

Mgr inż. MAKSYMILIAN ŁAZAROWICZ (ORCID: 0009-0003-1409-1337)

Politechnika Gdańska

Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

PORR S.A.

Mgr inż. JACEK KRZEMIŃSKI

PORR S.A.

Dr hab. inż. PIOTR JASKUŁA (ORCID: 0000-0002-1563-2778)

Politechnika Gdańska

Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

## Ocena wpływu wybranych parametrów materiałowych i technologicznych dybli na zachowanie nawierzchni z betonu cementowego

### *Evaluation of the impact of selected material and technological parameters of dowel bars on the behaviour of Portland Cement Concrete pavement*

**STRESZCZENIE:** W ostatnich 10 latach zauważono znaczny wzrost zastosowania nawierzchni z betonu cementowego w krajowej sieci dróg szybkiego ruchu. Wiodące wśród nawierzchni z betonu cementowego są nawierzchnie dyblowane i kotwione. Cechą charakterystyczną tego rozwiązania jest podzielenie jednorodnej nawierzchni na szereg płyt poprzez wykonanie poprzecznych i podłużnych szczelin dylatacyjnych. Ich zadaniem jest zapobiegnięcie powstawaniu losowych spękań skurczowych. Wbudowanie dybli i kotew zwiększa możliwość przenoszenia obciążenia drogowego określanego miarą współpracy płyt, a także zapewnia im swobodny ruch spowodowany obciążeniem termicznym. Prawidłowa praca dybli zależy od sposobu ich osadzenia, materiału, z jakiego zostały wykonane, czy parametrów geometrycznych jak długość, średnica czy kształt przekroju. W artykule dokonano przeglądu literaturowego mającego na celu określenie wpływu parametrów dybli na zachowanie się nawierzchni z betonu cementowego.

**Słowa kluczowe:** dyble, nawierzchnia z betonu cementowego, klawiszowanie, paczenie, naprężenia w płycie betonowej.

**ABSTRACT:** In the last 10 years it has been seen a significant increase the application of Portland Cement Concrete (PCC) pavements on the national highway network. The leading technology among cement concrete pavements are the dowelled and anchored ones. The distinctive feature of this solution is the division of the homogeneous pavement into a series of slabs by means of contraction and construction joints. Their purpose is to prevent the formation of random shrinkage cracks. The incorporation of dowels and anchors, on the other hand, improves the road load-bearing capacity determined by a measure of the cooperation of the slabs and also ensures that the slabs move freely due to thermal loading. The correct operation of dowels depends on their embedment, the material from which they are made, or geometric parameters such as length, diameter or cross-sectional shape. In this paper, a literature review is carried out to determine the influence of the dowel bar parameters on the behaviour of cement concrete pavements.

**Keywords:** dowel bars, concrete pavements, faulting, curling, stresses in concrete slab.

Na nawierzchnię z betonu cementowego działają trzy grupy obciążeń, tj. reologiczne, środowiskowe oraz od ruchu pojazdów [1].

Obciążenia reologiczne występują zaraz po wykonaniu nawierzchni i mają związek z procesami skurczu oraz zmian objętościowych. Wynikające z tego naprężenia w stosunkowo cienkiej płycie, w porównaniu z jej szerokością i długością, prowadzą z kolei do samoistnych

spękań skurczowych występujących losowo. Aby przeciwdziałać temu zjawisku, niedługo po stwardnieniu betonu dzieli się płytę na mniejsze części, wykonując poprzeczne i podłużne nacięcia dylatacyjne [2], co pozwala kontrolować ich lokalizację. Na skutek dalszego przyrostu wytrzymałości i zachodzącego skurczu beton pęka w śladzie nacięć na całą swoją grubość, dzieląc nawierzchnię na szereg płyt.

