miesięcznik naukowo-techniczny stowarzyszenia inżynierów i techników komunikacji RP

# przegląd komunikacyjny

9-10-11
2021
rocznik LXXVI
cena 50,00 zł
w tym 8% VAT

UKAZUJE SIĘ OD 1945 ROKU

# Transport lotniczy i infrastruktura lotniskowa

eISSN
2544-6037

ISSN
0033-22-32

Nowatorska metoda konstrukcyjno-techniczna wykorzystania prefabrykowanej, dyblowanej płyty żelbetowej do prowadzenia skutecznych napraw nawierzchni lotniskowych. Diagnostyka techniczna i kształtowanie niezawodności betonowych nawierzchni lotniskowych w toku ich modernizacji i rekonstrukcji. Przykłady zastosowania GPR do badań na lotniskach. Krata lotniskowa jako szybka i skuteczna metoda poprawy nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych. Ocena korozyjności atmosfery na podstawie ubytków korozyjnych próbek wzorcowych na terenie wybranych wojskowych baz lotniczych. Tekstura nawierzchni lotniskowych w aspekcie skuteczności ich odwadniania. Stabilizacja podłoża gruntowego i poziomowanie betonowych płyt nawierzchniowych. Zastosowanie destruktu asfaltowego w recyklowanych nawierzchniach drogowych. Integracja lotnisk w Polsce z lokalnym transportem szynowym

# Podstawowe informacje dla Autorów artykułów

„Przegląd Komunikacyjny" publikuje artykuły związane z szeroko rozumianym transportem oraz infrastrukturą transportu. Obejmuje to zagadnienia techniczne, ekonomiczne i prawne. Akceptowane są także materiały związane z geografią, historią i socjologią transportu.

**Artykuły publikowane w „Przeglądzie Komunikacyjnym" dzieli się na: „wnoszące wkład naukowy w dziedzinę transportu i infrastruktury transportu" oraz „pozostałe". Prosimy Autorów o deklarację (w zgłoszeniu), do której grupy zaliczyć ich prace.**

Materiały do publikacji: zgłoszenie, artykuł oraz oświadczenie Autora, należy przesyłać w formie elektronicznej na adres redakcji:

**artykuly@przeglad.komunikacyjny.pwr.wroc.pl**

W zgłoszeniu należy podać: imię i nazwisko autora, adres mailowy oraz adres do tradycyjnej korespondencji, miejsce zatrudnienia, zdjęcie, tytuł artykułu oraz streszczenie (po polsku i po angielsku) i słowa kluczowe (po polsku i po angielsku). Szczegóły przygotowania materiałów oraz wzory załączników dostępne są ma stronie:

**www.transportation.overview.pwr.edu.pl**

**W celu usprawnienia i przyspieszenia procesu publikacji prosimy o zastosowanie się do poniższych wymagań dotyczących nadsyłanego materiału:**

1. Tekst artykułu powinien być napisany w jednym z ogólnodostępnych programów (np. Microsoft Word). Wzory i opisy wzorów powinny być wkomponowane w tekst. Tabele należy zestawić po zakończeniu tekstu. Ilustracje (rysunki, fotografie, wykresy) najlepiej dołączyć jako oddzielne pliki. Można je także wstawić do pliku z tekstem po zakończeniu tekstu. Możliwe jest oznaczenie miejsc w tekście, w których autor sugeruje wstawienie stosownej ilustracji lub tabeli. Obowiązuje odrębna numeracja ilustracji (bez rozróżniania na rysunki, fotografie itp.) oraz tabel.
2. Całość materiału nie powinna przekraczać 12 stron w formacie Word (zalecane jest 8 stron). Do limitu stron wlicza się ilustracje załączane w odrębnych plikach (przy założeniu że 1 ilustracja = ½ strony).
3. Format tekstu powinien być jak najprostszy (nie stosować zróżnicowanych styli, wcięć, podwójnych i wielokrotnych spacji itp.). Dopuszczalne jest pogrubienie, podkreślenie i oznaczenie kursywą istotnych części tekstu, a także indeksy górne i dolne. **Nie stosować przypisów.**
4. Nawiązania do pozycji zewnętrznych - cytaty (dotyczy również podpisów ilustracji i tabel) oznacza się numeracją w nawiasach kwadratowych [...]. Numerację należy zestawić na końcu artykułu (jako „Materiały źródłowe"). Zestawienie powinno być ułożone alfabetycznie.
5. Jeżeli Autor wykorzystuje materiały objęte nie swoim prawem autorskim, powinien uzyskać pisemną zgodę właściciela tych praw do publikacji (niezależnie od podania źródła). Kopie takiej zgody należy przesłać Redakcji.

Artykuły wnoszące wkład naukowy w dyscyplinę inżynieria lądowa i transport podlegają procedurom recenzji merytorycznych zgodnie z wytycznymi MNiSW, co pozwala zaliczyć je, po opublikowaniu, do dorobku naukowego oraz uwzględnić w ewaluacji jakości działalności naukowej (Dz.U. 2019 poz. 392). Liczba uwzględnianych punktów w ewaluacji osiągnięć naukowych wynosi 5.

Do oceny każdej publikacji powołuje się co najmniej dwóch niezależnych recenzentów spoza jednostki. Zasady kwalifikowania lub odrzucenia publikacji i ewentualny formularz recenzencki są podane do publicznej wiadomości na stronie internetowej czasopisma lub w każdym numerze czasopisma. Nazwiska recenzentów poszczególnych publikacji/numerów nie są ujawniane.

Przygotowany materiał powinien obrazować własny wkład badawczy autora. Redakcja wdrożyła procedurę zapobiegania zjawisku Ghostwriting (z „ghostwriting" mamy do czynienia wówczas, gdy ktoś wniósł istotny wkład w powstanie publikacji, bez ujawnienia swojego udziału jako jeden z autorów lub bez wymienienia jego roli w podziękowaniach zamieszczonych w publikacji). Tekst i ilustracje muszą być oryginalne i niepublikowane w innych miejscach (w tym w internecie). Możliwe jest zamieszczanie artykułów, które ukazały się w materiałach konferencyjnych i podobnych (na prawach rękopisu) z zaznaczeniem tego faktu i po przystosowaniu do wymogów publikacyjnych „Przeglądu Komunikacyjnego".

Na stronie internetowej czasopisma dostępne są pełne wersje artykułów oraz streszczenia w języku polskim (od 2010) i angielskim (od 2016) jako OPEN ACCESS. Pod koniec 2018 roku „Przegląd Komunikacyjny" rozpoczął indeksowanie artykułów angielskich z użyciem numerów cyfrowych DOI. Czasopismo ubiega się o partycypowanie w bazie SCOPUS. Rejestrowane jest w międzynarodowej baza DOAJ https://doaj.org/.

Redakcja pisma oferuje objęcie patronatem medialnym konferencji, debat, seminariów itp.
Ceny są negocjowane indywidualnie w zależności od zakresu zlecenia. Możliwe są atrakcyjne upusty. Patronat obejmuje:

- ogłaszanie przedmiotowych inicjatyw na łamach pisma,
- zamieszczanie wybranych referatów / wystąpień po dostosowaniu ich do wymogów redakcyjnych,
- publikację informacji końcowych (podsumowania, apele, wnioski),
- kolportaż powyższych informacji do wskazanych adresatów.

**www.transportation.overview.pwr.edu.pl**

## Ramowa oferta dla „Sponsora strategicznego" czasopisma Przegląd Komunikacyjny

Sponsor strategiczny zawiera umowę z wydawcą czasopisma na okres roku kalendarzowego z możliwością przedłużenia na kolejne lata. Uprawnienia wydawcy do zawierania umów posiada Zarząd Krajowy SITK w Warszawie.

Przegląd Komunikacyjny oferuje dla sponsora strategicznego następujące świadczenia:

- **zamieszczenie logo sponsora w każdym numerze,**
- **zamieszczenie reklamy sponsora w jednym, kilku lub we wszystkich numerach,**
- **publikacja jednego lub kilku artykułów sponsorowanych,**
- **publikacja innych materiałów dotyczących sponsora,**
- **zniżki przy zamówieniu prenumeraty czasopisma.**

Możliwe jest także zamieszczenie materiałów od sponsora na stronie internetowej czasopisma.
Przegląd Komunikacyjny ukazuje się jako miesięcznik.
Szczegółowy zakres świadczeń oraz detale techniczne (formaty, sposób i terminy przekazania) są uzgadniane indywidualnie.

Osoba kontaktowa w tej sprawie:
Hanna Szary
hanna.szary@sitkrp.org.pl
ul. Czackiego 3/5, 00-043 Warszawa, tel.: (22) 827 02 58, 506 116 966

Cena za świadczenia na rzecz sponsora uzależniana jest od uzgodnionych szczegółów współpracy. Zapłata może być dokonana jednorazowo lub w kilku ratach (na przykład kwartalnych). Część zapłaty może być w formie zamówienia określonej liczby prenumerat czasopisma.

Na okładce: *Montaż płyty z kieszeniami*
*Źródło: Bartosz Świerzewski, Mariusz Wesołowski*

przegląd komunikacyjny
9-10-11 / 2021
rocznik LXXVI

***Szanowni P.T. Czytelnicy***

*Przekazujemy kolejny numer Przeglądu Komunikacyjnego. Jest on poświęcony wybranym elementom transportu lotniczego oraz infrastruktury lotniskowej w szczególności nawierzchniom lotniskowym. W pierwszym artykule Autorzy prezentują ciekawe rozwiązanie tj. prefabrykowaną płytę betonową, wykorzystywaną do wymiany zniszczonych istniejących płyt nawierzchniowych. Płyta jest połączona z sąsiednimi płytami i zapewnia ich współpracę. Opisano konstrukcję płyty, proces produkcji oraz technologię wbudowania. W kolejnym artykule przedstawiono teoretyczny model niezawodności modernizowanego i rekonstruowanego obiektu lotniskowego, ze zwróceniem szczególnej uwagi na: poprawność i skuteczność technologicznej jego realizacji. Ciekawy jest następny artykuł prezentujący metodę georadarową (GPR) wykorzystywaną do monitoringu nawierzchni dróg startowych, kołowania, płaszczyzn postoju samolotów na lotniskach w celu identyfikacji uszkodzeń. W artykule przedstawiono wyniki badań zrealizowane na lotnisku Okęcie w Warszawie. Kolejny artykuł prezentuje zastosowanie geokraty z tworzywa sztucznego do wzmacniania naturalnych nawierzchni lotniskowych w tym poboczy dróg startowych, czołowych pasów bezpieczeństwa i innych. Autorzy na podstawie badań prezentują efekty zastosowania takich elementów kratowych. Nośność podłoża wzrasta prawie ok. 50 % po zastosowaniu kraty. Interesujący jest artykuł oceniający korozyjność atmosfery na podstawie próbek testowych w obrębie wybranych lotnisk. W artykule przedstawiono wyniki ubytków korozyjnych rcorr próbek standardowych ze stali niskowęglowej, cynku, miedzi i aluminium pozyskanych z wybranych lotnisk Sił Zbrojnych RP, począwszy od 2015 roku. Następnie określono kategorie korozyjności atmosfery na podstawie przeprowadzonych pomiarów. Autorzy wnioskują, że korozyjność atmosfery może oddziaływać również na nawierzchnie lotniskowe. W kolejnym artykule przedstawiono wyniki badań w zakresie tekstury nawierzchni lotniskowych oraz ich analizę w odniesieniu do aktualnych wymagań. W badaniach, poza obecnie używaną punktową metodą pomiarową zastosowano nowatorską metodę oceny właściwości przeciwpoślizgowych, umożliwiającą równoczesny pomiar współczynnika tarcia μ oraz nowego współczynnika ciągłej średniej głębokości profilu i tekstury CMPTD. Uzyskane wyniki pozwoliły na przedstawienie wniosków, że przy ocenie tekstury nawierzchni lotniskowych i tym samym projektowaniu rozwiązań konstrukcyjnych w zakresie ich odwodnienia zasadnym jest uwzględnienie technologii jej wykonania. Kolejny artykuł został poświęcony zagadnieniu stabilizacji i poziomowania płyt betonowych nawierzchniowych w technologii iniekcji niskociśnieniowej z wykorzystaniem specjalistycznych materiałów iniekcyjnych (żywic). Technologia reniwelacji płyt znajduje zastosowanie w miejscach osiadania trwale wzmacniając podłoże gruntowe, względnie podbudowę, jak również pozwala przywrócić żądane parametry równości nawierzchni. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych, jak również wyniki testów terenowych wykonanych przed pracami iniekcyjnymi oraz po ich zakończeniu na przykładzie prac realizowanych na jednym z obiektów lotniskowych w Polsce. Następny artykuł prezentuje możliwości powtórnego zastosowania materiałów pochodzących z recyklingu w konstrukcjach nawierzchni drogowych i lotniskowych. Materiały odpadowe pochodziły ze starych i zniszczonych warstw nawierzchni. Destrukt asfaltowy został wykorzystany do wytworzenia nowych warstw nawierzchni drogowych – warstw podbudowy. Warstwy podbudowy wykonano z mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Głównym celem była ocena wpływu destruktu asfaltowego w mieszankach MCE na właściwości fizyczne, mechaniczne i reologiczne recyklowanej podbudowy. Spośród 15 polskich lotnisk obsługujących regularne połączenia pasażerskie tylko 5 jest zintegrowanych z lokalnym pasażerskim transportem szynowym, przy czym integracja ta ma rożną skalę, co przekłada się na efektywność połączeń intermodalnych i ich popularność wśród podróżnych, udowadnia Autor w kolejnym artykule. Istnieją także liczne plany budowy lub modernizacji linii kolejowych, a incydentalnie także tramwajowych celem usprawnienia dostępności portów lotniczych. Autor omawia istniejące i planowane (a także potencjalne) rozwiązania koncentrując się na transporcie lokalnym (aglomeracyjnym).*
*W numerze także przegląd prasy z zakresu transportu i infrastruktury transportowej.*

*Życzę naszym czytelnikom dobrej lektury.*

*Redaktor Naczelny*
*Prof. Antoni Szydło*

W numerze

**Aktualności** 2

**Nowatorska metoda konstrukcyjno-techniczna wykorzystania prefabrykowanej, dyblowanej płyty żelbetowej do prowadzenia skutecznych napraw nawierzchni lotniskowych**
Bartosz Świerzewski, Mariusz Wesołowski 4

**Diagnostyka techniczna i kształtowanie niezawodności betonowych nawierzchni lotniskowych w toku ich modernizacji i rekonstrukcji**
Małgorzata Linek, Piotr Nita, Adam Poświata 13

**Przykłady zastosowania GPR do badań na lotniskach**
Adam Szynkiewicz 18

**Krata lotniskowa jako szybka i skuteczna metoda poprawy nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych**
Agata Kowalewska,
Paweł Pietruszewski, Krzysztof Blacha 23

**Ocena korozyjności atmosfery na podstawie ubytków korozyjnych próbek wzorcowych na terenie wybranych wojskowych baz lotniczych**
Aleksandra Pajurek,
Paweł Iwanowski, Danuta Kowalska 28

**Tekstura nawierzchni lotniskowych w aspekcie skuteczności ich odwadniania**
Mariusz Wesołowski,
Krzysztof Blacha, Piotr Włodarski 33

**Stabilizacja podłoża gruntowego i poziomowanie betonowych płyt nawierzchniowych**
Mariusz Wesołowski,
Agnieszka Poteraj-Oleksiak, Danuta Kowalska 39

**Zastosowanie destruktu asfaltowego w recyklowanych nawierzchniach drogowych**
Łukasz Skotnicki, Jarosław Kuźniewski 46

**Integracja lotnisk w Polsce z lokalnym transportem szynowym**
Maciej Kruszyna 55

**Wydawca:**
Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej
00-043 Warszawa, ul. Czackiego 3/5
**www.sitkrp.org.pl**

**Redaktor Naczelny:**
Antoni Szydło

**Redakcja:**
Krzysztof Gasz, Igor Gisterek, Bartłomiej Krawczyk, Maciej Kruszyna (Z-ca Redaktora Naczelnego), Agnieszka Kuniczuk - Trzcinowicz (Redaktor językowy), Piotr Mackiewicz (Sekretarz), Wojciech Puła (Redaktor statystyczny), Wiesław Spuziak, Robert Wardęga, Czesław Wolek

**Adres redakcji do korespondencji:**
Poczta elektroniczna:
**redakcja@przeglad.komunikacyjny.pwr.wroc.pl**

Poczta „tradycyjna":
Piotr Mackiewicz, Maciej Kruszyna
Politechnika Wrocławska,
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
Faks: 71 320 45 39

**Rada naukowa:**
Marek Ciesielski (Poznań), Antanas Klibavičius (Wilno), Jozef Komačka (Žilina), Elżbieta Marciszewska (Warszawa), Andrzej S. Nowak (Auburn University), Tomasz Nowakowski (Wrocław), Victor V. Rybkin (Dniepropietrovsk), Marek Sitarz (Katowice), Wiesław Starowicz (Kraków), Hans-Christoph Thiel (Cottbus), Tomasz Siwowski (Rzeszów), Jiri Strasky (Brno), Andrea Zuzulova (Bratysława)

**Rada programowa:**
Mirosław Antonowicz, Dominik Borowski, Leszek Krawczyk, Marek Krużyński, Leszek W. Mindur, Andrzej Żurkowski

**Deklaracja o wersji pierwotnej czasopisma**
Główną wersją czasopisma jest wersja elektroniczna. Na stronie internetowej czasopisma dostępne są pełne wersje artykułów oraz streszczenia w języku polskim (od 2010) i angielskim (od 2016).

Redakcja zastrzega sobie prawo dokonywania zmian w materiałach nie podlegających recenzji.

Artykuły opublikowane w „Przeglądzie Komunikacyjnym" są dostępne w bazach danych 20 bibliotek technicznych oraz są indeksowane w bazach:

BAZTECH: **http://baztech.icm.edu.pl**
Index Copernicus: **http://indexcopernicus.com**
Międzynarodowa baza DOAJ **https://doaj.org/**

**Prenumerata:**
Szczegóły i formularz zamówienia na stronie:

**http://www.transportation.overview.pwr.edu.pl**

Obecna Redakcja dysponuje numerami archiwalnymi począwszy od 4/2010.

Numery archiwalne z lat 2004-2009 można zamawiać w Oddziale krakowskim SITK, ul. Siostrzana 11, 30-804 Kraków, tel./faks 12 658 93 74, **mrowinska@sitk.org.pl**

**Druk:**
HARDY Design, 52-131 Wrocław, ul. Buforowa 34a
Przemysław Wołczuk, **przemo@dodo.pl**

**Reklama:**
Dział Marketingu: **sitk.baza@gmail.com**

**Nakład:** 800 egz.

## Gmina Łubniany wprowadza nową bezpłatną komunikację. Połączy 11 sołectw

Krzysztof Ogiolda, nto.pl, 2.09.2021

Od 1 września komunikacja na terenie gminy Łubniany – na wszystkich liniach i kursach – jest bezpłatna. Samorząd podpisał umowę z firmą GTV Bus wyłonioną w przetargu.
Na terenie gminy będą funkcjonowały trzy linie autobusowe, które połączą wszystkie 11 sołectw. Komunikacja na terenie gminy Łubniany będzie darmowa. Poza terenem, gdy mieszkańcy będą chcieli dojechać autobusami do Kup i do Opola, trzeba będzie opłacić przejazd (4,50 zł do Opola, 3 zł do Kup). Przewoźnik zadeklarował także możliwość zakupu biletów miesięcznych (...).

## Co z wyczekiwanym łącznikiem na Muchoborze Wielkim? Są nowe ustalenia

Konrad Bałajewicz, Gazeta Wrocławska, 7.09.2021

Budowa łącznika pomiędzy ulicami: Rakietową a Żwirki i Wigury we Wrocławiu staje się rzeczywistością. Zarząd Dróg i Utrzymania Miasta wybrał wykonawcę tej inwestycji. Na drogę łączącą ul. Rakietową z ul. Żwirki i Wigury mieszkańcy tej części miasta czekają od lat. Ułatwiłby ona wrocławianom, ale także mieszkańcom: Smolca, Mokronosu czy Kątów Wrocławskich, przedostanie się na zachód Wrocławia bez konieczności wjeżdżania w stronę centrum miasta (...). O budowę łącznika w przetargu walczyło łącznie 8 firm. Jako najkorzystniejszą ofertę wybrano złożoną przez Berger Bau Polska na kwotę blisko 6,5 mln zł. Wykonawca ma 9 miesięcy na zakończenie prac od podpisania umowy (...).

## Dolny Śląsk: Brakujący fragment drogi S3 ma być już wkrótce przejezdny!

Jerzy Wójcik, Gazeta Wrocławska, 4.09.2021

Dobre informacje dla kierowców korzystających z dolnośląskiego odcinka drogi ekspresowej S3. Już wkrótce pojedziemy brakującym fragmentem tej trasy w okolicach Polkowic. Dziś to jedyne wąskie gardło na dolnośląskim odcinku, nie licząc oczywiście budowanych fragmentów od Bolkowa w stronę czeskiej granicy. W tym miejscu brakuje około 14 kilometrów drogi ekspresowej pomiędzy węzłami Polkowice Północ (dawnej węzeł Kaźmierzów) i Polkowice Północ. Prace są opóźnione o trzy lata, z powodu rozwiązania umowy z włoską firmą, która utknęła z pracami podczas realizacji. Nowy termin zakończenia prac i oddania drogi do ruchu to listopad tego roku (...).

## Tarnów-Wierzchosławice. Zielone światło dla budowy nowego połączenia Tarnowa z autostradą A4. Jest zezwolenie wojewody małopolskiego

Paulina Marcinek-Kozioł, Gazeta Krakowska, 7.09.2021

Zniknęła ostatnia formalna przeszkoda dla rozpoczęcia budowy połączenia węzła autostrady A4 w Wierzchosławicach ze Strefą Aktywności Gospodarczej w Tarnowie. Wojewoda małopolski, Łukasz Kmita wydał zezwolenie na realizację tej inwestycji. Na połączenie zachodniej strony Tarnowa z autostradą miasto czeka już od dziewięciu lat. Początkowo łącznik miała budować GDDKiA, ale ostatecznie ten projekt upadł. Potem z inwestycją usiłował się zmierzyć powiat tarnowski, a ostatecznie wzięło ją na swoje barki województwo (...). Nowy łącznik będzie miał 2,6 km długości. Jego początek zlokalizowany będzie przy węźle autostradowym w Wierzchosławicach, a koniec - na rondzie u zbiegu ulic Chemicznej i Witosa w Tarnowie. Najdroższym elementem trasy będzie liczący aż 830 metrów długości most na Dunajcu. Inwestycja ma kosztować 155 mln zł z czego 113 mln zł, to unijne dofinansowanie (...).

## Kraków. Tramwaj do Mistrzejowic: Oprócz tunelu zaplanowali rynnę, ale trzeba zapłacić dodatkowe 135 mln zł

Piotr Tymczak, Gazeta Krakowska, 6.09.2021

Przedstawiciele urzędu i wykonawcy linii tramwajowej z ul. Meissnera do Mistrzejowic doszli do porozumienia, by zrealizować wariant z dłuższym przebiegiem torowiska na poziomie „-1". Założenie jest takie, że tramwaje będą też przejeżdżać poniżej terenu na rondzie Młyńskim. Koszt dodatkowych prac ustalono na ok. 135 mln zł. Pierwotna koncepcja przebiegu linii tramwajowej do Mistrzejowic w rejonie ronda Młyńskiego przewidywała naziemny przebieg torowiska. Wiosną rozpoczęto analizy możliwości wprowadzenia w projekcie zmian, polegających na poprowadzeniu torów na tym rondzie poniżej poziomu terenu - nie w tunelu, ale w konstrukcji przypominającej wyglądem rynnę (...).

## Kraków. Nie ma zgody na tunel tramwajowy pod Alejami. Torowisko może powstać kosztem jezdni dla aut

Piotr Tymczak, Gazeta Krakowska, 7.09.2021

Odbyły się wstępne konsultacje przedstawicieli miasta z władzami konserwatorskimi dotyczące budowy linii tramwajowej z Nowego Kleparza do placu Inwalidów. Urzędnicy przedstawili kilka propozycji przebiegu nowej trasy wzdłuż al. Słowackiego. Małopolska wojewódzka konserwator zabytków Monika Bogdanowska nie widzi możliwości poprowadzenia torowiska w tunelu, ani kosztem pasa zieleni pośrodku tej głównej arterii w mieście.
- Ze względu na ochronę zieleni nie do przyjęcia jest wariant przebiegu linii tramwajowej w pasie zieleni alei Słowackiego. Z tego powodu nie do zaakceptowania jest też wariant drążenia tunelu pod ziemią z rampami wyjazdowymi o długości ok. 150 metrów. Takie rozwiązanie byłoby także niebezpieczne dla kamienic znajdujących się na Alejach – mówi Monika Bogdanowska, małopolska wojewódzka konserwator zabytków (...).

## Tramwaj na Maślice coraz bliżej. Kiedy pojedzie?

Andrzej Zwoliński, Gazeta Wrocławska, 14.09.2021

Powstała dokumentacja związana z przebudową ulicy Maślickiej i budową Nowomaślickiej oraz koncepcja przebiegu tramwaju przez osiedle Maślice. Na co mogą liczyć mieszkańcy?
Z blisko rocznym poślizgiem, ale w końcu jest – obiecana przez magistrat dokumentacja i koncepcja trzech związanych ze sobą inwestycji: przebudowy ulicy Maślickiej, budowy tzw. ulicy Nowomaślickiej, czyli łącznika Maślicka - Suwalska – Królewiecka i co najważniejsze - przebiegu przyszłej linii tramwajowej przez Osiedle Maślice (...). Jak informuje magistrat, rozpoczęcie realizacji zarówno linii tramwajowej jak i budowy ulicy Nowomaślickiej możliwe będzie dopiero po 2022 roku, wraz zapewnieniem prze Gminę Wrocław finansowania tych inwestycji z udziałem środków zewnętrznych (...).

## Projekt odtworzenia pociągu do Niepołomic. Zdalne spotkanie konsultacyjne dla mieszkańców

Jolanta Białek, Gazeta Krakowska, 15.09.2021

Odtworzenie połączenia kolejowego z Krakowa do Niepołomic, planowane w ramach programu „Kolej+", jest na etapie opracowywania studium planistyczno-prognostycznego dla inwestycji. Związane z tym dokumentem zdalne konsultacje dla mieszkańców, dotyczące przywrócenia połączeń kolejowych do Niepołomic, zapowiedziano na 20 września 2021.
- Ideą inwestycji jest odbudowa kolei do Niepołomic, co pozwoli na reaktywację po wielu latach przewozów pasażerskich na trasie Kraków – Niepołomice. W porównaniu z dawną linią kolejową do Niepołomic, nowa trasa zostanie wybudowana w nowym przebiegu. Ma to na celu dostosowanie inwestycji do obecnego układu urbanistycznego Niepołomic, a także możliwość obsługę zakładów przemysłowych zlokalizowanych w specjalnej strefie

ekonomicznej – podaje spółka Infra – Centrum Doradztwa, która wraz Instytutem Kolejnictwa opracowuje - na zlecenie województwa małopolskiego - studium planistyczno-prognostyczne dla przedsięwzięcia (...).

## Kraków. Stacja kolejowa przy osiedlu Złocień zostanie otwarta w tym roku

(AM), Gazeta Krakowska, 13.09.2021

Kolejarze z PKP PLK zapewniają, że w tym roku w końcu udostępniony zostanie pasażerom nowy przystanek kolejowy, który powstaje przy osiedlu Złocień. Będą się na nim zatrzymywały pociągi aglomeracyjne, a okoliczni mieszkańcy zyskają możliwość szybkiego dojazdu transportem szynowym do centrum miasta (do tego osiedla nie dojeżdżają przecież tramwaje). "Przystanek powstaje przy ul. Złocieniowej. Perony zlokalizowane są częściowo na moście, pod którym przepływa Serafa. Obiekt jest wykonany w ok. 70 proc. Mieszkańcy pobliskich osiedli będą mogli się do niego dostać przez klatki schodowe i windy. Wykonawca zrealizował też drogę, która po przedłużeniu będzie dodatkowym wyjazdem z osiedla. Pierwszy z dwóch peronów będzie oddany do eksploatacji jeszcze w tym roku" - informują kolejarze z PKP PLK (...).

## Nowy most na rzece San w Sanoku coraz bliżej. Podpisano umowę na opracowanie dokumentacji projektowej

Wojciech Zatwarnicki, nowiny24.pl, 14.09.2021

W Urzędzie Miasta Sanoka, w obecności Małgorzaty Jarosińskiej - Jedynak, sekretarz stanu w Ministerstwie Funduszy i Polityki Regionalnej została podpisana umowa między miastem Sanok i firmą Sweco na opracowania dokumentacji projektowej na potrzeby budowy nowego mostu na rzece San (...). Szacowany koszt budowy nowej przeprawy na Sanie wraz z budową dróg dojazdowych oraz skrzyżowania z drogą krajową nr 886 wynosi 63,9 mln zł. Koszt przygotowania dokumentacji to 1,3 mln zł, a dotacja z budżetu państwa na jej przygotowanie to ponad 1 mln zł. Most powstanie na przedłużeniu ul. Sobieskiego do ul. Gajowej. Będzie miał 120 m długości, 2-metrowy obustronny ciąg pieszo-rowerowy oraz dwukierunkową jezdnię o szerokości 6 m. Most zostanie zaprojektowany na najwyższą klasę obciążenia taborem samochodowym, a także na obciążenie pojazdami specjalnymi.

## "Chiński" odcinek drogi S14 jest już w dużej części wyasfaltowany

Jacek Zemła, Dziennik Łódzki, 16.09.2021

Prace przy budowie północnego odcinka drogi ekspresowej S14 stanowiącej zachodnią obwodnicę Łodzi szybko posuwają się do przodu. Na licznych odcinkach tego 16-kilometrowego fragmentu „ekspresówki" jezdnie są już pokryte warstwą wiążącą asfaltu. Tak jest m.in w okolicach Emilii i Lućmierza, w Zgierzu przy osiedlu 650-lecia oraz w rejonie granicy administracyjnej Łodzi i Zgierza. Wykonawca, którym jest chińska firma Stecol Corporation, koncentruje się obecnie na budowie obiektów inżynierskich. Jednym z najtrudniejszych jest wiadukt na linii kolejowej Zgierz - Kutno, gdzie tor przejdzie nad budowana trasą. Trwa tam zbrojenie elementów nośnych i zalewanie ich betonem. Obok tego wiaduktu powstają dwa inne - drogowe pod ulicami Bazylijską i Grotnicką. Na tej drugiej zapewniony został prowizoryczny przejazd dla samochodów (...).

## Autostrada A1 w Śląskiem. Takie stacje benzynowe staną przy trasie. GDDKiA wybrała dzierżawców MOP-ów

Anna Dziedzic, Dziennik Zachodni, 22.09.2021

Dwa nowe Miejsca Obsługi Podróżnych przy oddanej w 2019 roku części autostrady A1 mają już dzierżawców. GDDKiA podpisała z nimi umowy. Firmy Lotos Paliwa z Gdańska i Circle K Polska będą mogły postawić na MOP-ach Woźniki Wschód i Woźniki Zachód swoje stacje benzynowe i restaurację. Nowi dzierżawcy mają przejąć teren MOP-ów w ciągu najbliższych dni (...). Będą dzierżawić te tereny przez 20 lat, z możliwością przedłużenia o kolejne 10 lat. Oprócz zapłaty, na rzecz GDDKiA, zaoferowanego w przetargu stałego czynszu, dzierżawcy będą również odprowadzać dodatkowy czynsz uzależniony od przychodu uzyskanego z tytułu prowadzonej działalności. MOP Woźniki Wschód będzie miał kategorię II, zaś MOP Woźniki Zachód kategorię III. Dzierżawcy mają półtora roku na to, by dostosować MOP-y do zadeklarowanych kategorii (...).

## Kolejny krok do reaktywacji połączeń na zamkniętej linii kolejowej Racibórz-Głubczyce-Racławice Śląskie

Sławomir Draguła, nto.pl, 18.09.2021

Jest jednak problem. Program Kolej Plus jest skonstruowany tak, że budżet państwa zapewnia 75 procent potrzebnego finansowania, a samorządy pozostałą część. W przypadku odbudowy linii kolejowej Racibórz - Głubczyce - Racławice Śląskie chodzi o pieniądze rzędu od 45 do nawet 75 milionów złotych. To ogromna kwota, której gminy i powiaty nie udźwigną. Wykonanie studium planistycznego to jeden z koniecznych warunków do tego, by projekt związany z odbudową linii Racibórz - Głubczyce - Racławice Śląskie mógł zostać zakwalifikowany do rządowego programu Kolej Plus i uzyskał z budżetu państwa dofinansowanie do inwestycji. Koszt wstępnej dokumentacji to 1,2 miliona złotych. Milion pochodzi z rządu, a 200 tysięcy dał urząd marszałkowski. Dokument ma być gotowy do końca listopada. Kolejnym krokiem ma być podpisanie umowy przez samorządy, które wyraziły chęć włączenia się w projekt i mają partycypować w jego finansowaniu.
Chodzi o powiaty: raciborski, głubczycki i prudnicki oraz gminy: Baborów, Głubczyce, Głogówek, Pietrowice Wielkie, a także Racibórz (...).

## Podhale. Obwodnica Waksmundu oddana do użytku. Kierowcy już mogą jeździć po nowej szosie

Łukasz Bobek, Gazeta Krakowska, 22.09.2021

Dobra wiadomość dla kierowców z powiatu nowotarskiego. Otwarta w końcu została dla kierowców obwodnica Waksmundu. Teraz Zarząd Dróg Wojewódzkich w Krakowie bierze się za budowę drugiej części nowej drogi. Chodzi o nową drogę, która powstała od obrzeży Nowego Targu w kierunku wschodnim. Zaczyna się ona na rondzie na drodze krajowej nr 49 między Nowym Targiem a Gronkowem i docelowo ma biec aż za Harklową, gdzie włączy się do drogi wojewódzkiej 969, która dalej biegnie w kierunku Krościenka nad Dunajcem i Nowego Sącza. Inwestycja podzielona została na dwa etapy. Prace przy pierwszym etapie – od krajówki do drogi powiatowej Ostrowsko-Gronków - zakończyły się co prawda w grudniu 2020 roku. Jednak dopiero teraz Zarządowi Dróg Wojewódzkich udał się uzyskać odbiór nowej drogi i pozwolenie na użytkowanie (...).

## Dwie z trzech kładek dla rowerzystów w Rzeszowie już gotowe. W październiku otwarcie kolejnej

Piotr Samolewicz, nowiny24.pl, 20.09.2021

Od niedzieli przy moście Karpackim na zaporze czynna jest nowa kładka rowerowa. Wcześniej, bo w lipcu, otwarto kładkę przy moście Lwowskim, a już w październiku rowerzyści będą mogli korzystać z kolejnej - przy moście Narutowicza. Przęsła kładki przy moście Karpackim zostały wykonane z polimerów zbrojonych włóknem. Liczy ona 105 m długości i 3 m szerokości. Kosztowała ponad 4,6 mln zł, z czego większość tej kwoty pochodzi z Unii Europejskiej. Kładkę wykonała firma Intop Tarnobrzeg wraz z nowymi ścieżkami rowerowymi i nowym oświetleniem. Wykonawca przebudował też chodniki (...). Od 9 lipca czynna jest inna kładka rowerowa - przy moście Lwowskim. Liczy 85 metrów długości, ma 3 metry szerokości. Kosztowała prawie 2,9 mln złotych (...).

# Nowatorska metoda konstrukcyjno-techniczna wykorzystania prefabrykowanej, dyblowanej płyty żelbetowej do prowadzenia skutecznych napraw nawierzchni lotniskowych

## An innovative constructional and technical method of using a prefabricated, dowelled reinforced concrete slab for effective repairs of airport pavements

***Bartosz Świerzewski***

*Dr inż.*

*Profi Partner Sp. z o.o. i Wspólnicy Sp. k.*

*bartosz.swierzewski@profipartner.pl*

***Mariusz Wesołowski***

*Dr hab. inż.*

*Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych*

*mariusz.wesolowski@itwl.pl*



**Streszczenie:** Nawierzchnie lotniskowe stanowiące naziemną część pola manewrowego przeznaczonego do ruchu, postoju i obsługi statków powietrznych są niezwykle istotnym elementem infrastruktury lotniska. Głównym zadaniem nawierzchni jest przenoszenie obciążeń użytkowych od poruszających się lub stojących na nich statków powietrznych. Stan techniczny nawierzchni lotniskowych, który nie powinien budzić żadnych wątpliwości, jest elementem kluczowym dla zapewnienia bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych. Metoda naprawcza polegająca na zastosowaniu prefabrykowanej płyty lotniskowej w miejscu nadmiernej degradacji płyt istniejących wprowadza pionierski sposób połączenia płyt z płytami sąsiednimi stwarzający nową jakość konstrukcyjną zwiększającą przestrzenną sztywność całego elementu funkcjonalnego nawierzchni. Przeprowadzone wymiarowanie oraz analiza statyczno-wytrzymałościowa prefabrykowanej płyty lotniskowej metodą elementów skończonych w aspekcie globalnego stanu wytężenia konstrukcji potwierdziły, że zastosowane rozwiązanie techniczne z wykorzystaniem połączenia dyblowanego zostało właściwie zaprojektowane, ponieważ korzystnie wpływa na redystrybucję obciążeń między współpracującymi płytami prefabrykowanymi. Przeprowadzone badania laboratoryjne i poligonowe w zakresie cech materiałowych oraz eksploatacyjnych dały jednoznacznie pozytywne wyniki, które przesądzają o celowości zastosowania i upowszechnienia przedmiotowej metody naprawczej. Doświadczenia wykonawcze zebrane w toku prowadzonej pracy pozwalają na stwierdzenie całkowitej sprawności technicznej zaproponowanego rozwiązania konstrukcyjnego. Biorąc pod uwagę stosunkowo szybką i łatwą wymianę płyt bez konieczności wprowadzania dłuższych przerw w ruchu lotniczym, technologia ta może być z powodzeniem wykorzystywana zarówno w lotnictwie cywilnym, jak i wojskowym, a potencjał zastosowania tego rozwiązania technicznego może być również wykorzystany w naprawach betonowych nawierzchni drogowych.



***Słowa kluczowe:*** *Płyta prefabrykowana; Lotnisko; Nawierzchnie lotniskowe; Nośność; Uszkodzenia nawierzchni betonowych; Dyble; Bezpieczeństwo*



**Abstract:** Airport pavements, constituting the ground part of the maneuvering area intended for the movement, parking and servicing of aircraft, are an extremely important element of the airport infrastructure. The main task of the pavement is to transfer utility loads from moving or standing aircraft. The technical condition of airport pavements, which should not raise any doubts, is a key element for ensuring the safety of air operations. The repair method consisting in the use of a prefabricated airport slab in the place of excessive degradation of existing slabs introduces a pioneering method of connecting slabs with adjacent slabs, creating a new construction quality that increases the spatial stiffness of the entire functional element of the pavement. The performed dimensioning and static - strength analysis of the prefabricated airport slab using the finite element method in the aspect of the global state of effort of the structure confirmed that the technical solution with the use of a dowel joint was properly designed, because it has a positive effect on the redistribution of loads transfer between cooperating prefabricated slabs. The conducted laboratory and field tests and operational features gave clearly positive results, which determine the purposefulness of the application and popularization of this repair method. The implementation experience gathered in the course of the work carried out allows to state the complete technical efficiency of the proposed design solution. Considering the relatively quick and easy replacement of the slabs without the need to introduce longer breaks in air traffic, this technology can be successfully used in both civil and military aviation. The potential of this technical solution can also be used in the repair of concrete road surfaces.



***Keywords:*** *Prefabricated slab; Airport; Airport pavements; Carrying capacity; Damage to concrete pavements; Dowels; Security*


## Wstęp

W efekcie postępującej globalizacji transport lotniczy, zarówno w ruchu pasażerskim jak i cargo, jest obecnie najbardziej dynamicznie rozwijającą się gałęzią transportu na świecie. Korzyści, jakie płyną z tego rodzaju komunikacji polegają przede wszystkim na pokonywaniu bardzo dużych odległości w możliwie najkrótszym czasie w porównaniu do transportu drogą lądową czy też morską [5]. Konsekwentny i bardzo dynamiczny wzrost operacji lotniczych to zwiększone obciążenie lotnisk, a precyzyjnie rzecz ujmując – zwiększone oddziaływanie statków powietrznych na nawierzchnie lotniskowe, które wchodzą w skład złożonego systemu transportu lotniczego.

Nawierzchnie lotniskowe dzięki swoim charakterystycznym właściwościom mają głównie za zadanie przejęcie obciążeń użytkowych od poruszających się po nich statków powietrznych, a następnie przekazanie tych obciążeń na warstwy konstrukcyjne niżej położone oraz ich redystrybucję w tych warstwach. Właściwie zaprojektowana nawierzchnia lotniskowa powinna zapewniać odpowiednie przenoszenie obciążeń w taki sposób, aby odziaływanie podwozia statku powietrznego na nawierzchnię nie powodowało destrukcji tej nawierzchni, która mogłaby stanowić zagrożenie dla operujących statków powietrznych.

Nawierzchnia lotniskowa tak jak każda inna budowla inżynierska wyróżnia się charakterystyczną specyfiką

pracy [8]. Czynniki, które wyróżniają nawierzchnię lotniskową to przede wszystkim zależność od warunków meteorologicznych i klimatycznych, szczególny charakter obciążeń (statycznych i dynamicznych) czy też zmienny rozkład obciążeń i prędkości w czasie rozbiegu i dobiegu samolotu [10]. Specyfika i odmienność nawierzchni lotniskowych różniąca ją od innych nawierzchni np. nawierzchni drogowych polega również na stosunkowo dużym obciążeniu kontaktowym, które przyłożone jest na niewielką powierzchnię. Dodatkowo charakteryzuje ją duża powtarzalność obciążeń na niewielkim obszarze funkcjonalnym lotniska. W rezultacie mamy do czynienia z sytuacją, gdzie na lotnisku występują obszary o znacznej intensywności obciążeń oraz te, w których generowane obciążenie jest sporadyczne [16].

