszywa wapiennego. Wszystkie mieszanki charakteryzowały się wysoką mrozoodpornością, spełniając z zapasem wymagania stawiane w tej materii przez WT-5.

Wyniki badań przedstawione w niniejszym referacie wskazują, że cement CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R może być pełnowartościową alternatywą dla cementu CEM-II/B-V 32,5R w kontekście produkcji mieszanek CBGM.

Istotną zaletą cementu zawierającego pył z recyklingu betonu jest również wielkość emisji CO₂ powstająca w procesie produkcji. Wielkość ta jest zdefiniowana jako potencjał globalnego ocieplenia (GWP – Global Warming Potential) albo jako ślad węglowy produktu, wyrażony w kg, jako ekwiwalent CO₂ na tonę produktu. Zgodnie z danymi udostępnionymi przez producenta, dla cementu CEM-II/B-V 32,5R-HSR/NA wartość GWP wynosi 405 kg CO₂/t, natomiast dla cementu CEM-II/C-M (V-F-LL) 32,5R wynosi 348 kg CO₂/t. Oznacza to, że przy takim samym dozowaniu spoiwa, jak w przedstawionych wyżej badaniach, z tytułu zamiany cementu można zredukować ślad węglowy mieszanek CBGM o 14%.

5. Literatura

- [1] Spajamy Europejski Zielony Ład – ROADMAP 2050, SPC
- [2] PN-EN 197-6:2023-09 Cement. Część 6: Cement z materiałów budowlanych pochodzących z recyklingu.
- [3] PN-EN 197-5:2021-07 Cement. Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i cement wieloskładnikowy CEM VI.
- [4] PN-EN 197-1:2012 Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [5] PN-EN 14227-1:2013-10 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Specyfikacje. Część 1: Mieszanki związane cementem.
- [6] Wymagania Techniczne WT-5 2010: Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych.
- [7] PN-EN 13286-2:2010 Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie. Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody. Zagęszczanie metodą Proktora
- [8] PN-EN 13286-41:2022-04 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 41: Metoda badania wytrzymałości na ściskanie mieszanek związanych hydraulicznie.
- [9] PN-EN 13286-50:2007 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 50: Metoda sporządzania próbek związanych hydraulicznie za pomocą aparatu Proktora lub zagęszczania stole wibracyjnym.
- [10] PN-EN 13242+A1:2010 Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym.
- [11] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych 2014
- [12] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych 2014

[13] WARUNKI WYKONANIA I ODBIORU ROBÓT BUDOWLANYCH D-04.05.01 v03
PODBUDOWA I WARSTWA MROZOOCHRONNA Z MIESZANKI ZWIĄZANEJ
CEMENTEM

[14] C. Kraszewski, Charakterystyka wytrzymałościowa mieszanek kruszyw
związanych hydraulicznie do stosowania w podbudowach drogowych, Drogi i Mosty,
2009, nr 3, s. 31-54.

[15] P. Stałowski, G. Schmidt, H. Losik, Podbudowy drogowe – kompendium wiedzy,
Holcim Polska S.A.

[16] P. Stałowski, Niskoemisyjne cementy i spoiwa w podbudowach drogowych, IV
Forum Beton w Drogownictwie.

Adam Oziębły

PORR S.A.

Paweł Mofina

Cemex Polska Sp. z o.o.

Daniel Owsiak

MC Bauchemie Sp. z o.o.

Doświadczenia z budowy placu postojowego dla jednostek ciężkiego sprzętu na terenie zamkniętego kompleksu wojskowego z wykorzystaniem betonu o obniżonej emisyjności.

Experiences from the construction of a staging area for heavy equipment units within a closed military complex using low-emission concrete.

Streszczenie

W obecnej sytuacji geopolitycznej Polski rozbudowa obiektów o znaczeniu militarnym jest jednym z kluczowych elementów strategii bezpieczeństwa narodowego. Nowe inwestycje w tym obszarze polegają na budowie, rozbudowie lub modernizacji co związane jest często z powstawaniem nowych placów dla sprzętu ciężkiego. Ze względu na wymagania funkcjonalne nawierzchnia z betonu cementowego jest w tym przypadku optymalnym rozwiązaniem pod względem trwałości, wytrzymałości i co bardzo ważne - szybkości realizacji oraz gotowości do obciążenia i prowadzenia dalszych robót.

Oprócz wymagań funkcjonalnych dotyczących nawierzchni betonowej przedstawionych przez Zamawiającego, istotne było również uwzględnienie rozwiązań ograniczających negatywny wpływ na środowisko. Obniżenie śladu węglowego wbudowanego to obecnie jedno z największych wyzwań branży budowlanej. Jednym z głównych źródeł emisji CO₂ w przypadku betonu jest cement, dlatego też sprostanie tym założeniom wymagało indywidualnego podejścia już na etapie projektowania.

W prezentowanej pracy przedstawiono proces projektowania, produkcji oraz układania maszynowego mieszanki betonowej o specjalnym przeznaczeniu z zastosowaniem zbrojenia rozproszanego oraz cementu o obniżonym śladzie węglowym CO₂ mianowicie CEM II/B-S 42,5 N-NA.

Odpowiednio zaprojektowana receptura na beton nawierzchniowy została dostosowana do uwarunkowań technologicznych powiązanych z możliwościami produkcyjnymi, właściwościami mieszanki betonowej i betonu oraz technologią układania, a to wymagało doskonałej współpracy między wszystkimi uczestnikami tego projektu. Jednym z istotnych doświadczeń zdobytych podczas realizacji tego projektu było potwierdzenie możliwości stosowania cementu o obniżonej emisji CO₂ w tego typu zastosowaniach, gdzie przyjęte rozwiązania materiałowe zapewniło uzyskanie zakładanych parametrów nośności i trwałości wykonywanej nawierzchni.

Abstract

In Poland's current geopolitical situation, the expansion of facilities of military importance is one of the key elements of the national security strategy. New investments in this area consist of construction, expansion or modernization which is often associated with the creation of new yards for heavy equipment. Due to the functional requirements, cement concrete pavement is the optimum solution in this case in terms of durability, robustness and, very importantly, speed of implementation and readiness for loading and further work.

In addition to the functional requirements for the concrete pavement presented by the contracting authority, it was also important to consider solutions to reduce the negative impact on the environment. Reducing the embedded carbon footprint is currently one of the construction industry's biggest challenges. One of the main sources of CO₂ emissions for concrete is cement, so meeting these targets required a customised approach from the design stage.

This paper presents the design, production and machine placement of a special-purpose concrete mix using dispersed reinforcement and a cement with a reduced CO₂ footprint, namely CEM II/B-S 42.5 N-NA.

The respective formulation for the pavement concrete was adapted to the technological conditions related to production possibilities, the properties of the concrete mix and the concrete and the laying technology, and this required excellent cooperation between all participants in this project. One of the important lessons learned from this project is the confirmation of the feasibility of using CO₂-reduced cement in this type of application, where the material solutions adopted ensured that the load-bearing capacity and durability of the pavement to be constructed were achieved.

1. Wprowadzenie

W ramach opisywanej inwestycji przewidziana była przebudowa istniejących dróg dojazdowych wewnętrznych, placów manewrowych oraz miejsc postojowych dla 600 jednostek ciężkiego sprzętu oraz pojazdów osobowych. Powierzchnia placu postojowego wynosiła ok. 72 000 m², do ułożenia której wykorzystano 16 000 m³ mieszanki betonowej. W mieszance betonowej zastosowane zostało zbrojenie rozproszone w postaci włókien polipropylenowych. Prace betonowe trwały od lipca do listopada 2024 r.

2. Konstrukcja nawierzchni placu postojowego

Projektowane nawierzchnie przewidziane do ruchu musiały spełniać wymagania nośności dla: obciążeń 115 kN/oś oraz pojazdów gąsiennicowych o masie 67 ton. Dla nawierzchni placu postojowego przyjęto konstrukcję przedstawioną w tabeli 1.

Tabela 1. Konstrukcja nawierzchni placu postojowego.

Warstwa ścieralna nawierzchni z betonu cementowego C30/37	22 cm	67 cm
Warstwa poślizgowa – emulsja kationowa wolnorozpadowa 0,4 kg/m ²		
Warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki stabilizowanej C _{5/6}	15 cm	
Warstwa ulepszanego podłoża z mieszanki niezwiązanej CNR	30 cm	
Podłoże gruntowe (G1)/ nasyp budowlany, zagęszczony do I _s = 1.03		

Projekt nawierzchni betonowej dla placu postojowego nie zakładał zastosowania dybli i kotew. Wymagane było użycie zbrojenia rozproszonego w postaci włókien polimerowych mających wpływ na nośność elementu. Rozstaw szczelin dylatacyjnych wynosił 5 m.

3. Wymagania Specyfikacji Technicznej [1]

W tabeli 2 przedstawiono wymagania dla betonu nawierzchniowego przeznaczonego do budowy placu postojowego.

Tabela 2. Wymagania dla betonu nawierzchniowego.

Lp.	Właściwości betonu nawierzchniowego	Wymagania	Metoda badania
1	Klasa wytrzymałości na ściskanie wg PN – EN 206-1	C30/37	PN-EN 12390-3[2]
2	Gęstość, tolerancja do betonu wg zatwierdzonej recepty [%]	± 3,0	PN-EN 12390-7 [3]
3	Wytrzymałość na zginanie [MPa]	≥ 5,5	PN-EN 12390-5 [4]
4	Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]	≥ 3,0	PN-EN 12390-6 [5]
5	Odporność na zamrażanie i odmrażanie w obecności soli odladzających	FT2	PN-EN 12390-9 [6]

Lp.	Właściwości betonu nawierzchniowego	Wymagania	Metoda badania
6	Odporność betonu na działanie mrozu	F150	PN-B-06265 [7]
7	Charakterystyka porów powietrznych w betonie: - zawartość mikroporów o średnicy poniżej 0,3 mm (A_{300}) [%] - wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie L [mm]	$\geq 1,5$ $\leq 0,200$	PN-EN 480-11 [8] PB/0/18 (dla odwiertów) [9]
8	Odporność na wnikanie benzyny i oleju [mm]	≤ 30	PN-EN 13877-2 [10]

4. Projektowanie mieszanki betonowej

4.1. Dobór składników

Do betonu nawierzchniowego należy stosować materiały, które są oznakowane znakiem CE lub znakiem B i dla których Wykonawca (Producent) przedstawi Deklarację Właściwości Użytkowych (DWU) lub Krajową Deklarację Właściwości Użytkowych (KDWU), odniesione do Europejskiej Normy zharmonizowanej (ENh), Polskiej Normy wyrobu (PN), Europejskiej Oceny Technicznej (EOT) lub Krajowej Oceny Technicznej (KOT).

4.1.1. Cement

Cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S 42,5 N – NA jest cementem powszechnego użytku wg PN-EN 197-1 [11] i spełnia dodatkowo wymagania normy PN-B 19707 [12] jako cement niskoalkaliczny (NA). Jest to cement o normalnej wytrzymałości wczesnej (N) i klasie wytrzymałości 42,5. Jego głównymi składnikami są: klinkier cementu portlandzkiego i granulowany żużel wielkopiecowy (S).

Cement ten charakteryzuje szereg zalet, które przekładają się na właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu, co potwierdza wiele specjalistycznych aplikacji.

Mieszanka betonowa cechuje się:

- dobrą współpracą z domieszkami i dodatkami mineralnymi,
- bardzo dobrą urabialnością i utrzymaniem konsystencji w czasie,
- wysoką odpornością na segregację, dużą spoiistością mieszanki i więźliwością wody,
- wydłużonym czasem wiązania.

Natomiast stwardniały beton to:

- minimalizacja ryzyka destrukcji betonu jako skutku reakcji alkalicznej reaktywnego kruszywa z alkaliom,
- podwyższona odporność na agresję chemiczną środowiska,
- umiarkowany rozwój wytrzymałości wczesnej,
- wysoka wytrzymałość normowa (po 28 dniach),
- dobre i stabilne przyrosty wytrzymałości w dłuższym okresie dojrzewania (powyżej 28 dni),
- bardzo dobra stałość objętości i bardzo niski skurcz.