Obciążenie środowiskowe to ogół czynników oddziałujących na nawierzchnię poza ruchem pojazdów. Zaliczyć do nich należy m.in. temperaturę, wilgotność czy opady atmosferyczne. Na skutek różnic temperatury między dolną i górną powierzchnią nawierzchni, następuje zjawisko paczenia (ang. curling), czyli odkształcania się płyt [3]. Gdy temperatura górnej powierzchni jest wyższa niż dolnej, płyta wygina się wypukle. Na górnej powierzchni następuje koncentracja naprężeń ściskających, natomiast na spodzie rozciągających. Z kolei gdy temperatura górnej powierzchni jest niższa niż dolnej, płyta wygina się wklęsle, a układ powstałych naprężeń jest odwrotny niż opisano wcześniej. Gdy swobodny ruch płyt jest ograniczony, paczenie jest szczególnie niebezpieczne z uwagi na powstające naprężenia rozciągające w betonie.

Obciążenie od ruchu pojazdów jest ostatnią grupą oddziaływania na nawierzchnie z betonu cementowego. Szczelina dylatacyjna jest najsłabszym punktem nawierzchni z uwagi na wprowadzoną w nich nieciągłość. Oddziaływanie pojazdu jest przenoszone między płytami dwójako – przez oddziaływanie ścinające pomiędzy poszczególnymi ziarnami kruszywa w nieregularnej szczelinie oraz poprzez dyble [4]. Mechanizm przenoszenia obciążenia wyłącznie poprzez kruszywo nie jest efektywny, ponieważ z badań wynika, że wskaźnik współpracy takich płyt wynosi 20÷60% [5]. Wartości te wskazują, że większość obciążenia, działającego punktowo nie jest przekazywane na sąsiednie płyty, a to oznacza zwiększenie się naprężeń i szybszą degradację nawierzchni poprzez spękania oraz uskoki między płytami. Dlatego w trakcie układania nawierzchni w szczelinach dylatacyjnych poprzecznych wprowadzane są dyble, a w podłużnych kotwy. Ich zadaniem jest przenoszenie obciążeń między płytami, a także umożliwienie swobodnego ruchu płyt wynikającego z rozszerzania się i kurczenia betonu pod wpływem temperatury. Właściwie wbudowane dyble pozwalają osiągnąć wskaźnik współpracy płyt powyżej 90%, co wskazuje na bardzo dobrą pracę połączenia.

Prawidłowa praca dybli jest zdefiniowana ich cechami geometrycznymi (średnica i długość), położeniem w szczelinie dylatacyjnej oraz właściwościami materiałowymi. Im lepiej te parametry są dobrane do rozpatrywanego przypadku konstrukcji, tym dłużej nawierzchnia dyblowana jest w stanie prawidłowo pracować bez przekroczenia progu zmęczenia.

W artykule dokonano przeglądu literaturowego wpływu wspomnianych parametrów dybli na zachowanie nawierzchni z betonu cementowego.

### Czynniki wpływające na położenie dybli

Czynniki wpływające na położenie dybli można podzielić na dwie grupy – zależne od sposobu ich wbudowania oraz zależne od konsystencji mieszanki betonowej, w którą zostały wbudowane.

Pierwsza grupa obejmuje ogół zmiennych mających wpływ na technologiczne wprowadzenie dybli w mieszankę betonową. Wbudowanie dybli odbywa się za pomocą dyblarki będącej integralną częścią rozkładarki lub poprzez zastosowanie specjalnych stojaków, tzw.

koszy. Bezpośrednim elementem dyblarki mającym styk z dyblami są stalowe chwytaki zakończone półkuliście. W celu uniknięcia potencjalnego obrotu każdy dybel jest pogrążony za pomocą pary symetrycznie rozmieszczonych chwytaków. Zatem nieprawidłowe położenie dybli wbudowywanych dyblarką może być spowodowane niewłaściwym ustawieniem głębokości pogrążania dybli na dyblarce lub niesymetrycznym (nie półkolistym) zakończeniem chwytaków, wynikającym z nadmiernej eksploatacji.

Z kolei stosowanie specjalistycznych stojaków na dyble jest skuteczne tylko wtedy, gdy materiał, z którego wykonano stojaki, jest odporny na deformacje wynikające z procesów technologicznych zachodzących w trakcie wbudowywania mieszanki, gdy stojaki zostały trwale przymocowane do podłoża oraz gdy zostały ustawione rzetelnie i zgodnie z dokumentacją projektową.

