

SPRAWOZDANIE

Z wykonania niedestrukcyjnych badań archeologicznych przeprowadzonych z użyciem przynajmniej dwóch nieinwazyjnych metod pomiarowych terenu placu przykościelnego w Wiślicy (działka nr 437) w ramach projektu *„Modernizacja Muzeum Archeologicznego w Wiślicy jako oddziału Muzeum Narodowego w Kielcach wraz z otoczeniem w celu zabezpieczenia i ochrony unikatowych obiektów dziedzictwa narodowego”*

Zamawiający:

Muzeum Narodowe w Kielcach

Autorzy dokumentacji:

inż. Tomasz Skupień (upr. nr X – 0222)

mgr Tomasz Małyś (upr. nr X – 0234)

Nadzór merytoryczny (Politechnika Krakowska):

Dr hab. inż. Tomisław Gołębiowski, prof. PK

Dr inż. Bernadetta Pasierb

Trzebinia, czerwiec 2018 r.

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE PROJEKT BADAŃ GEOFIZYCZNYCH	3
2. PODSTAWY METODY GPR	8
3. PODSTAWY METODY ERT	10
4. WYNIKI BADAŃ GEOFIZYCZNYCH	12
4.1. Wyniki badań GPR	13
4.2. Wyniki badań ERT	35
5. WNIOSKI	59
6. LITERATURA	60

1. WPROWADZENIE I PROJEKT BADAŃ GEOFIZYCZNYCH

Zastosowanie metod geofizycznych stwarza możliwość przebadania dużego obszaru w relatywnie krótkim czasie, czego wynikiem jest znaczne zawężenie rejonu poszukiwań np. archeologicznych, co w efekcie znacząco redukuje pracochłonność i czasochłonność badań wykopaliskowych. Pomiary geofizyczne są badaniami nieinwazyjnymi, co jest szczególnie ważne na terenach objętych ochroną konserwatorską. Nowoczesna aparatura geofizyczna pozwala uzyskać wysokorozdzielcze obrazowanie obiektów archeologicznych / historycznych w układzie przestrzennym (3D).

Badania geofizyczne na stanowiskach archeologicznych znajdujących się w rejonach poddanych antropopresji są wyzwaniem, ze względu na dużą niejednoznaczność interpretacyjną i występowanie zakłóceń. Z tego względu, zalecane jest stosowanie w jednym miejscu badań kilku (co najmniej dwóch), wzajemnie uzupełniających się metod geofizycznych.

Rejon wyznaczony przez zleceniodawcę (tj. Muzeum Narodowe w Kielcach) do badań geofizycznych, tzn. działka nr 437 (Fig. 1) był w przeszłości poddany silnej antropopresji. Wcześniejsze badania archeologiczne i prace ziemne (m.in. wykonanie kanalizacji deszczowej, instalacji elektrycznej, izolacji przeciwwilgociowej części budynków i in.) wykazały, że w strefie przypowierzchniowej (na głębokościach do kilku metrów) znajdują się liczne pochówki szkieletowe. Jak wynika z prac archeologicznych, prowadzonych w latach 50-tych i 60-tych ubiegłego wieku (Fig. 2), w rejonie badań geofizycznych prowadzono kilkakrotnie przebudowy kościołów (Fig. 3 A,B). Prace wykopaliskowe pozwoliły odsłonić fragmenty dawnych fundamentów kościelnych (Fig. 4) oraz fundamenty wieży Muskaty (Fig. 4A). W roku 2003 przeprowadzono kolejne prace ziemne w rejonie fundamentów wieży Muskaty (3C), których celem było zabezpieczenie przeciwwilgociowe fundamentów Bazyliki.

Efektom prac wykopaliskowych prowadzonych w latach 50-tych i 60-tych, było m.in. obłożenie części fundamentu kolegiaty murem ceglany (forma izolacji) oraz budowa systemu studzienek i drenażu biegnącego równoległe do murów Bazyliki, w odległości 2.6 m.

W podziemiach Bazyliki, na południowej ścianie fundamentowej, przy pozostałościach wieży Muskaty, znajduje się charakterystyczny fragment muru (Fig. 5). Fragment ten może sugerować, że w tym miejscu znajdowało się podziemne przejście pomiędzy kościołem a domem Długosza.



Fig. 1. Rejon badań geofizycznych w Wiślicy – działka nr 437 (fot. www.polskazdrona.pl)

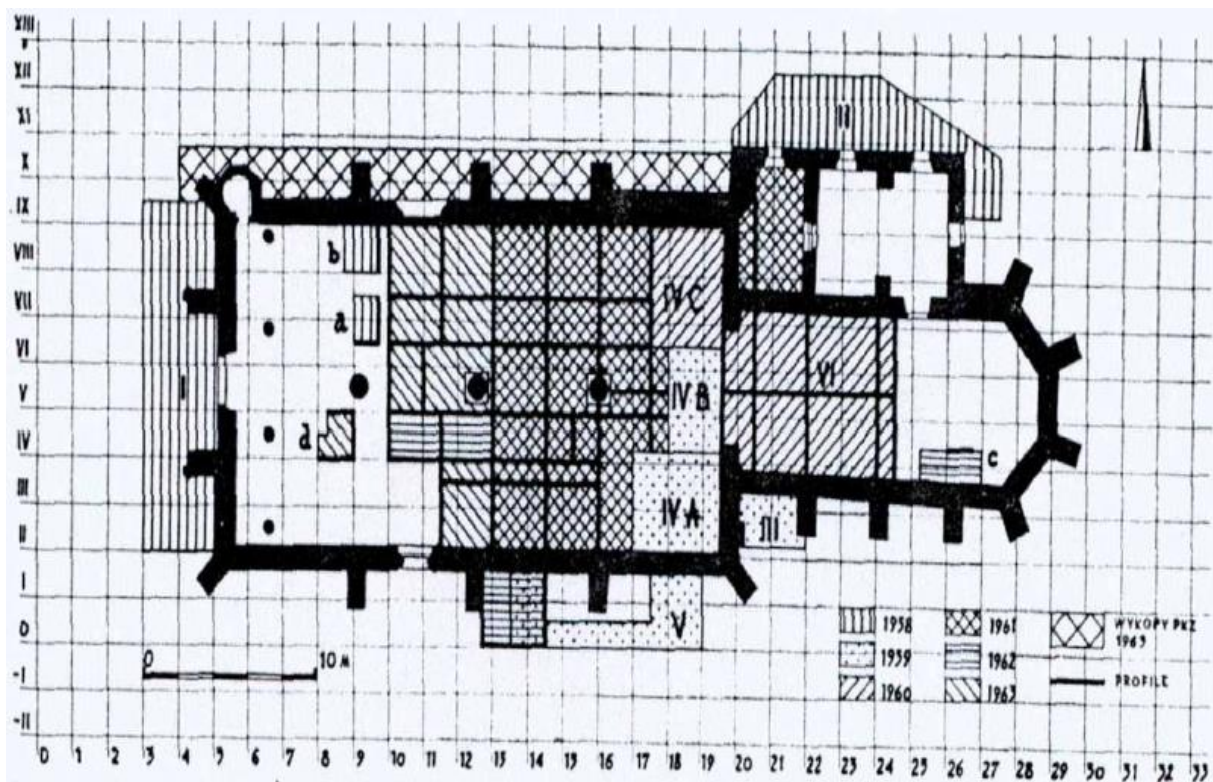


Fig. 2. Rejony badań archeologicznych prowadzonych w latach 50-tych i 60-tych ubiegłego wieku (Tomaszewski, 1963)

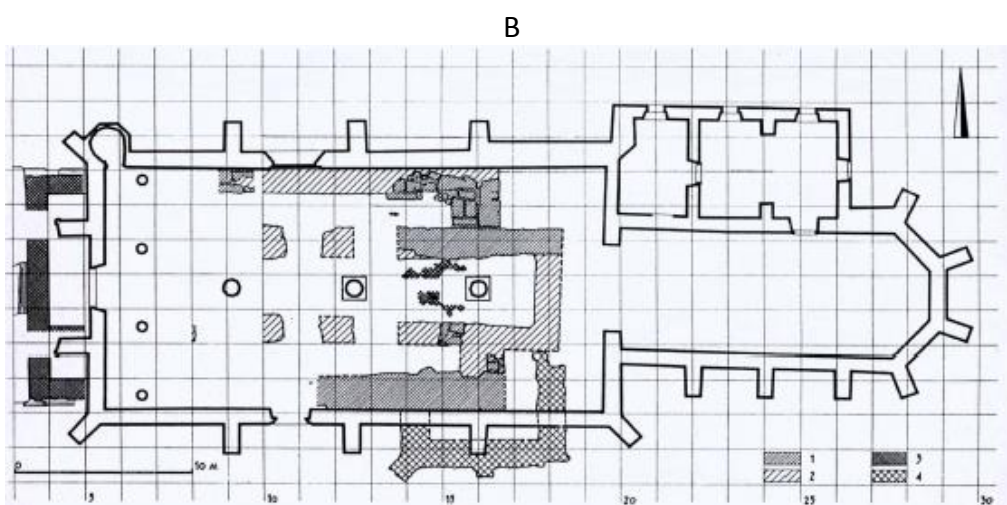
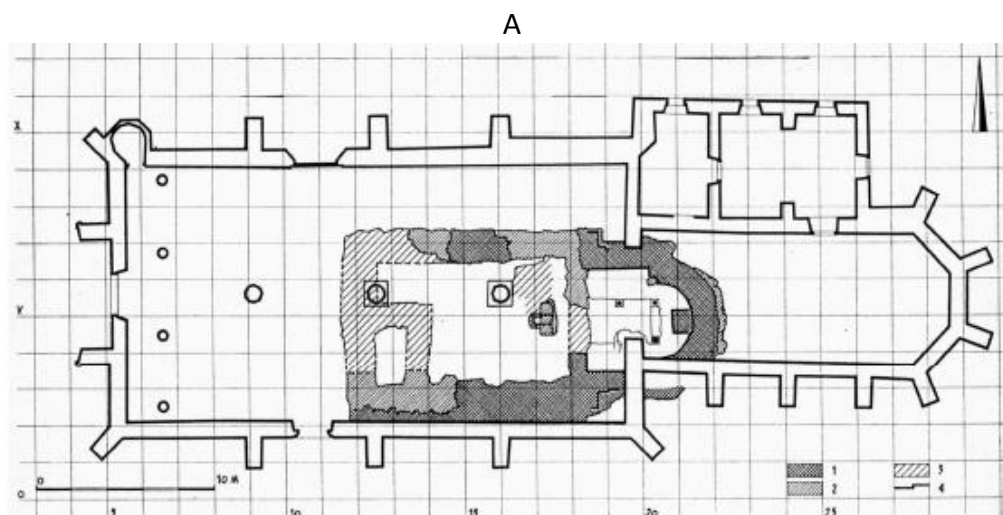


Fig. 3. A,B) Fundamenty kościołów ulokowanych w miejscu dzisiejszej Bazyliki, odsłonięte w latach 50-tych i 60-tych ubiegłego wieku (Tomaszewski 1963); C) Wykop wykonany w 2003 roku w rejonie fundamentów wieży Muskaty (W.Gliński)

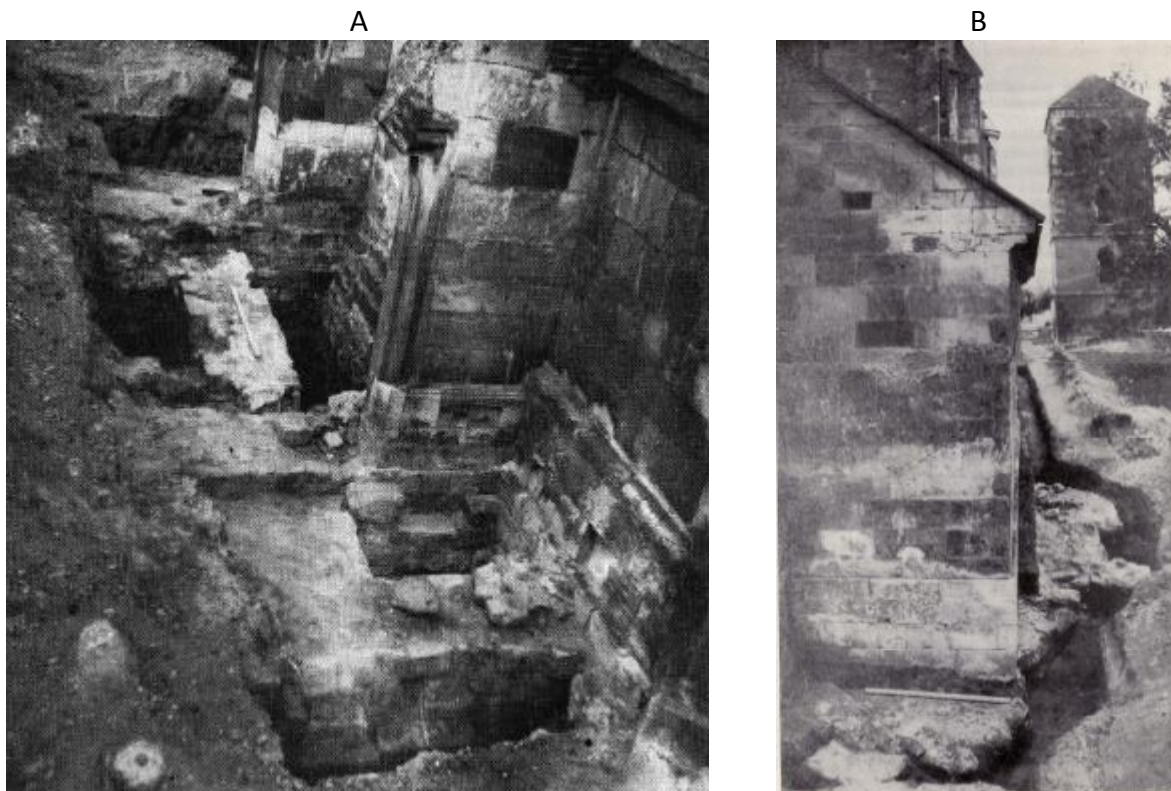


Fig.4. Prace archeologiczne w latach 1958 - 1960 (Tomaszewski 1963)

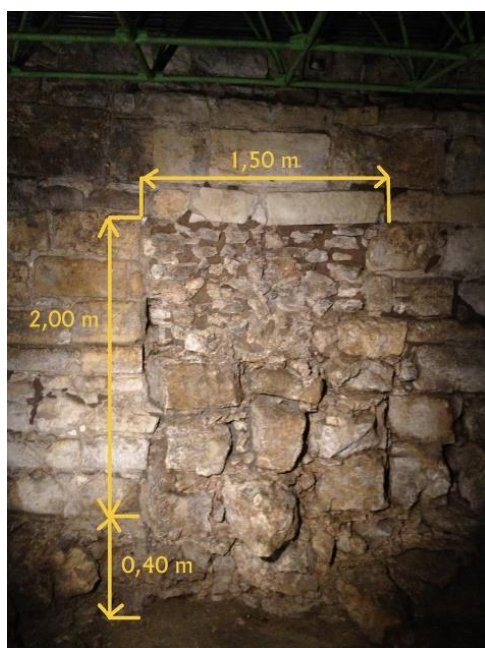


Fig. 5. Charakterystyczny fragment fundamentu Bazyliki, przy wieży Muskaty (Fot. W. Sołtysiak)

Analiza materiałów archiwalnych (przedstawiona pokrótce powyżej) pozwoliła zdefiniować trzy cele badań geofizycznych:

- 1) lokalizacja fundamentów budowli historycznych, innych niż te odsłonięte w latach 50-tych i 60-tych ubiegłego wieku (Fig. 3),

- 2) weryfikacja hipotezy o istnieniu podziemnego tunelu pomiędzy podziemiami Bazyliki (Fig. 5) i piwnicami domu Długosza,
- 3) okonturowanie miejsc pochówków (groby szkieletowe) – w tym przypadku, ze względu na małe rozmiary obiektów, niewielki kontrast parametrów fizycznych pozostałości szkieletów i trumien w stosunku do otaczającego gruntu, wyniki badań geofizycznych należy traktować z dużą ostrożnością.

Ze względu na częściowe pokrycie powierzchni terenu badań płytami chodnikowymi (Fig. 1) badania geofizyczne zostały przeprowadzone z użyciem dwóch, odpowiednio dobranych do warunków terenowych i wzajemnie uzupełniających się metod pomiarowych, tzn.:

- 1) metody georadarowej GPR (*Ground Penetrating Radar*) na całym obszarze badań,
- 2) metody tomografii elektrooporowej ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) tylko w miejscach występowania trawników.

Projekt profili pomiarowych, zlokalizowanych w 4 rejonach badań, pokazano na Fig. 6 - plan sytuacyjno-wysokościowy z naniesieniem profili geofizycznych przygotowano na podstawie mapy zasadniczej w wersji wektorowej (Licencja - Załącznik 1). Zaplanowanie badań w układzie profili równoległych, ze stałą odległością pomiędzy profilami równą 0,5m, pozwoliło na uzyskanie wysokorozdzielczego obrazowania 3D anomalii.

Badania geofizyczne prowadzono do maks. głębokości rzędu 5÷6m, czyli do średniej głębokości występowania stropu skały gipsowej w miejscu badań (Fig. 7).

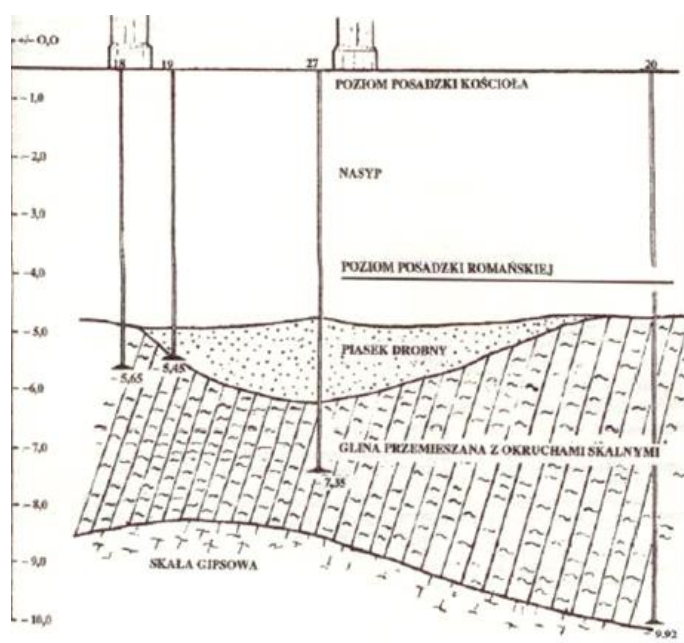


Fig. 7. Informacje geologiczne dotyczące podłoża pod Bazyliką

W miejscach występowania anomalii geofizycznych odwiercono 5 otworów kontrolnych (do głębokości maks. ok. 2,5m), a materiał uzyskany z wierceń poddano analizie geologiczno-geotechnicznej.

2. PODSTAWY METODY GPR

Metoda georadarowa (GPR – ang. *Ground Penetrating Radar*) jest bezinwazyjną techniką poszukiwawczą, w której wykorzystuje się fale elektromagnetyczne w zakresie częstotliwości od 10 MHz do kilku GHz, do rozpoznania budowy geologicznej i poszukiwania obiektów podziemnych. Stosuje się kilka technik badań terenowych:

- powierzchniowe profilowanie refleksyjne,
- otworowe profilowanie refleksyjne,
- powierzchniowe profilowanie refrakcyjne,
- powierzchniowe badania prędkości (WARR lub CMP),
- tomografia prędkościowa i tłumieniowa (w opcjach: otwór-otwór i otwór-powierzchnia),
- oraz w badaniach szczegółowych pomiary zmienno-offsetowe i zmienno-polarizacyjne.

Ponieważ badania miały charakter rekonesansowy, dlatego przeprowadzono je z wykorzystaniem standardowej techniki pomiarowej, czyli jako krótko-offsetowe (można przyjąć zero-offsetowe) profilowania refleksyjne, które pokrótce opisano poniżej.

Na Fig. 8 pokazano ideę profilowania refleksyjnego. Układ antenowy (tj. antena nadawcza i odbiorcza) przesuwa się wzdłuż profilu, a antena nadawcza emituje impulsy elektromagnetyczne co określony interwał odległościowy (Δx). Impulsy propagują w postaci fali elektromagnetycznej (e-m) w górotworze. Antena odbiorcza przesuwa się wzdłuż profilu równocześnie z anteną nadawczą, rejestrując sygnały odbite (tzw. refleksy), które zapisywane są w formacie cyfrowym na laptopie i wyświetlane w czasie pomiaru na monitorze; zapis taki nazywany jest falogramem, radargramem lub echogramem. Pozioma oś na echogramie zapisywana jest w skali odległości w metrach natomiast oś pionowa zapisywana jest w skali czasu w nanosekundach. W procesie przetwarzania danych pomiarowych dokonuje się konwersji osi czasowej na głębokościową z uwzględnieniem informacji o prędkości propagacji fali e-m w badanym ośrodku.

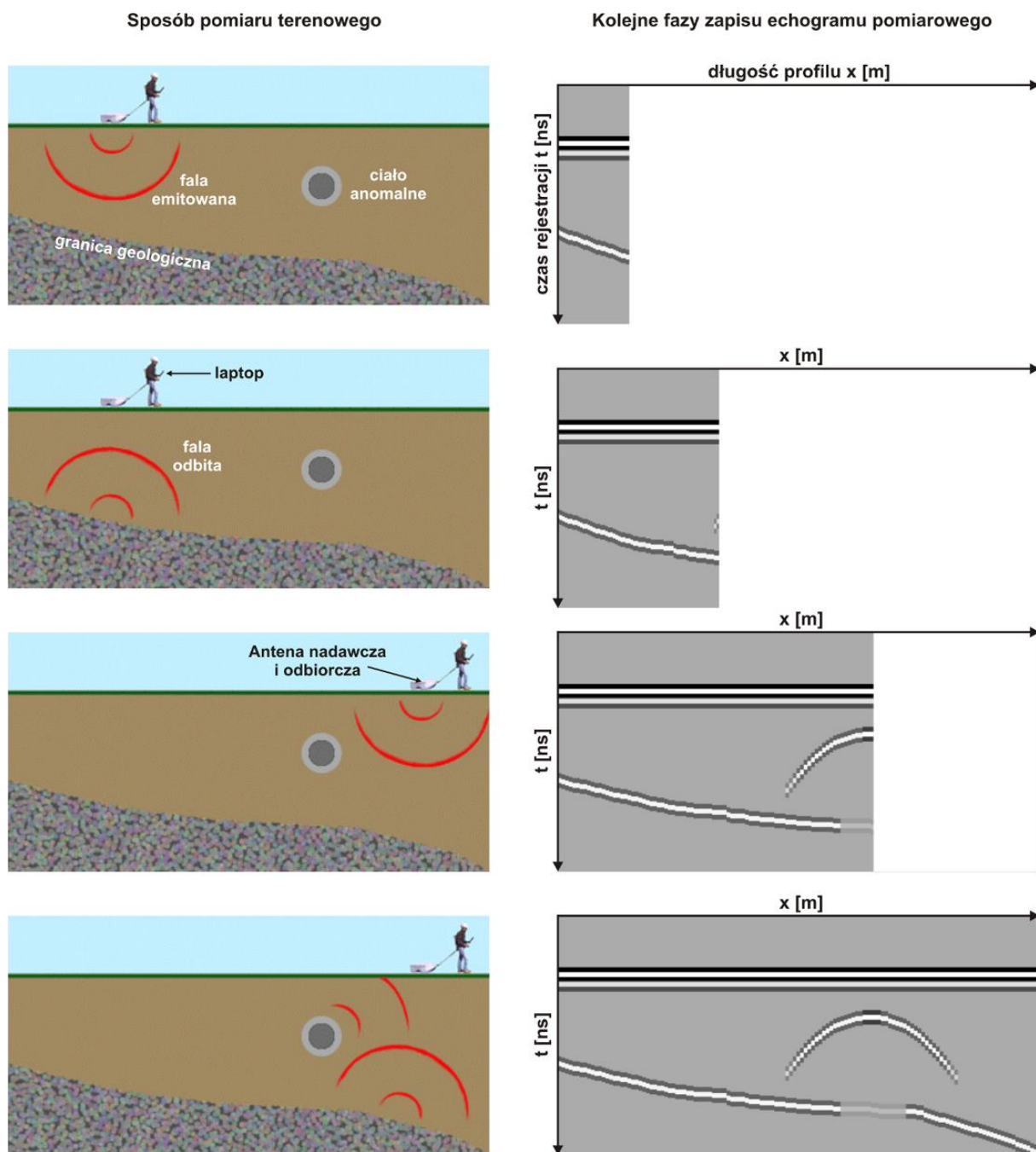


Fig. 8. Technika profilowania refleksyjnego (MALA 2003)

Propagacja fali e-m zależy od parametrów elektromagnetycznych ośrodka geologicznego, tj. względnej przenikalności elektrycznej ϵ_r [-] i elektrycznej przewodności właściwej σ [mS/m]. Ponieważ badania georadarowe prowadzi się w ośrodkach niemagnetycznych, dlatego przyjmuje się, że trzeci parametr elektromagnetyczny tzn. względna przenikalność magnetyczna μ_r [-] jest wartością stałą, równą 1. Ciała anomalne mogą natomiast posiadać określone wartości μ_r .

Różnica (kontrast) względnych przenikalności elektrycznych pomiędzy ciałem anomalnym (np. obiektem archeologicznym) i otaczającym ośrodkiem lub pomiędzy dwoma warstwami geologicznymi decyduje, w georadarowej technice refleksyjnej, o wartości współczynnika odbicia R [-], zgodnie z uproszczoną zależnością:

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r_grunt}} - \sqrt{\varepsilon_{r_obiekt}}}{\sqrt{\varepsilon_{r_grunt}} + \sqrt{\varepsilon_{r_obiekt}}} \quad (1)$$

Wartość elektrycznej przewodności właściwej σ ośrodka decyduje w metodzie GPR o tłumieniu fali elektromagnetycznej (gdzie α oznacza współczynnik tłumienia), zgodnie z uproszczoną zależnością:

$$\alpha = 1.7 \cdot 10^3 \frac{\sigma}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad [dB/m] \quad (2)$$

W metodzie georadarowej w zależności od rozmiarów poszukiwanych obiektów jak również od założonej głębokości poszukiwań oraz w zależności od techniki pomiarowej (tzn. badania refleksyjne, refrakcyjne, prędkościowe, otworowe itd.) stosuje się anteny o różnych częstotliwościach i konstrukcjach. Ponieważ badania miały charakter rekonesansowy, dlatego przeprowadzono je standardowymi antenami ekranowanymi, bistatycznymi o częstotliwości 125 MHz, których maks. zasięg głębokościowy wynosi ok. 15m, a średnia rozdzielczość ok. 0,25m.

Równie istotne w badaniach georadarowych, jak wybór konstrukcji i częstotliwości anteny, jest odpowiednie zorientowanie (polaryzacja) układu pomiarowego (antenowego) w zależności od przestrzennego rozkładu obiektów archeologicznych. Standardową orientacją jest równoległe ułożenie anten wzajemnie do siebie i prostopadle do linii profilowej; taka polaryzacja zastosowana jest w antenach, które wybrano do badań rekonesansowych.

3. PODSTAWY METODY ERT

Tomografia elektrooporowa (ERT – Electrical Resistivity Tomography, zwana również Resistivity Imaging, polski odpowiednik – obrazowanie elektrooporowe) rozwinęła się w latach 90-tych XX wieku, będąc efektem postępu w dziedzinie automatyzacji i komputeryzacji pomiarów geoelektrycznych. We wspomnianym okresie pojawiła się również możliwość komputerowej interpretacji tego typu badań (Dahlin 1996).