Zastosowanie cementu CEM II/B-S 42,5 N-NA w przypadku najwyższych wymagań WWIORB (zarówno dotyczących nawierzchni betonowych D-05.03.04 jak i obiektów inżynierskich M-13.01.00, czyli dla obiektów budowlanych i inżynierskich klasy S4 i

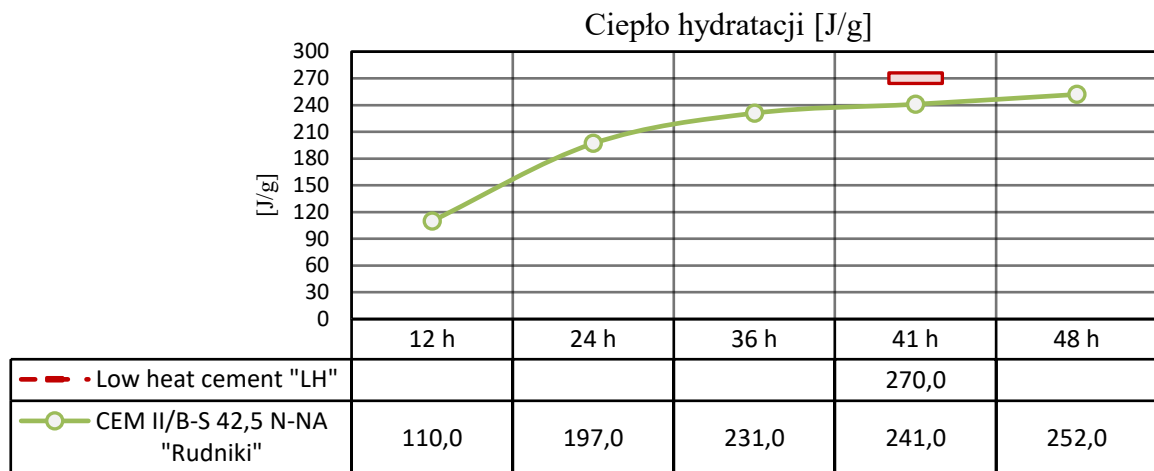
kategori oddziaływań środowiskowych E3) przekłada się na trwałość i bezpieczeństwo z uwagi na niską całkowitą zawartość alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w mieszance betonowej dla projektowanych receptur. Alkalia aktywne w mieszance betonowej gdzie zastosowano 385 kg/m^3 cementu, osiągają wartość średnią $1,59 \text{ kg/m}^3$, a maksymalną (dla pojedynczych wyników) na poziomie nie przekraczającym $2,0 \text{ kg/m}^3$. Dopuszczalna wartość w przypadku nawierzchni betonowych to $2,4 \text{ kg/m}^3$, a dla elementów konstrukcji inżynierskich $3,0 \text{ kg/m}^3$ (Tabela 3).

Tabela 3. Warunki zastosowania kruszywa do betonu w obiekcie klasy S4 w zależności od kategorii oddziaływania środowiska E oraz kategorii reaktywności kruszywa R.

Kategoria oddziaływania środowiska	Kategoria reaktywności kruszywa			
	Niereaktywne R0	Umiarkowane reaktywne R1	Silnie reaktywne R2	Bardzo silnie reaktywne R3
	Zawartość alkaliów aktywnych $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w betonie w kg/m^3			
E2	maks. $3,0 \text{ kg/m}^3$			
E3	1. dla nawierzchni dróg maks. $2,4 \text{ kg/m}^3$ 2. dla elementów drogowych obiektów inżynierskich oraz elementów konstrukcji bardzo trwałych do wymiany lub naprawy maks. $3,0 \text{ kg/m}^3$	Kruszyw o takiej kategorii reaktywności nie dopuszcza się		

Cement ten dopuszczony jest do stosowania w przypadku betonowych nawierzchni drogowych podlegających dużym obciążeniom (KR5-KR7) oraz konstrukcji obiektów inżynierskich w przypadku kategorii środowiska E3 oraz obiektów klasy S4. Zastosowanie w konstrukcji obiektów inżynierskich jest możliwe również z uwagi na umiarkowane ciepło hydratacji (Wykres 1).

Wykres 1 . Ciepło hydratacji CEM II/B-S 42,5 N – NA.



Zastosowanie cementu CEM II/B-S 42,5 N - NA pozwala zmniejszyć obciążenie dla środowiska poprzez znaczną redukcję śladu węglowego betonu. Cement ten posiada Deklarację Środowiskową III typu (EPD), która została wydana w 2021 roku i zweryfikowana w marcu 2023 przez Instytut Techniki Budowlanej (ITB). Emisja netto cementu CEM II/B-S 42,5 N - NA wynosi 327 kg CO₂/t, a emisja brutto = 436 kg CO₂/t. Tabela 4. ukazuje zestawienie emisji CO₂ na 1 tonę dwóch wybranych cementów.

Tabela 4. Porównanie emisji CO₂ dla produkcji CEM I 42,5 R-NA i CEM II/B-S 42,5 N-NA.

	CEM I 42,5 R -NA Rudniki	CEM II/B-S 42,5 N- NA Rudniki
Emisja brutto [kg] eq CO ₂ /[t] cementu	643	436
Emisja netto [kg] eq CO ₂ /[t] cementu	481	327
Redukcja eq CO ₂ [%] *	32	

*wyliczenie dla wbudowanej ilości cementu równej – 6 tys. ton

Porównując emisję eqCO₂ brutto pochodzącą z cementu użytego do wyprodukowania betonu i odnosząc ją do teoretycznego wykonania takiego projektu placu na cementzie CEM I, otrzymujemy różnicę na poziomie niemal 1275 ton eqCO₂. Jest to redukcja wbudowanego śladu węglowego o ponad 32 %. Za taką wartość emisji eqCO₂ odpowiada przykładowo 455 samochodów osobowych, które rocznie pokonują około 20 000 km.

4.1.2. Kruszywo

Do produkcji mieszanki betonowej zastosowane zostało kruszywo grube pochodzenia granitowego, poddane obróbce mechanicznej w celu uzyskania trzech frakcji: 2/8 mm, 8/16 mm i 16/22 mm.

Jako kruszywo drobne zastosowany został piasek naturalny frakcji 0/2 mm.



Rys. 1. Grys granitowy.

4.1.3. Domieszki

W produkcji betonów z cementami o zmniejszonym śladzie węglowym zawierających większą ilość dodatków, bardzo ważne jest zastosowanie domieszek chemicznych, które są kompatybilne z danym cementem. Dlatego do produkcji betonu nawierzchniowego użyto plastyfikator Centrament N11 i napowietrzacze Centrament Air 202T firmy MC-Bauchemie. Zastosowanie Centramentu N11 pozwoliło zmniejszyć ilość wody zarobowej, a co za tym idzie uzyskać bardziej zwarty i stwardniały zaczyn cementowy, co w rezultacie pozwala otrzymać beton o lepszych parametrach. W przypadku betonów nawierzchniowych (ze względu na ich specyfikę) niezwykle ważnym aspektem jest odpowiednie dobranie domieszki napowietrzającej dla uzyskania właściwej struktury napowietrzenia. Zastosowanie Centrament Air 202T pozwoliło na wprowadzenie do mieszanki równomiernie rozłożonych licznych mikropęcherzy o średnicy < 0,3 mm, co potwierdziły wyniki badań wstępnych. Obie domieszki posiadają Deklarację Środowiskową EPD.

4.1.4. Dodatki

Zastosowanie włókien w nawierzchniach betonowych to skuteczny sposób na zwiększenie wytrzymałości, trwałości i odporności na uszkodzenia, co jest szczególnie istotne w przypadku nawierzchni, które są narażone na intensywne użytkowanie i zmienne warunki atmosferyczne. Dlatego w produkcji zastosowano włókna polimerowe MC-Fibre 4024 SP 24 mm w rozpuszczalnych 2 kg opakowaniach. Użycie MC-Fibre 4024 SP 24 mm w mieszance poprawia wytrzymałość na rozciąganie i zginanie, jak również ograniczają skurcz plastyczny i skurcz wysychania, minimalizując tym samym ryzyko pęknięć. Ważnym aspektem jest również łatwość i

równomierne rozproszczenie włókna w całej objętości betonu oraz brak wystającego zbrojenia w ułożonej nawierzchni.



Rys. 2. Włókna w betonie.

4.2. Skład receptury mieszanki betonowej

Jak pisał A. M. Neville w książce „Właściwości betonu” [13] - „Dobór składu mieszanki jest zatem, mówiąc najprościej, procesem wyboru dogodnych składników betonu i określenie ich wzajemnych stosunków w ten sposób, aby zapewnione było wykonanie betonu na tyle oszczędnie, na ile jest to możliwe przy zachowaniu minimalnych wymagań właściwości, zwłaszcza wytrzymałości, trwałości i potrzebnej konsystencji”. W opisywanym projekcie opracowanie składu mieszanki betonowej nie polegało tylko na spełnieniu wymagań zawartych w ST co do mieszanki i stwardniałego betonu, ale również miało gwarantować prawidłowe wbudowanie w element. Wiązało się to z zapewnieniem optymalnego składu ziarnowego dostosowanego m.in. do sposobu zagęszczania mieszanki oraz wykończenia górnej powierzchni. Dobór odpowiednich domieszek chemicznych miał gwarantować nie tylko prawidłową urabialność oraz właściwą strukturę napowietrzenia, ale również w jak największym stopniu usprawnienie układania nawierzchni. Ostateczny skład mieszanki (tabela 5) betonowej został opracowany na podstawie szeregu przeprowadzonych badań i otrzymanych wyników laboratoryjnych.

Tabela 5. Skład mieszanki betonowej do układania maszynowego.

Składnik			Pochodzenie	Ilość [kg/m ³]
Cement	CEM II/B-S 42,5 N-NA		Cemex	385
Woda			-	143
Kruszywo drobne	piasek	0/2	-	574
Kruszywo grube	grys granitowy	2/8	-	1219
		8/16		
		16/22		
Domieszka	uplastyczniająca	Centrament N11	MC-Bauchemie	2,31
	napowietrzająca	Centrament AIR 202 T		1,16
Włókna	polipropylenowe	MC-Fibre 4024		2,00

5. Realizacja

5.1. Produkcja

Wytwórnia betonu usytuowana była obok placu budowy. Składała się ona z 4 silosów na cement, 8 zasobników szeregowych na kruszywo oraz magazynu na dodatki i domieszki chemiczne. Dwa mieszalniki, każdy o pojemności 3,5 m³, uzyskiwały wydajność maksymalną 200 m³/h.

5.2. Transport i wbudowanie

Transport mieszanki betonowej odbywał się samochodami ze skrzyniami stalowymi. Odległość od wytwórni betonu do miejsca wbudowania wynosiła maksymalnie 1 km. Liczba środków transportowych zapewniała ciągłość pracy zespołu układającego. Wbudowywanie mieszanki betonowej odbywało się w opcji jednowarstwowej. Praca wykonywana była przez zespół rozkładarek Wirtgen Sp 1500. Pierwsza maszyna z zestawu układała mieszankę betonową w pasie o szerokości od 8 m do 10 m, a druga z pomostem roboczym nadawała teksturę i наносiła preparat ochronny na nawierzchnię. Średnia prędkość układania wynosiła 0,9 m.b./min.



Rys. 3. Układanie nawierzchni.

W celu zapewnienia odpowiedniej makrotekstury poprawiającej bezpieczeństwo ruchu, zastosowano teksturowanie powierzchni betonu przy użyciu automatycznej szczotki stanowiącej integralną część maszyny układającej. Uzyskano w ten sposób rysę w kierunku poprzecznym.



Rys. 4. Tekstura nawierzchni.

5.3. Pielęgnacja

Na górną powierzchnię świeżo ułożonej mieszanki betonowej naniesiono maszynowo środek do pielęgnacji betonu. Powierzchnie boczne zabezpieczone zostały przy użyciu opryskiwacza ręcznego. Preparat na bazie dyspersji parafinowej tworząc ciekłą i szczelną warstwę zapewniał ochronę przed szybkim odparowaniem wody z

powierzchni betonu. Pozwoliło to na optymalny przebieg procesu hydratacji we wierzchniej warstwie betonu oraz zminimalizowało ryzyko powstania wczesnych rys skurczowych.

6. Właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu

6.1. Właściwości mieszanki betonowej

Parametry mieszanki betonowej takie jak konsystencja, zawartość powietrza oraz temperatura kontrolowane były z częstotliwością nie rzadszą niż raz na godzinę, natomiast gęstość raz na działkę roboczą. Konsystencja mieszanki betonowej uzależniona była m.in. od warunków atmosferycznych oraz szybkości realizacji robót. W tabeli 6 przedstawiono wyniki badań kluczowych parametrów mieszanki betonowej.

Tabela 6. Wyniki badań mieszanki betonowej

Lp.	Właściwości mieszanki betonowej	Wymagania	Wyniki badań
1	Konsystencja, metoda Vebe [s]	3÷20	10÷20
2	Zawartość powietrza [%]	4,5÷6,0 (-0,5; +1,0)	4,5÷5,9

6.2. Właściwości stwardniałego betonu

Kontrola parametrów wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu przeprowadzana była na serii 3 próbek dla każdego badania z działki roboczej. Pozostałe parametry trwałościowe kontrolowane były co 30 000 m² ułożonej nawierzchni. Przedstawione w tabeli 7 wyniki badań potwierdzają spełnienie zakładanych w recepturze parametrów stwardniałego betonu.

Tabela 7. Wyniki badań betonu.

