

INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW
Zakład Diagnostyki Nawierzchni

SPRAWOZDANIE
z realizacji pracy pt.:
**„Analiza możliwości wykorzystania techniki radarowej w
ocenie stanu połączeń międzywarstwowych”.**

SPRAWOZDNIĘ CZĘŚCIOWE
Etap I – zadania 1 i 2

Zleceniodawca: Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad

Umowa nr 2176/2008 z dnia 06.08.2008 roku

Opracowali:

mgr inż. Jacek SUDYKA – IBDiM

dr inż. Lech KRYSIŃSKI – Uniwersytet Warszawski

mgr inż. Przemysław HARASIM – IBDiM

dr inż. Piotr Jaskuła – Politechnika Gdańska

Kierownik Zakładu

Diagnostyki Nawierzchni

mgr inż. Tomasz MECHOWSKI

Warszawa, listopad 2008

Spis treści

1	Wstęp	9
2	Analiza możliwości identyfikacji połączeń międzywarstwowych	10
2.1	Podstawy techniki radarowej	10
2.1.1	Cechy elektryczne ośrodka	10
2.1.2	Propagacja fal elektromagnetycznych	14
2.1.3	Rozdzielczość pozioma i pionowa	18
2.1.4	Identyfikacja połączeń międzywarstwowych przy pomocy techniki radarowej	21
2.1.5	Charakterystyka stosowanych rozwiązań sprzętowych	21
2.1.6	Zastosowania i ograniczenia metody	25
2.2	Rejestracja ugięć nawierzchni metodami dynamicznymi	27
2.2.1	Charakterystyka ugięciomierzy dynamicznych FWD	31
2.2.2	Przydatność uzyskiwanych wyników w ocenie połączenia międzywarstwowego	33
2.2.2.1	Test młotem impulsowym	33
2.2.2.2	Metoda z użyciem FWD	34
2.2.2.3	Metoda IBDiM	35
2.3	Laboratoryjne metody oceny stanu połączeń międzywarstwowych	38
2.3.1	Skutki braku szczepności międzywarstwowej	39
2.3.2	Przyczyny utraty szczepności i rodzaje czynników wpływające na szczepność	41
2.3.3	Przegląd istniejących metod	44
2.3.3.1	Badanie ścinania w aparacie skrzynkowym	44
2.3.3.2	Test ścinania ASTRA	45
2.3.3.3	Metoda Leutner'a i jej modyfikacje	46
2.3.3.4	Ścinanie przy poziomym ściskaniu	52
2.3.3.5	Ścinanie przy użyciu aparatu Superpave Shear Tester (SST)	52
2.3.3.6	Rozszczepianie klinem	53
2.3.3.7	Metoda Pull-off	54
2.3.3.8	Metoda skręcania (ang. Torque Bond Test)	55
2.3.3.9	Badanie w urządzeniu ATTACKER	57
2.3.4	Zestawienie wymagań dotyczących szczepności międzywarstwowej	57
2.3.5	Podsumowanie	58
3	Laboratoryjna ocena możliwości pomiarowych techniki radarowej	59
3.1	Opis stanowiska badawczego	59
3.2	Badania laboratoryjne jakości rejestrowanych sygnałów odbitych	60
3.2.1	Prześwietlanie płyty parafinowej	60
3.2.2	Prześwietlanie cienkiej szyby	61
3.2.3	Wstępne rozpoznanie własności procesu samlowania sygnału	62
3.2.4	Wstępne rozpoznanie własności sygnału refleksyjnego	63
3.2.5	Badanie własności refleksyjnych warstwy wody	64
3.3	Analiza porównawcza uzyskiwanych wzorów fal elektromagnetycznych i ocena kontrastów międzywarstwowych	68
3.3.1	Pierwsze badania własności refleksyjnych szczelin („poziomych”)	68
3.3.2	Badanie modelowego sygnału referencyjnego odbitego od blachy	71

3.3.3	Prześwietlanie szyb i stosów szyb szklanych	73
3.4	Ocena charakteru fal emitowanych przez antenę pod kątem wykorzystania techniki radarowej w ocenie stanu połączenia warstw.....	77
3.4.1	Próby kalibracji zależności amplitudy refleksu od powierzchni blachy od odległości pomiędzy blachą i anteną	77
3.4.2	Przykłady wpływu złożoności geometrycznych powierzchni odbijającej na postać sygnału	79
3.4.3	Badanie rozwartości stożka obserwacyjnego anteny.....	80
3.4.4	Rozpoznawanie kształtu sygnału emitowanego przez antenę i sygnału odbitego od blachy	80
3.4.5	Badanie własności sygnału transmisyjnego w układzie dwu-antenowym	82
4	Podsumowanie	84
	Bibliografia	86

Załącznik Schemat stanowiska badawczego

Spis ilustracji

Rysunek 2.1 Rodzaje polaryzacji: (a) elektryczna, (b) jonowa, (c) molekularna i (d) międzyfazowa (Scaffer & Saxena, 1995).....	12
Rysunek 2.2 James Clark Maxwell (1831-1879).....	14
Rysunek 2.3 Powstawanie fali elektromagnetycznej	15
Rysunek 2.4 Mechanizmy rozpraszania fali: (a) odbicie kierunkowe, (b) refrakcja (załamanie), (c) dyfrakcja, (d) rezonans.....	16
Rysunek 2.5 Odbicie i przenikanie fali: (a) TE i (b) TM.....	17
Rysunek 2.6 Rozdzielczość pionowa Δv i pozioma Δh	18
Rysunek 2.7 Impulsy czasowe o szerokości $\frac{1}{2} W$; a) impulsy wyraźnie odseparowane gdy $T \gg W$, b) impulsy rozróżnialne do momentu gdy $T \approx W$, c) impulsy nakładające się (nierozróżnialne) gdy $T \ll W$	19
Rysunek 2.8 Rozdzielczość w funkcji częstotliwości emitowanej fali	21
Rysunek 2.9 Zasada rejestracji sygnałów odbitych w systemach GPR (a – uproszczony obraz przejścia impulsu elektromagnetycznego, b – zarejestrowany sygnał odbity, c – uproszczony falogram z pomiarów radarowych)	22
Rysunek 2.10 System pomiarowy z umieszczoną w wózku anteną typu ground-coupled o częstotliwości 400 MHz i umieszczoną na wysokości ok. 45 cm anteną typu horn o częstotliwości 1 GHz	23
Rysunek 2.11 System pomiarowy amerykańskiej firmy Penetradar (antenę typu horn o częstotliwościach 1 GHz).....	24
Rysunek 2.12 System pomiarowy kanadyjskiej firmy Road Radar (antena typu horn o częstotliwości 3 GHz i antena typu ground-coupled o częstotliwości 1 GHz)	24
Rysunek 2.13 System pomiarowy norweskiej firmy 3D Radar (antena 63 elementowa typu stepped frequency o zmiennej częstotliwości od 30MHz do 2 GHz)	24
Rysunek 2.14 Dane z pomiaru jednorodności warstwy asfaltowej; rysunek górny – stan dobry, rysunek dolny – nawierzchnia z ubytkami powierzchniowymi oraz lokalnie występującym, zbyt małym zagęszczeniem.....	25
Rysunek 2.15 Pomiar zawilgocenia warstw asfaltowych na głębokości 4 – 8 cm (wg raportu z badań – praca niepublikowana).....	26
Rysunek 2.16 Pomiar stanu podtorza antenami typu horn o częstotliwości 1 GHz.....	26
Rysunek 2.17 Model ideowy ugięciomierza oparty na a) masie pomiędzy sprężynami, b) masie na sprężynie i tłumiku	27
Rysunek 2.18 Ugięciomierz dynamiczny FWD A/S Phønix 1978 r. (www.pavement-consultants.com).....	28
Rysunek 2.19 Zestaw pomiarowy FWD Phonix z elektroniką firmy Dynatest (COST 336) 28	

Rysunek 2.20 Współczesna wersja ugięciomierza dynamicznego KUAB	29
Rysunek 2.21 Udział w rynku producentów FWD w 1999 roku (COST 336).....	29
Rysunek 2.22 Ugięciomierz UL-1	30
Rysunek 2.23 Traffic Speed Deflectometer (www.greenwood.dk)	30
Rysunek 2.24 Belka z zainstalowanymi czujnikami (www.greenwood.dk)	31
Rysunek 2.25 Ugięciomierz dynamiczny FWD	31
Rysunek 2.26 Płyta naciskowa z zestawem geofonów	32
Rysunek 2.27 Porównanie analiz spektralnych dla testu młotem impulsowym ze złym oraz dobrym powiązaniem warstw.....	33
Rysunek 2.28 Wykresy ugięć i nacisku w miejscu dobrego powiązania warstw (Mechowski, Harasim, Kowalski, Kusiak, & Borucki, 2006)	36
Rysunek 2.29 Wykresy ugięć i nacisku w miejscu ograniczonego powiązania warstw (Mechowski, Harasim, Kowalski, Kusiak, & Borucki, 2006)	36
Rysunek 2.30 Wykresy ugięć rejestrowanych przez czujnik centralny w miejscu dobrego i ograniczonego powiązania warstw (Mechowski, Harasim, Kowalski, Kusiak, & Borucki, 2006)	36
Rysunek 2.31 Wykresy ugięć i nacisku w miejscu braku połączenia międzywarstwowego (Mechowski, Harasim, Kowalski, Kusiak, & Borucki, 2006)	37
Rysunek 2.32 Zmienność ugięcia nawierzchni pod czujnikiem centralnym w czasie wraz z punktami charakterystycznymi (Mechowski, Harasim, Kowalski, Kusiak, & Borucki, 2006)	38
Rysunek 2.33 Widok księżycowatych spękań na skutek braku szczepności międzywarstwowej (fot. P. Jaskuła).....	40
Rysunek 2.34 Widok całkowitego poślizgu warstwy na skutek braku szczepności międzywarstwowej (fot. P. Jaskuła).....	40
Rysunek 2.35 Schemat i widok aparatu skrzynkowego zaadaptowanego do badań mieszanek mineralno-asfaltowych (Pos, Kruntcheva, Collop, & Thom, 2003).....	45
Rysunek 2.36 Schemat aparatu skrzynkowego ASTRA (Canestrari & Santagata, 2005) ...	46
Rysunek 2.37 Typowe wykresy uzyskane w badaniu aparatem ASTRA (Canestrari & Santagata, 2005)	46
Rysunek 2.38 Aparat Leutnera do ścinania próbek (Von Becker, 1990)	47
Rysunek 2.39 Wykres z badania	48
Rysunek 2.40 Widok urządzenia LPDS do ścinania (Partl & Raab, 1998)	48
Rysunek 2.41 Przyrząd do badania ścinania międzywarstwowego z USA (Sholar, Page, Musselman, Upshaw, & Moseley, 2002), (Tashman, Nam, & Papagiannakis, 2006).....	49

Rysunek 2.42 Aparat do badania Leutnera przygotowany na Politechnice Gdańskiej w 2001 roku (for. P. Jaskuła).....	50
Rysunek 2.43 Badanie ścinania (Hakim B. A., 2002).....	50
Rysunek 2.44 Ścinanie próbki z mieszanki mineralno-bitumicznej z geosyntetyczną warstwą pośrednią.....	51
Rysunek 2.45 Schemat badania ścinania przy poziomym ściskaniu (Romanoschi & Metcalf, 2002).....	52
Rysunek 2.46 Widok badania ścinania w aparacie SST (Tashman, Nam, & Papagiannakis, 2006)	53
Rysunek 2.47 Metoda badania szczepności poprzez rozszczepianie klinem [21].....	54
Rysunek 2.48 Widok urządzenia do badania pull-off	55
Rysunek 2.49 Widok próbki podczas badania odrywania – pull-off (Raab C & Partl M.N., 2004)	55
Rysunek 2.50 Badanie skręcania.....	56
Rysunek 2.51 Aparat ATTACKER do badania szczepności międzywarstwowej (West, Zhang, & Moore, 2005).....	57
Rysunek 3.1 Schemat stanowiska badawczego.....	59
Rysunek 3.2 Ustawianie stanowiska badawczego	60
Rysunek 3.3 Sygnał refleksyjny uzyskany przy prześwietlaniu płyty parafinowej i wzorzec sygnału emitowanego.....	61
Rysunek 3.4 Dekonwolucja sygnału wzorcowego i sygnału refleksyjnego prześwietlania płyty parafinowej	61
Rysunek 3.5 Sygnał uzyskany w wyniku pierwszej próby refleksyjnego prześwietlania cienkiej szyby i wynik dekonwolucji tego sygnału	62
Rysunek 3.6 Próba interpretacji strukturalnej sygnału refleksyjnego od cienkiej szyby...62	
Rysunek 3.7 Porównanie sygnałów (opis w tekście)	63
Rysunek 3.8 Porównanie sygnałów odbitych folii aluminiowej	64
Rysunek 3.9 Zestawienie dekonwolucji sygnałów odbitych od pomiętej folii aluminiowej.	64
Rysunek 3.10 Badanie wpływu zawartości soli na własności refleksyjne i transmisyjne warstwy wody.....	65
Rysunek 3.11 Dekonwolucyjny obraz podnoszącego się lustro wody.....	66
Rysunek 3.12 Interpretacja wyżej opisanego obrazu dekonwolucyjnego (D2, D3,... kolejne odbicia wielokrotne od dna basenu)	66

Rysunek 3.13 Interpretacja kształtu sygnału refleksyjnego (przy końcowym napełnieniu wodą)	67
Rysunek 3.14 Próba badania wpływu bocznych ścian basenu	67
Rysunek 3.15 Analiza zmian amplitudy głównego refleksu powierzchniowego.	68
Rysunek 3.16 Refleksyjny przekrój dekonwolucyjny przez dwie przylegające powierzchniami płyty parafinowe	69
Rysunek 3.17 Refleksyjny przekrój dekonwolucyjny – szczelina między płytami rozszerzająca się od 0 do 1 cm szerokości	70
Rysunek 3.18 Refleksyjny przekrój dekonwolucyjny – szczelina między płytami rozszerzająca się od 0 do 3 cm szerokości	70
Rysunek 3.19 Porównanie obrazów refleksyjnego prześwietlenia stosu płyt parafinowych (echogramy po lewej, obrazy dekonwolucyjne po prawej).....	70
Rysunek 3.20 Skan poprzeczny stosu płyt parafinowych ze szczeliną suchą rozwierającą się do szerokości 1.2 cm (echogramy po lewej, obrazy dekonwolucyjne po prawej).....	71
Rysunek 3.21 Przykład skanu oddaleniowego (dekonwolucja sygnału odbitego od blachy w różnych odległościach).....	71
Rysunek 3.22 Porównanie wzajemnie podobnych sygnałów odbitych od kilku blach	72
Rysunek 3.23 Próba analizy zależności amplitudy sygnału odbitego od blachy od odległości pomiędzy blachą, a anteną	72
Rysunek 3.24 Refleksyjny skan oddaleniowy blachy z dowiązanymi skalami przestrzennymi	73
Rysunek 3.25 Porównanie sygnałów refleksyjnych od szyb o grubości 4 i 10 mm	74
Rysunek 3.26 Wstępne porównanie przekrojów przez trzy szyby szklane 4, 10, 15 mm i przez stosy szyb 10/15 mm oraz 4/10/15 mm	74
Rysunek 3.27 Porównanie przekrojów dekonwolucyjnych przez stos szyb 4/10/15 mm i stos 4/10/S/15 mm ze szczeliną S 1.3 mm pomiędzy dolnymi szybami.....	75
Rysunek 3.28 Porównanie przekrojów dekonwolucyjnych przez stos szyb 4/10/Sk/15 mm z rozszerzającą się od 0 do 1.3 mm szerokości szczeliną klinową Sk pomiędzy dolnymi szybami i przez ten sam stos ze szczeliną Sk zalaną wodą.	75
Rysunek 3.29 Skany poprzeczne wzdłuż stosu szyb z szczelinami: górną rozwierającą się do szerokości 1.45 mm i dolną zwężającą się od szerokości 1.45 mm do zera.....	76
Rysunek 3.30 Sygnał refleksyjny i jego dekonwolucja dwóch zetkniętych ze sobą szyb szklanych - połączenie suche i mokre	77
Rysunek 3.31 Próby dopasowania funkcji opisującej zależność amplitudy sygnału odbitego od blachy od odległości między anteną i blachą	78

Rysunek 3.32 Próby dopasowania funkcji opisującej zależność amplitudy sygnału odbitego od blachy od odległości między anteną i blachą - węższy zakres dopasowania 78	
Rysunek 3.33 Skan oddaleniowego powierzchni blachy (echogram po lewej, próba dekonwolucji przy użyciu modelu sygnału odbitego).....	79
Rysunek 3.34 Echogram schodkowego obniżenia poziomu skanowanej blachy i próba jego dekonwolucji. Obecność blachy dolnej jest zauważalna jeszcze pod blachą górną w pobliżu jej krawędzi.	79
Rysunek 3.35 Echogram przejścia anteny ponad strefą nieregularnie pociętej folii aluminiowej (część środkowa) leżącej na blasze i próba jego dekonwolucji.	80
Rysunek 3.36 Próba rozpoznania rozwartości refleksyjnego stożka obserwacyjnego anteny	80
Rysunek 3.37 Sygnał refleksyjny od powierzchni blachy rejestrowany za pomocą tej samej anteny.....	81
Rysunek 3.38 Sygnał emitowany przez antenę 2 GHz rejestrowany bezpośrednio za pomocą drugiej anteny.....	81
Rysunek 3.39 Porównanie kolekcji sygnałów odbitych od blachy z sygnałem rejestrowanym bezpośrednio za pomocą drugiej anteny.	82
Rysunek 3.40 Zmiany sygnału w wyniku rotacji anteny odbiorczej (sygnał po lewej, próba dekonwolucji po prawej).	83
Rysunek 3.41 Zmiany sygnału przy przesuwaniu anteny odbiorczej w poprzek płaszczyzny polaryzacji sygnału i anten (sygnał po lewej, próba dekonwolucji po prawej).	83
Rysunek 3.42 Zmiany sygnału przy przesuwaniu anteny odbiorczej w płaszczyźnie polaryzacji sygnału i anten w poprzek osi prostopadłej do kierunku polaryzacji (sygnał po lewej, próba dekonwolucji po prawej).	83

Spis tabel

Tabela 2.1 Typowe wartości stałej dielektrycznej, przewodności, prędkość fali i tłumienia wybranych materiałów geologicznych (Moorman, 2001) (Morey, 1998).....	13
Tabela 2.2 Zestawienie metod (urządzeń) do określania szczepności w zależności od schematu badawczego.....	44
Tabela 2.3 Zestawienie wymagań szczepności międzywarstwowej (w porządku chronologicznym). Wymaganie siły ścinającej podawane dla próbki o średnicy $\phi 150$	58
Tabela 2.4 Wady i zalety metody Leutnera	58

1 Wstęp

Jednym z kluczowych parametrów konstrukcji nawierzchni jest prawidłowe połączenie wszystkich jej warstw. „Prawidłowe” oznacza w tym wypadku takie połączenie, które gwarantuje właściwe przekazywanie do warstw niżej leżących odkształceń generowanych przez koła pojazdów. Pożądane jest, więc by warstwy ułożone bezpośrednio jedna na drugiej stanowiły całość, ciągłość, tworzyły zwarty kompleks budowlany (konstrukcję). Stan połączenia międzywarstwowego w sposób istotny wpływa na funkcjonalność nawierzchni, lecz przede wszystkim stanowi o jej trwałości i funkcjonalności. Właściwe połączenie pełni dwie główne funkcje: zwiększa wytrzymałość zespołu warstw konstrukcji nawierzchni oraz uniemożliwia penetrację wody między warstwami.

Z uwagi na krytyczne znaczenie stanu połączenia międzywarstwowego w jakości nowych i remontowanych nawierzchni, coraz częściej można spotkać się z badaniami prowadzonymi w ramach szeroko pojętej diagnostyki, które mają na celu zidentyfikowanie tej cechy. Jak dotąd najpopularniejsze z nich to metody laboratoryjne takie jak Leutnera lub Sheare Box Test (dynamicznego ścinania w skrzynce), oparte na badaniach próbek nawierzchni pobranych z odwiercanych rdzeni. Jak zwykle w przypadku badań laboratoryjnych ograniczeniem jest ilość pobieranych próbek i punktowy charakter informacji uzyskiwanych z tego rodzaju badań. Dlatego naukowcy zajmujący się oceną stanu nawierzchni drogowych coraz częściej zwracają uwagę na bezinwazyjne metody diagnostyczne NDT (Non-Destructive Testig) takie jak Impulse Hammer Test (badanie młotem udarowym) czy badanie z wykorzystaniem ugięciomierza dynamicznego FWD (Falling Weight Deflectometer), pozwalające na uzupełnienie lub niekiedy zastąpienie metod laboratoryjnych.

Jedną z technik pomiarowych NDT, zdobywającą coraz większą popularność i uznanie wśród naukowców, jest technika radarowa. Poznając teorię i zasady funkcjonowania tej metody, jak i zakres podstawowych pomiarów rutynowo prowadzonych w wielu ośrodkach badawczych, można uznać, że jest to metoda relatywnie prosta. Tak jest w istocie kiedy oceniamy przydatność metody w prostych pomiarach, takich jak np. ocena ciągłości warstw konstrukcyjnych nawierzchni. Gdy jednak poznamy złożoność zagadnień i zjawisk towarzyszących samej technice pomiarowej dojdziemy do wniosku, że niesie ona ze sobą znaczną ilość informacji dotąd niewykorzystywanych, a jednocześnie istotnych ze względu na jakość dokonywanej oceny stanu odcinka drogi.

Celem pracy jest ocena przydatności techniki radarowej w identyfikacji połączeń międzywarstwowych. W ramach pracy przewiduje się zastosowanie techniki radarowej wspólnie z innymi technikami diagnostycznymi takimi jak ugięciomierz dynamiczny. Wyniki obu tych badań będą wspomagane standardowymi badaniami prowadzonymi w warunkach laboratoryjnych. Pozytywne wyniki tej pracy pozwolą na zwiększenie efektywności oceny stanu technicznego istniejących nawierzchni, polepszając jednocześnie jakość proponowanych w ramach remontów rozwiązań technologicznych.

2 Analiza możliwości identyfikacji połączeń międzywarstwowych

2.1 Podstawy techniki radarowej

Aby prawidłowo zrozumieć zasady techniki radarowej należy poznać zjawiska związane z propagacją fal elektromagnetycznych w ośrodku, a także czynniki wpływające na parametry ośrodka takie jak przenikalność elektryczna, podatność magnetyczna, przewodność, polaryzacja i tłumienie fali elektromagnetycznej.

2.1.1 Cechy elektryczne ośrodka

Cechy elektryczne ośrodka są charakteryzowane przez przenikalność elektryczną ε , podatność magnetyczną μ i przewodność (konduktywność) σ . Wielkości te mogą być tensorami zależnymi od kierunku w przestrzeni, a także posiadać wartości zespolone ze względu na różne mechanizmy strat. Na potrzeby techniki radarowej można przyjąć, że są to wielkości skalarne, które są współczynnikami w tzw. równaniach materiałowych:

$$\vec{D} = \varepsilon * \vec{E} \quad (2.1)$$

$$\vec{B} = \mu * \vec{H} \quad (2.2)$$

$$\vec{J} = \sigma * \vec{E} \quad (2.3)$$

gdzie:

$\vec{D}$ - wektor indukcji elektrycznej,

$\vec{E}$ - wektor natężenia pola elektromagnetycznego,

$\vec{B}$ - wektor indukcji magnetycznej,

$\vec{H}$ - wektor natężenia pola magnetycznego,

$\vec{J}$ - gęstość prądu elektrycznego,

ε - przenikalność elektryczna,

μ - podatność magnetyczna,

σ - przewodność.

Dla ośrodka określa się również względną przenikalność elektryczną ε_r i względną podatność magnetyczną μ_r :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (2.4)$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.5)$$

gdzie:

$\varepsilon = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$ - przenikalność elektryczna

ε_0 - przenikalność elektryczna próżni ($8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m)

ε_r' - część rzeczywista (definiuje właściwości ośrodka),

ε_r'' - część urojona (odpowiada za straty w ośrodku),

μ_0 - podatność magnetyczna próżni ($1.26 \cdot 10^{-6}$ H/m).

Najważniejszą właściwością elektryczną wpływającą na wyniki badań techniką radarową jest przenikalność elektryczna i związana z nią prędkość fali w ośrodku. Jest też ważna ze względu na precyzyjne określenie sposobu obliczenia poprawnej głębokości obiektu. Względna przenikalność elektryczna (nazywana również stałą dielektryczną) jest liczbą zespoloną i wyraża zgodnie z wzorem 2.4 stosunek przenikalności elektrycznej do przenikalności elektrycznej w próżni.

Podatność magnetyczna gruntu lub materiałów występujących w warstwach nawierzchni drogowych uważa się za równą podatności w próżni ($\mu_r = 1$) i dlatego nie ma ona wpływu na propagację fali w tego rodzaju ośrodkach. Tym nie mniej znane są badania, między innymi (Olhoeft & Capron, 1994), dowodzące przypadki, w których podatność magnetyczna wpływa na elektryczne właściwości gruntów.

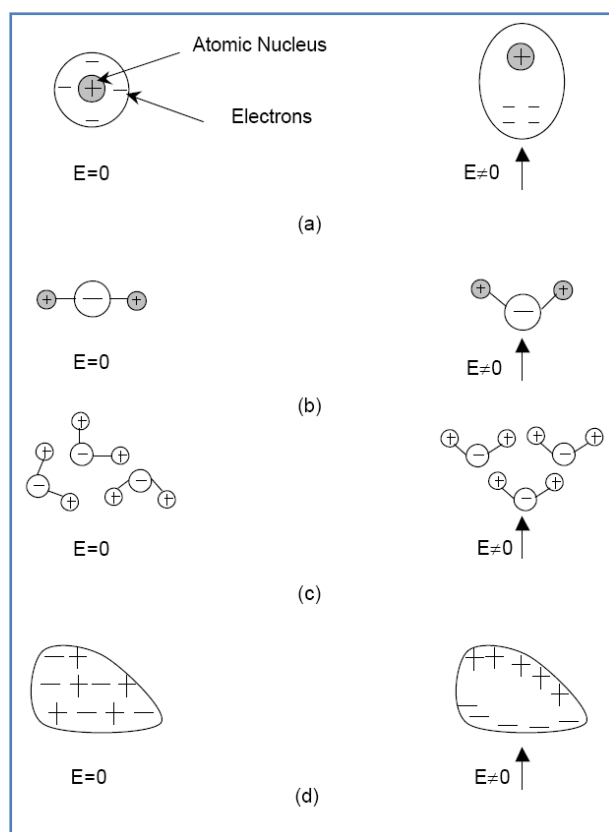
Przewodność elektryczna w ośrodkach takich jak grunty powoduje ruch nośników ładunków z wolnym lub ograniczonym przemieszczeniem, które może być powodowane przez różne zjawiska. Większość jonowo lub kowalencyjnie¹ związanych skał formujących minerały, takich jak kwarc lub mika, nie są przewodnikami i w momencie zetknięcia się ich z wodą tworzą się na powierzchni elektrolity zdolne do przewodzenia prądu elektrycznego poprzez ruch wolnych jonów, generowany przez pole elektryczne. Ruch jonów jest proporcjonalny do wielkości pola elektrycznego i zależy od temperatury, koncentracji jonów i ich wielkości. Przewodność elektryczna ośrodka wpływa na tłumienie fali elektromagnetycznej i w pewnym zakresie na jej odbicie.

Polaryzacja jest to zjawisko nierównomiernego rozkładu cząstek ładunku elektrycznego na atomach połączonych wiązaniem chemicznym. W materiałach znajdujących się w polu elektrycznym mamy do czynienia z tzw. polaryzacją wymuszoną. Ma ona miejsce w sytuacji gdy na cząsteczkę działa silne pole elektryczne i cząsteczka znajduje się w otoczeniu innych silnie polarnych cząsteczek lub wiązanie zostało wzbudzone promieniowaniem elektromagnetycznym, którego działanie nie spowodowało jego rozerwania. Istnieją cztery różne mechanizmy polaryzacji, które przedstawiono na Rysunku 2.1.

Dla ośrodków takich jak skały definiuje się również oporność właściwą jako odwrotność przewodności:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} [\Omega \cdot m] \quad (2.6)$$

¹ Wiązanie kowalencyjne to rodzaj wiązania chemicznego, którego istotą jest istnienie pary elektronów, współdzielonych w porównywalnym stopniu przez oba atomy tworzące to wiązanie.



Rysunek 2.1 Rodzaje polaryzacji: (a) elektryczna, (b) jonowa, (c) molekularna i (d) międzyfazowa (Scaffer & Saxena, 1995)

Parametry, które należy dodatkowo zdefiniować to impedancja falowa ośrodka, określana jako stosunek składowych wektorów pól elektrycznego i magnetycznego prostopadłych do siebie i do kierunku propagacji fali oraz stratność ośrodka, definiowana jako stosunek prądu przewodzenia związanego z ruchem ładunków do prądu przesunięcia związanego ze zmianą indukcji w czasie (Morawski & Gwarek, 1985). Na podstawie analizy tych parametrów przeprowadzonej w (Karczewski, 2007) można określić dwie, istotnie z punktu widzenia zastosowania techniki radarowej w drogownictwie, cechy tj. współczynnik tłumienia fali oraz impedancja ośrodka małostratnego (takiego jak np. piaski, żwiry). Współczynnik tłumienia fali jest wprost proporcjonalny do przewodności i przyjmuje w przybliżeniu postać:

$$\alpha = \frac{1,69 \cdot 10^3 \cdot \sigma}{\sqrt{\epsilon_r}} [dB/m] \quad (2.7)$$

natomiast impedancja ośrodka małostratnego zależy jedynie od stałej dielektrycznej ośrodka i przyjmuje uproszczoną postać:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.8)$$

Tłumienie fali elektromagnetycznej jest zjawiskiem istotnym dla zakresu penetracji głębokościowej metody radarowej. Im większe tłumienie tym mniejsza głębokość pomiaru i odwrotnie, mniejsze tłumienie ośrodka pozwala uzyskać lepszą penetrację. Jak

podaje między innymi (A-CUBED, 1983) największy wpływ na tłumienie mają przewodność i stała dielektryczna ośrodka, które z kolei zależą od jego składu mineralnego, porowatości, wilgotności, składu chemicznego, temperatury i częstotliwości fali emitowanej w głąb ośrodka. W Tabeli 2.1 przedstawiono typowe wartości stałych dielektrycznych, przewodności, prędkości fali i współczynników tłumienia wybranych materiałów.

Tabela 2.1 Typowe wartości stałej dielektrycznej, przewodności, prędkości fali i tłumienia wybranych materiałów geologicznych (Moorman, 2001) (Morey, 1998)

ośrodek	stała dielektryczna ϵ_r	przewodność σ [mS/m]	prędkość fali v [cm/ns]	tłumienie α [dB/m]
powietrze	1	0	30	0
woda destylowana	80	0,01	3,3	0,002
słodka woda	80	0,5	3,3	0,1
słona woda	80	30000	1	1000
lód	3-4	0,01	16	0,01
suchy piasek	3-5	0,01	15	0,01
piasek nasycony wodą	20-30	0,1-1	6	0,03-0,3
glina	5-40	2-1000	6	1-300
wapień	4-8	0,5-2	12	0,4-1,0
muł	5-30	1-100	7	1-100
asfalt	2,5-3,5	0,5-1,5	16-19	0,05-0,5
beton	3-9	1-3	10-17	0,5-1,5
granit	4-6	0,01-1	13	0,1-1
łupek	5-15	1-100	9	1-100

Bardzo ważnym parametrem jest prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w ośrodku małostratnym. Dzięki zdefiniowaniu tego parametru możliwe jest określenie prędkości fali w ośrodku przy znanej stałej dielektrycznej ośrodka. Korzystając z definicji prędkości fazowej:

$$v_f = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega}{\beta} (\sigma \ll \omega \cdot \epsilon) \quad (2.9)$$

gdzie:

ω - częstotliwość kątowna (pulsacja), k - liczba falowa, β - współczynnik fazy,

i zależności prędkości fali elektromagnetycznej w próżni c :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (2.10)$$

otrzymujemy następujący wzór:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.11)$$

gdy:

$$\mu_r = 1.$$

2.1.2 Propagacja fal elektromagnetycznych

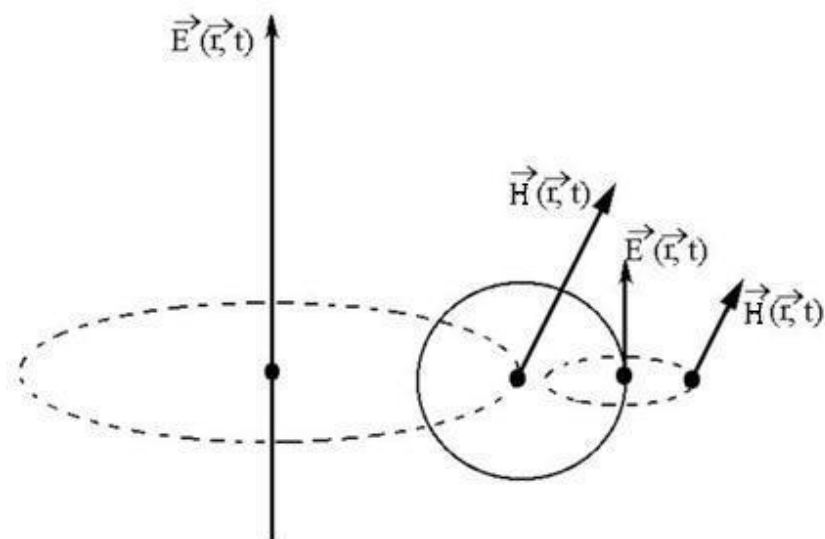
Propagację fal elektromagnetycznych w dowolnym ośrodku opisują prawa opracowane przez szkockiego fizyka Jamesa Clarka Maxwella (Rysunek 2.2).

