

Doświadczenia przy projektowaniu i budowie nawierzchni betonowych w Polsce

W niniejszej publikacji opisano doświadczenia, jakie wypracowano przy projektowaniu i budowie nawierzchni betonowych w Polsce. Zwrócono uwagę na technologię wykańczania powierzchni oraz oddziaływania termiczne determinujące wymagania projektowe oraz reżim technologiczny. Ponadto zaprezentowano zasady doboru oraz rodzaje konstrukcji nawierzchni sztywnych z betonu cementowego w nawiązaniu do „Katalogu typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych”.

1. Wprowadzenie

Rozwój technologii nawierzchni drogowych w Polsce do końca lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku koncentrował się głównie na nawierzchniach asfaltowych. Nawierzchnie betonowe realizowane były głównie na lotniskach, placach postojowych oraz drogach zakładowych.

Pojawienie się kryzysu energetycznego w gospodarce światowej, w tym również i polskiej, w połowie lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku spowodowało zainteresowanie administracji drogowej nawierzchniami betonowymi. Zainteresowanie to zostało spotęgowane zwłaszcza wtedy, gdy w połowie lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku zaobserwowano nagminne zjawisko powstawania kolein w nawierzchniach asfaltowych, spowodowane m.in. zwiększającym się obciążeniem osi pojazdów jak i wzrostem intensywności ruchu.

Liczba publikacji i podręczników w Polsce z zakresu nawierzchni betonowych nie jest imponująca. W 1935 roku powstały pierwsze „Wytyczne budowy nawierzchni betonowych”, opracowane w Drogowym Instytucie Badawczym w Warszawie. Pierwszy podręcznik z nawierzchni betonowych autorstwa E. Bratro pt. „Betonowe nawierzchnie drogowe” został wydany przez Związek Polskich Fabryk Portland Cementu w 1939 roku. W dalszym etapie pojawiły się podręczniki dotyczące nawierzchni lotniskowych, zawierające wybrane elementy projektowania i wykonawstwa nawierzchni betonowych: Z. Łopatek, „Projektowanie konstrukcji nawierzchni lotniskowych” - podręcznik wydany przez Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej w 1967 roku oraz S. Kozieł, „Lotniskowe nawierzchnie betonowe” - podręcznik wydany przez Wydawnictwa Komunikacji i Łączności w 1972 roku.

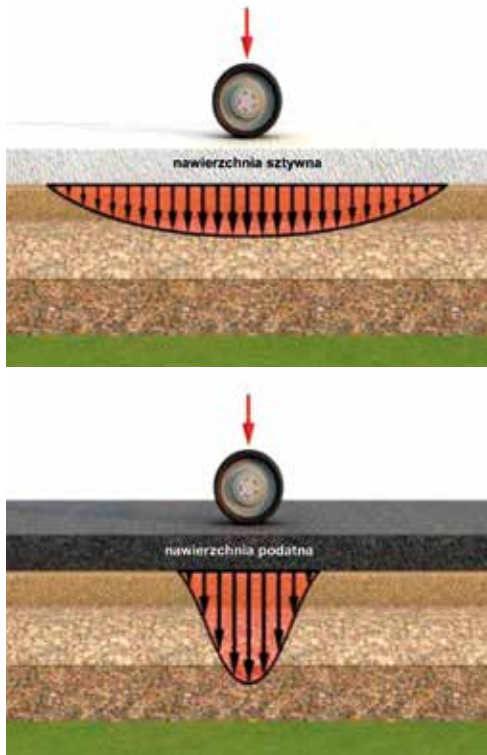
W 1983 roku Wydawnictwa Komunikacji i Łączności wydały kolejny podręcznik pt. „Nowoczesne nawierzchnie betonowe” autorstwa nestora polskiego drogownictwa Stefana Rolli. W tym samym roku Państwowe Wydawnictwa Naukowe wydały książkę Czesława Lewinowskiego pt. „Wymiarowanie konstrukcji jezdni drogowych z betonu cementowego”.

W 2001 roku został wydany „Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych”, a w 2004 roku ukazała się książka A. Szydło „Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Teoria, wymiarowanie, realizacja”, wydana przez Polski Cement [9]. W 2005 roku ukazała się pozycja autorstwa A. Szydło, P. Mackiewicza „Nawierzchnie betonowe na drogach gminnych” [10]. W 2014 roku został zweryfikowany i zaktualizowany „Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych” [11]. Pierwsze odcinki o nawierzchni betonowej zaczęto realizować na autostradzie A4. W 1995 roku dokonano przebudowy odcinka Krzywa – Krzyżowa o długości 17 km, realizując recykling starej nawierzchni betonowej (rys. 1).

W dalszym etapie przebudowano odcinek A4 Wrocław – Krzyżowa – 92 km (2002 r.), a następnie odcinek A4 – Krzyżowa – Zgorzelec – 50 km (2010). W 2009 roku wybudowano odcinek A18 Krzywa – Olszyna – 60 km. Natomiast pod koniec 2011 roku oddano do eksploatacji odcinek autostradowy w Polsce na autostradzie A2 o długości ok. 106 km, wybudowany wg najnowszych standardów światowych. Tutaj warstwa wierzchnia została wykonana w technologii „odkrytego kruszywa” w celu poprawienia warunków ruchowych oraz zmniejszenia hałasu. W 2012 roku przebudowano i wybudowano drogę S8 na długości 160 km. Obecnie nawierzchnie dróg betonowych stosowane są także na drogach niższych klas, także na drogach gminnych [10]. Warto zaznaczyć, że w Polsce coraz więcej powstaje odcinków dróg o nawierzchni betonowej. Stan na rok 2016 pokazano na rys. 2 w odniesieniu do dróg krajowych. Nawierzchnie betonowe posiadają wiele zalet związanych np. z wysokim bezpieczeństwem wynikającym z jasnej kolorystyki oraz dobrych własności przeciwpślizgowych. Uwzględniając zarówno koszty budowy jak i późniejszego utrzymania, posiadają zdecydowaną przewagę nad in-

Rys. 1. Recykling starej nawierzchni betonowej – Krzywa – Krzyżowa A4 – 17 km





Rys. 3. Rozkład nacisku od obciążenia w nawierzchni podatej i sztywnej

nymi typami nawierzchni w okresie 20-30-letnim. Ponadto posiadają wymaganą nośność i zdolność do przenoszenia dużych obciążeń z uwagi na rozkładanie nacisku na większej powierzchni (rys. 3). Zmniejszone jest także w dużym stopniu obciążenie niższych warstw, co przyczynia się do znacznego obniżenia jej odkształcenia. Wzrost grubości płyty betonowej znacznie zwiększa zdolność do przenoszenia dużych obciążeń, co w przypadku obciążeń ponadnormatywnych stanowi zdecydowaną przewagę nad innymi nawierzchniami.