Nawierzchnie wykonane w technologii betonu cementowego, w tym nawierzchnie z betonowych płyt prefabrykowanych, stanowią jedną z najbardziej popularnych i stosowanych metod budowy nawierzchni lotniskowych w Polsce [19, 20]. Pomimo wielu bezspornych zalet kompozytu betonowego, doświadczenia towarzyszące eksploatacji nawierzchni lotniskowych wykazują jednak liczne zjawiska uszkodzeń tych nawierzchni [9]. W efekcie statycznych i dynamicznych obciążeń zmiennych generowanych przez ruch statków powietrznych, ale także na skutek warunków atmosferycznych, stosowania środków odladzających oraz mediów eksploatacyjnych wynikających z obsługi statków powietrznych [4], na nawierzchniach tych można zidentyfikować powstawanie uszkodzeń. Biorąc pod uwagę nawierzchnie zbudowane z płyt prefabrykowanych możemy w tym przypadku wskazać uszkodzenia zmęczeniowe pochodzące od wielokrotnych obciążeń eksploatacyjnych (statycznych i dynamicznych) oraz zmiany we własnościach fizycznych podłoża, na którym została posadowiona płyta. Uszkodzenia tego typu prowadzą do obniżenia nośności nawierzchni, powstawania pęknięć, „klawiszowania" płyt, wykruszeń, a także deformacji niwelety w zakresie spadków podłużnych i poprzecznych [12]. Najbardziej niebezpieczne awarie nawierzchni betonowych, w których skala uszkodzeń pojedynczej płyty lotniskowej uniemożliwia wykonanie napraw doraźnych (miejscowa naprawa odprysków, wykruszeń), stanowią realne zagrożenie bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych przez statki powietrzne. W konsekwencji koniecznym jest poszukiwanie nowych, skutecznych i szybkich technologii do napraw zniszczonych, pojedynczych płyt lotniskowych. Jedną z takich metod jest możliwość wykorzystania betonowej płyty prefabrykowanej, która może stanowić skuteczną, lokalną naprawę nawierzchni lotniskowej, zapewniającą równorzędne parametry eksploatacyjne porównywalne z istniejącymi płytami sąsiednimi. Ponadto, jak wskazują zebrane dotychczas doświadczenia [3, 17, 18], betonowa płyta prefabrykowana może nawet spowodować zwiększenie nośności danej nawierzchni. Zjawisko to zostało również potwierdzone na podstawie przeprowadzonych badań własnych.

Niniejszy artykuł przedstawia koncepcję konstrukcyjno – techniczną związaną ze stosowaniem nowatorskiej naprawy nawierzchni polegającej na wbudowywaniu prefabrykowanej płyty lotniskowej w miejscu nadmiernej degradacji nawierzchni płyt istniejących. Wprowadzony nowatorski sposób połączenia płyty z płytami sąsiednimi stwarza nową jakość konstrukcyjną zwiększającą przestrzenną sztywność całego elementu funkcjonalnego [16].

## Opracowanie projektu żelbetowej płyty prefabrykowanej

Przedmiotem opracowania było stworzenie projektu i założeń dla prefabrykowanej, żelbetowej płyty lotniskowej uwzględniającej element współpracy płyt w postaci połączenia dyblowanego. Samolotem obliczeniowym, który obciążał płytę prefabrykowaną był Boeing 737-800 jako najpopularniejszy na świecie wąskokadłubowy samolot pasażerski średniego zasięgu. Nawierzchnią była płyta betonowa o grubości 24 cm z betonu klasy C35/45 (wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie dla próbek sześciennych równa 45 MPa) i wymiarach 2,5 x 5,0 m.

Do obliczenia wielowarstwowego układu nawierzchni lotniskowych wykorzystano teorię płyt sprężystych spoczywających na odkształcalnym podłożu [16]. Dla potrzeb wymiarowania, uwzględniając interakcję płyty z podłożem, przyjęty został model płyty spoczywającej na podłożu sprężystym w modelu Winklera. Projekt płyt obejmował kilka następujących po sobie etapów. Na początku należało przyjąć odpowiednie parametry wyjściowe związane z wyborem obliczeniowego statku powietrznego, zwłaszcza w aspekcie wartości przekazywanego obciążenia i jego rozkładu na nawierzchni. Następnie należało przeprowadzić obliczenia związane z obciążeniami statycznymi generowanymi na nawierzchnię lotniskową. Wymiarowanie nawierzchni żelbetowych stosowanych przy nawierzchniach lotniskowych wykonane zostało metodą tradycyjną, czyli metodą stanów granicznych (MSG). Na podstawie przeprowadzonych obliczeń określono, że płyta będzie posiadać zbrojenie górne i zbrojenie dolne w postaci siatek z prętów stalowych klasy A-III (rys. **1**). Stal zbrojeniowa to pręty żebrowane o średnicy 12 mm i 16 mm.

Zgodnie z opracowaniami [6, 7, 8], analiza współpracy płyt w betonowej nawierzchni lotniskowej wykazała, że dyblowanie tj. połączenie płyt poprzez stalowe elementy zapewnia współpracę płyt sąsiednich w przenoszeniu obciąż. Skuteczność obcią-

*1. Proces produkcji płyt prefabrykowanych*

żeń płyt połączonych dyblami zależy od wielu elementów konstrukcji nawierzchni, w tym: średnicy dybli, ich rozstawu, rodzaju podbudowy, klasy betonu i innych [1, 2]. Skuteczność całego połączenia dyblowanego jest sumą wartości obciążeń przenoszonych przez pojedyncze dyble.

Klasyczne rozwiązanie połączenia dyblowanego polega na tym, że jeden z końców stalowego pręta jest sztywno zamocowany w płycie betonowej, drugi koniec może się przemieszczać w sąsiedniej płycie mając zapewnioną swobodę przemieszczeń na długości płyty [6]. Ten wolny koniec umieszcza się najczęściej w stalowej tulejce. Dybel – stalowy pręt musi być ułożony prostopadle do płaszczyzny czołowej łączonych płyt i równolegle do górnej i dolnej ich powierzchni. Utwierdzona część dybla w płycie stanowi element o teoretycznie nieskończonej długości, który w pewnej odległości od ciała płyty przechodzi w ciało elastyczne [7].

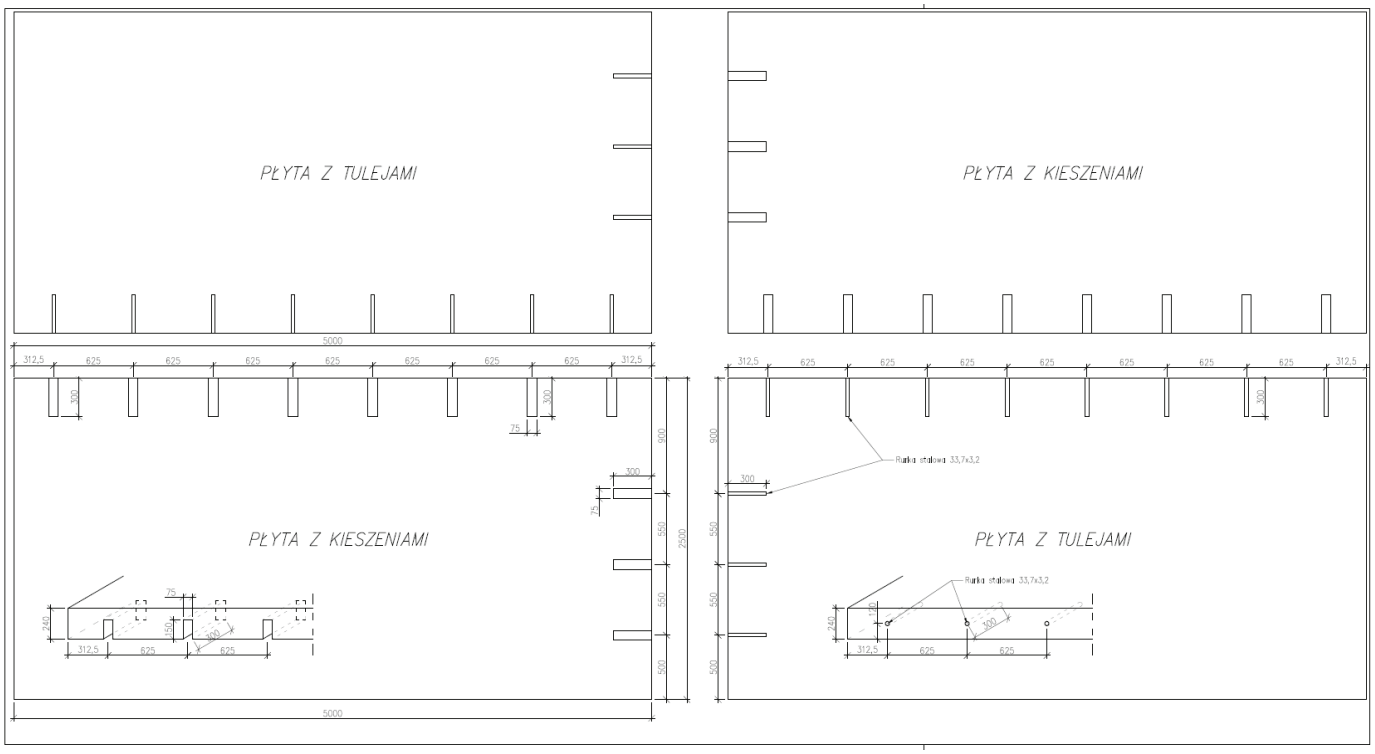
Mając na uwadze powyższe, w celu wprowadzenia możliwości współpracy płyt, a tym samym zwiększenia przestrzennej sztywności całego elementu funkcjonalnego, zaprojektowano połączenia płyt za pomocą dybli (rys. **2**) przyjmując poniższe założenia:

- zadane obciążenie to samolot obliczeniowy Boeing 737-800,
- płyty zostały ze sobą połączone wzdłuż krawędzi dyblami stalowymi o długości 60 cm i przekroju kołowym o średnicy 25 mm,
- rozstaw dybli na dłuższej krawędzi płyty (5,0 m) wynosił 62,5 cm,
- rozstaw dybli na krótszej krawędzi płyty (2,5 m) wynosił 55,0 cm.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz dowiedziono, że warunek wytrzymałości połączeń dyblowanych został spełniony, zatem połączenie dyblowane zostało zaprojektowane poprawnie.

## Technologia montażu prefabrykowanej płyty lotniskowej

Wymianę nawierzchni betonowych w technologii prefabrykacji stosuje się, gdy występuje konieczność wymiany fragmentu nawierzchni, a czas przeznaczony na wyłączenie nawierzchni z ruchu nie pozwala na odtworzenie nawierzchni w procesie standardowego betonowania [16].




*2. Projektowany układ 4 prefabrykowanych płyt betonowych*

***3**. Montaż płyty z kieszeniami*

Przed usunięciem uszkodzonych płyt, które zostały wytypowane do wymiany, należy wcześniej sprawdzić, czy sąsiadujące płyty są dobrze ustabilizowane i czy ich powierzchnie mogą być płaszczyznami odniesienia przy wbudowywaniu nowych płyt. Ponadto przed przystąpieniem do robót należy dokonać pomiaru geometrycznego płyty przeznaczonej do wymiany z uwagi na nieregularne wymiary płyt monolitycznych polegającego na sprawdzeniu jej długości, szerokości oraz grubości. W koniecznych przypadkach należy obciąć istniejącą nawierzchnię do pożądanych wymiarów tak, aby szerokość szczelin dylatacyjnych pomiędzy sąsiednimi płytami nie przekraczała 30 mm. Przy procesie wymiany płyt zwracamy szczególną uwagę, aby nie doszło do uszkodzenia betonu sąsiednich płyt, zmiany układu i kierunku istniejących dybli i kotew oraz uszkodzenia podłoża (podbudowy). Dla ułatwienia rozbiórki i dla zabezpieczenia sąsiednich płyt przed uszkodzeniem w trakcie rozbiórki, po całym obwodzie odcina się pasek o szer. 5-10 cm.

Podbudowę betonową uzupełnia się betonem klasy C16/20 w stanie tzw. „półsuchym" do wysokości istniejącej podbudowy i zagęszcza mechanicznie ciężką płytą wibracyjną. Na przygotowane i stabilne podłoże nakłada się w czterech lub sześciu punktach podparcia prefabrykatu podkładki z blachy stalowej o wymiarach 20 x 25 cm do takiej wysokości, żeby krawędzie swobodnie położonej na nich płyty żelbetowej swoją niweletą nie odbiegały od sąsiadujących z nią płyt (z dokładnością ± 2 mm). Taką precyzję wysokości posadowienia zapewniają podkładki o różnych grubościach blachy (0,5 – 4 mm). Podkładki stalowe oprócz funkcji regulującej precyzyjnie niweletę posadowienia prefabrykatu stanowią również tymczasowe podparcie płyty do czasu uzyskania przez zaprawę wymaganej wytrzymałości na ściskanie równą 10 MPa.

Po wykonaniu wstępnego montażu przestrzeń pomiędzy podkładkami wypełnia się bezskurczową zaprawą do wylewania przeznaczoną do wykonywania napraw konstrukcji betonowych i żelbetowych w budownictwie komunikacyjnym. Zaprawa wykazuje samorozlewność i wystarczy rozgarnąć ją listwą wyrównującą, ewentualnie dogładzić powierzchnię za pomocą pacy stalowej lub kielni. Świeżo zarobiona zaprawa zachowuje swoje właściwości przez ok. 30 min. Zaprawę wylewa się z lekkim naddatkiem, żeby uniknąć powstawania wolnych przestrzeni pod płytą żelbetową. Nadmiar zaprawy jest wyciskany w momencie montażu płyty. Dzięki temu dochodzi do wypełnienia ubytków i wolnych przestrzeni pod sąsiednimi płytami monolitycznymi.

Po dokładnym rozprowadzeniu zaprawy bezskurczowej przystępuje się do instalacji prefabrykowanej płyty żelbetowej za pomocą dźwigu. Płyty prefabrykowane opuszcza się po ustabilizowaniu ich poziomego położenia i szerokości przewidywanych szczelin nawierzchniowych. Równość nawierzchni sprawdza się łatą o długości 4 m, tak ustawioną, aby jej środek znajdował się nad złączem płyt. Prześwit między łatą, a powierzchnią nawierzchni sąsiadującej nie powinien przekraczać 5 mm, przy czym krawędzie płyt nie powinny wystawać przy szczelinach więcej niż 2 mm. W przypadkach skrajnych dopuszcza się sfrezowanie warstwy górnej płyty w celu dostosowania jej rzędnych do rzędnych płyt sąsiednich.

Układ płyt zastosowany w niniejszym rozwiązaniu technicznym, zgodnie z wcześniej przygotowanym projektem, składał się z 4 płyt, tj.: dwóch płyt z kieszeniami i dwóch płyt z tulejami (rys. **2**). W płytach prefabrykowanych, w których zaprojektowane zostały tuleje, umieszcza się dyble. Dyble umieszczane są w ścianie czołowej pasa technologicznego w zaprojektowanych i wykonanych wcześniej otworach, zgodnie z zaprojektowanym rozstawem, prostopadle do płaszczyzny ściany i w połowie grubości dyblowanej płyty. Głębokość zaprojektowanych otworów wynosi ½ długości dybla, natomiast średnica otworu jest o około 2 mm większa od średnicy dybla. Na tak przygotowane płyty z zainstalowanymi dyblami nakłada się za pomocą dźwigu płyty z zaprojektowanymi kieszeniami (rys. **3**) i wykonuje się ich wzajemne wyregulowanie wysokościowe.

Po ostatecznym wyregulowaniu wysokościowym płyt prefabrykowanych wykonuje się iniekcję przez specjalnie, wcześniej przygotowane otwory wyposażone w aplikatory, przez które wtłacza się substancję uszczelniającą pod płytę pod odpowiednim ciśnieniem (dla stabilizacji). Konieczne jest uprzednio uszczelnienie styku płyty z podłożem i sąsiedni-

mi elementami, aby zapobiec niekontrolowanemu wypłynięciu substancji wtłaczanej pod płytę. Iniekcja wykonywana jest bezpośrednio po wbudowaniu płyt prefabrykowanych. Materiał użyty do iniekcji w omawianym doświadczeniu to jednokomponentowy, bezskurczowy, wysokowytrzymały zaczyn cementowy. Jest to materiał o bardzo drobnym uziarnieniu, niskiej lepkości i płynnej konsystencji, przeznaczony do wykonywania iniekcji w gruncie, skałach, konstrukcjach betonowych, żelbetowych i murowanych oraz łączenia elementów betonowych, kamiennych i ceramicznych.

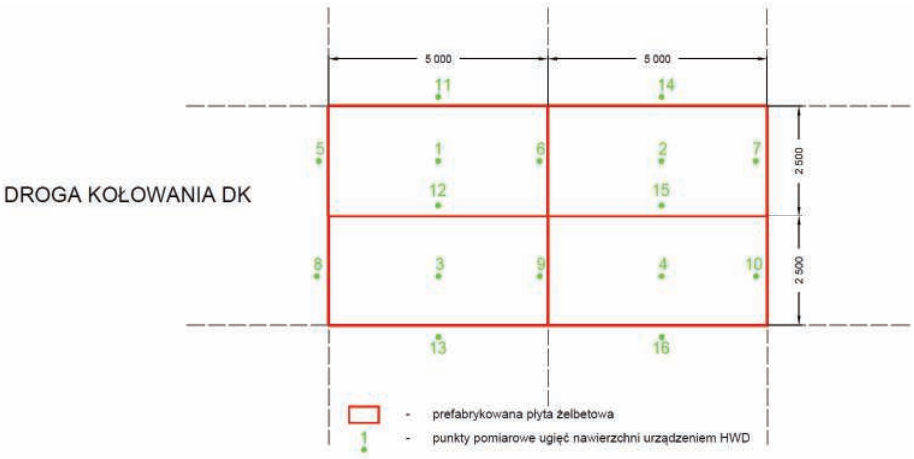
## Badania prefabrykowanej płyty lotniskowej we współpracy z płytami sąsiednimi

### Badania laboratoryjne

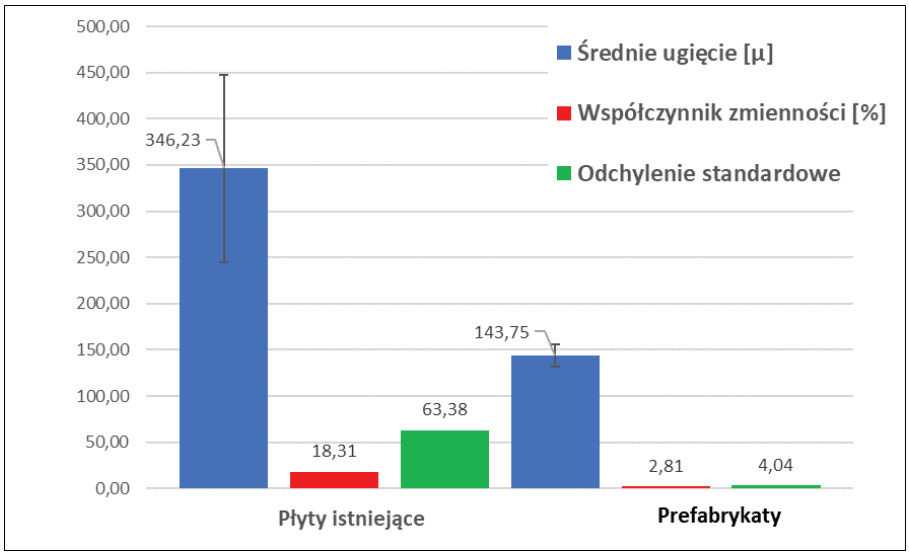
W celu weryfikacji proponowanego rozwiązania konstrukcyjnego wykonane zostały badania laboratoryjne właściwości materiałowych płyty w zakresie jej trwałości, które obejmowały zarówno badania cech mechanicznych, jak i cech fizycznych betonu. W zakresie analizy cech mechanicznych betonu wykonano badania wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie. W zakresie analizy cech fizycznych betonu wykonano badania nasiąkliwości wagowej oraz odporności na działanie mrozu. Badania zostały przeprowadzone na podstawie norm [11, 13, 14, 15].

Na podstawie przeprowadzonych badań potwierdzono, że:

- beton cementowy, z którego wykonano płytę prefabrykowaną spełnił wymagania normowe dla betonu klasy C35/45 w zakresie wytrzymałości na ściskanie, osiągając wartość średnią równą f ci 95 = (50,23 ± 2,31) MPa,
- beton cementowy, z którego wykonano płytę prefabrykowaną spełnił wymagania normowe dla betonu klasy C35/45 w zakresie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, osiągając wartość średnią równą f cf 95 = (7,35 ± 1,54) MPa,
- beton cementowy, z którego wykonano płytę prefabrykowaną spełnił wymagania normowe dla betonu klasy C35/45 w zakresie nasiąkliwości wagowej, gdyż jego nasiąkliwość wyniosła Nw 95 = (3,90 ± 0,31) % i nie przekroczyła dopuszczalnej wartości 5%,
- beton cementowy, z którego wykonano płytę prefabrykowaną spełnił wymagania dla stopnia mrozoodporności F200, ponieważ średnia wartość wytrzymałości na ściskanie próbek porównawczych wyniosła Δ m F 95 = (54,05 ± 3,70) MPa, ubytek masy próbek po badaniu był mniejszy niż 5% (0,22 ± 0,31) %, a średni spadek wytrzymałości na ściskanie nie przekroczył 20%.




*4. Plan pomiarów ugięć na ocenianej płycie żelbetowej (po wymianie) oraz na płytach sąsiadujących*




*5. Porównanie wartości ugięć dla płyt istniejących i prefabrykatów (płyty wymienione) wraz ze słupkami błędów*

### Badania poligonowe

Kolejnym etapem było przeprowadzenie badań poligonowych płyty lotniskowej w celu określenia nośności naprawianej w ten sposób nawierzchni i porównanie z nośnością otaczającej nawierzchni. Badania zostały przeprowadzone na lotniskowej drodze kołowania. Badania nośności nawierzchni zostały wykonane za pomocą ciężkiego ugięciomierza lotniskowego typu HWD. Pierwsza sesja pomiarowa dotyczyła badań płyt istniejących (tzw. układ porównawczy). Kolejne badania nośności dotyczyły płyt nowo wbudowanych z

***Tab. 1.*** *Wyniki oceny nośności nawierzchni dla wskaźnika PCN 52*

| Element Funkcjonalny Lotniska | Wskaźnik nośności PCN | Całkowita liczba operacji lotniczych |
|---|---|---|
| Płyty istniejące | 52/R/B/W/T | 145 000 |
| Nowe prefabrykaty | 52/R/B/W/T | 255 000 |

opcją współpracy z płytami sąsiednimi (rys. **4**). Przeprowadzone badania polowe wykazały, że podłoże gruntowe występujące pod konstrukcją badanej nawierzchni, w momencie jej badania, można ocenić jako grunty o kategorii nośności B (średnia nośność), przy współczynniku reakcji podłoża k=100 MN/m$^3$. Informacja ta została następnie wykorzystana do obliczenia liczby klasyfikacyjnej PCN nawierzchni.

Uzyskane wyniki badań nośności potwierdzają, że nowo zastosowany układ z płytą prefabrykowaną posiada wyższą nośność względem układu porównawczego (istniejącego). Średnia wartość ugięć zmierzonych na płytach prefabrykowanych $d_{95}$ = (143,75 ± 11,82) µm jest o 59% niższa od średniej wartości ugięć pomierzonych na płytach porównawczych $d_{95}$ = (346,23 ± 101,34) µm. Ponadto wskazano średnią wartość obliczonego modułu zastępczego konstrukcji nawierzchni z płytami prefabrykowanymi $Ez_{95}$ = (3 900,58 ± 182,64) MPa, która jest o 135% większa od modułu zastępczego wyznaczonego dla konstrukcji porównawczej $Ez_{95}$ = (1 661,32 ± 472,22) MPa (rys. **5**).

Na podstawie powyższego stwierdzono, że zastosowana technologia z wykorzystaniem prefabrykowanej płyty lotniskowej przyczyniła się do znacznej poprawy nośności badanych fragmentów nawierzchni lotniskowych. Zgodnie z metodyką ACN-PCN określoną przez ICAO, obliczona została liczba dopuszczalnych operacji lotniczych na płytach istniejących w stosunku do liczby operacji na nowo wbudowanych płytach prefabrykowanych. Przeprowadzona analiza dowodzi, iż miarodajny dla ocenianej konstrukcji nawierzchni jest wskaźnik PCN równy 52/R/B/W/T, zaś liczba dopuszczalnych operacji lotniczych wynosi 255 000 (przy obliczeniach dla samolotu referencyjnego Boeing 737-800). W konsekwencji liczba dopuszczalnych operacji lotniczych wzrosła o 76% w stosunku do układu z płytami istniejącymi (tab. **1**).

## Badania współpracy płyt

Biorąc pod uwagę aspekt zastosowania połączenia płyt za pomocą technologii dyblowania, analizie i obliczeniom poddana została współpraca płyt, zarówno z płytami istniejącymi, jak i między sobą. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że istnieje prawidłowa współpraca pomiędzy nowo wbudowanymi płytami prefabrykowanymi, a istniejącymi płytami lotniskowymi drogi kołowania, ponieważ wartość średnia współczynnika przenoszenia obciążeń wyniosła $J_{95}$ = (81,28 ± 8,03) %. Jednocześnie wartość średnia współczynnika przenoszenia obciążeń tylko dla współpracy nowych płyt prefabrykowanych z zastosowaniem opcji dyblowania wyniosła $J_{95}$ = (90,38 ± 3,77) % (tab. **2**).

Przedstawione powyżej wyniki jednoznacznie potwierdzają, że istnieje prawidłowa współpraca pomiędzy płytami prefabrykowanymi, a przenoszenie obciążeń pomiędzy płytami jest na bardzo wysokim poziomie. To w konsekwencji znacząco wpływa na zmniejszenie naprężeń i ugięć w płycie, a tym samym na zmniejszenie uszkodzeń nawierzchni, co jest zjawiskiem bardzo pożądanym.

## Badania cech eksploatacyjnych

W dalszym etapie badań sprawdzeniu poddane zostały parametry eksploatacyjne zaproponowanej w doświadczeniu badawczym prefabrykowanej płyty lotniskowej tj.: szorstkość, tekstura oraz równość. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- średnia wartość współczynnika

***Tab. 2.*** *Wyniki współpracy płyt prefabrykowanych*

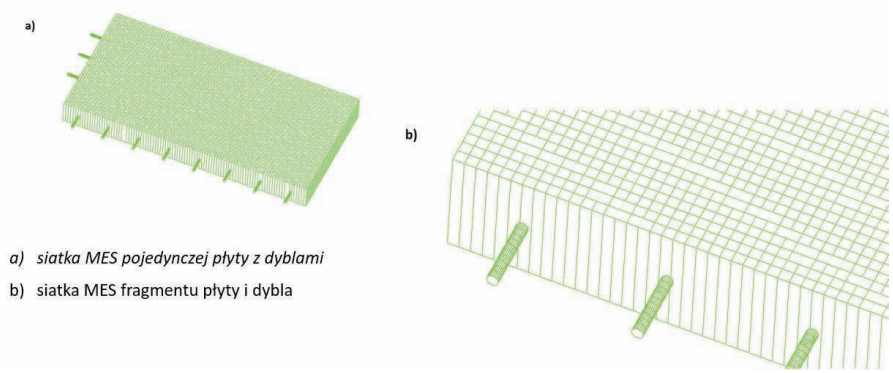
| Punkt pomiarowy | Naprężenie pod płytą [kPa] | Siła zrzutu [kN] | Ugięcie czujnika nr 2 [µm] | Ugięcie czujnika nr 3 [µm] | J [%] | J [%] tylko prefabrykaty |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 1241,00 | 197,42 | 177,40 | 143,80 | 81,10 | |
| 6 (tylko prefabrykat) | 1241,00 | 197,34 | 159,60 | 145,20 | 91,00 | 91,00 |
| 7 | 1244,00 | 197,85 | 225,00 | 155,50 | 69,10 | |
| 8 | 1243,00 | 197,61 | 143,90 | 128,90 | 89,60 | |
| 9 (tylko prefabrykat) | 1240,00 | 197,21 | 155,30 | 136,30 | 87,80 | 87,80 |
| 10 | 1245,00 | 197,98 | 259,20 | 127,90 | 49,30 | |
| 11 | 1246,00 | 198,22 | 162,40 | 142,30 | 87,60 | |
| 12 (tylko prefabrykat) | 1243,00 | 197,69 | 122,50 | 112,80 | 92,10 | 92,10 |
| 13 | 1246,00 | 198,17 | 185,40 | 144,30 | 77,80 | |
| 14 | 1244,00 | 197,90 | 162,70 | 137,10 | 84,30 | |
| 15 (tylko prefabrykat) | 1243,00 | 197,61 | 118,60 | 107,40 | 90,60 | 90,60 |
| 16 | 1245,00 | 198,06 | 186,90 | 140,30 | 75,10 | |
| Wartość średnia | 1243,42 | 197,76 | 171,58 | 135,15 | 81,28 | 90,38 |
| Odchylenie standardowe s | 1,98 | 0,33 | 39,94 | 13,87 | 12,36 | 1,83 |
| Odchylenie standardowe średniej | 1,14 | 0,19 | 23,06 | 8,01 | 7,14 | 1,06 |
| Współczynnik k dla rozkładu t-Studenta | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 3,18 |
| Przedział ufności średniej arytmetycznej | 2,51 | 0,42 | 50,75 | 17,63 | 15,71 | 3,36 |
| Niepewność wzorcowania ud(x) | 4,40 | 0,30 | 5,40 | 5,40 | 1,30 | 1,30 |
| Niepewność eksperymentatora ue(x) | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Niepewność standardowa złożona uc(x) | 2,60 | 0,20 | 11,94 | 5,08 | 3,65 | 1,18 |
| Niepewność rozszerzona U(x) | 5,73 | 0,43 | 26,29 | 11,17 | 8,03 | 3,77 |
| Współczynnik zmienności % | 0,16 | 0,17 | 23,28 | 10,27 | 15,21 | 2,02 |

tarcia na ocenianych nawierzchniach lotniskowych wyniosła $\mu_{95}$ = (0,62 ± 0,04). Nawierzchnia ocenianego elementu funkcjonalnego lotniska uzyskała średnie wartości współczynnika tarcia wyższe od wartości normatywnej dla nawierzchni lotniskowych „będących w eksploatacji", która wynosi 0,50,

- badana nawierzchnia lotniskowa zbudowana z płyt prefabrykowanych charakteryzowała się średnią głębokością tekstury na bardzo wysokim poziomie równym $ETD_{95}$ = 0,71 ± 0,11, przy wymaganym minimum normowym 0,25,
- stan równości w kierunku podłużnym oceniany zgodnie z przyjętymi kryteriami był na poziomie bardzo dobrym (średnia wadliwość wynosi $W_{95}$ = (2,80 ± 1,02) %),
- stan równości w kierunku poprzecznym oceniany zgodnie z przyjętymi kryteriami był także na poziomie bardzo dobrym (średnia wadliwość wynosi $W_{95}$ = (0,00 ± 0,04) %).

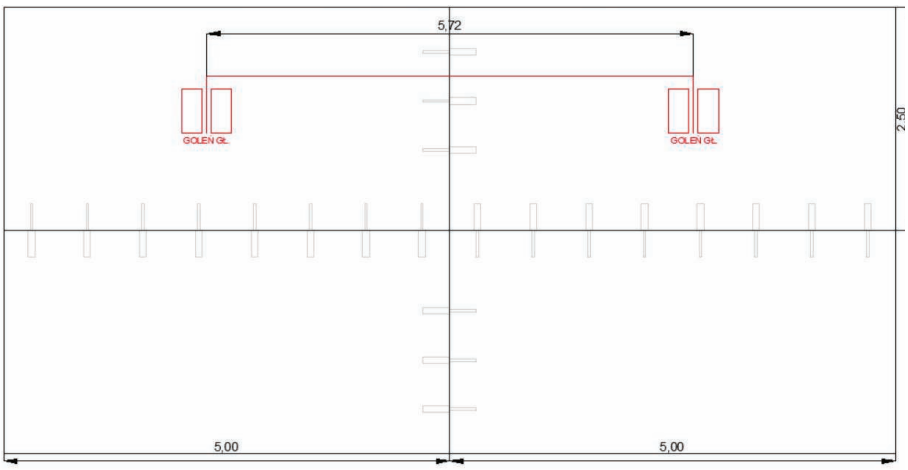
## Analiza statyczno-wytrzymałościowa prefabrykowanej płyty lotniskowej Metodą Elementów Skończonych (MES)

Kolejnym etapem prowadzonych badań była analiza statyczno-wytrzymałościowa prefabrykowanej płyty lotniskowej Metodą Elementów Skończonych. Dla potrzeb wymiarowania i analizy płyt przyjęto, że nawierzchnia będzie obciążona ruchem poruszających się po niej statków powietrznych, zaś samolotem obliczeniowym wybranym do analizy był również Boeing 737-800. Zakres badań obejmował analizę obciążonych, prefabrykowanych płyt betonowych połączonych ze sobą poprzez dyblowanie w aspekcie globalnego stanu wytężenia konstrukcji (naprężenia, odkształcenia). W analizie uwzględnione zostały stany wytężenia w dyblach łączących płyty sąsiednie. Model MES konstrukcji wykonano jako układ powłokowo-belkowy, ponieważ pojedyncza płyta składała się z elementów powłokowych, natomiast pojedynczy dybel składał się z elementów belkowych (rys. **6**). Biorąc pod uwagę fakt, że do symulacji MES zastosowano układ powłokowo-belkowy, najkorzystniejszą wartością naprężeń były zredukowane naprężenia Misesa. Hipoteza ta pozwala na określenie momentu, w którym materiał poddany złożonemu stanowi naprężeń utraci swoje własności sprężyste. Z technicznego punktu widzenia daje to 99% pewności zastosowania właśnie tej hipotezy.




a) siatka MES pojedynczej płyty z dyblami
b) siatka MES fragmentu płyty i dybla

**6**. *Model powłokowo - belkowy analizowanej konstrukcji*

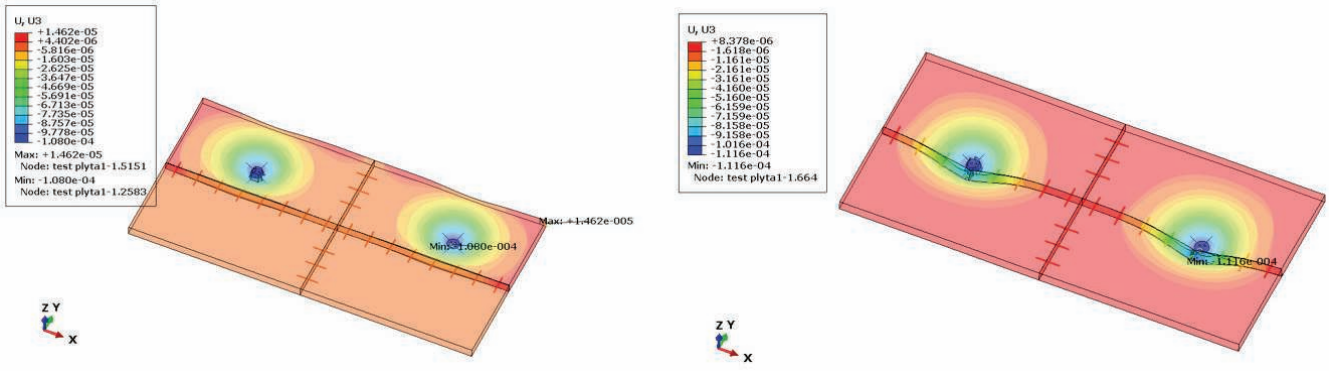



**7**. *Obciążenie płyty lotniskowej w jej środku – wariant I*

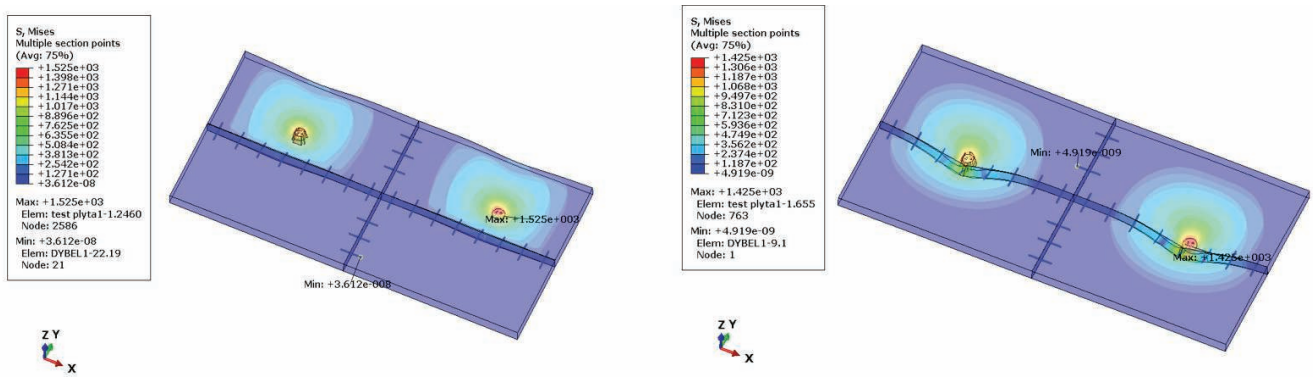
Na potrzeby niniejszej pracy badawczej, w celu odzwierciedlenia rzeczywistego ruchu statków powietrznych na drodze kołowania, analiza metodą MES została przeprowadzona w dwóch różnych wariantach obciążenia płyty lotniskowej [16]. Wariant pierwszy dotyczył analizy obciążenia płyty golenią główną samolotu w środkowej jej części (rys. **7**). W drugim wariancie obciążenie zostało zadane przy krawędzi płyty lotniskowej, w odległości 375 mm od jej krawędzi. W obu przypadkach zachowany został rozstaw obciążenia na płytach zgodny z rozstawem kół goleni głównej dla samolotu Boeing 737-800.

Na podstawie przeprowadzonych analiz MES stwierdzono, że:

- w badanych płytach nie wystąpi stan zarysowania, ponieważ maksymalne naprężenie główne jest dużo mniejsze niż wytrzymałość betonu na rozciąganie, wariant I (1 591 kPa < 5 790 kPa), wariant II (1 505 kPa < 5 790 kPa),
- wartość maksymalna odkształcenia głównego (rozciągającego) wynosi 0,00004 i występuje w centralnym punkcie przyłożenia obciążenia. Należy podkreślić, że zgodnie z wartością przyjmowaną w praktyce inżynierskiej, odkształcenie zarysowania przy rozciąganiu betonu jest na po-




***8**. Mapa warstwicowa przemieszczeń pionowych U3 w płycie lotniskowej w modelu powłokowo-belkowym*




***9**. Mapa warstwicowa z wizualizacją globalnego stanu naprężeń i odkształceń*

ziomie 0,00035. Zarysowanie w płycie betonowej nie powinno więc wystąpić, ponieważ dopuszczalne wartości odkształceń nie zostały przekroczone (0,00004 < 0,00035),

- pomimo symetrycznie przyłożonego obciążenia na płyty, stan naprężenia nie jest w pełni symetryczny - prawa płyta jest nieco bardziej wytężona. Wynika to z występowania zjawisk kontaktowych połączeń dybli,
- maksymalne przemieszczenie pionowe płyt dla wariantu I wynosi 0,01 mm i występuje w centralnym punkcie przyłożenia obciążenia; maksymalne przemieszczenie pionowe płyt dla wariantu II wynosi 0,008 mm i występuje w centralnym punkcie przyłożenia obciążenia (rys. **8**),
- maksymalne naprężenie w dyblach dla wariantu I osiąga wartość 56,08 kPa, dla wariantu II to 123,40 kPa. Maksymalne naprężenia styczne (ścinające) występują w środku długości dybli (na styku dwóch płyt), w przestrzeni szczeliny dylatacyjnej,
- wizualizacja globalnego stanu naprężeń i odkształceń pokazuje jak zdeformowane są dyble oraz krawędzie płyt sąsiadujących (rys. **9**).

Analiza statyczno-wytrzymałościowa konstrukcji oraz analizy porównawcze potwierdzają, że zastosowany w symulacji model powłokowo-belkowy pozwolił na ocenę globalnego stanu wytężenia konstrukcji z uwzględnieniem stanu zgięciowego.

## Podsumowanie

Nawierzchnie lotniskowe stanowiące naziemną część pola manewrowego przeznaczonego do ruchu, postoju i obsługi statków powietrznych są niezwykle istotnym elementem infrastruktury lotniska. Głównym zadaniem nawierzchni jest przenoszenie obciążeń użytkowych od poruszających się lub stojących na nich statków powietrznych. Stan techniczny nawierzchni, który nie powinien budzić żadnych wątpliwości, jest elementem kluczowym dla zapewnienia bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych.

Biorąc pod uwagę porty lotnicze, gdzie konieczne jest przeprowadzenie prac naprawczych na nawierzchniach lotniskowych, a jednocześnie nie ma możliwości przeniesienia ruchu na zapasową drogę startową lub inne drogi kołowania, czynnikiem najważniejszym z ekonomicznego punktu widzenia jest jak najkrótszy czas realizacji działań naprawczych i oddanie naprawianego obiektu w takim stanie technicznym, który będzie zapewniał bezpieczne wykonywanie operacji lotniczych. W konsekwencji powyższego, koniecznym jest poszukiwanie nowych, skutecznych i szybkich technologii do napraw zniszczonych płyt lotniskowych, które muszą być wykonane w określonym reżimie czasowym.