Lp.	Właściwości betonu nawierzchniowego	Wymagania	Wyniki badań
1	Wytrzymałości na ściskanie [MPa]	≥ 41,0	46,0÷56,1
2	Wytrzymałość na zginanie [MPa]	≥ 5,5	5,9÷6,0
3	Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]	≥ 3,0	3,75÷4,45
4	Odporność na zamrażanie i odmrażanie w obecności soli odładzających: - ubytek masy po 28 cyklach (m_{28}) [kg/m ²] - ubytek masy po 56 cyklach (m_{56}) [kg/m ²] - stopień ubytku m_{56}/m_{28}	≤ 0,5 ≤ 1,0 ≤ 2	0,12÷0,14 0,22÷0,27 1,8÷1,9
5	Odporność betonu na działanie mrozu - ubytek masy [%] - spadek wytrzymałości na ściskanie [%]	≤ 5 ≤ 20	0,1 4,8÷8,4
6	Charakterystyka porów powietrznych w betonie:	≥ 1,5	2,6÷3,0

Lp.	Właściwości betonu nawierzchniowego	Wymagania	Wyniki badań
	- zawartość mikroporów o średnicy poniżej 0,3 mm (A_{300}) [%] - wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie L [mm]	$\leq 0,200$	0,113÷0,162
7	Odporność na wnikanie benzyny i oleju [mm]	≤ 30	23÷25

7. Podsumowanie

Przyjęcie odpowiednich rozwiązań materiałowych i wysoki reżim produkcyjny zagwarantował powtarzalność reologiczną mieszanki. W zestawieniu z prawidłowym jej wbudowaniem, zapewnił uzyskanie zakładanych parametrów nośności i trwałości wykonywanej nawierzchni. W dobie zmian wynikających z ograniczenia emisji CO₂ w produkcji cementu, Generalni Wykonawcy, coraz częściej sięgają po cementy o mniejszym wskaźniku klinkierowym i większej ilości dodatków mineralnych. Głównym celem autorów referatu było pokazanie, że w dobrze zaplanowanym procesie technologicznym, poczynając od projektowania recepty aż do wykonania elementu, można stosować rozwiązania niskoemisyjne w nawierzchniach betonowych. Takie podejście znakomicie sprawdza się nie tylko na drogach eksploatowanych przez tradycyjny transport kołowy, ale również w nawierzchniach infrastruktury wojskowej. Wybór cementu, kruszyw i kompatybilnych domieszek chemicznych to zaledwie pierwszy krok w przygotowaniu mieszanek betonowych. Całą realizację poprzedziły liczne badania świeżej mieszanki i stwardniałego betonu, których wyniki potwierdziły możliwość zastosowania projektowanego rozwiązania. Proces układania nawierzchni przebiegał w sposób przewidywalny i powtarzalny, a wyniki badań próbek odwierconych z gotowej nawierzchni potwierdziły spełnienie założonych parametrów jakościowych. Przeglądając się aktualnej sytuacji geopolitycznej w naszym kraju, można założyć, że w perspektywie najbliższych lat pojawi się zwiększone zapotrzebowanie na tego typu realizacje. Wykonywana praca i zdobyte doświadczenie pozwolą z większą pewnością i w szerszym zakresie wykorzystywać składniki o zredukowanym śladzie węglowym w przyszłych inwestycjach.

8. Literatura

- [1] Specyfikacje Techniczne Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych. ST-12. Nawierzchnia betonowa.
- [2] PN -EN 12390-3:2019-07 Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [3] PN-EN 12390-7:2019-08 Badania betonu - Część 7: Gęstość betonu.
- [4] PN-EN 12390-5:2019-08 Badania betonu -Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań.
- [5] PN-EN 12390-6:2024-04 Badania betonu - Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań.

- [6] PKN-CEN/TS 12390-9:2017-07 Badania betonu - Część 9: Oznaczanie odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających – Złuszczenie.
- [7] PN-B-06265 Beton-Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie PN-EN 26+A2:2021-08.
- [8] PN -EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zapraw i zaczynu – Metody badań – Część 11: Oznaczenie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie.
- [9] Procedura badawcza GDDKiA PB/0/18.
- [10] PN-EN 13877-2:2024-05 Nawierzchnie betonowe – Część 2: Wymagania funkcjonalne dotyczące nawierzchni betonowych.
- [11] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [12] PN-B 19707:2023 Cement – Cement specjalny – Skład, wymagania i kryteria zgodności.
- [13] A.M. Neville: Właściwości betonu. V edycja, Kraków 2012.

mgr inż. Paweł Mofina

Cemex Polska Sp. z o.o.

dr inż. Piotr Górak

Cemex Polska Sp. z o.o.

dr inż. Krzysztof Blacha

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

mgr inż. Danuta Kowalska

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

Ocena wybranych właściwości betonu z cementem CEM II/B-S 42,5 N-NA pod kątem możliwości zastosowania na nawierzchnie lotniskowe – analiza porównawcza

Assessment of selected properties of concrete with CEM II/B-S 42,5 N-NA cement in terms of its potential use on airport pavements – comparative analysis

Streszczenie

Zastosowanie cementów portlandzkich żużlowych do produkcji betonu nawierzchniowego w przypadku realizacji dróg i autostrad o kategorii natężenia ruchu KR5-KR7 jest faktem i mamy już w Polsce szereg udanych realizacji nawierzchni betonowych o obniżonym śladzie węglowym dzięki użyciu tego typu cementów.

Jednakże, betonowe nawierzchnie to nie tylko drogi lokalne, krajowe, ekspresowe czy autostrady, ale również nawierzchnie elementów funkcjonalnych na lotniskach cywilnych i wojskowych. W takich obszarach realizacji, rozwiązania materiałowe reguluje norma *NO-17-A204:2025 Nawierzchnie lotniskowe. Nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania i metody badań* [1]. Zgodnie z ww. normą do betonu nawierzchniowego (warstwa jezdna) preferowane jest stosowanie cementu z grupy CEM I, których dostępność staje się coraz bardziej ograniczona. W połączeniu z niezwykle istotnymi aspektami wpływu na środowisko, naturalną konsekwencją wydaje się poszukiwanie innego rozwiązania materiałowego dla tego typu nawierzchni. Autorzy niniejszego referatu zaplanowali i wykonali program badawczy w bardzo szerokim zakresie w oparciu o wymagania stawiane dla betonu przeznaczonego do zastosowania w lotniskowych nawierzchniach betonowych. Przeprowadzone badania skupiały się przede wszystkim na porównaniu trwałości mrozowej ocenianej w różnych wariantach oddziaływania zależnych od rodzaju zastosowanych środków odladzających. Jako beton referencyjny przyjęto beton wykonany z użyciem cementu CEM I 42,5 R-NA, którego właściwości porównano z betonem wykonanym przy użyciu cementu o obniżonej zawartości klinkieru czyli CEM II/B-S 42,5 N-NA. Uzyskane wyniki badań potwierdziły niewykluczoną perspektywę uwzględnienia cementu portlandzkiego żużlowego w budownictwie lotniskowych nawierzchni betonowych, jako przyszłej materiałowej alternatywy o obniżonej emisyjności.

Abstract

The use of Portland slag cements for the production of pavement concrete in the case of construction of roads and motorways with traffic intensity category KR5-KR7 is a fact and we already have a number of successful constructions of concrete pavements with a reduced carbon footprint in Poland thanks to the use of this type of cement. However, concrete surfaces are not only local roads, national roads, expressways or motorways, but also the surfaces of functional elements at civil and military airports. In such areas of implementation, material solutions are regulated by the standard *NO-17-A204:2025 Airport pavements. Cement concrete pavements*.

Requirements and test methods [1]. According to the above standard, the use of cement from the CEM I group is preferred for pavement concrete (surface layer), the availability of which is becoming increasingly limited. In combination with the extremely important aspects of the impact on the environment, the natural consequence seems to be the search for another material solution for this type of pavement. The authors of this paper have planned and carried out a research program in a very wide scope based on the requirements for concrete intended for use in airport concrete pavements. The conducted studies focused primarily on the comparison of frost durability assessed in different variants of impact depending on the type of de-icing agents used. The reference concrete was concrete made using CEM I 42,5 R-NA cement, the properties of which were compared with concrete made using cement with reduced clinker content, that is CEM II/B-S 42,5 N-NA. The results obtained confirmed the not inconceivable prospect of Portland slag cement being included in the construction of airfield concrete pavements as a future material alternative with reduced emissions.

1. Wprowadzenie

Betonowe nawierzchnie to nie tylko drogi lokalne, krajowe, ekspresowe czy autostrady, ale również nawierzchnie lotnisk cywilnych i wojskowych, w tym: drogi kołowania i płyty postojowe stanowiące elementy będące istotną częścią trwałej infrastruktury krytycznej, od której zależy bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych. W tym obszarze do projektowania i wykonawstwa tego typu nawierzchni stosowana jest obecnie norma obronna NO-17-A204:2025 [1], zastępująca obowiązującą wcześniej normę PN-V-83002:1999 [2], która dostosowana została do obecnie posiadanej wiedzy, nowych technologii oraz przede wszystkim wymagań stawianych przez nową technikę lotniczą (zaktualizowana w trakcie realizacji projektu badawczego).

Aktualizacja dokumentów technicznych w infrastrukturze drogowej (WWiORB) etapowo się zmienia, uwzględniając możliwość stosowania innych materiałów oraz technologii pod warunkiem zapewnienia odpowiedniej trwałości. Pojawiają się także bardzo nieśmiało zapisy dotyczące oceny cyklu życia (LCA) oraz wpływu środowiskowego wyrażonego za pomocą śladu węglowego inwestycji, [3,4]. Postanowienia ww. normy obronnej również uwzględniają powyższe, lecz ze względu na specyfikę eksploatacji nawierzchni lotniskowych uwzględnić wszystkiego nie mogą. Stąd między innymi aktualnie brak możliwości stosowania do warstwy jezdnej nawierzchni lotniskowych cementów innych niż CEM I. Dotyczy to również nawierzchni drogowych odcinków lotniskowych [5,6]. Należy tu jednak wspomnieć, że proces zmian wywołany obniżoną emisyjnością spowodował ograniczoną dostępność tych cementów. Niemniej jednak szukanie nowych, alternatywnych rozwiązań jest jak najbardziej uzasadnione. Porównanie cementów CEM II/B-V, CEM II/B-S, CEM II B-L z cementem CEM I w betonach opisał np. J. Szczerba [7]. W praktyce jednak brak jest wystarczających doświadczeń, mogących umożliwić opracowanie alternatywnego rozwiązania opartego na cementach innych niż CEM I, które spełniłoby wszystkie wymagania współczesnego, szeroko rozumianego w tym przypadku budownictwa komunikacyjnego.

Proces wprowadzenia ewentualnych zmian wymaga przeprowadzenia szeregu badań, pozwalających na zdobycie większych doświadczeń, popartych oczywiście wynikami badań. Dopiero wtedy będzie możliwe ich proponowanie z pełną świadomością. Zastosowanie cementów innych niż CEM I w budownictwie lotniskowym jest o tyle trudne, że obecnie nie mamy wystarczających doświadczeń i potwierdzeń pozwalających na taką realizację. Przekłada się to na ryzyko, które na chwilę obecną jest nieakceptowalne w odniesieniu do bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych. Dlatego też powstał pomysł, aby zrealizować program badawczy, którego wyniki mogłyby potwierdzić (lub też nie) słuszność podążania w nowym kierunku dla przyszłych realizacji z użyciem cementów o niższej zawartości klinkieru. Cel programu badawczego wychodzi naprzeciw dzisiejszym wyzwaniom. Jeżeli zmierzmy się

z nimi, to być może będziemy dysponować potwierdzonym i bezpiecznym, ale co równie istotne niż emisyjnym pod względem emisji CO₂ rozwiązaniem alternatywnym.

Dlatego też autorzy podjęli próbę mającą na celu dokonanie oceny przydatności zastosowania cementu CEM II/B-S 42,5 N-NA do produkcji mieszanki betonowej z przeznaczeniem na nawierzchnie lotniskowe. Badania właściwości użytkowych cementu CEM II/B-S 42,5 N-NA były częścią bardzo obszernego programu badań, w ramach którego oceniono przydatność opracowanych rozwiązań materiałowych do budowy nawierzchni lotniskowych.

2. Program i realizacja badań

2.1 Informacje ogólne

Program badań został podzielony na etapy: laboratoryjny oraz technologiczny, podczas których zostały ocenione kluczowe właściwości mieszanki betonowej i betonu (nawierzchni), które następnie porównano i oceniono zgodnie z wymaganiami normy NO-17-A204:2025.

Zgodnie z wcześniej wspomnianą normą obronną, do budowy warstwy jezdni nawierzchni lotniskowych wymaga się betonu klasy C30/37, C35/45, C40/50 lub C45/55.

Do produkcji mieszanki betonowej (wymagany stosunek wodno-cementowy $\leq 0,40$) należy stosować sprawdzone materiały, odpowiedniej jakości, w tym:

- cement portlandzki o klasie wytrzymałości CEM I 32,5R(N) lub CEM I 42,5R(N), o zawartości alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \leq 0,60 \%$ (po potwierdzeniu pozytywnymi wynikami badań dopuszcza się stosowanie cementu o zawartości alkaliów powyżej 0,60 %, ale nie wyższej niż 0,80 %),
- kruszywo grube - zalecane stosowanie kruszywa łamanego granitowego o wielkości ziaren nie przekraczającej 31,5 mm. Możliwe jest zastosowanie innego kruszywa ze skał głębinowych oraz ze skał metamorficznych.

Beton do budowy nawierzchni lotniskowych powinien być napowietrzony, zawartość powietrza w mieszance betonowej powinna się mieścić w przedziale od 4,5 % do 5,5 %.

Poszczególnym klasom betonu przyporządkowano odpowiednie wymagania dotyczące właściwości fizycznych i mechanicznych:

- średnia wartość nasiąkliwości w wodzie oraz w środkach odladzających nie powinna być większa niż 5 % dla betonu klasy C30/37 (4,8 % dla betonu klasy C45/55),
- wytrzymałość na zginanie po 28 dniach twardnienia betonu klasy C30/37, określona na belkach 70 cm x 15 cm x 15 cm, (obciążanie dwupunktowe, rozstaw podpór dolnych: 60 cm; belka obrocona o 90° w stosunku do kierunku, w którym była formowana), nie niższa niż 5 MPa (dla pojedynczego wyniku). W przypadku betonu klasy C45/55 wartość ta wynosi 5,7 MPa.
- wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach twardnienia betonu klasy C30/37, określona zgodnie z PN-EN 12390-6:2024-04 na odwiertach o średnicy 15,0 cm pobranych z nawierzchni lub na kostkach 15 cm x 15 cm x 15 cm, nie powinna być niższa niż 3,3 MPa (dla pojedynczego wyniku). W przypadku betonu klasy C45/55 wartość ta wynosi 3,8 MPa.