2. Zasady doboru typowych nawierzchni

Konstrukcję nawierzchni z betonu cementowego tworzy zespół warstw ułożonych na naturalnym lub ulepszonym podłożu gruntowym. Na rys. 4 pokazano kompletny układ warstw konstrukcji nawierzchni sztywnych. Warstwy górne konstrukcji nawierzchni stanowi warstwa nawierzchniowa (płyta dyblowana i kotwiona, niedyblowana, zbrojona), warstwa poślizgowa i podbudowa zasadnicza. Mają one podstawowe znaczenie w przeniesieniu obciążeń od ruchu drogowego. Warstwy te dobierane są w zależności od kategorii ruchu oraz od typu podbudowy zasadniczej. Natomiast dolne warstwy konstrukcji nawierzchni, warstwa podbudowy pomocniczej i warstwa mrozoochronna, stanowią „fundament” dla warstw górnych konstrukcji nawierzchni.

Warstwy te dobierane są w zależności od grupy nośności podłoża gruntowego i od wymaganej nośności na powierzchni dolnych warstw konstrukcji nawierzchni. Warstwa mrozoochronna może pełnić także funkcję warstwy odsączającej. Konstrukcja nawierzchni spoczywa na podłożu gruntowym nawierzchni. W razie potrzeby podłoża gruntowe nawierzchni może być wzmocnione przez wykonanie na jego górnej powierzchni warstwy ulepszanego podłoża. Punktem wyjścia w procedurze katalogowej [11] doboru konstrukcji nawierzchni jest



Rys. 2. Sieć autostrad i dróg ekspresowych i rodzaje nawierzchni (rok 2016)

określenie ruchu projektowego przypadającego na pas obliczeniowy. Określa go się dla dwóch wartości osi standardowych (115 kN lub 100 kN) do wyznaczenia kategorii ruchu nie jest bezpośrednio związany z wymaganiami maksymalnych dopuszczalnych nacisków. Zaleca się jednak powiązać wartość osi standardowej z dopuszczalnym naciskiem dla danej drogi publicznej. Przykładowa zależność dla osi 100 kN.

$$N_{100} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot (N_C \cdot r_C^{100} + N_{C+P} \cdot r_{C+P}^{100} + N_A \cdot r_A^{100}) \quad (1)$$

gdzie:

N_{100} – ruch projektowy, sumaryczna liczba osi standardowych 100 kN w całym okresie projektowym nawierzchni przypadająca na pas obliczeniowy,
 N_A, N_C, N_{C+P} – ruch rzeczywisty, sumaryczna liczba autobusów (A), samochodów ciężarowych bez przyczep (C), samochodów ciężarowych z przyczepami oraz ciągników siodłowych z naczepami (C+P) w całym okresie projektowym, w przekroju drogi,
 $r_A^{100}, r_C^{100}, r_{C+P}^{100}$ – współczynnik przeliczeniowy liczby autobusów (A), samochodów ciężarowych bez przyczep (C), samochodów ciężarowych z przyczepami oraz ciągników siodłowych z naczepami (C+P) na liczbę osi standardowych 100 kN,
 f_1, f_2, f_3 – współczynnik obliczeniowego pasa ruchu, szerokości pasa ruchu, pochylenia niwelety.

Należy zwrócić uwagę, że sumaryczna liczba pojazdów podawana jest w całym projektowanym

- istniejące naw. asfaltowe
- - - projektowane naw. asfaltowe
- istniejące naw. betonowe
- - - projektowane naw. betonowe
- inne planowane drogi ekspresowe

Rys. 4. Schemat warstw konstrukcji nawierzchni sztywnych oraz warstwy ulepszanego podłoża



Tab. 1. Współczynniki przeliczeniowe pojazdów ciężkich na osie standardowe 100 kN i 115 kN

Lp.	Rodzaje pojazdów	Przykładowe typy sylwetek pojazdów	Współczynnik przeliczeniowy r	
			Oś standardowa 100 kN	Oś standardowa 115 kN
1.	Samochody ciężarowe bez przyczep C		0,347	0,130
2.	Samochody ciężarowe z przyczepami oraz ciągniki siodłowe z naczepami C+P		3,946	1,483
3.	Autobusy A		0,530	0,199

Tab. 2. Klasyfikacja ruchu projektowego (30 lat)

Kategoria ruchu	N_{100} – sumaryczna liczba osi standardowych 100 kN w całym okresie projektowym (30 lat) [milion osi 100 kN na pas obliczeniowy]	N_{115} – sumaryczna liczba osi standardowych 115 kN w całym okresie projektowym (30 lat) [milion osi 115 kN na pas obliczeniowy]
KR1	$0,045 < N_{100} \leq 0,15$	$0,017 < N_{115} \leq 0,06$
KR2	$0,15 < N_{100} \leq 0,75$	$0,06 < N_{115} \leq 0,28$
KR3	$0,75 < N_{100} \leq 6,39$	$0,28 < N_{115} \leq 2,40$
KR4	$6,39 < N_{100} \leq 15,99$	$2,40 < N_{115} \leq 6,00$
KR5	$15,99 < N_{100} \leq 42,63$	$6,00 < N_{115} \leq 16,00$
KR6	$42,63 < N_{100} \leq 101,25$	$16,00 < N_{115} \leq 38,00$
KR7	$N_{100} > 101,25$	$N_{115} > 38,00$