Prawa te ujęte zostały w czterech podstawowych równaniach elektromagnetyzmu, opisujących własności pola elektrycznego i magnetycznego oraz zależności między tymi polami. Z równań tych wynika m.in. istnienie fal elektromagnetycznych, których powstawanie jakościowo można wyjaśnić następująco (Rysunek 2.3): jeżeli w pewnym obszarze przestrzeni istnieje zmienne w czasie pole elektryczne $E(r,t)$, powoduje ono, zgodnie z II równaniem Maxwella, powstanie w tym obszarze wirowego pola magnetycznego $H(r,t)$, na ogół również zmiennego w czasie. Zmienne pole magnetyczne $H(r,t)$ wytwarza z kolei zmienne pole elektryczne $E(r,t)$, zgodnie z I równaniem Maxwella, itd. W ten sposób w przestrzeni rozchodzi się fala elektromagnetyczna.



Rysunek 2.2 James Clark Maxwell (1831-1879)

Źródło: http://pl.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell



Rysunek 2.3 Powstawanie fali elektromagnetycznej

Poniżej przedstawiono układ równań Maxwella przy pewnych założeniach dotyczących ośrodka geologicznego, a mianowicie: ośrodek jest nieograniczony, linowy, izotropowy, jednorodny, stratny i nie ma w nim ładunków i prądów. Przy takich założeniach układ równań przedstawiał się będzie następująco (Karczewski, 2007):

$$\Delta \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.12)$$

$$\Delta \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.13)$$

$$\Delta \times \vec{E} = -\mu \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.14)$$

$$\Delta \times \vec{H} = \sigma \cdot \vec{E} + \varepsilon \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.15)$$

gdzie:

$\Delta \cdot \vec{E}$ - dywergencja wektora $\vec{E}$,

$\Delta \times \vec{E}$ - przenikalność magnetyczna próżni.

Dla potrzeb techniki radarowej istotne jest rozwiązanie tego układu równań w postaci fali płaskiej. Możliwe jest poszukiwanie takiego „uproszczonego” rozwiązania ponieważ falę emitowaną przez antenę można traktować w przybliżeniu jako falę płaską jeżeli odległość od źródła fali wielokrotnie przekracza długość fali. Jak podaje (Karczewski, 2007) w takim przypadku rozwiązaniem jest para wektorów w następującej postaci:

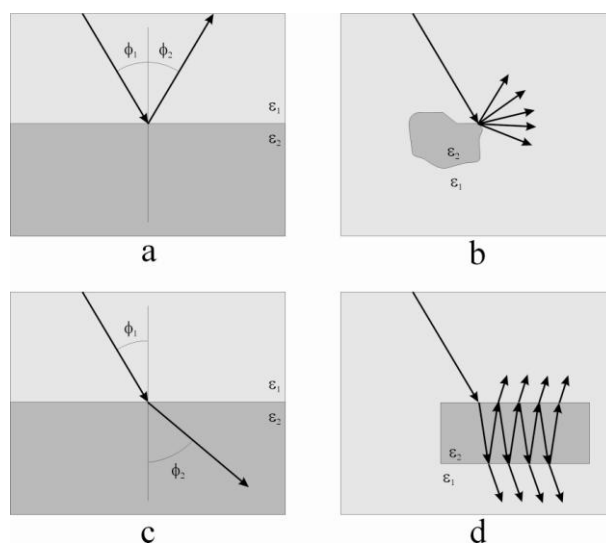
$$\vec{H} = \frac{k}{i \cdot \omega \cdot \mu} \cdot \hat{k} \times \vec{E} \quad (2.16)$$

$$\vec{E} = \frac{k}{\sigma - i \cdot \omega \cdot \epsilon} \cdot \hat{k} \times \vec{H} \quad (2.17)$$

gdzie:

$\vec{k} = k \cdot \hat{k}$ - wektor propagacji.

Fale elektromagnetyczne rozchodzące się w ośrodkach o zmiennych właściwościach elektrycznych mogą ulegać odbiciu, refrakcji, dyfrakcji i rezonansowi (Rysunek 2.4) (Daniels, 2000). Zjawiska te wpływają zarówno pozytywnie jak i negatywnie na jakość uzyskiwanych wyników.



Rysunek 2.4 Mechanizmy rozpraszania fali: (a) odbicie kierunkowe, (b) refrakcja (załamanie), (c) dyfrakcja, (d) rezonans

W technice radarowej najbardziej istotnym jest przypadek odbicia i refrakcji (załamania) fali na granicy dwóch materiałów o różnych właściwościach. Przypadek taki przedstawiono na Rysunku 2.5. Płaszczyznę padania fali elektromagnetycznej (EM) tworzy normalna do powierzchni płaskiej i fala padająca. Poprzeczna fala elektryczna (TE), nazywana falą o polaryzacji prostopadłej, reprezentuje falę, której wektor pola elektrycznego skierowany jest prostopadle do płaszczyzny padania, natomiast wektor pola elektrycznego poprzecznej fali magnetycznej (TM) skierowany jest równolegle do płaszczyzny padania i nosi nazwę fali o polaryzacji równoległej. Spełniając warunki brzegowe równania Maxwella na powierzchni padania można wyznaczyć współczynnik odbicia fali padającej:

współczynnik odbicia fali TE

$$\gamma_{\perp} = \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \quad (2.18)$$

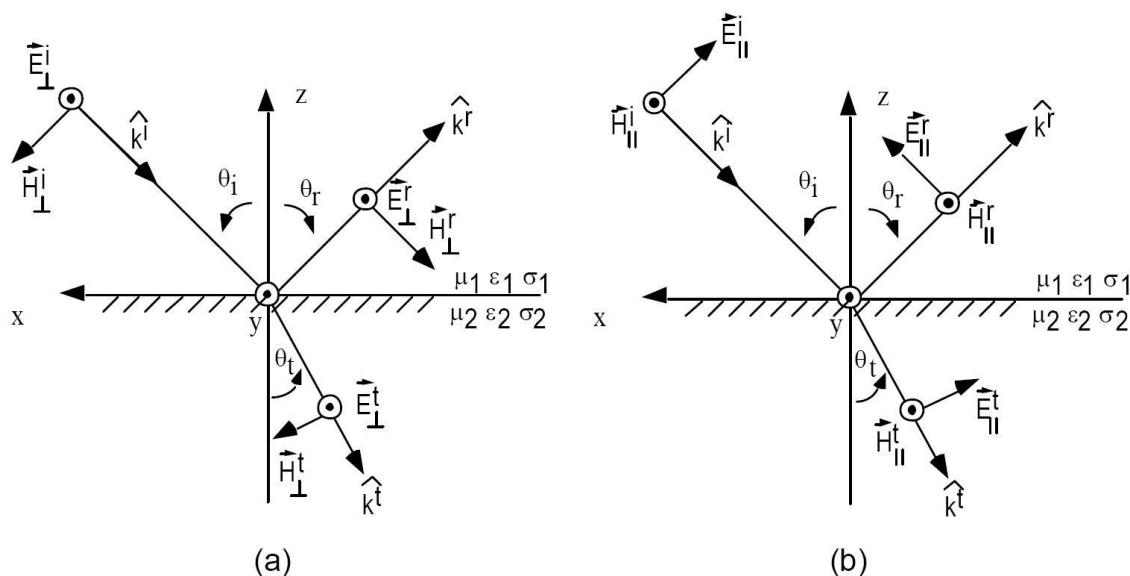
współczynnik odbicia fali TM

$$\gamma_{\parallel} = \frac{Z_2 \cos \theta_t - Z_1 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_t + Z_1 \cos \theta_i} \quad (2.19)$$

gdzie:

Z_1 i Z_2 - odpowiednio impedancja fali w ośrodku 1 i 2,

θ_i i θ_t - odpowiednio kąt padania i załamania



Rysunek 2.5 Odbicie i przenikanie fali: (a) TE i (b) TM

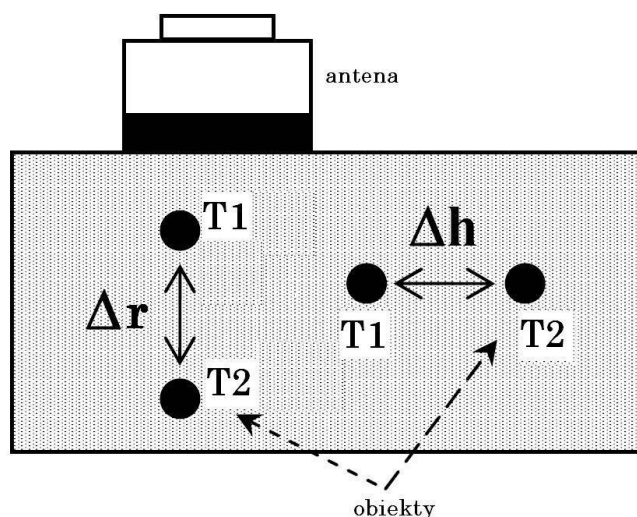
Ponieważ większość anten stosowanych w technice radarowej jest liniowo i horyzontalnie spolaryzowanych (TE) należy rozważyć jeszcze jeden przypadek gdy płaska fala elektromagnetyczna pada na płaszczyznę pod kątem prostym ($\theta_i = \theta_t = 0^\circ$). W takim przypadku współczynnik odbicia fali będzie następujący:

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2.20)$$

Z powyższego wynika, że współczynnik odbicia zależy od stałych dielektrycznych ośrodków, przez które propaguje fala. Jeżeli ośrodek 2 ma wyższą stałą dielektryczną od ośrodka 1, to współczynnik odbicia r będzie liczbą ujemną, co oznacza odwrotną polaryzację fali. Im wyższa bezwzględna wartość współczynnika odbicia tym silniejsze obicie od granicy między ośrodkami, większy kontrast między nimi i tym łatwiejsza identyfikacja ośrodków. Wzory (2.11) i (2.20) są najważniejszymi równaniami stosowanymi w interpretacji danych z pomiarów infrastruktury drogowej techniką radarową.

2.1.3 Rozdzielczość pozioma i pionowa

Jednym z poważniejszych problemów związanych z techniką radarową jest zdolność rozróżnienia obiektów będących blisko siebie i położonych w tej samej linii lub płaszczyźnie. W przypadku gdy poszukiwane obiekty zlokalizowane są wzdłuż płaszczyzny pionowej, prostopadłej do kierunku badania zdolność ta nazywana jest rozdzielczością pionową, natomiast gdy obiekty zlokalizowane są wzdłuż płaszczyzny poziomej, równoległej do kierunku badania zdolność ta nazywana jest rozdzielczością poziomą (Rysunek 2.6).



Rysunek 2.6 Rozdzielczość pionowa Δr i pozioma Δh

Analizując możliwości techniki w zakresie rozdzielczości pionowej należy pamiętać o tym, że mamy do czynienia z impulsami fali elektromagnetycznej wysyłanymi w kierunku badanego ośrodka, który „generuje” fale odbite, rejestrowane przez urządzenia pomiarowe jako sygnały zbliżone kształtem do impulsu wysłanego. Sygnały te mogą powracać z różnym opóźnieniem, zależnym od głębokości danego obiektu, co oznacza, że w niektórych wypadkach mogą się one nakładać. Wyjaśnienie tego zjawiska przedstawiono w formie graficznej na Rysunku 2.7.

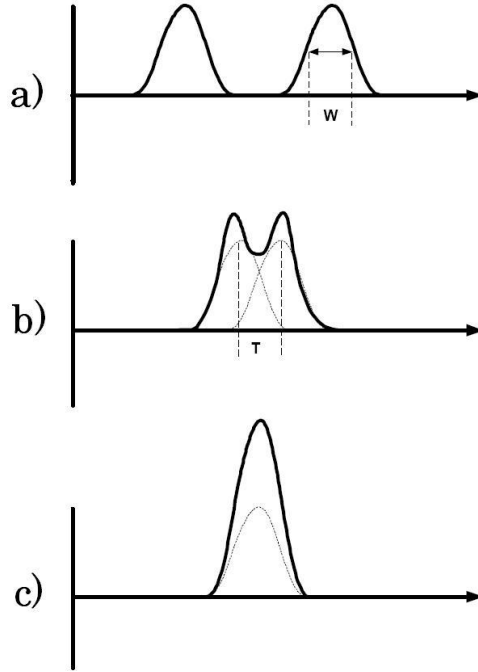
Jak podaje (Annan, 2001) jeżeli obserwujemy dwa obiekty T1 i T2, położone w jednej linii od punktu pomiaru, to różnica w czasie nadejścia impulsów odbitych będzie bezpośrednio związana z odległością między tymi obiektami. Czasy nadejścia impulsów odbitych od obiektów T1 i T2 można zapisać następująco:

$$t_1 = \frac{2d}{v} \quad (2.21)$$

$$t_2 = \frac{2d + 2\Delta r}{v} \quad (2.22)$$

gdzie:

d – głębokość położenia obiektu, v – prędkość fali.



Rysunek 2.7 Impulsy czasowe o szerokości $\frac{1}{2} W$; a) impulsy wyraźnie odseparowane gdy $T \gg W$, b) impulsy rozróżnialne do momentu gdy $T \approx W$, c) impulsy nakładające się (nierozróżnialne) gdy $T \ll W$

Różnica w czasie nadejścia impulsu może być wyrażona jako:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2\Delta r}{v} \quad (2.23)$$

przy czym wymagamy, aby różnica w czasie była większa niż połowa szerokości impulsu W , stąd:

$$\Delta r \geq \frac{Wv}{4} \quad (2.24)$$

Na podstawie wzoru (2.24) można stwierdzić, że rozdzielczość pionowa zależy od szerokości impulsu i prędkości fali w ośrodku.

W ten sam sposób możemy przeanalizować możliwości techniki radarowej pod kątem rozdzielczości poziomej. Czasy nadejścia impulsów odbitych od obiektów T_1 i T_2 można zapisać następująco:

$$t_1 = \frac{2d}{v} \quad (2.25)$$

$$t_2 = \frac{2(d^2 + \Delta h^2)^{\frac{1}{2}}}{v} \quad (2.26)$$

natomiast różnica w czasie nadejścia impulsu może być wyrażona jako:

$$\Delta t = \frac{2[(d^2 + \Delta h^2)^{\frac{1}{2}} - d]}{v} \quad (2.27)$$

W większości przypadków odległość obiektów od anteny jest znaczna w porównaniu z odległością pomiędzy tymi obiektami. Stąd można przyjąć, że :

$$\Delta t = \frac{\Delta h^2}{vd} \quad (2.28)$$

co z kolei wskazuje, że:

$$\Delta h \geq \sqrt{\frac{vdW}{2}} \quad (2.29)$$

Z powyższego wynika, że rozdzielczość pozioma zależy od prędkości fali w ośrodku, szerokości impulsu fali jak również od odległości obiektu od anteny.

Ponieważ szerokość impulsu W jest odwrotnie proporcjonalna do szerokości pasma impulsu odbieranego przez antenę B i do częstotliwości centralnej anteny f_c :

$$W = \frac{1}{B} = \frac{1}{f_c} \quad (2.30)$$

gdzie:

$$\lambda_c = \frac{f_c}{v} \quad (2.31)$$

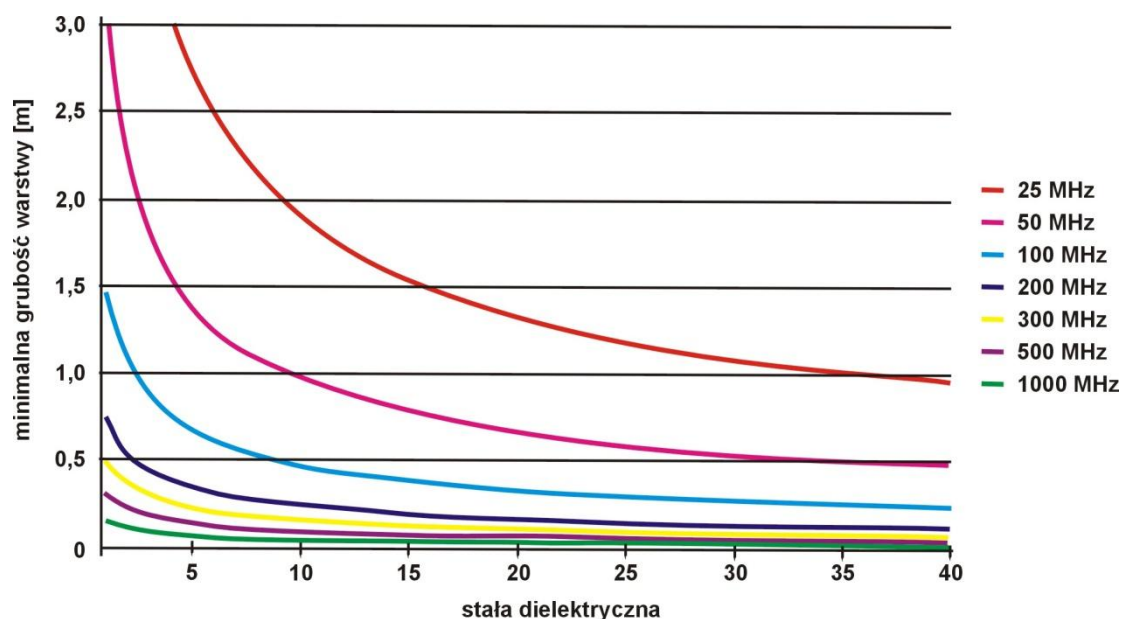
rozdzielczość pozioma może być wyrażona następująco:

$$\Delta h = \sqrt{\frac{d\lambda_c}{2}} \quad (2.32)$$

gdzie λ_c jest długością fali przy częstotliwości centralnej anteny.

Przedstawiona powyżej analiza dowodzi zależności między częstotliwością sygnału emitowanego przez antenę, głębokością penetracji techniki radarowej i rozdzielczością pomiaru. Na jej podstawie można stwierdzić, że wraz ze wzrostem częstotliwości emitowanej fali zmniejsza się głębokość penetracji, natomiast zwiększa się rozdzielczość pomiaru. W technice radarowej zależność ta ma ogromne znaczenie, szczególnie na etapie planowania pomiarów.

Jak wcześniej wspomniano rozdzielczość zależy od stałej dielektrycznej ośrodka. Zależność tą przedstawiono w formie graficznej (Rysunek 2.8), przygotowanej na podstawie (Morey, 1998), gdzie pokazano możliwe do zidentyfikowania, minimalne grubości warstw w zależności od częstotliwości emitowanej fali oraz stałej dielektrycznej ośrodka. Z przedstawionych danych wynika, że dla ośrodka o pewnej stałej dielektrycznej zastosowanie wyższej częstotliwości fali pozwala na identyfikację cieńszej warstwy. Analizując te dane należy pamiętać, że zostały one przygotowane przy założeniu, że możliwe jest zidentyfikowanie zarówno sygnału odbitego od górnej jak i od dolnej powierzchni badanej warstwy.



Rysunek 2.8 Rozdzielczość w funkcji częstotliwości emitowanej fali

2.1.4 Identyfikacja połączeń międzywarstwowych przy pomocy techniki radarowej

Przedstawione rozważania wskazują na teoretyczne możliwości zastosowania techniki radarowej w identyfikacji połączeń międzywarstwowych. Istotne znaczenie w takiej ocenie będą miały dwa parametry tj. częstotliwość emitowanej fali oraz współczynnik odbicia fali w strefie połączenia międzywarstwowego. O ile problem częstotliwości fali można rozwiązać w prosty sposób stosując odpowiednie anteny, o tyle współczynnik odbicia zależy od różnicy w budowie i właściwościach dwóch różnych, stykających się ze sobą materiałów i nie może być precyzyjnie stymulowany przez działanie czynników zewnętrznych. Tym nie mniej wstępnie wydaje się, że to właśnie ocena kontrastów (współczynników odbicia) będzie miała decydujące znaczenie w ocenie tego parametru nawierzchni drogowych.

Identyfikacja połączeń międzywarstwowych z pewnością jest zagadnieniem trudnym, zwłaszcza na etapie interpretacji otrzymywanych danych. W dostępnej literaturze, szczególnie zagranicznej, nie znaleziono konkretnych przykładów zastosowania techniki radarowej w ocenie połączeń międzywarstwowych. W nielicznych opracowaniach takich jak prace doktorskie (Loulizi, 2001) i (Saarenketo T. , 2006) oraz publikacjach (Sculion & Saarenketo, 1995), (Forest & Utsi, 2004) i (Saarenketo T. , 1997) stwierdza się jedynie możliwość dokonywania tego rodzaju oceny.

2.1.5 Charakterystyka stosowanych rozwiązań sprzętowych

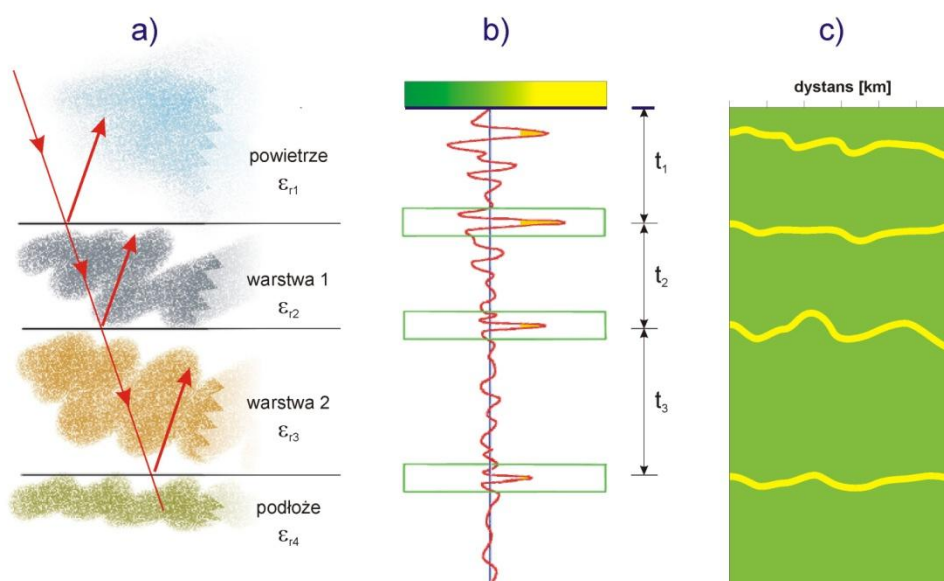
Pierwsze pomiary georadarowe zostały wykonane przez niemieckiego geofizyka W. Sterna w 1929 roku, ale dopiero w latach 50' tego stulecia technikę tę zastosowano na szerszą skalę w samolotach US Air Force (Olhoeft G, 2003). W latach 70' i 80' udoskonalano zarówno technikę pomiaru jak i metody interpretacji wyników, a główne próby praktycznego zastosowania GPR (Ground Penetrating Radar) dotyczyły między

innymi takich zagadnień jak pomiar grubości pokrywy lodowej, lokalizacja podziemnych tuneli, uskoków, a także położenia niewypałów (Geophysical Survey Systems, 2008). W połowie lat 80' powstał pierwszy cyfrowy system pomiarowy GPR, który swych „analogowych” poprzedników wyprzedzał pod wieloma względami, a przede wszystkim oferował możliwość zapisu danych w postaci cyfrowej na komputerach.

Dzięki szybkiemu rozwojowi techniki na przestrzeni ostatnich lat dostępnych jest dziś wiele metod pomiaru i oceny wyników uzyskanych przy pomocy techniki radarowej. Jedną z takich metod jest wizualizacja danych w postaci wykresów 3D z możliwością przedstawienia obrazu w funkcji czasu. Takie rozwiązania pozwalają naukowcom np. na przedstawianie ruchu obszaru zanieczyszczeń w gruncie.

Systemy radarowe GPR składają się z a) generatora impulsów, który generuje impulsy o zadanej częstotliwości i mocy, b) anteny, przy pomocy której wygenerowany impuls kierowany jest w stronę badanego obiektu oraz c) modułu zapisu, który przetwarza i zapisuje sygnały odbite.

Emitowane w kierunku badanej konstrukcji impulsy elektromagnetyczne przenikają przez kolejne warstwy materiałów o różnych właściwościach dielektrycznych, ulegając na ich granicach częściowemu odbiciu. Dzięki temu możliwe jest zarejestrowanie prędkości fali w ośrodku oraz amplitudy sygnału odbitego z granic między materiałami o różnych właściwościach dielektrycznych (Rysunek 2.9) (Sudyka, J., 2006).



Rysunek 2.9 Zasada rejestracji sygnałów odbitych w systemach GPR (a – uproszczony obraz przejścia impulsu elektromagnetycznego, b – zarejestrowany sygnał odbity, c – uproszczony falogram z pomiarów radarowych)

Rozróżnia się dwa rodzaje anten: ground-coupled i air-coupled (horn) (Rysunek 2.10). Anteny typu ground-coupled pracują w szerokim zakresie częstotliwości centralnej tj. od 80 MHz do 1500 MHz. Ich zaletą jest większa głębokość penetracji i lepsza pionowa rozdzielczość. Wadą tych anten jest ich położenie względem badanego obiektu (anten należy pozostawiać w bliskim kontakcie z powierzchnią obiektu) oraz powodowane przez

to położenie zakłócenia sygnału w obszarze styku z powierzchnią. Z tego powodu anteny te można stosować między innymi w ocenie i lokalizacji spękań nawierzchni, lecz nie nadają się one do pomiaru zawartości wolnych przestrzeni (mała dokładność pomiaru prędkości sygnału).



Rysunek 2.10 System pomiarowy z umieszczoną w wózku anteną typu ground-coupled o częstotliwości 400 MHz i umieszczoną na wysokości ok. 45 cm anteną typu horn o częstotliwości 1 GHz

Systemy pomiarowe przeznaczone do badań nawierzchni dróg wyposażane są zazwyczaj w anteny typu horn, o częstotliwości centralnej ok. 1 GHz i średniej głębokości penetracji 60 cm. Anteny tego typu umieszczane są na wysokości ok. 40 cm nad badaną powierzchnią. Częstotliwość pracy takich systemów pomiarowych jest bardzo wysoka i pozwala wykonywać pomiary z częstotliwością 1000 skanów na sekundę. W systemach tych stała dielektryczna wierzchniej warstwy obliczana jest z wykorzystaniem sygnału odbitego od metalowej płyty, którego amplitudę porównuje się z amplitudą sygnału odbitego od badanej powierzchni (Maser, K.; Scullion, T., 1991).

W celu uzyskanie większej ilości danych pojedyncze anteny można zestawiać w kilka, tak, aby pracowały jednocześnie w wielu kanałach. Takie rozwiązania są często spotykane ponieważ zwiększają wydajność całego systemu pomiarowego. Przykłady rozwiązań technicznych stosowane przez różnych producentów przedstawiono na zamieszczonych poniżej Rysunkach.



Rysunek 2.11 System pomiarowy amerykańskiej firmy Penetradar (anteny typu horn o częstotliwościach 1 GHz)



Rysunek 2.12 System pomiarowy kanadyjskiej firmy Road Radar (antena typu horn o częstotliwości 3 GHz i antena typu ground-coupled o częstotliwości 1 GHz)



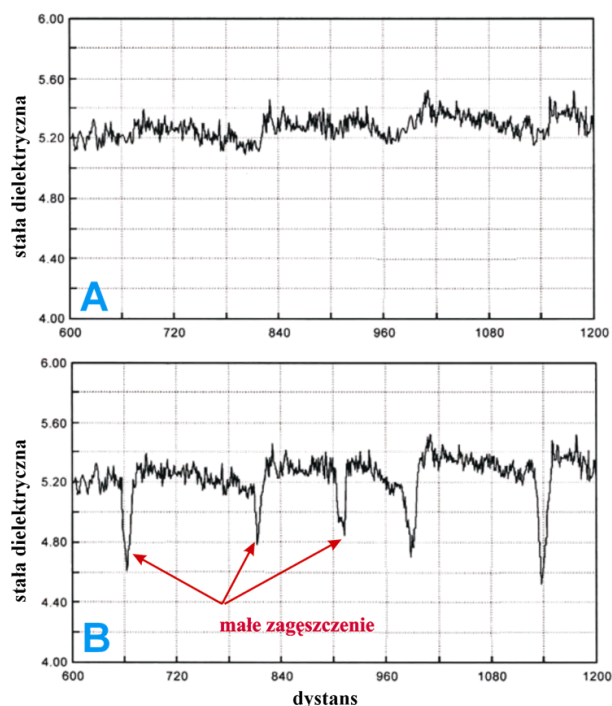
Rysunek 2.13 System pomiarowy norweskiej firmy 3D Radar (antena 63 elementowa typu stepped frequency o zmiennej częstotliwości od 30MHz do 2 GHz)

2.1.6 Zastosowania i ograniczenia metody

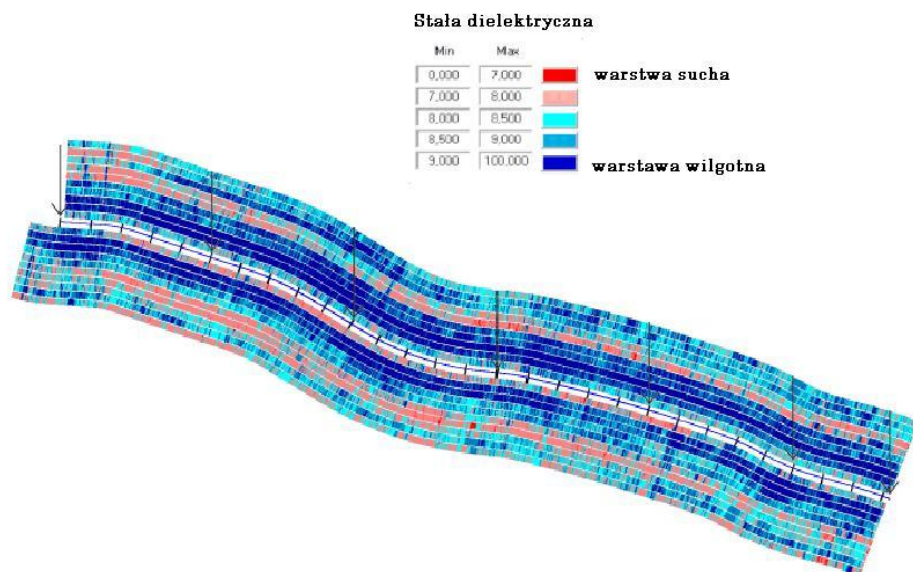
Technika radarowa stosowana jest w drogownictwie między innymi:

- do pomiaru grubości warstw nawierzchni dla potrzeb baz danych PMS (Pavement Management System),
- w pozyskiwaniu danych o konstrukcji do obliczeń trwałości zmęczeniowej nawierzchni,
- do celów projektowych np. podziału odcinka na sekcje jednorodne lub sprawdzenia grubości warstwy pod kątem frezowania,
- w badaniach odbiorczych nowych nawierzchni jako sprawdzenie grubości warstw i jednorodności zagęszczenia w przypadku warstw asfaltowych.

Oprócz zadań wymienionych powyżej, rutynowo wykonywanych w wielu krajach, technika radarowa stosowana jest również w bardziej skomplikowanych badaniach, takich jak ocena rozwarstwień i ubytków powierzchniowych nawierzchni (Rysunek 2.14), identyfikacja spękań oraz pomiar stopnia zawilgocenia (Rysunek 2.15) (Saarenketo & Scullion, 2000). W nawierzchniach betonowych oraz w diagnostyce mostowej technika radarowa dodatkowo wykorzystywana jest w ocenie rozwarstwień, lokalizacji pustek oraz rozmieszczeniu zbrojenia. Należy również wspomnieć o szerokim stosowaniu GPR w ocenie stanu podtorza dróg kolejowych, gdzie prowadzi się pomiary grubości podsypki lub lokalizuje się strefy zamulenia (Rysunek 2.16) (Hyslip, Smith, Olhoeft, & Selig, 2003).



