

Od sygnału georadarowego do map zawilgocenia: studium przypadku lokalizacji wody w konstrukcji nawierzchni drogowej

dr inż. Małgorzata Ruszczak, Wisła, 22.04.2024



Wyzwanie diagnostyczne



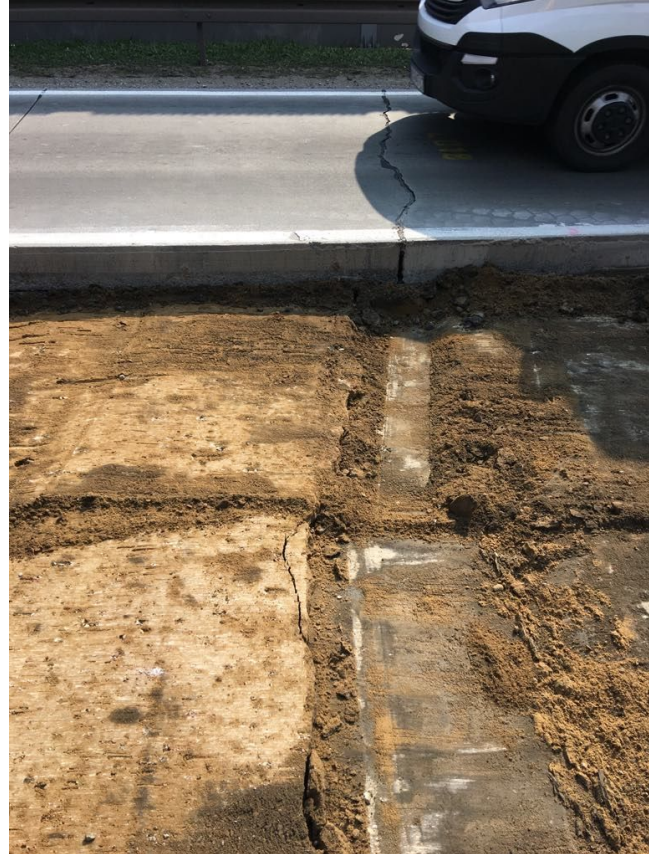
Możliwe źródła zawilgocień



- **Wody z opadów atmosferycznych**
 - infiltracja przez spękania i szczeliny nawierzchni
 - nieszczelne spoiny technologiczne
 - przesiąkanie przez pobocza i krawędzie jezdni
 - woda „uwięziona” w trakcie wbudowywania
- **Wody gruntowe**
 - podciąganie kapilarne z podłoża
 - okresowe podnoszenie poziomu wód gruntowych
 - brak lub nieskuteczna warstwa odsączająca
- **Woda napływająca z otaczającego terenu**
 - spływ boczny z terenów wyżej położonych
 - infiltracja z nasypów i skarp
- **Wody z systemów odwodnienia**
 - infiltracja z rowów przydrożnych
 - nieszczelne lub zamulone rowy i dreny

Wybrane skutki zawilgoceń

- **Pogorszenie adhezji lepiszcza do kruszywa**
 - odspajanie lepiszcza
 - przyspieszona degradacja mm-a
 - zwiększona podatność na uszkodzenia zmęczeniowe
- **Degradacja warstw niezwiązanych i podłoża**
 - rozluźnienie struktury materiału
 - powstawanie kolein i deformacji trwałych
- **Koncentracja naprężeń w konstrukcji**
 - nierównomierne osiadania
 - inicjacja spękań konstrukcyjnych
- **Przyspieszony rozwój uszkodzeń nawierzchni**
 - spękania siatkowe i podłużne
 - wykruszenia i ubytki– powstawanie wybojów
 - stripping
 - brak właściwego podparcia płyt betonowych



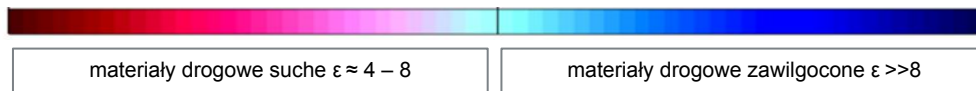
Dlaczego zawilgocenie jest widoczne w badaniach georadarowych?



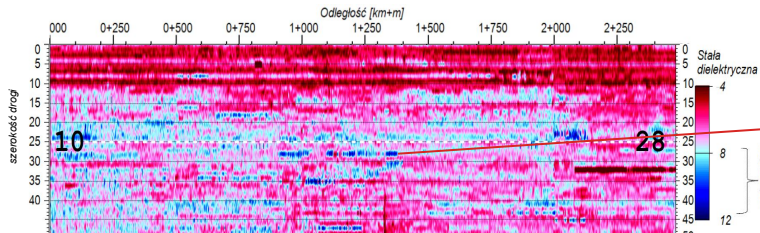
Zasada nr 1

Woda silnie zmienia właściwości elektromagnetyczne materiałów

– bardzo wysoka stała dielektryczna wody ($\epsilon \approx 80$), znaczny kontrast względem materiałów drogowych ($\epsilon \approx 4-8$), spowolnienie propagacji sygnału w strefach zawilgoconych