Tab. 3. Wymagania w zakresie nośności na powierzchni dolnych warstw konstrukcji nawierzchni

Lp.	Kategoria ruchu	Wymagana nośność na powierzchni dolnych warstw konstrukcji nawierzchni
1.	KR1-KR2	$E_2 \geq 80$ MPa
2.	KR3-KR4	$E_2 \geq 100$ MPa
3.	KR5-KR7	$E_2 \geq 120$ MPa

okresie eksploatacji. Wymagane jest zatem przeprowadzenie prognozy ruchu dla danej drogi na okres 30 lat. Współczynniki przeliczeniowe pojazdów ciężkich związane są z agresywnością ich oddziaływania na nawierzchnię. Zostały opracowane na podstawie analizy danych ze stacji ważenia pojazdów w ruchu na drogach krajowych w Polsce w ostatnich 4 latach. Uwzględniają one zróżnicowanie pojazdów pod względem konfiguracji osi i obciążenia. W tab. 1. pokazano wartości współczynników dla osi 100 kN i 115 kN. Znajomość osi standardowych pozwala projektantowi określić kategorię ruchu od KR1 do KR7. W tab. 2 pokazano klasyfikację ruchu dla okresu 30 lat.

W dalszym etapie projektowania określa się warunki gruntowe i wodne. Na ich podstawie wyznacza się grupę nośności podłoża (G1 – G4) i przyjmuje się odpowiednie wzmocnienie. Istotnym elementem jest zapewnienie wymaganej nośności na powierzchni dolnych warstw konstrukcji nawierzchni (tab. 3). Określa się ją na podstawie wartości wtórnego modułu odkształcenia E_2 , wyznaczonego z badania płytą pod naciskiem statycznym.

Wybór górnych typowych konstrukcji dobiera się w zależności od rodzaju podbudowy i kategorii ruchu (tab. 4-6). Podbudowa zasadnicza może być wykonana z mieszank niezwiązanych ($C_{50/30}$, $C_{90/3}$), betonu asfaltowego, mieszank związanych spoiwami hydraulicznymi ($C_{5/6}$, $C_{8/10}$), gruntów stabilizowanych spoiwami hydraulicznymi ($C_{3/4}$, $C_{5/6}$).

Dla kategorii ruchu KR1 i KR2 stosuje się płytę betonową niedyblowaną, natomiast dla kategorii KR3, KR4, KR5, KR6 oraz KR7 należy zastosować dyblę w szczelinach poprzecznych oraz kotwy w szczelinach podłużnych. Dla konstrukcji nawierzchni o ruchu KR7 i podbudowie z mieszanki związanej spoiwem hydraulicznym można zastosować także płytę betonową o zbrojeniu ciągłym, bez szczelin dylatacyjnych. W przypadku nawierzchni o układzie jednowarstwowym lub dwuwarstwowym w technologii klasycznego teksturowania należy wykonać warstwy „mokre na mokre” z tej samej mieszanki betonowej. W końcowym etapie doboru konstrukcji sprawdza się warunek odporności na wysadziny, uwzględniając kategorię pod-

Tab. 4. Typowe konstrukcje górnych warstw nawierzchni sztywnych. Podbudowa zasadnicza: mieszanka niezwiązana z kruszywa $C_{90/3}$

Kategoria ruchu	KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6	KR7
Ruch projektowy (mln osi 100 kN)	$\leq 0,15$	0,15 – 0,75	0,75 – 6,39	6,39 – 15,99	15,99 – 42,63	42,63 – 101,25	$> 101,25$
Ruch projektowy (mln osi 115 kN)	$\leq 0,06$	0,06 – 0,28	0,28 – 2,40	2,40 – 6,00	6,00 – 16,00	16,00 – 38,00	$> 38,00$
Typ I							
	niedyblowana	niedyblowana	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona
Legenda:	<p> warstwa nawierzchniowa z betonu cementowego warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki niezwiązanej z kruszywa $C_{90/3}$ wymagany wtórny moduł odkształcenia E_2 </p>						

Tab. 5. Typowe konstrukcje górnych warstw nawierzchni sztywnych. Podbudowa zasadnicza: beton asfaltowy

Kategoria ruchu	KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6	KR7
Ruch projektowy (mIn osi 100 kN)	≤ 0,15	0,15 – 0,75	0,75 – 6,39	6,39 – 15,99	15,99 – 42,63	42,63 – 101,25	> 101,25
Ruch projektowy (mIn osi 115 kN)	≤ 0,06	0,06 – 0,28	0,28 – 2,40	2,40 – 6,00	6,00 – 16,00	16,00 – 38,00	> 38,00
Typ II							
	niedyblowana	niedyblowana	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona
Legenda:							

toża, kategorię ruchu oraz głębokość przemarzania w zależności od rejonu w Polsce.