Metoda tomografii elektrooporowej jest powszechnie stosowana między innymi w kartowaniu geologicznym do rozpoznania budowy geologicznej, wyznaczania głębokości i miąższości warstw, nadkładu oraz nasypów, zalegania podłoża skalnego oraz lokalizacji zapadlisk i pustek a także ustalenia przebiegu granicy utworów słabo przepuszczalnych. Odgrywa znaczną rolę w planowaniu i analizie prospekcji archeologicznej (Misiewicz 1998). Wykorzystywana jest w rozpoznaniu morfologii antropogenicznej poprzez lokalizację nawarstwień kulturowych i identyfikację podziemnych pozostałości architektonicznych (Łyskowski i in. 2017, Gołębiowski i in. 2018) Metoda tomografii elektrooporowej stosowana jest również w detekcji podziemnych obiektów antropogenicznych (Rudzki 2002). Pozwala ukierunkować prace wykopaliskowe i przyczynia się do formułowania koncepcji przebiegu zdarzeń historycznych (Domogalla i Mościcki 2006).

Realizacja pomiaru metodą ERT polega na rozstawieniu w równych odległościach (Δx) zazwyczaj kilkudziesięciu elektrod i przeprowadzeniu profilowania elektrooporowego (Burger i in. 2006) dowolnie wybranym układem pomiarowym. Najczęściej stosowanymi układami pomiarowymi jest układ Wennera, Schlumbergera i Dipol–Dipol (Loke 2010). Wybór odpowiedniego układu pomiarowego, jego rozmiaru i podstawowej odległości między elektrodami pozwala na rozpoznanie ośrodka geologicznego z odpowiednią rozdzielczością (pionową i poziomą) oraz z pożądanym zasięgiem głębokościowym.

Rezultatem pomiarów metodą tomografii elektrooporowej jest zbiór wartości oporności pozornej w funkcji wielkości rozstawu układu pomiarowego i jego położenia wzdłuż profilu. Otrzymane dane przedstawia się w formie tak zwanego (pseudo) przekroju oporności pozornej, który na osi pionowej przedstawia wielkość opisującą rozmiar układu pomiarowego (połowa rozstawu elektrod prądowych $AB/2$ lub tak zwaną „pseudo-głębokość”), a na osi poziomej odległość wzdłuż profilu (Loke 2010). Pseudo-przekrój oporności pozornej poddawany jest następnie inwersji.

Inwersja polega na dobraniu takiego dyskretnego modelu 2D rozkładu oporności w ośrodku geologicznym, którego odpowiedź na symulowane pomiary będzie najbardziej zbliżony do otrzymanego na drodze pomiarów terenowych. Miarą dobroci wyników inwersji (poprawności założonego modelu) jest błąd średniokwadratowy (RMS) dopasowania modelu teoretycznego do modelu polowego. Poprzez wielokrotne powtórzenie tego procesu (iteracji) otrzymuje się w konsekwencji przekrój oporności właściwych w funkcji głębokości i odległości na profilu. Należy jednak zaznaczyć, że otrzymany na drodze inwersji rozkład

oporności elektrycznej nie zawsze odzwierciedla rozkład oporności rzeczywistej, z tego względu powinno się raczej mówić o oporności wyinterpretowanej. Wspomniany stan rzeczy wynika z niejednoznaczności procesu inwersji.

Wyniki badań elektrooporowych metodą ERT w dużej mierze zależą od lokalnej budowy podłoża obejmującej charakterystykę zarówno litologiczną, jak i strukturalno-tektoniczną, od sposobu wykonania badań (metodyki pomiarowej) i od morfologii terenu badań. Dodatkowo, należy mieć świadomość, że oporność elektryczna – cecha fizyczna materiałów wykorzystywana w badaniach elektrooporowych – nie pozwala na jednoznaczną litologiczną identyfikację danej skały. Oporność elektryczna podłoża zależy od warunków w jakich występuje: zawodnienia, temperatury, głębokości, wiek itp. Ponadto należy pamiętać, że rozdzielczość pionowa w metodach elektrooporowych wraz z głębokością maleje w postępie wykładniczym.

Uwzględniając powyższe czynniki oraz mając na uwadze, że badane podłoże poddane było antropopresji oraz niemożliwe było poprowadzenia pełnych profili ERT ze względu na wybrukowane podłoże, należy podkreślić, że warunki terenowe na wyznaczonym przez zleceniodawcę terenie, były trudna dla prowadzenia i interpretacji badań metodą tomografii elektrooporowej.

4. WYNIKI BADAŃ GEOFIZYCZNYCH

W roku 2013 Politechnika Krakowska (Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Geodezji, Geofizyki i Geologii Inżynierskiej) oraz Akademia Górniczo-Hutnicza (Katedra Geofizyki) przeprowadziły badania rekonesansowe na Placu Solnym (Gołębiowski i in. 2018) oraz pomiędzy Bazyliką i domem Długosza. Pomiary ERT wykonano układem dipol-dipol, w siatce 1,5m x 1,5m; pomiary GPR przeprowadzono techniką krótko-offsetowego profilowania refleksyjnego, z użyciem anten o częstotliwościach 250 MHz i 500 MHz. Celem badań była wstępna weryfikacja hipotezy o istnieniu podziemnego przejścia pomiędzy Bazyliką i domem Długosza. Wyniki badań były obiecujące i pozwoliły na przeprowadzenie interpretacji jakościowej, lecz ze względu na fakt zbyt dużej odległości pomiędzy profilami oraz rejestrację wielu anomalii pochodzących od silnie zaburzonego nasypu antropogenicznego, trudno było zaproponować jednoznaczną interpelację danych. Wyniki badań rekonesansowych

przedstawiono w pracy magisterskiej Pana Krzysztofa Cichego, pt.: „Kompleksowe badania geofizyczne na stanowiskach archeologicznych” (AGH, Wydział GGiOŚ, praca niepublikowana).

4.1. Wyniki badań GPR

Wyniki testowych badań GPR, przeprowadzonych w 2013 roku, wskazywały na dwa istotne fakty: (a) ośrodek geologiczny do głębokości kilku metrów jest bardzo silnie naruszony działalnością antropogeniczną, co powoduje rejestrację dużej ilości refleksów utrudniających interpretację oraz (b) grunt cechuje się bardzo wysokim tłumieniem. Biorąc pod uwagę oba fakty, zdecydowano, że pomiary w 2018 roku wykonane zostaną antenami o niższej częstotliwości, tj. 125 MHz; obniżenie częstotliwości miało powodować rejestrowanie refleksów z większych głębokości oraz rejestrowanie efektów tylko od większych obiektów (rzędu 0,25m i większych), co powinno ułatwić interpretację. Georadarowe pomiary terenowe przeprowadzono ukraińskim georadarem VIY (www.viy.ua).

Przed rozpoczęciem pomiarów właściwych przeprowadzono pomiary testowe, na profilu zaprojektowanym nad fragmentem fundamentu wieży Muskaty (Fig. 6); testowano dobór parametrów akwizycyjnych dla jak najlepszej wizualizacji znanych fragmentów fundamentów. Przykładowe echogramy testowe, zarejestrowane dla różnych wartości składania tras, pokazano na Fig. 9.

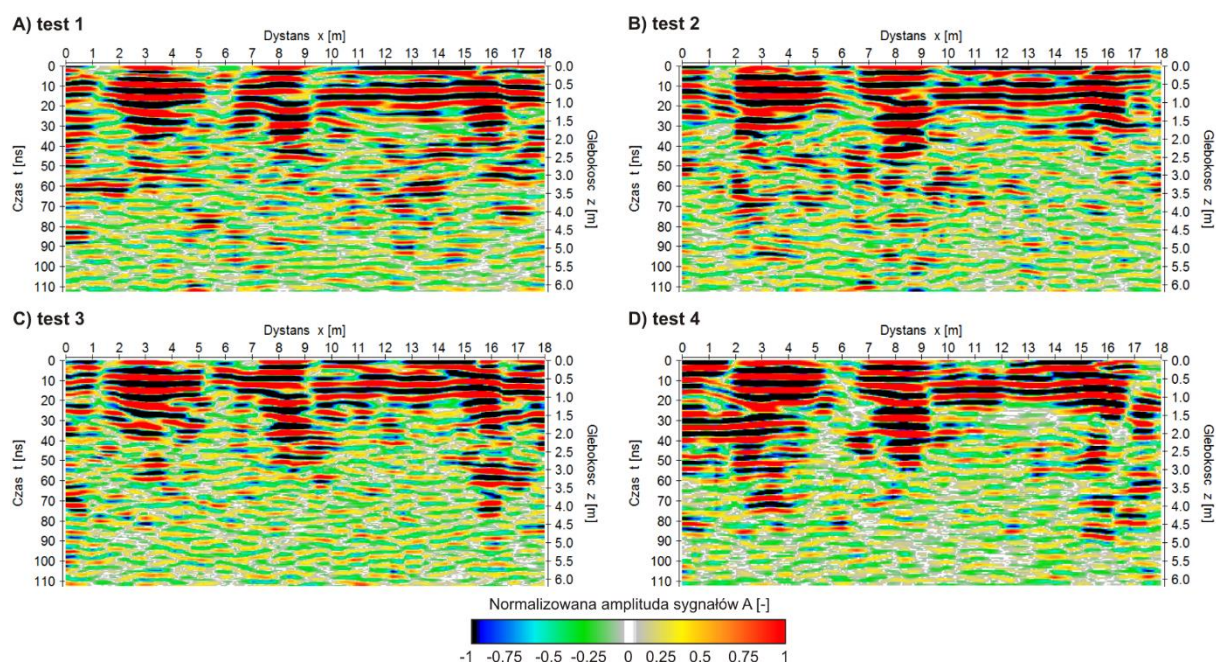


Fig. 9. Echogramy zarejestrowane dla różnych wartości składania: A) 4x, B) 10x, C) 6x, D) 3x

Ostatecznie, do przeprowadzenia badań właściwych przyjęto następujące parametry akwizycyjne: okno czasowe 180ns, ilość próbek 500, czas próbkowania sygnałów 0,35ns, odległość między trasami na profilach 0,1m, składanie 3x.

Aby poprawnie przekonwertować skalę czasową na głębokościową, na echogramach należy przeprowadzić rozpoznanie prędkościowe badanego ośrodka. W każdym rejonie badań (Fig. 6) przeprowadzono jedno badanie prędkościowe WARR, a wyniki badań pokazano na Fig. 10. Analiza badań WARR pokazała, że na żadnym hodografie nie zarejestrowała się fala odbita, a bezpośrednia fala gruntowa zarejestrowana została tylko w rejonie A; średnia prędkość fali gruntowej w rejonie A wynosi $v_g = 0,11$ m/ns.

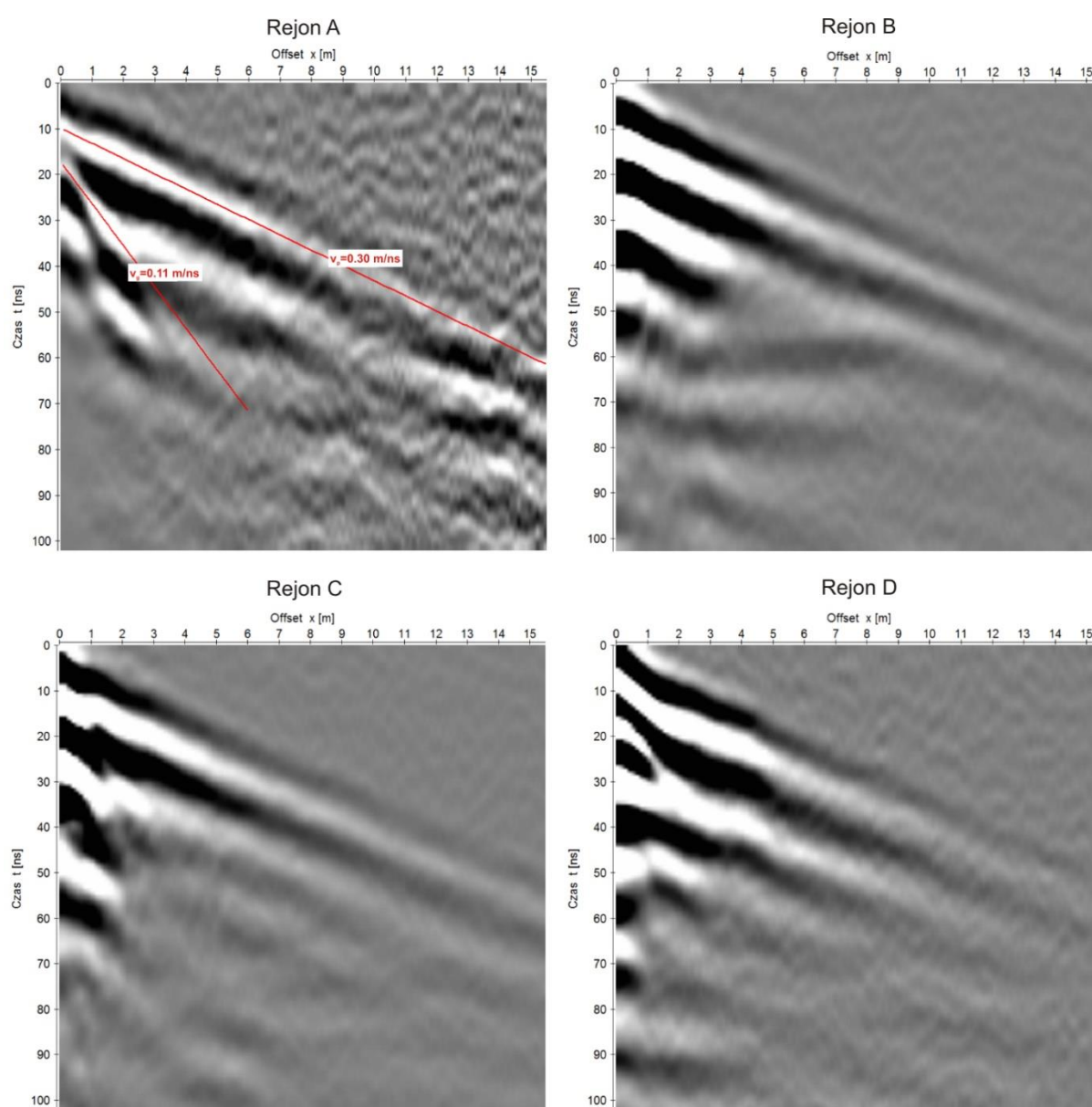


Fig. 10. Wyniki badań prędkościowych WARR dla każdego rejonu badań GPR

Ze względu na słabą jakość wyników badań WARR, przeprowadzono dodatkowo analizę krzywizn hiperbol dyfrakcyjnych (Fig. 11), zarejestrowanych na różnych profilach. Wynik badania WARR oraz analiza hiperbol dyfrakcyjnych pozwoliły określić średnią prędkość do konwersji czasowo-głębokościowej echogramów, równą $v_{sr} = 0,11$ m/ns.

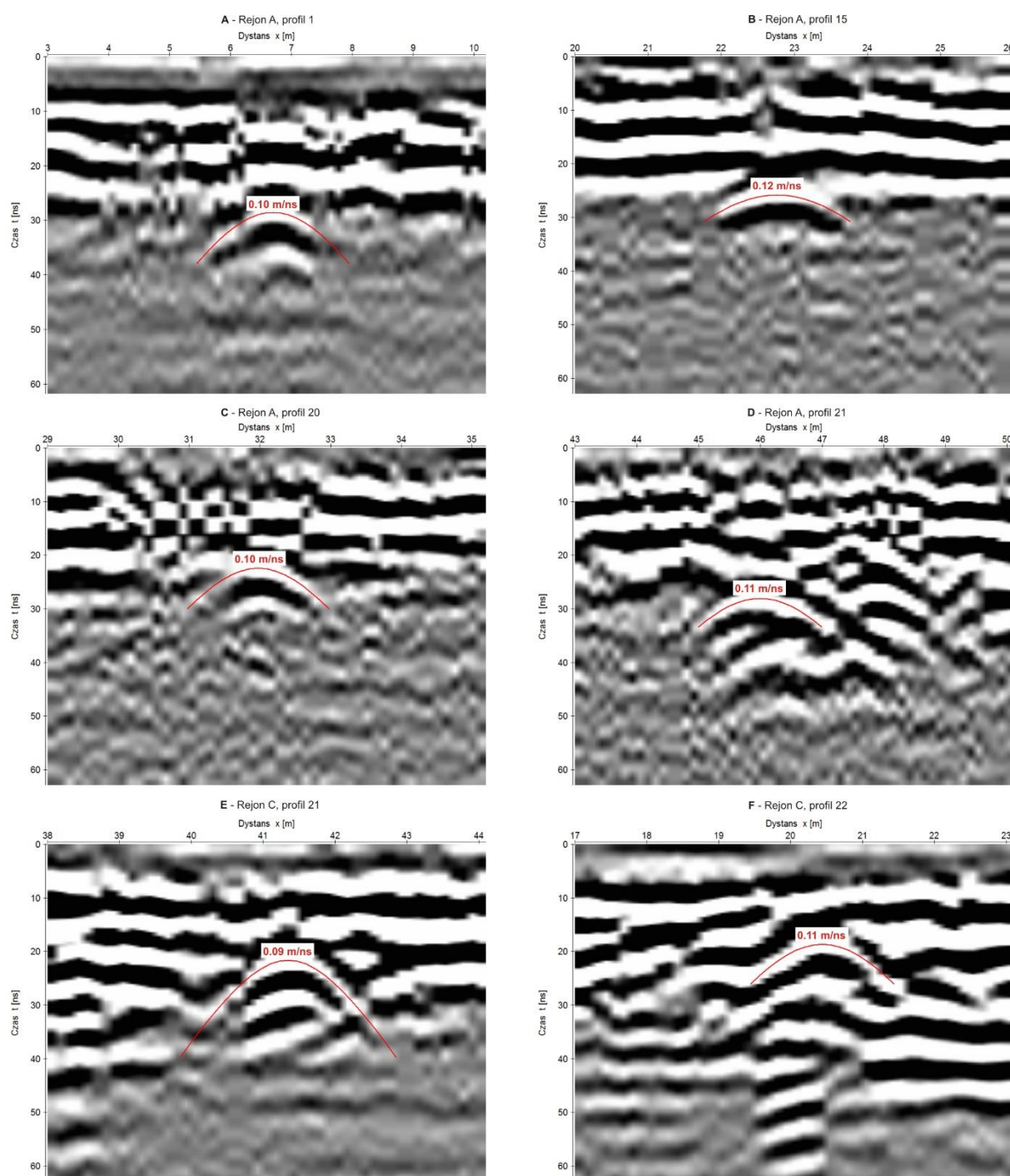


Fig. 11. Wyniki analiz hiperbol dyfrakcyjnych

Echogramy, prezentowane w niniejszym rozdziale, poddano cyfrowemu przetwarzaniu sygnałów; na etapie przetwarzania zastosowano następujące procedury: korekcja faz, korekcja czasu t_0 , korekcja przesterowań, określenie progu dyskryminacji amplitud, odejmowanie średniej ruchomej, uśrednianie medianą, usuwanie przesunięć stałoprądowych, filtracja częstotliwościowa, wygładzanie macierzowe, składanie, odejmowanie trasy średniej, wzmocnienie sygnałów, wybielanie spektralne, filtracja morfologiczna, migracja. Dokładny opis zastosowanych procedur przetwarzania oraz dobór ich parametrów można znaleźć m.in. w pracach Annan (1999), Gołębiowski (2012), Karczewski (2007).

Amplitudy sygnałów normalizowano do maks. wartości tzw. bezpośredniej fali powietrznej; procedura ta pozwoliła na bezpośrednie porównywanie fragmentów echogramów zarejestrowanych na poszczególnych profilach. Większość wizualizacji prezentowanych w dalszej części opracowania przygotowano poprzez wyliczenie tzw. amplitudy chwilowej sygnałów z transformaty Hilberta (Yilmaz 1994), a wyniki takie można utożsamić z obwiedniami sygnałów wysokoenergetycznych.

Wyniki badań GPR analizowano osobno dla każdego rejonu badań, dlatego też w każdym rejonie zdefiniowano lokalne układy współrzędnych kartezjańskich (Fig. 6).

Na Fig. 12. pokazano ogólny rozkład anomalii w Rejonie A. Na wizualizacji 3D widać dużą ilość, losowo rozłożonych w gruncie anomalii, ulokowanych do głębokości ok. 3m. Najwięcej anomalii znajduje się przy samej Bazylice, dlatego obszar ten został dodatkowo zwizualizowany poprzez cięcia bloku 3D płaszczyznami równoległymi do osi „x” (Fig. 13).

Na Fig. 13 widać anomalię rozbudowaną do głębokości ok. 4m, pomiędzy $x=44m$ a $x=62m$ – jest to efekt wypełnienia gruntem wkopu po badaniach archeologicznych prowadzonych pomiędzy 1958 a 1960 rokiem (Fig. 4B). Inną ciekawą strefą anomalną jest strefa pomiędzy $x=10m$ a $x=26m$ (Fig. 13) – podczas badań archeologicznych należy sprawdzić czy w tej strefie ma pozostałości fundamentów.

Na Fig. 12 zaznacza się również zlinearyzowana anomalia, mniej więcej równoległa do ściany Bazyliki pomiędzy $y=4m$ i $y=7m$; aby lepiej ją zwizualizować, na Fig. 14 pokazano kolejne cięcia bloku 3D. Anomalia ta pokrywa się z przebiegiem chodnika i może pochodzić od podbudowy chodnika, lecz efekty widoczne na Fig. 14 sięgają do głębokości ok. 2m (a więc więcej niż standardowa podbudowa), więc należy sprawdzić tą anomalię podczas prac archeologicznych.

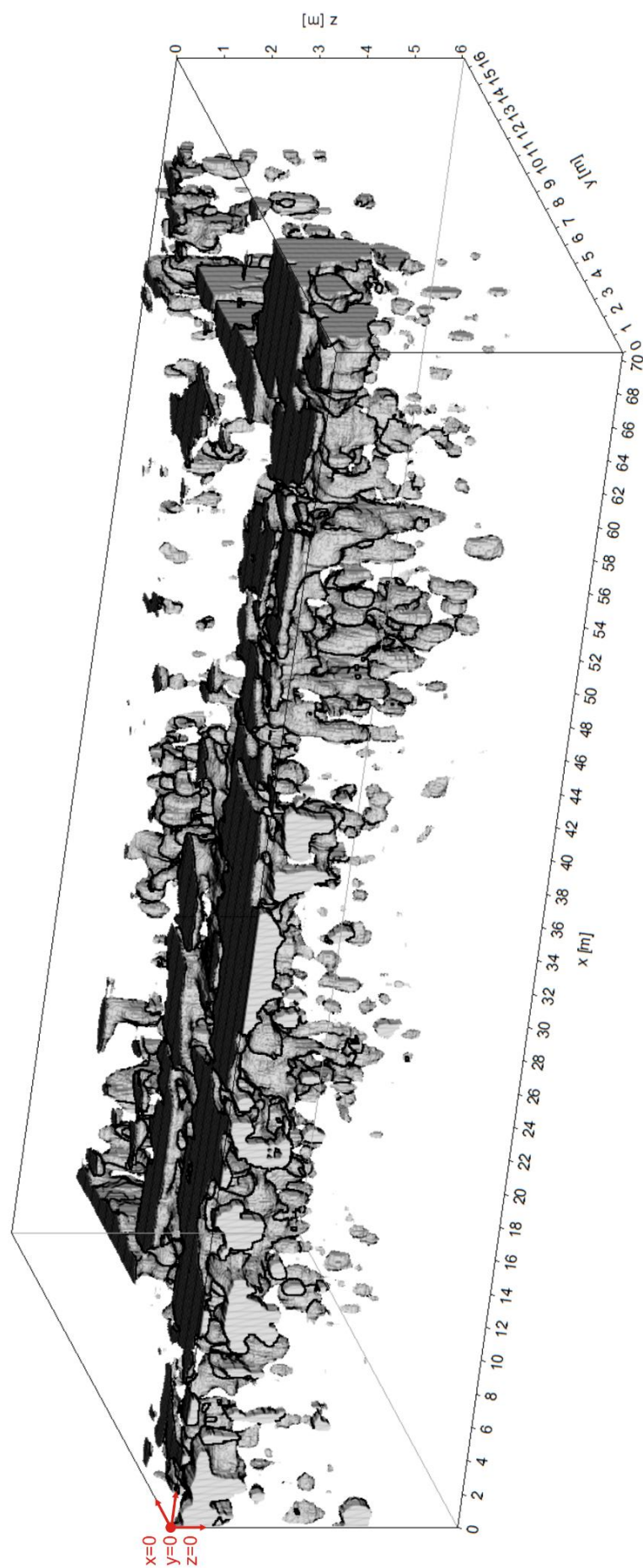


Fig. 12. Rozkład głównych anomalii w formie obwiedni amplitud chwilowych dla Rejonu A;
okonturowano znormalizowane energie sygnałów w zakresie od 0,75 do 1,0

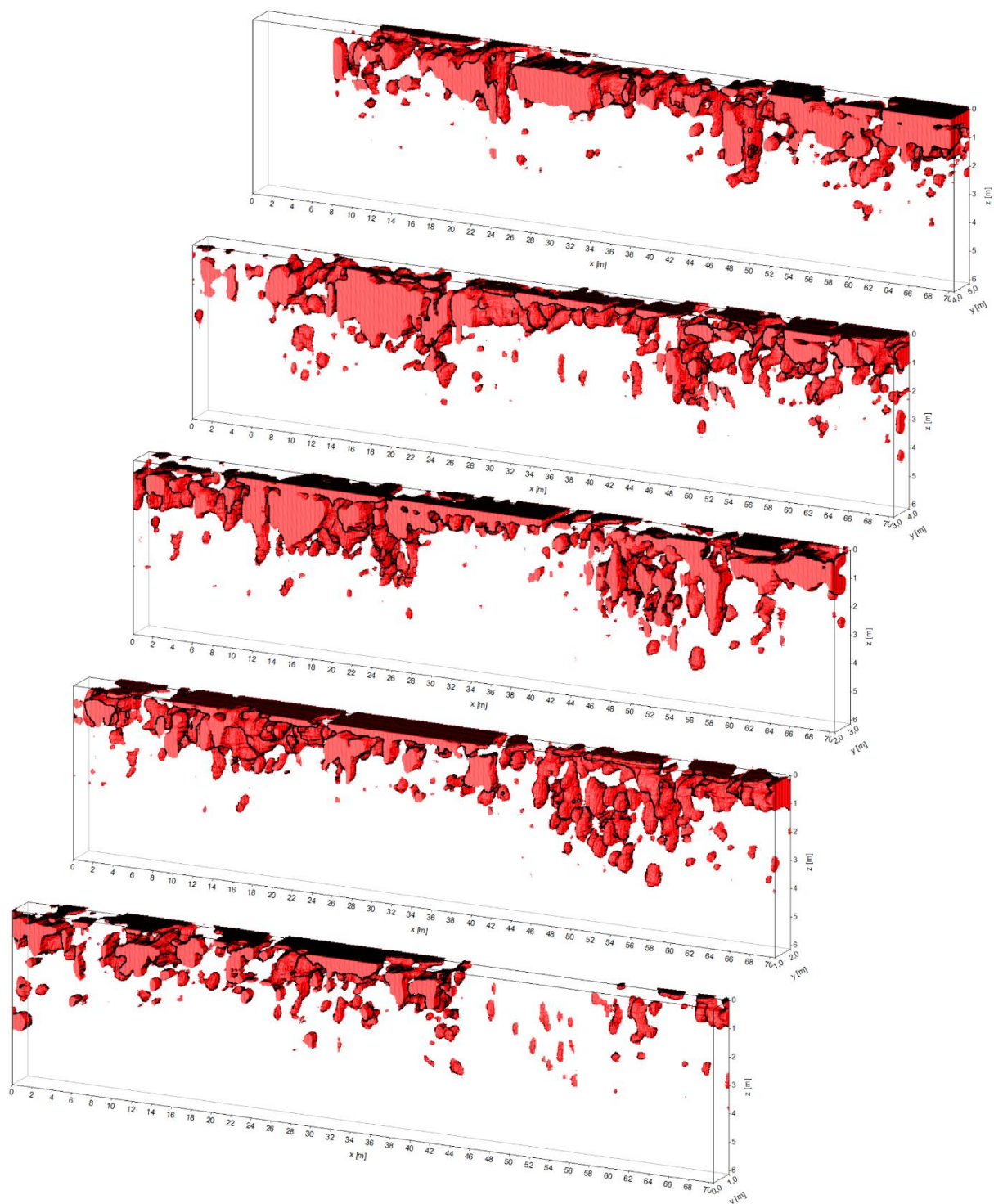


Fig. 13. Cięcia równoległe do osi „x” co 1m, bloku 3D z Fig. 12, od $y=0\text{m}$ do $y=5\text{m}$

Aby dokładnie pozycjonować poszczególne anomalie na płaszczyźnie „x-y” (tj. na płaszczyźnie terenu), blok 3D (Fig. 12) został przecięty płaszczyznami głębokościowymi, z krokiem co 0,2m (Fig. 15 i Fig. 16). Na Fig. 15 widać wyraźnie anomalię o wysokiej energii, rozciągającą się od $x=12\text{m}$ do $x=38\text{m}$ oraz być może kontynuację tej anomalii na $x=52\div 64\text{m}$.