Wymagania dotyczące trwałości mrozowej lotniskowego betonu nawierzchniowego są następujące:

- mrozoodporność w wodzie: po 200 cyklach zamrażania w powietrzu i rozmrażania w wodzie
- w przypadku betonu klasy C30/37: ubytek masy $\leq 5,0 \%$, spadek wytrzymałości $\leq 20 \%$, natomiast w przypadku betonu klasy C45/55: ubytek masy $\leq 4,7 \%$, spadek wytrzymałości $\leq 17 \%$; na powierzchniach próbek nie powinny występować mikrorysy.
- odporność na środki odladzające, określona metodą A, B lub C - po 200 cyklach zamrażania
- rozmrażania – wymagania jak w przypadku badania mrozoodporności w wodzie.

- odporność na powierzchniowe złuszczenie - po 56 cyklach zamrażania-odmrażania masa materiału złuszczonego nie powinna przekraczać 0,05 kg/m².

2.2 Etap wstępny

Etap wstępny (laboratoryjny) miał na celu wstępne zaprojektowanie receptury, sprawdzenie i potwierdzenie właściwości wykonanego betonu z wymaganiami zawartymi w normie obronnej ze szczególnym uwzględnieniem aspektów trwałościowych, w tym odporności betonu na oddziaływanie środowiska mrozowego w obecności różnych środków odladzających wykorzystywanych na lotniskach. Dodatkowo, wybrane badania wykonano przy narażeniu na roztwór NaCl, pomimo faktu, że ze względów bezpieczeństwa na lotniskach nie stosuje się środków odladzających na bazie chlorków z uwagi na możliwość uszkodzeń korozyjnych elementów konstrukcji samolotów oraz wyposażenia lotniskowego. Zakres badań (dla zaprojektowanej receptury betonu o klasie wytrzymałości C35/45, klasach ekspozycji XC4, XF3, XF4, XD3, XS3 na kruszywie granitowym do 22 mm) obejmował:

- weryfikację konsystencji betonu metodą Ve-Be wg PN-EN 12350-3 [8],
- weryfikację gęstości mieszanki betonowej wg PN-EN 12350-6 [9],
- weryfikację zawartości powietrza wg PN-EN 12350-7 [10],
- analizę struktury napowietrzenia wg PN-EN 480-11 [11],
- ocenę wytrzymałości na ściskanie wg PN-EN 12390-3 [12],
- ocenę wytrzymałości na zginanie wg PN-EN 12390-5 [11] i NO-17-A204 [13],
- ocenę wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wg PN-EN 12390-6 [14],
- ocenę nasiąkliwości w wodzie wg NO-17-A204 – Załącznik B
- oznaczenie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem wg PN-EN 12390-8 [15],
- ocenę mrozoodporności wewnętrznej F200 według zmodyfikowanych metod przechowywania próbek (3 środowiska)
 - próbki nasączone w środkach odladzających (nasączenie co 25 cykli w mrówczanie potasu oraz mrówczanie sodu)
 - próbki badane według PN-B 06265:2022-08 – Załącznik N [16].
- ocenę odporności na powierzchniowe złuszczenie betonu - cykliczne zamrażanie i odmrażanie w obecności różnych środowisk :
 - 3% NaCl – według procedury badawczej NO-17-A204 – Załącznik B
 - 3% NaCl – według PN-B 06265:2022-08 – Załącznik O
 - roztwory mrówczanu potasu (3 stężenia) – według procedury badawczej NO-17-A204 – Załącznik B
 - roztwór (15% m/m) mrówczanu sodu – według procedury badawczej NO-17-A204 – Załącznik B
 - woda – według procedury badawczej NO-17-A204 – Załącznik B

W niniejszym artykule przedstawiono tylko niektóre wyniki ww. badań.

2.3 Etap technologiczny

Etap technologiczny (próba terenowa) polegał na wytworzeniu w warunkach przemysłowych betonu na cemencie odniesienia (przyjęto CEM I 42,5 R-NA) oraz na cemencie badanym (CEM II/B-S 42,5 N-NA) według ustalonej laboratoryjnie receptury. Następnym etapem był transport mieszanki betonowej samochodem samowyladowczym oraz jej wbudowanie w pola testowe z zachowaniem projektowanej konsystencji i pozostałych parametrów. Próbki do oceny betonu zostały pobrane w trakcie betonowania oraz po 7 dniach dojrzewania betonu w konstrukcji wykonano odwierty Ø150 mm, które następnie podano badaniom laboratoryjnym zgodnie z przyjętym planem badań. Beton w konstrukcji dojrzewał w warunkach, które monitorowano w

sposób ciągły. Monitoring dotyczył pomiarów temperatury zewnętrznej oraz temperatury powierzchni betonu.

Plan poboru próbek i planowanych badań przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Zestawienie próbek pobranych w etapie technologicznym

Próbki pobierane w trakcie betonowania Rodzaje badań	Próbki rdzeniowe pobrane z konstrukcji Rodzaje badań
Wytrzymałość na ściskanie	Wytrzymałość na ściskanie
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu	Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu
Wytrzymałość na zginanie	-
Mrozoodporność F200	Mrozoodporność F200
Struktura napowietrzenia	Struktura napowietrzenia
Mrozoodporność powierzchniowa	Mrozoodporność powierzchniowa

3. Analiza wyników badań

3.1 Etap badań wstępnych

Do zaprojektowania betonu nawierzchniowego wykorzystano cement CEM II/B-S 42,5 N-NA o podstawowych właściwościach fizyko-chemicznych przedstawionych w tablicy 2.

Cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S 42,5 N -NA jest cementem powszechnego użytku wg PN-EN 197-1[17] i spełnia dodatkowo wymagania normy PN-B 19707 [16] jako cement niskoalkaliczny (NA). Zastosowanie w projekcie tego cementu nie było przypadkowe, ponieważ cement CEM II/B-S to jeden z nielicznych cementów akceptowanych do realizacji nawierzchni betonowych na drogach ekspresowych i autostradach w najwyższych kategoriach natężenia ruchu według wytycznych wzorcowych warunków wykonania i odbioru robót budowlanych D-05.03.04 Nawierzchnia z betonu cementowego V03 z 01.2025 [19].

Tablica 2. Podstawowe właściwości cementu CEM II/B-S 42,5 N-NA Rudniki

Właściwość	Jednostka	Wynik
Początek wiązania	min	172
Koniec wiązania	min	218
Woda do konsystencji normowej	%	29,7
Powierzchnia właściwa	cm ² /g	4464
Wytrzymałość na ściskanie:		
po 2 dniach	MPa	18,3
po 28 dniach		57,5
Analiza chemiczna:		
SO ₃	%	2,55
Cl		0,07
Na ₂ O _{eq}		0,60

Bardzo ważnym aspektem prób laboratoryjnych był właściwy dobór zestawu domieszek – plastyfikatora i domieszki napowietrzającej. Przeprowadzono wiele testów podstawowych właściwości reologicznych mieszanki betonowej, by w końcu ocenić prawidłowość rozwiązania na podstawie badań struktury napowietrzenia w stwardniałym betonie. Osiągnięcie odpowiednich parametrów napowietrzenia betonu wyrażonych za pomocą wskaźników opisujących rozmieszczenie porów (spacing factor) $L < 0,200$ mm, zawartości mikroporów A_{300}

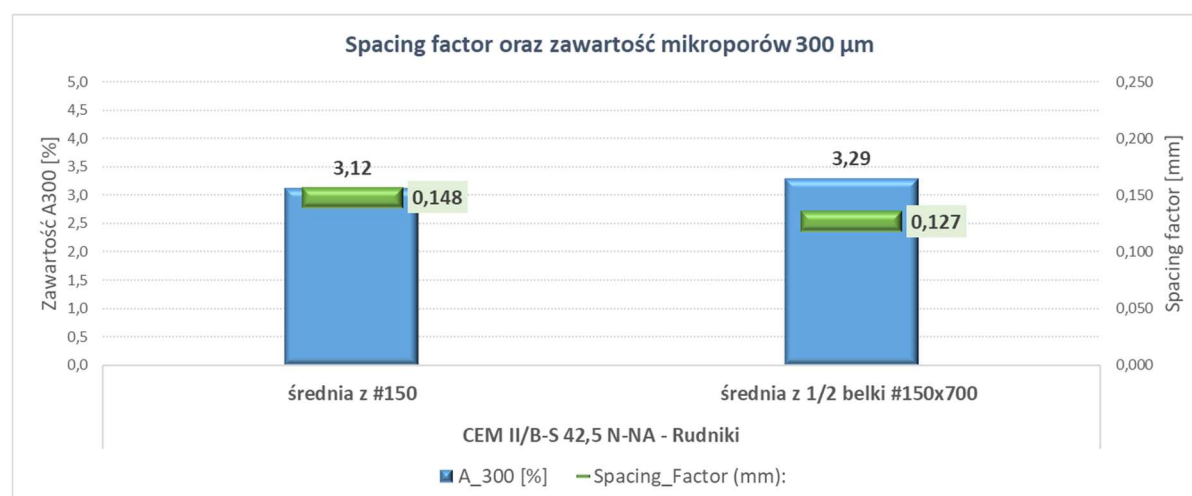
> 1,5% były kluczowe dla akceptacji rozwiązania materiałowego opartego na cemencie CEM II/B-S 42,5 N-NA i stosie okruszowym składającym się z gryszy granitowego o $d_{\max} = 22$ mm z krzywą uziarnienia gwarantującą odpowiednie właściwości mieszanki przewidzianej do układania maszynowego.

Uzyskane w trakcie prób laboratoryjnych wyniki badań mieszanki betonowej oraz betonu zestawiono z wymaganiami normy NO-17-A204 w tablicy 3, wraz z ich oceną. W przypadku mieszanki betonowej z cementem CEM II/B-S 42,5 N-NA ustalono odrębne kryteria akceptacji dotyczące konsystencji i zawartości powietrza.

Tablica 3. Ocena uzyskanych wyników dla mieszanki betonowej i betonu z cementem CEM II/B-S 42,5 N-NA Rudniki

Mieszanka betonowa - właściwość	Wymagania / ustalenia	Uzyskane wyniki	Ocena
Konsystencja Ve-Be	11-16 [s]	11-16 [s]	Akceptacja
Gęstość mieszanki	+/- 2% w stosunku do teoretycznej	2260-2270 kg/m ³	Akceptacja
Zawartość powietrza	5,5 – 6,5 %	6,0 – 6,5 [%]	Akceptacja
Beton – właściwości mechaniczne	Wymagania / ustalenia	Uzyskane wyniki	Ocena
Wytrzymałość na ściskanie f_{ck} 2d 7d 28d	- ≥ 34 MPa $\geq 45 + 4$ MPa	22,2 MPa 38,9 MPa 57,1 MPa	Akceptacja
Wytrzymałość na zginanie f_{cf} 7d 28d	- $\geq 5,5$ MPa	4,9 MPa 6,8 MPa	Akceptacja
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu $f_{ctm,sp}$ 28 d	$\geq 3,6$ MPa	4,1 MPa	Akceptacja

Określenie struktury napowietrzenia w betonie na wytypowanym rozwiązaniu domieszkowym wykonano na próbkach sześciennych oraz fragmentach belek pozostałych po badaniach wytrzymałości na zginanie. Wyniki zostały zaprezentowane graficznie na rysunku 1.



Rys. 1. Struktura napowietrzenia betonu z etapu laboratoryjnego

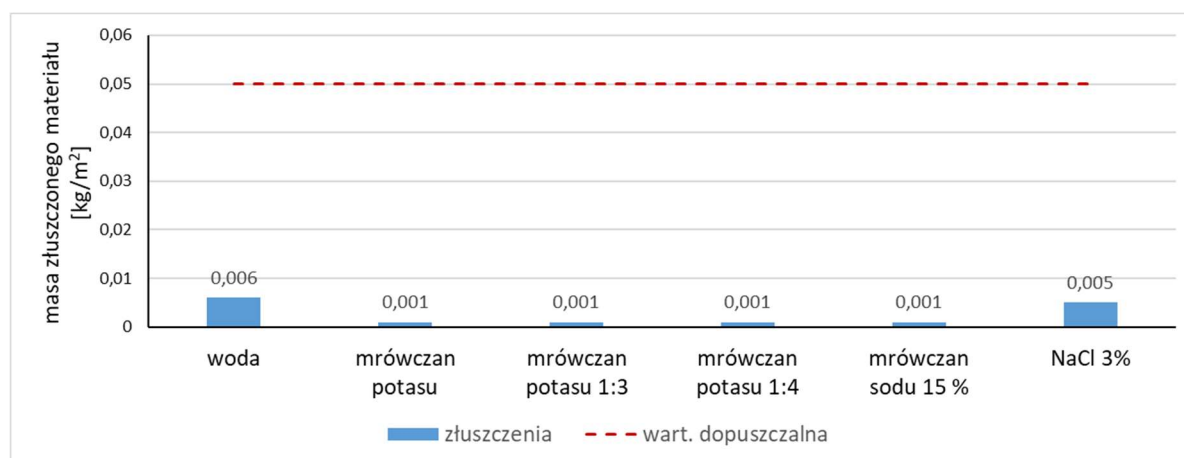
Analizując rozkład porów powietrznych i ich średnicę potwierdzono zasadność właściwego doboru układu domieszek chemicznych do zastosowanego cementu oraz do przyjętych wewnętrznie założonych wartości napowietrzenia mieszanki.