Jedną z takich metod zaproponowaną przez autorów niniejszego artykułu jest możliwość wykorzystania betonowej płyty prefabrykowanej współpracującej z płytami sąsiednimi. Co istotne, czas przeprowadzenia wszystkich działań naprawczych przy wykorzystaniu przedmiotowej metody nie przekracza 5 godzin i mogą być one wykonywane zarówno w

dzień, jak i w nocy, w różnych porach roku i warunkach atmosferycznych. Zaproponowana metoda w porównaniu do innych metod prowadzenia napraw przy użyciu prefabrykatów stosowanych zarówno w Polsce, jak i na świecie stanowi rozwiązanie pionierskie z uwagi na wprowadzenie elementu współpracy pomiędzy płytami oraz całkowity czas potrzebny na wykonanie zadania naprawczego, co w przypadku lotnisk stanowi niezwykle ważny argument.

Przedstawione w niniejszym artykule walory lotniskowej płyty prefabrykowanej oraz przeprowadzone badania laboratoryjne i poligonowe, które dały jednoznacznie pozytywne wyniki, przesądzają o celowości jej zastosowania i upowszechnienia. Doświadczenia wykonawcze zebrane w toku prowadzonej pracy oraz zastosowanie technologii napraw z użyciem prefabrykowanej płyty na lotnisku pozwalają na stwierdzenie całkowitej sprawności technicznej tego rozwiązania konstrukcyjnego. Biorąc pod uwagę stosunkowo szybką i łatwą wymianę płyt bez konieczności wprowadzania dłuższych przerw w ruchu lotniczym, technologia ta może być z powodzeniem wykorzystywana zarówno w lotnictwie cywilnym, jak i wojskowym. ◄

**Materiały źródłowe**


[1] Brown V.L., Bartholomew C.L.: FRP Dowel Bars in Reinforced Concrete Pavements, Proceedings of the International Symposium on Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-1, Vancouver, Canada; Ed. by A. Nanni and C.W. Dolan; American Concrete, Institute, Detroit, MI, ACI SP 138, p. 813-829, 1993.

[2] Graczyk M., Gajewski M., Szczerba R.: Analiza statyczna dyblowanej betonowej nawierzchni lotniskowej z uwzględnieniem zjawiska curlingu płyt. Drogi i Mosty 15 (2016), 137-155.

[3] Heinrich P.: Wymiana nawierzchniowych płyt betonowych z wykorzystaniem elementów prefabrykowanych OAT. Prezentacja podczas Konferencji Polskiego Kongresu Drogowego „Beton w drogownictwie". Suwałki, 10-12.04.2019.

[4] Linek M., Nita P., Żebrowski W., Wolka P.: Wpływ mediów eksploatacyjnych na parametry betonu cementowego przeznaczonego na nawierzchnie lotniskowe. Czasopismo Journal of KONBiN, Tom 49, Zeszyt 4, Strony 103-115, 2019 r.

[5] Linka A., Galant M., Wróblewska A.: Przegląd stanu bezpieczeństwa w lotnictwie cywilnym w Polsce. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport. 2018, tom z. 123, strony 85-93.

[6] Młodożeniec W.: Analiza pracy dyblowanych połączeń płyt nawierzchni lotniskowych. Rozprawa doktorska. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1994.

[7] Nejman T. J.: Badanie stanu naprężeń w betonowej drodze startowej obciążonej golenią samolotu na środku górnej powierzchni płyty. Towarzystwo Naukowe Ekspertów Budownictwa, Warszawa 1962.

[8] Nita P., Poświata A.: Współczesne betonowe nawierzchnie lotniskowe w Polsce. Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Dni Betonu 2002.

[9] Nita P.: Betonowe nawierzchnie lotniskowe, Teoria i wymiarowanie konstrukcyjne, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2005.

[10] Nita P.: Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.

[11] NO-17-A204:2015 Nawierzchnie lotniskowe. Nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania i metody badań.

[12] Papagiannakis A.T., Masad E.A.: Pavement Design and Materials, Wiley, 2008.

[13] PN-85/B-04500 Zaprawy budowlane. Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych.

[14] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.

[15] PN-EN 12390-5:2019-08 Badania betonu – Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań.

[16] Świerzewski B., Dysertacja: Betonowa płyta prefabrykowana przeznaczona do odtwarzania uszkodzonych, lokalnych nawierzchni lotniskowych. Politechnika Świętokrzyska, 2021.

[17] Świerzewski B., Wesołowski M.: Reconstruction of the Technical Condition of Concrete Airfield Pavements with the Use of Prefabricated Slab Technology, WMCAUS 2020, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 960 (2020) 022054.

[18] Tayabji S.: Precast Concrete Pavement Innovations, Performance and Best Practices, Conference Paper, September 2014.

[19] Wesołowski M., Barszcz P., Zieja M., Blacha K.: The evaluation method of degradation degree of runway pavement surfaces constructed from cement concrete. Safety and Reliability – Theory and Applications, Čepin, Briš (eds). Taylor & Francis Group, London 2017.

[20] Wesołowski M., Iwanowski P.: APCI Evaluation Method for Cement Concrete Airport Pavements in the Scope of Air Operation Safety and Air Transport Participants Life, Int. J. Environ. Res. Public Health, 17(5), 1663, 2020.

# Diagnostyka techniczna i kształtowanie niezawodności betonowych nawierzchni lotniskowych w toku ich modernizacji i rekonstrukcji

## Technical diagnostics and reliability development of concrete airfield pavements in modernization and reconstruction progress

***Małgorzata Linek***

*Dr inż.*

*Adiunkt w Katedrze Inżynierii Komunikacyjnej Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach*

*linekm@tu.kielce.pl*

***Piotr Nita***

*Prof. dr hab. inż.*

*Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych w Warszawie*

*piotr.nita@itwl.pl*

***Adam Poświata***

*Dr inż.*

*Główny Specjalista w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych w Warszawie*

*adam.poswiata@itwl.pl*



**Streszczenie:** Techniczna niezawodność betonowych nawierzchni lotniskowych, kształtuje się przede wszystkim na etapie opracowywanego projektu i jego rozwiązań techniczno-funkcjonalnych we wszystkich rodzajach robót branżowych. W procesie eksploatacji niezawodność techniczną nawierzchni można kształtować w wyniku ich modernizacji i rekonstrukcji. Efekt tych działań zależy przede wszystkim od jakości robót. Obecnie wykonawcy robót dysponują wysokiej jakości materiałami, specjalistycznym sprzętem ograniczającym ingerencję człowieka w procesie przygotowania i wbudowania mieszanki betonowej. Potencjalnie wysokie kwalifikacje personelu technicznego i innych członków załogi wykonujących roboty powinny być gwarancją wysokiej jakości robót. Proces eksploatacji, musi cechować wysoki poziom kultury technicznej i racjonalne procedury utrzymaniowe. W publikacji przedstawiono teoretyczny model niezawodności modernizowanego i rekonstruowanego obiektu lotniskowego, ze zwróceniem szczególnej uwagi na: poprawność i skuteczność technologicznej jego realizacji.



***Słowa kluczowe:*** *Niezawodność nawierzchni; Jakość robót nawierzchniowych; Stany eksploatacyjne; EFL (elementy funkcjonalne lotniska)*



**Abstract:** The technical reliability of concrete airport pavements evolves mainly when the project and its technical and functional solutions in all types of industry works is being developed. In the operation process, the technical reliability of the pavement can be shaped as a result of its' modernization and reconstruction. The effect depends primarily on the quality of the works. Currently, the contractors have high-quality materials and specialized equipment minimising human factor in the process of preparing and placing the concrete mix. Potentially high qualifications of technical personnel and other members of the works crew should be a guarantee of high quality works. The operation process must be characterized by a high level of technical culture and rational maintenance procedures. The publication presents the theoretical model of modernized and reconstructed airport's reliability, paying particular attention to the accuracy and efficiency of its technological implementation.



***Keywords:*** *Pavement reliability, Quality of pavement works, Operational condition; AFE (airport functional elements)*


### Wstęp

Celem modernizacji i rekonstrukcji nawierzchni lotniskowych lub wybranych jej części (EFL) elementu funkcjonalnego lotniska jest zwiększenie stanu bezpieczeństwa związanego z wykonywaniem operacji lotniczych i podniesienie standardów technicznych urządzeń lotniskowych, który ten poziom zapewnia. Cel ten można osiągnąć poprzez wysoką jakość procesów technologicznych podczas prowadzonej modernizacji oraz instalację skutecznych urządzeń technicznych, które bezpieczeństwo wykonywanych operacji lotniczych podnoszą na wyższy poziom. Właściwym działaniem w tym zakresie jest, wykorzystanie matematycznych relacji wynikających z teorii niezawodności obejmującej głównie ocenę rozkładów statystycznych i wyznaczenie odpowiednich wskaźników niezawodnościowych, które zwykle łączą się z zagadnieniami trwałości tych budowli. W zakres analizy niezawodnościowej wchodzą między innymi: gromadzenie informacji o konstrukcji i jej cechach w tym elementów trwałości. W konstrukcjach nawierzchni lotniskowych model niezawodności tego układu jest najczęściej wynikiem stanu podłoża gruntowego i zmian jego fizycznych i mechanicznych parametrów. Obserwacje licznych procesów technologicznych związanych z modernizacją nawierzchni i ich rekonstrukcji, naprężenia rzeczywiste i obliczeniowe ($\sigma rzecz \leq \sigma oblicz$), prowadzone badania kontrolne na poszczególnych etapach realizacji wykazują, że w pewnych przypadkach, jakość

wykonanych robót nie jest zadawalająca. W publikacji przedstawiono istotność technicznej niezawodności tych obiektów oraz jej wpływ na bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych.

## Niezawodność procesu technologicznego i niezawodność eksploatacyjna

Niezawodność procesu technologicznego Ti można przedstawić w postaci zależności

$$T_i \in T_n \leftrightarrow [l_r \geq l_p \cap q_r \geq q_p \cap t_r - t_z] \quad (1)$$

w którym:
$l_r$ -ogólna ilość wykonywanych robót,
$l_p$ - planowana do wykonania ilość robót,
$q_r$ - określona liczbowo jakość robót,
$q_p$ - wymagana jakość robót zgodna z obowiązującymi normami,
$t_r$ - rzeczywisty czas trwania robót,
$t_z$ - czas wyłączenia obiektu z eksploatacji.

Uwagę o ogólnej ilości robót należy rozumieć jako syntezę występujących poszczególnych rodzajów robót np. na ogólną ilość robót betonowych ma wpływ ich sumaryczna ilość wykonywana na poszczególnym elemencie funkcjonalnym nawierzchni (podbudowy, warstwy konstrukcyjnej, lub ewentualnie innych warstw). Stopień szczegółowości takiej analizy, zwraca uwagę na istotność takiej oceny i jej wpływu na niezawodność technologiczną wykonywanej modernizacji lub budowy nawierzchni na nowym obiekcie. Miarą niezawodnego procesu technologicznego należy uznać wektor kolumnowy w postaci zależności:

$$N = \begin{bmatrix} \frac{l_r}{l_p} \\ \frac{q_r}{q_p} \\ \frac{t_z}{t_r} \end{bmatrix} \quad (2)$$

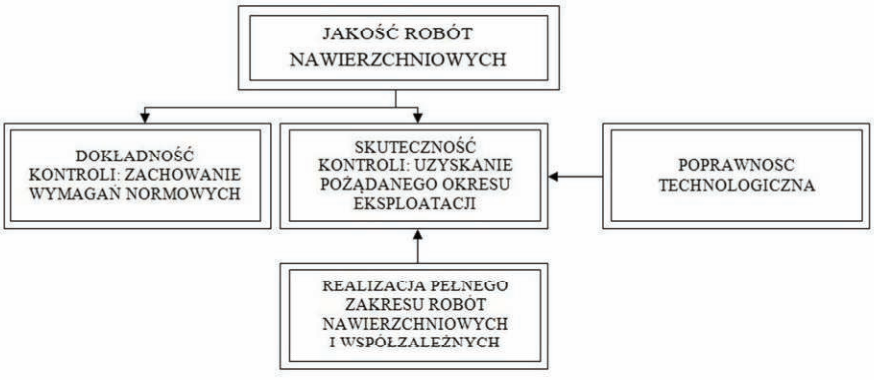
Niezawodność nawierzchni lotniskowej to właściwość rozumiana, że spełni ona poprawnie wszystkie funkcje w założonym okresie czasu, w określonych warunkach eksploatacyjnych. W odniesieniu do betonowej nawierzchni lotniskowej, którą zmodernizowano, miarą jej niezawodności jest sumaryczna liczba operacji lotniczych i obciążeń masowych Q, które wykonuje obliczeniowy samolot do czasu, w którym zostanie wykonana kolejna naprawa lub remont o kilkudziesięciu procentach rzeczywistej powierzchni *EFL*.

Inne rodzaje napraw mogą być pochodną działania sił przyrody lub działań wymuszonych. Obciążenie masowe nie powinno być mniejsze niż $Q_{min}$. Warunek ten można zapisać w postaci:

$$R(Q) = P\{Q, \phi, [], | Q \geq Qmin|\} \quad (3)$$

Funkcja ϕ oznacza, że stan nawierzchni zapewnia bezpieczny i regularny ruch statków powietrznych w istniejących warunkach eksploatacyjnych []. Wielkością, która jest w stanie spełnić ten warunek przy zastosowanych rozwiązaniach: projektowych, konstrukcyjnych i geometrycznych - jest jakość robót q. Miarą jakości robót należy uznać ich dokładność i skuteczność, która jest szczególnie istotna dla robót ulegających zakryciu. W postaci graficznej problem jakości przedstawiono na rys. **1**.

Poprawę jakości robót nawierzchniowych na lotniskach osiągnąć można poprzez doskonalenie odbiorów poszczególnych robót a w szczególności robót ulegających zakryciu. Istotnym zagadnieniem, które można zaobserwować w praktyce jest spotykana często pewna rozbieżność między rozwiązaniami przedstawionymi w projekcie a realiami wykonawstwa.



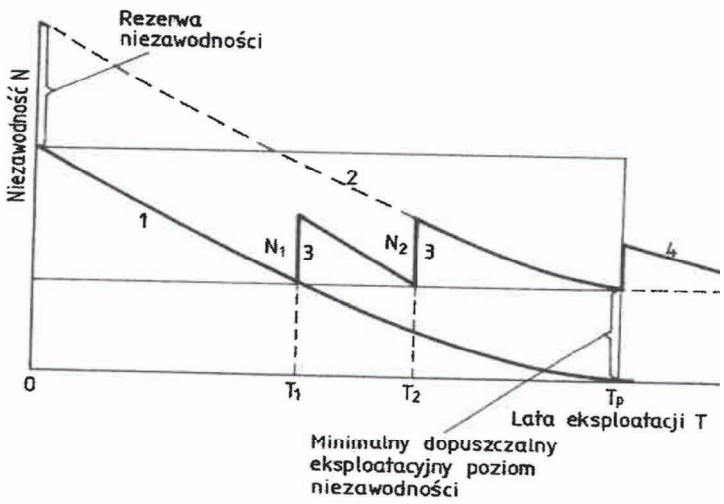

***1**. Składowe elementy procesu związanego z uzyskaniem odpowiedniej jakości robót*

## Stany eksploatacyjne i niezawodnościowe betonowych nawierzchni lotniskowych

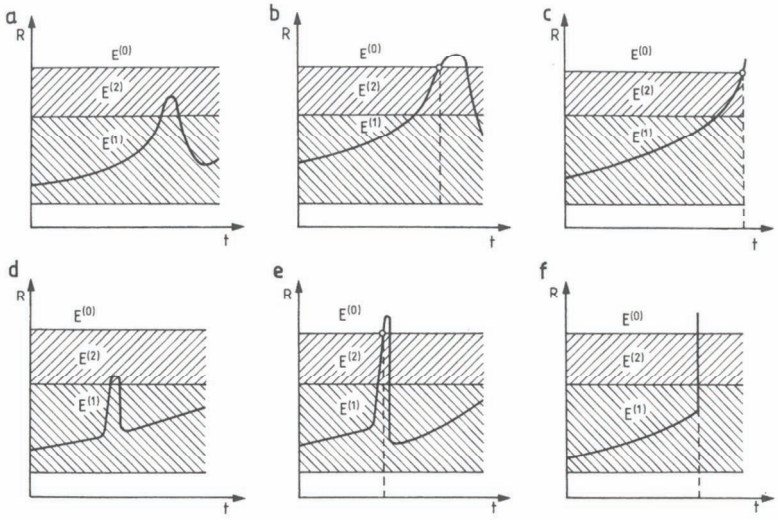
Analizując stany niezawodnościowe i eksploatacyjne nawierzchni lotniskowych należy mieć na uwadze zagadnienia o charakterze teoretycznym (metodologicznym i poznawczym) oraz doświadczalnym i użytkowym. Podczas użytkowania nawierzchni może się ona znajdować w następujących stanach eksploatacyjnych:

a) Stan pełnej gotowości eksploatacyjnej ($E^1$),
b) Stan ograniczonej zdolności eksploatacyjnej ($E^2$),
c) Stan niezdatności eksploatacyjnej ($E^0$).

W tej sytuacji konieczna jest umiejętność trafnego rozpoznawania stanów eksploatacyjnych nawierzchni zgodnie z odpowiednimi kryteriami oceny. Zasadniczym kryterium stanu technicznego nawierzchni są za-




***2**. Wykres przedstawiający okres eksploatacji nawierzchni z założonym czasie*




***3**. Możliwe stany niezawodnościowe nawierzchni w okresie jej użytkowania*

wsze naprężenia gdzie $\sigma_{rzecz} \leq \sigma_{oblicz}$. Dla tej podstawowej zależności wyróżnia się następujące relacje:

$$\begin{aligned} &\sigma_{rzecz}/\sigma_{oblicz} = 1 \rightarrow E_i \in E^{(1)} \\ &0 \leq \sigma_{rzecz}/\sigma_{oblicz} \leq 1 \rightarrow E_i \in E^{(2)} \\ &\sigma_{rzecz}/\sigma_{oblicz} = 0 \rightarrow E_i \in E^{(0)} \end{aligned} \qquad (4)$$

Naprężenia $\sigma_{rzecz}$ i $\sigma_{oblicz}$ są rzeczywistymi średnimi naprężeniami w środkowym przekroju płyty betonowej (rzeczywistymi i obliczeniowymi). Konsekwencją poprawnych relacji naprężeń w nawierzchni jest zawsze oczekiwana jej nośność. Okres eksploatacji nawierzchni z założonym czasie przedstawiono na rys. **2**.

Nawierzchnia lotniskowa, niezależnie od tego czy występuje w klasycznym układzie warstw, czy też w układzie złożonym z warstw i o różnych parametrach mechanicznych jest układem probabilistycznym. Opis stanu, w którym znajduje się nawierzchnia można przedstawić jako prawdopodobieństwo przejścia z jednego stanu w drugi. Stany te można opisać w postaci zbiorów złożonych z danych statystycznych, które tworzone są podczas okresowych (wiosennych i jesiennych) przeglądów technicznych i są archiwizowane.

Na rys. **3** przedstawiono wpływ różnorodnych czynników, które mają znaczenie na zaistnienie odpowiednich stanów technicznych nawierzchni. Stany fizyczne (techniczne) konstrukcji wyznaczają zbiór stanów niezawodnościowych. W zależności od wymagań związanych z niezawodnością istnieje relacja, która oznacza prawdopodobieństwo wejścia poszczególnych mierzalnych parametrów zbioru $\Delta$ do zbioru $\Omega$, który opisuje nawierzchnie jako zdeterminowany układ konstrukcyjny przedstawiony zależnością:

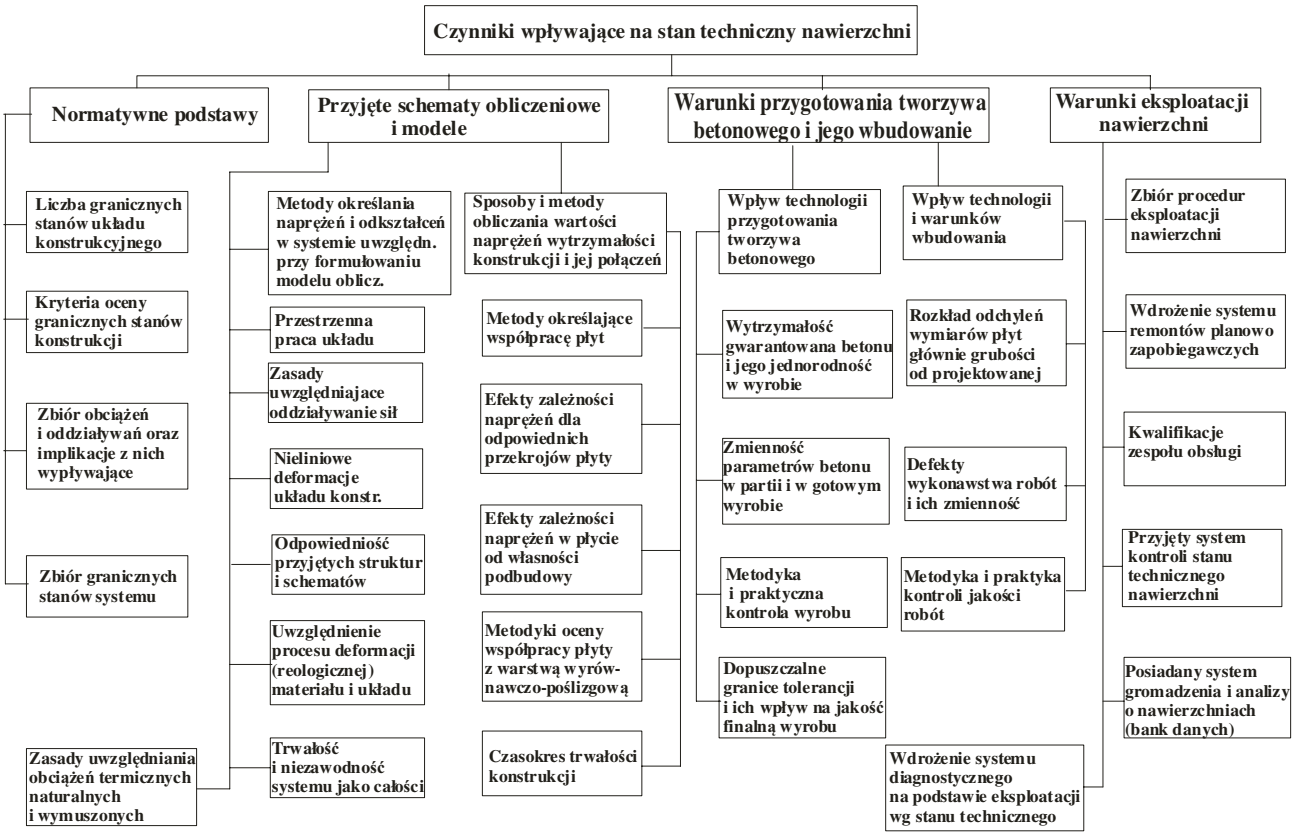
$$R = R\{\Delta \in \Omega\} \qquad (5)$$

Określenie stanów niezawodnościowych nawierzchni wymaga znajomości genezy, czasu trwania i pracy nawierzchni w czasie związanym z jej eksploatacją. Proces przejścia z jednego stanu eksploatacyjnego w drugi w normalnych warunkach (wyłączając stany wymuszone – losowe) jest procesem ciągłym. Ilustrację tego stanu (procesu) przedstawiono na rys. **3**, w którym zwrócono uwagę na stany pośrednie przejścia nawierzchni ze stanu pełnej zdolności eksploatacyjnej $E^{(1)}$ do stanu niezdolności eksploatacyjnej $E^{(0)}$.

Oznaczenia przyjete na rysunku:

a) odwracalny proces starzenia się nawierzchni bez osiągnięcia stanu $E^{(0)}$,
b) odwracalny proces starzenia się nawierzchni z osiągnięciem stanu $E^{(0)}$,
c) proces starzenia się nawierzchni o nieodwracalnym charakterze,
d) skokowy proces odwracalny bez osiągnięcia stanu $E^{(0)}$,
e) skokowy proces odwracalny z osiągnięciem stanu $E^{(0)}$,
f) proces skokowy nieodwracalny.

Ważnym zagadnieniem diagnostyki technicznej nawierzchni jest możliwość prognozowania jej zachowania się w danych warunkach i określenia czasu bezpiecznej pracy. Techniczną niezawodność nawierzchni można rozumieć dwojako tj. w ujęciu opisowym i ujęciu wartościowym. W znaczeniu opisowym niezawodność nawierzchni jest jej zdolnością do spełniania przez tę nawierzchnię, określonych wymagań technicznych i operacyjnych.




***4**. Schemat struktury różnorodnych czynników, które wpływają na proces projektowania, budowy i utrzymania nawierzchni lotniskowych*

W znaczeniu wartościowym niezawodność tej konstrukcji to prawdopodobieństwo właściwego spełniania przez tę nawierzchnię wymagań technicznych w czasie *t* nie mniejszym jednak od czasu założonego (oczekiwanego) $t_0$. Relację tą można przedstawić w postaci zależności.

$$R(t_0) = P(t \geq t_0) \quad (6)$$

Relację tą można przedstawić również jako prawdopodobieństwo wykonania pewnej ilości pracy, którą można utożsamiać z ilością przewiezionego ładunku $[]_0$

$$R([]0) = P([] \geq []_0) \quad (7)$$

***5**. W miejscu przeznaczonym na ułożenie mieszanki betonowej zalega warstwa wody*

Niezawodność nawierzchni wiąże się ściśle z pojęciem trwałości, którą należy rozumieć jako zdolność do zachowania zasadniczych własności nawierzchni w określonym czasie. Ewentualne obniżenie się poziomu technicznych wymagań dla nawierzchni może mieć charakter zużycia lub uszkodzenia. Nawierzchnia lotniskowa w znaczeniu niezawodności jest układem probabilistycznym a więc układem, którego zachowania nie da się dokładnie przewidzieć, można natomiast zbadać i określić odpowiedni poziom ufności poszczególnych zdarzeń. Nawierzchnia lotniskowa jest w istocie konstrukcyjnym układem mieszanym. Obecnie dąży się do tego, by zbudować wiarygodny model niezawodnościowy o dużej użyteczności. Przesłaniem tej idei jest możliwość zastapienia któregoś z ewentualnie uszkodzonych różnorodnych elementów składowych układu, przez przejęcie jego zadań przez jeden

***6**. Technologiczne pęknięcie płyty nawierzchni betonowej powstałe kilkanaście godzin po ułożeniu mieszanki betonowej*

lub więcej elementów współpracujących. Charakterystyczną cechą pracy nawierzchni jest ciągłość procesu jej użytkowania. Odnowienie nawierzchni należy rozumieć jako wymianę pojedynczego elementu lub takiej ich liczby w wyniku czego nawierzchnia odzyskuje oczekiwane własności eksploatacyjne. Najdalej idącym odnowieniem nawierzchni jest jej remont kapitalny. W diagnostyce nawierzchni lotniskowych trafność doboru odpowiedniej metody jej oceny, a nastepnie wykonanie prac remontowych w odpowiedniej ilości i jakości przyczynia się do podniesienia bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych. Stan techniczno-eksploatacyjny nawierzchni lotniskowych jest wypadkową bardzo wielu czynników: począwszy od przyjętych założeń i aktów normatywnych, poprzez dobór odpowiednich metod obliczeniowych i sposobu realizacji inwestycji, do zasad i poziomu kultury technicznej ich eksploatacji. Zbiór tych wielu czynników mających wpływ na cały proces „powstania i technicznego życia nawierzchni" przedstawiono na rys. **4**.

## Przykłady niewłaściwego wykonania wybranych elementów robót nawierzchniowych

Na rys. **4** przedstawiono liczne i różnorodne warunki gwarantujące wysoką niezawodność i trwałość nawierzchni lotniskowych. Jednak w nielicznych przypadkach realizacje robót nawierzchniowych obciążone są odstępstwami i nie spełniają wszystkich zasad prakseologicznej zasady wynikającej z „Traktatu o Dobrej Robocie"[2] dotyczy to przede wszystkim procesu realizacji robót i w nielicznych przypadkach rozwiązań projektowych. Na rys. **5** i **6** przedstawiono takie przykłady.

## Podsumowanie i wnioski

Poprawny przebieg robót remontowych i modernizacyjnych betonowych nawierzchni lotniskowych ma zasadniczy wpływ na ich trwałość i niezawodność w konsekwencji jest warunkiem bezpiecznego wykonywania operacji lotniczych.

1. Obecnie przy ogólnie dobrej jakości materiałów wchodzących w skład przygotowywanej mieszanki betonowej, istnieje szansa na uzyskanie oczekiwanej „poprawności technologicznej robót".
2. Czynnikiem ograniczającym dotychczas uzyskanie wysokiej i oczekiwanej jakości robót, jest sprzęt do układania mieszanki betonowej w miejscu przeznaczenia tj. maszyny układające mieszankę betonową. Wykorzystywany dotychczas sprzęt w naszych krajowych warunkach jest technicznie przestarzały i oczekiwanej jakości robót nie gwarantuje.
3. Spotykana jednak, niższa niż spodziewana poprawność technologiczna robót niweczy trud organizacyjny włożony w realizację zadania inwestycyjnego i ogranicza spodziewane efekty trwałościowe i niezawodnościowe.
4. Pewnym czynnikiem utrudniającym uzyskanie wysokiej jakości robót jest nadmierna kooperacja robót, nie chodzi tu jednak o roboty specjalistyczne.
5. Dyskusyjną sprawą, z zakresu nadzoru nad jakością robót jest sprawa zlecenia tych czynności strukturom organizacyjnym nie będących związanych organizacyjnie z inwestorem. ◄

## Materiały źródłowe

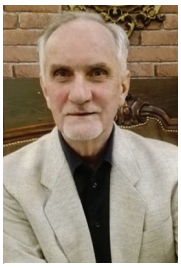

[1] Bałuch H.: Diagnostyka nawierzchni kolejowej. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 1978.

[2] Kotarbiński T.: Traktat o dobrej robocie. Wydawnictwa Polskiej Akademii Nauk. Warszawa 1955.

[3] Nita P.: Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2005.

# Przykłady zastosowania GPR do badań na lotniskach

## Examples of the use of GPR for research at airports



***Adam Szynkiewicz***

*KART-GEO Wrocław*

*adam.szynkiewicz@gmail.com*

**Streszczenie:** Badania GPR wykonano dla potrzeb rozbudowy portu lotniczego „Fryderyk Chopin" na Okęciu w Warszawie. Na lotnisku istniały: stare i nowe nawierzchnie. Profilowania GPR prowadzone były po wybranych liniach. Dla potrzeb badań, w nawierzchniach lotniska, zostały wykonane wiercenia rdzeniowane i wiercenia rdzeniowane w gruntach. Geologiczną interpretację danych GPR wykonano na podstawie danych z wierceń. Opracowano 6 modeli GPR dla badanych nawierzchni lotniska. Wyniki badań każdej linii przekrojowej GPR były porównywane z rezultatami badań HWD. Stwierdzono, że zastosowanie nieniszczącej metody GPR do monitoringu nawierzchni lotnisk powoduje: redukcję ilości wierceń w nawierzchniach, minimalizacje przerwy w ruchu samolotów, szybki i efektywny monitoring stan nawierzchni lotnisk.

***Słowa kluczowe:*** *GPR; Nawierzchnie lotnisk*

**Abstract:** The GPR tests were carried out for the needs of the expansion of the "Fryderyk Chopin" airport in Okęcie in Warsaw. There were old and new surfaces at the airport. USAR profiling was conducted on selected lines. For the purposes of the research, core drillings and ground core drillings were performed in the airport pavements. The geological interpretation of the GPR data was made on the basis of drilling data. Six GPR models were developed for the tested airport pavements. The results of each USAR cross-sectional line were compared with the results of the HWD study. It was found that the use of the non-destructive GPR method for monitoring airport pavements causes: reduction of the number of drilling in pavements, minimization of interruption in aircraft traffic, quick and effective monitoring of the condition of airport pavements.

***Keywords:*** *GPR; Airport pavement*

Metoda georadarowa (GPR) wykorzystywana jest do monitoringu nawierzchni na lotniskach: pasów startowych, dróg kołowania (taxiways), miejsca zawracania (turning pads), miejsc postojowych samolotów( APRONS - aircraft parking pads). Metodyczne, badania GPR wykonano dla potrzeb rozbudowy portu lotniczego „Fryderyk Chopin" na Okęciu w Warszawie. Badania GPR metodą profilowań liniowych wykonywano do głębokości 2,5 m aparaturą georadarową RAMAC/GPR z antenami ekranowanymi 250 MHz.

Postawiono zadania:

I. - pokazanie konstrukcji wybranych fragmentów nawierzchni lotniska,

II. - pokazanie stanu płyt oraz ich zniszczenia,

III. - pokazanie czy pod nawierzchniami istnieją jakieś dawne, nieznane konstrukcje.

Badaniom GPR postawiono wymagania:

1) nie przerywać pracy na lotnisku i w porcie lotniczym,
2) Prace GPR powinny być wykonywane tylko w nocy (21:30 -5:30), gdy na lotnisku ruch jest minimalny,

***1****. Aparatura georadarowa RAMAC/GPR z antenami ekranowanymi 250 MHz*

***2**. Przykłady rdzeni z wierceń w nawierzchniach: 9 – rdzeń z nowej nawierzchni, 10, 24 rdzenie ze starej nawierzchni*

***3**. Przykłady rdzeni z wierceń w nawierzchni Taxiway DK-A4*

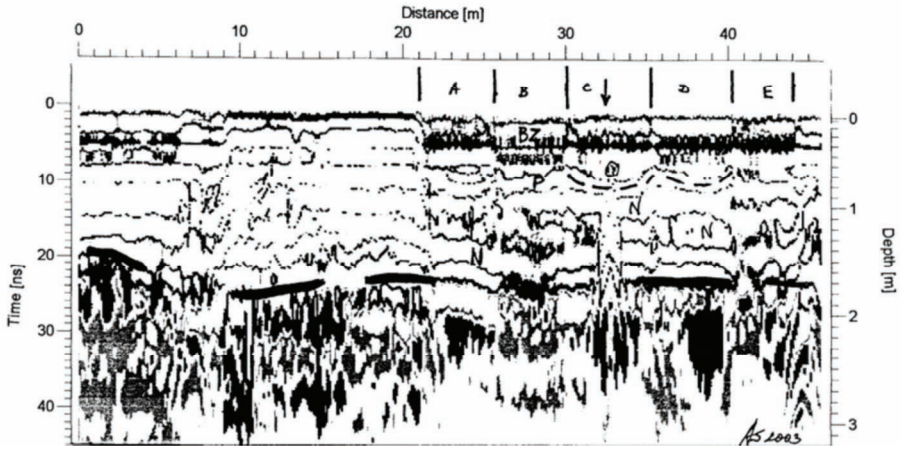
***4**. Położenie wybranych linii przekrojowych GPR (zielona kreska) oraz wybranych wierceń w nawierzchni*

3) stały kontakt radiowy z wieżą kontroli lotów.

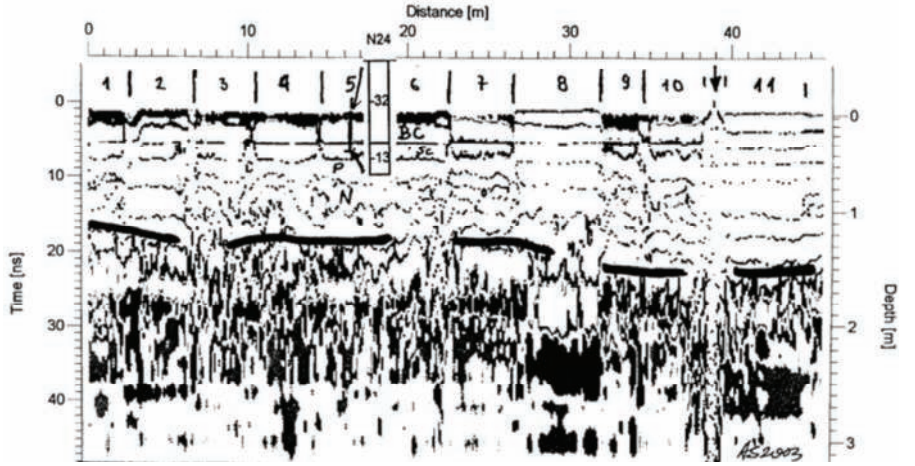
Obszar badań ograniczono do terenów przed dawnym Terminalem 1 oraz w miejscu planowanego nowego (obecnego) terminala.

Dla potrzeb badań, zostały wykonane 24 wiercenia (rdzeniowane) w nawierzchniach lotniska oraz 4 wiercenia (rdzeniowane) w gruntach (do głębokości 4-6 m).

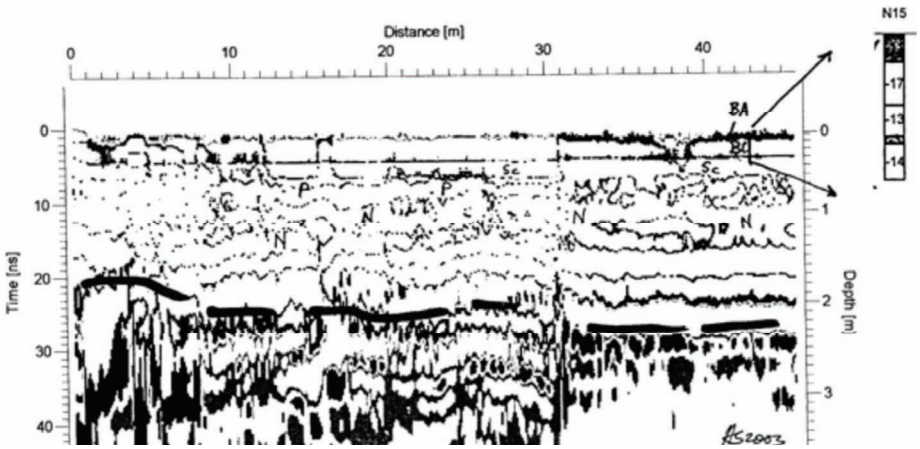
Przez okres ponad 50 lat działalności lotniska, nawierzchnie były przebudowywane. Na lotnisku istniały: stare i nowe nawierzchnie. Wiercenia wykazały, że stare nawierzchnie to przeważnie jedna warstwa betonu na tzw. bazie, którą tworzyła warstwa żwiru spojonego cementem. Nowe nawierzchnie posiadały dwie warstwy betonu leżące na cienkiej warstwie asfaltu, pod którym była warstwa bazy (żwir spojony cementem). Nawierzchnie dróg kołowania były różnie zbudowane. Najczęściej powierzchniowa warstwę tworzyła warstwa asfaltu, pod nim była jedna lub dwie warstwy betonu, leżącego na bazie (warstwa żwiru spojonego cementem).




***5**. Model 1 – płyta zbudowane z betonu zbrojonego (płyty: A, B, C, D, E)*




***6**. Model 2 – płyta zbudowane z: warstwy asfaltu (czarna nawierzchnia), warstwy betonu (BC), warstwy bazy (Sc)*




***7**. Model 3 – płyta zbudowane z: warstwy asfaltu (BA), dwie warstw betonu (BC,17+13), a poniżej: warstwa asfaltu (BC, 5 cm) oraz warstwa bazy (Sc, żwir spojony cementem); N15 – rdzeń z wiercenia w nawierzchni*

Profilowania GPR prowadzone były po wybranych liniach. Podczas dwóch tygodni pracy dwóch operatorów wykonało łącznie 30 km linii przekrojowych. Geologiczną interpretację danych GPR wykonano na podstawie danych z wierceń. Opracowano modele GPR nawierzchni lotniska:

Na mapie pokazującej płyty nawierzchni lotniska zaznaczono wyniki badań dla każdej płyty na linii przekroju GPR (Fig. **11**, **12**).

Płyty ponumerowano, na mapie (u góry) zaznaczono ich kondycję:

dobra – biała płyta (np. 3), spękana i wciśnięta (np. 6), zła kondycja (np. 8, 12)

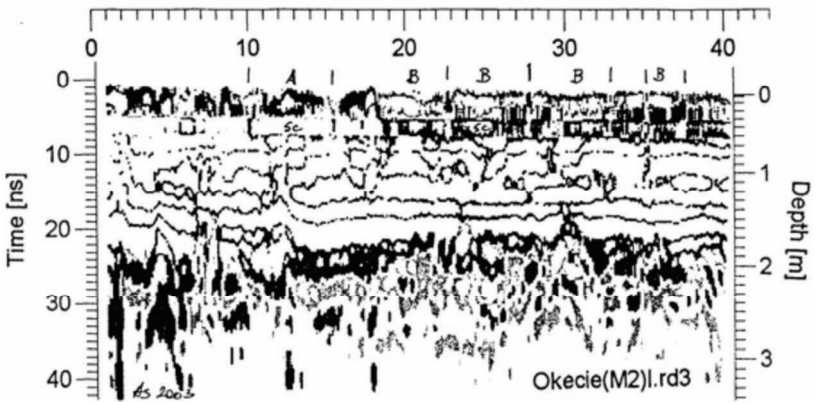
Wyniki badań każdej linii przekrojowej GPR były porównywane z rezultatami badań HWD, wykonywanymi prze Oddział Budowy Lotnisk Wojskowego Instytutu Technik Lotniczych w Warszawie (przykład na Fig. **13**).

Z porównania wynika zbieżność wyników badań. Na odcinku 0,000 – 0,170 km, HWD wykazuje, że płyty są bardzo złej kondycji (spękane), Porównywalny odcinek przekroju GPR (135 – 300 m) wskazuje także, że płyty są w bardzo złej kondycji, jednak obraz każdej płyty jest dokładniejszy.