Amerykańskie doświadczenia [6] wykazały liczne problemy z położeniem dybli niezależnie od zastosowanej metody ich wbudowania. Niewłaściwe położenie dybli umieszczonych na stojakach wynika z braku właściwego przymocowania ich do podłoża oraz ze zbyt słabych spoin łączących elementy stojaka, które w trakcie zachodzących procesów technologicznych ulegają zniszczeniu.

Konsystencja mieszanki betonowej decyduje pośrednio o poprawnym wbudowaniu dybli, a także o prawidłowym zacieraniu mieszanki betonowej oraz utrzymaniu ścian bocznych płyty betonowej. Mieszanki betonowe o konsystencji ciekłej mają tendencję do stawiania mniejszego oporu dyblarce. Oznacza to, że nawet jeśli pogrążanie dybli jest ustawione prawidłowo, elementy te mogą finalnie znaleźć się na większej głębokości niż pierwotnie założono. Z kolei gęste mieszanki stawiają znaczny opór przy pogrążaniu dybli, przez co ich osadzenie może być płytsze niż założono. Praktyka wykonawcza pokazuje, że optymalne konsystencje określane metodą VeBe dla mieszanek betonowych przeznaczonych do nawierzchni dwuwarstwowych wynoszą 16–20 sekund na dolną warstwę oraz 8–10 sekund na górną lub dla mieszanek przeznaczonych na nawierzchnie jednowarstwowe. Podane wartości wynikają z doświadczeń wykonawczych firmy PORR S.A.

### Przesunięcie pionowe

Pionowe położenie uznaje się za idealne, gdy dyble znajdują się w połowie grubości płyty, ponieważ wtedy przenoszenie obciążenia między płytą obciążoną a nieobciążoną jest optymalne. Modele teoretyczne oparte na metodzie elementów skończonych wykazały wzrost naprężeń w płycie obciążonej, gdy dybel znajduje się bliżej powierzchni. W przypadku położenia bliżej podbudowy rosną naprężenia w płycie nieobciążonej, a także spada wskaźnik współpracy płyt LTE (ang. Load Transfer Efficiency) ze względu na większy udział przenoszenia obciążenia przez beton niż przez dybel [5]. Inne badania wskazują na znaczny spadek nośności na ścinanie bez utraty sztywności w przypadku niewłaściwej grubości otuliny dybla [7].

Powyższe spostrzeżenia zebrane z analiz teoretycznych zostały zweryfikowane w ramach szeroko zakrojonych badań na amerykańskich drogach. Raport [8] nie wykazał znaczącego wpływu na spadek wskaźnika współ-

pracy płyt LTE, o ile zachowana była minimalna otulina wynosząca 5 cm. Płyty połączone dyblami mającymi tę minimalną otulinę wykazywały LTE > 90%, co jest wartością oczekiwaną. W trakcie badań terenowych zaobserwowano brak wpływu przesunięcia pionowego na zjawisko klawiszowania się płyt betonowych.

Studia empiryczno-analityczne [9] wskazują natomiast, że dyble znajdujące się bliżej powierzchni nawierzchni generują wyższe naprężenia rozciągające poprzeczne, co powoduje pęknięcia podłużne, biegnące od dylatacji. Badania te wykazały, że ryzyko pęknięcia poprzecznego rośnie, jeżeli dybel zbyt płytko osadzony znajduje się w połowie odległości między dylatacjami podłużnymi. Liczba zbyt płytko osadzonych dybli w szczelinie dylatacyjnej nie zwiększa jednak ryzyka wystąpienia pęknięcia, ponieważ każdy dybel generuje naprężenia w betonie wyłącznie w strefie powyżej dybla. Ma to związek ze zjawiskiem paczenia, ponieważ dyble wprowadzają między płytami ograniczenie w odkształcaniu się płyt, generując naprężenia rozciągające. Należy również podkreślić, że ryzyko spękania płyty rośnie proporcjonalnie wraz ze wzrostem modułu sprężystości betonu, współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu oraz pionowego gradientu temperatury.