Trwałość w środowisku mrozowym określoną za pomocą mrozoodporności wewnętrznej wykonano na próbkach poddanych 200 cyklom zamrażania i odmrażania w zaplanowanych środowiskach. Wyniki badań zestawiono w tablicy 4.

Tablica 4. Zestawienie wyników badań mrozoodporności wewnętrznej

Środowisko	Wymagania wg NO-17-A204 dla klasy betonu C 35/45	
	Spadek wytrzymałości < 19,0 %	Ubytek masy < 4,9 %
	Wyniki badań	
Woda metoda wg NO-17-A204 Załącznik B	11,0	0,16
Mrówczan potasu metoda B według NO-17-A204 (próbki wyjmowane z komory i nasączone co 25 cykli)	1,1	-0,04
Mrówczan sodu (15% roztwór) metoda B według NO-17-A204 (próbki wyjmowane z komory i nasączone co 25 cykli)	0,71	-1,87

Do określenia odporności betonu nawierzchniowego na powierzchniowe złuszczenie w obecności różnych środków odladzających stosowanych najczęściej na lotniskach, [20], wykorzystano metodą badawczą polegającą na poddaniu próbek 56 cyklom zamrażania i odmrażania przy zachowaniu odpowiednich warunków temperaturowych opisanych w załączniku B.5 normy obronnej. Zgodnie z wymaganiami tej normy wynik badania uznaje się za pozytywny, jeżeli ubytek masy po wymienionej liczbie cykli jest mniejszy niż 0,05 kg/m². Wyniki badań zostały przedstawione w formie graficznej na rysunku 2. Badania w różnych środowiskach generowanych przez różne środki odladzające zostały uzupełnione o środowisko 3% NaCl oraz wody destylowanej.



Rysunek 2. Wielkość powierzchniowego złuszczenia próbek betonu nawierzchniowego w różnych środowiskach

Masa złuszczonego materiału po 56 cyklach zamrażania i odmrażania w różnych środowiskach, nie przekroczyła poziomu dopuszczalnego $0,05 \text{ kg/m}^2$. Oceniając uzyskane wyniki można taki beton zakwalifikować dla klasy odporności FT2 według PN-B-06265 [16], zgodnie z którą maksymalne dopuszczalne złuszczenie jest 50 razy większe ($< 0,5 \text{ kg/m}^2$) lub do klasy odporności na powierzchniowe złuszczenie w obecności soli odladzającej najwyższej - bardzo dobrej według NT Build 492 ($< 0,1 \text{ kg/m}^2$).

Z punktu widzenia użyteczności, takie rygorystyczne wymaganie odnośnie do trwałości betonu dla nawierzchni lotniskowych jest kluczowe ze względu na bezpieczeństwo eksploatacji, ponieważ odpryski złuszczonego betonu mogą być przyczyną poważnych awarii użytkowanych statków powietrznych.

Na bazie uzyskanych wyników dla mieszanki betonowej wykonanej na bazie cementu CEM II/B-S 42,5 N-NA, potwierdzono zasadność kontynuacji dalszych prac mających na celu określenie przydatności takiego rozwiązania do wykonywania betonowych nawierzchni lotniskowych.

3.2 Etap technologiczny

Finalnym etapem programu badawczego było wykonanie w warunkach polowych odcinka doświadczalnego nawierzchni z betonu wyprodukowanego przemysłowo przy wykorzystaniu dwóch rodzajów cementów, tj. CEM I 42,5 R-NA – jako referencyjnego [17] oraz CEM II/B-S 42,5 N-NA – jako ocenianego.

Mieszanki betonowe produkowane były na wytwórni betonu, zlokalizowanej w odległości 18 km od miejsca wbudowania, a czas transportu mieszanki samochodem samowyladowczym trwał około 30 minut. Ważną kwestią jest fakt, że beton układany był w drugiej połowie listopada a dojrzewanie przypadło na okres niskich temperatur otoczenia (rys. 3), bliskich 0°C . Pola testowe zabezpieczone zostały płytami styropianowymi o grubości 10 cm oraz folią. Pomimo zabezpieczenia termicznego, warunki dojrzewania wpłynęły na wytrzymałości 7 dniowe betonu. Niebieskim polem na wykresie zaznaczono przedział czasowy od momentu ułożenia betonu do momentu przystąpienia do wykonywania odwiertów rdzeniowych.



Rys. 3. Temperatura otoczenia w czasie dojrzewania betonu z prób technologicznych

Zmierzona temperatura wierzchniej warstwy betonu, pod izolacją termiczną, w żadnym momencie nie spadła poniżej 10°C bez względu na rodzaj cementu w mieszance betonowej.

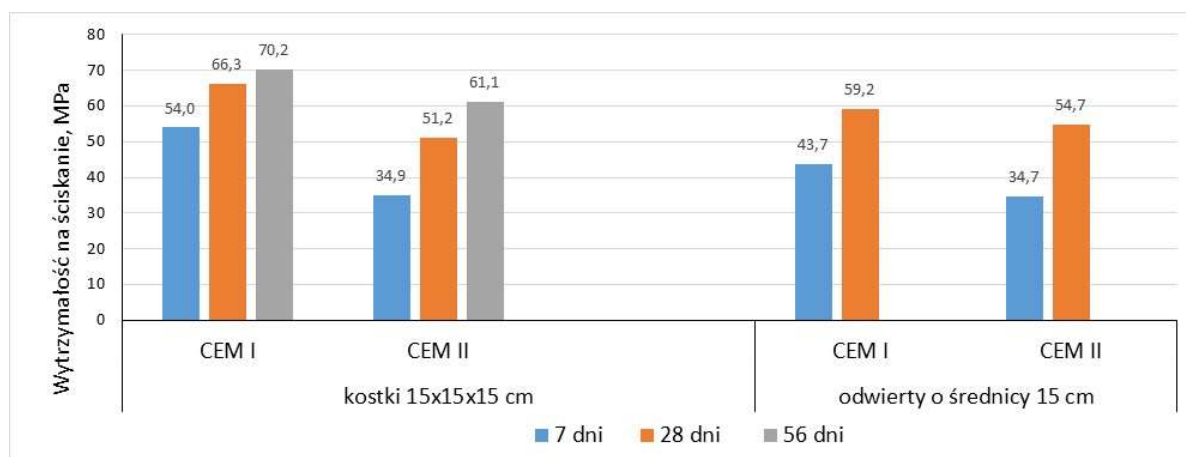
W czasie etapu technologicznego sprawdzono właściwości mieszanki betonowej zarówno w miejscu wytworzenia, jak i w miejscu wbudowania. W przypadku mieszanki betonowej z cementem CEM II/B-S 42,5 N-NA przyjęto ustalone w etapie wstępnym kryteria akceptacji dotyczące konsystencji i zawartości powietrza.

W trakcie betonowania zostały pobrane próbki kontrolne do oceny rozwoju wytrzymałości na ściskanie w czasie. Po upływie 7 dni od momentu wbudowania mieszanek przystąpiono do pobrania odwiertów rdzeniowych Ø150 mm. Zakres badań mieszanek, próbek sześciennych i odwiertów był identyczny jak w etapie I. Wyniki badań zestawiono w tablicy 5 i zobrazowano graficznie na rys. 4 (wytrzymałość na ściskanie) i rys. 5 (wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu).

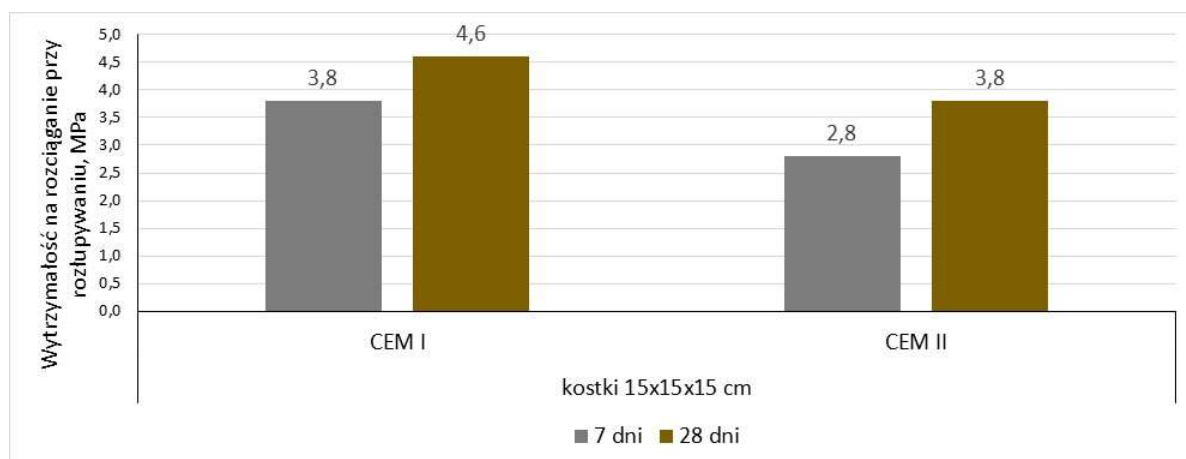
Tablica 5. Ocena uzyskanych wyników badań mieszanki betonowej i próbek betonu w postaci kostek o wymiarach 150x150x150 mm i odwiertów rdzeniowych Ø150 mm (beton do wykonania odcinków doświadczalnych)

	CEM I 42,5 R-NA			CEM II/B-S 42,5 N-NA		
Mieszanka betonowa - właściwość	Wymagania / ustalenia	Uzyskane wyniki	Ocena	Wymagania / ustalenia	Uzyskane wyniki	Ocena
Konsystencja Ve-Be [s]	11-16	11-16	Akceptacja	11-16	11-16	Akceptacja
Gęstość mieszanki	+/- 2% w stosunku do teoretycznej		Akceptacja	+/- 2% w stosunku do teoretycznej		Akceptacja
Zawartość powietrza [%]	4,5 – 5,5	4,8 – 5,3	Akceptacja	5,5 – 6,5	5,7 – 6,4	Akceptacja
Beton – właściwości mechaniczne	Wymagania / ustalenia	Uzyskane wyniki	Ocena	Wymagania / ustalenia	Uzyskane wyniki	Ocena
Wytrzymałość na ściskanie - kostki 15x15x15 cm wykonane podczas układania odcinków doświadczalnych						
Wytrzymałość na ściskanie f_{ck} / f_{cm} [MPa]						
7d	>34	54,0	Akceptacja	> 34	34,9	Akceptacja
28d	≥ 45 + 4	66,3		≥ 45 + 4	51,2	
56 dni	-	70,2		≥ 45 + 4	61,1	
Wytrzymałość na ściskanie - odwierty rdzeniowe						
f_{ck} / f_{cm} [MPa]						
7d	>34	43,7	Akceptacja	>34	34,7	Akceptacja
28d	≥ 45 + 4	59,2		≥ 45 + 4	54,7	
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu – kostki 15x15x15 cm						
$f_{ctm,sp}$ [MPa]						
7 dni	-	3,8	Akceptacja	-	2,8	Akceptacja
28 d	≥ 3,6	4,6		≥ 3,6	3,8	
Mrozoodporność w wodzie F200 - kostki 15x15x15 cm						
Spadek wytrzymałości [%]			Akceptacja			Akceptacja
Ubytek masy [%]	< 19,0 < 4,9	-2,2 0,13		< 19,0 < 4,9	6,9 0,19	
Mrozoodporność w wodzie F200 - odwierty rdzeniowe						
Spadek wytrzymałości [%]	< 19,0	6,1	Akceptacja	< 19,0	10,1	Akceptacja
Ubytek masy [%]	< 4,9	0,04		< 4,9	0,14	
Mrozoodporność F200 przy narażeniu na środek odladzający na bazie mrówczanu potasu – kostki 15x15x15 cm						
Spadek wytrzymałości [%]	< 19,0	6,5	Akceptacja	< 19,0	3,5	Akceptacja
Ubytek masy [%]	< 4,9	-0,03		< 4,9	-0,05	
Mrozoodporność F200 przy narażeniu na środek odladzający na bazie mrówczanu potasu –						

odwierty rdzeniowe						
Spadek wytrzymałości [%]	< 19,0	5,7	Akceptacja	< 19,0	6,2	Akceptacja
Ubytek masy [%]	< 4,9	-0,01		< 4,9	0,01	
Mrozoodporność F200 przy narażeniu na środek odladzający na bazie mrówczanu sodu – kostki 15x15x15 cm						
Spadek wytrzymałości [%]	< 19,0	-5,3 wzrost	Akceptacja	< 19,0	0,16	Akceptacja
Ubytek masy [%]	< 4,9	0,02		< 4,9	0,00	