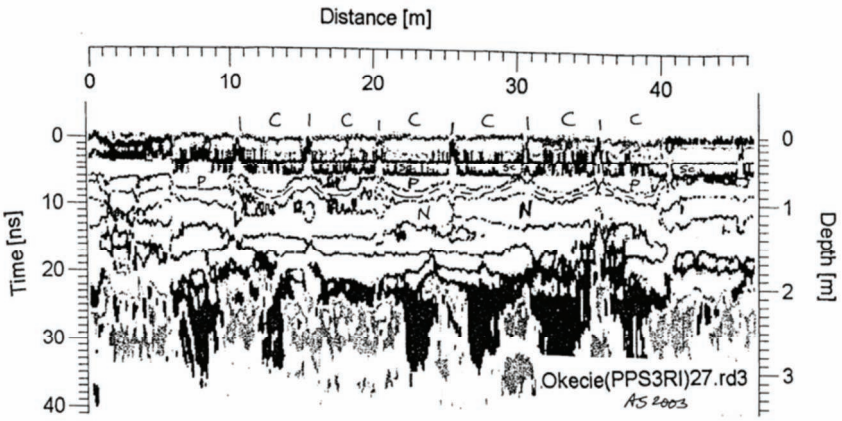
## Wnioski

Zastosowanie nieniszczącej metody GPR do monitoringu nawierzchni lotnisk powoduje:

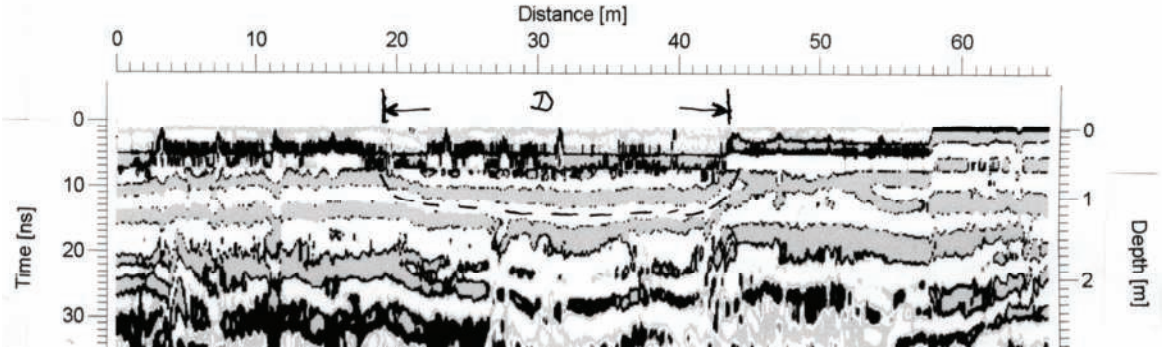
1. Redukcję ilości wierceń w nawierzchniach (czasochłonnych i bardzo kosztownych).
2. Minimalizuje przerwy w ruchu samolotów (lotnisko pracuje bez przerw).
3. Szybki i efektywny monitoring stan nawierzchni lotnisk. ◀



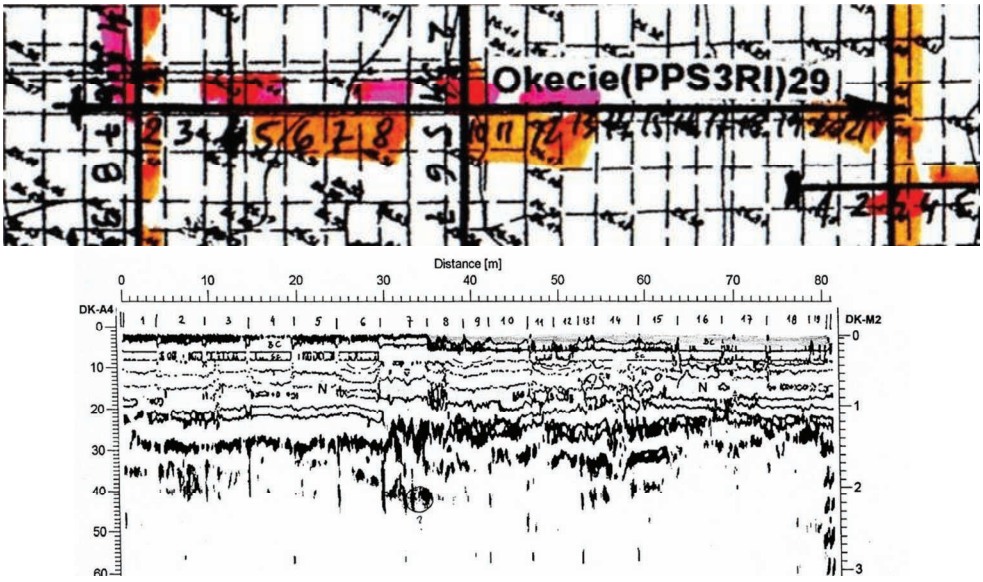

***8**. Model 4 – baza pod płytą (Sc): w dobrej kondycji (A), w złej kondycji, popękana (B)*



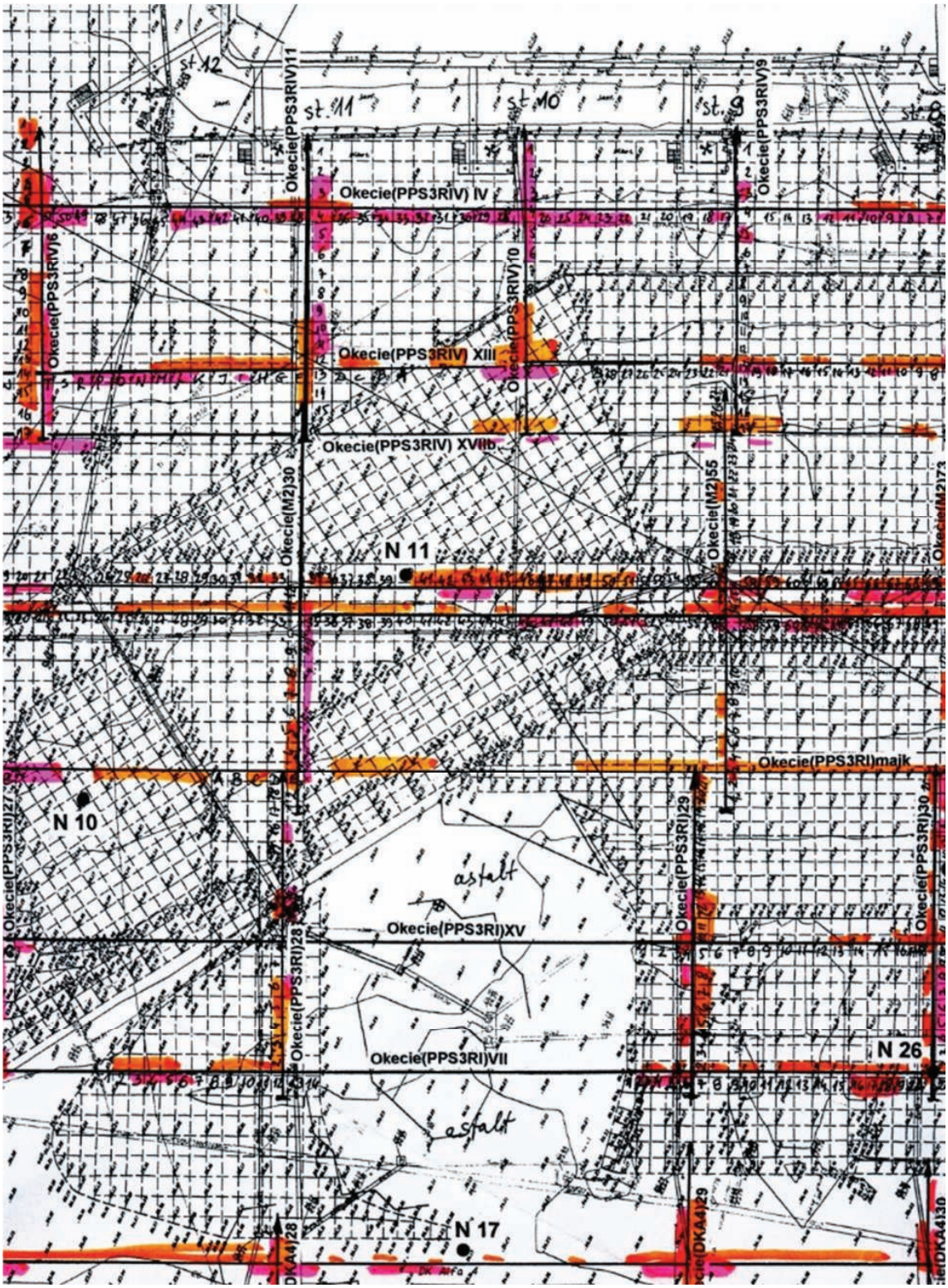

***9**. Model 5 – płyty (C) wciśnięte w subbazę (P) i w podłoże naturalne (N)*



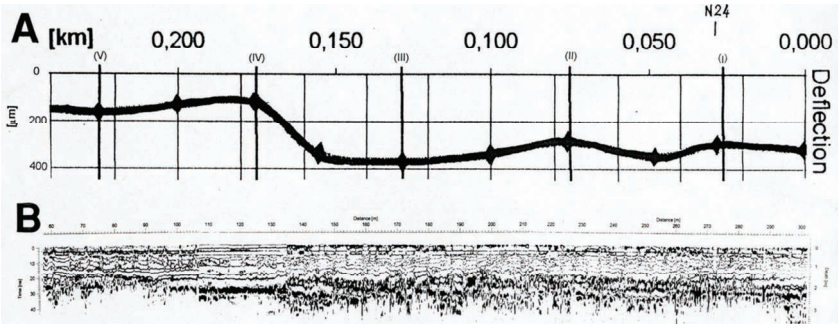

***10**. Model 6 – grupa płyt (D) wciśnięta w podłoże naturalne*




***11**. Przekrój GPR (PPS3RI)29, od DK-A4do DK-M2*




***12**. Fragment mapy z wynikami badań GPR: pokruszona baza pod płytami – kolor fioletowy, płyty wciśnięte w subbazę – kolor brązowy*




***13**. Porównanie wyników badań HWD (A) oraz wyników badań GPR (B) na tym samym odcinku przekrojowym (I-V – punkty kontrolne)*

# Krata lotniskowa jako szybka i skuteczna metoda poprawy nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych

## Airport grating as a quick and effective method of improving the load-bearing capacity of natural airport pavements

*Agata Kowalewska*

*Mgr inż.*

*Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych*

*agata.kowalewska@itwl.pl*

*Paweł Pietruszewski*

*Mgr inż.*

*Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych*

*pawel.pietruszewski@itwl.pl*

*Krzysztof Blacha*

*Mgr inż.*

*Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych*

*krzysztof.blacha@itwl.pl*



**Streszczenie:** Naturalne nawierzchnie lotniskowe, które stanowią elementy funkcjonalne lotnisk jak m.in.: pobocza drogi startowej, czołowe pasy bezpieczeństwa, awaryjna droga startowa lub roboczy pas startowy, odgrywają istotną rolę w kwestii bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych. Zarówno Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (International Civil Aviation Organization – ICAO) jak i Agencja Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego (European Uninion Aviation Safety Agency – EASA) określają wymagania nośności jakie powinny spełnić naturalne nawierzchnie lotniskowe. W dokumentach tych określony jest wymagany kalifornijski wskaźnik nośności CBR (ang. California Bearing Ratio) na poziomie 15÷20% na głębokości 15 cm poniżej poziomu terenu. Dotychczasowe badania poligonowe w cywilnych oraz wojskowych portach lotniczych wykazały, że nośność naturalnych nawierzchni lotniskowych niekiedy nie spełnia określonych wymagań. W związku z tym, że porty lotnicze nie mogą pozwolić sobie na długotrwałe wyłączenie lotniska zasadne jest poszukiwanie innowacyjnych metod poprawy nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych, które będą skuteczne i szybkie w realizacji. Taką metodą może być zastosowanie kraty lotniskowej wciskanej bezpośrednio w naturalną nawierzchnię lotniskową.



***Słowa kluczowe:*** *Nośność; CBR; Naturalna nawierzchnia lotniskowa; Bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych*



**Abstract:** Natural airport surfaces, which are functional elements of airports, such as: runway sides, front safety lanes, emergency runway or working runway, play an important role in the safety of air operations. Both the International Civil Aviation Organization (ICAO) and the European Union Aviation Safety Agency (EASA) define the load-bearing capacity requirements that natural airport pavements should meet. These documents specify the required California Bearing Ratio (CBR) of 15-20% at a depth of 15 cm below ground level. The previous field tests in civil and military airports have shown that the load-bearing capacity of natural airport pavements sometimes does not meet certain requirements. Due to the fact that airports cannot afford a long-term shutdown of the airport, it is justified to search for innovative methods of improving the load-bearing capacity of natural airport pavements, which will be effective and quick to implement. Such a method may be the use of an airport grating pressed directly into the natural airport pavement.



***Keywords:*** *Load bearing capacity; CBR; Natural airport pavement; Safety of air operations*


### Wstęp

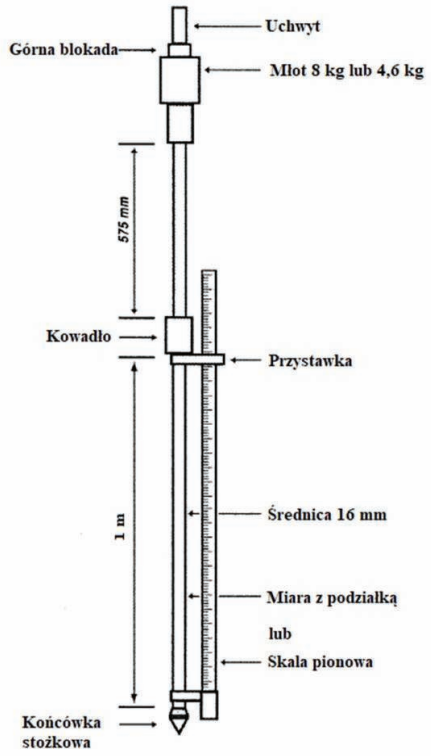
Naturalne nawierzchnie lotniskowe pełniące rolę pasa startowego na m.in. lotniskach aeroklubowych, poboczy dróg startowych, czołowych pasów bezpieczeństwa, awaryjnych dróg startowych, roboczych pasów startowych, muszą spełniać określone wymagania dotyczące ich nośności. Służby zajmujące się infrastrukturą na obiektach lotniskowych poszukują metod poprawy nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych skutecznych i szybkich, ponieważ bardzo ważne jest, aby jak najszybciej przywrócić zdolność operacyjną lotniska.

Jedną z takich metod jest zastosowanie kraty lotniskowej wykonanej z tworzywa sztucznego.

### Naturalne nawierzchnie lotniskowe

Rozróżnia się nawierzchnie naturalne gruntowe (warstwa jezdna nawierzchni wykonana jest z gruntu) oraz darniowe (nawierzchnia gruntowa, dodatkowo pokryta warstwą darni grubości 10-18 cm). Zgodnie z opisem w [17] darń jest to zwarta pokrywa roślinna, najczęściej trawiasta, o bardzo silnie rozrośniętym systemie korzeniowym. Wg normy obronnej NO-17-A503:2017 [15] nawierzchnie naturalne są to nawierzchnie lotniskowe utworzone poprzez odpowiednie przygotowanie gruntu, w celu zapewnienia możliwości bezpiecznego ruchu po nich wojskowych statków powietrznych.

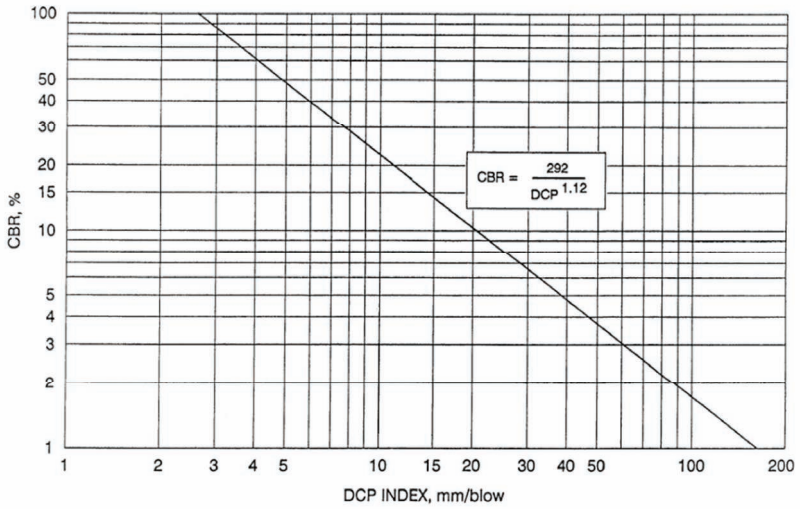
Nośność naturalnych nawierzchni lotniskowych jest podstawowym parametrem wpływającym na bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych. Określana jest na podstawie kalifornijskiego wskaźnika nośności CBR, który oblicza się na podstawie pomiarów wykona-




*1. Schemat sondy SDS [16]*

nych sondą dynamiczną stożkową SDS – rys. **1** (ang. DCP Dynamic Cone Penetrometer), zgodnie ze wzorem: CBR=292/DCP$^{1,12}$ , w którym CBR – kalifornijski wskaźnik nośności [%], DCP – zagłębienie stożka sondy przypadające na jedno uderzenie [mm] [16]. Wzór ten zgodnie z [5] jest najlepszą korelacją pomiędzy indeksem DCP a wskaźnikiem CBR – rys. **2**.

Niedostateczna nośność naturalnych nawierzchni lotniskowych może zagrażać bezpieczeństwu wykonywania operacji lotniczych. Na rys. **3** przedstawiono zdjęcie statku powietrznego, który krótko po przyziemieniu wpadł w poślizg i wypadł z drogi startowej. Skutkiem tego było załamanie się obu stron podwozia




*2. Korelacja między wskaźnikiem CBR a indeksem DCP [5]*

głównego, co spowodowało uszkodzenie skrzydła i wyciek paliwa [12].

Według wymagań opisanych w Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego ICAO [13] oraz Agencji Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego EASA [14] wskaźnik CBR powinien kształtować się na poziomie 15÷20% na głębokości 15 cm poniżej poziomu terenu. W normie obronnej [15] określono wymagania wskaźnika nośności CBR dla warstwy do głębokości 15 cm – 15% oraz dla warstwy od głębokości 15 cm do 85 cm – 8%.

Liczne badania poligonowe nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych, które wykonano na obiektach lotniskowych cywilnych oraz wojskowych na terenie RP wykazały, że większość nawierzchni naturalnych nie spełnia wymagań. Na rys. **4** przedstawiono profil nośności naturalnej nawierzchni lotniskowej, która nie spełnia w pełni określonych wymagań. Dotyczy to w szczególności warstwy do głębokości 15 cm.

*3. Wypadnięcie statku powietrznego poza drogę startową [12]*

Natomiast na rys. **5** zobrazowano profil nośności nawierzchni naturalnej spełniającej określone wymagania.

## Metody poprawy nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych

W celu poprawy oraz utrzymania odpowiedniej nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych należy poddawać je zabiegom naprawczym oraz konserwacyjnym.

Zabiegi konserwacyjne polegają na przeprowadzaniu planowych i bieżących zabiegów agrotechnicznych i mechanicznych, które wpływają na podnoszenie na wyższy poziom urodzajności gleby i wartości eksploatacyjnej roślinności darniotwórczej [6].

Zabiegi naprawczo-agrotechniczne polegają na: systematycznym koszeniu nawierzchni naturalnych, wałowaniu nawierzchni, uzupełnianiu obszarów o zmniejszonym zadarnieniu mieszanką traw oraz nawożeniu darni oraz wykonywaniu oprysków chemicznych [6]. Na rys. **6** przedstawiono zabieg uzupełniania obszarów o zmniejszonym zadarnieniu mieszanką traw, natomiast na rys. **7** wykonanie oprysków chemicznych [8].

Typowymi zabiegami wzmacniającymi, mającymi na celu poprawę nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych są: stabilizacja mechaniczna i chemiczna, wzmacnianie włóknami polimerowymi ostatecznie wymiana gruntu.

Stabilizacja mechaniczna polega na wykonaniu czynności prowadzących do uzyskania odpowiedniego zagęszczenia gruntu, które zapewni trwały wzrost wy-

trzymałości mechanicznej gruntu [9].

Stabilizacja chemiczna polega na wymieszaniu gruntu rodzimego z odpowiednio dobranymi środkami chemicznymi, np. cement, wapno, popioły lotne. Wybór środka chemicznego zależy od stanu w jakim znajduje się grunt i jakie właściwości gruntu należy poprawić. Na rys. **8** przedstawiono proces mieszania gruntu rodzimego ze środkiem chemicznym.

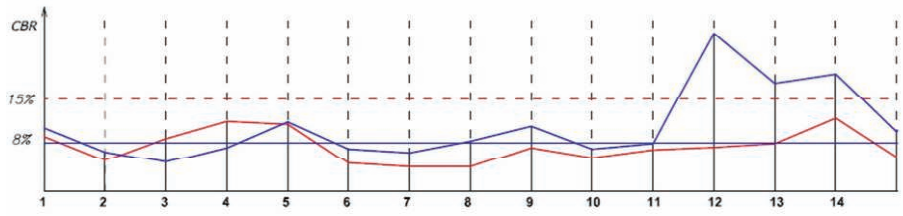
Wzmacnianie naturalnej nawierzchni włóknami polimerowymi polega na wymieszaniu mieszaniny piasku, gruntu rodzimego i włókien polimerowych [1]. Włókna polimerowe zazębiają się zapewniając wysoką wytrzymałość na rozciąganie i ścinanie, natomiast odpowiednio dobrany grunt (piasek) zapewnia odpowiednie zagęszczenie nawierzchni oraz jej stabilność w mokrych warunkach.

Wymiana gruntu jest bardzo kosztownym rozwiązaniem, stosowana jest gdy w podłożu występują grunty słabonośne, np. grunty organiczne – torfy, namuły, gytie lub grunty drobnoziarniste w stanie miękko plastycznym i płynnym.

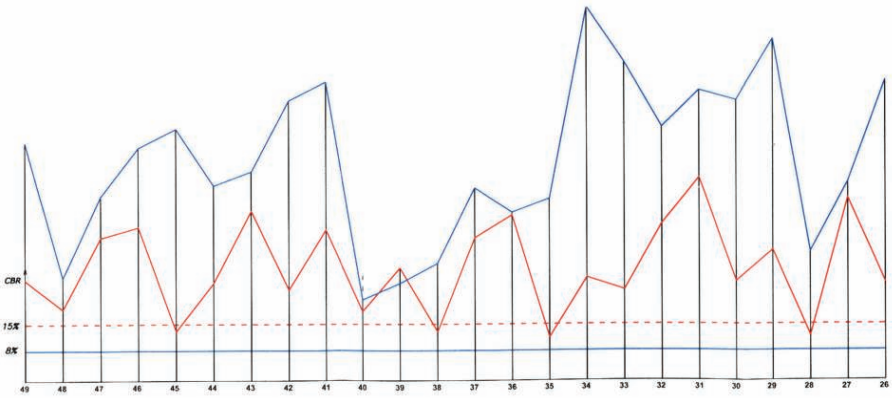
## Zastosowanie kraty lotniskowej w celu wzmocnienia naturalnych nawierzchni lotniskowych

Krata lotniskowa jest to produkt tożsamy z kratką drogową stosowaną np. na parkingach, z tą różnicą, że została zaprojektowana w taki sposób, aby jej parametry wytrzymałościowe były dostosowane do obciążeń jakie musi przenieść od statku powietrznego.

Zastosowanie kraty lotniskowej poprawia nośność nawierzchni naturalnych dzięki: zwiększeniu odporności materiałów wypełniających kratę na ścinanie w wyniku ich zamknięcia i zagęszczenia wewnątrz komórek, zmniejszeniu osiadania spowodowanego naturalnym zagęszczeniem oraz ograniczeniu bocznych przesunięć materiału wypełniającego komórki, zmniejszeniu naprężeń przekazywanych na podłoże gruntowe od obciążenia oddziaływującego na nawierzchnię w wyniku rozkładania skoncentrowanych obciążeń na sąsiadujące komórki kraty [2] – rys. **9**.




***4**. Profil nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych niespełniających w pełni wymagań*




***5**. Profil nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych spełniających wymagania*

Zarówno w Polsce jak i na świecie kraty lotniskowe wykonane z recyklingowanych materiałów z tworzywa sztucznego są stosowane do wzmacniania naturalnych nawierzchni lotniskowych. Przykładem może być lądowisko samolotowe użytku wewnętrznego Narew 2 należące do firmy Pronar Sp. z o.o. Posiada ono drogę startową z nawierzchnią trawiastą utwardzoną za pomocą krat wykonanych z tworzywa sztucznego o długości 1500 m. Spośród pasów startowych budowanych w tej technologii pas w Narwi jest najdłuższy na świecie [10]. Na rys. **10** przedstawiono proces układania kraty na trawiastej nawierzchni startowej natomiast na rys. **11** efekt końcowy.

## Właściwości kraty lotniskowej

Krata lotniskowa będąca obiektem badań (rys. **12**) została wykonana metodą wtryskową z polietylenu o wysokiej gęstości – HDPE. Typowe właściwości tego tworzywa opisano w tab. **1**, natomiast w tab. **2** przedstawiono dane techniczne kraty lotniskowej.

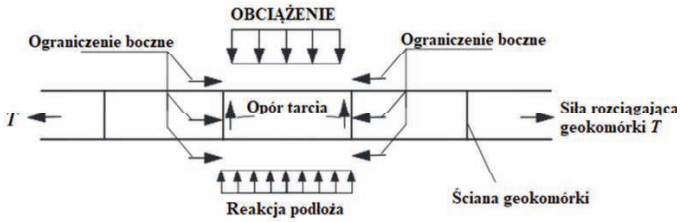
## Badania poligonowe wzmocnienia naturalnej nawierzchni lotniskowej przy użyciu kraty lotniskowej

Badania wpływu zastosowania kraty lotniskowej na poprawę nośności nawierzchni naturalnej wykonano na

***6**. Uzupełnianie obszarów o zmniejszonym zadarnieniu mieszanką traw [8]*

***7**. Wykonanie oprysków chemicznych [8]*

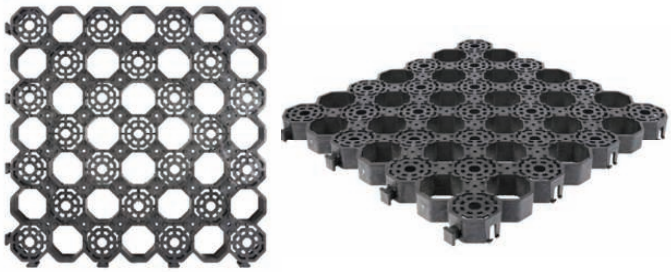
***8**. Proces mieszania gruntu rodzimego ze środkiem chemicznym*




***9**. Ograniczenie boczne wzmocnienia geosiatką komórkową [4]*

***10**. Układanie kraty na trawiastej nawierzchni drogi startowej [11]*

***11**. Utwardzona za pomocą kraty trawiasta nawierzchnia drogi startowej [7]*



***12**. Widok badanej kraty lotniskowej*

***13**. Widok kraty lotniskowej zaraz po wciśnięciu oraz po miesiącu*

dwóch poletkach badawczych. Krata lotniskowa została bezpośrednio wciśnięta w istniejącą nawierzchnię naturalną – rys. **13**.

Badania nośności konstrukcji nawierzchni naturalnej i kraty lotniskowej wykonano ugięciomierzem lotniskowym HWD – rys. **14**.

W celu analizy skuteczności zastosowania kraty lotniskowej jako wzmocnienia nawierzchni naturalnych, wyniki uzyskane z badania wskaźnika CBR przeliczono na moduł sprężystości E. W Polsce najczęściej stosowaną w tym celu zależnością jest wzór Powella [3]: $E=17,6 \cdot CBR^{0,64}$.

Na wykresie – rys. **15** przedstawiono porównanie wartości modułu sprężystości uzyskanego przed i po zastosowaniu kraty lotniskowej na nawierzchniach naturalnych. Uzyskane wyniki potwierdzają skuteczność zastosowania takiej metody do wzmocnienia nawierzchni naturalnych, gdyż nośność nawierzchni wzrosła o około 20-25%.

***Tab. 1.** Typowe właściwości tworzywa, z którego wykonano kratę lotniskową*

| Typowe właściwości | Wartość nominalna | Jednostka | Metoda badań |
|---|---|---|---|
| Wskaźnik szybkości płynięcia (MFR)<br>190˚C/2,16 kg<br>190˚C/5,0 kg | <br>4,0<br>11,0 | <br>g/10 min<br>g/10 min | <br>ISO 1133-1<br>ISO 1133-1 |
| Gęstość | 0,955 | g/cm$^3$ | ISO 1183-1 |
| Moduł sztywności przy rozciąganiu | 1200 | MPa | ISO 527-1, -2 |
| Naprężenie na granicy plastyczności | 27 | MPa | ISO 527-1, -2 |
| Wydłużenie na granicy plastyczności | 8 | % | ISO 527-1, -2 |
| FNCT (3,5 MPa, 2% Arkopal N100, 80˚C) | 4,5 | godz. | ISO 16770 |
| Udarność z karbem wg Charpy'ego<br>23˚C, Typ 1, karb A<br>-30˚C, Typ 1, karb A | <br>4,0<br>4,5 | <br>kJ/m$^2$<br>kJ/m$^2$ | <br>ISO 179<br>ISO 179 |
| Twardość Shore (Shore D) | 60 | - | ISO 868 |
| Twardość kulkowa (H 132/30) | 52 | MPa | ISO 2039-1 |
| Temperatura mięknienia Vicata (B/50 N) | 73 | ˚C | ISO 306 |

## Podsumowanie

Zastosowanie kraty lotniskowej w celu poprawy nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych jest zasadna z wielu powodów.

Główną zaletą zastosowanie krat lotniskowych wykonanych z tworzywa sztucznego jest możliwość szybkiego przywrócenia zdolności operacyjnej lotniska.

Krata jest wykonana z tworzywa sztucz-

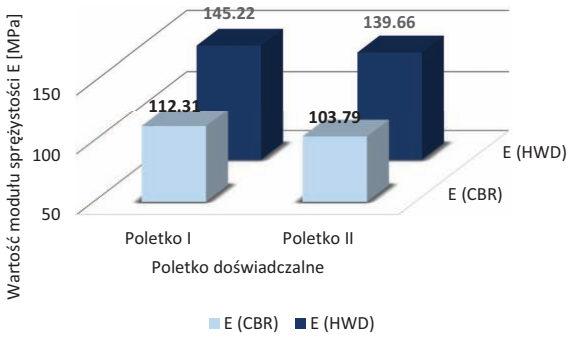
nego pochodzącego z recyklingu co jest korzystniejszym rozwiązaniem pod względem finansowym w porównaniu do wykonania np. nawierzchni sztywnej z betonu cementowego. Co za tym idzie, pomimo, że jest to tworzywo sztuczne to ma mniejszy negatywny wpływ na środowisko w przeciwieństwie do produkcji betonu cementowego.

Badania doświadczalne wykazały, że nośność naturalnych nawierzchni lotniskowych wzmocnionych za pomocą wciskanej kraty lotniskowej z tworzywa sztucznego uległa poprawie średnio o około 20%.

***Tab. 2.*** *Dane techniczne kraty lotniskowej*

| Cechy | Wartości deklarowane |
|---|---|
| Wymiary: ± 3% | 490 x 490 mm |
| Wysokość ścianek: | 40 mm |
| Grubość ścianek: | ścianki mają budowę stożkową<br>od góry 5 mm<br>od dołu 3,5 mm |
| Ilość krat na $m^2$: | ~ 4,2 szt. |
| Wielkość oczek: | 24 oczka puste – 63 mm x 63 mm<br>25 oczek zabudowanych – 63 mm x 63 mm<br>36 pełnych kwadratów – 23 mm x 23 mm |
| Waga: ± 4% | 1,65 kg/sztuka<br>6,93 kg/$m^2$ |
| Powierzchnia biologicznie czynna: | 53% powierzchnia wolna<br>47% tworzywo |

***14****. Pomiar nośności ugięciomierzem lotniskowym HWD*




***15****. Porównanie wartości modułu sprężystości nawierzchni naturalnej przed i po zastosowaniu kraty lotniskowej*

W związku z rozwojem tej metody jako wzmacnianie nawierzchni naturalnych będą prowadzone dalsze prace nad nowymi kształtami, właściwościami oraz sposobami instalacji krat lotniskowych na nawierzchniach naturalnych. ◀

## Materiały źródłowe


- Artykuły

[1] Wesołowski M., Pietruszewski P. i Kowalewska A. Cellural geosynthetics in the aspect of appliaction in airfield construction. Journal of KONBIN, 2019, Vol. 49, Issue 4, 341-362, nr DOI: DOI 10.2478/jok-2019-0090.

[2] Wesołowski M., Kowalewska A. The impact of a geogrid system on load-bearing capacity of natural airfield pavements. Archives of Civil Engineering, 2020, Vol. LXVI, 52, nr DOI: 10.24425/ace.2020.131795.

[3] Wesołowski M., Kowalska D., Kowalewska A. Geocell reinforcement in natural airfield pavement structure in the aspect of the safety of conducted flight operations. Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference, 2019, nr DOI: 10.3850/981-973-0000-00-0.

[4] Zhang L., Zhao M., Shi C., Zhao H. Bearing Capacity of geocell reinforcement in embankment engineering. Geotextiles and Geomembranes 2010, 28, 475-482, nr DOI: 10.1016/j.geotexmem.2009.12.011.

- Książki

[5] Webster S. L. i inni. Instruction Report GL-92-3 Description and application of dual mass dynamic cone penetrometer. US Army Corps of Engineers, 1992.

[6] Vademecum Służby Lotniskowej, Poznań: Lotniczych, Ministerstwo Obrony Narodowej Dowództwo Wojsk, 1974.

- Dokument elektroniczny l

[7] dlapilota.pl, www.lotniska.dlapilota.pl, 15.09.2021.

[8] JSA Culture Group, www.jsagriculture.com, 14.09.2021.

[9] Nascon, www.nascon.pl, 14.09.2021.

[10] PRONAR, www.pronar.pl, 15.09.2021.

[11] Przegląd Lotniczy, www.plar.pl, 15.09.2021.

[12] Transportion Safety Board of Canada, https://tsb.gc.ca/eng/index.html, 13.09.2021.

[13] Załącznik 14 do Konwencji o Międzynarodowym Lotnictwie Cywilnym, Lotniska, tom I, Projektowanie i Eksploatacja Lotnisk, https://www.ulc.gov.pl, 13.09.2021.

[14] Załącznik do Decyzji Dyrektora Wykonawczego EASA nr 2017/021/R z dnia 08 grudnia 2017 r. wdrażającej wydanie czwarte Specyfikacji Certyfikacyjnych (CS) oraz Materiałów Zawierających Wytyczne (GM) do Projektowania Lotnisk CS-ADR-DSN, https://www.ulc.gov.pl, 13.09.2021.

- Opracowania techniczne

[15] Norma obronna NO-17-A503:2017 Nawierzchnie lotniskowe. Naturalne nawierzchnie lotniskowe. Badania nośności.

[16] Norma ASTM D6951/D6951M-09 Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer In Shallow Pavement Applications.

[17] Wytyczne lotniskowe. Ocena techniczna lotniskowych nawierzchni darniowych na podłożu piaszczystym i piaszczysto-gliniastym. ITWL. Warszawa (1967).

# Ocena korozyjności atmosfery na podstawie ubytków korozyjnych próbek wzorcowych na terenie wybranych wojskowych baz lotniczych

## Atmospheric corrosivity assessment on the basis of standard samples' corrosion rates within the military air bases

***Aleksandra Pajurek***

*Mgr inż.*

*Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych*

***Paweł Iwanowski***

*Mgr inż.*

*Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych*

*pawel.iwanowski@itwl.pl*

***Danuta Kowalska***

*Mgr inż.*

*Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych*

*danuta.kowalska@itwl.pl*



**Streszczenie:** Korozja atmosferyczna to jeden z parametrów charakteryzujących stan techniczny elementów funkcjonalnych nawierzchni lotniskowych - pozwala określać stopień zdegradowania nawierzchni, szacować odpowiednią częstotliwość wykonywania przeglądów okresowych i podejmować odpowiednie środki, aby utrzymać nawierzchnie lotniskowe w stałym stanie gotowości technicznej. W celu określenia odporności korozyjnej nawierzchni lotniskowych wykonanych w technologii betonu cementowego i betonu asfaltowego, prowadzone są badania korozyjności atmosfery, oznaczanej na podstawie ekspozycji próbek standardowych materiałów i określeniu wielkości ubytków korozyjnych, ich postaci oraz wyglądu, a także zmian właściwości fizycznych w regularnych odstępach czasu. Próbki wystawiono na oddziaływanie warunków atmosferycznych na terenie wojskowych obiektów lotniskowych. W artykule przedstawiono wyniki ubytków korozyjnych *rcorr* próbek standardowych ze stali niskowęglowej, cynku, miedzi i aluminium pozyskanych z wybranych lotnisk Sił Zbrojnych RP, począwszy od 2015 roku. Następnie określono kategorie korozyjności atmosfery na podstawie przeprowadzonych pomiarów.



***Słowa kluczowe:*** *Korozja atmosferyczna; Ubytki korozyjne; Próbki standardowe; Wojskowe bazy lotnicze*



**Abstract:** Atmospheric corrosion is one of the parameters characterizing the technical condition of the functional elements of airport pavements - it allows to determine the degree of pavement degradation, estimate the appropriate frequency of periodic inspections and take appropriate measures to keep airfield pavements in permanent technical availability. In order to determine the corrosion resistance of the cement and asphalt concrete airfield pavement, atmospheric corrosivity tests determined on the basis of standard specimens exposure and determination of corrosion rates, form and appearance of deteriorations, as well as changes in physical properties at regular intervals are carried out. The samples were exposed to atmospheric conditions at military airport facilities. The article presents the *rcorr* corrosion rate results of low-carbon steel, zinc, copper and aluminum standard samples obtained from selected airports of the Polish Armed Forces, starting from 2015. Then, the corrosivity categories of the atmosphere were determined on the basis of the performed measurements.

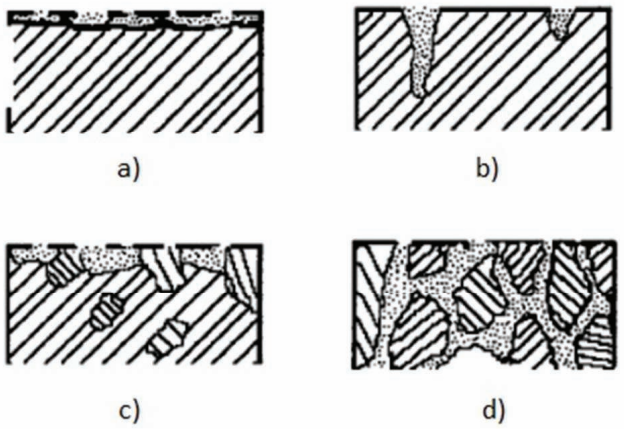


***Keywords:*** *Atmospheric corrosion; Corrosion rate; Standard specimens; Military air bases*


### Wstęp

Korozja atmosferyczna to oddziaływanie fizykochemiczne między metalem i środowiskiem miejsca badań korozji atmosferycznej. Podczas korozji atmosferycznej na powierzchni metalu zachodzą równocześnie dwa procesy: anodowy i katodowy. W procesie anodowym następuje utlenianie metalu. Z kolei przebieg reakcji katodowej zależy od pH środowiska – w środowisku kwaśnym następuje katodowa redukcja jonów wodorowych z wydzieleniem wodoru, natomiast w środowisku obojętnym i zasadowym następuje katodowa redukcja tlenu w roztworze wodnym z utworzeniem jonów wodorotlenowych [1].

Określanie szybkości korozji przy użyciu ubytków korozyjnych sugeruje, że korozja zachodzi równomiernie na powierzchni całej próbki [2]. Na wczesnym etapie ekspozycji szybkość korozji jest stosunkowo wysoka. Ponieważ produkty korozji gromadzą się na powierzchni metalu, szybkość korozji stopniowo spada i ma tendencję do pozostawania na stałym poziomie [3, 4]. Badania korozyjne w warunkach ekspozycji atmosferycznej prowadzone są na całym świecie i są stałym przedmiotem badań wśród badaczy. Międzynarodowy program badawczy ISO CORRAG (Collaborative Atmospheric Exposure Program) [5] prowadzony jest w celu określenia stopnia korelacji pomiędzy czterema użytymi metalami (stal węglowa, cynk, miedź i aluminium) w 13 krajach na całym świecie w trakcie 8 letniej ekspozycji próbek. Temperatura, wilgotność względna, stężenie dwutlenku siarki, szybkość osadzania chlorków i inne czynniki środowiskowe są monitorowane i rejestrowane przez cały okres ekspozycji. Czas ekspozycji próbek w wymiarze 8 lat przyjęto również w projekcie UN/ECE [6], w którym




***1**. Przykłady korozji powierzchniowej występującej na powierzchni metali: a) korozja ogólna, b) korozja lokalna, c) korozja selektywna, d) korozja międzykrystaliczna*

***2**. Przykładowa stacja korozyjna zlokalizowana na jednym z obiektów lotniskowych*

to w 12 krajach europejskich, Stanach Zjednoczonych i Kanadzie oceniano szybkość korozji próbek wykonanych ze stali, cynku, aluminium, miedzi, wapienia, piaskowca i innych materiałach. Autorzy [7] zestawili i ocenili bazy danych korozyjnych pozyskanych w ramach programów ISOCORRAG, ICP/UNECE i MICAT, dokonując podziału atmosfer na morską i nie morską. Depozycja chlorków na obszarach przybrzeżnych w dużym stopniu zależy od czynników wpływających na przedostawanie się w głąb lądu soli morskiej, tj. kierunek i prędkość wiatru, lokalna topografia, odległość od morza. Dlatego też, jedna z predysponowanych ekspozycji próbek korozyjnych znajduje się na obszarach nadmorskich [8, 9, 10, 11]. System oceny korozji atmosferycznej może również wesprzeć proces zarządzania elementami funkcjonalnymi lotnisk (wojskowych i cywilnych) oraz wspomóc racjonalne zarządzanie nawierzchniami lotniskowymi. Autorzy [12, 13, 14] dysponując wynikami badań próbek wzorcowych, wyznaczając korelacje z parametrami charakteryzującymi warunki atmosferyczne mają na celu ograniczenie zbierania danych środowiskowych, a ich oddziaływanie określać na podstawie ubytków korozyjnych próbek wzorcowych.

