

**INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW**  
**Zakład Diagnostyki Nawierzchni**

**SPRAWOZDANIE**  
z realizacji pracy pt.:  
**„Analiza propagacji spękań nawierzchni z wykorzystaniem  
techniki radarowej”.**

---

**SPRAWOZDNIĘ CZĘŚCIOWE**  
Etap I – zadania 1 - 6

Zleceniodawca: Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad

Umowa nr 2192/2008 z dnia 11.08.2008 roku

Opracowali:

mgr inż. Jacek SUDYKA – IBDiM

dr inż. Lech KRYSIŃSKI – Uniwersytet Warszawski

mgr inż. Tomasz MECHOWSKI – IBDiM

Kierownik Zakładu

Diagnostyki Nawierzchni



mgr inż. Tomasz MECHOWSKI

Warszawa, listopad 2009

## Spis treści

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>Wstęp.....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>2</b>   | <b>Analiza możliwości oceny spękań z wykorzystaniem techniki radarowej.....</b>                          | <b>7</b>  |
| <b>2.1</b> | <b>Charakterystyka spękań.....</b>   | <b>7</b>  |
| 2.1.1      | Mechanizmy powstawania spękań poprzecznych.....  | 8         |
| 2.1.2      | Metody oceny spękań.....   | 14        |
| <b>2.2</b> | <b>Cechy elektryczne ośrodka.....</b>  | <b>24</b> |
| <b>2.3</b> | <b>Propagacja fal elektromagnetycznych.....</b>  | <b>27</b> |
| <b>2.4</b> | <b>Rozdzielczość pozioma i pionowa.....</b>  | <b>30</b> |
| <b>2.5</b> | <b>System pomiarowy.....</b>   | <b>33</b> |
| <b>3</b>   | <b>Laboratoryjna ocena zakresu i dokładności techniki radarowej w identyfikacji i ocenie spękań.....</b> | <b>36</b> |
| 3.1        | Opis stanowiska badawczego.....  | 36        |
| 3.2        | Badania laboratoryjne jakości rejestrowanych sygnałów odbitych.....                                      | 37        |
| <b>4</b>   | <b>Analiza zdolności systemu pomiarowego.....</b>  | <b>39</b> |
| <b>5</b>   | <b>Opracowanie założeń do pomiarów prowadzonych w warunkach terenowych.....</b>                          | <b>45</b> |
| <b>6</b>   | <b>Badania na wytypowanych odcinkach badawczych.....</b>   | <b>46</b> |
| 6.1        | Ocena spękań metodami klasycznymi.....   | 47        |
| 6.2        | Badania radarowe.....  | 48        |
| <b>7</b>   | <b>Podsumowanie.....</b>   | <b>56</b> |
|            | <b>Bibliografia.....</b>   | <b>57</b> |

Załącznik 1 Wyniki badań radarowych na wytypowanych odcinkach badawczych

Załącznik 2 Inwentaryzacja uszkodzeń metodą wizualną odcinka A3\_S



## Spis ilustracji

|   |    |
|---|----|
| Rysunek 2.1 Wpływ ruchu na spękaną nawierzchnię.....  | 13 |
| Rysunek 2.2 Schemat ustawienia FWD w badaniach przekazywania obciążenia .....   | 17 |
| Rysunek 2.3 Wykres ugięć na spękanu z dobrym przekazywaniem obciążenia.....   | 18 |
| Rysunek 2.4 Wykres ugięć na spękanu z brakiem przekazywania obciążenia .....  | 18 |
| Rysunek 2.5 Schemat pomiaru przemieszczeń nawierzchni w obrębie pęknięcia metodą CAM (Francken, i inni, 1997).....  | 20 |
| Rysunek 2.6 Urządzenie CAM podczas pomiaru (du Plessis, 2007).....  | 20 |
| Rysunek 2.7 Wynik pomiaru urządzeniem CAM (Francken, i inni, 1997).....   | 21 |
| Rysunek 2.8 Schemat obciążenia nawierzchni w badaniu współpracy płyt, przy zastosowaniu ugięciomierza dynamicznego FWD.....   | 23 |
| Rysunek 2.9 Belka doświetlająca powierzchnię nawierzchni.....   | 24 |
| Rysunek 2.10 Obraz zarejestrowanego uszkodzenia na powierzchni nawierzchni.....   | 24 |
| Rysunek 2.11 Mechanizmy rozpraszania fali: (a) odbicie kierunkowe, (b) refrakcja (załamanie), (c) dyfrakcja, (d) rezonans.....  | 28 |
| Rysunek 2.12 Odbicie i przenikanie fali: (a) TE i (b) TM.....   | 29 |
| Rysunek 2.13 Rozdzielczość pionowa $\Delta v$ i pozioma $\Delta h$ .....  | 30 |
| Rysunek 2.14 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 $T \ll W$ .....  | 31 |
| Rysunek 2.15 Rozdzielczość w funkcji częstotliwości emitowanej fali.....  | 33 |
| Rysunek 2.16 Zasada rejestracji sygnałów odbitych w systemach GPR (a – uproszczony obraz przejścia impulsu elektromagnetycznego, b – zarejestrowany sygnał odbity, c – uproszczony falogram z pomiarów radarowych) .....  | 34 |
| Rysunek 2.17 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 .....  | 34 |
| Rysunek 3.1 Ustawianie stanowiska badawczego.....   | 36 |
| Rysunek 3.2 Platforma z zainstalowanym czujnikiem odległości i elementem symulującym spękania .....   | 37 |
| Rysunek 3.3 Echogramy uzyskane w wyniku przesuwania metalowego pręta prostopadłego do osi anteny, na poziomie 42 cm pod anteną, symulującego szczelinę spękania; po lewej w przypadku pręta o średnicy 1 cm, a po prawej w przypadku pręta o średnicy 0.5 cm. Dwie hiperbole poniżej hiperboli głównej są obrazem ramy, na której został zamocowany pręt. Sygnał powstający w wyniku obecności pręta ma kształt |    |



|  |    |
|--|----|
| zbliżony w ogólnym zarysie do sygnału wzorcowego uzyskiwanego przy odbiciu od blachy, ale nie jest z nim identyczny.....   | 38 |
| Rysunek 3.4 Echogram uzyskany w wyniku przesuwania metalowego pręta o średnicy 1 cm równoległego do osi anteny, na poziomie 42 cm pod anteną. Dwie hiperbole poniżej hiperboli głównej są obrazem ramy, na której został zamocowany pręt. Powstający tutaj sygnał jest znacznie słabszy niż w przypadku pręta prostopadłego do osi skrzyni anteny i ma on wyraźnie odmienny kształt, który kształtem jest bliższy refleksowi podwójnemu. ....  | 39 |
| Rysunek 4.1 Test rozdzielczości poprzecznej układu GPR, ze względu na możliwość rozróżnienia dwóch płytko położonych pęknięć odległych od siebie o 5, 10 i 15 cm. Jako laboratoryjny model symulujący pęknięcia bez masującego sygnału odbitego od nawierzchni (czyli bez piku głównego) posłużyły dwa metalowe pręty o średnicy 1 cm przesuwane na poziomie 35 cm pod anteną.....   | 40 |
| Rysunek 4.2 Echogram uzyskany w wyniku przesuwania pod anteną ustawionej pionowo płyty akrylowej (o grubości 1.5 cm) ustawionej prostopadle do osi skrzyni anteny, gdy górna krawędź płyty jest usytuowana na poziomie około 40 cm pod anteną. Płyta taka symuluje pojedyncze, kontynuujące się głęboko spękanie nawierzchni. Powstający sygnał elektromagnetyczny ma kształt zbliżony do refleksu pojedynczego, ale jest od niego w szczegółach odmienny. Hiperbola poniżej hiperboli głównej jest obrazem ramy, na której została zamocowana płyta. .... | 41 |
| Rysunek 4.3 Dopasowanie funkcji opisującej zależność amplitudy sygnału odbitego od blachy od odległości między anteną i blachą.....  | 42 |
| Rysunek 4.4 Dopasowanie funkcji opisującej zależność amplitudy sygnału odbitego od blachy od odległości między anteną i blachą - węższy zakres dopasowania .....   | 42 |
| Rysunek 4.5 Skan oddaleniowy powierzchni blachy (echogram po lewej, a po prawej dekonwolucja przy użyciu modelu sygnału odbitego).....   | 43 |
| Rysunek 4.6 Przekroje strukturalne (nieskrócone) po usunięciu piku głównego wzdłuż fragmentu testowego odcinka drogi gminnej w Pszczółkach (po lewej) i wzdłuż fragmentu ulicy Gołędzinowskiej w Warszawie (po prawej).....  | 43 |
| Rysunek 4.7 Przykłady identyfikacji rozstępów ukrytych pod powierzchnią drogi (echogramy po usunięciu piku głównego).....  | 44 |
| Rysunek 6.1 Lokalizacja odcinków wytypowanych do badań terenowych .....  | 46 |
| Rysunek 6.2 Profil pomiarowy, A – zarejestrowane sygnały radarowe, B – szacowana głębokość pęknięcia, C – grubość warstwy z lokalizacją pęknięć.....   | 48 |
| Rysunek 6.3 Kształty refleksów pęknięć nawierzchni.....  | 49 |
| Rysunek 6.4 Refleksy pęknięć prawdopodobnie postępujących od góry; odcinek A3_S..  | 50 |
| Rysunek 6.5 Refleksy zarejestrowane w obrębie dylatacji nawierzchni betonowej; odcinek A1_S.....   | 51 |

|  |    |
|--|----|
| Rysunek 6.6 Lokalizacja pęknięć i dylatacji nawierzchni betonowej; odcinek A1_S.....                       | 51 |
| Rysunek 6.7 Obraz nawierzchni z wbudowaną siatką przeciwpękaniową; odcinek B_S ..                          | 52 |
| Rysunek 6.8 Próba wyizolowania zakłóceń związanych z obecnością siatki przeciwpękaniowej; odcinek D_S..... | 52 |

## **Spis tabel**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.1 Typowe wartości stałej dielektrycznej, przewodności, prędkość fali i tłumienia wybranych materiałów geologicznych (Moorman, 2001)(Morey, 1998) ..... | 27 |
| Tabela 6.1 Wytypowane odcinki dróg.....   | 46 |



## 1 Wstęp

Jednym z najczęściej występujących uszkodzeń nawierzchni są spękania. Uszkodzenia te są efektem różnych mechanizmów zachodzących w nawierzchni. Rodzaj, pochodzenie oraz wpływ spękań na trwałość konstrukcji nawierzchni szeroko przedstawili między innymi (Jacobs, i inni, 1995), (Al-Qadi, i inni, 2008), (Abd El Halim, i inni, 2000), (Petit, i inni, 2004) i (CROW, 1990).

Z punktu widzenia użytkownika drogi spękania w niewielkim stopniu wpływają na komfort i bezpieczeństwo jazdy. W przypadku zarządzającego drogą pojawienie się na odcinku tego rodzaju uszkodzeń jest sygnałem świadczącym o niewłaściwej pracy nawierzchni, która w dłuższej perspektywie czasu będzie ulegać przyspieszonej degradacji. Dlatego w metodach projektowania jak i systemach zarządzania wyniki oceny intensywności i natężenia spękań są podstawowymi kryteriami zniszczenia nawierzchni.

Badania tego typu uszkodzeń, metody oceny i sposoby interpretacji uzyskiwanych wyników od lat są przedmiotem wielu publikacji. Ważnym elementem w procesie oceny stanu nawierzchni pod kątem spękań jest prawidłowa, wczesna ich identyfikacja. W ostatnich latach szczególnego tempa rozwoju nabrały metody diagnostyczne oparte na półautomatycznych lub automatycznych metodach identyfikacji. Są to przede wszystkim metody działające w oparciu o techniki wizyjne, w których wykorzystuje się technologie szybkiej obróbki obrazów cyfrowych o wysokiej rozdzielczości. Teoretyczne rozważania jak i praktyczne rozwiązania w tym zakresie przedstawiono między innymi w publikacjach (Rababaah, i inni, 2005), (Laurent, 2006), (Mustaffara, i inni, 2008).

Szybki rozwój technologii cyfrowych pozwala na wdrożenie innej, nieniszczącej metody pomiarowej. Technika radarowa GPR (Ground Penetrating Radar) daje możliwości identyfikacji uszkodzeń powierzchniowych takich jak rozwarstwienia, ubytki powierzchniowe, spękania, jednorodność zagęszczenia i stopień zawilgocenia. Rezultaty wdrożeniowych badań w ocenie tego rodzaju uszkodzeń przedstawiono między innymi przez (Saarenketo, i inni, 2000), (Sculion, i inni, 1995), (Sculion, 2006), (Colagrande, i inni, 2009) i (Benedetto, i inni, 2009). Jak podają autorzy tych prac wyniki przeprowadzonych badań należy traktować jako wstępne, a sama metodyka pomiaru i oceny wymaga ciągłego rozwoju.

Celem pracy jest ocena propagacji spękań poprzecznych na podstawie pomiarów georadarowych, prowadzonych w dłuższym okresie czasu na nowo wybudowanych nawierzchniach asfaltowych. Wykorzystanie techniki radarowej w takiej ocenie pozwoli na precyzyjne „śledzenie” pojawiających się spękań co w efekcie ułatwi wnioskowanie co do przyczyn ich powstawania.



## 2 Analiza możliwości oceny spękań z wykorzystaniem techniki radarowej

### 2.1 Charakterystyka spękań

Spękania są jednymi z najczęściej występujących rodzajów zniszczeń nawierzchni drogowych. Zarówno rodzaj spękań jak i przyczyny ich powstawania są bardzo zróżnicowane. Jakkolwiek spękania nie ograniczają w takim stopniu bezpieczeństwa ruchu jak np. koleiny, to ich występowanie jest sygnałem rozpoczętego procesu zniszczenia. Ważność faktu pojawienia się spękań nawierzchni podkreśla między innymi traktowanie ich jako jednego z głównych kryteriów zniszczenia nawierzchni (obok głębokości kolein) w wielu metodach projektowania nawierzchni i utrzymania sieci drogowych. Choć niektóre rodzaje spękań przyporządkowane są do zjawisk klimatycznych i występują tylko na określonych obszarach, to inne rodzaje spękań zależą od technologii, rodzaju materiałów czy konstrukcji nawierzchni - są więc niezależne od strefy geograficznej.

Koszty napraw spękań są relatywnie wysokie, jednak pozostawienie ich bez naprawy (nawet tymczasowej) prowadzi do nieodwracalnego zniszczenia całej struktury nawierzchni przez:

- wnikanie wody w konstrukcję nawierzchni i degradację podłoża gruntownego,
- "pompowanie" cząstek gruntu na powierzchnię,
- stopniowe zniszczenie strefy wokół spękania.

Sposób naprawy spękanej nawierzchni zależy od stwierdzonych przyczyn powstawania pęknięć, głębokości uszkodzeń, dostępnych technologii napraw oraz także od dostępnego budżetu. Rozpoznanie przyczyn powstawania spękań prowadzi także do sformułowania zasad projektowania nowych nawierzchni w taki sposób, aby systemowo uniknąć ryzyka powstania spękań.

Ze względu na przebieg (kierunek) spękania nawierzchni możemy podzielić na:

- spękania poprzeczne,
- spękania podłużne,
- spękania siatkowe.

Wśród możliwych przyczyn różnych spękań nawierzchni możemy wyróżnić za (Francken, i inni, 1997):

- spękania zmęczeniowe - spowodowane przekroczeniem wytrzymałości zmęczeniowej warstw bitumicznych,
- spękania skurczowe - pojawiające się w warstwie ścieralnej pod wpływem spadku temperatury lub w warstwach zawierających lepiszcza hydrauliczne np. cement,
- spękania spowodowane ruchem podłoża gruntowego - występują na skutek niedostatecznego zagęszczenia warstw podłoża, wzrostu wilgotności podłoża, skurczu warstw oraz podczas powstawania wysadzin,



- spękania spowodowane błędami podczas budowy - na skutek przyjęcia błędnej konstrukcji nawierzchni poszerzeń, występowania szczelin połączeniowych lub niedostatecznego sklejenia międzywarstwowego,
- spękania spowodowane czynnikami klimatycznymi i procesami fizyko-chemicznymi – wpływ procesów starzenia i czynników zewnętrznych (np. środków odladzających) na lepiszczce bitumiczne sprawia, że staje się ono kruche, podatne na pęknięcia i nie jest w stanie przenieść występujących w nawierzchni naprężeń rozciągających.

### 2.1.1 Mechanizmy powstawania spękań poprzecznych

Zagadnienia pojawiania się i rozwoju spękań w nawierzchniach należą do obszaru nauki zwanego mechaniką spękań. Zgodnie z teorią, proces pęknięcia można podzielić na 3 etapy (Jacobs, i inni, 1995):

1. inicjacja pęknięcia (pojawienie się mikrospełkań i spękań włoskowatych),
2. propagacja pęknięcia (stabilna faza wzrostu spękania),
3. zniszczenie (niestabilny przyrost pęknięcia i całkowite pęknięcie materiału).

Najbardziej znany model **inicjacji pęknięć** przedstawia się równaniem:

$$N = k\varepsilon^b \quad (1)$$

w którym:

N - liczba obciążeń do zniszczenia,

E - odkształcenie,

k, b - parametry regresji.

Należy zauważyć, że różnie definiowane jest zniszczenie. W niektórych przypadkach może to być całkowite pęknięcie (np. próbki), w innych - spadek naprężeń (lub odkształceń) o ustaloną wartość (zwykle do połowy pierwotnej wielkości). Parametry regresji k, b nie są współczynnikami materiałowymi, zależą jednak od rodzaju testu, sposobu obciążania itd. W modelu przewiduje się jedynie stan zmęczeniowej inicjacji spękań, a w praktyce stosuje się dodatkowe współczynniki pozwalające dokładniej przewidywać liczbę pojawiających się pęknięć (CROW, 1990).

Model ten związany jest z pojawianiem się spękań zmęczeniowych (wywołanych cyklicznym obciążeniem) i uwzględnia pojawienie się cykli naprężeń rozciągających wywołanych ruchem pojazdów lub zmianami temperatury.

Pojawienie się mikrorysy w jednorodnym materiale zaburza jego ciągłość, a zarazem zmienia sposób przenoszenia naprężeń wewnętrznych. W wyniku pojawiającego się obciążenia następuje koncentracja naprężeń w strefie nieciągłości. Zjawisko to umożliwia propagację pęknięcia i nazywane jest „zjawiskiem karbu”.

Powstawanie lokalnych nieciągłości zachodzi m.in. w następujących przypadkach:



- powstanie pęknięcia w niżej położonej warstwie (skurcz w podbudowie związanej),
- istniejące pęknięcia w niżej położonej warstwie (spękana warstwa bitumiczna pod nakładką),
- mikrospęknięcia powierzchniowe powstające podczas zagęszczania.

Należy dodać, że zjawisko karbu może zachodzić we wszystkich punktach, w których istnieje zaburzenie ciągłości warstw, np. na łączach poprzecznych, podłużnych pojawiających się podczas wykonywania warstw asfaltowych.

Modele opisujące proces **propagacji spękania** bazują na tzw. współczynniku intensywności naprężeń  $K$ , który w materiałach liniowo-sprężystych jest jednostką opisującą sytuację wokół górnej strefy pęknięcia. Natomiast w materiałach, które nie są liniowo sprężyste, teoria współczynnika  $K$  powinna być stosowana z dużą ostrożnością (CROW, 1990).

Przyrost długości spękania i odpowiedni model opisuje tzw. prawo Paris'a (Molenaar, 1995):

$$dc/dN = A(K)^n \quad (2)$$

w którym:

$dc/dN$  - wzrost długości spękania  $c$  podczas jednego cyklu obciążenia  $N$  [mm],

$K$  - współczynnik intensywności naprężeń opisujący stan naprężeń w górnej części pęknięcia [ $N/mm^{3/2}$ ],

$A, n$  - stałe materiałowe.

Dla spękań związanych z działaniem ruchu, wartości  $n$  zawierają się między 4.0 a 5.5, dla spękań związanych z działaniem temperatury  $n$  wynosi od 2 do 3. Parametr  $A$  obliczany jest z równania:

$$\log A = -2,36 - 1,14 n \quad (3)$$

Wyznaczenie wartości parametrów  $A$  i  $n$  było przedmiotem badań wielu autorów, m.in. (Molenaar, 1995), (Molenaar, 1984), (Krans, 1993) i (Jacobs, i inni, 1995).

### **Spęknięcia indukowane termicznie**

Jak większość materiałów, także mieszanki mineralno-asfaltowe wbudowane w nawierzchniach drogowych ulegają skurczowi podczas ochładzania. Skurcz nawierzchni jest ograniczany przez tarcie między warstwami (szczególnie między warstwami asfaltowymi, a podbudową). Powoduje to powstanie naprężeń rozciągających w nawierzchni.

W literaturze wyróżnia się dwa rodzaje spękań indukowanych termicznie:

- **spęknięcia niskotemperaturowe**, powstające na skutek skurczu termicznego podczas szybkiego spadku temperatury powietrza; są spękaniem poprzecznymi,



ponieważ naprężenia skurczowe są największe w kierunku podłużnym (wzdłuż drogi); mogą wystąpić w nawierzchniach podatnych i półsztywnych, w bitumicznej warstwie ścieralnej,

- **zmęczenie termiczne warstw bitumicznych**, powstające przez ruchy skurczowe warstwy stabilizowanej cementem, która w wyniku tego pęka; bitumiczna nakładka leżąca na warstwie związanej także po pewnym czasie pęka, ponieważ wielokrotne ruchy warstwy stabilizowanej powodują koncentrację naprężeń nad spękaniami; występuje w nawierzchniach półsztywnych.

Najważniejszymi czynnikami wpływającymi na rozwój spękań termicznych są (CROW, 1990):

- współczynniki skurczu termicznego warstwy ścieralnej i podbudowy,
- współczynnik tarcia pomiędzy warstwami nawierzchni,
- gradient zmian temperatury (w miejscu i czasie) oraz średnia temperatura warstwy asfaltowej,
- sztywność i zdolności relaksacyjne naprężeń asfaltu,
- wytrzymałość na rozciąganie i dopuszczalne odkształcenie warstwy asfaltowej.

Warstwy asfaltowe, stanowiące górną część konstrukcji nawierzchni, są najbardziej narażone na oddziaływanie niskich temperatur i powstawanie spękań niskotemperaturowych. Na powstawanie tego rodzaju spękań w warstwach bitumicznych (najczęściej w warstwie ścieralnej) mają wpływ następujące czynniki:

1. właściwości lepiszcza asfaltowego (kluczowe dla uniknięcia spękań termicznych, szacuje się że mają wpływ rzędu 85-95%); korzystniejsze jest stosowanie asfaltów miększych i modyfikowanych polimerami,
2. właściwości mieszanki (mieszanek) mineralno-asfaltowych (im sztywniejsza mieszanka, tym bardziej podatna na spękania),
3. wiek nawierzchni (im starsza nawierzchnia, tym większe prawdopodobieństwo wystąpienia w tym okresie warunków klimatycznych sprzyjających pęknięciom oraz dłuższy proces starzenia lepiszcza, a zarazem jego kruchości),
4. warunki klimatyczne (temperatura i gradient spadku temperatury).

### **Spękania odbite**

Spękaniami poprzecznymi odbitymi nazywamy spękania pojawiające się w górnych warstwach nawierzchni, których przyczyną jest przenoszenie się pęknięć z warstw leżących niżej.

Mechanizm ten obejmuje:

- pękanie warstw podbudowy związanej w nawierzchniach półsztywnych na skutek skurczu termicznego i technologicznego, a następnie:
  - pękanie warstw bitumicznych na skutek zmęczenia termicznego,
  - pękanie warstw bitumicznych na skutek działania ruchu,
- pękanie całej nawierzchni na skutek ruchów podłoża gruntowego,



- pękanie warstw podbudowy niezwiązanej, a następnie warstw bitumicznych,
- pękanie nakładek asfaltowych ułożonych na spękanej nawierzchni.

Według wielu autorów (Alenowicz, i inni, 1990), spękania poprzeczne w nawierzchniach o podbudowach stabilizowanych spoiwami hydraulicznymi są nieuniknione. Proces powstawania spękań rozpoczyna się tuż po wykonaniu podbudowy stabilizowanej i związany jest ze skurczem podczas wysychania cementu.

Na wielkość powstających pęknięć (tzn. częstotliwość występowania spękań) mają wpływ różne czynniki, takie jak:

- wytrzymałość na rozciąganie podbudowy związanej,
- grubość podbudowy związanej,
- moduł Younga  $E$  podbudowy związanej,
- współczynnik skurczu termicznego,
- wielkość spadku temperatury,

Zaobserwowano również, że istnieje związek między wytrzymałością podbudowy związanej na ściskanie, a częstotliwością występowania spękań: Im większa wytrzymałość podbudowy, tym rzadziej występują spękania. Jednak te rzadsze spękania wykazują większą aktywność (ponieważ większe są odstępstwa między spękaniami), co powoduje, że szybciej pojawiają się na powierzchni warstw asfaltowych.

Proces przenoszenia spękań przez warstwy asfaltowe można podzielić na etapy:

- **etap I** - powstawanie mikrospeknięć skurczowych tuż po zakończeniu wykonywania podbudowy związanej,
- **etap II** - „wstępnie” spękana podbudowa związana ulega przemieszczeniom podczas zmian temperatury (kurczenie i rozszerzanie) i przebiega proces dzielenia się podbudowy na płyty,
- **etap III** - podczas cyklicznych zmian temperatury, a zarazem cyklicznego rozwierania i zamykania pęknięć, na skutek przylegania warstwy asfaltowej do podbudowy, następuje koncentracja naprężeń rozciągających w dolnych włóknach warstwy bitumicznej, tuż nad pęknięciami. Szczególne znaczenie mają surowe zimy o dużych spadkach temperatury, następuje wtedy znaczne rozwarucie pęknięć w podbudowie, a naprężenia rozciągające są największe.
- **etap IV** w trzech podetapach, zachodzących jednocześnie lub osobno:
  - **etap IVa** - wraz ze spadkiem temperatury, zwiększają się naprężenia rozciągające i zmniejsza wytrzymałość na rozciąganie. W momencie zrównoważenia naprężeń i wytrzymałości na rozciąganie następuje pęknięcie warstwy bitumicznej w dolnych włóknach,
  - **etap IVb** - na skutek zmian temperatury, może nastąpić zjawisko „paczenia się” płyt podbudowy związanej. Oddziaływanie od dołu na warstwy bitumiczne może doprowadzić do powstania w niej pęknięcia w górnych, powierzchniowych włóknach.



- **etap IVc** - pod wpływem ruchu pojazdów następują pionowe ruchy krawędzi pęknięć i na skutek ścinania warstw bitumicznych pęknięcie propaguje ku górze.

Etap IV, warianty a, b i c, mogą zachodzić jednocześnie. Wtedy spękanie w warstwie bitumicznej powstaje jednocześnie w dolnej i górnej strefie, a spękanie propaguje z góry i z dołu, aż do spotkania i utworzenia jednego pęknięcia przez całą grubość warstwy.

Najważniejsze czynniki wpływające na częstotliwość tworzenia się spękań w podbudowie związanej są następujące:

- skład materiałowy podbudowy:** zawartość lepiszcza (cementu), rodzaj lepiszcza, rodzaj i uziarnienie mieszanki mineralnej, zawartość wody w mieszance; czynniki te mają wpływ na wytrzymałość i współczynnik skurczu termicznego podbudowy.
- grubość warstw bitumicznych** leżących na podbudowie; w wielu krajach, w których tradycyjnie wykonuje się podbudowy związane, istnieją przepisy określające minimalną grubość warstw bitumicznych, zapobiegającą pojawieniu się spękań na powierzchni przed upływem określonego czasu.
- właściwości warstw bitumicznych,**
- warunki wbudowywania**, a wśród nich ważna jest:
  - temperatura otoczenia podczas wykonywania warstw podbudowy związanej, zaleca się unikania okresów z wysoką temperaturą powietrza,
  - właściwa pielęgnacja podbudowy związanej po wbudowaniu,
  - bardzo dobre zagęszczenie warstw bitumicznych.

Większość spękań poprzecznych rozwija się w nawierzchniach półsztywnych w ciągu pierwszych 3-4 lat po oddaniu do eksploatacji. Potem liczba pojawiających się nowych spękań spada lub nawet się zatrzymuje. Stan ten opisywany jest jako „stan całkowitego spękania” (*fully cracked state*).

Obserwuje się, że zwykle pęknięcie warstwy asfaltowej jest znacznie szersze niż podbudowy związanej. Spowodowane jest to większym współczynnikiem skurczu termicznego mieszanek mineralno-asfaltowych niż mieszanek kruszywa i cementu oraz większym spadkiem temperatury na powierzchni warstw bitumicznych, jak również większym gradientem tego spadku.

W pracy (Alenowicz, i inni, 1990) wymienia się również spękania poprzeczne jako efekt powstawania naprężeń w warstwach niezwiązanych. Zjawisko to, nazwane „thermal-susceptibility”, (wyjaśnione przez Carpentera), jest czynnikiem powodującym powstanie spękań poprzecznych w regularnych odstępach w podbudowie. Związane jest z powstawaniem naprężeń rozciągających na skutek działania skurczu podczas zamrażania warstwy. Spękania takie propagują przez warstwy asfaltowe ku powierzchni. Powstawanie tego rodzaju spękań zależy od rodzaju materiału (kruszywa), zawartości drobnych cząstek w mieszance mineralnej i warunków klimatycznych (mrozu).

Rodzaj podłoża gruntowego ma duży wpływ na powstawanie spękań. W pracy (Francken, i inni, 1997) przedstawiono pogląd, że więcej spękań pojawia się w



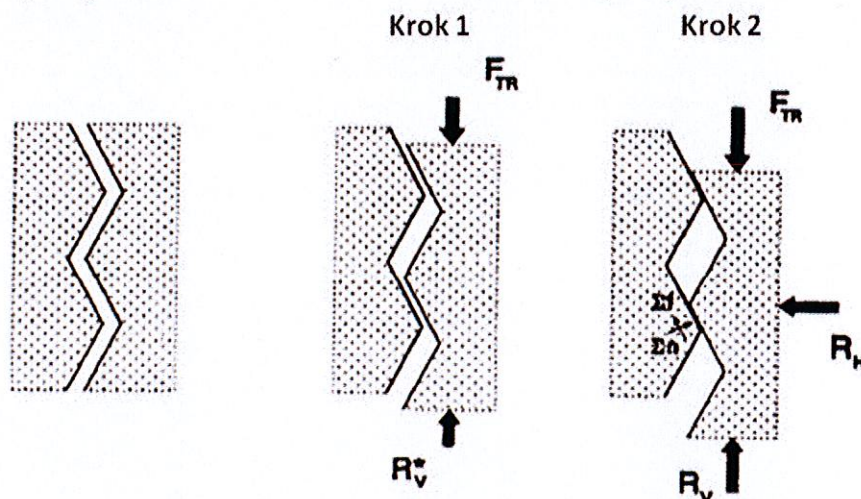
nawierzchniach z podłożem o grubszym uziarnieniu. Jest to spowodowane bilansem cieplnym nawierzchni - roczne zmiany temperatury są większe i szybsze w takich materiałach. W niektórych przypadkach, spękania skurczowe mogą także rozpocząć się w podłożu. Dzieje się tak w gruntach o dużych zmianach objętości podczas nawilgacania i wysychania (grunty gliniaste o wysokim indeksie plastyczności (Francken, i inni, 1997)). W konsekwencji tego procesu następują ruchy powierzchni podłoża.

Wpływ ruchu powoduje powstawanie spękań:

- **zmęczeniowych**, powstających początkowo w dolnej strefie warstw bitumicznych, potem na skutek działania temperatury i ruchu propagujących ku górze. Najbardziej charakterystycznym objawem zewnętrznym tego rodzaju spękań są spękania siatkowe,
- **spękania podłużne** w śladzie kół pojazdów, spowodowane działaniem poprzecznych naprężeń rozciągających powstających podczas bezpośredniego obciążenia warstwy ścieralnej kołem pojazdu. Efekt ten jest szczególnie dobrze widoczny w oddziaływaniu pojedynczych, szerokich opon (tzw. super single). W tym przypadku spękanie powstaje w warstwie ścieralnej i propaguje w głąb nawierzchni (do około 40÷50 mm (Jacobs, i inni, 1995)),
- **spękania poprzeczne** - oddziaływanie ciężkich pojazdów powoduje propagację wcześniej zainicjowanych mikrospełkań skurczowych. Propagacja ta może odbywać się w kierunku z dołu do góry - w przypadku spękanej podbudowy związanej lub z góry do dołu, w przypadku spękań niskotemperaturowych. Wpływ obciążenia ruchem na spękaną nawierzchnię przedstawia Rysunek 2.1.

Przed przejazdem

W trakcie przejazdu



Rysunek 2.1 Wpływ ruchu na spękaną nawierzchnię

W rzeczywistości nie zdarza się, aby droga była poddawana tylko jednemu rodzajowi obciążenia: temperaturze lub ruchowi. Dlatego należy rozpatrywać ich wspólne oddziaływanie na strukturę nawierzchni. Działanie temperatury powoduje ruch poziomy pęknięcia (otwieranie i zamykanie). Jednocześnie to samo pęknięcie obciążane jest kołami pojazdów. Najbardziej niekorzystnym okresem powodującym powstawanie



spękań poprzecznych w nawierzchni jest zima (okres temperatur poniżej +5°C). Powstają wtedy spękania skurczowe na powierzchni warstw bitumicznych (spękania niskotemperaturowe) i spękania skurczowe w warstwach związanych, przechodzące następnie w spękania odbite.

### 2.1.2 Metody oceny spękań

Powstające w nawierzchni spękania poprzeczne, czy to indukowane na powierzchni warstwy ścieralnej (spękania niskotemperaturowe), czy też powstające w podbudowie i przenoszone przez warstwy asfaltowe na nawierzchnię (spękania odbite) pogarszają warunki bezpieczeństwa i komfortu jazdy oraz stanowią zagrożenie dla trwałości konstrukcji drogi. Taki stan zmusza do podjęcia odpowiednich, popartych wiedzą techniczną i doświadczeniem, działań poprawiających stan nawierzchni. Planowanie i wykonywanie jakichkolwiek prac remontowych musi być poprzedzone badaniami pozwalającymi na ocenę przyczyn powstania spękań.

Proces oceny stanu spękań możemy podzielić na dwie części (Francken, i inni, 1997):

- część I - identyfikacja przyczyn,
- część II - pomiary i badania cech pęknięć.

Wyniki tak przeprowadzonej oceny pozwalają na wybór właściwej techniki naprawy pęknięcia, począwszy od technologii utrzymaniowej do całkowitego remontu. Korzystne jest, aby uzyskane dane pozwalały na wykorzystanie metody elementów skończonych w projektowaniu nakładki (de Bondt, i inni, 1995).

Proces **identyfikacji przyczyn** składa się z następujących kroków:

- ocena rodzaju konstrukcji nawierzchni, warunków klimatycznych i obciążenia ruchem,
- wizualna ocena stanu spękań,
- wykonanie odwiertów w nawierzchni w celu sprawdzenia grubości warstw, stanu warstwy związanej oraz głębokości i kierunku propagacji pęknięcia,
- ocena prawdopodobnego pochodzenia pęknięć.

Wizualna ocena spękań niezbędna jest do wyselekcjonowania odcinków wymagających dodatkowych, specjalistycznych badań. Taka ocena wykonywana jest zwykle po wybraniu reprezentatywnego odcinka drogi. W ramach oceny wybranego odcinka wykonuje się mapping spękań, ocenia sprawność odwodnienia, wpływ otoczenia drogi oraz (jeżeli występują) duże nierówności np. w postaci uskoków.

Wśród wielu metod opisanych w literaturze, pozwalających na opis stanu zniszczenia spowodowanego spękaniami poprzecznymi, jedną z najszerzej stosowanych jest metoda Indeksu Spękań *I*. Indeks Spękań oblicza się z równania wg (Yoder, i inni, 1975):

$$I = N_m + N_f + \frac{1}{2} N_h \quad (4)$$

w którym:



$N_m$  - liczba spękań tzw. „wielokrotnych”,

$N_f$  - liczba spękań tzw. „pełnych”,

$N_h$  - liczba spękań tzw. „połówkowych”.

Indeks oblicza się dla odcinków o długości 500 ft (stóp), tzn. 152.4 m., 2-pasowej drogi.

Istnieje także metoda prognozowania wartości Indeksu Spękań opracowana przez zespół Hajek i Haas, która ma ogólną postać:

$$I = f(S, a, d, m, t) \quad (5)$$

w której:

$S$  - moduł sztywności oryginalnego lepiszcza asfaltowego oznaczany metodą McLeoda (czas obciążenia 20000 sekund w temperaturze  $m$ ),

$a$  - wiek nawierzchni w latach,

$d$  - rodzaj podłoża gruntowego, np. piasek  $d=5$ , glina  $d=2$ ,

$m$  - temperatura zimy przyjęta dla celów projektowych, przyjmowana w korelacji z indeksem mrozowym,

$n$  - grubość warstw bitumicznych.

W publikacji (Yoder, i inni, 1975) zależność ta przyjmuje postać:

$$10^I = 2,4970 \cdot 10^{30} \cdot S^{(6,7966 - 0,87403 \cdot t + 1,33884 \cdot a)} \cdot (7,0539 \cdot 10^{-3})^d \cdot (3,1928 \cdot 10^{-13})^m \cdot d^{0,60263 \cdot S} \quad (6)$$

natomiast w pracy (Alenowicz, i inni, 1990) równanie to przybiera postać:

$$I = 30,3947 + (6,7966 - 0,87403 \cdot t) \log S - 2,1316 \cdot d - 0,8 \cdot m + 0,6026 \cdot S \cdot \log d \quad (7)$$

Zwykle w literaturze spotyka się podział spękań poprzecznych w zależności od ich wielkości i położenia na jezdni (pasie lub pasach ruchu). Ich rodzaje są też odzwierciedleniem zewnętrznie widocznego „rozwoju” pęknięcia w nawierzchni oraz równocześnie wielkości jej zniszczenia. W publikacji (de Bondt, i inni, 1995) spękania poprzeczne podzielono na 3 typy: A, B i C:

**Typ A** - obciążenia od pojazdów są przenoszone przez niespękane fragmenty nawierzchni i ewentualnie przez zablokowane (zaklinowane) ziarna kruszywa w wąskich pęknięciach,

**Typ B** - przejeżdżające pojazdy powodują zniszczenia i wygładzanie płaszczyzn pęknięcia, co zmniejsza klinowanie kruszywa w pęknięciu i transfer obciążenia w poprzek pęknięcia staje się coraz mniej efektywny,

**Typ C** - wielkość rozwarcia pęknięć spowodowana ruchami podbudowy i spadkiem temperatury może być dość duża, stąd ruch pojazdów wywołuje duże przemieszczenia pionowe krawędzi pęknięć i odłamywanie fragmentów warstwy ścieralnej.

(McLeod, 1987) przyjął nieco inną klasyfikację dla spękań niskotemperaturowych i podzielił je na 4 typy:

**Typ 1** - występuje na całej szerokości pasa ruchu,

**Typ 2** - rozpoczyna się na poboczu i sięga na część pasa ruchu,

**Typ 3** - rozpoczyna się w okolicach osi jezdni i sięga na część pasa ruchu,

**Typ 4** - znajduje się w środkowej części pasa ruchu i nie sięga brzegów pasa.

Jednym z najprostszych, a zarazem najefektywniejszych sposobów oceny głębokości strefy pęknięcia, kierunku propagacji spękań, stanu podbudowy związanej itp. jest wykonanie odwiertów w konstrukcji nawierzchni. Podczas wycinania odwiertów z nawierzchni należy przyjmować pewien schemat ich lokalizacji, nie sugerując się tylko miejscami o największym rozwarciu pęknięcia, ale także punktami na powierzchni z początkiem pęknięcia lub nie wykazującym pęknięcia, ale podejrzeniem jego występowania głębiej.

