

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

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

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

Streszczenie

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

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

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

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

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

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

Abstract

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

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

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

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

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

1. Przyczyny i konsekwencje utraty podparcia pod płytami betonowymi

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

Do przyczyn wadliwości podbudowy zalicza się między innymi:

(1) Błędy projektowo- wykonawcze:

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

(2) Błędy wykonawcze:

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

(3) Błędy utrzymaniowe:

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

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

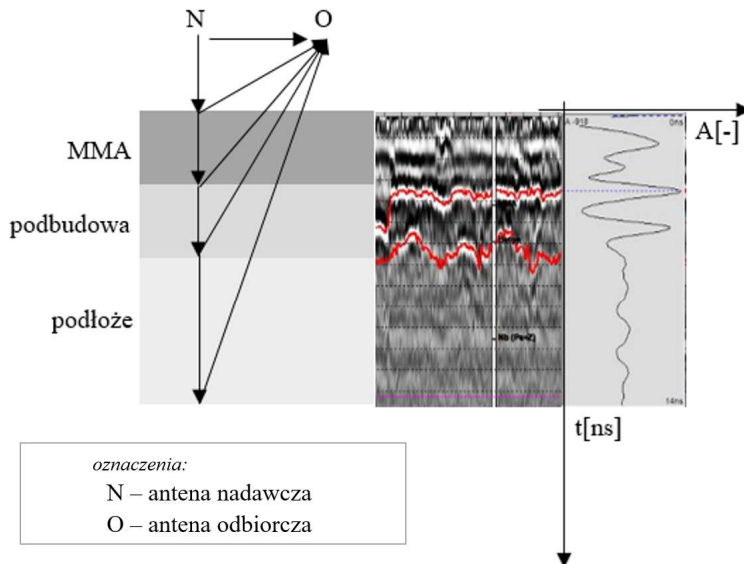
2. Diagnostyka nawierzchni drogowych z wykorzystaniem georadaru (GPR)

2.1 Podstawy metody GPR w inżynierii drogowej

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

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

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

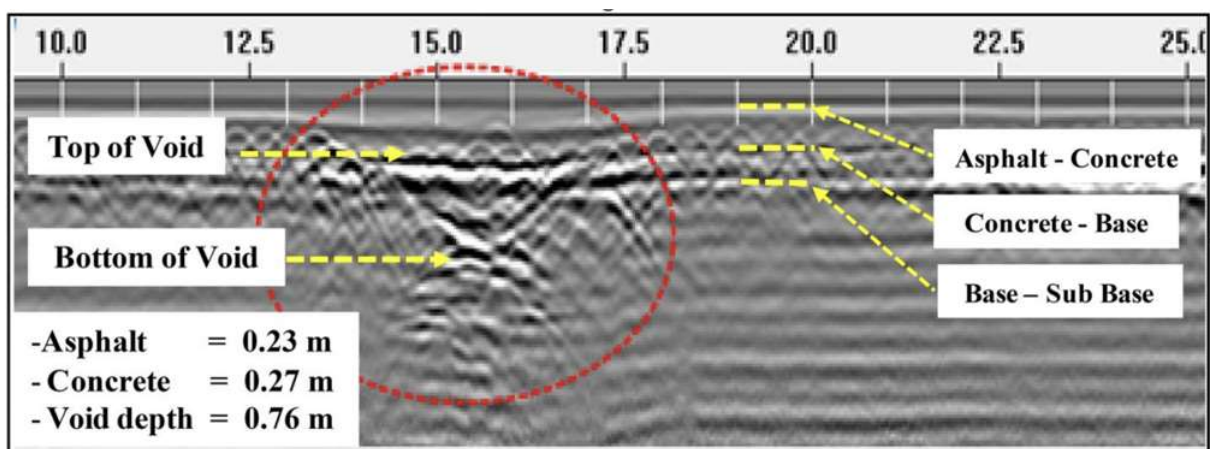


Rys. 1. Uproszczona metoda działania GPR (autor: M. Ruszczak)

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

2.2 Lokalizacja pustek pod płytami betonowymi metodą georadarową

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



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

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

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

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

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

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

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

wygenerowanie mapy lokalizacji potencjalnych pustek wymagających dalszej diagnostyki lub interwencji.