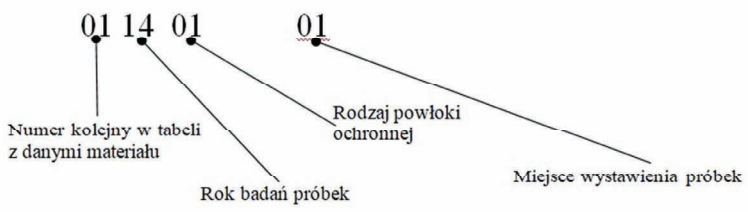
## Rodzaje korozji oraz czynniki korozyjne

Korozja atmosferyczna może występować w dwóch podstawowych formach: korozji ogólnej (równomiernej) i korozji lokalnej [15]. Korozja ogólna (równomierna) występuje z podobną szybkością i w tej samej postaci na całej powierzchni próbki. Ten rodzaj korozji jest typowy dla korozji atmosferycznej stali i miedzi [16]. Korozja lokalna występuje wybiórczo, w poszczególnych miejscach na powierzchni próbki. Można ją zaobserwować na stopach aluminium, cynku, stali nierdzewnej, niklu i innych metalach w postaci korozji wżerowej, szczelinowej i podosadowej. Często jest to wywołane obecnością jonów chlorkowych, które występują w powietrzu środowisk morskich i przybrzeżnych. Miejscowe oddziaływanie korozji niektórych stopów aluminium, w tym tych zawierających miedź, może przybierać postać korozji warstwowej i efektu łuszczenia czy pęcherzenia. Ponadto, wyróżniamy korozję selektywną, czyli korozję stopu metalu (np. mosiądzu), którego składniki wchodzą w reakcje w innych proporcjach niż ich proporcje w stopie czy też korozję międzykrystaliczną występującą na granicach ziaren metalu lub w obszarach do nich przylegających. W przypadku gdy dwa lub więcej różnych metali jest w bezpośrednim kontakcie, w obecności elektrolitu, mamy do czynienia z korozją galwaniczną (bimetaliczną). Poszczególne rodzaje korozji przedstawiono na rysunku **1** [16].

Na powierzchnię próbek metali oddziałują czynniki korozyjne, tj. wilgotność powietrza, opady atmosferyczne, temperatura powietrza, a także zanieczyszczenia powietrza (w szczególności stężenie dwutlenku siarki ($SO_2$), tlenków azotu ($NO_x$), pyły zawieszone PM, kwas azotowy ($HNO_3$) oraz zanieczyszczenia eksploatacyjne i technologiczne mikroklimatu, tj. chlor ($Cl_2$), siarkowodór ($H_2S$), kwasy organiczne i środki do odladzania). Proces korozji jest uzależniony od obecności elektrolitu, czyli medium w którym prąd elektryczny przenoszony jest przez jony. Może nim być deszcz, rosa, topniejący śnieg czy też wysoka wilgotność. Korozja atmosferyczna ma miejsce w warunkach wysokiej wilgotności względnej (tzw. krytycznej wilgotności względnej), poniżej której zwykłe metale nie korodują, ponieważ nie ma wystarczającej ilości wilgoci, aby utworzyć warstwę elektrolitu na powierzchni metalu. Jednakże, wg [17] powierzchnie wystawione na oddziaływanie deszczu charakteryzują się lepszą odpornością korozyjną niż powierzchnie rzadko lub wcale opłukiwane przez deszcz. Wg Cai, Y. K. i in. [18] wpływ różnych czynników środowiskowych na szybkość korozji metali jest zwykle nieliniowy.

## Badania korozji atmosferycznej

Badania korozyjne zostały przeprowadzone w warunkach eksploatacyjnych statków powietrznych w wybranych bazach lotniczych, w celu określenia odporności na korozję metali oraz korozyjności atmosfery. Zastosowano ekspozycję próbek na otwartej przestrzeni, gdzie czynniki atmosferyczne i zanie-




***3**. Schemat oznakowania próbek wzorcowych*

***4**. Próbki wzorcowe po zabiegu piaskowania powietrznego oraz ich oznakowaniu*

czyszczenia atmosfery oddziałują bezpośrednio na powierzchnię próbek [19]. Ramy do ekspozycji próbek metali znajdują się w obrębie stacji korozyjnych, czyli specjalnie ogrodzonych miejscach (celem zabezpieczenia przed możliwością zniszczenia badanych obiektów). Obecność budynków, jakichkolwiek konstrukcji w bezpośrednim sąsiedztwie stacji jest niedopuszczalne ponieważ stanowią one osłonę dla badanych próbek. Dlatego też stanowiska ekspozycyjne są zlokalizowanie w miejscach odosobnionych, w których powierzchnia próbek jest bezpośrednio wystawiona na działanie wszystkich czynników pogodowych. Jakakolwiek roślinność dookoła stanowiska jest wycinana lub skracana do wysokości 0,2 m. Ramy do ekspozycji zabezpieczono przed ich niepożądanym przemieszczaniem poprzez przymocowanie ich podstaw kołkami rozporowymi do betonowych wylewek. Specjalne uchwyty do mocowania próbek służą do zabezpieczenia badanych próbek przed przemieszczaniem się. Na fotografii **2** przedstawiono zdjęcie przykładowej stacji korozyjnej postawionej na jednym z obiektów lotniskowych.

Próbki standardowe są płytkami o wymiarach 50 mm x 100 mm i grubości w zależności od dostępnych na rynku grubości blach w zakresie od 1 mm do 3 mm.

Próbki wzorcowe są próbkami jednorocznymi nie zabezpieczonymi, jakimikolwiek preparatami antykorozyjnymi. Próbki przeznaczone do badań wykonano z arkuszy płaskich blach. W celu identyfikacji, stworzono schemat znakowania próbek poprzez wybijanie sekwencji cyfr, zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku **3**. Pierwsze dwie cyfry stanowią oznaczenie materiału, z jakiego wykonano próbkę (08 – stal węglowa, 09 – cynk, 10 – miedź, 11 – aluminium). Kolejne dwie cyfry oznaczają rok badań (wystawienia) próbek na stację korozyjną. Próbki wzorcowe są próbkami jednorocznymi, nie zabezpieczonymi jakimikolwiek preparatami antykorozyjnymi, w związku z tym na próbkach wytłacza się cyfry 01, co oznacza również, iż należy je zdjąć z ramy po jednym roku prowadzenia badań (wystawienia na działanie warunków atmosferycznych). Ostatnie dwie cyfry stanowią miejsce wystawienia próbek (każda z baz lotniczych, na których zlokalizowana jest stała stacja korozyjna ma przypisany swój indywidualny numer). Po oznakowaniu próbek, sporządzono wykaz zawierający identyfikację próbek. Na fotografii **4** przedstawiono próbki wzorcowe po zabiegu piaskowania powietrznego oraz ich oznakowaniu.

Próbki przygotowano według normy PN-EN ISO 8565:2021. Za przygotowanie i wystawienie próbek na stanowiska badawcze oraz późniejsze ich zwiezienie odpowiedzialni byli pracownicy Zakładu Lotniskowego ITWL. Przed ekspozycją, wszystkie próbki standardowe zostały odtłuszczone z zastosowaniem rozpuszczalników organicznych lub odtłuszczających cieczy alkaicznych. W czasie zdejmowania próbek ze stacji korozyjnych wystawiono próbki na kolejny okres badawczy.

Próbki po przywiezieniu do laboratorium Zakładu Lotniskowego zostały zważone i zmierzone. Następnie usunięto produkty korozji metodą chemiczną według normy EN ISO 8407:2021 Korozja metali i stopów - Usuwanie produktów korozji z próbek do badań korozyjnych [20]. Kolejnym krokiem było ponowne zważenie i zmierzenie próbek. Próbki ważono na wadze z dokładnością 0,001 g, natomiast pomiaru grubości wykonano śrubą mikrometryczną o dokładności 0,001 mm. Grubość próbki mierzono w pięciu punktach.

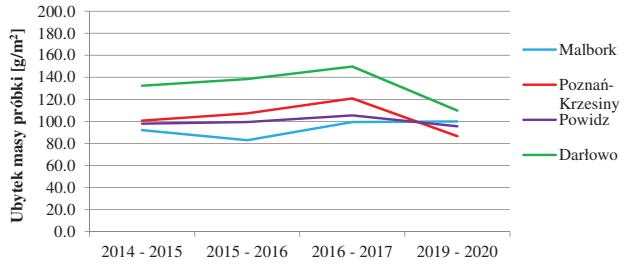
Ubytek masy próbki w przeliczeniu na jej powierzchnię obliczono według normy PN-EN ISO 9226:2012 Korozja metali i stopów - Korozyjność atmosfer - Ocena korozyjności na podstawie określenia szybkości korozji w próbkach standardowych [21].

## Pomiar ubytków korozyjnych próbek standardowych

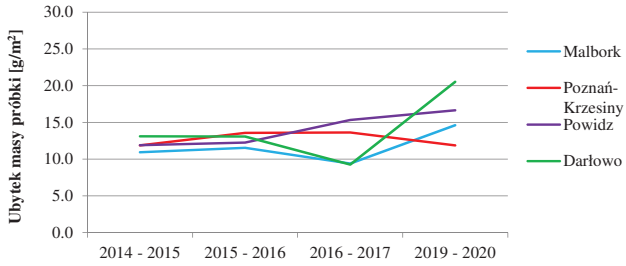
Zakład Lotniskowy ITWL prowadzi badania korozji atmosferycznej począwszy od października 2014 roku do dnia dzisiejszego. Zbiór danych korozyjnych obejmuje okresy ekspozycji rocznej w latach 2014 – 2015, 2015 – 2016, 2016 – 2017 oraz 2019 – 2020, a także jeden okres ekspozycji dwuletniej w latach 2017 - 2019. W poniższym artykule przedstawiono dane pozyskane ze stałych stacji korozyjnych zlokalizowanych na terenie 22 Bazy Lotnictwa Taktycznego w Malborku, 31 Bazy Lotnictwa Taktycznego w Poznaniu – Krzesinach, 33 Bazy Lotnictwa Transportowego w Powidzu oraz Grupy Lotniczej w Darłowie. Na wykresach (rysunki **5** – **8**) przedstawiono określone wartości ubytków korozyjnych próbek standardowych poszczególnych metali z podziałem na poszczególne obiekty.

Z powyższych zestawień wynika, że:

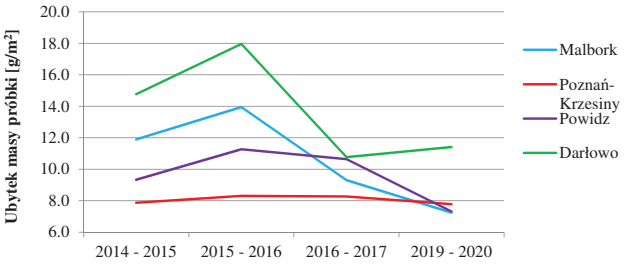
- najwyższe wartości ubytków korozyjnych *rcorr* stali węglowej zostały zarejestrowane w 2017 roku, najniższe – w 2020 (Poznań – Krzesiny, Powidz, Darłowo) i 2016 roku (Malbork),
- najwyższe wartości ubytków korozyjnych *rcorr* cynku zostały zarejestrowane w 2017 (Poznań – Krzesiny i Powidz) oraz 2020 roku



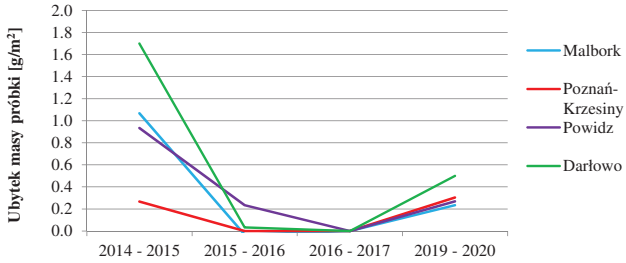

***5**. Ubytki masy próbek wzorcowych wykonanych ze stali węglowej w poszczególnych latach*




***6**. Ubytki masy próbek wzorcowych wykonanych z cynku w poszczególnych latach*




***7**. Ubytki masy próbek wzorcowych wykonanych z miedzi w poszczególnych latach*




***8**. Ubytki masy próbek wzorcowych wykonanych z aluminium w poszczególnych latach*

(Malbork i Darłowo), najniższe – w 2017 (Malbork, Darłowo) oraz 2015 roku (Poznań – Krzesiny, Powidz),

- najwyższe wartości ubytków korozyjnych *rcorr* miedzi zostały zarejestrowane w 2016 roku na wszystkich analizowanych stacjach korozyjnych, najniższe wartości ubytków *rcorr* zarejestrowano w 2020 (Malbork, Poznań – Krzesiny, Powidz) oraz 2017 roku (Darłowo),
- najwyższe wartości ubytków korozyjnych *rcorr* aluminium zostały zarejestrowane w 2015 roku na wszystkich analizowanych stacjach korozyjnych, najniższe wartości ubytków *rcorr* zarejestrowano w 2017 roku (również na wszystkich stacjach korozyjnych).

## Korozyjność atmosfery

Kategoria korozyjności atmosfery stanowi podstawę doboru materiałów i środków do ochrony w warunkach atmosferycznych, szczególnie w odniesieniu do okresu użytkowania, w tym też użytkowania nawierzchni lotniskowych. W niniejszej pracy, wykorzystany został system klasyfikacji korozyjności atmosfery na podstawie pomiaru ubytków korozyjnych standardowych próbek po pierwszym roku ekspozycji według normy PN-EN ISO 9223:2012 Korozja metali i stopów - Korozyjność atmosfer - Klasyfikacja, określanie i ocena [22]. W tab. **1** – **4** przedstawiono kategorie korozyjności określone na podstawie ubytków korozyjnych po 1 roku ekspozycji próbek na oddziaływanie korozji atmosferycznej.

Kategorie korozyjności atmosfery określone na podstawie ubytków korozyjnych (g/m$^2$) próbek wzorcowych metali są rozbieżne, wskazują na ścisłą zależność kategorii korozyjności od lokalnych warunków klimatycznych oraz stężeń zanieczyszczeń w powietrzu.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono rodzaje korozji występującej na powierzchni metali, a także czynniki korozyjne, które mają bezpośredni wpływ na szybkość korozji. Następnie, opisano wymagania dotyczące miejsc ekspozycji próbek standardowych metali w obrębie stałych stacji korozyjnych znajdujących się na terenie baz lotniczych Sił Zbrojnych RP oraz procedurę przygotowywania i postępowania z próbkami standardowymi metali (stal węglowa, cynk, miedź i aluminium). Przedstawiono również wyniki badań ubytków korozyjnych rcorr zarejestrowanych na stacjach korozyjnych w latach 2015 – 2020, znajdujących się na terenie wybranych baz lotniczych. Określono również kategorie korozyjności atmosfery na podstawie wartości ubytków korozyjnych rcorr po jednorocznej ekspozycji próbek.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na potrzebę prowadzenia regularnych testów korozyjnych w warunkach polowych w celu uzyskania rzeczywistych danych na temat trwałości metali i ich degradacji w różnych typach środowiska, rozszerzonych o badania laboratoryjne metali i ich stopów, tj. badania korozyjne w rozpylonej solance. Ponadto, zaleca się zwiększenie wielkości próby dostępnych danych korozyjnych w celu zwiększenia możliwości interpretacji otrzymanych wyników. ◀

## Materiały źródłowe

[1] Głuszko M. Korozja atmosferyczna konstrukcji stalowych i stalowych - ocynkowanych w otoczeniu zakładów przemysłu chemicznego. Metody ochrony, Ochrona przed Korozją, 1998.

[2] Sun B., Zuo H. M., Cheng X. Q., LiThe X. G. The role of chromium content in the long-term atmospheric corrosion proces, Npj Mater. Degrad., 2020.

[3] Cui, Z.Y., Li, X.G., Xiao, K., Dong, C.F., Liu, Z.Y., Zhang, D.W. Atmospheric corrosion behaviour of pure Al 1060 in tropical marine environment. Br. Corros., 2015.

[4] Lv, W.Y., Pan, C., Su, W., Wang, Z.Y., Liu, S.N., and Wang, C. A study on atmospheric corrosion of 304 stainless steel in asimulated marine atmosphere. J. Mater. Eng. Perform., 2015.

***Tab. 1.*** *Kategorie korozyjności atmosfery określone na podstawie ubytku masy próbek wykonanych ze stali węglowej*

| Stal węglowa | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Stacja korozyjna | 2014 - 2015 | | 2015 - 2016 | | 2016 - 2017 | | 2019 - 2020 | |
| | $r_{corr}$ g/m$^2$ | Kategoria korozyjności | $rr_{corr}$ g/m$^2$ | Kategoria korozyjności | $r_{corr}$ g/m$^2$ | Kategoria korozyjności | $r_{corr}$ g/m$^2$ | Kategoria korozyjności |
| Malbork | 92,1 | C2 | 82,9 | C2 | 99,5 | C2 | 100,0 | C2 |
| Poznań--Krzesiny | 100,7 | C2 | 107,2 | C2 | 120,8 | C2 | 86,6 | C2 |
| Powidz | 98,0 | C2 | 99,4 | C2 | 105,4 | C2 | 95,6 | C2 |
| Darłowo | 132,4 | C2 | 138,4 | C2 | 149,8 | C2 | 109,8 | C2 |

***Tab. 2.*** *Kategorie korozyjności atmosfery określone na podstawie ubytku masy próbek wykonanych z cynku*

| Cynk | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Stacja korozyjna | 2014 - 2015 | | 2015 - 2016 | | 2016 - 2017 | | 2019 - 2020 | |
| | $r_{corr}$ g/m$^2$ | Kategoria korozyjności | $rr_{corr}$ g/m$^2$ | Kategoria korozyjności | $r_{corr}$ g/m$^2$ | Kategoria korozyjności | $r_{corr}$ g/m$^2$ | Kategoria korozyjności |
| Malbork | 10,9 | C3 | 11,5 | C3 | 9,4 | C3 | 14,6 | C3 |
| Poznań--Krzesiny | 11,9 | C3 | 13,6 | C3 | 13,6 | C3 | 11,8 | C3 |
| Powidz | 11,9 | C3 | 12,2 | C3 | 15,3 | C4 | 16,6 | C4 |
| Darłowo | 13,1 | C3 | 13,1 | C3 | 9,3 | C3 | 20,5 | C4 |

***Tab. 3.*** *Kategorie korozyjności atmosfery określone na podstawie ubytku masy próbek wykonanych z miedzi*

| Miedź | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Stacja korozyjna | 2014 - 2015 | | 2015 - 2016 | | 2016 - 2017 | | 2019 - 2020 | |
| | $r_{corr}$ g/m$^2$ | Kategoria korozyjności | $rr_{corr}$ g/m$^2$ | Kategoria korozyjności | $r_{corr}$ g/m$^2$ | Kategoria korozyjności | $r_{corr}$ g/m$^2$ | Kategoria korozyjności |
| Malbork | 11,9 | C3 | 13,9 | C4 | 9,3 | C3 | 7,2 | C3 |
| Poznań--Krzesiny | 7,9 | C3 | 8,3 | C3 | 8,3 | C3 | 7,8 | C3 |
| Powidz | 9,3 | C3 | 11,3 | C3 | 10,6 | C3 | 7,3 | C3 |
| Darłowo | 14,8 | C4 | 18,0 | C4 | 10,8 | C3 | 11,4 | C3 |

***Tab. 4.*** *Kategorie korozyjności atmosfery określone na podstawie ubytku masy próbek wykonanych z aluminium*

| Aluminium | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Stacja korozyjna | 2014 - 2015 | | 2015 - 2016 | | 2016 - 2017 | | 2019 - 2020 | |
| | $r_{corr}$ g/m$^2$ | Kategoria korozyjności | $rr_{corr}$ g/m$^2$ | Kategoria korozyjności | $r_{corr}$ g/m$^2$ | Kategoria korozyjności | $r_{corr}$ g/m$^2$ | Kategoria korozyjności |
| Malbork | 1,1 | C3 | 0,0 | C2 | 0,0 | C2 | 0,2 | C2 |
| Poznań--Krzesiny | 0,3 | C2 | 0,0 | C2 | 0,0 | C2 | 0,3 | C2 |
| Powidz | 0,9 | C3 | 0,2 | C2 | 0,0 | C2 | 0,3 | C2 |
| Darłowo | 1,7 | C3 | 0,0 | C2 | 0,0 | C2 | 0,5 | C2 |


[5] Knotkova, D., Dean, S.W., and Kreislova, K. ISO CORRAG International atmospheric exposure program: summary ofresults. ASTM International, 2010.

[6] Tidblad, J. Atmospheric corrosion of metals in 2010–2039 and 2070–2099. Atmos. Environ., 2012.

[7] Chico B., De la Fuente D., Díaz I., Simancas J., Morcillo M. Annual Atmospheric Corrosion of Carbon Steel Worldwide. An Integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT Databases, 2017.

[8] Titakis C., Vassiliou P. Evaluation of 4-Year Atmospheric Corrosion of Carbon Steel, Aluminum, Copper and Zinc in a Coastal Military Airport in Greece, 2020.

[9] Mendoza, A.; Corvo, F. Outdoor and Indoor Atmospheric Corrosion of Non-Ferrous Metals. Corros. Sci., 2000.

[10] Morcillo M.,.Alcántara J., Díaz I., Chico B., Simancas J., De la Fuente D. Marine atmospheric corrosion of carbon steels, 2015.

[11] Melia M. A., Duran J., Taylor J. M., Presuel-Moreno F., Schaller R. F., Schindelholz E. J. Marine Atmospheric Corrosion of Additively Manufactured Stainless Steels, 2021.

[12] Wesołowski M., Rumak A., Iwanowski P., Poświata A. Assessment of the Impact of Atmospheric Corrosivity on the Cement Concrete Airfield Pavement's Operation Process, Sustainability, 2020.

[13] Wesołowski M., Iwanowski P.: APCI Evaluation Method for Cement Concrete Airport Pavements in the Scope of Air Operation Safety and Air Transport Participants Life, Int. J. Environ. Res. Public Health, 2020.

[14] Wesołowski M., Iwanowski P.: Evaluation of asphalt concrete airport Pavement conditions based on the Airfield Pavement Condition Index (APCI) in Scope of flight safety, Aerospace, 2020.

[15] EN ISO 8044:2020 Korozja metali i stopów - Terminologia.

[16] Veleva L., Kane R. D. Atmospheric Corrosion, Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection, 13 A, 2003.

[17] Vargel C. Corrosion of aluminium. Second Edition, 2020.

[18] PN-EN ISO 8565:2021 Metale i stopy - Badania korozji atmosferycznej - Wymagania ogólne.

[19] Cai, Y.K., Zhao, Y., Ma, X.B., and Zhou, K., Chen, Y. Influence of environmental factors on atmospheric corrosion in dynamicenvironment. Corros. Sci., 2018.

[20] PN-EN ISO 8407:2021 Korozja metali i stopów - Usuwanie produktów korozji z próbek do badań korozyjnych.

[21] PN-EN ISO 9226:2012 Korozja metali i stopów - Korozyjność atmosfer - Ocena korozyjności na podstawie określenia szybkości korozji w próbkach standardowych.

[22] PN-EN ISO 9223:2012 Korozja metali i stopów - Korozyjność atmosfer - Klasyfikacja, określanie i ocena.

# Tekstura nawierzchni lotniskowych w aspekcie skuteczności ich odwadniania

## Texture of airport pavements in terms of their drainage efficiency

***Mariusz Wesołowski***

*Dr hab. inż.*

*Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych*

*mariusz.wesolowski@itwl.pl*

***Krzysztof Blacha***

*Mgr inż.*

*Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych*

*krzysztof.blacha@itwl.pl*

***Piotr Włodarski***

*Mgr inż.*

*Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych*

*piotr.wlodarski@itwl.pl*



**Streszczenie:** Charakterystyka odwodnienia pola ruchu naziemnego lotnisk, a dokładnie szybkie odprowadzenie wody z nawierzchni stanowi główny czynnik bezpieczeństwa uwzględniany na etapie projektowania, budowy i utrzymania pola ruchu naziemnego oraz obszarów przylegających. Odprowadzanie wody z nawierzchni stanowi wymóg podstawowy i służy zmniejszeniu grubości warstwy wody na powierzchni. Odpowiednie odwodnienie jest zapewniane przede wszystkim poprzez powierzchnie o odpowiednim nachyleniu, zarówno podłużnym jak i poprzecznym (naturalne odprowadzanie wody). Natomiast dynamiczne odwodnienie uzyskiwane jest poprzez teksturę nawierzchni. W pracy przedstawiono wyniki badań w zakresie tekstury nawierzchni lotniskowych oraz ich analizę w odniesieniu do aktualnych wymagań. W badaniach, poza obecnie używaną punktową metodą pomiarową zastosowano nowatorską metodę oceny właściwości przeciwpoślizgowych, umożliwiającą równoczesny pomiar współczynnika tarcia $\mu$ oraz nowego współczynnika ciągłej średniej głębokości profilu i tekstury *CMPTD*. Uzyskane wyniki pozwoliły na przedstawienie wniosków, że przy ocenie tekstury nawierzchni lotniskowych i tym samym projektowaniu rozwiązań konstrukcyjnych w zakresie ich odwodnienia zasadnym jest uwzględnienie technologii jej wykonania (beton cementowy czy beton asfaltowy).



***Słowa kluczowe:*** *Odwodnienie nawierzchni lotniskowych; Tekstura nawierzchni lotniskowych; Bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych*



**Abstract:** The drainage characteristics of the surface movement area of airports, and more precisely the rapid drainage of water from the surface, is the main safety factor taken into account at the design, construction and maintenance stage of the movement area and adjacent areas. Drainage of water from the pavement is a basic requirement and serves to reduce the thickness of the water layer on the surface. Adequate drainage is ensured primarily by surfaces with an appropriate slope, both longitudinal and transverse (natural water drainage). On the other hand, dynamic drainage is achieved through the texture of the pavement. The paper presents the results of research on the texture of airport pavements and their analysis in relation to the current requirements. In the tests, apart from the currently used point measurement method, an innovative method of assessing anti-skid properties was used, which allowed for the simultaneous measurement of the friction coefficient $\mu$ and the new coefficient of continuous mean profile depth and *CMPTD* texture. The obtained results allowed for the presentation of conclusions that when assessing the texture of airport pavements and thus designing structural solutions for their drainage, it is reasonable to take into account the technology of its implementation (cement concrete or asphalt concrete).



***Keywords:*** *Drainage of airport pavements; Texture of airport pavements; Safety of air operations*


### Wstęp

Zapewnienie bezpieczeństwa jest jednym z najważniejszych celów podczas wykonywania operacji lotniczych na osiągnięcie, którego poza człowiekiem i statkiem powietrznym (SP) wpływ będzie miała oczywiście nawierzchnia lotniskowa, a mówiąc dokładnie jej stan techniczny. Jednym z elementów składowych procesu określenia stanu technicznego nawierzchni lotniskowej jest ocena jej właściwości przeciwpoślizgowych. Określają one przyczepność opony statku powietrznego do nawierzchni, czyli zdolność do wytwarzania siły tarcia pomiędzy nawierzchnią elementu funkcjonalnego lotniska (EFL) a kołami statku powietrznego w warunkach wzajemnego poślizgu. Do niedawna, przy określaniu stanu technicznego nawierzchni lotniskowych w zakresie właściwości przeciwpoślizgowych bazowano tylko na współczynniku tarcia, mierzonym podczas badania szorstkości. Obecnie ocena właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni lotniskowych obejmuje również pomiary głębokości tekstury nawierzchni, która wpływa bezpośrednio na proces odprowadzania wody z nawierzchni. Szybkie odprowadzenie wody z nawierzchni stanowi główny czynnik bezpieczeństwa uwzględniany już na etapie projektowania, budowy i oczywiście utrzymania pola ruchu naziemnego oraz obszarów przylegających. Odprowadzanie wody z nawierzchni stanowi wymóg podstawowy i służy zmniejszeniu gru-

bości warstwy wody na powierzchni. Odpowiednie odwodnienie jest zapewniane przede wszystkim poprzez powierzchnie o odpowiednim nachyleniu, zarówno podłużnym jak i poprzecznym (naturalne odprowadzanie wody). Natomiast dynamiczne odwodnienie uzyskiwane jest właśnie poprzez teksturę nawierzchni.

Mając powyższe na uwadze, w praktyce dąży się do tego, aby nawierzchnie lotniskowe charakteryzowały się dobrymi właściwościami przeciwpoślizgowymi, czyli aby spełniały określone, wymagane wartości (kryteria) zarówno dla współczynnika tarcia oraz głębokości tekstury. Niestety obowiązujące dokumenty odniesienia dotyczące tematyki tekstury nawierzchni lotniskowych w praktyce budzą wiele wątpliwości. Mianowicie nie definiują one wymaganych minimalnych wartości w odniesieniu do technologii, w jakiej została wykonana nawierzchnia (beton cementowy, beton asfaltowy), jak również dla poszczególnych przedziałów wiekowych nawierzchni, tj. „wartości projektowe dla nowych nawierzchni", „wartości do planowania działań naprawczych" oraz „wartości minimalne" (tak jak jest to w przypadku współczynnika tarcia) [16]. Natomiast, zdobyte przez autorów doświadczenie w zakresie prowadzenia badań właściwości przeciwpoślizgowych w zakresie tekstury jednoznacznie wskazuje, iż przy ich ocenie należy rozgraniczyć to czy ocena dotyczy nawierzchni wykonanej w technologii betonu cementowego czy też betonu asfaltowego. Wobec tego, autorzy przeprowadzili analizę uzyskanych wyników badań tekstury dla nowych nawierzchni lotniskowych w odniesieniu do aktualnych wymagań. W badaniach, poza obecnie używaną punktową metodą pomiarową zastosowano nowatorską metodę oceny właściwości przeciwpoślizgowych, umożliwiającą równoczesny pomiar współczynnika tarcia $\mu$ oraz nowego współczynnika ciągłej średniej głębokości profilu i tekstury *CMPTD*.

## Właściwości przeciwpoślizgowe – wymagania

Ocenę charakterystyki tarcia nawierzchni lotniskowych (ze wskazaniem na drogi startowe) przeprowadza się w dwóch aspektach, tj.:

- oceny charakterystyk tarcia nawierzchni sztucznych pokrytych warstwą śniegu, błota pośniegowego, lodem lub szronem,
- oceny (określania) charakterystyk tarcia nawierzchni dla celów budowy i eksploatacji.

Przy ocenie nawierzchni wg pierwszego aspektu przewidywane tarcie nawierzchni powinno zostać sklasyfikowane, jako dobre, średnie do dobrego, średnie, średnie do złego, złe. Przewidywane tarcie nawierzchni, w oparciu o zmierzony współczynnik, gdy droga startowa pokryta jest ubitym śniegiem albo tylko lodem, może być podawane zgodnie z tabelą **1** [15].

Charakterystyki tarcia przy ocenie nawierzchni wg drugiego aspektu (przede wszystkim na drodze startowej) powinny być:

- poddane ocenie w celu weryfikacji charakterystyki tarcia nawierzchni sztucznej na nowej lub wyremontowanej drodze startowej,
- poddawane okresowej ocenie w celu określenia śliskości drogi startowej o nawierzchni sztucznej.

Podczas pomiarów urządzeniami ASFT (*Airport Surface Friction Tester*) wartości współczynnika tarcia dla „nowych nawierzchni", „nawierzchni będących w eksploatacji, po przekroczeniu, których należy podjąć działania naprawcze" oraz „minimalnych wartości granicznych", powinny być zgodne z tabelą **2** [16].

Ponadto, w roku 2021 EASA (*European Aviation Safety Authority*) dokumentem [12] wprowadziła ocenę stanu nawierzchni drogi startowej do celów konserwacyjnych. W tym przypadku stosuje się tylko dwa poziomy tarcia (kryteria wymaganych wartości), tj. wartości, przy których należy rozpocząć planowanie konserwacji i wartości minimalne (warunkujące możliwość eksploatacji nawierzchni).

Badanie tekstury nawierzchni lotniskowych obecnie przeprowadzane jest przy wykorzystaniu punktowych metod pomiarowych, tj. metodą wo-

***Tab. 1.*** *Zestawienie wartości współczynników tarcia i oceny skuteczności hamowania dla zaśnieżonych i pokrytych lodem nawierzchni lotniskowych*

| Zmierzony współczynnik tarcia $\mu$ | Przewidywane tarcie nawierzchni | Cyfra kodu |
|---|---|---|
| 0.40 i więcej | Dobre | 5 |
| 0.39 do 0.36 | Średnie do dobrego | 4 |
| 0.35 do 0.30 | Średnie | 3 |
| 0.29 do 0.26 | Średnie do złego | 2 |
| 0.25 i poniżej | Złe | 1 |

***Tab. 2.*** *Zestawienie urządzeń pomiarowych (ASFT) stosowanych do badania szorstkości nawierzchni lotniskowych i wartości średnie wymaganych współczynników tarcia*

| Urządzenie pomiarowe | Prędkość pomiarowa [km/h] | Współczynnik tarcia μ | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Wartości projektowe dla nowych nawierzchni | Wartości do planowania działań naprawczych | Wartości minimalne (graniczne) |
| Przyczepa Surface Friction Tester i Pojazd Airport Surface Friction Tester (ASFT) | 65 | 0.70 | 0.50 | 0.40 |
| | 95 | 0.60 | 0.40 | 0.32 |

lumetryczną, inaczej objętościową (pomiar średniej głębokości tekstury *MTD*) wg PN-EN 13036-1: 2010 *Cechy powierzchniowe nawierzchni drogowych i lotniskowych. Metody badań. Część 1: Pomiar głębokości makrotekstury metodą objętościową* [17] lub profilometryczną (pomiar średniej głębokości profilu *MPD* / $d_{MPD}$) wg PN-EN ISO 13473-1: 2019 *Charakterystyka tekstury nawierzchni przy użyciu profili powierzchniowych. Część 1: Określanie średniego profilu głębokości* [18]. Wartość *MPD* może być przekształcona w szacowaną głębokość tekstury *ETD*, do tego celu służy równanie transformacji *ETD*=0.2+0.8 *MPD*.

Wymagania dotyczące głębokości tekstury, jakie muszą spełniać nowe nawierzchnie lotniskowe zostały zawarte w dokumentach wydanych przez światowe organizacje lotnicze, takie jak: EASA, ICAO (International Civil Aviation Organization) i FAA (*Federal Aviation Administration*), które przedstawiono w tabeli **3**.

W zakresie głębokości tekstury, obowiązujące dokumenty lotnicze określają wymagania praktycznie tylko dla nowych nawierzchni lotniskowych i dotyczą one przede wszystkim nawierzchni drogi startowej, co więcej nie są jednoznaczne, jak to przedstawiono w tabeli 3. Dokonując ich przeglądu nasuwa się pytanie, jaką przyjąć wymaganą wartość minimalną dla nowych nawierzchni – 1.0 mm czy 1.14 mm, ale też jak traktować zapis dopuszczający wartość poniżej 1.0 mm. Natomiast do oceny starszych nawierzchni lotniskowych, w chwili obecnej można zastosować jedynie klasyfikację ESDU (*Engineering Sciences Data Unit*) opracowaną dla drogi startowej w oparciu o informacje dotyczące tekstury, którą przedstawiono w tabeli **4** [15]. Przyjmuje się, że wartość głębokości tekstury równa 0.25 mm powinna zapewnić bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych. Należy zaznaczyć, że wymagania dla nawierzchni lotniskowych w zakresie głębokości tekstury dotyczą parametru *MTD* (*ETD*).

***Tab. 3.*** *Wymagania w zakresie głębokości tekstury dla nowych nawierzchni lotniskowych*

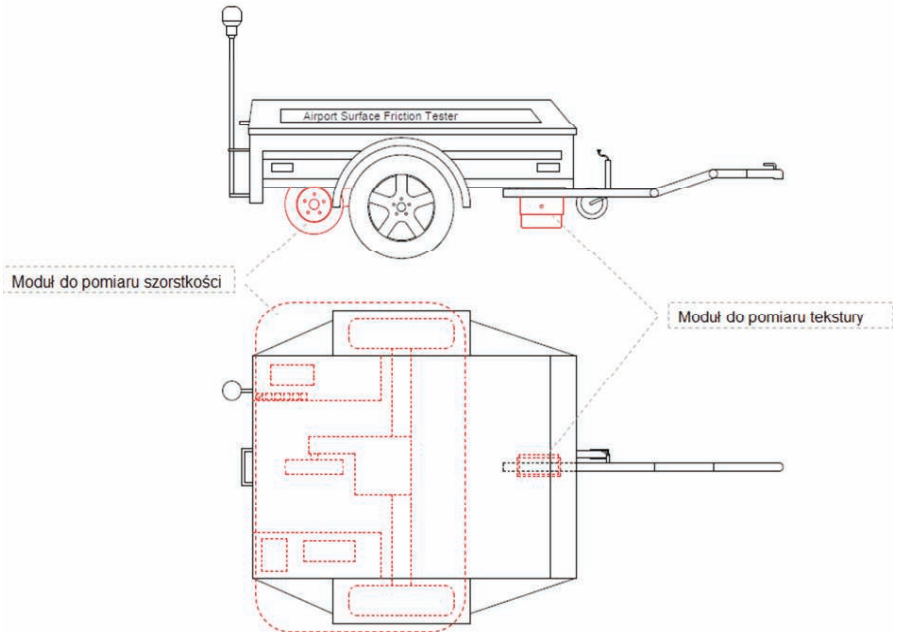
| Dokument | Głębokość tekstury [mm] |
|---|---|
| Załącznik 14 do Konwencji o Międzynarodowym Lotnictwie Cywilnym, Lotniska Tom I – Projektowanie i eksploatacja lotnisk (ICAO) [19] | ≥ 1.00 |
| Doc. 9157 AN/901 Aerodrome Design Manual Part 1 – Runways (ICAO) [14] | |
| Easy Access Rules for Aerodromes (Regulation (EU) No 139/2014) (EASA) [15] | |
| Doc. 9137 AN/898 Airport Service Manual Part 2 – Pavement Surface Conditions (ICAO) [13] | < 1.00 mm |
| Advisory Circular no: 150/5320-12C, U.S. Department of Transportation (FAA) [11] | ≥ 1.14 mm |

***Tab. 4.*** *Wymagania w zakresie głębokości tekstury dla eksploatowanych nawierzchni lotniskowych*

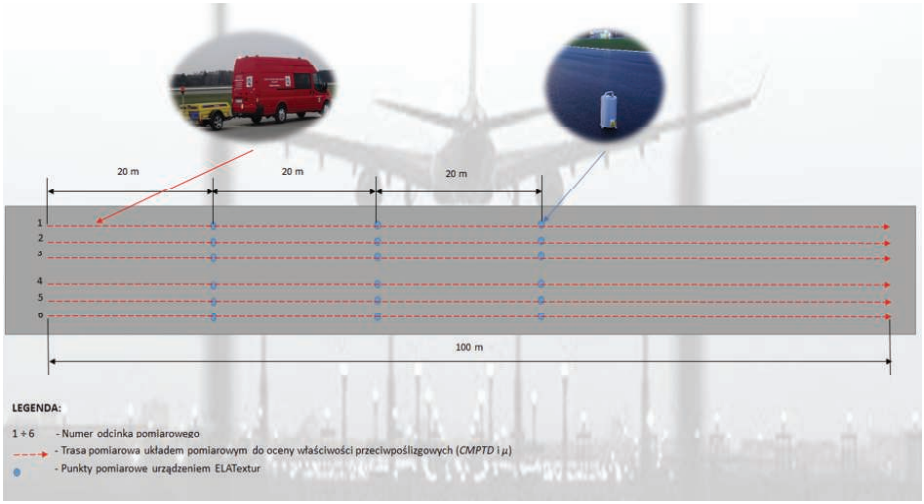
| Nazwa organizacji lotniczej | Klasyfikacja drogi startowej | Głębokość tekstury [mm] |
|---|---|---|
| ICAO, EASA | A | 0.10 – 0.14 |
| | B | 0.15 – 0.24 |
| | C | 0.25 – 0.50 |
| | D | 0.51 – 1.00 |
| | E | 1.01 – 2.54 |

## Metodyka badań i wyniki badań

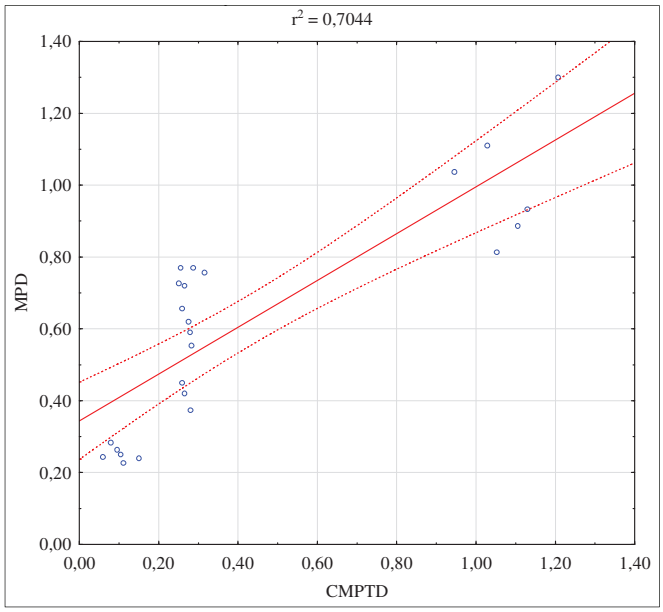
Badania przeprowadzono przy zastosowaniu układu pomiarowego zbudowanego na bazie testera tarcia nawierzchni lotniskowych ASFT na przyczepie T-10, wyposażonego dodatkowo w skaner laserowy profilu 2D/3D o wysokiej częstotliwości (dokonującego pomiaru w śladzie koła pomiarowego testera tarcia). Podobne próby podejmują również inni niewymienieni wcześniej [2] [3] [4] [9] [5], lecz przyjęte przez nich metody badawcze nie obejmują równoczesnego pomiaru tych dwóch parametrów. Należy także zaznaczyć, że w odróżnieniu do obecnie stosowanej metody pomiarowej (profilometrycznej), proponowana metoda pomiaru głębokości tekstury w ramach oceny właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni lotniskowych umożliwia dokonanie pomiaru zarówno w kierunku równoległym jak i prostopadłym do kierunku poruszania się testera tarcia. Metoda ta nie jest ograniczana pomiarem punktowym, tzn. pomiar nie odbywa się tylko i wyłącznie w funkcji długości odcinka pomiarowego, ale także w funkcji jego



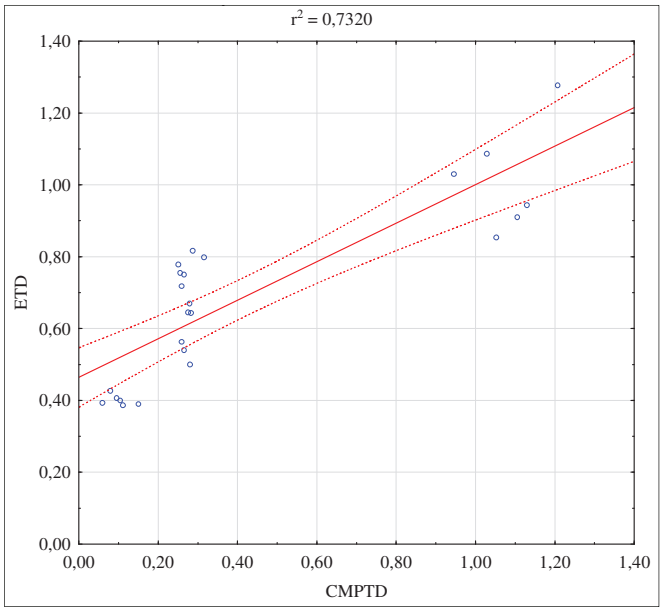

***1****. Schemat układu pomiarowego do oceny właściwości przeciwpoślizgowych*




***2**. Schemat pomiarów podczas badań terenowych*




***3**. Poziom zależności liniowej pomiędzy współczynnikami CMPTD a MPD*




***4**. Poziom zależności liniowej pomiędzy współczynnikami CMPTD a ETD*

szerokości (odpowiadającej szerokości styku opony koła pomiarowego testera tarcia z nawierzchnią). Układ pomiarowy do przyjętej metody oceny właściwości przeciwpoślizgowych obejmuje (rys. **1**):

- moduł do oceny szorstkości – pomiar współczynnika tarcia,
- moduł do oceny głębokości tekstury – pomiar nowego współczynnika *CMPTD* określającego ciągłą średnią głębokość profilu i tekstury.