mapa wilgotności warstwy wiążącej



stałe dielektryczne

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| 6,5 | 6,8 | 7,3 | 7,7 | 6,6 | 5,7 | 6,7 | 7 |
| 7,6 | 7,4 | 7,3 | 8,2 | 7,9 | 8,7 | 7,7 | 8 |
| 6,4 | 7,3 | 7,5 | 7,3 | 7,1 | 6,3 | 6,0 | 6 |
| 9,1 | 8,5 | 8,6 | 9,4 | 9,9 | 8,9 | 9,7 | 7 |
| 7,3 | 6,9 | 7,3 | 8,3 | 8,5 | 7,4 | 7,2 | 7 |
| 7,1 | 6,8 | 6,9 | 6,5 | 6,7 | 7,1 | 7,4 | 7 |
| 6,1 | 6,1 | 5,9 | 5,7 | 6,4 | 6,9 | 6,7 | 6 |
| 6,2 | 6,5 | 6,3 | 6,5 | 6,9 | 7,1 | 6,6 | 5 |
| 8,2 | 8,1 | 7,8 | 7,1 | 6,7 | 7,5 | 7,3 | 7 |

wysięki

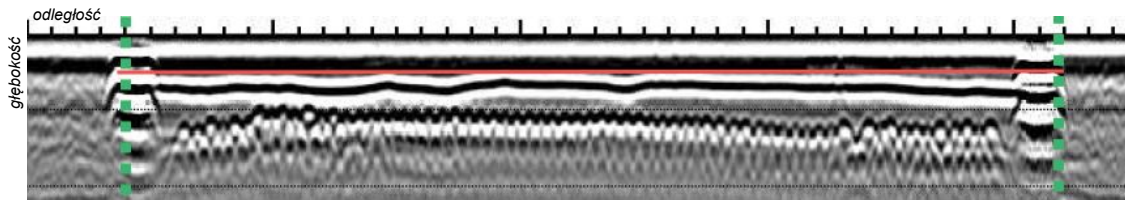


Zasada nr 2

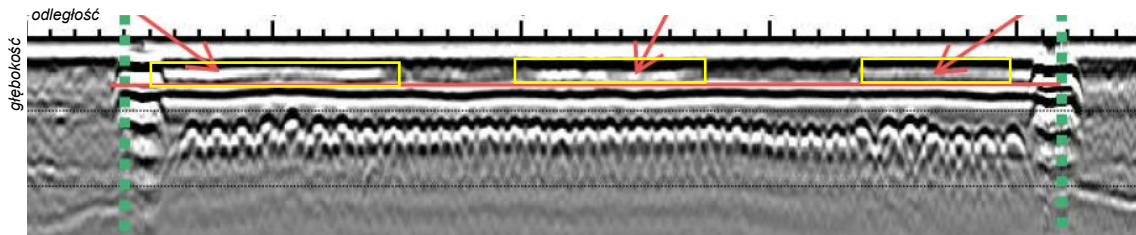
Woda powoduje wzrost tłumienia sygnału, zmiany charakteru odbić radarowych

– następuje redukcja amplitudy odbić, zanikanie refleksów z głębszych warstw, wzmocnienie lub rozmycie granic międzywarstwowych, zaburzenia ciągłości reflektorów

profil georadarowy odwzorowujący przekrój poprzeczny mostu



brak
zawilgocień

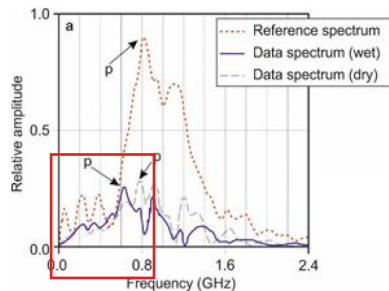


zawilgocenia

Zasada nr 3

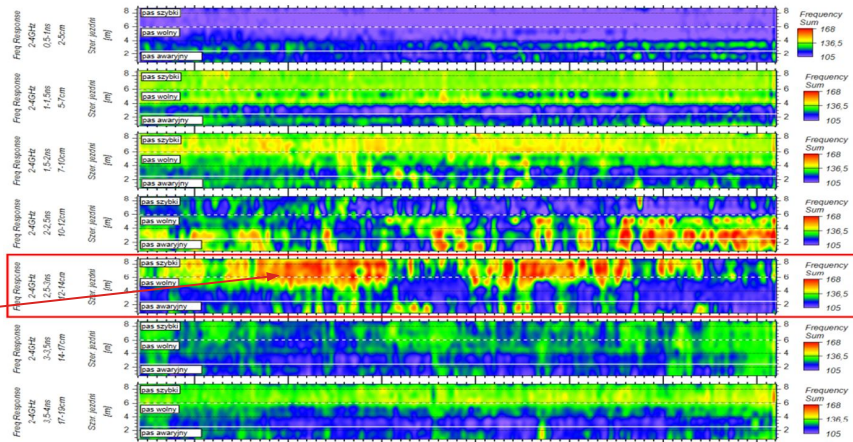
Woda powoduje zmiany widma częstotliwościowego sygnału

– selektywne tłumienie wyższych częstotliwości, przesunięcia energii sygnału w analizie spektralnej



mapa zawilgoceń warstw asfaltowych, plastry o szerokości 3 cm

Odległość [km+m]