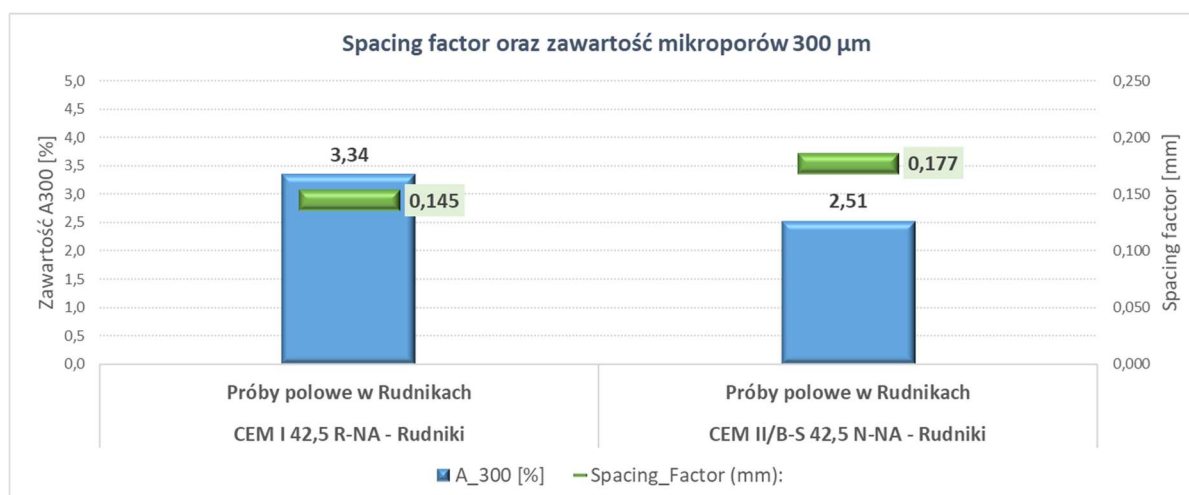


Rys. 4. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie próbek betonu z cementem CEM I i próbek z cementem CEM II (próbki w postaci kostek o wymiarach 15x15x15 cm oraz odwiertów rdzeniowych o średnicy 15 cm pobranych z odcinków doświadczalnych)



Rys. 5. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek betonu z cementem CEM I i próbek z cementem CEM II (próbki w postaci kostek o wymiarach 15x15x15 cm pobranych z odcinków doświadczalnych)

Potwierdzenie struktury napowietrzenia w stwardniałym betonie wykonano na walcach wyciętych w konstrukcji płyt. Wyniki zostały zaprezentowane graficznie na rysunku 6.



Rys. 6. Struktura napowietrzenia betonu z etapu technologicznego

Do napowietrzenia betonu wykonanego na cemencie referencyjnym CEM I 42,5 R-NA oraz na cemencie CEM II/B-S 42,5 N-NA w trakcie produkcji mieszanki przyjęto ten sam zestaw domieszek (plastyfikator + napowietrzacz). Zgodnie z wcześniejszymi doświadczeniami osiągnięcie zakładanej zawartości powietrza dla mieszanki wykonanej na cemencie żużlowym CEM II/B-S wymagało zwiększenia dozowania domieszki napowietrzającej o około 50% w stosunku do mieszanki wykonanej na cemencie referencyjnym. Wyniki badania struktury napowietrzenia w stwardniałym betonie pobranym z konstrukcji nawierzchni odcinka testowego pokazały, że do osiągnięcia pozytywnej oceny jakości takiej struktury przy zastosowanym układzie domieszek dla cementu CEM II/B-S potrzebne jest zwiększenie napowietrzenia o około 1% wartości bezwzględnej w stosunku do betonu wykonanego na cemencie CEM I.

Kluczową oceną trwałości rozwiązania materiałowego w przypadku betonów do zastosowania w nawierzchniach lotniskowych, jak już wspomniano wcześniej jest odporność na powierzchniowe złuszczenie w wyniku zamrażania / odmrażania w obecności różnych preparatów odladzających. Wyniki badań odporności na powierzchniowe złuszczenie betonów wykonanych na cemencie CEM I 42,5 R-NA oraz cemencie CEM II/B-S 42,5 N-NA zestawiono w tabelicy 6.

Tablica 6. Wielkość powierzchniowego złuszczenia dla próbek betonu nawierzchniowego wykonanego na różnych cementach w różnych środowiskach ekspozycji (kostki 15x15x15 pobrane podczas układania odcinków doświadczalnych)

Środowisko – stosowany środek odladzający	Dopuszczalny ubytek masy [kg/m²]	Rodzaj użytego cementu	
		CEM I 42,5 R-NA	CEM II/B-S 42,5 N-NA
		Wyniki badań [kg/m²]	
kostki 15x15x15 cm			
Mrówczan potasu	0,05	brak złuszczeń	brak złuszczeń
Mrówczan sodu (15 % roztwór)		brak złuszczeń	brak złuszczeń
Woda		0,004	0,018
odwierty rdzeniowe			

Mrówczan potasu	0,05	brak złuszczeń	brak złuszczeń
Woda		0,015	0,019

Po badaniach odporności na powierzchniowe złuszczenie próbki poddano badaniom wytrzymałości na odrywanie zgodnie z normą PN-EN 1542:2000, [20]. Wyniki badań wytrzymałości na odrywanie betonu po narażeniu na mróz i środki odladzające przedstawiono w tablicy 7. We wszystkich przypadkach zniszczenie miało charakter kohezyjny w betonie.

Tabela 7. Wyniki badań wytrzymałości na odrywanie próbek po badaniach odporności na powierzchniowe złuszczenie w wodzie i w środkach odladzających.

Środowisko – stosowany środek odladzający	Wymagana wytrzymałość na odrywanie, MPa	Rodzaj użytego cementu	
		CEM I 42,5 R-NA	CEM II/B-S 42,5 N-NA
		Wyniki badań [kg/m²]	
Kostki			
Mrówczan potasu	1,8	4,39	4,04
Mrówczan sodu (15% roztwór)		4,54	3,73
Woda		3,89	4,05
Odwierty rdzeniowe			
Mrówczan potasu	1,8	3,33	3,82
Woda		4,20	3,56

4. Wnioski

Podjęcie przedmiotowego tematu wg autorów bez wątplenia było działaniem właściwym. Spowodowane po części chęcią poznawczą, ale także pewnym wymuszeniem zachodzących zmian ukierunkowanych na obniżanie emisyjności stosowanych rozwiązań materiałowych.

Należy sobie jasno powiedzieć, że budownictwo drogowe znacznie wcześniej otworzyło się na możliwość stosowania cementów innych niż CEM I. Natomiast budownictwo lotniskowe podchodzi to tematu z dużo większym dystansem. Podejście to nie jest spowodowane brakiem chęci i otwartości na nowe rozwiązania materiałowe, lecz jak już wspomniano szczególnym charakterem procesu eksploatacji nawierzchni lotniskowych. Powoduje to konieczność innego spojrzenia na nawierzchnie lotniskowe niż na nawierzchnie drogowe.

Niemniej jednak, jak przedstawiono w pracy budownictwo lotniskowe podejmuje pewne próby, wychodząc naprzeciw pojawiającym się wyzwaniom.

Przeprowadzenie przedstawionego w pracy programu badawczego wpisuje się idealnie w aktualne strategie dekarbonizacji przemysłu cementowego, a mianowicie ograniczenia stosowania cementów o wysokim wskaźniku emisji eqCO₂ na rzecz cementów niskoemisyjnych.

Autorzy mają świadomość, że w dobie zmian wynikających z ograniczenia emisji CO₂ w produkcji cementu, kreowanie nowych rozwiązań materiałowych przy zastosowaniu cementów o zredukowanym śladzie węglowym takich jak np. CEM II/B-S 42,5 N-NA jest wyzwaniem. Musi jednak być spełniony warunek, tzn. odbywać się to powinno w sposób przemyślany przy spełnieniu wszystkich niezbędnych wymagań określonych dla betonu. Zakłada się, że redukcja emisji eqCO₂ przy zastosowaniu receptury na beton wynikająca z zamiany cementu CEM I na CEM II/B-S wynosi około 32 %. To wartość znacząca w

perspektywie świadomej gospodarki emisjami. Należy jednak zaznaczyć, że zmiana ta może powodować w pewnym stopniu obniżenie niektórych cech fizycznych i mechanicznych betonu (np. rozwój wytrzymałości wczesnych w porównaniu do CEM I przy tej samej klasie betonu). W tym miejscu kluczowym wydaje się być postawienie pytania, co jest ważniejsze? Czy ograniczenie emisyjności za wszelką cenę bez pozytywnych doświadczeń z okresu eksploatacji? Jak zmiany materiałowe w rozwiązaniach recepturowych mogą wpłynąć na bezpieczeństwo operacji lotniczych? Zagadnienie owo zależne jest od trzech ogólnie ujmując składowych, tj. człowiek, statek powietrzny oraz otoczenie (w tym nawierzchnie lotniskowe) i wymaga pogłębionej analizy popartej zdobyciem kolejnych doświadczeń.

Wnioski jakie można sformułować na podstawie wyników uzyskanych w ramach przeprowadzonego programu badawczego, potwierdzają możliwość zastosowania cementu CEM II/B-S do produkcji betonu z przeznaczeniem na nawierzchnie lotniskowe. Należy wspomnieć, że przywołana w pracy norma obronna dopuszcza przecież stosowanie cementów innych niż CEM I, ale z wyłączeniem warstwy jezdnej. Ograniczenie to, wprowadzone zostało ze względu na konieczność uzyskania jak najwyższej jakości nawierzchni, jaka bez wątpienia niezbędna jest do zapewnienia bezpieczeństwa przy wykonywaniu operacji lotniczych. Patrząc na wyniki zrealizowanego programu badawczego ograniczenie to nadal pozostanie, gdyż ryzyko jakie przyniosłoby jego zdjęcie w dalszym ciągu jest na razie nieakceptowalne ze względu na brak długoterminowych doświadczeń polowych. Uzyskane w projekcie wyniki wskazują, że kierunek poszukiwań jest obiecujący.

Reasumując, nie można jednoznacznie wykluczyć, że w przyszłości stosowanie cementów z grupy CEM II będzie również dopuszczone w przypadku warstwy jezdnej nawierzchni lotniskowych wykonywanych w technologii betonu cementowego. W dalszym ciągu zasadne jest kontynuowanie prac w tym kierunku, np. poprzez badania sprawdzające parametry wytrzymałościowe i trwałościowe nawierzchni po dłuższym okresie eksploatacji w rzeczywistych warunkach ich użytkowania (wykonanej na elemencie funkcjonalnym lotniska mniej istotnym z punktu widzenia bezpieczeństwa operacji lotniczych, takim jak np. płyta postojowa przeznaczona do dla statków powietrznych o napędzie turbośmigłowym) oraz innych części nawierzchni infrastruktury lotniskowej.

Literatura

- [1] NO-17-A204:2025 Nawierzchnie lotniskowe. Nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania i metody badań.
- [2] PN-V-83002:1999 Lotniskowe nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania ogólne i metody badań.
- [3] Rudnicki T., Stałowski, P.: Performance research of cement concrete pavements with a lower carbon footprint. *Materials*, 2024, vol. 17(13), 3162. DOI: 10.3390/ma17133162 (mdpi.com/1996-1944/17/13/3162)
- [4] Rudnicki T.: The impact of the aggregate used on the possibility of reducing the carbon footprint in pavement concrete. *Sustainability* 2022, 14, 16478
- [5] NO-17-A207:2022 Nawierzchnie lotniskowe – Drogowe odcinki lotniskowe – Wymagania i badania.
- [6] Wesołowski M., Blacha K., Poświata A., (2023). Drogowe odcinki lotniskowe jako element infrastruktury krytycznej i obronnej państwa.
- [7] Szczerba J., Garbacik A., Mróz H.: Właściwości betonów z nowych rodzajów cementów portlandzkich z dodatkami według PN-B-19701. *Cement Wapno Beton*, 2000, t. 5/67, nr 4, s. 149-153

- [8] PN-EN 12350-3:2019-07 Badanie mieszanki betonowej – Część 3. Badanie konsystencji metodą Vebe.
- [9] PN-EN 12350-6: 2019-08 – Część 6. Gęstość.
- [10] PN-EN 12350-7:2019-08 - Część 7. Badanie zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe.
- [11] PN-EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Metody badań – Część 11 Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie
- [12] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu – Część 3 Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania
- [13] PN-EN 12390-5:2019-08 Badania betonu - Część 5 Wytrzymałość na zginanie próbek do badań
- [14] PN-EN 12390-6:2024-04 Badania betonu – Część 6 Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badania
- [15] PN-EN 12390-8:2019-08 Badania betonu – Część 8. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem
- [16] PN-B-06265:2022-08 Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08
- [17] PN-EN 197-1:2012 Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- [18] PN-B-19707:2023-05 Cement. Cement specjalny. Skład, wymagania i kryteria zgodności
- [19] D-05.03.04 Nawierzchnia z betonu cementowego V03 z 01.2025 -źródło www.gov.pl/web/gddkia/nawierzchnie
- [20] Kowalska D., Wesołowski M., Rumak A., Poświata A., Zimowe utrzymanie nawierzchni lotniskowych z betonu cementowego w świetle wymagań normy NO-17-A205:2017, Konferencja Dni Betonu 2018.
- [21] Grabowski P. i in.: Protokół z pracy (z Orzeczeniem nr 19/24/2005): Określenie przydatności cementu CEM I 42,5 R z cementowni Rudniki do produkcji betonu na nawierzchnie lotniskowe, ITWL 2005
- [22] PN-EN 1542:2000 wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań - Pomiar przyczepności przez odrywanie

mgr. inż. Maksymilian Łazarowicz
Politechnika Gdańska, PORR S.A.

dr hab. inż. Piotr Jaskuła
Politechnika Gdańska

Eksperymentalna analiza przyczepności dybla w zależności od położenia i zastosowania smarowania

Experimental analysis of dowel adhesion as a function of the position and the lubrication application

Streszczenie

Nawierzchnie z betonu cementowego wykonane w technologii dyblowanej i kotwionej są podzielone szczelinami poprzecznymi i podłużnymi, tworząc szereg połączonych ze sobą płyt w celu uniknięcia powstawaniu przypadkowo zlokalizowanych spękań skurczowych. Dyble zwiększają możliwości przenoszenia obciążenia ruchu pojazdów, określanego miarą współpracy płyt, a także nie mogą zakłócić płytom swobodnego ruchu spowodowanego obciążeniem termicznym. Prawidłowa praca dybli uzależniona jest od sposobu ich osadzenia, materiału z jakiego zostały wykonane i geometrii: długości, średnicy czy kształtu przekroju. Ogólnie trwałość nawierzchni z betonu cementowego uzależniona jest od szeregu czynników materiałowych, technologicznych, wykonawczych i utrzymaniowych.