3. Typowe rodzaje nawierzchni betonowych

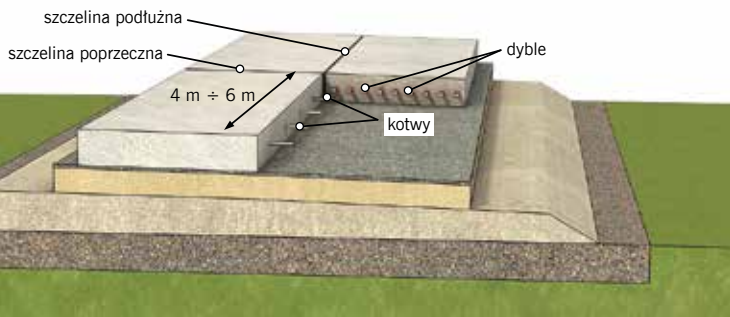
Najbardziej popularnymi nawierzchniami dla ruchu większego niż KR3 są nawierzchnie dyblowane i kotwione. W tych nawierzchniach w celu zapewnienia właściwej współpracy płyt w szczelinach pod wpływem zwiększonego obciążenia stosuje się dyble (szczeliny poprzeczne) oraz kotwy (szczeliny podłużne). Poza dyblami na współpracę mają także wpływ inne czynniki związane z podparciem płyty betonowej, zamocowaniem dybli i oddziaływaniem czynników degradujących szczeliny [5], [8], [12]. W katalogu w obliczeniach przyjęto płytę betonową z dyblami o rozstawie co 25 cm (średnica $\Phi 25$ mm, długość $l=50$ do 60 cm), kotwy o rozstawie co 100 cm (średnica $\Phi 20$ mm, długość $l=80$ cm). Dobór tych parametrów powinien zapewnić właściwą współpracę płyt betonowych. Przy indywidualnym doborze dybli uwzględnia się ich rozstaw oraz średnicę. W obliczeniach analizuje się liczbę dybli biorących udział przy przenoszeniu obciążenia z jednej płyty na drugą oraz warun-

ki naprężeń w betonie pod dyblem (a także wokół niego) w celu zapewnienia współpracy płyt na poziomie 80% [3], [4]. Na rys. 5 pokazano typowy schemat nawierzchni dyblowanej i kotwionej.

Ze względu na to, że beton wykazuje wrażliwość na działanie wpływów termicznych oraz wilgotnościowych w celu redukcji tych wpływów w nawierzchniach betonowych stosuje się system szczelin podłużnych i poprzecznych. Rozstaw szczelin w płycie jest uzależniony od tzw. długości krytycznej płyty L_{kryt} . Należy przestrzegać, aby wymiary płyt betonowych w planie (a tym samym rozstawy szczelin) nie przekraczały wymaganej długości. Przykładowo dla płyty o grubości 25-30 cm należy zachować maksymalne odległości szczelin około 5,0 m. Jest to związane z oddziaływaniem temperatury na płytę. W katalogu na podstawie pomiarów terenowych przeprowadzono wnikliwe analizy oddziaływania zmian dobowych temperatury na deformację i stan naprężeń w płycie. Na rys. 6 i 7 pokazano odkształcalność płyt długich i krótkich w zależności od oddziaływania temperatury. Dla płyt krótkich ciężar nie powoduje powstawania znacznych naprężeń termicznych.

Tab. 6. Typowe konstrukcje górnych warstw nawierzchni sztywnych. Podbudowa zasadnicza: mieszanka związana spoiwem hydraulicznym $C_{5/10}$, $C_{8/10}$

Kategoria ruchu	KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6	KR7	
Ruch projektowy (mIn osi 100 kN)	≤ 0,15	0,15 – 0,75	0,75 – 6,39	6,39 – 15,99	15,99 – 42,63	42,63 – 101,25	> 101,25	
Ruch projektowy (mIn osi 115 kN)	≤ 0,06	0,06 – 0,28	0,28 – 2,40	2,40 – 6,00	6,00 – 16,00	16,00 – 38,00	> 38,00	
Typ III	-	-	-					
	-	-	-	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	o zbrojeniu ciągłym
Legenda:								

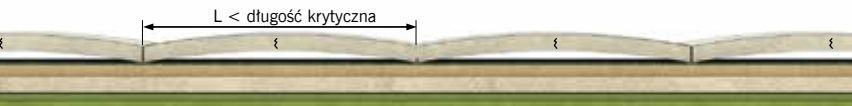


Rys. 5. Schemat nawierzchni dyblowanej z betonu cementowego

Jeżeli górna powierzchnia płyty ma wyższą temperaturę od dolnej, to płyta ma tendencję do wyginania się ku górze, ale wskutek ciężaru własnego oraz skrzepowania największe naprężenia rozciągające powstają na dolnej powierzchni płyty. Jeżeli natomiast dolna powierzchnia płyty ma wyższą temperaturę od górnej, to płyta ma tendencję do



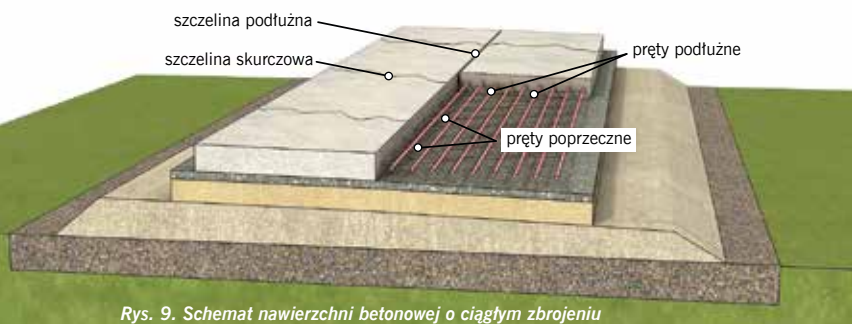
Rys. 6. Schemat odkształcenia płyt długich



Rys. 7. Schemat odkształcenia płyt krótkich



Rys. 8. Wyginanie płyty betonowej w zależności od warunków termicznych



Rys. 9. Schemat nawierzchni betonowej o ciągłym zbrojeniu



Rys. 10. Układ zbrojenia przy budowie autostrady A4

odkształcania się ku dołowi i wtedy największe naprężenia wskutek ciężaru własnego pojawiają się na górnej powierzchni rys. 8. Oddziaływanie temperatury ma także istotny wpływ na naprężenia pojawiające się w betonie wokół dybli [2], [7]. Mniej wrażliwa na oddziaływania termiczne jest nawierzchnia-pręty poprzeczne o średnicy $\Phi 12$ mm i rozstawie co 70 cm (układane pod kątem 65°) oraz pręty podłużne o średnicy $\Phi 20$ mm i rozstawie co 18 cm (układane na zakładkę 70 cm). Na rys 10. pokazano typowy układ zbrojenia. W Polsce wybudowano dwa eksperymentalne odcinki nawierzchni o ciągłym zbrojeniu na autostradzie A4 oraz A2, oba mają długości po ok. 1 km. Zachowują się bez zarzutu. W Europie stosowane są także inne typy nawierzchni betonowych. Przykładem może być płyta gruba, stosowana we Francji.