Zebranie danych o rodzaju konstrukcji, warunkach klimatycznych, obciążenia ruchem, wizualna ocena stanu pęknięć oraz wykonanie odwiertów w nawierzchni zazwyczaj pozwala na ocenę przyczyn powstania spękań. Dalsze badania są niezbędne do uzyskania bardziej dokładnych informacji, które zostaną wykorzystane do wybrania technologii naprawy.

Pomiary i badania cech pęknięcia stanowią część II oceny stanu spękań składają się z następujących czynności:

- wykonanie pomiarów FWD na niespękanej nawierzchni (najlepiej między śladami kół), w celu określenia modułów sztywności warstw E i sprężystości podłoża Es,
- wykonanie pomiarów FWD w celu określenia wpływu ruchu na powstawanie zniszczeń (pomiar w śladach kół),
- wykonanie ugięć na połączeniach i pęknięciach w celu określenia sposobu przekazywania obciążeń przez połączenia lub pęknięcia. Pomiary te powinny być wykonane równocześnie z pomiarami szerokości (rozwarcia) pęknięć. Pomiary szerokości połączeń mogą służyć ponadto do oszacowania czy nie nastąpiła częściowa utrata podparcia przez powstanie pustki lub „pompowanie” pod dnem płyty - jest to szczególnie ważne w nawierzchniach betonowych,
- pomiary ruchów pęknięcia w celu dokładnego określenia przemieszczeń płyt nawierzchni i przekazywania obciążeń przez pęknięcia, C.A.M.
- pomiary szerokości rozwarcia pęknięć w połączeniu z odstępami między kolejnymi pęknięciami spowodowanymi zmianami temperatury i wilgotności.



**Pomiary FWD do określenia modułów E wszystkich warstw są badaniem standardowym, które na podstawie otrzymanej czasu ugięć (odczytów geofonów), programów do tzw. wstecznego obliczania modułów warstw i danych o temperaturze nawierzchni, otrzymujemy informacje o rozkładzie sztywności wszystkich rodzajów warstw nawierzchni.**

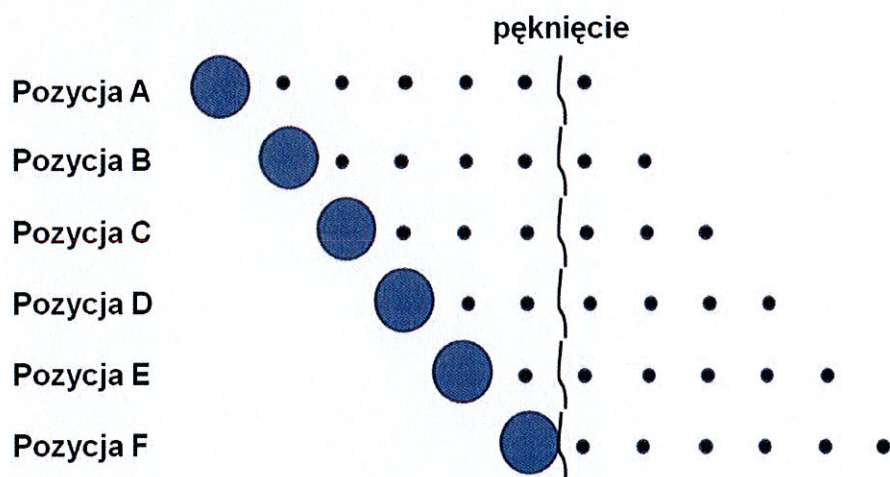
**Pomiary wpływu ruchu na powstawanie uszkodzeń** wykonuje się również przy użyciu ugięciomierza dynamicznego FWD. Badania przeprowadza się w następujących miejscach:

- w śladach kół - wyniki reprezentują stan strefy obciążonej ruchem,
- między śladami kół - wyniki reprezentują stan strefy nieobciążonej, domyślnie struktury pierwotnej (oryginalnej).

#### **Określenie przekazywania obciążeń przez pęknięcia**

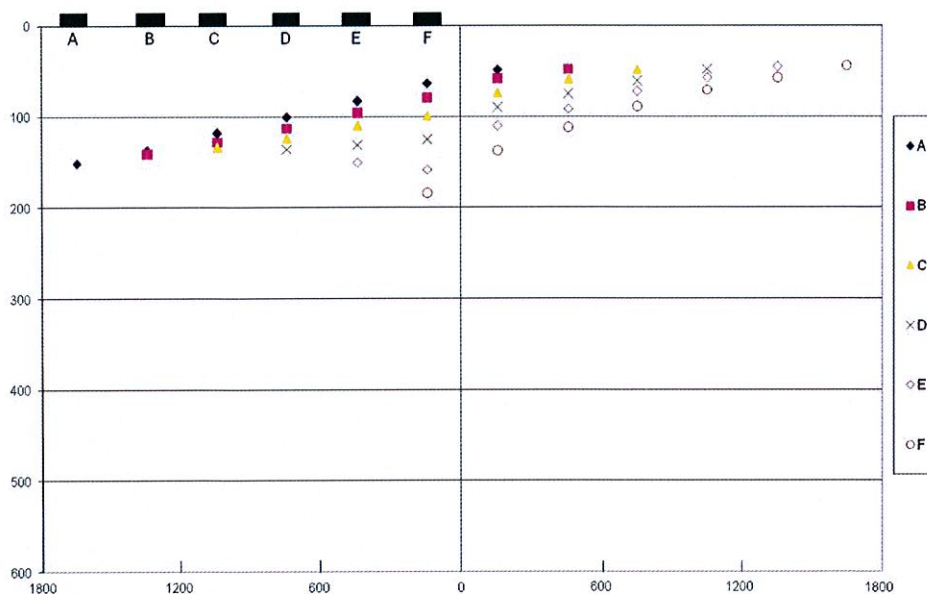
Sposób i wielkość przekazywania obciążenia przez pęknięcie ma duże znaczenie dla określenia potencjalnej głębokości oraz wielkości przemieszczeń krawędzi pęknięcia. Jest to zarazem pewien wskaźnik szkodliwości pęknięcia. Do wykonywania pomiaru niezbędny jest aparat FWD. Metoda jest opisana w wielu pracach m.in. w (Francken, i inni, 1997), (de Bondt, i inni, 1995) i (Molenaar, 1995).

Aparat FWD należy ustawić w taki sposób, aby pęknięcie znajdowało się między geofonami (Rysunek 2.2).

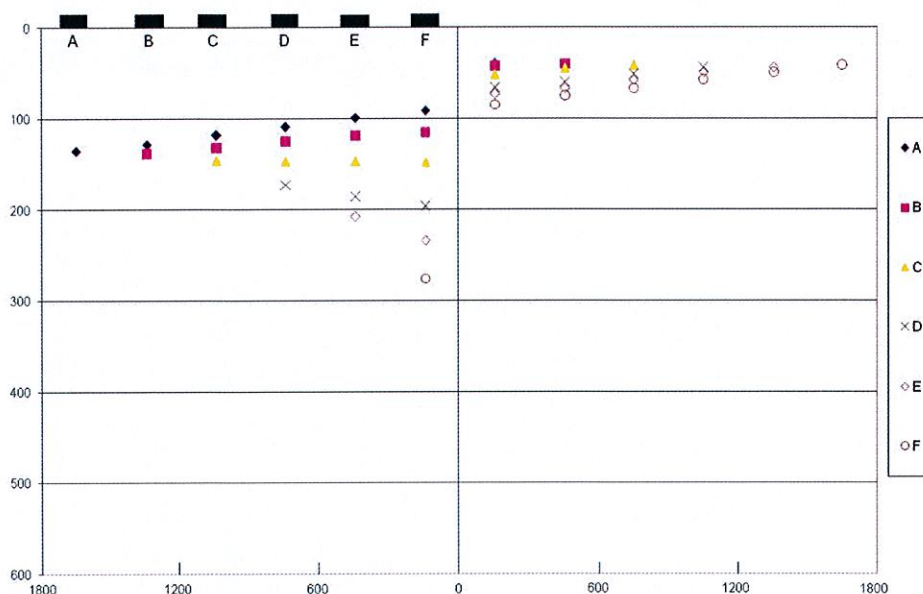


Rysunek 2.2 Schemat ustawienia FWD w badaniach przekazywania obciążenia

Na Rysunkach 2.3 i 2.4 przedstawiono wyniki uzyskane dzięki takiemu pomiarowi. Na rysunkach tych widać różnicę w wielkości przemieszczeń między miejscem z dobrym przekazywaniem obciążeń (Rysunek 2.3) a złym (Rysunek 2.4). Podobnie mogą wyglądać ugięcia w przypadku porównania pomiarów wykonanych latem i zimą, na tym samym pęknięciu. Wynika to z większego rozwarcia pęknięcia w niskiej temperaturze.



Rysunek 2.3 Wykres ugięć na spękaniu z dobrym przekazywaniem obciążenia



Rysunek 2.4 Wykres ugięć na spękaniu z brakiem przekazywania obciążenia

Z Rysunku 2.4 widać ponadto, że każda nakładka nad spękaniem będzie bardzo obciążona w zimie, przez złożenie:

- poziomych termicznych naprężeń rozciągających, występujących na skutek skurczu termicznego warstwy związanej,
- pionowych naprężeń ścinających spowodowanych ruchem pojazdów i słabego przenoszenia obciążenia przez pęknięcie (duża szerokość pęknięcia).

Zrozumiałe jest, że ze względów praktycznych nie stosuje się pełnej procedury pomiarów FWD (punkty od A do F). Zwykle pomiar odbywa się tylko w jednej konfiguracji obciążenia (F). Niektóre laboratoria stosują ustawienia w pozycji (E) lecz za



to przy nieco innych rozstawach geofonów (geofon 2 – 200mm, a geofon 3 – 300 mm od centrum obciążenia).

Wielkość przekazywanych obciążeń przez pęknięcie oblicza się ze wzoru:

$$LT = \frac{D_U}{D_L} \quad (8)$$

w którym:

$D_U$  - ugięcie nawierzchni po nieobciążonej stronie pęknięcia,

$D_L$  - ugięcie nawierzchni po obciążonej stronie pęknięcia,

Dzięki tak obliczonemu współczynnikowi LT, możliwe są dwie metody analizy efektywności przekazywania obciążeń przez pęknięcie:

a) na podstawie **danych empirycznych** określono następujące kryteria oceny efektywności przekazywania obciążeń:

- dobra,  $LT > 0,9$
- satysfakcjonująca,  $LT > 0,5$
- zła,  $LT < 0,5$

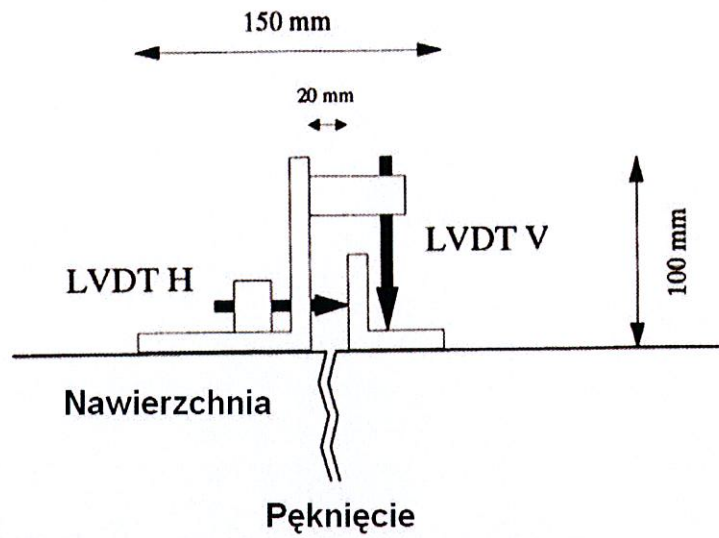
b) stosowanie metody elementów skończonych (MES) jako metody analizy obliczeniowej.

**Pomiar aktywności pęknięcia** (ruchów i szerokości) podczas ruchu drogowego realizowany jest specjalistycznym sprzętem pomiarowym. Sposób przekazywania obciążenia przez pęknięcie wykorzystujący ugięciomierz FWD jest bardzo szybką i efektywną metodą oceny stanu pęknięcia. Jednak stosowany tam sposób obciążenia nawierzchni w okolicy pęknięcia jest w pełni dynamiczny, z obciążeniem działającym pionowo na nawierzchnię. W rzeczywistych warunkach na drodze, obciążenia przekazywane są przez toczące się koło. Reakcja struktury nawierzchni zaburzonej przez pęknięcie podczas przejazdu koła pojazdu jest nieco inna niż symulacja w FWD.

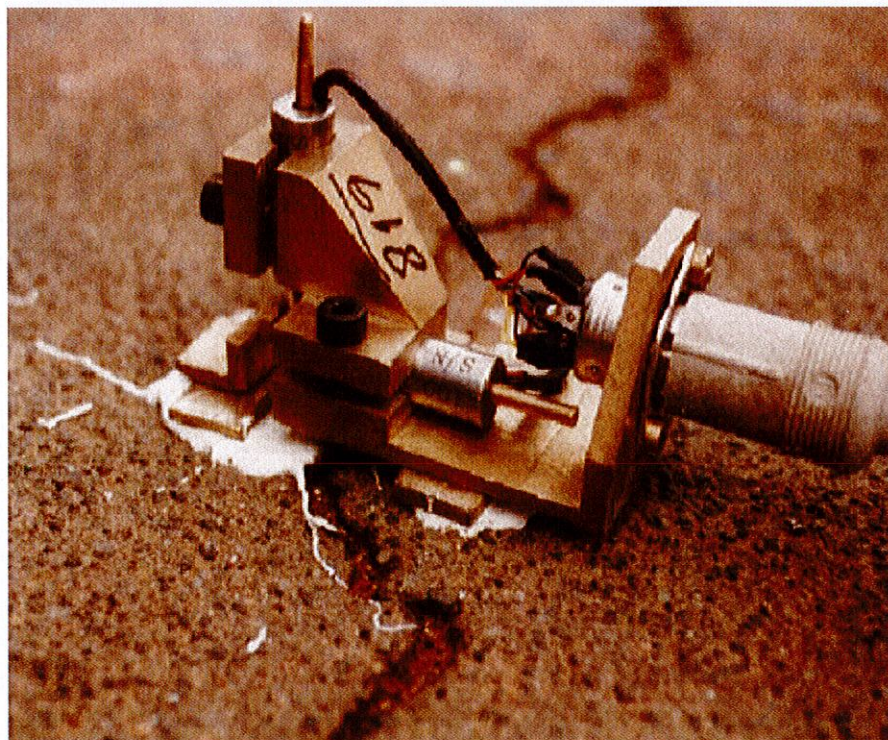
Aby zbadać reakcję nawierzchni i monitorować przemieszczenia pęknięć stworzono C.A.M. (Crack Activity Meter) przedstawiony na Rysunkach 2.5 i 2.6 CAM umożliwia ciągły pomiar przemieszczeń pionowych i poziomych w czasie przejazdu koła przez pęknięcie w płycie. Przykład typowego wyniku ilustruje Rysunek 2.7.

Pomiar metodą CAM wykorzystuje się bardzo często do określania technologii naprawy pękniętych nawierzchni betonowych. Dzięki CAM sprawdza się czy występuje tzw. „klawiszowanie” płyt. Jeśli tak, to płyty należy odprężyć (skruszyć) przed wykonaniem nakładki, ponieważ duże przemieszczenia płyt spowodują powstanie spękań odbitych w nakładce. Czynnikiem mającymi wpływ na wynik pomiaru (wielkość przemieszczeń) są: temperatura i wilgotność podłoża i podbudowy.



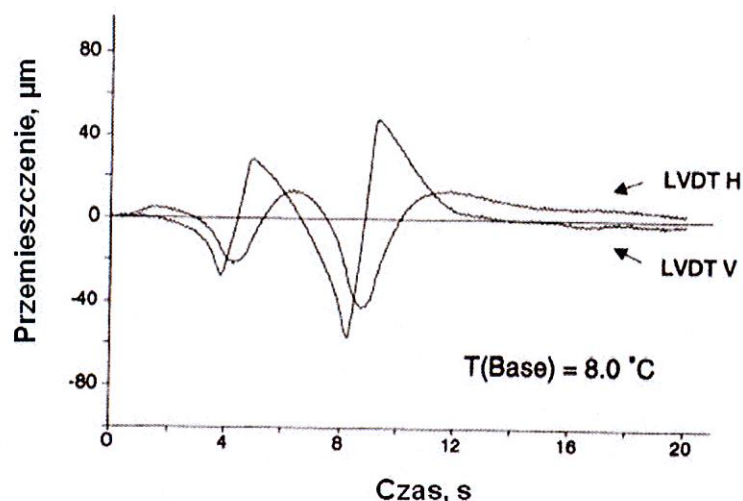


Rysunek 2.5 Schemat pomiaru przemieszczeń nawierzchni w obrębie pęknięcia metodą CAM (Francken, i inni, 1997)



Rysunek 2.6 Urządzenie CAM podczas pomiaru (du Plessis, 2007)





Rysunek 2.7 Wynik pomiaru urządzeniem CAM (Francken, i inni, 1997)

Spadek temperatury powoduje zwiększanie rozwarcia pęknięć, obniżając wielkość przekazywanego obciążenia przez pęknięcie i wielkość przemieszczeń pionowych. Stąd, pomiary rozwarcia pęknięć spowodowane zmianami temperatury są dość ważną częścią wykonywanych pomiarów.

Pomiar wykonuje się następująco:

- na brzegach pęknięcia instaluje się „szpilki”, będące ruchomymi punktami pomiarowymi,
- odległość pomiędzy szpilkami mierzona jest przez czujnik zegarowy umocowany do stałej ramy nie podlegającej wpływom temperatury,
- czujnik temperatury zewnętrznej zbiera dane o temperaturze powietrza,
- czujnik temperatury wewnętrznej zbiera dane o temperaturze podbudowy stabilizowanej cementem (znajduje się on w otworze wywierconym w nawierzchni i sięgającym środka grubości warstwy); należy zwrócić uwagę na dokładne umieszczenie czujnika, ponieważ gradient temperatury wewnątrz warstwy betonowej jest zbliżony do zera (Francken, i inni, 1997); jeśli gradient ten nie jest równy zero to następuje paczanie się warstwy, a pomiar rozwarcia pęknięcia jest zakłócony i nieprawidłowy.

### Metody oceny spękań poprzecznych stosowane w Polsce

Nie wszystkie metody oceny spękań stosowane w świecie są możliwe do zastosowania w Polsce, głównie z przyczyn sprzętowych. W naszym kraju, badania stanu pęknięć bazują na ocenie wizualnej oraz pomiarach ugięć. Według Katalogu<sup>1</sup> w ramach diagnostyki nawierzchni, przed opracowaniem technologii remontu drogi należy określić:

- indeks spękań

<sup>1</sup> Katalog Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Pólsztynowych, IBDiM, 2001



- współpracę krawędzi płyt w pęknięciu
- warunki podparcia krawędzi pęknięcia

**Indeks spękań „IS”** jest miarą intensywności występowania spękań. Oblicza się go ze wzoru:

$$IS = \frac{1}{2}L_n + L_p \quad (9)$$

w którym:

$L_n$  – liczba spękań na niepełną szerokość jezdni na 100m długości

$L_p$  - liczba spękań na pełną szerokość jezdni na 100m długości

Pod względem wartości „IS” przyjęto następującą klasyfikację odcinków nawierzchni:

|                 |                           |
|-----------------|---------------------------|
| $IS \leq 1$     | - odcinki nie spękane     |
| $1 < IS \leq 3$ | - odcinki średnio spękane |
| $IS > 3$        | - odcinki bardzo spękane  |

Jeśli odcinek nawierzchni nie jest spękany lub jest średnio spękany, to zaleca się naprawę pojedynczych pęknięć. Natomiast w przypadku nawierzchni bardzo spękanych zalecane jest wykonanie ciągłej naprawy na całej spękanej powierzchni, w postaci membrany przeciwspekaniowej.

Badanie **współpracy płyt „k”** wykonuje się w celu określenia możliwości pojawienia się ścinania w obrębie pęknięcia pod obciążeniem ruchem, co wyklucza możliwość stosowania membrany przeciwspekaniowej.

Oceny dokonuje się na podstawie pomiarów ugięć nawierzchni, poprzez porównanie wartości ugięć na części obciążonej i nieobciążonej krawędzi pęknięcia (Procedura 6, Załącznik C Katalogu). Współczynnik „k” wyznacza się ze wzoru:

$$k = \frac{2y_2}{y_1 + y_2} \quad (10)$$

w którym:

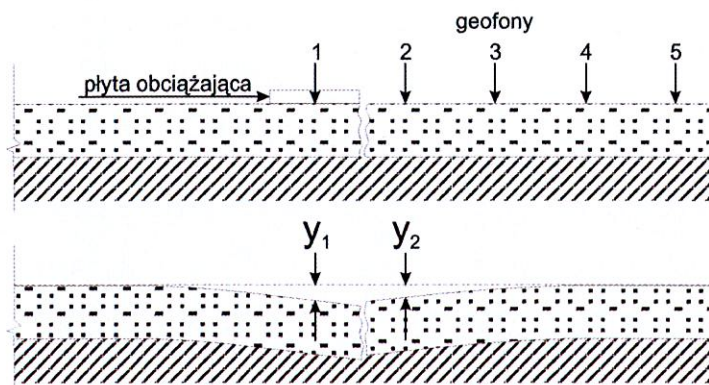
$y_1$  – ugięcie krawędzi obciążonej

$y_2$  - ugięcie krawędzi nieobciążonej

Pod względem wartości „k” przyjęto następującą klasyfikację odcinków nawierzchni:

|                     |                             |
|---------------------|-----------------------------|
| $k \leq 0,7$        | - brak współpracy płyt      |
| $0,7 < k \leq 0,95$ | - częściowa współpraca płyt |
| $k > 0,95$          | - pełna współpraca płyt     |





Rysunek 2.8 Schemat obciążenia nawierzchni w badaniu współpracy płyt, przy zastosowaniu ugięciomierza dynamicznego FWD

Badanie **warunków podparcia „s”** krawędzi płyty wykonuje się w celu określenia stanu podbudowy i podłoża pod pęknięciem. Daje możliwość bezinwazyjnego rozpoznania, czy zostało wymyte podłoże pod krawędzią płyty i dobrania na tej podstawie odpowiedniej technologii naprawy.

Oceny dokonuje się na podstawie pomiarów ugięć nawierzchni na krawędzi i w połowie rozpiętości płyty i i porównaniu tych wartości (Procedura 7, Załącznik C Katalogu). Współczynnik „s” wyznacza się ze wzoru:

$$s = \frac{y_1}{y_0} \quad (11)$$

w którym:

$y_1$  – ugięcie krawędzi obciążonej

$y_0$  - ugięcie pomierzone w środku rozpiętości płyty

Pod względem wartości „s” przyjęto następującą klasyfikację warunków podparcia płyty:

- $s < 1,4$             - dostateczne podparcie w obrębie spękania
- $s \geq 1,4$             - niedostateczne podparcie w obrębie spękania

### Nowoczesne metody oceny stosowane w Europie

W ostatnim czasie szybko rozwijają się metody identyfikacji spękań, które zastępują klasyczne metody wizualne. Są to systemy pomiarowe (Rysunek 2.9), które umożliwiają rejestrację cyfrowego obrazu powierzchni nawierzchni i występujących na niej spękań. Dzięki użyciu technologii oświetlenia LED pozostaje niewrażliwy na zmieniające się warunki oświetleniowe. Błyski światła LED mają wysoką intensywność w widmie światła nagrywanego, które kilkukrotnie przewyższa intensywność światła dziennego. System znakomicie współpracuje z innymi urządzeniami takimi jak profilograf laserowy.



Dzięki wysokiej rozdzielczości w porównaniu z tradycyjnymi kamerami zniekształcenia zredukowane są do minimum, a uzyskany obraz nawierzchni (Rysunek 2.10) umożliwia wykonywanie interpretacji uszkodzeń.



Rysunek 2.9 Belka doświetlająca powierzchnię nawierzchni



Rysunek 2.10 Obraz zarejestrowanego uszkodzenia na powierzchni nawierzchni

## 2.2 Cechy elektryczne ośrodka

Cechy elektryczne ośrodka są charakteryzowane przez przenikalność elektryczną  $\epsilon$ , podatność magnetyczną  $\mu$  i przewodność (konduktywność)  $\sigma$ . 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:

$$\vec{D} = \epsilon * \vec{E} \quad (12)$$

$$\vec{B} = \mu * \vec{H} \quad (13)$$

$$\vec{J} = \sigma * \vec{E} \quad (14)$$

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,

$\varepsilon$  - przenikalność elektryczna,

$\mu$  - podatność magnetyczna,

$\sigma$  - przewodność.

Dla ośrodka określa się również względną przenikalność elektryczną  $\varepsilon_r$  i względną podatność magnetyczną  $\mu_r$ :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (15)$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (16)$$

gdzie:

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

$\varepsilon_0$  - przenikalność elektryczna próżni ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m)

$\varepsilon_r'$  - część rzeczywista (definiuje właściwości ośrodka),

$\varepsilon_r''$  - część urojona (odpowiada za straty w ośrodku),

$\mu_0$  - 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, i inni, 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 kowalencyjnie<sup>2</sup> związanych skał formujących minerały, takich jak kwarc lub mika, nie są przewodnikami i w momencie

<sup>2</sup> Wiązanie kowalencyjne to rodzaj wiązania chemicznego, którego istotą jest istnienie pary elektronów, współdzielonych w porównywalnym stopniu przez oba atomy tworzące to wiązanie.

zestknięcia 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.

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

$$\rho = \frac{1}{\sigma} [\Omega \cdot m] \quad (17)$$

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, i inni, 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 małowstratnego (takiego jak np. piaski, żwiry). Współczynnik tłumienia fali jest wprost proporcjonalny do przewodności i przyjmuje w przybliżeniu postać:

$$\alpha = \frac{1,69 \cdot 10^3 \cdot \sigma}{\sqrt{\epsilon_r}} [dB/m] \quad (18)$$

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

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (19)$$

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, prędkość fali i tłumienia wybranych materiałów geologicznych (Moorman, 2001)(Morey, 1998)

| ośrodek     | stała dielektryczna<br>$\epsilon_r$ | przewodność $\sigma$<br>[mS/m] | prędkość fali $v$<br>[cm/ns] | tłumienie $\alpha$<br>[dB/m] |
|-------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| powietrze   | 1                                   | 0                              | 30                           | 0                            |
| słodka woda | 80                                  | 0,5                            | 3,3                          | 0,1                          |
| słona woda  | 80                                  | 30000                          | 1                            | 1000                         |
| 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                      |

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

$$v_f = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega}{\beta} (\sigma \ll \omega \cdot \epsilon) \quad (20)$$

gdzie:

$\omega$  - częstotliwość kątowna (pulsacja),  $k$  - liczba falowa,  $\beta$  - współczynnik fazy,

i zależności prędkości fali elektromagnetycznej w próżni  $c$ :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (21)$$

otrzymujemy następujący wzór:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (22)$$

gdy:

$$\mu_r = 1.$$

### 2.3 Propagacja fal elektromagnetycznych

Propagację fal elektromagnetycznych w dowolnym ośrodku opisują prawa opracowane przez szkockiego fizyka Jamesa Clarka Maxwella. 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: 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.

Dla potrzeb techniki radarowej istotne jest rozwiązanie 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:

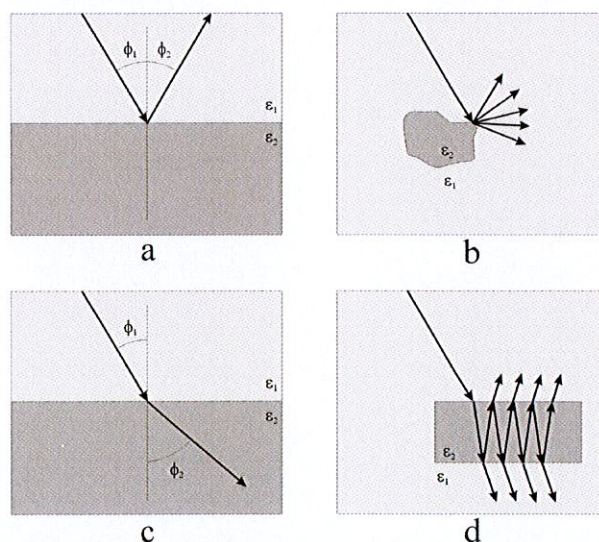
$$\vec{H} = \frac{k}{i \cdot \omega \cdot \mu} \cdot \hat{k} \times \vec{E} \quad (23)$$

$$\vec{E} = \frac{k}{\sigma - i \cdot \omega \cdot \varepsilon} \cdot \hat{k} \times \vec{H} \quad (24)$$

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 2.11) (Daniels, 2000). Zjawiska te wpływają zarówno pozytywnie jak i negatywnie na jakość uzyskiwanych wyników.



Rysunek 2.11 Mechanizmy rozpraszania fali: (a) odbicie kierunkowe, (b) refrakcja (załamanie), (c) dyfrakcja, (d) rezonans

W technice radarowej najistotniejszym jest przypadek odbicia i refrakcji (załamania) fali na granicy dwóch materiałów o różnych właściwościach. Przypadek taki przedstawiono na Rysunku 2.12. 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 równoległe 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

$$\gamma_{\perp} = \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \quad (25)$$

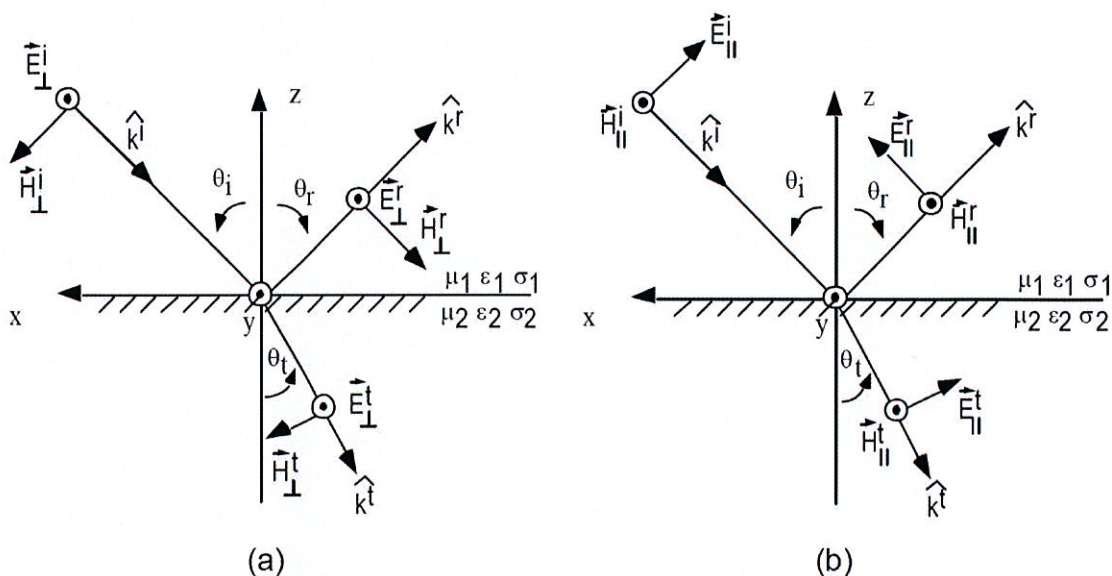
współczynnik odbicia fali TM

$$\gamma_{\parallel} = \frac{Z_2 \cos \theta_t - Z_1 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_t + Z_1 \cos \theta_i} \quad (26)$$

gdzie:

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

$\theta_i$  i  $\theta_t$  - odpowiednio kąt padania i załamania



Rysunek 2.12 Odbicie i przenikanie fali: (a) TE i (b) TM

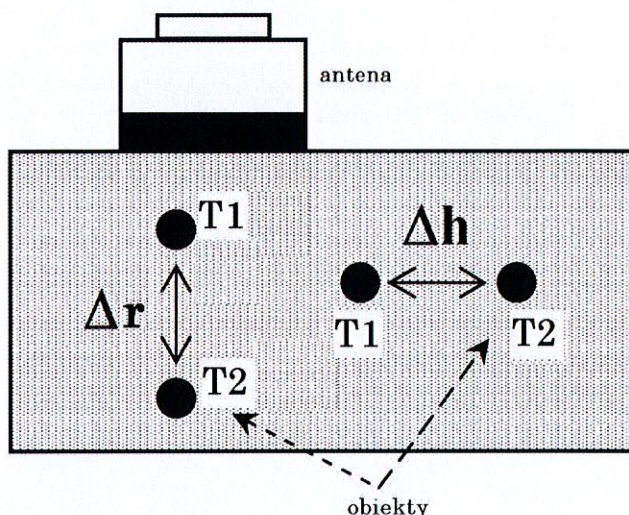
Ponieważ większość anten stosowanych w technice radarowej jest liniowo i horyzontalnie spolaryzowanych (TE) należy rozważyć jeszcze jeden przypadek gdy płaska fala elektromagnetyczna pada na płaszczyznę pod kątem prostym ( $\theta_i = \theta_t = 0^\circ$ ). W takim przypadku współczynnik odbicia fali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

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (27)$$

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.

## 2.4 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 2.13).



Rysunek 2.13 Rozdzielczość pionowa  $\Delta v$  i pozioma  $\Delta h$

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 2.14.

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:

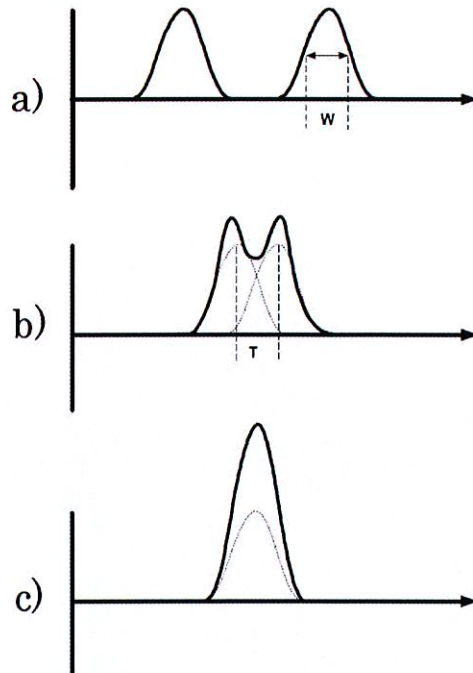


$$t_1 = \frac{2d}{v} \quad (28)$$

$$t_2 = \frac{2d + 2\Delta r}{v} \quad (29)$$

gdzie:

$d$  – głębokość położenia obiektu,  $v$  – prędkość fali.



Rysunek 2.14 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:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2\Delta r}{v} \quad (30)$$

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

$$\Delta r \geq \frac{Wv}{4} \quad (31)$$

Na podstawie wzoru (2.20) 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:

$$t_1 = \frac{2d}{v} \quad (32)$$

$$t_2 = \frac{2(d^2 + \Delta h^2)^{\frac{1}{2}}}{v} \quad (33)$$

natomiast różnica w czasie nadejścia impulsu może być wyrażona jako:

$$\Delta t = \frac{2[(d^2 + \Delta h^2)^{\frac{1}{2}} - d]}{v} \quad (34)$$

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

$$\Delta t = \frac{\Delta h^2}{vd} \quad (35)$$

co z kolei wskazuje, że:

$$\Delta h \geq \sqrt{\frac{vdW}{2}} \quad (36)$$

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  $f_c$ :

$$W = \frac{1}{B} = \frac{1}{f_c} \quad (37)$$

gdzie:

$$\lambda_c = \frac{f_c}{v} \quad (38)$$

rozdzielczość pozioma może być wyrażona następująco:

$$\Delta h = \sqrt{\frac{d\lambda_c}{2}} \quad (39)$$

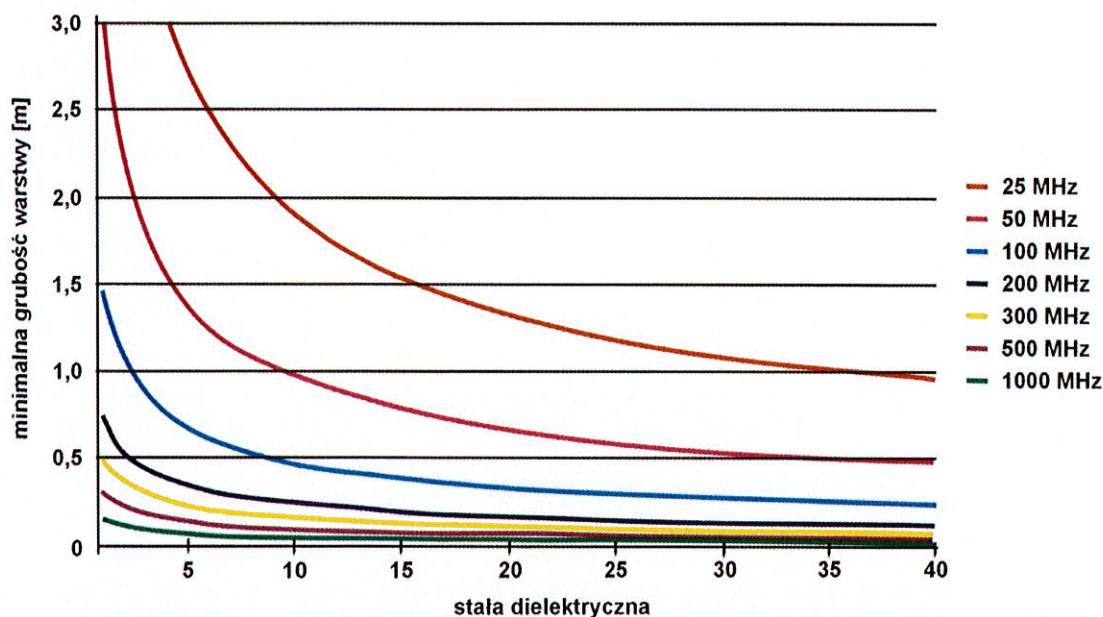
gdzie  $\lambda_c$  jest długością fali przy częstotliwości centralnej anteny.