Pomiary w ramach badań przeprowadzono na wytypowanych obiektach lotniskowych, przy prędkościach pomiarowych 65 km/h i 95 km/h, na nawierzchniach wykonanych zarówno w technologii betonu cementowego jak i betonu asfaltowego, wiek nawierzchni przyjęto na podstawie faktycznego okresu eksploatacji, tj. do 3 lat. Zgodnie z przyjętym planem badań terenowych, dla każdych z określonych warunków pomiarowych (np. prędkość pomiarowa 65 km/h, nawierzchnia wykonana w technologii betonu asfaltowego) wyznaczono 6 odcinków pomiarowych, każdy o długości 100 m. Odcinki dla konkretnych warunków pomiarowych zlokalizowane były na jednym EFL, np. droga kołowania wytypowanego obiektu testowego. Poszczególne odcinki traktowane były, jako pojedyncza próbka, natomiast 6 odcinków dla danych warunków pomiarowych, jako populacja próbek. Pomiar współczynników *CMPTD* i $\mu$ (zbudowany układ pomiarowy) odbywał się w sposób ciągły na całej długości odcinka pomiarowego, z częstotliwością odczytu co 0.2 m dla *CMPTD* oraz 10 m dla $\mu$. W związku z tym, do dalszych analiz przyjęto wyniki z odcinków 10 m dla poszczególnych odcinków pomiarowych. Ponadto, na każdym odcinku wykonano także pomiary punktowe urządzeniem ELATextur (na 20 m, 40 m i 60 m odcinka pomiarowego). Schemat pomiarów

wg przyjętej metodyki zaprezentowano na rysunku **2**.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów terenowych zmierzono wartości dla współczynników określających właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni lotniskowych. Wyniki z pomiarów terenowych współczynników *CMPTD* oraz *MPD* i *ETD* przedstawiono poniżej w tabelach **5** - **8**. Natomiast na rysunkach **3** - **4** zaprezentowano histogramy przedstawiające współczynniki korelacji liniowej określające poziom zależności liniowej pomiędzy współczynnikami *CMPTD* a *MPD* i *ETD* (przedział ufności 0,95). Natomiast wyznaczone na tej podstawie równania transformacji do przejścia z *CMPTD* na *MPD* i *ETD* przedstawiają się następująco: $MPD=0.65\times CMPTD+0.34$; $ETD=0.54\times CMPTD+0.46$ [10].

Dzięki wyznaczonym równaniom transformacji, po wykonaniu pomiarów z wykorzystaniem zaproponowanej metody badania właściwości przeciwpoślizgowych można wyznaczyć współczynniki *MPD* i *EDT* na podstawie, których można dokonać oceny nawierzchni lotniskowych w odniesieniu do aktualnych wymagań. Niemniej jednak, wyznaczone równania dają także możliwość zaproponowania nowego kryterium średniej głębokości tekstury (*ETD*) w odniesieniu do nowych nawierzchni lotniskowych, tj.:

- dla nawierzchni wykonanych w technologii betonu asfaltowanego – 0.82 mm,
- dla nawierzchni wykonanych w technologii betonu cementowego – 0.61 mm.

***Tab. 5.*** *Wyniki z pomiarów terenowych dla betonu asfaltowego (65 km/h)*

| Prędkość pomiarowa [km/h] | Technologia wykonania nawierzchni | Odcinek (próbka) | Wartości z pomiarów [mm] | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | *CMPTD* | *MPD* | *ETD* |
| 65 | Beton asfaltowy | 1 | 1.05 | 0.81 | 0.85 |
| | | 2 | 1.13 | 0.93 | 0.94 |
| | | 3 | 1.03 | 1.11 | 1.09 |
| | | 4 | 1.21 | 1.30 | 1.28 |
| | | 5 | 0.95 | 1.04 | 1.03 |
| | | 6 | 1.11 | 0.89 | 0.91 |
| Średnia: | | | 1.08 | 1.01 | 1.02 |

***Tab. 6.*** *Wyniki z pomiarów terenowych dla betonu asfaltowego (95 km/h)*

| Prędkość pomiarowa [km/h] | Technologia wykonania nawierzchni | Odcinek (próbka) | Wartości z pomiarów [mm] | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | *CMPTD* | *MPD* | *ETD* |
| 65 | Beton asfaltowy | 1 | 0.27 | 0.72 | 0.75 |
| | | 2 | 0.26 | 0.66 | 0.72 |
| | | 3 | 0.26 | 0.77 | 0.76 |
| | | 4 | 0.32 | 0.76 | 0.80 |
| | | 5 | 0.25 | 0.73 | 0.78 |
| | | 6 | 0.28 | 0.62 | 0.65 |
| Średnia: | | | 0.27 | 0.71 | 0.74 |

***Tab. 7.*** *Wyniki z pomiarów terenowych dla betonu cementowego (65 km/h)*

| Prędkość pomiarowa [km/h] | Technologia wykonania nawierzchni | Odcinek (próbka) | Wartości z pomiarów [mm] | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | *CMPTD* | *MPD* | *ETD* |
| 65 | Beton cementowy | 1 | 0.27 | 0.42 | 0.54 |
| | | 2 | 0.26 | 0.45 | 0.56 |
| | | 3 | 0.28 | 0.59 | 0.67 |
| | | 4 | 0.28 | 0.55 | 0.64 |
| | | 5 | 0.29 | 0.77 | 0.82 |
| | | 6 | 0.28 | 0.37 | 0.50 |
| Średnia: | | | 0.28 | 0.53 | 0.62 |

***Tab. 8.*** *Wyniki z pomiarów terenowych dla betonu cementowego (95 km/h)*

| Prędkość pomiarowa [km/h] | Technologia wykonania nawierzchni | Odcinek (próbka) | Wartości z pomiarów [mm] | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | *CMPTD* | *MPD* | *ETD* |
| 65 | Beton cementowy | 1 | 0.08 | 0.28 | 0.43 |
| | | 2 | 0.10 | 0.26 | 0.41 |
| | | 3 | 0.10 | 0.25 | 0.40 |
| | | 4 | 0.06 | 0.24 | 0.39 |
| | | 5 | 0.11 | 0.23 | 0.39 |
| | | 6 | 0.15 | 0.24 | 0.39 |
| Średnia: | | | 0.10 | 0.25 | 0.40 |

## Podsumowanie

Z praktycznego punktu widzenia poruszony przez autorów temat jest niezwykle istotny, przede wszystkim w aspekcie bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych. Cały czas dąży się do tego, aby nawierzchnie lotniskowe charakteryzowały się dobrymi właściwościami przeciwpoślizgowymi. które powinny być zdefiniowane poprzez określone (wymagane) wartości, w tym przypadku współczynnika tarcia oraz głębokości tekstury.

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, iż przy ocenie nawierzchni lotniskowych w zakresie jej tekstury należy przede wszystkim rozgraniczyć to czy ocena dotyczy nawierzchni wykonanej w technologii betonu cementowego czy też betonu asfal-

towego. Jak można zauważyć, zarówno w przypadku oceny nawierzchni przy zastosowaniu punktowej metody pomiarowej (*MPD* i *ETD*), jak również zaproponowanej nowej metody pomiarowej (*CMPTD*), wartości współczynników charakteryzujących teksturę nawierzchni są odpowiednio wyższe dla nawierzchni wykonanej w technologii betonu asfaltowego, a dla nawierzchni wykonanej w technologii betonu cementowego odpowiednio niższe. Dlatego też, zdaniem autorów, należałoby wziąć pod rozwagę wprowadzenie oddzielnych wymagań w tym zakresie w odniesieniu do technologii wykonania nawierzchni lotniskowej.

Zaproponowana nowa metoda pomiarowa w porównaniu do aktualnie stosowanych (punktowych) daje większe możliwości. Z badawczego punktu widzenia umożliwia przede wszystkim ciągły pomiar tekstury nawierzchni, co jak widać nie pozostaje bez znaczenia porównując wartości z pomiarów terenowych (widoczna różnica wartości).

Mając na uwadze uzyskane dotychczas i przedstawione wyniki, autorzy planują dalsze prace związane z analizą wyników w odniesieniu do pozostałych przedziałów wiekowych nawierzchni. Efekty prowadzonych badań i analiz w tym zakresie uzupełnią dotychczasowy zbiór prac [6] [7] [1] [8] oraz będą stanowić podstawę do kolejnych opracowań związanych z tematyką tekstury nawierzchni lotniskowych. ◄

**Materiały źródłowe**


- Artykuły

[1] Blacha K., Wesołowski M. Skid Resistance Properties of Airfield Pavements in the Light of Applicable Normative Rules, Journal of Konbin, Marzec 2019.

[2] Čelko J., Kovac M., Kotek P. Analysis of the Pavement Surface Texture by 3D Scaner, Transporation Research Procedia 14.2994-3003, 2016.

[3] Huang Y., Copenhaver T., Hempel P., Mikhail M. Development of Texture Measurement System Based on Continuous Pro-files from Three-Dimensional Scanning System, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. 2367 (2), 2013.

[4] Islam S., Hossain M., Miller R. Evaluation of pavement surface texture at the network level, Nondestructive Testing And Evaluation, tom 34, nr 1, pp. 1-12, 2018.

[5] Meegoda J., Gao S. Evaluation of pavement skid resistance using high speed texture measurement, Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015.

[6] Wesołowski M., Blacha K., Iwanowski P. Impact of Airfield Pavement's Operability on Its Anti-skid Properties, w Research Methods and Solutions to Current Transport Problems, 2020.

[7] Wesołowski M., Blacha K. Estimating the Impact of Texture Depth on the Roughness of Cement Concrete Airfield Pavements, Journal of Konbin, Czerwiec 2019.

[8] Wesołowski M., Blacha K. Evaluation of airfield pavement micro and macrotexture in the light of skid resistance (friction coefficient) measurements, w MATEC Web of Conferences 262:05017, 2019.

[9] Zhan Q. J. Li, Y., Yang G., Wang K. Pavement skid resistance as a function of pavement surface and aggregate texture properties, International Journal of Pavement Engineering, 2018.

[10] Zieja M., Wesołowski M., Blacha K., Iwanowski P. Analysis of the Anti-Skid Properties of New Airfield Pavements in Aspect of Applicable Requirements. Coatings (Road Surface Performance: Skid Resistance, Noise, and Rolling Resistance), 2021, 11 (7).

- Opracowania techniczne lub inne

[11] Advisory Circular no: 150/5320-12C, U.S. Department of Transportation, FAA, 1997 z późn. zm.

[12] Annex to ED Decision 2021/003/R "AMC & GM to Authority, Organisation and Operations Requirements for Aerodromes — Issue 1, Amendment 5", EASA, 2021.

[13] Doc. 9137 Podręcznik służb portu lotniczego Część 2 - Stan nawierzchni lotniskowych" (Airport Services Manual Part 2 - Pavement Surface Conditions), ICAO, 2002.

[14] Doc. 9157 Podręcznik projektowania lotnisk Część 1 - Drogi startowe (Aerodrome Design Manual Part 1 - Runways), ICAO, 2006.

[15] Łatwo Dostępne Przepisy dla Lotnisk (Rozporządzenie UE 139/2014), Europejska Agencja Bezpieczeństwa Lotniczego (EA-SA), 2019.

[16] NO-17-A501: 2015 Nawierzchnie lotniskowe. Badanie szorstkości. WCNJiK, 2015.

[17] PN-EN 13036-1: 2010 Cechy powierzchniowe nawierzchni drogowych i lotniskowych. Metody badań. Część 1: Pomiar głębokości makrotekstury metodą objętościową, 2010.

[18] PN-EN ISO 13473-1: 2019-04 Charakterystyka tekstury nawierzchni przy użyciu profili powierzchniowych. Część 1: Określanie średniej głębokości profilu, 2019.

[19] Załącznik 14 ICAO do Konwencji o Międzynarodowym Lotnictwie Cywilnym, Lotniska Tom I - Projektowanie i eksploatacja lotnisk, Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO), 2016 (wydanie 7).

# Stabilizacja podłoża gruntowego i poziomowanie betonowych płyt nawierzchniowych

## Stabilization of the subsoil and leveling of concrete paving slabs

***Mariusz Wesołowski***

*Dr hab. inż.*

*Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych*

*mariusz.wesolowski@itwl.pl*

***Agnieszka Poteraj-Oleksiak***

*Mgr inż.*

*Cover Technologies Sp. z o.o.,*

*agnieszka.poteraj@cover.net.pl*

***Danuta Kowalska***

*Mgr inż.*

*Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych*

*danuta.kowalska@itwl.pl*



**Streszczenie:** W procesie użytkowania nawierzchni lotniskowych obserwuje się zachodzące procesy destrukcyjne płyt betonowych spowodowane obciążeniami eksploatacyjnymi oraz czynnikami środowiskowymi. Jednym z najczęściej spotykanych uszkodzeń nawierzchni betonowych są progi (uskoki) - przemieszczenia pionowe krawędzi płyt lub przemieszczenia na pęknięciach płyt, będące następstwem uszkodzeń podłoża gruntowego lub podbudowy. Wykonywanie okresowych przeglądów stanu technicznego nawierzchni pozwala na monitorowanie zachodzących zmian i jednocześnie planowanie napraw, co wiąże się z doborem właściwych materiałów do ich wykonania. Niniejszy artykuł został poświęcony zagadnieniu stabilizacji i poziomowania płyt betonowych nawierzchniowych w technologii iniekcji niskociśnieniowej z wykorzystaniem specjalistycznych materiałów iniekcyjnych (żywic). Technologia reniwelacji płyt znajduje zastosowanie w miejscach osiadania trwale wzmacniając podłoże gruntowe, względnie podbudowę, jak również pozwala przywrócić żądane parametry równości nawierzchni. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych, jak również wyniki testów terenowych wykonanych przed pracami iniekcyjnymi oraz po ich zakończeniu na przykładzie prac realizowanych na jednym z obiektów lotniskowych w Polsce. W artykule przedstawiono m.in. wyniki badań nośności i równości nawierzchni oraz wyniki badań z wykorzystaniem georadaru. Przestawiona technologia należy do rozwiązań naprawczych nieinwazyjnych i robót krótkotrwałych.



***Słowa kluczowe:*** *Nawierzchnia betonowa; Iniekcje geotechniczne; Klawiszowanie płyt*



**Abstract:** In the process of using airport pavements, destructive processes of concrete slabs caused by operational loads and environmental factors are observed. One of the most common damage to concrete surfaces are thresholds (faults) - vertical displacements of the edges of the slabs or displacements on the cracks of the slabs, resulting from damage to the subsoil or foundation. Performing periodic inspections of the technical condition of the pavement allows you to monitor the changes taking place and at the same time plan repairs, which is associated with the selection of appropriate materials for their implementation. This article is devoted to the issue of stabilization and leveling of concrete pavement slabs in the low-pressure injection technology with the use of specialized injection materials (resins). The technology of slab re-leveling is used in places of settlement, permanently strengthening the subsoil or substructure, as well as allowing to restore the required parameters of pavement evenness. The article presents the results of laboratory tests as well as the results of field tests carried out before and after the injection works, based on the example of works carried out at one of the airport facilities in Poland. The article presents, among others the results of the load-bearing and evenness tests of the pavement and the results of the tests with the use of GPR. The presented technology belongs to non-invasive repair solutions and short-term works.



***Keywords:*** *Concrete pavement; Geotechnical injections; Keystrokes*


### Wstęp

Prawidłowo wykonana i eksploatowana nawierzchnia lotniskowa z betonu cementowego musi zapewnić bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych. Ze względu na dużą masę startową współczesnych statków powietrznych, które poruszają się z dużymi prędkościami przy starcie i lądowaniu, wymagana jest nawierzchnia o założonej nośności, odpowiedniej równości i szorstkości. W procesie użytkowania nawierzchni zachodzą procesy destrukcyjne spowodowane obciążeniami eksploatacyjnymi oraz czynnikami środowiskowymi. Pojawiające się uszkodzenia nawierzchni muszą być naprawiane. Niezwykle istotne jest, aby wykonywanie prac utrzymaniowych nie wstrzymywało na dłuższy okres czasu operacji lotniczych. Jedną z metod, która pozwala przywrócić wymagane parametry nawierzchni może być technologia iniekcji niskociśnieniowej.

### Uszkodzenia nawierzchni betonowych

Nawierzchnie betonowe są niezwykle praktyczne i ekonomiczne pod warunkiem, że wiemy jak się z nimi obchodzić podczas eksploatacji oraz jak eliminować przyczyny pojawiających się uszkodzeń. Generalnie,

uszkodzenia dzielimy na dwa typy: strukturalne i powierzchniowe. Uszkodzenia strukturalne, czyli świadczące o trwałości konstrukcji nawierzchni to przede wszystkim pęknięcia płyt zapoczątkowane na powierzchni lub w spodzie warstw, deformacje szczelin, osiadanie (klawiszowanie) płyt [5, 6, 7]. Uszkodzenia powierzchniowe, czyli świadczące o trwałości warstwy jezdnej, to ścieranie nawierzchni, złuszczenia powierzchniowe (płytkie i głębokie), pęknięcia włoskowate, siatkowe, pęknięcia mrozowe oraz uszkodzenia krawędziowe płyt. Natomiast uszkodzenia punktowe stanowią kraterki (drobne pustki powietrzne), odpryski pomarglowe, ubytki głębokie oraz wyłamania naroży płyt betonowych [4, 8]. Przykładowo, obłamanie krawędzi płyty w wyniku osiadania przedstawiono na rys. **1**.

Trwałość konstrukcji nawierzchni warunkowana jest jej uszkodzeniami strukturalnymi, będącymi rezultatem oddziaływania na nią ruchu pojazdów. Powoduje to cykliczne powstawanie naprężeń i odkształceń rozciągających w nawierzchni, wywołujących w długim czasie eksploatacji spękania zmęczeniowe. Liczba obciążeń przeniesionych przez nawierzchnię określana jest terminem trwałości zmęczeniowej. O trwałości zmęczeniowej decyduje konstrukcja nawierzchni (grubość warstw) i jakość (parametry mechaniczne) materiałów [7].

***1**. Obłamanie krawędzi płyty w wyniku osiadania*

Strategia utrzymania stanu nawierzchni danego typu musi uwzględniać powierzchniowe zabiegi utrzymaniowe wykonywane z odpowiednią częstotliwością, tak aby nie nastąpiło nadmierne uszkodzenie nawierzchni, którego skutkiem może być istotne zmniejszenie jej trwałości strukturalnej. Trzeba tu dodać, że nie istnieją nawierzchnie niewymagające zabiegów konserwujących. Trwałość nawierzchni należy rozumieć w istocie jako zbiór rozmaitych cech, które decydują o czasie eksploatacji nawierzchni (drogi) i kosztach jej utrzymania [7].

## Osiadanie płyt betonowych

Osiadanie płyt betonowych jest jednym z częściej występujących zjawisk w trakcie użytkowania nawierzchni komunikacyjnych. Spowodowane jest brakiem współpracy pomiędzy płytami, brakiem dostatecznego podparcia, co w konsekwencji pod dużym obciążeniem prowadzi do nierównomiernego obniżania się płyt [1]. Brak dostatecznego podparcia płyt nawierzchniowych spowodowane może być problemami występującymi w podbudowie. Takie przyczyny jak rozluźnienie materiału podbudowy wskutek penetracji wody, wypłukiwanie materiału prowadzi do jej osłabienia. Skrajnie pod płytą mogą występować puste przestrzenie tzw. kawerny, które zdecydowanie obniżają nośność konstrukcji.

Zjawisko osiadających płyt powinno zostać wyeliminowane natychmiast po identyfikacji przyczyn [7]. W przeciwnym razie osłabiona konstrukcja ulegać będzie dalszej szybkiej degradacji przejawiającej się w postaci pęknięć płyt, obłamań krawędzi itp.
W przypadku lotnisk, przemieszczenia krawędzi płyt do 1 cm nie stanowią czynnika, który eliminuje nawierzchnię z ruchu lotniczego, lecz ogranicza jej wykorzystanie. Powstanie progów między krawędziami sąsiednich płyt nawierzchniowych powoduje wiele trudności w eksploatacji, takich jak zastoiska wody, powierzchnie oblodzone w okresie zimowym, deformacje niwelety i ich dalsze konsekwencje [5, 8]. Wystąpienie progów między krawędziami poszczególnych płyt wiąże się z pogorszeniem się stanu równości [2], może wpływać na nośność konstrukcji [3], co może spowodować negatywne konsekwencje dla poruszającego się po nich statku powietrznego.

## Iniekcje geotechniczne

W zakresie napraw strukturalnych skutecznym i sprawdzonym rozwiązaniem są iniekcje geotechniczne, czyli nieuciążliwa i nieinwazyjna technologia wzmacniania i stabilizacji podłoża gruntowego oraz konstrukcji [1, 9]. Zapobiega to m. in. osuwaniu się gruntu, co skutkować może powstawaniu awarii czy katastrof budowlanych. Stabilizację gruntu stosuje się głównie w miejscach trudno dostępnych, gdzie mobilizacja ciężkiego sprzętu jest niemożliwa z przyczyn technicznych i ograniczeń ekonomicznych. Iniekcja z powodzeniem zastępuje technologię jet grouting w tego rodzaju sytuacjach. Nieodzownie towarzyszy zagadnieniu głębokiego fundamentowania, mikrotunelingu, umacniania skarp i wykopów.

Iniekcja do celów geotechnicznych jest procesem, w którym pompowalny materiał jest zdalnie wprowadzany do gruntu. Jest on pośrednio kontrolowany przez dobór własności reologicznych iniektu oraz parametrów wtłaczania, tj. ciśnienia, objętości, wydatku. W zakresie iniekcji geotechnicznej wyróżnia się dwa jej typy [10]. Pierwszy to iniekcja bezprzemieszczeniowa wypełniająca, polegającą na zastąpieniu wody lub przestrzeni porowej w gruncie, iniektem lub zaprawą, bez wyraźnych przemieszczeń gruntu. Termin ten obejmuje iniekcję penetracyjną i wypełnienie objętościowe. Drugim typem jest iniekcja przemieszczeniowa (rozpychająca) – iniekcja podłoża w

***2**. Zastosowanie iniekcji geotechnicznej do unoszenia płyty w nawierzchni betonowej*

taki sposób, że powoduje ona deformację, ściśnięcie lub przemieszczenie gruntu [10].

Technologia wykonania dotyczy procesu iniekcji stabilizującej suche i wilgotne grunty jak i wypełnienie ubytków, kawern oraz pustych przestrzeni w strukturze gruntu. Zakres użycia uzależniony jest od temperatury i mieści się w granicach: +3 °C - +30°C dla materiałów na bazie żywic.

Zastosowanie inteligentnych dwukomponentowych materiałów szybkosprawnych na bazie żywic eliminuje konieczność rozbiórki obiektu, prace iniekcyjne wykonywane są w sposób bezinwazyjny polegający na nawierceniu przez płyty nawierzchniowe prostopadłych otworów o średnicy nie większej niż 14 mm (rys. **2**). Dokładny dobór parametrów iniektu powinien zostać poprzedzony wykonaniem badań, a w niektórych przypadkach odcinka próbnego celem rozpoznania sytuacji oraz doprecyzowania parametrów materiału iniekcyjnego pod kątem spienialności (spienialny – ekspansywny, niespienialny, niskoekspansywny), lepkości (lepki, niskolepki), chłonności ze względu na zastany stan i rodzaj podłoża.

## Materiały do iniekcji geotechnicznych

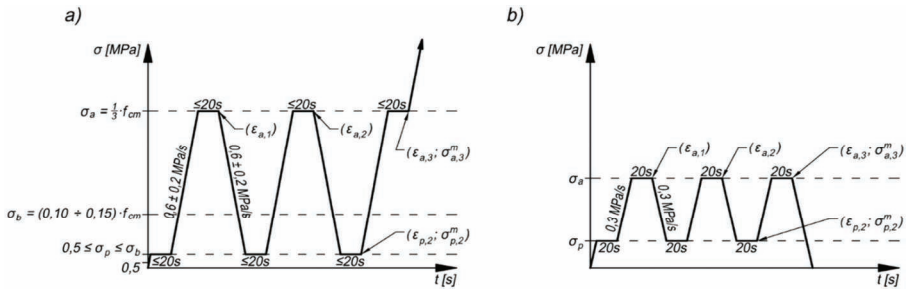
Materiały stosowane w iniekcjach wzmacniających to dwuskładnikowe systemy krzemianowo – izocjanianowe, otrzymywane przez zmieszanie składnika A i składnika B w stosunku objętościowym 1:1 [9]. Materiały takie wykorzystywane są w drogownictwie do iniektowania i unoszenia elementów betonowych dróg, wypełniania mniejszych pustek oraz stabilizowania i konsolidowania luźnych skał i piasków. Ponadto służą do wzmacniania i uszczelniania kruchych i słabych warstw górotworu oraz węgla o różnych stopniach zawilgocenia, skłonnych do odspajania się od calizny. Służą także do uszczelniania wycieków wody i gazów.

Cechy charakterystyczne ww. materiałów to:
- wysoka wytrzymałość mechaniczna,
- uzyskiwanie w krótkim czasie zadanej wytrzymałości,
- niewrażliwość na wodę,
- niska temperatura utwardzania,
- dobre właściwości hydro- i gazo izolacyjne,
- właściwości antyelektrostatyczne,
- trudnopalność.

Przebieg prac związanych z iniekcją pod płytą betonową
- prace zabezpieczające;
- wytyczenie siatki otworów mijankowo co 1 – 1,5 m, przy krawędziach płyt co 0,5 -1 m;
- nawiercenie prostopadłych otworów iniekcyjnych o śr. 14 – 16 mm na wskroś płyty w w/w siatce;
- osadzenie stalowych lanc iniekcyjnych w w/w otworach;
- wykonanie iniekcji niskociśnieniowej (do 20 bar) szybkosprawną, konstrukcyjną żywicą.
- usunięcie lanc i zaślepienie otworów;
- prace porządkowe;
- sporządzenie raportu z przebiegu prac iniekcyjnych.

## Sposób wykonania iniekcji

Iniekcja prowadzona jest przez bieżącą lancę aż do momentu zatamowania dalszego przepływu (gwałtowny wzrost ciśnienia i zatrzymanie pompy), pojawienia się „świeżej" żywicy w sąsiednim otworze iniekcyjnym lub osiągnięcia maksymalnego ciśnienia [9]. Zalecany kierunek iniekcji to systematyczne iniektowanie w jednym kierunku. Przy iniekcji wzmacniającej proces iniekcji rozpoczynamy z jednej strony i prowadzimy w miarę postępu w przeciwnym kierunku. W tym celu odpowiednia lanca iniekcyjna zaopatrzona jest w zawór zamykający. Przez tą lancę dokonuje się iniekcji do momentu, aż materiał wypełniający wydostanie się przez następną lancę, nastąpi gwałtowny wzrost ciśnienia lub ciągłość gruntu zostanie przerwana. Tu rozpoczyna się na nowo proces iniekcji, aż do uzyskania efektu w/w na kolejnej lancy. W niektórych miejscach może zajść potrzeba wykonania indywidulanej siatki rozmieszczenia lanc w celu ominięcia przeszkód lub braku dostępu. Iniekcja powinna być po możliwie jak najkrótszej przerwie kontynuowana. Przy jak najmniejszym ciśnieniu podającym można uzupełniać kończący się materiał wypełniający. Przerwa w iniekcji niesie ze sobą ryzyko niedostatecznego wypełnienia struktury iniektowanego ośrodka. Jeżeli przerwa jest niezbędna, należy




*3. Wykres badania modułu sprężystości: a) wg PN-EN12390-13:2014-02, metoda B; b) metoda zmodyfikowana*

*4. Badanie modułu sprężystości próbki materiału do iniekcji geotechnicznej, a) próbka z materiału Cover Geolift 2K przygotowana do badania b) widok próbki z materiału Cover Geopur 2K w maszynie wytrzymałościowej*

*5. Widok obniżenia krawędzi płyty na stanowisku postojowym (zalana wodą) – szczelina oznaczona nr 2*

*6. Nawiercenie otworów iniekcyjnych o średnicy 14-16 mm (zgodnie z wytyczoną siatką)*

kontynuować iniekcję w następnym pakerze, po stwardnieniu żywicy.

Maksymalne ciśnienie podczas iniekcji nie powinno przekraczać 20 bar. Natomiast niedopuszczalne jest rozerwanie gruntu żyłą materiału i niekontrolowane tłoczenie iniektu w środowisko gruntu. Na pompie ciśnienie iniekcji można od czytać bezpośrednio na manometrze. Wyższe ciśnienie może prowadzić do sedymentacji materiału, rozwarstwienia gruntu lub uszkodzenia konstrukcji. Stan techniczny danego elementu budowlanego może także wymagać ograniczenia ciśnienia iniekcji.

## Przykład zastosowania technologii iniekcji geotechnicznej na bazie żywic (polimerów) na nawierzchni lotniskowej

Technologię iniekcji niskociśnieniowej zastosowano do wyrównania płyty betonowej na płycie postoju samolotów na jednym z obiektów lotniskowych w Polsce.

Wstępnie, w Zakładzie Lotniskowym Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych w warunkach laboratoryjnych wykonano badania modułu sprężystości dwóch materiałów stosowanych w technologii iniekcji niskociśnieniowej, celem wytypowania jednego z nich do zastosowania w badaniach terenowych. Próbki do badań wykonano z materiałów dwukomponentowych: Cover Geolift 2K i Cover Geopur 2K, stosowanych w technologii iniekcji wypełniającej i rozpychającej. Sieczny ustabilizowany moduł sprężystości określono metodą B wg PN-EN 12390-13:2014-02 [11], zmodyfikowaną empirycznie (rys. **3**). Do wykonania badań wykorzystano maszynę wytrzymałościową do prób statycznych typu 50-C9842 firmy Controls oraz 3 czujniki odkształceń typu 55-C0222/G firmy Controls o ustawionej bazie pomiarowej L0 = 120 mm i zakresie pomiarowym 118,5 ÷ 121,5 mm (rys. **4**). Wyniki badań przedstawiono w tab. **1**. Ostatecznie, do prac

terenowych wytypowano materiał Cover Geolift 2K, dla którego średnia wartość siecznego ustabilizowanego modułu sprężystości wyniosła 680 MPa.

Widok sklawiszowanych płyt pokazano na rys. **5**. Po oczyszczeniu badanej nawierzchni oczyszczarką lotniskową, nawiercono otwory iniekcyjne (rys. **6**) zgodnie z wytyczoną siatką, w których osadzono stalowe lance iniekcyjne (rys. **7**), po czym wykonano iniekcje niskociśnieniową, kontrolując w trakcie robót przemieszczenia konstrukcji (rys. **8**).

Przed rozpoczęciem prac i po wykonaniu iniekcji wykonano badanie nośności (współpracy płyt betonowych), równości oraz badania georadarowe. Układ konstrukcyjny stanowiły warstwy: beton nawierzchniowy o grubości 20 cm, warstwa poślizgowa (papa) oraz podłoże gruntowe (piasek średni).

Badania georadarowe wykonano wykorzystując system georadarowy RIS MF HI-MOD#1 włoskiej firmy IDS, wyposażony w antenę dwuczęstotliwościową o zakresie 600-2000 MHz. W trakcie pomiarów, ze względu występujące zawilgocenie powierzchni elementu oraz lokalnie występujące kałuże, zasięg głębokościowy georadaru wyniósł ok. 1,0 m p.p.t. Na rys. **9** przedstawiono profil charakterystyczny dla analizowanego obszaru przed iniekcją, a na rys. **10** – profil charakterystyczny po iniekcji. Na poszczególnych profilach numerami oznaczono widoczne szczeliny dylatacyjne pomiędzy płytami. Występujące zaniżenie spągu warstwy położonej bezpośrednio pod konstrukcją unoszonej płyty pozwala sądzić, iż nastąpiło zmniejszenie stopnia zagęszczenia gruntu w tym rejonie, względem podłoża znajdującego się w bezpośrednim sąsiedztwie. Najprawdopodobniej w wyniku tego zjawiska nastąpiło przemieszczenie się płyty betonowej. Badania georadarowe wykonane po przeprowadzeniu zabiegu iniekcji wykazały zmiany w podłożu gruntowym położonym bezpośrednio pod konstrukcją płyty. Na echogramach zauważono obszar wykazujący inną charakterystykę w porównaniu do podłoża gruntowego. W powiązaniu z przeprowadzonymi zabiegami należy przypuszczać, iż jest to wprowadzony materiał iniekcyjny. Znaczna część materiału została wprowadzona pod płytę bezpośrednio sąsiadującą z płytą podnoszoną.

Pomiary nierówności wykonano przy pomocy łaty o długości 3 m. Ocenę stanu równości nawierzchni przeprowadzono na podstawie kryterium wadliwości, zgodnie z NO-17-A502:2015 i NO-17-A204:2015 [12, 14]. Pomiary odbywały się na losowo wybranych miejscach, na których

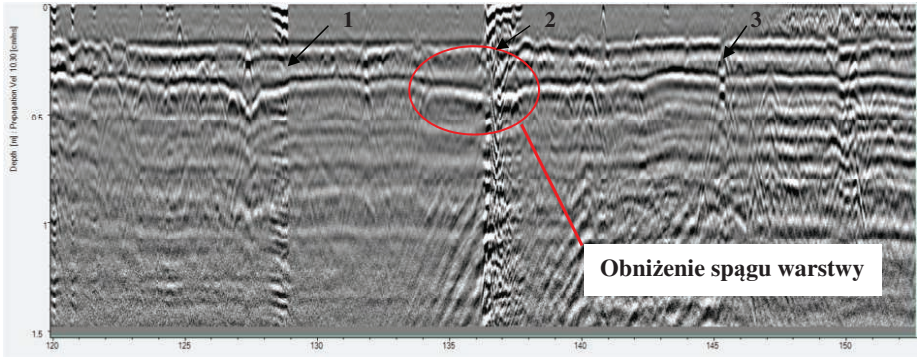
***Tab. 1.*** *Zestawienie wyników badań siecznego ustabilizowanego modułu sprężystości przy ściskaniu materiału Cover Geolift 2K i Cover Geopur 2K*

| nr próbki | Cover Geolift 2K | | | | | Cover Geopur 2K | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | d | $\varepsilon_{p,2}$ | $\varepsilon_{a,3}$ | $\Delta\varepsilon_s$ | $E_{c,s}$ | d | $\varepsilon_{p,2}$ | $\varepsilon_{a,3}$ | $\Delta\varepsilon_s$ | $E_{c,s}$ |
| | [mm] | [$10^{-6}$] | [$10^{-6}$] | [$10^{-6}$] | [MPa] | [mm] | [$10^{-6}$] | [$10^{-6}$] | [[$10^{-6}$] | [MPa] |
| 1 | 155,0 | 389,1 | 4516,5 | 4127,4 | 680 | 153,0 | 472,9 | 4705,1 | 4232,2 | 1540 |
| 2 | 155,0 | 326,8 | 4517,0 | 4190,2 | 670 | 153,0 | 847,7 | 4722,1 | 3874,4 | 1680 |
| 3 | 155,0 | 571,1 | 4661,5 | 4090,4 | 680 | 153,0 | 881,1 | 4924,8 | 4043,7 | 1610 |
| | Wartość średnia | | | | 680 | Wartość średnia | | | | 1610 |

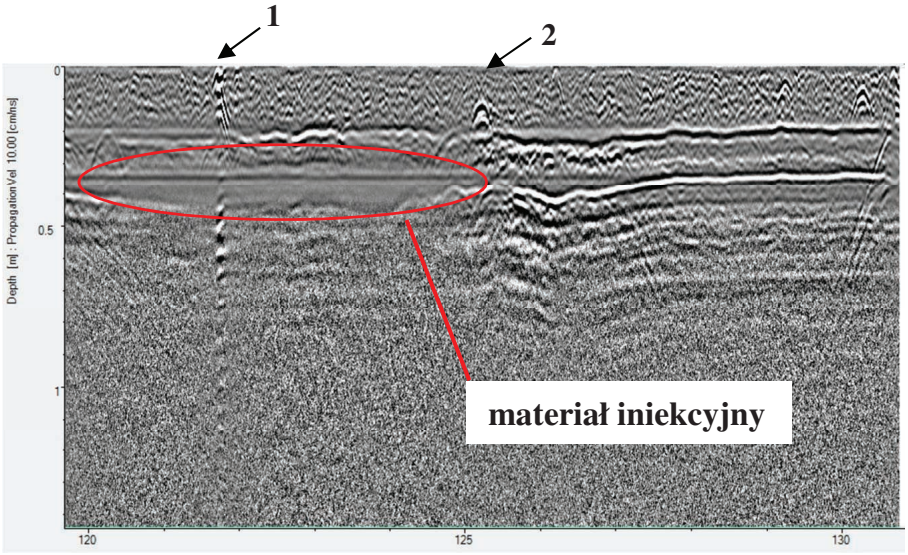
***7****. Osadzenie w nawierconych otworach, stalowych lanc iniekcyjnych*

a) b) c)

***8****. Wykonanie iniekcji niskociśnieniowej zabezpieczonej folią płyty (a). Kontrolowanie w trakcie robót iniekcyjnych przemieszczeń konstrukcji (b, c)*




***9**. Echogram prezentujący profil podłużny (obejmujący 4 płyty) uzyskany w wyniku pomiaru georadarem przed wykonaniem iniekcji. Numerami oznaczono szczeliny dylatacyjne*




***10**. Echogram prezentujący profil podłużny uzyskany w wyniku pomiaru po wykonaniu iniekcji*

***11**. Ugięciomierz udarowy typu HWD podczas pomiarów ugięć sprężystych*

nie było przeszkód mogących mieć wpływ na wartość mierzonych nierówności. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, ze stan równości po wykonaniu iniekcji polepszył się o 3,7 % względem wyników uzyskanych przed wykonaniem iniekcji.

Badanie współpracy sąsiadujących ze sobą płyt betonowych, wbudowanych w nawierzchnię badanego obszaru, wykonano za pomocą ciężkiego ugięciomierza lotniskowego typu HWD (Heavy Weight Deflectometer). Na rys. **11** przedstawiono ugięciomierz udarowy typu HWD w trakcie wykonywania pomiarów ugięć sprężystych nawierzchni badanego odcinka w miejscu połączenia płyt betonowych. Badanie przeprowadzono dokonując pomiarów ugięć sprężystych na krawędziach sąsiadujących ze sobą płyt betonowych ocenianej nawierzchni lotniskowej płytą o średnicy 450 mm, z siłą przekazywaną na nawierzchnię wynoszącą około 200 kN. Wyniki badania współpracy płyt betonowych przed i po wykonaniu iniekcji zestawiono w tab. **2**. W czasie badań wykonano również pomiary ugięć sprężystych na środku płyty betonowej przed wykonaniem iniekcji (stan odniesienia) i po wykonaniu zabiegu, zgodnie z normą NO-17-A500:2016 i NO-17-A204:2015 [13, 14]. Następnie w wyniku przeprowadzonej analizy porównano wartości pomierzonych ugięć sprężystych i wartości modułów zastępczych konstrukcji (tab. **3**). Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że współpraca między płytami przed wykonaniem iniekcji była ograniczona i średnia wartość współczynnika przenoszenia obciążeń wynosiła 66,1%. Po wykonaniu iniekcji wartość średnia współczynnika przenoszenia obciążeń wyniosła 83,4%, co oznacza dobrą współpracę płyt. Biorąc pod uwagę powyższe, należy stwierdzić, że badana technologia wpływa na poprawę współpracy płyt przy przenoszeniu obciążenia. Wyniki pomiarów ugięć sprężystych wskazują, że wykonana iniekcja przyczyniła się do zwiększenia ugięć sprężystych nawierzchni (1075,4 µm) o 34,3% względem stanu sprzed wykonania zabiegu (800,8 µm). Średnia wartość obliczonego modułu zastępczego konstrukcji nawierzchni po wykonaniu iniekcji (515,1 MPa) zmniejszyła się o 25,4% względem stanu odniesienia (690,6 MPa).