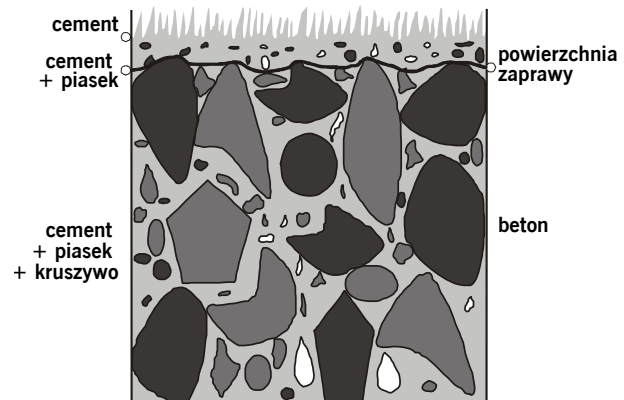
Układa się ją bezpośrednio na warstwie drenażowej z kruszywa lub geowłókniny, bez stosowania podbudowy. Płyta gruba jest mniej wrażliwa na wpływy termiczne, odkształcenia, zmniejsza się w niej skurcz z uwagi na większe siły tarcia o podłoże oraz naprężenia. Wymagane jest jednak dobre odwodnienie pod płytą i odprowadzenie wody poza obręb jezdni. Zgodnie z wymaganiami francuskimi stosuje się płyty o grubości od 31 do 37 cm, przy czym stosuje się zmienną grubość płyty (do 10 cm różnicy) w przekroju poprzecznym. Ma to swoje uzasadnienie z uwagi na większe obciążenie prawej krawędzi jezdni, wywierane przez pojazdy ciężarowe. Taki typ nawierzchni zastosowano na autostradzie A4, na długości 1300 m. Zachowuje się bez zarzutu. W tego typu nawierzchni stosuje się również dyble i kotwy.

Warto wyróżnić także nawierzchnie złożone (mieszane) (rys. 12). Dominują w typowych nawierzchniach w Anglii. Mogą być stosowane w przypadku wzmocnienia istniejących nawierzchni asfaltowych lub betonowych.

4. Wykańczanie górnej powierzchni płyty betonowej

Po ułożeniu górnej warstwy nawierzchni należy wygładzić powierzchnię i nadać jej odpowiednią teksturę. Na górnej powierzchni powstaje zaprawa piaskowa (rys. 13), która w pierwszym etapie eksploatacji nawierzchni decyduje o jej szorstkości. Wykończenie górnej powierzchni przez nadanie nawierzchni odpowiedniej tekstury jest ważnym problemem dla bezpieczeństwa ruchu z uwagi na

Rys. 13. Przekrój nawierzchni w strefie przypowierzchniowej



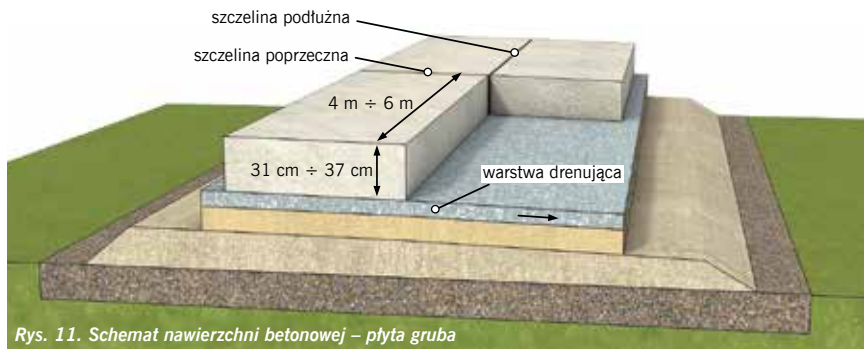
szcepność koła z nawierzchnią oraz szybkie odprowadzenie wody z nawierzchni. Tekstura istotnie wpływa także na wywoływanie hałasu w trakcie ruchu pojazdów.

Teksturowanie w celu uzyskania odpowiednio szorstkiej nawierzchni można przeprowadzić metodami: przeciąganie tkaniny jutowej w kierunku podłużnym do kierunku jazdy, przecieranie w kierunku prostopadłym do kierunku jazdy świeżo ułożonej mieszanki betonowej stalową szczotką, rowkowanie poprzeczne za pomocą widełek metalowych (rzadziej stosowane), opóźnianie hydratacji cementu w górnej warstwie świeżo ułożonej nawierzchni (np. przy użyciu glukozy), a następnie wypukanie niezwiązanej warstwy zaprawy cementowej strumieniem wody lub wyszczotkowanie.

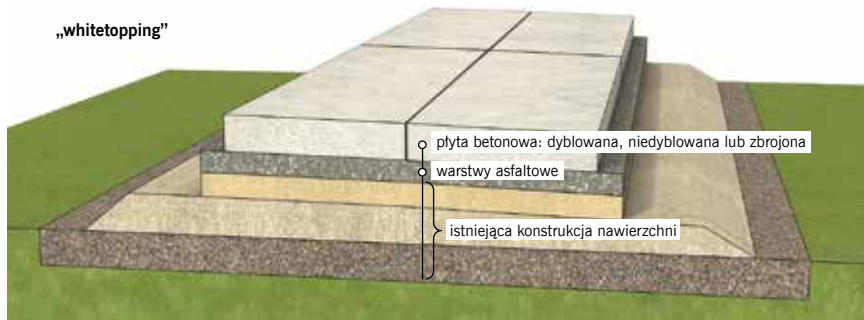
Każdy z wymienionych sposobów posiada szczególne zalety i wady. Przeciąganie juty jest najtańszym sposobem jednakże uzyskuje się najmniejszą teksturę powierzchni, rzędu 0,2 do 0,6 mm. Trwałość tego typu zabiegu wynosi 1-3 lat. Sposób ten ma również zalety. Tak wyprofilowana powierzchnia powoduje obniżenie głośności nawierzchni ok. 1-2 db. Szczotkowanie nawierzchni za pomocą szczotek w kierunku poprzecznym daje większą teksturę, w granicach 1-1,5 mm. Jednakże zwiększa się hałas. Zaletą tego sposobu jest stosunkowo szybkie odprowadzenie wody w kierunku poprzecznym oraz duży współczynnik szcepności koła z nawierzchnią. Trwałość zabiegu wynosi 3 do 5 lat.