Rysunek 2.14 Dane z pomiaru jednorodności warstwy asfaltowej; rysunek górny – stan dobry, rysunek dolny – nawierzchnia z ubytkami powierzchniowymi oraz lokalnie występującym, zbyt małym zagęszczeniem



Rysunek 2.15 Pomiar zawilgocenia warstw asfaltowych na głębokości 4 – 8 cm (wg raportu z badań – praca niepublikowana)



Rysunek 2.16 Pomiar stanu podtorza antenami typu horn o częstotliwości 1 GHz

Ilość zastosowań techniki radarowej wzrasta z każdym dniem wraz ze zwiększającymi się możliwościami pomiarowymi oferowanych urządzeń. Tym nie mniej należy pamiętać o ograniczeniach jakie niesie ze sobą stosowanie tej metody. Odnoszą się one głównie do etapu interpretacji uzyskanych danych:

- obrazy uzyskane po obróbce sygnałów odbitych nie są „zdjęciami” nieciągłości lub obiektów występujących pod badaną nawierzchnią, a jedynie zapisem amplitud sygnałów odbitych z granic między ośrodkami (warstwami) o różnych właściwościach dielektrycznych; uzyskanie poprawnego obrazu w dużej mierze zależy od umiejętności i wiedzy doświadczzonego operatora,

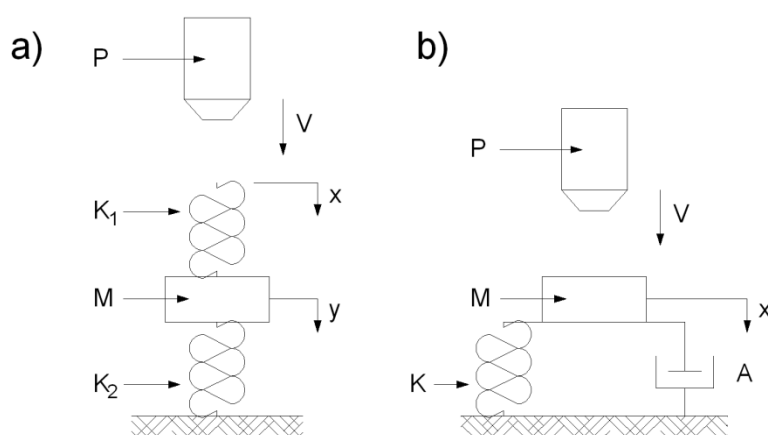
- duża ilość danych – w zależności od np. częstotliwości pomiarów wielkość pliku z pojedynczego przejazdu na długości 1 km może sięgać nawet 5-8 Mb,
- określenie poprawnej grubości warstwy zależy od znajomości właściwości dielektrycznych ośrodka, które zależą między innymi od częstotliwości emitowanej przez antenę fali elektromagnetycznej,
- zmiany stałej dielektrycznej oraz tłumienie fal elektromagnetycznych powodowane zwiększoną wilgotnością lub warstwami o podwyższonej przewodności,
- nakładanie się impulsów fal odbitych od cienkich warstw,
- zbyt małe różnice właściwości dielektrycznych ośrodków (mały kontrast) mogą znacznie utrudniać identyfikację warstw.

2.2 Rejestracja ugięć nawierzchni metodami dynamicznymi

Głównym oddziaływaniem niszczącym nawierzchnię jest ruch pojazdów. Przez wiele lat poszukiwano metody pomiaru oddziaływania pojazdu na nawierzchnię w warunkach rzeczywistych (in situ). W latach 50-tych opracowano metodę pomiaru ugięć nawierzchni bezpośrednio pod samochodem ciężarowym przy użyciu belki Benkelmana. Jednak z uwagi na statyczny charakter tej metody a także jej małą efektywność zaczęto poszukiwać metod lepiej oddających dynamiczne oddziaływanie pojazdów.

Idea ugięciomierza dynamicznego narodziła się we Francji (COST Action 336 "Falling Weight Deflectometer", 1996), gdzie po początkowych niepowodzeniach porzucono ją na rzecz rozwoju metody poruszającej się belki Benkelmana w ugięciomierzu Lacroix.

Doświadczenia francuskie wykorzystane jednak zostały przez inżynierów duńskich z Państwowego Laboratorium Drogowego (dzisiejszy Duński Instytut Drogowy) oraz Duńskiego Uniwersytetu Technicznego, którzy już w 1964 roku przeprowadzali pierwsze próby oceny nośności nawierzchni przy użyciu nowego urządzenia. Kluczowym w odwzorowaniu sinusoidalnego charakteru oddziaływania siły okazał się system dwóch sprężyn i masy pomiędzy nimi, zastąpiony później masą na sprężynie i tłumiku (Bohn). Taki schemat ideowy urządzenia pozostał niezmieniony aż do dnia dzisiejszego.



Rysunek 2.17 Model ideowy ugięciomierza oparty na a) masie pomiędzy sprężynami, b) masie na sprężynie i tłumiku

Pierwsze 65 egzemplarzy ugięciomierza wyprodukowała w latach 1968-1969 firma A/S Phønix. Były to niezwykle skomplikowane urządzenia. Dopiero w 1975 roku udoskonalono je wprowadzając w miejsce S-kształtnych sprężyn trzy gumowe odboje, hydrauliczny system podnoszenia obciążnika, a także elektroniczny system pomiaru ugięcia. Całość umieszczona została na specjalnie przygotowanej przyczepie.



Rysunek 2.18 Ugięciomierz dynamiczny FWD A/S Phønix 1978 r. (www.pavement-consultants.com)

W Wielkiej Brytanii, podobnie jak we Francji, rozwój ugięciomierzy dynamicznych traktowany był sceptycznie. Zarzucano metodzie nienaturalnie krótki czas oddziaływania na warstwy niżej położone oraz wzbudzaną podczas pomiarów inercję materiałów drogowych. Wątpliwości rozwiane zostały w 1973 roku kiedy na specjalnie przygotowanym odcinkach testowych przeprowadzono badania porównawcze przy użyciu typowego pojazdu ciężarowego, ugięciomierza FWD oraz belki Benkelmana. Analiza odkształceń i naprężeń pod warstwami asfaltowymi nie wykazała różnic w wynikach oddziaływania pojazdu i ugięciomierza.



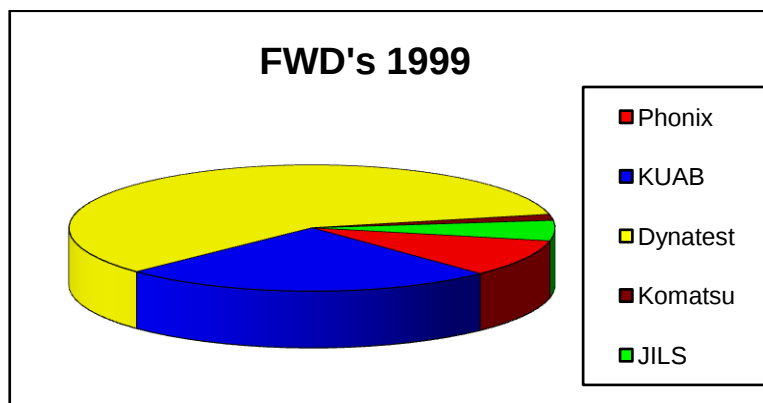
Rysunek 2.19 Zestaw pomiarowy FWD Phonix z elektroniką firmy Dynatest (COST 336)

W 1976 roku dzięki kooperacji Duńskiego Instytutu Drogowego oraz Uniwersytetu Technicznego utworzono firmę Dynatest, jednego z dzisiejszych liderów produkcji urządzeń FWD. W tym samym czasie podobne próby przeprowadzano również w Skandynawii, czego efektem był szwedzki ugięciomierz KUAB.



Rysunek 2.20 Współczesna wersja ugięciomierza dynamicznego KUAB

Lata 80-te przyniosły gwałtowny rozwój produkcji FWD w Holandii, gdzie kilka firm wybudowało takie urządzenia na własny użytek. Konieczne stało się też ujednolicenie tamtejszych metod pomiaru i interpretacji wyników, czego efektem było wprowadzenie wytycznych. W 1987 rozpoczęto produkcję JILS-FWD w Foundation Mechanics, Inc. w Stanach Zjednoczonych. Ugięciomierze dynamiczne FWD produkowane są również w Japonii przez firmę Komatsu.



Rysunek 2.21 Udział w rynku producentów FWD w 1999 roku (COST 336)

Na rysunku poniżej przedstawiono polski ugięciomierz udarowy UL-1 opracowany na potrzeby badań nawierzchni lotniskowych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych.



Rysunek 2.22 Ugięciomierz UL-1

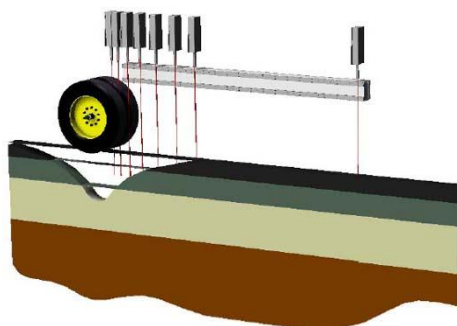
Najnowszym osiągnięciem w dziedzinie oceny nośności nawierzchni jest duński ugięciomierz laserowy TSD (Traffic Speed Deflectometer). Stworzony został do wykonywania sieciowych badań nośności nawierzchni, ze szczególnym uwzględnieniem identyfikacji miejsc o obniżonej trwałości konstrukcji drogowej, w celu minimalizacji użycia tradycyjnych urządzeń o powolnej specyfice działania.



Rysunek 2.23 Traffic Speed Deflectometer (www.greenwood.dk)

Pomiar ugięciomierzem laserowym TSD oparty jest na zaawansowanej technologii laserowej. Do pomiaru pionowego przemieszczenia powierzchni nawierzchni wywołanego przez poruszającą się ciężarówkę stosowane są specjalne czujniki laserowe. Różnica przemieszczeń między punktem obciążonym i nieobciążonym jest wyrażeniem aktualnego ruchu nawierzchni wywołanego przez ciężarówkę o znanym obciążeniu. Wykorzystując technikę Dopplera możliwa jest ocena prędkości ugięcia powierzchni nawierzchni. W celu uzyskania optymalnych warunków pomiarowych stosowane są systemy kontroli (system bezwładnościowy oraz serwomechanizm) pozwalający monitorować pozycję czujników laserowych. Czujniki pomiarowe zainstalowano w tylnej części naczepy, przed prawym tylnym kołem. Sprzęt do archiwizacji danych został umieszczony w kontenerze zamontowanym na naczepie, natomiast komputer sterujący zlokalizowany jest w kabinie kierowcy. Proces pomiarowy jest automatyczny i może go przeprowadzić jedna osoba. Pomiary wykonywane są zazwyczaj przy prędkości 70-80

km/h. Maksymalna prędkość pomiarowa wynosi 95 km/h, natomiast minimalna to 20 km/h. Typowa wielkość obciążenia to 10 ton lub inna w zależności od wymagań projektowych.



Rysunek 2.24 Belka z zainstalowanymi czujnikami (www.greenwood.dk)

Główną zaletą wynikającą z charakterystyki działania czujnika laserowego Dopplera jest prowadzenie pomiarów ugięć nawierzchni bezdotykowo i w sposób ciągły. Standard zbieranych danych odpowiada rezultatom uzyskanym z badań ugięciomierzem dynamicznym FWD lecz bez odstępów pomiarowych wynikających ze specyfiki badania wspomnianym urządzeniem. Wyjątkowość ugięciomierza TSD polega również na tym, że zbudowane zostało na bazie samochodu ciężarowego z naczepą, którego ruch odpowiada rzeczywistemu zachowaniu pojazdu na drodze (obciążenia nawierzchni i prędkość), a nie jak w pozostałych urządzeniach na symulacji takiego ruchu i przyjmowaniu pewnych założeń.

2.2.1 Charakterystyka ugięciomierzy dynamicznych FWD

Urządzenie FWD (Falling Weight Deflectometer) jest najbardziej rozpowszechnioną aparaturą badawczą tego typu na świecie. Umożliwia badania nośności nawierzchni drogowych, lotniskowych, a także dużych powierzchni przemysłowych, symulując nacisk wywierany przez samochód ciężarowy poruszający się z prędkością 35 - 40 km/h.



Rysunek 2.25 Ugięciomierz dynamiczny FWD

Zasada działania urządzenia FWD polega na pomiarze i rejestracji ugięć nawierzchni powstałych w wyniku działania impulsowego obciążenia dynamicznego o zadanej wielkości. Po zatrzymaniu urządzenia w danym punkcie pomiarowym, na nawierzchni ustawiana jest automatycznie płyta naciskowa wraz z geofonem centralnym (czujnikiem przemieszczeń) oraz geofonami znajdującymi się na belce pomiarowej. Z określonej wysokości wykonywany jest zrzut obciążnika o ustalonej wcześniej masie. W zespole generatora indukowany jest impuls siły, przekazywany na badaną nawierzchnię za pośrednictwem płyty naciskowej. W wyniku działania obciążenia konstrukcja nawierzchni oraz podłoże ulegają odkształceniu sprężystemu na pewnym obszarze, którego wielkość jest zależna od wielkości zadanego obciążenia testowego oraz od sztywności badanej konstrukcji. Wielkości ugięć nawierzchni mierzone są zazwyczaj za pomocą 7 do 9 geofonów ustawionych w ściśle określonych odległościach od osi działania siły obciążającej np.: 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500, 1800 mm. Przebiegi procesów obciążenia i odkształcenia się konstrukcji są rejestrowane jednocześnie.



Rysunek 2.26 Płyta naciskowa z zestawem geofonów

Na podstawie pomiarów czaszy ugięć ugięciomierzem dynamicznym FWD dokonuje się analizy nośności nawierzchni. Znając konstrukcję nawierzchni oraz głębokość i kształt czaszy ugięć można ocenić stan nawierzchni. Wyniki pomiarów mogą być wykorzystane nie tylko na poziomie projektu, ale również na poziomie sieci drogowo-ulicznej. Na poziomie sieci uzyskane wyniki można wykorzystać między innymi do budowy banku danych o nośności dróg, co pomocne jest w prawidłowym ustalaniu budżetu, podziału środków, typowaniu odcinków do remontu lub przebudowy oraz hierarchizacji ważności działań na sieci drogowej.

Głównym zadaniem FWD jest ocena nośności nawierzchni, jednak wyniki pomiarów mogą być wykorzystane również do innych celów np.:

- względne porównanie stanu poszczególnych warstw nawierzchni na podstawie pomiarów ugięć,
- określenie modułu sztywności poszczególnych warstw konstrukcji,
- bezpośrednie obliczenia odkształceń dla nawierzchni podatnych,
- strukturalna ocena stanu podbudów związanych,

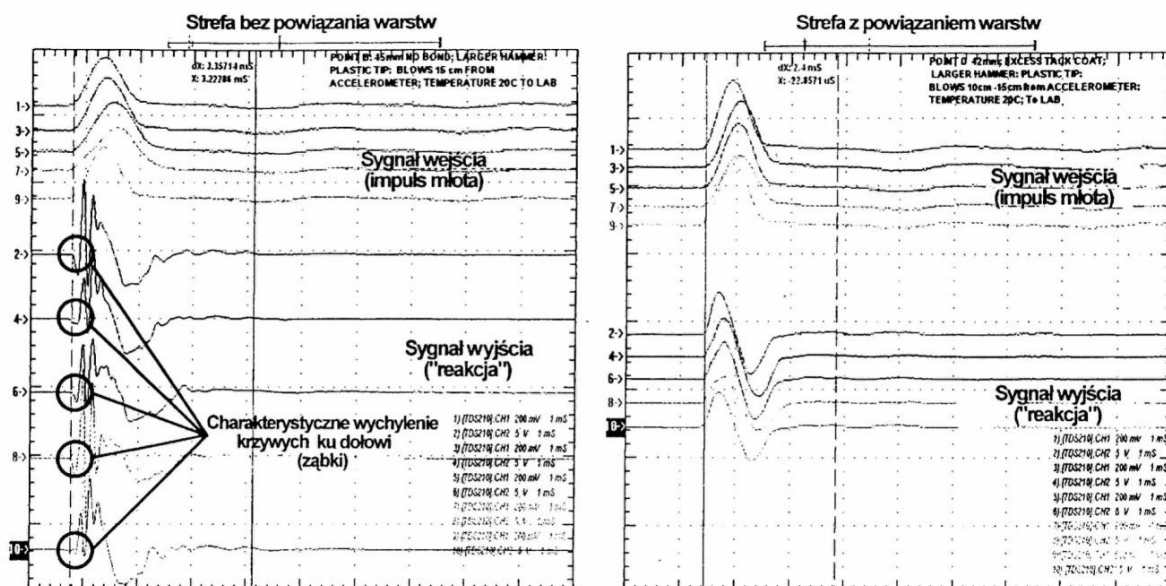
- ocena nośności materiałów niezwiązanych,
- badanie współpracy krawędzi płyt w pęknięciu,
- ocena jakości połączenia warstw.

2.2.2 Przydatność uzyskiwanych wyników w ocenie połączenia międzywarstwowego

Istnieje kilka metod badawczych pozwalających na ocenę powiązania między warstwami. Należą do nich m.in. laboratoryjne metody: Leutnera i dynamicznego ścinania w skrzynce (Sheare Box Test) omówione w punkcie 2.4 oraz metody nieniszczące z wykorzystaniem ugięciomierza udarowego FWD (Hakim B A, 1998) i (Sybilski, Mechowski, & Harasim, 2007) oraz badanie młotem udarowym (Impulse Hammer Test) (Sangiorgi, Collop, & Thom, 2008).

2.2.2.1 Test młotem impulsowym

Metoda jest nowoczesnym rozwiązaniem opracowanym na Uniwersytecie Nottingham. Pozwalają na ocenę powiązania pierwszych dwóch górnych warstw nawierzchni wykonanych z mieszanki mineralno-asfaltowej, bez konieczności wykonywania odwiertów w drodze. Zastosowana zasada pomiaru bazuje na tym, że udar młotem wzbudza reakcję falową, która zostaje zmierzona przez przetwornik przyspieszeń. Przykładowe wyniki analiz spektralnych dla przypadków „bez powiązania” i „z powiązaniem” przedstawia Rysunek 2.27. Już tutaj wyraźne są różnice w przebiegu krzywych. Wadliwe, względnie nie istniejące powiązanie warstw charakteryzuje się „postrzępionymi” wykresami przyspieszeń w odróżnieniu od „płynnych” przebiegów dla układów dobrze połączonych.



Rysunek 2.27 Porównanie analiz spektralnych dla testu młotem impulsowym ze złym oraz dobrym powiązaniem warstw

Z wykresów przedstawionych powyżej widać, że pierwsze jakościowe oceny możliwe są już bez dalszej matematycznej obróbki danych. Przeprowadzone badania porównawcze z innymi metodami badawczymi dowodzą wyraźnej zgodności badania młotem impulsowym z oceną powiązania warstw metodą Leutnera.

Z metodą młota udarowego należy wiązać duże nadzieje w zastosowaniu praktycznym. Jest to badanie nieniszczące, które pozwoli na ocenę powiązania warstw bezpośrednio po ułożeniu nowej warstwy w trakcie procesu budowlanego.

2.2.2.2 Metoda z użyciem FWD

Ugięciomierz dynamiczny FWD (Falling Weight Deflectometer) wywołuje powstanie na powierzchni drogi tzw. czaszy ugięcia. Wartości ugięć, w poszczególnych punktach pomiarowych służą, jako dane wyjściowe, do obliczenia sztywności (modułu sztywności) warstw konstrukcyjnych nawierzchni. Dotychczas było to podstawowe zastosowanie ugięciomierza FWD. Bezsprzeczne jest jednak, że jakość powiązania międzywarstwowego wpływa na uzyskiwane wyniki w pomiarach FWD. Opracowana przez Hakima (Hakim B A, 1998) metoda pozwala dodatkowo na ocenę związania warstw.

Schemat postępowania w tej metodzie jest następujący:

- zebranie danych z pomiarów czaszy ugięć oraz danych o konstrukcji nawierzchni (grubości i rodzaju warstw) i przyjęcie stałych materiałowych (współczynnik Poissona),
- obliczenia przemieszczeń nawierzchni przy zadanych wartościach modułów sztywności warstw (tzw. analiza odwrotna) i przy założeniu pełnego połączenia między warstwami (sztywność przy ścinaniu $K_{si} = 105 \text{ MN/m}^3$),
- wielokrotny rachunek regresji (kolejne iteracje) aż do otrzymania czaszy przemieszczeń najbardziej zbliżonej do czaszy ugięć z pomiarów FWD,
- wyznaczenie modułów sztywności odpowiadających obliczonej czaszy przemieszczeń,
- przyjęcie założenia, że warstwy leżące poniżej ocenianych warstw asfaltowych, dla których dokonuje się analizy połączenia międzywarstwowego mają stałą wartość modułu sztywność wynikającą z wcześniejszych obliczeń,
- ponowne obliczenia modułów warstw asfaltowych według zasad opisanych w poprzednich punktach, ale przy założeniu zmiennego połączenia między warstwami (sztywność przy ścinaniu od $K_{si} = 105 \text{ MN/m}^3$ – pełne połączenie do $K_{si} = 103 \text{ MN/m}^3$ – brak połączenia),
- wynikiem analiz są obliczone rzeczywiste wartości modułów warstw, uwzględniające istniejący podczas badania stan połączenia międzywarstwowego.

Biorąc wyznaczone wartości za podstawę do dalszych obliczeń, możliwe jest dokładniejsze orzekanie np. o szkodliwych koncentracjach naprężeń i oczekiwanej trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni.

2.2.2.3 Metoda IBDiM

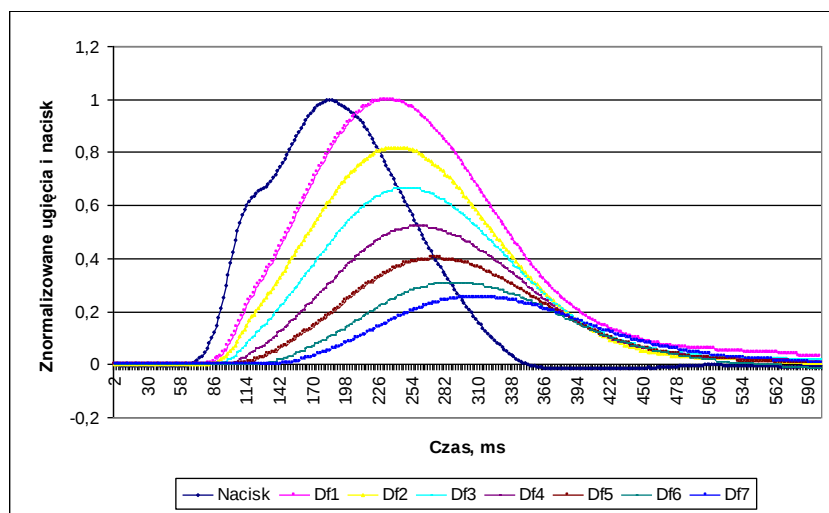
W latach 2005 – 2006 w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów wykonana została praca pt „Opracowanie metody oceny jakości połączenia warstw w konstrukcji nawierzchni za pomocą ugięciomierza dynamicznego FWD” zlecona przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad (Mechowski, Harasim, Kowalski, Kusiak, & Borucki, 2006). Jej rezultatem było opracowanie metodyki interpretacji wyników pomiarów ugięć ugięciomierzem dynamicznym FWD w celu oceny jakości połączenia międzywarstwowego.

W ramach ww. pracy do badań wytypowano 12 odcinków badawczych. Wyboru dokonano spośród odcinków dróg, na których stwierdzono zarówno złe jak i dobre powiązanie warstw konstrukcyjnych. Na odcinkach badawczych dokonano rozpoznania konstrukcji, pobrano próbki do badań laboratoryjnych oraz wykonano pomiary ugięć nawierzchni przy zastosowaniu ugięciomierza dynamicznego FWD.

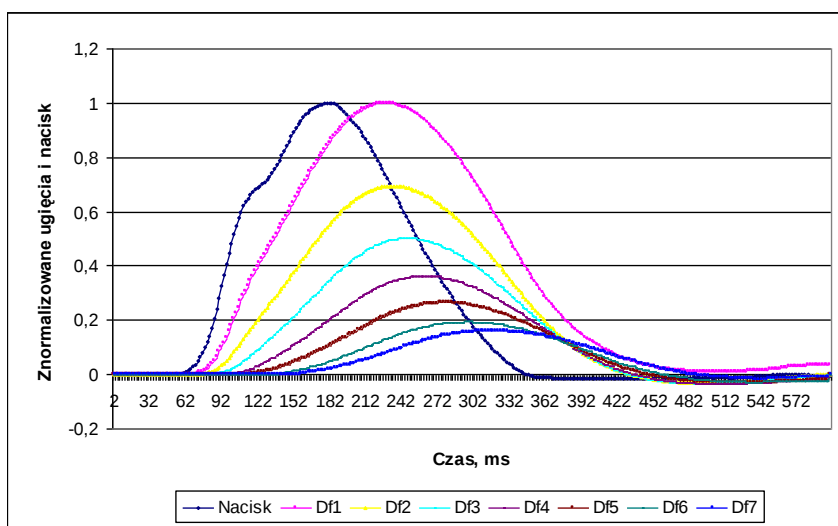
Podstawowym założeniem, jakie przyjęto przy opracowaniu metody oceny jakości połączenia międzywarstwowego, było wykorzystanie pełnych możliwości jakie daje ugięciomierz dynamiczny FWD. W programach komputerowych służących do obliczania modułów warstw konstrukcyjnych, a następnie trwałości zmęczeniowej nawierzchni korzysta się z pomiaru czasu ugięć, na którą składają się wartości maksymalnych ugięć na poszczególnych geofonach. Program Moddyn opracowany w IBDiM, oparty na teorii zjawisk falowych w układach wielowarstwowych, wykorzystuje pełne przebiegi ugięć nawierzchni i wartości ciśnienia kontaktowego, od momentu dokonania zrzutu obciążenia do chwili odprężenia. Dotychczasowe wieloletnie doświadczenia w wykonywaniu pomiarów ugięć FWD upoważniają do twierdzenia, że oprócz oceny nośności nawierzchni można tym urządzeniem badać również połączenie warstw konstrukcyjnych nawierzchni.

Analizując wyżej wymienione metody oceny połączenia międzywarstwowego wydaje się, że ze względów praktycznych najkorzystniejsze jest opracowanie metody zbliżonej do „testu młotem uderowym”. W przypadku pomiarów FWD „młotem” jest obciążenie dynamiczne generowane przez urządzenie, natomiast odbiornikiem geofony (czujniki przemieszczeń). Należy jednak opracować odpowiednią procedurę przetwarzania wyników pomiarów ugięć, pozwalającą na: określenie warstw konstrukcji charakteryzujących się dobrym lub niedostatecznym połączeniem oraz zidentyfikowanie połączenia (między którymi warstwami), które jest wadliwe.

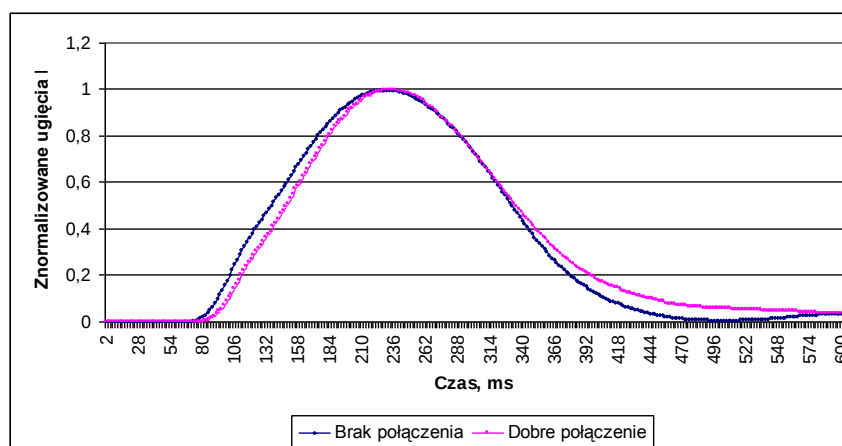
Analiza wyników pomiarów ugięć na odcinkach badawczych wskazuje na różnice w charakterystykach ugięcia nawierzchni z dobrym i złym połączeniem warstw. Na poniższych rysunkach przedstawiono wykresy ugięć i nacisku płyty w dwóch punktach pomiarowych. Dla lepszego porównania obu wykresów wartości ugięć i nacisków znormalizowano do wartości maksymalnych.



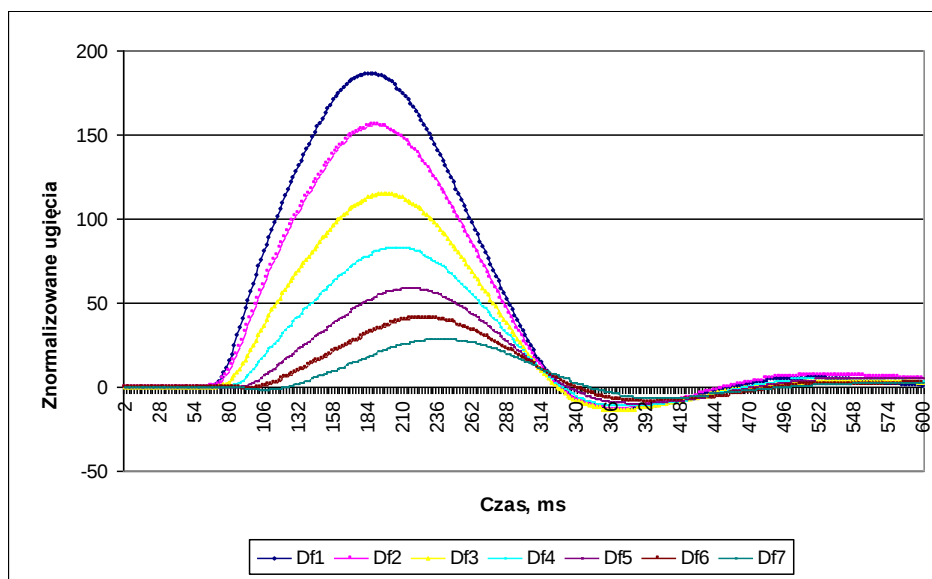
Rysunek 2.28 Wykresy ugięć i nacisku w miejscu dobrego powiązania warstw (Mechowski, Harasim, Kowalski, Kusiak, & Borucki, 2006)



Rysunek 2.29 Wykresy ugięć i nacisku w miejscu ograniczonego powiązania warstw (Mechowski, Harasim, Kowalski, Kusiak, & Borucki, 2006)



Rysunek 2.30 Wykresy ugięć rejestrowanych przez czujnik centralny w miejscu dobrego i ograniczonego powiązania warstw (Mechowski, Harasim, Kowalski, Kusiak, & Borucki, 2006)



Rysunek 2.31 Wykresy ugięć i nacisku w miejscu braku połączenia międzywarstwowego (Mechowski, Harasim, Kowalski, Kusiak, & Borucki, 2006)

Na wykresie obrazującym dobre połączenie warstw widoczne są dwa punkty przegięcia krzywej: pierwszy podczas zwiększania się nacisku wywieranego na powierzchnię i drugi podczas odprężenia. Natomiast wykresy przedstawiające ugięcia na odcinkach o ograniczonym powiązaniu warstw lub jego braku charakteryzują się dodatkowym punktem przegięcia po odprężeniu powierzchni.

Po przeanalizowaniu wykresów dla wszystkich pomierzonych ugięć stwierdzono, że dla odcinków, na których w wyniku wykonanych badań laboratoryjnych i odwiertów zaobserwowano brak połączenia międzywarstwowego przebiegi ugięć są podobne jak na Rysunkach 2.29 i 2.31. Natomiast dla odcinków o dobrym połączeniu międzywarstwowym otrzymano wykresy analogiczne jak na Rysunku 2.28.

Aby zaobserwowane zjawisko można było oceniać w sposób jakościowy wprowadzono „na roboczo” wskaźnik połączenia warstw W_{pw} , którego wartość oblicza się ze wzoru:

$$W_{pw} = \frac{U_{end} - U_{min}}{U_{max}} \cdot 100\% \quad (2.33)$$

gdzie:

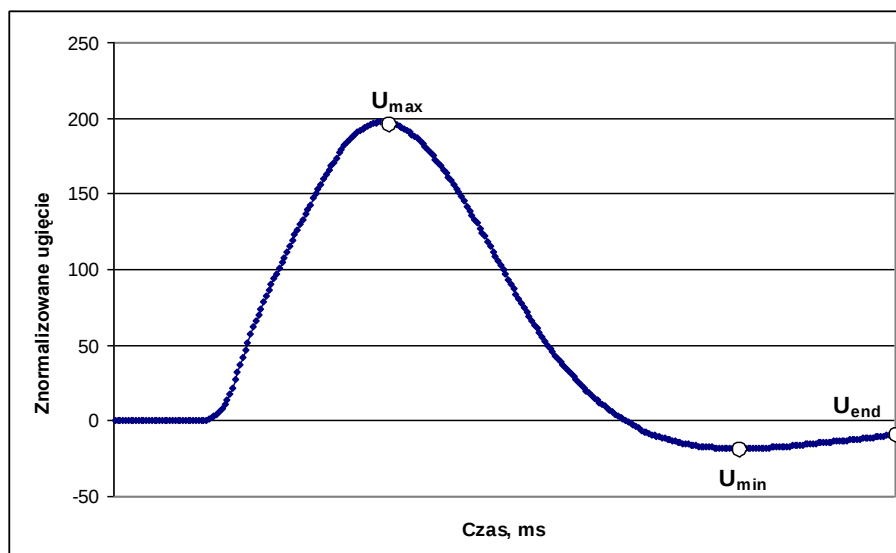
W_{pw} – wskaźnik połączenia warstw,

U_{end} – wartość ugięcia na końcu rejestrowanego przebiegu (po 600 ms),

U_{min} – najmniejsza wartość ugięcia,

U_{max} – ugięcie maksymalne.