### Przesunięcie poziome względem szczeliny

Przesunięcie poziome dybla względem szczeliny dylatacyjnej powoduje, że w jednej płycie znajduje się jego dłuższa część, w drugiej krótsza. Położenie to zaburza zdolność przekazywania obciążenia od ruchu pojazdów między połączonymi płytami, a to prowadzi do nierównego rozwoju naprężeń w betonie. Konsekwencją tego jest utrata nośności oraz sztywności na ścinanie [10]. Analizy obliczeniowe bazujące na metodzie elementów skończonych wykazały, że przesunięcie poziome dybla względem dylatacji generuje wyższe naprężenia ściskające, co w ekstremalnym przypadku prowadzi do kruszenia betonu [5]. Innymi konsekwencjami są utrata wskaźnika współpracy LTE o 30%, a także powstanie uskoków w szczelinach dylatacyjnych między płytami [8]. Liczne badania terenowe przeprowadzone w USA wykazały natomiast, że przesunięcie poziome dybla względem szczeliny ma wyraźny wpływ na spadek wskaźnika LTE oraz uskoki między płytami [8].

Badania nad zjawiskiem przesunięcia poziomego dybla względem szczeliny dylatacyjnej wykazały, że należy je rozpatrywać w dwóch przypadkach, tj. położenia w śladzie koła oraz poza nim [10]. Konsekwencje wystąpienia pierwszego z nich opisano powyżej, natomiast przesunięcie poziome poza śladem koła nie powinno być przedmiotem obaw zarządcy drogi.

### Obrót pionowy oraz poziomy

Idealnie wbudowany dybel powinien być równoległy do podłoża oraz prostopadły do szczeliny dylatacyjnej. Każde odchylenie od tego położenia jest rozumiane jako obrót pionowy lub poziomy, w zależności od sytuacji. Światowe badania wskazują, że obroty dybla powodują ograniczenia w ruchach spoin wywołanych skurczem termicznym i rozszerzaniem się betonu, co prowadzi do powstania naprężeń rozciągających w betonie oraz naprężeń wokół dybla

[8]. W ekstremalnym przypadku może nastąpić wykruszenie się betonu w bezpośrednim kontakcie z dyblem, powodując luz i zaburzając jego podstawową funkcję, tj. umożliwienie współpracy między płytami.

Badania laboratoryjne wykazały, że niejednolite obroty, tzn. takie, w których dyble nie są obrócone w tę samą stronę, mają większy wpływ na siłę wrywającą niż jednolite [8]. Wzrost siły wrywającej jest niekorzystny dla pracy płyt, ponieważ prowadzi do blokady połączenia, co uniemożliwia płytom swobodny ruch. Dodatkowo siła wrywająca rośnie wraz ze wzrostem wartości tych obrotów [7]. W ekstremalnym przypadku obrotów oraz przy nadmiernym rozwarciu szczelin dylatacyjnych następuje pęknięcie płyty. Inne badania laboratoryjne i analityczne [8] wykazały, że obroty dybli mogą skutkować spadkiem nośności na ścinanie i przyspieszonym procesem klawiszowania. Natomiast kolejne opracowanie [7] podaje, że wraz ze wzrostem obrotów maleje sztywność na ścinanie bez redukcji nośności.

Analizy obliczeniowe wykorzystujące metody elementów skończonych wskazują natomiast, że obroty dybli nie mają wpływu na naprężenia, o ile szerokość rozwarcia szczeliny dylatacyjnej nie przekracza 12,5 mm [7] oraz o ile wartość obrotu nie przekracza 51 mm dla dybla długości 457 mm [8]. Natomiast analizy wpływu obrotu dybli na wskaźnik współpracy płyt LTE wykazały sprzeczne ze sobą stanowiska różnych ośrodków naukowych. Według [7] obrót pionowy nie ma wpływu na LTE, lecz istotnie wpływa na klawiszowanie płyt, czyli odwrotnie niż w przypadku obrotu poziomego. Natomiast analizy obliczeniowe chińskich naukowców [11] wskazują na spadek LTE o 12% przy obrocie pionowym wynoszącym 15°.

Na podstawie wyżej przytoczonych wniosków ze światowych opracowań stwierdzić należy, że aspekt obrotów dybla wywołuje liczne spory w środowisku naukowym.