## Podsumowanie

Ze względu na zachodzące procesy destrukcyjne w betonie i pojawiające się w związku z tym uszkodzenia betonu, istotne jest wykonywanie okresowych przeglądów stanu technicznego nawierzchni, które pozwalają na monitorowanie zachodzących zmian i jednocześnie planowanie prac utrzymaniowych polegających na wykonywaniu napraw oraz zabiegów zabezpieczających. W przypadku lotnisk wszelkiego rodzaju uszkodzenia

płyt, stwarzają zagrożenie dla bezpieczeństwa poruszających się statków powietrznych.

Technologia iniekcji niskociśnieniowej z wykorzystaniem szybkosprawnych żywic iniekcyjnych (geopolimerów) pozwala na poziomowanie płyt w nawierzchni betonowej bez konieczności rozbiórki obiektu (demontażu płyt) z jednoczesnym przywróceniem wymaganych parametrów nawierzchni odnośnie do równości. W wyniku iniekcji następuje też dogęszczenie, konsolidacja rozluźnionych mas gruntu, wypełnienie pustych przestrzeni, wypełnienie warstw wodonośnych.

Na lotniskach w Polsce brak jest doświadczenia w stosowaniu technologii iniekcji geotechnicznych do usuwania progów między krawędziami sąsiednich płyt betonowych. Z tego względu wykonany odcinek doświadczalny będzie przedmiotem obserwacji i dalszych badań, dotyczących zmian parametrów konstrukcji w czasie. ◄

***Tab. 2.*** *Wyniki badania współpracy płyt betonowych przed wykonaniem iniekcji (stan odniesienia) i po wykonaniu iniekcji*

| Punkt pomiarowy | Naprężenie pod płytą | Siła zrzutu | Ugięcie czujnika nr 2 | Ugięcie czujnika nr 3 | J |
|---|---|---|---|---|---|
| | [kPa] | [kN] | [µm] | [µm] | [%] |
| Badania przed iniekcją | | | | | |
| 1 | 1277,00 | 203,02 | 1580,20 | 967,80 | 61,2 |
| 2 | 1233,00 | 196,07 | 1051,00 | 694,20 | 66,1 |
| 3 | 1253,00 | 199,28 | 2009,30 | 1387,50 | 69,1 |
| 4 | 1226,00 | 194,95 | 1177,10 | 766,30 | 65,1 |
| 5 | 1243,00 | 197,66 | 1355,50 | 864,20 | 63,8 |
| 6 | 1232,00 | 195,91 | 1132,70 | 808,10 | 71,3 |
| | | | | Wartość średnia: | 66,1 |
| Badania po iniekcji | | | | | |
| 1 | 1251,00 | 198,88 | 977,90 | 727,90 | 74,4 |
| 2 | 1224,00 | 194,59 | 798,10 | 726,10 | 91,0 |
| 3 | 1217,00 | 193,48 | 1055,60 | 828,20 | 78,5 |
| 4 | 1235,00 | 196,34 | 1089,60 | 858,70 | 78,8 |
| 5 | 1245,00 | 198,01 | 879,10 | 736,60 | 83,8 |
| 6 | 1248,00 | 198,45 | 751,10 | 705,00 | 93,9 |
| Wartość średnia: | | | | | 83,4 |

***Tab. 3.*** *Wyniki pomiarów ugięć sprężystych*

| Stan nawierzchni w trakcie pomiaru | Naprężenie pod płytą | Siła zrzutu | Ugięcie | Moduł zastępczy |
|---|---|---|---|---|
| | [kPa] | [kN] | [µm] | [MPa] |
| Przed wykonaniem iniekcji (stan odniesienia) | 1229,00 | 195,51 | 800,80 | 690,6 |
| Po wykonaniu iniekcji | 1231,00 | 195,83 | 1075,40 | 515,1 |

## Materiały źródłowe


- Artykuły

[1] Poteraj-Oleksiak A.: Wzmacnianie podłoża gruntowego i podbudowy dróg betonowych przy pomocy iniekcji geopolimerowych. II Suwalskie Forum Drogowe, Suwałki, 16.03.2018 r.

[2] Wesołowski M., Pietruszewski P, Poświata A., Kowalska D. Ocena równości nawierzchni lotniskowych w aspekcie obowiązujących dokumentów normatywnych. Przegląd komunikacyjny, 2018, R. 73 nr 12, 24-29.

[3] Wesołowski M., Blacha K., Rumak A. Influence of the load bearing capacity a concrete airfield pavement constructions on the safety of air operations. Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference, 2019, nr DOI: 10.3850/978-981-11-2724-3-0500-cd.

[4] Wesołowski M., Iwanowski P.: APCI Evaluation Method for Cement Concrete Airport Pavements in the Scope of Air Operation Safety and Air Transport Participants Life, Int. J. Environ. Res. Public Health, 17(5), 1663, 2020.

- Książki

[5] P. Nita: Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, 2008.

[6] M. Y. Shahin: Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots. Spinger, 2006.

[7] A. Szydło: Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Polski Cement, 2004.

[8] M. Wesołowski: Kompleksowa ocena stanu technicznego nawierzchni elementów funkcjonalnych lotnisk w aspekcie bezpieczeństwa lotów. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, 2020.

- Dokument elektroniczne

[9] www.covertechnologies.com, 23.09.2021.

- Opracowania techniczne lub inne

[10] Norma PN-EN 12715:2021-05 Wykonawstwo specjalistycznych robót geotechnicznych. Iniekcja

[11] Norma PN-EN 12390-13:2014-02 Badania betonu. Część 13. Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu.

[12] Norma obronna NO-17-A502:2015 Nawierzchnie lotniskowe. Badanie równości.

[13] Norma obronna NO-17-A500:2016 Nawierzchnie lotniskowe i drogowe. Badanie nośności.

[14] Norma obronna NO-17-A204:2015 Nawierzchnie lotniskowe. Nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania i metody badań.

# Zastosowanie destruktu asfaltowego w recyklowanych nawierzchniach drogowych

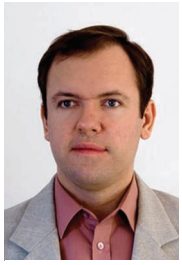
## Application of reclaimed asphalt in recycled road pavements

***Łukasz Skotnicki***

*Dr inż.*

*Politechnika Wrocławska, Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk*

*lukasz.skotnicki@pwr.edu.pl*



***Jarosław Kuźniewski***

*Dr inż.*

*Politechnika Wrocławska, Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk*

*jaroslaw.kuzniewski@pwr.edu.pl*



**Streszczenie:** W niniejszym referacie przedstawiono możliwości powtórnego zastosowania materiałów pochodzących z recyklingu w konstrukcjach nawierzchni drogowych. Materiały odpadowe pochodziły ze starych i zniszczonych warstw nawierzchni. Destrukt asfaltowy został wykorzystany do wytworzenia nowych warstw nawierzchni drogowych – warstw podbudowy. Warstwy podbudowy wykonano z mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Głównym celem była ocena wpływu destruktu asfaltowego w mieszankach MCE na właściwości fizyczne, mechaniczne i reologiczne recyklowanej podbudowy. Zastosowanie destruktu asfaltowego w mieszankach MCE redukuje koszty budowy dróg oraz pozwala na ekologiczne współistnienie inwestycji ze środowiskiem. Wyniki badań opracowano w ramach projektu pt. „Innowacyjna technologia wykorzystująca optymalizację środka wiążącego przeznaczonego do recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni zapewniająca jej trwałość eksploatacyjną" (TECHMATSTRATEG1/349326/9/NCBR/2017) w ramach przedsięwzięcia naukowego Badań Strategicznych oraz Programu Rozwojowego „Nowoczesne technologie materiałowe" (TECHMATSTRATEG I), który był finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR).



***Słowa kluczowe:*** *Mieszanka MCE; Recykling nawierzchni drogowych; Destrukt asfaltowy; Cementowe pylaste produkty uboczne*



**Abstract:** This paper presents the possibilities of reusing recycled materials in road pavement constructions. Waste materials came from old and damaged pavement layers. The reclaimed asphalt pavement (RAP) was used to create new layers of road surfaces - the base layers. The base layers were made of mineral-cement-emulsion mixtures (MCE). The main issue was to assess the impact of the RAP in MCE mixes on the physical, mechanical and rheological properties of the recycled base layer. The use of reclaimed asphalt in MCE mixes reduces road construction costs and allows for the ecological coexistence of the investment with the environment. The research results were developed as part of the project entitled "The innovative technology used the binding agent optimization that provides the long service life of the recycled base layer" (TECHMATSTRATEG1/349326/9/NCBR/2017) within the scientific undertaking of Strategic Research and Development Program entitled "Modern Materials Technology" (TECHMATSTRATEG I), which is financed by the National Center for Research and Development (Polish NCBiR).



***Keywords:*** *MCE mixture; Road pavement recycling; Reclaimed asphalt pavement (RAP); Cement dusty by-products*


### Wstęp

W ramach realizacji grantu badawczego „Nowoczesne technologie materiałowe" Katedra Dróg i Lotnisk Politechniki Wrocławskiej w latach 2018-2021 brała udział w projekcie: „Innowacyjna technologia wykorzystująca optymalizację środka wiążącego przeznaczonego do technologii recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni zapewniająca jej trwałość eksploatacyjną". Zakres tematu badawczego obejmował ocenę wpływu innowacyjnego środka wiążącego na właściwości fizyczne, mechaniczne i reologiczne recyklowanej podbudowy wykonanej z mieszanki mineralno-spoiwowej z emulsją asfaltową i asfaltem spienionym.

Opracowano procedury badań i oceny właściwości mieszanek drogowych zawierających: destrukt asfaltowy, różne składniki mineralne, spoiwo dedykowane (składające się z cementu, wapna i ubocznych produktów pylastych) pochodzące z cementowni oraz lepiszcze asfaltowe w postaci emulsji asfaltowej bądź asfaltu spienionego. Przygotowano także wytyczne technologii recyklingu głębokiego na zimno z emulsją asfaltową oraz dedykowanym spoiwem.

Jednym z materiałów służącym do wykonania warstw podbudowy drogowej są mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne. Innowacyjne podejście w temacie badawczym polegało na zastosowaniu w składzie tych mieszanek innowacyjnego spoiwa w zastępstwie cementu w połączeniu z destruktem asfaltowym i lepiszczem asfaltowym. Podstawą analiz było określenie wpływu spoiwa dedykowanego na parametry wytrzy-

małościowe mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Zakres badań przedstawionych w tym artykule obejmował: wytrzymałość mieszanek MCE na rozciąganie pośrednie określone metodą ITS oraz odporności na działanie czynników atmosferycznych określonych metodami: TSR, ITSR oraz AASHTO.

## Materiały recyklowane w drogownictwie

Zagadnienie ochrony środowiska jest bardzo istotne, szczególnie z uwagi na postępującą degradację i eksploatację otaczającej nas natury. Wobec zmniejszających się naturalnych zasobów materiałowych pojawił się problem powtórnego wykorzystania materiałów z już istniejących, ale wyeksploatowanych obiektów budowlanych. Powtórne wykorzystanie zużytych materiałów (recykling) obserwowane jest także w budownictwie drogowym.

Do budowy nawierzchni drogowych, jak i lotniskowych można zastosować nie tylko nowe, nieprzetworzone jeszcze materiały, ale także te pochodzące z recyklingu. Recykling nawierzchni drogowych umożliwia powtórne wykorzystanie materiałów drogowych, które po odpowiednim doziarnieniu i wymieszaniu ze spoiwami typu asfalt lub cement przy ich odpowiedniej zawartości procentowej, tworzą pełnowartościowe produkty materiałowe.

Recykling stosowany w budownictwie drogowym dostarcza bardzo wiele wymiernych korzyści: zmniejsza zapotrzebowanie na surowce mineralne, obniża koszty transportu kruszywa, wpływa na znaczne obniżenie liczby składowisk odpadów pochodzących ze zniszczonych nawierzchni drogowych.

W pracach naukowych z zakresu budownictwa publikowanych w najlepszych czasopismach branżowych wykazano, że warstwy konstrukcji drogowych z zawartością różnego rodzaju dodatków oraz tzw. destruktu asfaltowego uzyskują bardzo dobre właściwości mechaniczne, niejednokrotnie lepsze niż mieszanki składające się tylko ze składników naturalnych [29]. Ponadto doświadczenia chińskie potwierdziły możliwość zastosowania żużla betonowego i cegły do konstrukcji nawierzchni nasypów autostrad [12, 13]. W nasypach drogowych można zastosować odpady budowlane pochodzące z rozbiórki obiektów budowlanych [5, 26, 27]. Ten sam materiał można wykorzystać do stosowania w niezwiązanych warstwach podbudowy [3, 18, 30]. Materiały odpadowe w zastępstwie surowców naturalnych można także zastosować do budowy poboczy dróg lub dróg nieutwardzonych [8]. Parametrami monitorowanymi były gęstość, nośność i mrozoodporność. Mieszanki recyklowane zawierające odpady aluminium uzyskały lepsze wartości mechaniczne (wytrzymałość na ściskanie, parametr CBR) niż mieszanki recyklowane bez zawartości tego odpadu [15].

Udowodniono także możliwość zastosowania materiałów mineralnych pochodzących z recyklingu nawierzchni betonowych. Zamiast grubych naturalnych kruszyw – do 20%, można zastosować wysokiej jakości materiały pochodzące z recyklingu kruszyw betonowych [10]. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie pośrednie oraz modułów sprężystości wykazały, że do mieszanek asfaltowych dodatek recyklowanego kruszywa betonowego w ilości 40% mieszanki mineralnej jest optymalny i zalecany [17].

Zastosowanie zużytych opon do mieszanek z modyfikowanym asfaltem w konstrukcji nawierzchni powoduje dużą oszczędność energii i redukcję emisji dwutlenku węgla, poprzez zużycie dużo mniejszej ilości węgla [16, 32]. Guma samochodowa w postaci okruchów jako modyfikator poprawia właściwości reologiczne i mechaniczne mieszanin gumowo-asfaltowych [16].

W badaniach wykazano, że destrukt asfaltowy wraz z odzyskanym podłożem stabilizowanym cementem może być wykorzystany jako surowiec wtórny kruszywa do przygotowania mieszanek stabilizowanych cementem w technologii recyklingu na zimno [23]. Mieszanki z zawartością materiałów recyklowanych charakteryzowały się wystarczającą trwałością i dobrą wydajnością.

Spoiwa asfaltowe wpływają na parametry fizyko-mechaniczne, takie jak wytrzymałość na rozciąganie pośrednie, moduł sztywności pełzania czy zawartość wolnej przestrzeni, mieszanek recyklowanych metodą na zimno [4, 25]. Rodzaj spoiwa miał znaczący wpływ na zagęszczalność badanych mieszanin, co spowodowało uzyskanie różnych wartości parametrów mechanicznych. Otrzymane wyniki potwierdziły możliwość zastosowania do warstw konstrukcji nawierzchni mieszanek poddanych recyklingowi na zimno ze spienionym asfaltem.

Ponadto destrukt asfaltowy może być składnikiem mieszanki mineralno-cementowej wymieszanej z asfaltem spienionym (MCAS). Mieszanka ta, wykonana metodą przetworzenia na miejscu, wg. technologii na zimno, swoje szerokie zastosowanie znalazła w warstwie podbudowy zasadniczej [14, 20, 31], na której bezpośrednio wbudowana zostanie warstwa wiążąca z betonu asfaltowego w technologii na gorąco.

Kolejną mieszanką, w której można wykorzystać materiał recyklowany, jest tzw. asfalt kompaktowy. Powstaje on przy jednoczesnym układaniu dwóch warstw nawierzchni asfaltowej, zwykle wiążącej i ścieralnej. Badania nawierzchni wykonanej na autostradzie A-2 w Polsce potwierdziły jej właściwości w zakresie trwałości, odporności na deformacje i połączenia między warstwami [28].

Niemieckie laboratoria oraz firmy

wykonawcze dosyć często stosują destrukt asfaltowy do mieszanek dla górnych warstw konstrukcyjnych [24]. Ponadto destrukt asfaltowy jest wykorzystywany do utwardzania poboczy lub do budowy dróg serwisowych lub zakładowych.

Mieszanki zawierające destrukt asfaltowy wykazywały wyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie pośrednie (ITS) oraz zmniejszone odkształcenie niż tradycyjne mieszanki mineralno-asfaltowe [19].

Jako środek odmładzający można stosować imidazoliny, zarówno rzepakowe, jak i oleinowe do przywracania właściwości postarzałego asfaltu zawartego w RAP [33]. Dodanie imidazoliny do „starego" asfaltu spowodowało wzrost penetracji i spadek temperatury mięknienia i lepkości.

Ponadto, zastąpienie kruszywa grubego przez destrukt asfaltowy daje znaczną poprawę właściwości mechanicznych (m.in. stabilność Marshalla, wytrzymałość na rozciąganie pośrednie) i wydajności mieszanek mineralno-asfaltowych wytworzonych technologią na gorąco w porównaniu do tradycyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych [2].

Jednym ze sposobów utylizacji odpadów budowlanych w nawierzchniach drogowych może być zastosowanie mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Mieszanki MCE składają się z destruktu lub destruktu i kruszywa mineralnego, wymieszanego na zimno z cementem i emulsją asfaltową w określonych proporcjach, w warunkach optymalnej wilgotności. Mieszanki te charakteryzują się ciągłym uziarnieniem [6, 23].

Mieszanki typu MCE mogą być wykorzystywane w konstrukcjach nawierzchni drogowych jako warstwy podbudowy. Podbudowa z MCE może być stosowana w następujących przypadkach:

- przy przebudowie istniejących nawierzchni,
- przy poszerzeniu lub remoncie poboczy,
- przy budowie nowych nawierzchni (warstwa podbudowy) w ramach remontów i przebudów [8].

***Tab. 1.*** *Wymagania uziarnienia do mieszanki mineralnej (MM) dla warstw MCE [7]*

| Sito # [mm] | Mieszanka MCE dla KR 1÷2 | Mieszanka MCE dla KR 3÷4 |
|---|---|---|
| 63,0 | 100 | 100 |
| 31,5 | 80 – 100 | 80 – 100 |
| 16,0 | 55 – 100 | 55 – 93 |
| 8,0 | 35 – 90 | 35 – 80 |
| 4,0 | 25 – 75 | 25 – 67 |
| 2,0 | 16 – 60 | 16 – 55 |
| 1,0 | 9 – 45 | 9 – 43 |
| 0,5 | 5 – 35 | 5 – 33 |
| 0,125 | 2 – 18 | 2 – 15 |
| 0,063 | 0 – 12 | 0 – 12 |

Podstawowymi materiałami składowymi mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych są: destrukt, kruszywo doziarniające, spoiwo hydrauliczne, emulsja asfaltowa i woda.

Najbardziej rozpowszechniona jest metoda stosowania destruktu asfaltowego, powstałego z frezowania zdegradowanych nawierzchni podatnych.

Przy recyklingu z użyciem asfaltu i cementu wykonane warstwy nawierzchni charakteryzują się nośnością i wytrzymałością, przenosząc spękania skurczowe [9, 11].

Zastosowanie tych składników, szczególnie cementu, może powodować pojawienie się skurczu i spękań w warstwach drogowych. Autorzy pracy skoncentrowali się na redukcji zjawiska pękania w mieszankach typu MCE, poprzez zastosowanie innowacyjnego spoiwa cementowego wraz z materiałami pochodzącymi z recyklingu. Innowacyjne spoiwo cementowe skomponowane na bazie ubocznych produktów pylastych pochodzących z cementowni przyczynia się również do optymalizacji procesu recyklingu w nawierzchniach drogowych. Badania prowadzone były w zakresie analiz wytrzymałościowych oraz odporności na działanie czynników atmosferycznych. W efekcie prac wykazano, że innowacyjne spoiwa mają znaczący wpływ na otrzymywane wyniki badań. Zastosowanie innowacyjnych spoiw jako alternatywne rozwiązanie dla cementu, wpłynie pozytywnie na trwałość konstrukcji nawierzchni drogowych.

## Dobór składników mieszanek MCE

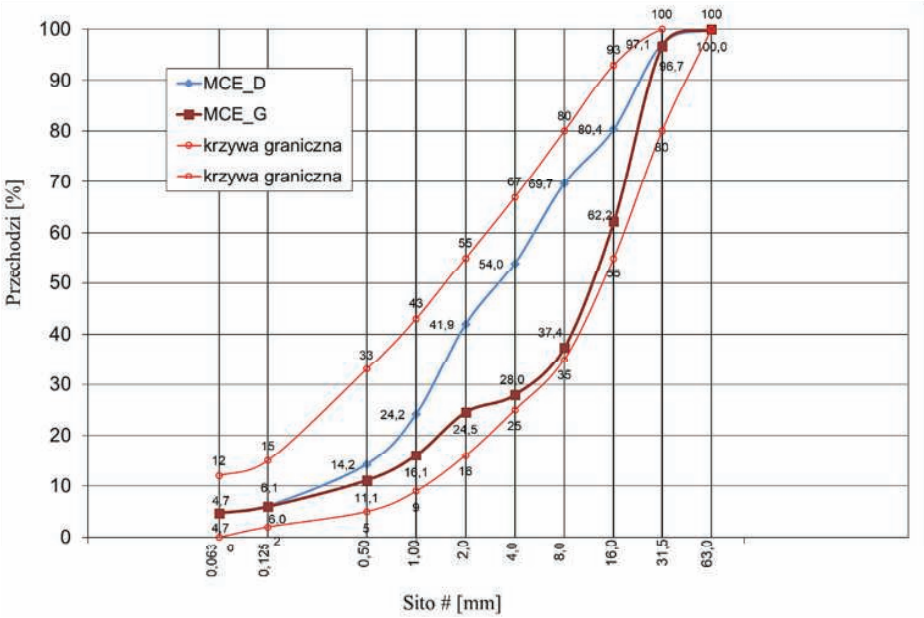
Projektowanie mieszanki MCE powinno być skorelowane z projektowaniem konstrukcji nawierzchni i organizacją robót, w zależności od metody jej wykonywania. Do wytworzenia mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych należy zastosować następujące materiały: destrukt asfaltowy, kruszywo doziarniające, spoiwo hydrauliczne, emulsję asfaltową oraz wodę.

Składy mieszanek mineralnych (MM) określono zgodnie z przyjętymi założeniami, tzn. dla dwóch typów mieszanek: drobnoziarnistej (oznaczonej symbolem D) i gruboziarnistej (oznaczonej symbolem G). Mieszanka drobnoziarnista składała się z kruszywa łamanego doziarniającego o ciągłym uziarnieniu 0/31,5 mm, kruszywa naturalnego doziarniającego o ciągłym uziarnieniu 0/2 mm oraz kruszywa recyklowanego – (destrukt asfaltowy) 0/10 mm. Z kolei mieszanka gruboziarnista w swym składzie zawierała kruszywo łamane doziarniające o ciągłym uziarnieniu 0/31,5 mm, kruszywo naturalne doziarniające o ciągłym uziarnieniu 0/2 mm oraz kruszywo recyklowane – (destrukt asfaltowy) 0/31,5 mm.

Na właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe mieszanek MCE w istotnym stopniu wpływa sam skład

***Tab. 2.*** *Składy mieszanek mineralnych (MM)*

| Składniki mieszanki drobnoziarnistej **(D)** | Składniki mieszanki gruboziarnistej **(G)** | Zawartość [%] |
|---|---|---|
| **0/10mm** destrukt asfaltowy | **0/31,5mm** destrukt asfaltowy | **40** |
| **0/31,5mm** kruszywo doziarniające , łamane | **0/31,5mm** kruszywo doziarniające, łamane | **50** |
| **0/2mm** kruszywo doziarniające, naturalne | **0/2mm** kruszywo doziarniające, naturalne | **10** |




***1****. Krzywe uziarnienia mieszanek mineralnych (MM)*

granulometryczny mieszanki mineralnej. Zgodnie z wymaganiami [7], jej uziarnienie mieszanki mineralnej powinno mieścić się w określonym przedziale podanym w tab. **1**. Uziarnienie takiej mieszanki mineralnej określa się bez uwzględniania cementu.

Z przeprowadzonych analiz wynika, żeby krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej drobnoziarnistej i gruboziarnistej spełniała warunki krzywych granicznych MCE oraz żeby zawartość procentowa poszczególnych jej składników (kruszywa naturalne oraz destrukt) w obu typach mieszanek była taka sama, w projekcie mieszanek mineralnych założono udział procentowy destruktu asfaltowego na poziomie 40%, kruszywa naturalnego 0/31,5 mm w ilości 50% oraz kruszywa naturalnego 0/2 mm wynoszącego 10%.

***Tab. 3.*** *Oznaczenie i składu skomponowanych spoiw*

| Oznaczenie spoiw | Składnik | | |
|---|---|---|---|
| | Cement | Wapno | Pyły |
| 1V | 0,20 | 0,20 | 0,60 |
| 2V | 0,20 | 0,60 | 0,20 |
| 3V | 0,60 | 0,20 | 0,20 |
| 4C | 0,20 | 0,40 | 0,40 |
| 5C | 0,40 | 0,20 | 0,40 |
| 6C | 0,40 | 0,40 | 0,20 |
| 7C | 0,33 | 0,33 | 0,33 |
| Ref | 1 | 0 | 0 |

Uziarnienie uzyskanych mieszanek mineralnych drobnoziarnistych i gruboziarnistych przedstawiono odpowiednio w tab. **2** oraz na rys. **1**.

Obie mieszanki, zarówno drobnoziarnista jak i gruboziarnista charakteryzują się ciągłością uziarnienia i mieszczą się w krzywych granicznych uziarnienia określonych dla mieszanek MCE przeznaczonych do podbudów.

Kolejnym krokiem było określenie składów mieszanek mineralnych (MM), które w swym składzie zamiast cementu zawierały innowacyjny środek wiążący (spoiwo). Jako mieszanki referencyjne przyjęto mieszanki gruboziarniste i drobnoziarniste, zawierające spoiwo cementowe oznaczone odpowiednio: MM_G_Ref i MM_D_Ref. Następnie zamiast cementu zastosowano innowacyjne spoiwa drogowe, zawierające w swym składzie cement, wapno i uboczne cementowe produkty pylaste (UCPP). Spoiw takich wykorzystano siedem, a różniły się one inną zawartością trzech składników: cementu, wapna i pyłów.

Spoiwo to miało za zadanie ograniczyć sztywność oraz zapewnić trwałość eksploatacyjną dla mieszanki MCE. Składy poszczególnych spoiw przedstawiono w tab. **3**.

W badaniach zastosowano siedem spoiw skomponowanych według planu eksperymentu z etapu I Programu „Nowoczesne technologie materiałowe" Techmatstrateg.

Na etapie projektowania składów wszystkich mieszanek mineralnych (MM) drobnoziarnistych i gruboziarnistych (16 mieszanek) określono dla nich następujące cechy: maksymalną gęstość objętościową, maksymalną gęstość objętościową szkieletu oraz wilgotność optymalną. Wyniki tych badań przedstawiono w tab. **4**.

Nieznaczne różnice w wartościach wilgotności optymalnych, gęstości objętościowych pomiędzy poszczególnymi składami, wynikają z niewielkich różnic, jakie występują w składzie spoiwa innowacyjnego.

Dla tak określonych składów mieszanek mineralnych (MM) wraz z innowacyjnymi spoiwami, wg tab. **4**, wykonano mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne (MCE). Zastosowano emulsję asfaltową C60B10ZM/R. Wyniki składów mieszanek drobnoziarnistych i gruboziarnistych ze spoiwem innowacyjnym przedstawiono w tab. **5**.

W kolejnym etapie prac przystąpiono do analiz cech wytrzymałościowych przedmiotowych mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych.

## Program badawczy

Badania wykonano dla mieszanek MCE gruboziarnistych z różnymi spoiwami hydraulicznymi o oznaczeniach: MCE_G_Ref, MCE_G_1V, MCE_G_2V, MCE_G_3V, MCE_G_4C, MCE_G_5C, MCE_G_6C, MCE_G_7C oraz drobno-

***Tab. 4.*** *Wilgotność optymalna mieszanek MM ze spoiwami innowacyjnymi*

| Mieszanka mineralna | | MM_G_1V | MM_G_2V | MM_G_3V | MM_G_4C | MM_G_5C | MM_G_6C | MM_G_7C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Wilgotność optymalna | G | 7,77 % | 7,74 % | 7,62 % | 7,69 % | 7,64 % | 7,63 % | 7,76 % |
| Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu | | 2,172 g/cm$^3$ | 2,190 g/cm$^3$ | 2,176 g/cm$^3$ | 2,186 g/cm$^3$ | 2,190 g/cm$^3$ | 2,197 g/cm$^3$ | 2,185 g/cm$^3$ |
| Maksymalna gęstość objętościowa | | 2,341 g/cm$^3$ | 2,359 g/cm$^3$ | 2,342 g/cm$^3$ | 2,354 g/cm$^3$ | 2,357 g/cm$^3$ | 2,365 g/cm$^3$ | 2,355 g/cm$^3$ |
| Mieszanka mineralna | | MM_D_1V | MM_D_2V | MM_D_3V | MM_D_4C | MM_D_5C | MM_D_6C | MM_D_7C |
| Wilgotność optymalna | D | 7,98 % | 7,94 % | 7,83 % | 7,91 % | 7,86 % | 7,85 % | 7,95 % |
| Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu | | 2,139 g/cm$^3$ | 2,153 g/cm$^3$ | 2,146 g/cm$^3$ | 2,148 g/cm$^3$ | 2,149 g/cm$^3$ | 2,156 g/cm$^3$ | 2,147 g/cm$^3$ |
| Maksymalna gęstość objętościowa | | 2,310 g/cm$^3$ | 2,324 g/cm$^3$ | 2,314 g/cm$^3$ | 2,318 g/cm$^3$ | 2,318 g/cm$^3$ | 2,325 g/cm$^3$ | 2,318 g/cm$^3$ |

ziarnistych: MCE_D_Ref, MCE_D_1V, MCE_D_2V, MCE_D_3V, MCE_D_4C, MCE_D_5C, MCE_D_6C, MCE_D_7C.

Dla realizacji zadania kluczowe było przeprowadzenie badań: gęstości i gęstości objętościowej, zawartości wolnej przestrzeni, nasiąkliwości, wytrzymałości na ściskanie osiowe, wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITS, odporności na działanie czynników atmosferycznych AASHTO i PANK, TSR, ITSR, modułu sztywności w rozciąganiu pośrednim IT-CY.

W niniejszym opracowaniu szczegółowej analizie poddano odporność badanych mieszanek na czynniki atmosferyczne. W zależności od zastosowanej metody badania próbek uzyskano różne poziomy wytrzymałości, służące do oceny przydatności danego materiału do zastosowania w warstwach podbudowy nawierzchni drogowych. Porównano trzy stosowane metody badawcze: AASHTO, TSR i ITSR.

Idea badań odporności na działanie czynników atmosferycznych metodami TSR, ITSR i AASHTO jest analogiczna a różnica polega na sposobie kondycjonowania próbek. We wszystkich metodach do porównania odporności na działanie wody i mrozu służą próbki świadki tzw. "próbki suche - DRY". Oznacza się dla nich wytrzymałość na rozciąganie pośrednie ITS (indirect tensile strength) – ITSDRY. Badanie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITS wykonano wg [22]. Do analiz wykorzystano po trzy próbki cylindryczne (Marshalla) o nominalnej średnicy 101,5 mm i wysokości 63,5 mm, dla każdego zarobu i temperatury charakterystycznej wynoszącej +25°C. Próbki zagęszczano po 75 uderzeń na stronę w automatycznym ubijaku Marshalla. Z uwagi na obecność w składzie mieszanek cementu i spoiw hydraulicznych okres dojrzewania próbek wynosił 28 dni.

W trakcie badań dokonano szczegółowej rejestracji obciążającej siły potrzebnej do zniszczenia próbki. Wartość siły niszczącej wykorzystano do określenia wytrzymałości na rozciąganie pośrednie próbek suchych ITSDRY.

Przykładowy widok wykonywanego testu i próbek Marshalla pokazano na rys. **2**. Wytrzymałości na rozciąganie ITS obliczono z zależności (1):

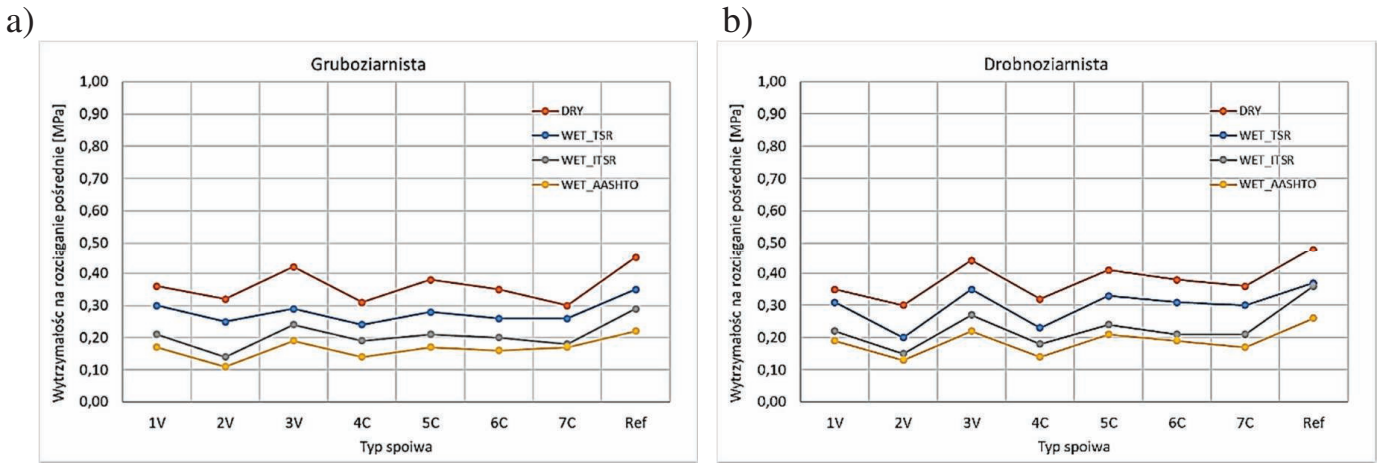
$$ITS = (2P)/(\pi D h) \qquad (1)$$

gdzie: *ITS* – wytrzymałość na rozciąganie pośrednie [MPa], *P* – wartość siły niszczącej [N], *D* – średnica próbki [mm], *h* – wysokość próbki [mm].

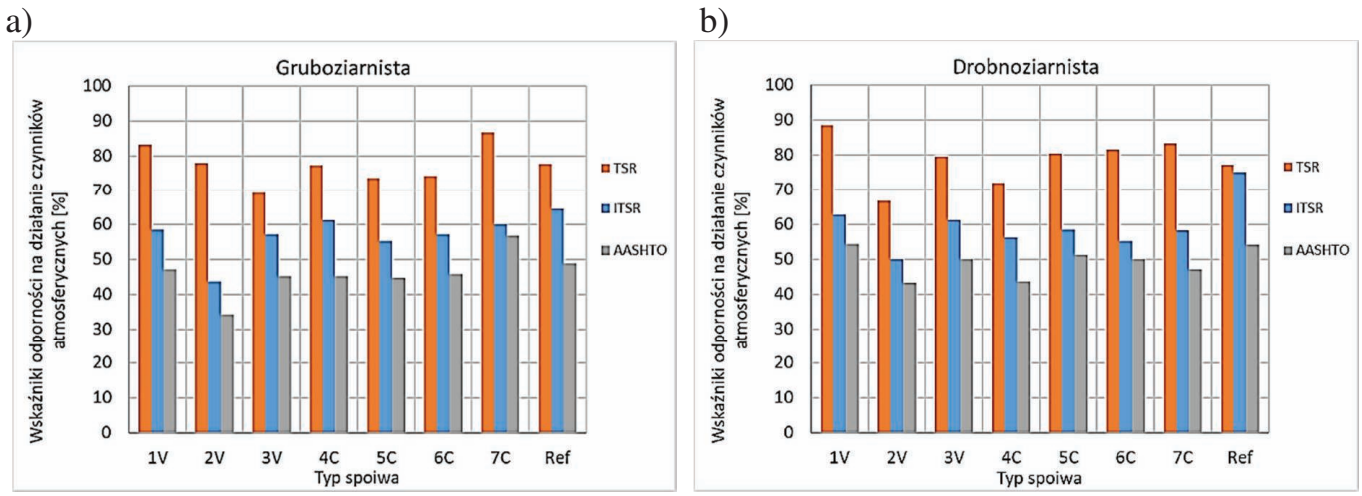
W metodzie TSR (odporność na działanie wody) wytrzymałość próbek suchych ITSDRY porównywana jest do wytrzymałości próbek nasączonych wodą ITSWET przez 24 h w temperaturze +25°C. Do analiz wykorzystano po trzy próbki cylindryczne (Marshalla) o nominalnej średnicy 101,5 mm i wysokości 63,5 mm, dla każdego zarobu i temperatury charakterystycznej.

W metodzie ITSR wg normy [21] i wytycznych technicznych [34] wytrzymałość próbek suchych ITSDRY porównywana jest do wytrzymałości próbek nasączonych wodą przez 72 h

***2****. Próbki do badań wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITS i schemat badania*




***3**. Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie – a) mieszanka MCE gruboziarnista, b) mieszanka MCE drobnoziarnista*




***4**. Odporność na działanie czynników atmosferycznych (TSR, ITSR, AASHTO) – a) mieszanka MCE gruboziarnista, b) mieszanka MCE drobnoziarnista*

***Tab. 5.** Skład mieszanek MCE*

| Składniki | Skład roboczy MM [%] | Skład **MCE_D** [%] | Skład **MCE_G** [%] |
|---|---|---|---|
| Destrukt asfaltowy **0/10mm (D)** lub **0/31,5mm (G)** | 40 | 34,4 | 34,5 |
| **0/31,5mm** kruszywo doziarniające , łamane | 50 | 43,0 | 43,1 |
| **0/2mm** kruszywo doziarniające, naturalne | 10 | 8,6 | 8,6 |
| **Cement** lub spoiwo (**1V,2V,3V,4C,5C,6C,7C**) | - | 3,0 | 3,0 |
| Emulsja asfaltowa C60B10ZM/R | - | 5,0 | 5,0 |
| Woda | - | 6,0 | 5,8 |

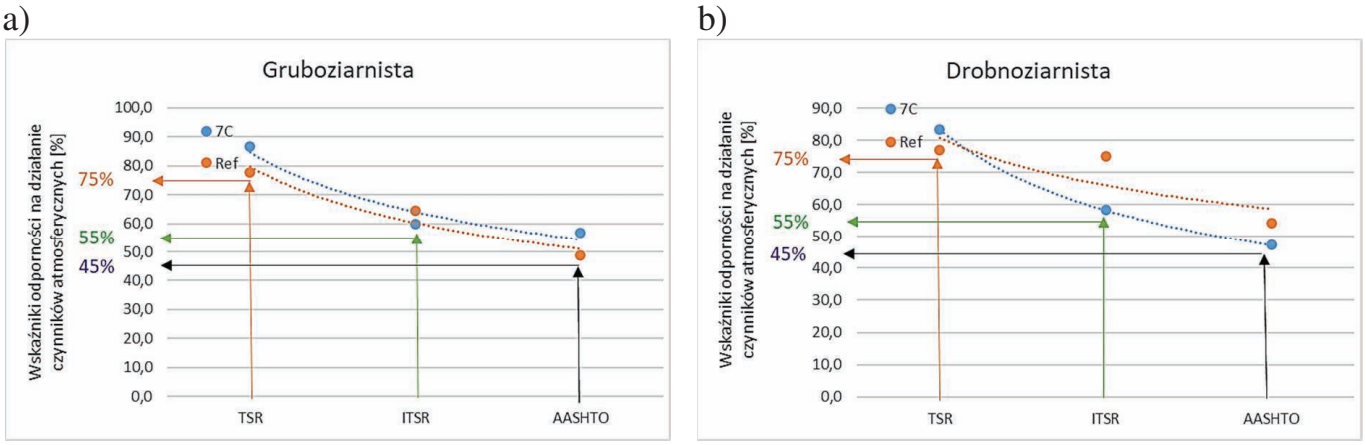
i poddanych jednemu cyklowi zamrażania ITSRWET w temp. -18°C przez min. 16 h. Do analiz wykorzystano trzy próbki cylindryczne (Marshalla) o nominalnej średnicy 101,5 mm i wysokości 63,5 mm, dla każdej mieszanki MCE.

W metodzie AASHTO wytrzymałość próbek suchych ITSDRY porównywana jest do wytrzymałości próbek nasączonych wodą w podciśnieniu 200 hPa przez 25 min. i poddanych 18 cyklom zamrażania i odmrażania w wodzie (-18°C przez 4 godziny i +20°C przez 4 godziny) - AASHTOWET [1]. Do określenia wytrzymałości AASHTOWET wykorzystano trzy próbki cylindryczne (Marshalla) o nominalnej średnicy 101,5 mm i wysokości 63,5 mm, dla każdej mieszanki MCE.

Na podstawie uzyskanych wyników szczegółowych określono wartości średnie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITSDRY, ITSWET, ITSRWET, AASHTOWET, dla wszystkich badanych mieszanek MCE z podziałem na mieszanki gruboziarniste i drobnoziarniste – rys. **3**.