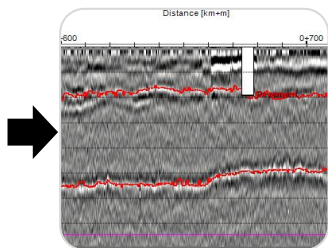


| | | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 43 | 136 | 121 | 122 | 128 | 140 | 144 | 142 | 132 |
| 36 | 144 | 135 | 129 | 126 | 144 | 147 | 150 | 136 |
| 54 | 152 | 139 | 132 | 141 | 161 | 147 | 145 | 135 |
| 46 | 160 | 143 | 131 | 130 | 148 | 122 | 135 | 144 |
| 29 | 161 | 145 | 135 | 150 | 141 | 128 | 142 | 149 |
| 30 | 126 | 115 | 114 | 121 | 129 | 112 | 118 | 141 |
| 22 | 119 | 116 | 116 | 124 | 125 | 117 | 122 | 130 |
| 25 | 127 | 115 | 117 | 121 | 119 | 116 | 118 | 134 |
| 20 | 112 | 112 | 110 | 122 | 130 | 113 | 119 | 146 |
| 17 | 109 | 110 | 108 | 109 | 123 | 113 | 112 | 146 |

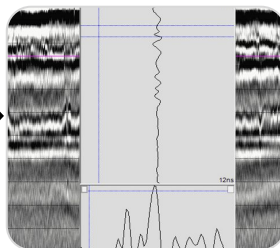
Od echogramu GPR do map zawilgocenia



Rejestracja danych



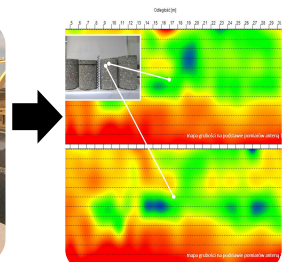
Identyfikacja warstw



Analiza parametrów diagnostycznych



Kalibracja terenowa

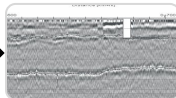


Opracowanie mapy

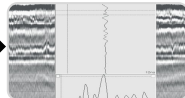
Rejestracja danych



Rejestracja danych



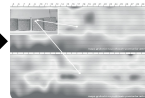
Identyfikacja warstw



Analiza parametrów
diagnostycznych



Kalibracja terenowa



Opracowanie mapy



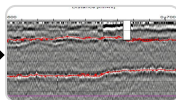
- Ciągłe, równoległe przejazdy wzdłuż drogi
- Rozstaw przejazdów – najlepiej co 1 m
- Zapis współrzędnych GPS trasy przejazdu
- Wideorejestracja trasy przejazdu – ułatwia identyfikację niejasnych anomalii

| | | |
|---|--------------|--------|
| → | pas szybki | 0,88 m |
| → | | 0,88 m |
| → | | 0,88 m |
| → | | 0,88 m |
| → | pas wolny | 0,88 m |
| → | | 0,88 m |
| → | | 0,88 m |
| → | | 0,88 m |
| → | pas awaryjny | 0,88 m |
| → | | 0,88 m |
| → | | 0,75 m |

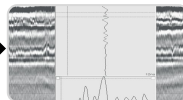
Identyfikacja warstw



Rejestracja danych



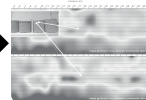
Identyfikacja warstw



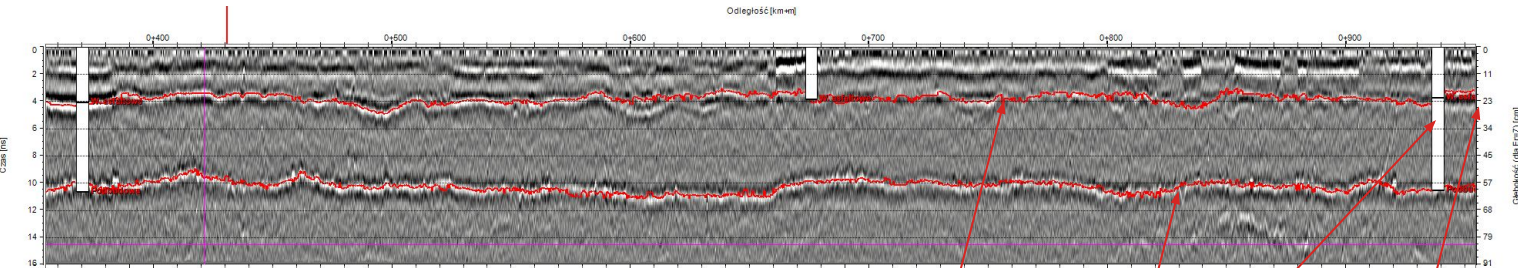
Analiza parametrów
diagnostycznych



Kalibracja terenowa



Opracowanie mapy



- Opracowanie skali głębokościowej
- Identyfikacja refleksów na skanach georadarowych

spód warstw asfaltowych

odwiert

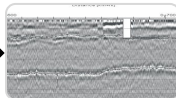
głębokość

spód podbudowy

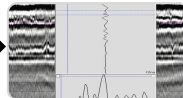
Analiza parametrów diagnostycznych



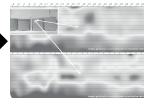
Rejestracja danych



Identyfikacja warstw

Analiza parametrów
diagnostycznych

Kalibracja terenowa



Opracowanie mapy

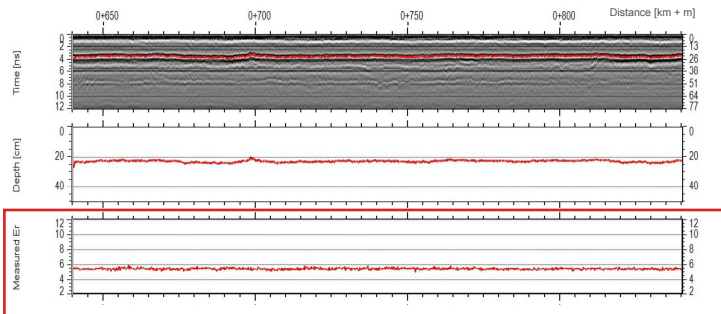
• Podejście 1 — parametry dielektryczne

(wyznaczanie stałej dielektrycznej warstw, analiza zmian prędkości propagacji)



materiały drogowe suche $\epsilon \approx 4 - 8$

materiały drogowe zawilgocone $\epsilon \gg 8$



• Podejście 2 — analiza częstotliwościowa

(analiza widma sygnał, identyfikacja stref zwiększonego tłumienia)

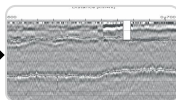


| Lokalizacja [km+m] | | Pas awaryjny | | | Pas wolny | | | Pas szybki | | |
|--------------------|-----------|--------------|----------|----------|-----------|----------|----------|------------|----------|-----------|
| Od [km+m] | Do [km+m] | Profil 1 | Profil 2 | Profil 3 | Profil 4 | Profil 5 | Profil 6 | Profil 7 | Profil 8 | Profil 10 |
| | | 0.75 | 1.63 | 2.51 | 3.39 | 4.27 | 5.15 | 6.03 | 6.91 | 7.79 |
| 116+500 | 116+520 | 126 | 147 | 164 | 162 | 165 | 123 | 144 | 149 | 129 |
| 116+520 | 116+540 | 126 | 147 | 164 | 162 | 165 | 123 | 144 | 149 | 129 |
| 116+540 | 116+560 | 128 | 152 | 161 | 160 | 154 | 124 | 139 | 153 | 128 |
| 116+560 | 116+580 | 110 | 137 | 164 | 161 | 159 | 121 | 128 | 143 | 116 |
| 116+580 | 116+600 | 107 | 132 | 158 | 158 | 154 | 137 | 133 | 136 | 119 |
| 116+600 | 116+620 | 105 | 134 | 157 | 146 | 155 | 133 | 136 | 119 | 109 |
| 116+620 | 116+640 | 107 | 130 | 155 | 149 | 150 | 126 | 119 | 130 | 115 |
| 116+640 | 116+660 | 106 | 131 | 148 | 148 | 154 | 130 | 128 | 133 | 115 |
| 116+660 | 116+680 | 110 | 132 | 154 | 153 | 151 | 123 | 122 | 133 | 114 |
| 116+680 | 116+700 | 106 | 122 | 143 | 138 | 144 | 124 | 117 | 118 | 108 |
| 116+700 | 116+720 | 107 | 130 | 154 | 150 | 152 | 123 | 118 | 123 | 112 |
| 116+720 | 116+740 | 119 | 141 | 162 | 152 | 158 | 131 | 135 | 131 | 118 |
| 116+740 | 116+760 | 116 | 139 | 164 | 161 | 161 | 131 | 131 | 138 | 120 |
| 116+760 | 116+780 | 116 | 133 | 157 | 154 | 157 | 117 | 126 | 133 | 115 |
| 116+780 | 116+800 | 116 | 138 | 162 | 140 | 166 | 131 | 127 | 128 | 117 |

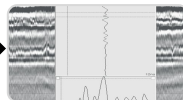
Kalibracja terenowa



Rejestracja danych



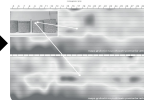
Identyfikacja warstw



Analiza parametrów
diagnostycznych

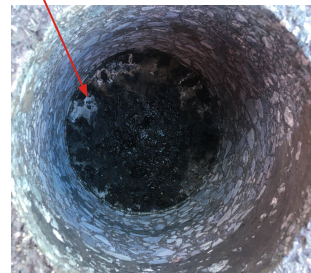


Kalibracja terenowa



Opracowanie mapy

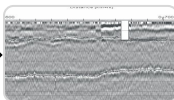
| Lp. | Lokalizacja | Wilgotność na spodzie nowej warstwy wiążącej | Amplituda x 10 MHz w oknie czasowym 2,5 – 3,0 ns (około 12 – 14 cm) |
|-----|-------------|--|---|
| 6 | ... | woda | 138 MHz |
| 5 | ... | woda | 154 MHz |
| 4 | ... | brak | 117 MHz |
| 2 | ... | woda | 144 MHz |
| 1 | ... | woda | 149 MHz |