Z każdym rokiem kultura wykonania nawierzchni z betonu cementowego jest coraz wyższa, a oddane w przeciągu ostatnich lat odcinki dróg, będące w okresie gwarancyjnym, są uważnie monitorowane przez zarządców dróg oraz firmy wykonawcze. Nieustannie poszukiwane są rozwiązania mające na celu poprawienie trwałości konstrukcji nawierzchni drogowej i długotrwałe utrzymanie komfortu podróżnych, mierzone równością oraz szorstkością nawierzchni.

W pracy przedstawiono wyniki studiów literatury oraz własnych badań laboratoryjnych, dotyczących wpływu smarowania dybla przed jego wbudowaniem na dalszą trwałość płyt betonowych. Jednym z podstawowych obciążeń, działających w szczelinach dylatacyjnych są poziome siły, wywołane ruchami płyt na skutek temperatury. Swobodna praca płyt w kierunku poziomym możliwa jest wtedy, gdy płyty nie napotykają oporów w szczelinach, co ma bezpośredni związek z powierzchnią i właściwym położeniem dybli. Badaniem, umożliwiającym symulację tego zjawiska jest pomiar wytrzymałości na wyrywanie metodą pull-out, która pozwala określić maksymalną osiowo przyłożoną do dybla siłę potrzebną do pokonania sił tarcia między dyblem, a betonem. Im mniejsza wartość ta siła przyjmuje, tym większą swobodę mają

plyty w trakcie eksploatacji. W pracy przedstawiono wyniki badań pull-out dla dybli smarowanych i niesmarowanych przed wbudowaniem w próbkę betonową, a także sprawdzono zmianę tej siły w zależności od wartości obrotu dybli.

Abstract

Jointed Plain Portland Cement Concrete Pavements are divided by transverse and longitudinal joints, forming a series of interconnected slabs to avoid the formation of randomly localized shrinkage cracks. Dowels increase the ability to carry the load of vehicle traffic, determined by the Load Transfer Efficiency, and must not interfere with the free movement of the slabs caused by thermal loading. The correct operation of dowels depends on the way they are embedded, the material they are made of and their geometry: length, diameter or cross-sectional shape. In general, the durability of cement concrete pavements depends on a number of material, technological, execution and maintenance factors.

With each passing year, the culture of cement concrete pavement construction is getting better and better, and the road sections that have been executed in the last few years, are being closely monitored by road authorities and contractors. Solutions are constantly being sought to improve the durability of road pavement construction and to maintain the comfort of travelers over the long term, as measured by the roughness of the pavement.

This paper presents the results of a literature study and our own laboratory tests on the effect of lubricating the dowel before it is embedded on the subsequent durability of concrete slabs. One of the main loads acting in expansion joints are horizontal forces, caused by the movement of slabs due to temperature. Free operation of slabs in the horizontal direction is possible when the slabs do not encounter resistance in the joints, which is directly related to the surface and proper position of dowels. A test to simulate this phenomenon is to measure pull-out strength using the pull-out method, which makes it possible to determine the maximum axially applied force to the dowel required to overcome the frictional forces between the dowel and the concrete. The smaller the value this force takes, the more freedom the slabs have during operation. This paper presents the results of pull-out tests for lubricated and unlubricated dowels before embedding them into a concrete specimen, and also checks the change in this force as a function of the dowel's rotation value.

1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych zadań nawierzchni z betonu cementowego w technologii dyblowanej i kotwionej jest przeniesienie obciążeń od ruchu pojazdów, termicznych oraz reologicznych występujących zaraz po wykonaniu [1]. Cykliczne obciążenie płyt betonowych osią obliczeniową sprawia, że najsłabszym miejscem nawierzchni jest szczelina dylatacyjna będąca celowo stworzoną nieciągłością, której zadaniem jest uchronienie nawierzchni od wystąpienia samoistnych spękań skurczowych w początkowym okresie dojrzewania betonu [2]. Oznacza to, że następuje nierównomierne obciążanie płyt betonowych tj. sytuacja w której płyta jest poddawana naciskowi od kół pojazdów, a sąsiednia nie. Wbudowane zawczasu w szczelinę dylatacyjną dyble mają za zadanie zwiększenie transferu obciążenia między płytą obciążoną, a płytami nieobciążonymi zwiększając w ten sposób żywotność nawierzchni [3].

Z kolei obciążenie termiczne wpływa na zmiany objętościowe płyt betonowych, ponieważ na skutek różnic temperatury między dolną i górną powierzchnią nawierzchni, następuje zjawisko curlingu, czyli odkształcania się płyt [4]. Gdy temperatura górnej powierzchni jest wyższa niż dolnej, płyta wygina się wypukle. Na górnej powierzchni następuje koncentracja naprężeń rozciągających, natomiast na spodzie ściskających. Z kolei gdy temperatura górnej powierzchni jest niższa niż dolnej, płyta wygina się wklęsle, a układ powstałych naprężeń jest odwrotna niż opisano wcześniej. Dodatkowo dobowe różnice temperatur wpływają na poziome ruchy płyt betonowych spowodowane rozszerzaniem się i kurczeniem materiału. Dlatego bardzo istotnym jest zapewnienie płytom swobody ruchu by nie następował wzrost naprężeń rozciągających powodujących zniszczenie betonu po przekroczeniu jego granicznej wytrzymałości [5]. Swoboda poziomych ruchów płyt betonowych uzależniona jest od kilku czynników do których należy zaliczyć m.in. połączenie płyty betonowej z podbudową, położenie dybli w szczelinie dylatacyjnej, czy adhezję między dyblem i betonem. Na szczególną uwagę zasługuje ostatni parametr, ograniczenie przyczepności dybla do betonu powoduje, że przenosi on obciążenie pionowe między płytami, lecz nie stanowi on obszaru kumulacji sił poziomych oraz naprężeń. Dotychczas stosowanym w kraju rozwiązaniem było powleczenie dybli cienką warstwą polimeru zmniejszającego przyczepność dybla do betonu [6]. Natomiast dodatkowym zabiegiem stosowanym powszechnie przy budowie nawierzchni z betonu cementowego w technologii dyblowanej i kotwionej w USA jest smarowanie dybli przed ich wbudowaniem. Zabieg ten ma na celu jeszcze znacznie większą redukcję adhezji między dyblem i betonem umożliwiając w ten sposób zmniejszenie sił w płytach, czego konsekwencją jest ograniczenie naprężeń w betonie. Amerykańskie wytyczne [7] dla niektórych regionów podają graniczną wartość dopuszczalnych naprężeń podczas próby pull-out na poziomie 0,3 MPa. Z kolei dla innych stanów maksymalna dopuszczalna siła wrywająca określana na poziomie 15,2 kN.

Smarowania dybli przed wbudowaniem nie stosowano dotąd w Polsce i budzi polemikę wśród praktyków. Badaniem mogącym zasymulować użyteczność tego zabiegu technologicznego jest pomiar pull-out zgodnie z ISO 1040-1 pkt 7.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest określenie wpływu obrotu dybli na wartość siły wrywającej dybla podczas badania pull-out mającego na celu symulację poziomych ruchów płyt betonowych w trakcie eksploatacji wywołanych obciążeniem termicznym. Dodatkowo

zbadano wpływ zabiegu technologicznego, jakim jest smarowanie dybli przed wbudowaniem, na wartość siły wrywającej i porównanie uzyskanych wyników z wielkościami otrzymanymi z badań dybli niesmarowanych.

3. Badania laboratoryjne

3.1 Procedura badawcza

Oznaczenie wytrzymałości na wrywanie dybla przeprowadzono na tzw. próbce krótkiej, czyli takiej dla której długość odcinka przyczepności wynosi od trzech do pięciu średnic. Wybór ten pozwala na przyjęcie koniecznych uproszczeń polegających na tym, że w trakcie pomiaru zmiany odkształceń w osi pręta są liniowe, natomiast naprężenia przyczepności mają wartość stałą [8], co odpowiada z kolei gładkiej powierzchni dybli.

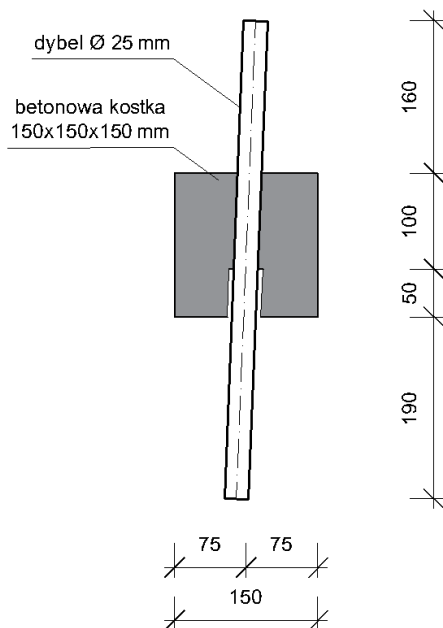
Procedurę badawczą przeprowadzono w oparciu o zapisy normy ISO 1040-1 pkt 7 oraz rozszerzono ją o metodykę badań opisaną w [9]. Metoda pomiaru polega na umieszczeniu dybla w sześciennym próbkę betonowej w taki sposób, by odcinek przyczepności wynosił czterokrotność średnicy dybla. Po co najmniej dwudziestoośmiodniowym okresie pielęgnacji betonu, próbkę umieszcza się w maszynie wytrzymałościowej w taki sposób, aby wolny koniec pręta został zamocowany trwale. Natomiast betonowy sześcian umieszczony jest w specjalnie w tym celu wykonanej stalowej klatce, do której przyłożona jest pionowa siła powodująca ruch ku górze. W ten sposób następuje zjawisko wrywania dybla z betonowej próbki. Przyrost naprężenia przekazywanego przez maszynę na próbkę powinien być stały i wynosić od 10 do 20 MPa/min. Jednakże prędkość przyrostu siły określono z myślą o prętach żebrowanych, które w kontakcie z betonem generują dużo większą siłę przyczepności w porównaniu z prętami gładkimi. Dlatego do badań przyjęto prędkość przyrostu przemieszczenia równe 1 mm/min zgodnie z zaleceniami z [10].

W związku z tym, że celem doświadczenia jest określenie wpływu obrotu dybla na wartość wytrzymałości na wrywanie, pomiar przeprowadzono dla obrotów o wartości. Położeniem referencyjnym, do którego porównywano uzyskane wartości sił, było to równoległe do podstawy i prostopadłe do działającej siły. Wartości obrotów dobrano tak, aby odwzorowywały progowe wartości klasyfikacyjne dybli zgodnie z krajowymi dokumentami technicznymi [11], a także zwiększono je by zbadać potencjalną zależność między obrotem i wytrzymałością na wrywanie. Wartości obrotów pionowych, wyrażonych jako odchylenie między końcami pełnowymiarowego dybla, wynosiły dla badania wytrzymałości na ścinanie:

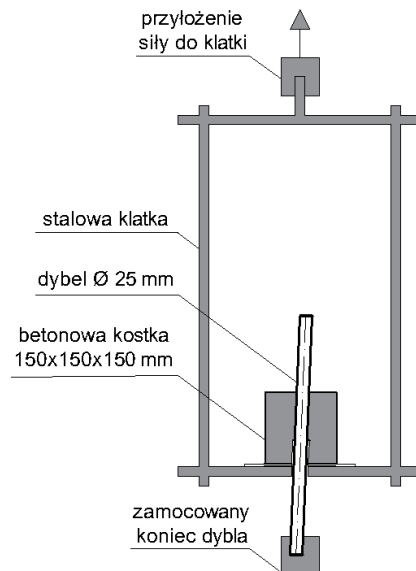
- 0 mm, co odpowiada kątowi 0° i jest określana jako położenie idealne,
- 20 mm, co odpowiada kątowi $2,3^\circ$ i jest określana zgodnie z [11] jako graniczna wartość między grupą „do odbioru bez potrąceń” i „do odbioru z potrąceniami”,
- 40 mm, co odpowiada kątowi $4,6^\circ$ i jest określana zgodnie z [11] jako graniczna wartość między grupą „do odbioru z potrąceniami” i „nie do odbioru”,
- 60 mm, co odpowiada kątowi $6,9^\circ$,

Schemat zestawu badawczego przedstawiono na rysunku 1. Schemat jest tożsamy dla badania przy osiowym położeniu dybla

Próbka do badania wyrywania



Schemat stanowiska badawczego



Rys. 1. Widok próbki oraz schemat zestawu badawczego przy określeniu wytrzymałości na wyrywanie dybla dla obrotu pionowego równego 0 - 80 mm.