W USA w ostatnich latach coraz popularniejszą metodą wykańczania (i poprawy) powierzchni nawierzchni betonowych jest rowkowanie przy użyciu tarcz diamentowych („diamond grinding and grooving”, rys. 14, [6]). Metoda ta polega na wykonaniu (wycięciu) w nawierzchni dwóch typów podłużnych rowków. Badania wykazały, że metoda ta pozwala na znaczną poprawę przyczepności, przy jednoczesnej poprawie równości (IRI) i znacznym spadku poziomu generowanego przez pojazdy hałasu.

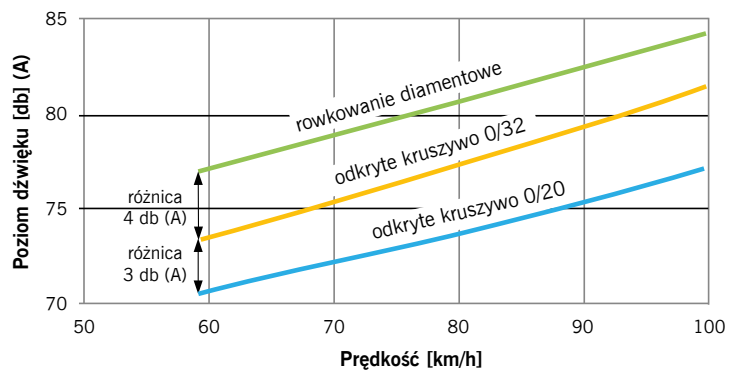
Warto zwrócić uwagę na technologię zwaną ekspozycją kruszywa lub teksturą płukanego betonu. Mimo iż pierwsze eksperymenty realizowano w USA, to znaczny rozwój i skuteczne opracowanie technologii „odkrytego kruszywa” miało miejsce w Europie. Badania przeprowadzone w Europie jednoznacznie potwierdziły skuteczność tej technologii w obniżaniu poziomu hałasu (rys. 15, [1]).



Rys. 11. Schemat nawierzchni betonowej – płyta gruba



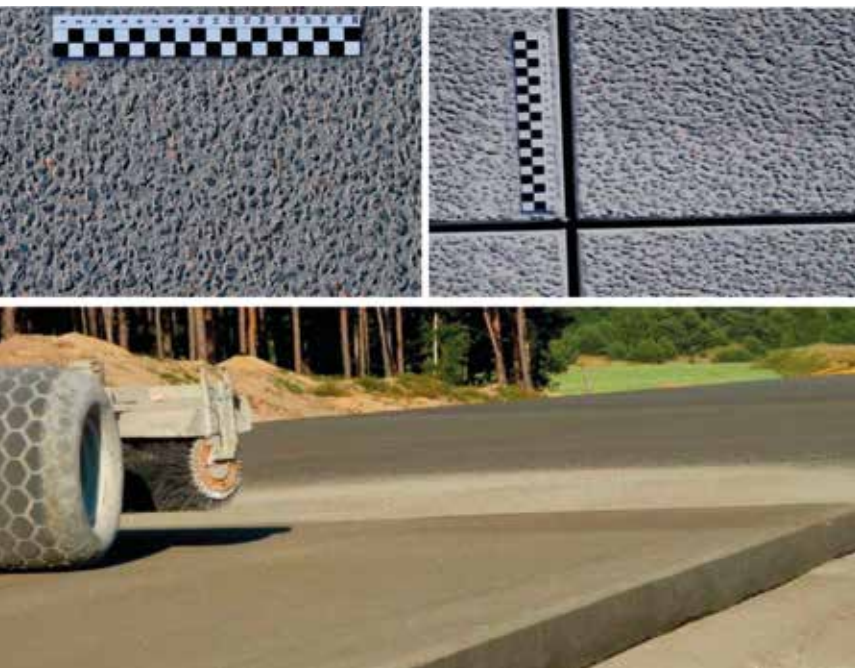
Rys. 12. Schematy nawierzchni złożonych (mieszanych)



Rys. 15. Badane „europejskie” struktury powierzchni wg [1]

Rys. 14. Rowkowanie i szlifowanie diamentowe („diamond grinding and grooving”), [6]





Rys. 16. Przykład nawierzchni w technologii odkrytego kruszywa realizowanej na autostradzie A2 w Polsce