W przypadku niewystępowania wartości U_{min} (np. w przypadku dobrego połączenia warstw) przyjmuje się, że $U_{min} = U_{end}$. Znaczenie wartości użytych we wzorze obrazuje Rysunek 2.32.



Rysunek 2.32 Zmienność ugięcia nawierzchni pod czujnikiem centralnym w czasie wraz z punktami charakterystycznymi (Mechowski, Harasim, Kowalski, Kusiak, & Borucki, 2006)

Na podstawie wykonanych pomiarów ugięć ugięciomierzem dynamicznym FWD oraz konfrontacji uzyskanych wyników ze stanem nawierzchni ocenionym na podstawie badań laboratoryjnych i wyglądu próbek pobranych z odcinków badawczych, przyjęto następującą, wstępną klasyfikację stanu połączeń między warstwami:

- $W_{pw} = 0$ pełne połączenie warstw,
- $0 < W_{pw} \leq 4$ dobre połączenie warstw,
- $4 < W_{pw} \leq 8$ słabe połączenie warstw,
- $W_{pw} > 8$ brak połączenia warstw.

Przedstawiana metoda wskazuje, że wyniki pomiarów ugięciomierzem dynamicznym FWD (pełne przebiegi ugięć w czasie) mogą być z powodzeniem wykorzystane do oceny jakości połączenia między warstwami konstrukcyjnymi nawierzchni drogowej. Wyznaczenie wskaźnika W_{pw} lub analiza wykresów ugięć w funkcji czasu, pozwala na szybkie i proste, wstępne wnioskowanie o jakości połączenia. Niestety na obecnym etapie badań nie można jednoznacznie określić, które warstwy charakteryzują się złym połączeniem, ponieważ stwierdzono brak korelacji wyników pomiarów ugięć z głębokością występowania.

2.3 Laboratoryjne metody oceny stanu połączeń międzywarstwowych

Sczepnością międzywarstwową określamy połączenie między poszczególnymi warstwami w konstrukcji nawierzchni. Pożądane jest by warstwy ułożone bezpośrednio jedna na drugiej stanowiły całość, ciągłość, tworzyły zwarty kompleks budowlany (konstrukcję). Pełne połączenie międzywarstwowe gwarantuje niezakłóconą pracę nawierzchni zgodnie z założeniami projektowymi, czyli przenoszeniem obciążeń od ruchu pojazdów na podłoże.

Połączenie międzywarstwowe pełni dwie główne funkcję (Cross & Shrestha, 2004):

- zwiększa wytrzymałość zespołu warstw konstrukcji nawierzchni,
- uniemożliwia penetrację wody między warstwami.

Szczepność międzywarstwowa w konstrukcji nawierzchni to złożone zjawisko, w którym działa wiele czynników, lecz główne to sklejenie warstw i wspólne zazębianie się warstw nawierzchni (Glet, 2000).

Sklejenie warstw następuje na skutek odpowiedniej zawartości asfaltu w mieszance, który pełni funkcję lepiszcza, kleju. Tak bywało w przypadku dawniej budowanych nawierzchni (Jiménez & Soto Sanchez, 2000). Warstwy asfaltowe miały duże zawartości asfaltu i kruszywo drobnoziarniste. Gwarantowało to wysoką szczepność, ale nie zapewniało wystarczającej sztywności mieszanki. Dzisiejsze mieszanki mają inny skład, konieczne jest skropienie powierzchniowe np. za pomocą emulsji asfaltowych. Dużą rolę odgrywa również wałowanie mieszanki, gdyż proces ten „wyciska” asfalt z mieszanki na powierzchnie styku dwóch warstw. Asfalt zaś ma większą zdolność do szczepiania warstw.

Zazębianie się warstw polega na tym, że ziarna kruszywa górnej warstwy klinują się z ziarnami warstwy dolnej. W procesie szczepiania zimna warstwa dolna jest rozgrzewana przez wbudowywaną gorącą warstwę górną. Dzięki czemu mięknie i jest możliwe zazębianie się ziaren kruszyw obu warstw. Głównym czynnikiem przy zazębianiu się warstw jest wysoka temperatura i odpowiednia energia zagęszczania (wałowania). Zazębienie przejmują większość działających poziomych naprężeń ścinających (Glet, 2000). Najlepsze zazębienie uzyskuje się w technologii „gorące na gorące” oraz przez właściwe dobranie uziarnienia górnej mieszanki w zestawieniu z niżej leżącą.

Znajomość mechanizmu szczepności pozwala dobierać rodzaj metody badawczej, jak i interpretować uzyskane wyniki przy ocenie poszczególnych czynników wpływających na szczepność międzywarstwową.

2.3.1 Skutki braku szczepności międzywarstwowej

Szczepność międzywarstwowa jest zagadnieniem niezwykle istotnym dla trwałego i prawidłowego funkcjonowania nawierzchni drogowych podatnych i półsztywnych. Skutki nieprawidłowego wykonania połączenia międzywarstwowego, w nowo projektowanej konstrukcji jak i starej konstrukcji wzmocnionej, mogą być bardzo różne, od tak zwanych „księżycowatych” spękań (Rysunek 2.33) do poślizgu całej warstwy nawierzchni (Rysunek 2.34). Według (Chellgren, 1999) miejsca najczęstszego występowania skutków braku szczepności międzywarstwowej występują tam, gdzie pojazdy regularnie i często hamują i przyspieszają np. przed sygnalizacją świetlną, ponadto na łukach o mniejszych promieniach tzn. tam gdzie występują duże siły odśrodkowe oraz na odcinkach o dużych spadkach podłużnych, które generują zwiększone naprężenia ścinające w konstrukcji nawierzchni.



Rysunek 2.33 Widok księżycowatych spękań na skutek braku szczepności międzywarstwowej (fot. P. Jaskuła)



Rysunek 2.34 Widok całkowitego poślizgu warstwy na skutek braku szczepności międzywarstwowej (fot. P. Jaskuła)

Romanoschi i Metcalf (Romanoschi & Metcalf, 2002) również wskazują na spękania ślizgowe, jako najłatwiej zauważalne zniszczenie powstające na skutek niewłaściwego wiązania między warstwą ścieralną a następną poniżej. Spękania te występują w miejscach, gdzie pojawiają się duże siły styczne między kołami pojazdów a nawierzchnią, choć mogą wystąpić również na skutek prostego przejazdu kół pojazdu. Uszkodzenia te mają wygląd zbliżony do półksiężyca i o dwóch końcach skierowanych przeciwnie do kierunku ruchu (Rysunek 2.33).

Glet (Glet, 2000) wytypował i opisał trzy różne przypadki oddzielenia się warstw:

- dolna warstwa nie ma odpowiedniej spójności (kohezji); dochodzi do rozerwania warstwy;
- warstwa szczepna rozrywa się;
- górna warstwa nie przylega do całej powierzchni dolnej warstwy lub nie posiada odpowiedniej spójności.

Według Judyckiego (Judycki & Jaskuła, 2005/2006) i Zawadzkiego i innych (Zawadzki, Skierczyński, & Mechowski, 2003) skutkiem braku powiązania między warstwami asfaltowymi jest wzrost ugięcia poszczególnych warstw. Utrata szczepności międzywarstwowej bardzo mocno wpływa na trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni, ze względu na duże ugięcia poszczególnych warstw, powstanie spękań zmęczeniowych w wyższych warstwach konstrukcyjnych niż na spodzie warstw asfaltowych i szybszą propagację spękań zmęczeniowych na powierzchnię. Po czym następuje wnikanie wody w spękania i postępujące niszczenie nawierzchni.

Judycki (Judycki J, 2003) stwierdza, że zmniejszenie szczepności wywołuje zmianę rozkładu odkształceń rozciągających w warstwach asfaltowych. Przy braku szczepności warstwy oddzielnie przenoszą zarówno ściskanie, jak i rozciąganie. Nawet częściowa szczepność 30% jest istotna, dopiero przy braku szczepności następuje radykalny wzrost odkształceń rozciągających.

Na skutek braku powiązania oczekiwać należy większych odkształceń i szybszego powstawania kolein w okresie letnim oraz wcześniejszych strukturalnych uszkodzeń, rys, wykruszeń (Von Becker, 1990).

Dodatkowy skutek braku szczepności międzywarstwowej to powstawanie spękań w obszarze poza powierzchniami działania obciążenia z niebezpieczeństwem pompowania, nagromadzenia drobnych cząstek i zniszczenia warstwy wiążącej przy penetracji wody (Von Becker, 1990). Hakim i inni (Cheung, Hakim, & Armitage, 2000) wskazuje, że brak powiązania międzywarstwowego przyczynia się do spadku modułu sztywności „pakietu” warstw asfaltowych konstrukcji, czego skutkiem jest skrócenie trwałości zmęczeniowej nawierzchni. Dzieje się tak, dlatego, że poszczególne warstwy, wzajemnie niepowiązane, posiadają mniejsze wytrzymałości na rozciąganie, wskutek czego ich trwałość jest mniejsza i dochodzi do uginania się i niewłaściwego przekazywania obciążeń. Spękania zmęczeniowe pojawiają się nie na spodzie ostatniej (dolnej) warstwy bitumicznej, a tylko na spodzie warstwy leżącej na płaszczyźnie, przy której wystąpił spadek szczepności.

2.3.2 Przyczyny utraty szczepności i rodzaje czynników wpływające na szczepność

Judycki (Judycki J, 2003) wskazuje na fakt, że w Polsce problem ze szczepnością międzywarstwową zaczął występować po wprowadzeniu sztywnych i gruboziarnistych betonów asfaltowych odpornych na deformacje trwałe, zawierających w dolnych warstwach mało asfaltu. Jednocześnie autor proponuje by częściej stosować betony asfaltowe z drobniejszym uziarnieniem, a co za tym idzie z większą zawartością asfaltu.

Glet (Glet, 2000) zakłócenia związania warstw asfaltowych uzależniono od czterech głównych przyczyn:

- brak fizycznego związania; warstwy leżą jedna na drugiej oddzielnie,
- związanie jest za miękkie: warstwy przesuwają się,
- występuje zbyt gruba błonka lepiszcza w warstwie sklejającej: warstwy nie są stabilne,
- występuje zbyt mało zaprawy: warstwy między sobą dotykają się tylko punktowo –ziarna kruszywa ulegają zmiżdżeniu.

Judycki w publikacji (Judycki J, 2003) przedstawił opis konkretnego przypadku, jaki wystąpił podczas remontu nawierzchni drogi o bardzo ciężkim ruchu, gdzie na pewnym dość krótkim odcinku wystąpił problem ze szczepnością międzywarstwową między warstwami podbudowy asfaltowej, układanej w dwóch przejściach. Jako przyczynę utraty szczepności wyróżniono kilka prawdopodobnych przyczyn działających jednocześnie:

- niekorzystne warunki atmosferyczne – niska temperatura około 5°C i znaczna wilgotność powietrza opóźniały rozpad emulsji i zakłócały przyczepność,
- sztywna gruboziarnista mieszanka mineralno-asfaltowa – niska zawartość asfaltu (3,8%) w mieszance 0/31,5 uniemożliwiły wciśnięcie się ziaren z górnej warstwy, by uzyskać zazębienie,
- słabe właściwości klejące emulsji asfaltowej zastosowanej do skropienia – zastosowano emulsję na bazie zwykłego asfaltu w bardzo niekorzystnych warunkach,
- prawdopodobna segregacja gruboziarnistej podbudowy 0/31,5 – tworzyły się skupiska grubych ziaren, które uniemożliwiały zazębienie się warstwy górnej.

Judycki (Judycki J, 2003) stwierdził między innymi, że lepszą szczepność można uzyskać przy zastosowaniu zawartości asfaltu w podbudowie asfaltowej, nie mniejszej od 4%.

Hakim i inni (Cheung, Hakim, & Armitage, 2000) wskazał inne równie ważne przyczyny braku związania międzywarstwowego takie jak:

- słaba kontrola powykonawcza,
- brak warstwy szczepnej,
- zabrudzenie dolnej warstwy i
- układanie mieszanek w zbyt niskich temperaturach.

Katastrofalne skutki może mieć nieprawidłowa przebudowa starej nawierzchni asfaltowej, jak opisano w pracy Gleta (Glet, 2000). Stara warstwa ścieralna przejmuje po przebudowie całkiem nowy zakres obowiązków, któremu często nie jest w stanie sprostać, czego przyczyną mogą być osłabienie związania międzywarstwowego konstrukcji nawierzchni i jej degradacja.

Dodatkowo zauważyć można przypadki, gdzie po nowej warstwie wiążącej odbywa się ruch samochodowy, co wiąże się z pozostawianiem przez koła tych pojazdów cząstek glin i innych zabrudzeń. Powoduje to w znacznym stopniu osłabienie związania międzywarstwowego (Glet, 2000).

Bardzo ważnym elementem wpływającym na warunki pracy warstw szepnych jest sposób wykonania i pielęgnacja warstwy przed wbudowaniem warstwy górnej (Brendt, 1998). Jest to istotne zagadnienie zarówno w przypadku konstrukcji z warstwą szepną, skropieniem, jak i w warunkach bezpośredniego wykonywania warstw. Szczegółowe zalecenia znajdziemy w instrukcji niemieckiej (Brendt, 1998). Wymagania odnośnie podbudowy zakładają konieczność zwracania uwagi na:

- równomierność powierzchni, brak wykruszeń, ubytków itp.,
- chropowatość i porowatość,
- materiały oddzielające np. kurz, zanieczyszczenia, woda, resztki środków oddzielających,
- luźny materiał.

W przypadku wystąpienia wymienionych objawów należy zastosować środki zaradcze w celu oczyszczenia powierzchni.

Wpływ wody na szepność przebadano w ramach pracy (Sholar, Page, Musselman, Upshaw, & Moseley, 2002). Na odcinkach testowych wyodrębniono sekcje, na których zasymulowano działanie „deszczówki”. Warstwę szepną *ang. tack-coat* polano wodą przed wbudowaniem górnej warstwy. Dowiedziono, że woda obniżyła siły wiązania, w stosunku do równoważnych sekcji bez zastosowania wody. Siły wiązania w przypadku mokrych powierzchni rosły z czasem, ale nigdy nie osiągały wartości, jakie uzyskano na sekcjach bez „deszczówki”. W jednym przypadku nie udało się nawet pobrać próbek do badania ścinania, jako, że próbka „rozpadła się”- wystąpił całkowity brak szepności między warstwami nawierzchni.

Hachiya i Sato (Hachiya & Sato, 1997) podają, że znaczący wpływ rodzaju warstwy szepnej ma znaczenie dopiero w wysokiej temperaturze $>30^{\circ}\text{C}$, czas rozpadu emulsji jest zależny od temperatury i wilgotności otoczenia. Podają, że 16 godzin jest niezbędne do całkowitego rozpadu emulsji, przy uwzględnieniu ekstremalnych warunków atmosferycznych i zanieczyszczonego podłoża.

Glet (Glet, 2000) przebadał związanie warstw trzema metodami: badanie ścinania według Leutnera, badanie przyczepności i oderwania na próbce wzorcowej w badaniu według Heroína, badanie na równi pochyłej. W wyniku tych badań autor przedstawił następujące rezultaty: na wielkość siły ścinającej i drogę ścinania duży wpływ ma rodzaj mieszanki mineralno-asfaltowej i typ górnej warstwy, stopień zagęszczenia warstwy, zawartość lepiszcza w dolnej warstwie konstrukcji nawierzchni.

Raab i Partl (Raab & Partl) przedstawili badania, dotyczące szwajcarskich nawierzchni asfaltowych. Badania wykonywano na rdzeniach pozyskanych nawierzchni i wykazały, że naprężenia ścinające na granicy warstw wiążącej i ścieralnej nowej nawierzchni zależą głównie od właściwości warstwy ścieralnej. Wykazano, że duże znaczenie dla szepności międzywarstwowej ma zawartość lepiszcza i wolnych przestrzeni, gdzie jest to szczególnie widoczne w przypadku porowatego asfaltu i asfaltu lanego. Dla SMA siły ścinania były na poziomie 19 kN , natomiast dla asfaltu lanego na poziomie 40 kN, w temperaturze 20°C .

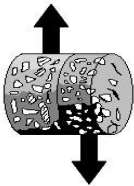
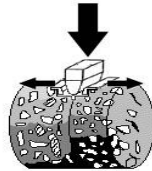
Jaskuła (Jaskuła, 2006) na podstawie przeprowadzonych badań stwierdza, że siła ściskania międzywarstwowego zależy jest od wielu czynników, z których istotnie decydujące są: rodzaj emulsji zastosowany do skroplenia międzywarstwowego i skuteczność zagęszczenia warstw stykających się ze sobą (ściskanych).

2.3.3 Przegląd istniejących metod

Istnieje szereg metod laboratoryjnych do określania siły powiązania warstw (Jiménez & Soto Sanchez, 2000), które ze względu na wspólne cechy można pogrupować w odniesieniu do schematu obciążenia próbki:

- ścinanie proste,
- rozłupywanie,
- odrywanie,
- skręcanie.

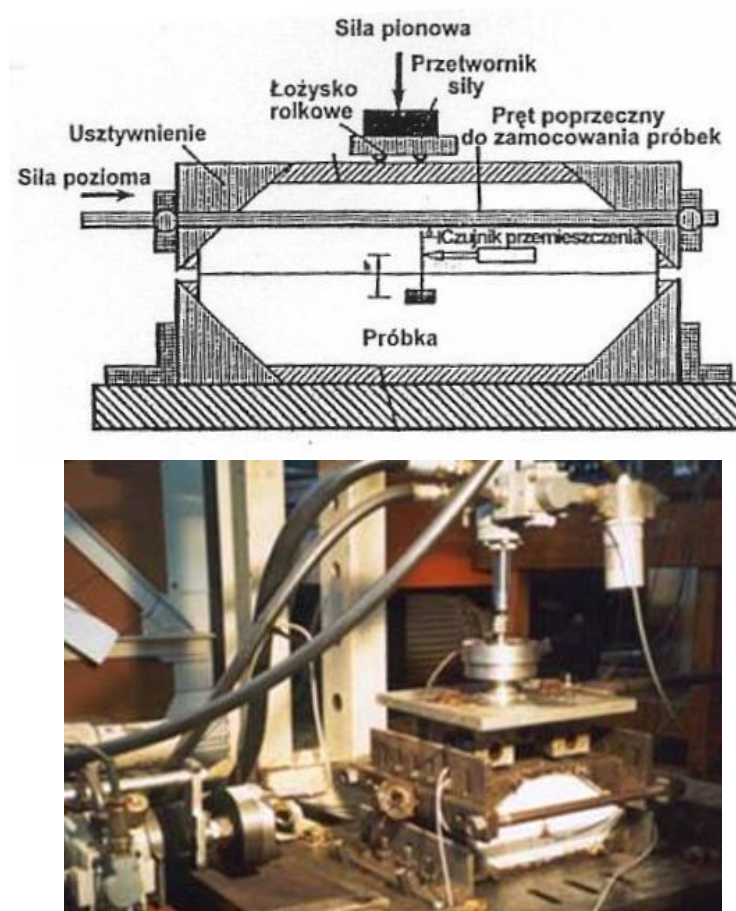
Tabela 2.2 Zestawienie metod (urządzeń) do określania szczepności w zależności od schematu badawczego

Lp.	Model metody badawczej		Metoda badania szczepności i kraj stosowania
1	Ścinanie proste		Aparat Leutnera - Niemcy, Polska Aparat LPDS - Szwajcaria Modyfikacje prasy Marshalla - USA, Hiszpania, Kanada Aparat skrzynkowy - Wielka Brytania, Włochy
2	Rozłupywanie		Klinowy test rozłupywania - Austria
3	Odrywanie		Test odrywania "pull-off" - Austria, Niemcy
4	Skręcanie		Badanie ścinania przez skręcanie - Wielka Brytania

2.3.3.1 Badanie ścinania w aparacie skrzynkowym

W 1978 r. Uzan i inni wprowadzili do badania mieszanek mineralno-asfaltowych specjalnie przystosowane urządzenie, które odpowiada zasadzie badania bezpośredniego ścinania w skrzynce z mechaniki gruntów (*ang. shear box*) (Rysunek

2.35). Tu oprócz pomiaru ścinania można regulować obciążeniem pionowym w czasie badania. W Wielkiej Brytanii w 1986 roku aparat skrzynkowy zastosował Hughes (Pos, Kruntcheva, Collop, & Thom, 2003).



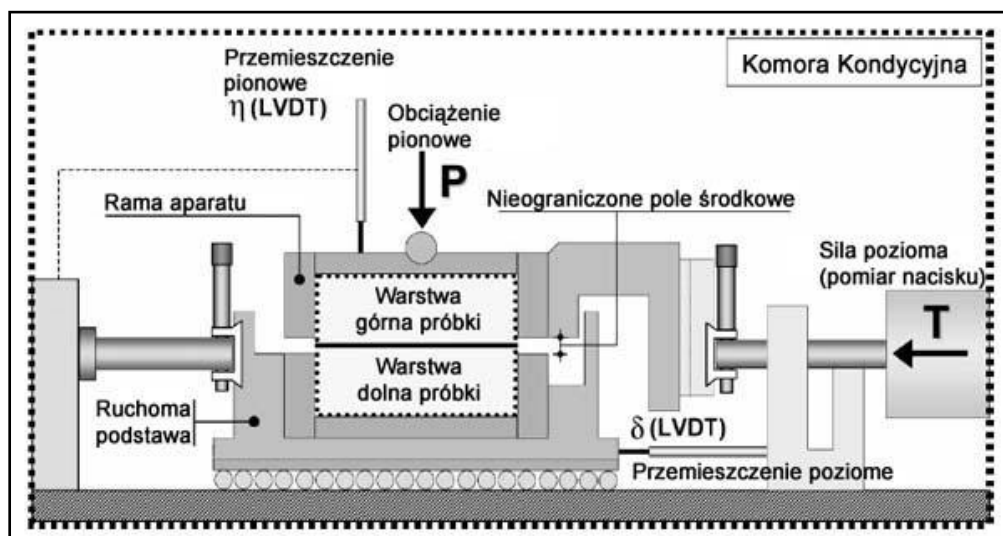
Rysunek 2.35 Schemat i widok aparatu skrzynkowego zaadaptowanego do badań mieszanek mineralno-asfaltowych (Pos, Kruntcheva, Collop, & Thom, 2003)

2.3.3.2 Test ścinania ASTRA

Pewną modyfikacją aparatu skrzynkowego jest urządzenie ASTRA (ang. Ancona Shear Testing Research and Analysis) (Rysunek 2.36). Pierwsze prace nad metodą rozpoczęto w 1992 równolegle na kilku włoskich uczelniach. Celem było bliższe przyjrzenie się czynnikom ważnym z punktu widzenia konstrukcji i zachowania się nawierzchni, z czego główną uwagę skupiono na dominującej roli ścinania. Efektem było opracowanie urządzenia do badania warstw szepnych układów wielowarstwowych zaprezentowanego po raz pierwszy w 1993 roku. Podstawowe możliwości ASTRA zostały przedstawione w (Canestrari & Santagata, 2005).

Przygotowanie dwuwarstwowych próbek bitumicznych odbywa się zazwyczaj poprzez statyczne zagęszczanie warstwy jednej na drugiej, wraz z użyciem wymaganej wielkości skropienia emulsją na powierzchni dolnej warstwy. Według nowych zaleceń należy zdefiniować szereg czynników mogących mieć wpływ na wynik i dobrać je tak aby odzwierciedlały rzeczywiste warunki wbudowywania nawierzchni (np. typ i zagęszczenie mieszanek, czas rozpadu i temperatura emulsji, temperatura badania). Test ścięcia

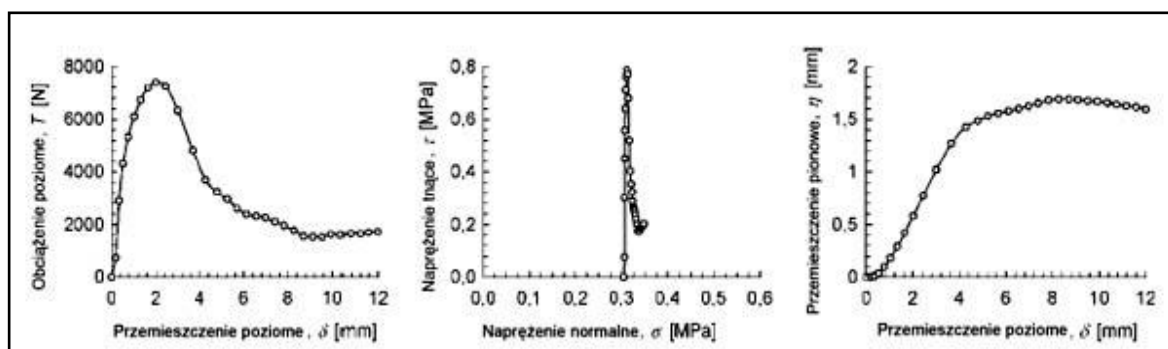
odbywa się poprzez przyłożenie poziomego przesuwu, jednostajnie wzrastającego, do dwóch części ramy wewnątrz której znajduje się próbka.



Rysunek 2.36 Schemat aparatu skrzynkowego ASTRA (Canestrari & Santagata, 2005)

System gromadzenia danych rejestruje wielkość poziomego obciążenia T oraz odczyt z dwóch mierników: przesunięcie poziome górnej części ramownicy δ oraz przesunięcie pionowe η płytki obciążającej próbkę od góry.

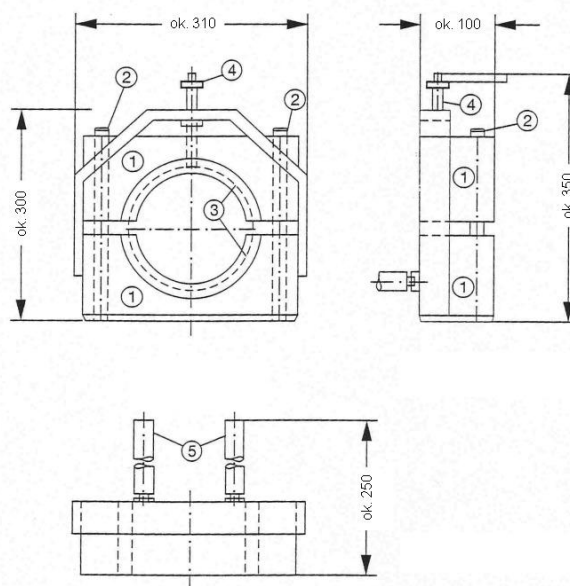
Typowe wykresy wyników z ASTRA przedstawiono na Rysunku 2.37.



Rysunek 2.37 Typowe wykresy uzyskane w badaniu aparatem ASTRA (Canestrari & Santagata, 2005)

2.3.3.3 Metoda Leutner'a i jej modyfikacje

Początek badań ścinania datujemy na koniec lat 70 XX wieku. Związany jest on z osobą niemieckiego badacza Leutner, obecnie profesora z Politechniki w Karlsruhe, który uważany jest za twórcę pierwszego aparatu do badania wytrzymałości warstw szczepnych. Działanie tego aparatu (znanego obecnie jako aparat Leutnera) opiera się na metodzie bezpośredniego ścinania.



Rysunek 2.38 Aparat Leutnera do ścinania próbek (Von Becker, 1990)

Dokładne działanie tej aparatury, jak również sposób badania są przedmiotem instrukcji [24]. Badanie wykonuje się je na próbkach rdzeniowych średnicy 150 mm i mierzy się maksymalną siłę ścinającą, przy której następuje uszkodzenie warstwy sczepnej – zerwanie w temperaturze 20°C. Siła ścinająca jest jedyną siłą działającą na próbkę w trakcie badania. Instrukcja opisuje dokładny sposób pobierania próbek i warunki niezbędne, jakie powinny wykazywać pobrane próbki. Badanie stosuje się jako badanie kontrolne przed otwarciem nowej drogi do ruchu. Badanie określa wpływ sklejenia i zazębienia się próbek.

W teście Leutnera musimy mieć możliwość: regulacji prędkości przesuwu szczek ściskających, normalnie równej 50mm/min oraz równoczesnego zapisu wykresu siła-droga ścinania oraz utrzymywania stałej temperatury próbki. Przykładowe dane uzyskane z pomiaru przedstawiono na Rysunku 2.39.

Naprężenie ścinające wyznacza się z wzoru:

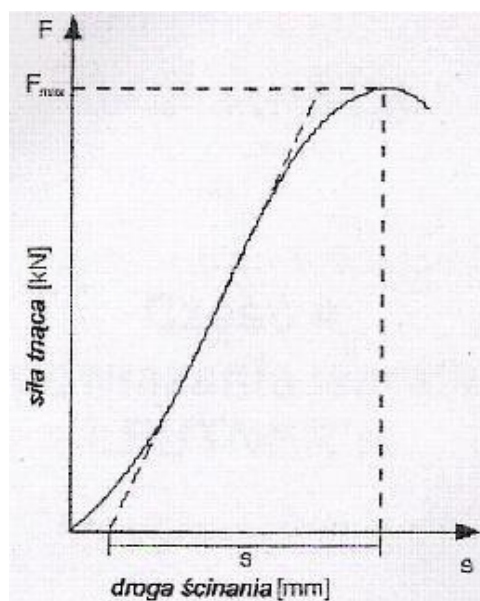
$$\tau = \frac{\max P}{A} = \frac{\max P}{\pi * D^2 / 4} \quad (2.34)$$

gdzie:

maxP – maksymalna siła ścinająca [kN],

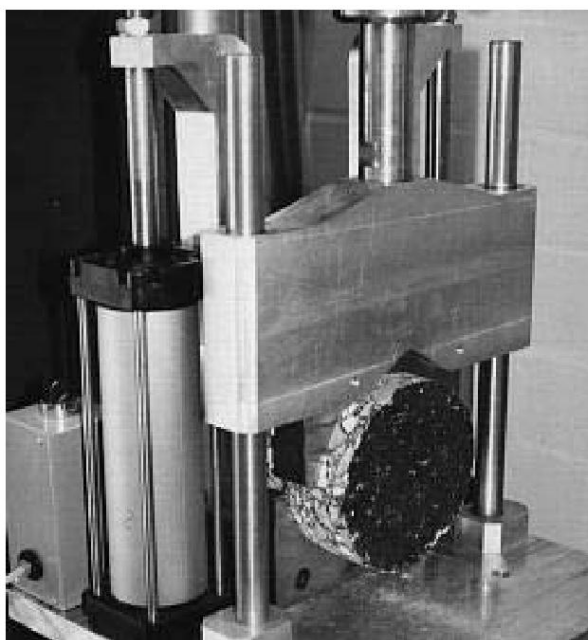
A – powierzchnia przekroju próbki [mm²],

D – średnica próbki [mm].



Rysunek 2.39 Wykres z badania

Metoda Leutnera była rozwijana i modyfikowana przez Raab'a i Partl'a w instytucie EMPA w Szwajcarii (Partl & Raab, 1998). Powstało urządzenie LPDS (*ang. Layer-Parallel Direct Shear*), (Rysunek 2.40) działające na tej samej zasadzie, lecz z dokładnym, pneumatycznym mocowaniem próbki do badania.



Rysunek 2.40 Widok urządzenia LPDS do ścinania (Partl & Raab, 1998)

Badacze wprowadzili dodatkowy parametr - sztywność ścinania, definiowana wzorem:

$$S_{\max} = \left(\frac{\Delta P}{\Delta w} \right)_{\max} \quad (2.35)$$

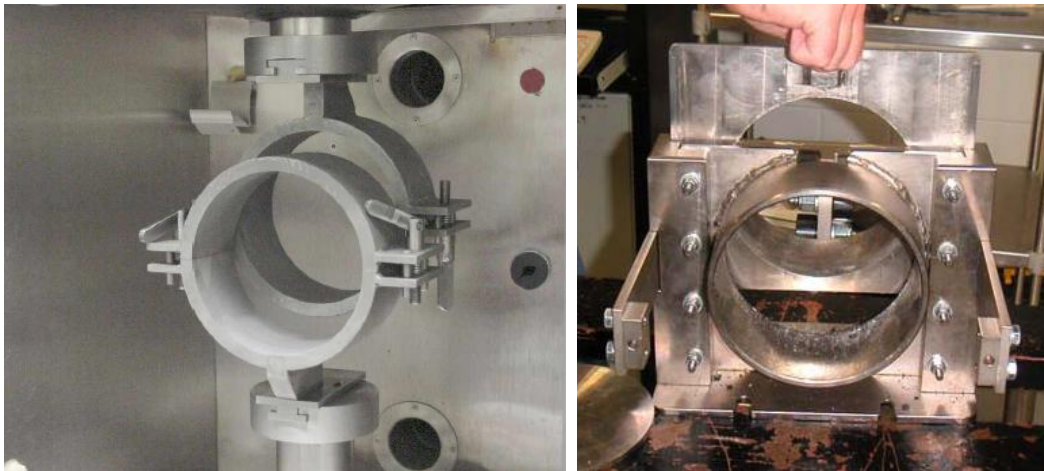
gdzie:

S_{max} – sztywność ścinania [kN/mm],

ΔP – maksymalny przyrost siły ścinającej podczas badania [kN],

Δw – maksymalny przyrost drogi ścinania [mm].