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 2.15), 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 2.15 Rozdzielczość w funkcji częstotliwości emitowanej fali

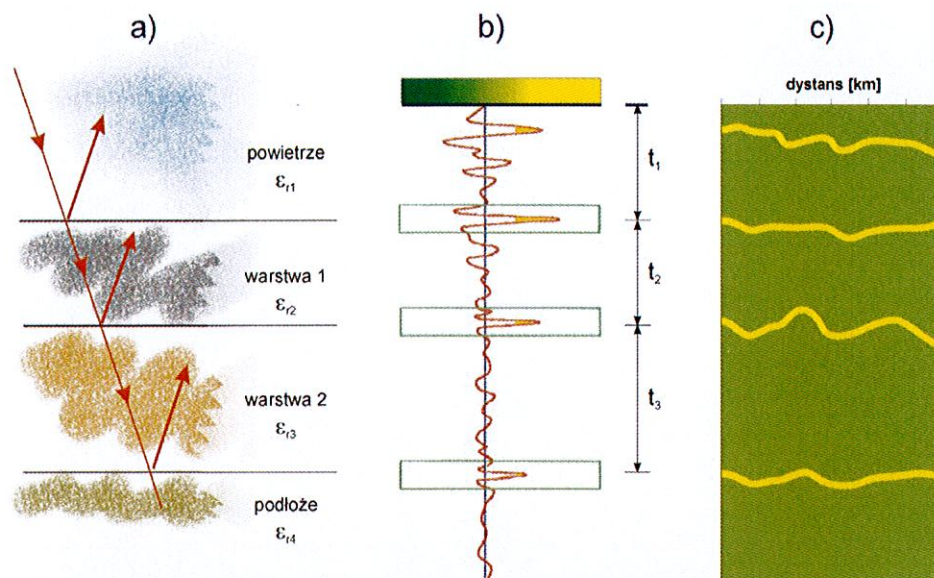
## 2.5 System pomiarowy

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 2.16)(Sudyka, J., 2006).

Rozróżnia się dwa rodzaje anten: ground-coupled i air-coupled (horn) (Rysunek 2.17). 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 muszą pozostawać 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 2.16 Zasada rejestracji sygnałów odbitych w systemach GPR (a – uproszczony obraz przejścia impulsu elektromagnetycznego, b – zarejestrowany sygnał odbity, c – uproszczony falogram z pomiarów radarowych)



Rysunek 2.17 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).



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, identyfikacja spękań oraz pomiar stopnia zawilgocenia (Saarenketo, i inni, 2000). W nawierzchniach betonowych oraz w diagnostyce mostowej technika radarowa dodatkowo wykorzystywana jest w ocenie rozwarstwień, lokalizacji pustek oraz rozmieszczeniu zbrojenia.

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 doświadczonego 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.

### 3 Laboratoryjna ocena zakresu i dokładności techniki radarowej w identyfikacji i ocenie spękań

#### 3.1 Opis stanowiska badawczego

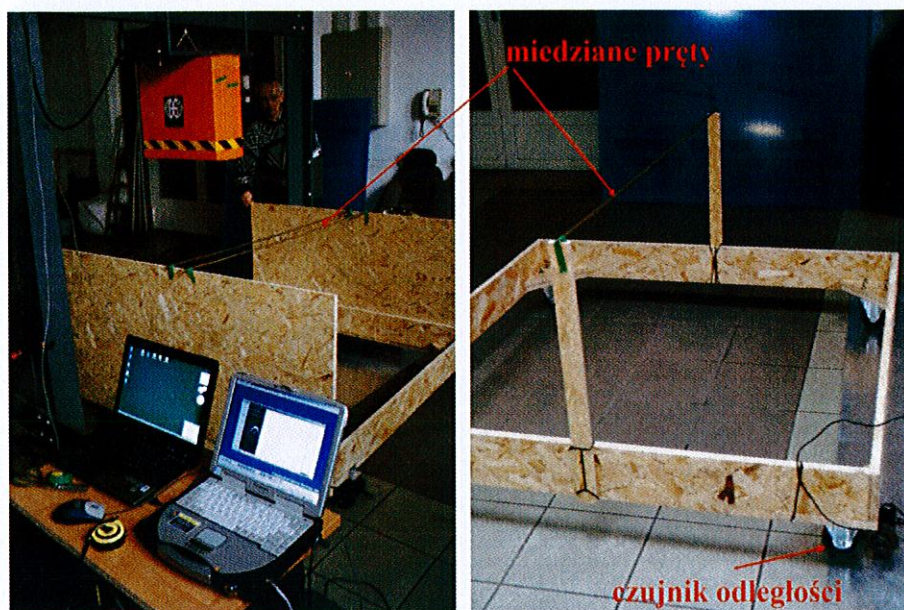
Stanowisko badawcze zostało zaprojektowane i wykonane tak, aby możliwe było symulowanie spękań o różnych rozmiarach, występujących na różnych głębokościach. Stelaż stanowiska wykonano w całości z materiałów słabo odbijających fale elektromagnetyczne (winidur), bez użycia jakichkolwiek łączników metalowych. Wprowadzono również możliwość płynnego opuszczania i podnoszenia anteny co pozwala na prowadzenie tzw. pomiarów zbliżeniowych. Gotowe stanowisko przedstawiono na Rysunku 3.1.



Rysunek 3.1 Ustawianie stanowiska badawczego

Dodatkowo wykonano ruchomą platformę (Rysunek 3.2), dzięki której możliwe jest symulowanie ruchu anteny w poziomie, tak jak to ma miejsce w trakcie pomiarów terenowych.





Rysunek 3.2 Platforma z zainstalowanym czujnikiem odległości i elementem symulującym spękania

Na platformie umieszczano elementy symulujące spękania poprzeczne. Wprowadzenie do badań elementów o różnych kształtach i rozmiarach miało na celu zweryfikowanie teoretycznych możliwości pomiarowych urządzenia oraz określenie czynników jak np. kształt spękania, które miałyby wpływ na jakość uzyskiwanych wyników. Rezultaty tych badań przedstawiono w kolejnych punktach niniejszego sprawozdania.

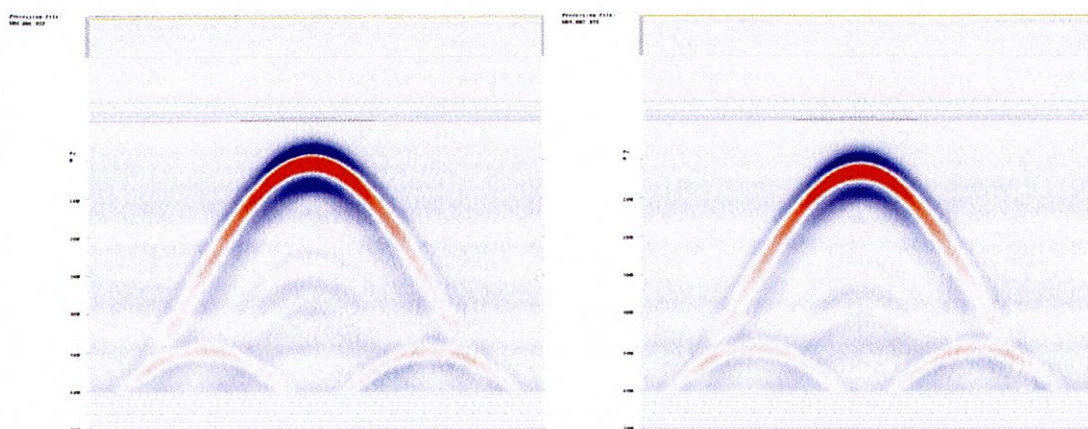
### 3.2 Badania laboratoryjne jakości rejestrowanych sygnałów odbitych

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.

Podobnie jak w przypadku odspojen badania laboratoryjne sygnałów generowanych przez szczeliny nastroczają poważnych trudności, jeśli idzie o zbudowanie modelowej szczeliny wewnątrz struktury warstwowej tak, żeby właściwy jej sygnał nie był nałożony na pik główny i na refleks od dolnej powierzchni stosu, szczególnie gdy chodzi o nakładanie się pakietów czołowych tych sygnałów. Rozwiązaniem tego problemu okazało się zastosowanie prętów (na przykład metalowych), które ułożone i przesuwane poziomo pod anteną stanowią wyidealizowane modele pojedynczych spękań. Sygnał od takiego modelowego spękania jest wtedy całkowicie wolny od sygnałów refleksyjnych górnej i dolnej powierzchni stosu, jakie byłyby obecne w bardziej zbliżonym do sytuacji terenowej modelu warstwowym. Dzięki takiemu wydzieleniu możemy dokładnie obejrzeć strukturę sygnału rejestrowanego przy skanowaniu szczeliny (Rysunek 3.3). Szczelinom prostopadłym do kierunku osi pudła anteny i zarazem kierunku jej ruchu (typowa sytuacja terenowa), odpowiada pakiet czołowy zbliżony kształtem do refleksu



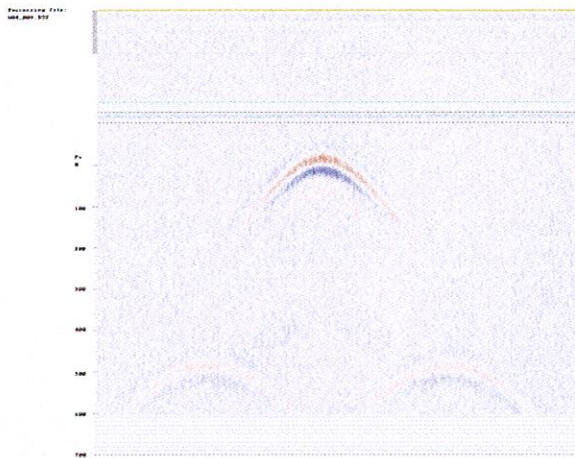
pojedynczego, aczkolwiek nie jest on z nim identyczny. Rozmiary poprzeczne takich liniowych pęknięć są zazwyczaj małe w porównaniu z długością fali anteny 2 GHz, przez co kształt sygnału prawie nie zależy od rozmiarów poprzecznych szczeliny, a jedynie amplituda sygnału jest proporcjonalna do pola przekroju poprzecznego i współczynnika odbicia właściwego kontrastowi materiałowemu pomiędzy szczeliną, a otaczającym ją ośrodkiem.



Rysunek 3.3 Echogramy uzyskane w wyniku przesuwania metalowego pręta prostopadłego do osi anteny, na poziomie 42 cm pod anteną, symulującego szczelinę spękaniową; po lewej w przypadku pręta o średnicy 1 cm, a po prawej w przypadku pręta o średnicy 0.5 cm. Dwie hiperbole poniżej hiperboli głównej są obrazem ramy, na której został zamocowany pręt. Sygnał powstający w wyniku obecności pręta ma kształt zbliżony w ogólnym zarysie do sygnału wzorcowego uzyskiwanego przy odbiciu od blachy, ale nie jest z nim identyczny.

W przypadku szczeliny równoległej do osi pudła anteny, a przesuwanej prostopadle do kierunku osi pudła, generowany sygnał jest znacznie słabszy (Rysunek 3.4), a jego kształt znacząco przypomina dodatni refleks podwójny. Jest to zatem sytuacja wygaszenia odbieranego sygnału i oznacza to w szczególności, że dominujący w polu promieniowania anteny kierunek pola elektrycznego jest mniej więcej prostopadły do pudła anteny. Opisana wcześniej konfiguracja z osią pudła skierowaną wzdłuż kierunku ruchu i zarazem wzdłuż osi drogi jest zatem optymalna przy diagnozie spękań, które są zwykle skierowane poprzecznie do osi drogi. Generowany sygnał jest bowiem wtedy najsilniejszy.





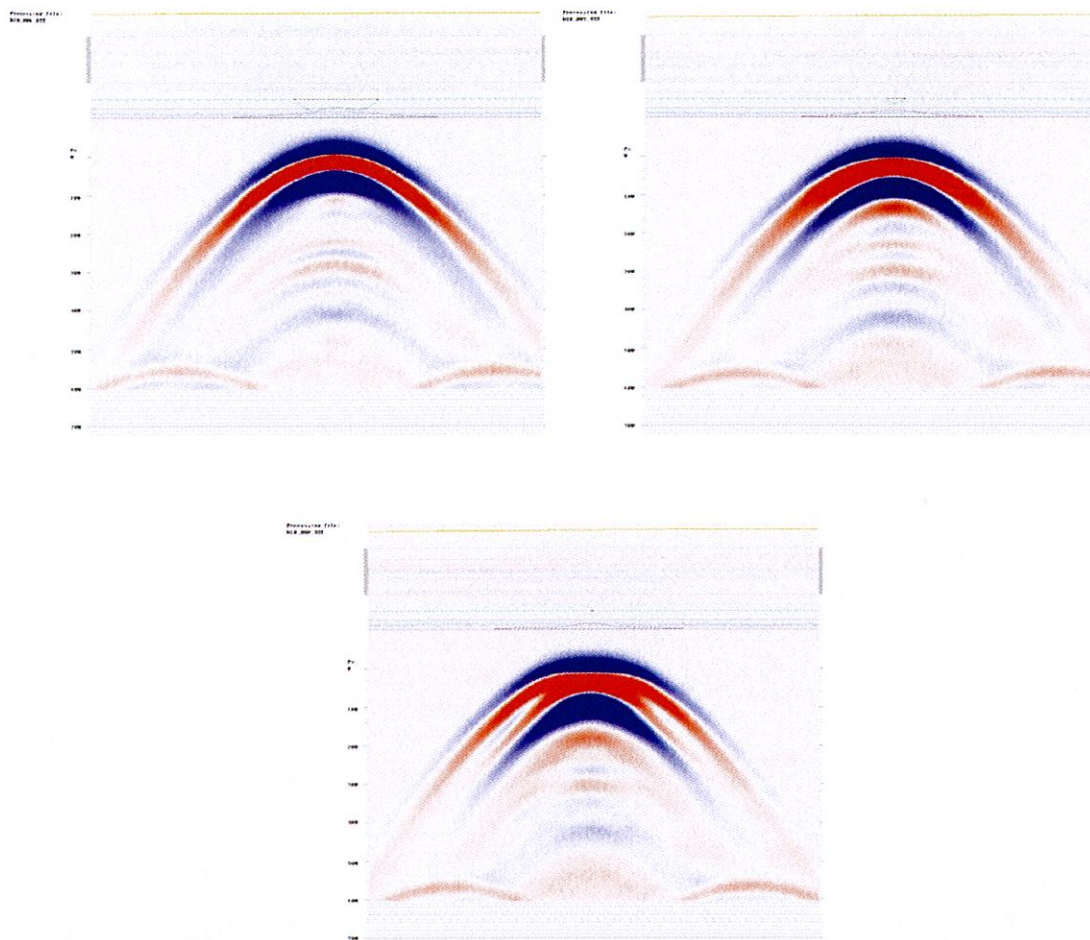
Rysunek 3.4 Echogram uzyskany w wyniku przesuwania metalowego pręta o średnicy 1 cm równoległego do osi anteny, na poziomie 42 cm pod anteną. Dwie hiperbole poniżej hiperboli głównej są obrazem ramy, na której został zamocowany pręt. Powstający tutaj sygnał jest znacznie słabszy niż w przypadku pręta prostopadłego do osi skrzyni anteny i ma on wyraźnie odmienny kształt, który kształtem jest bliższy refleksowi podwójnemu.

Zaprezentowane wyniki badań są dowodami wymagań postulowanych w założeniach niniejszej pracy i stanowią jedynie fragment danych jakie udało się zebrać w ramach kilkudziesięciu seriach pomiarowych. Ponieważ wiele z tych wyników wymaga sprawdzenia zakłada się dalsze prace i pomiary laboratoryjne. Dotychczas uzyskane dane wykorzystane zostaną w opracowaniu nastawów kalibracyjnych sprzętu dla potrzeb badań terenowych.

#### 4 Analiza zdolności systemu pomiarowego

Analiza zdolności systemu pomiarowego polegała w praktyce na ocenie rozdzielczości układu pomiarowego. Do tego celu przygotowano stanowisko badawcze, w którym metalowe pręty, ustawiane w różnych konfiguracjach, pełniły rolę spękań.

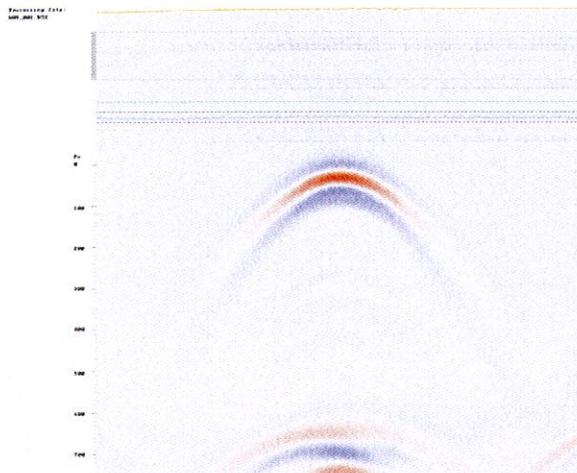
Wyidealizowane modele szczelin pozwoliły na ocenę rozdzielczości układu pomiarowego, przy próbie odróżnienia dwóch równoległych i bliskich sobie szczelin położonych na jednym poziomie. W przypadku szczelin położonych płytko pod powierzchnią drogi, gdy antena znajduje się w standardowej pozycji pomiarowej szczeliny zaczynają być odróżnialne przy wzajemnej odległości około 10 cm, a odróżnienie jest wyraźne przy 15 cm (Rysunek 4.1).



Rysunek 4.1 Test rozdzielczości poprzecznej układu GPR, ze względu na możliwość rozróżnienia dwóch płytko położonych pęknięć oddalonych od siebie o 5, 10 i 15 cm. Jako laboratoryjny model symulujący pęknięcia bez masującego sygnału odbitego od powierzchni (czyli bez piku głównego) posłużyły dwa metalowe pręty o średnicy 1 cm przesuwane na poziomie 35 cm pod anteną.

Aby uzyskać jakościowy pogląd na kształt sygnału generowanego przez pionowy rozstęp sięgający głęboko w nawierzchnię drogową, wykonano skan pionowo ustawionej płyty arylowej, prostopadłej do osi pudła anteny i przesuwanej wzdłuż kierunku tej osi (Rysunek 4.2). Sygnał ma wtedy kształt zbliżony do dodatniego refleksu pojedynczego, ale drugie minimum w zakresie pakietu czołowego jest wyraźnie bardziej rozbudowane jeśli idzie o szerokość i amplitudę, niż w przypadku sygnału generowanego przez spękanie wąskie.

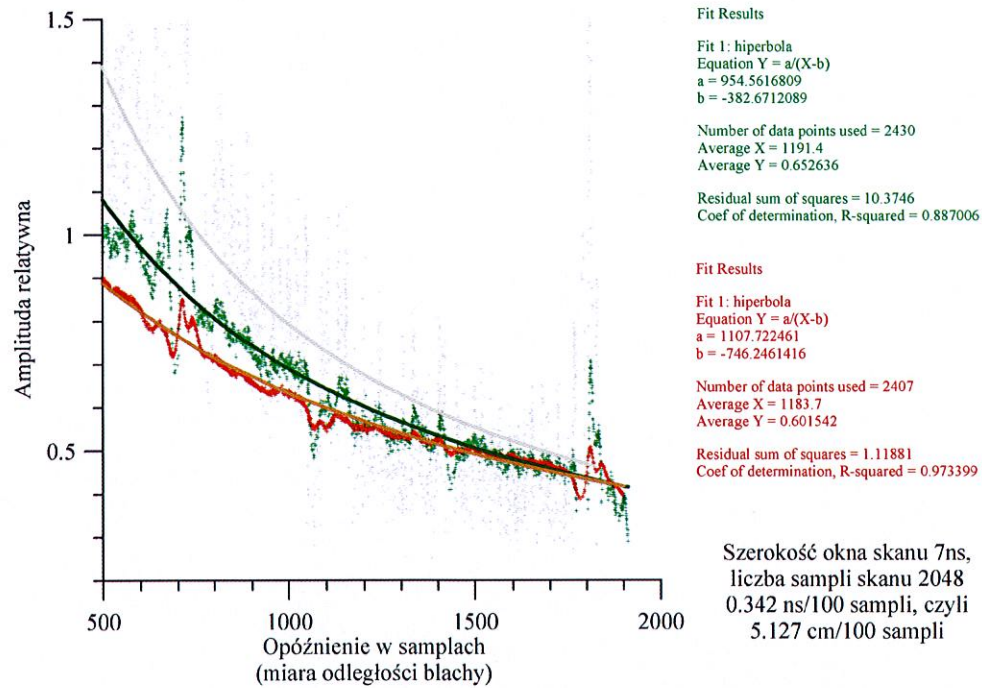




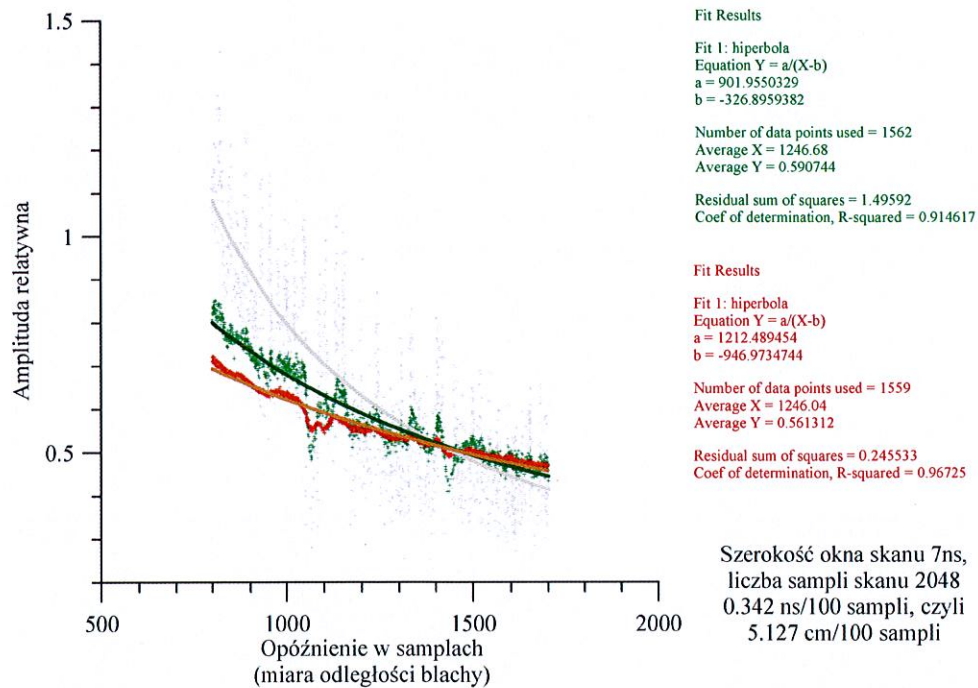
Rysunek 4.2 Echogram uzyskany w wyniku przesuwania pod anteną ustawionej pionowo płyty akrylowej (o grubości 1.5 cm) ustawionej prostopadle do osi skrzyni anteny, gdy górna krawędź płyty jest usytuowana na poziomie około 40 cm pod anteną. Płyta taka symuluje pojedyncze, kontynuujące się głęboko spękanie powierzchni. Powstający sygnał elektromagnetyczny ma kształt zbliżony do reflektu pojedynczego, ale jest od niego w szczegółach odmienny. Hiperbola poniżej hiperboli głównej jest obrazem ramy, na której została zamocowana płyta.

W celu uzyskania lepszej jakości obrazu radarowego wykonano, tak jak w badaniach odspojen, testy dopasowania funkcji opisującej zależność amplitudy sygnału odbitego od blachy od odległości między anteną i blachą (Rysunek 4.3). Ponieważ otrzymano małe wartości parametru  $b$ , opisującego położenie centrum emisyjnego, wykonano testy dopasowania funkcji opisującej tę zależność przy węższym zakresie dopasowania (Rysunek 4.4).

Na podstawie tych danych wykonano skan oddaleniowy powierzchni blachy (na Rysunku 4.5 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).

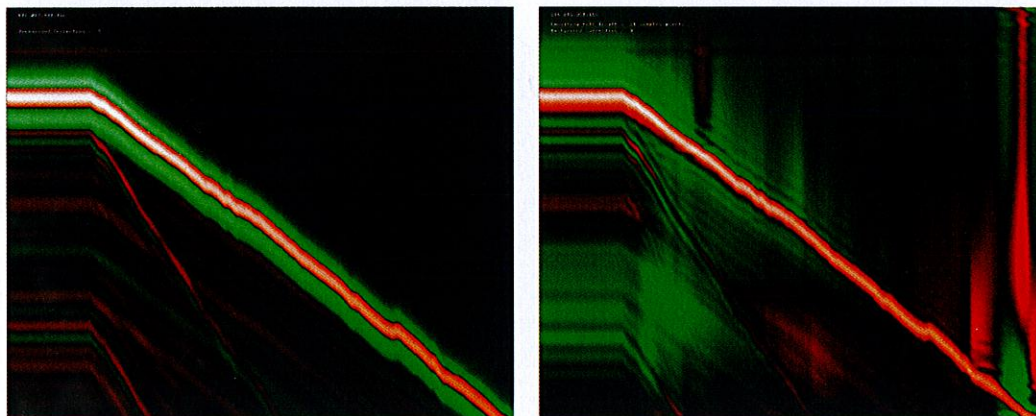


Rysunek 4.3 Dopasowanie funkcji opisującej zależność amplitudy sygnału odbitego od blachy od odległości między anteną i blachą



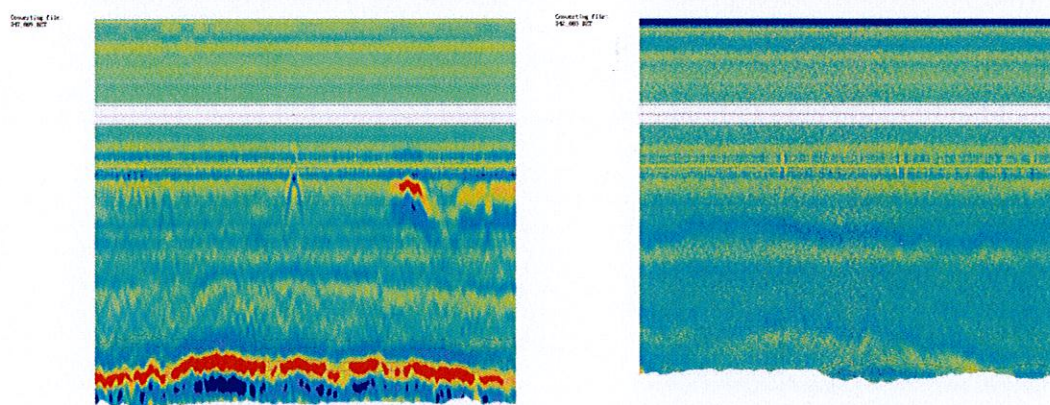
Rysunek 4.4 Dopasowanie funkcji opisującej zależność amplitudy sygnału odbitego od blachy od odległości między anteną i blachą - węższy zakres dopasowania





Rysunek 4.5 Skan oddaleniowy powierzchni blachy (echogram po lewej, a po prawej dekonwolucja przy użyciu modelu sygnału odbitego)

W ramach oceny zdolności systemu pomiarowego przeprowadzono badania terenowe. Pośród tych pierwszych pomiarów, ciekawych obserwacji dostarczył testowy odcinek drogi gminnej w Pszczółkach (Rysunek 4.6).

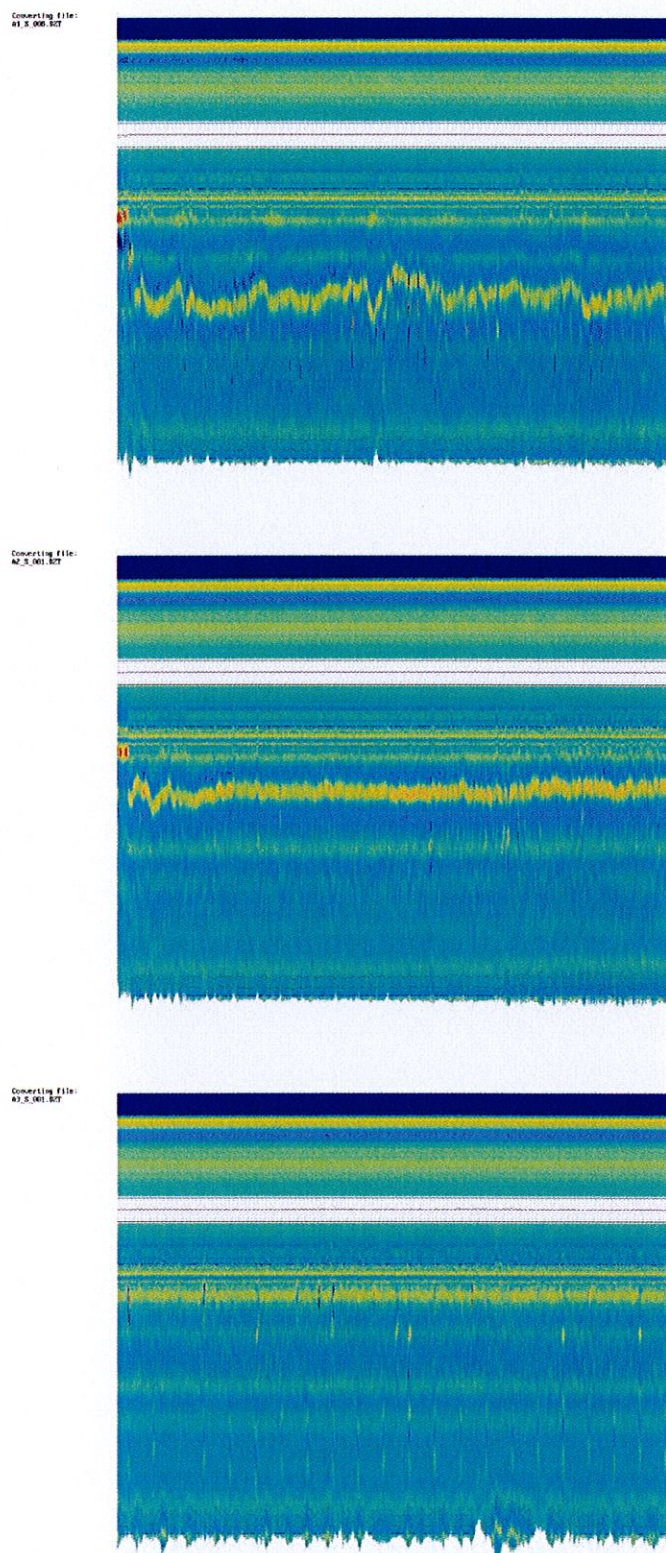


Rysunek 4.6 Przekroje strukturalne (nieskrócone) po usunięciu piksu głównego wzdłuż fragmentu testowego odcinka drogi gminnej w Pszczółkach (po lewej) i wzdłuż fragmentu ulicy Golędzinowskiej w Warszawie (po prawej).

Na nieskróconym poprzecznie przekroju strukturalnym uzyskanym po usunięciu piksu głównego możemy zauważyć liczne hiperbole spękania. Co ciekawe odpowiadają one spękanom bardzo płytkim, jakich nie odnotowano na samej powierzchni w czasie wykonywania pomiaru. Niektóre silne sygnały odpowiadające płytkim defektom podpowierzchniowym wydają się być złożone z takich hiperbol spękania. Ramiona hiperbol kontynuują się w dół przekroju tworząc dwie krzyżujące się i bardzo wyraźne rodziny niemal prostych linii, których obecność może być uznana za wskaźnik diagnostyczny obecności licznych spękań nawet w sytuacji, gdy wierzchołki hiperbol nie są z jakichś powodów wyraźnie widoczne. Wierzchołki hiperbol jednak nie występują zasadniczo w pobliżu horyzontów strukturalnych, z których głębszy został zaprojektowany jako model nieprawidłowego połączenia międzywarstwowego, w trakcie budowy drogi. Jako porównania użyto przekroju wzdłuż odcinka ulicy



Goleźdinowskiej w Warszawie, który jest przykładem zdrowej nawierzchni, a jego przekrój strukturalny wydaje się być wolny od hiperbol spękaniaowych.



Rysunek 4.7 Przykłady identyfikacji rozstępów ukrytych pod powierzchnią drogi (echogramy po usunięciu piku głównego).



Wśród innych wniosków uzyskanych w wyniku wstępnych badań terenowych należy wymienić potwierdzenie zdolności pomiarów georadarowych w identyfikacji szczelin mających postać szerokich rozstępów ukrytych pod powierzchnią drogi (Rysunek 4.7). W tych szczególnych przypadkach rozstępy te były udokumentowane jako własność technologiczna wcześniejszej nawierzchni.

## 5 Opracowanie założeń do pomiarów prowadzonych w warunkach terenowych

W efekcie przeprowadzonych badań i analiz przedstawionych w wcześniejszych punktach przyjęto następujące ustawienia systemu pomiarowego:

- częstotliwość próbkowania: min 300 KHz,
- optymalna częstotliwość pomiaru: 1 cm,
- dopuszczalna częstotliwość pomiaru: 2 cm
- ilość sampli w skanie: 1024,
- ilość bitów w samplu: 16,
- początek próbkowania sygnału: 96,5ns
- szerokość okna próbkowania sygnału: 10ns,
- wzmacnienie sygnału: 11dB.

Dla takich nastawów systemu pomiarowego przyjęto następującą metodykę pomiarów:

- przed rozpoczęciem zasadniczych pomiarów należy wygrzewać system w trybie zapisu przez co najmniej jedną godzinę (można zastosować stacking<sup>3</sup> sygnałów),
- przeprowadzić pomiar tła (tzw. sygnał powietrza) przez min 30s,
- przeprowadzić pomiar sygnału odbitego z blachy przez min 30s,
- przeprowadzić pomiar sygnału odbitego z blachy w trybie „bouncing<sup>4</sup>”,
- wykonać pomiar zasadniczy z oknie próbkowania 10ns.

Po pomiarach zasadniczych:

- przeprowadzić pomiar tła (tzw. sygnał powietrza) przez min 30s,
- przeprowadzić pomiar sygnału odbitego z blachy przez min 30s,

W trakcie pomiarów zasadniczych, na ile to możliwe należy oznaczać na falogramie markerem miejsca widocznych spękań. Po przeprowadzonych badaniach należy przeprowadzić identyfikację spękań widocznych na nawierzchni metoda wizualną.

Odwierty kontrolne należy wykonać w ramach drugiej serii pomiarowej GPR, po przeprowadzeniu interpretacji danych z pierwszej serii. Miejsce wykonania odwiertu kontrolnego należy wskazać bezpośrednio w trakcie pomiarów. Należy przy tym zadbać o możliwie najdokładniejsze wyznaczenie miejsca odwiertu tak, aby trafić w spękanie.

---

<sup>3</sup> stacking – funkcja uśredniająca określoną przez operatora liczbę skanów

<sup>4</sup> tryb bouncing – pomiar sygnału odbitego w celu ustalenia amplitudy wychyleń anteny w pionie



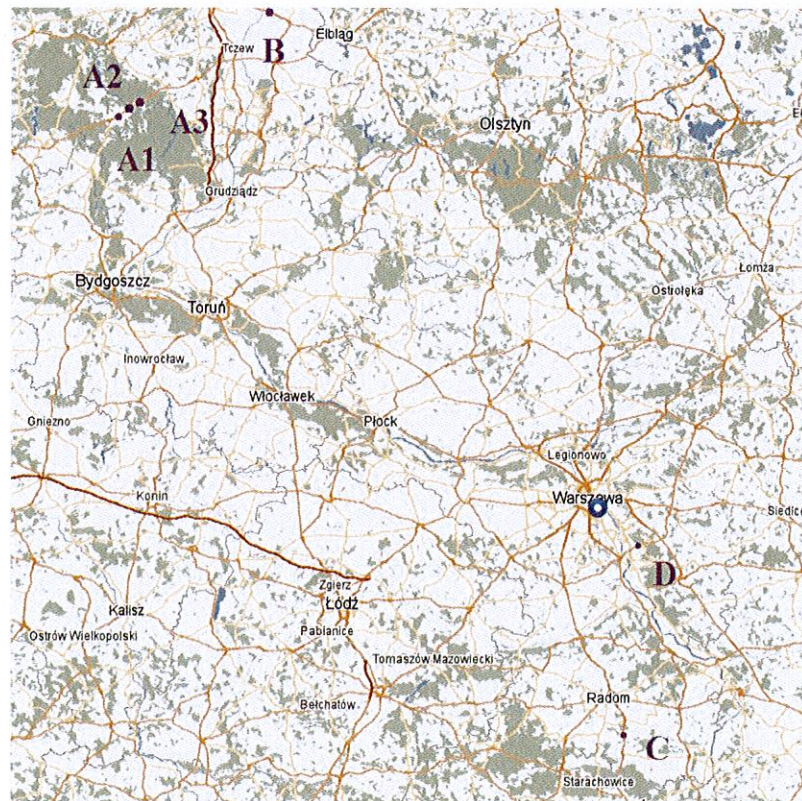
Do tego celu przewiduje się wykorzystanie taśmy mierniczej, danych z pomiaru odległościomierzem GPR oraz współrzędnych GPS.

## 6 Badania na wytypowanych odcinkach badawczych

W celu weryfikacji przyjętych założeń zaplanowano i wykonano badania terenowe na wytypowanych odcinkach dróg (Tabela 6.1 oraz Rysunek 6.1). Odcinki przewidziane do badań zostały wyselekcjonowane z pośród kilkunastu odcinków zgłoszonych przez Oddziały GDDKiA.

Tabela 6.1 Wytypowane odcinki dróg

| Oznaczenie odcinka | Lokalizacja | Pikietaż [km] |         | uwagi                                 |
|--------------------|-------------|---------------|---------|---------------------------------------|
|                    |             | początek      | koniec  |                                       |
| A1_S               | DK 22       | 271+500       | 271+000 | strona lewa (w śladzie prawego koła)  |
| A2_S               | DK 22       | 269+000       | 268+500 | strona lewa (w śladzie prawego koła)  |
| A3_S               | DK 22       | 278+800       | 279+000 | strona prawa (w śladzie prawego koła) |
| B_S                | DK 7        | 38+000        | 39+000  | strona prawa (w śladzie prawego koła) |
| C_S                | DK 9        | 30+000        | 28+800  | strona lewa (w śladzie prawego koła)  |
| D_S                | DK 50       | 193+800       | 193+000 | strona lewa ( w śladzie prawego koła) |



Rysunek 6.1 Lokalizacja odcinków wytypowanych do badań terenowych



Większość wytypowanych odcinków posiada nawierzchnię nową, użytą ok. 3-4 lat. Wyjątkiem jest odcinek A3 (nawierzchnia betonowa), którego nawierzchnia poddana jest długiemu, kilkudziesięcioletniemu okresowi eksploatacji. Wybrane odcinki charakteryzują się następującą konstrukcją:

- A1 i A2 – asfaltowa warstwa ścieralna o grubości 4 cm ułożona na istniejącej nawierzchni z betonu cementowego; w miejscach dylatacji warstwy betonowej wykonano nacięcia warstwy ścieralnej; w chwili obecnej nawierzchnia bez widocznych uszkodzeń,
- A3 – nawierzchnia betonowa o grubości ok. 22 cm z licznymi spękaniem poprzecznymi i ukośnymi oraz uszkodzeniami w obrębie dylatacji,
- B – pakiet warstw asfaltowych o grubości ok. 21 cm ułożony na warstwie MCE o grubości ok. 16 cm, poniżej istniejąca nawierzchnia (wg. uzyskanych informacji nawierzchnia przed remontem charakteryzowała się licznymi uszkodzeniami, w tym spękaniem poprzecznymi); na odcinku stwierdzono spękania poprzeczne już na etapie badań odbiorczych w 2006 roku; w chwili obecnej nawierzchnia posiada pojedyncze spękania poprzeczne,
- C – nawierzchnia asfaltowa o grubości ok. 10 cm, wykonana jako nakładka istniejącej nawierzchni asfaltowej o grubości ok. 15 cm ułożonej na warstwie chudego betonu; przed remontem odcinek charakteryzował się licznymi spękaniem poprzecznymi; w chwili obecnej nawierzchnia posiada pojedyncze spękania poprzeczne,
- D - nawierzchnia asfaltowa o grubości łącznej ok. 21 cm, wykonana jako nakładka istniejącej nawierzchni asfaltowej o grubości ok. 14 cm ułożonej na warstwie betonu cementowego; przed remontem odcinek charakteryzował się licznymi spękaniem poprzecznymi, szybko odtwarzającymi się po wykonanych wcześniej odnowach; w chwili obecnej nawierzchnia bez widocznych uszkodzeń.