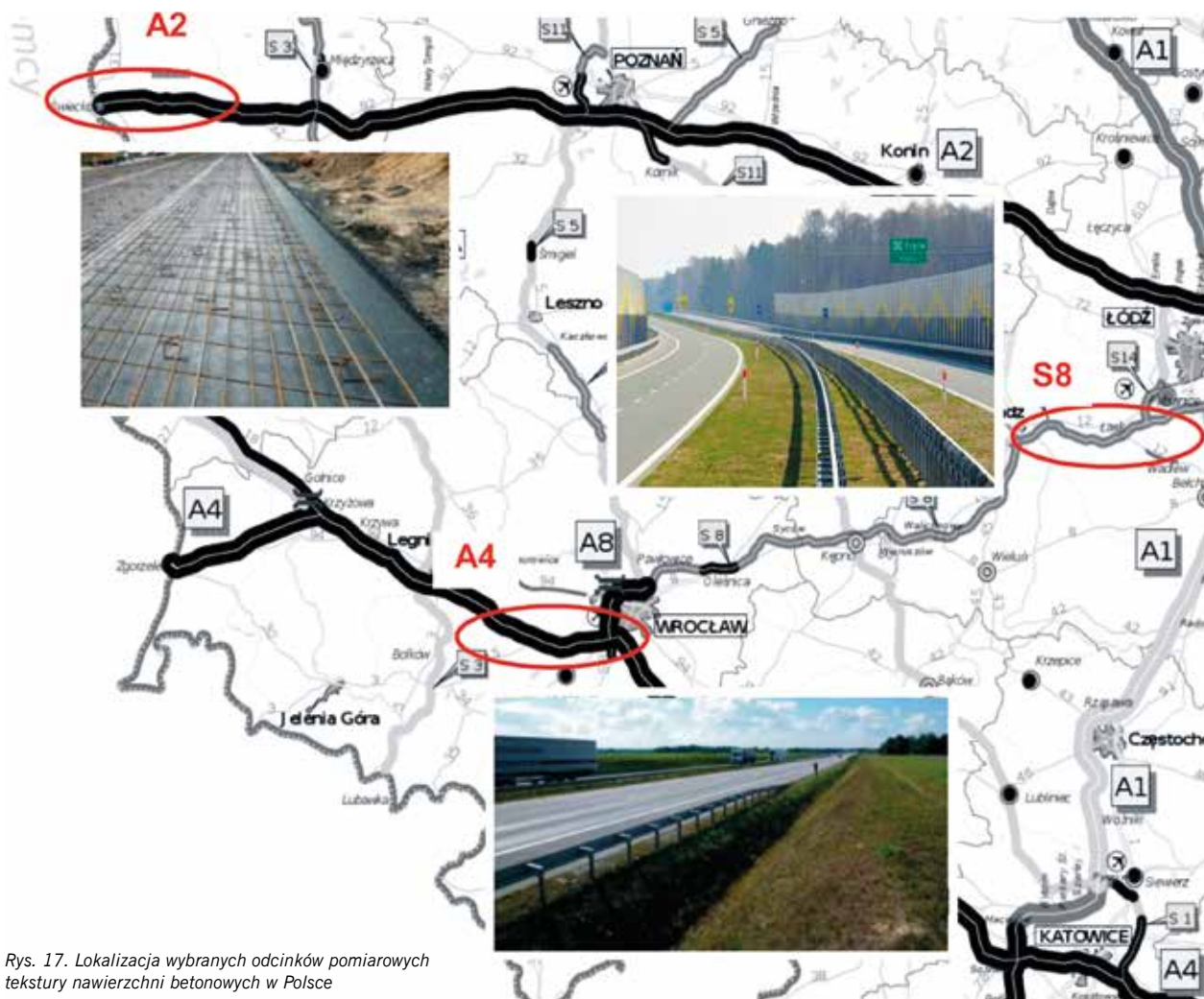
Na podstawie pierwszych badań w Austrii od roku 1990 określano wymagania technologiczne dotyczące wymaganej średnicy ziaren oraz zawartości frakcji kruszywa stosowanego w nawierzchniach betonowych. W dalszym etapie rozwinięto technologię odkrytego kruszywa w Belgii, Anglii oraz Niemczech. Uzyskując

w zakresie częstotliwości powyżej 1000 Hz obniżenie poziomu hałasu o 6-10 dB w porównaniu do konwencjonalnych struktur betonowych. Technologia odkrytego kruszywa została także zastosowana w Polsce na autostradzie A2 (rys. 16) i drodze ekspresowej S8.

Aby wykonać nawierzchnię w technologii „otkrytego kruszywa”, beton układa się dwuwarstwowo „mokre na mokre”, górna warstwa o grubości 5 cm i kruszywie o uziarnieniu do 8 mm, dolna o uziarnieniu 22 mm. Po ułożeniu warstwę górną zrasza się środkiem (np. glukozą) niszczącym zaprawę cementową i w ramach zabiegów pielęgnacyjnych rozkłada się na nią folię. Można też powierzchnię wymywać wodą pod ciśnieniem. Szczeliny dyfuzyjne w warstwie betonu nacina się poprzez folię. W dalszym etapie, po około dwóch dniach (w zależności od warunków klimatycznych i recepty betonowej), usuwa się folię z powierzchni betonu, a niezwiązaną zaprawę cementową wymywa lub szczotkuje, pozostawiając frakcję kruszywa na powierzchni warstwy ścieralnej. Uzyskana w ten sposób tekstura zapewnia wymagane cechy przeciwpoślizgowe.

Aktualnie w ramach prac związanych z krajowym programem Rozwój Innowacji Drogowych (RID) trwają badania tekstury nawierzchni betonowych w Polsce. Analizie poddano trzy odcinki dróg A2, S8 oraz A4 (rys. 17).

Na autostradzie A2 badana jest nawierzchnia o ciągłym zbrojeniu na podbudowie z mieszanki



Rys. 17. Lokalizacja wybranych odcinków pomiarowych tekstury nawierzchni betonowych w Polsce

mineralno-asfaltowej oraz nawierzchnia dyblowana na podbudowie z chudego betonu. Powierzchnia górna jest wykonana w technologii odkrytego kruszywa. Na drodze ekspresowej S8 nawierzchnia z odkrytym kruszywem na podbudowie z chudego betonu, na którym jest geowłóknina. Natomiast na A4 nawierzchnia dyblowana na podbudowie z kruszywa, nawierzchnia o ciągłym zbrojeniu na chudym betonie oraz nawierzchnia dyblowana na podbudowie z chudego betonu, na którym jest ułożona geowłóknina. Górna powierzchnia jest wykonana w technologii szrotkowania poprzecznego. Wstępnie stwierdzono znaczne zróżnicowanie tekstury (MPD), w zależności od badanych typów odcinków i ich lokalizacji (rys. 18). Zidentyfikowano największą teksturę na nowo oddanym odcinku S8 w technologii odkrytego kruszywa. Prace nadal trwają i będzie oceniany także wpływ tekstury i równości na hałas drogowy.