Badania terenowe mające zweryfikować realny wpływ obrotów dybli na stan płyt betonowych po wieloletnim obciążeniu ruchem wykazały brak spękań płyt o dużych wartościach obrotów oraz spękania płyt o niewielkich wartościach obrotów [8]. Pęknięcia musiały zostać spowodowane czynnikami innymi niż obroty dybli, choć bez dokładnej analizy pozostałych czynników, np. wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu, nie można tego jednoznacznie stwierdzić.

### Rozstaw między dyblami

Analizy obliczeniowe [12] wskazują zasadę, że wzrost odległości dybli od siebie skutkuje wzrostem naprężeń w betonie. Dwukrotne zwiększenie odległości w rozstawie dybli zwiększa naprężenia normalne o około 20%, a naprężenia styczne o 10% [12]. Jednakże odległość między dyblami nie może być mniejsza niż 200 mm z uwagi na powstanie pęknięć betonu wzdłuż linii dybla [13].

Żadne archiwalne badania terenowe przeprowadzane w USA nie powiązały w sposób bezpośredni uszkodzeń nawierzchni z niewłaściwym rozstawem między dyblami.

### Średnica dybla

Średnica dybla powinna zostać dobrana odpowiednio do grubości nawierzchni z betonu cementowego. Podsta-

wowa zasada wynikająca z praktyki mówi, że średnica dybla powinna stanowić 1/8 grubości płyty [5]. W Polsce stosuje się dyble o średnicy 25 mm niezależnie od grubości płyty, zgodnie z niemieckimi wytycznymi. Natomiast amerykańskie wytyczne [14] zalecają stosowanie różnych średnic w zależności od grubości płyty.

Inne badania wykazały, że wraz ze wzrostem średnicy dybla maleje ugięcie płyty w szczelinie pod wpływem zadanego obciążenia oraz maleją naprężenia ścinające w betonie [14]. Jednakże zbyt duża średnica dybla zastosowana do zbyt cienkiej płyty również nie jest pożądana. W takim przypadku oraz przy dużej sztywności płyty i na skutek ekstremalnego odkształcenia się płyt pod wpływem różnicy temperatur między górną i dolną powierzchnią, dochodzi do tzw. zjawiska łomu skutkującego wyłamywaniem się betonu przy poprzecznych szczelinach dylatacyjnych [3].

### Parametry materiałowe dybli

Obecnie powszechnie stosowanym materiałem do produkcji dybli jest stal węglowa o minimalnej wytrzymałości na rozciąganie 250 MPa. Zgodnie z normą PN-EN 13877-3 dybel powinien być prosty, wolny od nierówności, o końcach pozbawionych wypukłości. Z uwagi na fakt, że stal węglowa nie jest odporna na korozję, dyble pokrywa się ochronną powłoką zapobiegającą temu procesowi. Najczęściej stosowaną powłoką jest polimer, żywice epoksydowe, a rzadziej np. stop cynku.

Jako efekt poszukiwania większej odporności na proces korozji pojawiły się dyble ze stali nierdzewnej, dyble stalowe w osłonce ze stali nierdzewnej, dyble jako stalowe tuleje wypełnione zaczynem cementowym [15], ale były to tylko prace eksperymentalne.

Alternatywnym rozwiązaniem dla stali jest zastosowanie włókna szklanego (ang. Glass Fiber Reinforced Polymer – GFRP), które nie ulega procesom korozji. Dzięki gładkiej powierzchni i niewielkiemu wiązaniu na styku dybel-beton dochodzi do powstania mniejszych naprężeń blokujących niż dla stali, co powoduje mniejsze ograniczenie płyt [16]. Jednakże włókna szklane mają znaczącą wadę w porównaniu ze stalą, tj. dużo gorsze właściwości w kierunku poprzecznym, co ma wpływ chociażby na ich odporność na ścinanie. Badania wskaźnika współpracy płyt LTE przeprowadzone dla dybli ze stali i z włókna szklanego o takich samych średnicach wykazały większe ugięcie dybli GFRP [16]. Ma to związek z mniejszą sztywnością giętną, którą można zwiększyć wyłącznie poprzez zwiększenie średnicy dybla. Jednakże kolejne badania [16] wskaźnika współpracy przeprowadzone dla obu rodzajów dybli o takiej samej już sztywności giętną (średnica stalowych dybli to 25 mm, z włókna szklanego 38 mm) wykazały identyczne ugięcia, lecz dużo mniejsze naprężenie w dyblach z włókna szklanego. Mniejsze naprężenia wynikają z większej powierzchni przekroju dybli z GFRP.