W celu określenia potencjalnej zależności między wytrzymałością na wyrywanie a obrotem dybla zdecydowano, że jedyną mierzoną wartością będzie maksymalna siła wyciągająca. Badanie przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej marki ZWICK/ROELL Z400 na Politechnice Gdańskiej. Badanie prowadzono do uzyskania maksymalnej siły wyciągającej dybel z próbki i kontynuowano je do osiągnięcia wysuwu dybla do wartości 20 mm, ponieważ zauważono, że przy tej wartości siły wyciągająca zaczyna maleć.

3.2 Przygotowanie próbek do badań

Badania przeprowadzono na dyblach stalowych powleczonych warstwą polietylenu w dwóch wariantach tj. dyble posmarowane przed wykonaniem próbki oraz nieposmarowane. Do badań zastosowano dyble o średnicy 25 mm ze stali, której w drodze badań laboratoryjnych określono granicę plastyczności jako 342 MPa oraz wytrzymałość na rozciąganie jako 480 MPa. Olej, którym posmarowano dyble zgodnie z zaleceniami AASHTO T 253-02, to SAE 30.

Długość badanych dybli wynosiła 500 mm i umieszczono je w sześciennych próbkach o wymiarach 150x150x150 mm betonowych w taki sposób, że odcinek kontaktu dybla z betonem wynosił czterokrotność średnicy dybla tj. 100 mm. W celu odizolowania pozostałej długości dybla od betonu, zastosowano ochronną gąbkę, którą usunięto po stwardnieniu betonu. Beton zastosowany do wykonania obiektów badawczych był klasy C35/45, co odpowiada wymaganiom stawianym płytom betonowym dla obciążenia ruchu KR7 [12]. Długości wystających końców dybla z próbki wynosiła 19 cm od strony późniejszego mocowania oraz 16 cm. W próbkach nie użyto spiralnego zbrojenia poprzecznego, którego zadaniem jest dodatkowe skrępowanie dybla oraz zmniejszenie prawdopodobieństwa rozłupania betonu,

ponieważ celem tego badania jest możliwie najwierniejsze odtworzenie warunków pracy dybla w płycie betonowej, w której jak wiadomo ten element nie występuje.

Formy oraz przygotowane do badań obiekty przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Forma oraz obiekt badawczy do wykonania oznaczenia wytrzymałości na wrywanie - z lewej forma, z prawej obiekt przygotowany do badań.

Oznaczenie siły wrywającej dla każdej wartości obrotu oraz dla każdego wariantu badawczego, zostało przeprowadzone na trzech próbkach.

3.3 Wyniki badań

Po wykonaniu pomiarów dokonano inspekcji obiektów badań. Próbkę betonową nie wykazały pęknięć lub zarysowań, a dybl nie uległ deformacji w trakcie pomiaru. Obserwacja ta dotyczyła zarówno dybli posmarowanych przed betonowaniem, jak i tych nieposmarowanych. Stan próbek po badaniu wytrzymałości na wrywanie przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Próbkę po badaniu wytrzymałości na wrywanie.

Średnie maksymalne siły wrywające oraz towarzyszące im wysuwy dybli stalowych w osłonie z polietylenu przedstawiono w tabelach 1-2 oraz rysunku 4. Oczekiwane zmiany procentowe w ocenianych parametrach przedstawiono w zakresach dodatnich, a nieoczekiwane w zakresach ujemnych.

Tab. 1. Maksymalne siły wrywające dla dybli stalowych smarowanych i niesmarowanych.

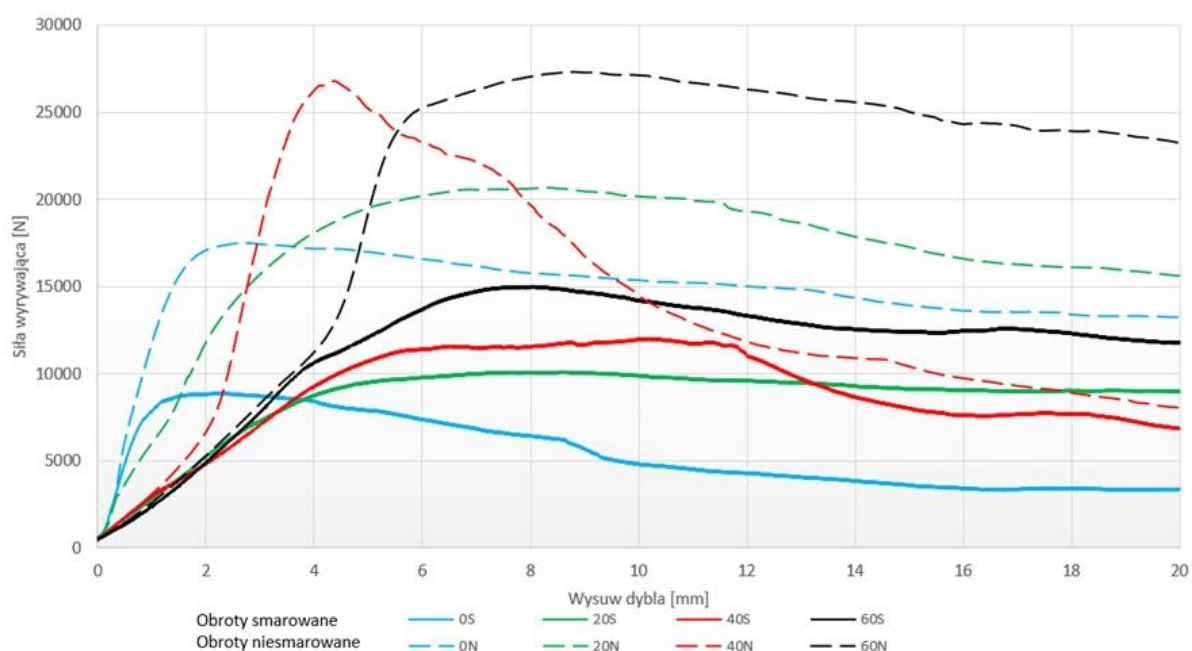
L.p.	Wartość obrotu [mm]	Maksymalna siła wrywającej [N]		Spadek siły wrywającej dla dybli smarowanych [%]
		niesmarowane	smarowane	
1	0	17 517,3	8 869,9	49,4
2	20	20 678,5	10 078,6	51,3
3	40	26 799,4	11 993,1	55,2
4	60	27 323,7	14 980,6	45,2

Na podstawie analizy wyników (tab. 1) maksymalnej siły wrywającej w przypadku dybli smarowanych widać jednoznaczną redukcję siły w zakresie od 45 do 55%. Zauważono też, że obrót dybla istotnie zwiększa siłę wrywającą wraz ze wzrostem obrotu dybla. Można też zaobserwować, że pomimo wzrostu siły w przypadku dybli obroconych nasmarowanie redukuje wzrost siły do poziomu dybla niesmarowanego bez obrotu. Oznacza to, że smarowanie dybli jest w stanie zrekompensować wpływ złego położenia dybla, jego odchylenia od położenia idealnego na wielkość siły wrywającej. Jest to istotna informacja, że zabieg smarowania dybli pozwala na ograniczenie negatywnych skutków wynikających z błędu wykonawczego jakim jest wbudowanie dybli w niewłaściwym położeniu.

Tab. 2. Wysuw przy maksymalnych siłach wrywających dla dybli stalowych smarowanych i niesmarowanych.

L.p.	Wartość obrotu [mm]	Wysuw [mm]		Zmiana wysuwu dla dybli smarowanych [%]
		niesmarowane	smarowane	
1	0	2,33	2,68	13,1
2	20	8,34	8,57	2,8
3	40	4,36	5,85	34
4	60	8,79	8,04	-8,5

Na podstawie analizy wyników (tab. 2) wysuwu przy maksymalnej sile wrywającej zauważono, że zmiany są mało istotne wynoszące $\pm 10\%$. Nie zaobserwowano jednoznacznej zależności na wielkość wysuwu dybla smarowanego i niesmarowanego. Jedynie w przypadku obrotu dybla o wartość 40 mm zaobserwowano większą zmianę wysuwu równą 34%.



Rys. 4. Zestawienie siły wrywającej w czasie badania wytrzymałości na wrywanie dybli stalowych niesmarowanych i smarowanych.

Na podstawie uzyskanych wyników badań obliczono energię potrzebną do osiągnięcia maksymalnej siły wrywającej dyble z próbki betonowej. Rezultaty przedstawiono w tabeli 3. Z rysunku 4 i zestawienia w tabeli 3 można zauważyć, że zarejestrowano istotny spadek energii potrzebnej do osiągnięcia maksymalnej siły wrywającej dybel po posmarowaniu, w zakresie od 32 do 51%. Będzie to miało pozytywny wpływ na generowanie naprężeń termicznych w płycie. Zmniejszenie oporów swobodnego ruchu poziomego płyty zmniejsza naprężenia w płycie.

Tab. 3. Wartości energii do osiągnięcia maksymalnej siły wrywającej dybel.

L.p.	Wartość obrotu [mm]	Energia [J] dybli nieposmarowanych		Zmiana energii dla dybli smarowanych [%]
		niesmarowane	smarowane	
1	0	33,06	16,06	51,4
2	20	130,26	64,71	50,3
3	40	50,88	34,34	32,5
4	60	133,63	74,69	44,1

4. Podsumowanie

Wyniki badań pull-out, czyli wrywania dybli z próbki betonowej w przypadku dybli stalowych w osłonie z polietylenu wykazały wzrost maksymalnej siły wrywającej oraz towarzyszącemu jej wysuwowi elementu wraz ze wzrostem kąta obrotu dybla. Zauważono również, że energia potrzebna do osiągnięcia maksymalnej siły wrywającej rośnie wraz ze wzrostem kąta obrotu dybla, choć dla dybli posmarowanych osiąga niższe wartości dla tych samych obrotów niż dla tych nieposmarowanych.

Smarowanie dybla w każdym przypadku obrotu lub braku obrotu dybla zmniejsza wielkość maksymalnej siły do wyrwania oraz energii potrzebnej do osiągnięcia maksymalnej siły o 50%.

Zauważone zmiany wartości wysuwu dybla, sił wrywających oraz towarzyszącej im energii, świadczą o ich związku z obrotem dybla. Badania wykazały, że w praktyce obrót dybla będzie zmniejszał swobodę pracy płyt betonowych prowadząc do ewentualnych zablokowania szczelin, których następstwem jest powstanie zarysowań, pęknięć lub zniszczeń betonu. Testy wykazały również, że skutecznym sposobem ograniczenia skutków obrotu dybli na trwałość płyt, jest ich posmarowanie przed wbudowaniem.

6. Literatura

- [1] M. A. Glinicki, Inżynieria betonowych nawierzchni drogowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2019
- [2] A. Szydło, Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego: teoria, wymiarowanie, realizacja, Polski Cement, Kraków, 2004
- [3] G. Griffiths i N. Thom, Concrete Pavement Design Guidance notes, Taylor & Francis, Londyn, 2007
- [4] M. Graczyk, M. Gajewski i R. Szczerba, Analiza statyczna dyblowanej betonowej nawierzchni lotniskowej z uwzględnieniem zjawiska curlingu płyt, Roads and Bridges - Drogi i Mosty, 15, 2016
- [5] A. Singh i A.K. Chandrappa, Effect of Uniform Vertical and Longitudinal Dowel Misalignment in Jointed Plain Concrete Pavement, International Journal of Pavement Research and Technology, 328, 2023
- [6] M. Łazarowicz, J. Krzemiński i P. Jaskuła, Ocena wpływu wybranych parametrów materiałowych i technologicznych dybli na zachowanie nawierzchni z betonu cementowego, Inżynieria i Budownictwo, 79, 2023
- [7] M.B. Snyder, Guide to dowel load transfer systems for jointed concrete roadway pavements, Report Date, 2011
- [8] M. Burdziński, M. Niedostatkiwicz, Badania doświadczalne przyczepności, Builder, 6, 2020
- [9] M. Burdziński, M. Niedostatkiwicz, Analiza doświadczalna wpływu średnicy pręta na przyczepność w teście pull-out, Materiały Budowlane, 1, 2022
- [10] L. Khazanovich, K. Hoegh, M. Snyder, NCHRP Report 637: Guidelines for Dowel Alignment in Concrete Pavements, Transportation Research Board, 2009
- [11] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Instrukcja DP-T 14 Ocena jakości na drogach krajowych. Część I – Roboty drogowe, Warszawa, 2020
- [12] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych, Wrocław, 2014

XIII
KONFERENCJA

DNI BETONU 2025

13-15 października 2025



PARTNERZY PROGRAMOWI



SPONSORZY / FIRMY



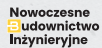
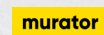
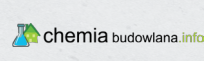
PATRONAT MEDIALNY



www.bta-czasopismo.pl



WSPÓŁPRACA MEDIALNA



ORGANIZATOR



Stowarzyszenie Producentów Cementu

30-003 Kraków • ul. Lubelska 29 • tel.: +48-12-423-33-55

biuro@polskicement.pl • dnibetonu@polskicement.pl

www.polskicement.pl

Bądź z nami w kontakcie:

www.facebook.com/PolskiCement

www.facebook.com/ArchitekturaBetonowa

x.com/polskicement

www.instagram.com/architektura_betonowa



ISBN: 978-83-61331-51-3