5. Podsumowanie

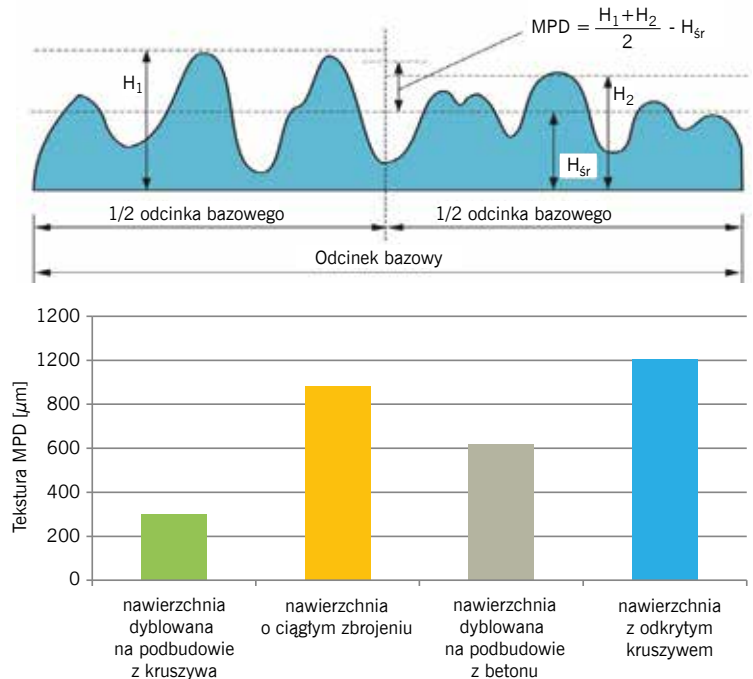
Potrzeby wynikające ze stosowania nawierzchni betonowych w związku ze wzrastającym ciężkim ruchem drogowym są jak najbardziej uzasadnione. Nakłady finansowe na utrzymanie tego typu nawierzchni w długim okresie eksploatacji, jaki zapewniają nawierzchnie betonowe, sprawiają, że technologia ta jest coraz częściej stosowana w Polsce. Przykładem jest wiele realizacji autostrad i dróg ekspresowych. Planowane są także nowe odcinki w tej technologii. Aktualny katalog przeznaczony dla nawierzchni sztywnych uwzględnia dotychczasowe doświadczenia krajowe i zagraniczne w zakresie technologii budowy nawierzchni betonowych. Na uwagę zasługuje rozszerzony zakres konstrukcji nawierzchni z uwzględnieniem nawierzchni o ciągłym zbrojeniu oraz różnych typów podbudowy z kruszywa. Pozwala to projektantowi i wykonawcy dokonać optymalnych wyborów i dostosować nawierzchnie do własnych potrzeb finansowych. Uwzględnienie kryteriów zmęczenia przy doborze nawierzchni betonowych, zwiększonego nacisku osi, nowoczesnych rozwiązań technologicznych stawia niniejszy katalog na równi z innymi katalogami europejskimi.

W Polsce prowadzi się wiele badań dotyczących nawierzchni betonowych. Monitoruje się ruch pojazdów, analizuje się warunki klimatyczne mające wpływ na powstawanie dodatkowych naprężeń w płycie betonowej oraz bada się teksturę wpływającą na cechy przeciwpoślizgowe.

W dalszym etapie rozwoju nawierzchni betonowych w Polsce należy doskonalić technologię w zakresie redukcji hałasu oraz rozwijać prace nad koncepcją długowiecznych nawierzchni.

dr hab. inż. Piotr Mackiewicz
prof. dr hab. inż. Antoni Szydło
Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa
Lądowego i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk

Wybrane elementy niniejszego artykułu zrealizowano w ramach przedsięwzięcia RID, które jest współfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad.



Literatura

- Hendrickx Ir L. (1998). *Noiseless concrete pavements*, n° 18 FEBELCEM „DOSSIER CEMENT”.
- Mackiewicz, P. (2014). „Thermal stress analysis of jointed plane in concrete pavements.” *App. Therm. Eng.*, 73 (2014), 1167-1174.
- Mackiewicz, P. (2015). „Analysis of stresses in concrete pavement under a dowel according to its diameter and load transfer efficiency.” *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(11), 845-853.
- Mackiewicz, P. (2015). „Finite-Element Analysis of Stress Concentration around Dowel Bars in Jointed Plain Concrete Pavement.” *Journal of Transportation Engineering*, 141(6).
- Roesler, J.R., et al. (2016). „Concrete slab analyses with field-assigned non-uniform support conditions.” *International Journal of Pavement Engineering*, 17(7), 578-589.
- Scofield L. (2009). „Transportation Noise and Concrete Pavements, Using Quiet Concrete Pavements as the Noise Solution”, ACPA,
- Shoukry, S.N., William, G.W. and Riad, M.Y. (2007). „Effect of thermal stresses on mid-slab cracking in dowel jointed concrete pavements.” *Struct. and Infr. Eng.*, 3(1), 43-51.
- Sii, H.B., et al. (2014). „Effect of dowel looseness on response of jointed concrete pavements using three-dimensional finite element analysis.” *Advanced Materials Research*. 2014. *Trans Tech Publ.*
- Szydło, A. (2004). „Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Teoria wymiarowanie, realizacja.” *Polski Cement*.
- Szydło, A., Mackiewicz, P. (2005). „Nawierzchnie betonowe na drogach gminnych.” *Polski Cement*.
- Szydło, A., Mackiewicz, P., Wardęga, R. and Krawczyk, B. (2014). „Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych.” *Raport, GDDKiA, Warszawa*.
- Zhang, Y-c. and L.-I. Gao (2016). „Effect of dowel bar position deviation on joint load-transfer ability of cement concrete pavement.” *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(1), 30-36.

Rys. 18. Wyniki pomiarów dla wskaźnika tekstury MPD dla różnych typów nawierzchni