Uzyskane wytrzymałości na rozciąganie pośrednie dla próbek "suchych" ITSDRY oraz próbek „mokrych" ITSWET, ITSRWET, AASHTOWET, posłużyły do wyznaczenia odporności na działanie czynników atmosferycznych TSR, ITSR, AASHTO dla wszystkich badanych mieszanek MCE z podziałem na mieszanki gruboziarniste i drobnoziarniste – rys. **4**. Wskaźniki odporności na działanie czynników atmosferycznych TSR, ITSR, AASHTO wyrażone są w procentach i wskazują na to jaka część wytrzymałości na rozciąganie pośrednie pozostała po procesie kondycjonowania próbek w porównaniu do próbek świadków tzw. „suchych".

Na podstawie przeprowadzonych analiz wyników badań stwierdzono, że najmniejsze spadki wytrzymałości na rozciągnie pośrednie – największa procentowa pozostałość wytrzymałości po kondycjonowaniu próbek w porównaniu do próbek „suchych", występuje w badaniu TSR. Jednokrotne nasączanie próbek wodą obniża ich




***5**. Odporność na działanie czynników atmosferycznych (TSR, ITSR, AASHTO) – a) mieszanka MCE gruboziarnista, b) mieszanka MCE drobnoziarnista*

wytrzymałość na rozciąganie pośrednie w granicach 10-30%. W przypadku jednokrotnego nasączania i zamrażania (metoda ITSR) spadek wytrzymałości sięga 30-55%, w zależności od zastosowanego spoiwa. Natomiast w przypadku jednokrotnego nasączenia i 18-krotnego zamrażania i rozmrażania (metoda AASHTO) spadki wytrzymałości sięgają nawet 65% w stosunku do próbek „suchych". W badaniu TSR najniższe spadki wytrzymałości zaobserwowano dla mieszanek z zawartością spoiw 1V i 7C, zarówno dla drobnoziarnistej jak i gruboziarnistej. W przypadku badań ITSR najmniejsze spadki wytrzymałości dotyczą mieszanek gruboziarnistych z zawartością spoiw Ref, 4C i 7C oraz drobnoziarnistych Ref, 1V i 3V. Spadki wytrzymałości w badaniu metodą AASHTO w najmniejszym stopniu wykazywane były w mieszankach gruboziarnistych z zawartością spoiw 7C i Ref, natomiast w drobnoziarnistych Ref, 1V i 5C.

Obecnie do oceny wrażliwości na działanie wody i mrozu konwencjonalnych mieszanek MCE stosowane jest kryterium odpowiadające badaniu ITSR. Wg [7] pozostała wytrzymałość na rozciąganie pośrednie dla próbek kondycjonowanych w wodzie nie może być niższa od 70% lub 80% w zależności od aktualnej kategorii ruchu KR – tab. **6**.

W badaniu tym stosuje się jednak tylko nasączanie wodą bez zamrażania oraz temperaturę badawczą +5°C. W opinii autorów niniejszej pracy bardziej adekwatne jest zastosowanie metody pielęgnacji próbek z zamrażaniem oraz temperatury badawczej +25°C. W ten sposób uzyska się ujednolicenie badań odporności na wodę i mróz dla mieszanek MCE i mieszanek MMA oraz adaptację do możliwych rzeczywistych warunków pracy warstwy MCE w nawierzchni. Przykładowe zależności wskaźnika odporności na działanie czynników atmosferycznych dla mieszanek z zawartością spoiw 7C i Ref, zarówno gruboziarnistych i drobnoziarnistych pokazano na rys. **5**. Mieszanki te wytypowano z uwagi na najlepsze, korzystne właściwości wytrzymałościowe wykazywane w całym procesie badawczym. Jednocześnie ukazano proponowane dopuszczalne minimalne kryteria oceny przydatności mieszanek MCE z destruktem asfaltowym, do zastosowania w warstwach podbudowy nawierzchni drogowych.

W wyniku przeprowadzonych prac badawczych zaproponowano wprowadzenie nowych kryteriów oceny przydatności dla MCE z destruktem asfaltowym, w zależności od stosowanej metody pielęgnacji próbek – tab. **7**.

***Tab. 6.** Wymagania w odniesieniu do próbek z mieszanki MCE [7]*

| Cecha | Ruch KR1-KR2 | Ruch KR3-KR4 |
|---|---|---|
| Odporność na działanie wody (pozostała wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po przechowywaniu próbek w wodzie), T=+5°C po 28 dniach, [%] | nie mniej niż 70 | nie mniej niż 80 |

***Tab. 7.** Wymagania dla próbek z mieszanki MCE z destruktem asfaltowym*

| *TSR [%] 25°C* | *ITSR [%] 25°C* | *AASHTO T283 [%] 25°C* |
|---|---|---|
| min. 75 | min. 55 | min. 45 |

## Podsumowanie

Na podstawie wykonanych analiz wytrzymałości na rozciągnie pośrednie zauważono, że istnieje wpływ warunków atmosferycznych na mieszanki MCE z zawartością dedykowanego spoiwa. Największą odporność na czynniki atmosferyczne wykazują próbki w badaniu metodą TSR, w którym wytrzymałość na rozciąganie pośrednie obniża się w zakresie 10÷30%, zarówno dla mieszanek gruboziarnistych, jak i drobnoziarnistych, w stosunku do wytrzymałości uzyskanej metodą ITS dla próbek suchych. Przy określaniu odporności metodą ITSR próbki obniżały swoją wytrzymałość w zakresie 30÷55% a przy określaniu metodą AASHTO próbki obniżały swoją wytrzymałość w zakresie 45÷65%.

W badaniu TSR najmniejsze spadki wytrzymałości występują w mieszankach z zawartością spoiw 1V i 7C, zarówno drobnoziarnistej jak i gruboziarnistej. W przypadku badań ITSR najmniejsze spadki wytrzymałości dotyczą mieszanek gruboziarnistych z zawartością spoiw Ref, 4C i 7C oraz drobnoziarnistych Ref, 1V i 3V. Spad-

ki wytrzymałości w badaniu metodą AASHTO w najmniejszym stopniu wykazywane były w mieszankach gruboziarnistych z zawartością spoiw 7C i Ref, natomiast w drobnoziarnistych Ref, 1V i 5C.

W ramach projektu zastosowano destrukt asfaltowy do wytworzenia nowych warstw nawierzchni drogowych, warstw podbudowy z mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Zastosowanie destruktu asfaltowego jako materiału odpadowego w mieszankach MCE pozwoli na redukcję kosztów budowy dróg oraz pozytywnie wpłynie na aspekty ochrony środowiska i ekologiczne współistnienie inwestycji ze środowiskiem.

W wyniku przeprowadzonych prac badawczych opracowano nowe kryteria oceny przydatności dla MCE z destruktem asfaltowym do zastosowania w warstwach podbudowy nawierzchni drogowych, pod względem odporności na działanie czynników atmosferycznych, w zależności od stosowanej metody pielęgnacji próbek (metody TSR, ITSR, AASHTO T283).

Przeprowadzone badania i analizy potwierdziły jednocześnie możliwość zastosowania spoiwa dedykowanego do wytworzenia mieszanek MCE. Mieszanki spełniają wymagania projektowania do zastosowania w warstwach konstrukcyjnych nowych nawierzchni drogowych. Mieszanki MCE zawierające innowacyjne spoiwo dedykowane mogą zostać wykorzystane do konstrukcji warstw podbudowy nawierzchni obciążonych ruchem do kategorii ruchu KR7.

Uzyskane wyniki badań posłużyły do opracowania wytycznych dotyczących procedur projektowania składu innowacyjnego środka wiążącego (trójskładnikowego) zwanego spoiwem dedykowanym do technologii wykonania warstwy z mieszanki mineralno-spoiwowej z emulsją asfaltową.

Niniejszy artykuł powstał w związku z realizacją zadań badawczych w projekcie pt. „Innowacyjna technologia wykorzystująca optymalizację środka wiążącego przeznaczonego do technologii recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni zapewniająca jej trwałość eksploatacyjną", w ramach wspólnego przedsięwzięcia „Nowoczesne technologie materiałowe" współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. ◄

## Materiały źródłowe

[1] AASHTO T283. Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage. 2011.

[2] AL-Ghurabi S. B., Al-Humeidawi B. H.: Evaluation of performance of hot mix asphalt contained various sizes of Reclaim asphalt pavement and polymer modified Bitumen. Materials Today: Proceedings, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.063.

[3] Arulrajah A., Disfani M. M., Horpibulsuk S., Suksiripattanapong C., Prongmanee N. Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications. Construction and Building Materials, 58, 245–57, 2014, https://doi.org/10.2016/j.conbuildmat.2014.02.025.

[4] Chomicz-Kowalska, A., Maciejewski K. Performance and viscoelastic assessment of high-recycle rate cold foamed bitumen mixtures produced with different penetration binders for rehabilitation of deteriorated pavements. Journal of Cleaner Production, 258, 120517, 2020, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120517.

[5] Cristelo N., Vieira C. S., de Lurdes Lopes M. Geotechnical and geo-environmental assessment of recycled construction and demolition waste for road embankments. Procedia Engineering, 143, 51–58, 2016, https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.007.

[6] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad - Szczegółowe specyfikacje techniczne D-04.10.01 - Wykonanie podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE), 2001.

[7] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad - Instrukcja projektowania i wbudowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE), Warszawa, 2019.

[8] Huber S., Henzinger C., Heyer D. Influence of water and frost on the performance of natural and recycled materials used in unpaved roads and road shoulders. Transportation Geotechnics, 22, 100305, 2020, https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100305.

[9] Issa R., Zaman M. M., Miller G. A., Senkowski L. J. Characteristics of Cold Processed Asphalt Millings and Cement-Emulsion Mix. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, Asphalt Mixtures, Materials and Construction, no. 1767, 2001.

[10] Kox S., Vanroelen G., Van Herck J., de Krem H., Vandoren B. Experimental evaluation of the high-grade properties of recycled concrete aggregates and their application in concrete road pavement construction. Case Studies in Construction Materials, 11, e00282, 2019, https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00282.

[11] Li G., Zhao Y., Pang S., Huang W. Experimental study of cement--asphalt emulsion composite. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 5, 1998.

[12] Liu L., Li Z., Cai G., Liu X., Yan S. Humidity field characteristics in road embankment constructed with recycled construction wastes. Journal of Cleaner Production, 259, 120977, 2020, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120977.

[13] Liu L., Li Z., Congress S. S. C., Liu

X., Dai B. Evaluating the influence of moisture on settling velocity of road embankment constructed with recycled construction wastes. Construction and Building Materials, 241, 117988, 2020, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117988.

[14] Löffler K., Schäfer V. Fundationsschichten aus Asphalt mit Schaumbitumen. Bitumen nr 2, 1998.

[15] López-Alonso M., Martinez--Echevarria., Garach L., Galán A., Ordoñez J., Agrela F. Feasible use of recycled alumina combined with recycled aggregates in road construction. Construction and Building Materials, 195, 249-257, 2019, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.084.

[16] Nanjegowda V. H., Biligiri K. P. Recyclability of rubber in asphalt roadway systems: A review of applied research and advancement in technology. Resources, Conservation & Recycling, 155, 104655, 2020, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104655.

[17] Nwakaire C. M., Yap S. P., Yuen C. W., Onn C. C., Koting S., Babalghaith A. M. Laboratory study on recycled concrete aggregate based asphalt mixtures for sustainable flexible pavement surfacing. Journal of Cleaner Production, 262, 121462, 2020, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121462.

[18] O'Mahony M. M., Milligan G. W. E. Use of recycled materials in subbase layers. Transportation Research Record No. 130, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 73–80, 1991.

[19] Oreto C., Veropalumbo R., Viscione N., Biancardo S. A., Russo F. Investigating the environmental impacts and engineering performance of road asphalt pavement mixtures made up of jet grouting waste and reclaimed asphalt pavement. Environmental Research, Volume 198, July 2021, 111277.

[20] OST D-04.10.01a. Szczegółowa Specyfikacja Techniczna: Podbudowa z mieszanki mineralno-cementowej z asfaltem spienionym (MCAS) wykonana w technologii recyklingu głębokiego na zimo. GDDKiA, Warszawa, 2013.

[21] PN-EN 12697-12. Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań - Część 12: Określanie wrażliwości na wodę próbek mineralno-asfaltowych.

[22] PN-EN 12697-23. Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 23: Oznaczanie wytrzymałości mieszanki mineralno-asfaltowej na rozciąganie pośrednie.

[23] Ren J., Wang S., Zang G. Effects of recycled aggregate composition on the mechanical characteristics and material design of cement stabilized cold recycling mixtures using road milling materials. Construction and Building Materials, 244, 118329, 2020, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118329.

[24] Ruttmar I. Destrukt asfaltowy: bogactwo niedostatecznie wykorzystane, edroga.pl.

[25] Skotnicki Z. Ł., Kuźniewski J., Szydło A. Research on the properties of mineral-cement emulsion mixtures using recycled road pavement materials. Materials, vol. 14, nr 3, art. 563, s. 1-23, 2021, https://doi.org/10.3390/ma14030563.

[26] Soleimanbeigi A., Edil T. B. Compressibility of recycled materials for use as highway embankment fill. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 141, 5, 2015, https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001285.

[27] Soleimanbeigi A., Edil T. B., Benson C. H. Engineering properties of recycled materials for use as embankment fill. Geo-Congress 2014 Technical Papers: Geo-Characterization and Modeling for Sustainability, Atlanta, 2014, 3645–3657, doi:10.1061/9780784413272.353.

[28] Sybilski D., Maliszewski M., Mularzuk R., Bańkowski W. Pierwsze zastosowanie asfaltu kompaktowego w Polsce. Drogownictwo nr 4, 2006.

[29] Tavira J., Jiménez J. R., Ledesma E. F., López-Uceda A., Ayuso J. Real--scale study of a heavy traffic road built with in situ recycled demolition waste. Journal of Cleaner Production, 248, 119219, 2020, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119219.

[30] Vegas I., Ibañez J.A., Lisbona A., de Cortazar A. S., Frías M. Pro--normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. Construction and Building Materials, 25, 5, 2674–2682, 2011, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.018.

[31] Veith G. Kaltrecycling mit Schaumbitumen. Strassen und Autobahnen nr 7-8, 2001.

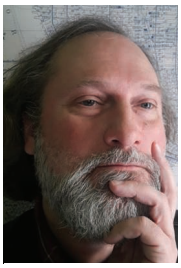
[32] Wang Q-Z., Wang N-N., Tseng M-L., Huang Y-M., Li N-l. Waste tire recycling assessment: Road application potential and carbon emissions reduction analysis of crumb rubber modified asphalt in China. Journal of Cleaner Production, 249, 119411, 2020, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119411.

[33] Wróbel M., Woszuk A., Ratajczak M., Franus W. Properties of reclaimed asphalt pavement mixture with organic rejuvenator. Construction and Building Materials, 271, 121514, 2021.

[34] WT-2 – cz. I. Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania techniczne. Warszawa, 2014.

# Integracja lotnisk w Polsce z lokalnym transportem szynowym

## Integration of Polish airports with local rail transport



***Maciej Kruszyna***

*dr hab. inż. prof. PWr*

*Politechnika Wrocławska,*
*Wydział Budownictwa Lądowego*
*i Wodnego, Katedra Dróg,*
*Mostów, Kolei i Lotnisk*

*maciej.kruszyna@pwr.edu.pl*

**Streszczenie:** Spośród 15 polskich lotnisk obsługujących regularne połączenia pasażerskie tylko 5 jest zintegrowanych z lokalnym pasażerskim transportem szynowym, przy czym integracja ta ma różną skalę, co przekłada się na efektywność połączeń intermodalnych i ich popularność wśród podróżnych. Istnieją także liczne plany budowy lub modernizacji linii kolejowych, a incydentalnie także tramwajowych celem usprawnienia dostępności portów lotniczych. Autor omawia istniejące i planowane (a także potencjalne) rozwiązania koncentrując się na transporcie lokalnym (aglomeracyjnym). Zagadnienie integracji CPK z siecią kolei dalekobieżnej jest tylko zarysowane jako temat o odmiennej specyfice i jako taki zasługujący na odrębną publikację.

***Słowa kluczowe:*** *Lotnisko; Lokalny transport szynowy; Integracja*

**Abstract:** Out of 15 Polish airports serving regular passenger connections, only 5 are integrated with local passenger rail transport, and this integration has a differ scale, which translates into the efficiency of intermodal connections and their popularity among travelers. There are also numerous plans to build or modernize railway lines and, incidentally, also tram lines to improve airport accessibility. Author of this paper discusses the existing and planned (as well as potential) solutions, focusing on local (agglomeration) transport. The issue of integration of CPK (Centralny Port Komunikacyjny = Central Transportation Hub) with the long-distance rail network is only outlined as a topic with different specificity and as such deserves a separate publication.

***Keywords:*** *Airport; Local rail transport; Integration*

### Wprowadzenie

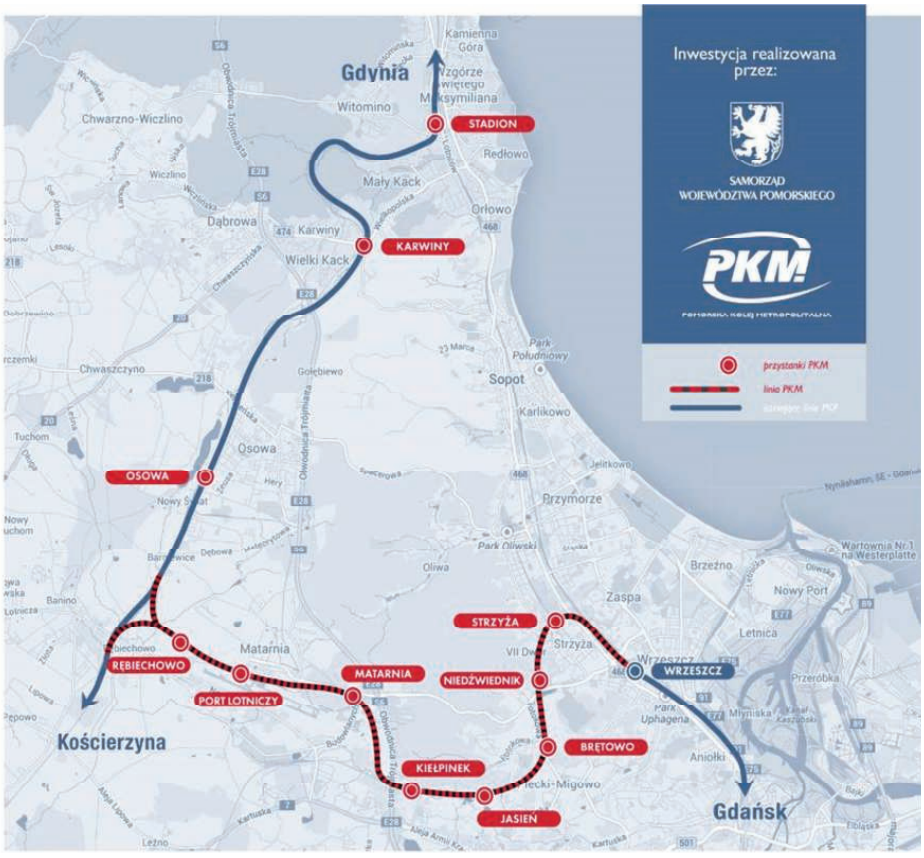
Zapewnienie możliwości dojazdu na lotnisko transportem szynowym (a w szczególności kolejowym) jest zagadnieniem ważnym z uwagi na równoważenie podziału zadań przewozowych i kształtowanie ekologicznej mobilności. Nabiera to znaczenia w portach lotniczych wielkich i dużych, ale także warte jest rozważenia dla mniejszych lotnisk. Na świecie zaobserwować można wzrastającą rolę dojazdów na lotniska bez wykorzystania samochodu i w wielu lokalizacjach pojawiają się nowe inwestycje w infrastrukturę transportu szynowego integrowaną z terminalami lotnisk. Wyróżnić można dwa podejścia (niekoniecznie konkurencyjne względem siebie): włączenie lotniska w sieć szynowego transportu lokalnego (aglomeracyjnego); włączenie lotniska w sieć szynowego transportu dalekobieżnego. Obie te formy są obecne np. na lotnisku Frankfurt Main (w pierwszej dziesiątce lotnisk świata), gdzie funkcjonują odrębne przystanki dla obu typów połączeń, przy czym nowszy dotyczy transportu dalekobieżnego.

W Polsce funkcjonują lotniska małej i średniej wielkości (z punktu widzenia przewozów europejskich). Niemniej zasadne jest realizowanie połączeń kolejowych do wszystkich lotnisk które mają mniej lub bardziej regularne przewozy pasażerskie, także z uwagi na potencjalną intensyfikację przewozów, która z kolei może być efektem poprawy dostępności lotniska po uruchomieniu dojazdów koleją. Za publikacją [3] przytacza się mapę lokalizacji istotnych portów lotniczych w Polsce na tle lokalnych sieci kolejowych (rysunek **1**). Wskazano 15 lotnisk wyróżniając te do których doprowadzono transport szynowy (Gdańsk, Olsztyn – Szymany, Warszawa Okęcie, Lublin i Kraków) oraz pozostałe (Szczecin – Goleniów, Bydgoszcz, Poznań, Zielona Góra – Babimost, Wrocław, Łódź, Modlin, Katowice – Pyrzowice, Radom i Rzeszów). W artykule przedstawiono wybrane rozwiązania, zarówno funkcjonujące lub planowane czy realizowane. Ograniczono się do połączeń o charakterze lokalnym nie uwzględniając zagadnienia CPK.

### Przykład 1: Gdańsk, model być może idealny?

Stosunkowo nowym elementem systemu kolei aglomeracyjnej w Trójmieście jest Pomorska Kolej Metropolitarna, PKM. Linia PKM została wybudowana w latach 2013–2015 przez konsorcjum przedsiębiorstw Budimex i Ferrovial Agroman na zlecenie spółki Pomorska Kolej Metropolitalna, która jest zarządcą tej linii. Ruch pociągów pasażerskich

*1. Mapa lokalizacji ważnych lotnisk w Polsce wraz z układami lokalnych sieci kolejowych [3]*




*2. Linia PKM obsługująca m.in. lotnisko w Gdańsku [4]*

rozpoczęto 1 września 2015, a ich operatorem jest PKP Szybka Kolej Miejska w Trójmieście. Celem programu PKM było podniesienie poziomu spójności społecznej i gospodarczej województwa pomorskiego, poprzez wdrożenie zintegrowanego z układem komunikacji publicznej Metropolii Trójmiejskiej, systemu KR. Program objął swoim zasięgiem głównie obszar aglomeracyjny Trójmiasta oraz powiaty: bytowski, kościerski, kartuski. Pierwszy etap inwestycji oznaczał odbudowę sieci poprzez rewitalizację nieczynnej od 1945 roku Kolei Kokoszkowskiej oraz budowę odcinka łączącego południowe dzielnice Miasta Gdańska z Lotniskiem w Rębiechowie oraz linią kolejową Gdynia – Kościerzyna. Planowane rozwiązanie otwarło Metropolię na Kaszuby umożliwiając dojazd mieszkańców i turystów do Kartuz, Kościerzyny czy Bytowa oraz ułatwiając i znacznie przyspieszając podróż z głębi województwa do Trójmiasta.

Trasa PKM (rysunek **2**) składa się z kilku części: odcinka istniejącej do 1945 roku linii kolejowej Gdańsk Wrzeszcz – Kokoszki (do km 9,8 tej linii), odcinka budowanej od podstaw linii kolejowej do miejsca włączenia w linię 201 (Nowa Wieś Wielka – Kościerzyna – Gdynia Port (do ok km 18,3) wraz z łącznicą od projektowanej stacji technicznej (Barniewicka) w kierunku Kościerzyny o długości ok 1,35 km. Projekt objął także budowę 8 przystanków. Przy większości przystanków PKM kształtowane są węzły przesiadkowe (tramwaj, autobus, Park and Ride). Budowę dróg dojazdowych, parkingów oraz nowych przystanków autobusowych i tramwajowych realizuje miasto Gdańsk, które w ten sposób włączyło się do projektu. Taka realizacja projektu, gdzie województwo (jako główny inwestor) bierze na siebie ciężar budowy linii kolejowej ze wszystkimi przystankami, a samorząd lokalny buduje drogi dojazdowe i węzły przesiadkowe przy poszczególnych przystankach sprawdziła się w realizacji projektu i może być wzorem dla innych systemów. Inwestycja włączyła w sieć kolejową lotnisko nie poprzez ślepą bocznicę, a przystanek na przelotowej linii kolejowej. Jest to rozwiązanie bardzo efektywne i wyjątkowe na skalę Polski.

### Przykład 2: Kraków, problem z przystankiem końcowym

Na terenie województwa małopolskiego działa lokalny przewoźnik Koleje Małopolskie (KMŁ). KMŁ to przewoźnik kolejowy utworzony przez samorząd województwa małopolskiego uchwałą z dn. 2 grudnia 2013 roku [7]. Spółka została powołana w celu świadczenia usług użyteczności publicznej w zakresie transportu publicznego poprzez zapewnienie efektywnej organizacji i

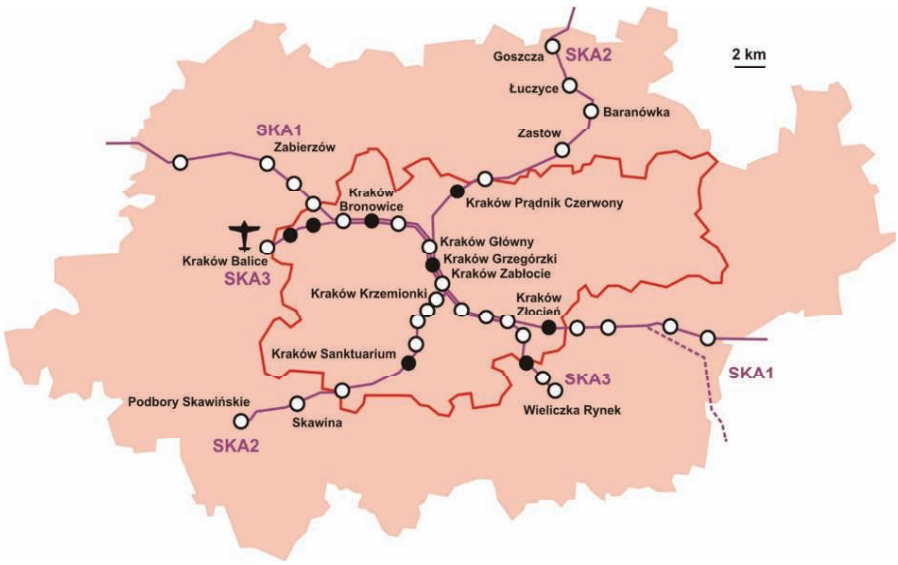
funkcjonowania pasażerskiego ruchu kolejowego na terenie województwa małopolskiego. W ostatnich latach spółka realizowała przewozy na różnych trasach określanych jako Szybka Kolej Aglomeracyjna (SKA), choć niektóre z tych linii mają charakter kolei regionalnej. Najbardziej miejski charakter ma trasa: Wieliczka Rynek – Kraków Główny – Kraków Lotnisko (Balice) – rysunek **3**, choć i tu trwa zagęszczanie przystanków oraz rozbudowa infrastruktury liniowej.

Docelowo powstanie sieć KA o znacznym udziale torowisk wyodrębnionych z ruchu dalekobieżnego i dużej gęstości przystanków. Pozwoli to na usprawnienie połączeń w ramach Krakowskiego Obszaru Funkcjonalnego (KrOF). KrOF został zidentyfikowany w projekcie RPO województwa małopolskiego jako delimitacja interwencji w formule ZIT [5]. Interwencje w ramach ZIT będą realizowana na terenie obszaru o intensywnych powiązaniach funkcjonalnych pomiędzy Krakowem i otaczającymi go gminami: Biskupice, Czernichów, Igołomia Wawrzeńczyce, Kocmyrzów Luborzyca, Liszki, Michałowice, Mogilany, Niepołomice, Skawina, Świątniki Górne, Wieliczka, Wielka Wieś, Zabierzów, Zielonki. Jest to obszar wydzielony z subregionu: Krakowski Obszar Metropolitalny – Metropolia Krakowska. Łączna powierzchnia obszaru ZIT wynosi 1275 km$^2$, w tym 326,8 km$^2$ zajmuje miasto Kraków, a 948,2 km$^2$ – strefa podmiejska. Liczba ludności KrOF w końcu 2013 r. wynosiła 1,03 mln, w tym 275 tys. osób zamieszkiwało strefę podmiejską [3].

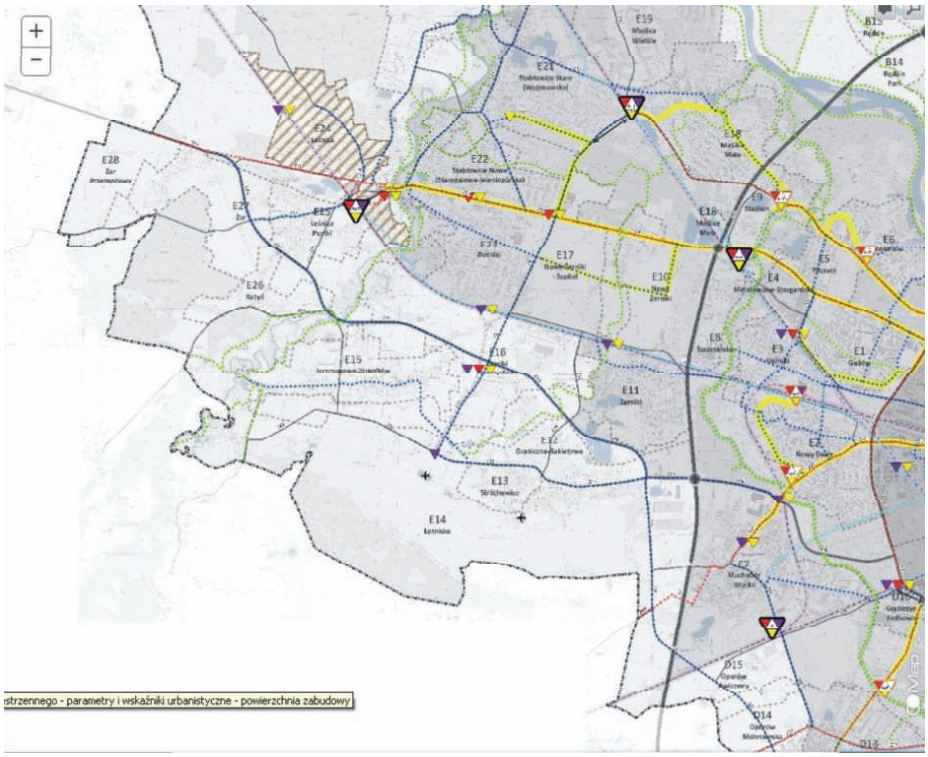
Przykład krakowski cechuje trasowanie linii kolejowej na lotnisko jako dodatkowego i końcowego przystanku w sieci połączeń. Zatem z odcinka sieci doprowadzonego na lotnisko korzystać będą wyłącznie (lub niemal) wyłącznie pasażerowie zainteresowani lotniskiem. Podobna konfiguracji dojazdu do lotnisk funkcjonuje w Warszawie (Okęcie), Lublinie i Szymanach.

### Przykład 3: Wrocław, problem z trasowaniem linii kolejowej

W ramach systemu linii głównych aglomeracji rozważa się zagadnienie połączenia do portu lotniczego [2]. Z jednej strony system transportu publicznego musi umożliwić efektywne dotarcie do lotniska mieszkańcom całej aglomeracji (a nawet większego obszaru oddziaływania). Z drugiej strony, podróże związane z lotniskiem nie mają charakteru codziennych aktywności mieszkańców aglomeracji (wyłączywszy dojazdy do pracy na lotnisku). Decydujące znaczenie odnośnie decyzji o budowie nowego połączenia na lotnisko mogą mieć: wielkość ruchu lotniczego i lokalna konfiguracja sieci transportowych. W niektórych przypadkach okazać się może że najsensowniejszą opcją jest wykreowanie specjalnej linii łączącej lotnisko z centrum aglomeracji (na przykład z głównym węzłem – dworcem kolejowym). W takim przypadku możliwe jest wprowadzenie dodatkowego, specyficznego środka transportu (w tym BRT, kolei magnetycznej). Z drugiej strony, atrakcyjne może wprzęgnięcie połączenia na lotnisko w system „normalnych" linii głównych (także kolejowych). Daje to możliwość dojazdu bez przesiadki do portu lotniczego z wybranych obszarów aglomeracji. Taka opcja musi jednak wynikać ze „sprzyjającego" przebiegu istniejących tras. Przeprowadzenie zbyt kosztownych inwestycji dla włączenia lotniska




***3**. Sieć SKA w Aglomeracji Krakowskiej [3]*



***4**. Fragment Studium Zagospodarowania i Kierunków Rozwoju Wrocławia prezentujący m.in. potencjalne połączenie kolejowe na lotnisko [6]*

***5**. Informacja o inwestycji dotyczącej rewitalizacji linii kolejowej numer 182 [1]*

w infrastrukturę wydaje się być nieefektywne.

Taki problem obecny jest we Wrocławiu, gdzie lotnisko położone jest pomiędzy dwoma ważnymi liniami kolejowymi (274 do Wałbrzycha i dalej, 275 do Legnicy i dalej), ale w dość dużej odległości od nich (rysunek **4**). Z jednej strony stwarza to potencjalne możliwości stworzenia połączenia kolejowego na lotnisko nie tylko z Wrocławia ale i innych miejscowości regionu. Z drugiej utrudnia decyzje odnośnie planowania. Faktycznie w minionych latach sformułowano liczne koncepcje połączenia do jednej bądź drugiej linii – z przystankiem końcowym „lotnisko". Koncepcja na rysunku 4 pokazuje podłączenie do linii 275. Istnieje też koncepcja spięcia obu linii z „przelotem" przez lotnisko – bardzo atrakcyjna funkcjonalnie, ale wymagająca tunelu kolejowego pod polem wzlotów, co z technicznego punktu widzenia nie jest niemożliwe, ale jest drogie. Z uwagi na powyższe uwarunkowania zadanie doprowadzenia kolei do wrocławskiego lotniska nadal pozostaje w sferze koncepcji. Podobna sytuacja (formułowanie koncepcji) dotyczy także innych lotnisk w Polsce, spośród których wymienić można: Poznań, Szczecin (Goleniów), Rzeszów, Bydgoszcz, Modlin czy Babimost. Omówienie tych koncepcji znaleźć można m.in. w [3].

### Przykład 4: Katowice – Pyrzowice, nowa realizacja

Interesująca sytuacja dotyczy aglomeracji górnośląsko- zagłębiowskiej i funkcjonującego na jej terenie lotniska w Pyrzowicach. Lotnisko to leży pomiędzy liniami na których funkcjonują połączenia pasażerskie (stacje: Tarnowskie Góry, Zawiercie), a w jego sąsiedztwie przebiega linia 182 aktualnie rewitalizowana do przewozów pasażerskich, w tym dla obsługi lotniska.

W wyniku inwestycji [1] podróż koleją z Zawiercia będzie trwała 23 min, a z Tarnowskich Gór niecałe 20 min. Przejazdy z Katowic i z Częstochowy zajmą około 1 godz. Poza stacją Pyrzowice Lotnisko pojawią się nowe przystanki: Miasteczko Śląskie Centrum, Mierzęcice, Zawiercie Kądzielów. Z kolei na stacjach Tarnowskie Góry, Siewierz i Poręba dojdzie do modernizacji peronów, a Zawiercie wzbogaci się o nowy peron (rysunek **5**). Realizacja projektu „Rewitalizacja i odbudowa częściowo nieczynnej linii kolejowej nr 182 Tarnowskie Góry–Zawiercie" pochłonie 660 mln zł netto, przy czym większość tej kwoty pokryje dofinansowanie ze środków unijnych z Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko w wysokości przekraczającej 500 mln zł. Zakończenie inwestycji ma nastąpić w II kwartale 2023 r.

Realizowane połączenie na lotnisko Pyrzowice nie stworzy najszybszego połączenia z Katowicami, ale z perspektywy całej aglomeracji, czy województwa śląskiego oraz wobec faktu włączenia w regionalny system połączeń kolejowych z pewnością będzie atrakcyjnym jego elementem. Pozostaje życzyć powodzenia innym portom lotniczym w realizacji planów i koncepcji włączenia ich w sieć transportu kolejowego.

### Podsumowanie

Do kilku lotnisk w Polsce doprowadzono połączenie kolejowe. W innych lokalizacjach planuje się takie inwestycje bądź są one już w realizacji. Z pewnością rozwiązania takie są korzystne tworząc alternatywne możliwości dotarcia do lotnisk. W świetle zasad zrównoważonej mobilności (i rozwoju) wartościowy jest jak największy udział podróży nie samochodowych, w tym związanych z lotniskami. Prezentowane przykłady wskazują że najbardziej efektywne trasowanie linii na lotnisko polega na włączeniu jej w system transportu regionalnego. Prowadzenie linii kolejowej wyłącznie do portu lotniczego ogranicza dostępność oraz liczby pasażerów. Jednak nie zawsze możliwe (efektywne ekonomicznie) jest takie zaplanowanie przebiegu linii, aby przystanek „lotnisko" nie był końcowym. Na przeszkodzie mogą stać uwarunkowania zagospodarowania przestrzennego, bariery trasowania, istniejąca zabudowa itp. W miarę możliwości zalecany jest jednak układ przelotowy z uruchamianiem tras przebiegających przez obszar lotniska, a nie służących wyłącznie obsłudze ruchu lotniczego. ◀

### Materiały źródłowe

[1] https://inzynieria.com/drogi/wiadomosci/61006,wiecej-prac-na-budowie-linii-kolejowej-do-katowickiego-lotniska-film,inwestycja-za-660-mln-zl@inzynieria.com
[2] Kruszyna M. Klucz do planowania transportu publicznego w aglomeracji "30/6". Studia nad Rozwojem Dolnego Śląska. 2014, nr 3, s. 9-63.
[3] Kruszyna M. „Koleje miejskie i regionalne w Polsce", Monografia, Łódź: Księży Młyn Dom Wydawniczy, 2018.
[4] Materiały PKM
[5] Strategia Zintegrowanych Inwestycji Terytorialnych dla Krakowskiego Obszaru Funkcjonalnego http://metropoliakrakowska.pl/zit/strategia
[6] Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Wrocławia uchwalone 11 stycznia 2018 r.
[7] www.malopolskiekoleje.pl

# 28 lat
## na rynku budowlanym

KONSORCJUM PROJEKTOWO-WYKONAWCZE
**EKOBUDOWA**
SP. Z O.O.

**PROJEKTOWANIE**

**WYKONAWSTWO**

- **wentylacja i klimatyzacja**
- **instalacje grzewcze, gazowe oraz wodno-kanalizacyjne**
- **chłód technologiczny**
- **instalacje technologiczne: próżni, sprężonego powietrza, pary i oleju termalnego**
- **kotłownie wodne, parowe, pary i oleju termalnego**
- **instalacje elektryczne**
- **rozdzielnice elektryczne,**
- **automatyka przemysłowa i obiektowa**
- **budownictwo ogólne, przemysłowe i drogowe**


97-400 Bełchatów
ul. Owocowa 13
ekobudowa@ekobudowa.com.pl

tel.: +48 44 634 86 31
fax: +48 44 634 86 37
www.ekobudowa.com.pl


JAKOŚĆ ROKU ZŁOTO · CERTYFIKAT Złoty Płatnik · CWB CERTYFIKAT WIARYGODNOŚCI BIZNESOWEJ · Diamenty miesięcznika Forbes · ISOCERT · PRZEDSIĘBIORSTWO FAIR PLAY

# TOROMIERZ INERCYJNY iTEC
## Dokładny pomiar strzałek

www.graw.com

REKLAMA

GM ROADS

## CZAS NA INNOWACYJNE **BUDOWNICTWO**

Oferujemy **profesjonalne usługi** z zakresu:

- budowy infrastruktury komunikacyjnej, sieci instalacyjnych i obiektów hydrotechnicznych,
- wykonywania pomiarów geodezyjnych, tworzenia map do celów projektowych, wytyczenia budynku i sieci.

W BUDOWNICTWIE WYBIERZ FIRMĘ,
**KTÓREJ MOŻESZ ZAUFAĆ**

Zobacz, co już wybudowaliśmy
i dla kogo pracowaliśmy:
**www.gm-roads.pl**

**Biuro:**
ul. Krzemieniecka 47,
54-613 Wrocław

**Budownictwo inżynieryjne:**
tel.: (71) 300 12 40
e-mail: info@gm-roads.pl

**Geodezja:**
tel.: 697 660 932
e-mail: m.wozniak@gm-roads.com

**Siedziba firmy:**
ul. Wrocławska 41, Łażany
58-130 Żarów

REKMA

**REKMA Sp. z o.o.**
ul. Szlachecka 7
32-080 Brzezie
tel. +48 12/633 59 22
fax +48 12/397 52 20

# www.rekma.pl

- Dylatacje bitumiczne EDM typ Rekma
- Dylatacje mechaniczno-asfaltowe SILENT-JOINT RESA
- Szczeliny dylatacyjne w nawierzchniach betonowych i asfaltowych
- Naprawa spękań nawierzchni
- Specjalistyczne cięcie nawierzchni betonowych i asfaltowych
- Wypełnianie szczelin dylatacyjnych w torowiskach tramwajowych
- Natrysk środkami hydrofobowymi i hydrofilowymi
- Rowkowanie (grooving) nawierzchni
- Specjalistyczne wiercenie otworów pod kotwy i dyble
- Kruszenie nawierzchni betonowych metodą ultradźwiękową – RMI

## SPECJALISTYCZNE PRACE DROGOWE

POLSKA

CSBETON

## CS-BETON Polska Sp. z o.o.

Pl. Solny 14 / 3, 50-062 Wrocław

tel.: +48 787 540 853

e-mail: robert.stawecki@csbeton.pl

web: www.csbeton.pl