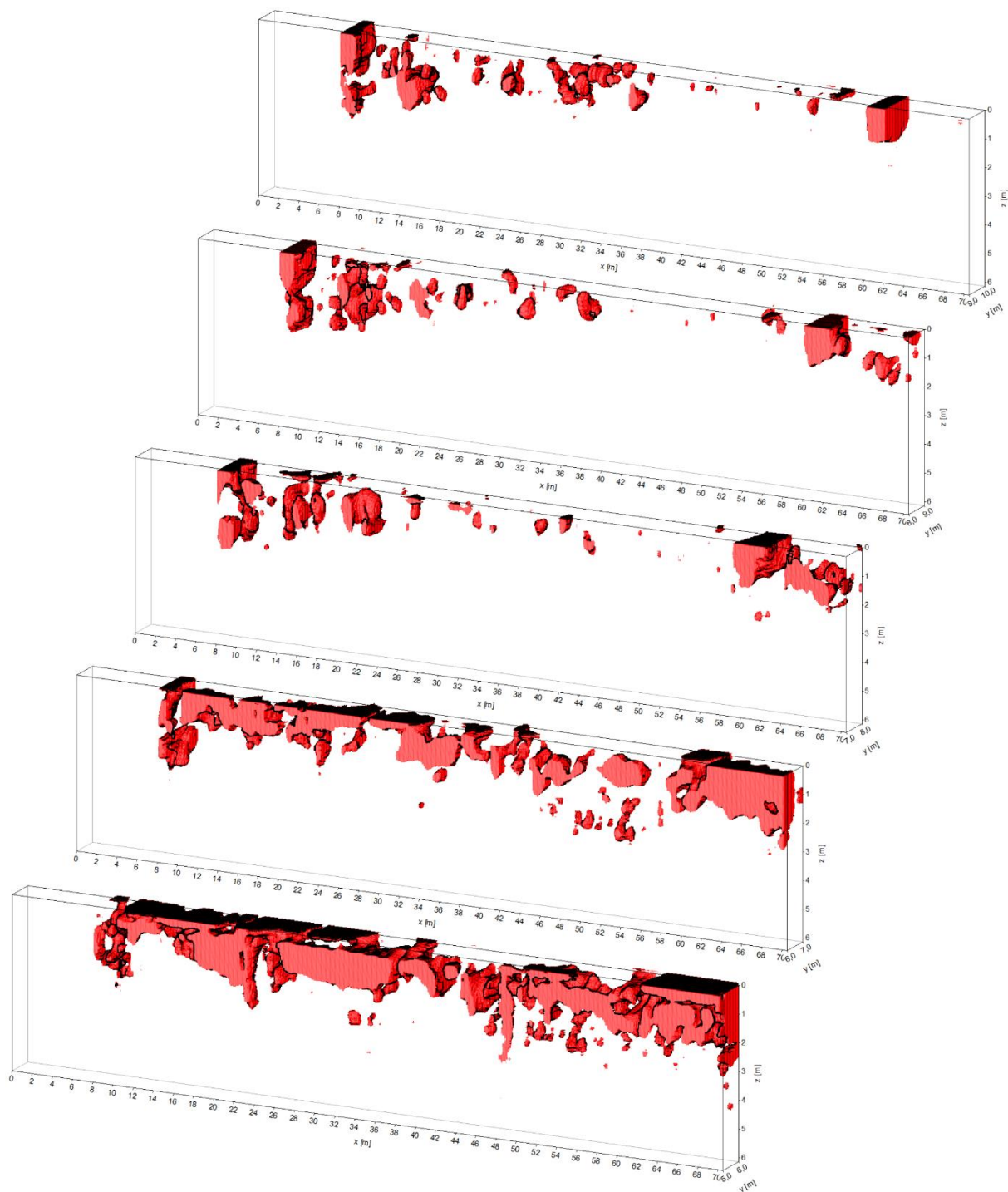


Fig. 14. Cięcia równoległe do osi „x” co 1m, bloku 3D z Fig. 12, od $y=5\text{m}$ do $y=10\text{m}$

Na Fig. 16, anomalia z pozycji $x=12\div 38\text{m}$ jest nadal widoczna i rejestruje się do głębokości 1,4m, fragmentaryczne do 1,6m. Na Fig. 15 i Fig. 16 anomalie o wysokich energiach zarejestrowały się również pomiędzy $x=61\text{m}$ a $x=70\text{m}$ i od $y=0\text{m}$ do $y=8\text{m}$ – anomalie te mogłyby być generowane przez podbudowę chodnika, lecz rozbudowane są w pionie do „z” ok. 1,6m (Fig. 16).

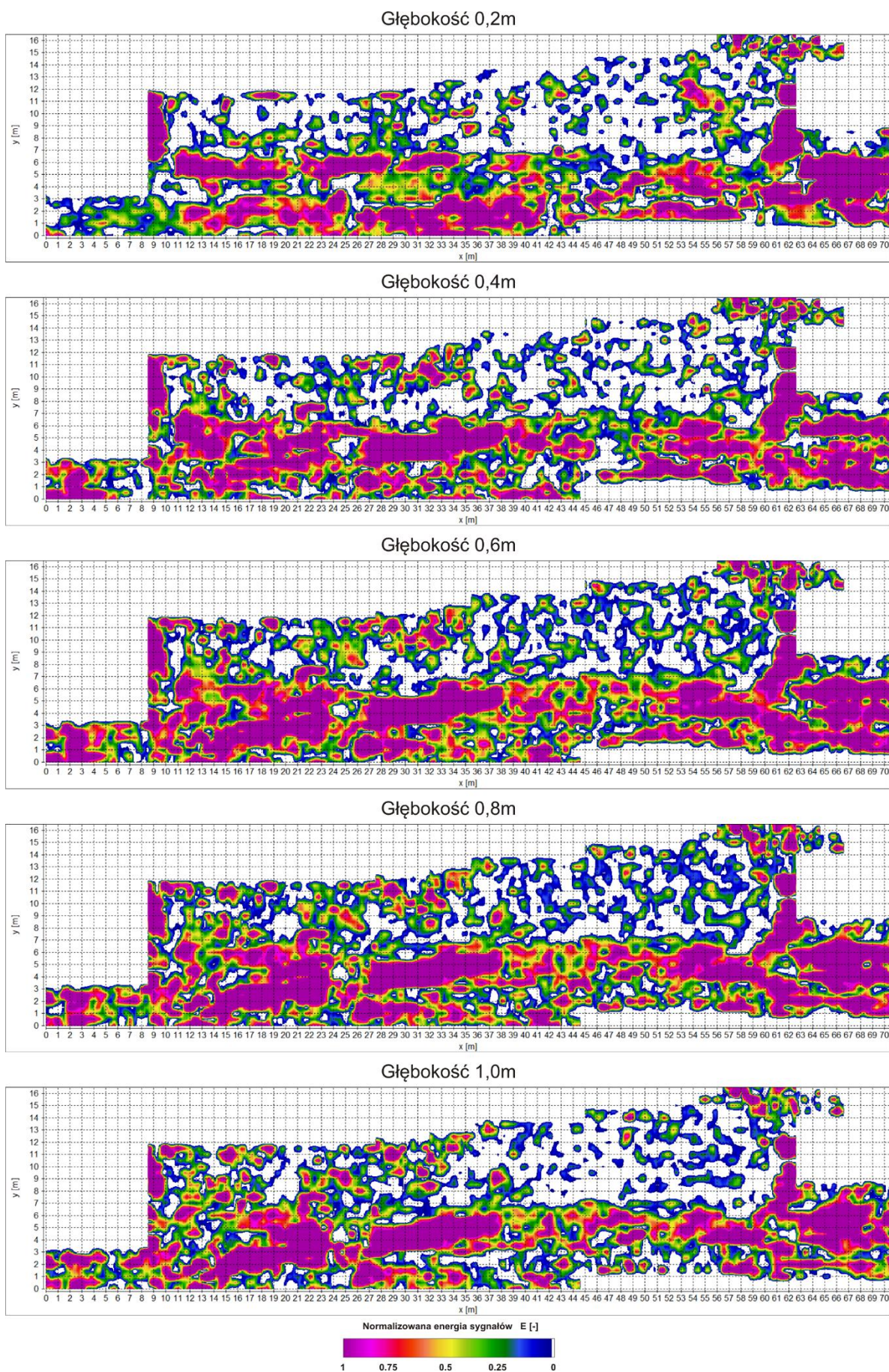


Fig. 15. Cięcia głębokościowe bloku 3D z Fig. 12, od $z=0,2\text{m}$ do $z=1,0\text{m}$

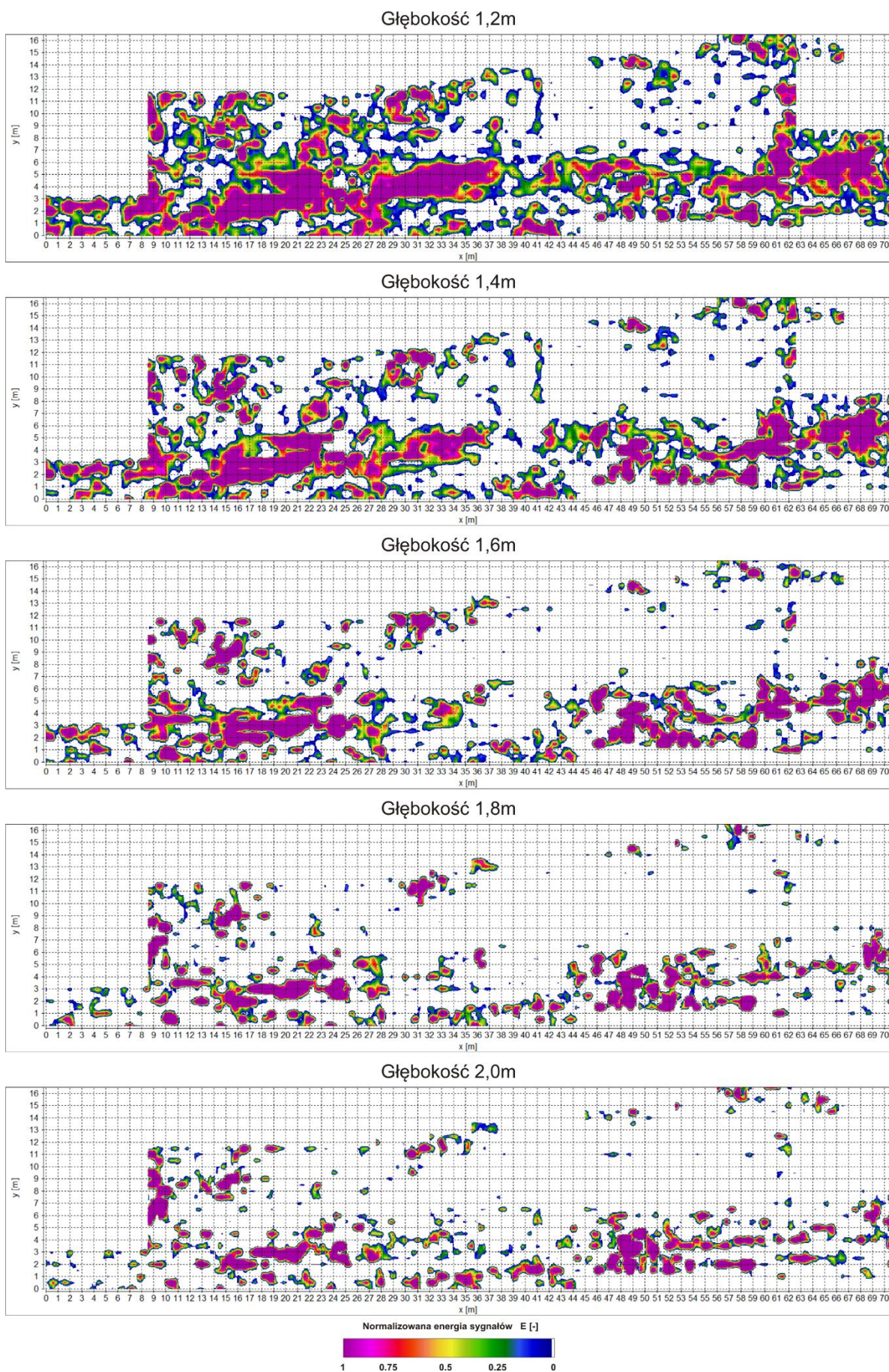


Fig. 16. Cięcia głębokościowe bloku 3D z Fig. 12, od $z=1,2\text{m}$ do $z=2,0\text{m}$

Na Fig. 17 pokazano klasyczne echogramy, przecinające obszary występowania głównych anomalii w Rejonie A. Na echogramach wyraźnie zaznaczają się strefy zwiększonych amplitud sygnałów w omawianych powyżej strefach anomalnych, a charakterystyka refleksów, jednoznacznie wskazuje, że są to miejsca, na które należy zwrócić szczególną uwagę podczas prac archeologicznych.

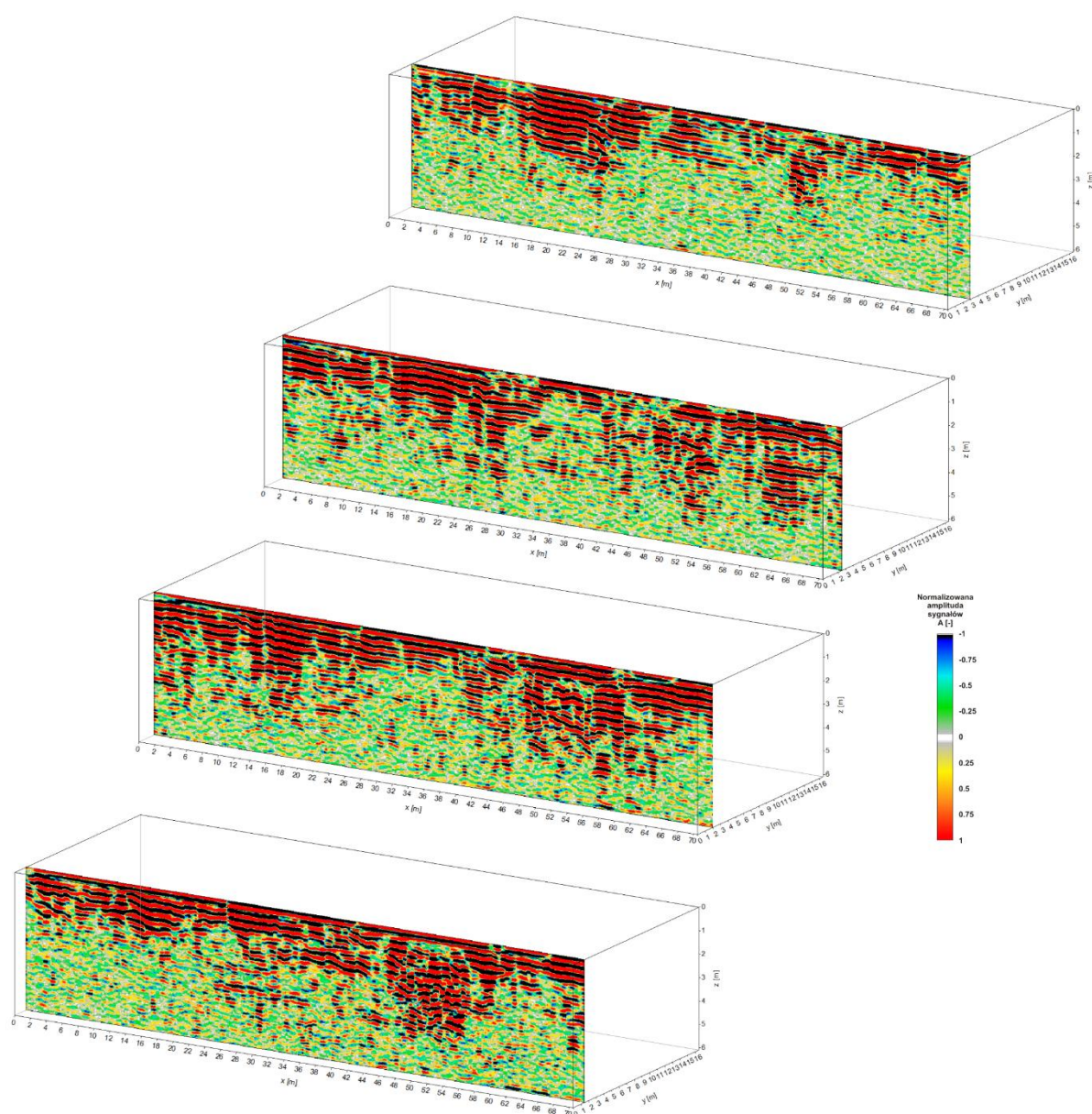


Fig. 17. Wybrane echogramy dla Rejonu A

Charakterystyczną anomalię, widoczną na Fig. 17, pomiędzy $x=46\text{m}$ i $x=60\text{m}$, próbowano rozwiąć dwoma otworami (Fig. 6) ulokowanymi na współrzędnych: $x=49\text{m}$, $y=2\text{m}$ (OTW-1) oraz $x=58\text{m}$, $y=3\text{m}$ (OTW-2). Analiza materiału uzyskanego z otworów

wskazuje, że grunt stanowią nasypy antropogeniczne, a na głębokości 0,2m (OTW-1) i 0,5m (OTW-2) wiertło natrafiło na twarde podłoże (beton, mur), co uniemożliwiało dalsze wiercenie ręczne. Jako otwór referencyjny dla Rejonu A wykonano otwór OTW-3 (Fig. 6) w którym na głębokości 1,9m nawiercono warstwę piasków, a powyżej zalegał nasyp antropogeniczny z dużymi okruchami skalnymi. W interwale głębokościowym od 0,2m do 1,9m nawiercono w otworze OTW-3 bardzo dużo fragmentów kości.

Na Fig. 18. pokazano ogólny rozkład anomalii w Rejonie B. Na wizualizacji 3D widać znacznie mniej, losowo rozłożonych w gruncie małych anomalii, w porównaniu z Rejonem A (Fig. 12). Podobnie jak miało to miejsce w Rejonie A, również w Rejonie B anomalie o wysokich energiach lokują się głównie przy budynku Bazyliki, co jest najprawdopodobniej spowodowane wpływem materiału, którym zasypano wkopy archeologiczne. Na Fig. 18 widoczne jest kilka anomalii rozbudowanych w pionie i sięgających do głębokości ok. 3÷4m; aby dokładniej zgeometryzować te anomalie, blok 3D przecięto płaszczyznami równoległymi do osi „x” (Fig. 19).

Na Fig. 19 widoczne są 3 wyraźnie główne anomalie pionowe, z osiami na $x=1,5m$, $x=8,5m$ oraz $x=18,5m$. W Rejonie B nie występuje infrastruktura podziemna, tj. kable, rury, kanalizacja i in. (Fig. 6), więc można przyjąć, że obserwowane efekty związane są z pozostałościami fundamentów odsłoniętych podczas prac archeologicznych w latach 1958-1960 (Fig. 3). Anomalie zanikają od 3-4 metra licząc w kierunku „y”.

Na Fig. 18 widoczne są również anomalie o wysokich energiach w strefie przypowierzchniowej, pomiędzy $y=7m$ a $y=11,5m$. Aby dokładnie przeanalizować te anomalie, blok 3D przecięto odpowiednimi płaszczyznami równoległymi do osi „x” (Fig. 20). Anomalia w końcowych częściach profili na Fig. 20 nie sięga co prawda głęboko, lecz ma charakterystyczny obrys prostokątny, więc należałoby ją sprawdzić podczas badań archeologicznych.

Na Fig. 21 pokazano ogólny rozkład anomalii w Rejonie C, a cechą charakterystyczną wizualizacji 3D jest bardzo duża ilość drobnych anomalii, losowo rozłożonych w strefie przypowierzchniowej; efekt ten jest podobny do obserwowanego w Rejonie A, lecz ilość małych anomalii wydaje się być tutaj większa. Ogólnie można stwierdzić, że anomalie ulokowane są tylko w strefie przypowierzchniowej, do głębokości ok. 1÷2m; anomalie rozbudowane w pionie obserwowane są tylko w zachodniej części rejonu badań, czyli

w końcowej części profili, przy Bazylice. Aby dokładniej zgeometryzować główne anomalie blok 3D przecięto płaszczyznami równoległymi do osi „x” (Fig. 22 i Fig. 23).

Na Fig. 22 pionowo rozbudowane anomalie widoczne są tylko pomiędzy $y=14\text{m}$ a $y=15\text{m}$, natomiast efekty od fundamentów wieży Muskaty można wyseparować z rozkładu energii sygnałów tylko dla profili od $y=8\text{m}$ do $y=11\text{m}$, gdzie następuje przerwanie ciągłości anomalii w strefie przypowierzchniowej. Trudność w jednoznacznej interpretacji anomalii dla wieży Muskaty wynika z faktu, że rejon tych fundamentów był dwukrotnie odkopywany i zasypywany w latach 1958-1960 oraz w 2003 roku.

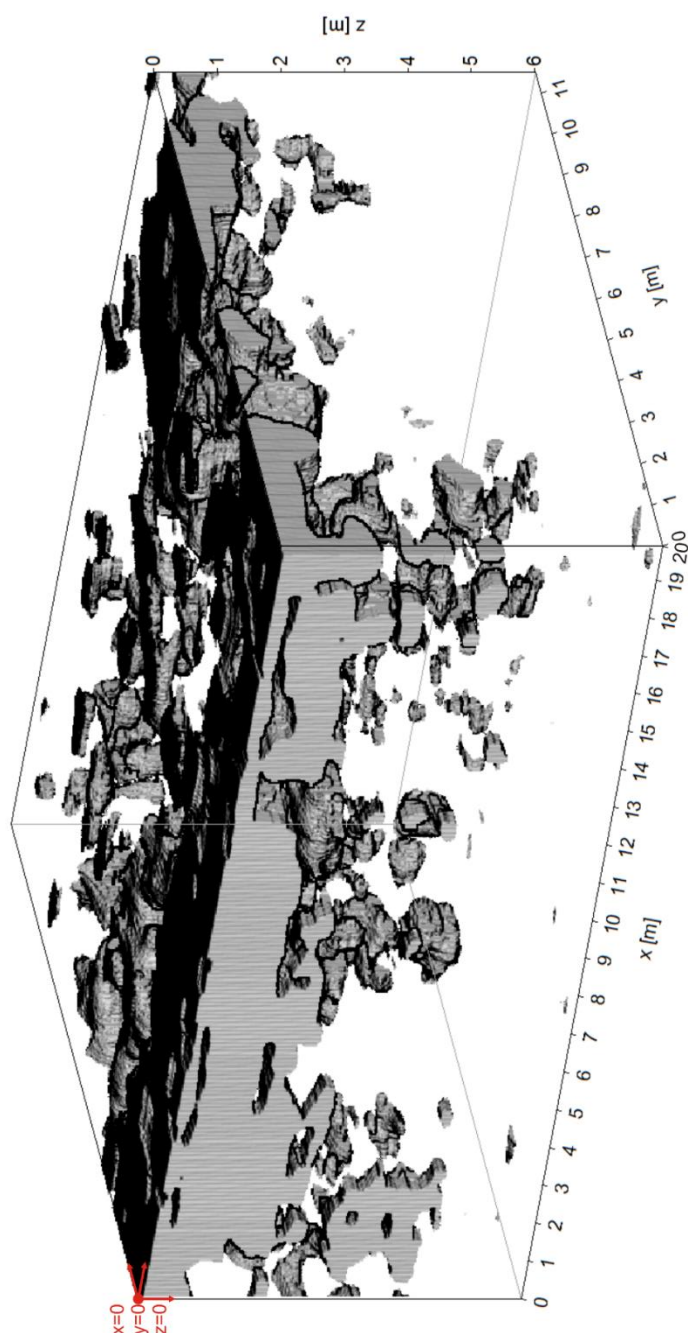


Fig. 18. Rozkład głównych anomalii w formie obwiedni amplitud chwilowych dla Rejonu B;
okonturowano znormalizowane energie sygnałów w zakresie od 0,75 do 1,0

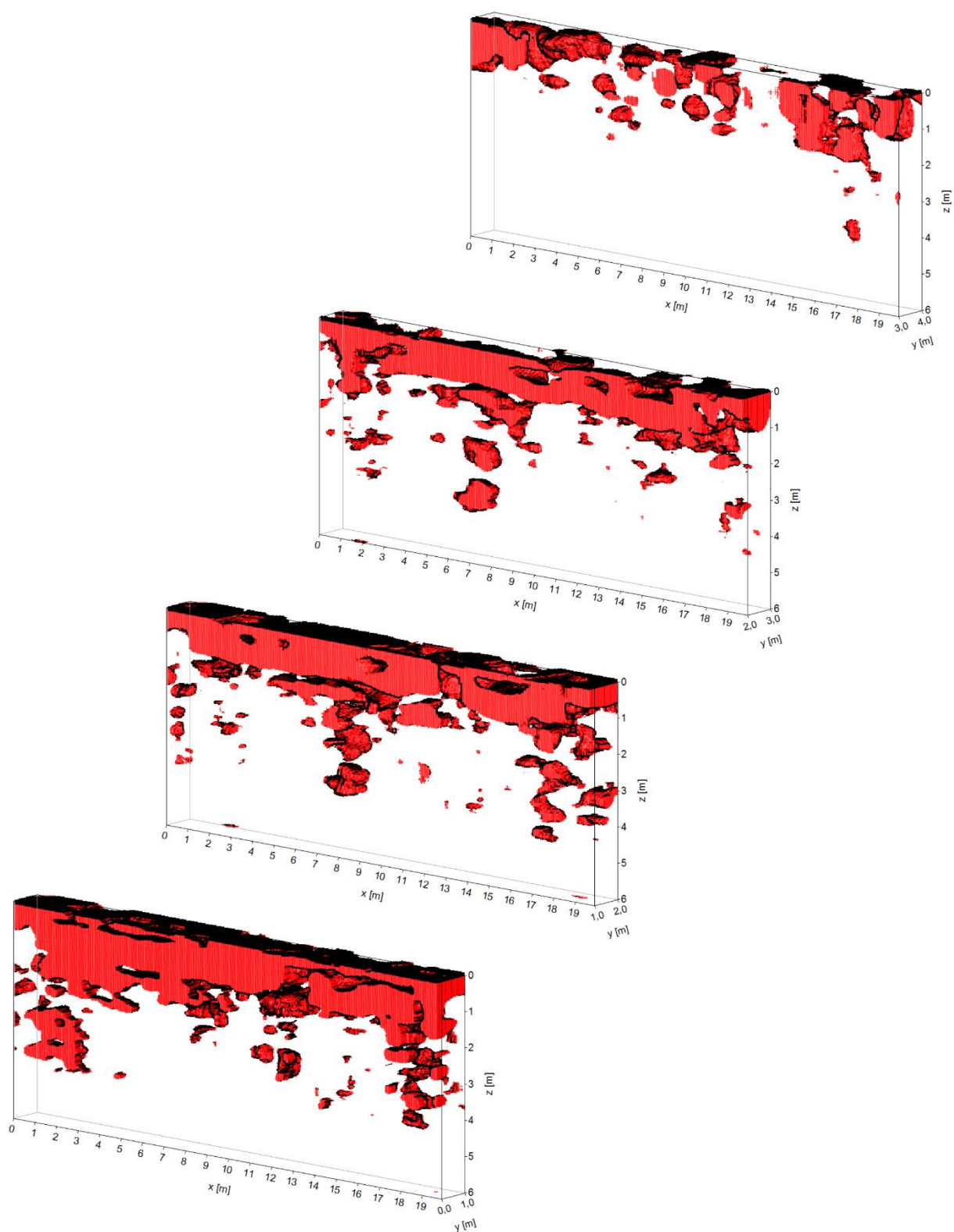


Fig. 19. Cięcia równoległe do osi „x” co 1m, bloku 3D z Fig. 18, od $y=0\text{m}$ do $y=4\text{m}$