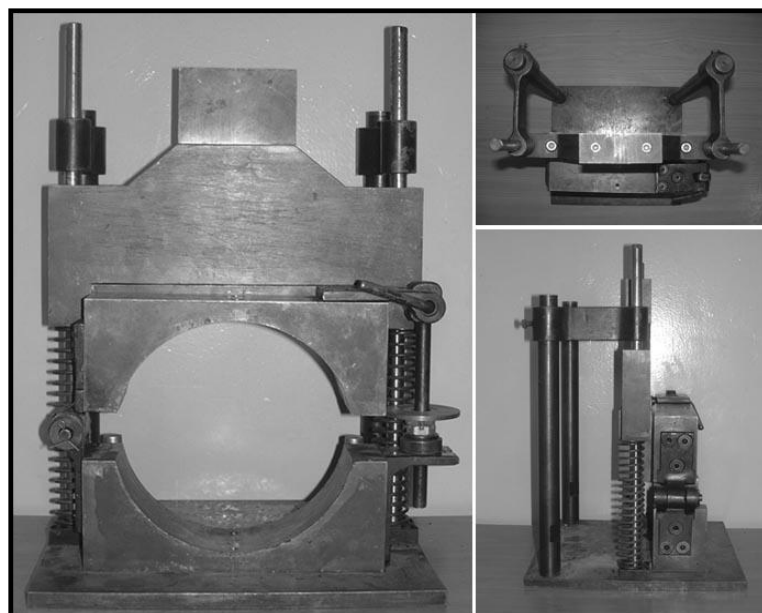
Prosty przyrząd opierający się na zasadzie prostego ścinania przedstawili także Amerykanie (Rysunek 2.41) (Sholar, Page, Musselman, Upshaw, & Moseley, 2002). Stworzyli nowy przyrząd prosty w działaniu, który imitował czyste ścinanie i pozwalał na użycie różnych parametrów testowych (metoda obciążania, wielkość obciążenia, temp itp.).



Rysunek 2.41 Przyrząd do badania ścinania międzywarstwowego z USA (Sholar, Page, Musselman, Upshaw, & Moseley, 2002), (Tashman, Nam, & Papagiannakis, 2006)

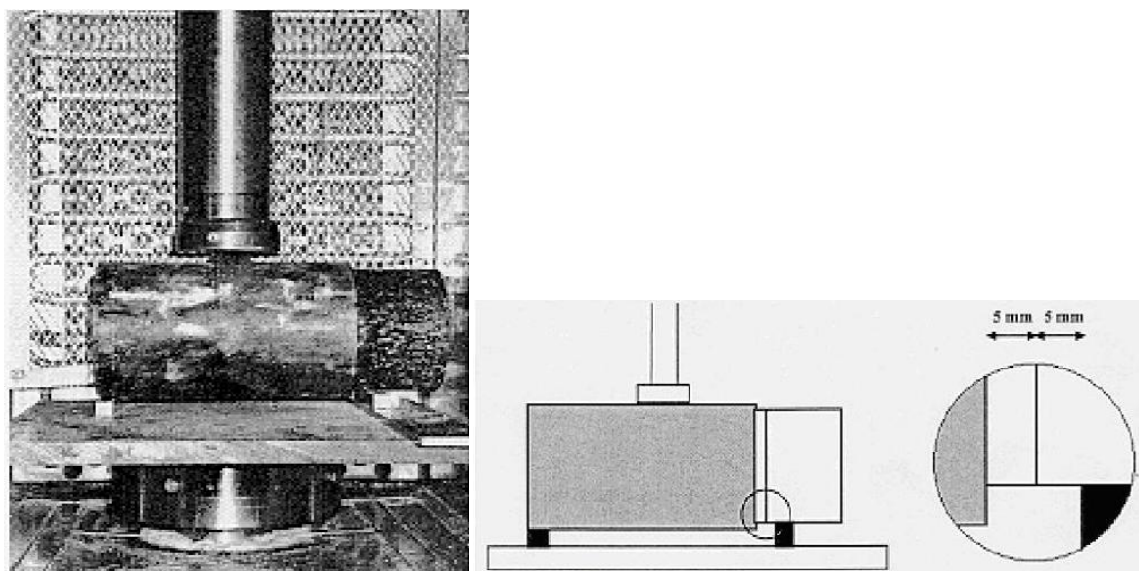
Jako aparat wyjściowy wybrano sprzęt służący do pomiaru wytrzymałości na ścinanie między cienką warstwą betonu wbudowaną na warstwie mieszanki mineralno asfaltowej „na gorąco”. Na jego podstawie stworzono aparat, który „bada” próbki drogowe o średnicy 150mm. Wszelkie założone parametry są nastawne, a aparat jest dostosowany do połączenia z typową maszyną obciążającą używaną w większości laboratoriów.

Od 2001 roku badania szczepności prowadzone są także na Politechnice Gdańskiej, gdzie stworzono aparat do ścinania (Rysunek 2.42) wzorem aparatu Leutnera i szwajcarskiego aparatu LPDS.



Rysunek 2.42 Aparat do badania Leutnera przygotowany na Politechnice Gdańskiej w 2001 roku (for. P. Jaskuła)

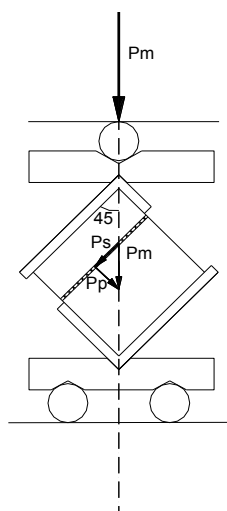
Bardzo prostą metodę oceny warstwy szepnej przy ścinaniu opracowano na Politechnice Katalońskiej w Hiszpanii (Hakim B. A., 2002). Wycięte próbki z nawierzchni o średnicy 100 mm montowane są w rurze stalowej o zbliżonej średnicy, tak by wystawała jedna warstwa poza koniec rury (Rysunek 2.43). Następnie w schemacie belki wolnopodpartej, jedną podpórę stanowi koniec rury, drugą stanowi wysunięta próbka (np. warstwa ścieralna) wykonuje się obciążenie rury w środku rozpiętości. Badanie wykonuje się w temperaturze 40°C. W tym przypadku występuje jednak w ścinanym przekroju dodatkowo moment zginający (Rysunek 2.43).



Rysunek 2.43 Badanie ścinania (Hakim B. A., 2002)

Na Politechnice Krakowskiej wdrożono metodę, opracowaną w latach 70-tych do badania szczepności międzywarstwowej. Urządzenie wykorzystano w badaniach (Zieliński, 2004) szczepności międzywarstwowej pakietu warstw asfaltowych z warstwą

pośrednią – z geosyntetykiem. Urządzenie do badań ścinania przedstawiono na Rysunku 2.44.



Rysunek 2.44 Ścinanie próbki z mieszanki mineralno-bitumicznej z geosyntetyczną warstwą pośrednią

Wytrzymałość na ścinanie obliczana jest jako składowa wzdłuż powierzchni kontaktu warstw wg następujących wzorów:

$$\sigma_{\tau} = \frac{P_{\tau}}{F_{\tau}} \quad (2.36)$$

gdzie:

$$P_{\tau} = \frac{P_m}{\sqrt{2}}, \quad F_{\tau} = d \cdot s$$

P_m – maksymalna siła działająca na próbkę [N],

P_{τ} – maksymalna siła ścinająca [N], σ_{τ} – naprężenie ścinające [MPa],

F_{τ} – powierzchnia ścinania [mm²],

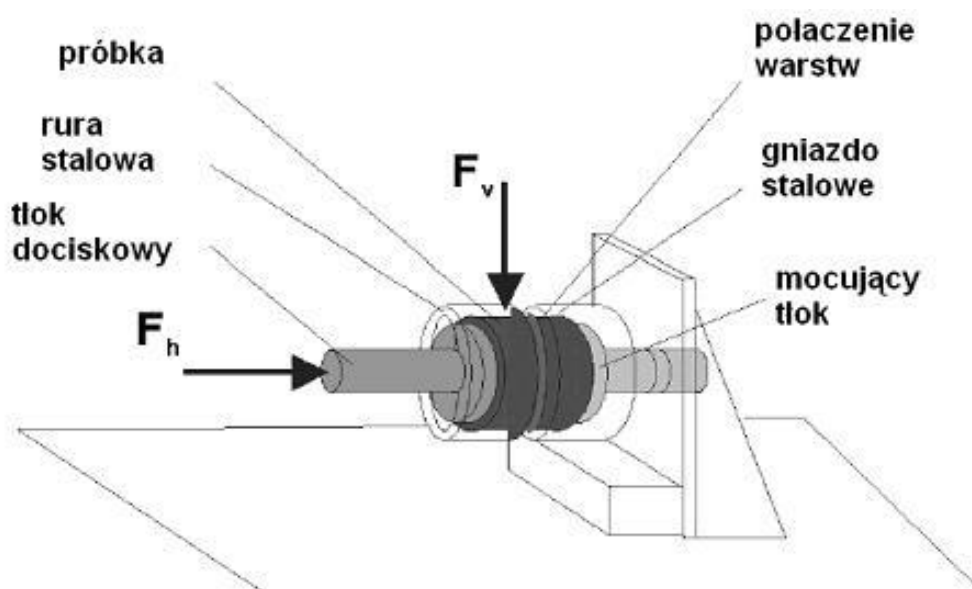
s – szerokość próbki = 75 mm, d – długość próbki = 75mm

Drugi z parametrów szepności tj. sztywność ścinania jest wyrażona jako stosunek modułu stycznego M przyrostu siły do odkształcenia przez powierzchnię ścinania F_{τ}

$$S_{\tau} = \frac{M}{F_{\tau}}, \quad [\text{N/mm/mm}^2]. \quad (2.37)$$

2.3.3.4 Ścinanie przy poziomym ściskaniu

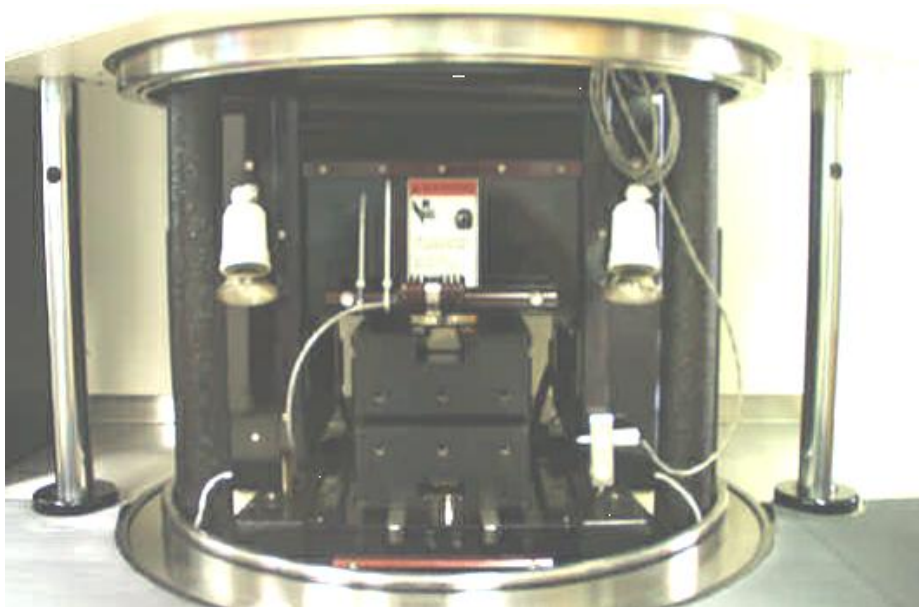
Inną metodę, opartą na ścinaniu, omówiono w artykule (Romanoschi & Metcalf, 2002). Próbki wycięte z nawierzchni o średnicy 95 mm poddaje się badaniu w teście ścinania, lecz jednocześnie z siłą ścinającą próbka jest obciążana poziomo działającą siłą, prostopadłą do płaszczyzny ścinania. Schemat badania (Rysunek 2.45) przybliża rzeczywisty stan naprężeń w pracy nawierzchni.



Rysunek 2.45 Schemat badania ścinania przy poziomym ściskaniu (Romanoschi & Metcalf, 2002)

2.3.3.5 Ścinanie przy użyciu aparatu Superpave Shear Tester (SST)

Mohamed i inni (West, Zhang, & Moore, 2005) podczas badania ścinania międzywarstwowego dla dokładniejszej symulacji obciążenia od poruszającego się pojazdu zasymulowali pulsacyjne obciążenie zamiast statycznego. Zastosowali do tego celu aparat Superpave Shear Tester (SST) (Rysunek 2.46) opracowany podczas programu SHRP, który jednocześnie wywołuje w dwóch płaszczyznach: dynamiczne ścinanie (0,1 MPa) i ściskanie (0,13 MPa). Zwykle badanie trwa do 10000 cykli; obciążenie co 1 sekundę i czasie przyrostu 0,5 sekundy. Temperatura badania w przedziale od 25 do 55°C.

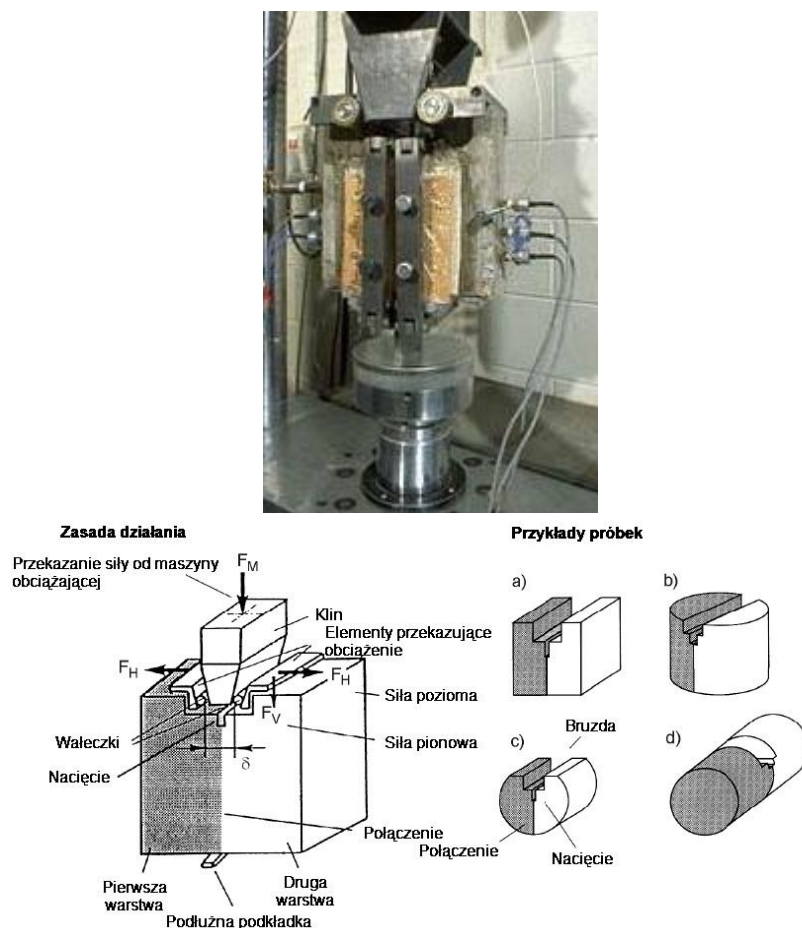


Rysunek 2.46 Widok badania ścinania w aparacie SST (Tashman, Nam, & Papagiannakis, 2006)

2.3.3.6 Rozszczepianie klinem

Pierwsze prace nad szczepnością międzywarstwową warstw asfaltowych nawierzchni przeprowadzał Krenkel w 1957 roku, który odporność na ścinanie ustalił za pomocą uderzenia klina (ang. Wedge Splitting Test) (Stockert, 2002). Spadający ciężar z określonej wysokości na uderzeniowy klin, który osadzony był w próbce asfaltowej wywoływał określone siły. Miarodajną siłą była ta, która powstawała przy określonej liczbie uderzeń (Rysunek 2.47).

Metodę klina rozwinął Tscheg w 1986 roku, który zoptymalizował obliczanie wyników za pomocą koła Mohr'a i uzależnił od wielkości próbki.



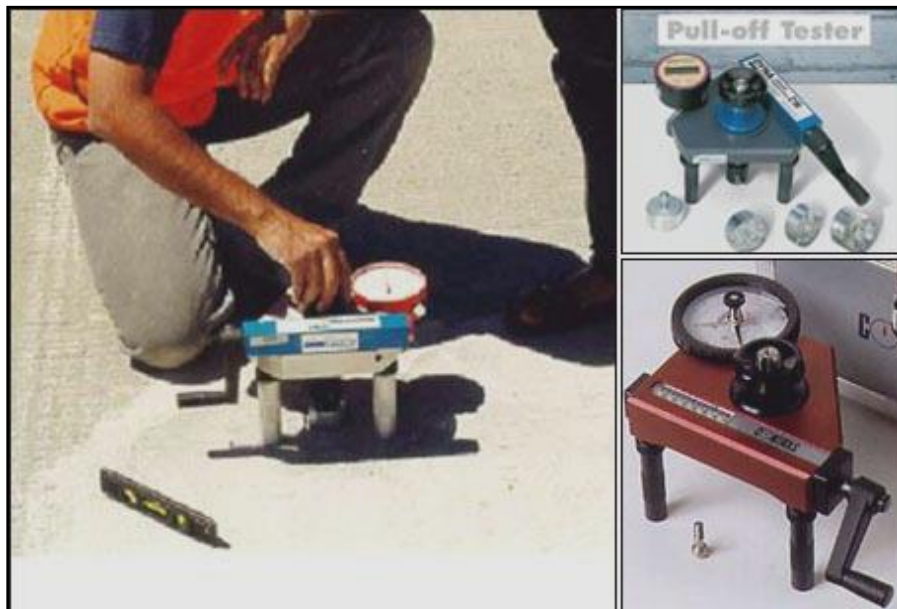
Rysunek 2.47 Metoda badania szczepności poprzez rozszczepianie klinem [21]

Zasada badania podana w (Tschegg, Kroyer, Dong-Ming, Stanzl, & Litzka, 1995) przedstawia się następująco: w próbce wycina się prostokątny rowek i nacina się warstwę szczepną na dnie rowka –miejsce, od którego postępuje pęknięcie wraz ze wzrostem obciążenia. Siła ściskająca od maszyny obciążającej przekazywana jest poprzez klin i specjalne płytki; dla zmniejszenia wpływu tarcia podłożone są też waleczki. Rozszczepienie powodowane jest przez powstającą siłę poziomą, której wartość jest prosta do wyznaczenia i zależy od smukłości użytego klina. Przy pomocy dwóch czujników (umieszczonych na linii działania siły poziomej) mierzone jest przemieszczenie „na boki” rozszczepianych warstw. W sposób ciągły rejestrowane są trzy wartości w trakcie testu: wartość obciążenia i przemieszczenie boczne warstw; tworzony jest wykres obciążenie–przemieszczenie, energię potrzebną do rozszczepienia warstwy wyprowadza się na podstawie wielkości obszaru pod wykresem. W badaniu stosuje się próbki cylindryczne, jak i prostokątne, z różnym położeniem warstwy szczepnej.

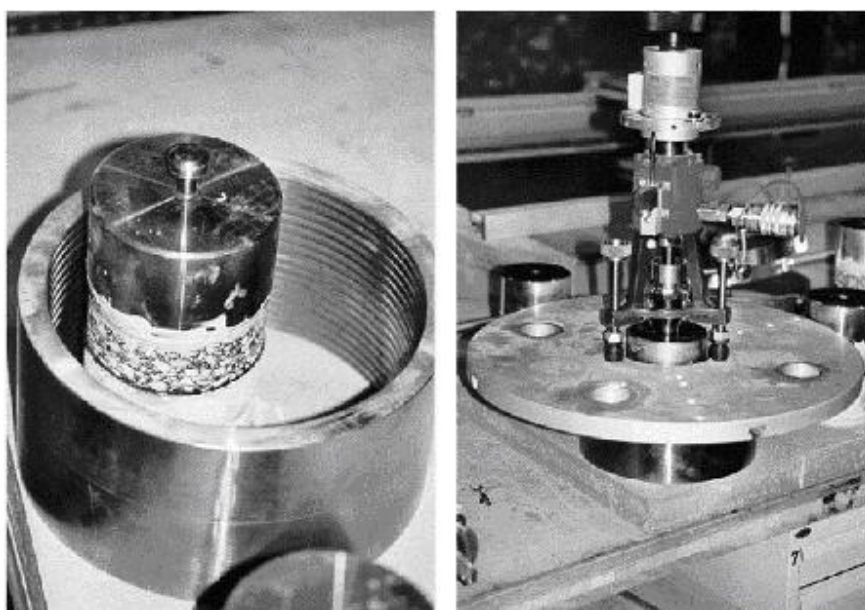
2.3.3.7 Metoda Pull-off

Metoda Pull-off jest stosowana w Niemczech do sprawdzania napraw elementów betonowych. Ströckert (Stockert, 2002) wskazuje, że metoda nadaje się sprawdzania połączeń cienkich warstw ściernalnych z mieszanek mineralno-asfaltowych. W nawierzchni wierci się rdzeń na głębokość poniżej badanej warstwy szczepnej. Następnie na wierzch wywierconego rdzenia nakleja się metalową płytkę, a do niej mocuje się

urządzenie dynamometryczne, którym wykonuje się test odrywania, ze stałą siłą (Rysunek 2.48). Badanie przeprowadza się w temperaturze $+10^{\circ}\text{C}$. Jeżeli rdzenie badane są w laboratorium to należy je przykleić do płyty betonowej, będącej podstawą stanowiska badawczego (Rysunek 2.49). W Niemczech badanie jest wymagane dla cienkich warstw ściernych na zimno.



Rysunek 2.48 Widok urządzenia do badania pull-off



Rysunek 2.49 Widok próbki podczas badania odrywania – pull-off (Raab C & Partl M.N., 2004)

2.3.3.8 Metoda skręcania (ang. Torque Bond Test)

Jako pierwszy metodę skręcania opublikował Velske w 1982 roku (Stockert, 2002). Próbkę Marshalla obciążone symetrycznie stałym ciężarem (siłą), poddawane są skręcaniu. Najślabszy przekrój określa wynik badania w temperaturze 40°C .



Rysunek 2.50 Badanie skręcania

W Wielkiej Brytanii badanie skręcania (*ang. Torque Bond Test*) polega na zasadzie działania klucza dynamometrycznego (Pos, Kruntcheva, Collop, & Thom, 2003). Badanie jest przydatne także w warunkach terenowych. Wykonuje się wiercenie o średnicy 100 mm lub 150 mm w warstwie mieszanki aż na głębokość poniżej 20 mm badanej warstwy szepnej. Następnie na wierzch nakleja się metalową płytkę, a do niej mocuje się urządzenie dynamometryczne, którym wykonujemy test ścięcia (Rysunek 2.50). Podczas badania należy przykładać z możliwie stałą prędkością obrotową moment. Próba skręcania musi się zakończyć w ciągu 30-90 sekund. Po zerwaniu zapisuje się: czas do ścięcia, maksymalny moment obrotowy, temperatura na granicy warstw, opis granicy warstw.

Jako wynik próby skręcania podaje się wytrzymałość na ścinanie na granicy warstw:

$$\tau = \frac{12 * M * 10^6}{\pi * D^3} \quad (2.38)$$

gdzie:

τ - wytrzymałość na ścinanie [kPa],

M – maksymalny moment obrotowy [Nm],

D – średnica rdzenia [mm].

2.3.3.9 Badanie w urządzeniu ATTACKER

Badanie szczepności międzywarstwowej można wykonać przy użyciu jest urządzenia ATTACKER (Rysunek 2.51) firmy Instron, Inc (West, Zhang, & Moore, 2005). Warstwa szczepna, skropienie jest aplikowane na metalową płytkę, próbkę z mieszanki mineralno-asfaltowej lub nawierzchnię a metalowy krążek jest upuszczany na powierzchnię z aplikowanym skropieniem. Siła szczepienia pomiędzy płaszczyznami może być mierzona poprzez rozciąganie lub skręcanie.



Rysunek 2.51 Aparat ATTACKER do badania szczepności międzywarstwowej (West, Zhang, & Moore, 2005)

2.3.4 Zestawienie wymagań dotyczących szczepności międzywarstwowej

Brak jest oficjalnych kryteriów, wymagań szczepności międzywarstwowej na świecie. Jedynie dwa kraje Szwajcaria i Austria znormalizowały metody badawcze i podały wymagania szczepności międzywarstwowej dla nowo oddanych nawierzchni. Inne kraje publikują propozycje wymagań na podstawie realizowanych prac badawczych. W Tabeli 2.3 zestawiono wymagania i propozycje wymagań szczepności międzywarstwowej stosowane na świecie.

Tabela 2.3 Zestawienie wymagań szepności międzywarstwowej (w porządku chronologicznym). Wymaganie siły ścinającej podawane dla próbki o średnicy $\phi 150$

Lp.	Miejsce stosowania	Kryterium			Metoda	Autor, Rok
		Siła ścinająca	Droga ścicia	Naprężenie		
1.	Austria	-		Ś-W 3,0 MPa W-P 2,0 MPa W-P 0,8 MPa	Leutner Leutner Pull-off	Fenz, 1987
2.	Niemcy	Ś-W 14 kN W-P 10 kN P-P 13 kN		Ś-W 0,8 MPa W-P 0,6 MPa P-P 0,7 MPa	Leutner	Codja, 1994
3.	Austria	-	nie dotyczy	e.zw. 1,0 MPa e.m. 1,5 MPa	Pull-off	Krzemien&Tschengg 1995
4.	Szwajcaria	Ś-W 23 kN	brak	1,3 MPa	Leutner	Raab&Partl 1999
5.	Niemcy	Ś-W 25 kN W-P 20 kN P-P 16 kN	Ś-W 2,0-4 mm W-P 1,5-3 mm P-P 1,0-3 mm	Ś-W 1,4 MPa W-P 1,1 MPa P-P 0,9 MPa	Leutner	Stockert, 2002
6.	Polska	23 kN	brak	1,3 MPa	Leutner	Zawadzki, 2002
7.	USA	-	brak	0,7 MPa	Leutner	West, 2005
8.	Niemcy	Ś-W 16 kN W-P 13 kN	brak	Ś-W 0,9 MPa W-P 0,7 MPa	Leutner	Bald, 2006

Oznaczenia w tabeli:

pole zaciemnione oznacza właściwość oryginalnie podaną przez autora kryterium

Ś-W – pomiędzy warstwami ścieralną i wiążącą, W-P – pomiędzy warstwami wiążącą i podbudową

P-P – pomiędzy warstwami podbudową i podbudową, e.zw. – emulsja zwykła, e.m. – emulsja modyfikowana

2.3.5 Podsumowanie

Jak widać zagadnienie kontroli szepności międzywarstwowej w laboratorium nie jest do końca rozwiązane. Powstało wiele metod, co jednocześnie umożliwia wybór, dopasowanie metody badawczej do cechy, którą chcemy badać. Ale wydaje się, iż najwierniej oddającymi prace nawierzchni są metody opierające się na zasadzie bezpośredniego ścinania z symulacją siły normalnej. Jednak z zaprezentowanych powyżej metod tego typu najbardziej popularna jest metoda Leutnera (szczególnie, gdy weźmiemy pod uwagę aparaty powielające jej sposób działania). Metoda Leutnera stosowana jest również w warunkach polskich. W Tabeli 2.4 przedstawiono wady i zalety metody Leutnera.

Tabela 2.4 Wady i zalety metody Leutnera

Ścinanie proste wg. Leutner'a	
Wady	Zalety
brak obciążenia normalnego, przez co nie odwzorowuje w pełni warunków rzeczywistych	prostota testu prostota wykonania próbek szybkość wykonania testu możliwość połączenia z powszechną prasą Marshalla z racji czasu powstania metoda najszerzej opisana i poparta wiarygodnymi wynikami unormowana w materiałach niemieckojęzycznych (Szwajcaria)

Metoda Leutnera jest jedną z pierwszych, jaką opracowano w celu badania szczepności międzywarstwowej, jest ona najszerszej opisana w dostępnej literaturze. Popularność metody wynika z jej prostoty i skuteczności. Może być stosowana w każdym z laboratoriów dzięki możliwości obciążania przy pomocy powszechnej prasy Marshalla.

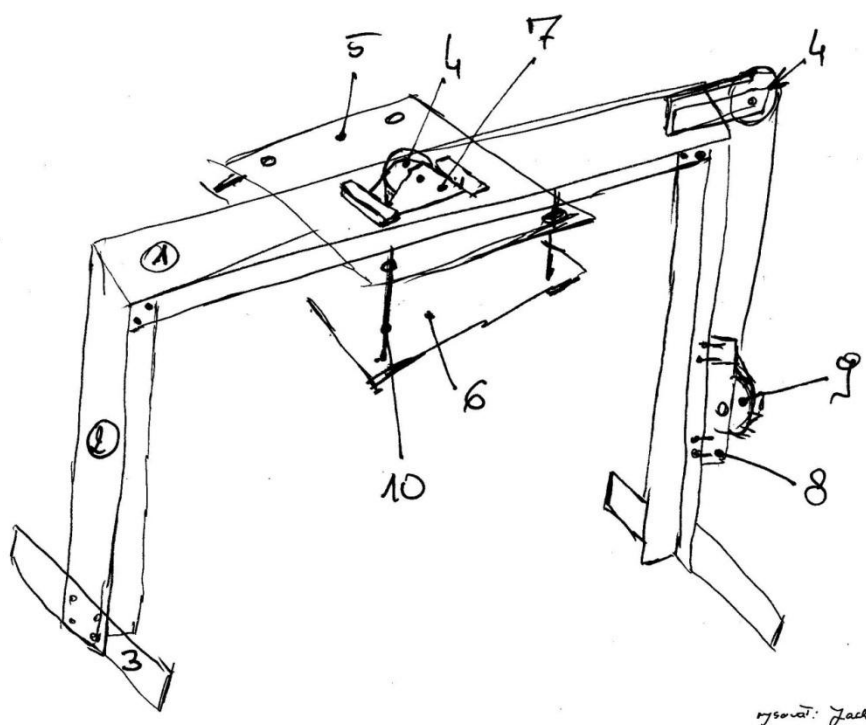
Cześć pozostałych metod znajduje się jeszcze w fazie testów (np. aparat ASTRA) i stanowią autorskie pomysły badaczy z poszczególnych krajów, które nie poddane zostały pełnej weryfikacji i unormowaniu. Aparat Leutnera, a w szczególności aparat LPDS są częścią norm krajów, z których pochodzą, gdzie określono konkretne wymagania wytrzymałości na ścinanie czy siły ścinającej.

Przy doborze sposobu wykonania próbek do badania Leutnera sugeruje się korzystanie z próbek pobieranych z nawierzchni jeżeli tylko jest to możliwe. W przypadku wykonywania próbek w laboratorium zaleca się jak najwierniejsze odwzorowanie warunków panujących na budowie. Badania laboratoryjne prowadzone na Politechnice Gdańskiej (Judyski & Jaskuła, 2005/2006) potwierdzają nieskuteczność zagęszczania walcem ręcznym statycznym - nie zachodzi wtedy zjawisko klinowania się ziaren łączonych warstw.

3 Laboratoryjna ocena możliwości pomiarowych techniki radarowej

3.1 Opis stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze zostało wykonane zgodnie z projektem autorów niniejszego opracowania (Rysunek 3.1). Szczegółowe rysunki techniczne zamieszczono w Załączniku.



Rysunek 3.1 Schemat stanowiska badawczego

Stanowisko zostało zaprojektowane i wykonane tak, aby możliwe było badanie różnych materiałów o zmiennych gabarytach. Stelaż stanowiska wykonano w całości z materiałów słabo odbijających fale elektromagnetyczne (winidur), bez użycia jakichkolwiek łączników metalowych. Wprowadzono również możliwość płynnego opuszczania i podnoszenia anteny co pozwala na prowadzenie tzw. pomiarów zbliżeniowych. Gotowe stanowisko przedstawiono na Rysunku 3.2.