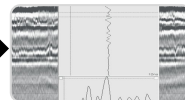
Opracowanie map zawilgocenia



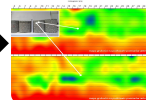
Rejestracja danych



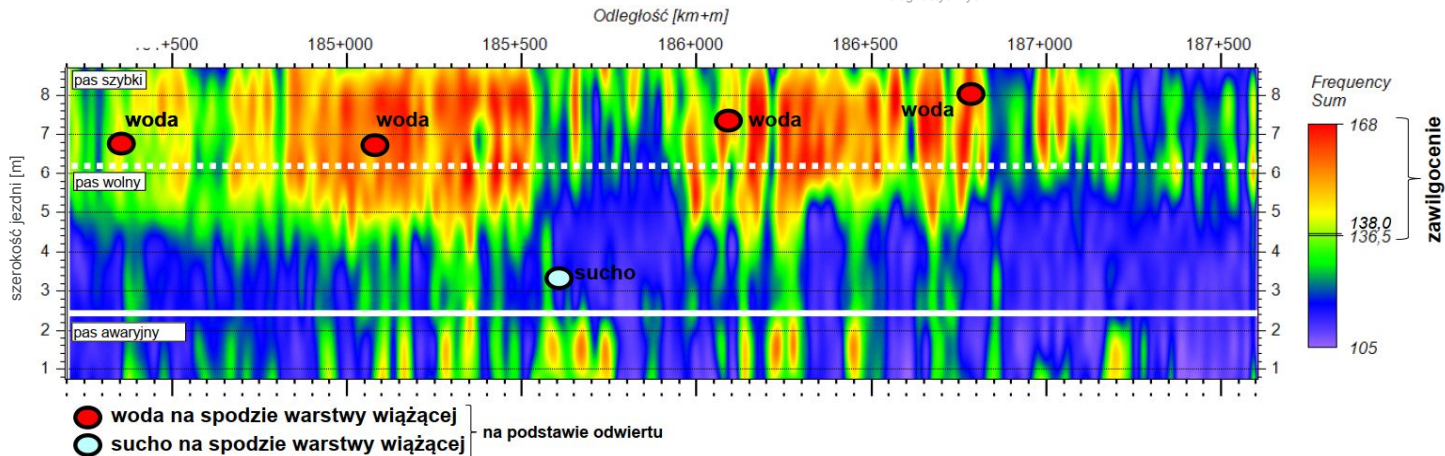
Identyfikacja warstw

Analiza parametrów
diagnostycznych

Kalibracja terenowa



Opracowanie mapy



Lokalizacja zawilgoceń na obiekcie mostowym



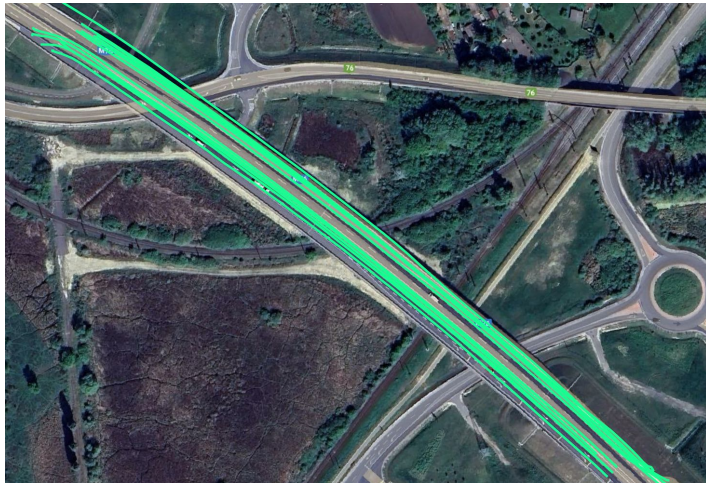
PROBLEM

- pojawiające się wsięki na nawierzchni asfaltowej mostu, niezwiązane z opadami atmosferycznymi
- cel – sprawdzenie, w którym miejscu konstrukcji nawierzchni znajduje się zawilgocenie



WYKONANE BADANIA

- wykonano badania georadarowe, po 3 przejazdy na pas ruchu
- po wstępnej analizie GPR wykonano odwierty kalibrujące



ANALIZA BADAŃ GPR

- Analiza częstotliwościowa
(analiza widma sygnału, identyfikacja stref zwiększonego tłumienia)
- Podzielono przekrój poprzeczny mostu na plastry o głębokości 12,5 mm
(łącznie podzielono nawierzchnię asfaltową mostu na **12 plastrów**)



- Wykonano odwierty kalibrujące i oceniając stan zawilgocenia poszczególnej warstwy w odwiercie przyjęto skalę ryzyka występowania zawilgocenia



WYBRANE ODWIERTY/ ODKRYWKI METODĄ „NA SUCHO”



woda napłynęła natychmiast po wyjęciu rdzenia, interpretacja: wysokie ryzyko występowania



nie zaobserwowano napływu wody, natomiast widoczne jest zawilgocenie, interpretacja: średnie ryzyko występowania zawilgocenia

śladowe ilości zawilgocenia, interpretacja: niskie ryzyko występowania zawilgocenia

brak zawilgocenia, interpretacja: brak ryzyka występowania zawilgocenia



nie zaobserwowano napływu wody, natomiast widoczne jest zawilgocenie, interpretacja: średnie ryzyko występowania zawilgocenia

wysokie ryzyko

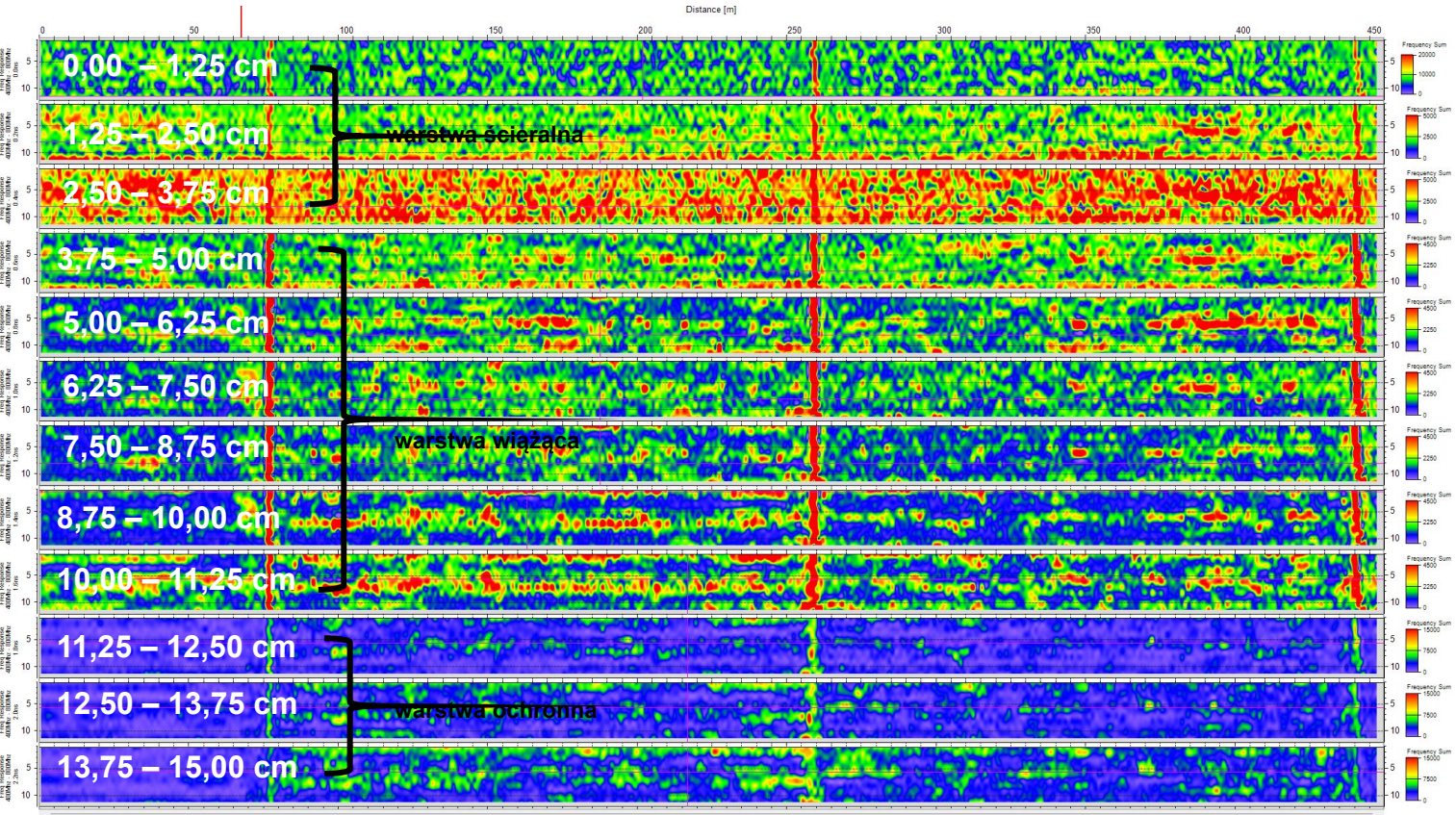
średnie ryzyko

niskie ryzyko

brak ryzyka



STRABAG
WORK ON PROGRESS



MAPA RYZYKA ZAWILGOCEŃ – WARSTWA ŚCIERALNA, 12,5 – 25,0 mm



wysokie ryzyko zawilgocenia
średnie ryzyko zawilgocenia
niskie ryzyko zawilgocenia
brak ryzyka zawilgocenia



STRABAG
WORK ON PROGRESS

MAPA RYZYKA ZAWILGOCEŃ – WARSTWA ŚCIERALNA, 25,0 – 37,5 mm



wysokie ryzyko zawilgocenia
średnie ryzyko zawilgocenia
niskie ryzyko zawilgocenia
brak ryzyka zawilgocenia



STRABAG
WORK ON PROGRESS

MAPA RYZYKA ZAWILGOCEŃ – WARSTWA WIAŻĄCA, 37,5 – 50,0 mm



wysokie ryzyko zawilgocenia
średnie ryzyko zawilgocenia
niskie ryzyko zawilgocenia
brak ryzyka zawilgocenia



STRABAG
WORK ON PROGRESS

MAPA RYZYKA ZAWILGOCEŃ – WARSTWA WIAŻĄCA, 62,5 – 75,0 mm

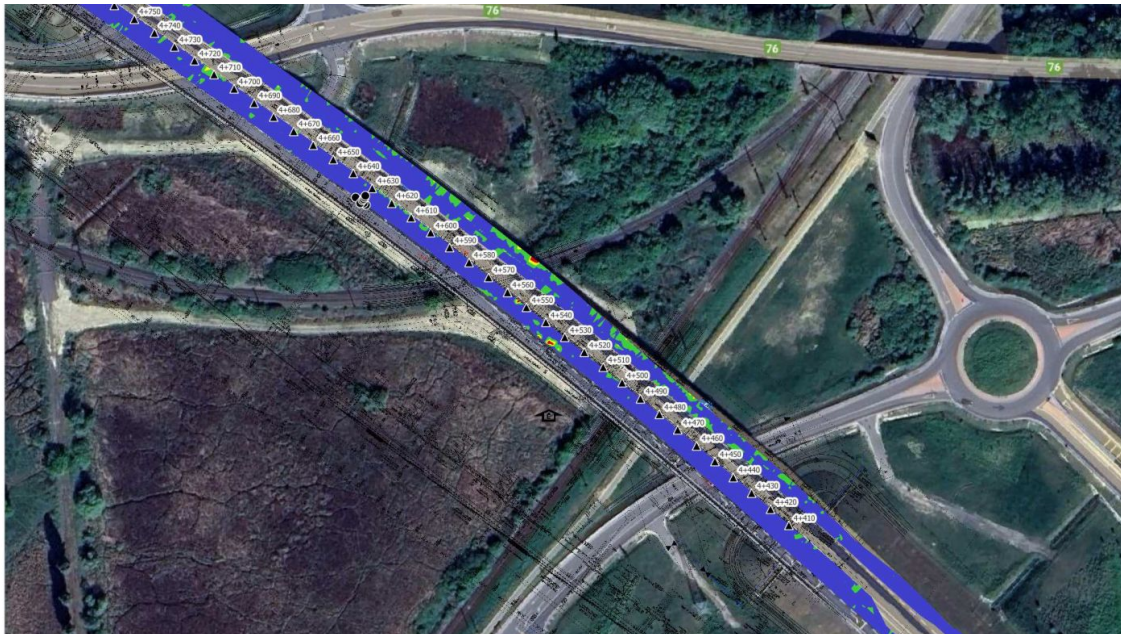


wysokie ryzyko zawilgocenia
średnie ryzyko zawilgocenia
niskie ryzyko zawilgocenia
brak ryzyka zawilgocenia



STRABAG
WORK ON PROGRESS

MAPA RYZYKA ZAWILGOCEŃ – WARSTWA OCHRONNA, 11,25 – 12,50 CM

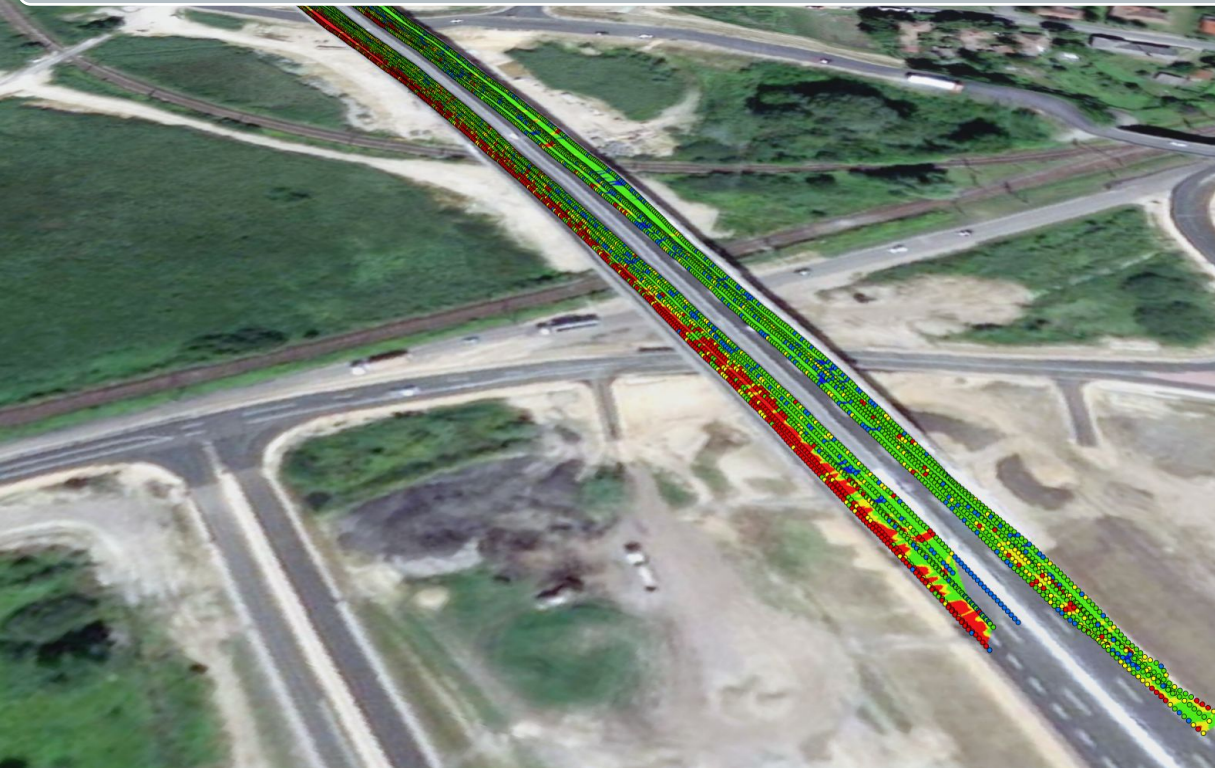


wysokie ryzyko zawilgocenia
średnie ryzyko zawilgocenia
niskie ryzyko zawilgocenia
brak ryzyka zawilgocenia

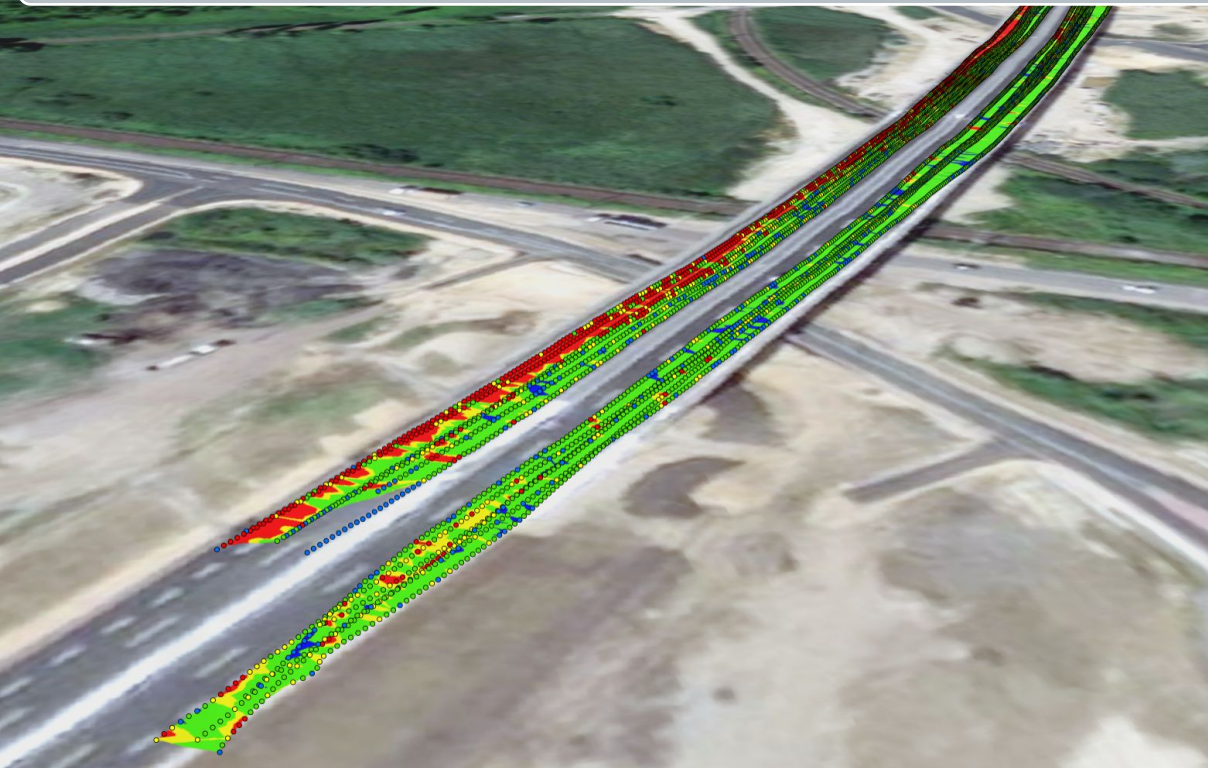


STRABAG
WORK ON PROGRESS

MAPA RYZYKA ZAWILGOCEŃ – WARSTWA ŚCIERALNA, 12,5 – 25,0 mm



MAPA RYZYKA ZAWILGOCEŃ – WARSTWA ŚCIERALNA, 12,5 – 25,0 mm



- Zawilgocenie zlokalizowano **w warstwie ścieralnej oraz warstwie wiążącej**, co wskazuje na dopływ wody od powierzchni konstrukcji lub ze stref krawędziowych pomostu.
- W warstwie ochronnej **nie stwierdzono oznak podwyższonej wilgotności**, co sugeruje zachowanie szczelności zasadniczej hydroizolacji pomostu.
- Największą koncentrację stref zawilgoconych odnotowano **po stronie pasa awaryjnego jezdni lewej**, co wskazuje na lokalny charakter dopływu wody.
- Rozkład zawilgoczeń sugeruje boczną infiltrację wody w strefie krawędzi pomostu, prawdopodobnie poprzez **nieszczelności przy krawężnikach lub elementach odwodnienia**.
- Obserwowane zawilgoczenia mają charakter powierzchniowo-międzywarstwowy i **nie wskazują na degradację głównej izolacji obiektu mostowego**.

- Uszczelnienie stref krawędziowych pomostu
- Kontrola i udrożnienie systemu odwodnienia mostowego
- Lokalne uszczelnienie nawierzchni asfaltowej w strefach infiltracji
- Rozważenie zastosowania izolacji pionowej w strefie krawędzi jezdni w celu ograniczenia bocznego dopływu wody.

Wyniki badań GPR wskazują na infiltrację boczną przy zachowanej szczelności zasadniczej izolacji pomostu, co umożliwia ukierunkowanie działań naprawczych na strefy krawędziowe obiektu.

Dziękuję za uwagę