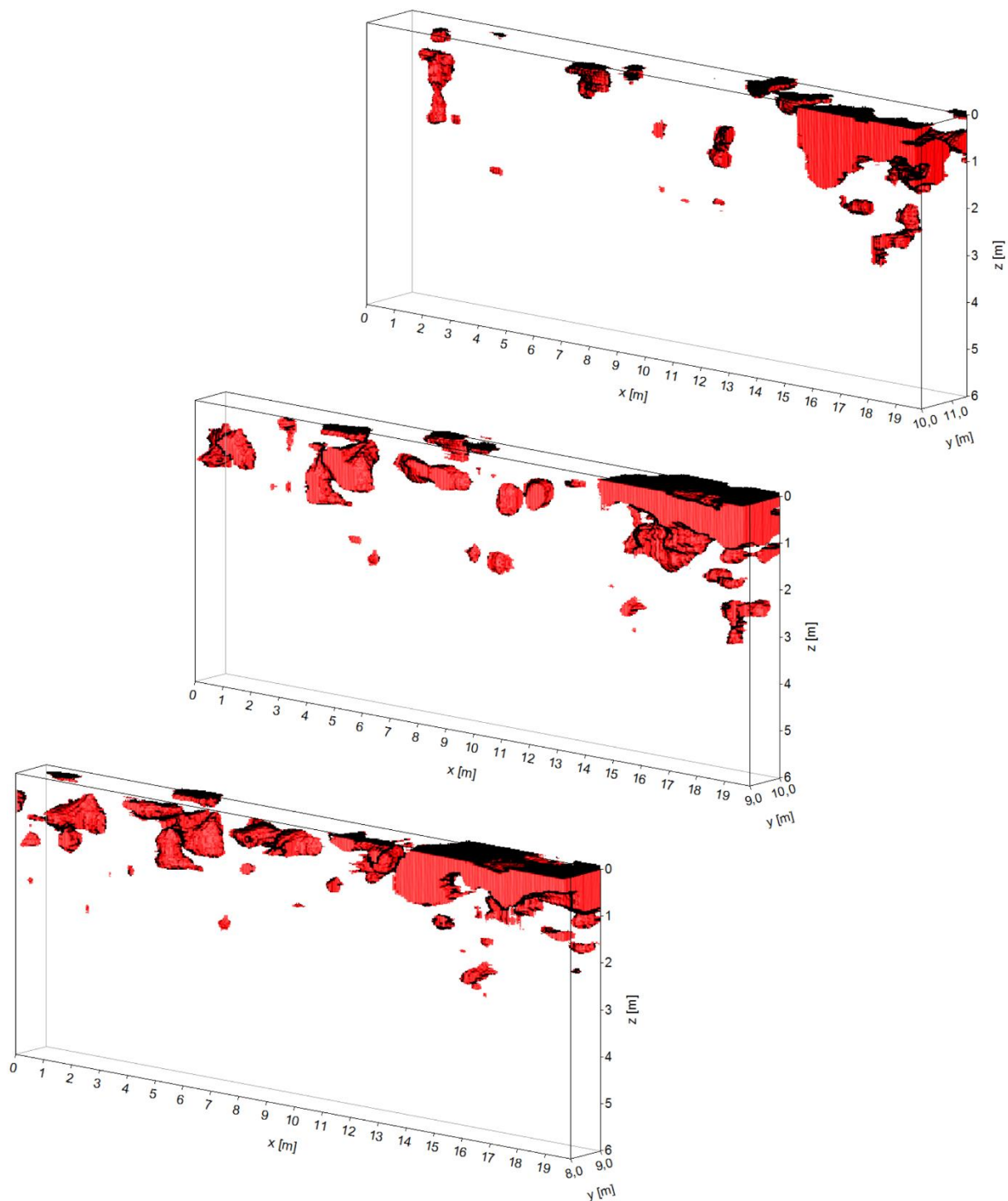


Fig. 20. Cięcia równoległe do osi „x” co 1m, bloku 3D z Fig. 18, od $y=8m$ do $y=11,5m$

Na Fig. 21, Fig. 22 i Fig.23 nie rejestrują się wyraźne anomalie z głębokości większych niż 1m, maks. 2m, co wskazywałoby na fakt, że hipoteza o tunelu pomiędzy Bazyliką a domem Długosza jest nieprawdziwa. Jeśli taki tunel (tj. pustka z powietrzem) faktycznie by istniał, powinien generować na echogramach charakterystyczne, łukowate (tj. o kształcie hiperboli) refleksy. Aby przeanalizować obecność takich efektów przygotowano Fig. 24 i Fig. 25.

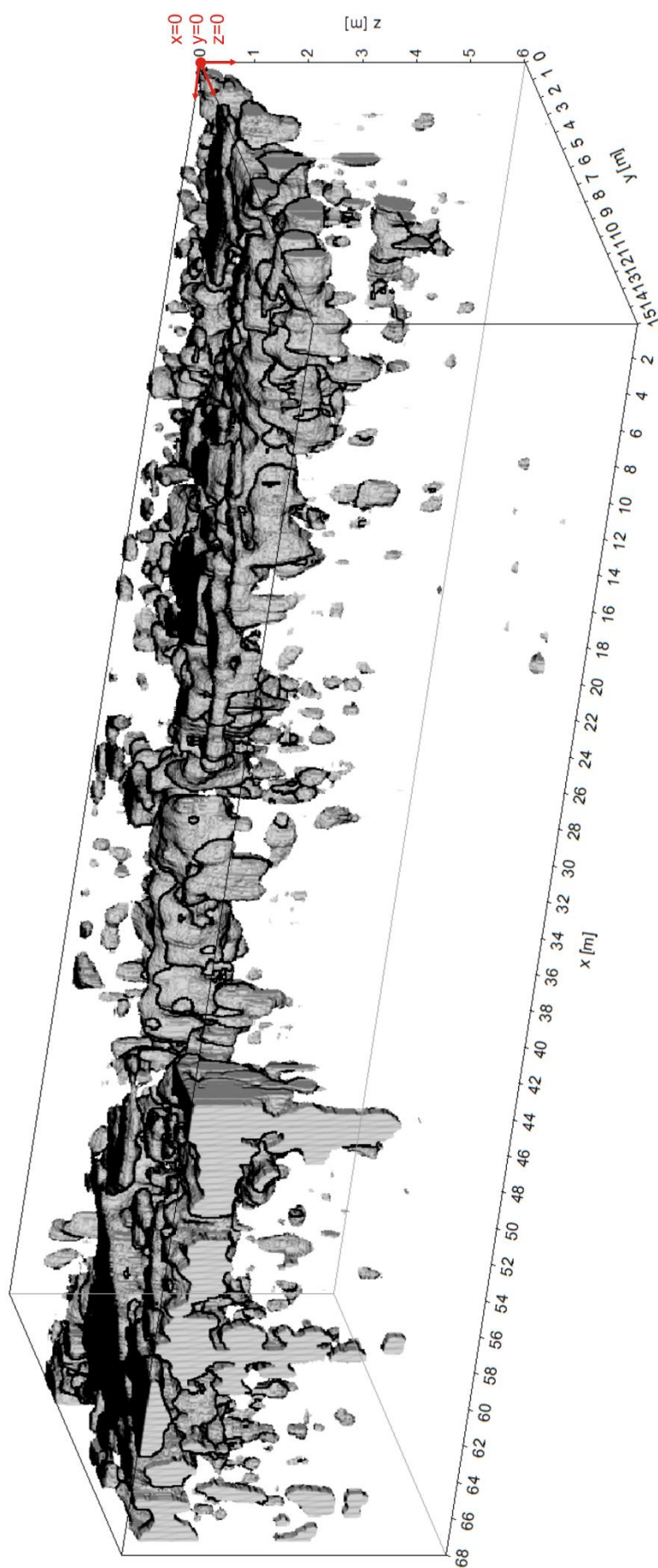


Fig. 21. Rozkład głównych anomalii w formie obwiedni amplitud chwilowych dla Rejonu C;
 okonturowano znormalizowane energie sygnałów w zakresie od 0,75 do 1,0

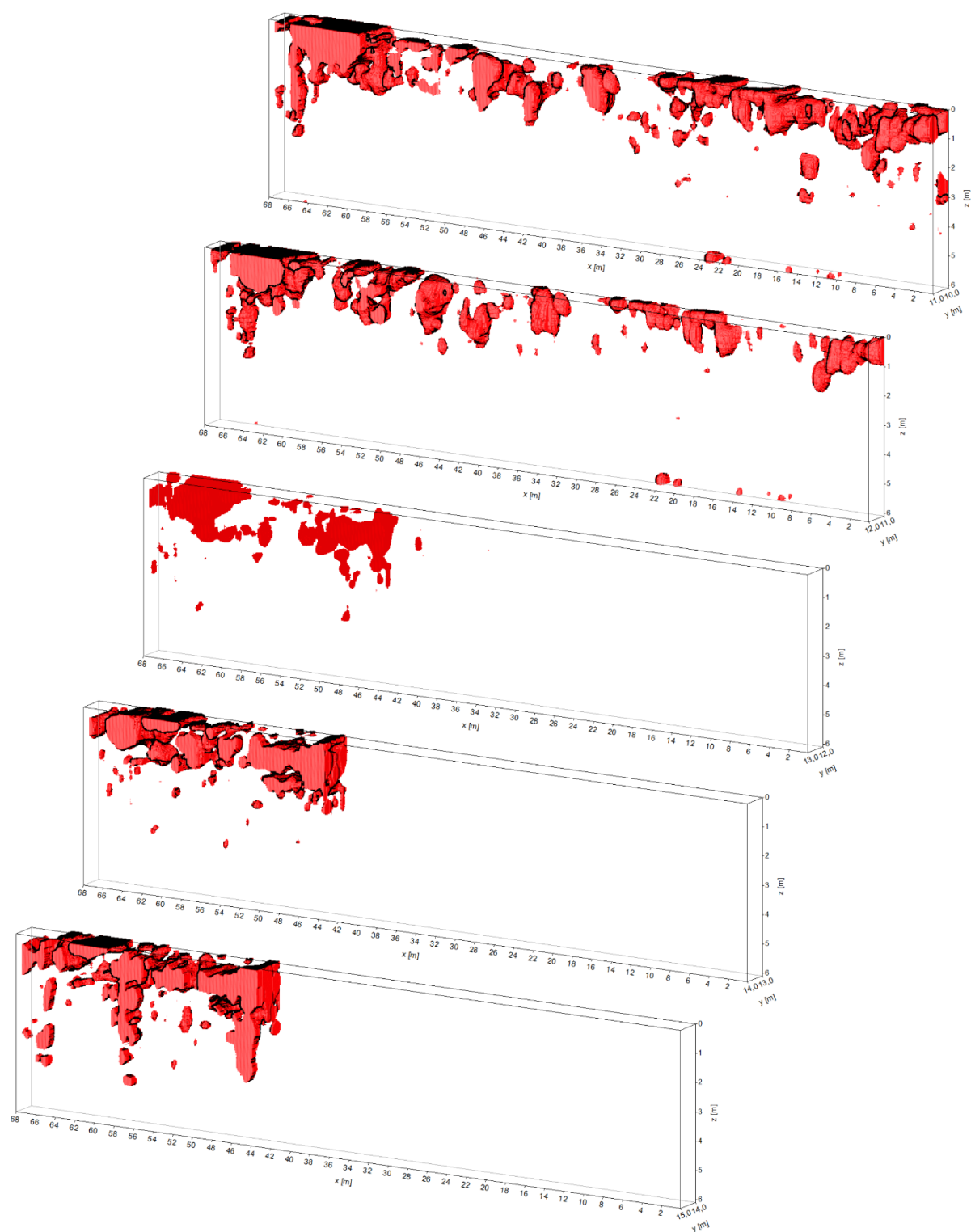


Fig. 22. Cięcia równoległe do osi „x” co 1m, bloku 3D z Fig. 21, od $y=10\text{m}$ do $y=15\text{m}$

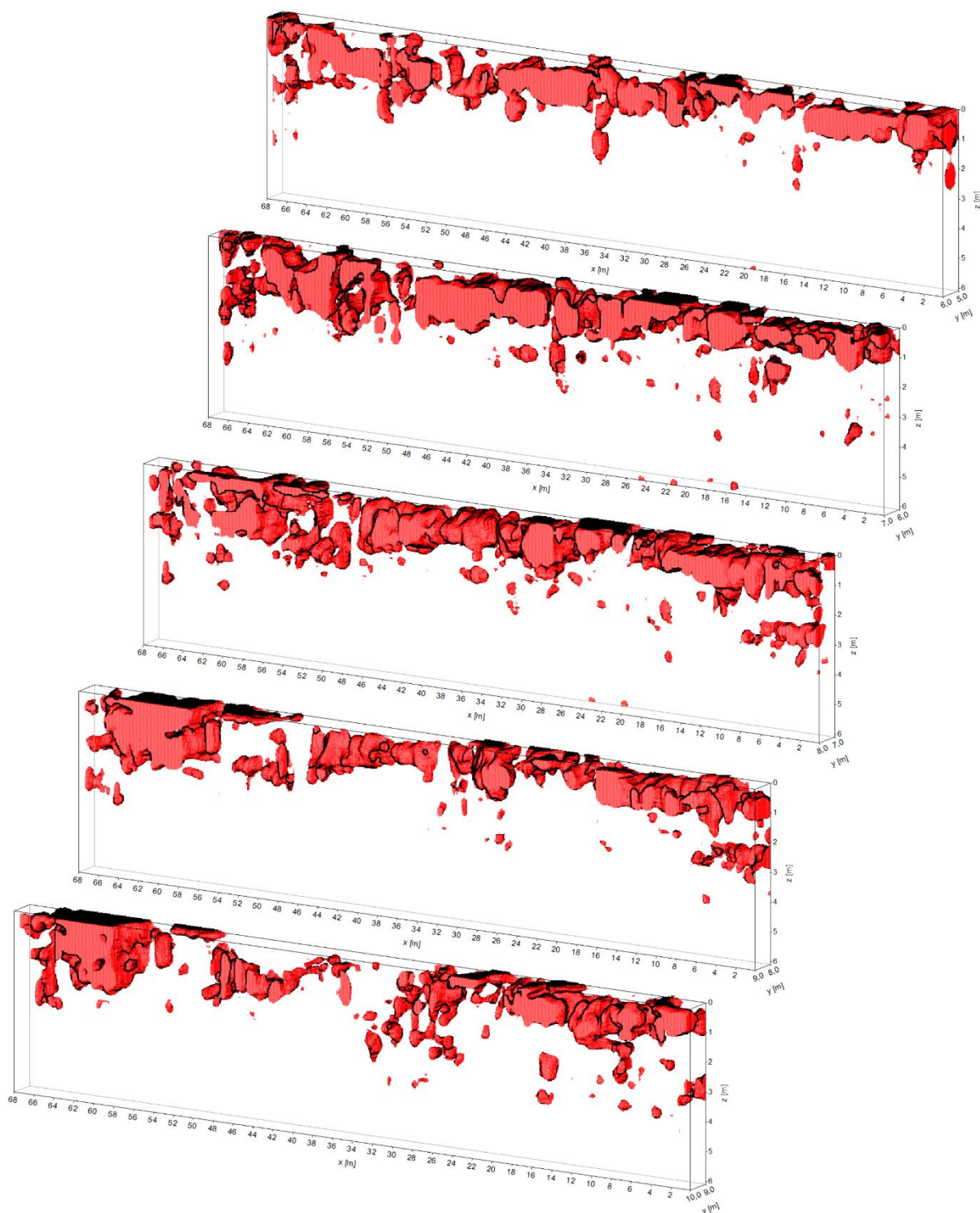


Fig. 23. Cięcia równoległe do osi „x” co 1m, bloku 3D z Fig. 21, od $y=5\text{m}$ do $y=10\text{m}$

Na Fig. 24 rejestruje się strefa bardzo silnego wzrostu amplitud refleksów na profilu na $y=0,5\text{m}$, pomiędzy $x=10\text{m}$ i $x=28\text{m}$, z charakterystyczną hiperbolą z osią na $x=26\text{m}$; podobna hiperbola rejestruje się na kolejnym profilu ($y=1\text{m}$), z osią przesuniętą na $x=27\text{m}$; na kolejnych, wybranych profilach ($y=2\text{m}$ i $y=5\text{m}$) opisywany efekt zanika. Na profilach przy

Bazylice, tzn. na $y=10,5\text{m}$ i $y=11\text{m}$ (Fig. 25) również nie widać wyraźnych anomalii od tunelu, natomiast na Fig. 23 pojawia się lokalnie strefa anomalii ulokowanych na osi $x=28\div 30\text{m}$. Pojawianie się i zanikanie efektów w strefie, gdzie powinien znajdować się hipotetyczny tunel może być spowodowane faktem, że nie jest on pustką wypełniona powietrzem, lecz może być fragmentarycznie zagruzowany lub wypełniony materiałem geologicznym. Aby jednoznacznie zweryfikować hipotezę o istnieniu tunelu należy wykonać wkopy weryfikujące w miejscach wskazanych w interpretacji, a najbardziej charakterystyczne efekty pojawiają się przy domu Długosza. Charakterystyczne anomalie przy domu Długosza zostały rozwiercone otworem OTW-5 (Fig. 6), z którego wynika, że: do głębokości 2,8m występuje nasyp antropogeniczny (z fragmentami cegieł) z bardzo dużą ilością fragmentów kości.

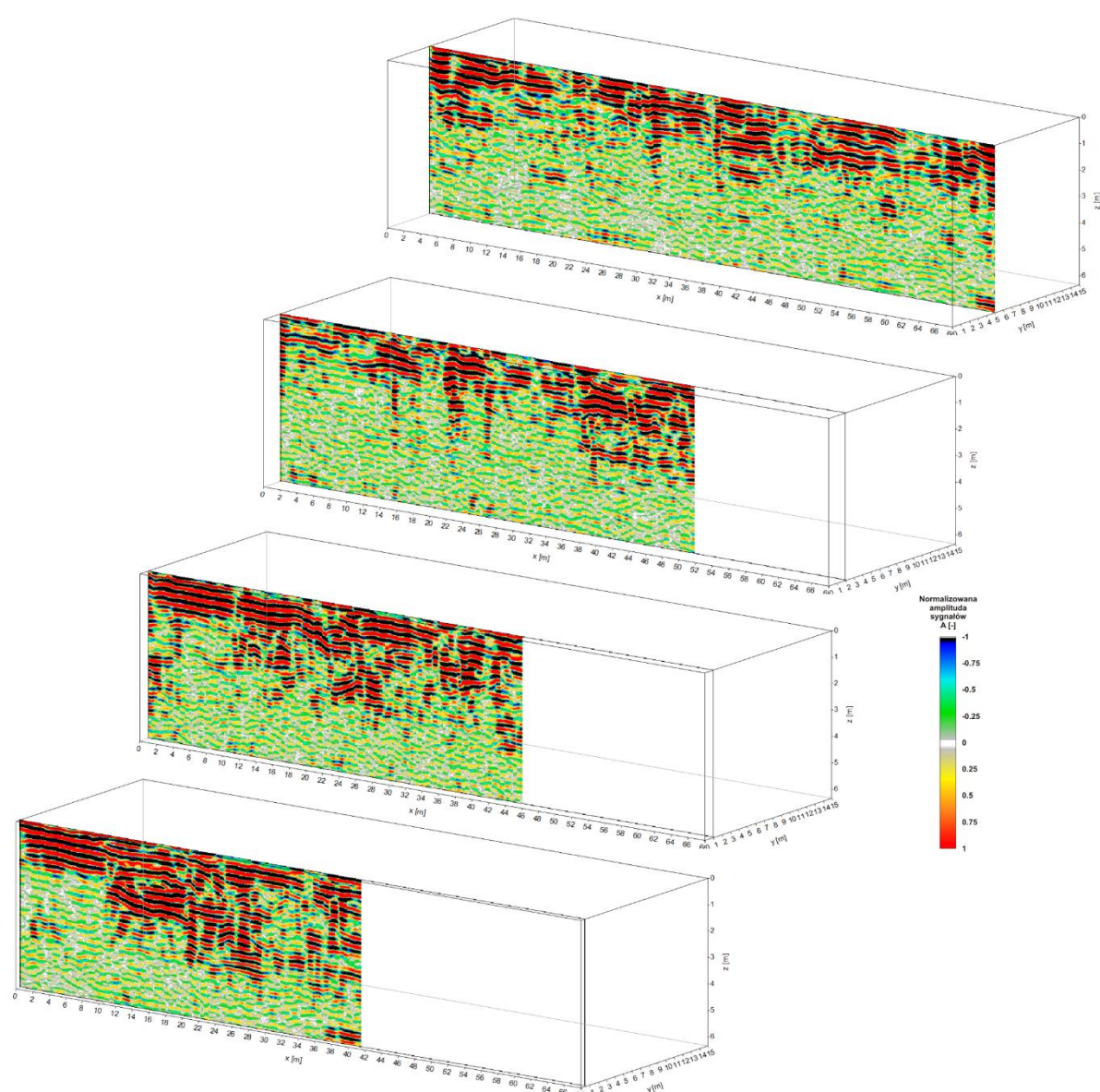


Fig. 24. Wybrane echogramy dla Rejonu C

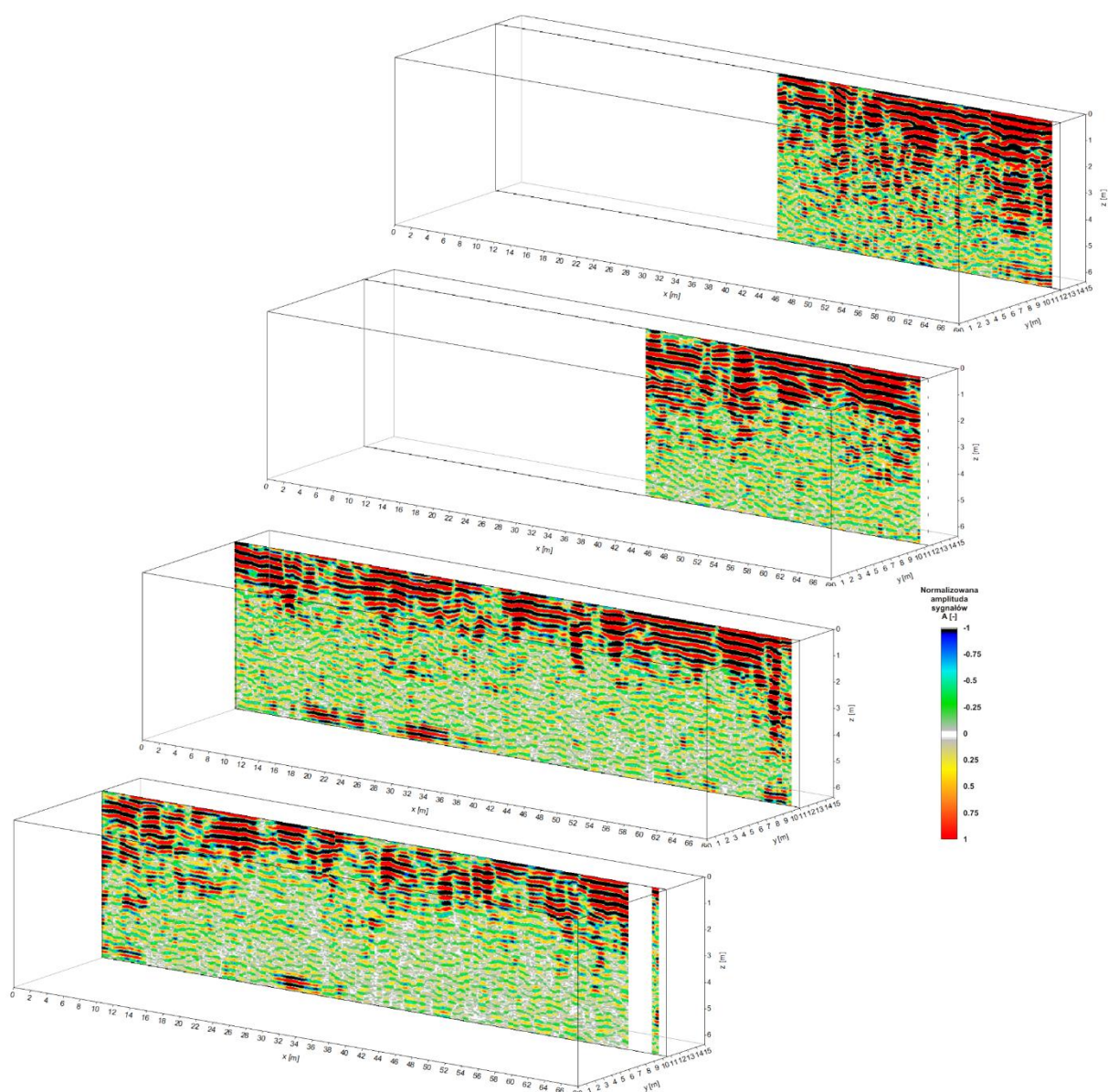


Fig. 25. Wybrane echogramy dla Rejonu C

Wysokoamplitudowe anomalie widoczne na Fig. 25 pomiędzy $y=10\text{m}$ a $y=15\text{m}$ zostały przewiercone otworem OTW-4 (Fig. 6), z badań otworów wynika, że: do głębokości 2,5m zalega nasyp antropogeniczny z bardzo dużą ilością kości i z fragmentami cegieł.

Na Fig. 26 przedstawiono główne anomalie zarejestrowane w Rejonie D. Rozkład anomalii w tym rejonie jest podobny do Rejonu B, tzn. rejestrują się raczej większe anomalie, a mały, losowo rozłożonych anomalii jest relatywnie mało. Na Fig. 26 widoczna jest główna podłużna anomalia ciągnąca się równolegle do osi „x” – jest to najprawdopodobniej efekt od kanalizacji widocznej na Fig. 6. W rejonie D przebiega również instalacja elektryczna (Fig. 6), a wkop tej instalacji również może dawać efekty na obrazie 3D. Aby dokładniej

przeanalizować efekty zarejestrowane w Rejonie D wykonano cięcia głębokościowe bloku 3D z krokiem $z=0,2\text{m}$ (Fig. 27 i Fig. 28).

Na Fig. 27 widać wyraźnie dwie równoległe anomalie z osiami na $y=2\text{m}$ i $y=5\text{m}$. Anomalia z osią na $y=2\text{m}$ to efekt od kanalizacji, natomiast anomalia na $y=5\text{m}$ wydaje się być warta sprawdzenia, tym bardziej, że rozciąga się w pionie od głębokości ok. $0,4\text{m}$ do $1,2\text{m}$, zanikając na $z=2\text{m}$ (Fig. 28). Wysokie energie sygnałów odbitych dla rejestracji pomiędzy $x=12\div 17\text{m}$ i $y=0\div 9\text{m}$ są najprawdopodobniej wynikiem superpozycji efektów rejestrowanych od wkopów pod kanalizację i pod kable elektryczne.