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

3.1 Stan nawierzchni przed przystąpieniem do remontu

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



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

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

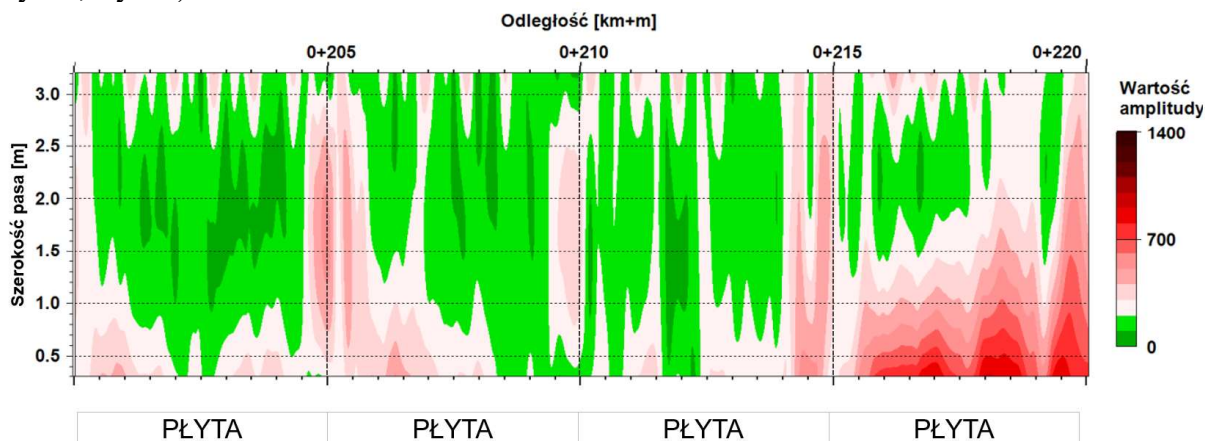
W związku z powyższymi obserwacjami podjęto decyzję o zastosowaniu metody georadarowej w celu weryfikacji obecności pustek oraz określenia ich lokalizacji. Badania georadarowe miały na celu potwierdzenie przypuszczeń wynikających z oceny wizualnej oraz dostarczenie dokładnych danych niezbędnych do zaplanowania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

3.2 Diagnostyka przedremontowa

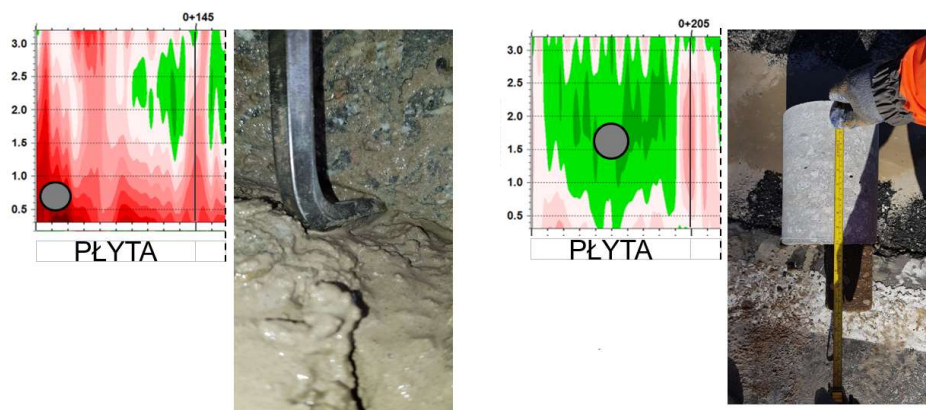
W ramach przygotowań do remontu nawierzchni betonowej wykonano pomiary georadarowe w układzie równoległych profili, rozmieszczonych co około 1 metr. Tak zaprojektowana siatka umożliwiła szczegółową ocenę stanu podbudowy pod płytami betonowymi.

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

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



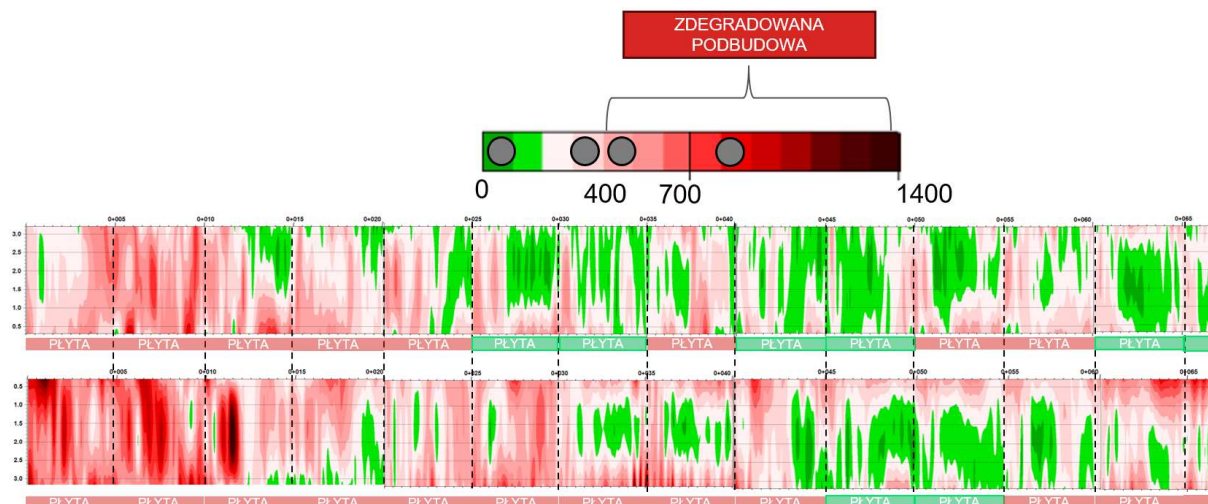
Rys. 4. Fragment mapy amplitud (pustek) przed kalibracją.



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

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

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



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

3.3 Planowanie zabiegów naprawczych

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

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

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

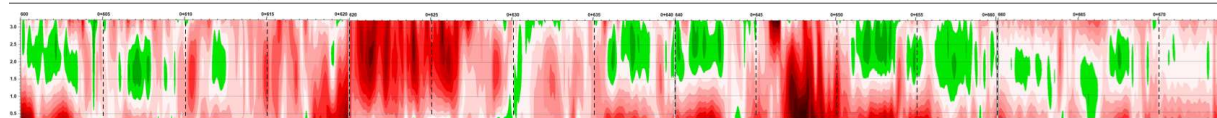


Rys. 7. Iniekcje geopolimerem pustek znajdujących się pod płytami betonowymi.

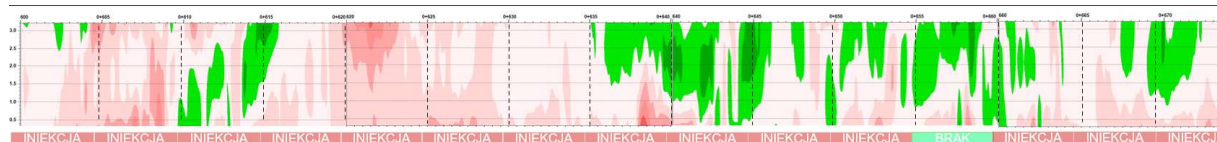
3.4 Monitoring efektów: bezpośrednio po remoncie, po 3 i 6 latach

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

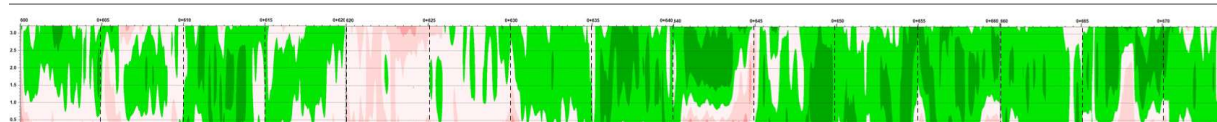
2019: STRONA LEWA, 15 PŁYT, PRZED NAPRAWAMI



2019: STRONA LEWA, 15 PŁYT, PO INIEKCJACH



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

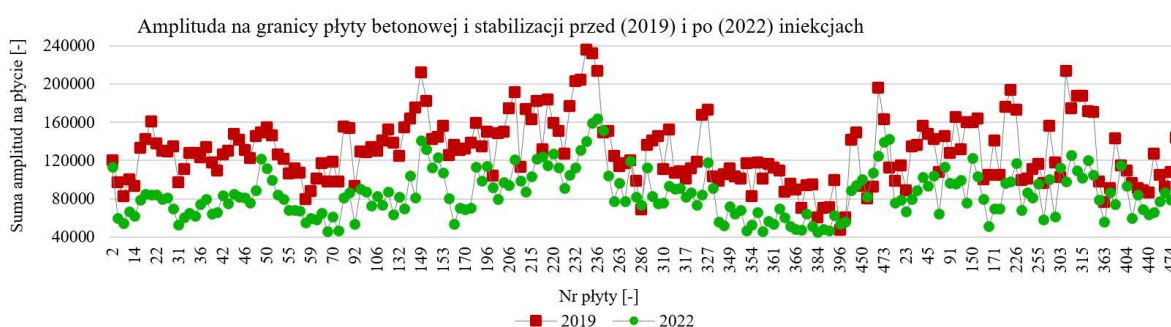


Rys. 8. Monitoring efektów naprawy nawierzchni betonowej na podstawie badania georadarem. U góry: mapa pustek pod płytami betonowymi przed naprawami. Na środku – mapa pustek bezpośrednio po wykonaniu iniekcji geopolimerem. Na dole – mapa pustek 3 lata po eksploatacji. Zaobserwowano zmniejszenie wartości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

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

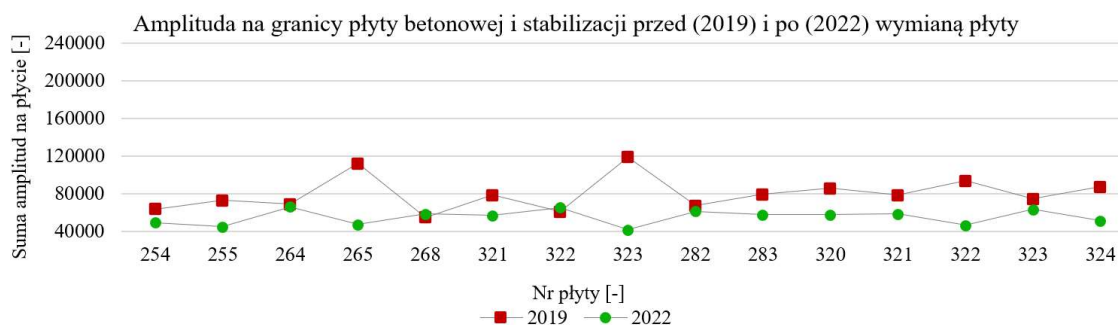
wartościach – szczególnie w zakresie barw ciemnoczerwonych – co wskazywało na obecność pustek i brak właściwego podparcia. Na kolejnych mapach przedstawiono wyniki pomiarów wykonanych bezpośrednio po iniekcji (Rys. 8, po środku) oraz po trzech latach eksploatacji (Rys. 8, na dole). Widoczny jest wyraźny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

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



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

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



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

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

4. Wnioski i rekomendacje dla praktyki inżynierskiej

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

(1) Skuteczna diagnostyka to podstawa planowania napraw

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

(2) Różne podejścia do detekcji uszkodzeń z wykorzystaniem GPR

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

(3) Automatyzacja analizy danych GPR dzięki wykorzystaniu kontrastów dielektrycznych

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

(4) Konieczność kalibracji danych GPR

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

(5) Rekomendacja: stały monitoring oraz okresowa diagnostyka

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

(6) Zakres stosowalności wniosków

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

Podsumowanie:

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

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

5. Literatura

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