W trakcie badań laboratoryjnych [17] zauważono, że siła potrzebna do wykonania badania pull-out dybla jest mniejsza dla włókna szklanego niż dla stalowego. Konsekwencją tego jest lepsza praca dybla GFRP z uwagi na mniejsze ryzyko zablokowania szczeliny dylatacyjnej. Kolejne badania przeprowadzone w laboratorium na frag-

mentarycznym modelu płyty o niewłaściwym położeniu dybli stalowych i z włókna szklanego wykazały wyższe wartości wskaźnika LTE dla tych drugich [13]. Natomiast pomiary na wspomnianych modelach dodatkowo obciążonych milionem cykli obciążeniowych wykazały korzystniejsze parametry takie jak luz dybla w betonie i współpraca płyt dla dybli z GFRP [17]. Inne badania [18] wykonane w laboratorium na dwóch płytach betonowych połączonych dyblami stalowymi oraz z GFRP, polegające na przyłożeniu obciążenia niszczącego na połączeniu płyt, wykazały odkształcenia płyt połączonych dyblami z GFRP o 10% większe niż dla stalowych. Warto jednak zauważyć, że siła potrzebna do zniszczenia płyt połączonych stalowymi dyblami była o połowę większa niż dla dybli z GFRP.

Badania analityczne z zastosowaniem metody elementów skończonych wykazały, że w przypadku dybli z włókna szklanego żywotność nawierzchni jest większa niż przy zastosowaniu stalowych dybli o takiej samej sztywności giętną [13]. Wynika to z większej redukcji blokowania płyt, mniejszego luzowania się dybli w betonie oraz zapewnienia większej skuteczności przenoszenia obciążeń.

W Polsce wykorzystanie dybli z włókien szklanych w nawierzchniach z betonu cementowego nie miało dotąd miejsca.

### Krajowe wytyczne do oceny położenia dybli w nawierzchniach z betonu cementowego

Badania położenia dybli w szczelinach dylatacyjnych należy przeprowadzać z częstotliwością 1 raz na 50 metrów bieżących dla parametrów takich, jak przesunięcie pionowe, przesunięcie poziome względem dylatacji, rozstaw dybli, obrót poziomy oraz obrót pionowy [19]. Każdemu z tych parametrów przypisano dopuszczalne tolerancje wykonawcze, które klasyfikują dyble w jednej z trzech kategorii, tj. „do odbioru bez potrąceń”, „do odbioru z potrąceniami” oraz „nie do odbioru” [20]. Zbiorcze podsumowanie każdego przypadku pokazano w tablicy 1.

Zakwalifikowanie dybla do grupy „do odbioru bez potrąceń” oznacza, że jego położenie jest zgodne z wymaganiami inwestora. Grupa „do odbioru z potrąceniami” oznacza, że położenie dybla odbiega od wymagań, lecz jest akceptowalne po naliczeniu kary obliczonej zgodnie z [20]. Z kolei grupa „nie do odbioru” oznacza brak możliwości odebrania wykonanej szczeliny dylatacyjnej o nieprawidłowo osadzonym dyblu bez wcześniejszego przedstawienia programu naprawczego wady. W praktyce korekta położenia dybla w stwardniałym betonie jest nie-

Tablica 1. Ocena położenia dybli w nawierzchniach z betonu cementowego w Polsce [20]

Rodzaje odchyłek	„Odbiór bez potrąceń”	„Odbiór z potrąceniami”	„Nie do odbioru”
Przesunięcie pionowe [mm]	≤ 20	21 ÷ 40	> 40
Przesunięcie poziome [mm]	≤ 50	51 ÷ 100	> 100
Rozstaw [mm]	≤ 50	51 ÷ 75	> 75
Obrót poziomy lub pionowy [mm]	≤ 14	15 ÷ 40	> 40

możliwa, więc jedynym programem naprawczym byłaby wymiana płyt z niewłaściwym położeniem dybla. Rozwiązanie to nie gwarantuje, że odbudowane płyty byłyby wolne od wad, dlatego GDDKiA wypracowała z przedstawicielami firm budowlanych dwa schematy postępowania dla dybli „nie do odbioru” [21]:

- w przypadku nieprawidłowo wbudowanych dybli w ilości do 15% nastąpi wydłużenie gwarancji dla całego realizowanego odcinka o dodatkowe 4 lata oraz zabezpieczenie finansowe na ten czas wynoszące 3% wartości wykonanej warstwy ścieralnej z betonu cementowego; wydłużenie gwarancji obejmuje równość podłużną, spękania płyt oraz wykruszenia w strefie przykrawędziowej; procedura ta dotyczy dybli „nie do odbioru”, natomiast potrącenie dla grupy „do odbioru z potrąceniami” nastąpi zgodnie z [20];

- dla każdego innego przypadku zostanie opracowane indywidualne rozwiązanie.

Należy zauważyć, że wystarczy jeden dybel „nie do odbioru”, by procedura ta obejmowała wszystkie pozostałe dyble prawidłowo wbudowane w szczeliny dylatacyjne.

### Podsumowanie stanu wiedzy

Na podstawie przeglądu literatury zauważono, że parametrami dybli mającymi największy wpływ na stan naprężeń, a w konsekwencji na trwałość zmęczeniową nawierzchni z betonu cementowego są obroty poziome i pionowe, przesunięcia poziome względem szczeliny oraz przesunięcia pionowe. Drugorzędnymi czynnikami są natomiast rozstawy między dyblami oraz ich średnice.

Przeanalizowane badania dotyczące pracy dybli w szczelinach dylatacyjnych opierają się w większości na analizach obliczeniowych wykorzystujących modele elementów skończonych. Formułowane na ich podstawie wnioski były nierzadko rozbieżne z wynikami badań terenowych, np. przeprowadzanych na poddanych wieloletniej eksploatacji drogach w USA. Zauważono, że w trakcie pomiarów terenowych badacze często pomijali parametry mechaniczne i wytrzymałościowe betonu, z którego wykonane zostały płyty, a także nie uwzględniano wpływu środowiska na etapie wykonawczym i eksploatacyjnym mierzonych odcinków dróg.

Obecnie obowiązujące wymagania krajowe dotyczące tolerancji wykonawczych położenia dybli są zbieżne z przepisami zagranicznymi. Algorytm postępowania z nawierzchniami, w których stwierdzono przekroczenie tolerancji wykonawczych, został opracowany w sposób niedający możliwości przeanalizowania każdego ekstremalnego przypadku położenia dybli oddzielnie i na tej podstawie stwierdzenia zagrożenia dla trwałości zmęczeniowej nawierzchni. Zauważono jednocześnie, że krajowe przepisy techniczne nie dopuszczają alternatywnych rozwiązań materiałowych dla dybli stalowych. Natomiast studia literaturowe wskazują, że parametry dybli z GFRP pozwalają na stosowanie ich w nawierzchniach z betonu cementowego.

W trakcie przeglądu literatury zauważono brak raportów z pomiarów rozwoju naprężeń w szczelinach dylatacyjnych oraz ich zachowania na etapie wykonawczym. Uwarunkowane to jest wysokimi kosztami oraz skalą realizacji takiego przedsięwzięcia, które pozwoliłoby jed-

nocześnie na uzyskanie najbardziej wiarygodnych danych dotyczących omawianego zagadnienia. Porównanie tak zebranych wyników z rezultatami osiągniętymi metodami obliczeniowymi dałoby możliwość wypracowania korelacji pomiędzy teoretyczną a faktyczną trwałością nawierzchni z betonu cementowego.

### PIŚMIENNICTWO

- [1] Glinicki M.A.: Inżynieria betonowych nawierzchni drogowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2019.
- [2] Szydło A.: Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego: teoria, wymiarowanie, realizacja, Polski Cement, 2004, Kraków.
- [3] Graczyk M., Gajewski M., Szczurba R.: Analiza statyczna dyblowanej betonowej nawierzchni lotniskowej z uwzględnieniem zjawiska curlingu płyt, *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, Tom 15, 2016, Nr 2, 137-155.
- [4] Maitra S.R., Reddy S., Ramachandra L.S.: Load transfer characteristics of dowel bar system in jointed concrete pavement, *Journal of Transportation Engineering*, Tom 135, 2009, Nr 11, DOI 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000065.
- [5] Singh A., Chandrappa A.: Effect of Uniform Vertical and Longitudinal Dowel Misalignment in Jointed Plain Concrete Pavement, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2022, DOI <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00178-7>.
- [6] Federal Highway Administration, Iowa State University, and National Concrete Pavement Technology Center, *Dowel Basket Anchoring Methods*, 2017.
- [7] Saxena P., Gotlif A., Khazanovich L.: Guidelines for Dowel Alignment in Concrete Pavements. Appendix D Finite element analysis, 2009. DOI 10.17226/14249.
- [8] Khazanovich L., Hoegh K.: Guidelines for Dowel Alignment in Concrete Pavements. Appendix A Review of literature and other relevant information, 2009.
- [9] Seo Y., Kim S.M.: Longitudinal cracking at transverse joints caused by dowel bars in Jointed Concrete Pavements, *KSCCE Journal of Civil Engineering*, Tom 17, 2013, Nr 2, DOI 10.1007/s12205-013-2047-5.
- [10] Khazanovich L., Hoegh K., Snyder M.: NCHRP Report 637: Guidelines for Dowel Alignment in Concrete Pavements, *Transportation Research Board*, 2009
- [11] Hu Ch., Ma J., Yu Y., Luo Y.: Optimal design on dowel length for cement concrete pavement, *International Journal of Pavement Research and Technology*, TOM 9, 2016 Nr 6, DOI 10.1016/j.ijprt.2016.10.003.
- [12] Daćko M., Brodzik R.: Selection of parameters of dowelling connections in concrete airport pavement, *Archives of Civil Engineering*, Tom 58, 2012, Nr 1, DOI 10.2478/v.10169-012-0007-y.
- [13] Al-Humeidawi B., Mandal P.: Evaluation of performance and design of GFRP dowels in jointed plain concrete pavement – Part 2: Numerical simulation and design considerations, *International Journal of Pavement Engineering*, Tom 15, 2014, Nr 8, DOI 10.1080/10298436.2014.893314.
- [14] Khazanovich L.: Dowel and Tie Bars in Concrete Pavement Joints: Theory and Practice, 2nd International Conference on BestPractices for Concrete Pavements, 2011.
- [15] Smith K.: Alternative Dowel Bars for Load Transfer in Jointed Concrete Pavements, 2001.
- [16] Al-Humeidawi B., Mandal P.: Evaluation of performance and design of GFRP dowels in jointed plain concrete pavement-part 1: Experimental investigation, *International Journal of Pavement Engineering*, TOM 15, 2014, Nr 5, DOI 10.1080/10298436.2013.824081.
- [17] Al-Humeidawi B., Mandal P.: Experimental investigation on the combined effect of dowel misalignment and cyclic wheel loading on dowel bar performance in JPCP, *Eng Struct*, Tom 174, 2018, DOI 10.1016/j.engstruct.2018.07.052.
- [18] Rabah M., Eisa M., Elghanam A.: Influence of Misalignment Method on Performance of Dowel Bars in Joints of Rigid Pavement. (Dept. C), MEJ. *Mansoura Engineering Journal*, Tom 46, 2021, Nr 3, DOI 10.21608/bfemu.2021.202453.
- [19] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, *Warunki wykonania i odbioru robót budowlanych. D-05.03.04 Nawierzchnia z betonu cementowego*, Warszawa, 2019.
- [20] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, *Instrukcja DP-T 14 Ocena jakości na drogach krajowych. Część I – Roboty drogowe*, Warszawa, 2020.
- [21] Bukowski L.: Podsumowanie i rekomendacje prac grupy roboczej powołanej do wypracowania dalszego postępowania w sprawie nieprawidłowo wbudowanych dybli, Warszawa, 2022.