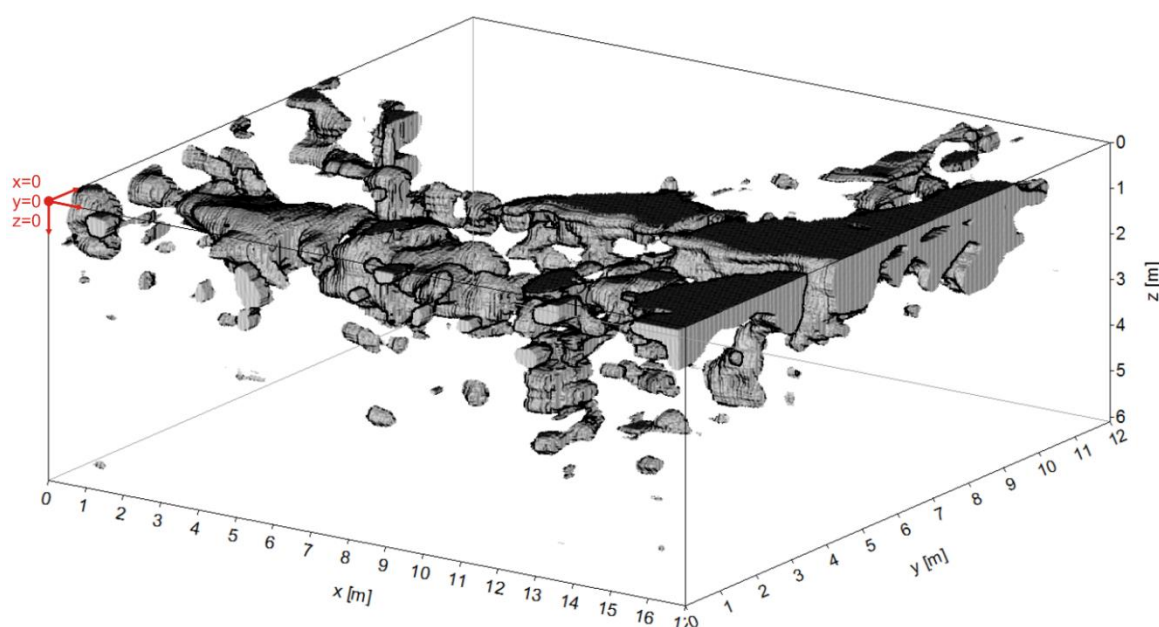


Fig. 26. Rozkład głównych anomalii w formie obwiedni amplitud chwilowych dla Rejonu D; okonturowano znormalizowane energie sygnałów w zakresie od 0,75 do 1,0

Analizując rejestracje dla wszystkich czterech rejonów badań można stwierdzić, że ośrodek gruntowy jest bardzo silnie zaburzony działalnością antropogeniczną, co skutkuje rejestracją bardzo wielu, losowo rozłożonych anomalii. Fakt ten nie pozwala jednoznacznie rozróżnić anomalii pochodzących od pochówków szkieletowych oraz od gruzu czy naturalnych niejednorodności ośrodka. Podczas badań archeologicznych będzie można zweryfikować, które małe anomalie georadarowe były efektem pochówków, a które miały inną genezę. W strefie przypowierzchniowej, do głębokości ok. 1m , rejestruje się tak wiele anomalii o wysokich energiach (Fig. 12, Fig. 18, Fig. 21, Fig. 26), że nie sposób wydzielić w nich miejsc związanych z pochówkami szkieletowymi.

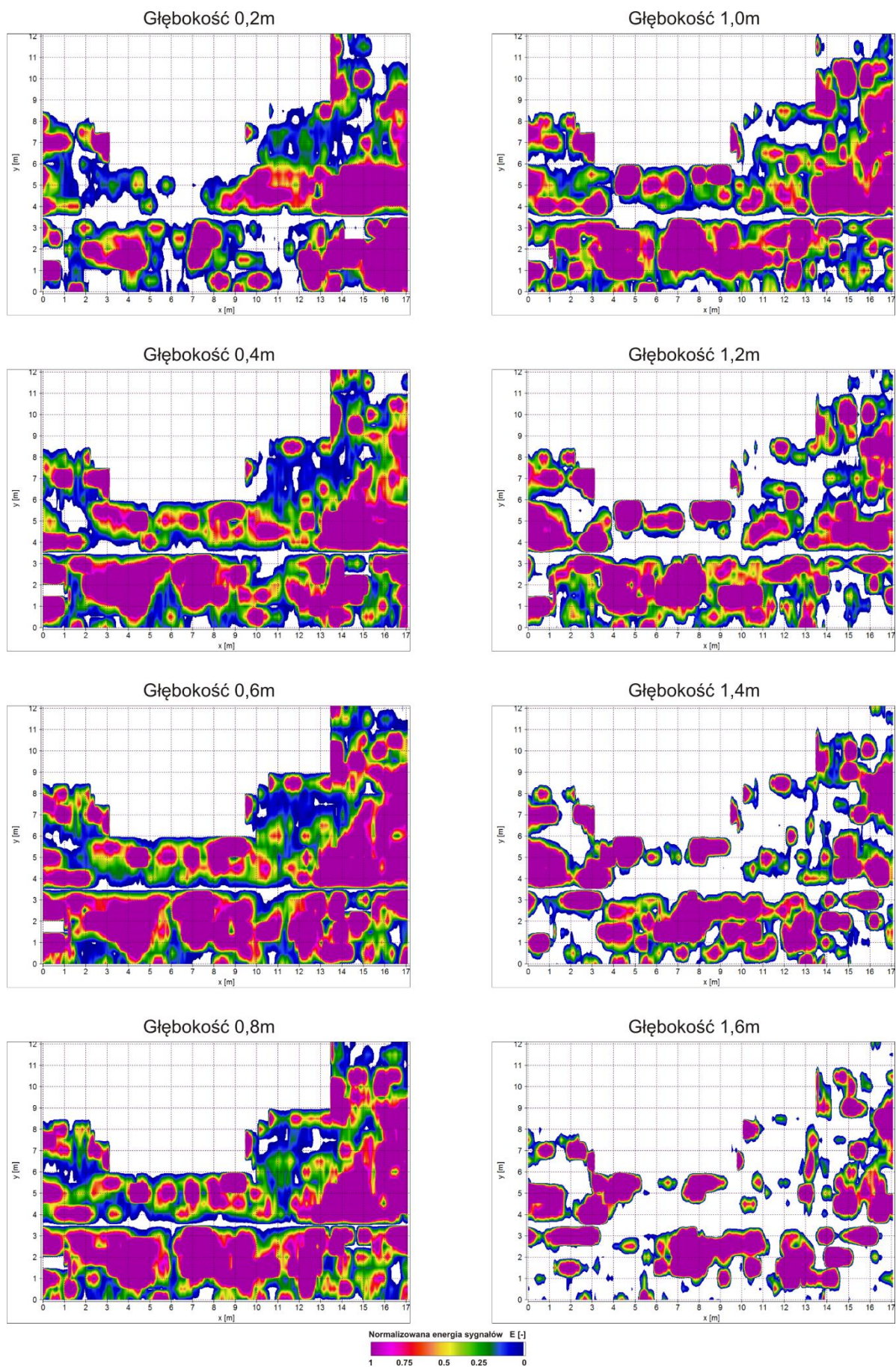


Fig. 27. Cięcia głębokościowe bloku 3D z Fig. 26, od $z=0,2\text{m}$ do $z=1,6\text{m}$

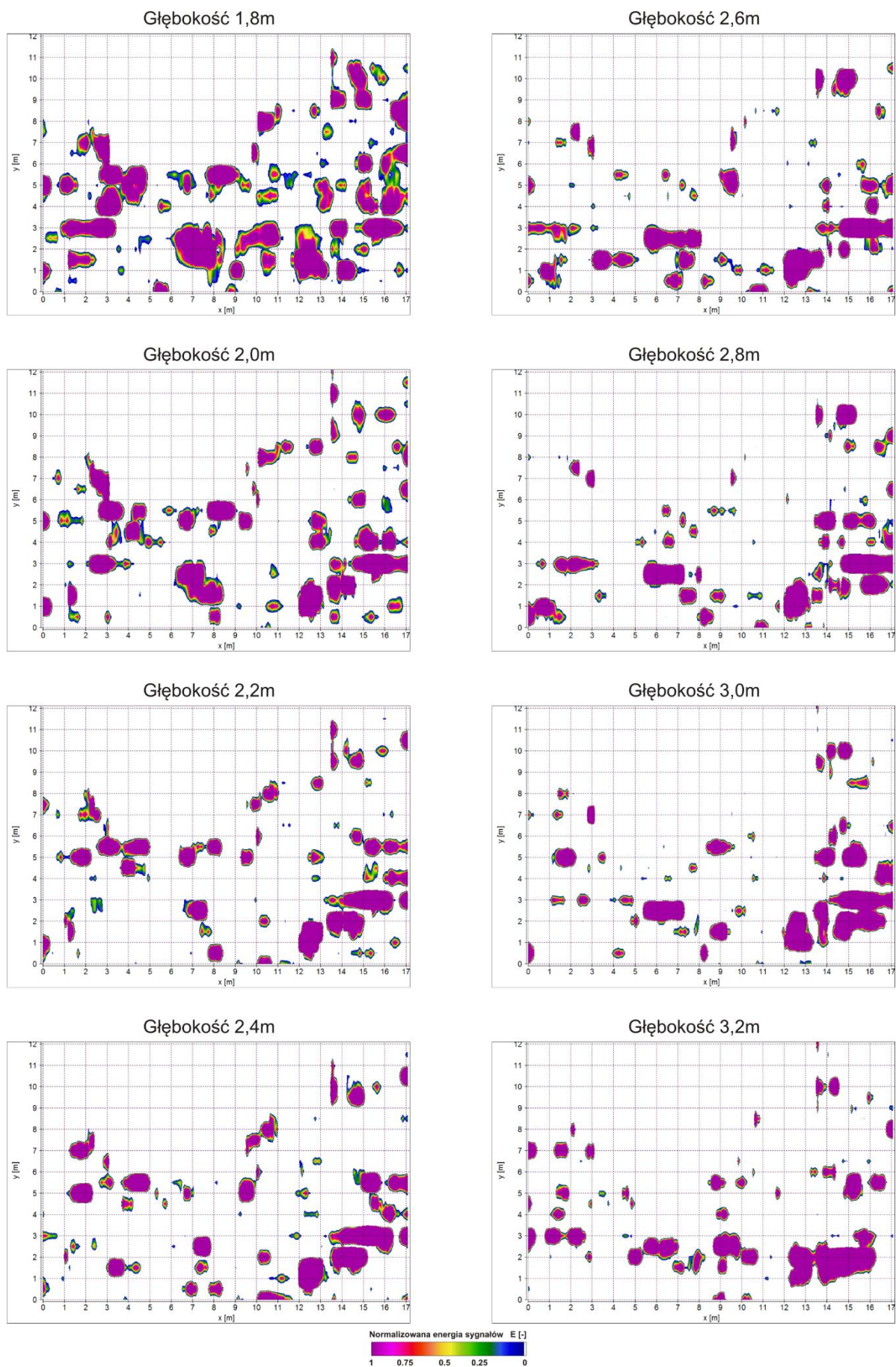


Fig. 28. Cięcia głębokościowe bloku 3D z Fig. 26, od $z=1,8\text{m}$ do $z=3,2\text{m}$

4.2. Wyniki badań ERT

Pomiary geofizyczne metodą tomografii elektrooporowej na terenie Bazyliki w Wiślicy przeprowadzono wzdłuż równoległych profili według schematu przedstawionego na Rys. 6. W sumie wykonano 42 profile, w 7 seriach pomiarowych, o łącznej długości 1666 metrów. W pierwszej serii wykonano pomiary wzdłuż trzech profili (1-3) o długości 29 m, po północnej stronie Bazyliki, wzdłuż korpusu nawowego. Odległość między profilami i kolejnymi elektrodami wynosiła 0,5m, w ten sposób całkowita powierzchnia pomiarowa wyniosła 29m x 1,5m. W drugiej serii, stanowiącej kontynuację wcześniejszej, wykonano również pomiary wzdłuż trzech profili (4-6) o długości 39 m, obejmujące swym zasięgiem również północną ścianę zakrystii. W tej serii powierzchnia pomiarowa wynosiła 39m x 1,5m. Następnie pomiary kontynuowano na trawniku, po północnej stronie Bazyliki, między dzwonnica a kapliczką. Na tym terenie pomiary przeprowadzono w dwóch seriach; trzeciej (7-16) oraz czwartej (17-20). Profile miały odpowiednio długości 50m oraz 26m. Kolejną piątą serią badań przeprowadzoną została po południowej stronie Bazyliki, po fundamencie Bazyliki z tzw. wieżą Muskaty. Poprowadzono tam równoległe profile (21-28) o długości 33 metrów. Seria szósta przeprowadzona na trawniku wzdłuż domu Długosza składała się z profili (29-35) o długości 52 metry każdy. Zbadano zatem podłoże na prostokątnym obszarze o wymiarach 52m x 3,5m. Ostatnią siódmą serię pomiarową wykonano na trawniku po profilach o długości 18m każdy (36-42), rozłożonych wzdłuż południowej ściany prezbiterium Bazyliki. Pomiary obejmowały obszar o wymiarach 18m x 3m. Schematy równoległych profili zaplanowano pod kątem interpretacji danych metodą inwersji 3D.

Przed rozpoczęciem badań właściwych wykonane zostały testy różnych układów pomiarowych i różnych ustawień akwizycyjnych na profilach o długości 15 metrów, w celu wybrania optymalnego rozwiązania do przeprowadzenia badań szczegółowych.

Badania przeprowadzono wykorzystując nowoczesną aparaturę pomiarową ARES I czeskiej firmy GF Instruments (www.gfinstruments.cz). W pierwszej kolejności metodą tomografii elektrooporowej ERT wykonano pomiary testujące dla różnych układów pomiarowych, tj. dipolowy, Wenera, Shlumbergera, celem wyboru optymalnego do przeprowadzenia dalszych badań szczegółowych. Na podstawie analizy wyników Rys. 29 dla zastosowanych układów pomiarowych, biorąc pod uwagę informacje geologiczne oraz charakterystykę układów pomiarowych, jak również czas badań i związane z tym zużycie

baterii - zdecydowano, że badania szczegółowe będą wykonywane układem Schlumbergera. Znaczenie miał też, korzystny stosunek S/N (sygnał użyteczny/szum) dla tego układu pomiarowego (Loke 2003).

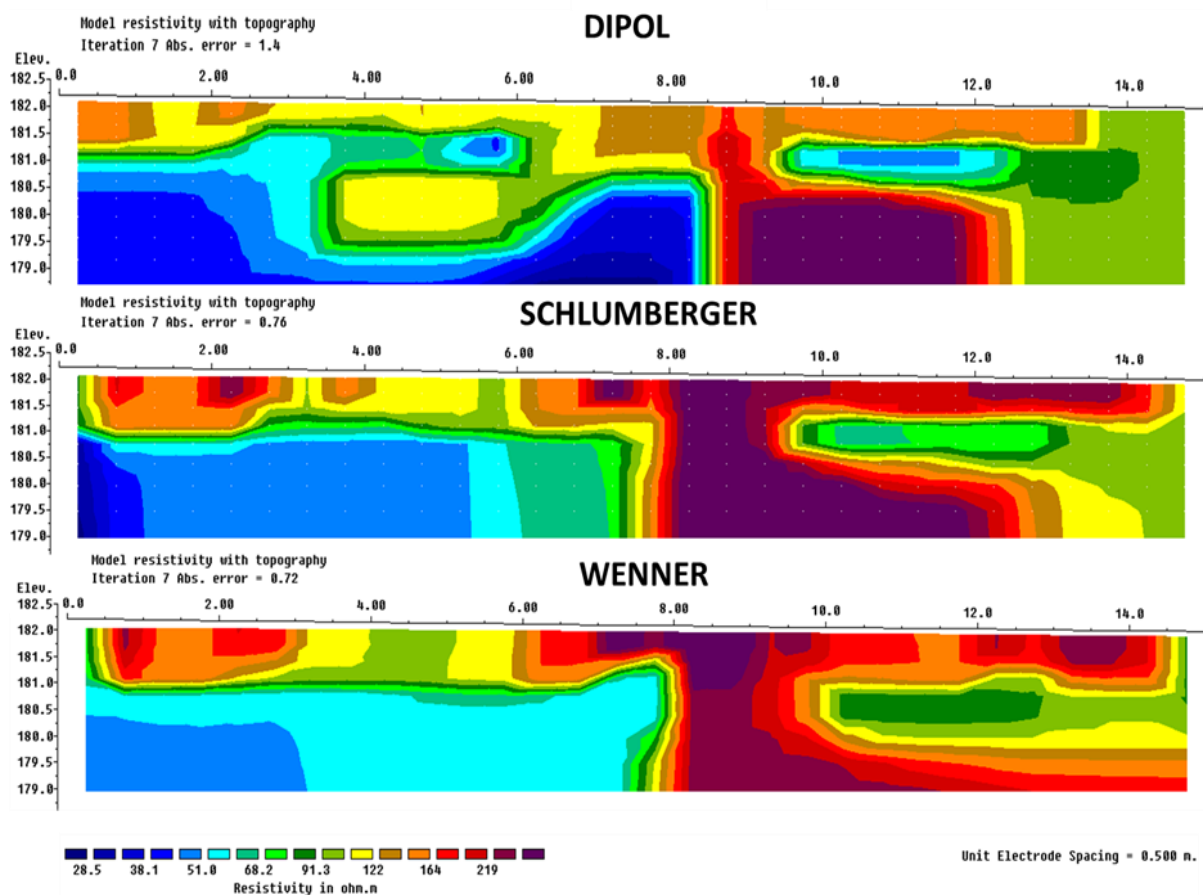


Fig. 29. Porównanie przekrojów ERT uzyskanych dla układu dipolowego, Schlumbergera i Wennera

W trakcie testów stosowano również różne parametry akwizycyjne na profilach. Oprogramowanie sterujące procesem pomiarowym ma możliwość na bieżąco analizować i przeprowadzać korektę pomiarów na podstawie uzyskanych błędów, uwzględniając wprowadzone dane. Pomiary wykonano przy optymalnej wartości potencjału równej 10 mV. Taką wartość poziomu potencjału założono ze względu na złożone warunki podłoża. Zwiększona wartość potencjału uzasadniona jest w przypadku wystąpienia trakcji elektrycznej oraz w przypadku większych głębokości badań. Założono czas trwania impulsu prądu równy 0,5s i ilość impulsów (stack) dla jednego mierzonego punktu potrzebną do obliczenia błędu pomiarowego (odchylenie standardowe) równą 4. Dopuszczalne odchylenie standardowe przyjęto na poziomie 2%. Oznaczało to, że jeżeli 4 cykle danych zebrane

w każdym punkcie spadły w granicach 2% względem siebie, gromadzenie danych zostało zakończone w tym punkcie. W trakcie pomiaru rejestrowane są natomiast automatycznie parametry takie jak: natężenie wejściowego prądu, napięcie, opór, odchylenie standardowe, zmierzona liczba punktów, EI-pot - spadek napięcia elektrod potencjalnych.

Ze względu na konieczność uwzględnienia topografii linii pomiarowych na etapie inwersji na wszystkich profilach wykonano prace niwelacyjne, które są niezbędne dla badań metodą ERT. Zróżnicowane ukształtowanie terenu może prowadzić do pojawiania się „fałszywych anomalii” w rozkładzie oporności pozornych. Uwzględnienie topografii pozwala ograniczyć możliwość błędnej interpretacji danych pomiarowych. Prowadzona niwelacja elektrod zakłada, że mamy do czynienia z morfologią terenu typu 2D.

Pliki wynikowe z aparatury Ares I były przetwarzane w celu nadania danym połowym formatu wymaganego przez wykorzystywany do inwersji program – Res2Dinv. Na etapie przetwarzania danych pomiarowych analizowane były różne procedury inwersyjne w celu wyboru optymalnej metodyki przetwarzania i interpretacji. Podczas inwersji zdecydowano się zatem stosować opcję robust wspomnianego programu. Celem uzyskania trójwymiarowego modelu podłoża przeprowadzono również inwersje 3D korzystając z programu Res3Dinv firmy Geotomo Software wykorzystującego nieliniowe techniki optymalizacji. Obraz rozkładu oporności otrzymany z inwersji 3D można było przedstawić w formie pionowych i horyzontalnych cięć (przekrojów) głębokościowych. Inwersja 3D oraz interpretacja i analiza z wykorzystaniem programu Voxler (GoldenSoftware) umożliwiła uzyskanie trójwymiarowego modelu podłoża.

Wyniki interpretacji geofizycznej danych ERT przedstawiono w formie dwuwymiarowych (x-z) przekrojów pionowych, obrazujących rozkład oporności wyinterpretowanej dla profili kolejnych serii pomiarowych (I-VII). Przedstawiono również analogiczne przekroje głębokościowe w płaszczyźnie horyzontalnej (x-y). Należy podkreślić, że mogą się one różnić od rzeczywistego rozkładu oporności w tym ośrodku (np. Mościcki 2012).

Trzy profile (1-3) składające się na sekcję pierwszą poprowadzone zostały wzdłuż północnej ściany nawy Bazyliki. Profile kończyły się przed ścianą boczną zakrystii. Na Fig. 29 przedstawione zostały przekroje dla wybranych profili 1 i 3 otrzymane z inwersji 2D danych pomiarowych, uzyskanych układem Schlumbergera. Warstwa przypowierzchniowa charakteryzuje się opornościami (oporność wyinterpretowana) powyżej 200 Ωm , które

w części wschodniej profilu zdecydowanie wzrastają do około 700 Ωm . Jest to związane ze zmianami w budowie nasypu antropogenicznego. Również miąższość nasypu jest zróżnicowana od około 1 metra, na 4-tym, 12-tym i 18.5 metrze profilu 1, do maksymalnej uzyskanej dla tych pomiarów głębokości, począwszy od 19-go metra profilu 1. Na przekroju 2 grubość nasypu od 19-go metra ulega wypłycaniu i wynosi około 5 metrów. W tym miejscu znajduje się zasypany wykop archeologiczny. Na 18,5m profilu można zauważyć niskooporową anomalię (8 Ωm), która może być spowodowana podciąganiem kapilarnym wody przez fundamenty filarów Bazyliki lub rozluźnieniami terenu. Anomalia może wskazywać na niewłaściwe działanie odwodnienia nasypu. Poniżej warstwy nasypu znajduje się kompleks, który na długości do 19 metrów profilu 1 zaburzony jest w sposób dość regularne. Prawdopodobnie miejsca zaburzeń odpowiadają fundamentom filarów korpusu nawowy. Anomalie te zanikają w miarę oddalania się od ścian Bazyliki (profil 3). Maksymalny błąd średniokwadratowy RMS w omawianych przypadkach wynosi około 4.3%.

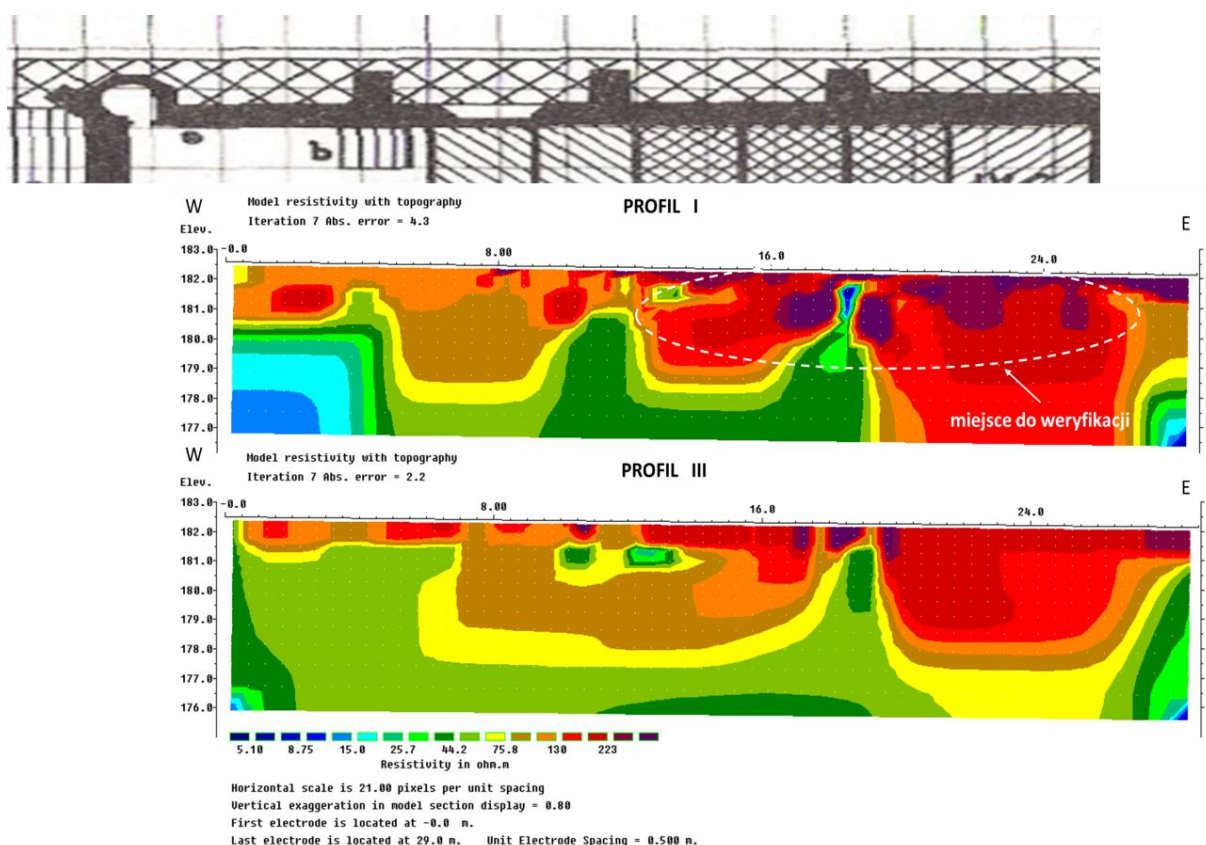


Fig. 29. Przekroje ERT dla sekcji I - profile 1 i 3

Interpretację danych przeprowadzono również metodą inwersji 3D. Wyniki pomiarów opornościowych po zastosowaniu inwersji 2D zostały zebrane w zestawie danych 3D oraz poddane przetwarzaniu inwersyjnemu 3D. W efekcie otrzymano cięcia głębokościowe przedstawiające rozkład oporności w płaszczyźnie pionowej, będące interpolacją wartości oporności między kolejnymi przekrojami (odpowiednie do prezentowanych przekrojów 2D) (Fig. 30A) i odpowiednie w płaszczyźnie poziomej (Fig. 30B). Maksymalny błąd średniokwadratowy RMS w omawianych przypadkach dla sekcji I wynosi około 4.19% dla 7 iteracji i jest porównywalny z błędem uzyskanym w wyniku przetwarzania inwersyjnego 2D. Na cięciach głębokościowych w płaszczyźnie pionowej można prześledzić kolejne zmiany w rozkładzie oporności (w budowie podłoża) w miarę oddalania się od ściany północnej Bazyliki. Cięcia poziome przedstawiają mapy powierzchniowe interpolowane z kolejnych przedziałów głębokości od 0.0-0.25m; 0.25-0.54m; 0.54-0.87m; 0.87-1.25m; 1.25-1.69m; 1.69-2.19m; 2.19-2.77mm; 2.77-3.43m; 3.43-4.20m; 4.20-5.08m; 5.08-6.09m. Należy również pamiętać, że wartości oporności na początku i końcu profili dla tego typu wizualizacji są interpolowane przez program i mogą nie odzwierciedlać rzeczywistych warunków podłoża.

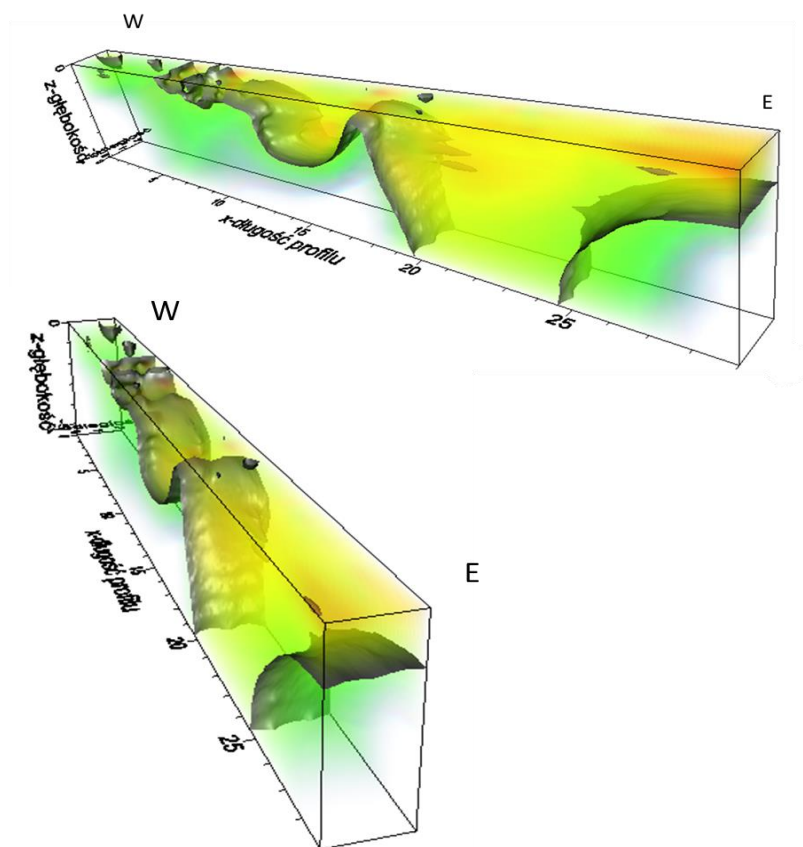


Fig. 31. 3D-wymiarowy obraz podłoża przy północnej ścianie nawy Bazyliki w Wiślicy

Pomiary wykonane w schemacie profili równoległych posłużyły do stworzenia modelu 3D, który uwzględnia zróżnicowanie parametrów również w trzecim kierunku prostopadłym do profilu. Na Fig. 31 przedstawiono trójwymiarowy model ośrodka z wyszczególnionym przebiegiem izopowierzchni o oporności 100 Ω m.