Rysunek 3.2 Ustawianie stanowiska badawczego

3.2 Badania laboratoryjne jakości rejestrowanych sygnałów odbitych

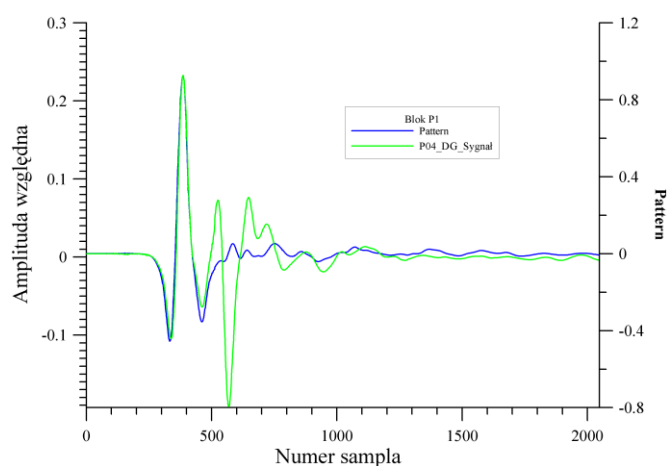
Przeprowadzone sesje pomiarowe dotyczyły wstępnej oceny procesu rejestracji i przetwarzania danych przez urządzenie pomiarowe. Badania polegały między innymi na ocenie strukturalnej sygnałów odbitych, rozpoznaniu własności procesu samplowania sygnału oraz badaniu własności sygnałów refleksyjnych w pomiarach różnych materiałów.

3.2.1 Prześwietlanie płyty parafinowej

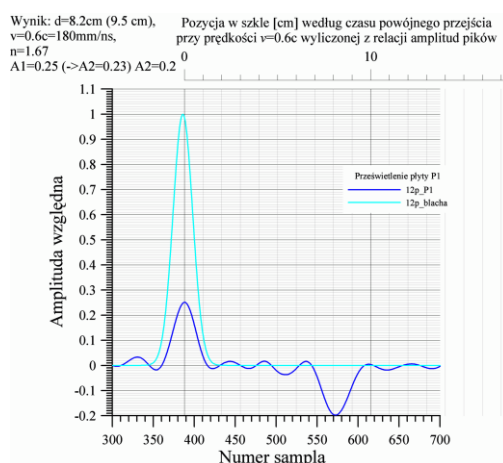
Próba wykonana w celu wstępnego oznaczenia współczynnika załamania parafiny (przy częstotliwości 2 GHz), prędkości falowej i grubości płyty).

Pomierzono sygnał refleksyjny oraz wzorzec sygnału emitowanego (Rysunek 3.3) w potrzebnego do dokonania dekonwolucji. Na Rysunku 3.4 przedstawiono wynik dekonwolucji sygnału wzorcowego i sygnału refleksyjnego prześwietlania płyty

parafinowej pozwalający na wstępne oznaczenie współczynnika załamania parafiny (przy częstotliwości 2 GHz), prędkości falowej i grubości płyty.



Rysunek 3.3 Sygnał refleksyjny uzyskany przy prześwietlaniu płyty parafinowej i wzorzec sygnału emitowanego



Rysunek 3.4 Dekonwolucja sygnału wzorcowego i sygnału refleksyjnego prześwietlania płyty parafinowej

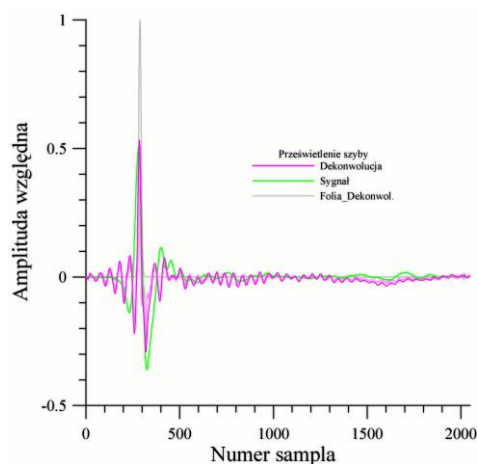
3.2.2 Prześwietlania cienkiej szyby

Próba interpretacji strukturalnej sygnału refleksyjnego od cienkiej szyby (około 6 mm grubości).

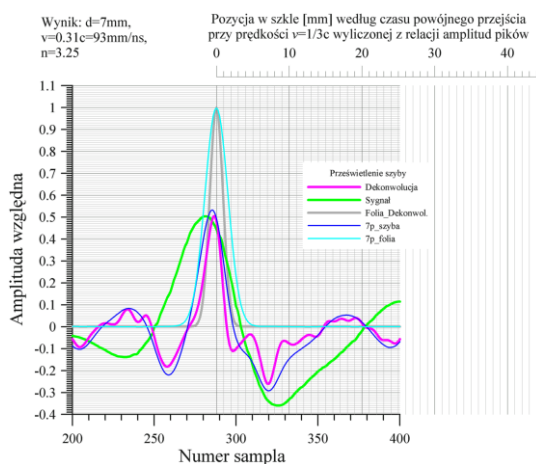
Pomierzono sygnał uzyskany w wyniku pierwszej próby refleksyjnego prześwietlania szyby, który następnie poddano dekonwolucji za pomocą sygnału wzorcowego odbitego od blachy (Rysunek 3.5).

Rysunek 3.6 przedstawia wykres sygnału dekonwolucyjnego, gdzie widoczny jest główny refleks od przedniej powierzchni szyby i nieco późniejszy refleks o przeciwnym

znaku od tylnej powierzchni. Są tutaj także przedstawione wyniki wstępnego oszacowania stałej dielektrycznej szkła i odpowiadającej jej prędkości fali z amplitudy refleksu głównego oraz wynik oszacowania grubości szyby. Skala głębokości w szkło (u góry) została dowiązana do tych wyników



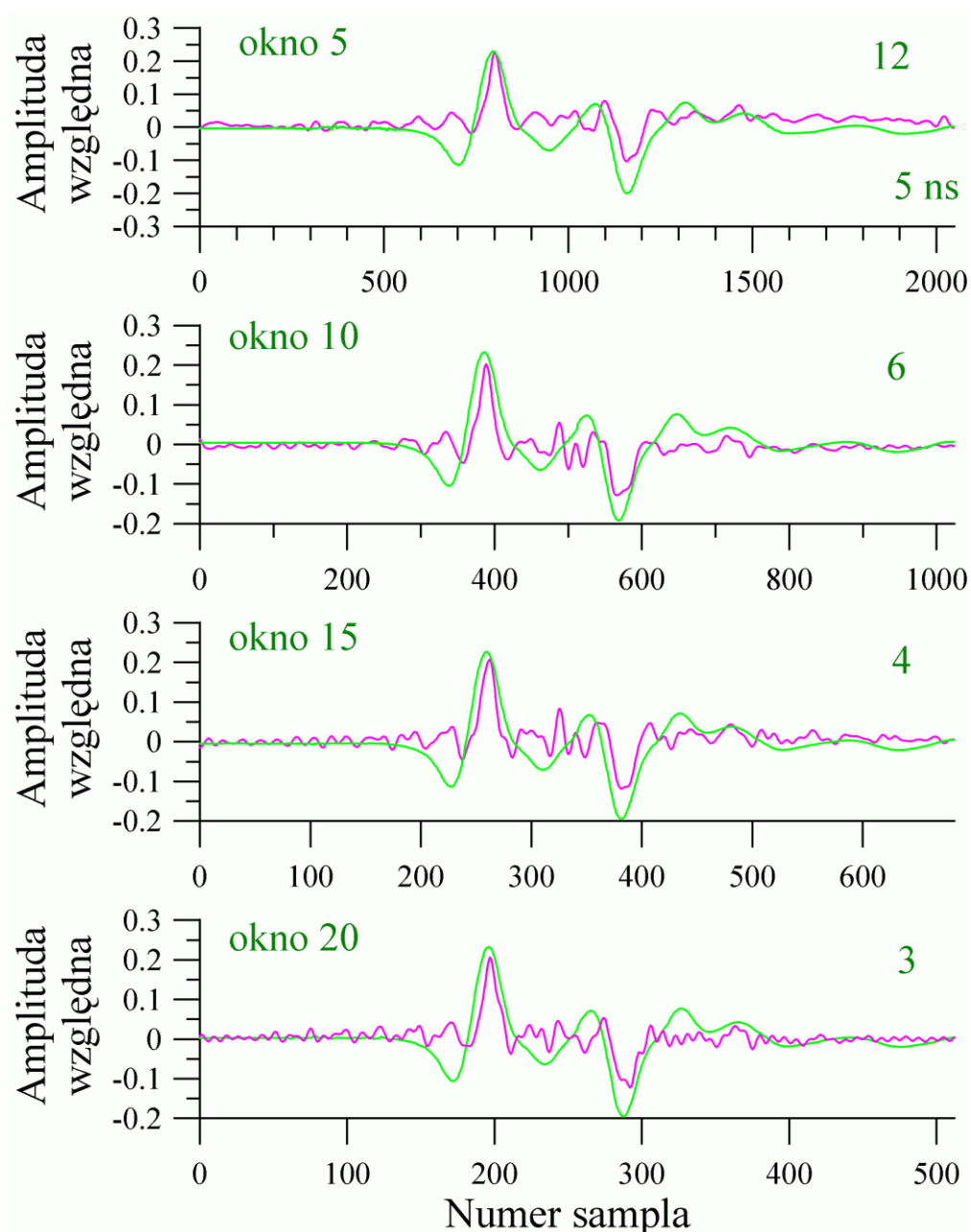
Rysunek 3.5 Sygnał uzyskany w wyniku pierwszej próby refleksyjnego prześwietlenia cienkiej szyby i wynik dekonwolucji tego sygnału



Rysunek 3.6 Próba interpretacji strukturalnej sygnału refleksyjnego od cienkiej szyby

3.2.3 Wstępne rozpoznanie własności procesu samlowania sygnału

Próba wykonano w celu wstępnego rozpoznania własności procesu samlowania sygnału (przez antenę odbiorczą) poprzez zmianę szerokości czasowej okna skanu. W tym celu dokonano porównania sygnałów refleksyjnego prześwietlenia płyty parafinowej o grubości 9.5 cm (linie zielone) ich dekonwolucji (linie liliowe). Powyższe wykonano przy użyciu okien skanowania o różnych długościach (5, 10, 15, 20 ns), z których wybrano ten sam odcinek czasowy o długości 5 ns

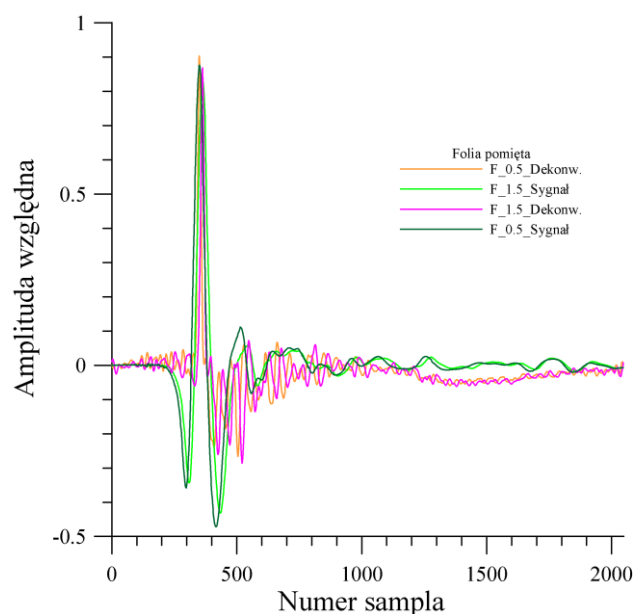


Rysunek 3.7 Porównanie sygnałów (opis w tekście)

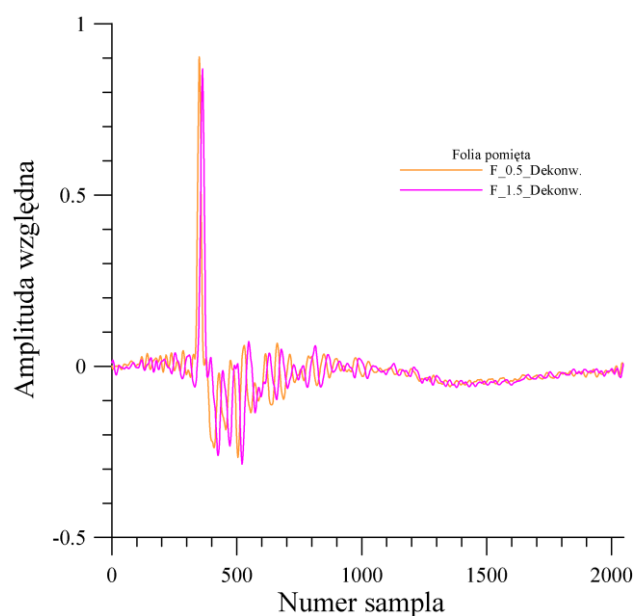
3.2.4 Wstępne rozpoznanie własności sygnału refleksyjnego

Próbkę wykonano w celu wstępnego rozpoznania własności sygnału refleksyjnego od powierzchni stochastycznie zdeformowanej, co zasymulowano przy pomocy folii aluminiowej.

Na Rysunku 3.8 przedstawiono porównanie sygnałów odbitych od folii aluminiowej pomiętej w różnym stopniu, zestawione z ich dekonwolucjami za pomocą sygnału odbitego od płaskiej blachy. Rysunek 3.9 przedstawia wynik dekonwolucji sygnałów odbitych od nieregularnie pomiętej folii aluminiowej.



Rysunek 3.8 Porównanie sygnałów odbitych folii aluminiowej



Rysunek 3.9 Zestawienie dekonwolucji sygnałów odbitych od pomiętej folii aluminiowej.

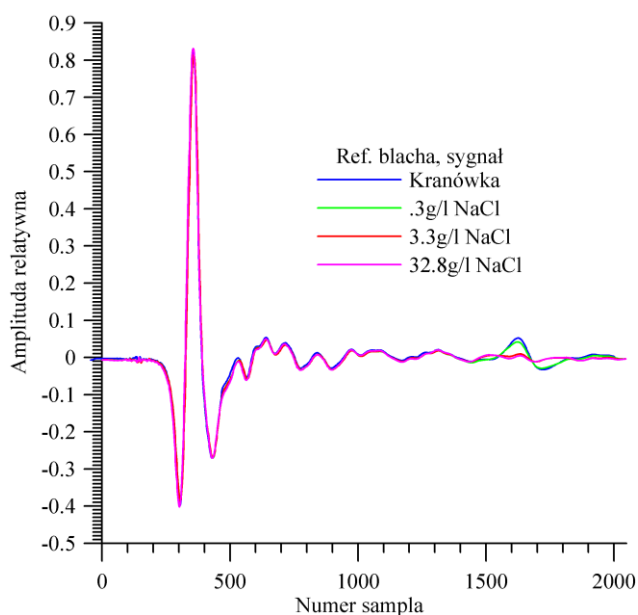
3.2.5 Badanie własności refleksyjnych warstwy wody

Próbie przeprowadzono w celu

- zbadania wpływu zawartości soli na własności refleksyjne i transmisyjne warstwy wody (10.5 cm grubości)
- oszacowania prędkości falowej w wodzie przy użyciu czasu powrotu głównego refleksu dennego przy znanej końcowej głębokości wypełnienia basenu wodą

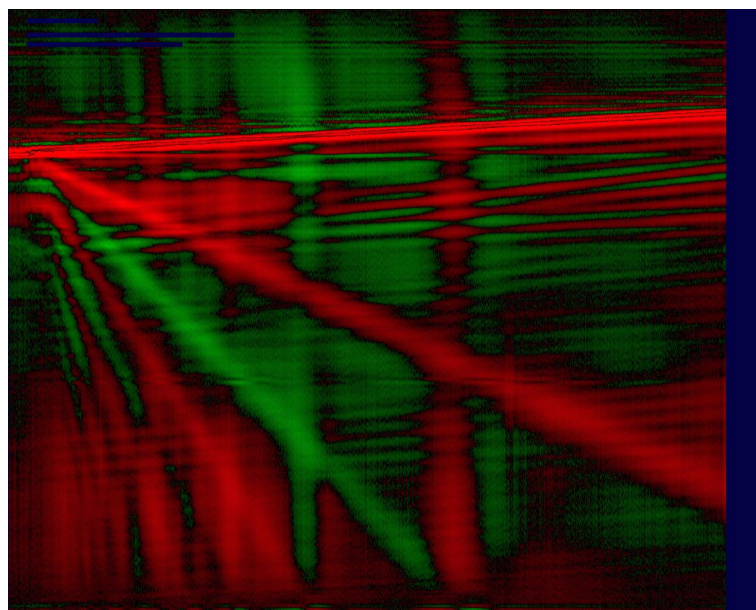
- interpretacji kształtu sygnału refleksyjnego odbitego od powierzchni wody,
- analizy zmian amplitudy głównego refleksu powierzchniowego.

Badanie wpływu zawartości soli na własności refleksyjne i transmisyjne warstwy wody (10.5 cm grubości) (Rysunek 3.10) uwidaczniało brak wpływu zawartości soli na stałą dielektryczną (brak zmiany amplitudy pików głównego) oraz wyraźny wzrost pochłaniania przy dużych zawartościach soli, który doprowadza do zaniku sygnału odbitego od metalowego dna basenu (w okolicy 1600-go sampla).

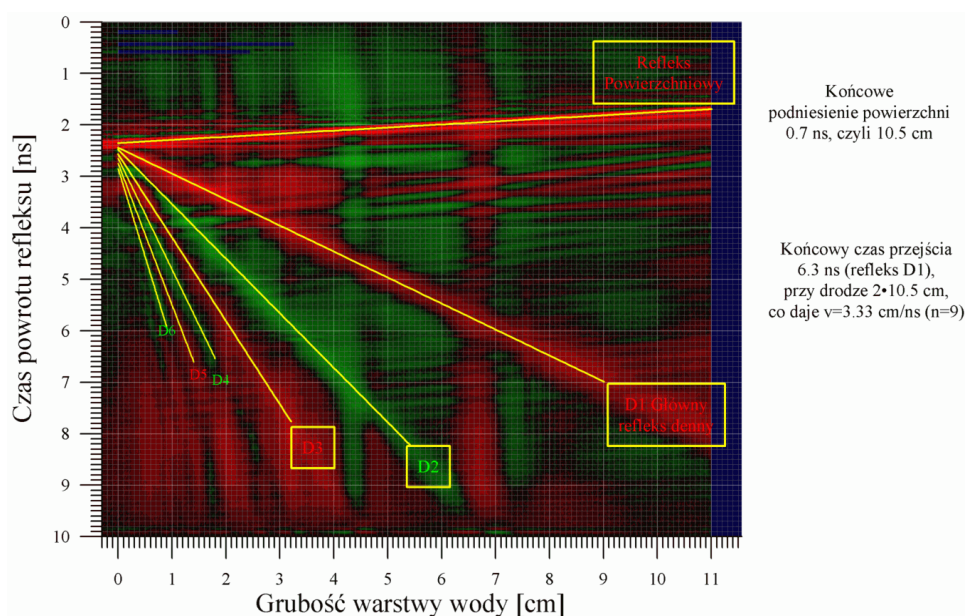


Rysunek 3.10 Badanie wpływu zawartości soli na własności refleksyjne i transmisyjne warstwy wody

Rysunek 3.12 przedstawia próbę interpretacji obrazu dekonwolucyjnego (Rysunek 3.11) podnoszącego się lustro wody w basenie prześwietlanym refleksyjnie od góry (D2, D3,... kolejne odbicia wielokrotne od dna basenu). Próba oszacowania prędkości falowej w wodzie przy użyciu czasu powrotu głównego refleksu dennego D1 przy znanej końcowej głębokości wypełnienia basenu wodą wykazała, że prędkość fali wynosi 3,33 cm/ns.

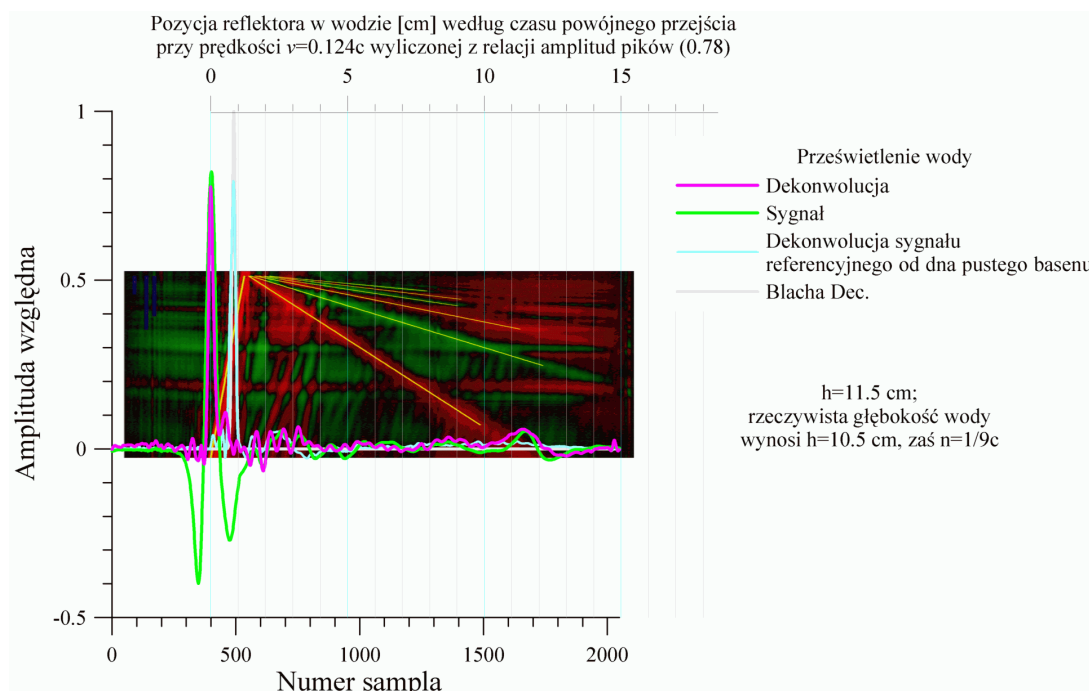


Rysunek 3.11 Dekonwolucyjny obraz podnoszącego się lustra wody



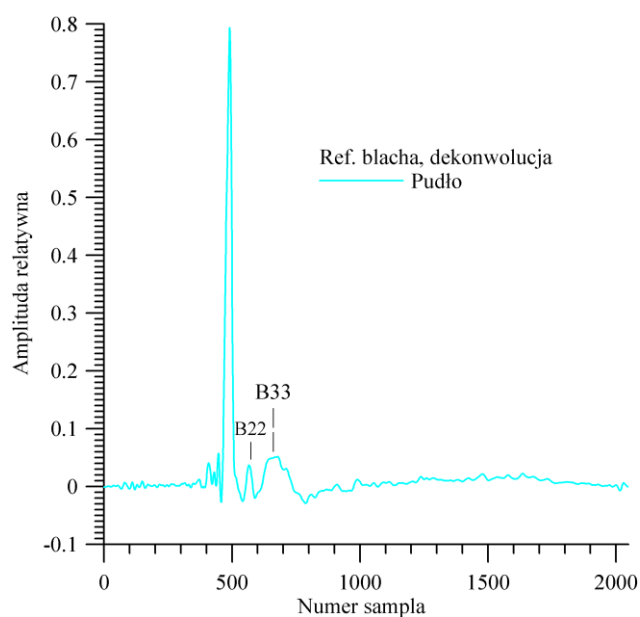
Rysunek 3.12 Interpretacja wyżej opisanego obrazu dekonwolucyjnego (D2, D3,... kolejne odbicia wielokrotne od dna basenu)

Interpretację kształtu sygnału refleksyjnego (w sytuacji końcowej) przy pomocy przekroju dekonwolucyjnego przedstawiono na Rysunku 3.13. Końcowy element rejestrowanego kształtu przynależy do głównego refleksu dennego. Aktywność pojawiająca się zaraz za sygnałem głównym może być skutkiem rozpraszania fali przez boczne ściany basenu.

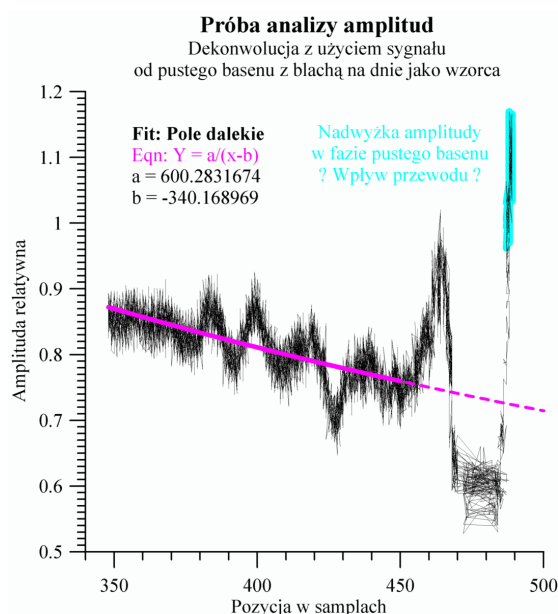


Rysunek 3.13 Interpretacja kształtu sygnału refleksyjnego (przy końcowym napełnieniu wodą)

Dodatkowo przeprowadzono próbę badania wpływu bocznych ścian basenu, za pomocą dekonwolucji sygnału odbitego od dna pustego basenu (Rysunek 3.14). Analizę przeprowadzono z użyciem sygnału refleksyjnego od rozległej blachy jako wzorca (B22, B33 pozycje sygnału rozproszonego odpowiadające odległości anteny od ścian basenu w odległości 22 i 33 cm). W ramach zadań dodatkowych przeprowadzono również analizę zmian amplitudy głównego refleksu powierzchniowego (Rysunek 3.15).



Rysunek 3.14 Próba badania wpływu bocznych ścian basenu



Rysunek 3.15 Analiza zmian amplitudy głównego refleksu powierzchniowego.

3.3 Analiza porównawcza uzyskiwanych wzorów fal elektromagnetycznych i ocena kontrastów międzywarstwowych

Wstępne sesje pomiarowe dotyczyły rozpoznania możliwości pomiarowych dostępnego sprzętu georadarowego (oszacowania możliwych do uzyskania rozdzielczości wgłębnych w pomiarach refleksyjnych, własności refleksyjnych typowych kontrastów materiałowych, możliwości zestawienia dwu-antenowych układów pomiarowych). Przy tych pomiarach wstępnych wysiłki skupiają się przede wszystkim na układach wyidealizowanych, czyli na ośrodkach jednorodnych, z płaskimi, rozległymi („prawie nieskończonymi”) powierzchniami rozdziału między nimi, co daje szansę poznawania regularności w propagacji i odbijaniu sygnałów oraz pozwala na oszacowanie maksymalnej możliwej do uzyskania rozdzielczości wybranych metod pomiarowych i interpretacyjnych. Elementarna stabilność obserwacji była możliwa do uzyskania dzięki skonstruowaniu stanowiska kalibracyjno-pomiarowego o właściwych, dużych rozmiarach, przy zastosowaniu materiałów słabo odbijających fale elektromagnetyczne.

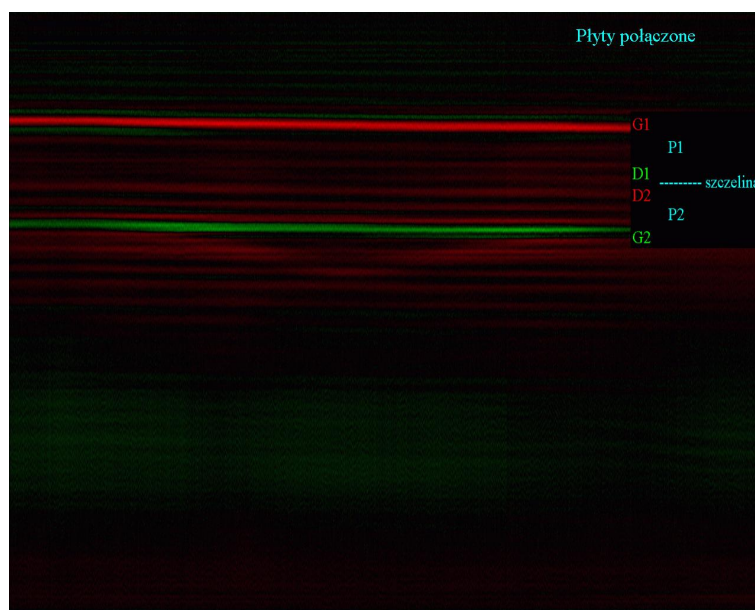
3.3.1 Pierwsze badania własności refleksyjnych szczelin („poziomych”)

Przeprowadzono badania refleksyjnego przekrój dekonwolucyjnego zarejestrowanego podczas pomiarów przez dwie przylegające powierzchniami płyty parafinowe (Rysunek 3.16). Szczelina pomiędzy płytami ma nieregularny kształt o zmiennej szerokości osiągającej miejscami wartość kilku milimetrów, a mimo to nie jest widoczna na przekroju.

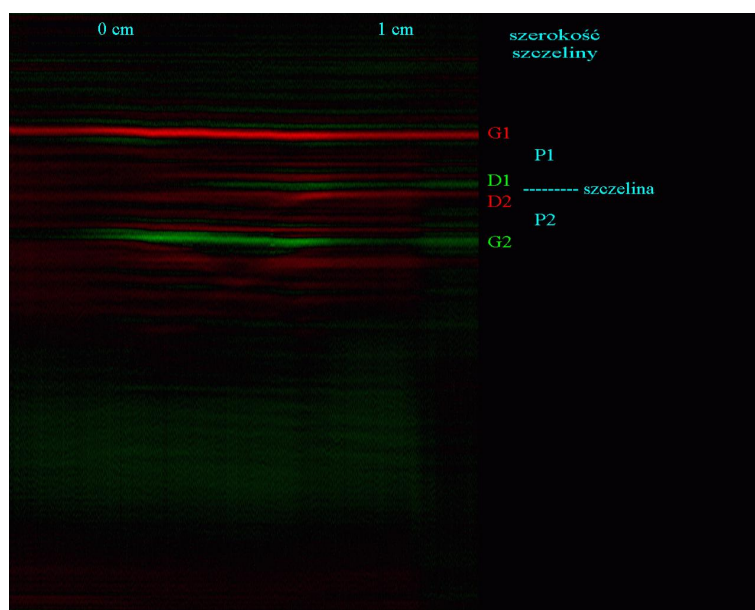
Na Rysunku 3.17 przedstawiono refleksyjny przekrój dekonwolucyjny przez dwie przylegające płyty parafinowe, pomiędzy którymi znajduje się rozszerzająca się (od 0 do

1 cm szerokości) szczelina. Szczelina pomiędzy płytami jest widoczna na przekroju, gdy osiąga szerokość około 0.5 cm, aczkolwiek pierwsze jej niepełne przejawy są identyfikowalne od szerokości pierwszych kilku milimetrów.

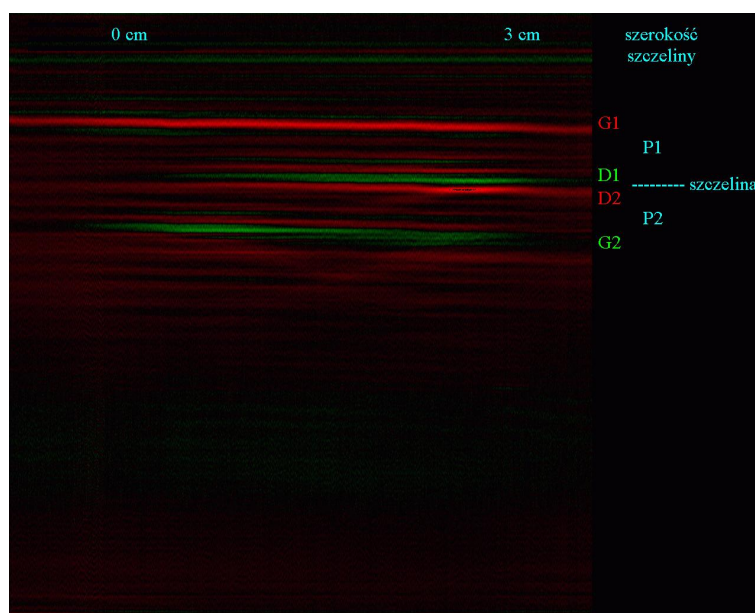
Przeanalizowano również refleksyjny przekrój dekonwolucyjny przez dwie przylegające płyty parafinowe, pomiędzy którymi znajduje się rozszerzająca się (od 0 do 3 cm szerokości) szczelina (Rysunek 3.18). Tak samo jak w poprzednim przypadku szczelina pomiędzy płytami jest widoczna na przekroju, gdy osiąga szerokość około 0.5 cm, z tym, że pierwsze przejawy są identyfikowalne od szerokości pierwszych kilku milimetrów.



Rysunek 3.16 Refleksyjny przekrój dekonwolucyjny przez dwie przylegające powierzchniami płyty parafinowe

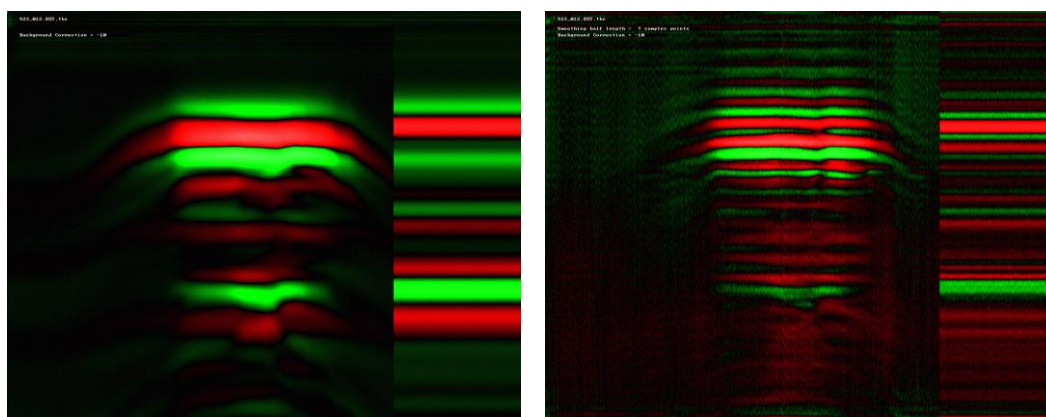


Rysunek 3.17 Refleksyjny przekrój dekonwolucyjny – szczelina między płytami rozszerzająca się od 0 do 1 cm szerokości

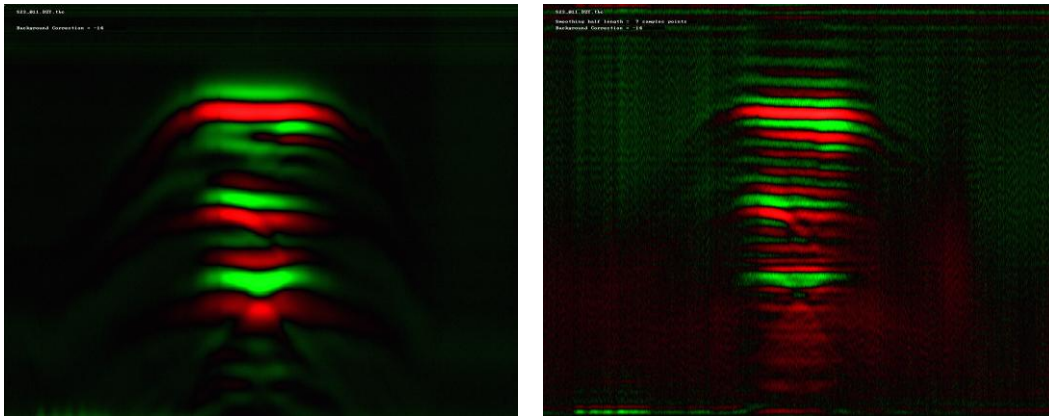


Rysunek 3.18 Refleksyjny przekrój dekonwolucyjny – szczelina między płytami rozszerzająca się od 0 do 3 cm szerokości

Dodatkowo przeprowadzono porównanie obrazów refleksyjnego prześwietlenia stosu płyt parafinowych (echogramy i obrazy dekonwolucyjne) (Rysunek 3.19 i 3.20). Na każdym z rysunków po lewej stronie znajduje się obraz stosu, w którym kilkumilimetrowa szczelina pomiędzy dwiema najwyższymi płytami jest zalana wodą, zaś po prawej jest obraz tego stosu ze szczelinami suchymi. Tak duża szczelina w obu wypadkach ma wyraźne odzwierciedlenia na przekrojach. Można też zauważyć, że obraz dekonwolucyjny pomimo obecnych trudności jest znaczącą pomocą w identyfikacji szczeliny.



Rysunek 3.19 Porównanie obrazów refleksyjnego prześwietlenia stosu płyt parafinowych (echogramy po lewej, obrazy dekonwolucyjne po prawej)

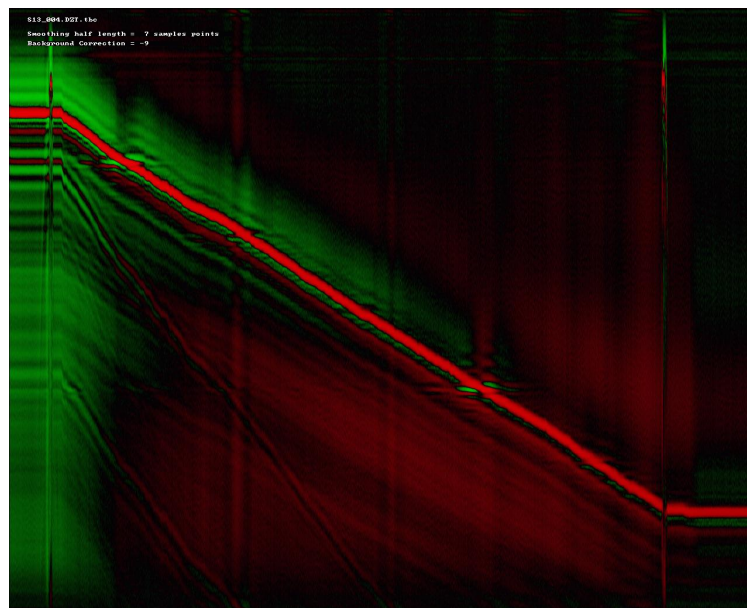


Rysunek 3.20 Skan poprzeczny stosu płyt parafinowych ze szczeliną suchą rozwierającą się do szerokości 1.2 cm (echogramy po lewej, obrazy dekonwolucyjne po prawej)

3.3.2 Badanie modelowego sygnału referencyjnego odbitego od blachy

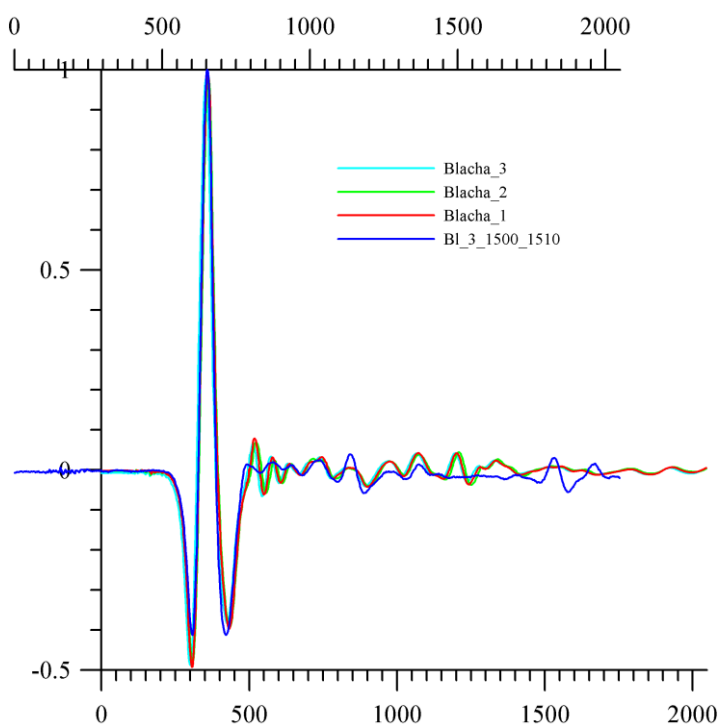
Próby wykonano w celu określenia referencyjnego sygnału odbitego od blachy. Próby wykonano w kilku wariantach min. przeprowadzono testy oddaleniowe. Wyniki przedstawiono na Rysunkach 3.21 – 3.24.

Na szczególną uwagę zasługują wyniki przedstawione na Rysunku 3.24, gdzie pokazano refleksyjny skan oddaleniowy blachy (z dowiązanymi skalami przestrzennymi). Uzyskany obraz wykazuje na obecność artefaktów w postaci poziomych linii. Na rysunku zaznaczone są hipotetyczne obiekty rozpraszające, które mogłyby być odpowiedzialne za obecność tych artefaktów. Dalsze testy nie potwierdzały tej interpretacji. Linie te są prawdopodobnie artefaktami procesu sampłowania sygnału przez antenę odbiorczą (tzw. „kiksami”), gdyż są przywiązane do skali czasowej okna skanu.

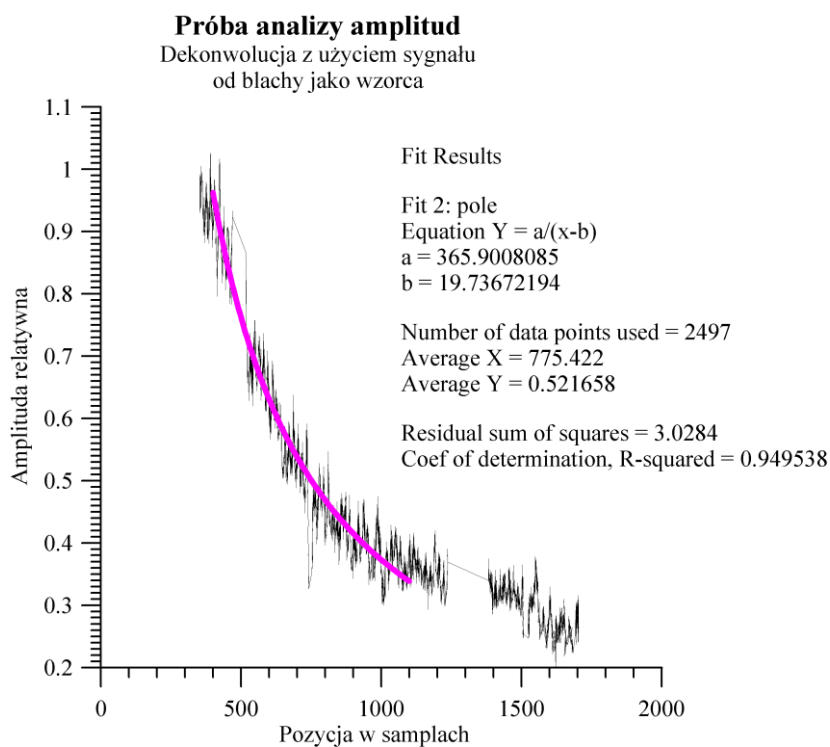


Rysunek 3.21 Przykład skanu oddaleniowego (dekonwolucja sygnału odbitego od blachy w różnych odległościach)

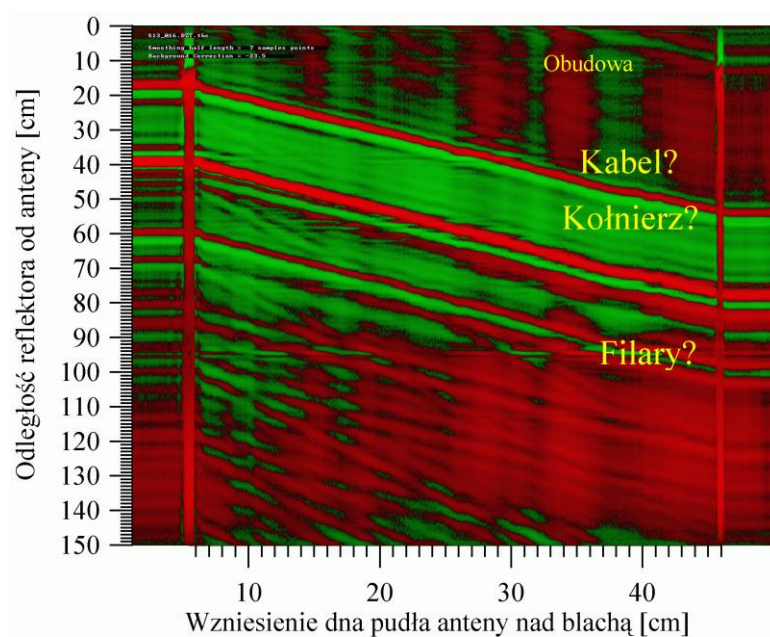
Poniżej przedstawiono porównanie wzajemnie sygnałów odbitych od kilku blach w tej samej odległości od anteny (1, 2, 3). Sygnał od blachy 3 ma nieco inny kształt ponieważ antena znajdowała się w nieco większej odległości.



Rysunek 3.22 Porównanie wzajemnie podobnych sygnałów odbitych od kilku blach



Rysunek 3.23 Próba analizy zależności amplitudy sygnału odbitego od blachy od odległości pomiędzy blachą, a anteną.

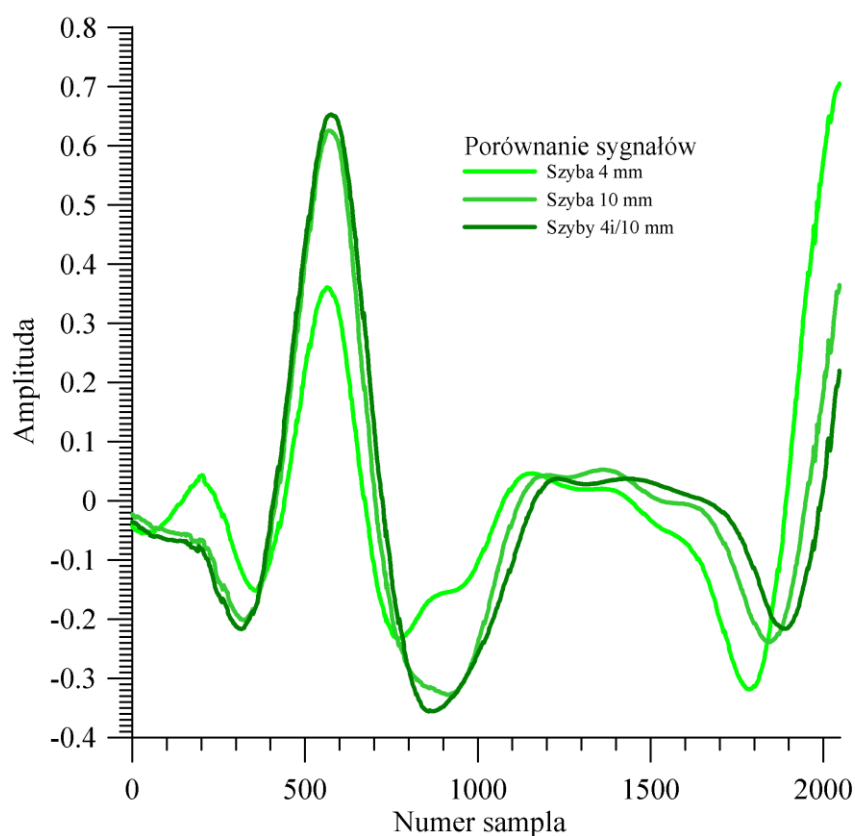


Rysunek 3.24 Refleksyjny skan oddaleniowy blachy z dowiązanymi skalami przestrzennymi

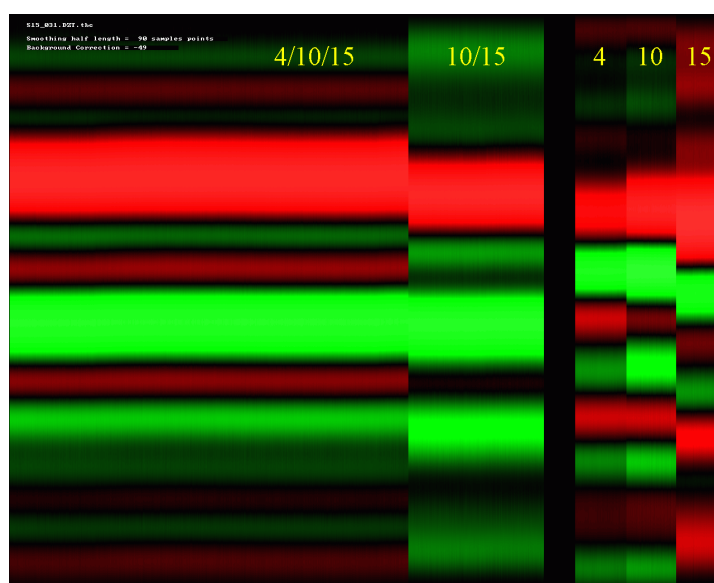
3.3.3 Prześwietlanie szyb i stosów szyb szklanych

Próby wykonane w celu oceny zdolności techniki radarowej do identyfikacji szczelin o małych rozmiarach. Na zamieszczonych poniżej rysunkach przedstawiono próby analizy sygnałów uzyskanych przy różnych układach.

Na Rysunku 3.25 przedstawiono porównanie sygnałów refleksyjnych od szyb o grubości 4 i 10 mm oraz obu tych szyb zetkniętych powierzchniami. Natomiast na Rysunku 2.26 przedstawiono wstępne porównanie przekrojów dekonwolucyjnych przez trzy szyby szklane 4, 10, 15 mm oraz przez stosy szyb 10/15 oraz 4/10/15 mm (numeracja szyb w stosie „od góry” tj. od strony anteny). Porównanie to wskazuje między innymi na trudność w identyfikacji powierzchni styku szyby 4 mm z innymi szybami.

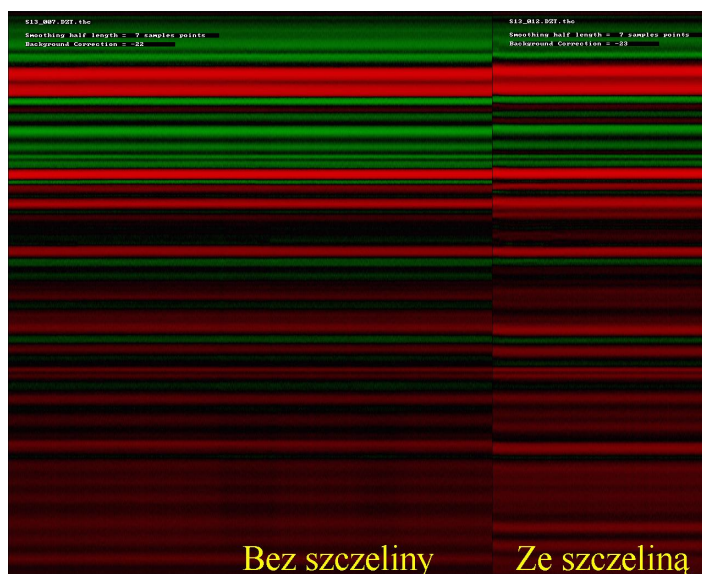


Rysunek 3.25 Porównanie sygnałów refleksyjnych od szyb o grubości 4 i 10 mm



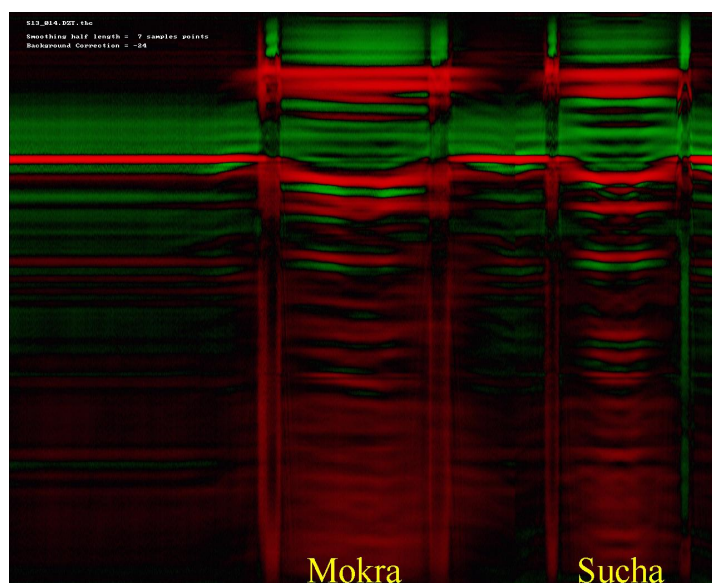
Rysunek 3.26 Wstępne porównanie przekrojów przez trzy szyby szklane 4, 10, 15 mm i przez stosy szyb 10/15 mm oraz 4/10/15 mm

W innym wariancie dokonano porównania przekrojów dekonwolucyjnych przez stos szyb 4/10/15 mm i stos 4/10/S/15 mm ze szczeliną S 1.3 mm pomiędzy dolnymi szybami (Rysunek 3.27). Szczelina jest praktycznie niewidoczna, a słabymi znamionami jej obecności są jedynie nieco wcześniejsze przyjścia refleksów od wyżej leżących horyzontów i małe, trudno interpretowalne zmiany amplitud w późniejszym sygnale.



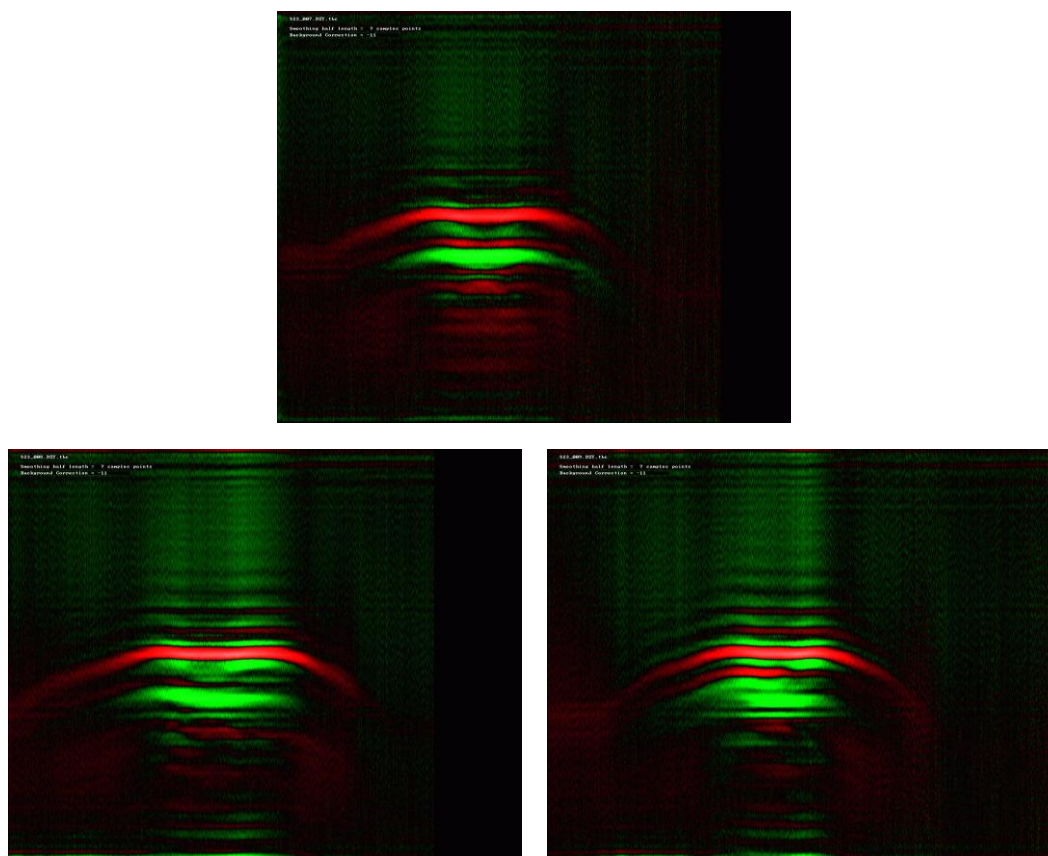
Rysunek 3.27 Porównanie przekrojów dekonwolucyjnych przez stos szyb 4/10/15 mm i stos 4/10/S/15 mm ze szczeliną S 1.3 mm pomiędzy dolnymi szybami

Kolejny wariant to porównanie przekrojów dekonwolucyjnych przez stos szyb 4/10/Sk/15 mm z rozszerzającą się (od 0 do 1.3 mm szerokości) szczeliną klinową Sk pomiędzy dolnymi szybami i przez ten sam stos ze szczeliną Sk zalaną wodą (Rysunek 3.28). Szczelina sucha jest praktycznie niewidoczna, podczas gdy szczelina mokra jest wyraźnie zauważalna już od szerokości 0.5 mm. Ważną właściwością wody decydującą o rozpoznawalności szczeliny jest jej mała prędkość falowa, powodująca duże opóźnienie refleksów od głębszych horyzontów (czerwony, przesuwający się w dół refleks). Dzięki temu opóźnieniu obecność szczeliny manifestuje się przy małych jej szerokościach, nim jeszcze refleks od dolnej powierzchni szczeliny stanie się zauważalny (zielony pas pojawiający się stopniowo pomiędzy czerwonymi).



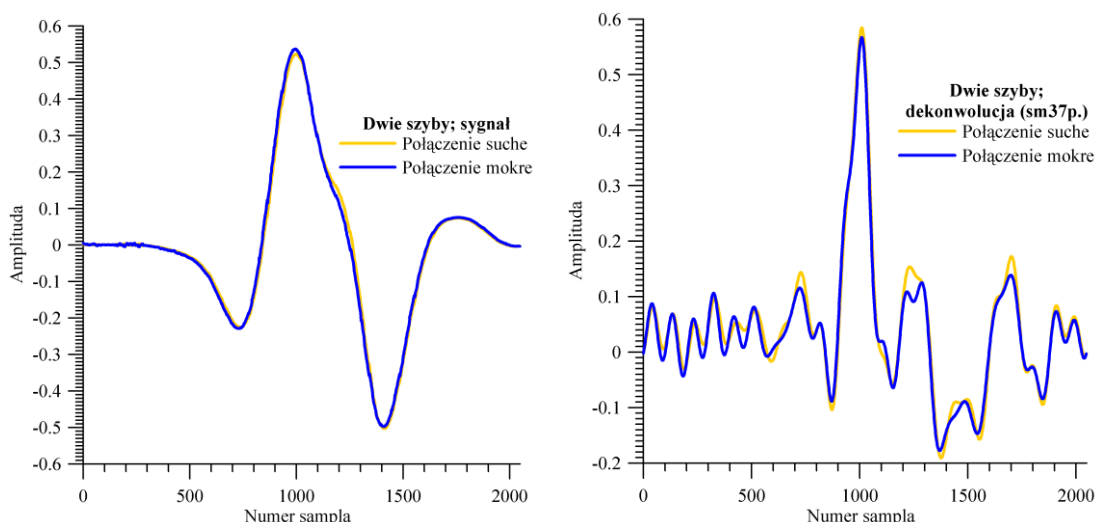
Rysunek 3.28 Porównanie przekrojów dekonwolucyjnych przez stos szyb 4/10/Sk/15 mm z rozszerzającą się od 0 do 1.3 mm szerokości szczeliną klinową Sk pomiędzy dolnymi szybami i przez ten sam stos ze szczeliną Sk zalaną wodą.

Dodatkowo wykonano skany poprzeczne (dekonwolucje) wzdłuż stosu szyb, pomiędzy którymi są dwie szczeliny: górna rozwierająca się do szerokości 1.45 mm i dolna zwężająca się od szerokości 1.45 mm do zera (Rysunek 3.29). Na rysunku górnym przypadek obu szczelin suchych, a na dolnym przypadek górnej szczeliny zalanej wodą (po lewej) i obu szczelin zalanych wodą (po prawej).



Rysunek 3.29 Skany poprzeczne wzdłuż stosu szyb z szczelinami: górną rozwierającą się do szerokości 1.45 mm i dolną zwężającą się od szerokości 1.45 mm do zera

Ciekawy obraz uzyskano w badaniu dwóch szyb zetkniętych ze sobą powierzchniami. Układ ten zbadano w dwóch wariantach tj. przy zetknięciu szyb „na sucho” i „na mokro”, symulując w ten sposób „mikroskopijne” szczeliny poziome. Na zamieszczonym poniżej rysunku przedstawiono wynik tego badania w postaci sygnału refleksyjnego (po lewej) i jego dekonwolucji (po prawej).



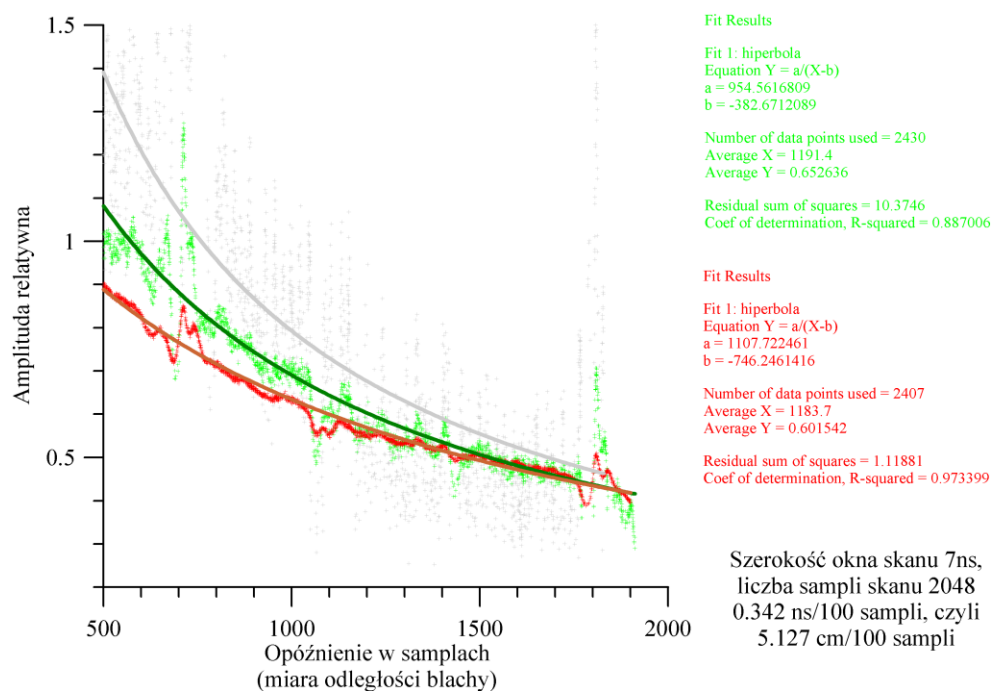
Rysunek 3.30 Sygnał refleksyjny i jego dekonwolucja dwóch zetkniętych ze sobą szyb szklanych - połączenie suche i mokre

3.4 Ocena charakteru fal emitowanych przez antenę pod kątem wykorzystania techniki radarowej w ocenie stanu połączenia warstw

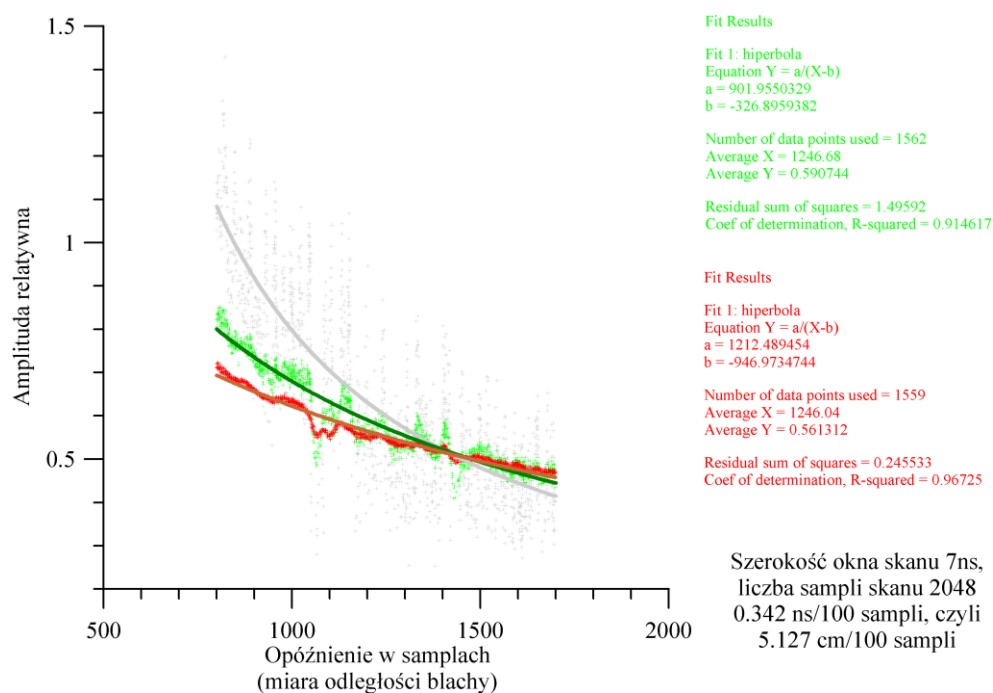
3.4.1 Próby kalibracji zależności amplitudy refleksu od powierzchni blachy od odległości pomiędzy blachą i anteną

Przeprowadzono próby dopasowania funkcji opisującej zależność amplitudy sygnału odbitego od blachy od odległości między anteną i blachą (Rysunek 3.31). Otrzymano zaskakująco małe (zbyt ujemne) wartości parametru b opisującego położenie centrum emisyjnego w jednostkach numeru sampla. Dlatego wykonano próby dopasowania funkcji opisującej tę zależność przy węższym zakresie dopasowania (Rysunek 3.32).