## 6.1 Ocena spękań metodami klasycznymi

W ramach przeprowadzonych badań przeprowadzono ocenę spękań metodą wizualną. Ponieważ do badań przyjęto odcinki nowe o niewielkiej intensywności uszkodzeń zdecydowano, że lokalizacja występujących pęknięć zostanie naniesiona na profilach radarowych w formie markerów (pionowe linie koloru żółtego). Wyjątek stanowi odcinek A3\_S, na którym przeprowadzono pełną inwentaryzację. Wyniki tej inwentaryzacji zamieszczono w Załączniku.

Intensywność spękań oceniono obliczając wskaźnik IS zgodnie z zaleceniami Katalogu<sup>5</sup>, w którym podano kryteria oceny tj.  $IS \leq 1$  oznacza nawierzchnie niespękane,  $1 < IS \leq 3$  oznacza nawierzchnie średnio spękane, a  $IS > 3$  oznacza nawierzchnie bardzo spękane. Klasyfikacja odcinków pod względem intensywności spękań przedstawia się następująco:

---

<sup>5</sup> Katalog Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych

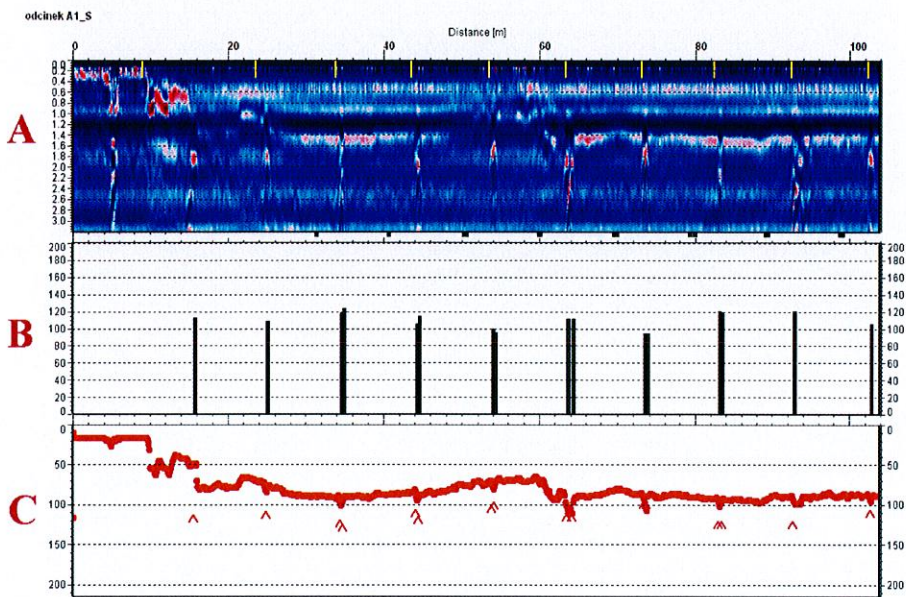


- odcinek A1\_S – IS=0 (brak spękań)
- odcinek A2\_S – IS=0 (brak spękań)
- odcinek A3\_S – IS=10 (odcinek bardzo spękany)
- odcinek B\_S – IS=1 (odcinek niespękany)
- odcinek C\_S – IS=1 (odcinek niespękany)
- odcinek D\_S – IS=0 (brak spękań)

## 6.2 Badania radarowe

Wyniki przeprowadzonych badań zamieszczono w Załączniku w formie profili jak na Rysunku 6.2. Przedstawione dane zawierają zapis sygnałów radarowych (profil A), szacowaną głębokość pęknięcia (profil B) oraz grubość zidentyfikowanej warstwy z lokalizacją spękań.

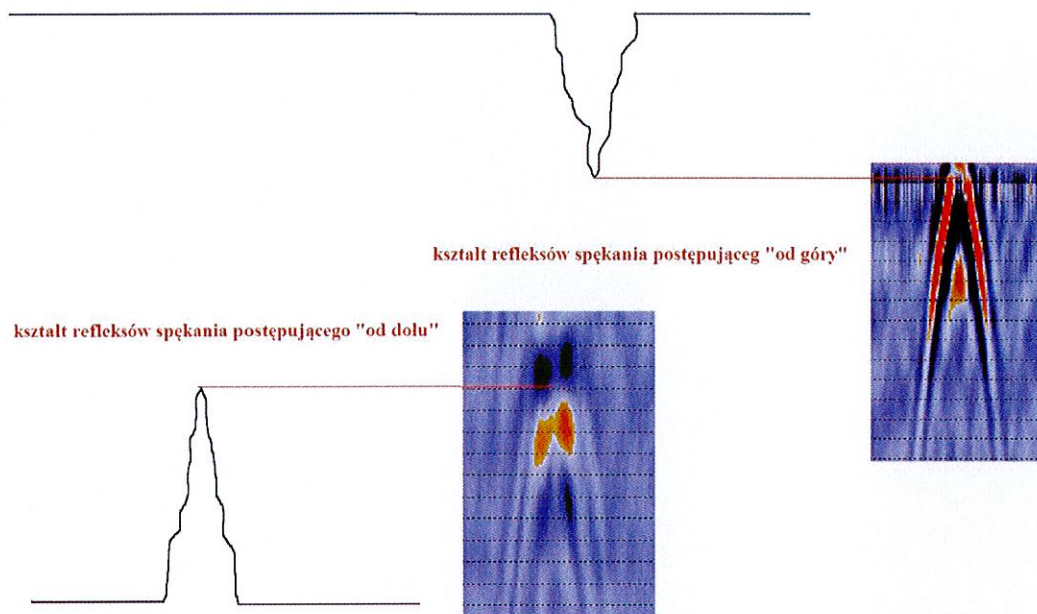
Z uwagi na problemy związane z uzyskaniem odpowiedniej jakości sygnału radarowego nie było możliwe poprawne określenie kierunku postępowania i głębokości pęknięcia, dlatego uzyskane w tym zakresie dane należy traktować w sposób umowny. Wyjaśnienie tego problemu przedstawiono w dalszej części sprawozdania.



Rysunek 6.2 Profil pomiarowy, A – zarejestrowane sygnały radarowe, B – szacowana głębokość pęknięcia, C – grubość warstwy z lokalizacją pęknięć

Problem oceny głębokości i kierunku pęknięcia wynika z rodzaju i kształtów refleksów uzyskiwanych podczas obserwacji pęknięcia. Przykład zarejestrowanego obrazu radarowego na pęknięciu przedstawiono na Rysunku 6.3. Interpretacja pęknięć postępujących od góry wydaje się być stosunkowo prosta zwłaszcza przy wykorzystaniu techniki wizyjnej (patrz punkt 2.1.2), która potwierdzać będzie ich lokalizację na powierzchni.



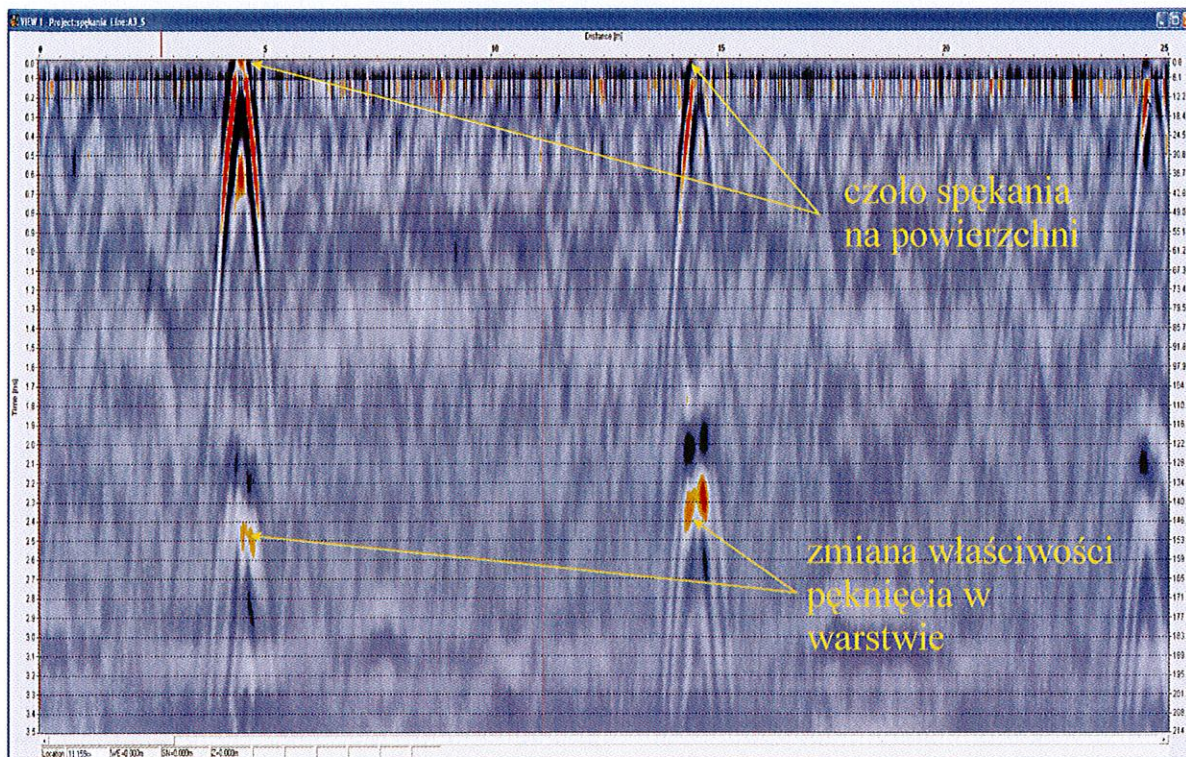


Rysunek 6.3 Kształty refleksów pęknięć nawierzchni

Nieco bardziej kłopotliwa lecz możliwa jest interpretacja pęknięć propagujących od dołu ponieważ uzyskane refleksy nie są zakłócone przez ramiona hiperbol sygnału odbitego z pęknięcia postępującego od góry.

Problem właściwej interpretacji występuje dopiero wtedy gdy mamy do czynienia z zmianą właściwości pęknięcia wraz z głębokością lub gdy w jednym miejscu występują dwa rodzaje spękań: propagujące od góry i od dołu. W takim wypadku (Rysunek 6.4) jest niezwykle trudno określić, z którym rodzajem pęknięcia mamy do czynienia ponieważ cały obraz zniekształcony jest przez refleksy pęknięcia na powierzchni lub postępującego od góry.

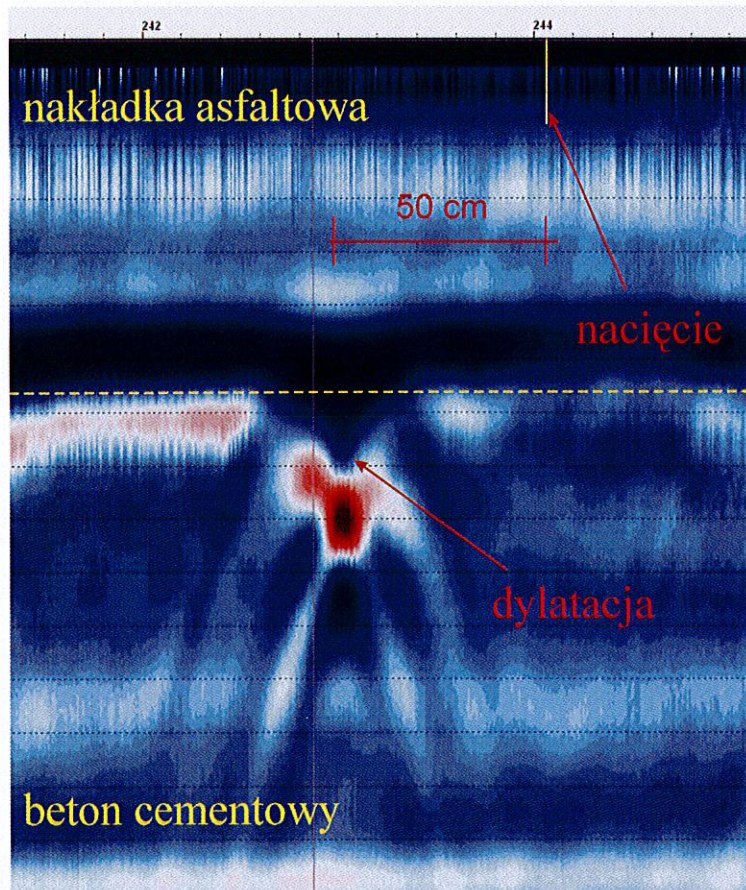




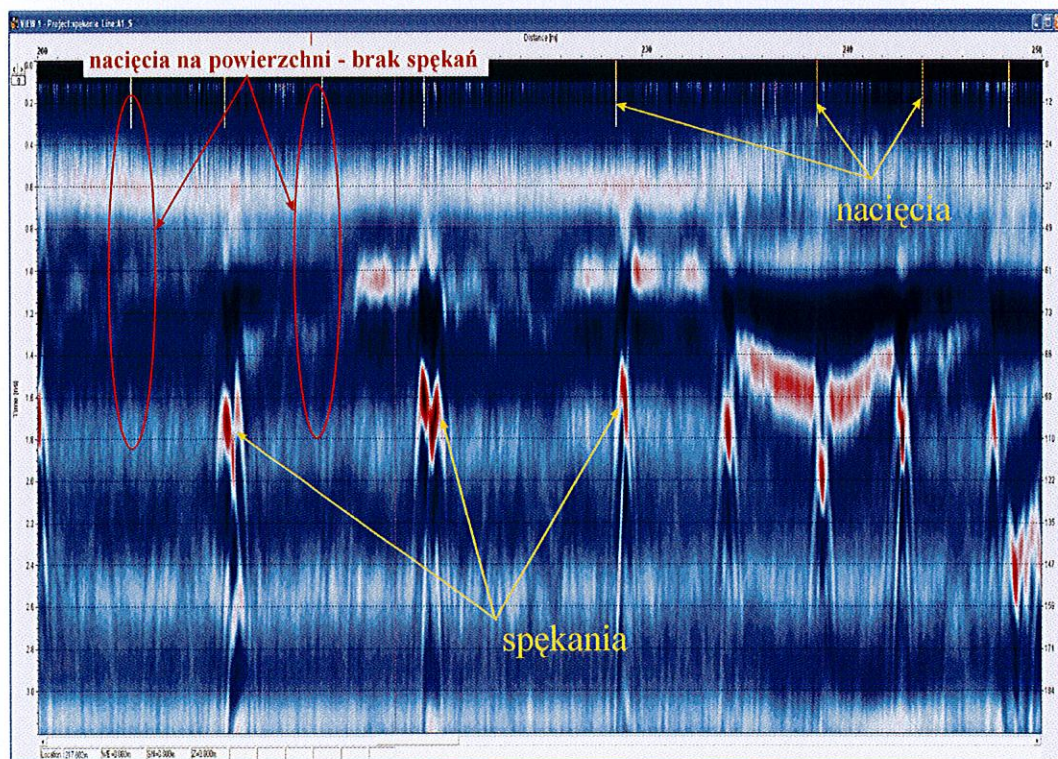
Rysunek 6.4 Refleksy pęknięć prawdopodobnie postępujących od góry; odcinek A3\_S

Innym problemem interpretacyjnym jest poprawne zlokalizowanie pęknięć występujących blisko siebie. Jak wykazano w badaniach laboratoryjnych minimalna odległość obiektów, których refleksy będą odróżnialne wynosi ok. 10 cm. Poniżej tej odległości dochodzi do nakładania się ramion hiperbol i zakłócania obrazu radarowego. Przypadek taki przedstawiono na Rysunku 6.5, na którym widoczne są dwie hiperbole reprezentujące krawędzie dylatacji nawierzchni betonowej. Ciekawą obserwacją z tego fragmentu odcinka jest też różnica między widocznym na powierzchni nacięciem nakładki asfaltowej, a lokalizacją dylatacji istniejącej nawierzchni betonowej. Na Rysunku 6.6 przedstawiono większy fragment omawianego odcinka, na którym widoczne są refleksy dylatacji oraz pęknięć i odpowiadające im nacięcia warstwy asfaltowej. Na profilu pomiarowym zaznaczono również miejsca, w których wykonano nacięcia lecz nie zarejestrowano sygnałów świadczących o występujących pęknięciach bądź dylatacjach.





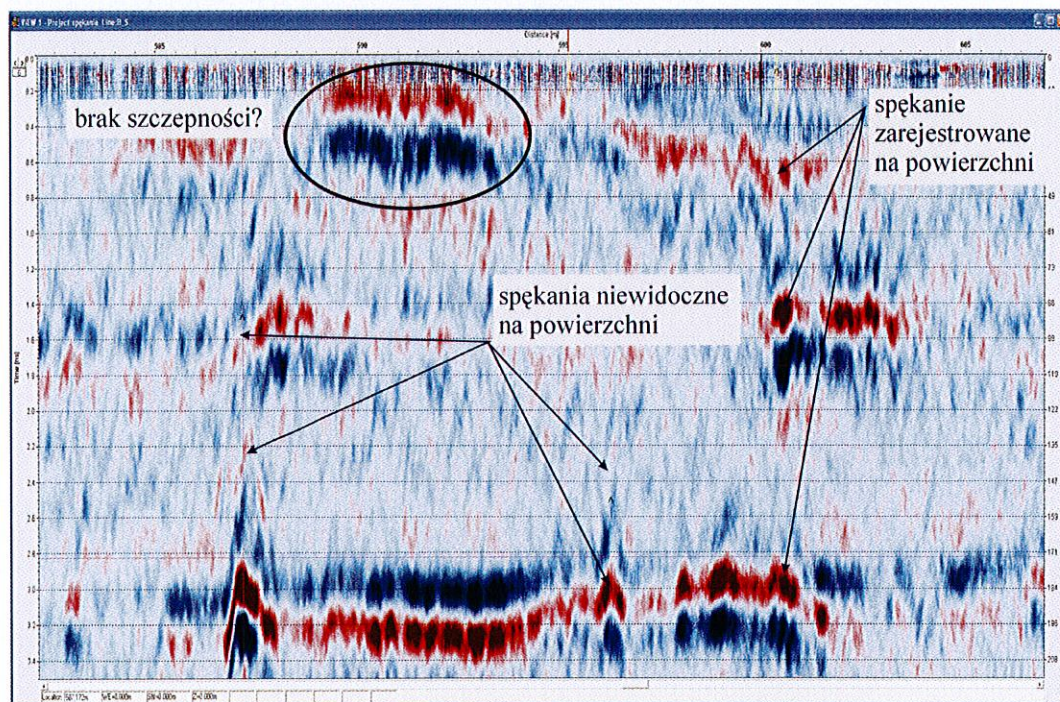
Rysunek 6.5 Refleksy zarejestrowane w obrębie dylatacji nawierzchni betonowej; odcinek A1\_S



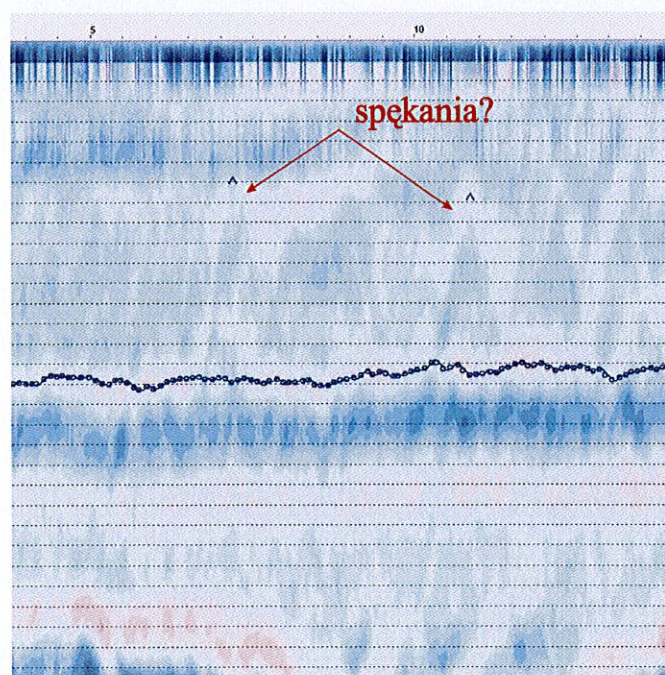
Rysunek 6.6 Lokalizacja pęknięć i dylatacji nawierzchni betonowej; odcinek A1\_S



Dalsze trudności w interpretacji pęknięć obrazują Rysunki 6.7 i 6.8. W nawierzchniach, w których wbudowano siatkę przeciwpękaniową niezwykle trudno jest określić miejsce występowania ewentualnych pęknięć, ponieważ sygnały odbite od struktur takich jak siatki w sposób znaczący zniekształcają (zakłócają) zarejestrowany obraz radarowy. Efekty te widoczne na Rysunku 6.7, gdzie widoczne się ukośnie przecinające się ramiona hiperbol. Rysunek 6.8 przedstawia wyizolowane zakłócenia sygnału radarowego i próbę interpretacji pęknięć.



Rysunek 6.7 Obraz nawierzchni z wbudowaną siatką przeciwpękaniową; odcinek B\_S



Rysunek 6.8 Próba wyizolowania zakłóceń związanych z obecnością siatki przeciwpękaniowej; odcinek D\_S



## 7 Podsumowanie

Wstępne badania nad detekcją spękań pokazują, że metoda georadarowa ma w tym obszarze znaczące możliwości diagnostyczne, przede wszystkim w zakresie identyfikacji znamion dużych rozstępów i zaawansowanego spękania nawierzchni, także w takich przypadkach, gdy niekoniecznie ujawniają się one na powierzchni drogi.

Nieco zaskakująca jest dosyć mała rozdzielczość anteny. Zakładano bowiem, że minimalna odległość między rozróżnialnymi obiektami będzie znacznie niższa niż to wynika z badań laboratoryjnych (10 cm). Problem rozdzielczości powinien zostać ostatecznie rozstrzygnięty po analizie danych z pomiarów terenowych.

Konieczne jest dopracowanie metody filtracji zakłóceń, zwłaszcza tych związanych z obecnością siatki przeciwspekaniowej w konstrukcji nawierzchni. Udoskonalenie metody powinno uwzględniać zarówno weryfikację nastawów kalibracyjnych jak i możliwość wykorzystania oprogramowania dedykowanego do lokalizacji obiektów.

Już na obecnym etapie można stwierdzić, że niezwykle przydatne było by wdrożenie metody pomiarowej wykorzystującej zarówno technikę radarową jak i technikę wizyjną. Wyniki zsynchronizowane poprzez dokładny pomiar GPS znacznie ułatwiłyby identyfikację pęknięć nawierzchni.

W ramach Etapu I pracy przeprowadzono następujące prace:

- analiza możliwości pomiaru oceny spękań z wykorzystaniem techniki radarowej,
- badania prowadzone w warunkach laboratoryjnych nad zakresem i dokładnością techniki radarowej w identyfikacji i ocenie spękań,
- analiza zdolności systemu pomiarowego oraz jego kalibracja na podstawie badań laboratoryjnych,
- opracowanie założeń do pomiarów prowadzonych w warunkach terenowych,
- badania radarowe na wytypowanych odcinkach badawczych (nowe nawierzchnie).

W następnym etapie pracy planuje się:

- kontynuację badań radarowych na wytypowanych odcinkach badawczych.
- kontynuację weryfikacji stanu spękań nawierzchni metodami klasycznymi.
- wstępną analizę porównawczą uzyskanych danych.



## Bibliografia

**Abd El Halim A O, Taylor D A and Mochamed El H H** Reflective cracking in pavement research in practice [Conference] // 4th International RILEM Conference. - Ottawa : RILEM, 2000.

**A-CUBED** General state of the art review of ground probing radar [Book Section]. - Ontario : A-CUBED, 1983.

**Alenowicz J and al et** Minimizing reflection and frost heave cracking in flexible and semi-rigid road pavements [Report]. - Oulu : Technical University of Oulu, 1990.

**Al-Qadi I L, Scarps T and Loizos A** Pavement cracking [Book]. - [s.l.] : CRC Press/Balkema, 2008.

**Annan A.P** Ground Penetrating Radar // Workshop notes. - Ontario : Sensor&Software Inc., 2001.

**Benedetto A and Fattorini F** GPR signal processing in the frequency domain for detection of moisture variability in pavement structure [Conference] // MAIREPAV6. - Torino : Politecnico di Torino, 2009.

**Bohn Axel O.** The History of the Falling Weight Deflectometer (FWD) [Journal].

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

**Canestrari F and Santagata E** Temperature effects on the shear behaviour of tack coat emulsions used in flexible pavements // The International Journal of Pavement Engineering. - 2005.

**Chellgren J D** Preventing Pavement Slipping [Journal] // Local Highway Technical News. - 1999. - p. vol 11 no. 4.

**Cheung M W, Hakim B A and Armitage R J** Use of FWD Data for Prediction of Bonding Between Pavement Layers [Journal] // International Journal of Pavement Engineering. - 2000. - pp. vol. 1, s. 49-59.

**Colagrande S [et al.]** Ground penetrating radar assessment for flexible road pavement degradation [Conference] // MAIREPAV6. - Torino : Politecnico di Torino, 2009.

COST Action 336 "Falling Weight Deflectometer" [Report]. - [s.l.] : FEHRL, 1996.

**Cross S A and Shrestha P P** Guidelines for Using Prima and Tack Coats [Journal] // Technical Report FHWA-CFL-04-001. - 2004. - p. s 113.

**CROW** Surface cracking in asphalt layers, Report of the Working Group "Surface Cracking in Asphalt Layers" [Report]. - Holandia : Centre for Research and Contract Standardization in Civil, 1990.



- Daniels J** Ground Penetrating Radar fundamentals // Appendix to Reprot to United States Environmental Protection Agency. - 2000.
- de Bondt A H and Steenvoorde M P** Reinforcement test section A50 (A6) Friesland [Report]. - Delft : Delft University of Technology, 1995.
- du Plessis L** Instrumentation & Measurement [Conference] // SATC HVS Workshop: Instrumentation & Measurement. - [s.l.] : Pavement Interactive, <http://pavementinteractive.org>, 2007.
- Forest R and Utsi V** Non Destructive crack depth measurements with Ground Penetrating Radar [Conference] // Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar . - Delft : Slob, Yarovov & Rhebergen (eds), 2004. - pp. pp 799–802.
- Francken L and Vanelstraete A** RILEM Report 18 [Report]. - [s.l.] : RILEM, 1997.
- Geophysical Survey Systems Inc.** GSSI [Online]. - 2008. - <http://www.geophysical.com/militarysecurity.htm>.
- Glet W** Układ i związanie warstw w konstrukcjach nawierzchni asfaltowych [Journal] // Nowości w Zagranicznej Technice drogowej. - 2000. - pp. s 37-53.
- Hachiya Y and Sato K** Effect of Tack Coat on Bonding Characteristics at Interface Between Asphalt Concrete Layers [Journal] // Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements. - 1997. - pp. s 349-362.
- Hakim B A** The importance of good bond between bituminous layers [Journal] // Scott Wilson Pavement Engineering. - 2002. - p. s. 11.
- Hakim B A** Pavement assessment including bonding condition: case studies. [Conference] // International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields. - Trondheim : [s.n.], 1998.
- Hyslip J [et al.]** Assessment of railway track substructure condition using Groun Penetrating Radar. - 2003.
- Jacobs M M J, Hopman P C and Molenaar A AA** The crack growth mechanism in asphaltic mixes [Journal] // HERON, Delft University of Technology. - Delft : HERON, Delft University if Technology, 1995. - pp. vol. 40, no. 3, p. 181-199.
- Jaskuła P** Ocena szczepności między warstwami asfaltowymi nawierzchni [Journal] // Drogownictwo. - 2006. - pp. s. 412-414.
- Jiménez P F and Soto Sanchez J A** Special Modified Emulsions of Modified Bitumen for Tack Coats [Journal] // 2 nd Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona. - 2000. - pp. s. 463-471.
- Judycki J and Jaskuła P** Badania i ocena wpływu szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni asfaltowej [Report]. - Gdańsk : Raport z badań I i II etapu badań, 2005/2006.



**Judycki J** Szczepność między warstwami asfaltowymi nawierzchni [Article] // Drogownictwo. - wrzesień 2003. - pp. s. 275-279.

**Karczewski Jerzy** Zarys metody georadarowej [Book]. - Kraków : Wydawnictwa AGH, 2007.

**Krans R L** Crack growth experiments on asphalt concrete beams [Conference] // VTI Conference. - Hague : [s.n.], 1993.

**Laurent J** Developing an automated crack measurement system: challenges and solutions, [Conference] // International Workshop "Automated detection of pavement cracking" . - Quebec : PIARC Technical Committee, 2006.

**Loulizi Amara** Development of Ground Penetrating Radar signal modeling and implementation for transportation infrastructure assessment // Praca doktorska. - 2001.

**Maser, K.; Scullion, T.** Automated detection of pavement layer thicknesses and subsurface moisture using ground penetrating radar. - [s.l.] : Transport Research Board, 1991.

**McLeod N W** Employing paving asphalt temperature susceptibility in the structural design of asphalt pavements [Report]. - 1987.

**Mechowski T [et al.]** Opracowanie metody oceny jakości połączenia warstw w konstrukcji nawierzchni za pomocą ugięciomierza dynamicznego FWD [Report]. - Warszawa : IBDiM, Praca niepublikowana, wykonana na zlecenie GDDKiA, 2006.

**Molenaar A A A** Fatigue and reflection cracking due to traffic loads [Conference] // Proceedings of the AAPT . - 1984.

**Molenaar A A.A** Material characterisation with respect to cracking [Report]. - 1995.

**Moorman Brian** Ground-penetrating radar applications in paleolimnology [Conference]. - Dordrecht : Kuwer Academic Publishers, 2001.

**Morawski Tadeusz and Gwarek Wojciech** Teoria pola elektromagnetycznego [Book]. - Warszawa : WNT, 1985.

**Morey Rexford** Ground penetrating radar for evaluating subsurface conditions for transportation facilities // NCHRP Synthesis 255. - Washington : Transportation Research Board, 1998.

**Mustaffara M, Lingb T C and Punab C O** Automated pavement imaging program (APIP) for pavement cracks classification and quantification – a photogrammetric approach [Conference] // International Society of Photogrammetry and Remote Sensing Congress . - Beijing : [s.n.], 2008.

**Olhoeft G** [Online]. - 2003. - <http://www.g-p-r.com/>.

**Olhoeft G and Capron D** Petrophysical causes of electromagnetic dispersion [Conference] // Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating



Radar. - Waterloo : Waterloo Centre of Groundwater Research, 1994. - pp. vol 1 of 3: 145-152.

**Pałys M, Zawadzki J and Skierczyński P** Połączenie między warstwami nawierzchni asfaltowej- metoda badania wymagania [Conference] // VIII Międzynarodowa Konferencja Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe. - Kielce : IBDiM, 2002. - pp. s. 299-306.

**Partl M N and Raab C** Shear strength properties between asphalt pavement layers [Journal] // Archives of Civil Engineering. - 1998. - pp. s. 353-365.

**Petit C, Al-Quadi I L and Millien A** Cracking in Pavements: Mitigation, Risk Assessment and Prevention [Conference] // 5th International RILEM Conference. - Limoges : RILEM, 2004.

**Pos J [et al.]** Powiązanie asfaltowych warstw nawierzchni: badania, wpływy, ocena-rozważania porównawcze Niemcy- Wielka Brytania [Journal] // Nowości Techniki Zagranicznej, (opr. Mikulski J.). - 2003. - pp. s. 5-30.

**Raab C and Partl M N** Inter-Layer and In-Layer Shear Strength of Swiss Asphalt Pavements. - [s.l.] : EMPA.

**Raab Ch.** Związanie warstw asfaltowych (Normalizacja badania w Szwajcarii) [Journal] // Nowości w Zagranicznej Technice Drogowej, (opr. Wałęcka H.K.). - 2002. - pp. s. 13-32.

**Raab C and Partl M.N.** Interlayer shear performance experience with different pavement structures [Conference] // Euroasphalt and Eurobitume Congress. - Wiena : [s.n.], 2004.

**Rababaah H, Wolfer J and Vrijtoru D** Asphalt pavement crack classification: a comparison of GA, MLP and SOM [Conference] // GECCO. - Washington : [s.n.], 2005.

**Romanoschi S A and Metcalf J B** The characterization of pavement layer interfaces [Conference] // ICAP. - Copenhagen : [s.n.], 2002. - p. s. 18.

**Saarenketo T and Scullion T** Road evaluation with Ground Penetrating Radar [Journal] // Journal of Applied Geophysics 43. - 2000. - pp. 119-138.

**Saarenketo T.** Using ground penetrating radar and dielectric probe measurements in pavement density quality control. - [s.l.] : Transport Research Record 1997, pp. 34-41, 1997.

**Saarenketo Timo** Elektrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys // Praca doktorska. - Oulu : University of Oulu, 2006.

**Sangiorgi C, Collop A C and Thom N H** A non-destructive impulse hammer for evaluating the bound between asphalt layers in a road pavement [Conference] // International Symposium: Non-Destructive Testing in Civil Engineering. - Berlin : Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung E.V, 2008.



**Scaffer J and Saxena A** The science and design of engineering materials [Conference]. - [s.l.] : Richard D. Irwin, Inc, 1995.

**Sculion T and Saarenketo T** Ground Penetrating Radar Technique in Monitoring Defects in Roads and Highways [Conference] // Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP.. - Orlando, Florida. : Compiled by Ronald S. Bell., 1995. - pp. pp 63–72..

**Sculion T** Perpetual pavements in texas: state of the practice [Report]. - Washington : Federal Highway Administration, 2006.

**Sholar G A [et al.]** Preliminary Investigation of a Test Method to Evaluate Bond Strength of Bituminous Tack Coats [Journal] // Research Report FL/DOT/SMO/02-459, Florida Department of Transportation. - 2002. - p. s. 36.

**Stockert U** Ein Beitrag zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund im Asphaltstraßenbau [Journal] // Elektronische Publikationen Darmstadt. - 2002. - p. s. 145.

**Sudyka, J.** Technika radarowa w drogownictwie – nowa jakość w ocenie konstrukcji nawierzchni. - [s.l.] : Polski Kongres Drogowy, 2006.

**Sybilski D, Mechowski T and Harasim P** Ocena połączenia międzywarstwowego nawierzchni ugięciomierzem FWD [Journal] // Drogi i Mosty. - 2007. - pp. 41-82.

**Tashman L, Nam K and Papagiannakis T** Evaluation of the influence of tack coat construction factors on the bond strength between pavement layers [Journal] // Washington Center for Asphalt Technology. - 2006.

**Tschegg E K [et al.]** Investigation of Bonding Between Asphalt Layers on Road Construction [Journal] // Journal of Transportation Engineering. - 1995. - pp. s. 309-316.

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

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

**Yoder and Witczak** Principles of pavement design [Report]. - 1975.

**Zawadzki J, Skierczyński P and Mechowski T** Wpływ połączenia między warstwami asfaltowymi na trwałość nawierzchni [Conference] // IX Międzynarodowa Konferencja Trwałe i bezpieczne Nawierzchnie Drogowe. - Kielce : IBDiM, 2003. - pp. s. 415-423.

**Zieliński P** Wybrane zagadnienia trwałości nawierzchni asfaltobetonowej z geosyntetyczną warstwą pośrednią // Praca doktorska. - [s.l.] : Politechnika Krakowska, 2004.



**INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW**  
**Zakład Diagnostyki Nawierzchni**

**ZAŁĄCZNIK 1**

**„Wyniki badań radarowych na wytypowanych odcinkach  
badawczych”.**

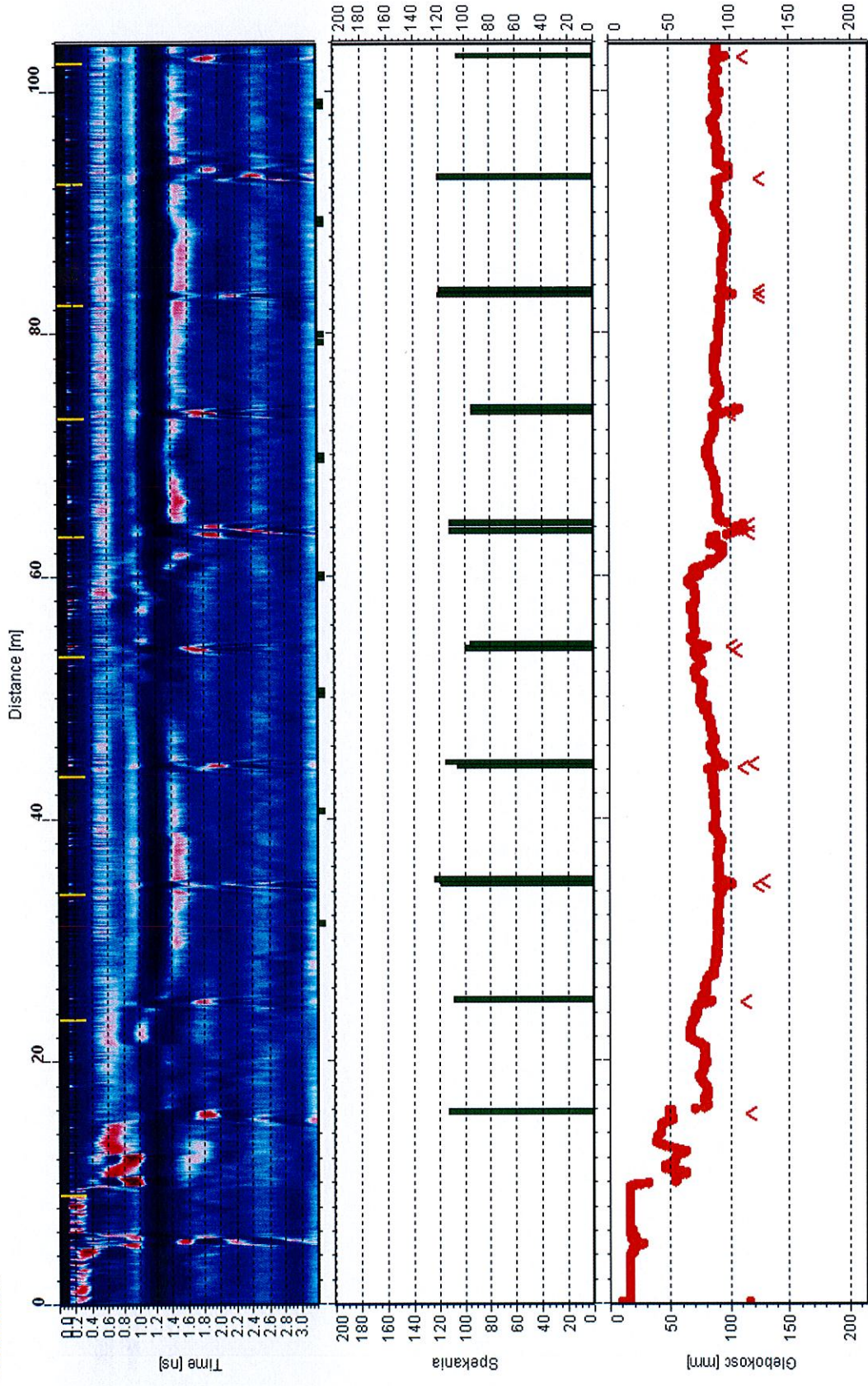
---

Zleceniodawca: Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad

Umowa nr 2192/2008 z dnia 11.08.2008 roku

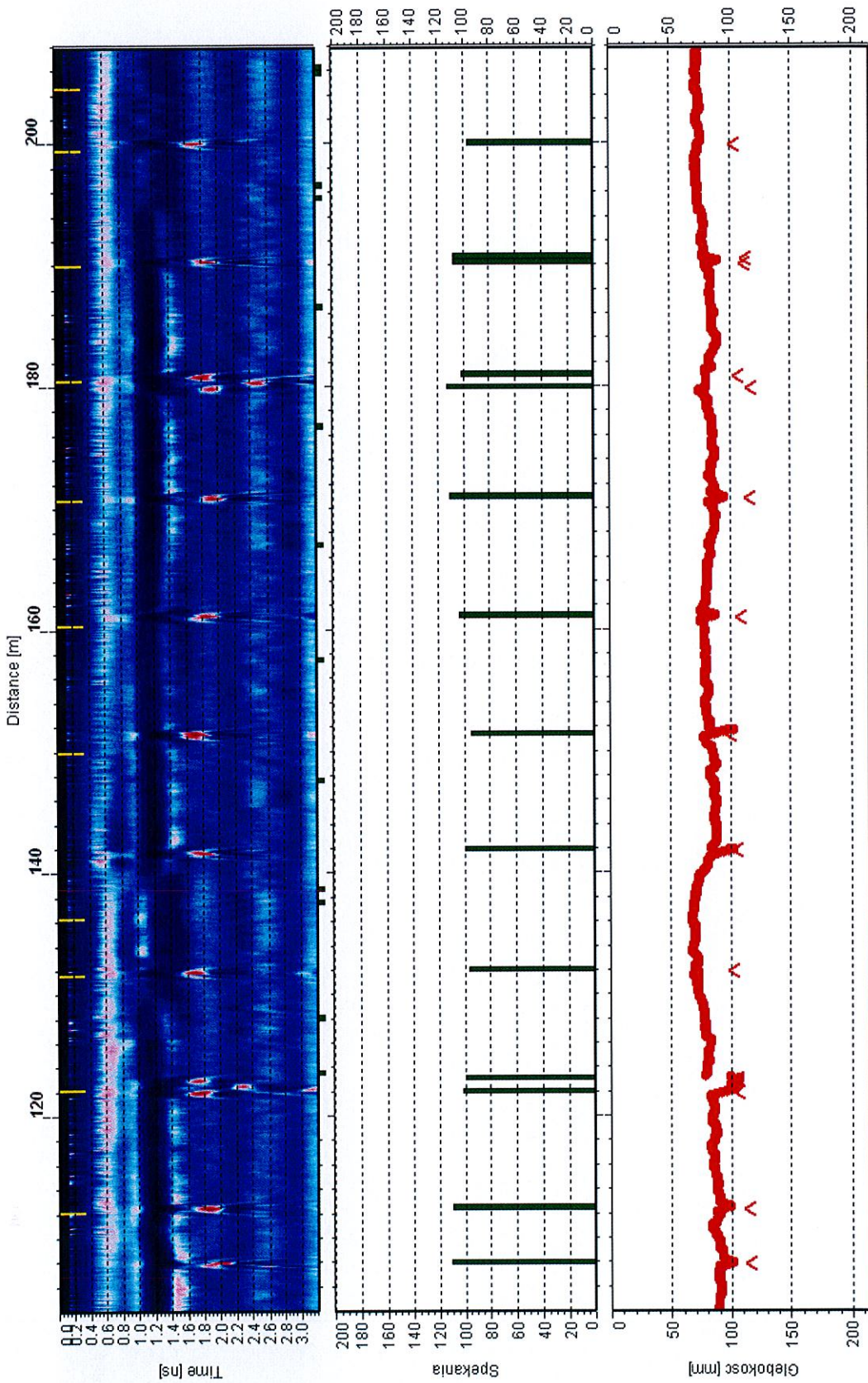


odcinek A1\_S



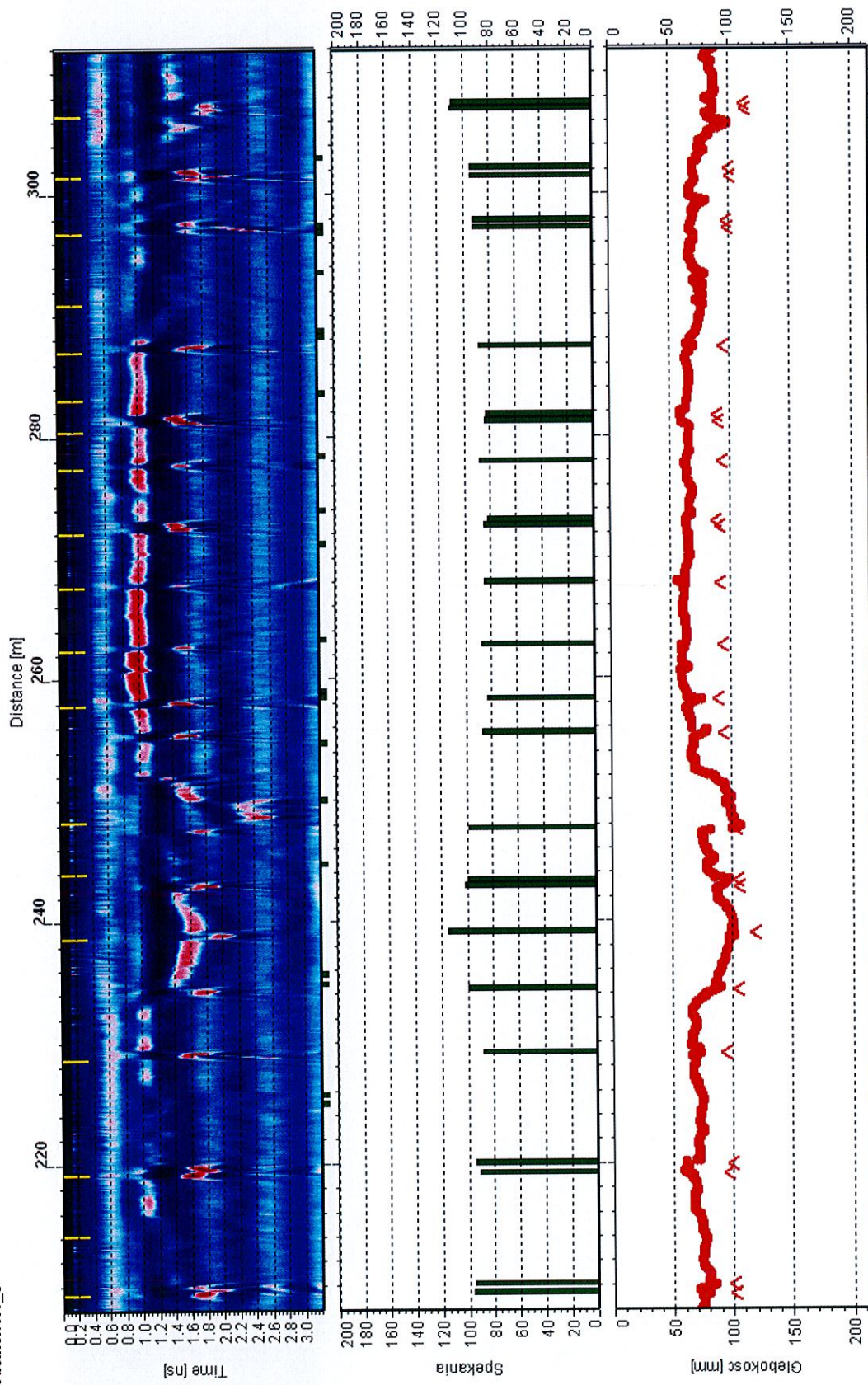


odcinek A1\_S



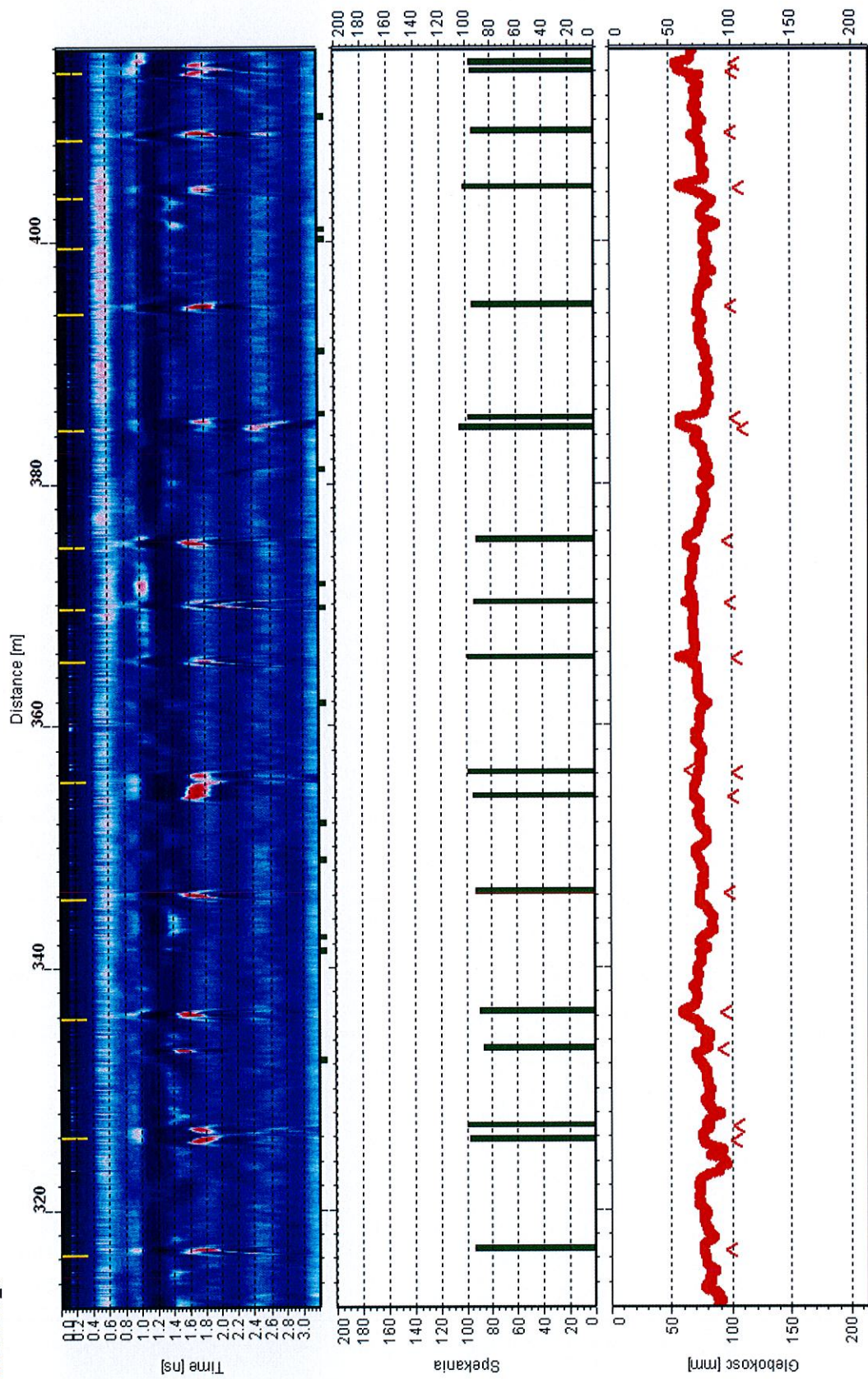


odcinek A1\_S

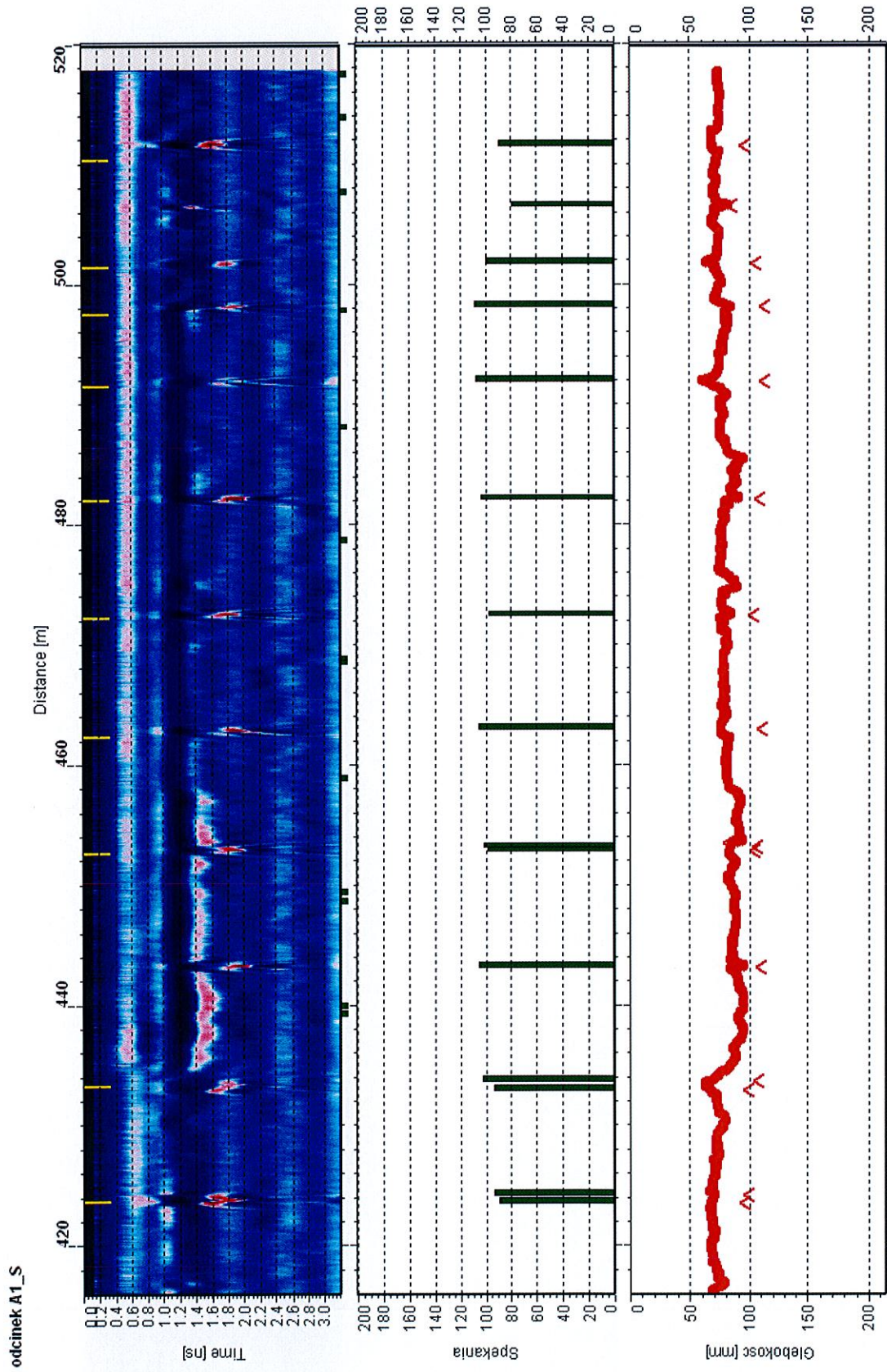




odcinek A1\_S

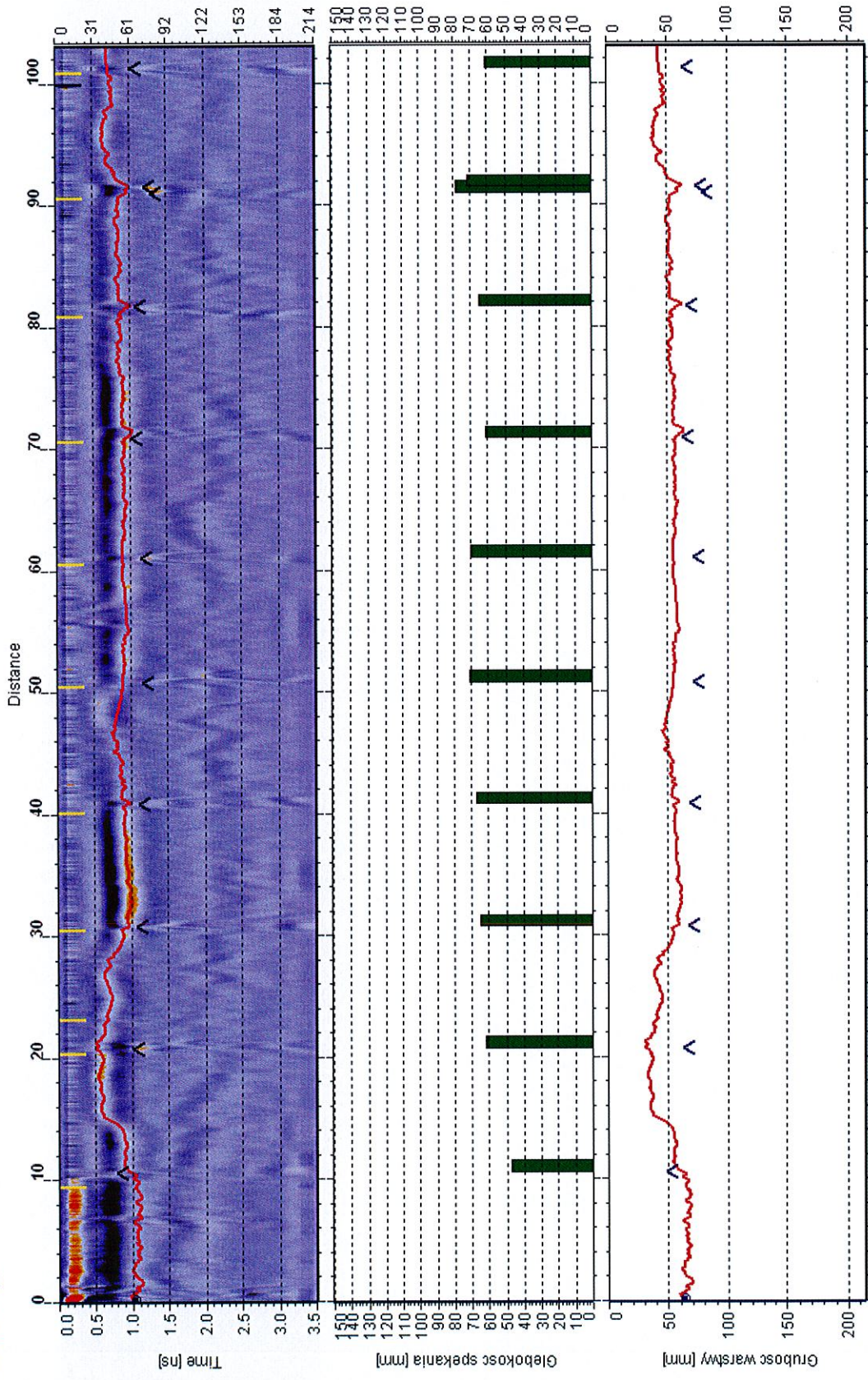






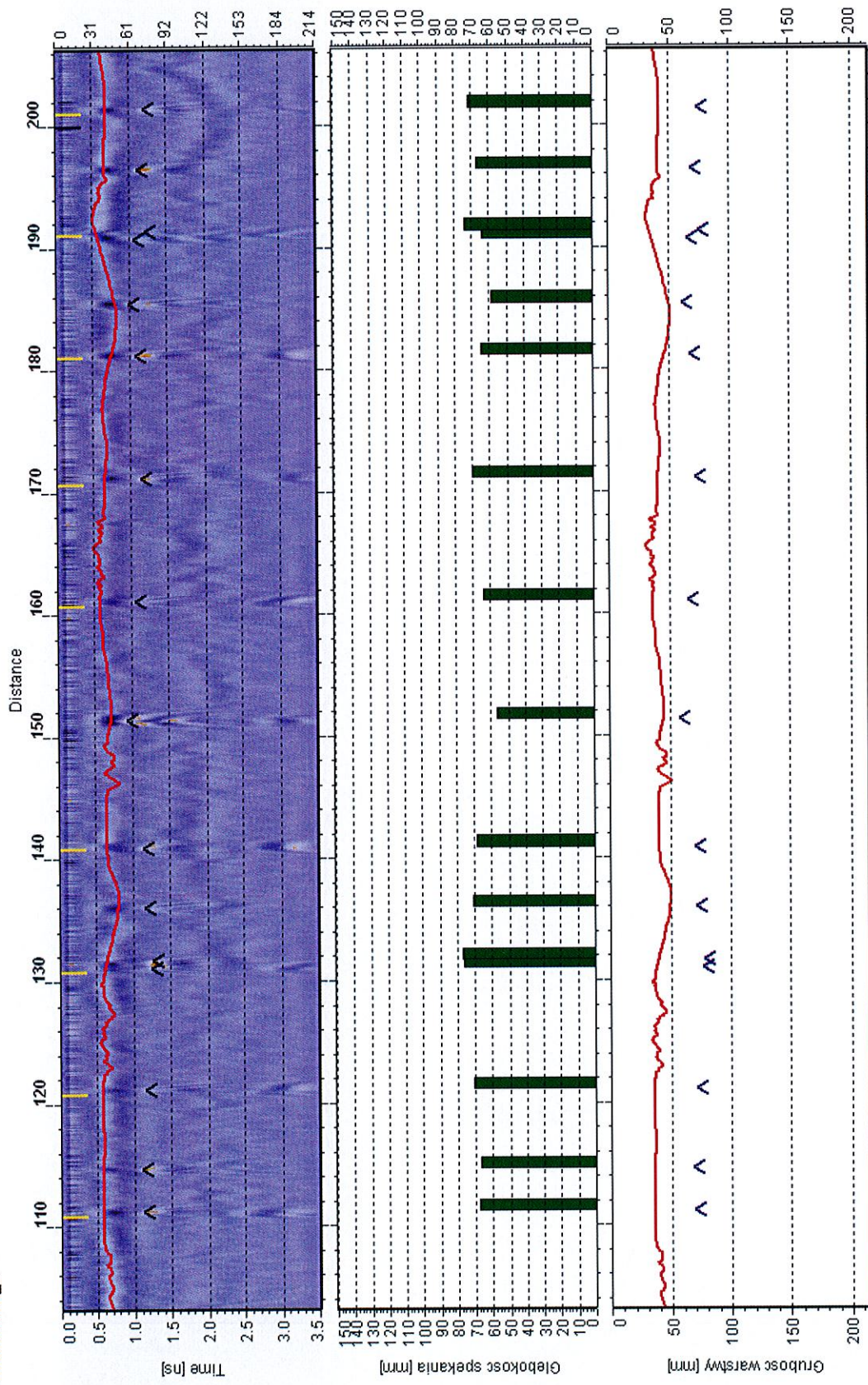


Odcinek: A2\_S



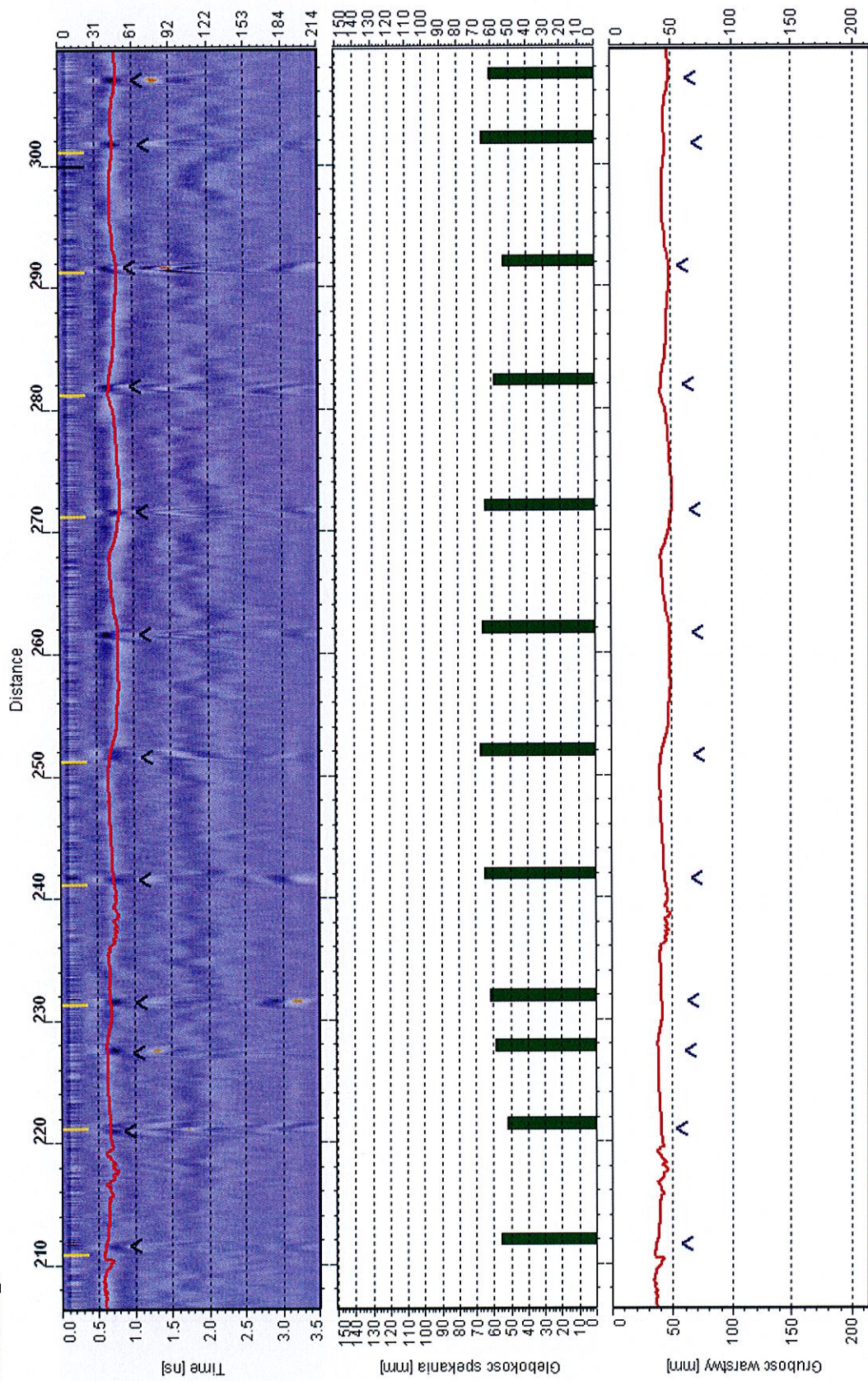


Odcinek: A2\_S



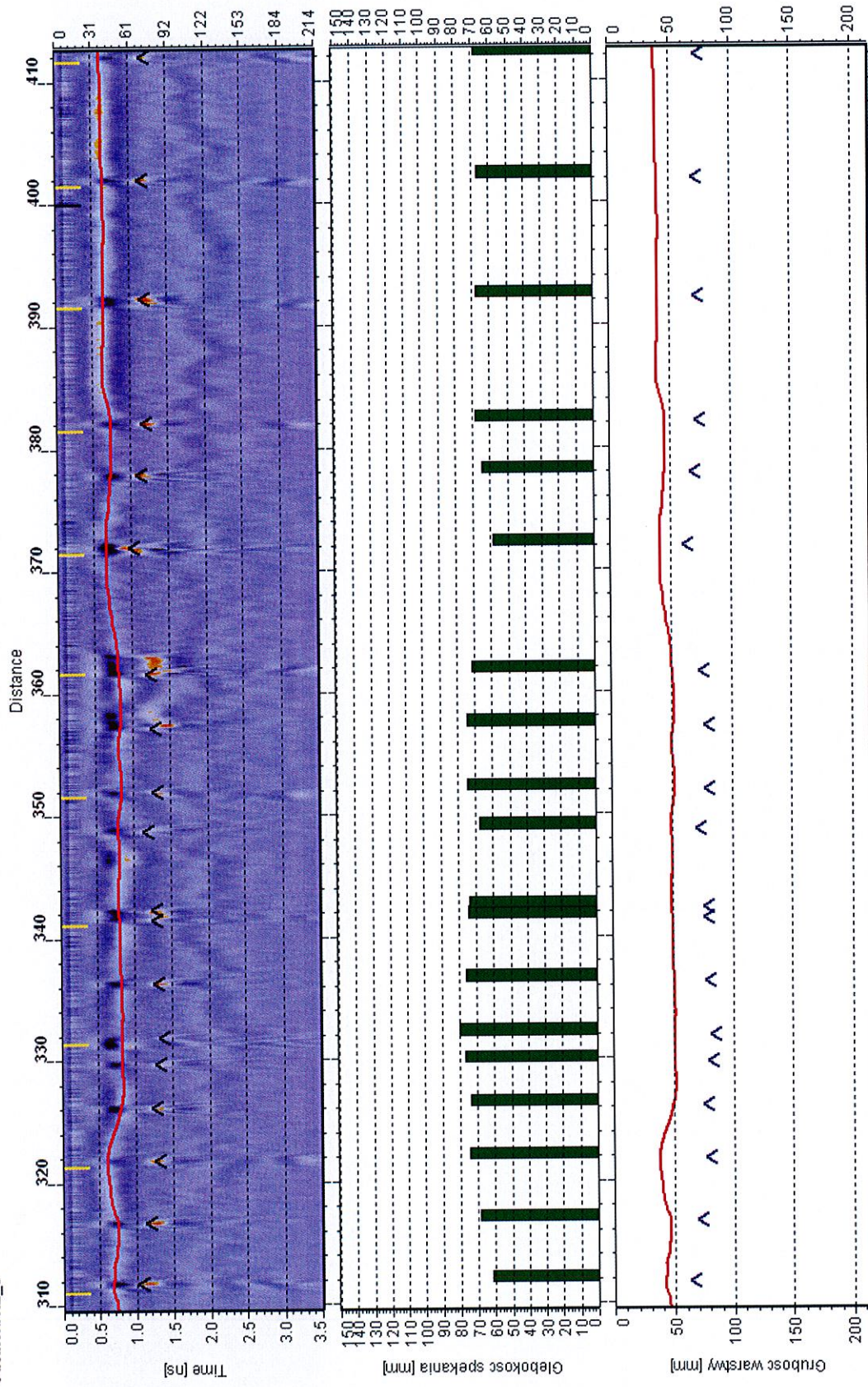


Odcinek: A2\_S



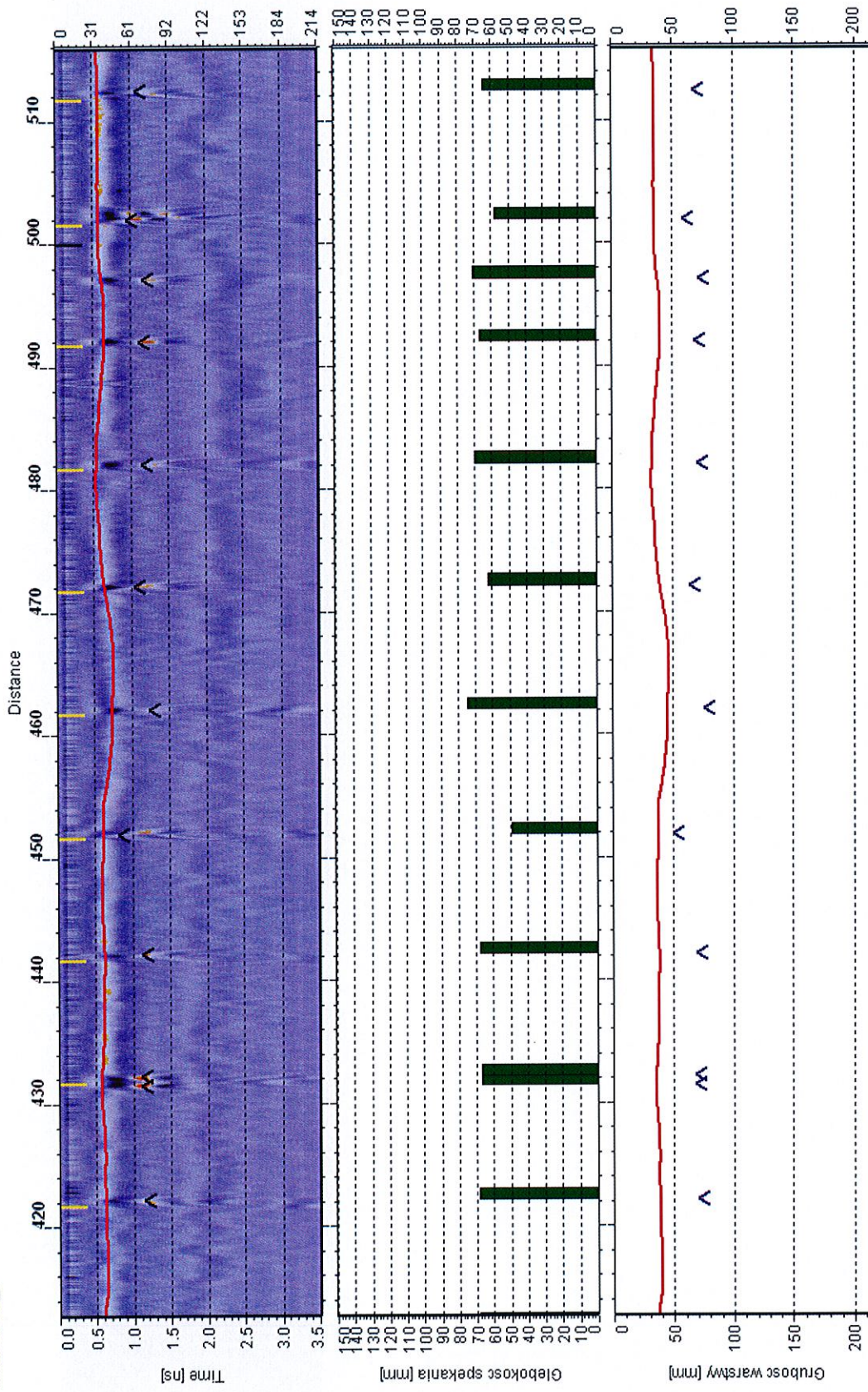


Odcinek: A2\_S



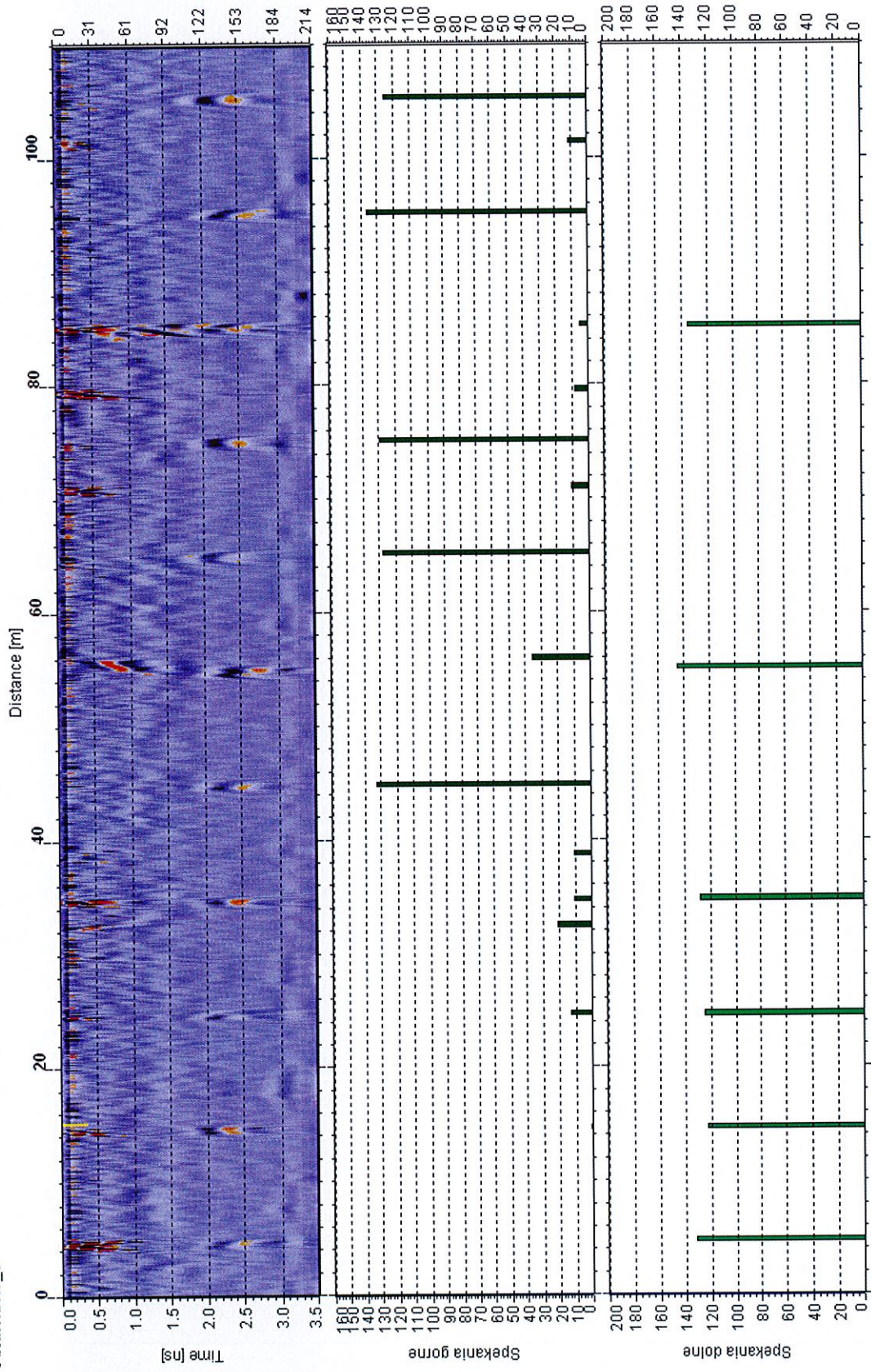


Odcinek: A2\_S



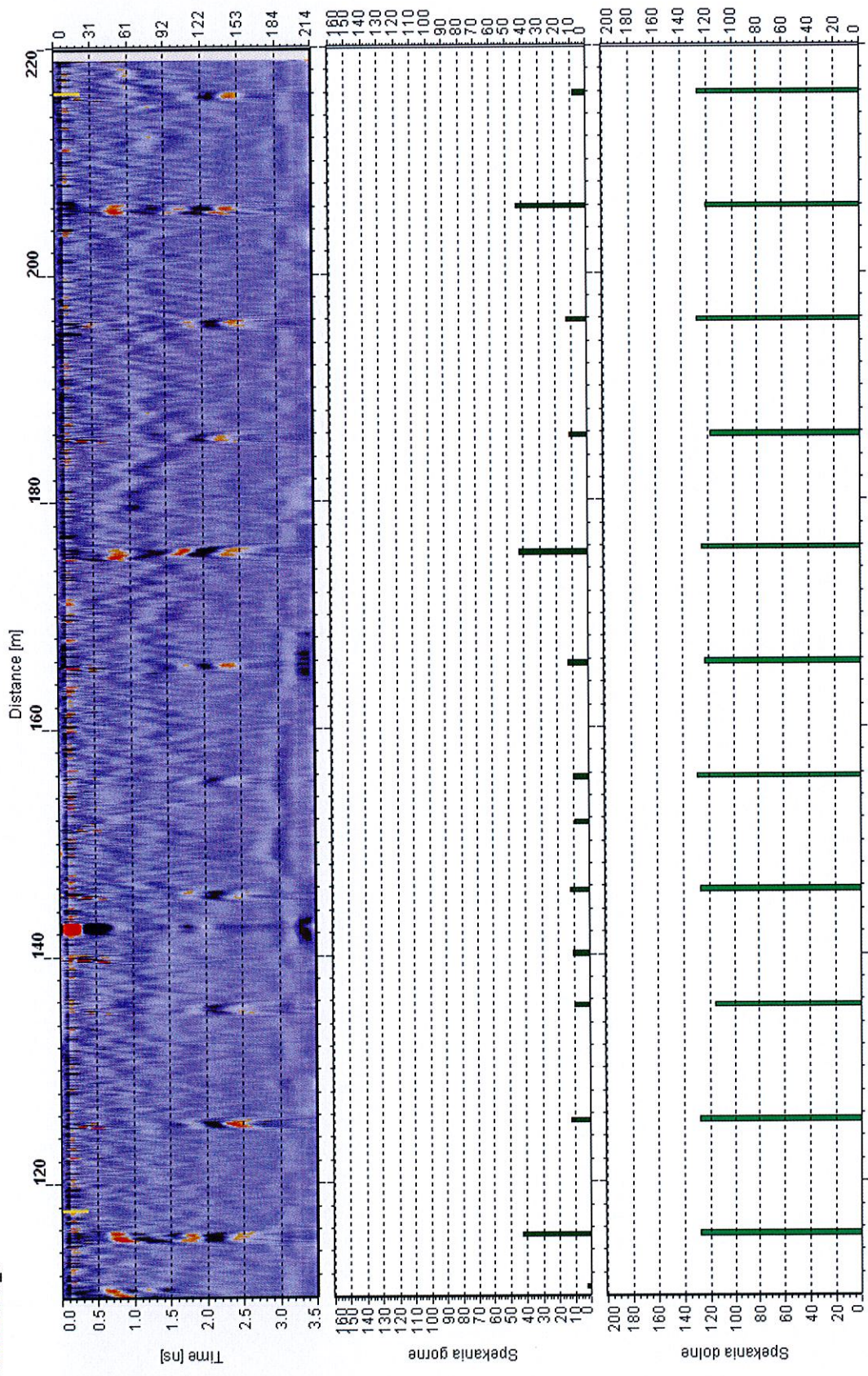


Odcinek: A3\_S

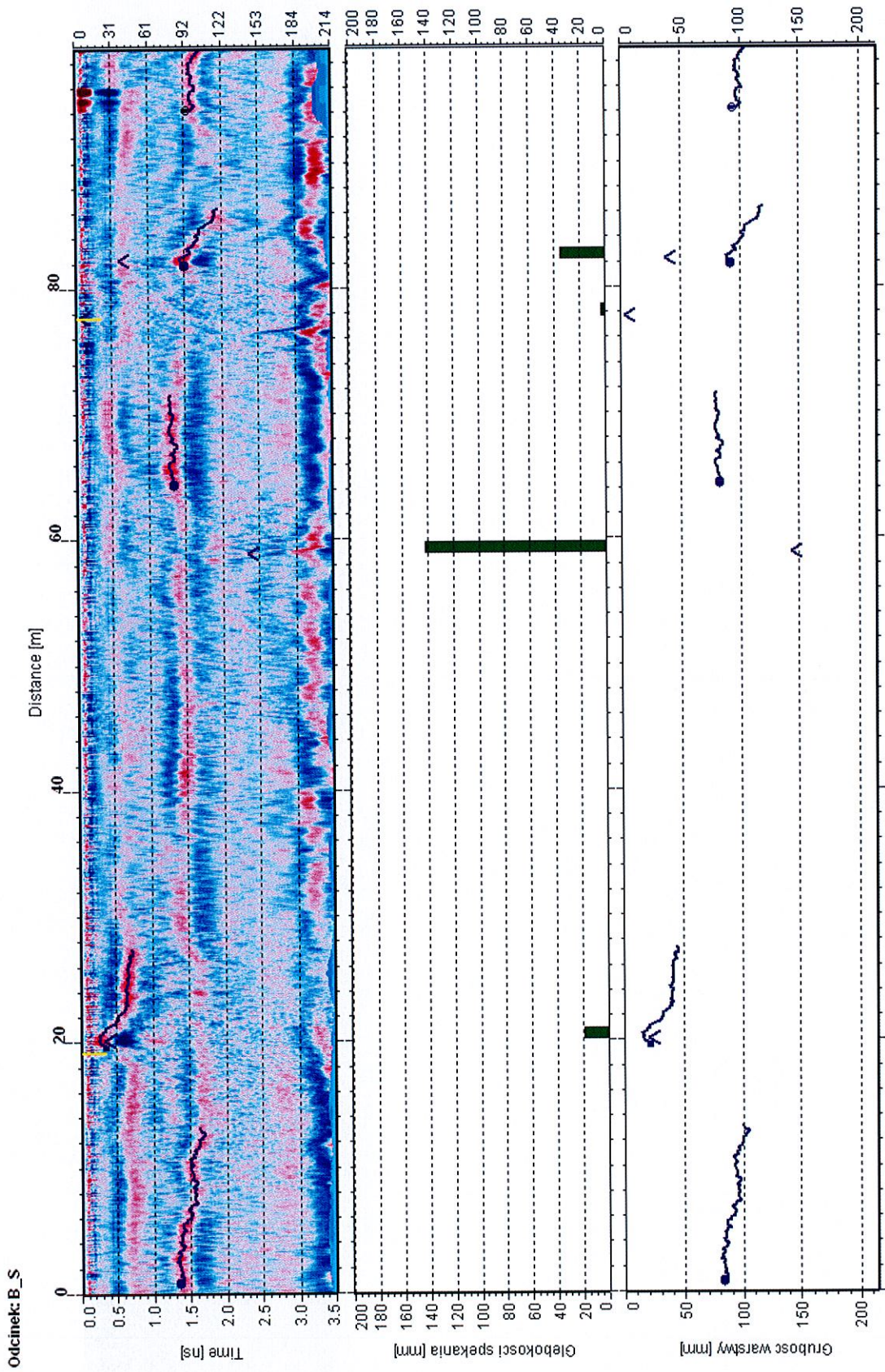




Odcinek: A3\_S

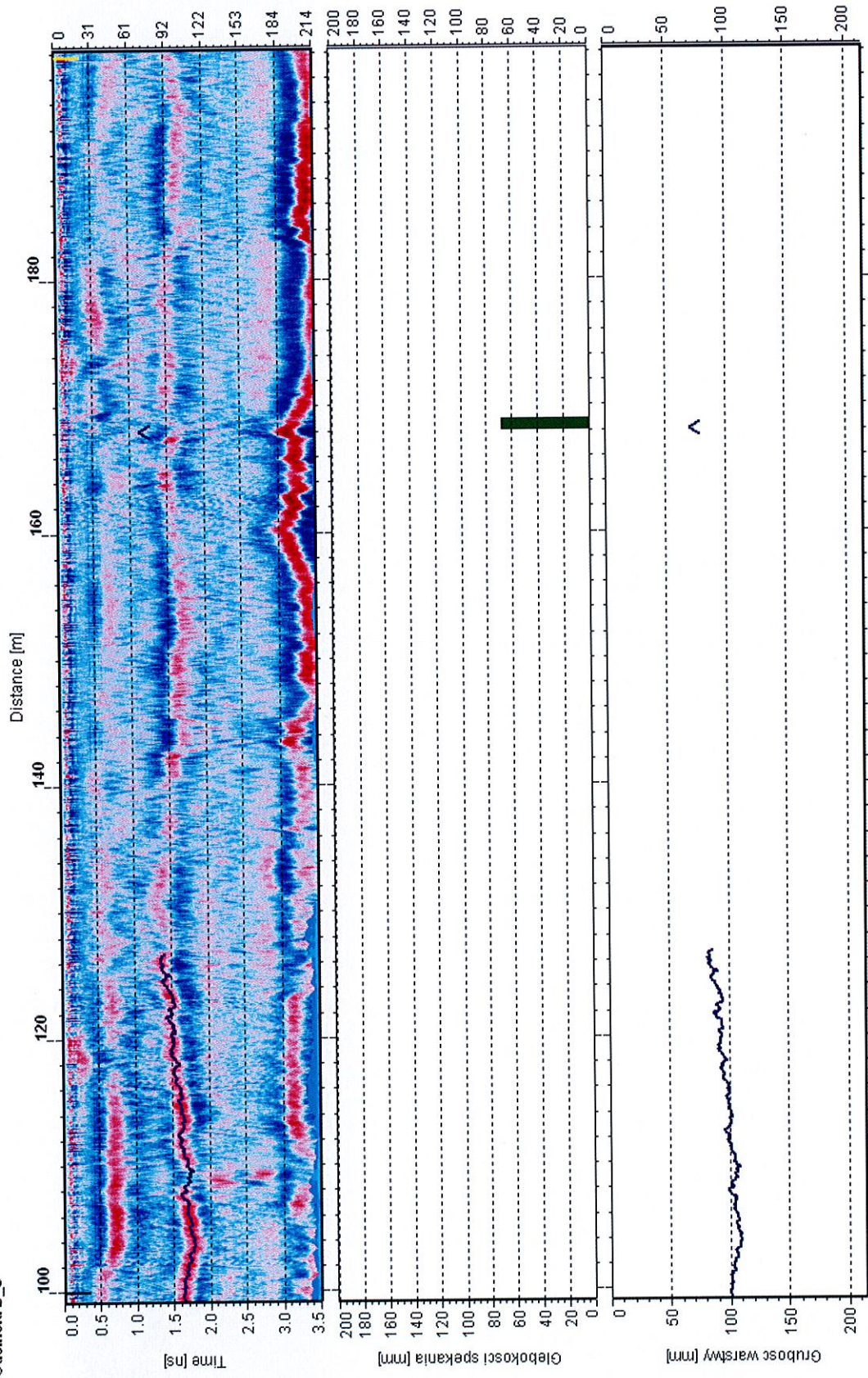






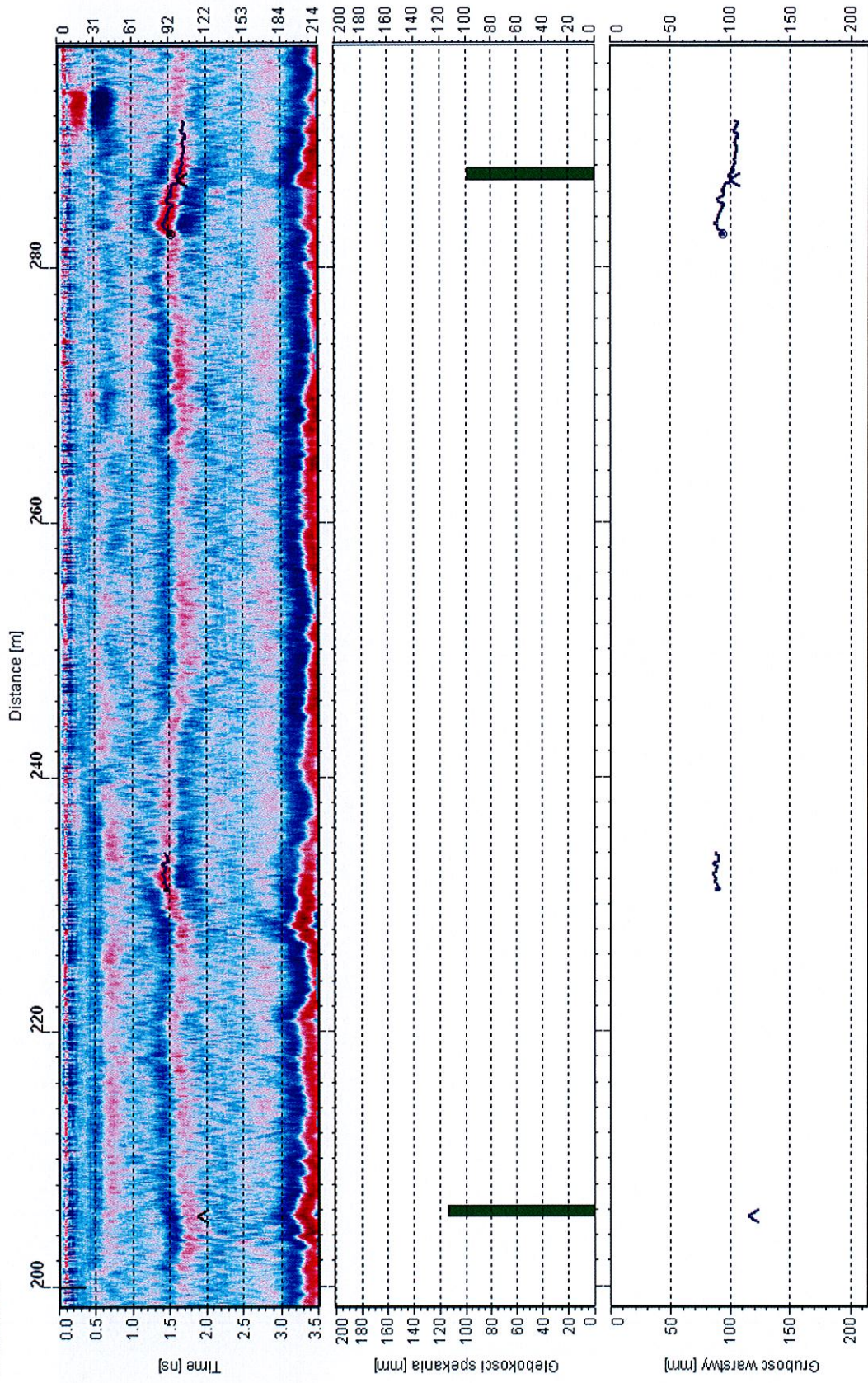


Odcinek: B\_S





Odcinek: B\_S

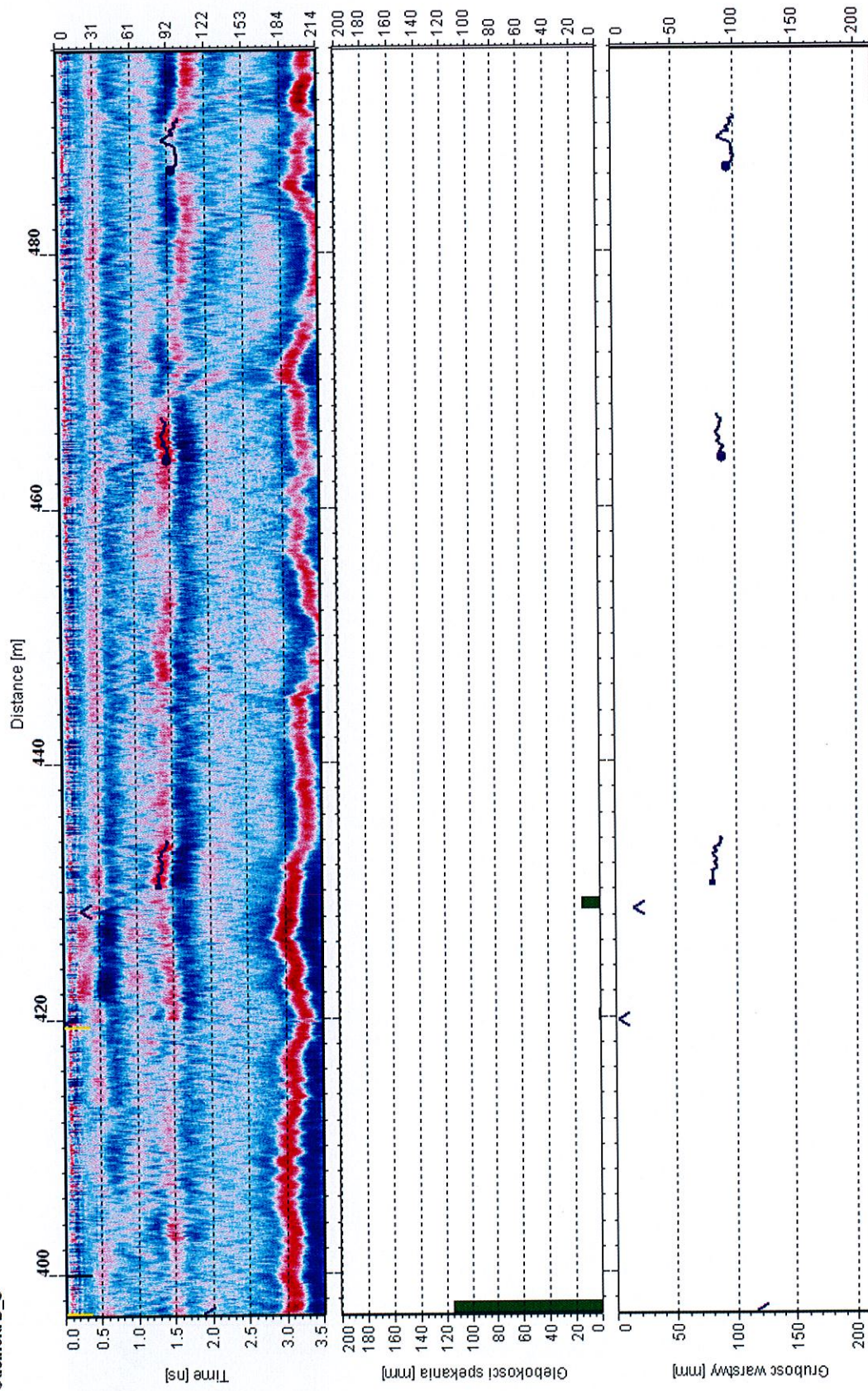






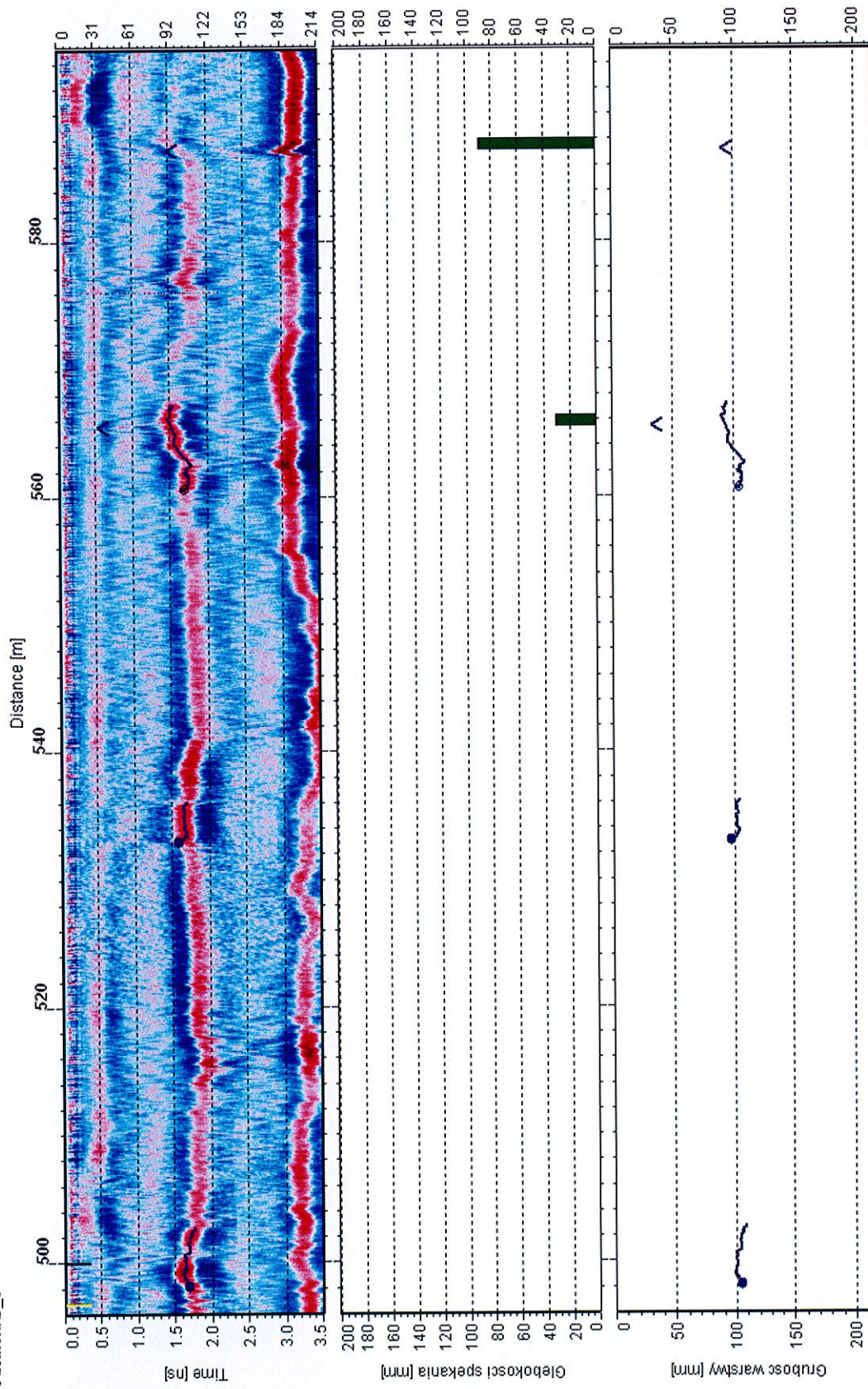


Odcinek: B\_S



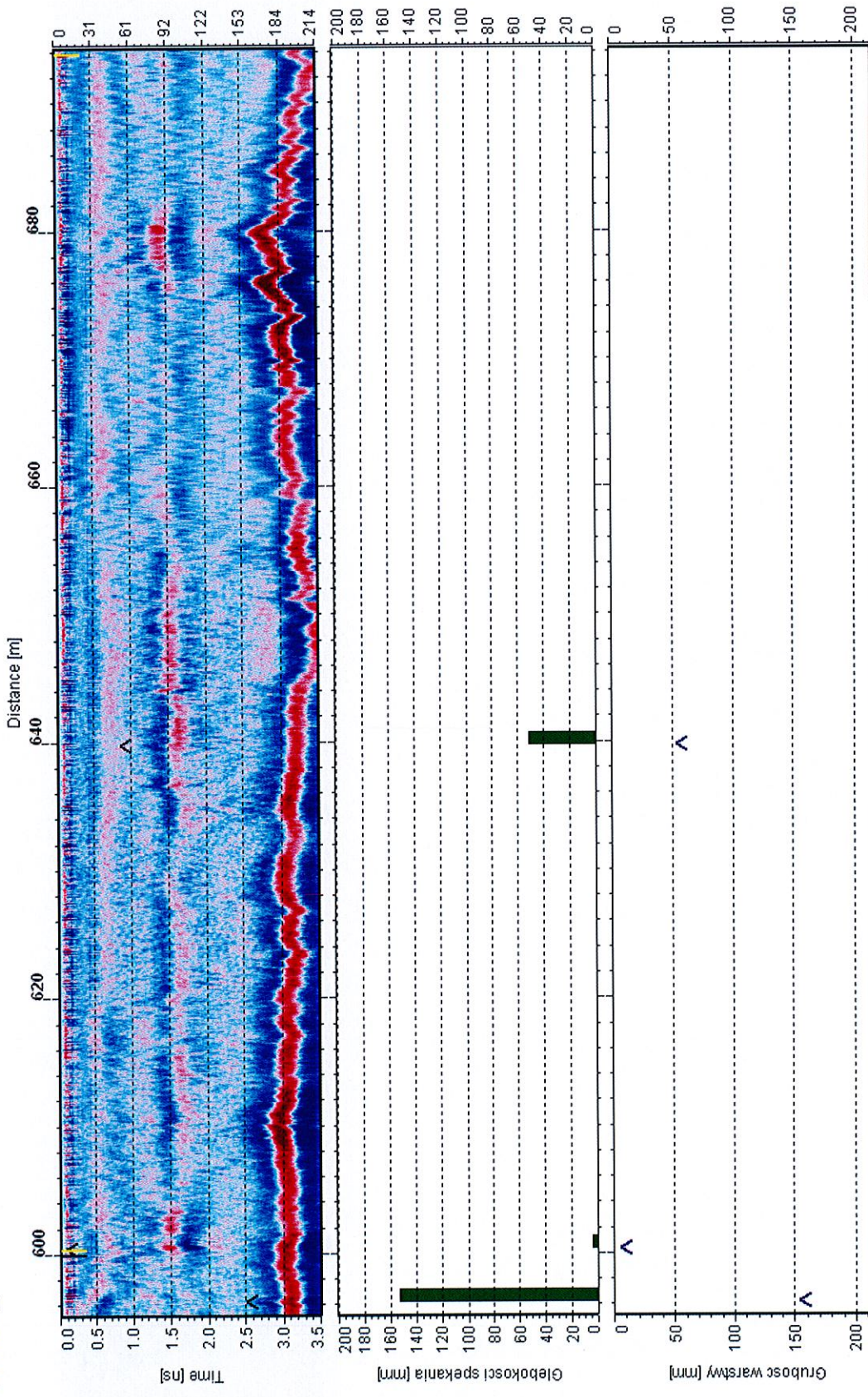


Odcinek: B\_S



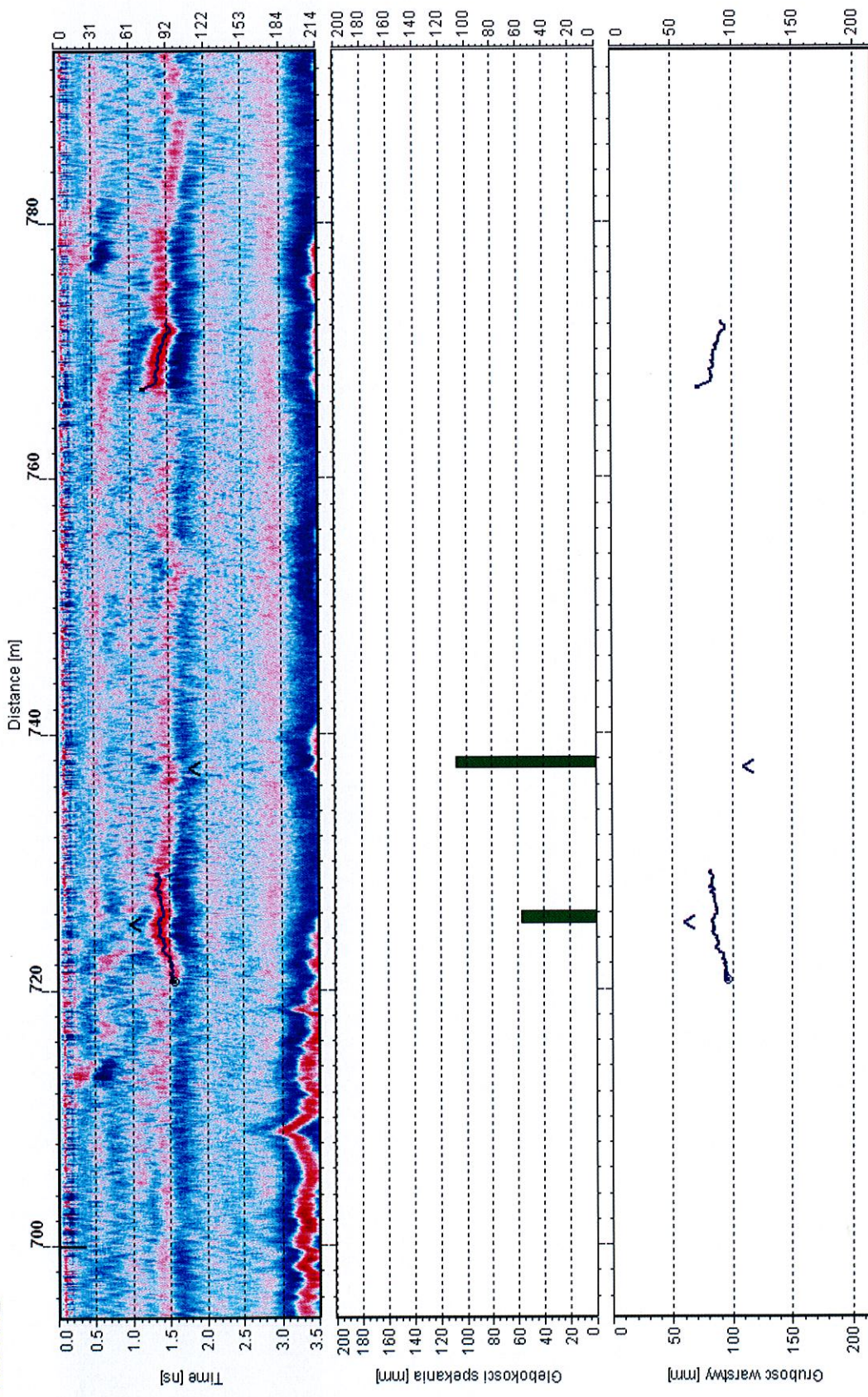


Odcinek: B\_S



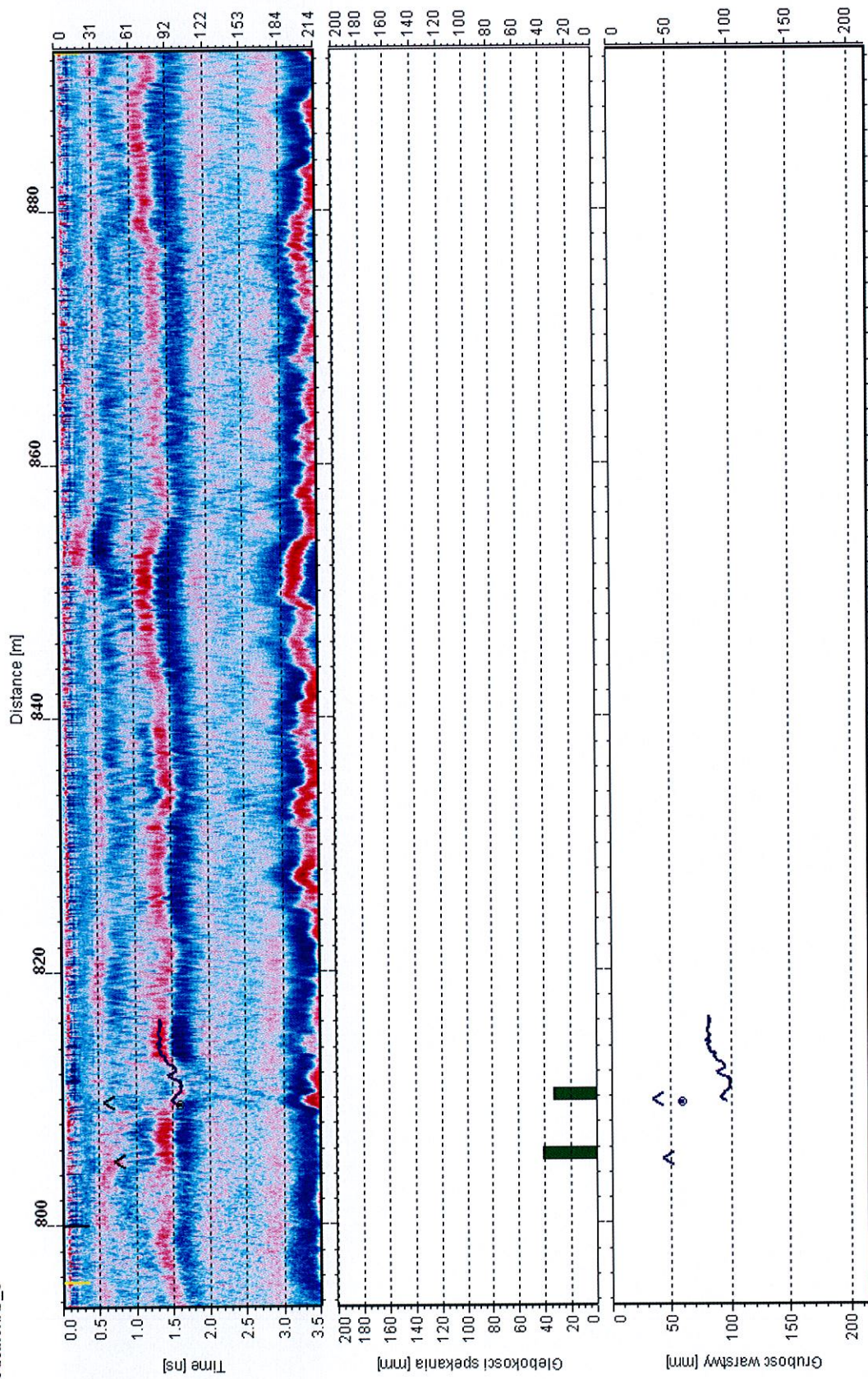


Odcinek: B\_S



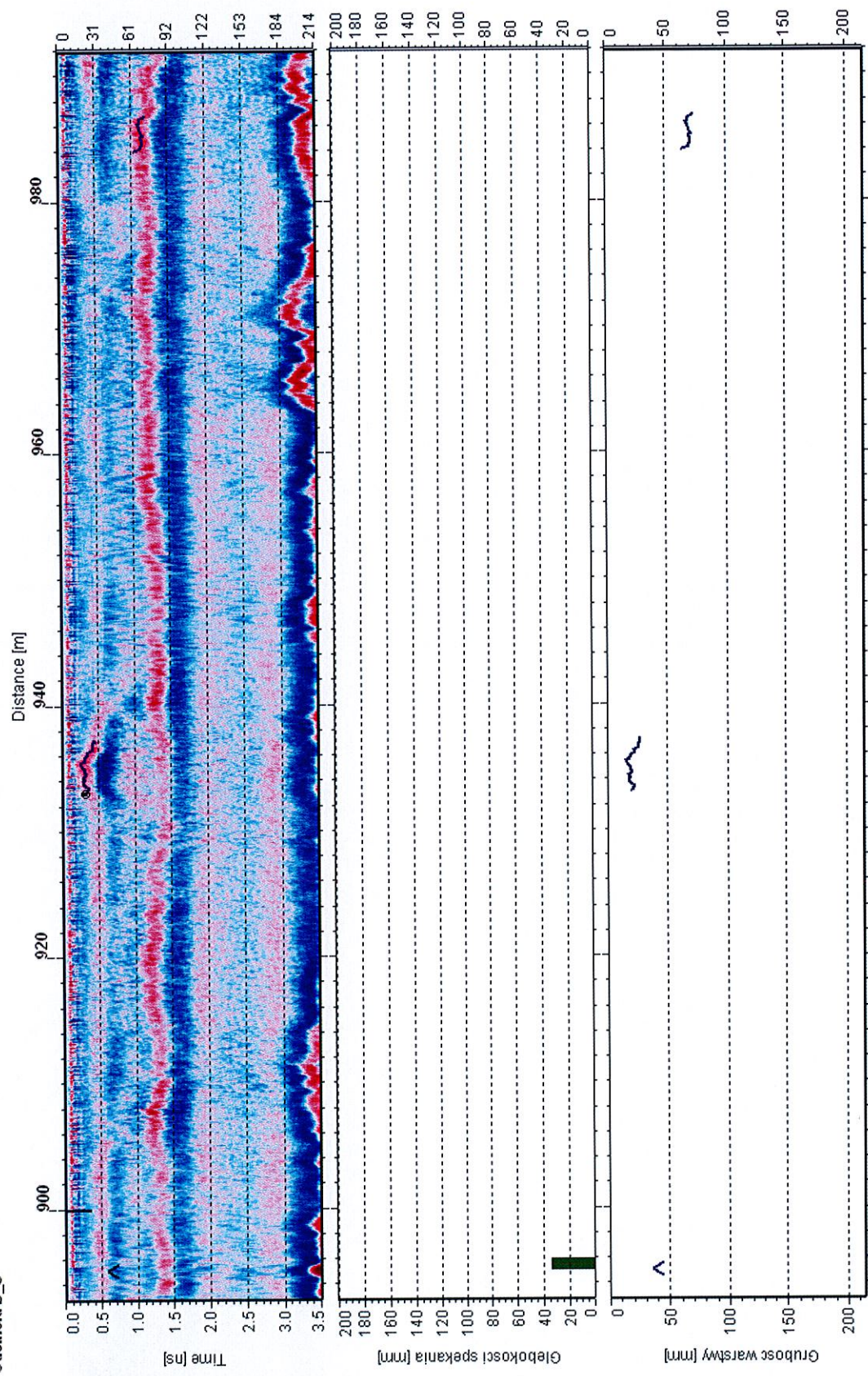


Odcinek: B\_S

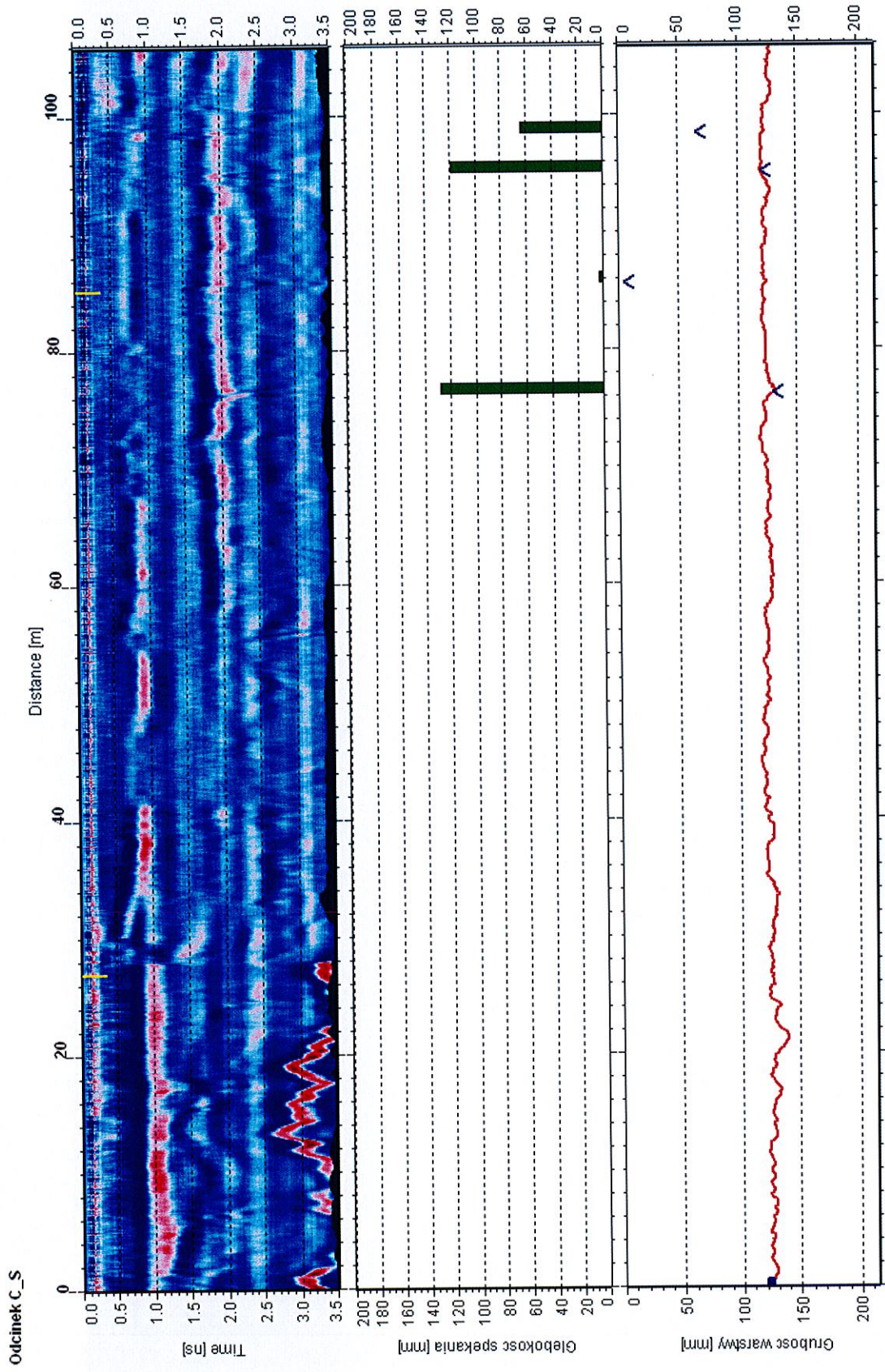




Odcinek: B\_S

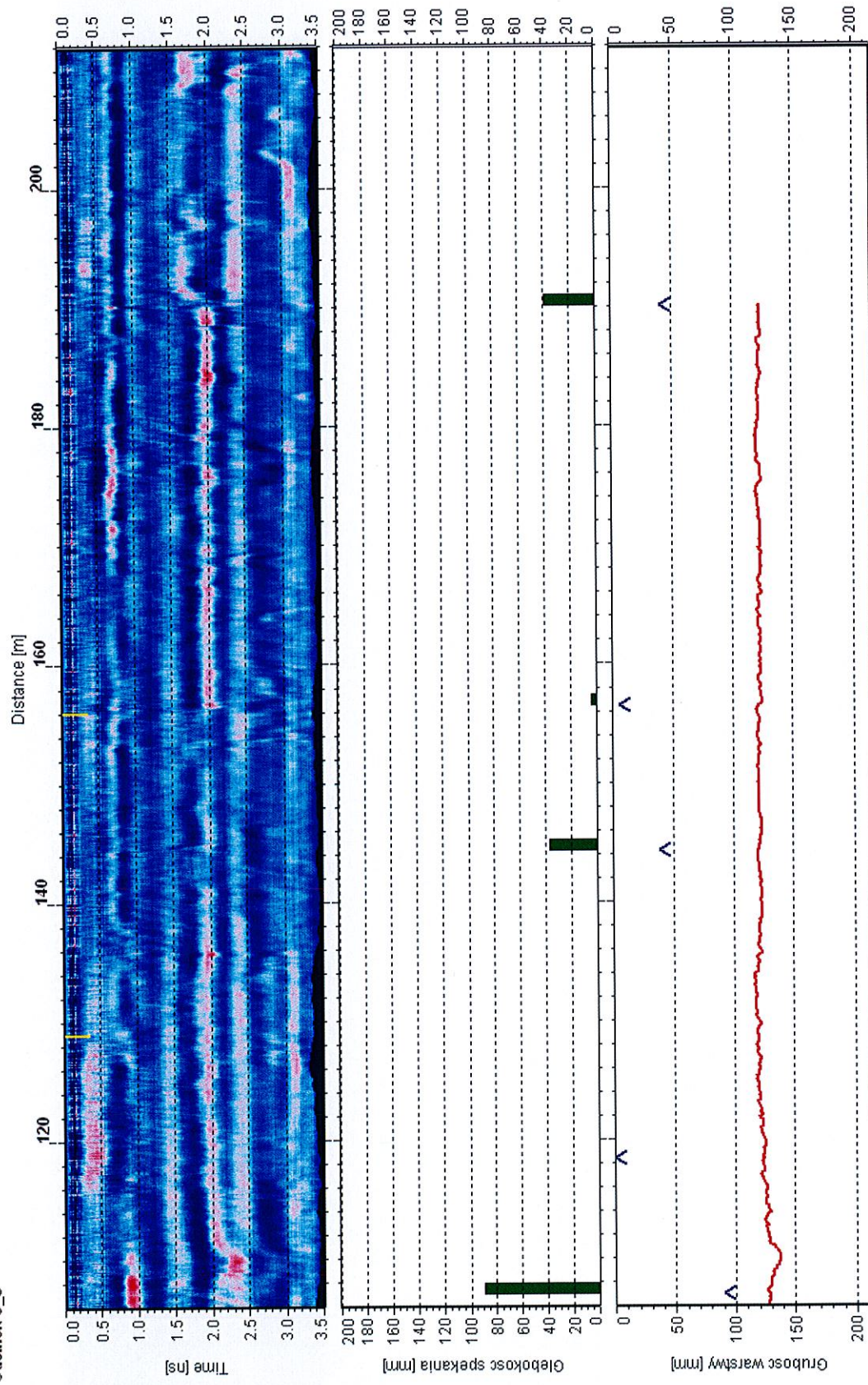






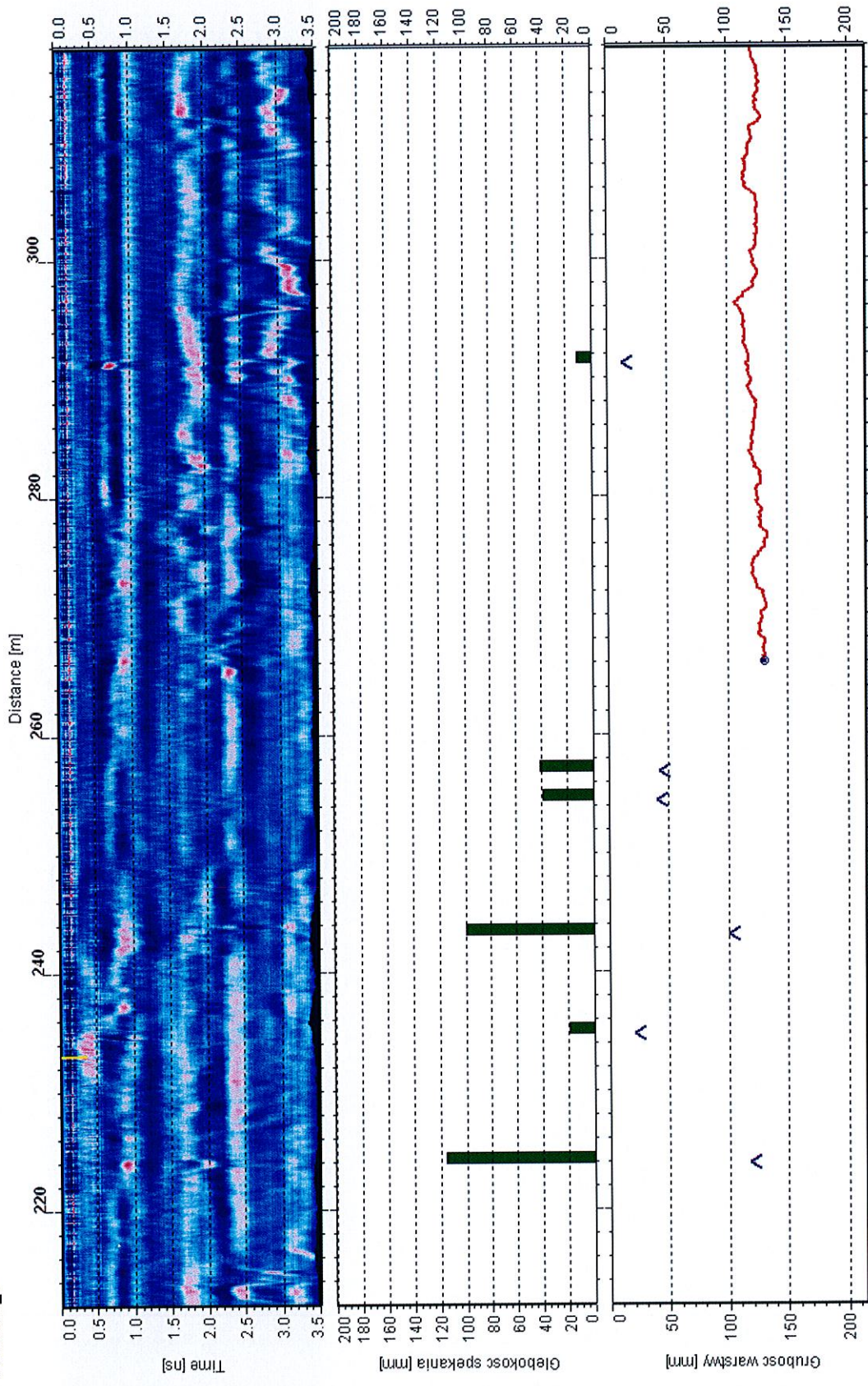


Odcinek C\_S

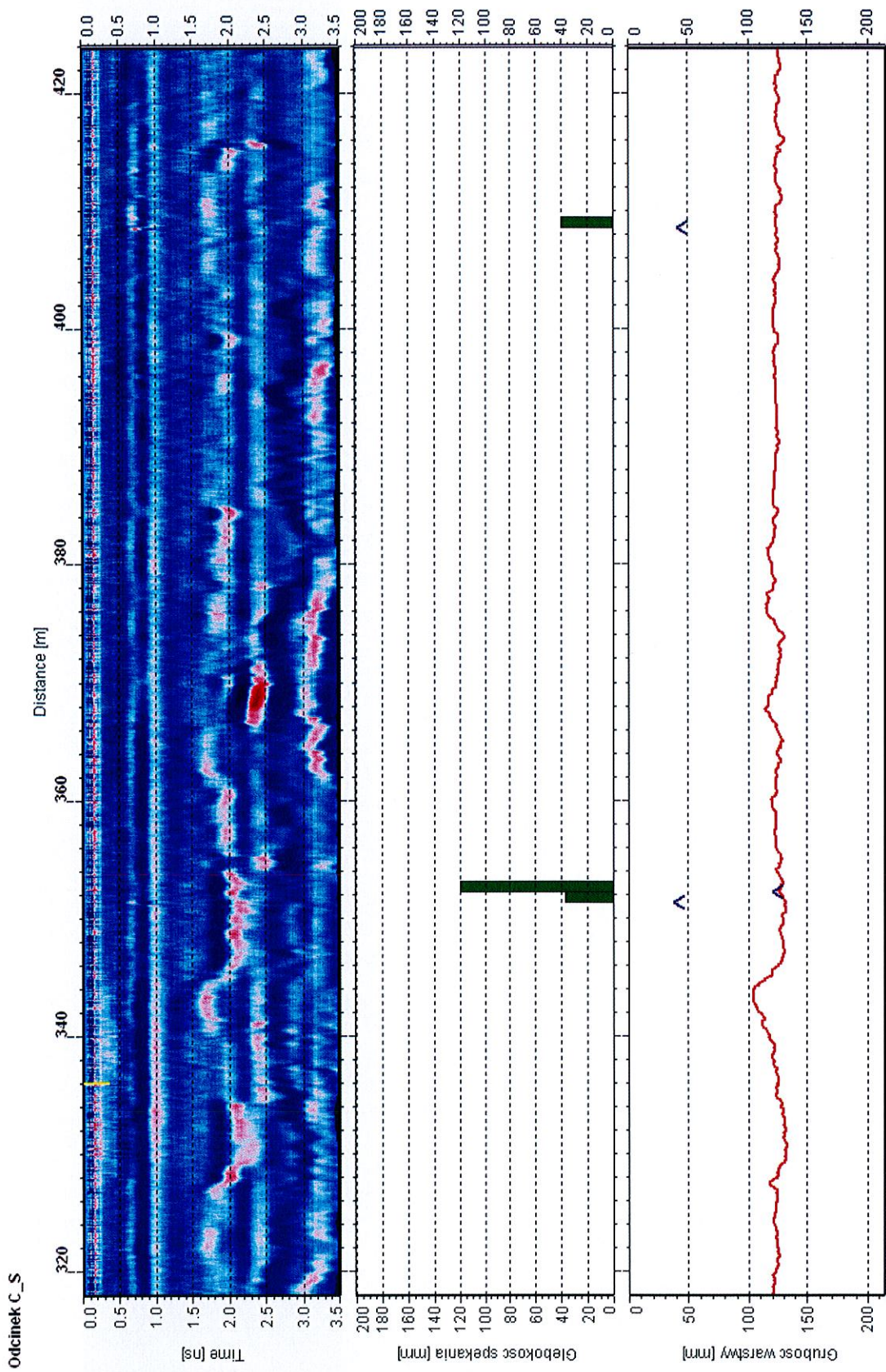




Odcinek C\_S

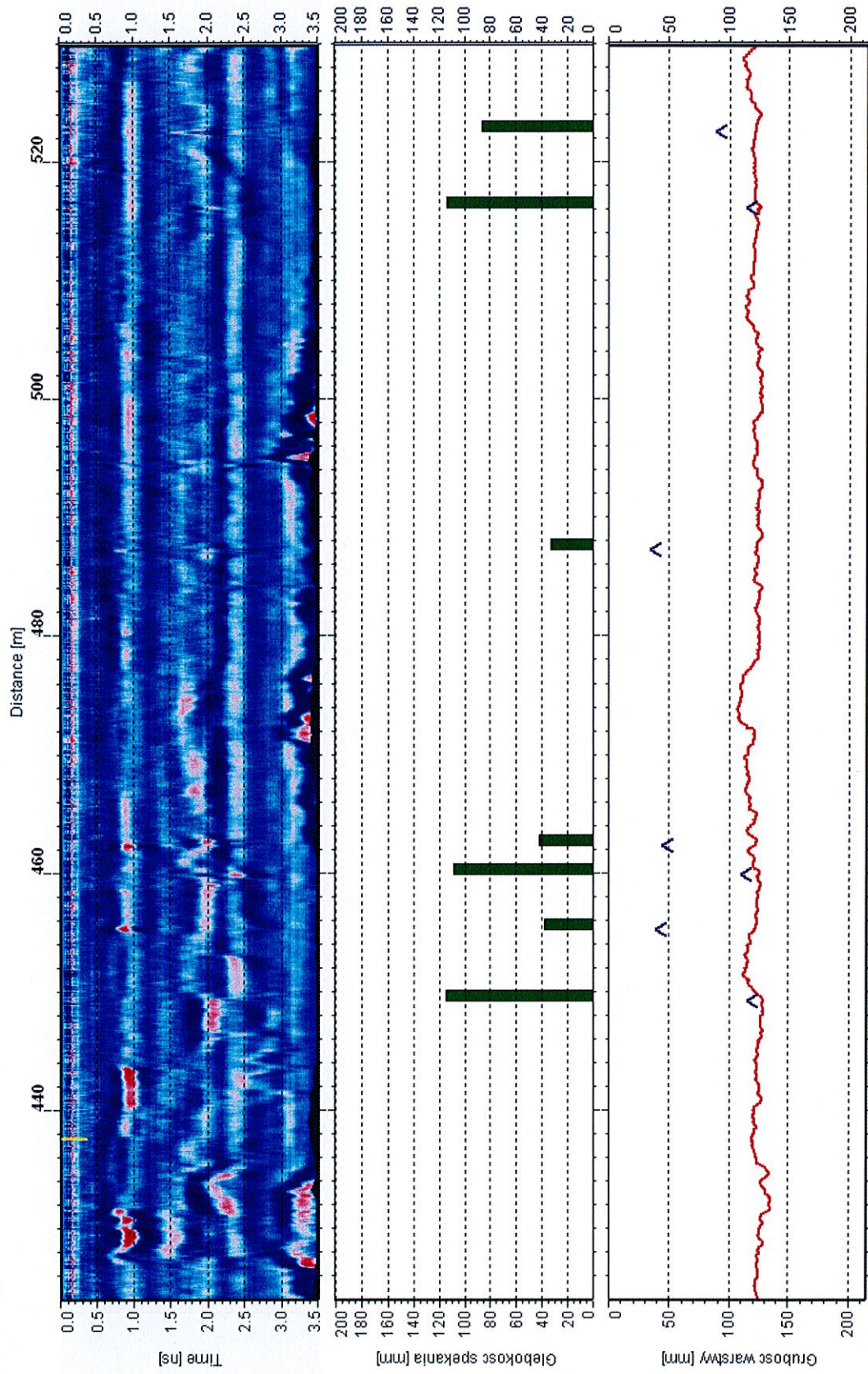






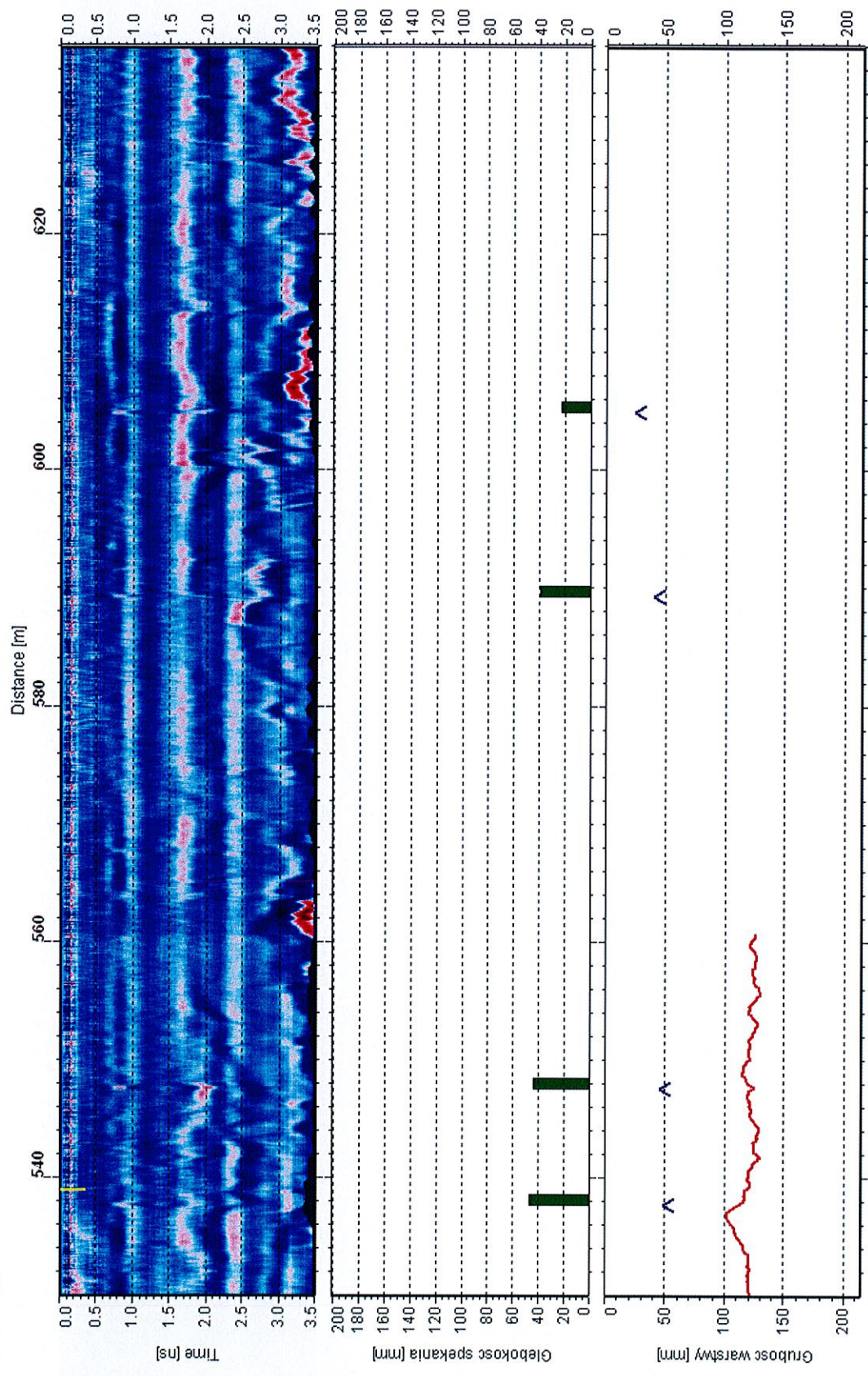


Odcinek C\_S



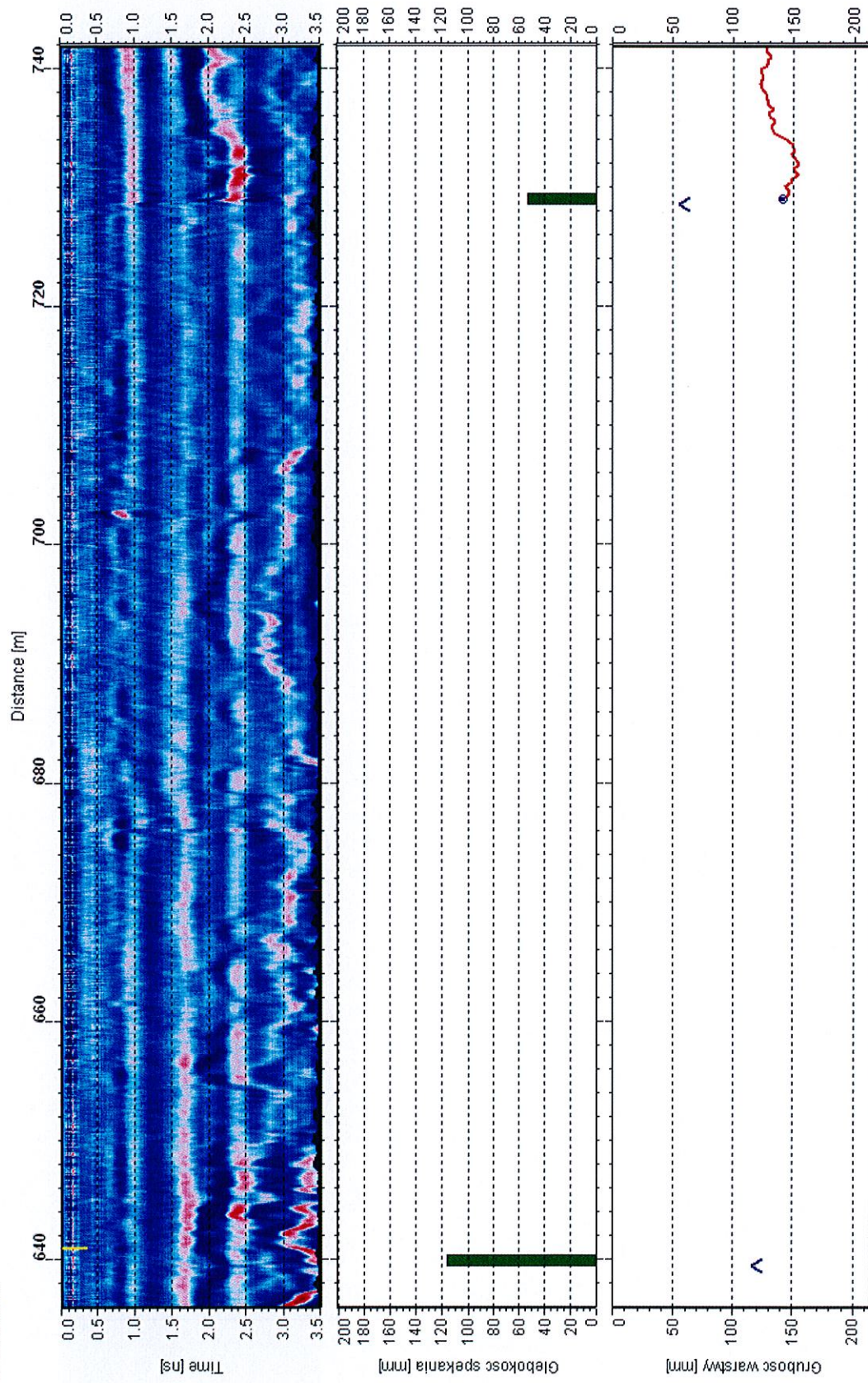


Odcinek C\_S

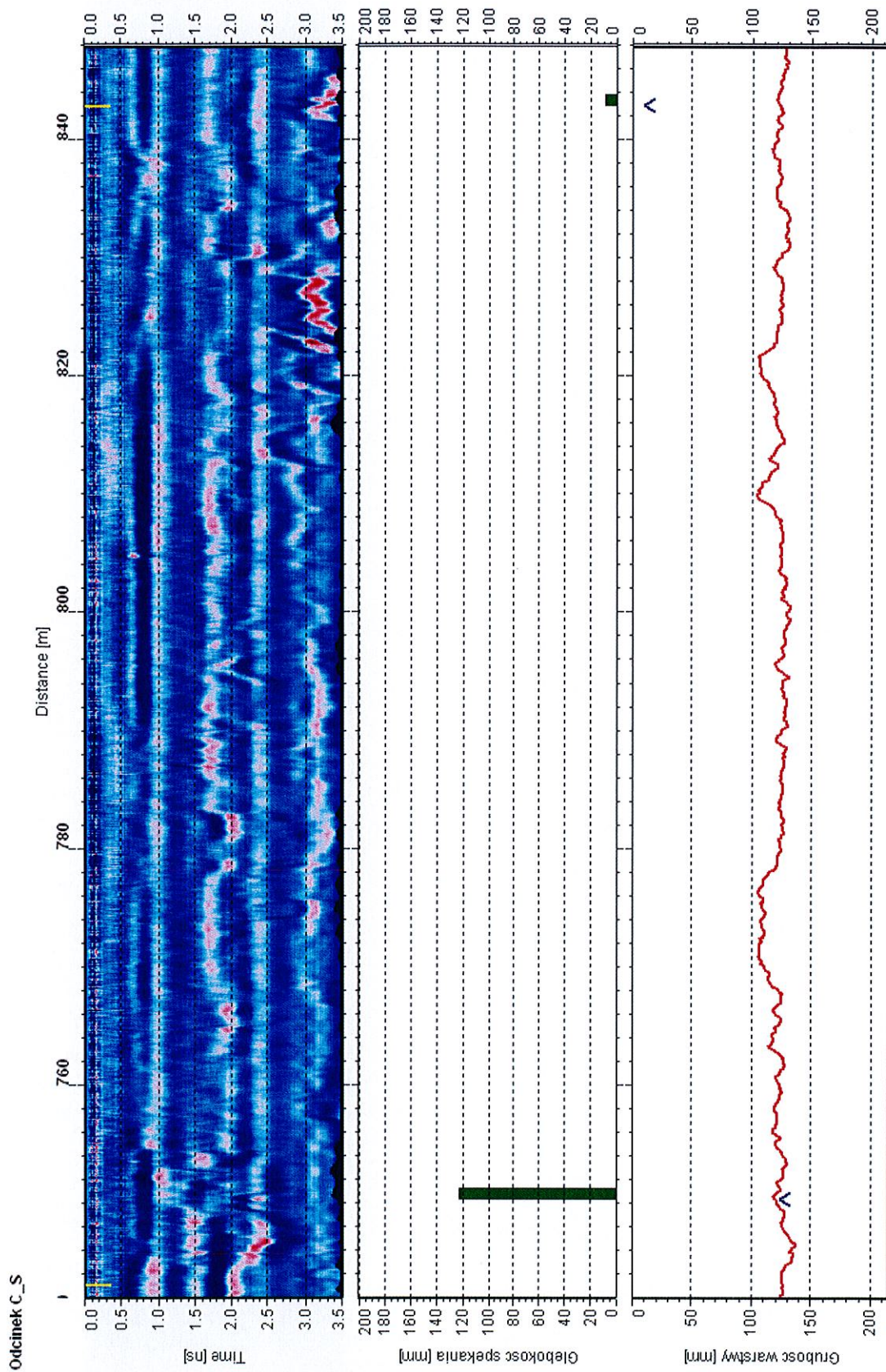




Odcinek C\_S

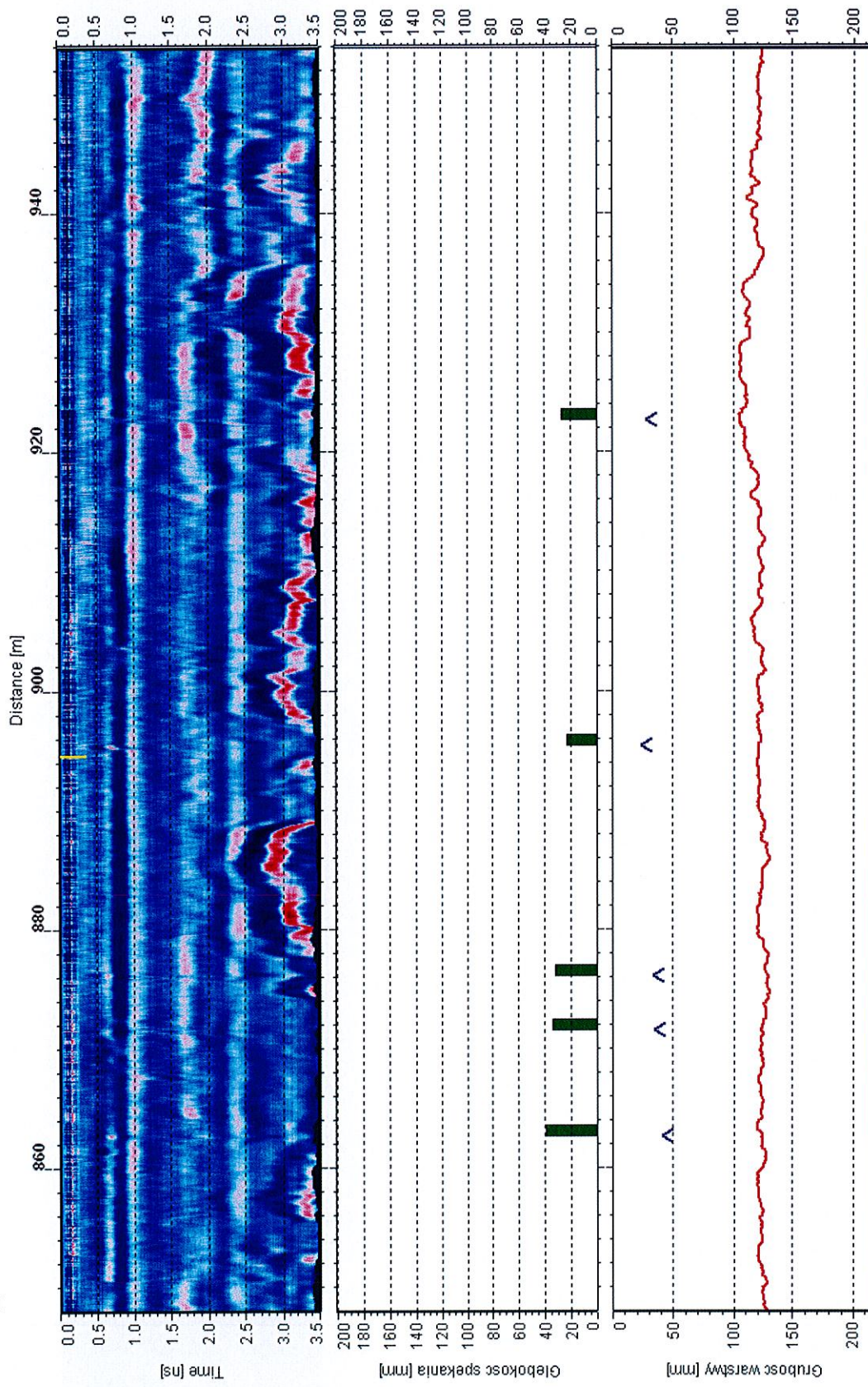






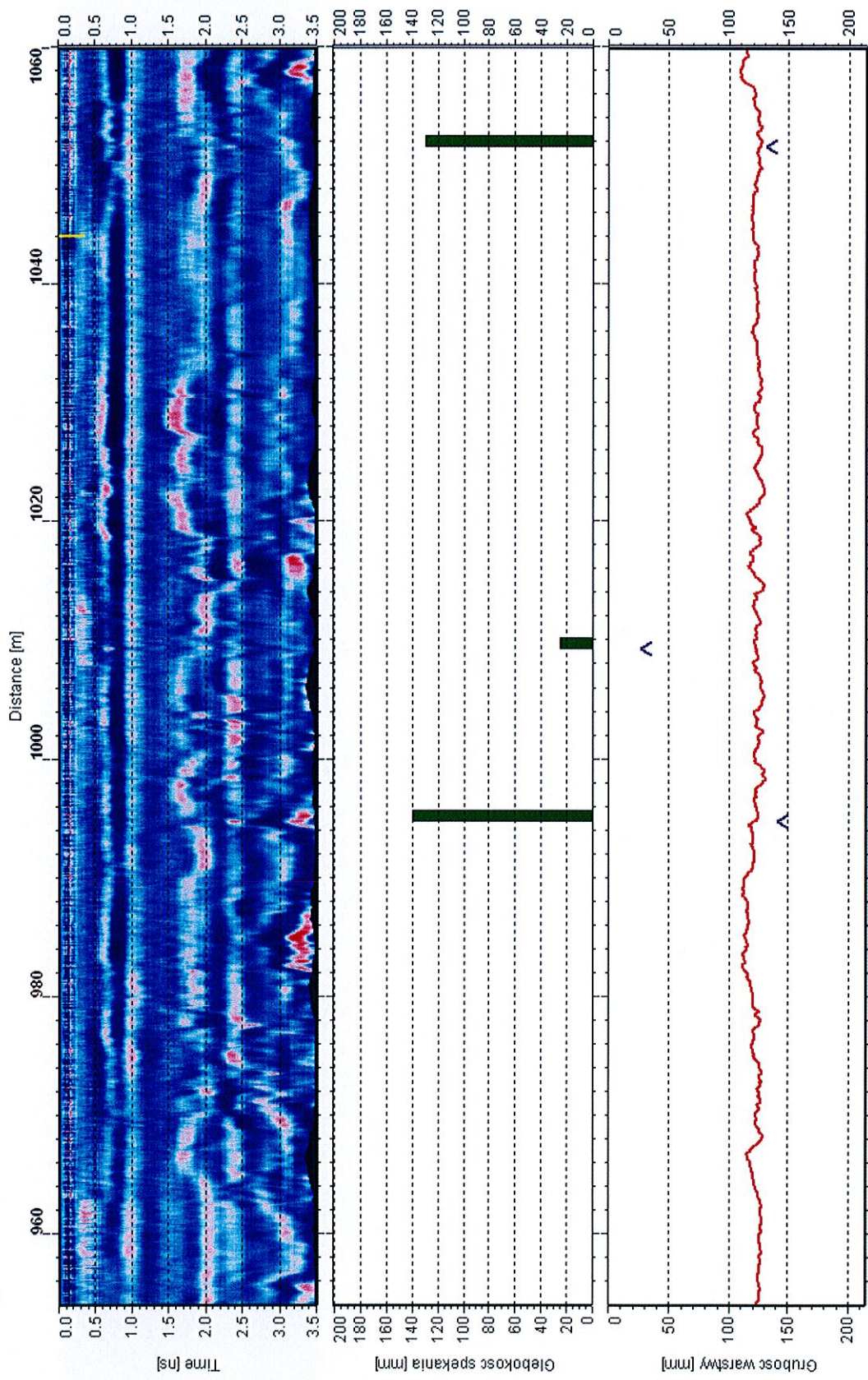


Odcinek C\_S



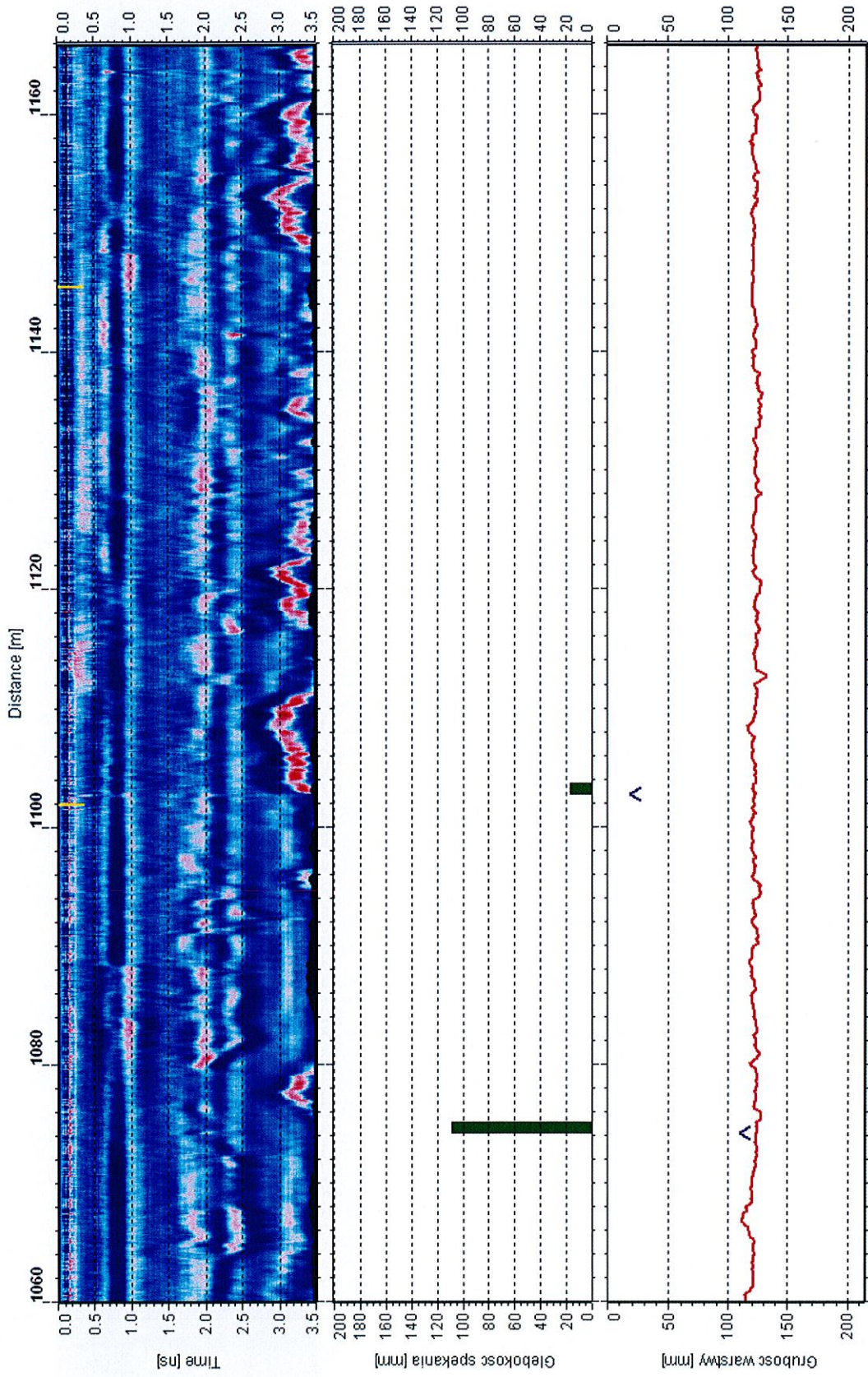


Odcinek C\_S



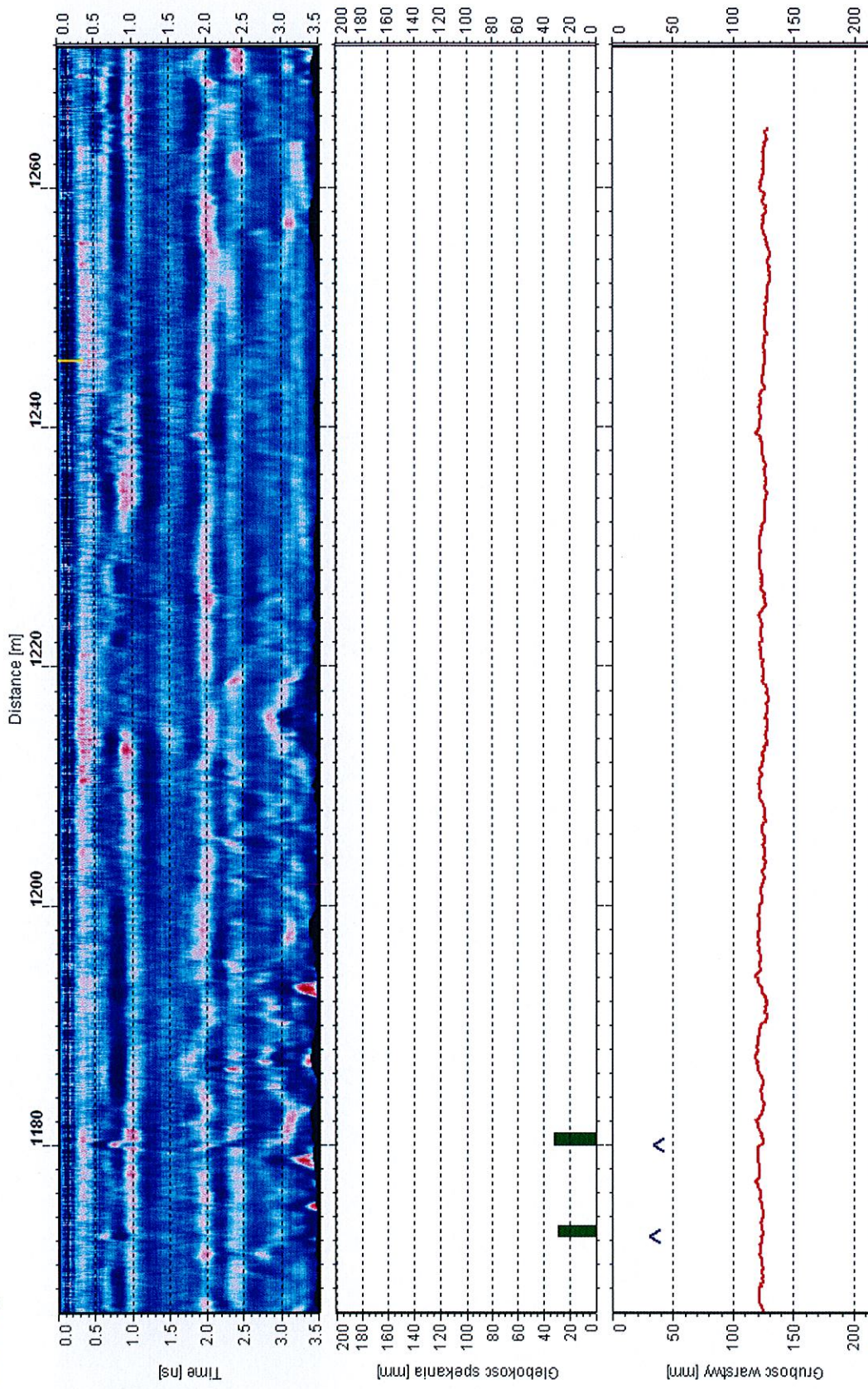


Odcinek C\_S

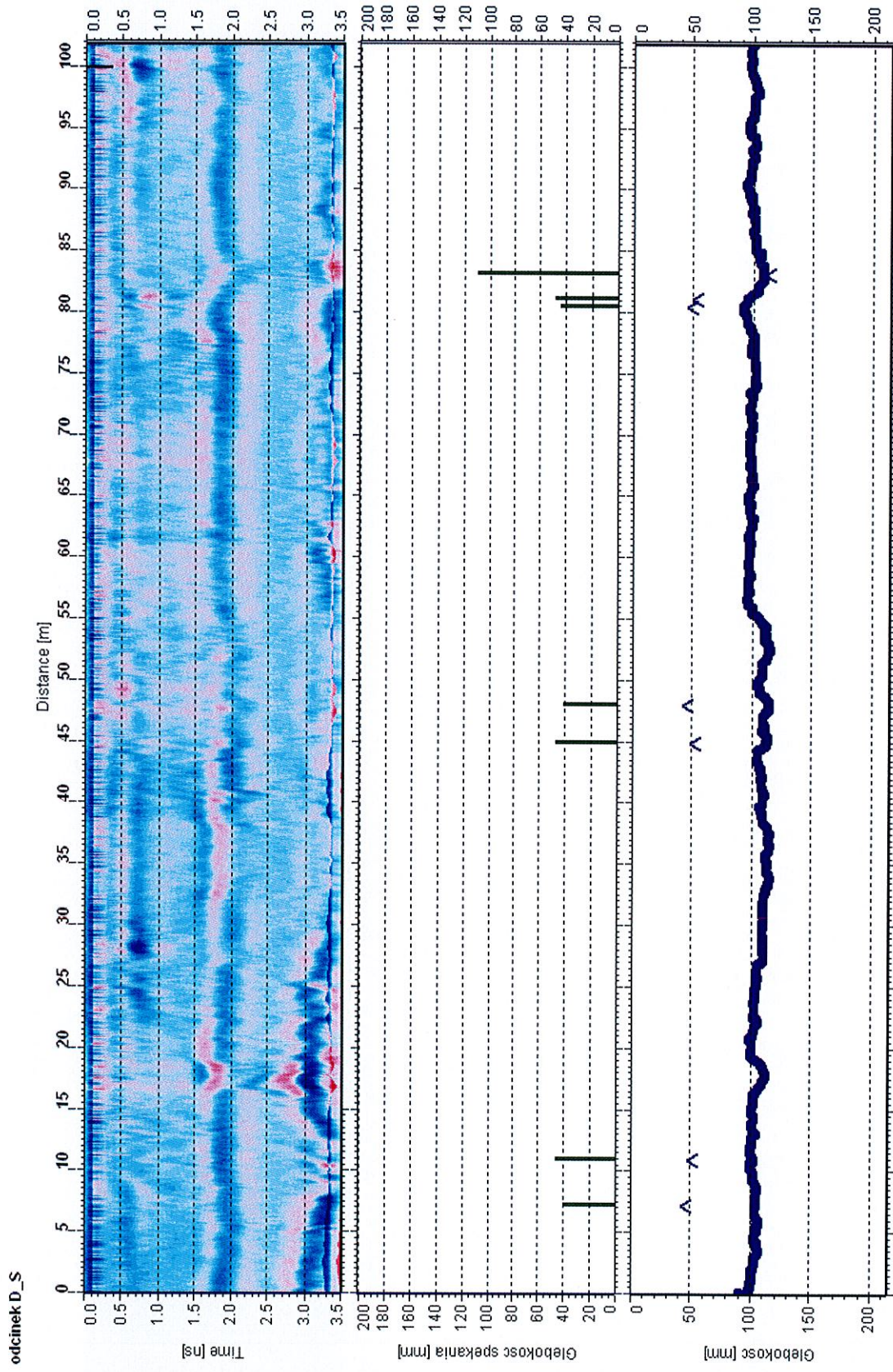




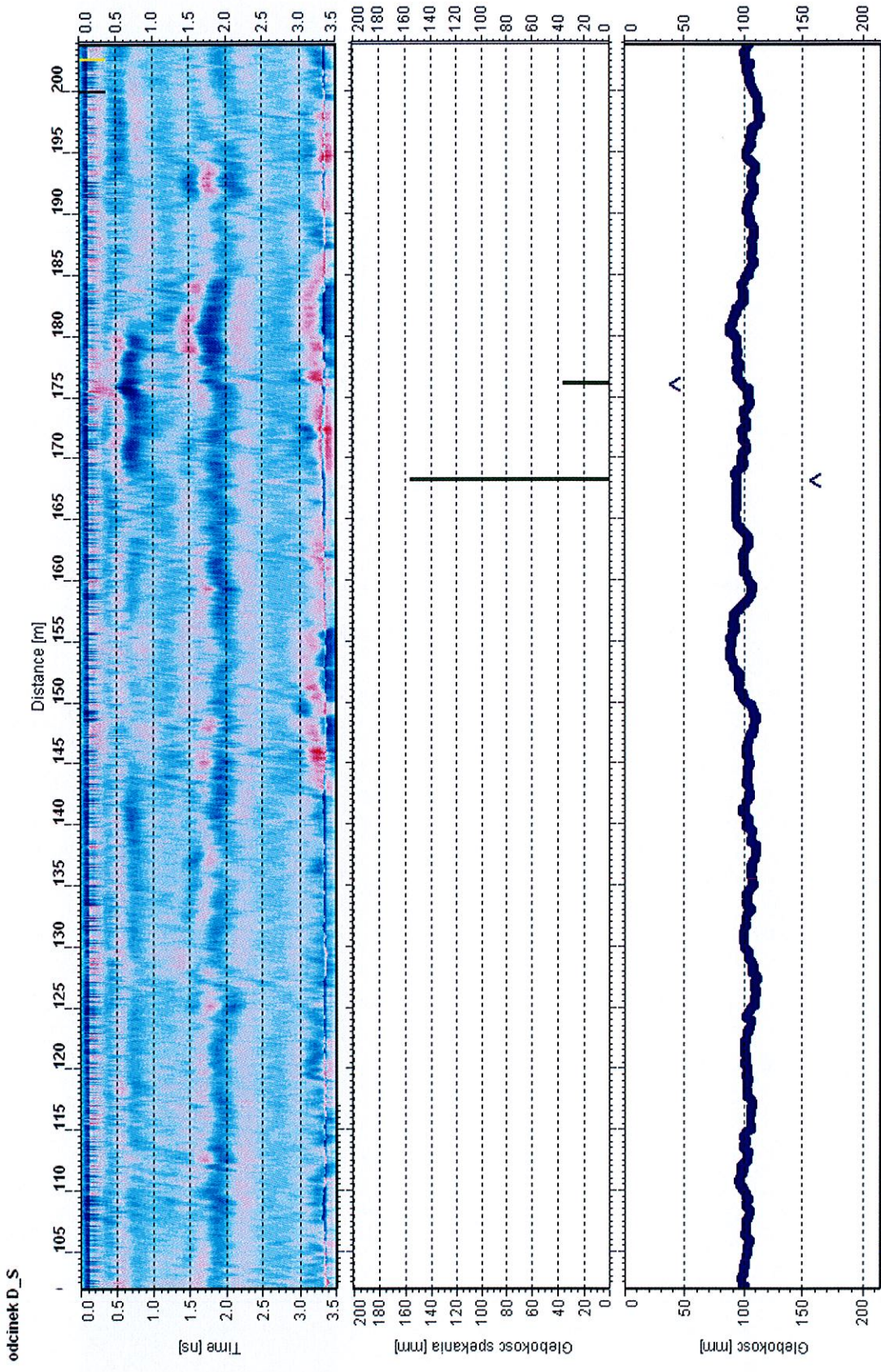
Odcinek C\_S



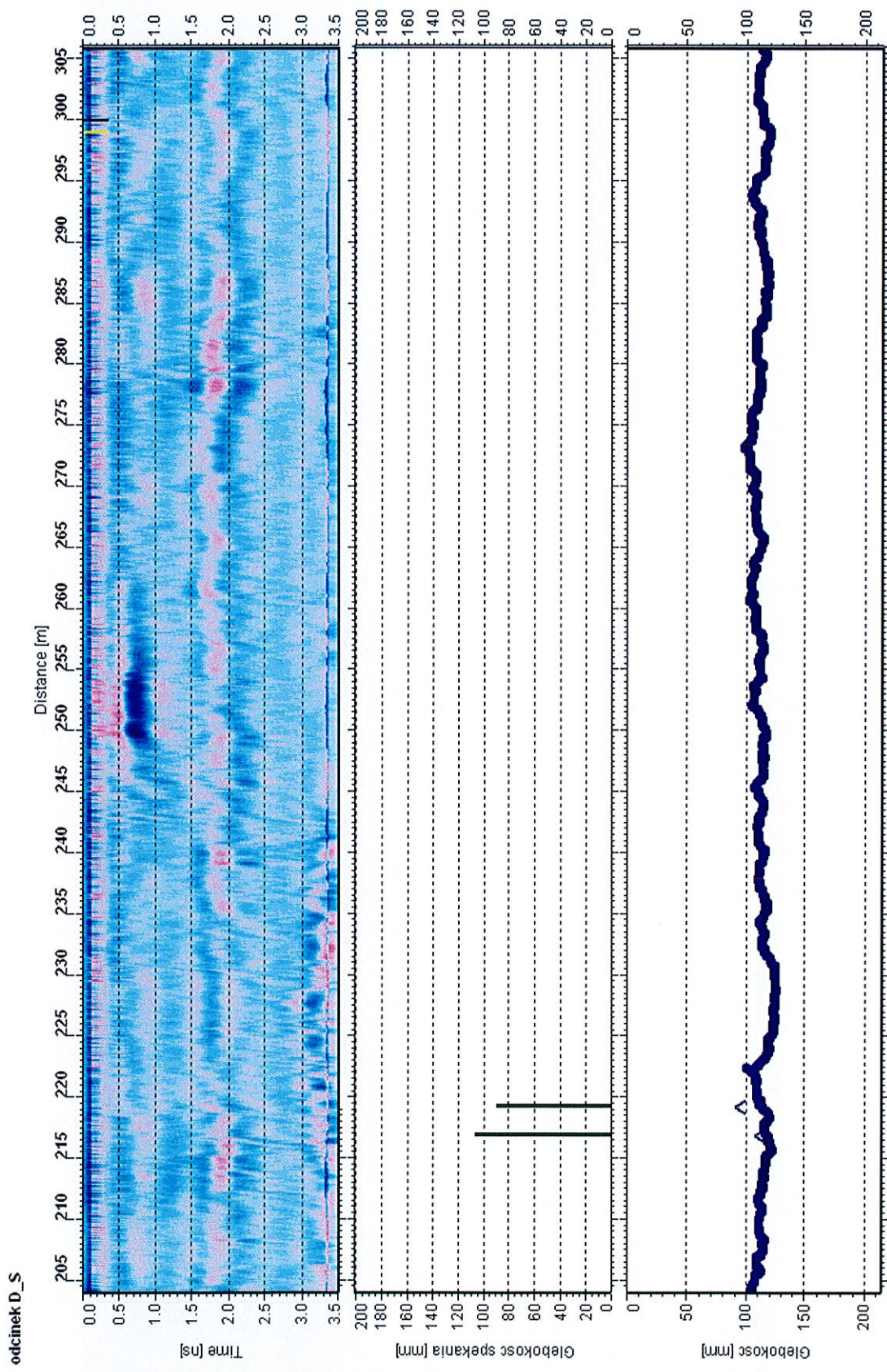






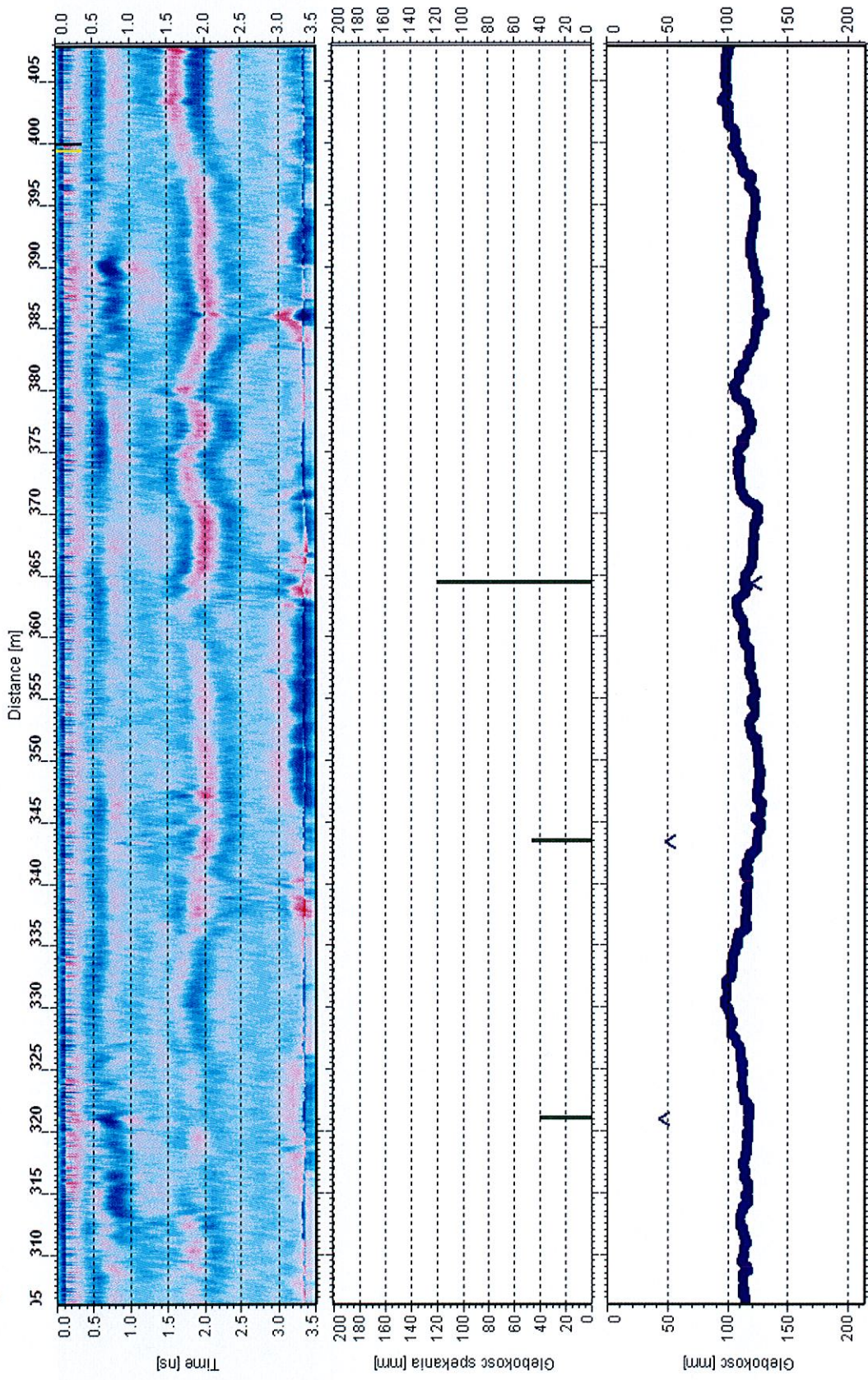






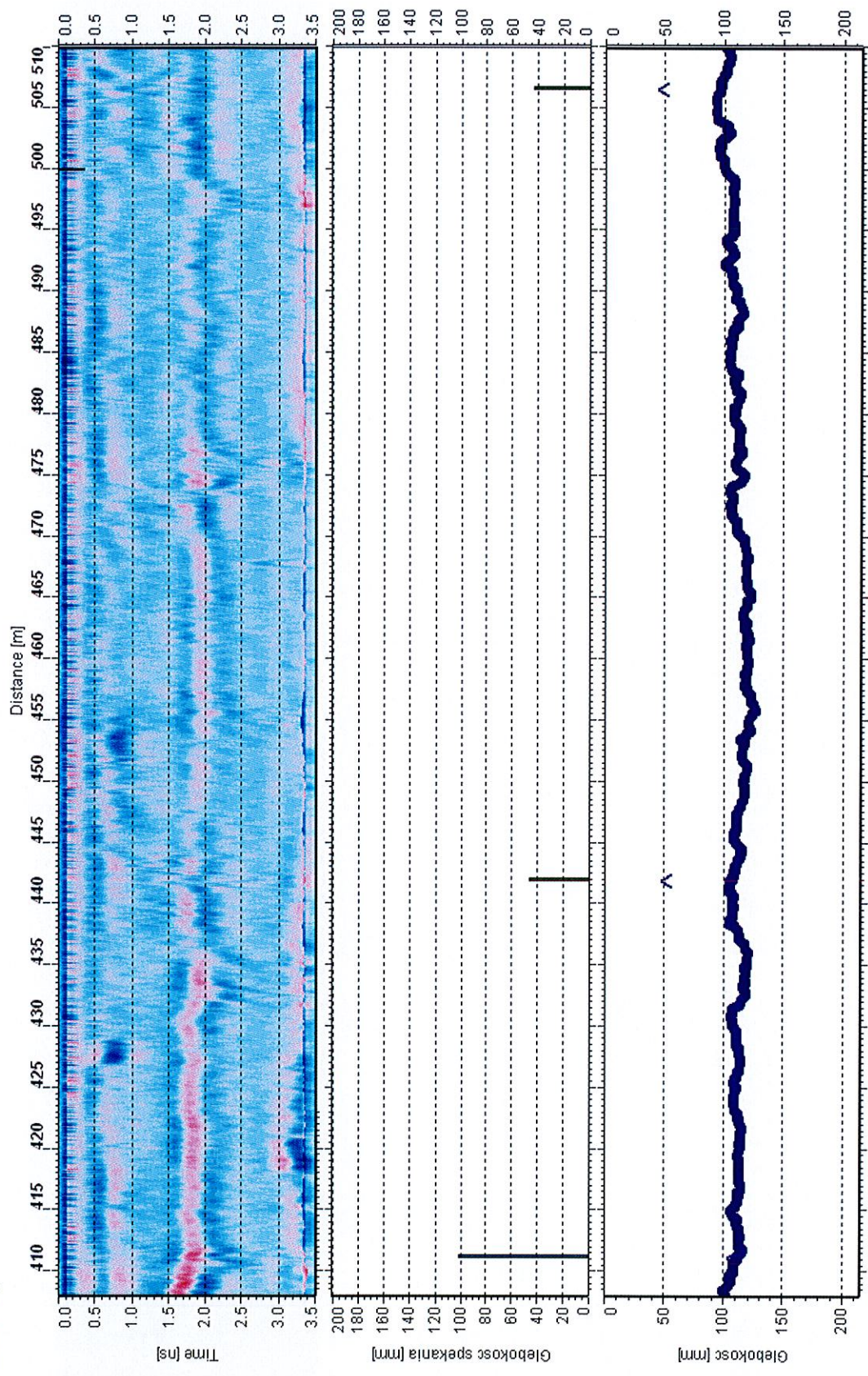


odcinek D\_S



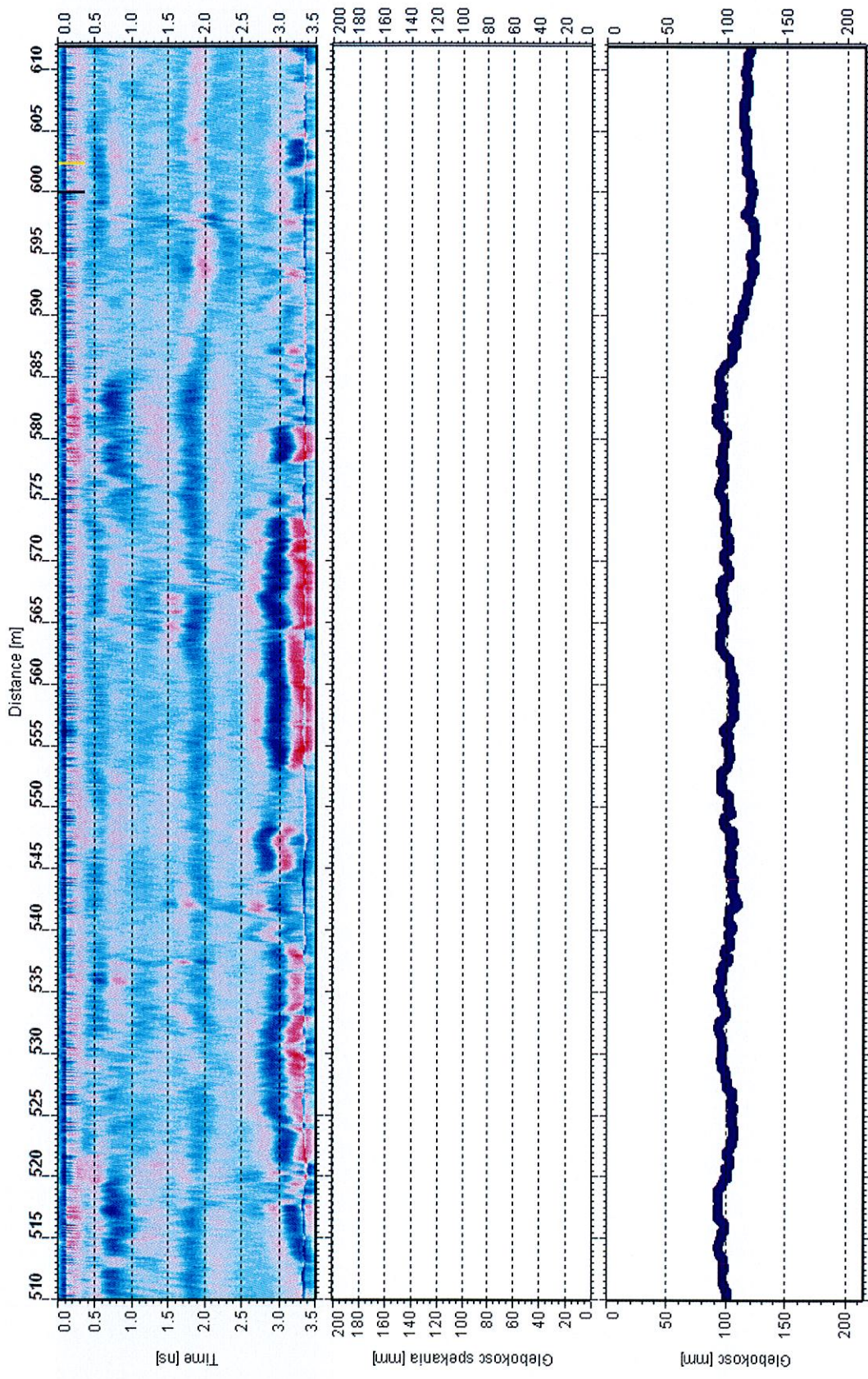


odcinek D\_S

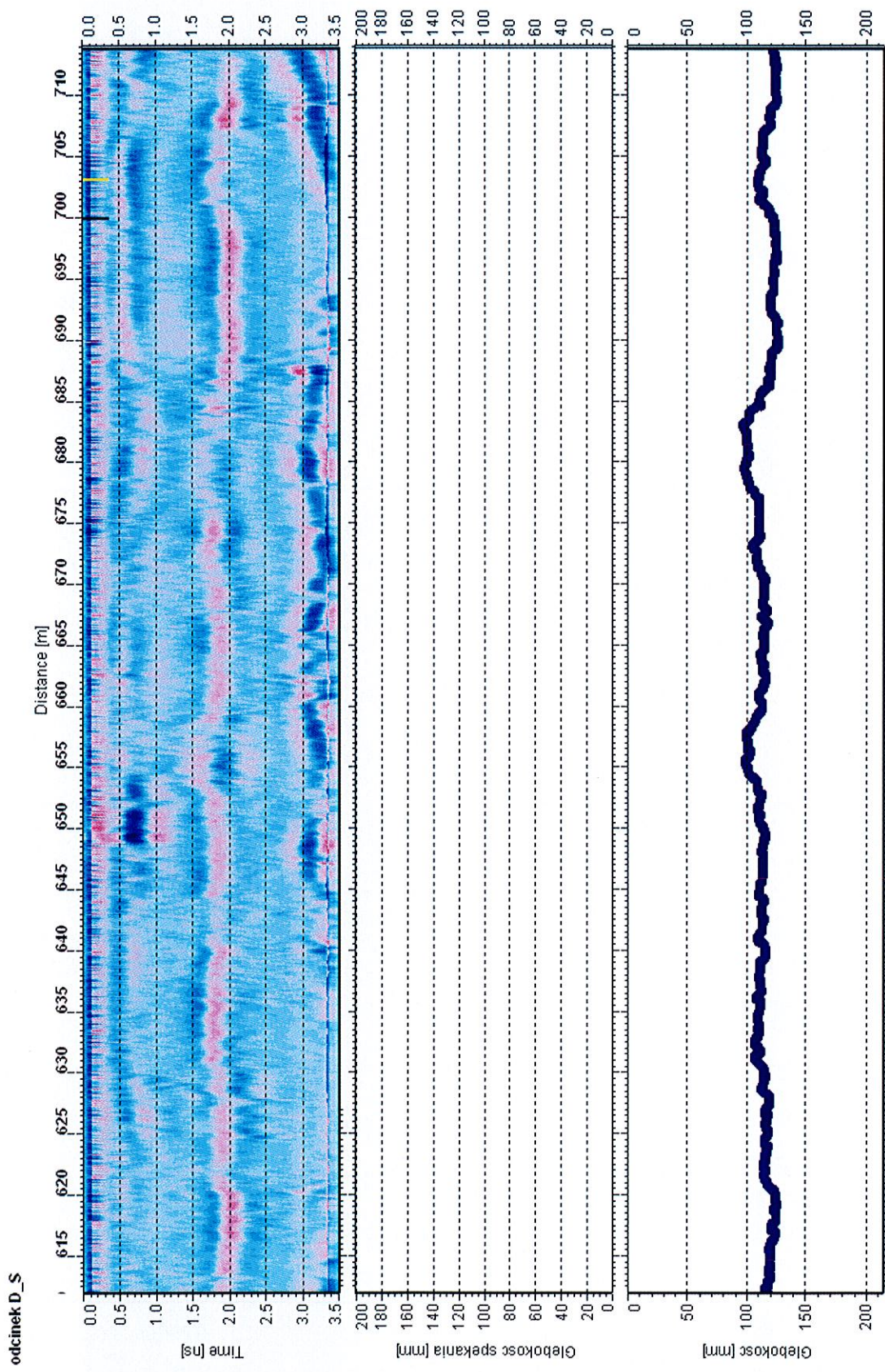




odcinek D\_S

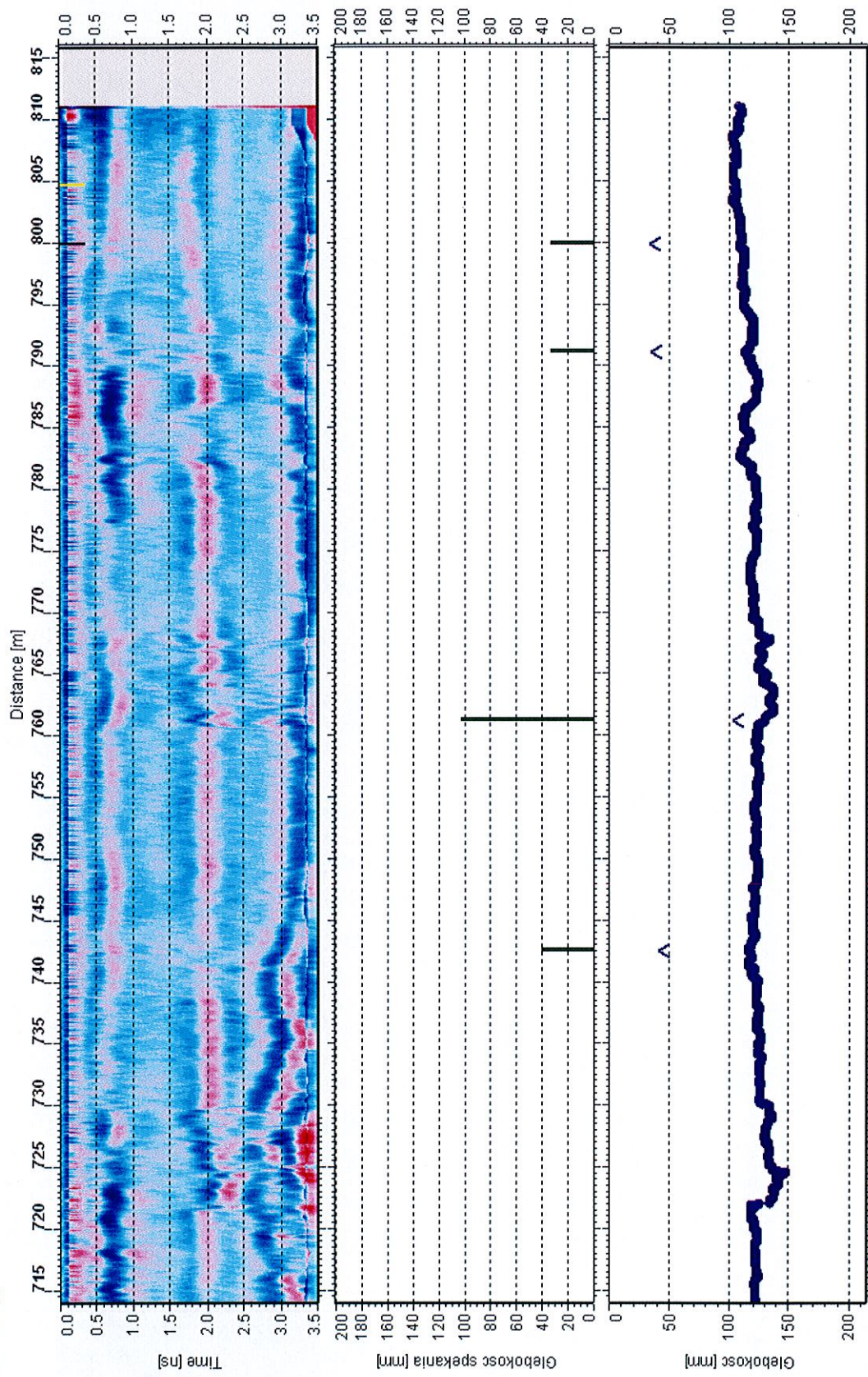








odcinek D\_S





**INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW**  
**Zakład Diagnostyki Nawierzchni**

**ZAŁĄCZNIK 2**

**„Inwentaryzacja uszkodzeń metodą wizualną odcinka A3\_S”.**

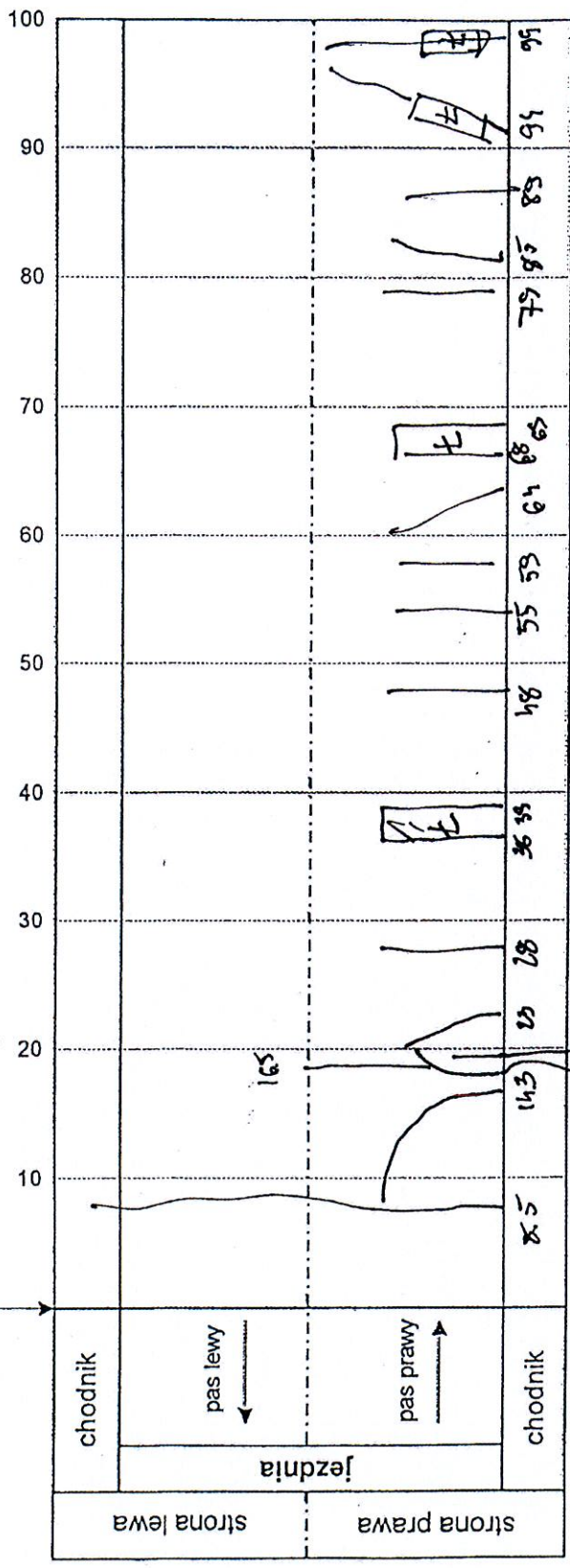
Zleceniodawca: Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad








Umowa nr 2192/2008 z dnia 11.08.2008 roku



DK 22 / A3-S /

Km. 278+800

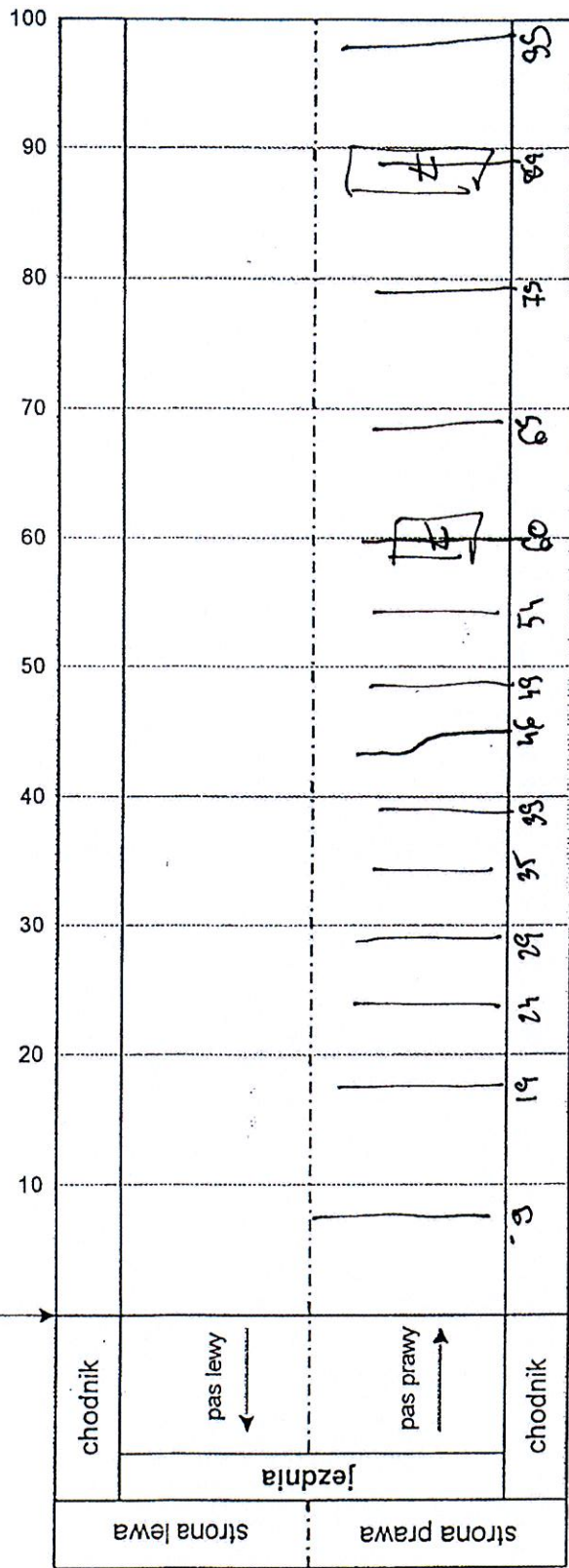


- Typy uszkodzeń:
-  - miejsca przebitaowane
  -  - wykruszenia
  -  - łaty
  -  - spękania siatkowe
  -  - wyboje
  -  - spękania liniowe
  -  - wytamania krawędzi
  - ozn. liter. -



Dk22

Km. 278+900



Typy uszkodzeń:



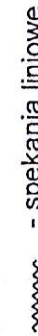
- miejsca przebitumaowane



- wyboje



- wykruszenia



- spękania liniowe



- łąty

- wytamania krawędzi



- spękania siatkowe

ozn. liter.

-