Przekroje uzyskane z pomiarów przeprowadzonych w sekcji II (profile 4-6) swoimi wymiarami obejmują większy zakres (Fig. 32), dzięki temu na głębokości 5 metrów można zauważyć niskooporowe podłoże o wartościach oporności z przedziału 5-20 Ω m. Tak niskie wartości oporności odpowiadają prawdopodobnie warstwie gliny przemieszanej z okruchami skalnymi. Nad gliną między fundamentami filarów, podobnie jak na wcześniejszych profilach zaznacza się wysokooporowy kompleks. Na profilach 4-6 wartości oporności są jednak wyższe niż na poprzednich i wynoszą około 400 Ω m. Strop anomalii widoczny wyraźnie na przekrojach sekcji II znajduje się na głębokości około 2m p.p.t. i odpowiada poziomowi stropu krypty. Natomiast jej spąg widoczny na około 4,5m p.p.t. i pokrywa się z poziomem posadzki rzymskiej (4,2m głębokości).

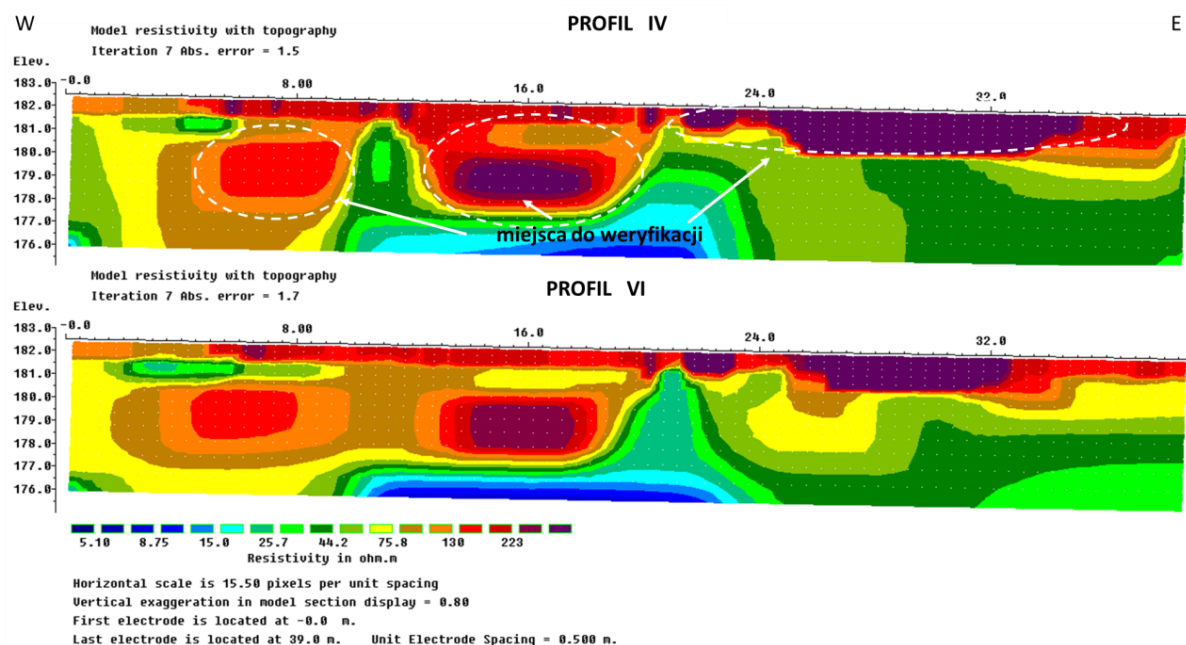


Fig. 32. Przekroje ERT dla sekcji II - profile 4 i 6

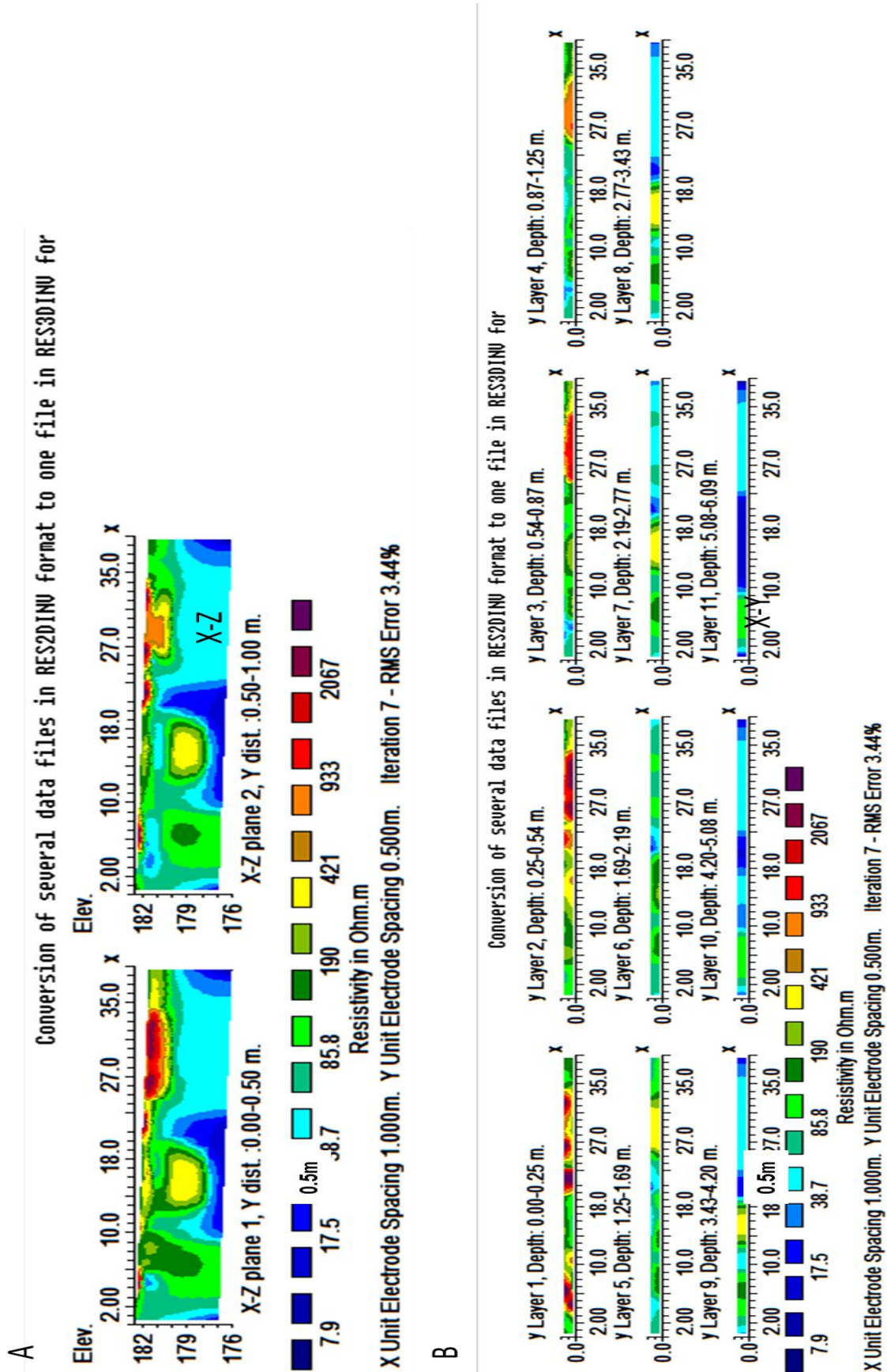


Fig. 33. Przekroje ERT w formie cięć głębokościowych: A) pionowych i B) poziomych otrzymane z inwersji 3D dla podłoża przy północnej ścianie nawy i zakrystii Bazyliki w Wiślicy

Anomalia ma regularny kształt dobrze zaznaczony również na cięciach głębokościowych w płaszczyźnie pionowej x-z (Fig. 33A) oraz na 3D-wymiarowym obrazie podłoża (Fig. 34). Od 20 metra długości na profilach sekcji II w warstwie przypowierzchniowej widoczna jest również kolejna wysokooporowa anomalia. Ma nieckowaty kształt i rozciąga się wzdłuż północnej ściany zakrystii Bazyliki. Spąg anomalii jest płaski i sięga do około 2.5 metra p.p.t. Wysokie wartości oporności anomalii przekraczające 1000 Ωm świadczą o bardzo silnym rozluźnieniu ośrodka z występowaniem nawet pustych przestrzeni, mającym związek z działalnością antropogeniczną. Poniżej występuje kompleks nienaruszonych utworów o opornościach rzędu 30-80 Ωm . Maksymalny błąd średniokwadratowy RMS uzyskany w inwersji 2D w omawianych przekrojach wyniósł około 2,7%, natomiast dla przekrojów uzyskanych z inwersji 3D wyniósł 3,44%. Tak małe wartości błędów świadczą o poprawności i dokładności wykonanych badań.

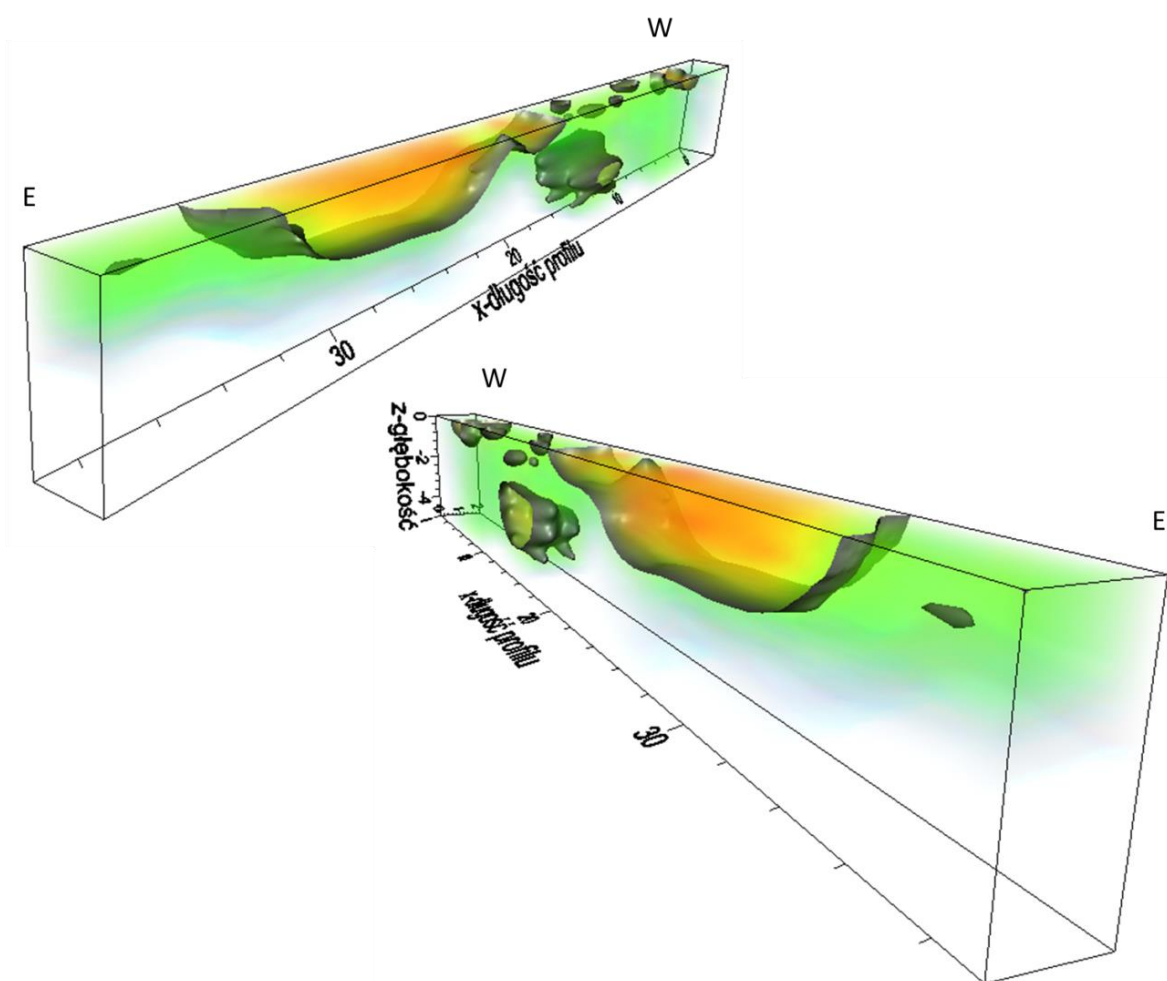


Fig. 34. 3D-wymiarowy obraz podłoża przy północnej ścianie nawy i zakrystii bazyliki w Wiślicy.

Sekcja trzecia obejmuje 10 profili o numerach od 1 -16. Profile poprowadzone zostały po trawniku między dzwonnica a kapliczką. Na Fig. 35 można zobaczyć rozkład oporności dla wybranych typowych przekrojów tej sekcji (profile 7, 12 i 16). Na wszystkich profilach zaznacza się wyraźna granica opornościowa między nadkładem a podłożem. Miąższość nadkładu jest jednakowa na całej długości wszystkich profili i wynosi około 1m. W części zachodniej terenu wartości oporności na przekrojach są większe i zawierają się w przedziale od 300 Ωm do miejscami nawet 700 Ωm . Tak wysokie wartości oporności są wynikiem znacznego rozluźnienia gruntu w tej części terenu. Natomiast w części wschodniej terenu wartości oporności w warstwie przypowierzchniowej są niższe, mieszczą się w przedziale 130-230 Ωm , co wskazuje na grunt bardziej zwięzły. W podłożu widoczne jest duże zróżnicowanie rozkładu oporności wyinterpretowanej w obrębie omawianych profili. Strefy anomalne względnie wysokooporowe (70-130 Ωm) widoczne są na przekrojach między 5 a 34 metrem. Strop ich znajduje się na głębokości około 2m p.p.t., a spąg sięga do 5,5 metra. Anomalie te prawdopodobnie są kontynuacją anomalii przedstawionych na przekrojach w sekcji II. Porównując wyniki ERT z przekrojem geologicznym (Fig. 7) można dojść do wniosku, że spągowa część (od 5m w dół) anomalii stanowi przedłużenie soczewki piasku, potwierdzonej przez otwory wykonane w podłożu Bazyliki.

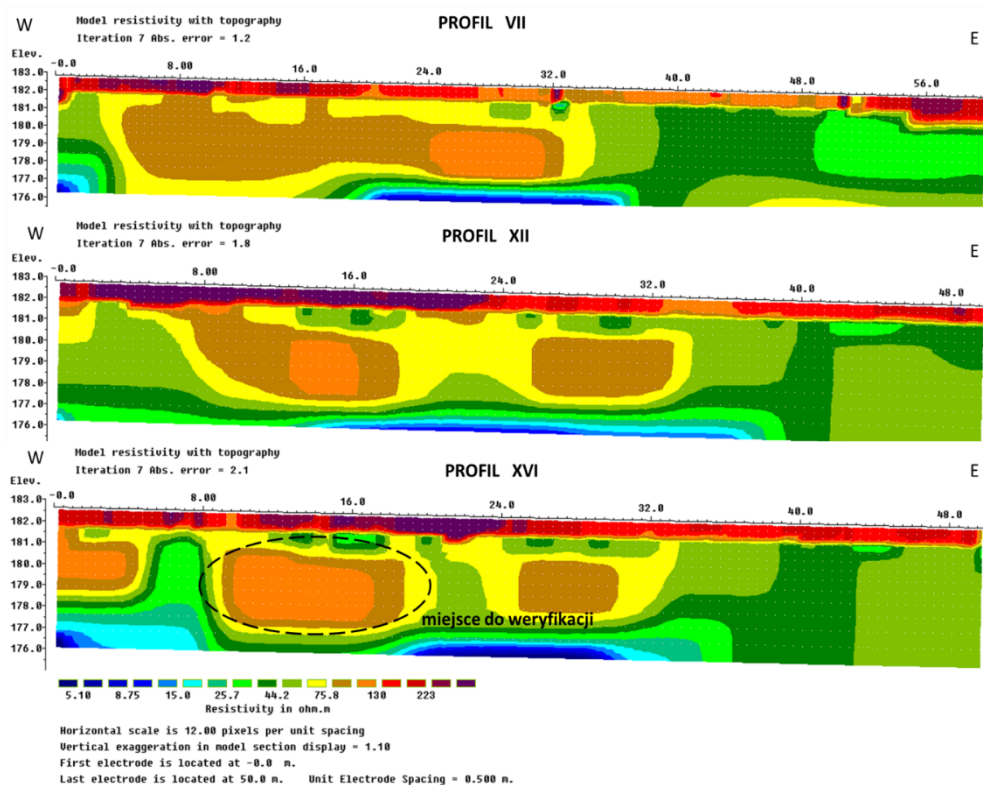


Fig. 35. Przekroje ERT dla sekcji III – przykładowe profile 7, 12 i 16

Poniżej w spągu występują utwory niskooporowe o wartościach oporności wyinterpretowanej z zakresu 5-20 Ωm , które zgodnie z profilem geologicznym powiązać można z gliną. Maksymalny błąd średniokwadratowy RMS uzyskany w inwersji 2D wyniósł 3.2%, natomiast po inwersji 3D uzyskano przekroje o wartości błędu absolutnego Abs (minimalizacja bezwzględnej różnicy między zmierzonymi i obliczonymi wartościami oporności pozornej) poniżej wartości 2%. Na obrazie 3D (Fig. 36) oraz na cięciach głębokościowych (Fig. 37) można zaobserwować, jak zmienia się rozkład oporności wraz z oddalaniem się od ściany północnej Bazyliki oraz wraz ze wzrostem głębokości.

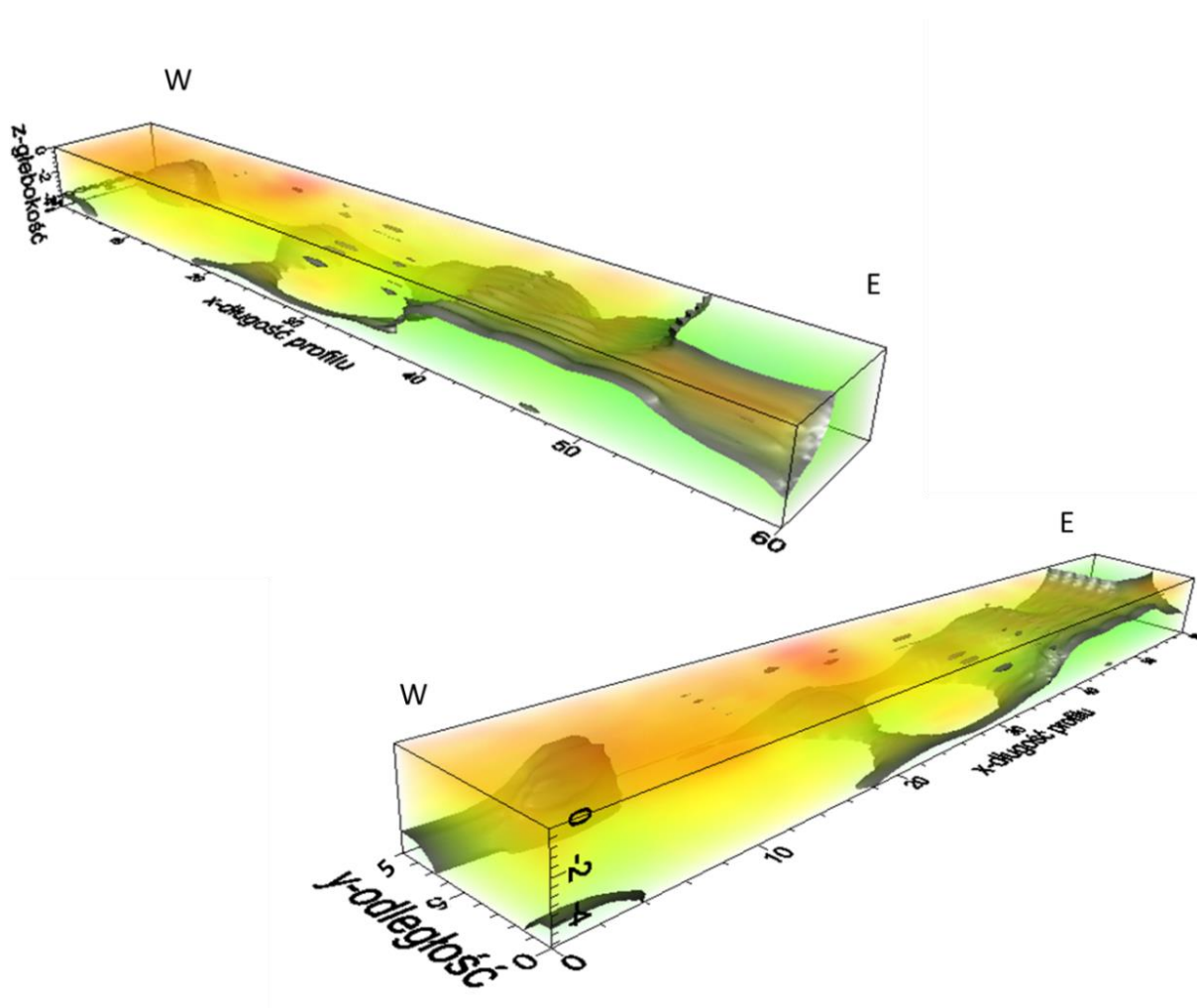


Fig. 36. 3D-wymiarowy obraz podłoża po północnej stronie bazyliki między dzwonnica a kapliczką.

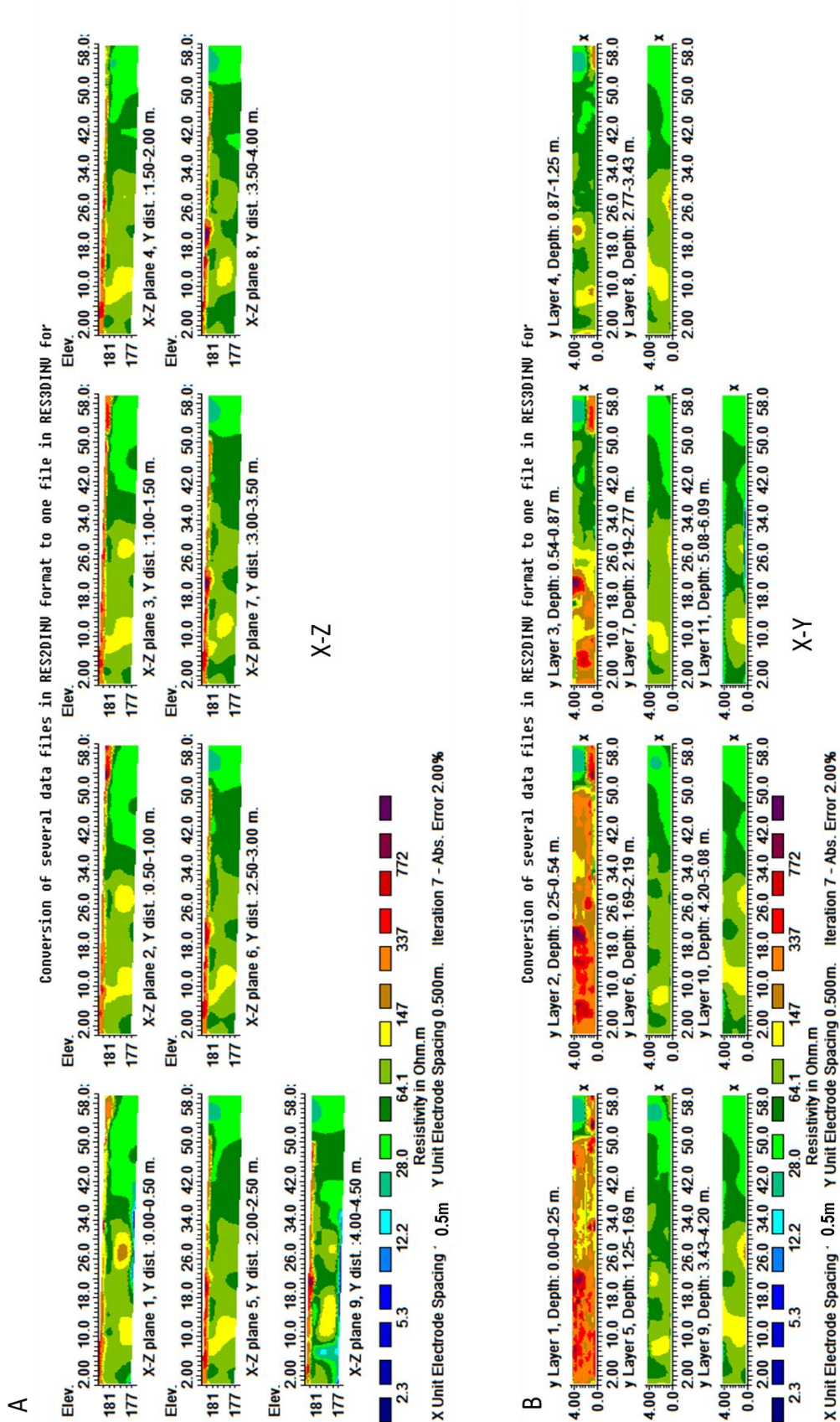


Fig. 37. Przekroje ERT w formie cięć głębokościowych: A) pionowych i B) poziomych otrzymane z inwersji 3D dla podłoża po północnej stronie bazyliki między dzwonnicką a kapliczką

Profile w sekcji IV stanowiły kontynuację wcześniejszych, ze względu jednak na zagospodarowanie obszaru zaczynały się od 24 metra długości profili z sekcji III. Na Rys. 38 przedstawiono dwa przekroje 17 i 20. Podobnie jak poprzednio bardzo wyraźnie zaznacza się warstwa przypowierzchniowa o wartościach oporności między 130-230 Ωm , a w miejscach rozluźnienia gruntu (np. na profilu 20 między 4-7m, 11,5-15 oraz 16-22 metrem) wartości oporności w tej warstwie wzrastają do 500 Ωm . Poniżej na całym przekroju wyraźnie widać dosyć jednorodną pod względem rozkładu oporności warstwę, o wartościach z przedziału 30-75 Ωm . Wartości oporności wskazują na glinę z dodatkiem piasków. Na kolejnych wizualizacjach Fig. 39 i Rys. 40 można prześledzić rozkład oporności w podłożu na płaszczyźnie pionowej oraz poziomej, jako cięcia głębokościowe horyzontalne uzyskany w wyniku przetwarzania inwersyjnego 3D oraz przestrzenny obraz rozkład oporności.