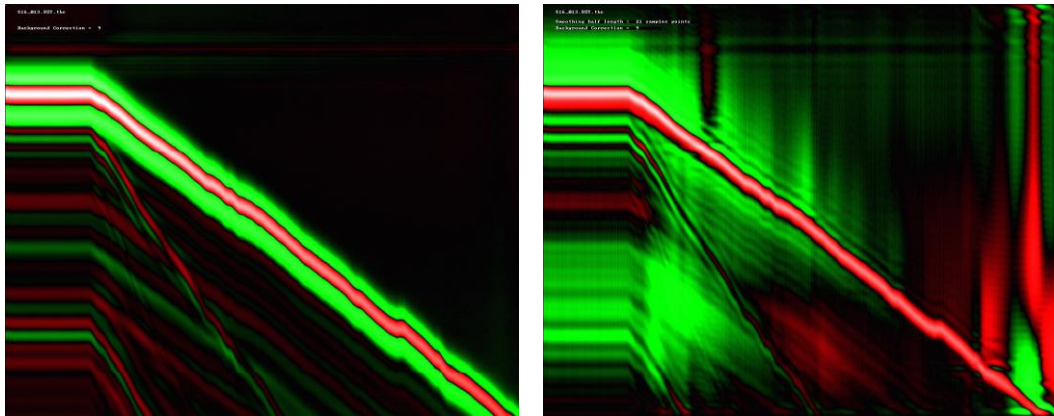
Na podstawie tych danych wykonano skan oddaleniowy powierzchni blachy (na Rysunku 3.33 echogram po lewej, próba dekonwolucji przy użyciu jako modelu sygnału odbitego w odległości około 70 cm, po prawej). Na rysunku wyraźnie widoczny refleks główny, element stowarzyszone translacyjnie z refleksem głównym oraz ślad sygnału asynchronicznego (prawdopodobnie podwójne odbicie od blachy lub ewentualnie efekt dyfrakcyjny związany z powierzchnią tworzącą stożka obserwacyjnego anteny).



Rysunek 3.31 Próby dopasowania funkcji opisującej zależność amplitudy sygnału odbitego od blachy od odległości między anteną i blachą



Rysunek 3.32 Próby dopasowania funkcji opisującej zależność amplitudy sygnału odbitego od blachy od odległości między anteną i blachą - węższy zakres dopasowania

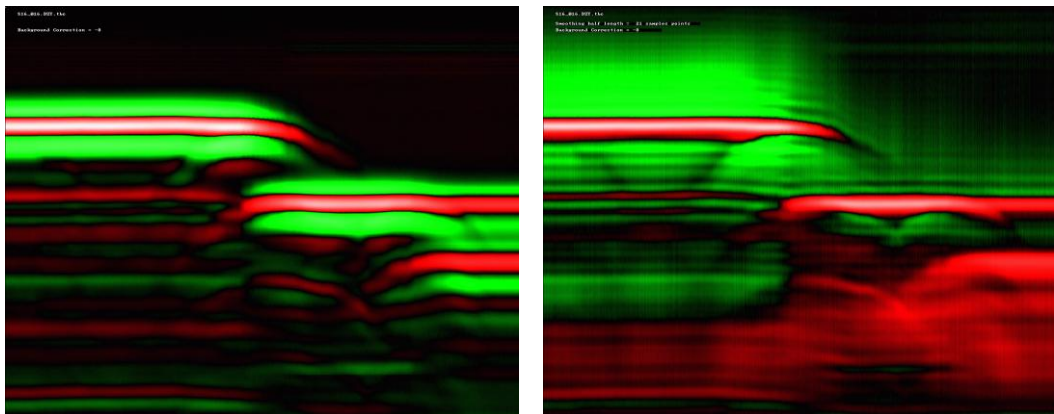


Rysunek 3.33 Skan oddaleniowego powierzchni blachy (echogram po lewej, próba dekonwolucji przy użyciu modelu sygnału odbitego)

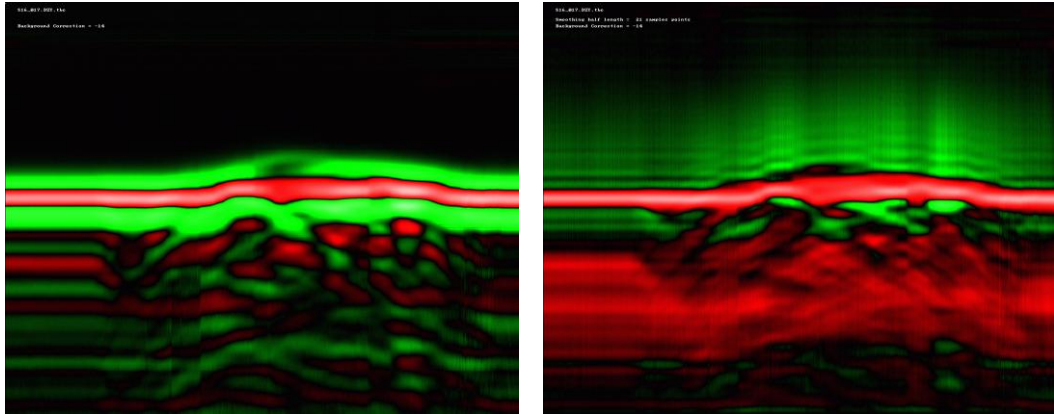
3.4.2 Przykłady wpływu złożoności geometrycznych powierzchni odbijającej na postać sygnału

Próby przeprowadzono w celu oceny wpływu złożoności geometrycznych powierzchni odbijających na postać sygnału. Na rysunkach zamieszczonych poniżej przedstawiono wyniki prób wykonanych w dwóch wariantach. Pierwszy (Rysunek 3.34) dotyczy badania schodkowo obniżonego poziomu blachy, który jest zauważalna jeszcze pod blachą górną w pobliżu jej krawędzi.

W drugim wariantcie (Rysunek 3.35) przeprowadzono badania nieregularnie pogniętej folii aluminiowej leżącej na blasze.



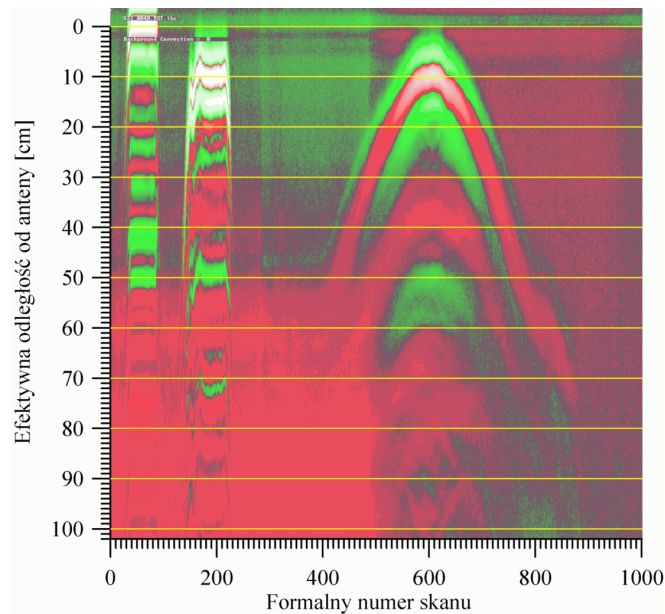
Rysunek 3.34 Echogram schodkowego obniżenia poziomu skanowanej blachy i próba jego dekonwolucji. Obecność blachy dolnej jest zauważalna jeszcze pod blachą górną w pobliżu jej krawędzi.



Rysunek 3.35 Echogram przejścia anteny ponad strefą nieregularnie pociętej folii aluminiowej (część środkowa) leżącej na blasze i próba jego dekonwolucji.

3.4.3 Badanie rozwartości stożka obserwacyjnego anteny

Próba wykonana w celu rozpoznania rozwartości refleksyjnego stożka obserwacyjnego anteny. Badanie wykonano przez przesuwanie w poziomej płaszczyźnie metalowego pręta pod anteną skierowaną w dół.

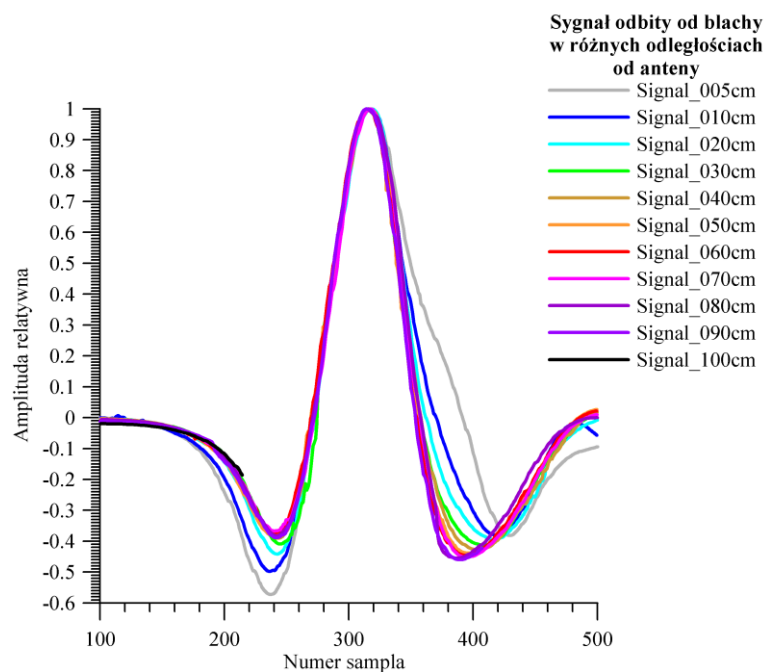


Rysunek 3.36 Próba rozpoznania rozwartości refleksyjnego stożka obserwacyjnego anteny

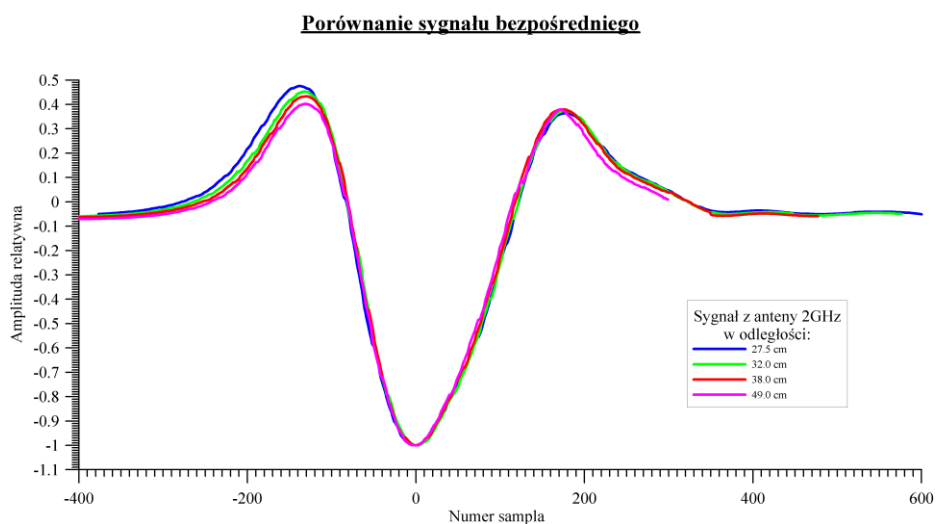
3.4.4 Rozpoznawanie kształtu sygnału emitowanego przez antenę i sygnału odbitego od blachy

Poniżej przedstawiono próby wstępnego rozpoznawanie kształtu sygnału emitowanego przez antenę i sygnału odbitego od blachy. Badania przeprowadzono dla układu pojedynczego, w którym fala emitowana i rejestrowana jest przez jedną antenę

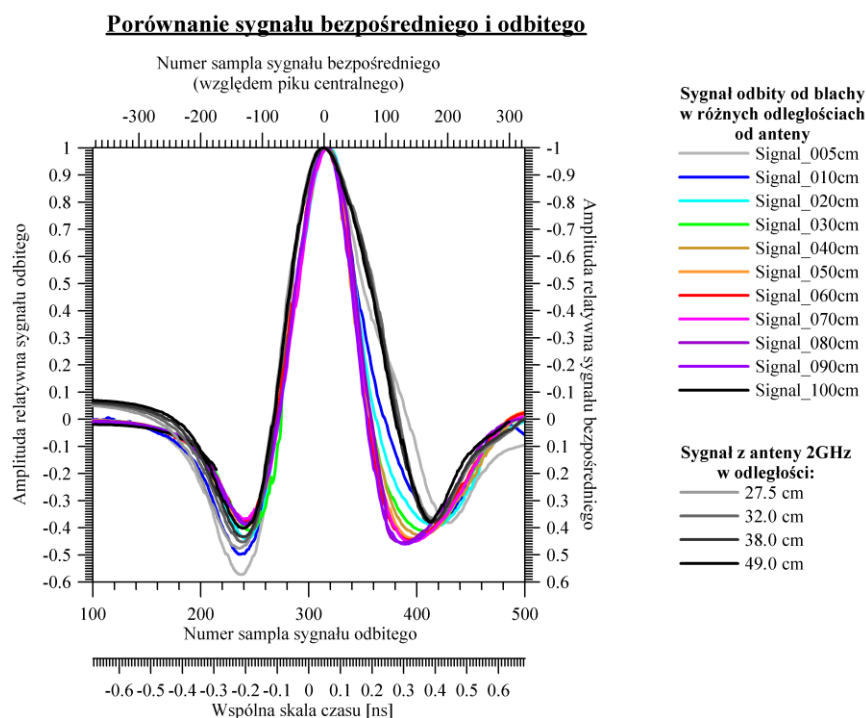
(o częstotliwości 2 GHz) (Rysunek 3.37) oraz dla układu podwójnego gdzie nadajnikiem była antena 2GHz a odbiornikiem antena o częstotliwości 1 GHz (Rysunki 3.38 i 3.39).



Rysunek 3.37 Sygnał refleksyjny od powierzchni blachy rejestrowany za pomocą tej samej anteny.



Rysunek 3.38 Sygnał emitowany przez antenę 2 GHz rejestrowany bezpośrednio za pomocą drugiej anteny.



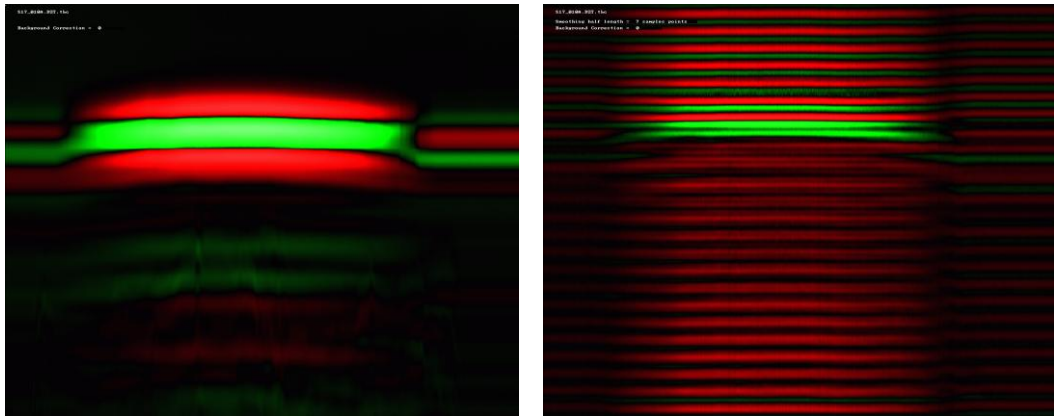
Rysunek 3.39 Porównanie kolekcji sygnałów odbitych od blachy z sygnałem rejestrowanym bezpośrednio za pomocą drugiej anteny.

3.4.5 Badanie własności sygnału transmisyjnego w układzie dwu-antenowym

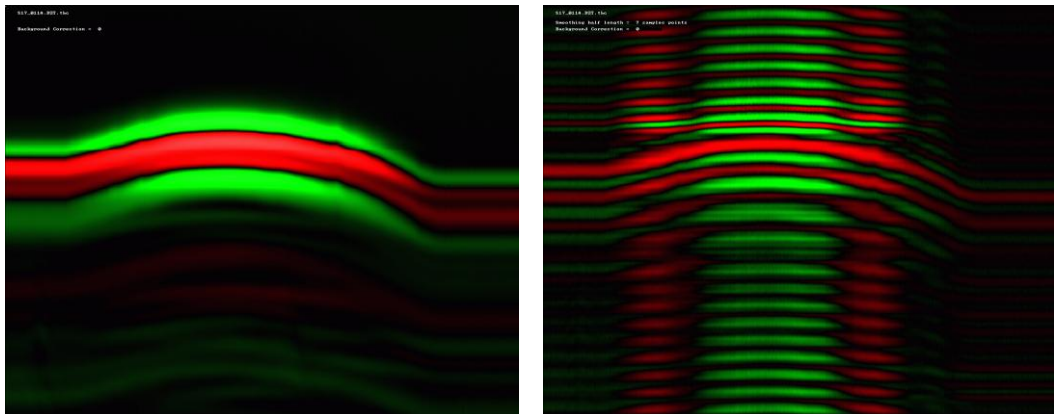
W układach podwójnych, opisanych w poprzednim punkcie, przeprowadzono dodatkowe pomiary polegające na ocenie zmian sygnałów i polaryzacji przy różnych ustawieniach anten względem siebie.

Zmian sygnału rejestrowanego dokonano w trzech wariantach, w których:

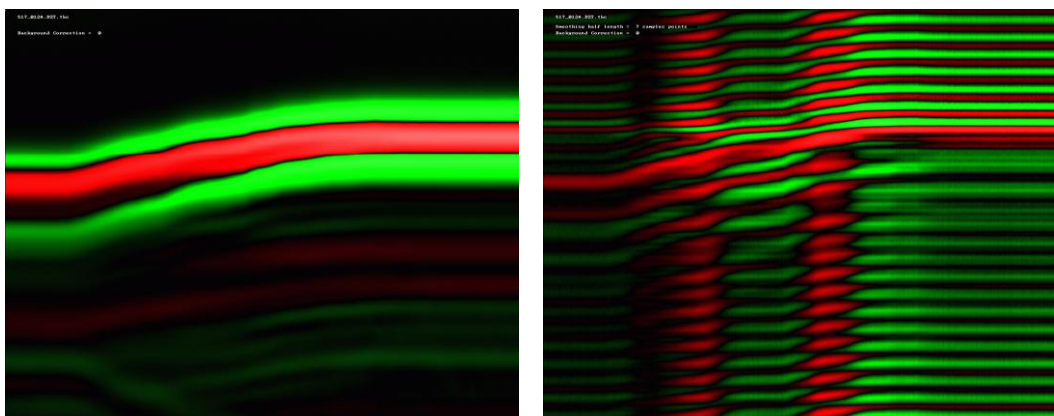
- dokonano rotacji anteny odbiorczej wokół osi prostopadłej do kierunków polaryzacji obu anten przedstawiono (Rysunek 3.40),
- przesuwno antenę odbiorczą w poprzek płaszczyzny polaryzacji sygnału i anten,
- przesuwno antenę odbiorczą w płaszczyźnie polaryzacji sygnału i anten w poprzek osi prostopadłej do kierunku polaryzacji.



Rysunek 3.40 Zmiany sygnału w wyniku rotacji anteny odbiorczej (sygnał po lewej, próba dekonwolucji po prawej).



Rysunek 3.41 Zmiany sygnału przy przesuwaniu anteny odbiorczej w poprzek płaszczyzny polaryzacji sygnału i anten (sygnał po lewej, próba dekonwolucji po prawej).



Rysunek 3.42 Zmiany sygnału przy przesuwaniu anteny odbiorczej w płaszczyźnie polaryzacji sygnału i anten w poprzek osi prostopadłej do kierunku polaryzacji (sygnał po lewej, próba dekonwolucji po prawej).

4 Podsumowanie

Technika radarowa

Wstępne wyniki pokazują, że możliwa do uzyskania w praktyce rozdzielczość wgłębna przy pomiarach refleksyjnych (możliwość rozróżnienia horyzontów odbijających) z użyciem anteny 2 GHz **może osiągać rząd 1 mm**, przy dużych kontrastach materiałowych (jak kontakt dielektryka z wodą), ale wymaga zwykle zastosowania dekonwolucji sygnału i jego detalicznej interpretacji. Dekonwolucja pozwala na kilkukrotne poprawienie rozdzielczości czasowej przy rozróżnianiu zinterferowanych sygnałów odbitych. Obecnie rozdzielczość ta jest na poziomie dziesiątej części okresu fali, czyli **istotnie przekracza rozdzielczość uważaną za nominalną**.

W trakcie badań zostały także wstępnie zidentyfikowane przeszkody dalszego polepszania rozdzielczości na drodze dekonwolucji, a są to przede wszystkim:

- zjawisko zmiany kształtu sygnału przy odbiciu,
- artefakty procesu samlowania sygnału.

Dalsze polepszanie rozdzielczości na drodze dekonwolucji jest uzależnione od znalezienia ewentualnych regularności tych zjawisk. Poza tymi próbami poprawiania rozdzielczości uzyskiwanej przy bezpośredniej identyfikacji horyzontów, plany dalszych badań przewidują także badanie innych przejawów obecności cienkich warstw w ośrodku.

Metody dynamiczne FWD i młot impulsowy

Metoda opisana w punkcie 2.3.2.3 wskazuje, że wyniki pomiarów ugięciomierzem dynamicznym FWD (pełne przebiegi ugięć w czasie) mogą być z powodzeniem wykorzystane do oceny jakości połączenia między warstwami konstrukcyjnymi nawierzchni drogowej. Wyznaczenie wskaźnika W_{pw} lub analiza wykresów ugięć w funkcji czasu, pozwala na szybkie i proste, wstępne wnioskowanie o jakości połączenia. Należy jednocześnie stwierdzić, że metoda wymaga, o ile to możliwe, głębszej weryfikacji i uszczegółowienia, szczególnie w zakresie identyfikacji warstwy charakteryzującej się złym połączeniem.

Obiecujące wyniki daje również metoda młota impusowego, która tak jak FWD jest badaniem nieniszczącym, a jednocześnie, ze względu na swoje małe rozmiary, pozwala na ocenę powiązania warstw bezpośrednio po ułożeniu nowej warstwy w trakcie procesu budowlanego. Autorzy niniejszego opracowania zakładają możliwość wykorzystania tego urządzenia w dalszych etapach pracy, pod warunkiem jego dostępności.

Badania laboratoryjne

Zagadnienie kontroli szczepności międzywarstwowej w laboratorium nie jest do końca rozwiązane. Istnieje wiele metod, co jednocześnie umożliwia wybór, dopasowanie metody badawczej do cechy, którą chcemy badać. Niemniej wydaje się, iż najwierniej

oddającymi prace nawierzchni są metody opierające się na zasadzie bezpośredniego ścinania z symulacją siły normalnej.

Z zaprezentowanych powyżej metod tego typu najbardziej popularna jest metoda Leutnera, która stosowana jest też w warunkach polskich. Metoda Leutnera jest jedną z pierwszych, jaką opracowano w celu badania szczepności międzywarstwowej, jest ona najszerzej opisana w dostępnej literaturze, a popularność metody wynika z jej prostoty i skuteczności. Może być stosowana w każdym z laboratoriów dzięki możliwości obciążania przy pomocy powszechnej prasy Marshalla.

W ramach Etapu I pracy przeprowadzono następujące prace:

- wykonano stanowisko badawcze do prowadzenia pomiarów radarowych w warunkach laboratoryjnych,
- przeprowadzono badania na materiałach podstawowych i oceniono jakość rejestrowanych sygnałów odbitych,
- przeanalizowano uzyskiwane wzory fal elektromagnetycznych i kontrastów międzywarstwowych,
- przeprowadzono wstępną weryfikację założeń wykorzystania techniki radarowej w ocenie stanu połączenia międzywarstwowego.

W następnym etapie pracy planuje się:

- przeprowadzenie badań laboratoryjnych na próbkach materiałów stosowanych w warstwach ścieralnych nawierzchni (mieszanka mineralno-asfaltowa, beton cementowy, itp.)
- wykonanie pomiarów radarowych, pomiarów ugięciomierzem dynamicznym oraz badań laboratoryjnych na wytypowanych odcinkach badawczych; zakłada się również wykorzystanie metody młota impulsowego,
- dokonanie analiza porównawcza uzyskanych wyników badań pod kątem identyfikacji połączeń międzywarstwowych.

Bibliografia

A-CUBED. (1983). General state of the art review of ground probing radar. Ontario: A-CUBED.

Annan, A. (2001). Ground Penetrating Radar. *Workshop notes*. Ontario, Kanada: Sensor&Software Inc.

Bohn, A. O. (n.d.). The History of the Falling Weight Deflectometer (FWD).

Brendt. (1998). Instrukcja, dotycząca wiązania warstw, spoin, połączeń i kształtowania asfaltowych poboczy powierzchni komunikacyjnych. *tłumaczenie z języka niemieckiego wykonał mgr inż Edmund Boito*. Bonn: M SNAR.

Canestrari, F., & Santagata, E. (2005). Temperature effects on the shear behaviour of tack coat emulsions used in flexible pavements. *The International Jurnal of Pavement Engineering*.

Chellgren, J. D. (1999). Preventing Pavenemt Slipping. *Local Highway Technical News*, vol 11 no. 4.

Cheung, M. W., Hakim, B. A., & Armitage, R. J. (2000). Use of FWD Data for Prediction of Bonding Between Pavement Layeres. *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 1, s. 49-59.

(1996). *COST Action 336 "Falling Weight Deflectometer"*. FEHRL.

Cross, S. A., & Shrestha, P. P. (2004). Guidelines for Using Prima and Tack Coats. *Technical Report FHWA-CFL-04-001*, s 113.

Daniels, J. (2000). Graund Penetrating Radar fundamentals. *Appendix to Reprot to United States Environmental Protection Agency*.

Forest, R., & Utsi, V. (2004). Non Destructive crack depth measurements with Graund Penetrating Radar. *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar* (pp. pp 799–802). Delft: Slob, Yarovov & Rhebergen (eds).

Geophysical Survey Systems, I. (2008). *GSSI*. Retrieved from <http://www.geophysical.com/militarysecurity.htm>

Glet, W. (2000). Układ i związanie warstw w konstrukcjach nawierzchni asfaltowych. *Nowości w Zagranicznej Technice drogowej*, s 37-53.

Hachiya, Y., & Sato, K. (1997). Effect of Tack Coat on Bonding Characteristics at Interface Between Asphalt Concrete Layers. *Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements*, s 349-362.

Hakim B A. (1998). Pavement assessment including bonding condition: case studies. *International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields*. Trondheim.

Hakim, B. A. (2002). The importance of good bond between bituminous layers. *Scott Wilson Pavement Engineering*, s. 11.

- Hyslip, J., Smith, S., Olhoeft, G., & Selig, E. (2003). Assessment of railway track substructure condition using Groun Penetrating Radar.
- Jaskuła, P. (2006). Ocena szczepności między warstwami asfaltowymi nawierzchni. *Drogownictwo* , s. 412-414.
- Jiménez, P. F., & Soto Sanchez, J. A. (2000). Special Modified Emulsions of Modified Bitumen for Tack Coats. *2 nd Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona* , s. 463-471.
- Judycki J. (2003, wrzesień). Szczepność między warstwami asfaltowymi nawierzchni. *Drogownictwo* , pp. s. 275-279.
- Judycki, J., & Jaskuła, P. (2005/2006). *Badania i ocena wpływu szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni asfaltowej*. Gdańsk: Raport z badań I i II etapu badań.
- Karczewski, J. (2007). *Zarys metody georadarowej*. Kraków: Wydawnictwa AGH.
- Loulizi, A. (2001). Development of Groud Penetrating Radar signal modeling and implementation for transportation infrastructure assessment. *Praca doktorska* .
- Maser, K.; Scullion, T. (1991). Automated detection of pavement layer thicknesses and subsurface moisture using ground penetrating radar. Transport Research Board.
- Mechowski, T., Harasim, P., Kowalski, A., Kusiak, J., & Borucki, R. (2006). *Opracowanie metody oceny jakości połączenia warstw w konstrukcji nawierzchni za pomocą ugięciomierza dynamicznego FWD*. Warszawa: IBDiM, Praca niepublikowana, wykonana na zlecenie GDDKiA.
- Moorman, B. (2001). Ground-penetrating radar applications in paleolimnology. Dordrecht: Kuwer Academic Publishers.
- Morawski, T., & Gwarek, W. (1985). *Teoria pola elektromagnetycznego*. Warszawa: WNT.
- Morey, R. (1998). Ground penetrating radar for evaluating subsurface conditions for transportation facilities. *NCHRP Synthesis 255* . Washington: Transportation Research Board.
- Olhoeft G. (2003). Retrieved from <http://www.g-p-r.com/>
- Olhoeft, G., & Capron, D. (1994). Petrophysical causes of elektromagnetic dispersion. *Proceedings of the Fifth Internationa Conference on Ground Penetrating Radar* (pp. vol 1 of 3: 145-152). Waterloo: Waterloo Centre of Groundwater Research.
- Pałys, M., Zawadzki, J., & Skierczynski, P. (2002). Połączenie między warstwami nawierzchni asfaltowej- metoda badania wymagania. *VIII Międzynarodowa Konferencja Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe* (pp. s. 299-306). Kielce: IBDiM.
- Partl, M. N., & Raab, C. (1998). Shear strength properties between asphalt pavement layers. *Archives of Civil Engineering* , s. 353-365.

- Pos, J., Kruntcheva, M., Collop, A., & Thom, N. (2003). Powiązanie asfaltowych warstw nawierzchni: badania, wpływy, ocena- rozważania porównawcze Niemcy- Wielka Brytania. *Nowości Techniki Zagranicznej*, (opr. Mikulski J.) , s. 5-30.
- Raab Ch. (2002). Związanie warstw asfaltowych (Normalizacja badania w Szwajcarii). *Nowości w Zagranicznej Technice Drogowej*, (opr. Wałęcka H.K.) , s. 13-32.
- Raab C, & Partl M.N. (2004). Interlayer shear performance experience with different pavement structures. *Euroasphalt and Eurobitume Congress*. Viena.
- Raab, C., & Partl, M. N. (n.d.). Inter-Layer and In-Layer Shear Strength of Swiss Asphalt Pavements. EMPA.
- Romanoschi, S. A., & Metcalf, J. B. (2002). The characterization of pavement layer interfaces. *ICAP*, (p. s. 18). Copenhagen.
- Saarenketo, T. (2006). Elektryczne właściwości materiałów drogowych i gruntów podłoża oraz zastosowanie radaru przenikającego grunt w badaniach infrastruktury drogowej. *Praca doktorska* . Oulu: University of Oulu.
- Saarenketo, T. (1997). Using ground penetrating radar and dielectric probe measurements in pavement density quality control. *Transport Research Record* 1997, pp. 34-41.
- Saarenketo, T., & Scullion, T. (2000). Road evaluation with Ground Penetrating Radar. *Journal of Applied Geophysics* 43 , 119-138.
- Sangiorgi, C., Collop, A. C., & Thom, N. H. (2008). A non-destructive impulse hammer for evaluating the bond between asphalt layers in a road pavement. *International Symposium: Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung E.V.
- Scaffer, J., & Saxena, A. (1995). The science and design of engineering materials. Richard D. Irwin, Inc.
- Scullion, T., & Saarenketo, T. (1995). Ground Penetrating Radar Technique in Monitoring Defects in Roads and Highways. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP*. (pp. pp 63–72.). Orlando, Florida.: Compiled by Ronald S. Bell.
- Sholar, G. A., Page, G. C., Musselman, J. A., Upshaw, P. B., & Moseley, H. L. (2002). Preliminary Investigation of a Test Method to Evaluate Bond Strength of Bituminous Tack Coats. *Research Report FL/DOT/SMO/02-459, Florida Department of Transportation* , s. 36.
- Stockert, U. (2002). Ein Beitrag zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund im Asphaltstraßenbau. *Elektronische Publikationen Darmstadt* , s. 145.
- Sudyka, J. (2006). Technika radarowa w drogownictwie – nowa jakość w ocenie konstrukcji nawierzchni. *Polski Kongres Drogowy*.

Sybilski, D., Mechowski, T., & Harasim, P. (2007). Ocena połączenia międzywarstwowego nawierzchni ugięciomierzem FWD. *Dropi i Mosty* , 41-82.

Tashman, L., Nam, K., & Papagiannakis, T. (2006). Evaluation of the influence of tack coat construction factors on the bond strength between pavement layers. *Washington Center for Asphalt Technology* .

Tschegg, E. K., Kroyer, G., Dong-Ming, T., Stanzl, S. E., & Litzka, J. (1995). Investigation of Bonding Between Asphalt Layers on Road Construction. *Journal of Transportation Engineering* , s. 309-316.

Von Becker. (1990). Wpływ szczepności międzywarstwowej na zachowanie się nawierzchni asfaltowych. *FGSV 25/B5.1*. Boon: tłumaczenie z języka niemieckiego dla potrzeb Zakładu Budowy Dróg PG wykonał mgr inż. Edmund Boito.

West, R. C., Zhang, J., & Moore, J. (2005). *Evaluation of bond strength between pavement layers*. Alabama: NCAT Report 05-08, Auburn University.

Zawadzki, J., Skierczynski, P., & Mechowski, T. (2003). Wpływ połączenia między warstwami asfaltowymi na trwałość nawierzchni. *IX Międzynarodowa Konferencja Trwałe i bezpieczne Nawierzchnie Drogowe* (pp. s. 415-423). Kielce: IBDiM.

Zieliński, P. (2004). Wybrane zagadnienia trwałości nawierzchni asfaltobetonowej z geosyntetyczną warstwą pośrednią. *Praca doktorska* . Politechnika Krakowska.