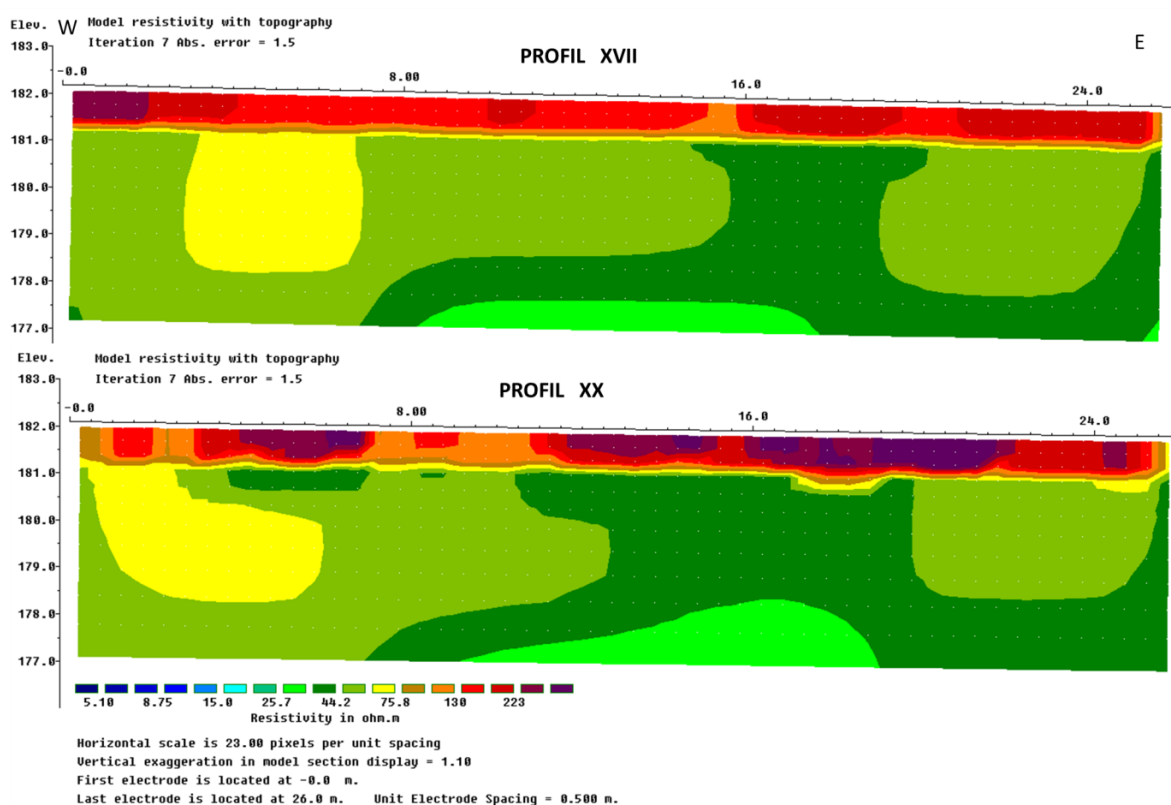
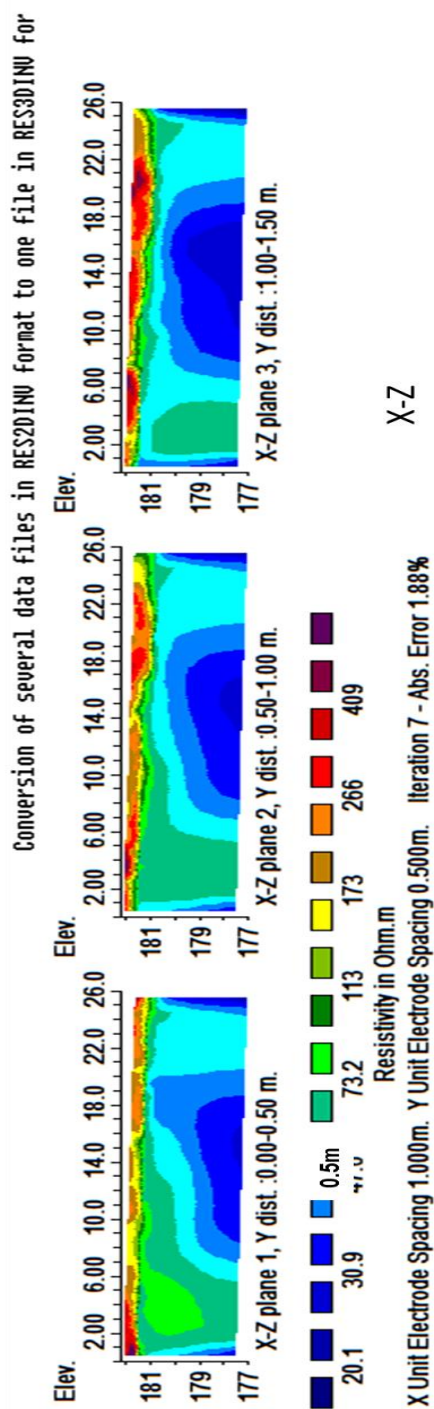


Fig. 38. Przekroje ERT dla sekcji IV – przykładowe profile 17 i 20

A



B

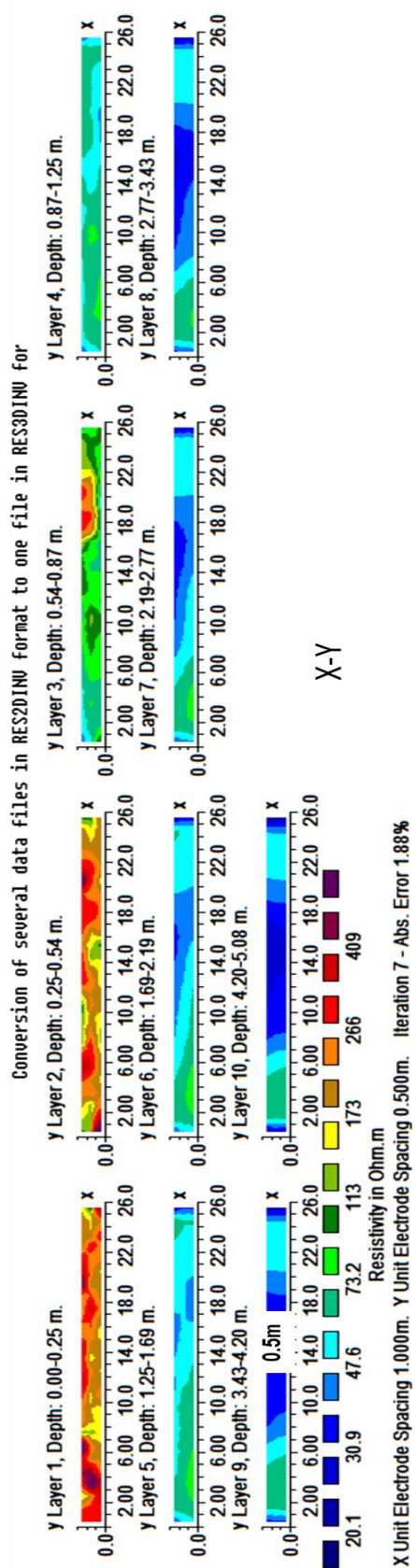


Fig.. 40. Przekroje ERT w formie cięć głębokościowych: A) pionowych i B) poziomych otrzymane z inwersji 3D dla podłoża po północnej stronie Bazyliki między dzwonnica a kapliczką.

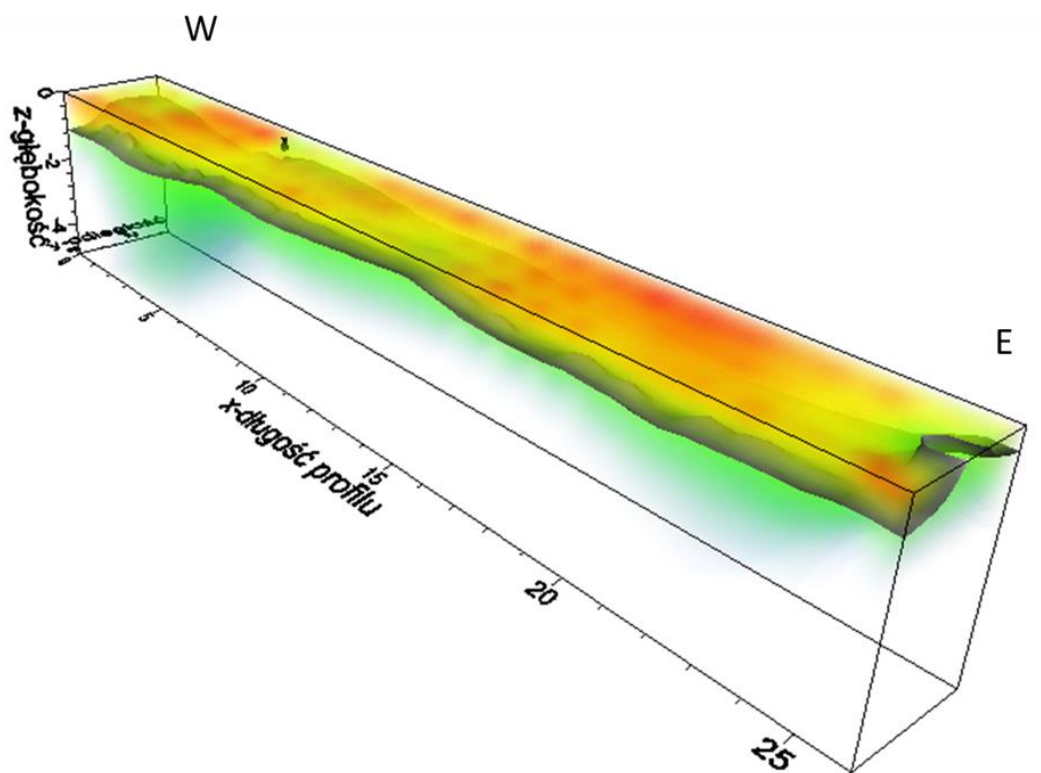


Fig. 39. 3D-wymiarowy obraz podłoża po północnej stronie Bazyliki w Wiślicy

W sekcji V celem pomiarów geofizycznych było sprawdzenie hipotezy o istnieniu podziemnego przejścia pomiędzy Bazyliką a domem Długosza. Wskazują na to przekazy ustne i charakterystyczna zabudowa ściany w podziemiach kościoła (Fig. 5).

Tunel miałby wychodzić z poziomu krypty pod Bazyliką, której podłoga znajduje się na głębokości ok. 4,2m względem powierzchni terenu, na której prowadzony był pomiar. W związku z tym jej strop powinien znajdować się na głębokości ok. 1,8m. Na Fig. 40 przedstawione zostały wybrane przekroje z sekcji V otrzymane z inwersji 2D danych pomiarowych uzyskanych układem Schlumbergera. Na podstawie ich analizy można wyróżnić przypowierzchniową warstwę wysokooporową (ok. 200 Ωm) o miąższości około 1m. Warstwa ta jest zróżnicowana opornościowo i obrazuje położenie współczesnego nasypu wokół Bazyliki wraz z miejscami jego rozluźnień. Poniżej znajduje się kompleks niskooporowy charakteryzujący się stosunkowo dużą zmiennością oporności (30-80 Ωm) świadczącą o znacznym zróżnicowaniu warstwy. W kilku miejscach pod nasypem zauważyć można małych rozmiarów anomalie o wartościach oporności wyinterpretowanej około 45 Ωm .

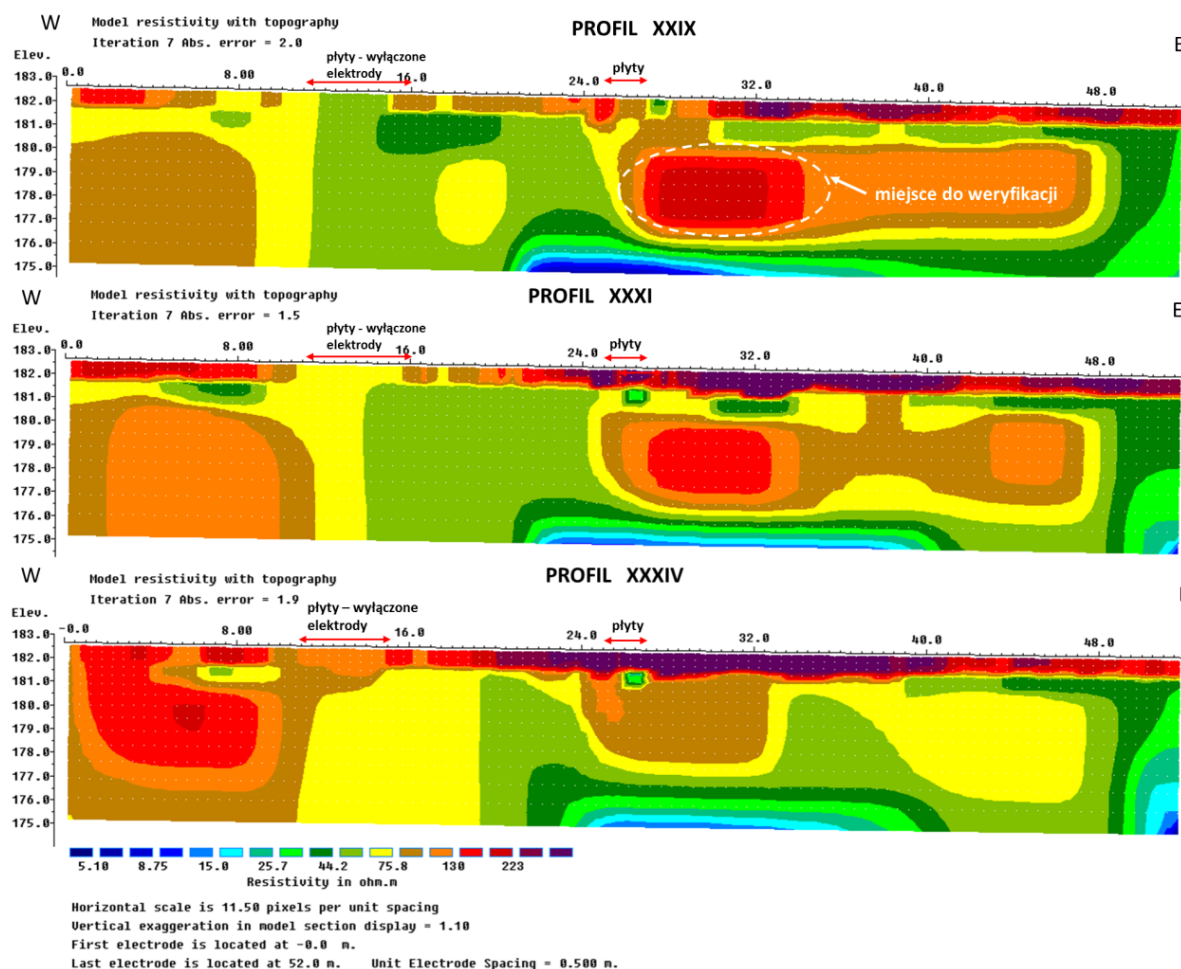
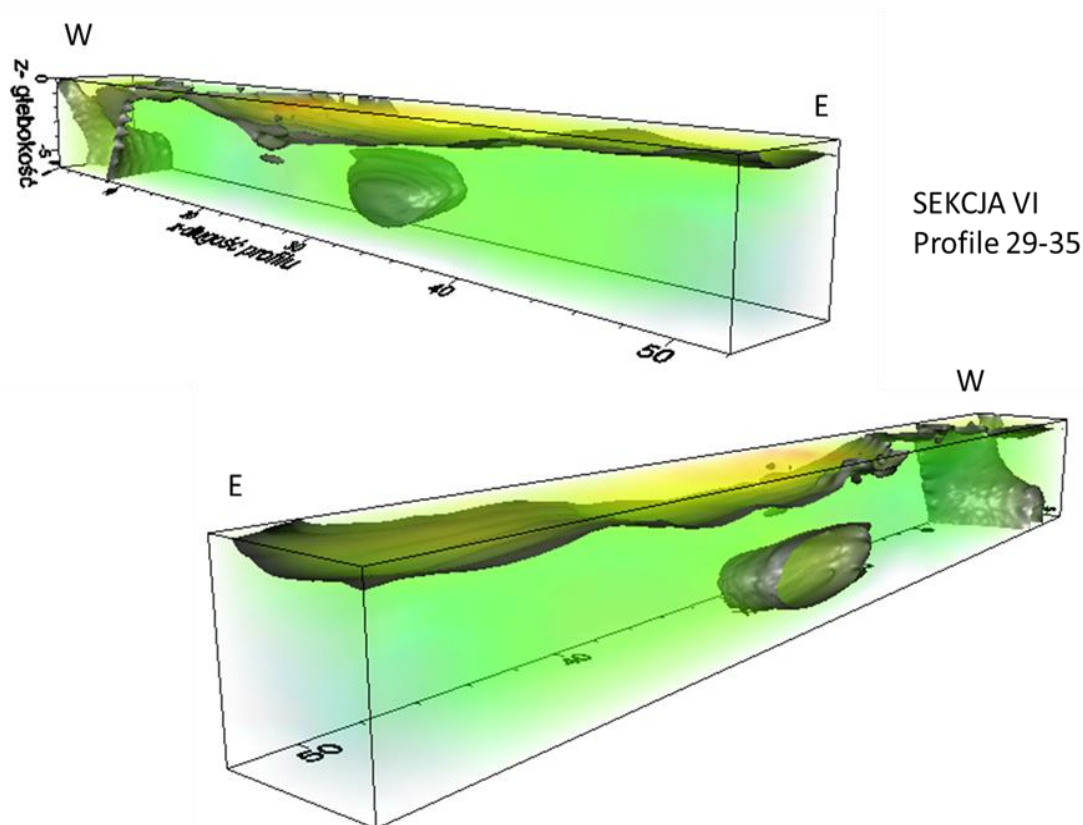


Fig. 40. Przekroje ERT dla profili 29, 31 i 34

Bardzo charakterystyczna jest anomalia powtarzająca się regularnie na wszystkich przekrojach, zarejestrowana między 25 a 26 metrem profilu. Prawdopodobnie jest to oddziaływanie znajdujących się w tym miejscu na powierzchni płyt. W strefie pod nasypem można zauważyć także dwie anomalie na głębokości około 2,5 metra. Anomalia wysokooporowa ($>200 \Omega\text{m}$) w środkowej części przekroju ma prostokątny kształt i wymiary 2,5m x 7m. Ze względu na jej charakterystyczny kształt i miejsce występowania można by ją wiązać z hipotezą o istniejącym przejściu podziemnym między Bazyliką a domem Długosza. Spąg anomalii koreluje ze stropem piasku drobnego wg. przekroju geologicznego (Fig. 7). Anomalia ta w miarę przybliżania się do domu Długosza zanika, natomiast bardziej wtedy uwypukla się anomalia na początku profilu. Widoczne to jest szczególnie na Fig. 41 przedstawiającym trójwymiarowy rozkład oporności w badanym podłożu przy domu Długosza. Pod wysokooporową anomalią występują utwory niskooporowe o wartościach oporności poniżej $20 \Omega\text{m}$. Obszar niskich oporności koreluje się z warstwą glin wykrytą za

pomocą otworów. Maksymalny błąd średniokwadratowy RMS w omawianych przypadkach wynosi około 2%. Interpretację danych przeprowadzono również tak jak i dla wszystkich wcześniejszych danych metodą inwersji 3D. Uzyskane obrazy rozkładu oporności wyinterpretowanej przedstawione zostały na płaszczyźnie pionowej i poziomej w postaci cięć głębokościowych. Maksymalny błąd średniokwadratowy RMS w omawianych przypadkach wynosi około 2,22% dla 7 iteracji i jest porównywalny z błędem uzyskanym w wyniku przetwarzania inwersyjnego 2D. Na cięciach głębokościowych w płaszczyźnie pionowej można prześledzić kolejne zmiany w rozkładzie oporności przekładające się na budowę podłoża w miarę oddalania się od domu Długosza. Cięcia poziome (Fig. 42) przedstawiają mapy powierzchniowe interpolowane z kolejnych przedziałów głębokości od 0-0.5; 0.5-1.08m; 1.08-1.74m; 1.74-2.5m; 2.5-3.37m; 3.37-4.38m; 4.38-5.53m; 5.53-6.86m. Na Fig. 41 przedstawiono trójwymiarowy model ośrodka. Wyraźnie widać układ warstwy przypowierzchniowej o nieregularnym przebiegu na początku w części zachodniej profilu. Tam też jak i na środku modelu widoczne są opisywane anomalie, które nie pozwalają na odrzucenie hipotezy o istniejącym przejściu podziemnym.



Rys. 41. 3D-wymiarowy obraz podłoża przy domu Długosza

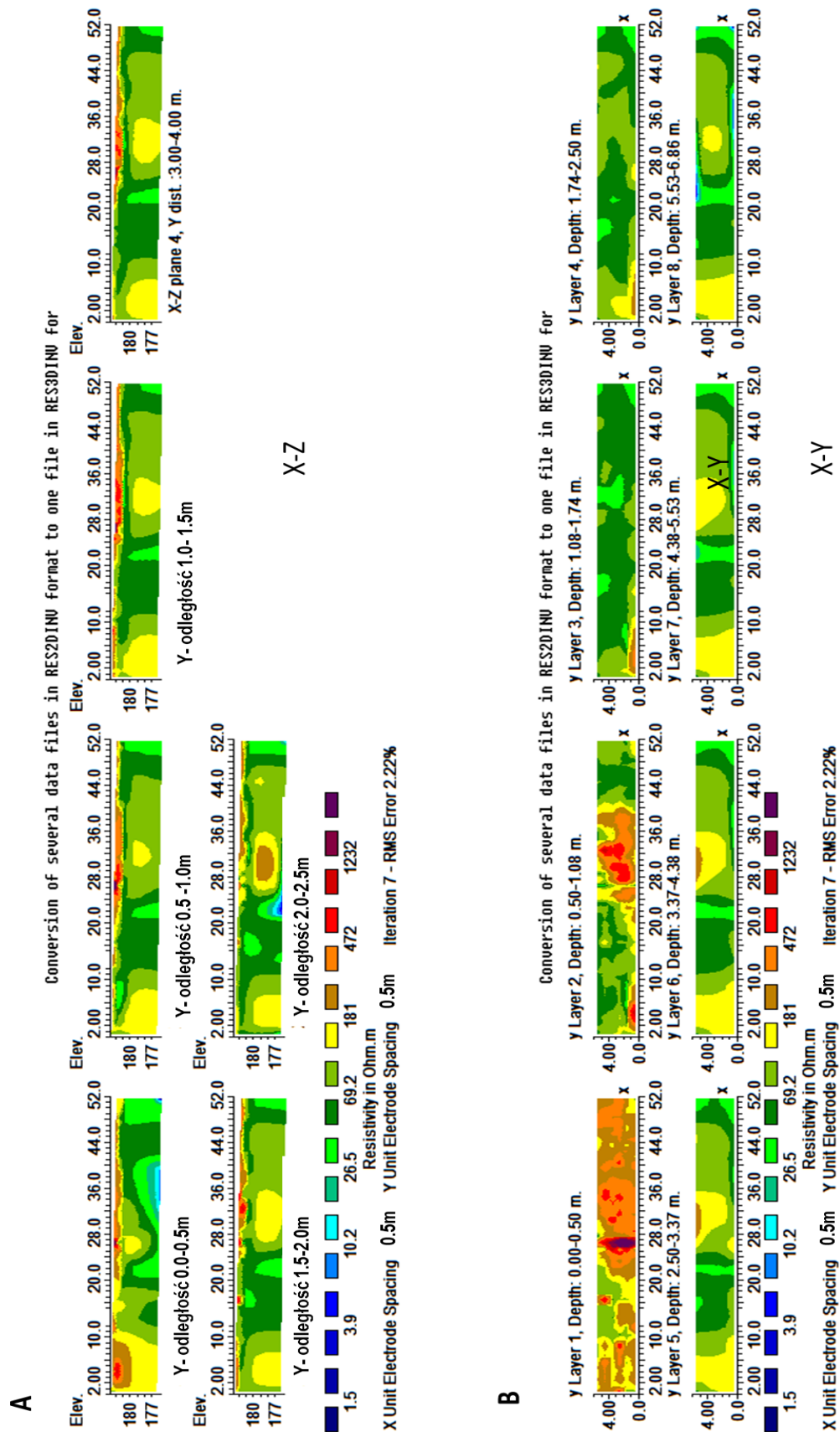


Fig. 42. Przekroje ERT w formie cięć głębokościowych pionowych i poziomych otrzymane z inwersji 3D

Profile (21-28) stanowiły sekcję VI i ulokowane były wzdłuż południowej ściany Bazyliki z początkiem przy jej bocznym wejściu. Tak jak na poprzednich przekrojach warstwę przypowierzchniową stanowi nasyp o miąższości około 1-1,5m (Fig. 43). Miejscami jest rozluźniony, na co wskazują wartości oporności dochodzące do 300 Ω m. Poniżej występuje kompleks charakteryzujący się dużą zmiennością oporności (40-300 Ω m). Przekrój oporności jest zdominowany przez anomalię wysokooporową znajdującą się np. między 8 a 17 metrem profilu 28. W miarę przybliżania się do ściany Bazyliki jej długość wzrasta do 25 metra (profil 24). Strop anomalii znajduje się na głębokości 2m i jest płaski, co świadczy o ingerencji antropogenicznej. Spąg podobnie jak w przypadku anomalii przy domu Długosza występuje około 5m p.p.t. Prawdopodobnie anomalia przy domu Długosza jest kontynuacją tej anomalii. W miarę przybliżania się do południowej ściany Bazyliki uwidoczniają się niejednorodności wewnątrz anomalii, co można zauważyć w rozkładzie oporności (Fig. 43 i Fig. 44).

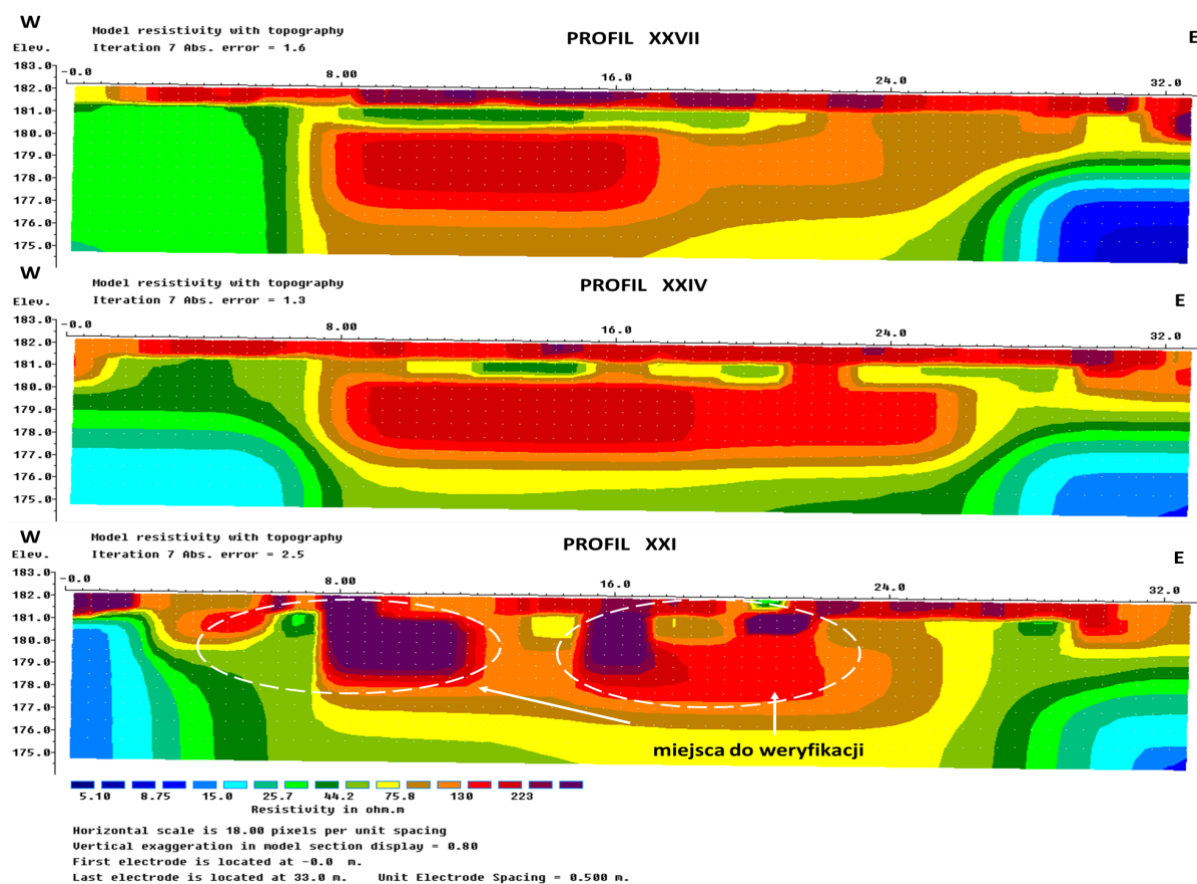
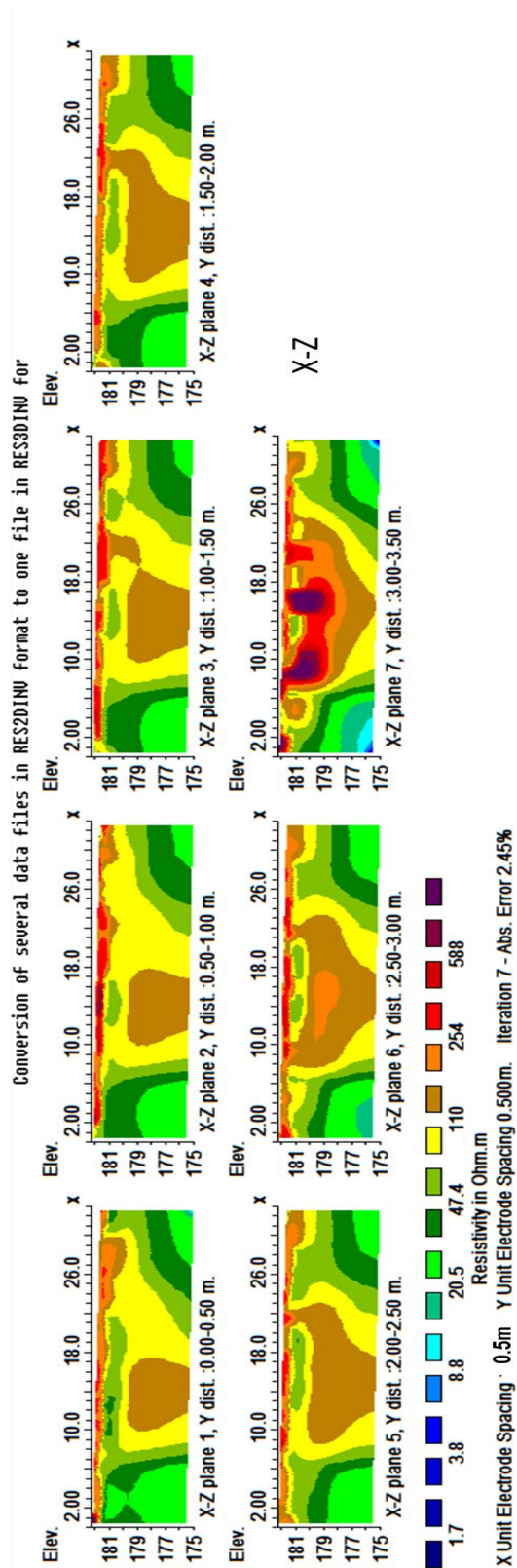


Fig. 43. Przekroje ERT dla profili 21, 24 i 27

A



B

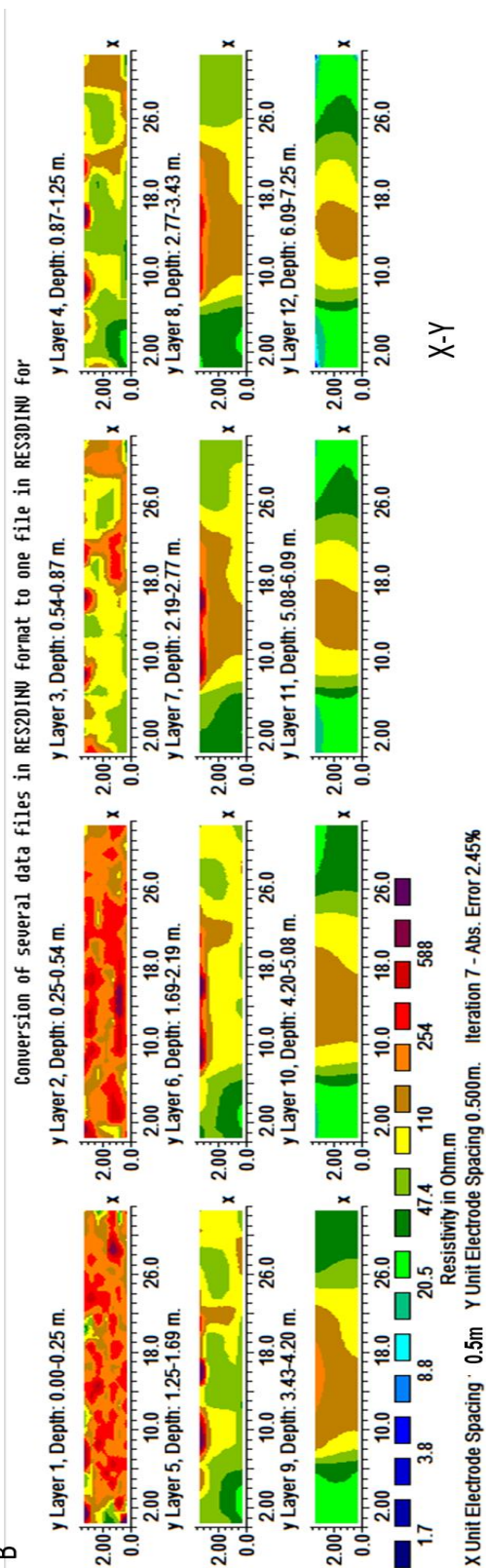


Fig. 44. Przekroje ERT w formie cięć głębokościowych pionowych i poziomych otrzymane z inwersji 3D dla pomiarów przy południowej ścianie Bazyliki

Na profilu 21 najbliższym południowej ściany Bazyliki, w obrębie opisywanej anomalii wydzielić można trzy oddzielne anomalie o opornościach powyżej 250 Ωm , znajdujące się w miarę regularnych odstępach. Prawdopodobnie w ten sposób zaznaczyły się fundamenty Bazyliki, być może z tzw. wieżą Muskaty. Fig. 45 przedstawia trójwymiarowy model podłoża dla rozkładu izopowierzchni o oporności 100 Ωm . Kolorem czerwonym zaznaczają się strefy anomalne o podwyższonej oporności.

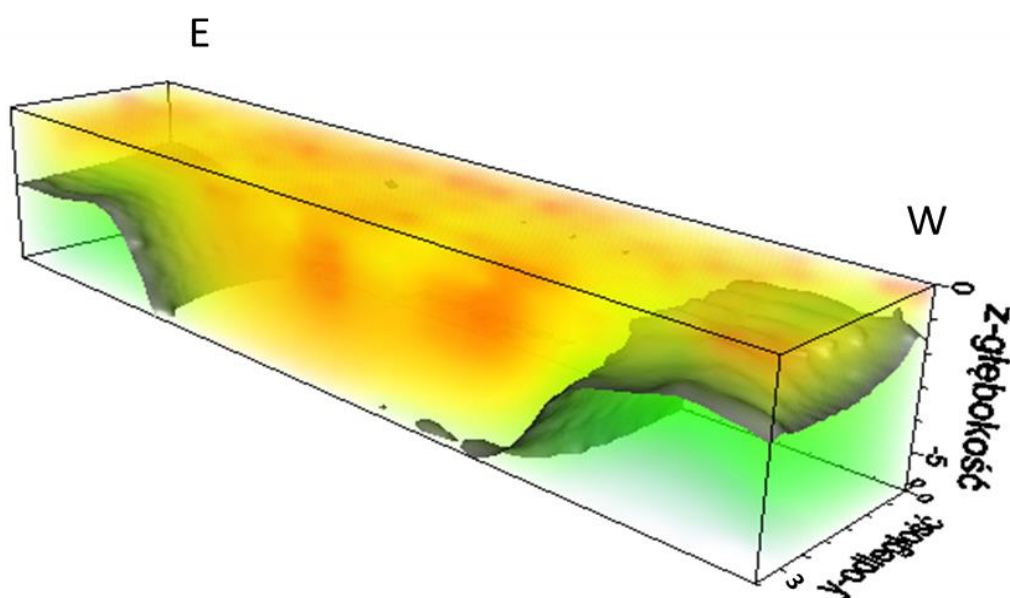


Fig. 45. 3D-wymiarowy obraz podłoża przy południowej ścianie Bazyliki

Sekcja VII z profilami 36-42 była już ostatnią i obejmowała teren przy południowej ścianie prezbiterium Bazyliki. Choć miejsce to nie zostało jeszcze przebadane archeologicznie na przekrojach (Fig. 46 i Fig. 47) widoczna jest ingerencja antropogeniczna w podłoże, o czym świadczy duże zróżnicowanie rozkładu oporności wyinterpretowanej w obrębie omawianych profili. W związku z tym nie jest widoczna na przekrojach wyraźna granica opornościowa pomiędzy podłożem i nadkładem. Strefa anomalna miejscami bardzo wysokooporowa jest dominująca i zaznacza się na powierzchni do 16 metra profili (Fig. 46 i Fig. 47). Rozciąga się wzdłuż ścian Bazyliki do 16 metra profili (Rys. 46) pasem o szerokości 3,5 metra, co widoczne jest na cięciach głębokościowych horyzontalnych (Fig. 46 i Fig. 47). Na profilu 27 najdalej odsuniętym od prezbiterium wartości oporności dochodzą do 500 Ωm , natomiast w miarę przybliżania się do ściany prezbiterium bazyliki oporność rośnie do bardzo

wysokich wartości nawet ponad 6000 Ωm . Widoczne to jest szczególnie w przedziale długości między 3-7 m, 10-13m przekroju 42. Tak duże wartości świadczą o występowaniu w miejscach anomalii pustych przestrzeni, które mogą mieć związek z miejscami pochówków. Na profilu 42 zaznaczyły się równie miejsca występowania filarów. Spąg anomalii znajduje się na głębokości prawie 4,5 metrów, jest płaski i odpowiada poziomowi posadzki rzymskiej. Poniżej, jak również od 13 metra profili na głębokości prawie 2m p.p.t. znajduje się nienaruszony kompleks o wartościach oporności 50-200 Ωm , odpowiadający glinie.

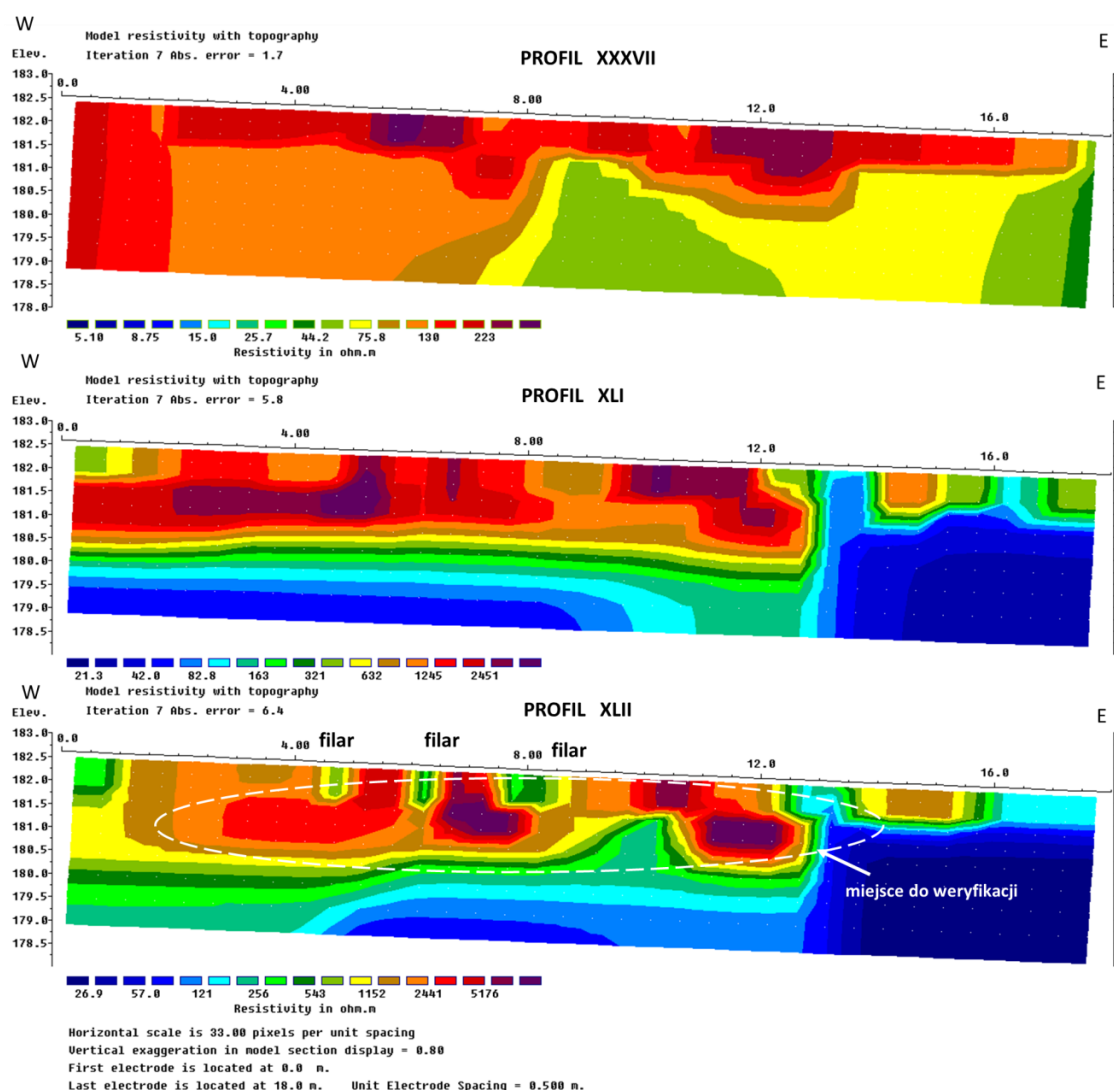


Fig. 46. Przekroje ERT dla profili 21, 24 i 27

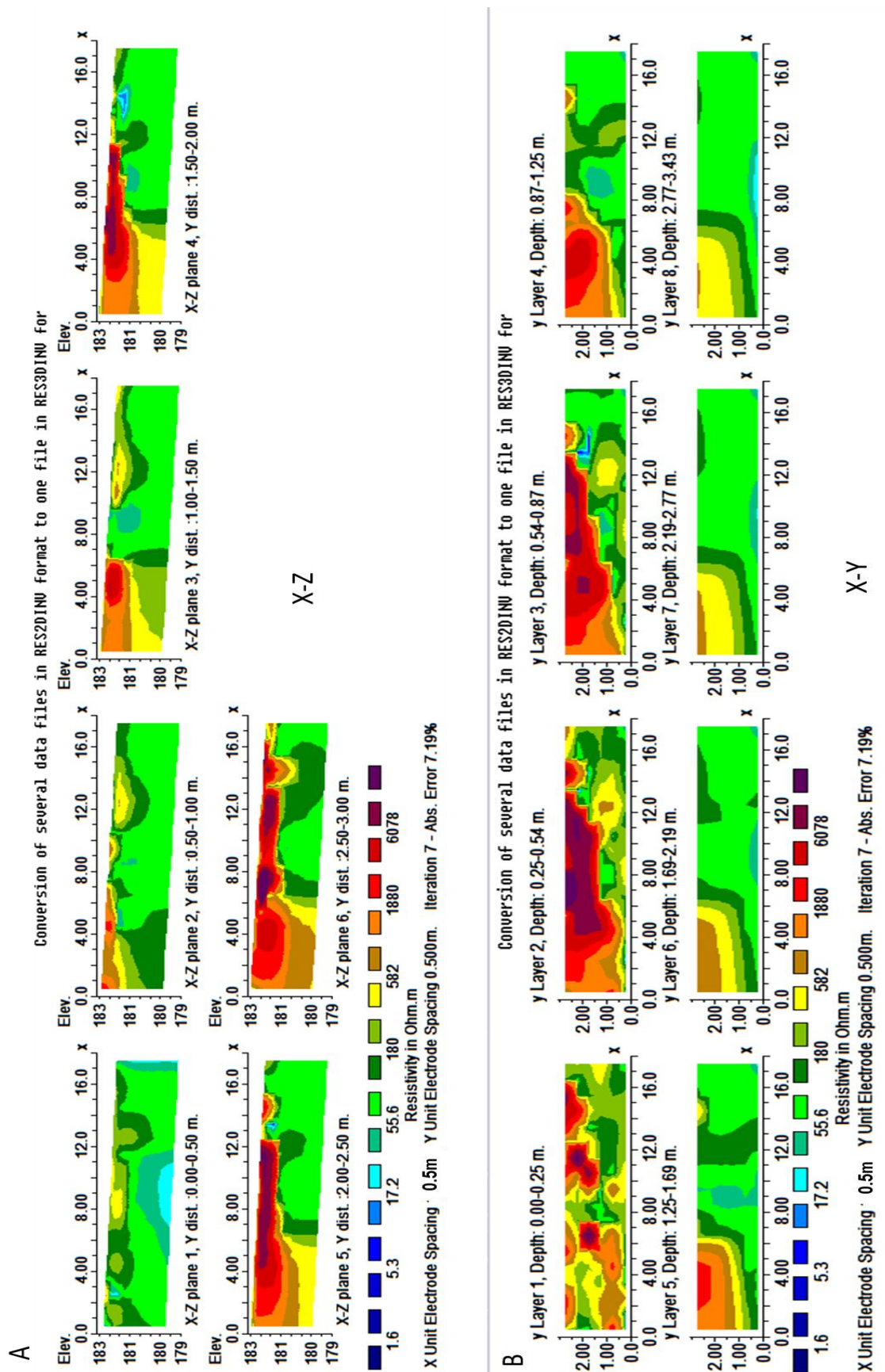


Fig. 47. Przekroje ERT w formie cięć głębokościowych pionowych i poziomych otrzymane z inwersji 3D dla pomiarów przy południowej ścianie prezbiterium Bazyliki

Na Fig. 47 bardzo wyraźnie widać układ anomalii wysokooporowej na kolejnych cięciach płaszczyznowych poziomych w przedziałach 0.0-0.25m; 0.25-0.54m; 0.54-0.87m; 0.87-1.25m; 1.25-1.69m; 1.69-2.19m; 2.19-2.77m; 2.77-3.43m. Zasięg głębokościowy uwarunkowany był długością profilu ($1/5$ długości profilu). Maksymalny błąd średniokwadratowy RMS uzyskany w inwersji 2D wyniósł 6,8%, natomiast w inwersji 3D uzyskano przekroje z dokładnością błędu absolutnego Abs równą 7,19%. Na Fig. 48 przedstawiono przestrzenny rozkład anomalii wysokooporowej okonturowującej prawdopodobne miejsca pochówków.

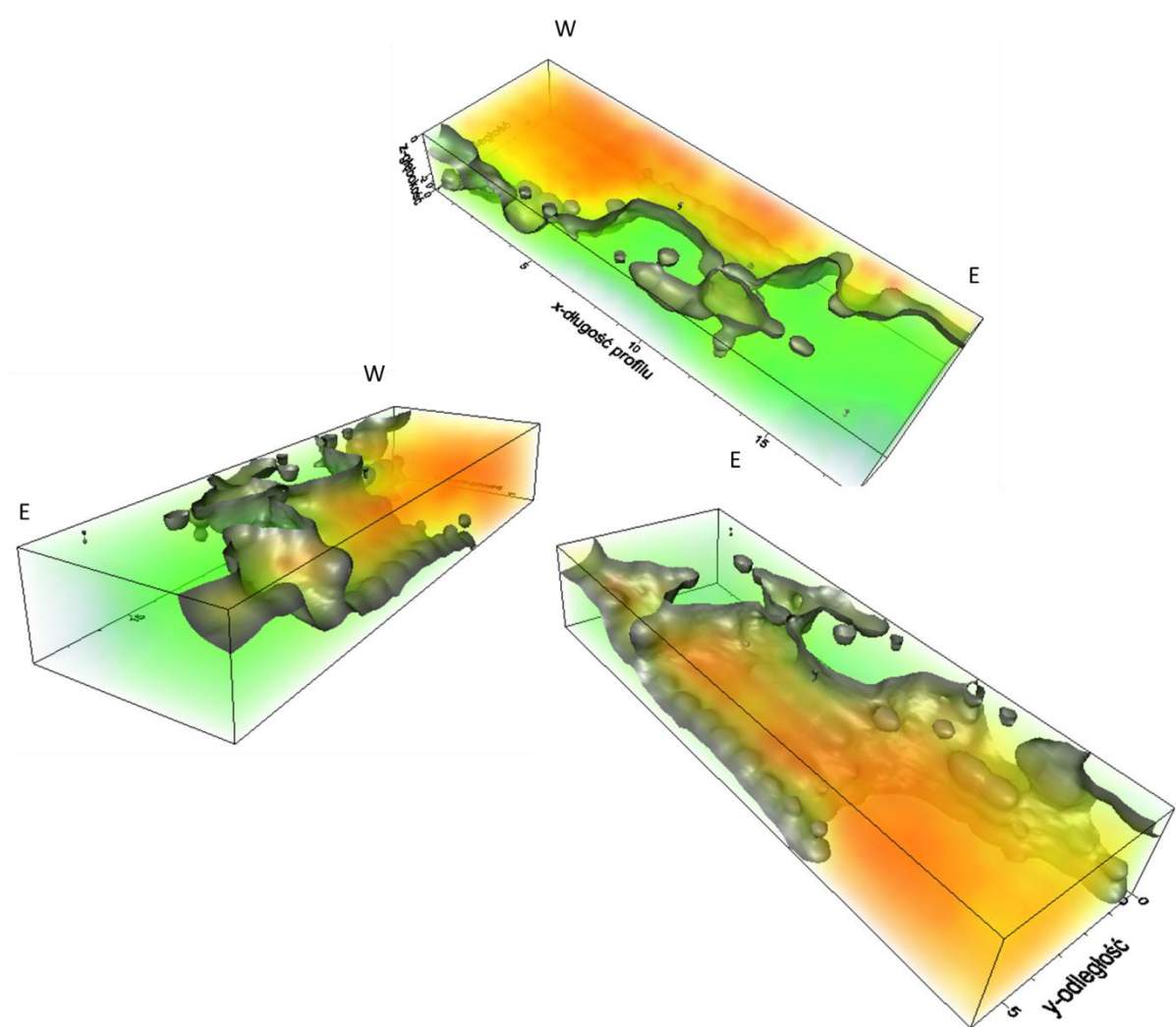


Fig. 48. 3D-wymiarowy obraz podłoża przy południowej ścianie prezbiterium Bazyliki

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań metodą tomografii elektrooporowej i georadarową oraz ich korelacji z danymi geologicznymi na przedmiotowym terenie zlokalizowano fundamenty budowli historycznych w Wiślicy.

Metoda georadarowa pozwoliła wyznaczyć dwie główne anomalie w północne części Bazyliki (Rejon A), z których jedna ma charakter przypominających fundament, natomiast druga jest charakterystyczna dla warstw ziemi naruszonych działalnością antropogeniczną; w rejonie tym zarejestrowano również dużo drobnych anomalii pochodzących prawdopodobnie od miejsc pochówków szkieletowych. Po zachodniej stronie Bazyliki (Rejon B) uwidoczniły się anomalie, które mogą być kontynuacją odsłoniętych w latach 1958-1960 fragmentów fundamentów; w rejonie tym wyznaczono jeszcze jedną anomalię przypowierzchniową. Po południowej stronie Bazyliki (Rejon C) zaznacza się bardzo duża ilość drobnych, losowo rozłożonych anomalii (miejsca pochówków szkieletowych?) oraz anomalie przy ścianie Bazyliki. W rejonie C występują również strefy anomalne, które mogą wskazywać na istnienie przejścia pomiędzy Bazyliką a domem Długosza. W rejonie D, po wschodniej stronie Bazyliki widoczne są miejsca wkopów pod instalacje elektryczne i kanalizacyjne, lecz pojawia się tutaj również liniowa anomalia przy ścianie Bazyliki nie związana z instalacjami.

Miejsce północnego fundamentu korpusu nawowego Bazyliki zaznaczone jest na przekrojach przedstawionych i sekcji I i sekcji II, w szczególności wyraźnie zaznacza się na obrazie 3D. Południowy fundament korpusu nawowego prawdopodobnie z tzw. wieżą Muskaty oraz południowy fundament prezbiterium zlokalizowano na przekrojach sekcji V i VI - profile 21 i 42. Zweryfikowano również hipotezę o istnieniu podziemnego tunelu pomiędzy podziemiami Bazyliki i domem Długosza. Przekroje 29 i 39 sekcji V przedstawiają anomalię, która może wskazywać na miejsce wspomnianego tunelu. Jej przestrzenny rozkład dobrze widoczny jest na obrazie 3D. Prawdopodobne jest też, że anomalia zlokalizowana przy domu Długosza jest kontynuacją anomalii zaznaczającej się na przekroju 24 sekcji VI, umiejscowionym wzdłuż południowej ściany nawy Bazyliki. Po północnej stronie Bazyliki na przekrojach 4, 5, 6 sekcji II również zaznacza się anomalia, która może wskazywać na miejsce zasypanego tunelu - na obrazie 3D widoczny jest jej kształt. Miejsca pochówków zostały zlokalizowane na podstawie przekrojów 37-42 ostatniej sekcji VII.

LITERATURA

- Annan A.P., 1999. *Practical Processing of GPR Data*. Sensor and Software Inc., Canada.
- Burger H. T., Sheehan A. F., Jones C. H., 2006. *Introduction to Applied Geophysics: Exploring the Shallow Subsurface*. London.
- Dahlin T., 1996. *2D resistivity surveying for environmental and engineering applications*. First Break, Vol. 14, No. 7, 275–283.
- Domogalla W., Mościcki W., 2006. *Zastosowanie geofizycznych badań elektrooporowych w rozpoznaniu morfologii antropogenicznej na przykładzie zamku Błogostawionej Salomei w Grodzisku pod Skatą (Małopolska)*. Geologia, T. 32, z.4, 405–418.
- Gołębiowski T., 2012. *Zastosowanie metody georadarowej do detekcji i monitoringu obiektów o stochastycznym rozkładzie w ośrodku geologicznym*. Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Gołębiowski T., Pasierb B., Porzucek S., Łój M., 2018. *Complex prospection of medieval underground salt chambers in the village of Wiślica, Poland*. Archaeological Prospection, 1–12.
- Karczewski J., 2007. *Zarys metody georadarowej*. Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Loke M.H., 2003. *Rapid 2D Resistivity & IP Inversion using the least-squares method*. Geotomo Software.
- Loke M.H., 2010. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Geotomo Software.
- Łyskowski M., Pasierb B., Wardas-Lasoń M., Wojas A., 2017. *Historical anthropogenic layers identification by geophysical and geochemical methods in the Old Town area of Krakow (Poland)*. Catena, 163, 196–203.
- MALA 2003. *Basic and Advanced Radar Theory*. MALA GeoScience AB, Mala, Sweden.
- Misiewicz K., 1998. *Metody geofizyczne w planowaniu badań wykopaliskowych.*, P.P.H. GROSS, Warszawa.
- Mościcki W.J., 2012. *Wykorzystanie geoelektrycznych metod geofizycznych do rozpoznawania nawarstwień antropogenicznych - możliwości i ograniczenia*. Nawarstwienia Historyczne Miast, Wyd. AGH, Kraków, s. 223-234.
- Rudzki M., 2002. *Zastosowanie metody tomografii elektrooporowej do wykrywania podziemnych obiektów antropogenicznych*. Publish. Inst. Geophys. Pol. Accad. Sc. M. 25 (313).
- Tomaszewski A., 1963. *Kolegiata wiślicka. Wyniki badań w latach 1958-1960*. w: Rozprawy Zespołu do Badań nad Polskim Średniowieczem Uniwersytetu Warszawskiego i Politechniki Warszawskiej, „Odkrycia w Wiślicy”, Warszawa 1963, s.69.
- Yilmaz O., 1994. *Seismic Data Processing*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA.