



Państwowy Instytut Geologiczny  
Państwowy Instytut Badawczy

państwowa służba geologiczna  
państwowa służba hydrogeologiczna



# MONITORING GEODYNAMICZNY W ZAKRESIE INTERFEROMETRII SATELITARNEJ PASA WYSADÓW SOLNYCH W POLSCE ORAZ PRÓBA OKREŚLENIA RUCHLIWOŚCI SOLI W CZWARTORZĘDZIE Z WYKORZYSTANIEM TOMOGRAFII ELEKTROOPOROWEJ I TECHNIK MODELOWANIA 3D

w ramach Umowy nr 913/2014/Wn-07/FG-GO-DN/D z dnia 23.12.2014r.

## RAPORT KOŃCOWY

### Nadzorujący:

Minister Klimatu  
ul. Wawelska 52/54, 00-922 Warszawa

### Finansujący:

Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska  
i Gospodarki Wodnej  
02-673 Warszawa, ul. Konstruktorska 3A



Sfinansowano ze środków  
Narodowego Funduszu  
Ochrony Środowiska  
i Gospodarki Wodnej

### Wykonawca:

Państwowy Instytut Geologiczny –  
Państwowy Instytut Badawczy  
00-975 Warszawa, ul. Rakowiecka 4



### Kierownik tematu:

dr Zbigniew Perski  
Imię i nazwisko

.....  
Podpis

### Kierownik komórki organizacyjnej:

.....  
Pieczęć i podpis

### Dyrektor/Dyrektor pionu:

.....  
Pieczęć i podpis

Warszawa, grudzień 2019 r.



Szczegóły dokumentu:

	Raport końcowy
Autorzy	Zbigniew Perski Marek Brzeziński Maria Przyłucka Grzegorz Pacanowski Miroslaw Musiatewicz Łukasz Nowacki Marek Graniczny Zbigniew Kowalski Jacek Chełmiński Paweł Czarniak Urszula Stępień Grzegorz Czapowski
Uwagi	

## Spis treści

1	Spis efektów rzeczowych zadania.....	7
2	Wstęp.....	10
3	Cele, założenia i schemat realizacji projektu .....	11
4	Wysady i struktury solne na terenie Polski oraz ich mobilność.....	16
5	Wybrane struktury solne do analizy ruchliwości soli w czwartorzędzie .....	20
5.1	Wapno.....	22
5.2	Łanięta .....	24
5.3	Struktura Izbica Kujawska - Łęczycza .....	27
5.4	Wysad Damasławek .....	29
6	Monitoring geodynamiczny - metody pomiaru deformacji .....	34
6.1	Niwelacja precyzyjna .....	34
6.2	Pomiary GNSS .....	34
6.3	Satelitarna Interferometria Radarowa InSAR.....	35
6.4	CRInSAR - Satelitarna Interferometria z wykorzystaniem reflektorów radarowych	38
7	Interferometryczna analiza archiwalnych zobrażeń radarowych pasa wysadów solnych Niżu Polskiego .....	42
7.1	Dane archiwalne ERS-1, ERS-2 i Envisat.....	42
7.1.1	Dane Sentinel-1 .....	45
7.2	Środowisko obliczeniowe InTOP .....	45
7.3	Obliczenia interferometryczne i wyniki .....	46
7.3.1	Opracowanie danych ERS-1/2 i Envisat .....	46
7.3.2	Wyniki opracowania danych ERS-1/2 i Envisat .....	47
7.3.3	Wyniki opracowania danych Envisat.....	56
7.3.4	Opracowanie danych Sentinel-1.....	57
7.3.5	Wyniki opracowania danych Sentinel-1.....	57
7.4	Interpretacja wyników .....	58
7.4.1	Analiza danych Sentinel-1 dla poligonów badawczych.....	60
8	Monitoring interferometryczny wysadu Wapno i jego otoczenia.....	62
8.1	Przygotowanie terenu poligonu badawczego do prowadzenia monitoringu geodynamicznego w zakresie interferometrii satelitarnej i GNSS.....	62
8.1.1	Infrastruktura pomiarowa .....	65
8.2	Dane satelitarne użyte w analizach CRInSAR poligonu Wapno .....	67
8.3	Przetwarzanie danych i analiza.....	69
8.3.1	Serie czasowe InSAR i ich interpretacja .....	72
8.3.2	Integracja danych pomiarowych i ocena dokładności.....	77
8.4	Konserwacja infrastruktury pomiarowej i jej dalsze losy .....	80

8.5	Podsumowanie opracowania monitoringu geodynamicznego.....	80
9	Rozpoznanie wstępne budowy geologicznej czwartorzędu i neogenu wybranych wysadów solnych .....	81
9.1	Obszar Izbica Kujawska .....	81
9.2	Obszar Łanięta .....	88
9.3	Obszar Wapno .....	92
9.4	Obszar Łęczyca.....	95
10	Prace, roboty i badania geologiczne.....	98
10.1	Pomiary geofizyczne i ich opracowanie .....	98
10.2	Opracowanie wyników pomiarów grawimetrycznych .....	110
10.2.1	Interpretacja jakościowa.....	113
10.2.2	Interpretacja ilościowa .....	116
10.2.3	Wyniki .....	117
10.3	Roboty geologiczne .....	123
10.3.1	Wykonane prace geologiczne.....	126
10.3.2	Badania laboratoryjne .....	131
10.3.3	Wnioski .....	137
11	Analiza struktur czwartorzędowych i ich korelacja ze współczesną aktywnością wysadów.....	139
11.1	Obszar Wapna – szczególny poligon badań i obserwacji skutków ruchliwości wysadu .....	141
11.2	Analiza struktur geologicznych (wyniki badań geofizycznych ERT i SGE oraz analiz grawimetrycznych) .....	144
11.2.1	Obszar Izbica Kujawska .....	144
11.2.2	Obszar Łanięta.....	147
11.2.3	Obszar Wapno .....	149
11.2.4	Obszar Łęczyca (z okolicami Ozorkowa) .....	150
12	Analiza struktur czwartorzędowych dla określenia struktur tektonicznych (ciągłych i nieciągłych) związanych z oddziaływaniem wysadu.....	151
12.1	Izbica Kujawska .....	152
12.2	Łanięta .....	153
12.3	Wapno.....	154
12.4	Pozostałe obszary badań i analiz .....	155
12.5	Analiza struktur tektonicznych na obszarach badawczych .....	156
12.5.1	Wysad Łanięta.....	156
12.5.2	Wysad Wapno .....	158
12.5.3	Struktura solna Izbica – Kłodawa – Ozorków (ze struktura solną Izbicy Kujawskiej) .....	159
12.6	Wnioski.....	160

13	Opracowanie i udostępnienie wyników .....	161
13.1	Mapy odkryte wysadów.....	161
13.2	Kompleksowe modele strukturalne osadów czwartorzędowych.....	162
13.3	Publikacje i wystąpienia naukowe.....	163
14	Podsumowanie i wnioski.....	165
15	Literatura .....	168

## 1 Spis efektów rzeczowych zadania

W wyniku realizacji zadania otrzymano następujące efekty rzeczowe, złożone razem z raportem końcowym:

1. Projekt robót geologicznych szt 1 - Płyta CD „PROJEKT ROBÓT GEOLOGICZNYCH”. Kopia projektu znajduje się w NAG po nrCBDG 1106849, Inw. 2022/2017
2. Dokumentacja geologiczna inna szt 1 (wydruk i zapis elektroniczny) - Płyta CD „DOKUMENTACJA GEOLOGICZNA”
3. Sprawozdanie z wykonanych prac geologicznych - raport końcowy: 1 szt (wydruk i zapis elektroniczny) - jest to niniejszy raport oraz płyta CD „Raport końcowy”
4. Mapy geologiczne nieseryjne: 4 szt. (mapy odkryte wybranych struktur z naniesionymi granicami intersekcyjnymi wysadów solnych w postaci wydruku i w formie elektronicznej, jako baza danych w systemie GIS) - Płyta CD „ZADANIE 11.1”
5. Zbiór archiwalnych materiałów geologicznych, geodezyjno-kartograficznych, sejsmologicznych i strukturalnych: 1 komplet - Płyta CD „ZADANIE 4.3”
6. Zbiór notatek z konsultacji merytorycznych realizowanych w poszczególnych zadaniach: 1 komplet - Płyta CD „ZADANIE 7”
7. Kompleksowy model strukturalny utworów czwartorzędowych nad wybranymi wysadami solnymi i w ich bezpośrednim otoczeniu - wersja elektroniczna: 4 szt - Płyta CD „ZADANIE 11.2”

Ponadto otrzymano serie efektów pośrednich, zgodnie z Opiszem Przedmiotu Przedsięwzięcia. Zrealizowane dla każdego podzadania efekty rzeczowe (ich nazwę i ilość) przedstawiono w poniższej tabeli.

Efekty uzyskane dla każdego z podzadań, zgodnie z Opiszem Przedmiotu Przedsięwzięcia:

Nr w HRF	tytuł zadania	podzadanie	tytuł podzadania	miara	ilość	sposób dołączenia do raportu
4	Rozpoznanie Nizu Polskiego na potrzeby monitoringu geodynamicznego oraz badania ruchliwości soli w czwartorzędzie	4.1	Wstępna analiza struktur solnych pod kątem ich mobilności neotektonicznej	raport	1	Płyta CD „ZADANIE 4”
		4.2	Waloryzacja form solnych wg kryteriów geologiczno- morfologiczno- złożowych oraz spełnienie warunków koniecznych do uzyskania danych interferometrycznych	raport	1	Płyta CD „ZADANIE 4”
		4.3	Zebranie materiałów geologicznych, geodezyjno - kartograficznych, sejsmologicznych i strukturalnych	kpl	1	Płyta CD „ZADANIE 4.3”
		4.4	Analiza archiwalnych zobrażeń radarowych pasa wysadów solnych Nizu Polskiego	raport	1	Płyta CD „ZADANIE 4”
		4.5	Wyznaczenie struktur solnych dla badań szczegółowych, zdefiniowanie obszaru poligonu badawczego, opracowanie projektu robót geologicznych	raport	1	Płyta CD „ZADANIE 4”

5	Przygotowanie terenu poligonu badawczego do prowadzenia monitoringu geodynamicznego w zakresie interferometrii satelitarnej i GNSS	5.1	Wyznaczenie lokalizacji i przygotowanie poligonu badawczego	m kw	200	Opis w raporcie końcowym oraz w sprawozdaniu końcowym
		5.2	Konserwacja i demontaż infrastruktury pomiarowej	szt.	10	Opis w raporcie końcowym oraz w sprawozdaniu końcowym
6	Przygotowanie terenu poligonu badawczego do prowadzenia monitoringu geodynamicznego w zakresie interferometrii satelitarnej i GNSS	6.1	Stabilizacja oraz wyznaczenie współrzędnych geodezyjnych punktów monitoringowych	pkt	10	Opis w raporcie końcowym oraz w sprawozdaniu końcowym
		6.2	Wykonanie i stabilizacja reflektorów na potrzeby pomiarów interferometrycznych	szt.	7	Opis w raporcie końcowym oraz w sprawozdaniu końcowym
		6.3	Wykonanie niwelacji precyzyjnej punktów monitoringowych	szt.	10	Płyta CD „ZADANIE 6.3”
7	Realizacja pomiarów w ramach monitoringu geodynamicznego pasa wysadów solnych	7.1	Realizacja pomiarów interferometrycznych	seria	80	Opis w raporcie końcowym oraz w sprawozdaniu końcowym
		7.2	Realizacja weryfikacyjnych pomiarów GNSS	sesja	4	Opis w raporcie końcowym oraz w sprawozdaniu końcowym
		7.3	Konsultacje merytoryczne i tematyczne	notatka	7	Płyta CD „ZADANIE 7”
		7.4	Analiza i opracowanie pomiarów interferometrycznych	raport	1	Płyta CD „ZADANIE 7”
8	Przygotowanie linii podstawowych profili badawczych na potrzeby pomiarów geoelektrycznych i robót geologicznych	8.1	Przygotowanie linii profili badawczych	mb	37250 mb	Opis w raporcie końcowym oraz w sprawozdaniu końcowym
		8.2	Przygotowanie projektu robót geologicznych	projekt	1	Płyta CD „PROJEKT ROBÓT GEOLOGICZNYCH” Kopia projektu znajduje się w NAG po nrCBDG 1106849, Inw. 2022/2017
9	Realizacja pomiarów geofizycznych	9.1	Realizacja i opracowanie sondowań SGE	opracowanie	1	Płyta CD „ZADANIE 9”
		9.2	Realizacja i opracowanie pomiarów tomografii elektrooporowej wzdłuż profili badawczych	opracowanie	1	Płyta CD „ZADANIE 9”
10	Analiza i opracowanie wyników monitoringu geodynamicznego, przyczyn i skutków ruchliwości soli	10.1	Rozpoznanie wstępne budowy geologicznej czwartorzędowej i neogenu wybranych wysadów solnych	raport	1	Płyta CD „ZADANIE 10”
		10.2	Analiza struktur czwartorzędowych i ich korelacja z współczesną aktywnością wysadów	raport	1	Płyta CD „ZADANIE 10”
		10.3	Analiza struktur czwartorzędowych dla określenia struktur tektonicznych (ciągłych i nieciągłych) związanych z oddziaływaniem wysadu oraz dróg przepływu wód podziemnych, zwłaszcza rozpuszczających wysady solne	raport	1	Płyta CD „ZADANIE 10”
		10.4	Analiza istniejących danych grawimetrycznych z zasobów CBDG wraz z ich interpretacją	raport	1	Płyta CD „ZADANIE 10.4”
11	Opracowanie i udostępnienie wyników	11.1	Sporządzenie map odkrytych wysadów z naniesionymi granicami intersekcyjnymi wysadów solnych	mapa	4	Płyta CD „ZADANIE 11.1”



**MONITORING GEODYNAMICZNY WYSADÓW SOLNYCH – RAPORT KOŃCOWY**

	monitoringu geodynamicznego i badań ruchliwości soli w czwartorzędzie	11.2	Opracowanie kompleksowego modelu strukturalnego osadów czwartorzędowych nad wybranymi wysadami solnymi i w ich bezpośrednim otoczeniu	model	4	Płyta CD „ZADANIE 11.2”
		11.3	Udostępnienie oraz prezentacja wyników tematu	raport, publikacja	7	Płyta CD „ZADANIE 11.3” Płyta CD „Raport końcowy”
12	Koordynacja, serwis i obsługa realizacji tematu	12.1	Koordynacja realizacji tematu	koordynacji (miesiąc)	51	Opis w sprawozdaniu końcowym
		12.2	Dozór i kontrola prac kooperacyjnych	dozór (miesiąc)	6	Opis w sprawozdaniu końcowym
		12.3	Obsługa informatyczna tematu	obsługa informatyczna (miesiąc)	51	Opis w sprawozdaniu końcowym
15	Analiza i opracowanie weryfikacyjnych pomiarów GNSS PRACE PODWYKONAWCÓW	15	Analiza i opracowanie weryfikacyjnych pomiarów GNSS	raport	1	Płyta CD „ZADANIE 15”
16	Wykonanie robót geologicznych PRACE PSG	16.1	Wykonanie badań laboratoryjnych	próbka	45	Płyta CD „ZADANIE 16 i 17”
		16.2	Dozór geologicznych wierceń i sond mechanicznych	raport	1	Płyta CD „ZADANIE 16 i 17”
		16.3	Analizy i zestawienia wyników robót geologicznych i badań laboratoryjnych	dokumentacja	1	Płyta CD „Dokumentacja geologiczna”
		16.4	Koordynacja prac	miesiąc	12	Płyta CD „ZADANIE 16 i 17”
17	Wykonanie robót geologicznych PRACE PODWYKONAWCÓW	17.1	Wykonanie wierceń badawczych	mb	784	Płyta CD „ZADANIE 16 i 17”
		17.2	Wykonanie sond mechanicznych	mb	1680	Płyta CD „ZADANIE 16 i 17”
		17.3	Wykonanie badań laboratoryjnych	próbka	10	Płyta CD „ZADANIE 16 i 17”

## 2 Wstęp

Niniejszy raport stanowi opracowanie zadania Państwowej Służby Geologicznej pt.: **„Monitoring geodynamiczny w zakresie interferometrii satelitarnej pasa wysadów solnych w Polsce oraz próba określenia ruchliwości soli w czwartorzędzie z wykorzystaniem tomografii elektrooporowej i technik modelowania 3D”**.

Zadanie było realizowane w ramach zatwierdzonego przez Ministra Środowiska Planu zadań Państwowej Służby Geologicznej, przewidzianych do realizacji w latach 2014-2017. Zadanie było finansowane ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, z siedzibą w Warszawie (02-673), ul. Konstruktorska 3a. Środki pochodzą z opłat określonych w art. 141 ustawy z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze.

Wykonawcą zadania opisanego w niniejszym raporcie był Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy z siedzibą w Warszawie (00-975), ul. Rakowiecka 4.

Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy, który pełni funkcję Państwowej Służby Geologicznej, nadzorowanej przez Ministra Środowiska, realizując zadanie: „Monitoring geodynamiczny w zakresie interferometrii satelitarnej pasa wysadów solnych w Polsce oraz próba określenia ruchliwości soli w czwartorzędzie z wykorzystaniem tomografii elektrooporowej i technik modelowania 3D” wypełnia założenia służby, uzupełniając kompendium wiedzy o strukturach solnych w Polsce i ich geodynamice. Szczegółowe rozpoznanie tych obszarów może być wykorzystywane na etapie projektowania podziemnych magazynów i składowisk w obrębie struktur solnych, minimalizując szkody powstające na powierzchni terenu i w infrastrukturze podziemnej przy takich inwestycjach. Zgromadzone informacje mogą zostać również wykorzystane przez jednostki samorządowe w celu wykorzystania przy planowaniu rozwoju gospodarki krajowej i lokalnej.

Raport zawiera syntezę przeprowadzonych prac i badań w projekcie oraz wnioski z realizacji zaplanowanych zadań.

### 3 Cele, założenia i schemat realizacji projektu

„Monitoring geodynamiczny w zakresie interferometrii satelitarnej pasa wysadów solnych w Polsce oraz próba określenia ruchliwości soli w czwartorzędzie z wykorzystaniem tomografii elektrooporowej i technik modelowania 3D” jest zadaniem państwowej służby geologicznej przewidzianym do realizacji przez okres 51 miesięcy począwszy od 1 stycznia 2014 roku. W ramach dotychczasowych działań statutowych Państwowego Instytutu Geologicznego– Państwowego Instytutu Badawczego (PIG-PIB) przetestowane zostały możliwości wykorzystania satelitarnej interferometrii radarowej do badania ruchów powierzchni terenu nad wysadem solnym Inowrocław w obrębie Niżu Polskiego (Piątkowska i in., 2012 a i b, Piątkowska i in., 2014), co stanowi podstawę metodyczną do realizacji przedmiotowego tematu.

Bezpośrednim celem wykonania przedsięwzięcia było określenie przydatności wysadów solnych dla lokowania w nich strategicznych dla kraju inwestycji. Wykonane modele 3D mogą umożliwić wstępne szacowanie ryzyka inwestycyjnego, również dla wysadów solnych, które nie były przedmiotem badań szczegółowych. Dodatkowo, wyniki mogą zostać wykorzystane przy konstrukcji kompleksowego modelu geodynamiki Polski, na podstawie sieci monitoringu geodynamiki współczesnej w oparciu o permanentne pomiary geodezyjne, sejsmologiczne, geofizyczne i hydrogeologiczne. Celowym było takie zlokalizowanie obszaru monitoringu geodynamicznego, by objął on wysady o różnicach w przebiegu procesów deformacji osadów czwartorzędu, a także całego kompleksu osadów kenozoicznych zwłaszcza pod kątem skali i charakteru deformacji glacitektonicznych i neotektonicznych oraz ich związku z wysadami solnymi.

W ramach programu operacyjnego Infrastruktura i Środowisko, Polska z pomocą finansową Unii Europejskiej buduje nowe Podziemne Magazyny Gazu (PMG) przez co zwiększa swoją niezależność energetyczną i rozszerza możliwości magazynowania surowców energetycznych i chemicznych w strukturach solnych w Polsce. Zgromadzone w wyniku realizacji zadania materiały, opracowania czy analizy mogą stanowić podstawę do optymalnego wyboru lokalizacji i lepszego zaprojektowania komór magazynujących w wysadach solnych nie wykazujących aktywności geodynamicznej. Poznanie natury zjawisk geodynamicznych zachodzących w obrębie pasa wysadów solnych w Polsce może ułatwić również zaadaptowanie istniejących komór poeksploatacyjnych na zbiorniki magazynujące węglowodory płynne, a w przyszłości również inne surowce energetyczne i chemiczne. Poprzez adaptowanie komór poeksploatacyjnych zwiększona zostanie pojemność

magazynująca (m.in. węglowodory, surowce chemiczne, itp.), co pozytywnie wpłynie na zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego kraju m.in. przez:

- 1) zapewnienie ciągłości dostaw surowca,
- 2) możliwość eksportowania nadwyżek zmagazynowanego surowca.

Ciągły dostęp do zasobów gazu ziemnego wpłynie na zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska przez:

- 1) stopniowe zastępowanie powszechnie wykorzystywanego węgla kamiennego i brunatnego w produkcji energii elektrycznej,

- 2) wyeliminowanie odpadów zanieczyszczających powierzchnię terenu powstałych w trakcie spalania

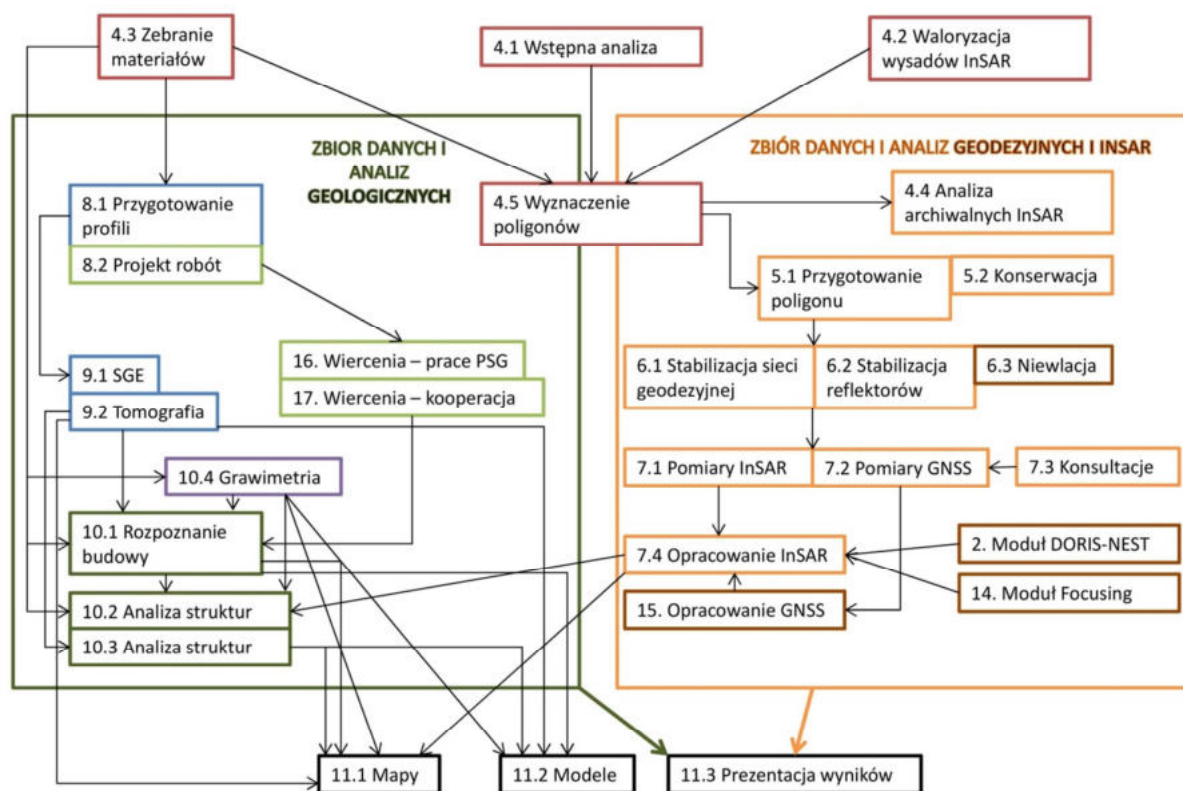
węgla kamiennego i brunatnego,

- 3) zminimalizowanie ilości zanieczyszczeń emitowanych do atmosfery w trakcie spalania węgla kamiennego i brunatnego, m.in: dwutlenku siarki, tlenu azotu, sadzy i popiołu.

Realizacja projektu jest również bardzo ważna z punktu widzenia władz samorządowych w kontekście monitoringu terenów zdegradowanych górniczo. Właściciel zakładu górniczego jest zobowiązany do prowadzenia monitoringu deformacji powierzchni, jednak po zamknięciu zakładu i zaprzestaniu eksploatacji to zobowiązanie wygasa. Problem ten dotyczy szczególnie terenów gdzie eksploatacja została zakończona dziesiątki lat temu, gdzie często brak jest informacji o dawnej eksploatacji. Monitoring satelitarny w takich przypadkach może być jedyną, tanią metodą pozwalającą na prowadzenie pomiarów dla dużych obszarów. Z takim przypadkiem boryka się gmina Wapno, gdzie do lat '70 XX w prowadzona była podziemna eksploatacja soli kamiennnej, która doprowadziła do wystąpienia katastrofalnych w skutkach deformacji. Gmina Wapno zwróciła się do PIG-PIB o włączenie jej obszaru do programu monitoringu geodynamicznego.

Prace badawcze realizowane w ramach przedsięwzięcia prowadzone były na obszarze Niżu Polskiego w granicach szeroko pojętej strefy Teisseyre'a- Tornquista (TTZ), w obrębie której struktury soli cechsztyńskich przebijają część lub cały kompleks mezozoiczny, a także ingerują w kompleks osadów kenozoicznych deformując je. Dla wybranych wysadów i struktur solnych przeprowadzone zostały prace oraz szczegółowe analizy i interpretacje przedstawione w niniejszym projekcie.

Realizacja projektu odbywała się według schematu przedstawionego na Ryc. 1.



Ryc. 1 Schemat realizacji projektu. Numery zadań zgodne z Harmonogramem Rzeczowo-Finansowym.

Projekt rozpoczął się realizacją zadania nr 4, pt.: **Rozpoznanie Nizu Polskiego na potrzeby monitoringu geodynamicznego oraz badania ruchliwości soli w czwartorzędzie**. W ramach przedmiotowego zadania opracowany został Raport nr 4.1 „Wstępna analiza struktur solnych pod kątem ich mobilności neotektonicznej”. Następnie został zebrany komplet materiałów archiwalnych: geologicznych, geodezyjnych, kartograficznych, sejsmologicznych i strukturalnych (Raport nr 4.3). Jako wstęp do analiz ruchów terenu za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej, przeprowadzono waloryzację form solnych według kryteriów geologiczno- morfologiczno- złożowych oraz spełnienia warunków koniecznych do uzyskania danych interferometrycznych (Raport nr 4.2). Na podstawie tych zadań zostały wyznaczone obszary badawcze będące przedmiotem dalszych opracowań. Szczegółowy opis granic wybranych obszarów znajduje się w niniejszym raporcie (Raport nr 4.5).

Dalsze prace były podzielone na monitoring geodynamiczny pionowych ruchów terenu, przeprowadzony z wykorzystaniem technik interferometrii satelitarnej (InSAR) (Ryc. 1, ramka

pomarańczowa), oraz na badania geologiczne, mające na celu określenie ruchliwości soli w czwartorzędzie (Ryc. 1, zielona ramka).

Monitoring geodynamiczny w zakresie interferometrii satelitarnej rozpoczął się wstępną analizą archiwalnych zobrażeń radarowych pasa wysadów solnych Niżu Polskiego (Raport nr 4.4). Na jej podstawie został przygotowany schemat przetworzeń wszystkich dostępnych dla całego pasa wysadów scen archiwalnych pochodzących z lat 1992-2012 z satelitów Europejskiej Agencji Kosmicznej ERS i ENVISAT (rozdział 7 oraz Raport nr 7.4). Przetworzenie to było przeprowadzone z wykorzystaniem tworzonego na potrzeby projektu oprogramowania InTOP (zadania 2 oraz 14). Jego wynikiem jest analiza pionowych ruchów powierzchni terenu dla okresu 20 lat.

Dla poligonu badawczego „Wapno” zostały przeprowadzone dodatkowe przetworzenia InSAR, z wykorzystaniem komercyjnych, wysokorozdzielczych scen radarowych (rozdział 8 oraz Raport nr 7.4). Prace te obejmowały **przygotowanie terenu poligonu badawczego do prowadzenia monitoringu geodynamicznego w zakresie interferometrii satelitarnej i GNSS**. W ramach tego zadania zostało wyznaczonych 10 punktów infrastruktury pomiarowej. Infrastrukturę pomiarową stanowią reflektory wykonane na potrzeby pomiarów interferometrycznych oraz punkty monitoringowe wykonane na potrzeby pomiarów GNSS. Ich stabilizacja umożliwiła pomiar przemieszczeń terenu z dokładnością milimetrową. Założenie infrastruktury pomiarowej obejmowało: stabilizację oraz wyznaczenie współrzędnych geodezyjnych punktów monitoringowych, wykonanie i stabilizację reflektorów na potrzeby pomiarów interferometrycznych, wykonanie niwelacji precyzyjnej punktów monitoringowych (Raport nr 6.3) oraz ciągłą konserwację infrastruktury pomiarowej.

Zadanie nr 7 stanowiła **Realizacja pomiarów w ramach monitoringu geodynamicznego pasa wysadów solnych**. W pierwszym etapie pomiary interferometryczne wykonano na podstawie archiwalnych danych satelitarnych (dane z systemów ERS- 1, ERS- 2, Envisat) metodą rozpraszaczy stabilnych PSI (*Persistent Scatters InSAR*), co pozwoliło na określenie dynamiki obszaru pasa wysadów solnych Niżu Polskiego (Raport nr 7.4). Następnie pomiary interferometryczne wykonano na podstawie aktualnych zobrażeń satelitarnych dla obszaru wybranego poligonu badawczego „Wapno”. Aktualne zobrażenia satelitarne wykonano przez system TerraSAR- X. Opracowanie wszystkich przetworzeń InSAR stanowi Raport nr 7.4. Równoległe do pomiarów interferometrycznych realizowane były weryfikacyjne pomiary GNSS w 4 weryfikacyjnych kampaniach pomiarowych. Wyniki

otrzymane w efekcie przeprowadzenia kampanii pomiarów weryfikacyjnych GNSS stanowią kontrolę pomiarów interferometrycznych (rozdział 8, Raport nr 15).

Równolegle do prac związanych z monitoringiem powierzchniowym, prowadzone były badania geologiczne w celu określenia ruchliwości soli w czwartorzędzie. Prace obejmowały analizę materiałów archiwalnych, pomiary geofizyczne z wykorzystaniem techniki elektrooporowej, opracowanie wyników pomiarów grawimetrycznych, zaplanowanie i wykonanie nowych robót geologicznych, a następnie analizę struktur czwartorzędowych.

**Przygotowanie linii podstawowych profili badawczych na potrzeby pomiarów geoelektrycznych** (Zadanie nr 8) obejmowało analizę geologicznych materiałów archiwalnych z obszaru struktur solnych i ich otoczenia oraz dostępnych baz robót geologicznych obserwacji i pomiarów w odsłonięciach naturalnych i sztucznych dla wybrania i udokumentowania przekrojów badawczych przez tereny testowe. Na tej podstawie wyznaczone i wykonane zostały profile badawcze na potrzeby pomiarów tomografii elektrooporowej rozwijanej w miarę możliwości w nawiązaniu do struktur w czwartorzędzie z precyzyjną lokalizacją najistotniejszych elementów w ich przebiegu (Opracowanie nr 9.1 i 9.2).

Dla identyfikacji struktur geologicznych w obrębie czwartorzędu, charakterystyki ich budowy i historii rozwoju oraz zakorzenienia w strukturach wysadów solnych zaplanowano wykonanie niezbędnych robót geologicznych. Ich lokalizacja, zakres i charakterystyka zostały określone po wykonaniu profili geofizycznych na obszarze wybranych wysadów solnych i były uzależnione od wyników pomiarów tomografii elektrooporowej. Zakres prac geologicznych stanowi „Projekt robót geologicznych” (Zadanie nr 8.2, rozdział 10.3).

**Realizacja pomiarów geofizycznych** (Zadanie nr 9) została przedstawiona w Raporcie nr. 9.1 (Realizacja i opracowanie sondowań SGE) oraz nr 9.2 (Realizacja i opracowanie pomiarów tomografii elektrooporowej wzdłuż profili badawczych) i w rozdziale 10.1.

Została również wykonana analiza istniejących danych grawimetrycznych z zasobów CBDG wraz z ich interpretacją (Raport nr 10.4, rozdział 10.2).

W kolejnym etapie projektu zostały wykonane roboty geologiczne, zgodnie z projektem (Zadanie nr. 8.2), których wynikiem jest Dokumentacja geologiczna inna (Zadanie nr 16 i 17). Dokumentacja ta wraz z Raportami 7.4, 9.1, 9.2, 10.4 oraz kompletem danych archiwalnych – 4.3 została następnie wykorzystana w zadaniu nr 10: „**Analiza i opracowanie wyników monitoringu geodynamicznego, przyczyn i skutków ruchliwości soli**”. Przeprowadzona

została identyfikacja lokalnych i regionalnych zmian miąższości kompleksów osadowych czwartorzędu oraz możliwych do identyfikacji poszczególnych serii litogenetycznych. Analiza składa się z rozpoznania wstępnego budowy geologicznej czwartorzędu i neogenu obszarów badawczych (Raport nr 10.1), analizy struktur czwartorzędu i neogenu (Raport nr 10.2) oraz analizie struktur czwartorzędowych ich związku z ruchliwością wysadów i procesami ich degradowania (Raport nr 10.3)

**Opracowanie i udostępnienie wyników monitoringu geodynamicznego i badań ruchliwości soli w czwartorzędzie** stanowią: mapy odkryte wysadów z naniesionymi granicami intersekcyjnymi wysadów (Zadanie 11.1), kompleksowe modele strukturalne osadów czwartorzędowych nad wybranymi wysadami solnymi i w ich bezpośrednim otoczeniu (Zadanie 11.2) oraz publikacje naukowe (Zadanie nr 11.3).

#### **4 Wysady i struktury solne na terenie Polski oraz ich mobilność**

Utwory górnopermskie (cechsztyń), zawierające pokłady soli kamiennych i potasowych występują na blisko 2/3 obszaru Polski, wypełniając wschodnią część cechsztyńskiego basenu środkowo-europejskiego, zlokalizowaną na obszarze tzw. bruzdy śródpolskiej. Obecny zasięg osadów cechsztyńskich we wschodniej części tego basenu w pewnym stopniu odzwierciedla pierwotny przebieg linii brzegowej ówczesnego morza, która tworzy dwie zatoki: na obszarze obniżenia podlaskiego i syneklizy perybałtyckiej, rozdzielone wyniesieniem mazursko-suwalskim. Na zachód od nich, w centralnej części dawnego basenu cechsztyńskiego (obszar tak zwanego Nizżu Polskiego), osady salinarne występują obecnie na głębokości kilku tysięcy metrów, a ich miąższość sięga 1000 m. W kierunku brzegów morza cechsztyńskiego utwory te występują na mniejszej głębokości, maleje również jej grubość (Orska, Werner, 1987). Znaczna miąższość utworów solnych w centrum basenu w powiązaniu z późniejszą ewolucją tektoniczną obszaru bruzdy stwarzała optymalne warunki dla rozwoju procesów halokinezy, których wyrazem są różnorodne tektoniczne struktury solne np. poduszki, grzbiety czy wysady solne.

Wstępna analiza struktur solnych pod kątem ich mobilności tektonicznej została przedstawiona w Raporcie 4.1.

Historię badań geologicznych basenu cechsztyńskiego na Nizżu Polskim można datować od końca XVIII wieku. Zapoczątkowały je badania G. Puscha (1833) związane z



występowaniem solanek w Ciechocinku. Odkrycie złoża w Inowrocławiu w 1871 r. można uznać za początek historii badań złóż soli na Niżu Polskim. Powstał tam pierwszy zakład górniczy produkujący solankę szybami górniczymi, sięgającymi do powierzchni zwierciadła solnego oraz otworami wiertniczymi. W latach 1879 – 1907 czynne były dwie kopalnie w południowej części wysadu, które zostały zatopione w 1907 r. wskutek wdarcia się wód do wyrobisk górniczych. W latach 1923 – 1929 zgłębiono w południowej części złoża trzeci szyb, który był czynny do 1979 r. Punktem wyjścia do badań geologicznych w rejonie Wapna było płytkie występowanie gipsów, które zaczęto eksploatować około 1828 r. W związku z występowaniem w gipsach słonych wód, wykonano w 1869 r. pierwsze wiercenie w poszukiwaniu soli, Pierwszy szyb u odkrytym złożu soli kamiennej zgłębiono tutaj w 1911 r. Wysadowe złoża solne w Górze odkryto w wyniku poszukiwań prowadzonych w latach 1912 – 1914. Przed Pierwszą Wojną Światową odkryto przy pomocy wierceń trzy złoża solne Inowrocław, Wapno i Góra) i założono dwie kopalnie soli (Inowrocław i Wapno). W okresie tym nie prowadzono badań geofizycznych. Pierwsze pomiary geofizyczne rozpoczęto w 1929 r. w okolicy złoża solnego Góra. Na początku lat 30-tych XX wieku Państwowy Instytut Geologiczny (PIG) przystąpił na Kujawach do wykonania regionalnego zdjęcia grawimetrycznego, które prowadził E. Janczewski. W latach 1937 – 1939 badania te doprowadziły do wyznaczenia wielkiej anomalii w rejonie Izbica Kujawska – Kłodawa – Łęczyca. Prace grawimetryczne kontynuowano w okresie okupacji niemieckiej. Po wojnie w wyniku intensywnych prac geofizycznych i geologiczno – wiertniczych prowadzonych przez PIG odkryto kolejne wysady solne: Kłodawa (1947), Rogóźno (1948), Izbica Kujawska (1953), Lubień (1954), Mogilno (1956), Łanięta (1959) oraz Damasławek (1960).

Należy więc przyjąć, że minęło już ponad 140 lat od momentu rozpoczęcia badań złóż soli permskiej w Polsce, których rozpoznaniem w ubiegłym wieku kierował głównie PIG (patrz: Czapowski, Bukowski, 2009). Efektem tych prac są setki opracowań regionalnych, publikacji i liczne dokumentacje geologiczne złóż soli. Spośród 15 udokumentowanych złóż zagospodarowano dotychczas jedynie złoża w 5 strukturach wysadowych w środkowej Polsce (złoża w wysadach solnych: Wapno, Inowrocław, Mogilno, Góra i Kłodawa). W 2015 r. udokumentowane bilansowe zasoby cechsztyńskiej soli kamiennej szacowano na 85,38 mld ton, z czego blisko 54,9 mld ton kryje się w strukturach wysadowych Niżu Polskiego (Szuflicki i in. 2016). Zatem istnieje w naszym kraju wielki potencjał geologiczny dla wykorzystania nagromadzeń permskich soli, wiążący się również ze zmianą postrzegania struktur solnych (zgodnie ze tendencjami światowymi), nie tylko jako źródła pozyskiwania

surowca dla przemysłu, lecz także jako wyjątkowo korzystnego górotworu dla budowy bezpiecznych magazynów paliw i składowisk odpadów (w tym promieniotwórczych).

Charakterystyczną cechą sedymentacji osadów ewaporatowych (salinarnych) jest wyraźna cykliczność procesów i powstających osadów, stanowiąca podstawę podziału litostratygraficznego cechsztynu w całym obszarze europejskim. Na podstawie wzorcowych profilów cechsztynu niemieckiego G. Richter-Bernburg (1955) zaproponował podział tych utworów na cztery cyklotemy solne (zespoły osadów – głównie skał węglanowych i ewaporatów, powstałych w jednym cyklu sedymentacji przez jednorazowe odparowanie wód zbiornika morskiego). Są to: werra – Z1, stassfurt – Z2, leine – Z3 i aller – Z4. J. Poborski (1960, 1964) wyróżnił na obszarze Polski sole najstarsze, starsze, młodsze i najmłodsze, które odpowiadają podziałowi niemieckiemu. Pełny cechsztyński cykl sedymentacyjny rozpoczyna się klasycznymi utworami pelitowymi (iłowiec piaszczysty, łupkowy, marglisty, dolomityczny, magnezytowy bądź anhydrytowy), na którym leży zwykle wapień, dolomit lub gips (w specyficznych warunkach – anhydryt), a następnie – w miarę wzrostu stężenia wody morskiej w wyniku odparowania - osadzają się sole kamienne, a w wyjątkowo sprzyjających warunkach i przy maksymalnej koncentracji solanki - sole potasowe i potasowo–magnezowe. W zależności od położenia analizowanego profilu osadów (środkowa lub brzeżna część basenu) pewne komponenty takiego cyklu mogą osiągać różną grubość bądź być nieobecne. Nagromadzenia osadów ewaporatowych (siarczanów i soli) stanowią cenne złoża kopalin i szczególnie w odniesieniu do soli kamiennej – podstawowego źródła tego surowca dla krajowej gospodarki.

Terminem tektonika solna opisuje się zespół zjawisk i form tektonicznych związanych z występowaniem soli. Są one bardzo charakterystyczne ponieważ sól cechuje się wysoką plastycznością i mniejszą gęstością niż większość innych skał, stąd łatwo ulega plastycznym deformacjom i przemieszczeniom pod wpływem naprężeń tektonicznych. Migracja soli może powodować w skrajnym przypadku jej przebicie się przez nadległe warstwy skalne i uformowanie struktur diapirowych (wysadowych). Tektonikę solną dzieli się na:

- halotektonikę - ruchy soli pod wpływem nacisków tektonicznych
- halokinezę - ruchy soli pod wpływem ciężaru skał nadległych

Typowymi strukturami tektoniki solnej są:

- Wysady (diapiry) solne.

- Poduszki solne.
- Wały solne.
- Słupy solne i grzebień solne

W pierwszej kolejności, w wyniku procesów kinematycznych formują się poduszki i wały solne, a następnie diapiry i słupy solne oraz grzebień. Stopień komplikacji poszczególnych form solnych jest zależny od budowy geologicznej otoczenia i lokalnych układów naprężeń panujących w górotworze, od momentu uformowania poduszki solnej do stadium słupa solnego i diapiru.

Regionalne rozprzestrzenienie struktur tektonicznych, w tym przejawów tektoniki solnej, zostało przedstawione przez R. Dadleza (1998) na „*Mapie tektonicznej cechsztyńsko – mezozoicznego kompleksu strukturalnego na Niżu Polskim*” w skali 1 : 500 000.

Na obszarze Niżu Polskiego wyróżnia się dwa kompleksy strukturalne: starszy - od kambru do syluru i młodszy - od permu do kenozoiku. Podłoże permsko-mezozoicznego basenu w obrębie platformy paleozoicznej, składa się z osadów karbonu, dewonu i starszych formacji, sfałdowanych podczas orogenezy waryscyjskiej. Podłoże osadów permskich osiąga 5-7 km grubości w centralnej części Polski oraz na północno-zachodnim skraju platformy paleozoicznej i zmniejsza się na południowym-zachodzie, południu, wschodzie i północnym-wschodzie. Pierwsze przemieszczenia ewaporatów górnego permu (a przede wszystkim mas solnych) zostało zainicjowane w środkowym triasie i ruchy te z różną intensywnością zaznaczały się zapewne i w młodszym mezozoiku (Krzywiec, 2004 a i b, 2009). Jednak dopiero laramijskie ruchy tektoniczne ostatecznie uformowały diapirowe struktury solne w osi bruzdy śródpolskiej oraz łańcuchy poduszek i wysadów solnych wzdłuż krawędzi inwersyjnego wału środkowo-polskiego. Basen osadowy mezozoiku został zdeformowany podczas laramijskiej fazy tektonicznej, pomiędzy kredą a trzeciorzędem. Podczas tej fazy, plastyczne warstwy solne zostały ostatecznie „wyciśnięte” do powierzchni, rozrywając nadległy, prawie 6 km grubości kompleks utworów triasu, jury i kredy. Wzmagające się ruchy tektoniczne podzieliły ten obszar na dwa subbaseny: synklinorium szczecińsko-łódzkie i synklinorium grudziądzko-warszawskie. Pomiędzy tymi subbasenami uformowało się antyklinorium środkowo-polskie. Po tej deformacji struktury mezozoiczne zostały zerodowane, a później przykryte przez płasko zalegające utwory trzeciorzędu. Znaczny postęp w rozpoznawaniu tektoniki solnej przedstawił P. Krzywiec (2009) analizując powtórnie przetworzone dane sejsmiczne na wybranych przykładach struktur solnych.

Uwzględniają one najnowsze interpretacje genetyczne struktur solnych i pozwalają na zaproponowanie nowych, genetycznie znacznie bardziej wiarygodnych modeli budowy i ewolucji geologicznej tych struktur. Modele te często znacznie odbiegają od prezentowanych w przeszłości. Oznacza to, że w przypadku wykonania nowych badań sejsmicznych poszczególnych struktur solnych należy się liczyć ze znacznymi zmianami poglądów dotyczących ich geometrii i ewolucji geologicznej. Podobną zmianą dotychczasowego obrazu budowy wewnętrznej wysadów solnych skutkuje reinterpretacja archiwalnych danych z otworów wiertniczych np. wysadu Góra (Czapowski i in. 2012), wykorzystująca modelowanie komputerowe np. wysad Łanięta (Chełmiński i i. 2016). Może to mieć zasadnicze znaczenie podczas oceny obecnej i przyszłej stabilności struktur wysadowych (Jarosiński, 2013), co z kolei jest niesłychanie ważnym problemem w kontekście budowy w obrębie struktur solnych podziemnych zbiorników na węglowodory bądź też składowisk odpadów radioaktywnych.

## **5 Wybrane struktury solne do analizy ruchliwości soli w czwartorzędzie**

Analizy ruchliwości soli w czwartorzędzie zostały przeprowadzone dla czterech wysadów solnych: Łanięta, struktury Izbica Kujawska – Łęczycza, Damasławek i Wapno, (Ryc. 2), które znajdują się w pasie utworów górnopermskich (cechsztyn), zawierających pokłady soli kamiennych i potasowych, wypełniających wschodnią część cechsztyńskiego basenu środkowo-europejskiego, zlokalizowaną na obszarze tzw. bruzdy śródpolskiej. Pod względem administracyjnym obszary znajdują się w województwie kujawsko-pomorskim (powiaty nakielski, żniński i włocławski), wielkopolskim (powiat kolski), łódzkim (powiaty łęczycki, poddębicki, zgierski, kutnowski) oraz fragmencie mazowieckiego (powiat gostyński). Obszary badawcze mają kształt kwadratu o bokach 15 km (powierzchnia 225 km<sup>2</sup>). Wyjątek stanowi dodatkowy obszar „Łęczycza”, który został wyznaczony w celu dokładniejszej analizy ruchliwości soli nad strukturą solną Izbica Kujawska – Łęczycza. Obszar ten ma wymiary 20 na 27 km i powierzchnię 540 km<sup>2</sup>.

Dla obszarów badawczych „Łanięta”, „Izbica Kujawska”, „Łęczycza” oraz „Wapno” dodatkowo wyznaczono poligony, dla których przeprowadzono szczegółowe analizy.

Warstwy tematyczne danych wykorzystanych do analiz dla obszarów i poligonów badań zostały przedstawione w Tab. 1. Zbiór materiałów geologicznych, geodezyjnych-

kartograficznych, sejsmologicznych i strukturalnych, wykorzystanych do analiz, został przedstawiony w Raporcie 4.3. Współrzędne skrajnych wierzchołków obszarów w Tab. 2, a poligonów w Tab. 3. Zakres obszarów i poligonów badawczych na tle mapy topograficznej w skali 1: 50 000 został przedstawiony w Raporcie 4.5.



Ryc. 2 Lokalizacja poligonów badawczych na tle struktur solnych.

Tab. 1 Warstwy tematyczne dla obszarów i poligonów badawczych.

	Warstwa tematyczna	Obszar badań	Poligon badawczy
1	PODKŁAD TOMOGRAFICZNY	X	X
2	NUMERYCZNY MODEL TERENU	X	X
3	OTWORY HYDROGEOLOGICZNE		X
4	OTWORY ZŁOŻOWE I INNE		X
5	MAPA GEOLOGICZNA 1: 50 000	X	X
6	MAPA GEOLG. -STARSZE PODŁOŻE	X	X
7	ARCHIWALNE PRZEKROJE GEOL	X	X
8	MAPY GRAWIMETRYCZNE	X	X
9	GEOFIZYKA PŁYTKA WYKONONANA W RAMACH NINIEJSZEGO OPRACOWANIA		X

10	INNE OPRACOWANIA I WYNIKI ARCHIWALNE	X	X
11	OPRACOWANIE ARCHIWALNE INTERFEROMETRYCZNE	X	X
12	OPRACOWANIE NOWYCH DANYCH INTERFEROMETRYCZNYCH		X (Wapno)

Tab. 2 Współrzędne w układzie PL-1992 wierzchołków obszarów badawczych.

		Obszar badawczy				
	NAZWA	WSP X1	WSP Y1	WSP X2	WSP Y2	km <sup>2</sup>
1	ŁANIĘTA	512000	492000	527000	507000	225
2a	IZBICA KUJAWSKA	477000	497000	492000	512000	225
2b	ŁĘCZYCA	500000	480000	520150	480000	540
3	DAMASŁAWEK	397000	559400	412000	544400	225
4	WAPNO	390000	554000	405000	569000	225

Tab. 3 Współrzędne w układzie PL-1992 wierzchołków poligonów badawczych.

		Poligon badawczy				
	NAZWA	WSP X1	WSP Y1	WSP X2	WSP Y2	km <sup>2</sup>
1	ŁANIĘTA	517000	497000	521000	501000	16
2a	IZBICA KUJAWSKA	481000	501000	488000	509000	56
2b	ŁĘCZYCA	501000	461000	517000	471000	160
3	DAMASŁAWEK					
4	WAPNO	395000	560000	399000	563000	12

## 5.1 Wapno

Wysad w planie poziomym ma kształt zbliżony do elipsy o wymiarach 350 m x 1000 m, której oś dłuższa przebiega w kierunku NW–SE (Ziąbka i in. 1977). W przekroju pionowym poprzecznym ma kształt słupa przypominającego maczugę (Ślizowski, Saługa, 1996), nachylonego ku wschodowi (Ryc. 3). Poza wysadem w kierunku NW odnotowano uskok o biegu 340 stopni i upadzie 22 stopni ku E (op. cit).

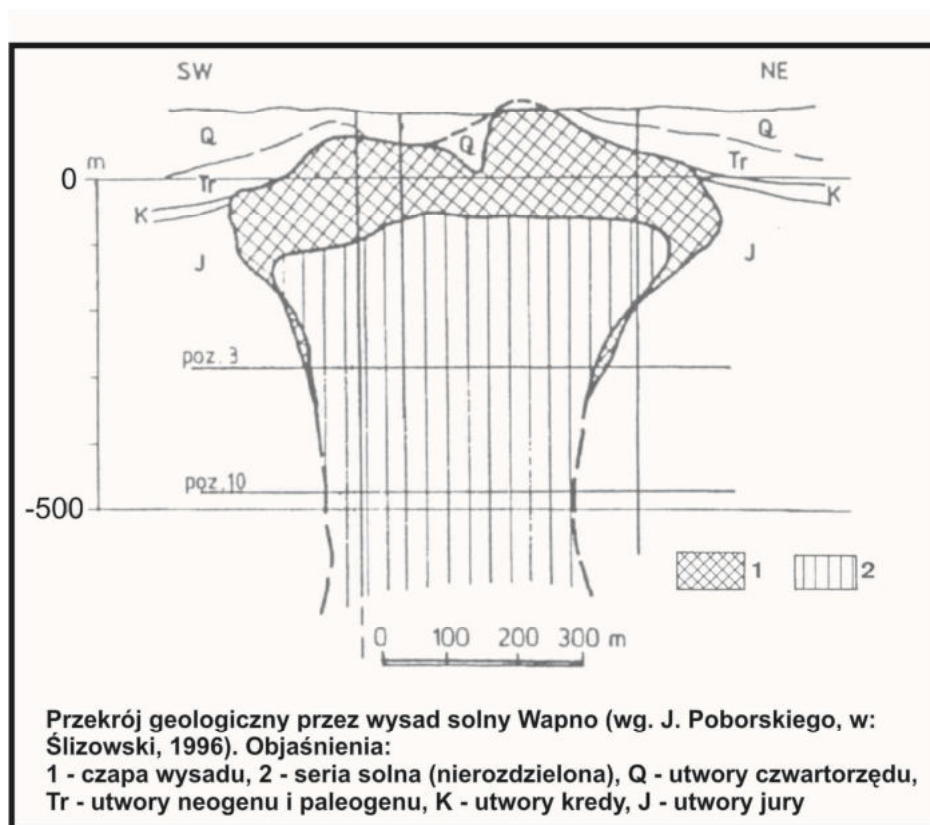
Ponad wysadem występują utwory czwartorzędu oraz paleogenu i neogenu, zaś w jego otoczeniu – także kredy i jury (Gałaszewski, 1955; Ziąbka i in. 1977). Czapa gipsowa wysadu tworzy wychodnie na powierzchni terenu i występuje na głębokości do 80 m (spąg – na głębokości 70-160 m) zaś jej przeciętna miąższość to ok. 175 m. Zwierciadło solne występuje

na głębokości 160-180 m, zaś pień solny wysadu budują utwory solne cykli PZ2, PZ3 i PZ4 cechsztynu (Ziąbka i in. 1977).

Złoże soli kamiennej rozpoznano w wysadzie 64 otworami do maks. głębokości 1316 m. Aktualnie rejestrowane są tylko zasoby pozabilansowe złoża w kat. A+B w ilości 5,8 mln t.

Na obszarze wysadu zarejestrowano 4 poziomy wodonośne w utworach nadkładu oraz wody zasolone w obrębie czapy (Ziąbka i in. 1977). Późniejsze badania (Rasała, 2005, 2006) dokładniej ukazały wzajemne powiązania wód tych poziomów i ich wpływ na degradację czapy wysadu.

W 1977 r. wskutek nagłego wtargnięcia wód powierzchniowych do wyrobisk górniczych kopalnia została zatopiona i zaprzestano produkcji. Katastrofa spowodowała zapadanie się całych domów i ulic Wapna. Przez jakiś czas okolica była wręcz wyludniona. Z czasem mieszkańcy zaczęli jednak wracać. Teren nadal nie był jednak stabilny. W końcu zlecone zostały szczegółowe badania geologiczne. Ich efektem jest opublikowany raport (Rasała i in., 2013). Wnioski z raportu nie mogą napawać optymizmem. Wynika z niego, że teren jest wciąż aktywny i w przyszłości może dochodzić do następnych szkód górniczych. Raport jednak nie wskazuje prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia. Najbardziej niebezpiecznie jest w okolicach przedszkola i dawnego zapadliska. Tam obowiązuje zakaz budowania nowych budynków. Obecnie zamknięta kopalnia soli sama w sobie nie stanowi zagrożenia. Natomiast groźna jest czapa gipsowa do której dochodzą wody. Powodują one jej rozpuszczanie i podmywanie oraz powstawanie nowych pustek (Rasała, 2005, 2006).



Ryc. 3 Przekrój geologiczny przez wysad solny Wapno (wg. Poborskiego w: Ślizowski, 1996).

## 5.2 Łanięta

Wysad ten wraz z sąsiednim wysadem Libień „wyrastają” z większej poduszki solnej Wojszyc (por. Krzywiec 2004a). Został on – podobnie jak wysad Lubień - zidentyfikowany przez E. Janczewskiego za pomocą badań grawimetrycznych jeszcze przed II wojną światową, w latach 1937-1939. W latach 1950-tych i 1960-tych wykonano badania refrakcyjne, które pozwoliły na pierwsze, wstępne okonturowanie obu struktur. Wyniki były niezbyt wysokiej jakości. W latach 70-tych ub. wieku wykonano badania sejsmiki refleksyjną.

Złoże soli kamiennej w wysadzie zostało udokumentowane w latach 1963 i 1980 (dwie dokumentacje: J. Dębskiego w 1963 r. i K. Pareckiej w 1980 r.) i jego zasoby bilansowe oszacowano na 2,1 mld ton w kategorii C1 zaś pozabilansowe – na 1,06 mld ton;. W późniejszym okresie na obszarze wysadu nie prowadzono systematycznych badań

W planie poziomym wysad ma kształt prawie koła o średnicy 3,3–3,7 km. Na obszarze struktury odwiercono 16 otworów wiertniczych do maks. gł. 550,0 m, nie przewiercając całej serii solnej (Czapowski i in. 2005). W świetle danych wiertniczych czapa wysadu grubości



29,6-241,4 m zalega na głębokości 90,0-308,6 m, zaś seria solna cechsztynu została nawiercona na głębokości 3234,5-282,5 m i jej nawiercona grubość sięga > 257,4 m. Nad strukturą występują utwory czwartorzędu (grubości 43,0-104,0 m), oraz paleogenu i neogenu (grubości 0-252,4 m) (Ryc. 4 A, B). Poniżej występuje czapa wysadu grubości 29,6-241,4 m, a potem seria solna cechsztynu grubości > 257,4 m. Na nawiercony profil serii solnej składają się następujące wydzielenia litostratygraficzne cykli PZ2, PZ3 i PZ4 cechsztynu o sumarycznej grubości (z pominięciem powtórzeń tektonicznych):

- zuber czerwony (Na4t) – 0-100,8 m,
- najmłodsza sól kamienna (Na4) – 0-40,74 m,
- zuber brunatny (Na3t) – 0-104,0 m,
- młodsza sól kamienna (Na3) – 0- > 86,0 m,
- anhydryt główny (A3)– 0-121,6 m,
- starsza sól kamienna (Na2) – 0-257,4 m,
- starsza sól potasowa (K2) – 0-7,0 m.,
- anhydryt podstawowy (A2) – 0-103,4 m,

Powyższa sukcesja dowodzi wybitnie silnych zaburzeń tektonicznych w strukturze solnej i dużej aktywności wysadu po kredzie (usunięcie utworów mezozoiku z nadkładu struktury). Najnowszy model budowy tektonicznej stropowej części słupa solnego wysadu, oparty o komputerowe modelowanie zreinterpretowanych danych z otworów wiertniczych, ukazuje system 2 synklin zbudowanych z utworów cykli PZ3 i PZ4, przedzielonych i otulonych ewaporatami cyklu PZ2 (Chełmiński i in. 2016).

W nadkładzie wysadu Łanięta (Czapowski i in. 2005) profil osadów paleogenu i neogenu jest niemal kompletny i charakterystyczny dla obszaru Nizy Polskiego (Ciuk, 1993). Utwory paleocenu odpowiadają formacji odrzańskiej z ciekim pokładem węgla brunatnego (VII pokład odrzański). Utwory eocenu reprezentują formację jerzmanowicką i zawierają ciepłolubną faunę priabonu (Odrzywolska-Bieńkowska, Pożaryska, 1984). Profil osadów oligocenu odpowiada formacji mosińskiej dolnej, formacji czempińskiej z pokładem węgla brunatnego (V pokład czempiński) i formacji mosińskiej górnej.

Na profil osadów miocenu składają się (Kasiński, 2004) utwory; formacji rawickiej, formacji ścinawskiej z pokładem węgla brunatnego (II pokład łużycki), formacji

adamowskiej, formacji poznańskiej z 2 pokładami węgla brunatnego (I pokład środkowopolski i IA pokład oczkowicki).

Osady plejstoceńskie ponad wysadem solnym składają się przede wszystkim z piaszczystych glin zwałowych z otoczakami skandynawskich skał magmowych i metamorficznych. Utwory te lokalnie, w okolicy otworu Ł-7, znajdują się bezpośrednio ponad czapą wysadu. Gliny zwałowe tworzą w nadkładzie wysadu jeden do czterech poziomów, przy czym na przeważającej części obszaru występują dwa poziomy. Poziomy glin zwałowych są rozdzielone pakietami piasków różnoziarnistych i żwirów.

W sąsiedztwie wysadu nawiercono utwory jury (Parecka, 1980).

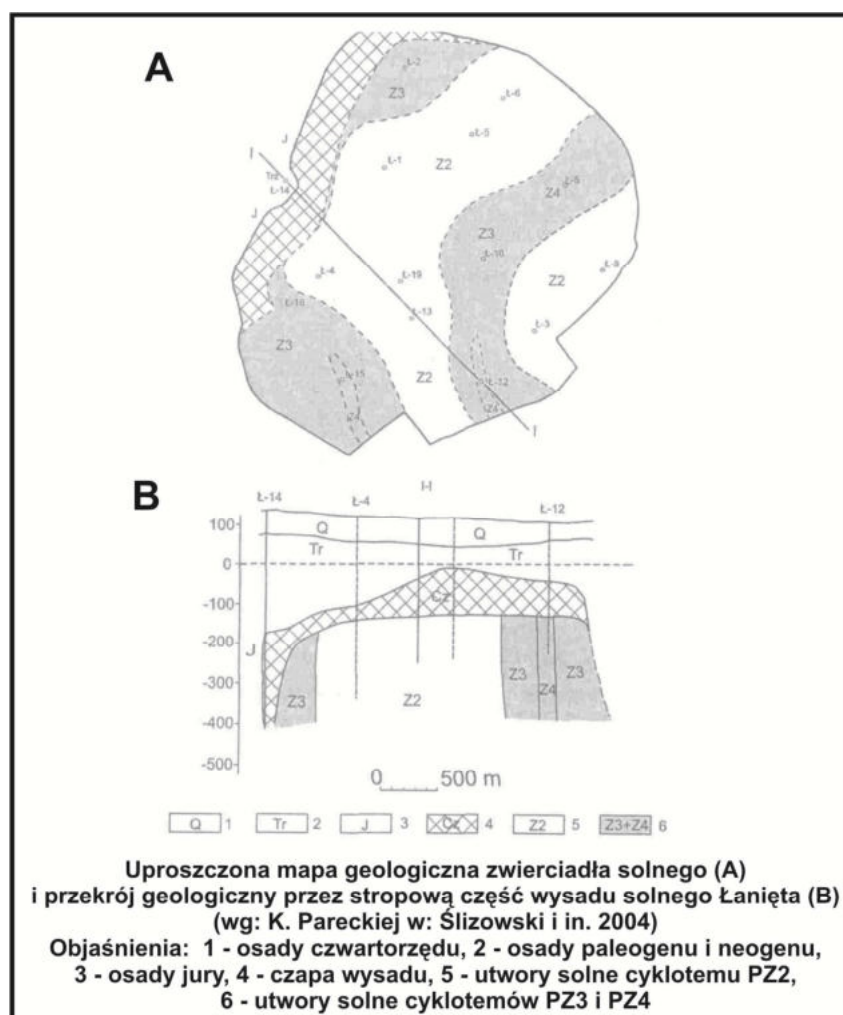
W utworach nadkładu występują trzy piętra wodonośne (Parecka, 1980), a poza jego obrębem - piętro jurajskie:

- piętro plejstoceńskie, w skład którego wchodzi jeden lub dwa poziomy wodonośne, związane z utworami piaszczystymi i żwirowymi; poziomy te są oddzielone od siebie pakietem glin zwałowych;

- piętro neogeńskie, w skład którego wchodzi dwa poziomy wodonośne; poziom górny jest związany z piaszczystymi utworami formacji mosińskiej górnej, rawickiej, ścinawskiej i adamowskiej, ma ono kontakt hydrauliczny z dolnym poziomem plejstoceńskim; poziom dolny występuje piaszczysto-żwirowych utworach formacji mosińskiej dolnej; oba poziomy są rozdzielone mułkami formacji czempińskiej z V czempińskim pokładem węgla brunatnego;

- piętro jurajskie, występujące poza konturem wysadu (okolice otworów Ł-17 i Ł-18), w skład którego wchodzi dwa poziomy wodonośne; poziom górny jest związany z facją węglanową oksfordu (malm), a poziom dolny – z piaskowcami i zlepieńcami doggeru;

- piętro cechsztyńskie, w skład którego wchodzi jeden poziom wodonośny, związane z czapą wysadu, rozwinięty odmiennie w dwóch obszarach: w utworach gipsowo-anhydrytowych (okolice otworów Ł-5, Ł-9, Ł-13, Ł-14 i Ł-19) i w utworach gipsowo-iłowych (okolice otworów Ł-7, Ł-10, Ł-12 i Ł-15); w tych ostatnich pozostaje lokalnie (okolice otworu Ł-7) w kontakcie hydraulicznym z poziomem plejstoceńskim.



Ryc. 4 Wysad łañęta. A. Uproszczona mapa geologiczna zwierciadła solnego. B. Przekrój geologiczny przez stropową część wysadu solnego (wg: Ślizowski i in. 2004).

### 5.3 Struktura Izbica Kujawska - Łęczycza

Wysad Izbica Kujawska występuje w północnej części wielkiej struktury solnej (grzebienia solnego) Izbica Kujawska–Kłodawa–Łęczycza. Na mapie kompleksu permomezozoicznego R. Dadleza (1998) zobrazony jest jako owalny diapir w wymiarach 3 km x 2 km i osi NNE-SSW, przebijający się przez mezozoik i obcięty od NE uskokiem. W przekroju pionowym wysad ma kształt asymetrycznego słupa o niemal pionowej ścianie zachodniej i łagodniej nachylonej wschodniej (Ryc. 5)

Struktura ta nie była szerzej opisywana, stratyografię i wykształcenie utworów nadkładu i cechsztynu omawiał J. Poborski (1955) i J. Sękwicz (1960). W otoczeniu wysadu Izbica Kujawska pomierzono niewiele danych sejsmicznych (por. Krzywiec, 2004a, b). Wobec słabego stanu rozpoznania brak jest udokumentowanych zasobów soli kamiennej w wysadzie

zaś szacunkowe zasoby perspektywiczne soli ocenia się na około 1.5 mld ton (Wołkowicz i in. 2011).

Czapa gipsowo-iłowa wysadu została nawiercona na głęb. 144,0-412,0 m, a jej miąższość waha się od 27,7 m do 207,2 m. Zwierciadło solne stwierdzono na głęb. 224,5-5563,5 m, zaś grubość nawierconej serii solnej wynosi > 857,8 m.

Na obszarze i bliskim sąsiedztwie struktury odwiercono 8 głębokich otworów wiertniczych do maks. gł. 1212,3 m. W świetle danych wiertniczych nad strukturą występują następujące utwory o grubości:

- czwartorzęd – 20,5-201,6 m,
- paleogen i neogen – 0-128,7 m,
- jura – 0-51,0 m.

Poniżej występuje czapa wysadu, a pod nią nierozdzielona seria solna cechsztynu grubości > 857,8 m. Brak jest danych o budowie wewnętrznej tej struktury solnej, jednakże ze względu na położenie i wznoszenie się z tego samego grzbietu solnego, co wysad solny Kłodawy, wnioskować można, iż utwory cechsztyńskie budujące wysad mają podobny inwentarz litostratygraficzny co wysad kłodawski, są podobnie intensywnie wewnętrznie pofałdowane, nieciągle i zapadają bardzo stromo.

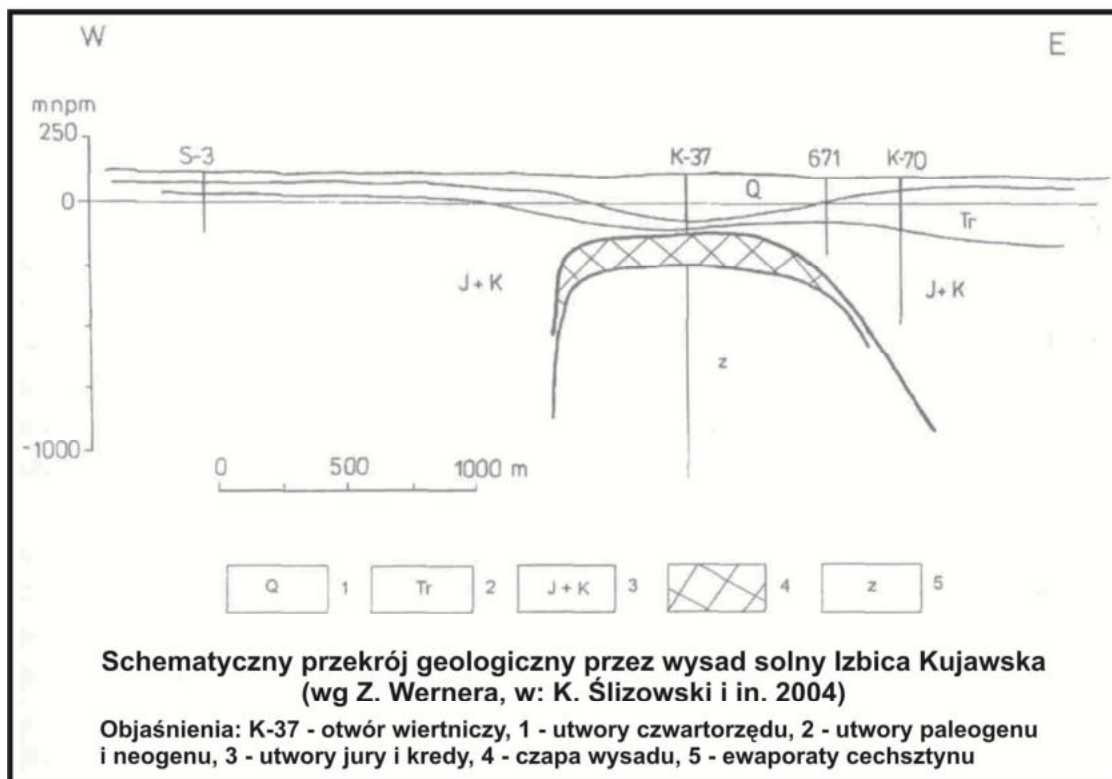
W otoczeniu wysadu Izbica Kujawska w podłożu osadów kenozoicznych występują utwory najwyższej jury – kimerydu i portlandu – reprezentowane przez margle i mułowce (Ślizowski, Saługa, 1996).

W okolicy wysadu najniższą część profilu osadów kenozoicznych tworzą paleoceńskie zwietrzliny starszego podłoża, wyżej leżą kolejne osady paleogenu: formacji jermanowickiej (eocen górny), formacji mosińskiej dolnej (eocen górny/oligocen dolny), formacji czempińskiej (oligocen dolny) z przerostami węgla brunatnego (V pokład czempiński) oraz formacji mosińskiej górnej (Czapowski i in. 2005). Na omawianym obszarze brak utworów miocenu dolnego, a miocen środkowy i górny reprezentują osady: formacji adamowskiej (miocen środkowy) z wkładkami węgla brunatnych (IIA pokład lubiński) i formacji poznańskiej (górny miocen-dolny pliocen) z I środkowopolskim pokładem węgla brunatnego w spągu.

Na utwory plejstocenu składają się osady lodowcowe, wodnolodowcowe i rzeczne zlodowaceń: południowopolskiego, środkowopolskiego i północnopolskiego (Kasiński i in.

1999). Osady holocenu plejstocenu oraz rzecznych i eolicznych utworów o niewielkiej miąższości. Utwory holocenu w tym rejonie to głównie torfy i namuły organiczne oraz piaski eoliczne i rzeczne.

Stosunki hydrogeologiczne w otoczeniu i nadkładzie struktury solnej nie są bliżej rozpoznane.



Ryc. 5 Schematyczny przekrój geologiczny przez wysad solny Izbica Kujawska (wg. Z. Wernera w: Ślizowski i in. 2004).

#### 5.4 Wysad Damasławek

Wysad solny Damasławek leży w północnej części niecki mogileńsko-łódzkiej i należy do ciągu struktur solnych Piła-Wapno-Damasławek-Mogilno o przebiegu z NW na SE (Czapowski i in. 2005; Tarka, 1992). Wysad Damasławek wraz z położonym ku NW wysadem Wapno wyrasta z częściowo przebijającej się antykliny Damasławek-Wapno, która jest nieregularnym wałem o szerokości od około 1,5 km do ponad 4 km, rozciągającym się w kierunku NW-SE na przestrzeni około 29 km. Prawdopodobnie stanowi on też południowo-wschodnie przedłużenie poduszki solnej Piły (Raczyńska i in. 1987). Wysad wznosi się z depresyjnej strefy charakteryzującej się dużymi miąższościami osadów młodszego mezozoiku (Mrozek i in. 1961). Spąg utworów cechsztynu w rejonie wysadu znajduje się na głębokości

ok. 6 km, wspólną zaś cechą wszystkich trzech wysadów tej strefy (Wapno, Damasławek, Mogilno) jest ich elipsoidalny kształt, o biegu dłuższej osi NW-SE, podobnie jak większości struktur wysadowych na Niżu (Tarka, 1992).

Wysad został odkryty w roku 1958 dzięki badaniom sejsmicznym (patrz – Werner, 1974; Kornowska, 1980). Wiercenia wykonane w latach 1960-61 oraz dodatkowe badania geofizyczne pozwoliły wstępnie rozpoznać budowę diapiru Damasławka (Mrożek i in. 1961) i opracować dokumentację geologiczną zasobów soli (Werner, 1974; Kornowska, 1980) oraz hydrogeologiczną (Brożek, Tatarski 1983). Wykonane dwa otwory naftowe w pobliżu wysadu wykazały obecność wód termalnych w utworach dolnojurajskich i dolnokredowych. Wysad budził zainteresowanie jako potencjalne miejsce przyszłego podziemnego składowiska odpadów promieniotwórczych (np. Garlicki i in. 1997, 1998; Jarosiński i in. 2000; Krzywiec i in. 1999, 2000; Twarogowski i in. 2002). Wyniki tych prac zostały dopełnione powierzchniowym kartowaniem geologicznym nad wysadem (Rasała, 2000).

Wysad Damasławek zbadany został za pomocą geoelektryki i geotermii (Twarogowski i in. 2002), sejsmiki refrakcyjnej, prześwieleń sejsmicznych, naftowych danych sejsmicznych (por. Dadlez, 2001; Wolnowski, 1993) oraz za pomocą płytkiej wysokorozdzielczej sejsmiki refleksyjnej (Krzywiec i in., 2000). Ostatnio intensywne prace sejsmiczne na tej strukturze w ramach koncesji rozpoznawczej, zakończone opracowaniem dokładnego modelu kształtu wysadu, przeprowadziła firma Gaz-System S.A. (niestety, dane te są jak dotychczas własnością tej firmy i nie zostały udostępnione).

Wysad Damasławek ewoluował począwszy od triasu a swoją obecną formę zawdzięcza syn-inwersyjnej kompresji. Ma on charakter rozszerzającego się nieco ku górze słupa solnego, którego strop położony jest stosunkowo blisko powierzchni (Ryc. 6A). W interpretacji R. Dadleza (2001) wysad Damasławka ma bardzo regularny strop, jednak dane płytkie sejsmiki refleksyjnej jednoznacznie pokazały, że jego czapa wraz z nadkładem kredowo-trzeciorzędowym pocięta jest systemem uskoków (Ryc. 6B).

Wysad Damasławek, jeden z największych w Polsce, ma w planie poziomym - na głębokości zwierciadła solnego (średnio około 475 m p.p.t.) - kształt nieregularnej elipsy o powierzchni ok. 16,4 km<sup>2</sup>, której dłuższa oś przebiegająca w kierunku NW-SE ma długość 5,5 km, krótsza zaś ok. 3,5 km (Kornowska, 1983). W przekroju pionowym wysad ma formę słupa przechylonego w kierunku południowo-zachodnim (Kornowska, 1983; Ślizowski, Saługa, 1996), otoczonego głównie przez utwory jury i kredy górnej oraz trzeciorzędu.

Złoże soli kamiennej w wysadzie zostało udokumentowane w 1983 r. w kategorii C2 (Kornowska, 1983) i jego zasoby bilansowe oszacowano na ok. 17.7 mld ton. W latach 1997–2001 prowadzono również na obszarze wysadu prace geologiczno–geofizyczne pod kątem możliwości wykorzystania go pod przyszłe składowisko odpadów promieniotwórczych, a w przyszłości rozważana jest przez firmę Gaz-System S.A. budowa w jego obrębie kawernowych magazynów gazu.

Pień solny wysadu Damasławek - podobnie jak w większości wysadów na Niżu Polskim - budują ewaporaty cyklotemów PZ2, PZ3 i PZ4. Czapa gipsowo-iłowa wysadu została nawiercona na głęb. 184-245 m, a jej miąższość waha się od 84 m do 294 m (Kornowska, 1983). Zwierciadło solne stwierdzono na głęb. 446-538,8 m, zaś grubość nawierconej serii solnej wynosi > 154,0 m. Wysokość wysadu Damasławka waha się od 4,5 km do 5,5 km od podłoża cechsztynu do spągu trzeciorzędu (Wolnowski, 1993).

Na obszarze wysadu odwiercono 17 głębokich otworów wiertniczych do maks. gł. 1050,0 m, z których 3 otwory nie nawierciły serii solnej. W świetle danych wiertniczych nad strukturą występują następujące utwory o grubości (Ryc. 7B i C):

- czwartorzęd – 29,0-58,0 m,
- neogen – 109,6-154,0 m,

Utwory czapy gipsowej wysadu zostały nawiercone na głębokości 184,0-1050,0 m i grubość jej sięga 294,1 m. Na profil ewaporatów (serii solnej – Ryc. 7A, B i C) składają się następujące wydzielenia litostratygraficzne cechsztynu o sumarycznej grubości:

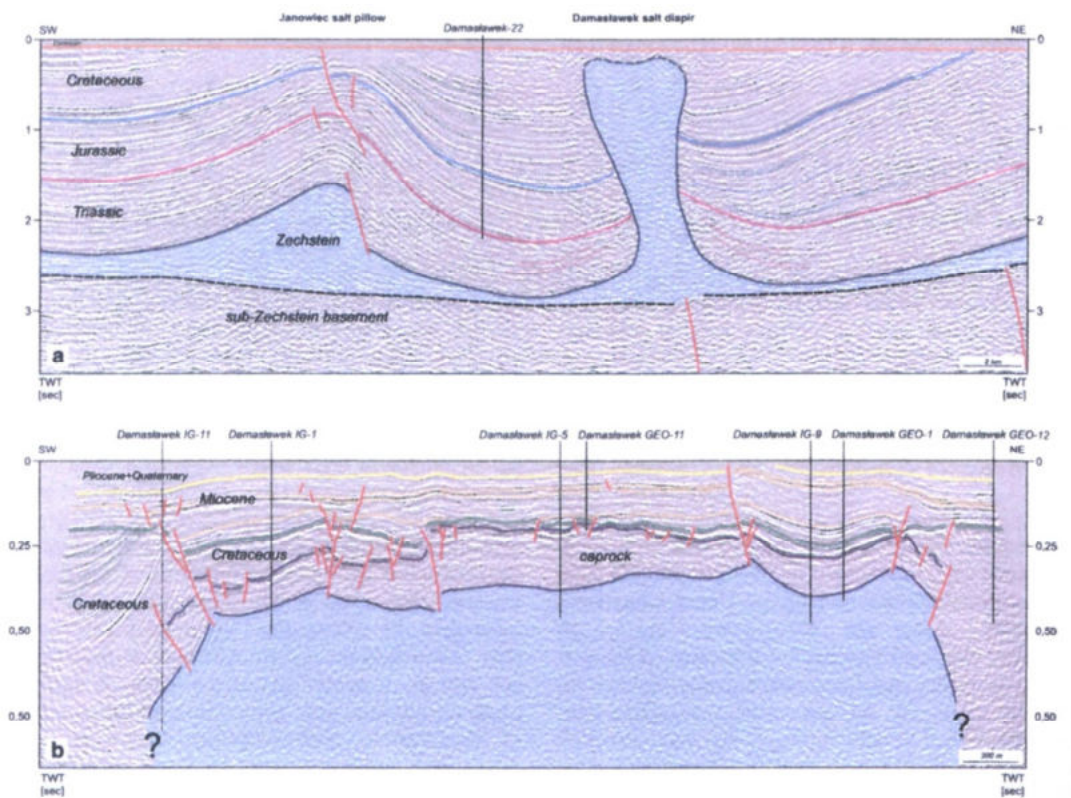
- najmłodsza sól kamienna (Na4) – 0-77,7 m,
- zuber brunatny (Na3t) – 0-52,1 m,
- młodsza sól kamienna (Na3) – 0-106,0 m,
- anhydryt główny (A3) – 0-9,0 m,
- starsza sól kamienna (Na2) → 154,0 m.

Wysad w Damasławku obramowują strefy dyslokacyjne, wygasające w pokrywie kenozoicznej, a wzdłuż dyslokacji południowej na skraju czapy gipsowej zaklinowane są stromo nachylone osady kredy (Ryc. 7A i B). W planie strukturalnym zalegania stropu utworów jury górnej obie te dyslokacje o orientacji NW-SE (północna) i N-S (zachodnia) zbiegają się w okolicy otworu Sielec IG-1 (Kasiński i in. 2002). Na wschodnim skraju

wysadu, w okolicach otworów 76/80, Sielec IG-1, Geo-8 i Geo-13, jest rozwinięte wyraźne zapadlisko, w obrębie którego strop podłoża podkenozoicznego osiąga rzędne –160 do –100 m npm (Ryc. 7A, B i C).

Wysad otaczają utwory jury górnej i kredy (Kicman, 1993). Ponad samym wysadem utwory kredy występują w postaci płytów o różnej grubości, pociętych skomplikowaną siecią uskoku normalnych i odwróconych.

Na profil utworów kenozoicznych składają się osady (Czapowski i in. 2005): a) eocenu: formacja jержmanowicka i formacja mosińska dolna (eocen górny i oligocen dolny), b) oligocenu: formacja czempińska z V czempińskim pokładem węgla brunatnego i formacja mosińska górna i c) miocenu: formacja krajeńska z węglem brunatnym II pokładu łużyckiego i formacja poznańska (miocen górny–pliocen?) z węglem brunatnym I pokładu śródkowopolskiego w spągu.



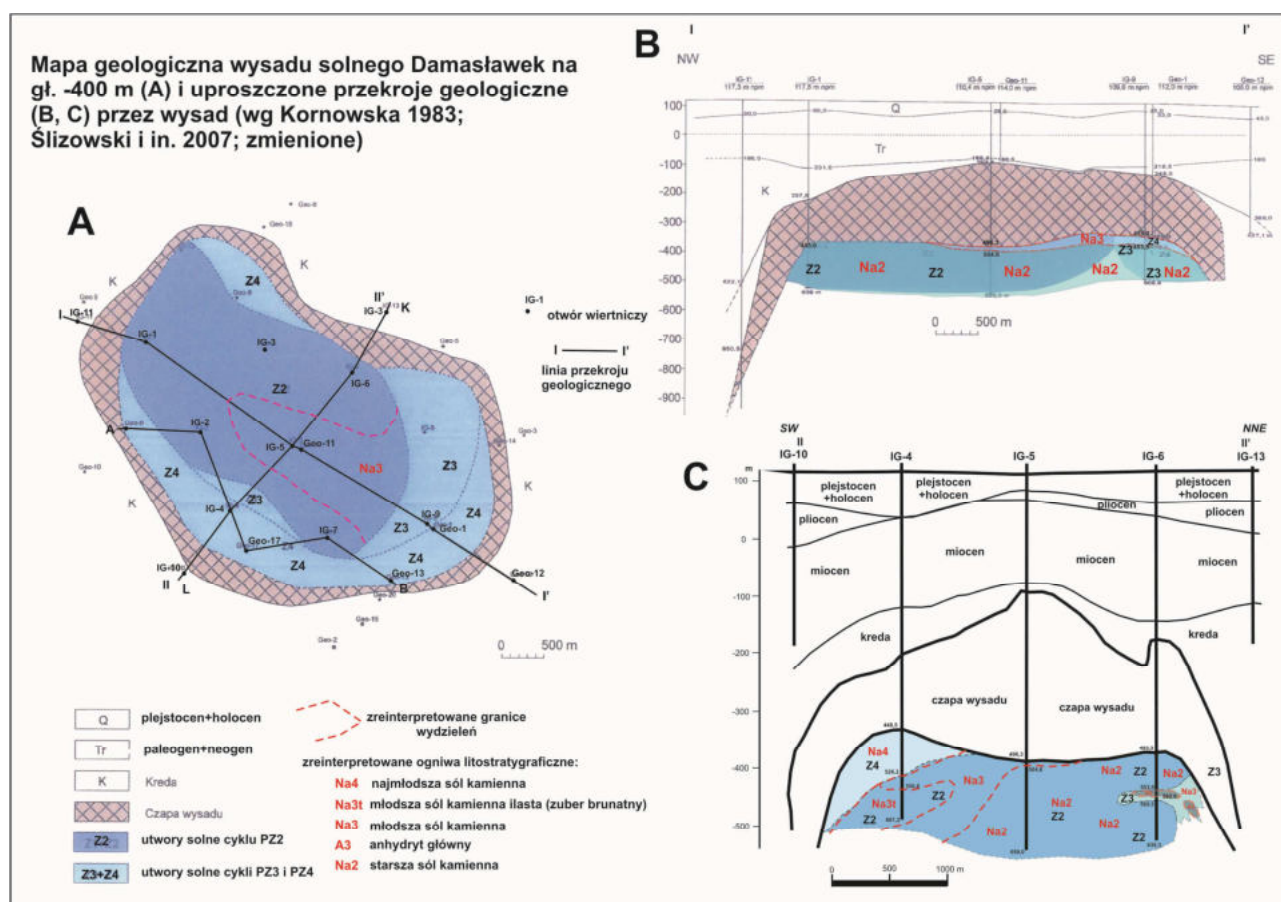
Ryc. 6 Czasowe przekroje sejsmiczne przez wysad solny Damastówek i poduszkę solną Janowiec (przekrój górny - a) oraz przez stropową część wysadu Damastówek (przekrój dolny - b) (wg Krzywiec, 2012).

Zarówno utwory kredowe jak i nadległe utwory paleogenu i neogenu są pocięte siecią uskoku, z których część jest ograniczona jest do najpłytszych partii nadkładu, część zaś przecina również strop wysadu solnego (Krzywiec, Kasiński, 2005).



Osady plejstocenu w strefie wysadu Damasławek to gliny zwałowe oraz piaski i żwiry wodnolodowcowe zlodowacenia środkowopolskiego, piaski fluwioglacjalne zlodowacenia północnopolskiego i glin zwałowe zlodowacenia północnopolskiego (Włodek, 2004). Osady holocenu to rzeczne piaski oraz mady i namuły organiczne.

Nad i w otoczeniu wysadu Damasławek stwierdzono (Kornowska, 1983) cztery piętra wodonośne: plejstocenijskie (1 poziom wodonośny), trzeciorzędowe (2 poziomy: eoceński i miocenijski), kredowy i cechsztyński (w utworach czapy wysadu), o silnej więzi hydraulicznej pomiędzy sobą.



Ryc. 7 Mapa geologiczna wysadu Damasławek na gł. -400 m (A) i uproszczone przekroje geologiczne (B, C) przez wysad (wg Kornowskiej, 1983 i Ślizowskiego i in. 2007, zmienione)

## 6 Monitoring geodynamiczny - metody pomiaru deformacji

Jednym z podstawowych założeń projektu było przetworzenie danych radarowych SAR metodą satelitarnej interferometrii radarowej InSAR. W tej części przedsięwzięcia można wydzielić dwa podzadania: przetwarzanie danych archiwalnych z systemów ERS-1/2, Envisat dla obszaru całego pasa wysadów oraz przetwarzanie rejestrowanych w trakcie trwania projektu wysokorozdzielczych danych z satelity TerraSAR-X dla rejonu wysadu Wapno. Interferometryczny monitoring wysadu Wapno prowadzono w oparciu o specjalnie zaprojektowane i wykonane w ramach projektu reflektory radarowe, które dla weryfikacji były mierzone za pomocą optycznej niwelacji precyzyjnej i niwelacji GNSS.

Wybrane metody gwarantowały precyzyjny pomiar deformacji terenu. Spodziewane, ewentualne deformacje nie przekraczały kilku mm/rok, stąd potrzeba zaplanowania i budowy geodezyjnej infrastruktury pomiarowej, która gwarantowałaby najwyższą dokładność pomiarów. Dla precyzyjnego określenia współrzędnych x, y, z zdecydowano się wykorzystać technologię GNSS, zaś dla walidacyjnych / weryfikacyjnych pomiarów składowej z, optyczną niwelację precyzyjną. Założono, że punkty pomiarowe stanowić będą jednocześnie reflektory do pomiarów interferometrycznych a jednocześnie zostaną wyposażone w uchwyty do montowania anten GNSS i repery do niwelacji precyzyjnej.

### 6.1 Niwelacja precyzyjna

Niwelacja precyzyjna jest szczególnym przypadkiem niwelacji geometrycznej, metody wyznaczania różnic wysokości znanej od czasów starożytnych. Pomiar różnic wysokości punktów odbywa się na podstawie pomiaru położenia poziomej osi celowej niwelatora na pionowo ustawionych na tych punktach łąkach niwelacyjnych. Zasady jej wykonania określa Instrukcja Techniczna G-4 "Pomiary sytuacyjne i wysokościowe".

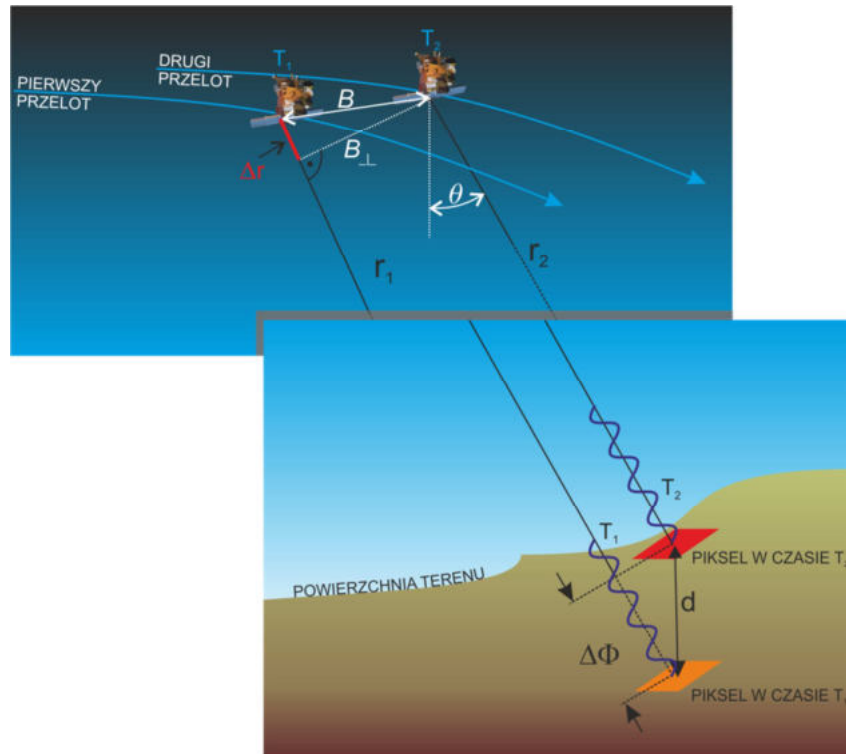
### 6.2 Pomiary GNSS

GPS (*Global Positioning System*) a obecnie szerzej GNSS (*Global Navigation Satellite System*) to technika najpowszechniej obecnie stosowana w pomiarach inżynierskich i geodezji. Technologia GNSS służyć może również do precyzyjnych pomiarów niwelacyjnych zwanych niwelacją satelitarną. Jest to pomiar różnic wysokości punktów wykonywany metodą precyzyjnego pozycjonowania przy pomocy odbiorników GNSS.

W rezultacie pomiarów i obliczeń wyznacza się wysokości ortometryczne na podstawie wysokości geometrycznych wyznaczanych techniką satelitarną GPS oraz informacji o ziemskim polu siły ciężkości, które pozwalają wyznaczyć odstęp geoidy od elipsoidy. Do regionalnych wyznaczeń modelu potencjału grawitacyjnego wprowadza się regionalne i lokalne anomalie grawimetryczne, a w podejściu lokalnym numeryczne modele terenu. Z uwagi na fakt, że wyznaczenie współrzędnej wysokościowej jest obarczone wyższym błędem niż współrzędnych horyzontalnych pomiary i obliczenia należy prowadzić z wykorzystaniem zaawansowanych metod (Stępnia et al., 2013).

### **6.3 Satelitarna Interferometria Radarowa InSAR**

Interferometria SAR (InSAR) to technika służąca do uzyskiwania informacji dotyczących względnych danych wysokościowych (Goldstein et al., 1988). Wykorzystuje ona różnice fazy sygnałów radarowych pochodzących z dwóch obserwacji mikrofalowych typu SAR (*Synthetic Aperture Radar*) tego samego obszaru (Ryc. 8). Dobry przegląd podstaw metodyki, potencjału i obszarów zastosowań InSAR można znaleźć w szeregu prac o charakterze podstawowym: (Bamler and Hartl, 1998; Bürgmann et al., 2000; Massonnet and Feigl, 1998; Perski, 1999). Tradycyjna technika InSAR opiera się na wykorzystaniu interferogramów tj. rastrowych zbiorów przedstawiających różnice fazy pomiędzy dwoma rejestracjami SAR. Nazywana jest ona metodą D-InSAR (*Differential – InSAR*) dla odróżnienia od technik wykorzystujących jednoczesne rejestracje przy użyciu dwóch anten SAR (Bistatic-InSAR). Podsumowując, **D-InSAR wykorzystuje rejestracje SAR wykonywane sekwencyjnie za pomocą jednej anteny SAR w czasie kolejnych przelotów satelity nad tym samym obszarem.**

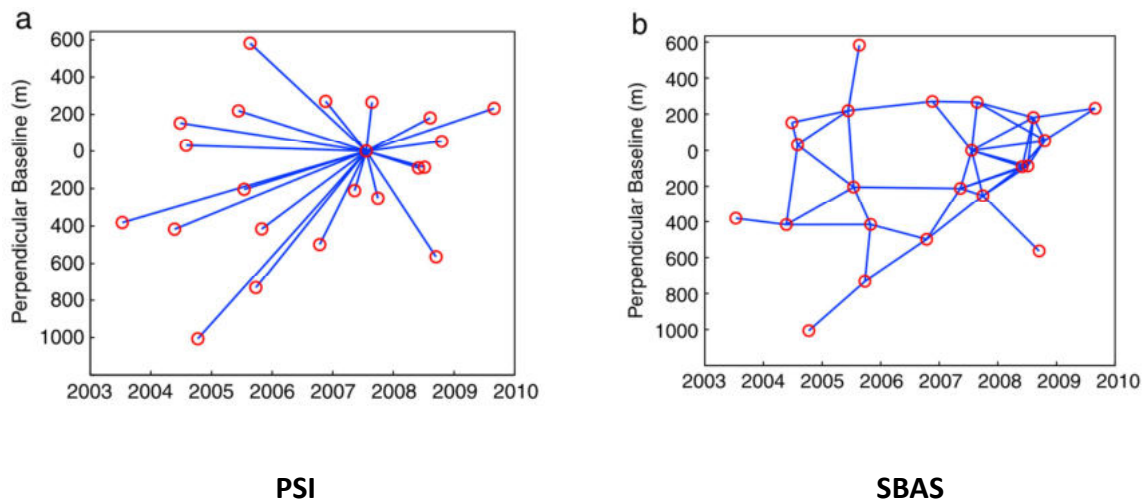


Ryc. 8 Geometria i zasada działania D-InSAR

Największe ograniczenia metody InSAR wiążą się z tzw. dekorelacją czasową (stopniową utratą koherencji w czasie), która związana jest ze zmianami właściwości elektromagnetycznych lub/i pozycją rozpraszacza wewnątrz komórki rozdzielczości (Cattabeni et al., 1994; Villasenor and Zebker, 1992). Kolejnym ograniczeniem metody InSAR jest występowanie tzw. artefaktów atmosferycznych. Zróżnicowana zawartość pary wodnej w troposferze a także jej turbulentny charakter są źródłem dodatkowej składowej fazowej sygnału nazywanej atmosferycznym obrazem fazy (*Atmospheric Phase Screen APS*). W przypadku pojedynczego lub jedynie kilku interferogramów dla danego obszaru efekty atmosferyczne są bardzo trudne lub wręcz niemożliwe do usunięcia, stąd uzyskiwane dokładności pomiarowe są często dużo niższe od oczekiwanych (Hanssen, 2005). Z powodu wymienionych ograniczeń praktyczne użycie metody InSAR jest w większości przypadków zredukowane do danych o małych bazach czasowych, przypadków badania zjawisk o dużych przyrostach deformacji zachodzących w czasie pomiędzy kolejnymi rejestracjami, badania obszarów pozbawionych roślinności, przypadków, gdy oba obrazy użyte do konstrukcji interferogramu zostały zarejestrowane w tych samych bądź bardzo zbliżonych warunkach atmosferycznych.

Ominięcie podstawowych ograniczeń metody InSAR i jej rozwinięcie w kierunku analiz szeregów czasowych (MTI – *Multi Temporal InSAR*) okazało się możliwe dzięki zastosowaniu metod punktowych, opartych na selekcji pikseli zachowujących koherencję w czasie. Charakteryzują je różne strategie przetwarzania i selekcji koherentnych pikseli. Pierwsza tego typu metoda (PSI – *Persistent Scatterers SAR interferometry*) została opracowana w końcu lat '90 XX wieku przez zespół POLIMI z Politechniki w Mediolanie (Ferretti et al., 1999). Wykorzystuje ona właściwości rozpraszaczy stabilnych (PS). Była ona pierwszą opracowaną i wdrożoną w praktyce metodą analiz wieloczasowych SAR. Główną ideą metody PSI jest dekompozycja serii interferometrycznych obserwacji fazowych na trzy podstawowe składowe: deformacji, wysokości względnej i APS dla pikseli spełniających warunek PS. Podstawowym warunkiem prawidłowego przeprowadzenia dekompozycji sygnału jest odpowiednia liczba obserwacji, stąd wymaganie co najmniej 20 interferogramów.

Kolejne rozwinięcia metody wykorzystują koherencję; metoda StaMPS – (Hooper et al., 2004) oraz wykorzystanie interferogramów o krótkich bazach, metoda SBAS – (Berardino et al., 2002). Metoda SBAS (*Small Baseline Subsets*) wykorzystuje wszystkie najkorzystniejsze kombinacje interferometryczne w obrębie serii (Ryc. 9). Ma to na celu obliczenie serii interferogramów w taki sposób by miały one jak najwyższą koherencję.



Ryc. 9 Wykresy odległości bazowych w stosunku do baz czasowych dla par interferometrycznych tego samego zestawu danych. Niebieskie linie pokazują w jaki sposób tworzy się pary interferometryczne w metodzie a) PSI i b) SBAS (Hooper et al., 2012).

## 6.4 CRInSAR - Satelitarna Interferometria z wykorzystaniem reflektorów radarowych

Ze specyfiki obrazowania mikrofalowego SAR wynika, że wartość zarejestrowanego sygnału jest koherentną sumą odbić od obiektów elementarnych znajdujących się wewnątrz komórki rozdzielczości (*resolution cell*). Moc odebranego sygnału zależy od nachylenia powierzchni odbijającej w stosunku do kąta padania fali radarowej, właściwości dielektrycznych powierzchni oraz jej szorstkości. W zależności od rodzaju pokrycia terenu tylko część sygnału ulegającego rozproszeniu zostaje odbita w stronę anteny SAR. Ten typ rozproszenia nazywamy rozproszeniem wstecznym (*backscattering*). Jeśli w obrębie komórki rozdzielczości występuje element charakteryzujący się bardzo wysokim rozpraszaniem wstecznym to właśnie jego amplituda będzie sygnałem dominującym dla wartości piksela. Dla obiektów tego typu obie składowe sygnału: faza i amplituda wykazują bardzo wysoką stabilność w czasie (dla kolejnych obserwacji). Obiekty takie, dzięki swoim właściwościom, nazywane są obiektami koherentnymi (*coherent targets*), rozpraszaczami koherentnymi (*coherent scatterers*) albo rozpraszaczami stabilnymi (PS: *persistent scatterers, permanent scatterers*). Rozpraszacze stabilne wykorzystuje się w satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR) w tzw. metodzie interferometrii rozpraszaczy stabilnych (PSI).

Rozpraszacze stabilne to obiekty charakteryzujące się silnym rozpraszaniem wstecznym, które jest dominującym sygnałem dla danej komórki rozdzielczości. Obiekty takie można scharakteryzować za pomocą wysokich wartości tzw. radarowego przekroju skutecznego RCS (*Radar Cross Section*). Najogólniej mówiąc RCS danego obiektu jest to ekwiwalent płaskiej powierzchni izotropowo odbijającej fale elektromagnetyczne, jaka byłaby potrzebna do odbicia tej samej mocy sygnału (Henderson and Lewis, 1998). Na obszarach zurbanizowanych mamy do czynienia z grupami obiektów zbudowanych z płaskich, gładkich powierzchni o różnym nachyleniu takimi jak ściany czy dachy budynków o niejednokrotnie wysokiej stałej dielektrycznej (powierzchnie metalowe).

Oprócz obiektów, które działają jak rozpraszacze stabilne, istnieje możliwość celowego instalowania urządzeń zapewniających odbicie sygnału radarowego w żądany sposób. Obiekty takie nazywamy **reflektorami radarowymi**. Stosuje się je w dwóch podstawowych przypadkach:

1. Dla uzupełnienia sieci naturalnych stabilnych rozpraszaczy. Reflektory instaluje się wówczas w miejscach pozbawionych infrastruktury bądź wychodni skalnych – na

obszarach upraw rolnych bądź nieużytków. Dla uzyskania optymalnych wyników instalację reflektorów należy w takim przypadku poprzedzić interferometryczną analizą danych archiwalnych dla danego obszaru.

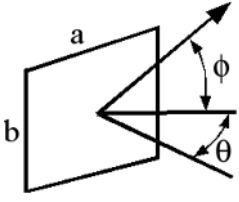
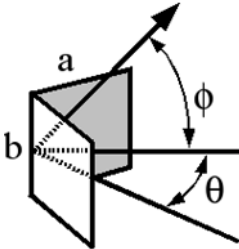
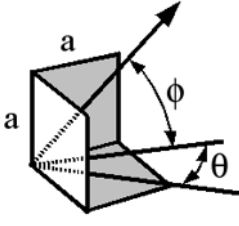
2. Dla walidacji wyników. Reflektor radarowy jest jedynym obiektem, gdzie interferometryczny pomiar deformacji można bezpośrednio odnieść do wyników pomiarów geodezyjnych. Reflektor radarowy ma ściśle zdefiniowane fizyczne centrum fazowe, które można zmierzyć metodami geodezyjnymi (za pomocą niwelacji precyzyjnej czy GNSS). Pomiar taki zapewnia absolutną integrację pomiarów interferometrycznych z pomiarami geodezyjnymi i geodezyjnym układem odniesienia. Reflektory walidacyjne są jednocześnie uzupełnieniem sieci naturalnych rozpraszaczy (patrz pkt 1).

Rozpraszanie mikrofalowe, jakie zachodzi w przypadku reflektorów radarowych można sprowadzić do trzech elementarnych przypadków tzw. rozpraszaczy podstawowych (*canonical scatterers* – Franceschetti et al., 2002), do których należą (Inglada et al., 2004):

1. Rozpraszacz jednopowierzchniowy lub zwierciadlany (*specular scatterer*),
2. Rozpraszacz dwuścienny (*dihedral scatterer*),
3. Rozpraszacz trójścienny (*trihedral scatterer*).

Charakterystyki i geometrię poszczególnych typów rozpraszaczy elementarnych przedstawiono w Tabeli 4.

Tab. 4 Charakterystyka typów rozpraszaczy elementarnych (Perski et al., 2006).

Typ rozpraszacza	Nazwa	RCS	Uwagi
	Jednopowierzchniowy (Płaszczyznowy) ( <i>Specular</i> )	$\sigma = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$	Rozpraszanie wsteczne największe przy prostopadłym ustawieniu reflektora.
	Dwupowierzchniowy (Dwuścienny) ( <i>Dihedral</i> )	$\sigma = \frac{8\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$	Rozpraszanie wsteczne zmniejsza się gwałtownie wraz ze zmianą kąta $\phi$ . Mała wrażliwość na zmiany kąta $\theta$ .
	Trójpowierzchniowy (Trójścienny) ( <i>Trihedral</i> )	$\sigma = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2}$	Największe rozpraszanie wsteczne w stosunku do innych typów, najmniejsza wrażliwość na zmiany kątów $\phi$ i $\theta$ .

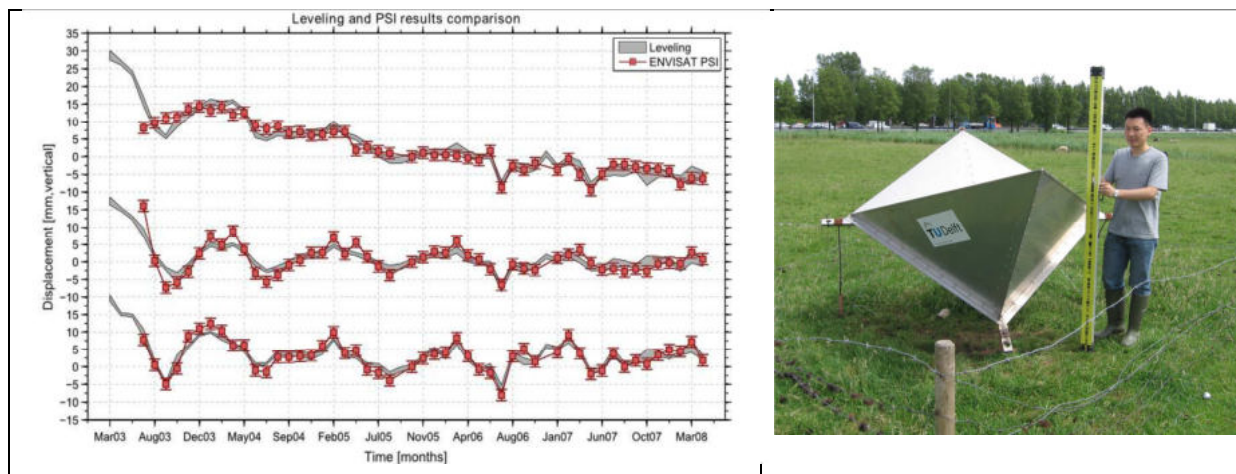
Z uwagi na dużą efektywność i małą wrażliwość na błędy orientacji najczęściej stosowany typem reflektora jest reflektor trójścienny (*Trihedral*). Z uwagi na kształt jest zwany reflektorem narożnikowym (*Corner Reflector* - CR). Reflektory narożnikowe były od początku stosowane do walidacji i testów dokładnościowych radarowych systemów satelitarnych. Do walidacji pomiarów interferometrycznych użyto ich po raz pierwszy w marcu 1992 roku w trakcie tzw. „*Bonn Experiment*” (Hartl et al. 1993; Prati et al. 1993). 19 reflektorów trójściennych skonstruowanych przez Instytut Nawigacji Uniwersytetu w Stuttgarcie, o rozmiarach przyprostokątnej 1,4 m (RCS = 37 dB sqm) zbudowanych z pełnych blach aluminiowych rozmieszczono w terenie w okolicy Bonn. Reflektory rozmieszczono w odległościach od 500 do 100 m wzdłuż liniowego ciągu równoległego do kierunku LoS (*Line of Sight* – kierunek padania wiązki radarowej). Reflektory umieszczono na ramowych podstawach zbudowanych z rur stalowych, 7 z nich miało możliwość regulacji pionowej, skokowo o odpowiednio 1 cm, 5 cm, 10 cm i 20 cm. Reflektory wychylono o 24,5° od poziomu, w kierunku satelity. Współrzędne każdego z reflektorów mierzono za pomocą odbiornika GPS. W dniach 23 i 26 marca zespół terenowy TU Stuttgart dokonał przemieszczenia wybranych reflektorów nie informując o tym zespołu przetwarzającego dane



(Politechnico Milano). Nad całościową koordynacją eksperymentu czuwał zespół specjalistów ESA. Różnicowe pomiary interferometryczne (pomiędzy reflektorem a jego otoczeniem) wykazały przemieszczenia reflektorów nr 9 i 11 dla par interferometrycznych 23.03 – 29.03 i 26.03 – 29.03 odpowiednio o 7 mm i 9 mm. Zespół terenowy dokonał zmiany wysokości reflektorów 9 i 11 o 10 mm. Eksperyment potwierdził wysoką dokładność i ogromną przydatność interferometrii do praktycznych zastosowań.

Od czasu „Eksperymentu z Bonn” reflektory radarowe stosowane były w szeregu innych eksperymentach walidacyjnych, pracach badawczych. Ponadto są one stosowane w przemysłowych systemach monitoringu, których wyniki z uwagi na komercyjny charakter nie są publikowane.

Ważnych danych na temat efektywności systemów SAR satelitów ERS-2 i Envisat dostarczył 5-letni eksperyment DCRE (*Delft Corner Reflector Experiment*) realizowany przez zespół TU Delft w latach 2003 – 2007 (Marinkovic et al., 2007). 5 trójściennych reflektorów o wymiarach 1,5 m wykonanych z pełnej blachy aluminiowej zlokalizowano na płaskim obszarze pastwisk między Rotterdamem a Delft (Ryc. 10). Były one mierzone za pomocą niwelacji precyzyjnej dzień po każdej rejestracji satelitarnej. Dla integracji wyników i prawidłowej ich walidacji wewnętrznej stosowano tzw. podwójne różnice (w czasie i pomiędzy sąsiednimi reflektorami). Po uwzględnieniu poprawek na lokalizację reflektora wewnątrz komórki rozdzielczości (Perrisin, 2006) otrzymano dokładność wyznaczenia wysokości reflektora (dla podwójnych różnic) na poziomie 1,6 mm. Oznaczało to, że dokładność pomiaru interferometrycznego jest na poziomie niwelacji II klasy (wg. Instrukcji Technicznej G-2 Głównego Geodety Kraju) i może być on stosowany w pomiarach geodynamicznych.



Ryc. 10 DCRE (*Delft Corner Reflector Experiment*) – przykładowe serie czasowe dla reflektorów (Marinkovic et al, 2007) . Z prawej widok ogólny reflektora (fot. Autor).

Dla obliczeń interferometrycznych reflektory radarowe stanowią szczególną sieć PS, którą wykorzystuje się do obliczeń. Obliczenia wykonuje się metodą PSI, jednak w znacznie uproszczonej wersji. Dla reflektorów CR znane bowiem są współrzędne X, Y, Z centrum fazowego reflektora, które można dokładnie zmierzyć metodami geodezyjnymi. W związku z tym nie jest konieczne wyszukiwanie PSC za pomocą analizy amplitudy. Reflektory zazwyczaj nie są zbyt odległe od siebie i nie jest wymagana korekta atmosferyczna (różnice APS pomiędzy reflektorami są zanedbywalne). Wymagana jest jedynie korekta fazy uwzględniająca położenie reflektora wewnątrz komórki rozdzielczości (Perissin, 2006).

## 7 Interferometryczna analiza archiwalnych zobrazowań radarowych pasa wysadów solnych Nizy Polskiego

### 7.1 Dane archiwalne ERS-1, ERS-2 i Envisat

Na potrzeby projektu wykorzystano dane archiwalne zarejestrowane przez systemy ERS-1, ERS-2 i Envisat w latach 1992 – 2012 (Tab. 5). Dane te były udostępniane nieodpłatnie dla zarejestrowanych użytkowników naukowych przez Europejską Agencję Kosmiczną na potrzeby konkretnych zadań badawczych. Od 2017 roku dane te są dostępne nieodpłatnie dla wszystkich zarejestrowanych użytkowników bez dodatkowych restrykcji.

Dane te posłużyły do próby regionalnego określenia współczesnej aktywności pasa wysadów solnych.

Tab 5. Parametry techniczne rejestracji ERS1/2 i Envisat

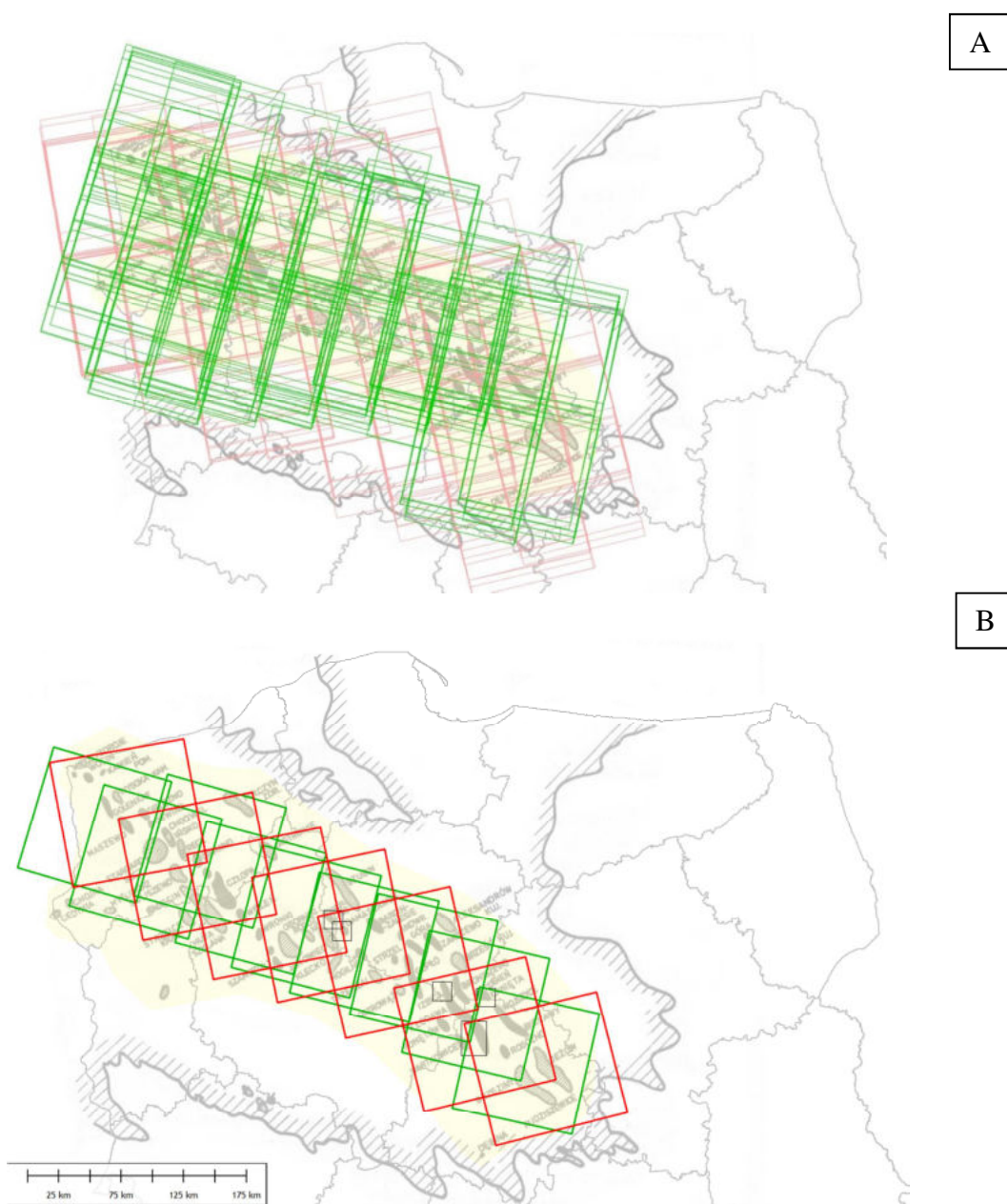
Rodzaj danych	SAR RAW		
Satelita	ERS-1	ERS-2	Envisat
Tryb obrazowania	Strip Map		
Pasma C dł. fali	5,7 cm	5,7 cm	5,6 cm
Rodzaj rejestracji	Descending, right-looking		asc/dsc, right-looking
Numer ścieżki ( <i>track</i> )	036 (Lewino), 136 (Berejów), 494 (Babiak)		
Kąty obrazowania	25° - 29° (środek sceny 23°)		
Liczba użytych scen	878 (descending)		173 (descending) 216 (ascending)

Radary SAR satelitów ERS-1 i ERS-2 miały identyczne charakterystyki w związku z czym można je objąć wspólnym przetwarzaniem danych. Dane Envisat, z uwagi na

nieznacznie inną długość fali muszą być przetwarzane oddzielnie. Łączenie zbiorów odbywało się w domenie wyników.

Nominalne sceny ERS-1/2 i Envisat obejmują obszar 100 x 100 km o rozdzielczości terenowej ok. 25 m. Zasięg scen użytych do przetwarzania poszczególnych obszarów przedstawia

Ryc. 11. Z uwagi na małą liczbę scen dla danych ERS-1/2 nie brano pod uwagę geometrii descending.



**Ryc. 11 A:** zasięgi użytych scen ERS-1/2 i Envisat na tle struktur solnych Niżu Polskiego (wg. Garlicki , Szybist 1986) (czerwony: geometria ascending, zielony: geometria descending); **B:** zasięgi przetwarzanych scen po połączeniu

### **i przycięciu w obrębie pasów obrazowania)**

Do przetwarzania użyto surowych danych typu RAW. Standardowo focusing SAR jest wykonywany po stronie operatora satelitarnego a odbiorca otrzymuje odpowiednio przetworzone produkty. Proces focusingu SAR obejmuje następujące elementy:

- Range (chirp) compression – formowanie rozdzielczości w kierunku zasięgu
- Deskewing (zero doppler processing) i range migration (korekta przesunięć obiektów związanych z kątem skręcenia w kierunku zasięgu)
- Azimuth focusing (formowanie rozdzielczości w kierunku azymutu)
- Multilooking – poprawienie radiometryczne obrazu przez podział spektrum doppler'a na składowe (looks) i zsumowanie (niezależnych looks)

Dla większości zastosowań danych radarowych nie ma zatem potrzeby sięgania po surowe dane SAR. Inaczej jest w przypadku masowego przetwarzania i analizy danych w satelitarnej interferometrii radarowej. Rozmiar plików RAW jest 2-3 krotnie mniejszy aniżeli stosowanych dotychczas zbiorów SLC (Single Look Complex). Zastosowanie zbiorów RAW ułatwia przechowywanie danych jak również ich transfer. Dla interferometrii wykonywanie focusingu po stronie odbiorcy ma jeszcze dwa ważne aspekty:

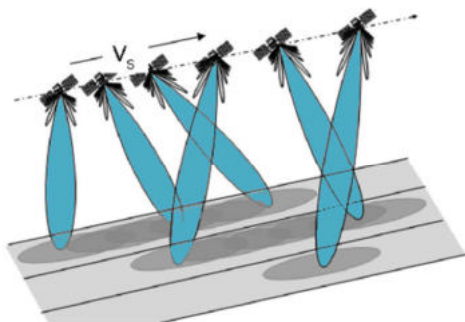
1. Możliwy jest focusing do jednej, zadanej wartości tzw. 'doppler'a" dla całej serii danych. W przypadku danych SLC, każda scena ma ustaloną wartość „doppler'a" indywidualnie (tzw. zero doppler processing). Skutkuje to występowaniem dodatkowych szumów, które trzeba usuwać w trakcie przetwarzania (metodą filtracji częstotliwościowej).
2. Zbiory RAW można łatwo łączyć ze sobą wzdłuż pasa rejestracji. Dzięki temu jednolitym przetwarzaniem można objąć większy obszar bez potrzeby późniejszego łączenia wyników w obrębie pasa.

Dane Envisat obejmują okres od 4 listopada 2002 roku do 9 maja 2012 roku kiedy to satelita uległ nieodwracalnej awarii. Zarejestrowanych zostało niewiele scen dla rejonu badań, co wiąże się z niskim priorytetem obserwacji obszaru. Mała liczba scen powoduje duże wartości baz czasowych dla poszczególnych interferogramów i niskie wartości koherencji, co znacznie utrudnia obserwację serii czasowych.

### 7.1.1 Dane Sentinel-1

W momencie tworzenia wniosku projektowego dane Sentinel-1 nie były brane pod uwagę dla przetwarzania całego obszaru pasa wysadów solnych. W trakcie prac nad nowymi modułami oprogramowania InTOP okazało się, że dodanie funkcjonalności wielkoobszarowego opracowywania danych Sentinel-1 jest możliwe w ramach modułu WAP.

Misja Sentinel-1 jest częścią europejskiego programu Copernicus i wszystkie dane są dostępne nieodpłatnie. Zakończone sukcesem wystrzelenie satelity Sentinel-1A nastąpiło 03 kwietnia 2014 r. a 1B 22 kwietnia 2016 r. Dane Sentinel-1 dla obszarów lądowych są rejestrowane w typie *Interferometric Wide* (IW), który jest realizowany za pomocą trybu TOPS (*Terrain Observation by Progressive Scans*). Tryb ten umożliwia rejestrację pasa obrazowania o szerokości 250 km przy zachowaniu rozdzielczości terenowej ok. 25 m. Rejestracja odbywa się impulsowo (*Bursts*) dla 3 pod-ścieżek (*sub-swath*) – IW1, IW2, IW3 (Ryc. 12).



Ryc. 12 Rejestracja danych SAR w trybie TOPS (De-Zan and Guarnieri, 2006)

Rejestracja każdej pod-ścieżki odbywa się z jednoczesnym elektronicznym sterowaniem wiązki w kierunku azymutu. Ruch wiązki – od tyłu do przodu.

W opracowaniu wykorzystano dane zarejestrowane w okresie od 2014.12.01 do 2019.11.29.

## 7.2 Środowisko obliczeniowe InTOP

InTOP (InSAR Toolbox Of PGI) to nazwa specjalistycznego oprogramowania dla InSAR rozwijanego w PIG-PIB. Dostępne jest ono w dwóch odmianach: desktopowej (open source), która obejmuje podstawową funkcjonalność interferometryczną. Wersja ta może służyć jako

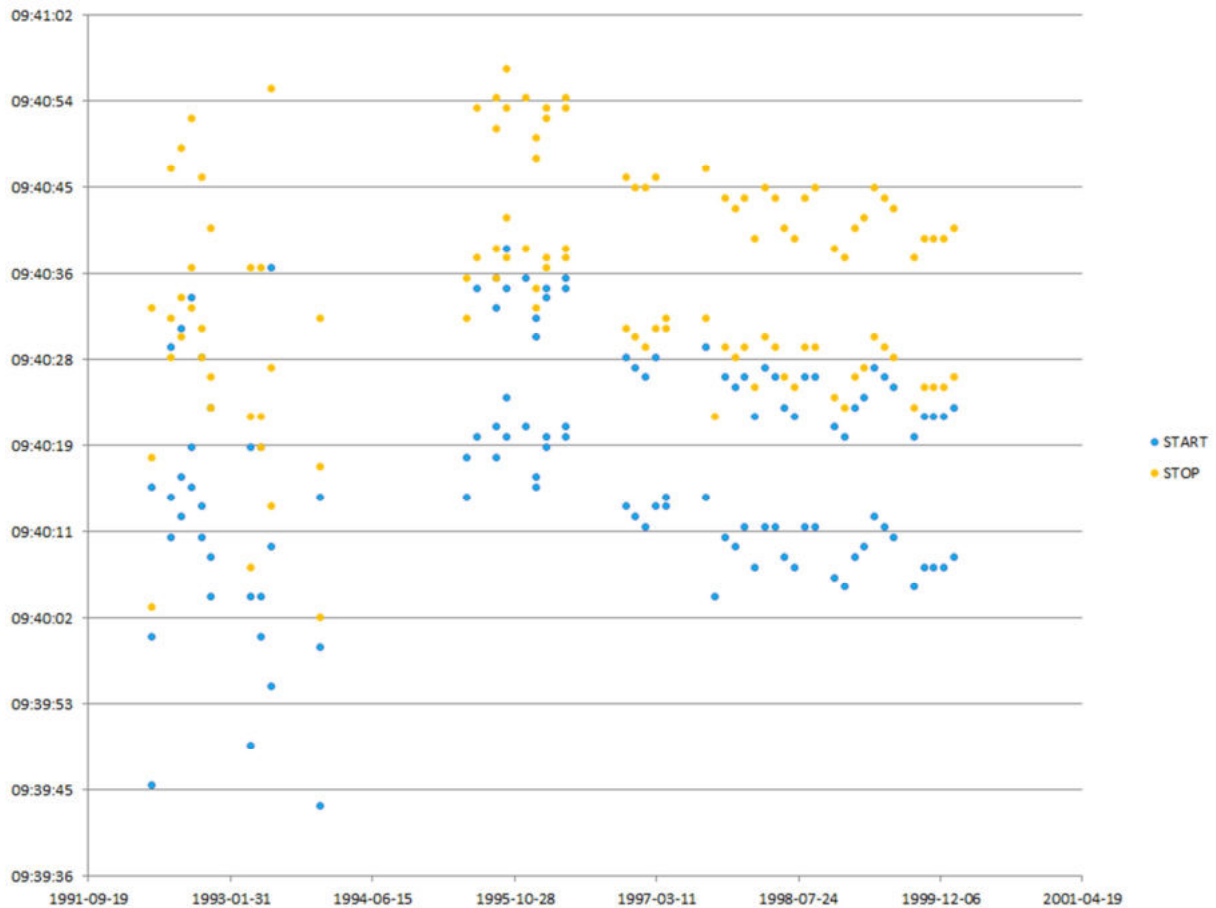
demonstrator, do opracowywania niewielkich projektów oraz w celach edukacyjnych. Druga odmiana, serwerowa jest zainstalowana na serwerze obliczeniowym OK-InSAR PIG-PIB ze zdalnym dostępem. Zawiera ona moduły dla pełnej funkcjonalności zakładanej w projekcie i służy do masowego przetwarzania ogromnych ilości danych InSAR. Takie rozwiązanie jest jedynym jakie pozwala na przetwarzanie danych z satelity Sentinel-1. Zgodnie z umową, odmiana serwerowa może być wykorzystywana i udostępniana tylko pracownikom PIG-PIB. W ramach zadania oprogramowanie InTOP zostało wyposażone w dodatkowe moduły: Moduł SAR StripMap data Focusing (SMF) umożliwiający wykorzystywanie surowych danych typu RAW jako materiału źródłowego w analizach InSAR; Moduł Wide Area Processing (WAP): umożliwiający optymalizację przetwarzania danych wielkoobszarowych; Moduł Homogeneous Distributed Scatterers (HDS): służący do opracowywania i analizy serii obrazów SAR pod kątem tzw. rozpraszaczy semi-stabilnych.

Wszystkie obliczenia omówione w niniejszym raporcie zostały przeprowadzone w środowisku InTOP.

## **7.3 Obliczenia interferometryczne i wyniki**

### **7.3.1 Opracowanie danych ERS-1/2 i Envisat**

W opracowaniu wykorzystano łącznie 889 scen ERS-1/2 zarejestrowanych wzdłuż 9 pasów obrazowania (Ryc. 13). Każdy pas obrazowania musiał być przetwarzany oddzielnie, a łączenie i homogenizacja danych odbywały się w domenie wyników. Ogromnym wyzwaniem okazała się nieregularność rejestracji w czasie i przestrzeni w obrębie każdego z pasów. Z uwagi na niski priorytet obserwacji dużej części obszarów pasy obrazowania są niepełne, a wyłączenia i włączenia rejestracji następują w nieoczekiwanych miejscach. Czas włączenia i wyłączenia warunkuje długość rejestrowanego pasa jak i lokalizację początku i końca w trakcie przelotu satelity z północy na południe (descending). Sytuację tą dobrze objaśnia wykres na Rys. 8. Przedstawiono tam czasy początków i końca rejestracji dla każdej ze scen ścieżki 494. Bardzo duże skoki występują w latach 1992 – 1993 oraz 1995 – 1997.



Ryc. 13 Wykres czasów początku i końca rejestracji scen dla ścieżki 494

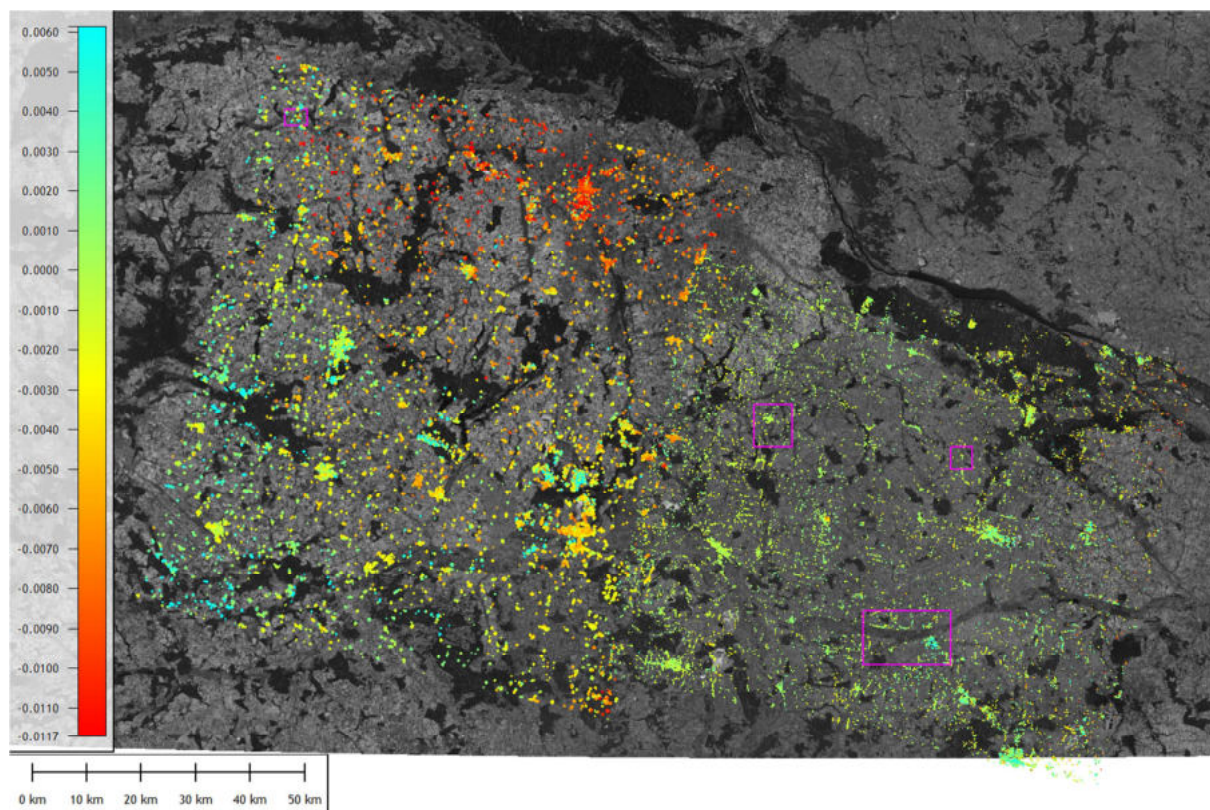
Warto również zwrócić uwagę na brak danych z 1994 roku. Przerwa była spowodowana przestawieniem anteny w inne tryby rejestracji, które dodatkowo nie były praktycznie wykonywane dla terenu Polski. Niewielka liczba scen z lat 1992 i 1993 oraz roczna przerwa zdecydowały ostatecznie o odrzuceniu tej części danych. Ponadto część ze scen rejestrowanych w latach 1995 – 1997 również musiała być odrzucona przez brak wspólnego pokrycia dla obszaru badań.

### 7.3.2 Wyniki opracowania danych ERS-1/2 i Envisat

W początkowej fazie projektu opracowano pilotażowo metodą SBAS archiwalne dane ERS-1/2 SAR dla obszaru jednej sceny ze ścieżki 494. W późniejszym okresie opracowaniem objęto wszystkie dostępne dane starając się by obszar opracowania pokrywał jak największą część pasa wysadów solnych w Polsce. Niestety z uwagi na niewielką liczbę scen w poszczególnych ścieżkach i niską koherencję wiarygodne wyniki dla przetworzeń udało się wykonać jedynie dla scen ERS-1/2 ze ścieżek 494 oraz 036.

### 7.3.2.1 Szczegółowe opracowanie danych archiwalnych dla badanych poligonów

Metodą SBAS opracowano archiwalne dane ERS-1/2 SAR dla obszaru ścieżek 494 i 036. Dane te (38 scen dla ścieżki 494 oraz 9 scen dla ścieżki 036) obejmowały okres 1993 – 2000 roku. Obszar opracowania obejmuje swym zasięgiem wszystkie poligony badawcze Wapno, Damasławek, Łanięta, Izbica Kujawska i Łęczyca (Ryc. 14).



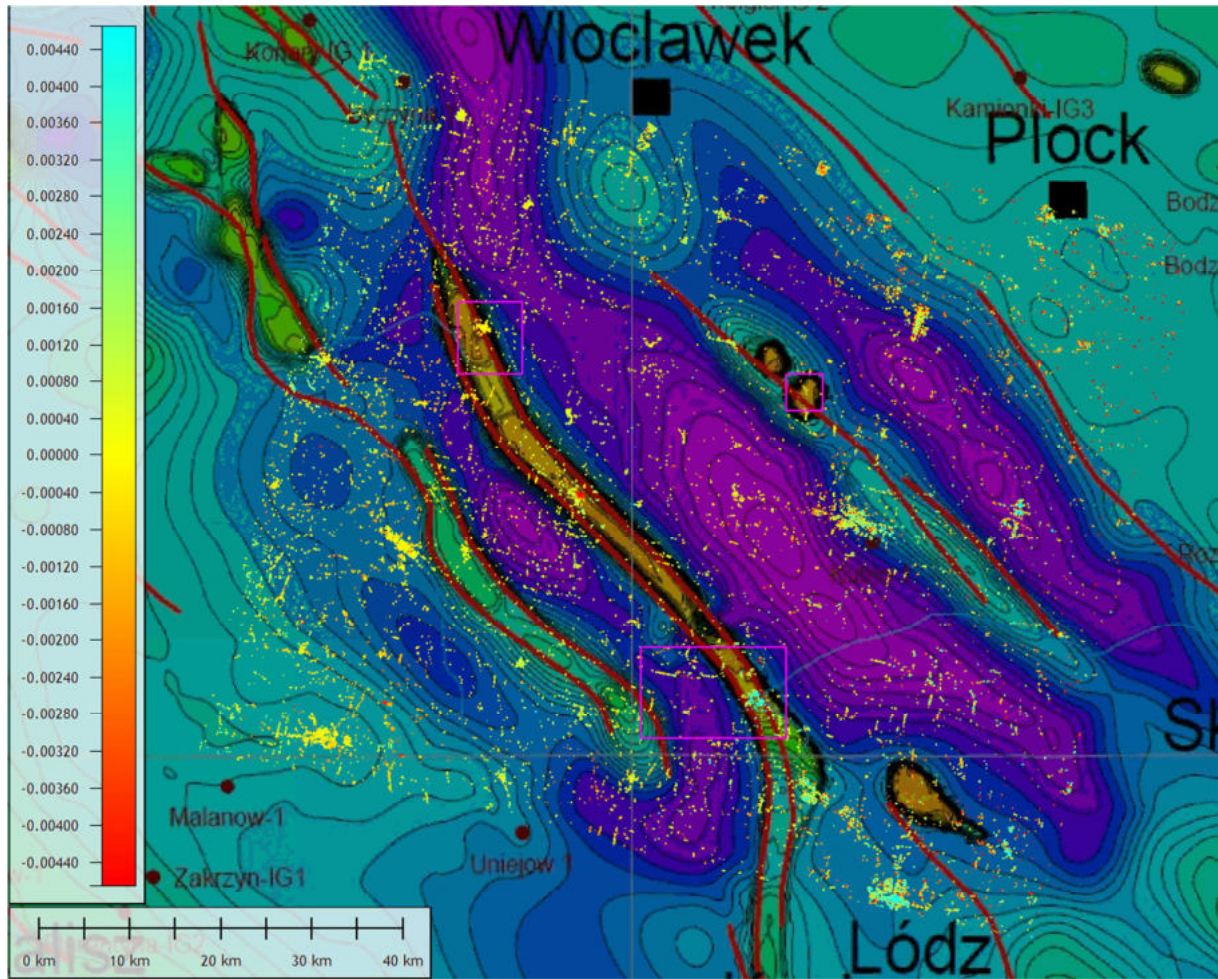
Ryc. 14 Wyniki opracowania danych ERS-1/2 dla ścieżek 494 i 036. Deformacja [m/rok]

**UWAGA:** magnitudy przemieszczeń w kierunku LoS. Kolor czerwony (przemieszczenia od satelity – wartości ujemne) oznacza obniżanie; Kolor niebieski (przemieszczenia do satelity – wartości dodatnie) oznacza podnoszenie

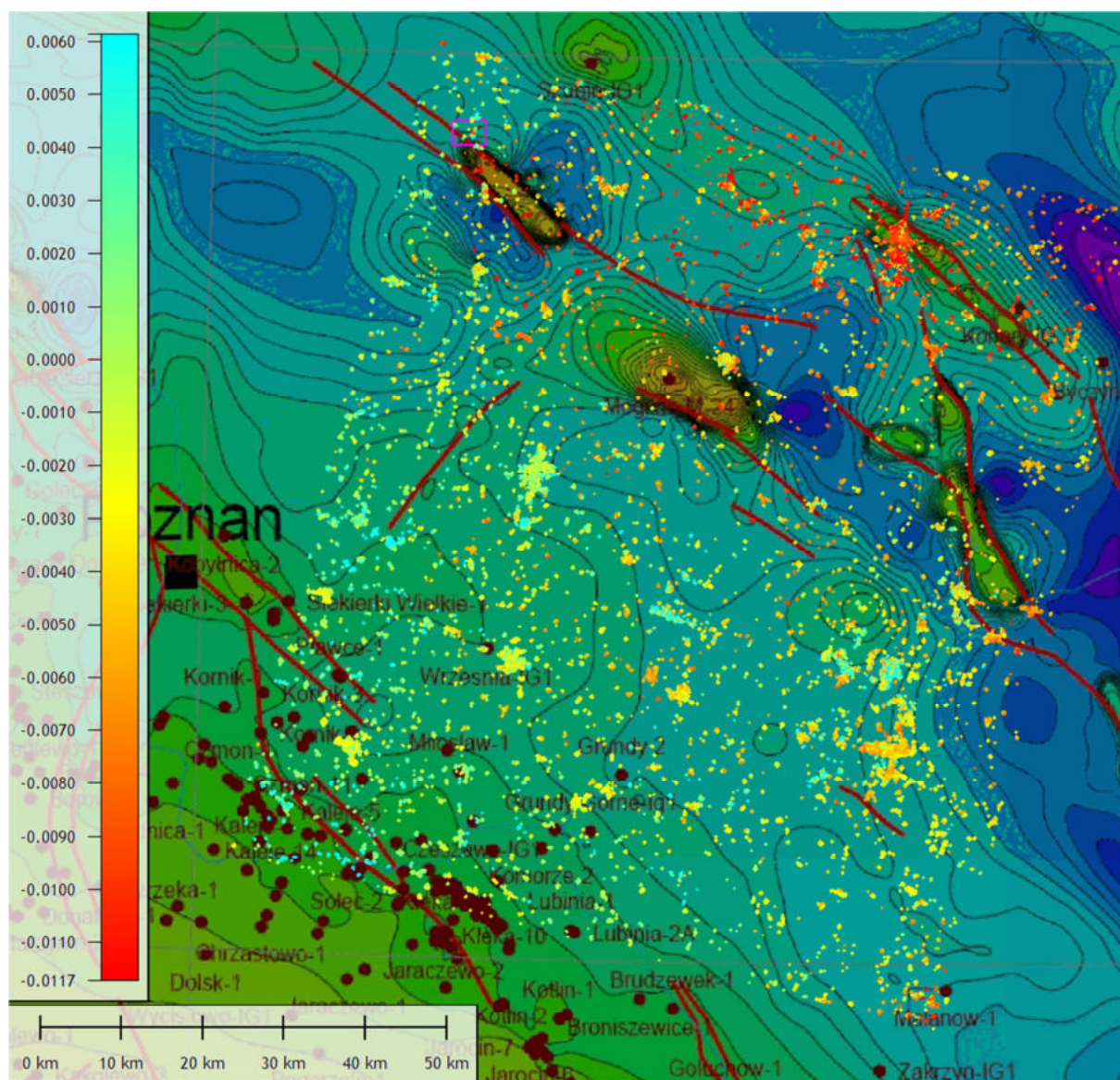
Opracowany obszar obejmuje swym zasięgiem całą strukturę Izbica Kujawska-Łanięta (Ryc. 15) oraz strukturę Wapno-Damasławek (Ryc. 16).

Względne ruchy powierzchni terenu na obszarze opracowania nie przekraczają w większości przypadków zakresu -4 do +4 mm/rok. Dla badanego obszaru zidentyfikowano łącznie nieco ponad 500 tys. punktów DS. Ich rozmieszczenie jest nieregularne i skupia się na terenach zurbanizowanych, pojedynczych budynkach i elementach naziemnej infrastruktury technicznej.





Ryc. 15 Wyniki opracowania danych ERS-1/2 dla ścieżki 494 na tle mapy strukturalnej powierzchni stropu cechsztynu (Papiernik 20120. Deformacja [m/rok]



Ryc. 16 Wyniki opracowania danych ERS-1/2 dla ścieżki 036 na tle mapy strukturalnej powierzchni stropu cechszynu (Papiernik 2012). Deformacja [m/rok]

Analizując otrzymane dane w skali lokalnej da się zauważyć szereg anomalii, które dobrze korelują z występowaniem struktur solnych.

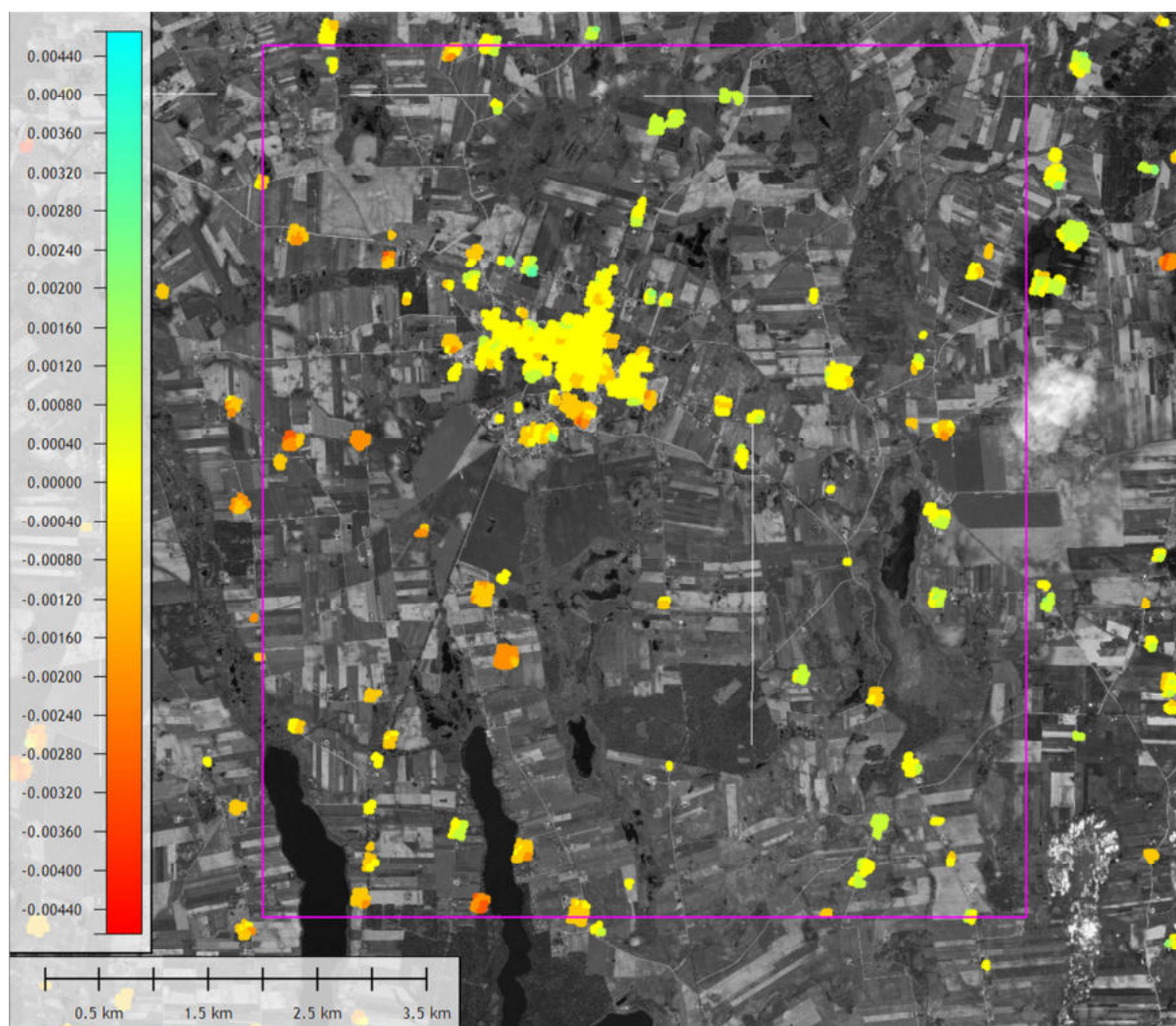
### 7.3.2.2 Struktura Izbica Kujawska – Łęczyca

Obszar objęty poligonem Izbica Kujawska nie wykazywał przemieszczeń w badanym okresie (Ryc. 17). Na obszarze struktury Izbica Kujawska – Łęczyca stwierdzono natomiast dwie duże anomalie, które mogą mieć związek z aktywnością struktur solnych.

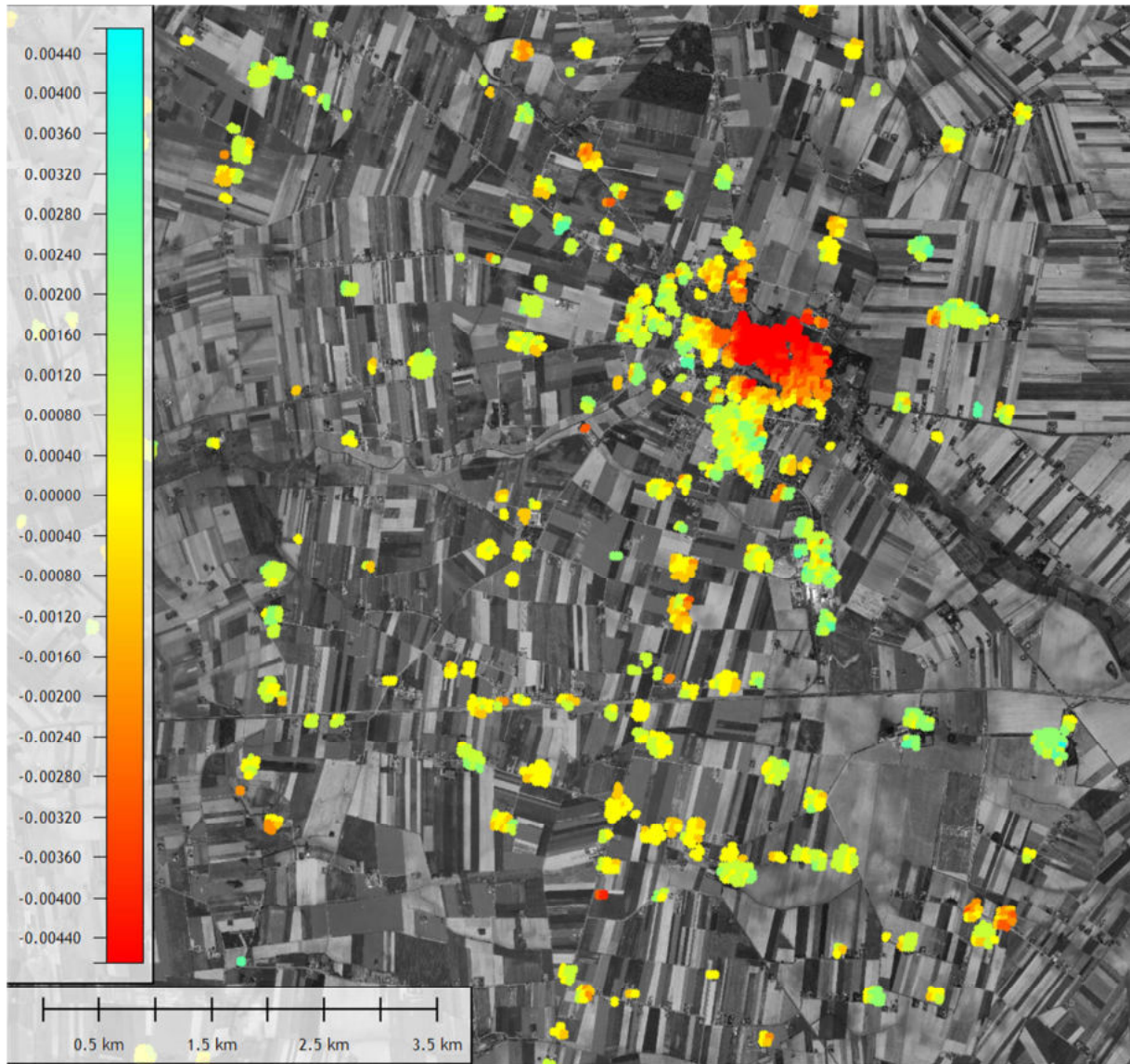
Anomalia Kłodawy: na terenie obszaru zabudowanego stwierdzono występowanie sporej grupy punktów DS wykazujących obniżanie o maksymalnej wartości 7,5 mm/rok (Ryc. 18).

Anomalia ta ma ok. 2 km średnicy. Może być ona związana z procesami naturalnymi bądź też z aktywnością wydobywczą na obszarze wysadu.

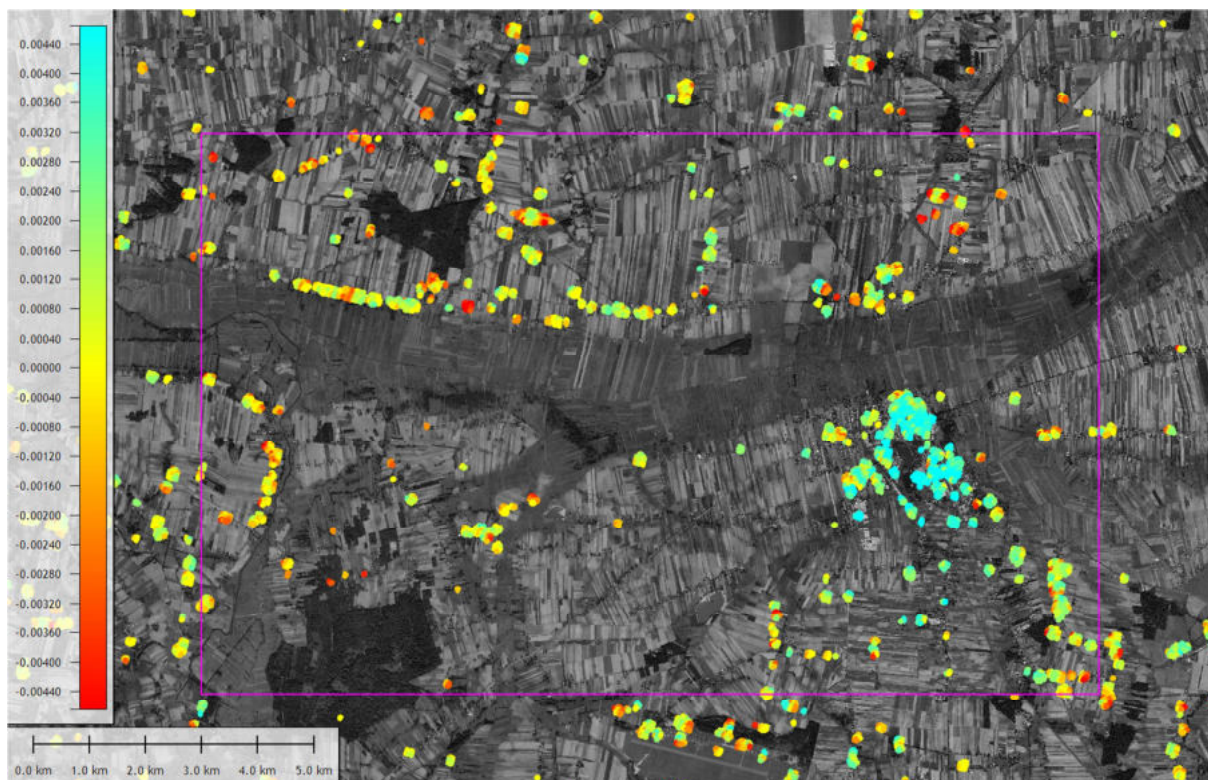
Anomalia Łęczycy: stwierdzono występowanie podnoszenia terenu we wschodniej i południowej części miejscowości o maksymalnych magnitudach 8 mm/rok (Ryc. 19). Występowanie obszaru o podwyższonych wartościach podnoszenia dobrze koreluje się z zasięgiem struktur stropu cechsztynu (Ryc. 20), co świadczy o związkach strefy obniżania z aktywnością wysadu i struktur tektoniki solnej.



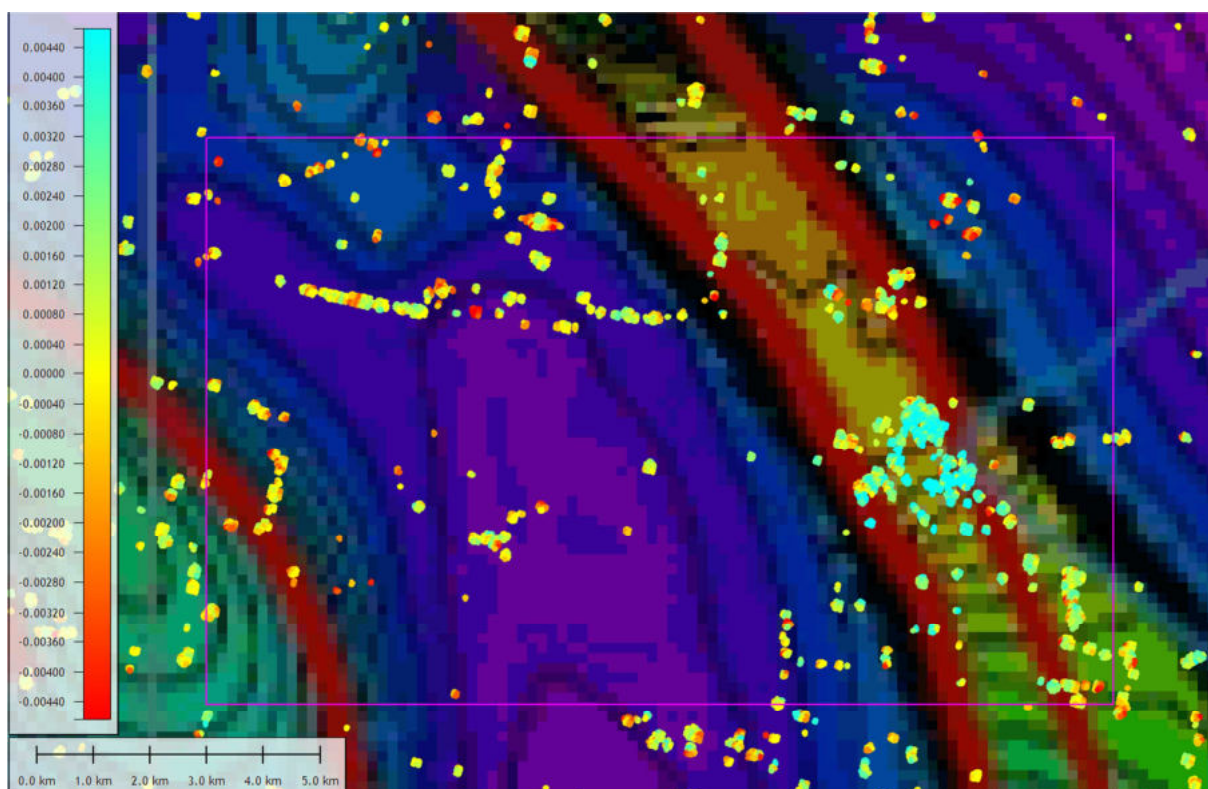
Ryc. 17 Poligon Izbica Kujawska – wyniki przetworzenia SBAS. Deformacja [m/rok]



Ryc. 18 Rejon Kłodawy - – wyniki przetworzenia SBAS. Deformacja [m/rok]



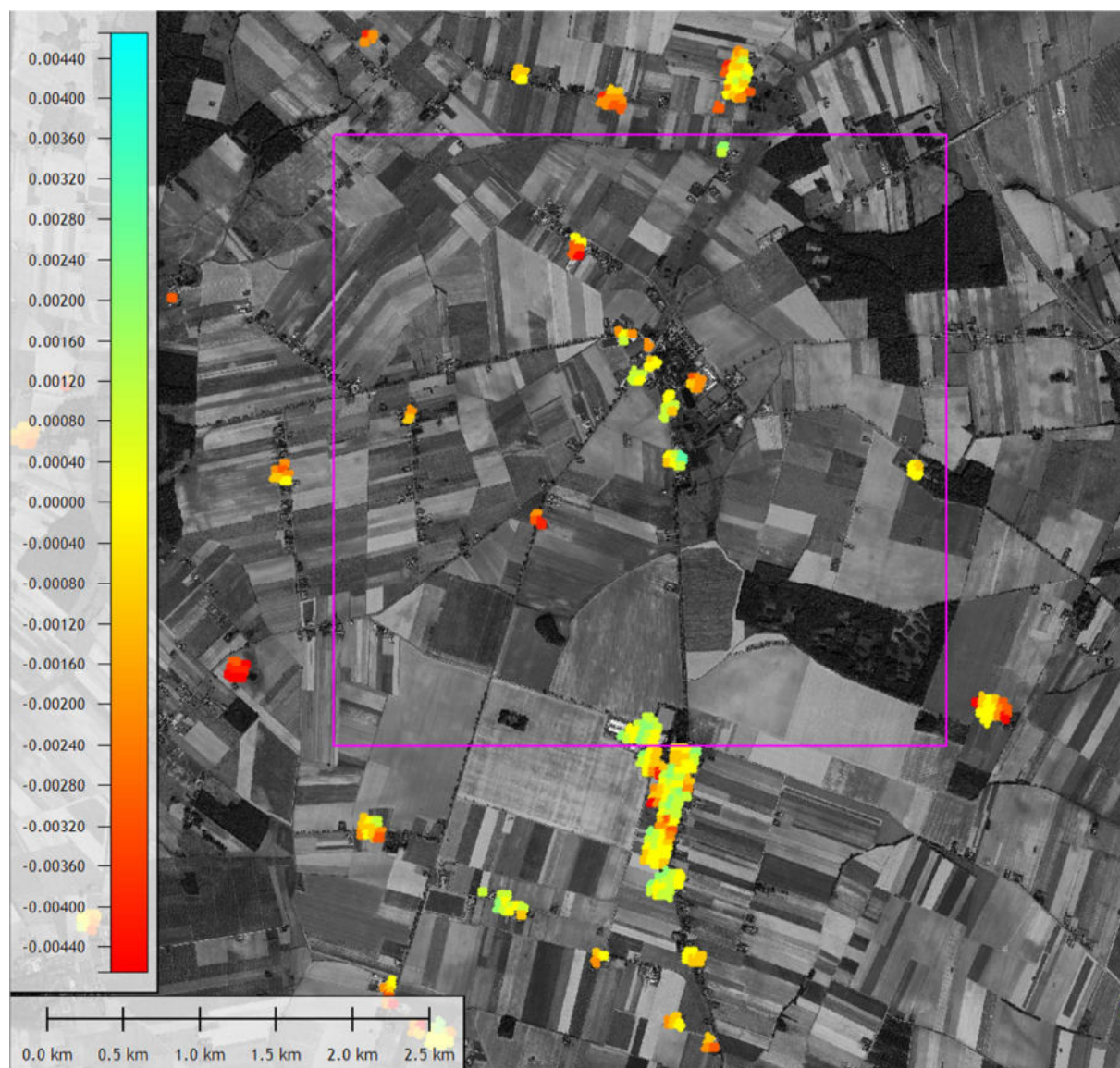
Ryc. 19 Poligon Łęczyska - – wyniki przetworzenia SBAS. Deformacja [m/rok]



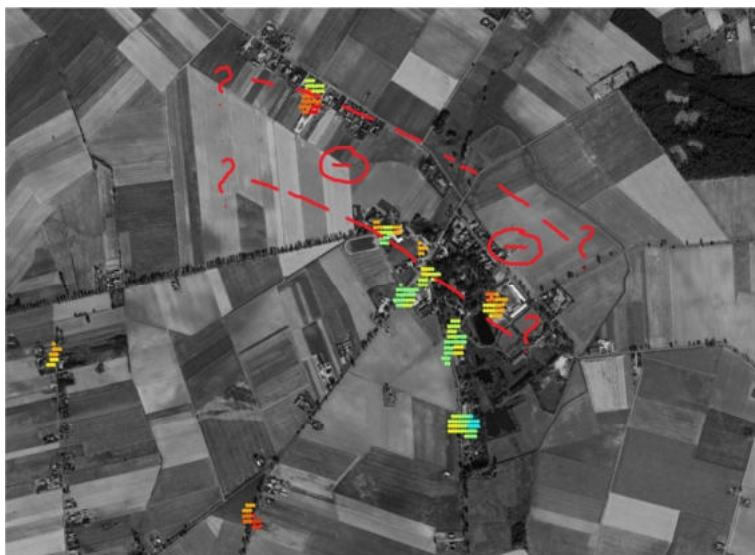
Ryc. 20 Poligon Łęczyska - – wyniki przetworzenia SBAS na tle mapy strukturalnej powierzchni stropu cechsztynu (Papiernik 2012). Deformacja [m/rok]

### 7.3.2.3 Poligon Łanięta

Interesujące wyniki otrzymano również dla poligonu Łanięta. Stosunkowo rzadka zabudowa sprawiła, że w wyniku przetwarzania SBAS otrzymano niewielką liczbę punktów (Ryc. 21). Część z nich wykazuje wyraźne obniżenie o wartościach 2 – 5 mm/rok. Rozmieszczenie wystąpień podnoszenia można interpretować jako strefę o przebiegu NW-SE (Ryc. 22) co jest generalnie zgodnie z przebiegiem struktur solnych.



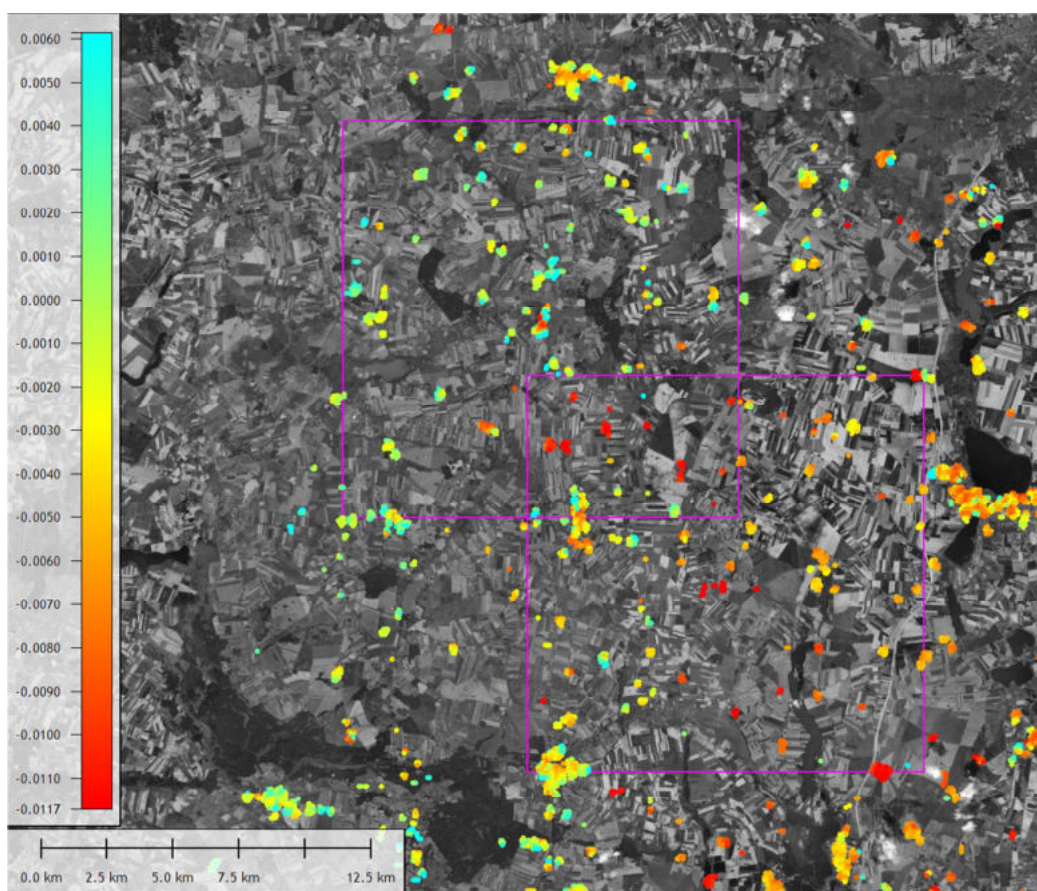
Ryc. 21 Poligon Łanięta - wyniki przetworzenia SBAS. Deformacja [m/rok]



Ryc. 22 Poligon Łanięta – próba interpretacji

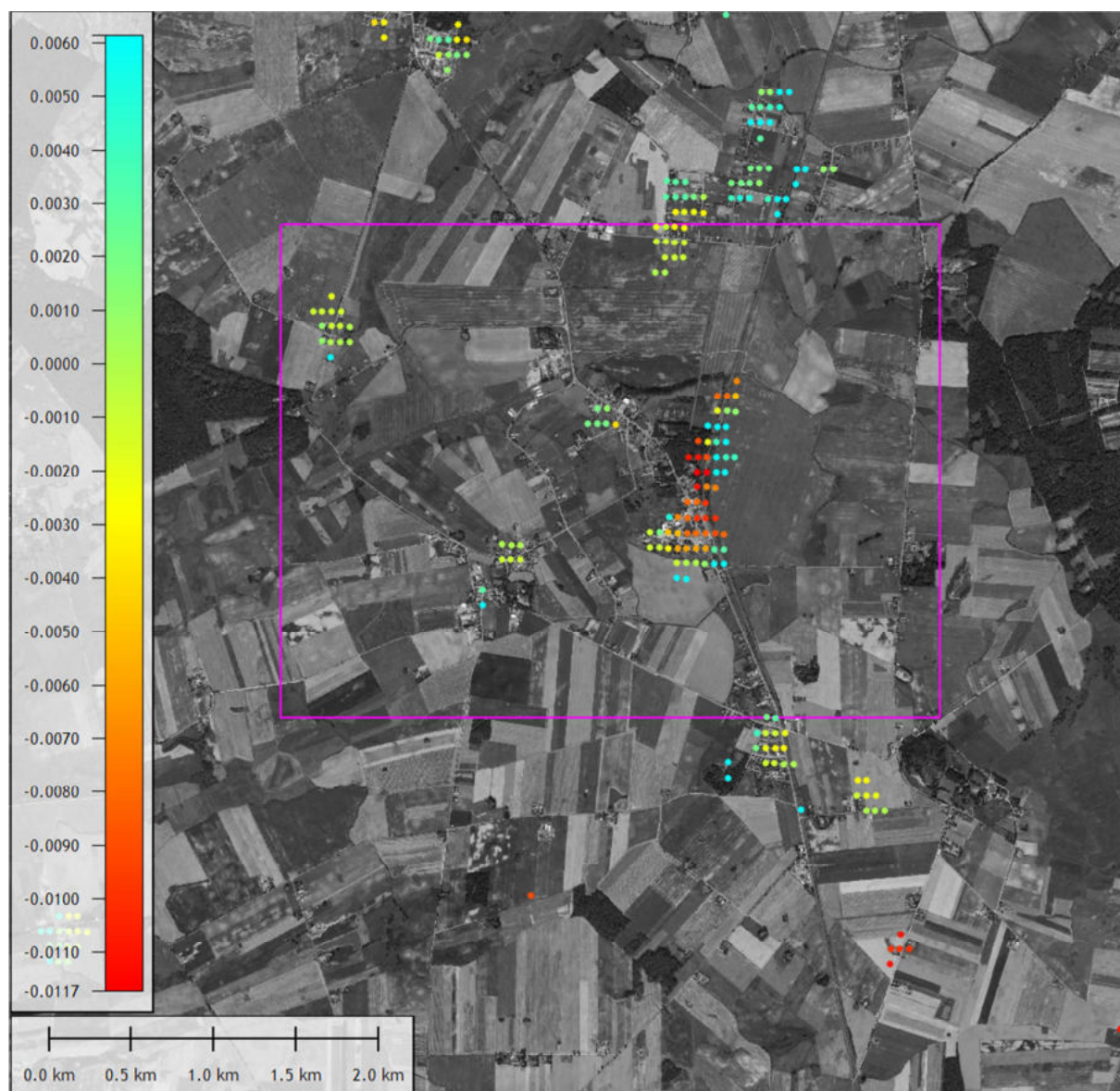
#### 7.3.2.4 Obszar Wapno-Damaśławek

Wyniki przetworzeń InSAR dla obszaru Wapno-Damaśławek otrzymano z nielicznych danych ze ścieżki 036 (Ryc. 23).



Ryc. 23 Poligon Wapno-Damaśławek – wyniki przetworzeń SBAS. Deformacja [m/rok]

Widoczne w środkowej części obszaru obniżenia (ok 1 mm/rok) dobrze korelują się z zasięgiem struktury solnej (Ryc. 23). Wyniki otrzymane dla obszaru samego Wapna również pokazują strefę obniżenia (Ryc. 24), które dobrze korelują się z zasięgiem stropu wysadu.



Ryc. 24 Poligon Wapno – wyniki przetworzeń SBAS. Deformacja [m/rok]

### 7.3.3 Wyniki opracowania danych Envisat

Pomimo stosunkowo wysokiej całkowitej liczby scen dla serii danych Envisat okazało się że niewiele obszarów ma wystarczające pokrycie czasowe. Maksymalna liczba scen na ścieżkę o wspólnym pokryciu wynosiła 22 sceny (T: 036dsc i 458asc), przy czym zazwyczaj było to maksymalnie 5 scen / rok!

Przy takiej konfiguracji danych nie udało się przetworzyć danych metodami InSAR ani otrzymać wiarygodnych wyników.

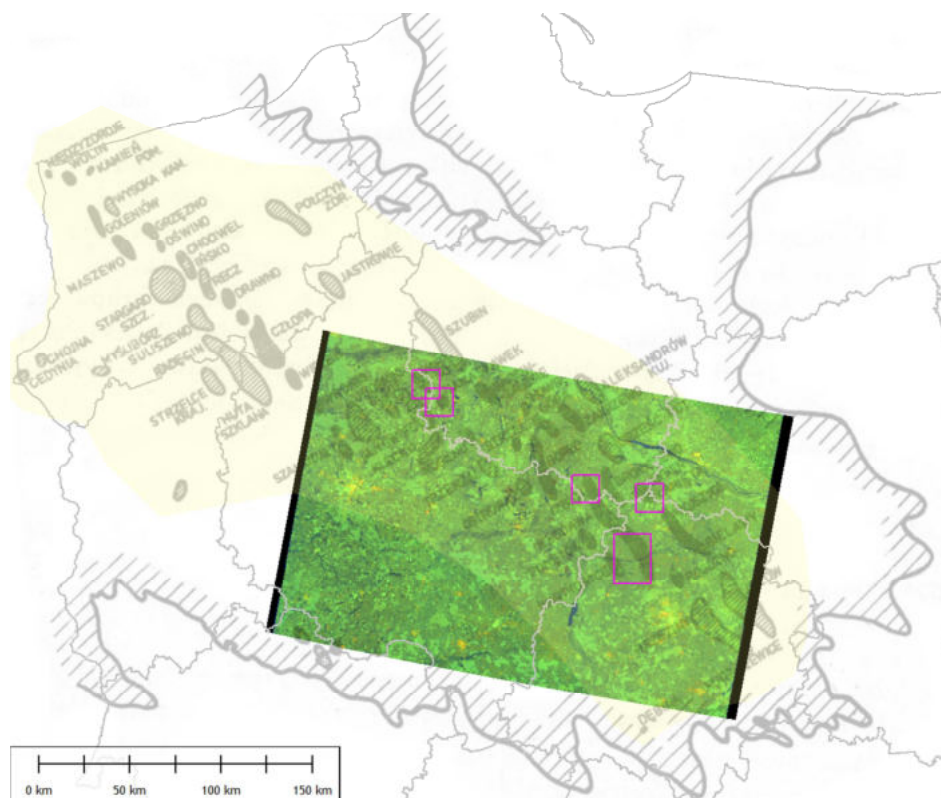


### 7.3.4 Opracowanie danych Sentinel-1

Dane Sentinel-1 dla całego obszaru przetwarzano metodą PSI. Dane Sentinel-1 charakteryzują się scenami o rozległym zasięgu przestrzennym, bardzo małymi wartościami baz geometrycznych jak i bardzo dużą rozdzielczością czasową (6 dni). Gwarantuje to dużą liczbę kombinacji interferometrycznych i bardzo wysoką koherencję interferogramów. Jednocześnie komplikuje przetwarzanie danych od strony technicznej, gdyż poza dodatkowymi koniecznymi operacjami przetwarzanie danych w trybie TOPS wymaga ogromnych ilości pamięci operacyjnej i dyskowej.

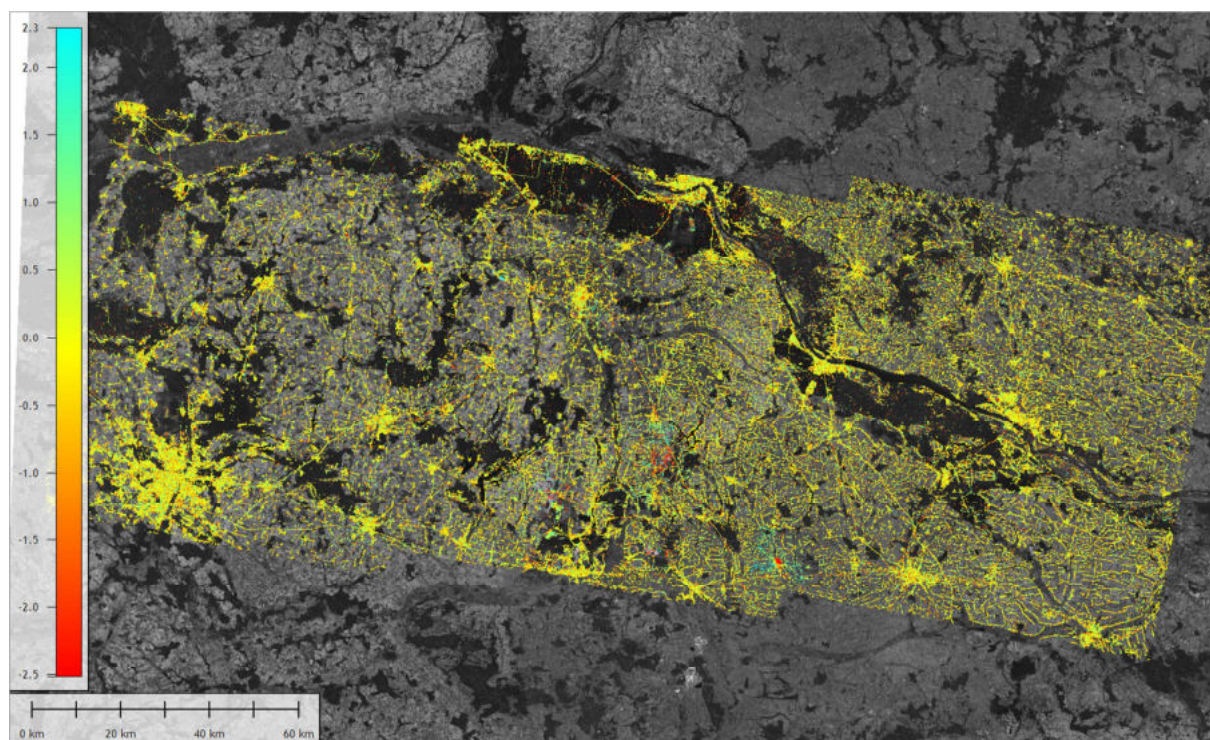
### 7.3.5 Wyniki opracowania danych Sentinel-1

Dane Sentinel-1 przetworzono dla całego obszaru sceny ścieżki 124 DSC. Dane obejmowały okres 5-ciu lat (od 2014.12.01 do 2019.11.29), łącznie 288 scen. Obszar opracowania obejmuje środkową część pasa wysadów solnych, która obejmuje badane poligony (Ryc. 25) z wyjątkiem obszaru Łęczycy.



Ryc. 25 Obszar opracowania danych Sentinel-1 na tle struktur solnych Nizy Polskiej (wg. Garlicki , Szybist 1986)

Dane Sentinel-1 przetwarzano metodą PSI. Otrzymano olbrzymi zbiór danych z bardzo dużą gęstością punktów, która pozwala na wiarygodną interpretację (Ryc. 26).



**Ryc. 26 Zbiór punktów PS otrzymanych w wyniku przetwarzania danych Sentinel-1. Deformacja [mm/rok]**

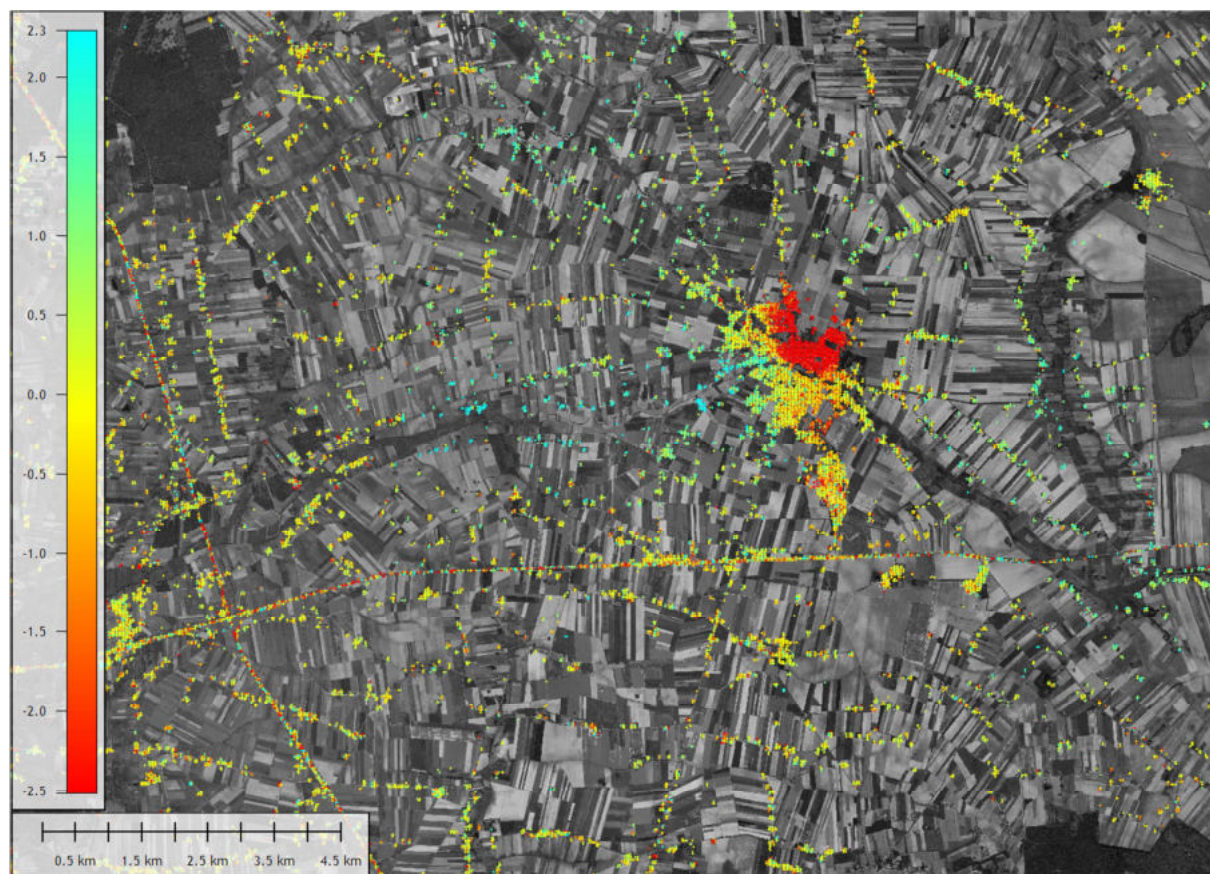
#### 7.4 Interpretacja wyników

Otrzymany dla środkowej części pasa wysadów solnych zbiór punktów PS (Ryc. 26) charakteryzuje się niewielkimi wartościami przemieszczeń (w granicach od -2,5 do 2,5 mm/rok). Większość obszaru pozostaje stabilna, niemniej widocznych jest cały szereg anomalii, których związek z aktywnością wysadów pozostaje oczywisty.

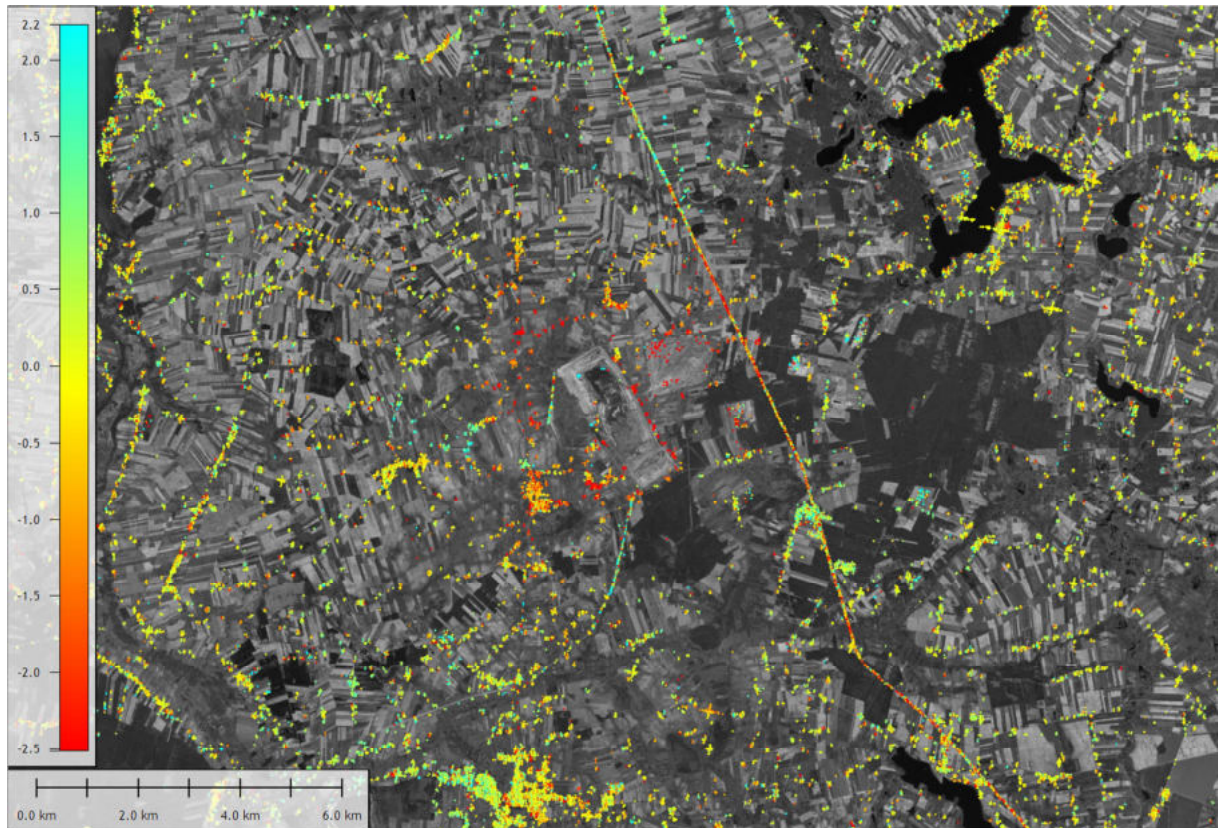
Jedną z najbardziej wyróżniających się anomalii jest obszar miejscowości Kłodawa (Ryc. 27). W północnej części obszaru zabudowanego występuje obszar silnego obniżania, któremu towarzyszy podnoszenie części zachodniej. Podobny rozkład deformacji występował również dla zbioru danych ERS-1/2 (Ryc. 18).

Kolejną anomalią jest rejon Wierzbinka, również dotknięty przez obniżanie terenu o wartościach między 1,5 do 2,5 mm/rok. Obniżenia w tym rejonie związane są z

odwadnianiem odkrywkowej kopalni węgla brunatnego Tomisławice (Ryc. 28) i nie mają związku ze strukturami solnymi.



Ryc. 27 Obszar Kłodawy na zbiorze danych PS Sentinel-1. Deformacja [mm/rok]



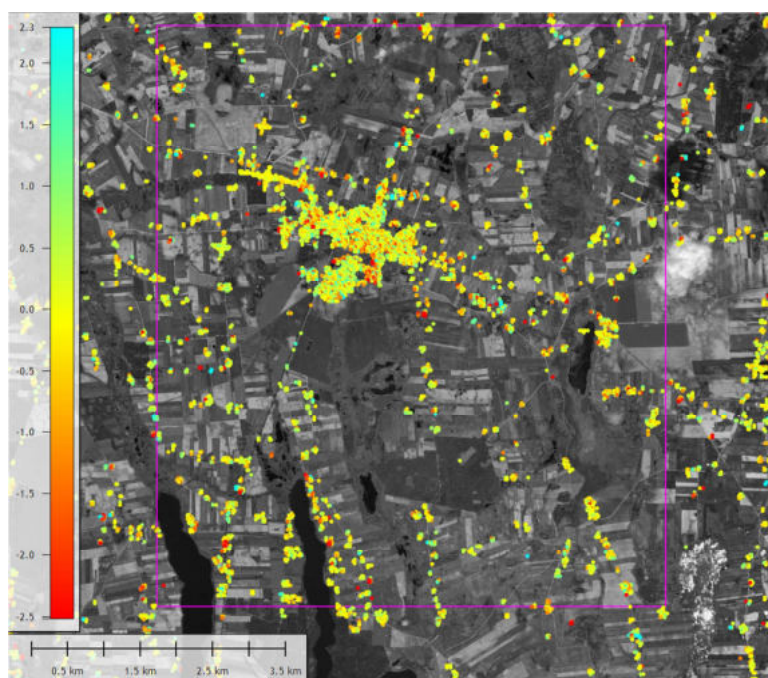
Ryc. 28 Rejon Wierzbinka na zbiorze danych PS Sentinel-1. Deformacja [mm/rok]

#### 7.4.1 Analiza danych Sentinel-1 dla poligonów badawczych

Poligon Łęczyca znalazł się poza zasięgiem opracowania i stąd nie jest szczegółowo opisywany poniżej.

##### 7.4.1.1 Izbica Kujawska

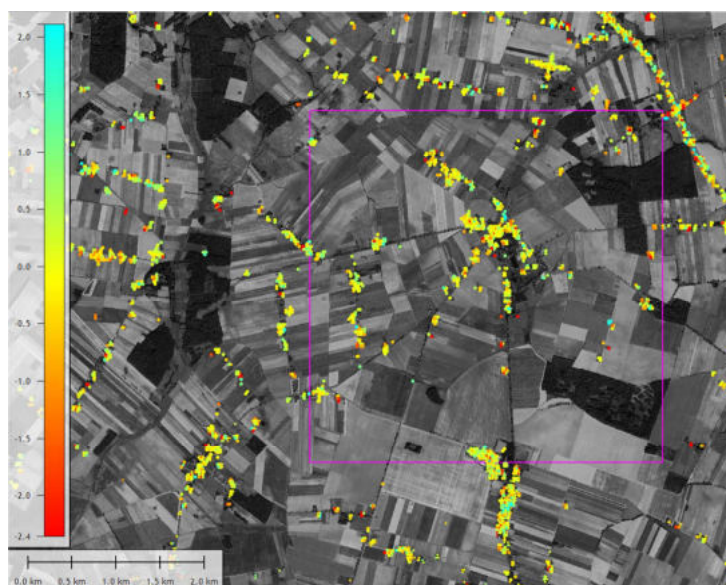
Na obszarze Izbica Kujawska nie stwierdzono występowania deformacji terenu (Ryc. 29).



Ryc. 29 Poligon Izbica Kujawska na zbiorze danych PS Sentinel-1. Deformacja [mm/rok]

#### 7.4.1.2 Łanięta

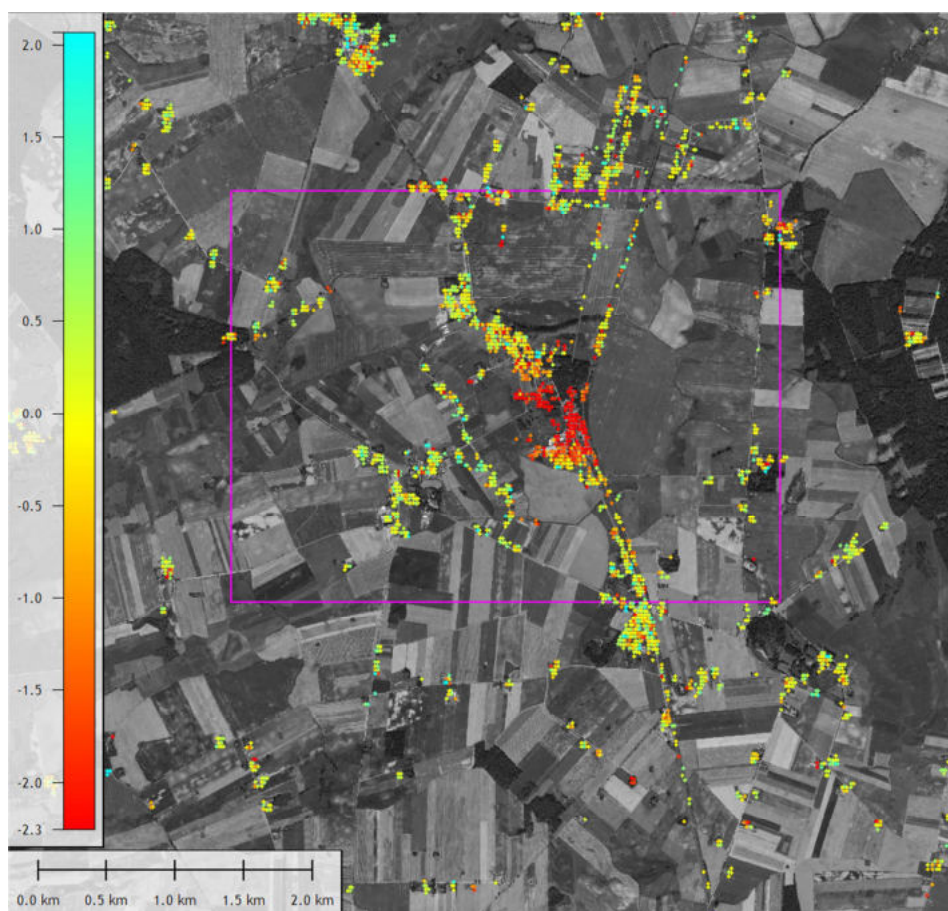
Na obszarze poligonu Łanięta nie stwierdzono występowania deformacji (Ryc. 30).



Ryc. 30 Poligon Łanięta na zbiorze danych PS Sentinel-1. Deformacja [mm/rok]

#### 7.4.1.3 Wapno

Miejscowość Wapno podlega stałym obniżeniom o wartościach do 2,5 mm/rok. Największe magnitudy ruchów występują w rejonie dawnego wyrobiska gipsów (Ryc. 31). Potwierdza to wcześniejsze obserwacje dla danych ERS-1/2. Deformacje te zostały szczegółowo potwierdzone w wynikach pomiarów reflektorów radarowych (rozdz. 7).



Ryc. 31 Poligon Wapno na zbiorze danych PS Sentinel-1. Deformacja [mm/rok]

## 8 Monitoring interferometryczny wysadu Wapno i jego otoczenia

Pierwotnie w założeniach projektu monitoring geodynamiczny miał być założony na obszarze wykazującym największą aktywność określoną za pomocą analizy danych archiwalnych. W międzyczasie, do wykonawców projektu zgłosił się Wójt Gminy Wapno z prośbą o objęcie monitoringiem właśnie rejonu Wapna.

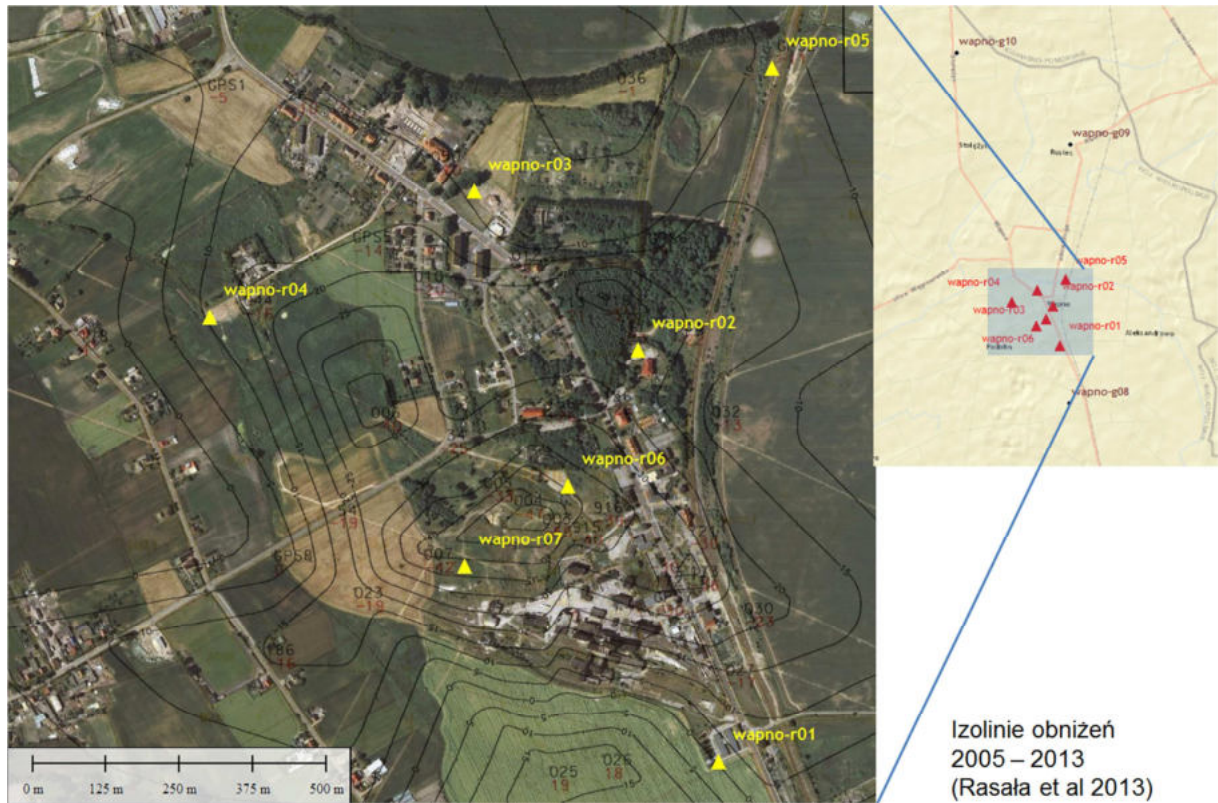
### 8.1 Przygotowanie terenu poligonu badawczego do prowadzenia monitoringu geodynamicznego w zakresie interferometrii satelitarnej i GNSS

Miejscowość Wapno została dotknięta znacznymi deformacjami terenu, w wyniku których duża część miejscowości została zniszczona. Katastrofa nastąpiła 5 sierpnia 1977 roku kiedy na skutek wtargnięcia wód podziemnych do wyrobisk kopalni soli Wapno, na powierzchni terenu zaczął się tworzyć lej sufozyjny a towarzyszące mu zapadlisko osiągnęło ponad 20m głębokości. Miejscowość do dnia dzisiejszego boryka się z deformacjami terenu i towarzyszącym im uszkodzeniom budynków i infrastruktury. Badania geologiczne i pomiary

deformacji były prowadzone na tym obszarze w ramach wielu projektów, jednak nie są kontynuowane w sposób systematyczny (Rasała et al 2013).

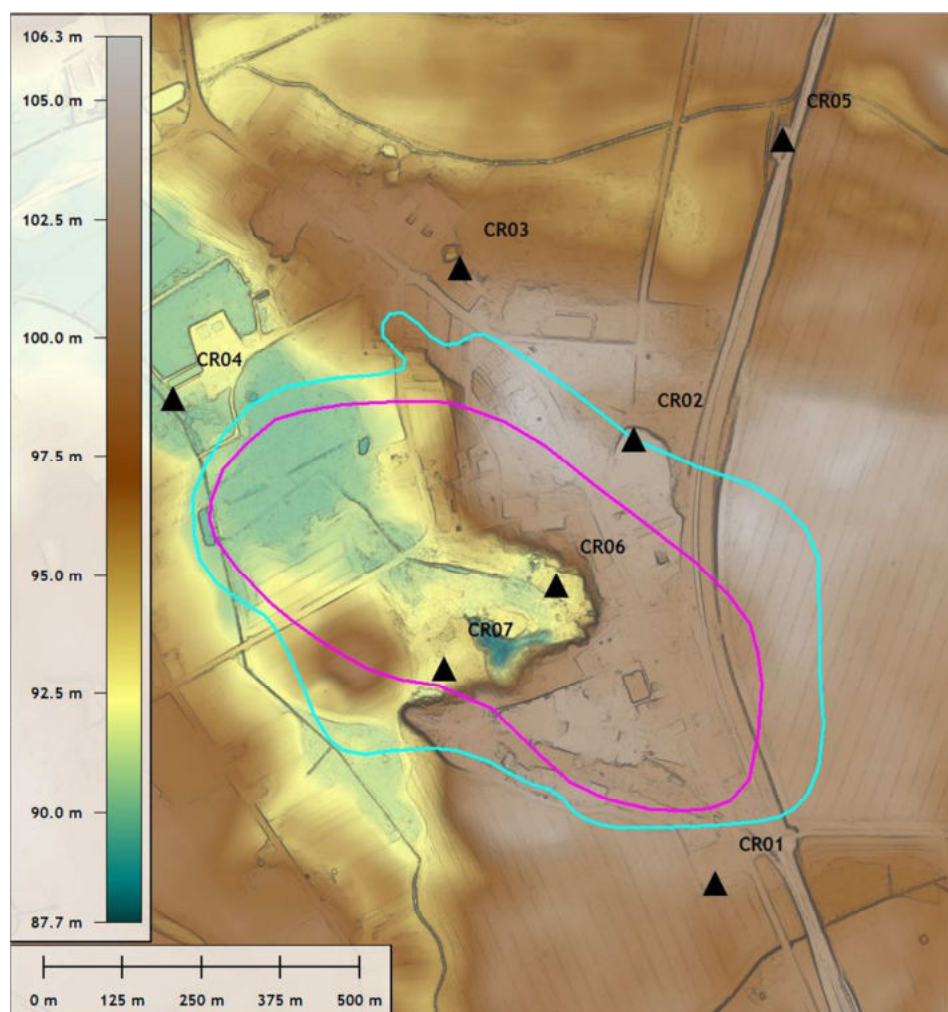
Po analizie danych archiwalnych, zespół stwierdził, że założenie monitoringu geodynamicznego w miejscowości Wapno ma uzasadnienie w ramach zadania. Wysad Wapno znajduje się na głębokości jedynie 165m p.p.t co stanowi najpłycej występującą strukturę solną w Polsce. Spodziewane deformacje mogą być tak natury antropogenicznej jak i naturalnej a monitoring będzie miał znaczenie nie tylko naukowe ale również użyteczne dla poprawy bezpieczeństwa mieszkańców.

Po analizie wyników wcześniejszych pomiarów deformacji i w porozumieniu z władzami Wapna wytypowano 7 lokalizacji pod reflektory radarowe i 3 pod referencyjne postumenty GNSS. Z wyjątkiem jednej lokalizacji, całą infrastrukturę udało się zlokalizować na gruntach należących do gminy (Ryc. 32). Lokalizacje dobierano w ten sposób, by jeśli to możliwe pokrywały się z wystąpieniami wcześniejszych anomalii deformacji. Reflektory CR06 i CR07 rozmieszczono na terenie dawnego wyrobiska kopalni gipsu, natomiast CR02 na południe od obszaru zapadliska z 1977 roku (Ryc. 33). Obszar zapadliska został zrehabilitowany i jest w tej chwili porośnięty lasem (parkiem) co uniemożliwia prowadzenie na tym obszarze obserwacji satelitarnych (Ryc. 32). Postumenty GNSS zlokalizowano poza zasięgiem wpływu deformacji wysadu Wapno w miejscowościach Stołęczyn, Rusiec i Srebrna Góra.



Ryc. 32 Mapa lokalizacyjna punktów monitoringu w miejscowości Wapno na tle ortofotomapy (dane geoportal.gov.pl)





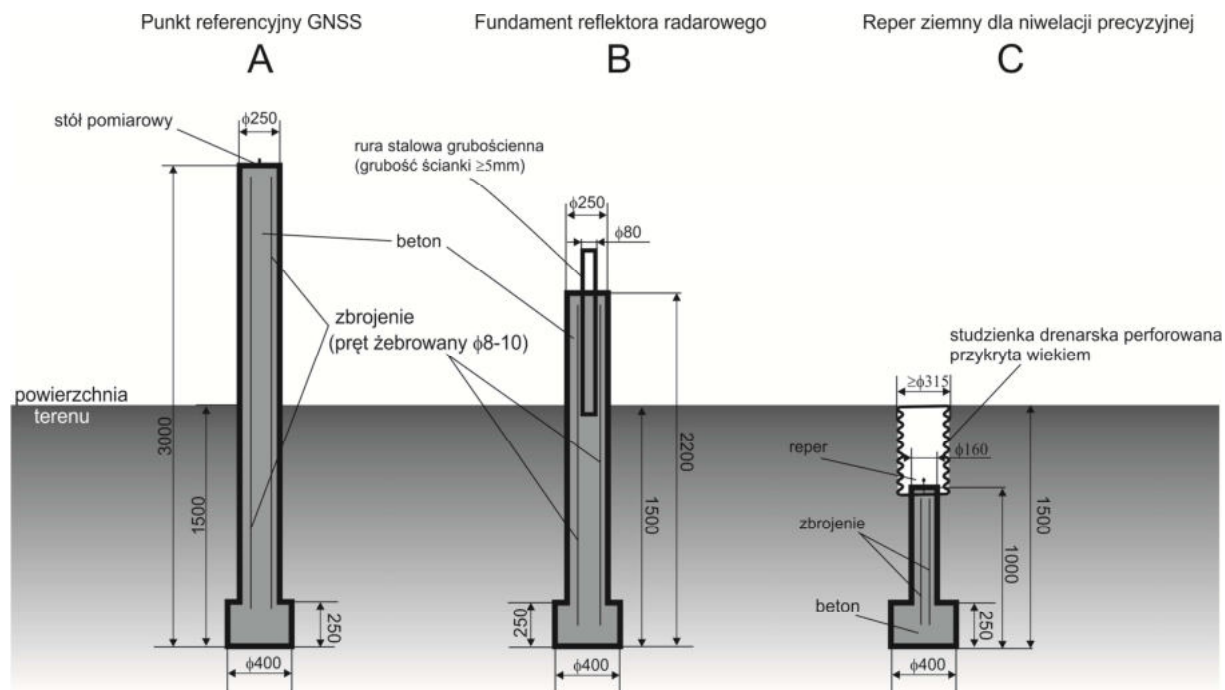
Ryc. 33 Infrastruktura pomiarowa na tle ukształtowania powierzchni terenu obszaru (dane wysokościowe ISOK). Zaznaczono również zasięgi czapy gipsowej i wysadu (na podst. Rasała et a. 2013)

### 8.1.1 Infrastruktura pomiarowa

W tej części opisano podstawowe wymagania techniczne dla poszczególnych elementów infrastruktury pomiarowej jakie zostały przedstawione w postępowaniu przetargowym i jakie są spełniane przez istniejącą i działającą osnowę pomiarową. Wymagania te powstały w trakcie konsultacji technicznych z pracownikami Wydziału Geodezji i Gospodarki Przestrzennej Instytutu Geodezji Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego. Parametry techniczne reflektorów zostały opracowane przez Z. Perskiego i P. Marinkovica (PPO.Labs) w oparciu o wcześniejsze doświadczenia na poligonach pomiarowych w Babiaku, Berejowie i Lewinie oraz numeryczne modelowanie tzw. skutecznej powierzchni odbicia RCS (*Radar Cross Section*) i stosunku sygnału do otoczenia SCR (*Signal to Clutter Ratio*) mając na

uwadze radarowe pasma X (9,6 GHz) i C (5,4 GHz) wykorzystywane przez satelity TerraSAR-X, Sentinel-1.

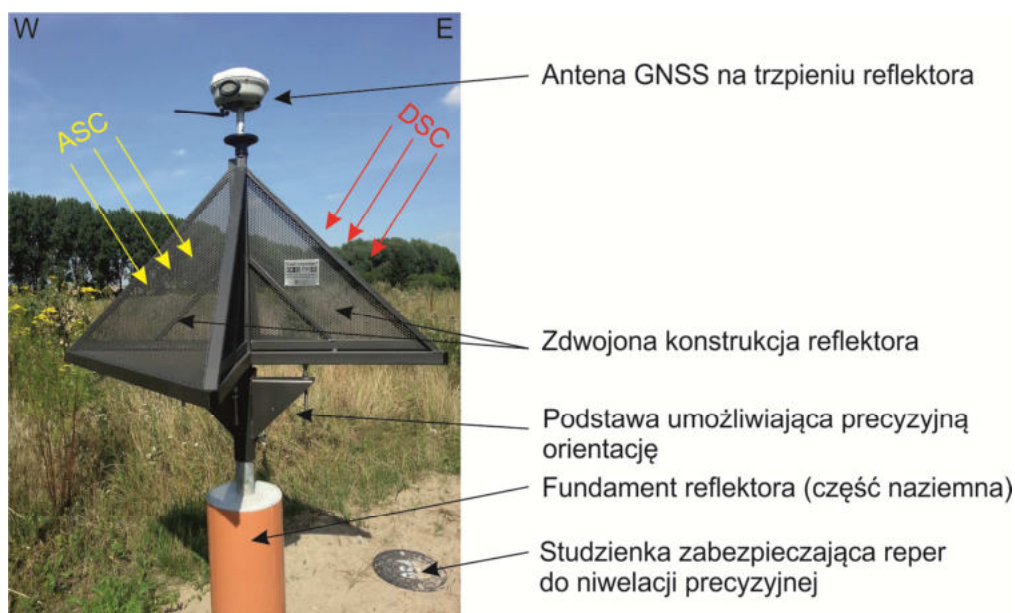
Posadowienie punktów w gruncie odbywało się przez wykonanie odpowiedniej konstrukcji żelbetonowej osadzonej na głębokości 1,5 m, tj. poniżej powierzchni przemarzania gruntu (Ryc. 34).



Ryc. 34 Konstrukcja punktów pomiarowych na poligonie Wapno

Reflektory wykonano z profili stalowych kwadratowych 25 x 25 mm, na których zamontowano powierzchnie z aluminiowej blachy perforowanej. Na każdym z fundamentów zainstalowano zintegrowaną konstrukcję składającą się z zespolonych dwóch reflektorów tak by można było prowadzić pomiary w oparciu o orbity wschodzące (ascending - asc) i schodzące (descending - desc). Taka konstrukcja zapewnia otrzymanie dwóch niezależnych serii obserwacji i umożliwia dekompozycje wektora deformacji na pionowy i E-W. Na potrzeby pomiarów walidacyjnych każdy z reflektorów zaopatrzone w trzpień do mocowania anteny GNSS.

Repery ziemne do niwelacji precyzyjnej lokalizowano w bezpośrednim sąsiedztwie reflektorów (Ryc. 35).



Ryc. 35 Reflektor radarowy poligonu Wapno i jego podstawowe elementy

## 8.2 Dane satelitarne użyte w analizach CRInSAR poligonu Wapno

W analizach CRInSAR poligonu Wapno wykorzystano dane satelitarne z dwóch systemów: TerraSAR-X oraz Sentinel-1

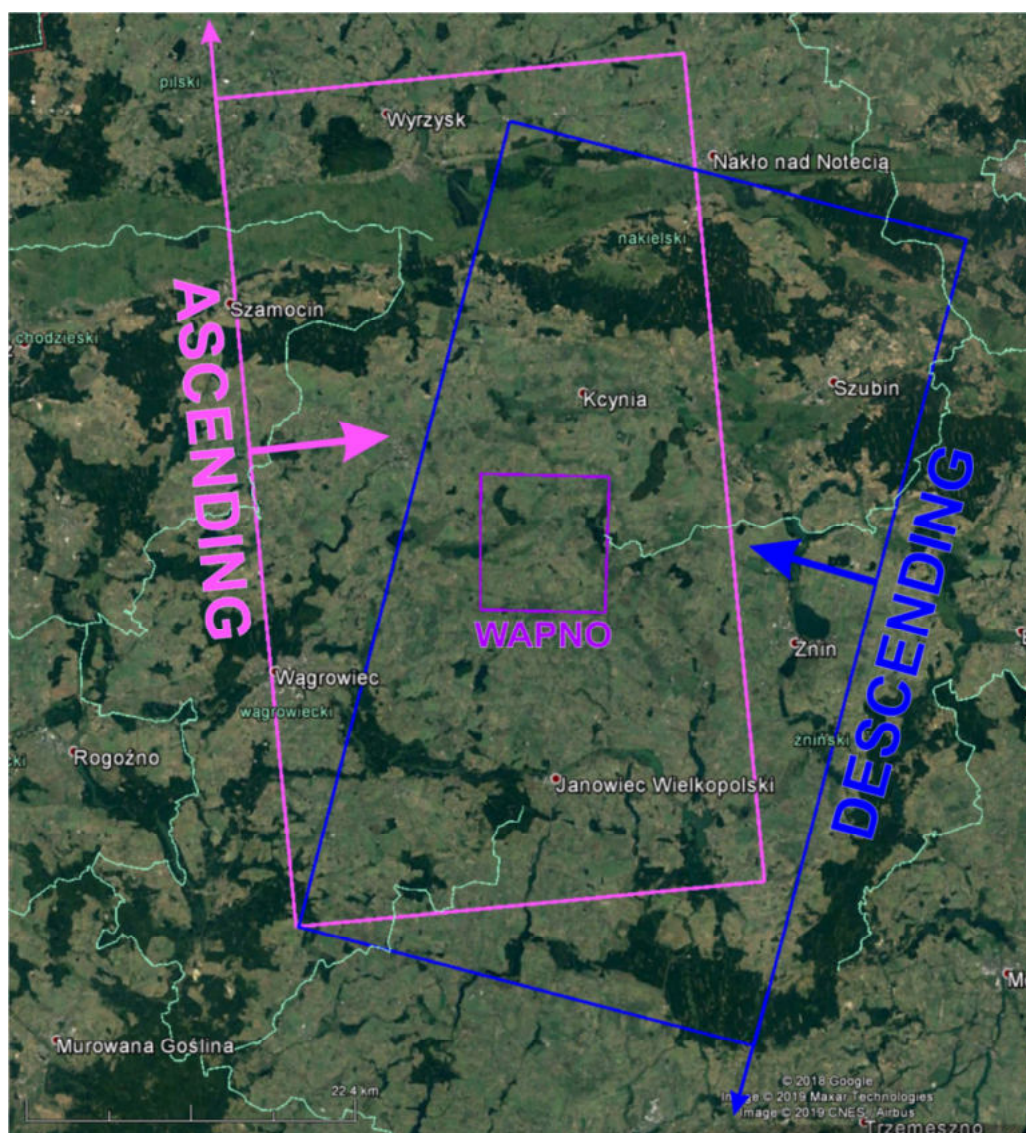
### 8.2.1.1 Dane TerraSAR-X

Na potrzeby projektu zamówiono wykonanie rejestracji wysokorozdzielczych SAR. Dane te obejmują okres od 23 lipca 2015 r. do 27 września 2016 r. Wykonywane były regularnie, w interwałach 11-dniowych przez komercyjnego satelitę TerraSAR-X w czasie przelotów orbit schodzących i wschodzących (Ryc. 36, Tab.6).

### 8.2.1.2 Opis zbioru danych

Tab. 6 Dane techniczne:

Rodzaj danych	SAR SLC
Satelita	TerraSAR-X
Tryb obrazowania	Strip Map
Pasma X dł. fali	3,1 cm
Rodzaj rejestracji	Descending/Ascending, right-looking
Numer ścieżki ( <i>track</i> )	017-DSC, 70-ASC
Kąty obrazowania	strip012: 39.9° - 42.8° / strip010:36.1°-38.5°
Liczba scen	80



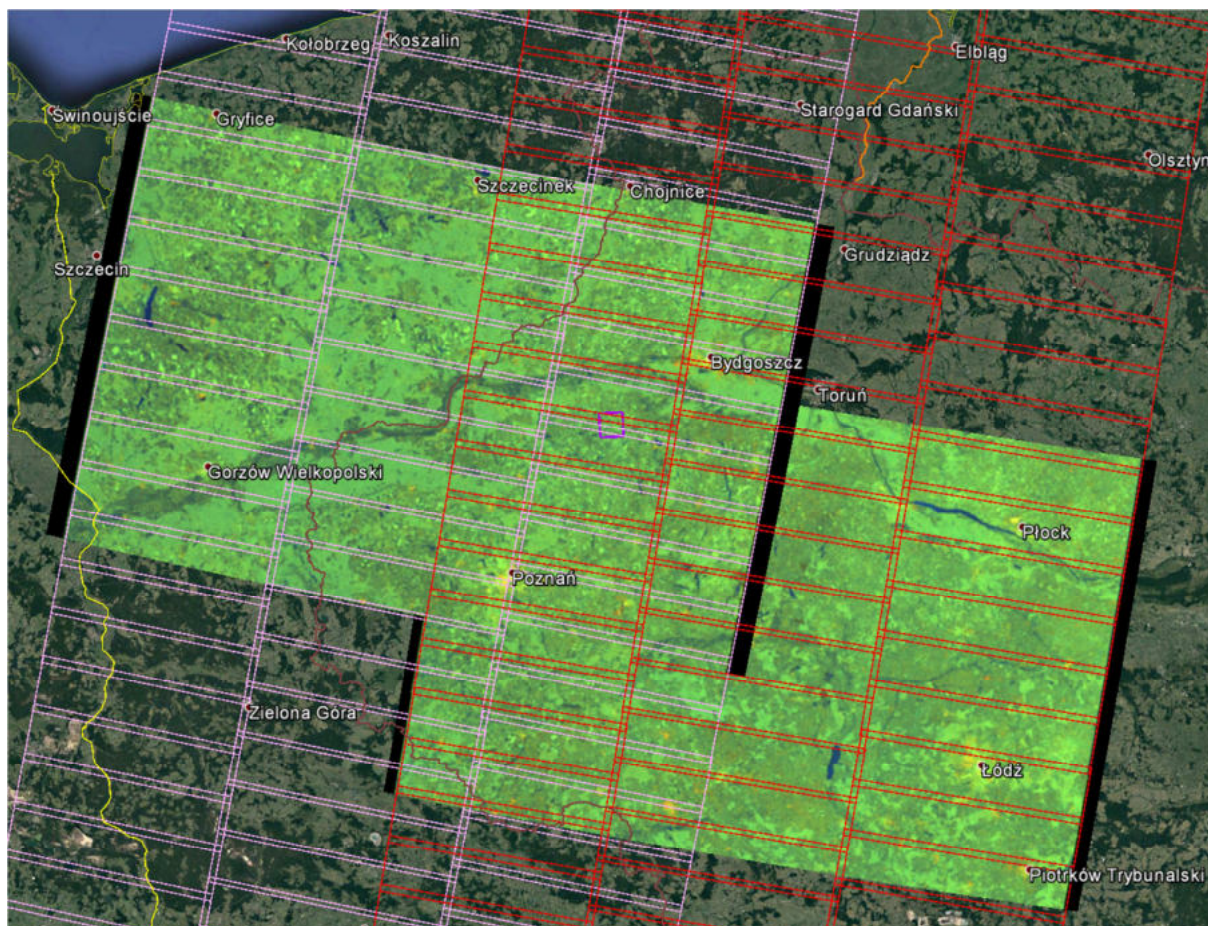
Ryc. 36 Zasięgi scen TerraSAR-X

### 8.2.1.3 Dane Sentinel-1

Do obliczeń wzięto pod uwagę 2 sąsiednie ścieżki descending (Tab. 7, Ryc. 37). Wstępne analizy wykazały, że dane ascending są obarczone dużym błędem dlatego odrzucono je z dalszych analiz.

Tab. 7 Dane techniczne:

Rodzaj danych	SAR SLC
Satelita	Sentinel-1A, Sentinel-1B
Tryb obrazowania	Interferometric Wide (TOPS)
Pasma C dł. fali	5,4 cm
Rodzaj rejestracji	Descending, right-looking
Numer ścieżki ( <i>relative orbit number</i> )	124DSC; 022DSC
Kąty obrazowania	20° - 45°
Liczba scen	100; 106



Ryc. 37 Zasięgi użytych scen Sentinel-1 na tle obszaru badań

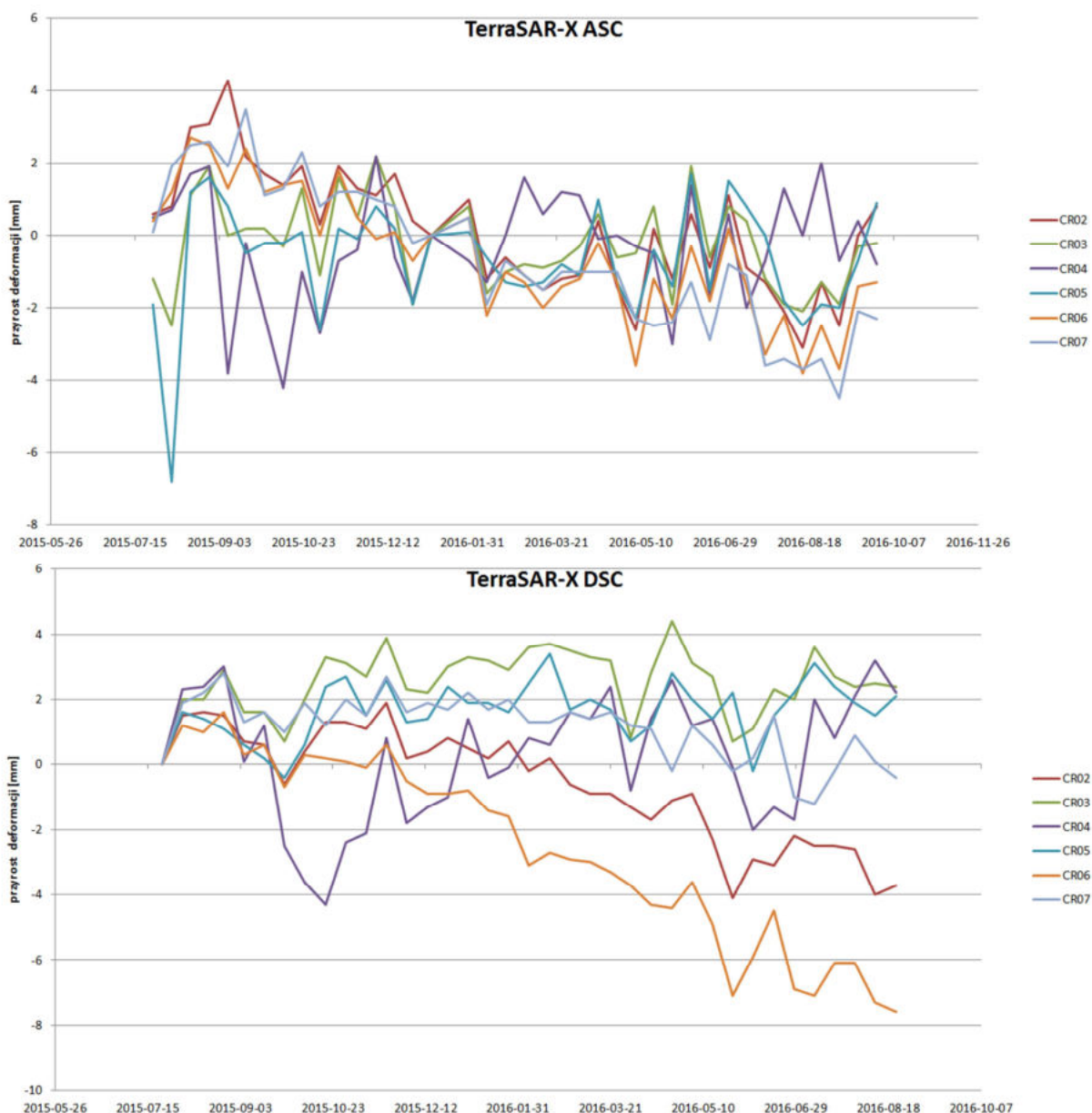
### 8.3 Przetwarzanie danych i analiza

W przypadku danych TerraSAR-X i Sentinel-1 procedura przetwarzania wyglądała podobnie. Zastosowano uproszczone przetwarzanie serii danych InSAR gdyż znane były współrzędne reflektorów pomierzone w terenie. Dzięki temu wykorzystano wyseparowane w oparciu o współrzędne reflektorów wartości fazowe reflektorów. Obliczeń dokonano względem odpowiedniej sceny referencyjnej: TerraSAR-X ASC = 2015-07-26; TerraSAR-X DSC = 2015-07-23; Sentinel-1 DSC 22 = 2015-07-22; Sentinel-1 DSC 124 = 2015-07-29. Obliczenia odnoszono zawsze do tego samego reflektora przyjętego jako referencyjny: początkowo jako referencyjny przyjęto CR01, w dalszych analizach CR03. Otrzymano w ten sposób wielkości podwójnych różnic (*double differences*), które charakteryzują względne przemieszczenia w czasie (Ryc. 38).

Wstępne oceny wyników Sentinel-1 wykazały, że z dalszych analiz należało odrzucić reflektory o numerach CR01, CR02 i CR04. Reflektory CR01 i CR02 zlokalizowane były na terenie gminnego ośrodka pomocy społecznej i przedszkola. Reflektor CR01 zlokalizowano

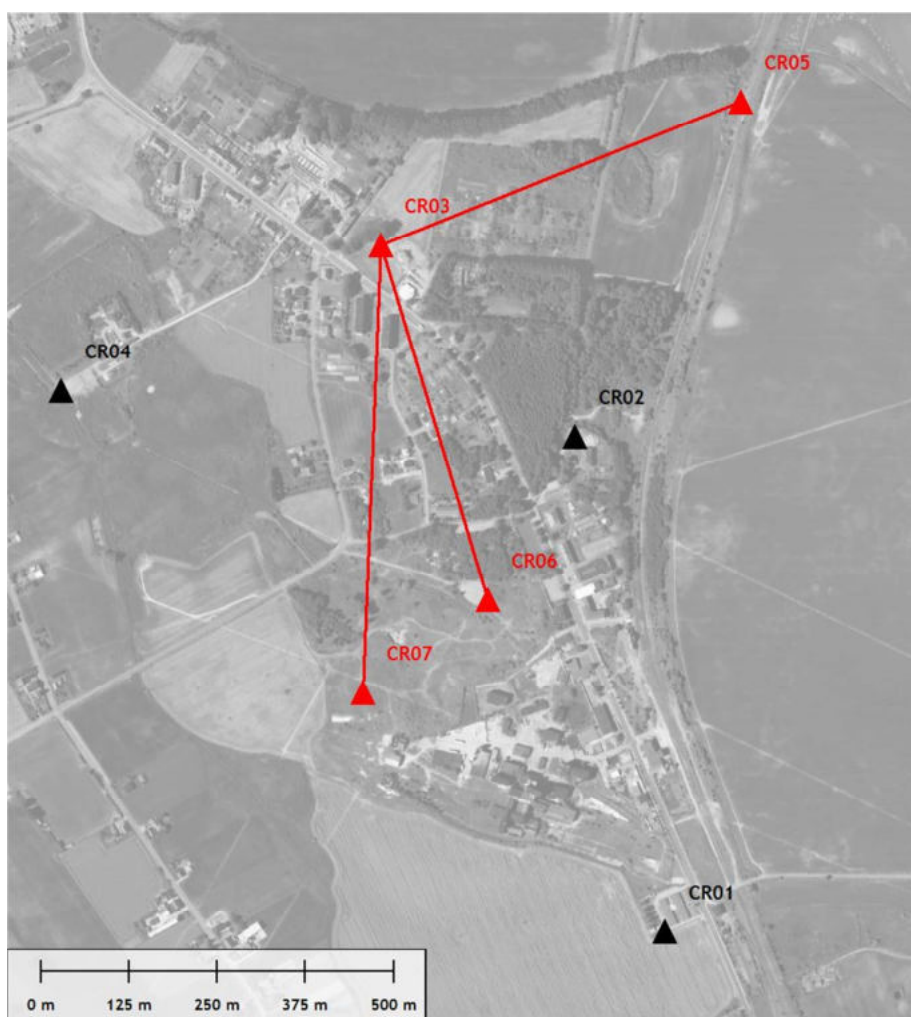
blisko metalowego ogrodzenia a CR02 zbyt blisko budynku przedszkola. W pobliżu reflektora CR04 w 2017 roku wybudowano wysoki maszt telefonii komórkowej. W przypadku mniejszej rozdzielczości jaka ma miejsce dla danych Sentinel-1 sygnał jest zaszumiony i w jego skład wchodzi odbicia od opisanych obiektów. Warto podkreślić, że obiekty te nie stanowiły problemów w przypadku danych wysokorozdzielczych TerraSAR-X. Nie jest znany wpływ masztu telekomunikacyjnego w pobliżu reflektora CR04 gdyż rejestracje danych wysokorozdzielczych zakończono przed jego wybudowaniem.

Aby możliwe stało się porównanie wyników dla Sentinel-1 i TerraSAR-X ostatecznie **zrezygnowano z CR01, CR02, CR04** dla wszystkich serii czasowych. Analiza danych TerraSAR-X dla wszystkich reflektorów wykazała, że reflektory te wykazywały jedynie przemieszczenia o charakterze sezonowym (Ryc. 38).



Ryc. 38 Zestawienie serii czasowych – podwójnych różnic przemieszczeń wszystkich reflektorów dla danych TerraSAR-X w stosunku do cr01

Ostateczny kształt sieci pomiarowej reflektorów przyjęty do zintegrowanych obliczeń i analiz przedstawiono na Ryc. 39.



Ryc. 39 Ostateczny kształt sieci pomiarowej reflektorów poligonu Wapno przyjęty do analiz. Na czerwono zaznaczono wektory podwójnych różnic (double differences)

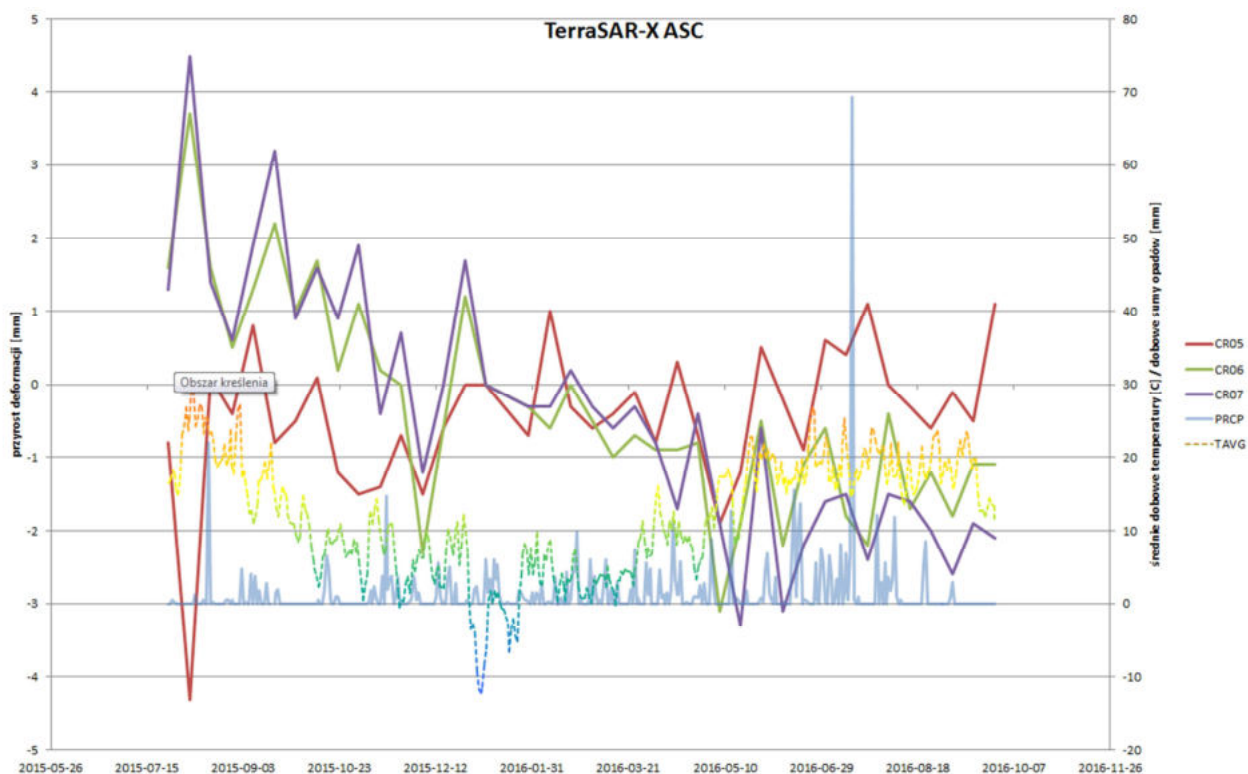
### 8.3.1 Serie czasowe InSAR i ich interpretacja

W celu określenia wpływu warunków środowiskowych na reflektory wielkości przemieszczeń porównano z ogólnymi danymi meteorologicznymi. Były to średnie dobowe temperatury oraz dobowe sumy opadów. Do analiz wzięto ogólnodostępne dane z najbliższej stacji Ławica koło Poznania na podstawie Global Historical Climatology Network (GHCN). Okres pomiarowy danych InSAR okazał się być zbyt krótki by jednoznacznie wykazać ewentualną sezonową cykliczność zmian. Widoczna jest jedynie zwiększona amplituda zmian w okresach występowania wysokich temperatur co związane jest z rozszerzalnością cieplną metalu (Ryc. 40 i Ryc. 41). Dane TerraSAR-X DSC i dwie niezależne serie Sentinel-1 DSC wykazują bardzo dużą zgodność jeśli chodzi o przyrosty deformacji (Ryc. 42 i Ryc. 43). Liniowe przyrosty deformacji przeliczone na mm/rok są do siebie bardzo zbliżone (Tab. 8).

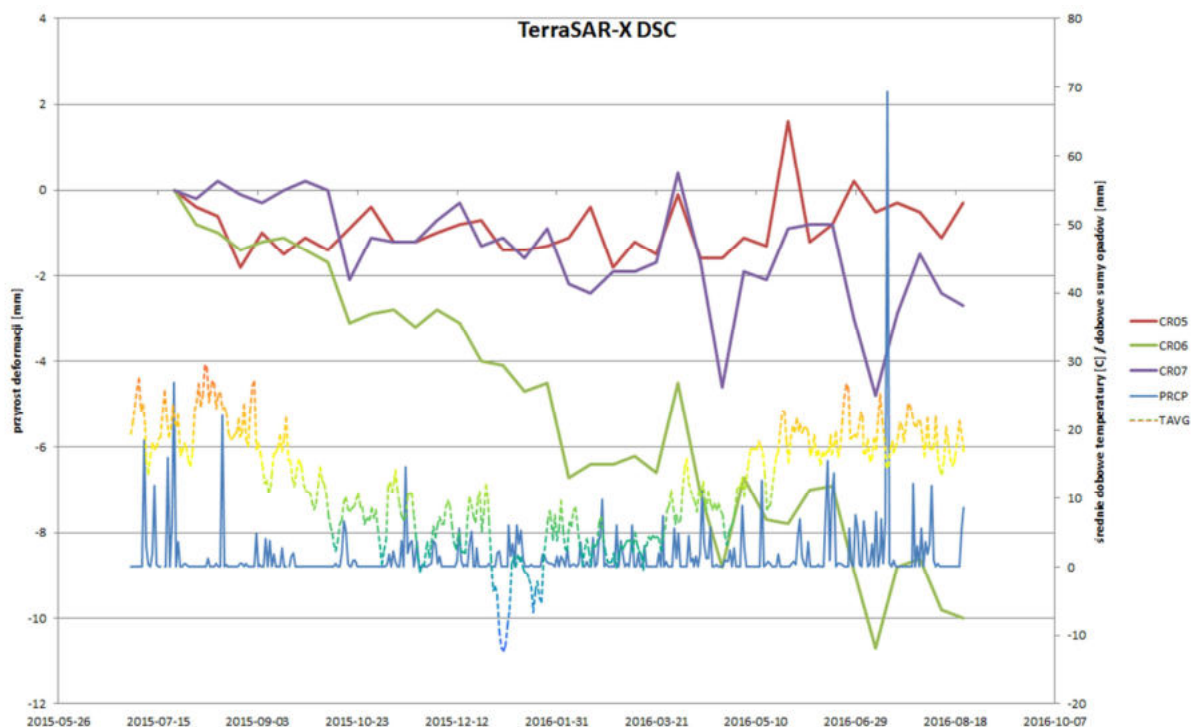


Tab. 8 Średnie prędkości deformacji LoS

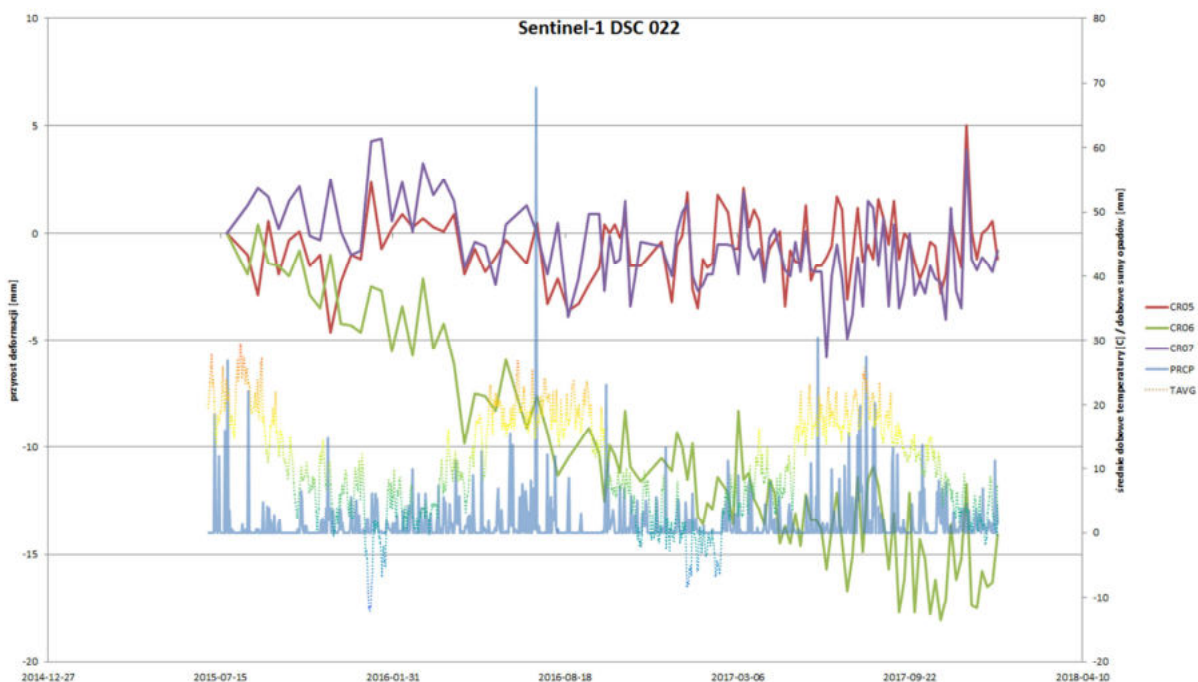
	TSX ASC	TSX DSC	S1 DSC 022	S1 DSC 124
CR05	+1 mm/rok	+0.5 mm/rok	+/- 0 mm/rok	+0.4 mm/rok
CR06	-2 mm/rok	-10 mm/rok	-8 mm/rok	-8 mm/rok
CR07	-2 mm/rok	-3 mm/rok	-2,5 mm/rok	-1 mm/rok



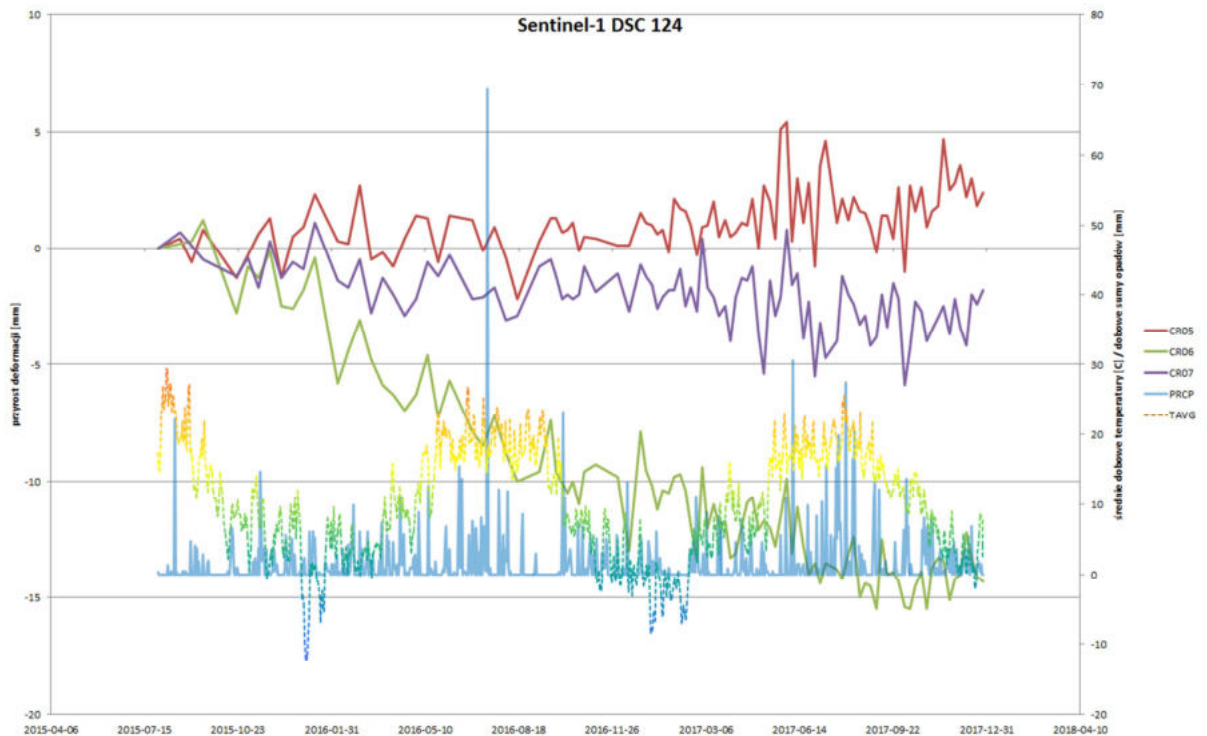
Ryc. 40 Seria czasowa obserwacji reflektorów dla danych TerraSAR-X ascending. Dane meteorologiczne ze stacji Ławica na podstawie Global Historical Climatology Network (GHCN). PRCP – dobowe sumy opadów, TAVG – średnie temperatury dobowe



Ryc. 41 Seria czasowa obserwacji reflektorów dla danych TerraSAR-X descending. Dane meteorologiczne ze stacji Ławica na podstawie Global Historical Climatology Network (GHCN)



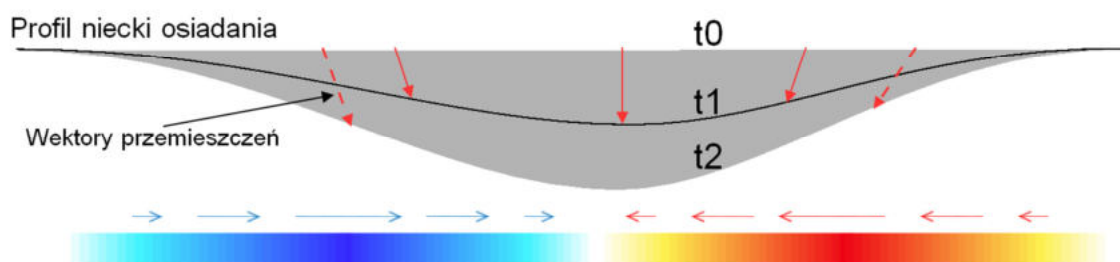
Ryc. 42 Seria czasowa obserwacji reflektorów dla danych Sentinel-1, ścieżka 022 descending. Dane meteorologiczne ze stacji Ławica na podstawie Global Historical Climatology Network (GHCN)



**Ryc. 43** Seria czasowa obserwacji reflektorów dla danych Sentinel-1, ścieżka 124 descending. Dane meteorologiczne ze stacji Ławica na podstawie Global Historical Climatology Network (GHCN)

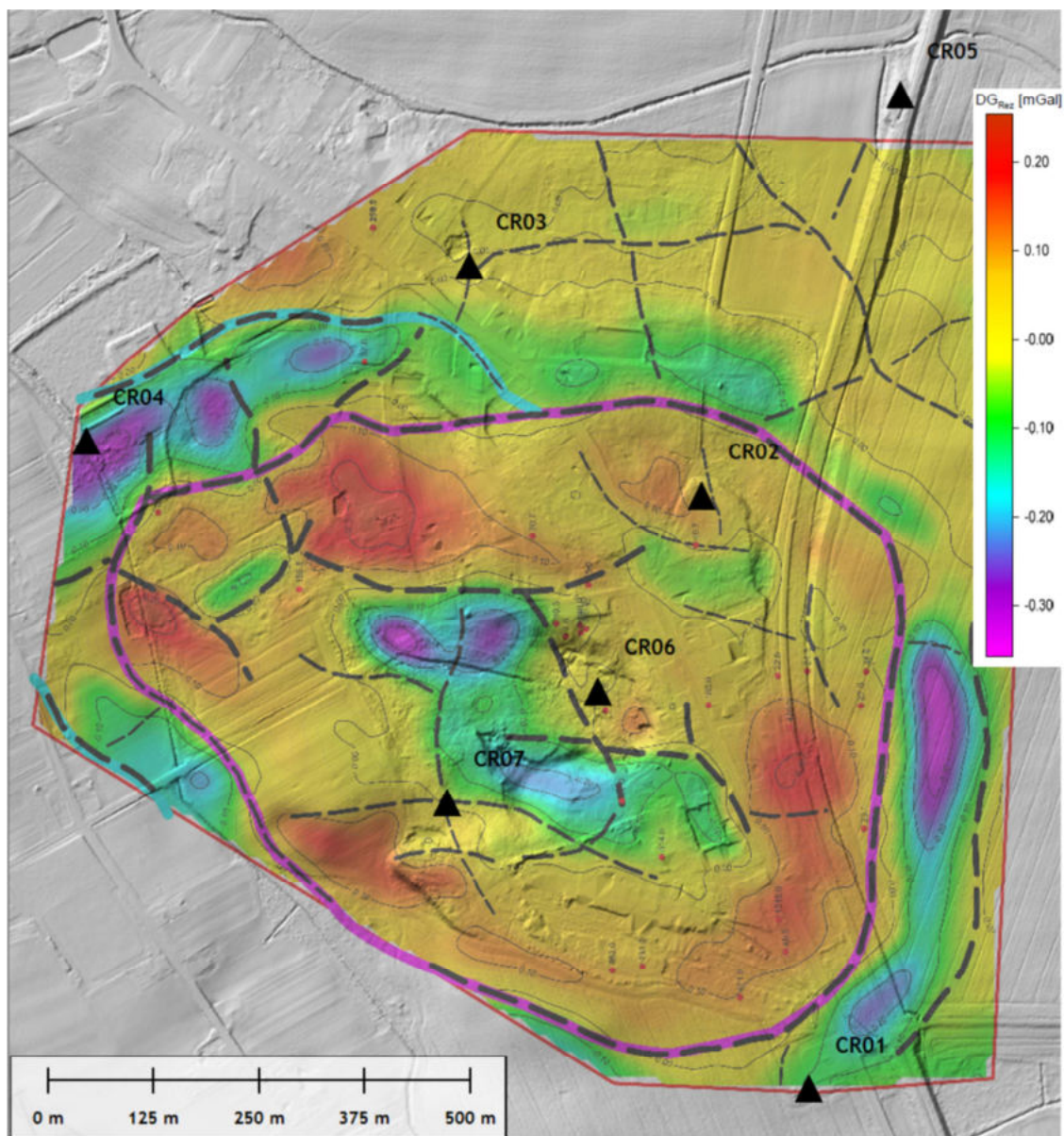
Na dzień dzisiejszy ilość danych dla określenia trójwymiarowych wektorów przemieszczeń dla reflektorów radarowych jest niewystarczająca. Dane InSAR pozwalają dobrze określić składową pionową oraz W-E, natomiast składowa N-S jest niedoszacowana.

Otrzymane wyniki pozwalają określić, że reflektory CR 06 i CR07 podlegają obniżaniu oraz przesunięciom w kierunku NW. Może to świadczyć istnieniu rozleglejszej niecki obniżeniowej (Ryc. 44), której centrum znajdowałoby się pomiędzy reflektorami CR07 i CR04. Jeśli przyjrzeć się dokładnie wynikom TerraSAR-X dla reflektora CR04 (Rys. 32) można zauważyć nieznaczny trend wznoszący dla obu kierunków ASC i DSC, co można interpretować jako wynik przesuwania się ku SE.



**Ryc. 44** Próba interpretacji przesunięć poziomych jako efektu rozwijania się niecki obniżeniowej. Im dalej od centrum niecki, tym przesunięcia poziome są większe (na podstawie Knothe 1984)

Potwierdzeniem tej tezy są wyniki reinterpretacji i reprocesingu danych mikrogravimetrycznych (Raport z zadania nr 10.4). Obszar hipotetycznej niecki obniżeniowej bardzo dobrze koreluje się z obrazem anomalii mikrogravimetrycznych i obszarem występowania silnych gradientów pola ciężkości. Sytuacja taka wskazuje na istnienie szeregu nieciągłości i obszarów predystynowanych dla powstawania stref o wzmożonej mobilności (Ryc. 45). Ponadto istnienie obszaru obniżania potwierdzają wyniki przetworzeń danych archiwalnych InSAR ERS-1/2 i Sentinel-1 (Ryc. 24, Ryc.31).



Ryc. 45 Rozmieszczenie reflektorów na tle mapy anomalii mikrogravimetrycznych (Raport nr 10.4). BTWR filtr górnoprzepustowy, częstotliwość odcięcia  $lg = 500$  m (przybliżony zasięg głębokościowy prospekcji 0 - 125/250 m). Reinterpretacja G. Czapowskiego na podstawie danych archiwalnych HYDRONAFTA 2010

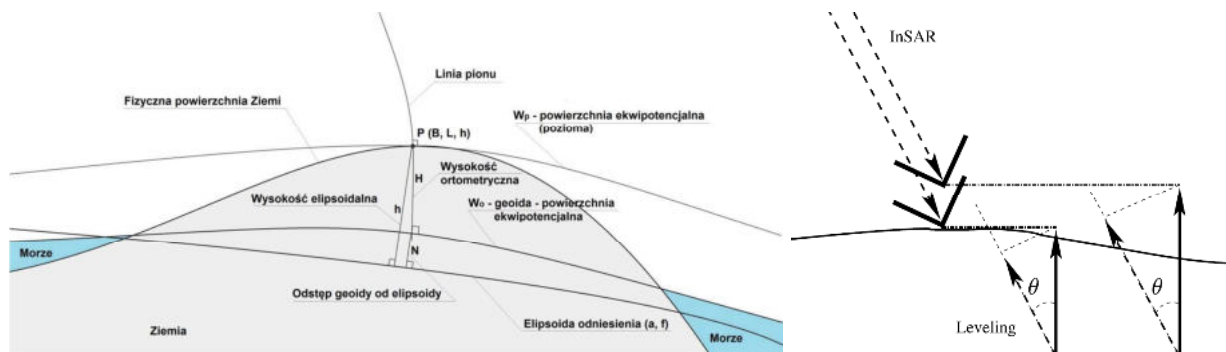
### 8.3.2 Integracja danych pomiarowych i ocena dokładności

Dane z przetworzeń InSAR zostały zintegrowane i porównane z wynikami niwelacji precyzyjnej (Raport 6.3) oraz pomiarów GNSS (Raport 15).

Chcąc integrować i wspólnie analizować dane zebrane za pomocą 3 niezależnych metod pomiarowych należy zdać sobie sprawę, z różnicy zasady pomiaru wysokości jak i sposobu jego odniesienia. Stąd otrzymane wyniki reprezentują różniące się zagadnienia:

- Dane niwelacyjne – wysokość ortometryczna mierzona wzdłuż rzeczywistej linii pionu w stosunku do powierzchni geoidy odniesienia;
- Dane GNSS - wysokość elipsoidalna mierzona wzdłuż normalnej do elipsoidy odniesienia;
- Dane InSAR – wysokość elipsoidalna mierzona w kierunku padania wiązki radarowej (LoS);

Zależności te przedstawia **Ryc. 46**.



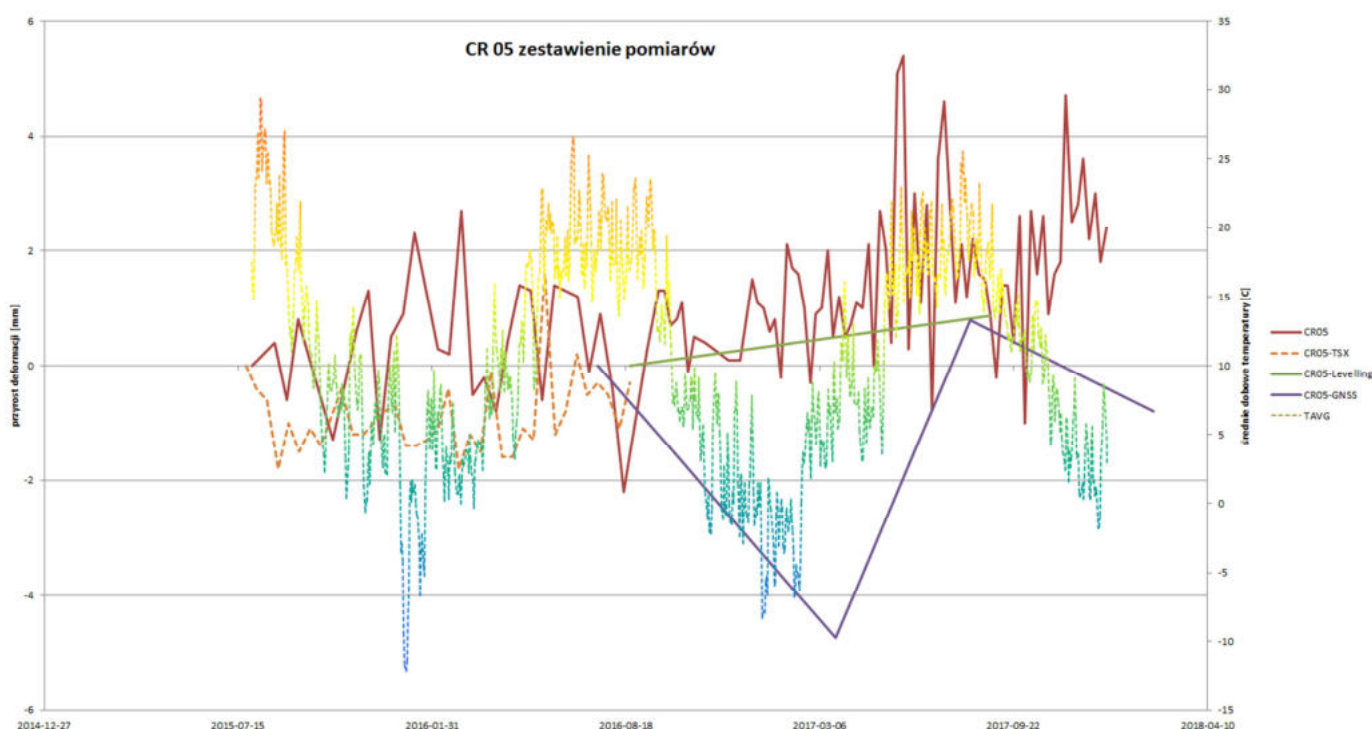
**Ryc. 46** Wysokość punktu względem powierzchni odniesienia: geoidy i elipsoidy (Wielgosz, 2014) oraz przypadek ukośnych pomiarów InSAR (Ketelaar, 2008)

Zakładając, że wysokość geoidy i elipsoidy nie uległy zmianie w czasie jaki upłynął pomiędzy kolejnymi pomiarami można obliczyć tzw. podwójne różnice (*double differences*). Podwójne różnice to różnice wysokości pomiędzy danym punktem a punktem przyjętym za referencyjny oraz danym pomiarem a pomiarem przyjętym za referencyjny w domenie czasu. Obliczenie podwójnych różnic redukuje problem rozbieżności pomiędzy układami odniesienia (elipsoida / geoida). Metodę podwójnych różnic stosuje się w obliczeniach GNSS dla wyeliminowania błędów zegarów odbiorników i satelitów a także wpływu jonosfery,

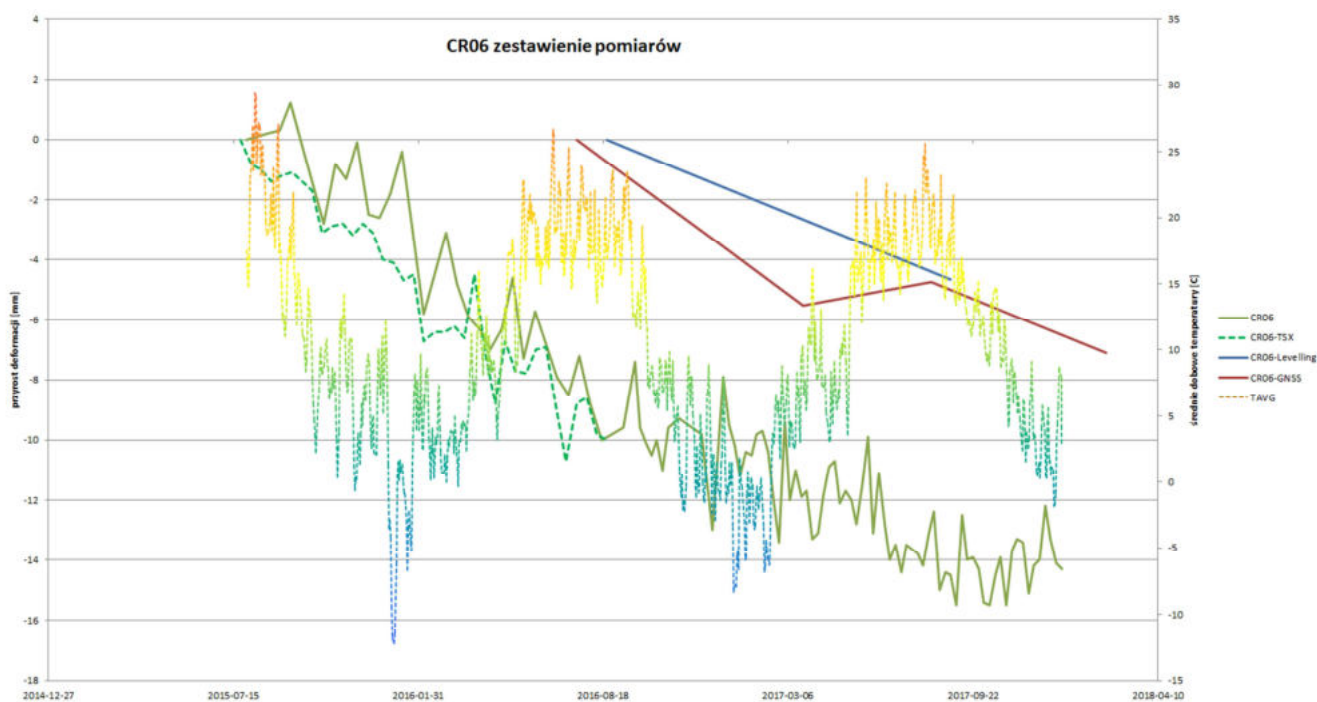
troposfery i błędów orbity. W obliczeniach InSAR podwójne różnice wykorzystywane są do obliczeń przyrostów deformacji punktów PS, których nie możemy dowiązać do bezwzględnego układu współrzędnych.

Kolejną sprawą jest uwzględnienie faktu, że dane InSAR nie reprezentują kierunku prostopadłego do elipsoidy a kierunek w stosunku do niej ukośny (LoS). Dla celów porównawczych można obliczyć składową ukośną wektora pionowych przemieszczeń GNSS i niwelacji lub składową pionową wektora obserwacji InSAR. W drugim przypadku powinno się najpierw dokonać pełnej dekompozycji sygnału na składowe XYZ a następnie obliczyć składową LoS na podstawie składowej Z. Obliczenie takie nie jest możliwe, gdyż obserwacje InSAR nie pozwalają na pełną dekompozycję składowych wektora przemieszczeń. Z tego powodu ostateczną analizę porównawczą wyników prowadzono dla składowej LoS.

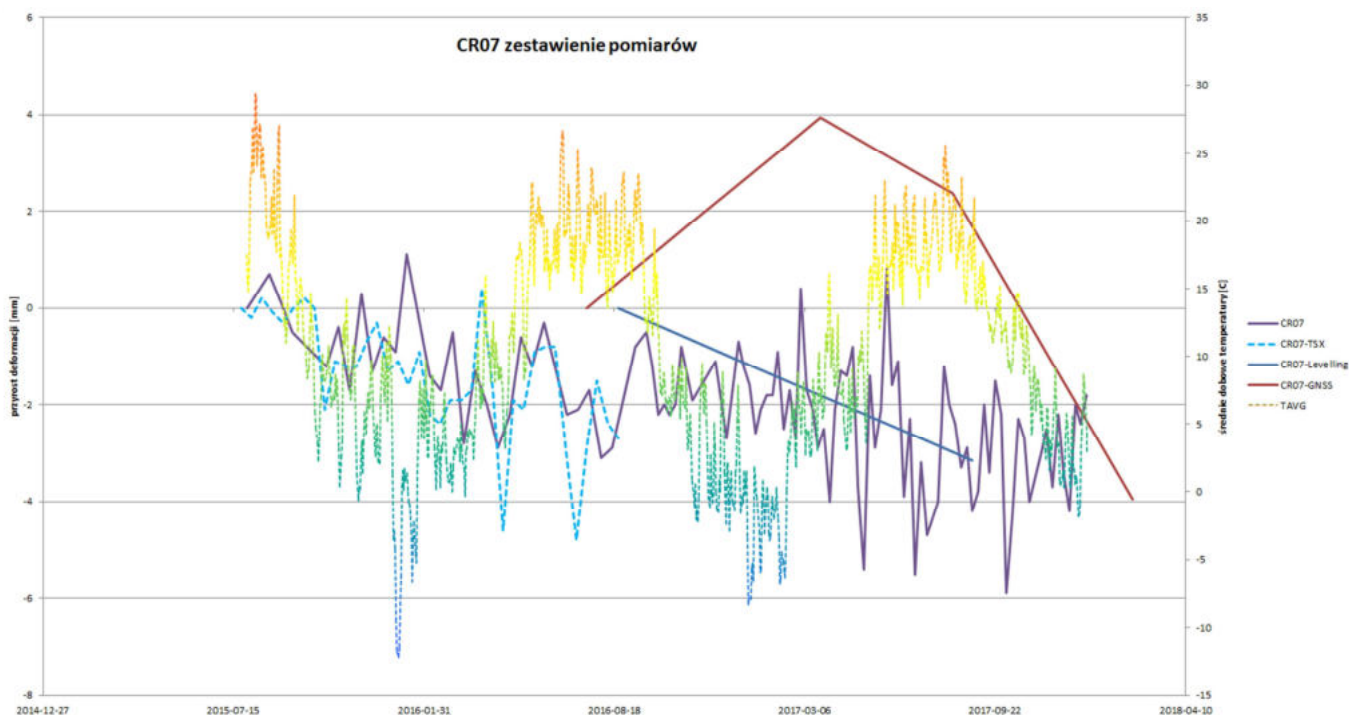
Użyte metody pomiarowe wykazały swoją generalną kompatybilność i porównywalność wyników. Pewną trudność sprawia tutaj duża różnica w bazach czasowych pomiarów – półroczny GNSS, roczny dla niwelacji i oraz 11-, 12- i 6-dniowy dla pomiarów InSAR. Na rysunkach Ryc. 47-Ryc. 49 przedstawiono zestawienia serii czasowych podwójnych różnic na tle średnich temperatur dobowych.



Ryc. 47 Zestawienie podwójnych różnic pomiarów dla reflektora CR05



Ryc. 48 Zestawienie podwójnych różnic pomiarów dla reflektora CR06



Ryc. 49 Zestawienie podwójnych różnic pomiarów dla reflektora CR07

Analizując rysunki Ryc. 47-Ryc. 49 warto pamiętać, że podwójne różnice dla każdej serii pomiarowej były liczone w stosunku do pierwszego (najstarszego) pomiaru i dlatego serie GNSS i niwelacji są jakby „zawieszone” w stosunku do pomiarów InSAR. Należy jednak zwrócić uwagę, że trendy serii są bardzo do siebie zbliżone. Zgodność jest szczególnie dobra

dla pomiarów TerraSAR-X, Sentinel-1 oraz niwelacji precyzyjnej. W przypadku danych GNSS najlepszą zgodność uzyskano dla reflektora CR06, który wykazywał największą mobilność. Najgorsza zgodność pomiarów GNSS z pozostałymi wystąpiła dla reflektora CR07, ale dla tego obiektu otrzymano największe błędy w trakcie opracowywania pomiarów GNSS (RMS 5.06 – 6,66 mm).

Wyniki analiz przemieszczeń na infrastrukturze pomiarowej wykazały maksymalne przemieszczenia dochodzące do -10 mm/rok w kierunku LoS na reflektorze CR06. Tak duże wartości przemieszczeń, jak i cała przedstawiona analiza dowodzi zasadności wykorzystania metod satelitarnych do monitoringu przemieszczeń na terenach wysadów solnych, charakteryzujących się niestabilizowaniem procesów geologicznych.

#### **8.4 Konserwacja infrastruktury pomiarowej i jej dalsze losy**

Infrastruktura pomiarowa poligonu Wapno jest cały czas utrzymywana w dobrej kondycji. Jest ona co najmniej raz w roku sprawdzana i konserwowana. Koszone jest najbliższe otoczenie reflektorów, ich wnętrza jest czyszczone i sprawdzany jest stan powłok antykorozyjnych.

W styczniu 2018 rozpoczęto prace nad zadaniem p.t. „Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski (InMPTP) – etap I”. Celem tego projektu jest zbudowanie serwisu zapewniającego dane o deformacjach powierzchni terenu Polski, które pozyskiwane będą z interferometrycznego przetwarzania obrazów Sentinel-1. Jednym z kluczowych elementów projektu jest walidacja danych InSAR oraz ich prawidłowe dowiązanie do państwowego układu współrzędnych a to zadanie nie jest możliwe do wykonania bez rozbudowanej sieci reflektorów radarowych. Istniejąca infrastruktura pomiarowa poligonu Wapno będzie więc nadal przez kolejne utrzymywana i wykorzystywana, w tym również do pomiarów naziemnych.

#### **8.5 Podsumowanie opracowania monitoringu geodynamicznego**

Przeprowadzone analizy różnych zestawów niezależnych danych radarowych, przetwarzanych różnymi metodami pokazały spójny obraz deformacji. Wyraźnie niestabilne pozostają wysady dla których prowadzona jest lub była w przeszłości eksploatacja podziemna



(Wapno, Kłodawa, Inowrocław). W świetle tych kompleksowych wyników jeszcze większe uzasadnienie znajduje decyzja o monitorowaniu rejonu Wapna. Współczesna dynamika pasa wysadów solnych jest niewielka, naturalne ruchy są w granicach 1- 2mm/rok. Wielkości te są na granicy błędów pomiarowych. Tak niewielkie deformacje były możliwe do stwierdzenia dzięki danym Sentinel-1 z 5-cio letniego okresu obserwacji. Regionalna analiza danych historycznych z lat 1992 – 2010 okazała się być niewykonalna w zakładanym zakresie z uwagi na bardzo niepełne archiwa – dane radarowe dla terenu Polski gromadzono wówczas sporadycznie, w długich odstępach czasowych. Niewielkie, naturalne ruchy o magnitudzie do 1mm/rok, jeśli występują mogą być w przyszłości wykryte jeśli dostępny będzie zbiór danych Sentinel-1 dla co najmniej dziesięciolecia.

## **9 Rozpoznanie wstępne budowy geologicznej czwartorzędu i neogenu wybranych wysadów solnych**

Do charakterystyki budowy geologicznej obszarów badawczych wykorzystano analizę Szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami dla arkuszy; Dla obszaru badawczego Izbicy Kujawskiej wykorzystano badania geologiczne z arkuszy Izbica Kujawska – 479 (Brzeziński 2009, 2013) i Sompolno – 478 (Kozydra, Brzeziński 1996, 2013), dla obszaru Łanięta – z arkusza Gostynin – 481 (Roman 1999, 2011), dla obszaru Wapno - z arkusza Kcynia (Chachaj 2005 a, b) i dla obszaru Łęczycy – arkuszy Łęczycy (Domosławska 1960, Domosławska-Baraniecka 1968) oraz z materiałów Mapy geologicznej Polski w skali 1:200.000 arkusz Płock (Brzeziński, Krawczyk 2008). Korzystano także z innych opracowań archiwalnych, które wymieniono w rozdziale Literatura.

**Szczegółowy opis rozpoznania wstępnego stanowi raport z Zadania nr 10.1 wraz z załącznikami.**

### **9.1 Obszar Izbica Kujawska**

#### **1) Perm**

Na obszarze opracowania, w bezpośrednim podłożu podkenozoicznym, zalegają utwory permsko-mezozoiczne. Utwory **permu** wykształcone są w postaci formacji ewaporatowej cechsztynu: soli kamiennej, anhydrytów, zubrów i gipsów, które budują rdzeń struktury solnej Izbica Kujawska, będącej częścią większej struktury solnej Izbica-Kłodawa-

Łęczycza. Osady cechsztynu nawiercono w 5 otworach, najwyżej na wysokości 123,5 p.p.m. (Kłodawa 71) w północnej części struktury solnej, najniżej 448,0m p.p.m. (Podtymień K-69) w południowej części struktury solnej. Dalej na południe, utwory cechsztynu występują głębiej, co dokumentuje otwór w Długiem (Długie K-68), w którym nie dowiercono osadów cechsztynu do 516 m p.p.m. Opisywane jest jako stopniowe obniżanie zwierciadła solnego wysadu Izbicy Kujawskiej z północy na południe (Orska, Werner, 1987). Podłoże osadów cechsztynu występuje na głębokości około 7000 m (Dadlez, Marek 1974).

## **2) Trias**

Utwory triasu rozpoznano w otworze Augustynowo 1 (K-39) (przekrój A-A'), gdzie ich strop leży na wysokość około 100m p.p.m. Mułowce, iłowce oraz mułki i piaski zalegają tu nad osadami czapy struktury solnej Izbicy Kujawskiej. Ich spąg został nawiercony na wysokości 140 m p.p.m. Pod triasowymi iłowcami występują iłowce z gipsami i anhydrytami czapy wysadu miąższości 32,7m. W stropie tych osadów występują iłowce z gipsami i anhydryty miąższości około 40m. Podobny układ osadów struktury solnej nad i pod triasem występuje w okolicach Siedlca na północ od Łęczycy w strukturze solnej Kłodawa-Łęczycza-Ozorków (Krzywiec 2004).

## **3) Jura**

Wapienie, dolomity, iłowce i piaskowce jury zalegają bezpośrednio pod kenozoikiem nad strukturą solną na południe i wschód od obszaru, na którym osady wysadu i czapy solnej występują na powierzchni podkenozoicznej. Jura górna występuje także na wschód od struktury solnej Izbicy Kujawskiej, gdzie jest najmłodszym ogniwem stratygraficznym tej części wału śródpolskiego (Żelaźniewicz i in., 2011). Jurę nad strukturą solną nawiercono w Izbicy Kujawskiej (K-67), Podtymieniu (K-69) i Zdrojówce (otwór Kłodawa K-71). Miąższość nieprzewierconych osadów jury nad strukturą solną Izbica Kujawska wynosi od 51m w Zdrojówce do 228,8 m w Podtymieniu.

## **4) Kreda**

Uważa się, że młodsze ogniwa kredy górnej zastały na obszarze struktury solnej Izbica Kujawska usunięte w czasie inwersyjnego wypiętrzania wału śródpolskiego. Na zachód od

struktury solnej występują utwory **kredy** reprezentowane przez mułowce, iłowce, piaskowce, margle, wapienie i dolomity, notowane m.in. na przekroju geologicznych A-A' w wierceniach Mąkoszyn MG-20 (strop osadów kredy na wysokości 16,5 m n.p.m.). Utwory te nawiercono także w Świętosławicach (otw. Świętosławice 1, strop 24,1 m n.p.m.) i Ślazierze (otw. Ślazierze 1, strop 13,8 m n.p.m.). Osady czapy solnej to ility i iłowce oraz mułowce z przewarstwieniami gipsów i anhydrytów, gipsy i anhydryty. Występują one poniżej osadów mezozoicznych. Miąższość osadów czapy solnej wynosi od 74,5 m w Zdrojówce (otw. K-71) do 144,5 m w Podtymieniu (K-69).

Podłoże kenozoiku charakteryzuje się zróżnicowaniem morfologicznym i wysokościami od ok. 80,0 m p.p.t. do 170,0 m p.p.t. Tam, gdzie pod kenozoikiem nawiercono osady jury i kredy opis profilu, w tym profilowania weryfikujące, nie zawiera wzmianek o występowaniu na kontakcie osadów jury lub kredy serii lub wkładek gipsu i anhydrytu. Wpływ na to miała działająca na tym terenie tektonika solna, która spowodowała wypiętrzanie starszych utworów i odsłanianie ich pod kenozoikiem, np. na północ od Izbicy Kujawskiej.

W stropie osadów mezozoicznych nad strukturą solną osady czapy solnej nawiercono w Augustynowie (otwór K-39), gdzie leżą na osadach triasu.

## 5) Paleogen

Do osadów tworzących się kredzie górnej i paleogenie zaliczono zgodnie z regionalnym schematem stratygraficznym gipsy, anhydryty oraz ility, iłowce i mułowce z gipsami i anhydrytami tworzące okrywę osadów struktury solnej. Taką pozycję stratygraficzną tych osadów należy uznać za naturalną. Jednak trudno zaprzeczyć, że tworzenie się czapy gipsowej jako naturalnego produktu wyługowywania soli kamiennej i innych skał struktur solnych trwało dłużej: zarówno wcześniej i później jak tak nakreślony czas powstania osadów struktury czapy. W Augustynowie (profil Augustynowo K39) iłowce z udziałem anhydrytów czapy solnej leżą między solami struktury solnej a iłowcami z udziałem gipsów jako okrywającą strukturę solną czapa solna.

W odwierconym dla opisywanego projektu otworze Izbica Kujawska PIG-1 na głębokości 78,5-100,0 m występują iłowce, mułowce oraz piaski z przewarstwieniami gipsów. Osady są warstwowe i pochylone od 45° do 60°. W strefie stropu osadów gipsy tworzą jednorodne przewarstwienia niezgodne z nachyleniem całej serii. Od około 80 m głębokości występują jako przewarstwienia pochylone zgodnie z nachyleniem całości serii,

wypełniające przewarstwienia, pustki międzyławicowe, miejscami inkrustując luźniej spojone mułowce i ilowce. Miąższość warstw gipsu wynosi od 4-20 cm. Lokalnie w dolnej części serii tworzy nieciągłe przewarstwienia. W osadach przepuszczalnych bezpośrednio nad tą serią występują wody z dużą zawartością substancji mineralnych, z dominującymi składnikami: sodem Na (1, 7 g/l) i chlorem Cl (2,1 g/l) (próbka 1010/18/1, tabela 2). Osady czapy gipsowej zaklasyfikowano stratygraficznie do kredy górnej i paleogenu (m.in. Roman 2014, 2015).

### **Eocen**

Występowanie osadów paleogenu zostało udokumentowane wynikami badań Pożaryskiego (1953), Odrzywolskiej-Bieńkowej (1966) i Woźnego (1966). Pożaryski w Izbicy Kujawskiej stwierdza w profilu miąższości 61,8 m faunę typową dla brakicznego środowiska morskiego. Wiekowo określa ją jako pochodzącą z oligocenu górnego z możliwością zakwalifikowania także jako najwyższej części oligocenu dolnego.

Odrzywolska-Bieńkowa (1966) na podstawie mikrofauny otwornicowej z otworów Augustynowo K39 (oraz badanej przez M. Smoleńską-Nehring mikrofauny z otworu Izbica Kujawska K 37) sytuuje je stratygraficznie jako osady eocenu górnego na podstawie badania otwornic z profilu Izbica Kujawska K 37 z głębokości 123,0-207,0 m E. Odrzywolska-Bieńkowa, (1966). Według opisu litologicznego rdzenia Augustynowa K-39 badany osad rozpoczyna się na głębokości 207,6 (opis: zlityfikowany okrucowiec wapnisty szary) (100,6m p.p.m.).

Woźny (1966) badał faunę z otworu Izbica Kujawska K 67 mięczaki z odcinka na głębokości 125,2-137,0 m. Korelował ją z latdorfem, zaliczonym obecnie do eocenu górnego (za: Peryt, Piwocki 2004). Badany odcinek rdzenia występuje na głębokości 125,2-137,0 m i litologicznie. W Izbicy Kujawskiej K 67 osady paleogenu rozpoczynają się na głębokości 158,7 m (51,7 m p.p.m.) piaskowcem drobnoziarnisty przechodzący w mułki ciemnoszare. Granicą z nadległym węglem brunatnym jest na głębokości 91 m (16 m n.p.m.) i ją należy traktować jako rozdzielenie od osadów neogenu osadzonych w innym środowisku brakiczne osady mułkowe paleogenu.

Profil Izbica Kujawska PIG-1 został odwiercony około 1,5 km na północny wschód od profilu Augustynowo K-37. Słodkowska (2018) w ramach tego zadania wykonała badania 13 próbek osadów. Ze względu na skład zespołów fitoplanktonu rozdzielając je na dwa odrębne okresy wiekowe. Zespół starszy (91,9 – 92,0 m) określa osad na głębokości 89,5 - 93,5

(badanie objęło 2 próbki), który ze względu na spektra pyłków należy do eocenu dolnego. Osady rozpoczynają się na głębokości 93,5 m. Tworzą go mułki ilaste przechodzące w piaski drobnoziarniste. Osad reprezentuje dolną część profilu.

### **Oligocen**

Zespół osadów młodszych z Izbicy Kujawskiej PIG-2 występujący na głębokości 89,5 – 71,0 m (30,5-48,5 m n.p.m.) litologicznie zbudowany z mułków węglistych, piasków zawęglonych, lokalnie mułków ilastych Słodkowska określa jako dolnooligoceni. Różnice w składzie spektrów pyłkowo-fitoplanktonowych i dynamice zbiornika układają się konsekwentnie w kierunku zwiększania jego dynamiki, co też przekłada się na dużą zmienność litologiczną osadów.

W profilu Izbica Kujawska PIG-4 osady oligocenu rozpoczynają się piaskami różnoziarnistymi na głębokości 97,6 m. Powyżej leżące serie piasków drobnoziarnistych, węgla brunatnego oraz mułków piaszczystych. Piaski drobnoziarniste lokalnie zawierają sieczkę roślinną (głęb. 77,7-78,0 m, 79,0-79,3 m, 87,7-88,0 m) oraz ksylity (87,8 m, 90,5 m).

## **6) Neogen**

Utwory neogenu występują praktycznie na całym obszarze. Lokalnie, w okolicy Izbicy Kujawskiej, brak jest osadów neogenu, a podłoże czwartorzędu stanowią skały mezozoiku. Miocen reprezentowany jest przez mułki i piaski, piaski drobnoziarniste, rzadziej gruboziarniste, iły i mułki lokalnie z pokładami węgla brunatnego. W okolicach Mąkoszyna i Grochowisk na zachód od struktury solnej Izbica Kujawska, częściowo w obrębie obszaru badawczego Izbica Kujawska występuje pokład węgla brunatnych korelowany z środkowopolską grupą pokładów węgla brunatnego. Lokalnie w okolicach miejscowości Kozaty i Ślazewo (poza obszarem badawczym) występują dwa pokłady węgla brunatnego (np. Mąkoszyn MG14, Mąkoszyn Grochowiska 37/32C). dwa pokłady węgla brunatnego występują także w Kolonii Grochowiska (otwór Mąkoszyn MG22). Można przypuszczać, że, zwłaszcza na obszarze struktury solnej Izbica Kujawska występuje właśnie dolny, starszy pokład węgla brunatnego. Jego pozycja stratygraficzna nie jest jasna.

Najwyżej w profilu miocenu występują iły i pyły oraz piaski drobnoziarniste lokalnie z wkładkami węgla brunatnych, zaliczane są do utworów formacji poznańskiej. W zachodniej części obszaru badawczego występują jako najwyższa część osadów neogenu o zmiennej miąższości od 8m do ponad 30m. Na obszarze Wzniesień Izbickich osady formacji

poznańskiej występują w deformacjach glacitektonicznych. Na północ od Wzniesień Izbickich w strefie struktury solnej (otwory Izbica Kujawska PIG-1 i PIG-2) osady neogenu zostały usunięte i nie występują w podłożu czwartorzędu.

Najwyżej w profilu miocenu występują ropy i pyły oraz lokalnie piaski drobnoziarniste, zaliczane są do utworów formacji poznańskiej. W zachodniej części obszaru badawczego występują jako najwyższa część osadów neogenu o zmiennej miąższości od 8 m do ponad 30 m. Na obszarze Wzniesień Izbickich osady formacji poznańskiej występują w deformacjach glacitektonicznych. Na północ od Wzniesień Izbickich w strefie struktury solnej (otwory Izbica Kujawska PIG-1 i PIG-2) osady neogenu zostały usunięte i nie występują w podłożu czwartorzędu.

## **7) Czwartorzęd**

Utwory tworzą zwartą pokrywę na całym obszarze. Osady czwartorzędu na analizowanym obszarze posiadają zróżnicowaną miąższość i profil litologiczno-facjalny. Największa miąższość osadów występuje w obrębie jednostki Izbica Kujawska-Kłodawa-Łęczycza, gdzie osady mogą osiągać powyżej 100,0 m miąższości. Bardzo często jednak rozpoznanie geologiczne jest niejednoznaczne, ze względu na kontakt osadów piaszczystych czwartorzędu i neogenu, stąd autorzy objaśnień do SmgP (np. Kozydra, Brzeziński 2013, Brzeziński 2013) sugerują ostrożność w interpretacjach opartych na niepewnym materiale archiwalnym.

W wierceniach badawczych (Izbica Kujawska PIG-2, PIG-3) występują 4 poziomy glin zwałowych rozdzielonych osadami międzyglinowymi. Dwa dolne poziomy glin zwałowych korelowane są z osadami zlodowaceń południowopolskich. Podobne warunki geologiczne poziomów glin zwałowych z arkusza Sompolno (Kozydra, Brzeziński 1996, 2013), gdzie na podstawie badań litologiczno-petrograficznych Zabielskiego wyodrębniono, na zachód od struktury solnej Izbicy Kujawskiej, dwie gliny zwałowe z tego okresu pozwalają precyzyjniej je korelować z okresami zlodowacenia San 1 i San 2. Osady zlodowaceń San 1 i San 2 poza glinami zwałowymi tworzą piaski wodnolodowcowe zebrane w kilka odrębnych wydzieleni osadów wodnolodowcowych oraz niewielkiej miąższości osady zastoisk. Na obszarze struktury solnej podlegały deformacjom glacitektonicznym co przedstawia przekrój A-A' między Izbicą Kujawską (otw. Izbica Kujawska PIG-3) i Augustynowem (otw. Izbica Kujawska PIG-1).

Brak na obszarze badań osadów organicznych korelowanych z **interglacjałem mazowieckim** (wielkim). Osady takie najbliżej opisano z obszaru Łanięta (Granoszewski 2018). Poza obszarem badań występują osady rzecznych dolin kopalnych, wypełnione osadami piaszczystymi o zróżnicowanej granulacji, charakterystycznej dla profili osadów rzecznych. Osady interglacjalne nie tworzą ciągłych pokładów, a ich miąższości mogą dochodzić do 20,0 m.

Profil utworów **zlodowaceń środkowopolskich** budują dwa poziomy glin zwałowych (zlodowacenia Odry i Warty), rozdzielone piaszczystymi utworami wodnolodowcowymi i ilasto-mułkowymi osadami zastoiskowymi. Rozpoznane poziomy glacialne są nieciągłe i osiągają miąższość do 20,0-30,0 m. Z obydwoma poziomami glacialnymi wiążą się stratygraficznie osady zastoiskowe. Tworzą dwa dobrze udokumentowane zbiorniki kopalne na południe i zachód od Wzniesień Izbickich, wskazującymi na względne obniżenie tego obszaru w czasie zlodowaceń środkowopolskich. Osady zastoiskowe rozdzielają gliny zwałowe na podstawie regionalnego rozpoznania budowy geologicznej korelowane ze zlodowaceniem odry.

Osady **zlodowaceń północnopolskich** rozpoznano na całym opracowywanym obszarze i wykształcone są w postaci piaszczystych utworów rzecznych, lodowcowych i wodnolodowcowych, glin zwałowych oraz osadów zastoiskowych. Na powierzchni terenu występują rozległe obszary wysoczyzny morenowej zbudowane z glin zwałowych tego okresu, formy moren czołowych wyciśniętych zbudowanych z piasków i żwirów oraz glin zwałowych, zdeformowanych w wyniku procesów glacitektonicznych. Tworzą one Wzniesienia Izbickie, najwyższe części obszaru badawczego Izbicy Kujawskiej, które to wzniesienia kształtowały procesy glacitektoniczne. Na powierzchni terenu występują także niewielkie pola piasków i żwirów sandrów sypanych na południe od Wzniesień Izbickich oraz wypełniające obniżenia na północy obszaru badawczego. Miąższość osadów wodnolodowcowych sandrów na południe od Wzniesień Izbickich przekracza 15 m. Świadczy o istnieniu obniżenia w tej części obszaru, nawiązującego miejscem do jezior zastoiskowych z okresu zlodowaceń środkowopolskich.

Najmłodsze osady występujące na omawianym obszarze to osady **holoceńskie**. Powszechnie występują torfy, związane z zabagnionymi obniżeniami terenu. Rzadziej są to piaski humusowe i namuły, które występują przy niewielkich ciekach wodnych. Miąższość holocenu dochodzi maksymalnie do 10,0 m.

## 9.2 Obszar Łanięta

### 1) Perm

Na obszarze opracowania, w bezpośrednim podłożu podkenozoicznym, zalegają utwory permsko-mezozoiczne. Utwory **permu** wykształcone są w postaci soli kamiennej formacji cechsztyńskiej, rzadziej zubrów i anhydrytów. Dla udokumentowania struktury wysadu wykonano 19 otworów wiertniczych (Dębski, 1963, Parecka 1980), z których 14 dosięgnięto lustra solnego a 16 otworów dokumentowało cały profil czapy wysadu lub jego znaczącej części. Wysad Łanięta posiada dokumentację geologiczną złoża soli kamiennej (Dębski 1964, Parecka 1980). Wysad solny jest częścią grzebienia solnego Brześć Kujawski – Wojszyce (Dadlez, Marek 1974). Zwierciadło solne zostało nawiercone na głębokości stosunkowo podobnej: od 243,1 m (otwór Łanięta PIG-3) do 323 m (Łanięta PIG-1) Spąg cechsztynu występuje na głębokości około 6500 m (Orska, Werner 1987).

### 2) Jura

Utwory jury górnej reprezentowane przez mułowce, ilowce, piaskowce, margle, wapienie i dolomity i występują w otoczeniu wysadu solnego Łanięta na powierzchni podkenozoicznej. Strop osadów permsko-mezozoicznych jest bardzo zróżnicowany wysokościowo, zwłaszcza bezpośrednio nad wysadem solnym Łanięt, gdzie występuje na wysokościach od ok. 90,0 m p.p.t. do 170,0 m p.p.t. Wpływ na to miała działająca na tym terenie tektonika salinarna, która spowodowała wypiętrzanie starszych utworów.

### 3) Paleogen

W stropie serii solnej, w wyniku procesu ługowania soli, powstała w kredzie i paleogenie czapa solna gipsowo-anhydrytowo-ilasta. Jej miąższość jest bardzo zmienna i wynosi od 29,6 m w Witoldowie (otw. Łanięta Ł-4) do ponad 241 m na zachód od Witoldowa (Łanięta Ł-14), gdzie czapy solnej nie przewiercono. Zmienność grubości czapy solnej wiąże się z usytuowaniem profilu wiertniczego względem zapadliska subrozcyjnego Łanięt (Kasiński, 2004). Na obszarze zapadliska miąższości czapy gipsowej są mniejsze, co można wiązać ze szczególnie intensywnym wylugowywaniem w tej części wysadu.



### **Paleocen**

W Witoldowie (Łanięta Ł-4) Grabowska (1964) opisała analizą palinologiczną zespoły sporomorf, których formy wskazują na pochodzenie osadów z paleocenu górnego. Osady paleocenu występują tu na głębokości 218,4-224,8 m bezpośrednio nad osadami czapy gipsowej.

### **Eocen górny**

Utwory eocenu górnego zidentyfikowano na podstawie badań mikrofauny w Łaniętach (Łanięta Ł-1) (Odrzywolska-Bieńkowa, Pożaryska, 1984) w próbach z iłów i piasków drobnoziarnistych. Osady eocenu występują na głębokości 192,6-208,0m bezpośrednio nad czapą solną.

### **Oligocen**

Bezpośrednio powyżej osadów morskich eocenu górnego w Łaniętach (Łanięta Ł-1) występuje dolny pokład węgla brunatnego, który należy wiązać z czempińską grupą pokładów i stratygraficznie przypisać wiek oligoceński, wraz z towarzyszącymi węglom piaskom i mułkom. Podobny wiek mają także osady o litologicznych i litostratygraficznych z zapadliska Łanięt (patrz przekrój geologiczny C-C').

## **4) Neogen**

Utwory neogenu występują ciągłą warstwą na całym obszarze, ale wykazują silne zaburzenia i zróżnicowanie. **Miocen dolny i środkowy** reprezentowany jest przede wszystkim przez piaski drobnoziarniste, rzadziej gruboziarniste z wkładkami węgla brunatnych i osiąga miąższości do 120,0 m we wschodniej części wysadu solnego poza obszarem zapadliska subbrozyjnego (otw. Łanięta Ł-7). W innych obszarach poza zapadliskiem wykazuje dużą zmienność litologii i miąższości. Opis części osadów w wierceniach jest dość niepewny, dlatego można przypuszczać, że dolne części osadów zakwalifikowanych tutaj do miocenu mogą być starsze i pochodzić z paleogenu.

Miocen środkowy i górny (formacja poznańska) osiąga znacznie mniejsze miąższości (do ok. 20,0 m) i wykształcony jest głównie w postaci iłów pstrych z przewarstwieniami mułków i piasków. Osady formacji poznańskiej nad wysadem solnym występują głównie nad zapadliskiem subbrozyjnym, gdzie występuje jako ciągła pokrywa o miąższości do 40-50 m. Poza zapadliskiem notowane są tylko w zachodniej i południowo zachodniej strefie krawędzi

wysadu solnego Łanięta. Jego zniszczenie przynajmniej częściowo związane jest z deformacjami glacitektonicznymi, którym ulegała strefa południowej krawędzi wysadu, gdzie w Suchodębii (nr CBDG Id91670) i w Budach Starych (otw. Łanięta PIG-5) osady tej formacji występują od wysokości 94,0-96,0 m n.p.m., czyli wyjątkowo wysoko.

## 5) Czwartorzęd

Osady czwartorzędu na analizowanym obszarze posiadają zróżnicowaną miąższość i profil litologiczno-facjalny. Miąższość w obrębie wysadu solnego Łanięta waha się od ok. 45,0 m do ponad 100,0 m (otw. Łanięta PIG-2).

Na omawianym terenie w profilu osadów plejstocenu wydziela się przede wszystkim osady lodowcowe, wodnolodowcowe i zastoiskowe zlodowaceń: południowopolskiego, środkowopolskiego i północnopolskiego oraz interglacjałów: mazowieckiego. Rozpoznanie osadów czwartorzędu opierało się na profilach wierceń surowcowych dla udokumentowania złoża soli wysadu Łanięta. Obserwacje prób okruchowych, na których opiera się opis stratygraficznych czwartorzędu są niepewne, a czasami wprost zwodnicze. Potwierdzają to przekroje geologiczne C-C' i D-D' dołączone do tej dokumentacji. Miejsca niepewne na poszczególnych profilach archiwalnych zaznaczono na nich.

W profilu utworów **zlodowaceń południowopolskich** rozpoznano 2 poziomy glin zwałowych, rozdzielone wodnolodowcowymi osadami piaszczysto-żwirowymi.. Poziomy najstarszych zlodowaceń na obszarze arkusza Gostynin (Roman 1999, 2011) nie tworzą ciągłych pokładów i na znacznym obszarze zachowały się jedynie w formie szczątkowej. Stosunkowo pełny profil zachowany został w obszarze wysadu solnego, w obniżeniu podłoża podczwartorzędowego, gdzie osiągają największe miąższości. Poziom niższy korelowany ze zlodowacenie Nidy występuje tu konsekwentnie na obszarze zapadliska subbrozyjnego Łanięt (przekrój geologicznych A-A'), gdzie osiąga miąższość do 8 m. Poza zapadliskiem został zidentyfikowany w Witoldowie (otw. Łanięta PIG-4). Gliny zwałowe drugiego poziomu zlodowaceń południowopolskich zostały opisane jako wspólny poziom ze zlodowaceń San 1 i San 2. Miąższość glin zwałowych wynosi 25-30 m (otw. Łanięta Ł-3 i Łanięta PIG-2). Zwraca uwagę występowanie dwóch serii osadów jeziornych i zastoiskowych w zapadlisku subbrozyjnym (otw. Łanięta PIG-4). Ich miąższości przekraczają 30 m a zasięg przestrzenny był ograniczony do części obszaru nad zapadliskiem subbrozyjnym Łanięt.

Z interglacjałem mazowieckim (wielkim) związane są rzeczne doliny kopalne, wypełnione osadami piaszczystymi o zróżnicowanej granulacji, charakterystycznej dla profili

osadów rzecznych. Osady interglacjalne nie tworzą ciągłych pokładów, a ich miąższości mogą dochodzić do 30,0 m. W tym czasie miała miejsce silna erozja osadów najstarszego plejstocenu. We Franciszkowie (profil Łanięta PIG-2) występują na głębokości 30,8-46,0 m mułki organiczne i gytie. Badania palinologiczne (Granoszewski 2018) wykazały, że spektrum pyłkowe w górnej części określa poziomy pyłkowe z tych osadów jako *Carpinus-Abies-Betula* L PAZ o wysokim udziale jodły i graba oraz olchy i dębu. Zawiera on zapis końcowej fazy okresu grabowo-jodłowego i wraz z młodszym poziomem 45,38 – 43,94 m – *Betula-Pinus-Larix-(Juniperus)* L PAZ reprezentującym okres sosnowo-brzozowy na podstawie składu taksonomicznego (współwystępowanie graba i jodły, obecność *Celtis*) należy zaliczyć do schyłkowej fazy interglacjalna mazowieckiego, czyli MIS 11c (Mamakowa, 2003).

Wobec powyższej interpretacji spągu osadów z Łanięta PIG-2 sukcesję pyłkową zawartą w dwóch młodszym poziomach pyłkowych to jest: 43,42 – 40,04 m – *Juniperus-Betula-Poaceae (Artemisia)* L PAZ i 38,96 – 35,52 m – *Poaceae-Juniperus-Betula (Artemisia)* L PAZ należy przypisać do wczesnego glacialu zlodowacenia liwca (MIS 10). Porównanie sukcesji z Łanięta z sukcesją z Ossówki na Podlasiu (Krupiński, 1995) wskazuje na wiele ścisłych podobieństw w rozwoju roślinności w okresie po optimum klimatycznym interglacjalnym z profilem Łanięta PIG-2.

W górnej części profilu nad piaskami drobnoziarnistymi, na głębokości 30,8 – 31,5 m występują poziom pyłkowy *Pinus-Carpinus-Corylus* L PAZ reprezentujący okres lasów sosnowo-brzozowych i grabowo-dębowych z leszczyną środowiska klimatu interglacjalnego korelowanego (Granoszewski 2018) z MIS- 9 w polskiej stratygrafii nazywany okresem zbójna. Rozciągłość czasowa między obydwoma okresami ciepłymi wynosi około 80-100 tys. lat i świadczy o stabilności warunków środowiskowych tego okresu na obszarze wysadu solnego Łanięta.

Profil utworów zlodowaceń środkowopolskich w omawianym obszarze budują 3 poziomy glin zwałowych (zlodowacenia Odry i Warty), których granica jest niejasna i wspólnie tworzą wydzielenia stratygraficzne. Na części obszaru poziomy glinowe są rozdzielone piaszczystymi utworami wodnolodowcowymi. W okresie zlodowacenia Odry powstawały również ilasto-mułkowate osady zastoiskowe notowane jako seria niewielkiej miąższości nad zapadliskiem subbrozyjnym. Osady prawdopodobnie tego wieku ustępują jako znacznej miąższości przy krawędzi zapadliska (otwory Łanięta PIG-3, S14, S10, i Łanięta Ł-8). Gliny zwałowe zlodowacenia Warty występują powszechnie na powierzchni omawianego obszaru. W wyniku prac geologicznych wyodrębniono dwie gliny zwałowe rozdzielone

osadami wodnolodowcowymi. Osady wodnolodowcowe występują w Bodach Starych (otwory Łanięta PIG-4, Łanięta Ł-4), w Witoldowie (Łanięta S14) czy Łaniętach (Łanięta S5). Gлина zwałowa zlodowacenia Warty w Łaniętach wykazuje rozbieżne cechy litopetrograficzne w dolnej i górnej części (Roman 2011). Cechy te w przypadku górnej części glin zwałowych mają cechy zbliżone do glin zwałowych zlodowacenia wisły.

W dolinie Skrwy w Łaniętach (poza obszarem badań) występują torfy i gytie interglacjału eemskiego (Roman 2011). Osady nie są przykryte gliną zwałową, co posłużyło także do interpretacji stratygraficznej najmłodszej gliny zwałowej.

Osady zlodowaceń północnopolskich występują na obszarze wysadu solnego Łanięta w postaci piaszczysto-żwirowych utworów wodnolodowcowych. Na powierzchni terenu występują nieregularnie i pokrywają niewielkie obszary. Osiągają również niewielkie miąższości ok. 5,0 m. Gliny zwałowe ze zlodowaceń północnopolskich (stadiał górny zlodowacenia wisły) występują w odległości około 5-7 km na północ i zachód od obszaru badawczego. Łądolód zlodowacenia wisły nie dotarł do tego obszaru (Roman 2011).

Na powierzchni terenu rozpoznano także eluwalne piaski i piaski ilaste powstające z wietrzenia glin zwałowych zlodowacenia środkowopolskiego.

Najmłodsze osady występujące na omawianym obszarze to osady holocenijskie związane przede wszystkim z rzeką Skrwą. Wykształcone są w postaci mad rzecznych (mułki i ily) z piaskami oraz piaski humusowe wypełniające dna dolinne. Na powierzchni pojawiają się również piaski i piaski pyłowate deluwialne. Miąższość holocenu w dolinie rzecznej dochodzi do 15,0 m.

### **9.3 Obszar Wapno**

#### **1) Perm**

Sole kamienne, gipsy i anhydryty występują jako sole najmłodsze i młodsze cyklotemów Aller i Leine. Sole starsze cyklotemu Strassfurt występują w osiowej części wysadu i stanowią przeważającą masę złoża. Wysad w planie poziomym ma formę elipsy wydłużonej w kierunku NW-SE (długość do 750 m, a szerokość do 350 m). Strop zwierciadła solnego występuje na głębokości 160-180 m (Ratajczak, 1997, 2000) i jego wysokość jest stosunkowo stała.

W Wapnie od 1828 roku eksploatowano wysad solny. W latach 1911 -1977 prowadzono eksploatację soli kamiennej w kopalni głębinowej. W dniu 5 sierpnia 1977 roku do kopalni

wdarła się woda występująca w osadach nadkładu złoża soli kamiennej. Bezpośrednią przyczyną katastrofy było wdarcie wody do podziemnych wyrobisk z warstw wodonośnych położonych poza kopalnią. Zachwianiu uległa statyka górotworu, powstały liczne zapadliska, a 28 października 1977 roku rozległe zapadlisko w centralnej części Wapna obejmujące m.in. tereny kopalni, osiedla i stacji kolejowej. Ewakuowano około 1400 ówczesnych mieszkańców Wapna. Na obszarze zapadliska do dzisiaj powstają niewielkie zapadliska na obszarze ówczesnych deformacji.

## **2) Jura**

Osady jury górnej występują na powierzchni podkenozoicznej pasem od Wapna w kierunku północno zachodnim w kierunku na Gołańcz, wyznaczając tym przebieg osi struktury antyklinalnej pokrywy permio-mezozoicznej. W osady te leżą na wysokości 16,0 m n.p.m. i występują jako wapienie, iłowce, mułowce i mułki

## **3) Kreda**

Kreda górna nie występuje na obszarze wysadu, skąd została usunięta podobnie jak górne części kredy dolnej. Kreda górna znana jest z obszaru na południe i południowy wschód od wysadu Wapna (występują w otworach z rejonu wysadu Damasławek, np. w otworze Damasławek Geo 19). Kartograficzny opis struktur podkenozoicznych (m.in. Dadlez, Dembowska 1965) przedstawia osady kredy dolnej na obszarze wału śródpoleskiego, a na zachód od wysadu w obszarze niecki mogileńsko – łódzkiej także osady kredy górnej.

Utwory czapy gipsowej oddzielono od osadów wysadu Wapno, nadając im oddzielny numer. Nadbudowują one osady wysadu Wapna. Czapa w górnej części przekracza obszarowo zasięg pnia wysadu (Rasała i in., 2010, Raport nr 10.4). Sięga do powierzchni terenu (przekrój geologiczny F-F')

## **4) Paleogen**

### **Oligocen**

W Czeszewie leżącym na zachód od obszaru Wapno, w niecce mogileńsko- łódzkiej opisano piaski glaukonitowe i mułki miąższości ponad 90 m należące do oligocenu. Jest to

seria piasków drobnoziarnistych odpowiada osadom mosińskim dolnym (Ciuk 1970). Powyżej nich występuje seria złożona z mułków pyłowato-piaszczystych oraz ilów, cała jest nazywana ilami toruńskimi, a ich wiek jest określany na oligocen środkowy. W Czeszewie nad ilami toruńskimi występują piaski kwarcowe z domieszką glaukonitu z węglem brunatnym w stropie. Utwory oligoceńskie występują w Podolinie, jako około 40 metrowa warstwa ilów i piasków drobnoziarnistych z glaukonitem. Podobnie osady drobnopiaszczyste znajdują się na obszarze wysadu Wapna (Wapno C2) w otworze odwierconym po katastrofie 2010 roku. Ich pozycję stratygraficzną można uznać za nietypową i wymagającą wyjaśnienia.

### **5) Neogen**

Utwory mioceńskie na zachód od wysadu (Podolin 66/64) zbudowane są z piasków drobnoziarnistych kwarcowych oraz węgla brunatnego i ilów ciemno szarych. Węgiel brunatny występuje w postaci dwóch poziomów rozdzielonych piaskami. Miąższość całej serii wynosi około 70 m.

W Kcyni osady mułków węglistych i węgiel brunatny zostały zinterpretowane (Ciuk 1970, za: Chachaj, 2005 a,b). Sytuacją geologiczną węgla występującego często w postaci odrębnych kilku soczew przypomina pozycję węgla brunatnego górnego w Wapnie. Dolny mioceński podkład węgla brunatnego na zachód od wysadu może być starszym od warstw środkowopolskich.

Na obszarze wysadu nie ma ciągłej warstwy osadów neogenu. Występują natomiast piaski drobnoziarniste kwarcowe oraz węgiel brunatny notowany w postaci jednego poziomu, prawdopodobnie odpowiadającego warstwom środkowopolskim.

Iły oraz pyły ilaste i piaski drobnoziarniste formacji poznańskiej kończą sedimentację neogenu. Występują warstwa miąższości około 50 m na obrzeżach wysadu oraz około 30 m w obrębie wysadu. Charakterystyczna jest rozpiętość wysokości tych osadów na obszarze wysadu, od 30-40 m n.p.m. do 60-70 m n.p.m., wynikająca z deformowania tych osadów podobnie jak osadów miocenu dolnego i środkowego leżących poniżej. Lokalnie notuje się okruchy gipsów i skał krystalicznych w obrębie formacji poznańskiej w profilach z Wapna (Wapno C2, odwiercony w 2010 roku). Są one efektem przemieszczeń osadów starszych (neogen).

W centralnej części wysadu brak osadów miocenu.

## 6) Czwartorzęd

### Zlodowacenia południowopolskie

Profil czwartorzędu na obszarze Wapna jest bardzo zredukowany. Brak najstarszych ogniw stratygraficznych tego okresu, usuniętych zapewne w wyniku denudacji i erozji obszaru. Najstarsze gliny zwałowe leżące bezpośrednio nad osadami podłoża czwartorzędowego identyfikuje się (Chachaj 2015a,b) jako osady zlodowaceń południowopolskich. Określenie wieku glin zwałowych opiera się na wynikach składu petrograficznego żwirów, m.in. w Podolinie nawiercone na głębokości 55,5 m jako czwarty wyizolowany pokład glin zwałowych.

### Zlodowacenia północnopolskie

Rozległe powierzchnie wysoczyzny morenowej buduje jednolity pokład glin zwałowych. W okolicach wysadu Damasławka opisywane są (Włodek, 2002) jako jednolity poziom glin zwałowych o miąższości ponad 40 m w otworach 45 i 57 m. Miąższość glin tego poziomu wiąże się z tektoniką salinarną jako przejaw lokalnej tektoniki obszarów sąsiadujących z wysadem Damasławka.

### Holocen

Sedymentacja odbywała się głównie w obszarach rynien subglacialnych. Dominują osady jezior i bagnisk: gytie, torfy i kreda jeziorna, najczęściej wypełniające część obniżeń. Większy zasięg mają namuły, zwłaszcza wypełniające dna obniżeń.

## 9.4 Obszar Łęczycza

### 1) Perm

Obszar obejmuje południową część struktury solnej, która jako grzebień solny tylko częściowo przebija się przez utwory mezozoiku. Na obszarze badań nie nawiercono otworów permu. Najbliższe miejsce to Drozdów w gminie Świnice Warckie około 2 km na zachód od granicy obszaru (otwór Wartkowice 2, utwory permu na głębokości około 3000 m) ujmujący strukturę solną Wartkowice będącej elementem ciągu struktur Gopło – Ponętów – Wartkowice. Struktura solna Kłodawa – Łęczycza – Ozorków na powierzchni podkenozoicznej uwydatnia się na obszarze Łęczycza w postaci wychodni jury środkowej oraz w części zachodniej wychodni jury górnej. Osady permu nie zostały tu nawiercone. Głębokość stropu

permu szacowana jest (Dadlez, 1998) na około 5,8 – 6,5 tysiąca metrów rosnąc w kierunku południowym. Obrys struktury solnej na podstawie danych grawimetrycznych zdjęcia półszczytowego przedstawia raport 10.4 (Raport nr 10.4).

## **2) Jura**

Na odcinku Łęczycza – Ozorków struktury solnej Izbica Kujawska – Kłodawa – Ozorków na powierzchni podkenozoicznej nad strukturą solną występują osady jury środkowej i częściowo jury górnej. Osady jury dolnej występują bezpośrednio pod kenozoikiem na północ od obszaru badań, notowane m.in. w miejscowości Sobótka w gminie Grabów powiatu łęczyckiego.

W jurze środkowej przeważają facje iłowcowo- mułowcowe. W rejonie Łęczyczy z kujawu (bajos środkowy) była rozpoznana seria rudna w postaci 6 pokładów łupków z syderytami i syderytów, eksploatowanych w Łęczyckim Zagłębiu Rud Żelaza w latach 1955–1992. Miąższości poszczególnych ogniw stratygraficznych jury środkowej są niewielkie.

## **3) Kreda**

Występuje na zachód od struktury solnej. Są to łupki ilaste, z piaskowcami, wapieniami i marglami ilastymi oraz piaskami. mułki i mułowce, ropy i ropy oraz piaski. Sumaryczna miąższość osadów kredy dolnej wynosi około 150m (Domosławska-Baraniecka, 1968). Opisywane są okolice Osady kredy dolnej występują w Krzepocinie (przekrój F-F') na głębokości około 300 m.

## **4) Paleogen**

Najstarszymi osadami paleogenu morskiego są osady oligocenu dolnego (Ciuk 1970, 1974). Są piaski drobno- i średnioziarniste kwarcowe i kwarcowo-glaukonitowe. Występują lokalnie w obniżeniach podłoża na obszarze struktury solnej. Wypełniają tu obniżenia, interpretowane (Brzeziński 2008) jako miejsca ugięć w obrębie mezozoiku. Były niszczone przez procesy erozyjne na obszarze struktury Łanięta – Ozorków.



## 5) Neogen

Utwory piaszczyste i pyłowate z wkładkami węgla brunatnego tworzą ten poziom stratygraficzny. Na obszarze struktury solnej występują w postaci odrębnych płatków, co jest efektem postsedymencyjnej, czwartorzędowej erozji i gwarancyjnej działalności zwłaszcza starszych lądolodów. Na obszarze segmentu mogileńsko-łódzkiego tworzą zwarta pokrywę miąższości ponad 40 m dopiero od Błonia leżącego na północ od obniżenia Neru-Bzury (otwór banku HYDRO nr 5520029). W Topoli Królewskiej (otw. Nr 5520085) miąższość osadów neogenu wynosi 14,5 m.

## 6) Czwartorzęd

Nad strukturą solną Łęczyca – Ozorków miąższość czwartorzędu wynosi od dwudziestu kilku do czterdziestu kilku (Lubień nr banku HYDRO 5520276) metrów. Charakterystycznym rysem czwartorzędu obszaru struktury solnej Łęczyca – Ozorków są dobrze wydzielone poziomy glin zwałowych (przekrój F-F'). Wydzielono 4 poziomy glin zwałowych i odniesiono je do wydzielen czwartorzędu na sąsiednim arkuszu SMGP Piątek (Jeziorski, 2013, 2014). Poziomy glin zwałowych powstały w czasie zlodowaceń południowopolskich i środkowopolskich. W wielu miejscach (Lubień, Sierpów, Topola Katowa, Krzepocin) występuje poziom osadów zastoiskowych. Z analizy sytuacji geologicznej każdego z tych miejsc można wyciągnąć wniosek o jednym rozległym poziomie zastoiskowym na tym obszarze, odniesionym do okresu transgresji zlodowacenia odry.

Bezpośrednio do strefy struktury solnej od strony zachodniej przylega obszar głęboko posadowionych osadów czwartorzędu w okolicach Krzepocina leżący już na obszarze segmentu mogileńsko-łódzkiego synklinorium szczecińsko-miechowskiego (Żelaźniewicz i in., 2011). Osady czwartorzędowe mają tu miąższość do ponad 300m i są zróżnicowane litologicznie i genetycznie. Obszar, w którym występują jest interpretowany jako wąskim obniżenie podłożu mezozoicznym ograniczonym krawędziami o niesprecyzowanej genezie (Baraniecka, Skompski 1978). Należy nadmienić, że osady czwartorzędowe miąższości ponad 200 m występują tu między Krzepocinem, Pełaczaskami, Rossewem i Leźnicą. Na obszarze ich występowania nie stwierdzono wyższego położenia osadów mezozoiku i starszych pięter kenozoiku, dlatego nie ma podstaw, by traktować te obniżenia jako wąskie struktury a sytuację na całym obszarze jako przypadkowe trafianie na wąskie rynnowe struktury, które głęboko wcinały się w podłoże czwartorzędu. Stawia to problem znaczenia struktury solnej Łęczyca-Ozorków w powstaniu i rozwoju tej struktury czwartorzędowej.

## **10 Prace, roboty i badania geologiczne**

### **10.1 Pomiary geofizyczne i ich opracowanie**

Zgodnie z założeniami zadania głównym celem zrealizowanych badań geoelektrycznych było uszczegółowienie budowy geologicznej.

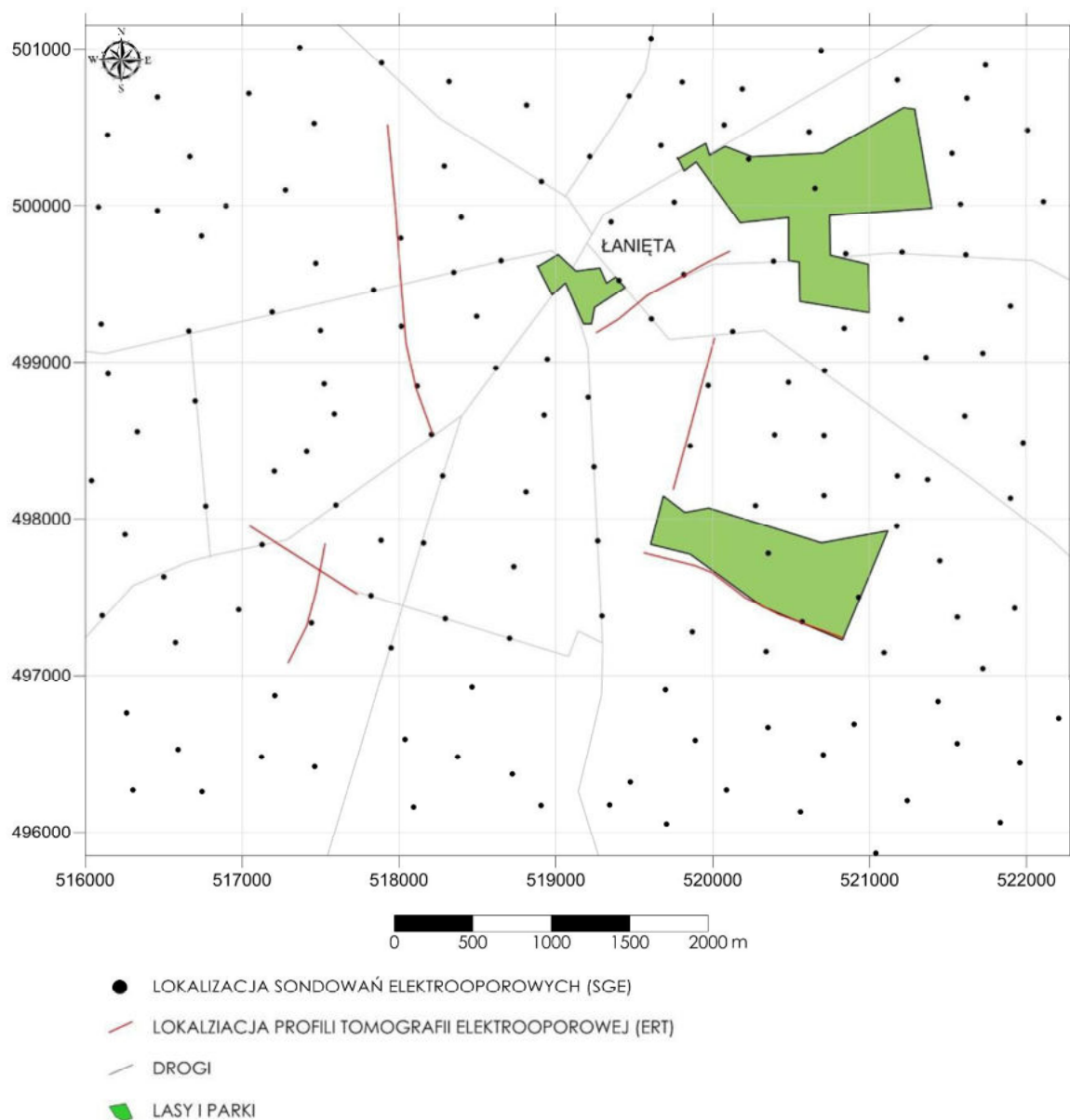
W szczególności spodziewano się iż zastosowanie badań geoelektrycznych umożliwi rozpoznanie litologii utworów czwartorzędowych, pozwoli zobrazować ew. strefy zaburzeń w utworach czwartorzędowych pochodzących od niżej ległych wysadów. Dodatkowo założono iż badania te będą w stanie określić ew. strefy wód silnie zmineralizowanych (jeśli takie występują) nad wysadami. Wyniki badań geofizycznych posłużyły także min. do stworzenia modeli 3D czwartorzędu i jego podłoża nad strukturą solną Izbica Kujawska - Łęczyca i wysadem solnym Łanięta oraz Wapno.

W celu realizacji w/w założeń wykonano pomiary metodą tomografii elektrooporowej oraz pionowych sondowań elektrooporowych.

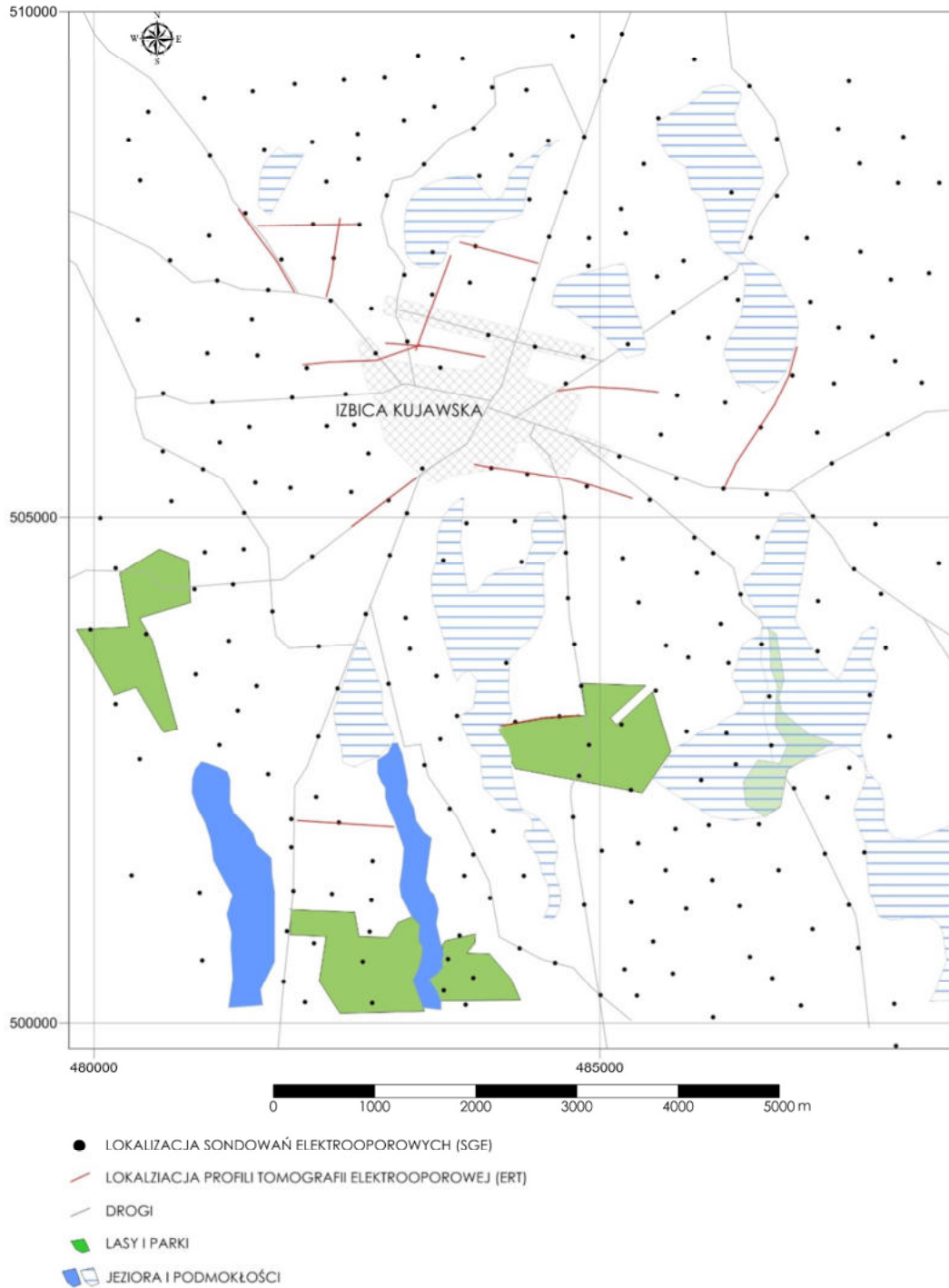
Badania geofizyczne w ramach analizy ruchliwości soli w czwartorzędzie zostały wykonane w 3 lokalizacjach: wysadzie solnym Łanięta, strukturze Izbica Kujawska – Łęczyca (we względu na znaczny rozmiar struktury prace prowadzone były w dwóch lokalizacjach – okolice Izbicy Kujawskiej i Łęczycy), wysadzie solnym Wapno, które znajdują się w pasie utworów górnopermskich (cechsztyn), zawierających pokłady soli kamiennych i potasowych, wypełniających wschodnią część cechsztyńskiego basenu środkowo-europejskiego, zlokalizowaną na obszarze tzw. bruzdy śródpolskiej.

**Szczegółowe opracowanie przeprowadzonych badań geofizycznych i ich wyników zostało zawarte w Opracowaniu nr 9.**

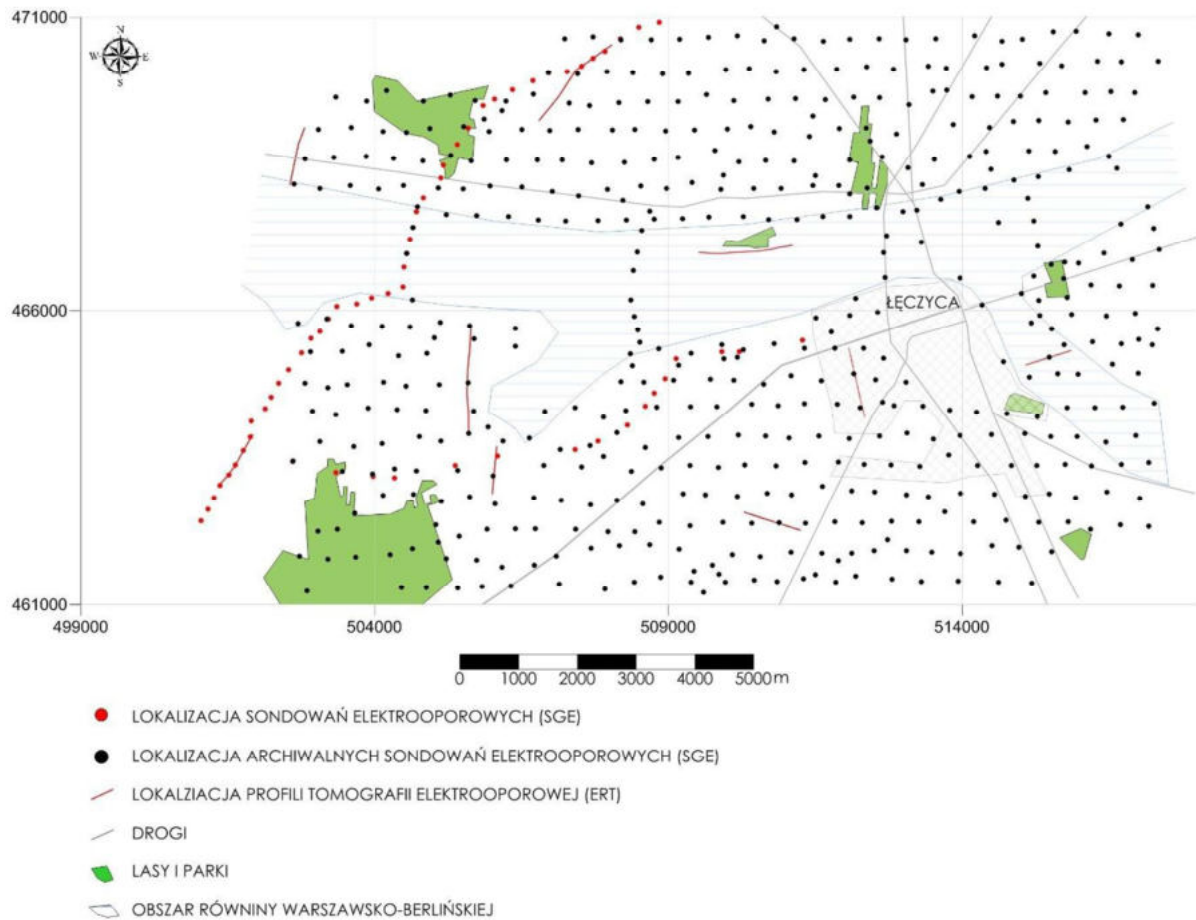
Na Ryc. 50-53 przedstawiono szczegółową lokalizację profili ERT i sondowań SGE.



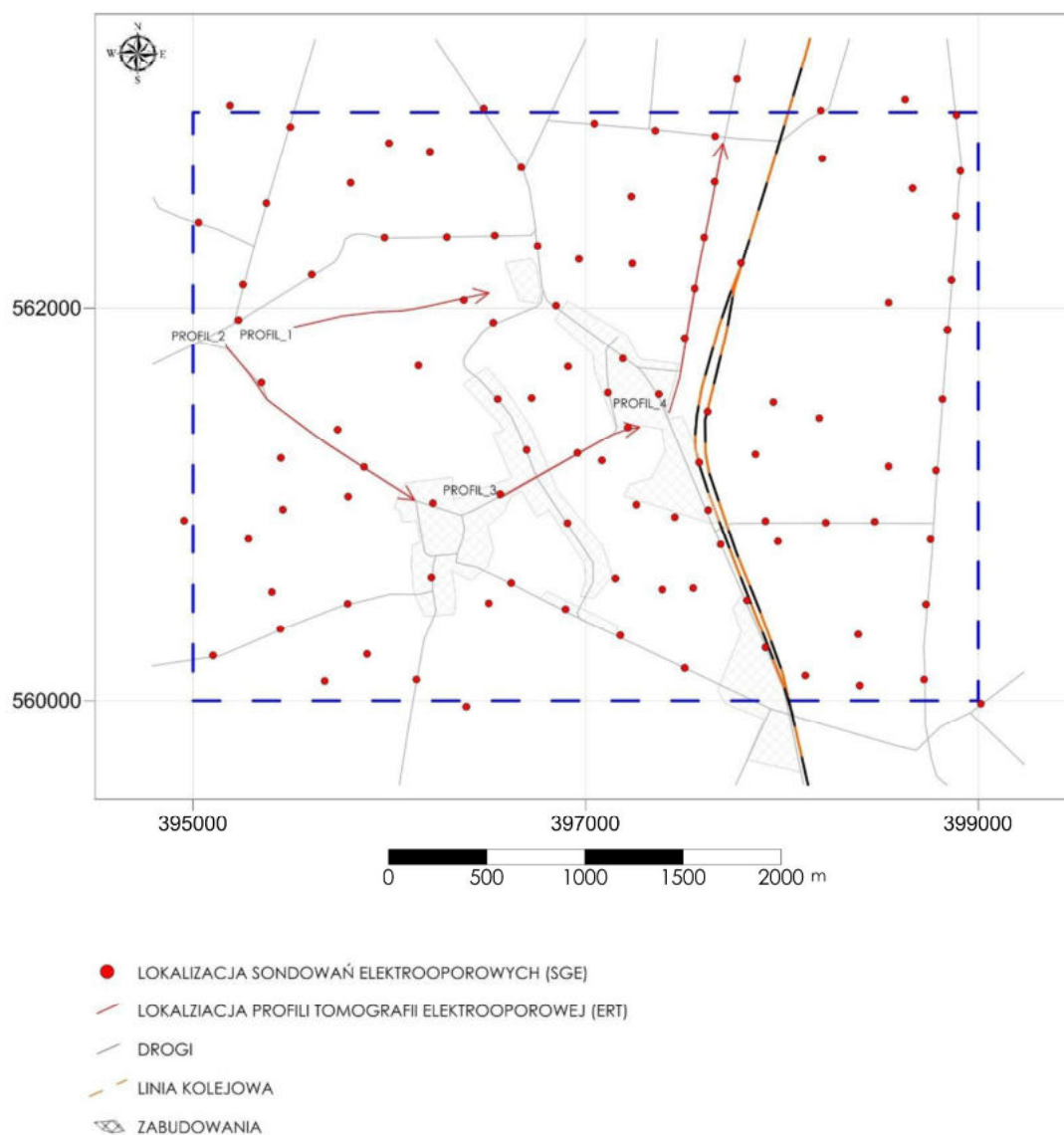
**Ryc. 50** Poglądowa mapa lokalizacji sondowań elektrooporowych i profili tomografii elektrooporowej – obszar łanięta.



Ryc. 51 Poglądowa mapa lokalizacji sondowań elektrooporowych i profili tomografii elektrooporowej- obszar Izbica Kujawska.



Ryc. 52 Poglądowa mapa lokalizacji sondowań elektrooporowych i profili tomografii elektrooporowej – obszar Łęczyca.



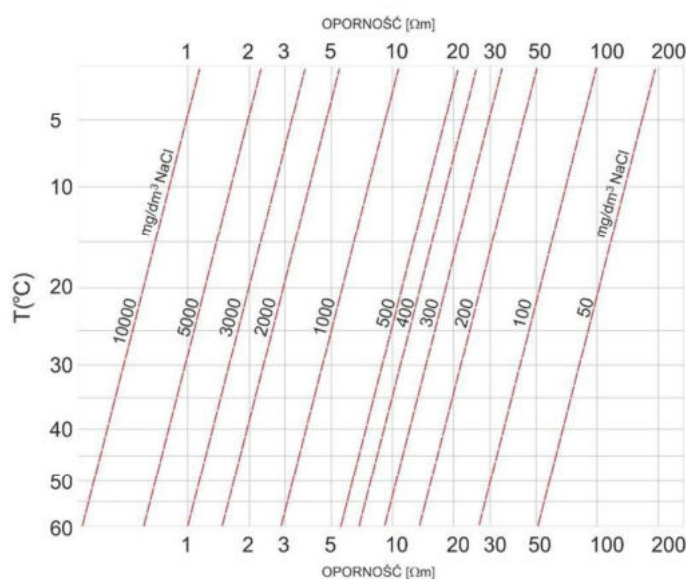
**Ryc. 53** Poglądowa lokalizacja sondowań elektrooporowych i profili tomografii elektrooporowej – obszar Wapno

Analityczną część wyników badań geofizycznych wykonanych metodą tomografii elektrooporowej przedstawiono na przekrojach geoelektrycznych zestawionych w załącznikach do Opracowania nr 9 dla każdego z obszarów. Przekroje sporządzono w skali poziomej 1: 2000 i pionowej 1: 1000 z uwzględnieniem morfologii terenu odczytanej z NMT.

Sondowania elektrooporowe zostały zaprojektowane w siatce, po to by uzyskać z nich w marę równe pokrycie badanego terenu. Sondowań nie zestawiano w przekroje (wyjątek stanowią po 2 przekroje na każdym z obszarów), tylko wykonano z nich mapy rozkładu oporności pozornych na różnych głębokościach (cięciach głębokościowych). Przyjęto iż

cięcia wykonane zostaną dla  $AB/2 = 4, 16, 63, 125$  i  $250$ , co można przełożyć na głębokość  $2, 8, 30, 60, 120$  metrów.

Na oporność elektryczną gruntów, skał decydujący wpływ mają trzy główne czynniki: mineralizacja wody, zawartość frakcji ilastej oraz wilgotność (Ogilwi, 1974). Zmiany oporności w zależności od zasolenia wody i temperatury obrazuje Ryc. 54. Zmineralizowana woda oraz materiał ilasty, stanowią składniki dobrze przewodzące prąd. Obniżają zatem znacznie oporność gruntów, czy skał w których występują.



Ryc. 54 Wykres zależności oporności wody od mineralizacji i temperatury (Ogilwi, 1974)

Podział wód ze względu na mineralizację przedstawia się następująco (Bocheńska i in., 2002, Ogilwi, 1974).

- **wody ultra słodkie** charakteryzują się mineralizacją od  $10$  do  $100 \text{ mg/dm}^3$  ( $0,01$ - $0,1 \text{ g/dm}^3$ ) i opornościami  $80$ - $800 \text{ } \Omega\text{m}$  (temperatura  $7^\circ \text{C}$ ),
- **wody słodkie** charakteryzują się mineralizacją od  $100$  do  $1000 \text{ mg/dm}^3$  ( $0,1$ - $1 \text{ g/dm}^3$ ) i opornościami  $8$ - $80 \text{ } \Omega\text{m}$  (temperatura  $7^\circ \text{C}$ ),
- **wody półsłodkie** charakteryzują się mineralizacją od  $1000$  do  $3000 \text{ mg/dm}^3$  ( $1$ - $3 \text{ g/dm}^3$ ) i opornościami  $3$ - $8 \text{ } \Omega\text{m}$  (temperatura  $7^\circ \text{C}$ ),
- **wody słonawe** charakteryzują się mineralizacją od  $3000$  do  $10000 \text{ mg/dm}^3$  ( $3$ - $10 \text{ g/dm}^3$ ) i opornościami  $0,9$ - $3 \text{ } \Omega\text{m}$  (temperatura  $7^\circ \text{C}$ ),

- **wody słone** charakteryzują się mineralizacją od 10000 do 35000 mg/dm<sup>3</sup> (10-35 g/dm<sup>3</sup>) i opornościami 0.2-0.9 Ωm (temperatura 7° C),

- **wody solankowe** charakteryzują się mineralizacją powyżej 35000 mg/dm<sup>3</sup> (35 g/dm<sup>3</sup>) i opornościami poniżej 0.2- Ωm (temperatura 7° C).

Są to laboratoryjne wartości oporności wody, które w dużym stopniu będą oddziaływały na oporności np. piasków zawadnionych, czy całych kompleksów skalnych.

Wysadowe struktury solne są od dawna przedmiotem zainteresowania geologów i hydrogeologów. Związane jest to z oddziaływaniem tych struktur na zasolenie wód w pobliżu wysadów a także z kwestią pozyskania surowców czy magazynowania w tych strukturach odpadów. Istnieje jednak bardzo mało opracowań dotyczących problematyki geologii i hydrogeologii nad wysadami oraz w ich bezpośrednim otoczeniu.

Brakuje prac dotyczących kompleksowego rozpoznania warunków geologicznych i hydrogeologicznych w rejonie wysadowych solnych. Dotyczy to również problematyki oddziaływania wysadów solnych na wody podziemne. Wyjątkiem może być tu praca prof. Józefa Górskiego i dr Marka Rasała – „*Hydrogeologia wybranych wysadów solnych regionu kujawskiego – aspekty poznawcze i uytylitarne*”, która wydana została w 2008 roku.

W literaturze polskiej pojawiają się informacje na temat zasolenia wód w pobliżu wysadów solnych (Malinowski (red.), 1991; Bojarski (red.), 1996; Szybist, 2003, Górski & Rasała 2008).

Prace te dowodzą iż wysady mają niewątpliwie wpływ na mineralizację i chemizm wód w ich otoczeniu. Niemniej autorzy przytaczają często informacje z pojedynczych otworów o różnej głębokości i usytuowaniu w stosunku do wysadu. W swojej pracy (Górski & Rasała 2008), autorzy przytaczają przykłady z rejonu Łęczycy, gdzie na głębokości 27 m stwierdzono wody o zasoleniu 5,2 g/l (Poborski 1957a), a w rejonie wysadu Kłodawy na głębokości 50–60 m – o mineralizacji 5 g/l (Werner i in., 1960). Zwracają też uwagę na wpływ wysadowych struktur solnych na występujące w ich rejonie wody gruntowe i powierzchniowe. Przykładowo w brzeźnych częściach wysadu Damasławek występują wody ujęte studniami kopanymi o mineralizacji nawet 1,5–3g/l (Prochazka, 1970).

Co ciekawe w literaturze można znaleźć poglądy iż wysady solne mają obecnie bardzo ograniczony wpływ na wody podziemne ze względu na izolujące właściwości czap gipsowo-iłowych (Macioszczyk, 1987; Macioszczyk, Dobrzyński, 2002; Bojarski (red.), 1996). Ponadto wg Bojarskiego (Bojarski red., 1996) zasolenie wód w otoczeniu wysadów solnych wiąże się



również z dopływem solanek z dużych głębokości poprzez przywysadowe strefy dyslokacyjne.

W rejonie wysadu solnego Damasławek w końcu lat siedemdziesiątych i początku lat osiemdziesiątych wykonano 27 otworów o głębokości od 186 do 2893 m w celu rozpoznania warunków geologicznych i hydrogeologicznych złoża soli (Brożek, Tatarski, 1983). Wyniki badań wykazały, że wody w utworach czwartorzędu nad czapą nie są zasolone – mineralizacja poniżej 1 g/dm<sup>3</sup>. Słodkie wody stwierdzono również w utworach paleogenu i neogenu oraz kredy ponad czapą.

(Górski & Rasala 2008) przytaczają też przykład dotyczący hydrogeologii wysadów solnych na terenie Stanów Zjednoczonych Ameryki w rejonie Zatoki Meksykańskiej. Z istniejących tam danych wynika, że nad niektórymi wysadami utworzyły się lokalne strefy zasilania. W większości jednak nie zaznacza się ich wpływ na regionalne systemy przepływu wód podziemnych. Badania wykazały, że słodkie wody zasilające czapy wysadów spływają w kierunku lustra solnego, skąd jako gęste solanki migrują w dół przez brzeżne partie wysadów. Autorzy podkreśla jednak, że granice lateralne czap są również przepuszczalne. Wskazuje także, że naturalny proces spływania solanek z lustra solnego do otoczenia może być zakłócony w wyniku gospodarczego wykorzystywania wysadów oraz intensyfikacji poboru wód podziemnych.

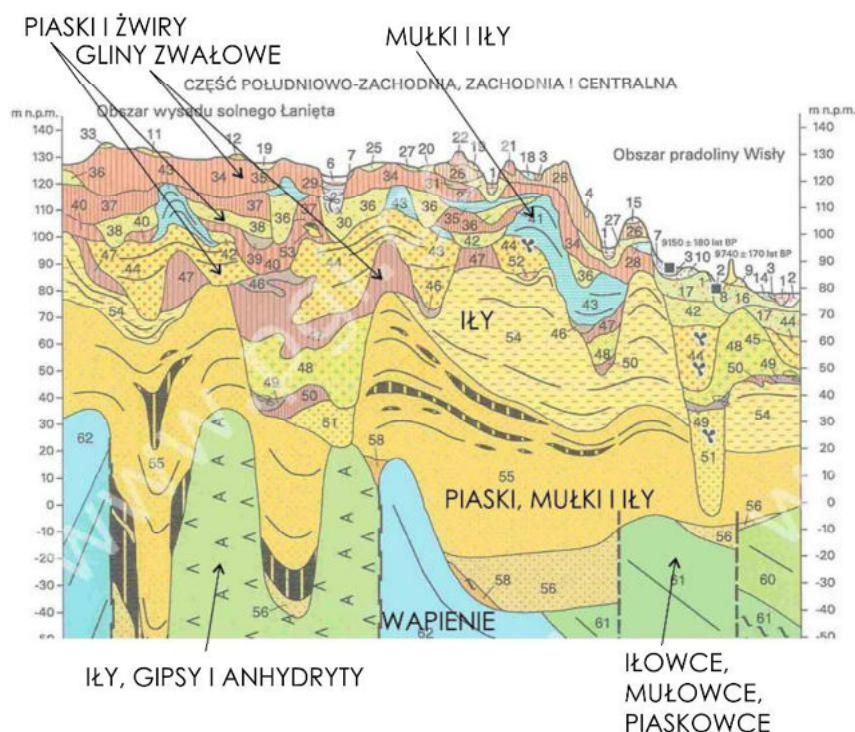
Wykonując badania geofizyczne, spodziewano się iż interpretacja badań będzie niezwykle trudna. Możliwy wpływ wód zmineralizowanych zakłóci relacje opornościowe w obrębie badanego ośrodka. Są to jednak informacje niezwykle ciekawe, bo obrazują one w jaki sposób zachodzą relacje w systemie przepływu wód nad wysadem. Do tej pory nie prowadzono prac tego typu. **Wyniki badań posłużyły do opracowania koncepcji modelu geologicznego w dalszym etapie projektu.**

Na podstawie analizy danych archiwalnych, głównie Szczegółowej mapy geologicznej Polski, oraz archiwalnych danych otworowych można mieć pogląd na ogólną budowę geologiczną jaka występuje na badanych obszarach. Widać, iż w obrębie wysadów zaleganie poszczególnych kompleksów utworów czwartorzędowych jest silnie zaburzone. Miąższość utworów jest zmienna i dobrze rozpoznana wierceniami. W ich obrębie najczęściej wyróżnić możemy kilka nieciągłych poziomów glin, rozdzielonych utworami piaszczystymi. Lokalnie występować mogą strefy ilów.

Czwartorzęd zalega na utworach neogenu, zbudowanego z utworów ilastych, miocenu - piaski mułki i łąy. W obrębie czapy wysadu utwory czwartorzędowe mogą mieć kontakt z utworami kredy.

Analizując dane otworowe i budowę geologiczną, gdzie dobrym przykładem wydaje się być wysad Łanięta przez który przechodzi przekrój geologiczny (Ryc. 55) widać iż w strefie wysadu istnieje duże zróżnicowanie w położeniu warstw, ich miąższości.

Wyniki badań geoelektrycznych potwierdzają iż jest to strefa bardzo skomplikowana. To skomplikowanie obrazu geoelektrycznego występuje na obszarze każdej z analizowanych struktur.



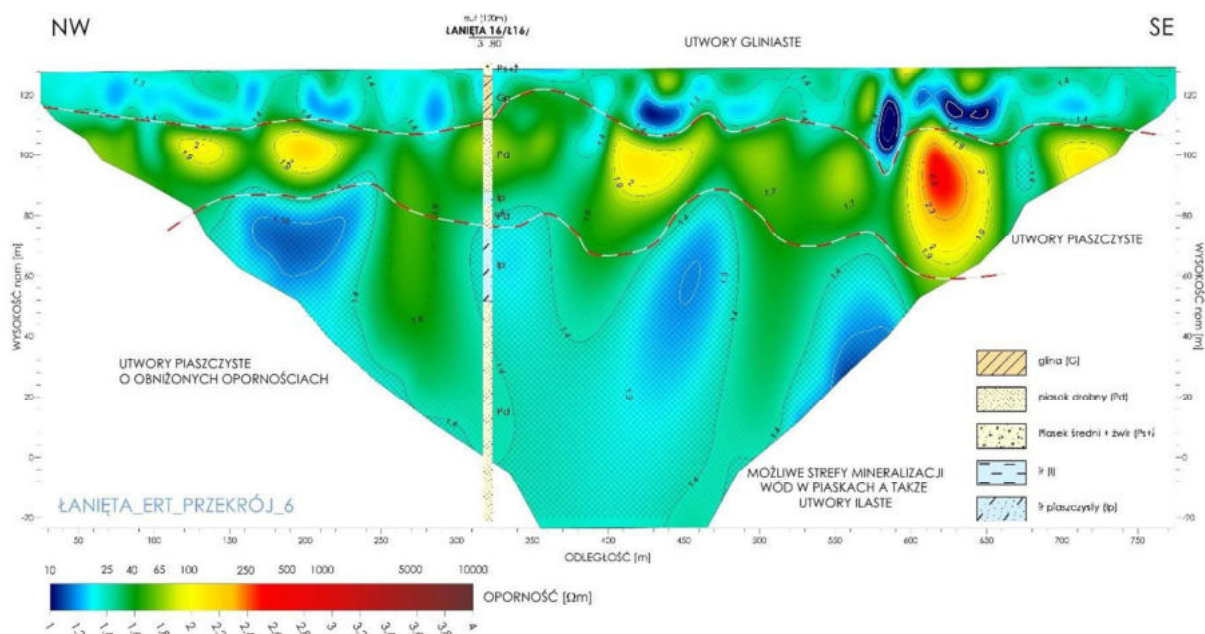
Ryc. 55 Fragment przekroju ze Szczegółowej mapy geologicznej Polski, z obszaru wysadu Łanięta (Roman M., 1999 – zmienione)

Jak już wspomniano wcześniej, analityczną część wyników badań geofizycznych wykonanych metodą tomografii elektrooporowej przedstawiono na przekrojach geoelektrycznych oraz mapach rozkładu oporności pozornych zestawionych w załącznikach graficznych do Opracowania nr 9 z podziałem dla każdej ze struktur.

Przekroje pokazują rozkłady wartości oporności wyinterpretowanych w procesie inwersji. Na przekroje naniesiono znajdujące się w pobliżu otwory archiwalne. Należy przy tym zaznaczyć, iż litologia otworów została uproszczona, otwory zostały wyrysowane w programie Geostar. Na przekrojach wyrysowano także autorską interpretację geologiczną,

opartą na wynikach geoelektrycznych oraz litologii otworów archiwalnych. Interpretacja wyników badań elektrooporowych jest trudna i w wielu przypadkach może być niejednoznaczna. Tym niemniej widać iż w obrębie utworów czwartorzędowych występuje duża zmienność w zakresie wyinterpretowanych oporności.

Na przekrojach daje się przede wszystkim zauważyć to, iż rozkład wartości oporności wyinterpretowanych jest bardzo nieregularny i zróżnicowany. Na niektórych przekrojach pojawiają się bardzo niskie wartości oporności. Oporności takie bardzo rzadko rejestrują się dla utworów geologicznych, nie korelują się one z litologią otworów, raczej należy korelować je z mineralizacją wód. Można przypuszczać iż niskie wartości oporności są wynikiem mineralizacji wód roztworami solankowymi. Zestawiając wyniki badań jakie uzyskano metodą ERT z mapami rozkładu oporności, widać korelację wyników badań z obu metod.



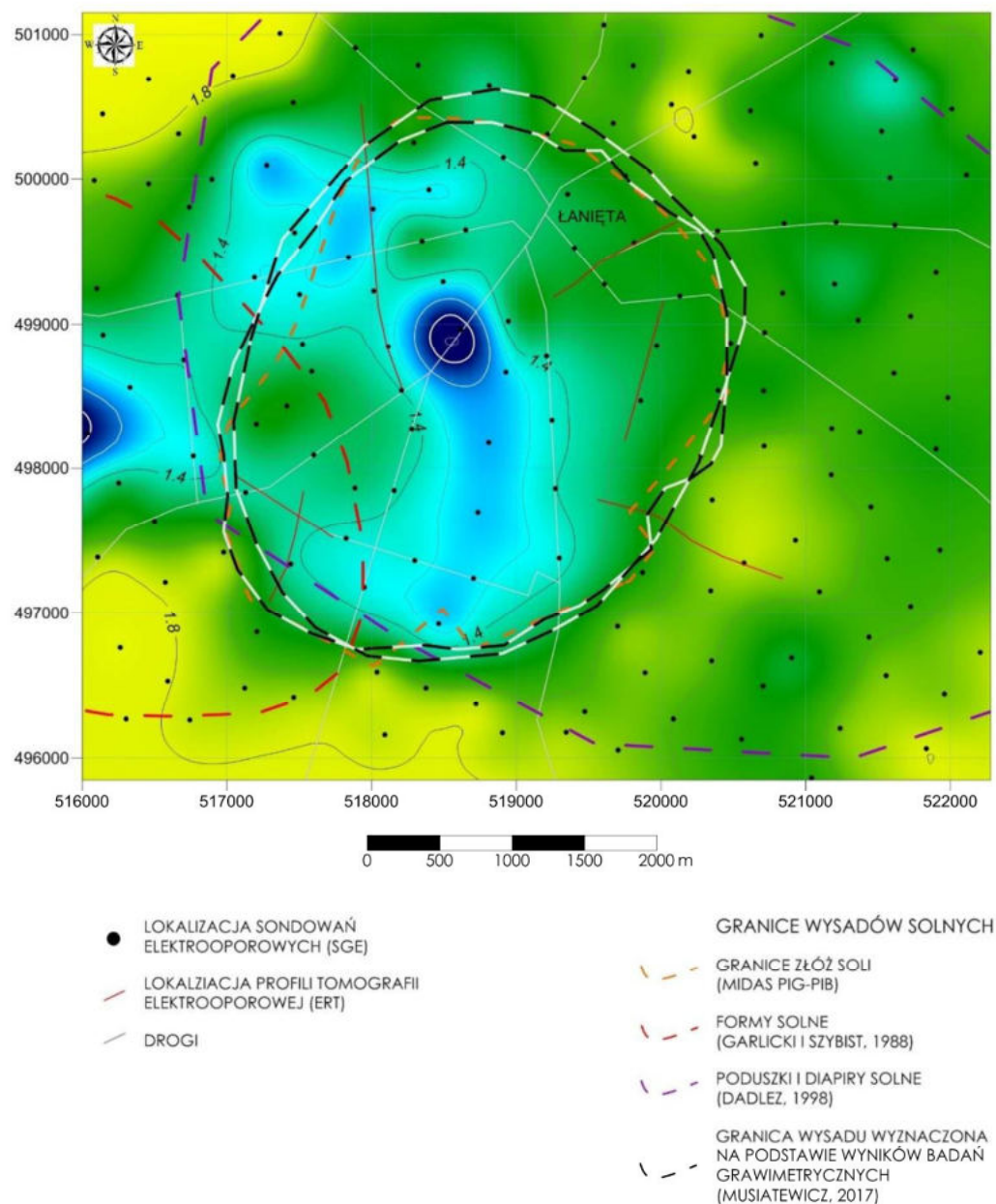
**Ryc. 56** Fragment przekroju elektrooporowego, ze strefami niskich wartości oporności w piaskach. Strefy te mają niewątpliwie związek z mineralizacją mód podziemnych – wysad Łanięta.

Założono iż strefy niskich wartości oporności związane będą głównie z mineralizacją piasków. W utworach czwartorzędowych, tam gdzie wody nie są zmineralizowane utwory piaszczyste charakteryzują się opornościami od 70-80 do kilkuset  $\Omega\text{m}$ . Korelując wyniki geoelektryczne z profilami wierceń widać, iż strefy gdzie należy spodziewać się piasków w wielu miejscach na przekrojach ERT są niskooporowe. Miejscami mogą być to warstwy

ilaste, niemniej w wielu miejscach są to ewidentnie piaski, których oporności zostały obniżone poprzez wpływ wód z solankami.

Można na tej podstawie założyć, iż w strefach tych istnieje uprzywilejowany przepływ wód, które charakteryzować się będą podwyższoną mineralizacją. Potwierdzają to wyniki sondowań elektrooporowych. Mapy i przekroje które wykonano na ich podstawie, pokazują ewidentnie iż w zarysie wysadu istnieją strefy niskooporowe, które niewątpliwie związane są z mineralizacją wód.

Na Ryc. 57 przedstawiono mapę rozkładu oporności pozornych dla głębokości AB/2 – 250 m. Widoczna niskooporowa strefa zlokalizowana w centralnej i zachodniej części obszaru badań, występuje niejako w obrębie granicy wysadu wyznaczonego na podstawie bazy MIDAS oraz na podstawie granicy którą opracowano na podstawie wyników badań grawimetrycznych. Wyraźne obniżone wartości oporności mają niewątpliwie związek z mineralizacją wód.



**Ryc. 57** Mapa rozkładu oporności pozornych dla głębokości AB/2 – 250m, z widocznymi strefami obniżonych wartości oporności. Strefy te mają niewątpliwie związek z mineralizacją mód podziemnych – wysad łanięta

Badania geofizyczne są na pewno dużym uszczegółowieniem informacji na temat budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych w strefie nad i w sąsiedztwie wysadu.

## 10.2 Opracowanie wyników pomiarów grawimetrycznych

W ramach podzadania 10.4 wykonano reprocessing wraz z elementami reinterpretacji danych grawimetrycznych, przechowywanych w zasobach Centralnej Bazy Danych Geologicznych (CBDG). Przetwarzanie obejmowało dane grawimetryczne pochodzące z archiwalnych, półszczegółowych badań grawimetrycznych, wykonanych w II połowie ubiegłego wieku w rejonach występowania wysadów: ŁANIĘTA, DAMASŁAWEK, IZBICA KUJAWSKA, ŁĘCZYCA oraz WAPNO. Ponadto, dla wysadów ŁANIĘTA oraz DAMASŁAWEK wykonano również przetwarzanie istniejących, archiwalnych danych pochodzących z badań szczegółowych, zaś dla wysadu WAPNO przeprowadzony został reprocessing danych z nowoczesnego rozpoznania mikrogravimetrycznego, wykonanego w roku 2010.

### **Szczegółowe opracowanie wyników pomiarów grawimetrycznych stanowi Raport nr 10.4.**

Celem prac wykonanych w ramach podzadania 10.4 było opracowanie „quasi tektonicznego” szkicu obejmującego struktury solne stanowiące obiekty badań wraz z przylegającym otoczeniem. Stąd analizy rozkładu przyspieszenia pola siły ciężkości prowadzone były przede wszystkim pod kątem identyfikacji stromo nachylonych nieciągłości (granic kontrastów gęstościowych) w rozkładzie gęstości ośrodka geologicznego, które mogłyby stanowić odzwierciedlenie istniejących uskoków, kontaktów, stromo nachylonych granic warstw skalnych, czy też wyklinowań facjalnych. Te zaś z kolei mogłyby wskazywać na lokalizację rejonów szczególnie predysponowanych do występowania ruchów ośrodka geologicznego w obrębie i w otoczeniu struktur wysadowych.

Na potrzeby analiz grawimetrycznych nad każdą z wymienionych wyżej struktur wysadowych opracowane zostały cyfrowe modele morfologii powierzchni terenu (DEM) o rozdzielczości 100 x 100 m. Model opracowano na podstawie danych wysokościowych udostępnionych przez Głównego Geodetę Kraju ([www.codgik.gov.pl](http://www.codgik.gov.pl)). Ponadto, nad wysadem WAPNO opracowano model o rozdzielczości 10 x 10 m w oparciu o wyniki niwelacji technicznej stanowisk, na których wykonane zostały pomiary mikrogravimetryczne.

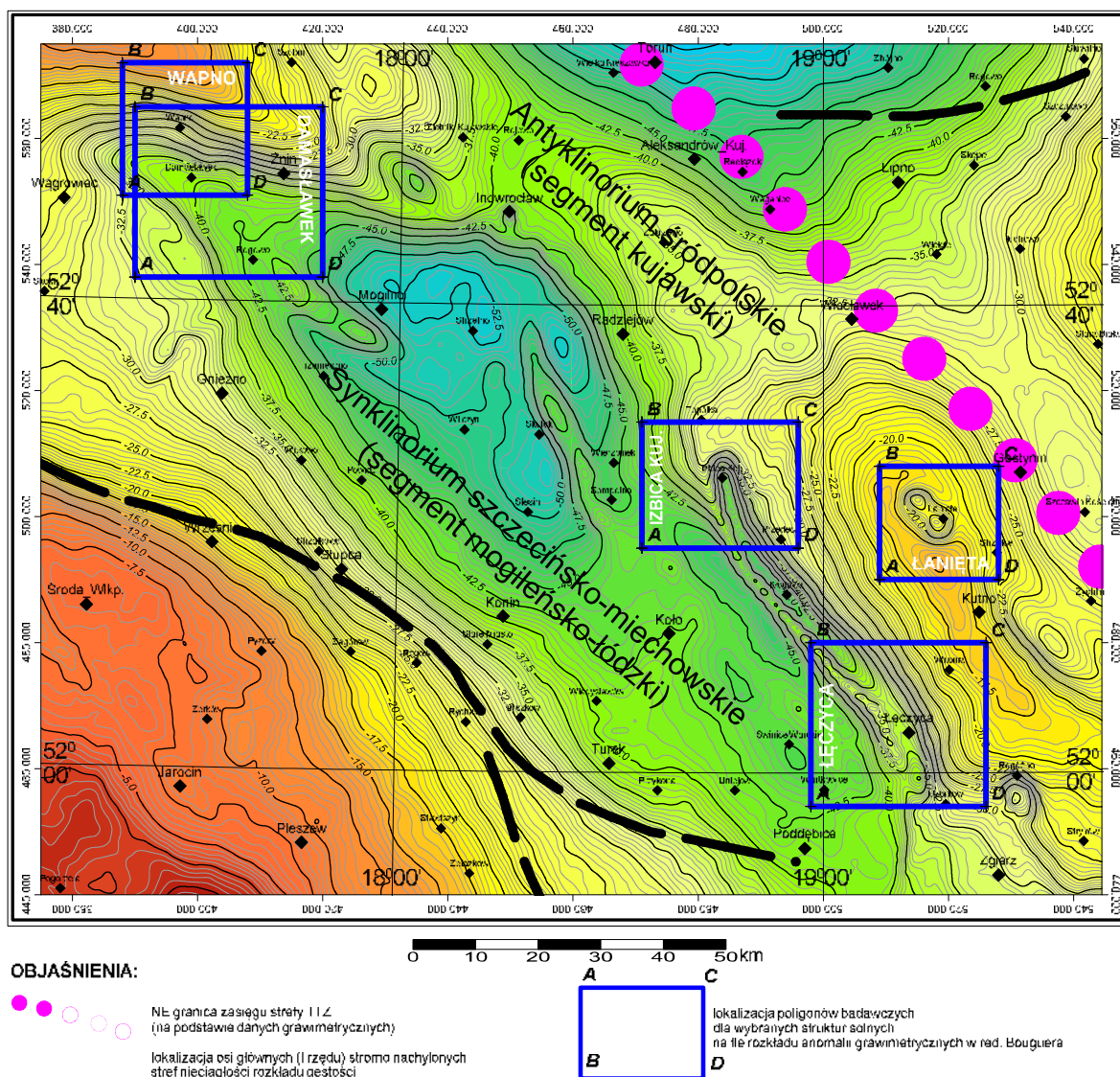
W ramach podzadania wykonano szeroki zakres przetwarzania obejmującego elementy interpretacji jakościowej oraz ilościowej pola siły ciężkości, w tym: przedłużanie analityczne w górę  $\Delta g(\text{up}...)$ , obliczenie gradientu poziomego  $dg/ds$ ., odchylenia standardowego (STD)

wydzielenie z pola pomierzonego anomalii rezydualnych  $\Delta g_{Rez}$  (interpretacja jakościowa) oraz 2D i 3D dekonwolucje rozkładu pola anomального (interpretacja ilościowa). Wyniki analiz oraz interpretacji udokumentowano w postaci map i przekrojów grawimetrycznych.

Większość prac analitycznych wykonano z zastosowaniem algorytmów filtracji częstotliwościowej pola siły ciężkości dostępnych w systemie OASIS Montaj firmy Geosoft Ltd. Mapy, przekroje oraz wykresy opracowano w programach Surfer i Grapher firmy Golden Software. Przygotowanie danych oraz ich analizy, zwłaszcza w odniesieniu do danych otworowych, wykonywano z wykorzystaniem elementów pakietu biurowego MS Office: Access i Excel firmy Microsoft. Parametry przetwarzania i filtracji dobierano indywidualnie dla każdej struktury, z uwzględnieniem właściwości źródłowych danych grawimetrycznych oraz przybliżonych parametrów geometrycznych poszczególnych wysadów pochodzących z wcześniejszego rozpoznania geofizycznego i geologicznego.

Raport 10.4 zawiera opis danych wejściowych, wykorzystanych w pracach analitycznych, opis prac interpretacyjnych oraz przykłady i opisy uzyskanych wyników. Całość wyników opracowana została w formie cyfrowej w postaci zbiorów, siatek interpolacyjnych oraz map i wykresów.

Lokalizację obszarów, w których prowadzone były analizy danych grawimetrycznych przedstawiono na Ryc. 58 na tle podstawowej mapy anomalii Bouguera, odwzorowującej rozkład przyspieszenia pola siły ciężkości na obszarze analizowanych struktur solnych. Mapa ta pokazuje również pozycję analizowanych obszarów względem osi przebiegu głównych stref (I rzędu) nieciągłości grawimetrycznych w Polsce, stanowiących odzwierciedlenie granic regionalnych jednostek geologicznych.



Ryc. 58 Lokalizacja poligonów badawczych i ich pozycja względem głównych (regionalnych nieciągłości odwzorowanych w polu siły ciężkości), w granicach których wykonane zostało przetwarzanie, analiza i interpretacja danych grawimetrycznych w projekcie.

W przypadku wszystkich, analizowanych struktur solnych zastosowany został identyczny schemat przetwarzania danych grawimetrycznych oraz schemat analizy rozkładu pola siły ciężkości. W ramach jednolitego schematu różnicowane były jedynie parametry poszczególnych procedur. Parametry dobierane były w taki sposób aby zoptymalizować wyniki uwzględniając wstępnie zdefiniowane parametry geometryczne poszczególnych struktur, w tym przede wszystkim głębokość do lustra soli, a także uwzględniając rodzaj rozpoznania grawimetrycznego. Wyjątek od tej zasady stanowił wysad Wapno, dla którego zmieniono poziom redukcji danych mikrogravimetrycznych. Anomalne pole siły ciężkości zostało przeliczone z poziomu morza na poziom + 85 m n.p.m. Poziom ten został wybrany arbitralnie i jest bliski wartości rzędnej najniższej położonego punktu pomiarowego na obszarze



rozpoznania mikrograwimetrycznego. Zmiana poziomu redukcji danych zmniejszała wielkość wpływu ewentualnych błędów w rozkładzie gęstości warstwy redukcyjnej na wartości pola anomalnego oraz uprościła analizy ilościowe. Z punktu widzenia interpretacji geologicznej operacja ta ma znaczenie neutralne.

Do przetwarzania danych i ich analiz wykorzystano system oprogramowania OASIS Montaj firmy Geosoft, programy GS Surfer i GS Grapher firmy Golden Software, a także elementy pakietu MS Office: program bazodanowy MS Access, arkusz kalkulacyjny MS Excel.

W pierwszym etapie przygotowania danych dla każdej analizowanej struktury opracowane zostały cyfrowe modele wysokości terenu (DEM) w postaci regularnych siatek interpolacyjnych w formacie GS Surfer. Siatki DEM opracowano w dwóch rozdzielczościach: 100 x 100 (rozdzielczość natywna) oraz 250 x 250 metrów, dla wsparcia interpretacji wyników przetwarzania danych grawimetrycznych oraz bezpośredniego wykorzystania w procedurach analizy ilościowej pola siły ciężkości, a także do prezentacji wyników.

Zastosowany schemat przetwarzania danych grawimetrycznych obejmował procedury interpretacji jakościowej oraz ilościowej.

### 10.2.1 Interpretacja jakościowa

Schemat procedur interpretacji jakościowej obejmował:

- 1) Opracowanie siatek podstawowych rozkładu anomalii  $\Delta g$  w redukcji Bouguera ( $CBA \equiv \Delta g_{Bou}$ ).
- 2) Interpretacja jakościowa anomalii  $\Delta g_{Bou}$ , w tym:
  - 2.1 Transformacje pola siły ciężkości w górę (przedłużenie analityczne) -  $\Delta g_{BouUp()}$ .
  - 2.2 Obliczenia rozkładu gradientu poziomego -  $dg_{BouUp()}/ds$ .
  - 2.3 Obliczenia rozkładu odchylenia standardowego (STD) anomalii -  $STD(\Delta g_{BouUp()})$ ,
  - 2.4 Filtracja częstotliwościowa rozkładu pola anomalnego w domenie przestrzeni i obliczenia rozkładu anomalii rezydualnych  $\Delta g_{Rez}$  oraz trendów regionalnych  $\Delta g_{Reg}$ .

Podstawę przetwarzania i analiz rozkładu pola siły ciężkości w rejonach występowania struktur solnych stanowiły regularne siatki interpolacyjne anomalii  $\Delta g_{\text{Bou}}$ . Opracowane zostały w podstawowej rozdzielczości 500 x 500 m dla danych półszczegółowych, a następnie dogęszczone z użyciem funkcji sklepanych (spline) do rozdzielczości roboczej 250 x 250 m. Siatki interpolacyjne dla danych szczegółowych opracowano w rozdzielczości 25 x 25 m dla wysadu Łanięta i Damasławek, zaś dla wysadu Wapno w rozdzielczości 10 x 10 m. Interpolację wykonano metodą krigingu.

Procedura transformacji pola siły ciężkości w górę (przedłużenie analityczne w górę) stanowiła pierwszy etap przetwarzania rozkładu pola siły ciężkości. Zastosowana została w odniesieniu do wszystkich, wyjściowych siatek interpolacyjnych i na wszystkich strukturach wysadowych objętych interpretacją. Transformacja ta miała na celu eliminację ewentualnych fluktuacji z pomierzonego rozkładu pola siły ciężkości, spowodowanych niedokładnościami pomiarów, przypowierzchniowymi niejednorodnościami w warstwie redukcyjnej oraz wpływem morfologii terenu na wyniki pomiarów w przypadku braku poprawki topograficznej lub niedokładnego jej wyznaczenia. Przedłużenie analityczne anomalii w górę wykonano metodą filtracji częstotliwościowej na poziomy +50, + 100 i + 200 m względem oryginalnego poziomu redukcji pola pomierzonego. Zastosowanie metody przedłużenia analitycznego w górę nie zniekształca rozkładu pola anomalnego, a jedynie zapewnia jego „gładkość” redukując mikro niedokładności pomiarowe.

Przedłużone analitycznie w górę siatki anomalii grawimetrycznych w red. Bouguera  $\Delta g_{\text{BouUp}(0)}$  wykorzystywane były w kolejnych etapach przetwarzania danych. W przypadku każdego z wysadów solnych wybierano jeden poziom przedłużenia (możliwie najniższy), na którym w rozkładzie pola anomalnego wyraźnie widoczna była redukcja ilości wysokoczęstotliwościowych fluktuacji wartości. Zmianę poziomu odniesienia danych uwzględniano (odwracano) w procedurach interpretacji ilościowej.

Obliczenia anomalii gradientu poziomego  $dg_{\text{BouUp}(0)}/ds$  oraz obliczenia anomalii odchylenia standardowego  $\text{STD}(\Delta g_{\text{BouUp}(0)})$  są transformacjami pola pozwalającymi wyznaczyć lokalizację stromo nachylonych granic nieciągłości gęstości. Mimo odmiennej natury (wielkość fizyczna i wielkość statystyczna) w zastosowaniu do analizy pola siły ciężkości, obie wielkości charakteryzują zmienność tego pola w przestrzeni. W przypadku analizy 2D lokalizacja osi ekstremów lokalnych (maksimów) anomalii gradientu lub wartości odchylenia standardowego, obliczonych w granicach zastosowanego operatora, odzwierciedla

rzut pionowy na powierzchnię odniesienia pionowej (w praktyce stromo nachylonej) granicy nieciągłości gęstości.

W niniejszej analizie pola siły ciężkości dla wszystkich analizowanych struktur, z wyjątkiem wysadu Wapno, wykonane zostały obliczenia charakterystyki zmienności poziomej pola grawitacyjnego z użyciem obu metod. Anomalie gradientu poziomego  $dg_{BouUp}/ds$  obliczono z wykorzystaniem filtracji częstotliwościowej pola, zaś wartości odchylenia standardowego obliczono wg. algorytmu M. Musiatewicza (niepublikowany) w dwóch wariantach operatora kołowego o promieniu  $r = 1\ 250$  i  $2\ 500$  m (w przypadku analizy danych półszczegółowych) oraz  $r = 500$  i  $1000$  m (dane szczegółowe). Dla wysadu Wapno obliczono jedynie rozkład anomalii gradientu poziomego. Ostatecznie do wyznaczenia lokalizacji poziomej stromo nachylonych granic gęstościowych wykorzystane zostały siatki gradientu poziomego. Rozkład wartości odchylenia standardowego wykorzystywany był pomocniczo.

W ramach analizy jakościowej pola siły ciężkości, dla każdej z analizowanych struktur przeprowadzono separację anomalii rezydualnych  $\Delta g_{Rez(BouUp)}$  i trendu regionalnego  $\Delta g_{Reg(BouUp)}$  z pola pomierzonego. Obliczenia wykonano w metodą filtracji częstotliwościowej w domenie przestrzeni z zastosowaniem górnoprzepustowego (HP) i dolnoprzepustowego (LP) filtru Butterwortha (BTWR). Dla każdego obiektu wykonano serię filtracji pola anomalnego z zastosowaniem różnych wartości parametrów przetwarzania. Celem było uzyskanie serii obrazów pola anomalnego (rezydualnego i regionalnego) odwzorowującego stosunki gęstościowe budowy geologicznej dla różnych głębokości rozpoznania. Na użytek interpretacyjny wykorzystano obrazy rozkładu anomalii rezydualnych o maksymalnym zasięgu głębokościowym do ok. 1.5 – 3.0 km.

Wartości głównego parametru zastosowanych filtrów (graniczna długość fali) na poszczególnych obiektach przedstawiono w Tab. 9. Wyniki wszystkich wykonanych filtracji dostępne są w postaci regularnych siatek wartości w formacie programu GS Surfer. Mogą być konwertowane do systemów GIS.

**Tab. 9. Zastosowane parametry filtracji (graniczna długość fali) do obliczeń wartości anomalii rezydualnych i regionalnych struktur solnych.**

Lp.	Nazwa struktury solnej/obiektu	Anomalie rezydualne Filtry HP (HighPass) - długość fali [km] (maks. zasięg głęb. rozpoznania)	Filtry LP (LowPass) (anomalie regionalne)
<b>Rozpoznanie półszczegółowe</b>			
1.	Damaśławek (sDet)	2.0; 4.0; 6.0; 8.0; 12.0; 16.0 maks. zasięg do głęb.: (0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 3.0; 4.0)	2.0; 4.0; 6.0; 8.0; 12.0; 16.0
2.	Wapno (sDet)	4.0; 6.0; 8.0; 12.0; 16.0 maks. zasięg do głęb.: (1.0; 1.5; 2.0; 3.0; 4.0)	8.0; 12.0; 16.0
3.	Izbica Kuj. (sDet)	2.0; 4.0; 6.0; 8.0; 10.0; 12.0; 16.0 maks. zasięg do głęb.: (0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0; 4.0)	2.0; 4.0; 6.0; 8.0; 10.0; 12.0; 16.0
4.	Łąnięta (sDet)	2.0; 4.0; 6.0; 8.0; 12.0; 16.0; 20.0 maks. zasięg do głęb.: (0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3; 4.0; 5.0)	2.0; 4.0; 6.0; 8.0; 12.0; 16.0
5.	Łęczycza (sDet)	2.0; 4.0; 6.0; 8.0; 12.0; 16.0 maks. zasięg do głęb.: (0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 3.0; 4.0)	2.0; 4.0; 6.0; 8.0; 12.0; 16.0
<b>Rozpoznanie szczegółowe</b>			
1a.	Damaśławek (Det)	2.0; 4.0; 6.0; 8.0; 12.0 maks. zasięg do głęb.: (0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 3)	2.0; 4.0; 6.0; 8.0; 12.0
2a.	Wapno (Det)	0.250; 0.500; 1.0; 2.0; 6.0; 8.0 maks. zasięg do głęb.: (0.075; 0.125; 0.25; 0.5; 1.5; 2.0)	0.250; 0.500; 1.0; 2.0; 6.0; 8.0
3a.	Łąnięta (Det)	2.0; 4.0; 6.0; 8.0 maks. zasięg do głęb.: (0.5; 1.0; 1.5; 2.0)	2.0; 4.0; 6.0; 8.0

### 10.2.2 Interpretacja ilościowa

Interpretację ilościową wykonano dla wszystkich obiektów, z pominięciem wysadu Damaśławek, będących przedmiotem rozpoznania, tak dla rozpoznania półszczegółowego, jak i szczegółowego. Interpretację ilościową wykonano metodą dekonwolucji rozkładu pola anomalnego w wariantach 3D i 2D. W wariacie 3D wykorzystywano powierzchniowe rozkłady anomalii grawimetrycznych, zaś w wariacie 2D rozkłady pola wzdłuż kilku arbitralnie wyznaczonych profili przecinających badane struktury wysadowe.

W tzw. metodach pól potencjałowych, do których – między innymi – należy grawimetria, metoda dekonwolucji – w uproszczeniu – polega na analizie krzywizny pola anomalnego na ograniczonym obszarze lub ograniczonej długości profilu i dopasowaniu do teoretycznego rozkładu pola, jakie byłoby generowane przy założeniu istnienia

poszukiwanego, zdefiniowanego rodzaju źródła zaburzenia. W przypadku uzyskania dopasowania spełniającego zadane warunki brzegowe w zakresie przyjętych tolerancji i parametrów operatora, wyznaczane są parametry źródła zaburzenia.

W ramach wykonanego przetwarzania dekonwolucję anomalii pola siły ciężkości ograniczono do wyznaczenia lokalizacji i obliczenia głębokości źródeł pola anomalnego, generowanego przez stromo nachylone granice nieciągłości gęstości istniejące w badanym ośrodku geologicznym. Modelem geometrycznym opisującym pionowe lub stromo nachylone granice nieciągłości gęstości jest model pionowego stopnia. W zastosowanej metodzie Eulera modele źródła pola anomalnego opisywane są wartościami tzw. indeksu strukturalnego ( $is$ ). W przypadku pola siły ciężkości wartość indeksu dla stopnia pionowego wynosi 0 ( $is=0$ ).

Przetwarzanie danych wykonano z wykorzystaniem metody Eulera (3D) i dekonwolucji gradientu całkowitego (sygnału analitycznego AS) przy zastosowaniu transformacji Hilberta (2D). Obliczenia wykonano z wykorzystaniem procedur dostępnych w pakiecie Oasis Montaj firmy Geosoft. Wynikiem dekonwolucji są chmury punktów lokalizujące poszukiwaną strukturę w przestrzeni (3D -  $x,y,h$ ) lub na płaszczyźnie prostopadłej do profilu (2D -  $x,h$ ), gdzie  $x$  jest miarą bieżącą po rozciągłości profilu,  $h$  jest głębokością określoną względem powierzchni odniesienia lub względem powierzchni terenu.

3D dekonwolucję Eulera wykonano w dwóch wariantach: w tzw. wariancie standardowym (*standard solution*) oraz w wariancie „umiejscowionym” (*located solution*). W pierwszym przypadku wynikiem dekonwolucji są wszystkie istniejące rozwiązania w przestrzeni 3D, które spełniają założone parametry oraz kryteria analizy pola dla przyjętego modelu źródła pola anomalnego. W drugim wariancie wyniki dekonwolucji ograniczone są do rozwiązań, których lokalizacja w płaszczyźnie XY jest z góry określona. W tym wariancie dopuszczalną lokalizację rozwiązań ograniczono do punktów, które położone były wzdłuż osi lokalnych maksimów anomalii gradientu poziomego (wyinterpretowane linie odwzorowania się na powierzchni wychodni pionowych i stromo nachylonych granic gęstościowych).

### 10.2.3 Wyniki

Z uwagi na analogiczny zakres prac przetwarzania i procedur interpretacyjnych, zastosowanych w odniesieniu do poszczególnych struktur wysadowych, znaczenie geofizyczne i geologiczne uzyskanych wyników w zakresie obejmującym wstępną ich

interpretację jest podobne. Wszystkie struktury wysadowe, które są obiektami bieżącej analizy grawimetrycznej, były również obiektami wcześniejszych badań geologicznych i geofizycznych oraz analiz i interpretacji. Rezultaty tych badań oraz wyniki analiz danych są zawarte w dokumentacjach źródłowych, a także w licznych, wcześniejszych publikacjach. Przedstawione w niniejszym raporcie wyniki przetwarzania danych grawimetrycznych oraz ich interpretacja jest z założenia ograniczona do zagadnień związanych z tektoniką. Jednak może być poszerzona także o inne aspekty rozpoznania geofizycznego i geologicznego, pod warunkiem uwzględnienia wyników innych badań, w tym także wyników wierceń.

W wyniku przeprowadzonych analiz we wszystkich przypadkach uzyskano rozpoznanie lokalizacji najważniejszych elementów nieciągłych budowy geologicznej, odzwierciedlającej się w polu siły ciężkości. Dotyczy to zarówno otoczenia badanych wysadów (analizy wykonane na bazie półszczegółowego rozpoznania grawimetrycznego), jak i obszaru zlokalizowanego w obrębie ich granic (dane szczegółowe). Zidentyfikowane nieciągłości budowy sklasyfikowane zostały w trzech kategoriach: silne, wyraźne i prawdopodobne. Należy mieć na uwadze, że zdefiniowane tu kategorie mają przede wszystkim znaczenie geofizyczne i odnoszą się do intensywności odzwierciedlania się nieciągłości w polu grawitacyjnym, a co za tym idzie wielkości kontrastu gęstościowego na granicy nieciągłości.

Ponadto niemal w każdym z przypadków wyznaczone zostały zasięgi (granice) przystropowych części struktur solnych. Wyjątek stanowi wysad Damasławek, którego zasięg przystropowej części wysadu w rozkładzie pola anomalnego siły ciężkości nie odzwierciedla się wyraźnie na całym obszarze.

Na podstawie obrazu anomalii rezydualnych zidentyfikowane zostały obszary, w których mogą występować undulacje głębokości głównych horyzontów anomaliotwórczych budowy geologicznej, jakimi są granice kompleksów litologicznych, na których występują skokowe zmiany gęstości, zmiany miąższości kompleksów, a także różnice wykształcenia litologicznego skutkujące zmianami gęstości. Aby ułatwić analizę związków pomiędzy rozkładem pola siły ciężkości, a elementami budowy geologicznej, na wszystkich załącznikach mapowych (Raport nr 10.4) naniesione zostały lokalizacje przebiegu stromo nachylonych granic gęstościowych, które są wynikiem przeprowadzonej interpretacji jakościowej.

Wyniki interpretacji ilościowej metodami dekonwolucji Eulera (3D) i Wernera (2D) pozwoliły na oszacowanie głębokości większości zidentyfikowanych elementów nieciągłości ośrodka geologicznego, tak w otoczeniu wysadów, jak i w granicach poszczególnych

obiektów. Wyniki dekonwolucji przedstawiono na mapach (3D) i przekrojach (2D) wykonanych wzdłuż wybranych profili. Należy mieć na uwadze, że w przypadku dekonwolucji 2D, która zakłada dwuwymiarowość struktur (w praktycznych zastosowaniach rozciągłość  $\geq 5 \cdot$  szerokość) oraz prostopadłość przekroju w odniesieniu do rozciągłości, na części wybranych przekrojów warunki takie nie były spełnione, co skutkowało błędami w wartościach rozwiązań.

Uzyskane wyniki przetwarzania danych grawimetrycznych w zakresie obejmującym elementy interpretacji jakościowej i ilościowej (3D dekonwolucja Eulera) przedstawione zostały na mapach, zaś dekonwolucji 2D na przekrojach grawimetrycznych będących załącznikami do raportu nr 10.4. Załączniki mapowe oraz przekroje opracowano w programie GS Surfer oraz GS Grapher w wersjach 11 (v11) i zapisano w naturalnych formatach na załączonym do raportu dysku wraz z elementami składowymi załączników. W celu swobodnego posługiwania się danymi załączniki wyeksportowano do formatu .pdf w dwóch wersjach A i B. Wersja A stanowi cyfrowy obraz załącznika w postaci gotowej do druku wraz z opisami i ramkami, wersja B jest obrazem mapy załącznika z usuniętymi ramkami i opisami. Do wersji B dodane zostały pliki georeferencyjne umożliwiające import pliku do systemów GIS oraz łączenie z innymi danymi i wynikami.

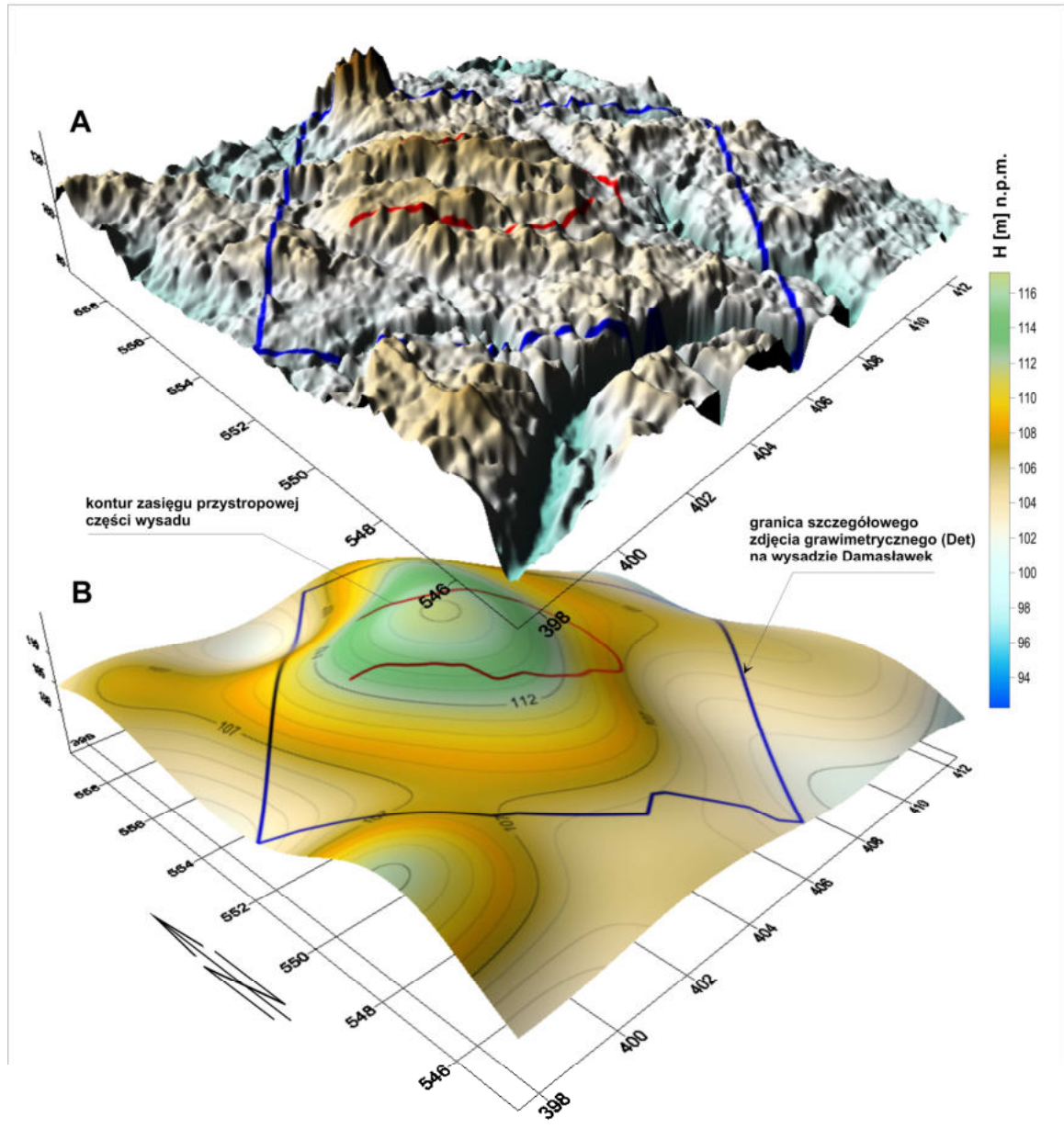
W trakcie opracowania danych wysokościowych oraz grawimetrycznych na poszczególnych strukturach solnych wykonywano również analizy niestandardowe, których wynik może pośrednio wskazywać na fakt bardzo powolnej mobilności struktur w pionie. Odzwierciedlenie tego ruchu wydaje się być dostatecznie widoczne pomimo nieprzerwanych procesów erozji powierzchni. Wyniki analiz niestandardowych dostępne są w autorskich materiałach roboczych. Nie zostały dołączone do końcowej wersji raportu.

Analizy niestandardowe obejmowały przede wszystkim analizę morfologii powierzchni terenu na analizowanych obszarach występowania wszystkich struktur solnych, omawianych w niniejszym raporcie. We wszystkich przypadkach z wyjątkiem wysadu Wapno rezultaty były podobne, tj. zaobserwowano wyraźne wyniesienie terenu w obrazie rozkładu trendu rozkładu wartości rzędnych nad strukturą solną, który aproksymowano filtrem dolnoprzepustowym (LP) Butterwortha metodą filtracji częstotliwościowej w domenie przestrzeni (wspomniana wcześniej technika separacji pola regionalnego i rezydualnego w grawimetrii). Zazwyczaj dobre wyniki uzyskiwano przy zastosowaniu filtra LP o granicznej długości fali  $\lg$  równej 5 lub 6 km.

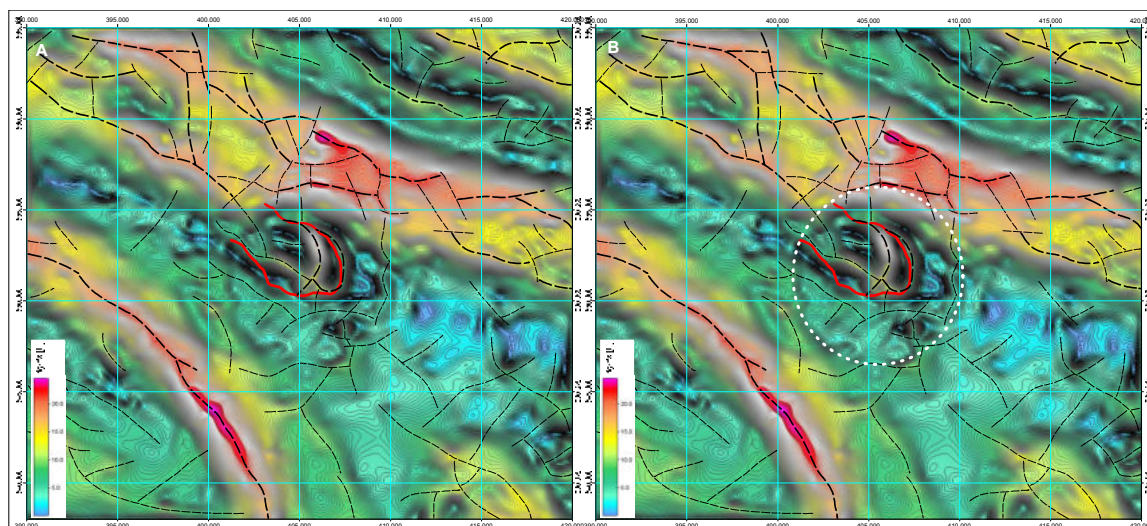
Poniżej na rys. 4 zaprezentowano przykład wyniku takiej analizy w odniesieniu do wysadu Damasławek na obszarze szczegółowego zdjęcia grawimetrycznego. Należy zaznaczyć, że analiza uwzględniająca dane wysokościowe z rozleglejszego obszaru, daje również podobny wynik.

Innym przykładem analiz niestandardowych jest wykorzystanie możliwości manipulacji technikami graficznej wizualizacji obrazów prezentujących wyniki przetwarzania danych geofizycznych. Przykład takiej wizualizacji i jej rezultatu pokazano również dla wysadu Damasławek, tym razem w obszarze analizy danych grawimetrycznych z półszczegółowego zdjęcia grawimetrycznego (Ryc. 59). Na obrazach anomalii gradientu poziomego ( $dg/ds$ ) pokazanych na Ryc. 60 a uwidacznia się wokół struktury solnej strefa anomalna o cechach rozkładu anomalii wyraźnie różniących się od otoczenia. Najprawdopodobniej strefa ta może być świadectwem zasięgu bezpośredniego oddziaływania fizyko-chemicznego wysadu na swoje otoczenie.





Ryc. 59 3D model (DEM) powierzchni terenu na obszarze szczegółowego zdjęcia grawimetrycznego wykonanego nad wysadem Damaszewek (A) i obraz 3D trendu w rozkładzie wysokości na analizowanym obszarze, aproksymowanym filtrem dolnoprzepustowym Butterwortha o granicznej długości fali  $l_g = 6$  km (LP06 BTWR) z wykorzystaniem techniki filtracji częstotliwościowej w domenie przestrzeni (B).



**Ryc. 60** Wysad solny Damasławek – obszar analizy półszczegółowego zdjęcia grawimetrycznego, mapa anomalii gradientu poziomego  $dg(up250)/ds$  anomalii siły ciężkości. A – odwzorowanie w polu anomalnym strefy okalającej wysad (możliwy zasięg wpływu fizyko-chemicznego)

Wykonana analiza archiwalnych danych grawimetrycznych z rozpoznania półszczegółowego oraz szczegółowego pozwoliła na uzyskanie klarownego obrazu quasi-tektonicznego odwzorowywania się w rozkładzie pola siły ciężkości obecności stromo nachylonych i pionowych elementów nieciągłych w budowie ośrodka geologicznego oraz pozwoliła na określenie ich lokalizacji. Należy zaznaczyć, że lokalizacja na powierzchni wyinterpretowanych stref nieciągłych niekoniecznie musi odwzorowywać elementy ewidentnej tektoniki nieciągłej, jakimi są uskoki. Również należy wspomnieć, że istniejące w ośrodku geologicznym elementy nieciągłe, stwierdzone w wyniku bezpośrednich badań lub innych analiz geologicznych, o ile nie będzie kontrastu gęstości na granicy nieciągłości, nie będą odzwierciedlać się w rozkładzie pola anomalnego i są wtedy grawimetrycznie niewykrywalne.

Kryterium odwzorowywania się w postaci anomalii pola grawitacyjnego jest nieciągłość w rozkładzie masy ośrodka geologicznego, a tym samym istnienie nieciągłości i kontrastów gęstościowych na granicach kompleksów skalnych. W dalszej konsekwencji, w przypadku stromego lub pionowego nachylenia powierzchni, w obrazie rozkładu pola grawitacyjnego pojawiają się strefy anomalne gradientu poziomego pola grawitacyjnego, które odzwierciedlają lokalizację tych nieciągłości. Zatem strefy anomalnego gradientu mogą świadczyć również o obecności stromo nachylonych granic litologicznych w kompleksach skał różniących się gęstościowo, a także gwałtownych zmian facjalnych. Uzyskane wyniki

lokalizacji i przebiegu stref nieciągłych świadczyć mogą o istnieniu także takich elementów strukturalnych.

Wykonane w ramach niniejszego opracowania analizy ilościowe pozwoliły na określenie lokalizacji kontrastowych gęstościowo nieciągłości budowy geologicznej, a także na oszacowanie ich głębokości występowania.

### **10.3 Roboty geologiczne**

Roboty geologiczne wykonano na podstawie „Projektu robót geologicznych w celu identyfikacji struktur geologicznych w obrębie czwartorzędu na obszarach wysadów solnych Izbica Kujawska i Łanięta” zatwierdzonego Decyzją Ministra Środowiska nr DGK-VIII.4740.1.2016.MW w dniu 3.03.2017 r. Wykonawcami prac geologicznych byli Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy z siedzibą w Warszawie (00-975), ul. Rakowiecka 4: Centrum Geozagrożeń i Program Kartografia Geologiczna i Geologia Regionalna, Geofizyka Toruń S.A. w Toruniu (87-100) ul. Chrobrego 50 i Centrum Doskonałości GADAM Gliwickie Centrum Datowania Bezwzględne w Gliwicach (44-100) ul. Konarskiego 22A. Prace geologiczne były prowadzone w okresie od 3.03.2017 do 31.12.2018 r. Dozór robót prowadzili pracownicy Programu Kartografia Geologiczna i Geologia Regionalna PIG-PIB. Z wykonanych prac zgodnie z art. 92 pkt. 1 ww. Ustawy z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze, dokumentacja geologiczna inna została sporządzona w przypadku wykonywania prac geologicznych niekończących się udokumentowaniem złóż kopalin.

Dotychczasowe rozpoznanie i udokumentowanie struktur geologicznych w obrębie czwartorzędu wysadów solnych jest najczęściej słabe. Niewielkie obszarowo struktury na podstawowych mapach geologicznych są elementem zainteresowania ale najczęściej rozpoznania głębszych struktur czwartorzędowych opartym na archiwalnym materiale wiertniczym. Ten z kolei to najczęściej archiwalne profile wierceń surowcowych. Osady czwartorzędu, a także przynajmniej część osadów neogenu i paleogenu opisywano w nich na podstawie prób okruchowych, a rdzeń uzyskiwano jedynie dla wybranych odcinków w niektórych z profili wiertniczych. Granicę czwartorzęd – neogen w tych otworach często trudno zdefiniować jednoznacznie co do głębokości i osadów występujących w tej pozycji stratygraficznej. Występują tu także archiwalne profile otworów hydrogeologicznych, z których korzystano za pomocą banku HYDRO prowadzonym przez państwową służbę

hydrologiczną w PIG-PIB. Są to często profile o dobrym opisie litologicznym, ograniczone jednak do poszczególnych, zazwyczaj większych miejscowości na obszarze struktur solnych. Badania geoelektryczne: tomografia ERT i sondowania SGE, wykonane dla zasadniczego zadania PSG potwierdziły złożony i skomplikowany charakter struktur geologicznych nad strukturami solnymi Izbica Kujawska i Łanięta, tym samym wskazując na niedostateczne rozpoznanie struktur geologicznych i budowy czwartorzędu nad wysadami.

Na wytypowanych do prac geologicznych obszarach badawczych Izbica Kujawska (nad strukturą solną Izbica Kujawska) i Łanięta (nad wysadem solnym Łanięta) rozpoznanie nie odbiega od przedstawionego powyżej. Dlatego w ramach zadania wytypowano miejsca dla uszczegółowienia rozpoznania, jako cel zasadniczy stawiając określenie związku struktur solnych i ich części z podłożem czwartorzędu i strukturami czwartorzędowymi. Celem pełnordzeniowych wierceń badawczych było uzyskanie pełnego profilu osadów czwartorzędowych w wybranych, ważnych lub typowych miejscach nad wysadami w celu uzyskania reperowych danych geologicznych dla obszarów poszczególnych wysadów.

Należy dodać, że niedostateczne rozpoznanie struktur nad wysadami solnymi nie ogranicza się do dwóch wybranych struktur solnych. Na obszarze Niżu Polskiego wymaga zarówno analiz szczegółowych jak też sformułowania wniosków generalnych. Dlatego wnioski z prac mogą mieć znaczenie dla sposobu postępowania przy pracach geologicznych z nadkładem czwartorzędowym nad innymi dokumentowanymi wysadami i szerzej strukturami solnymi na obszarze Niżu Polskiego.

**Pełen opis wykonanych robót geologicznych łącznie z profilami poszczególnych otworów i szczegółowymi wynikami badań laboratoryjnych zawierają Raporty nr 16 i 17 oraz Dokumentacja geologiczna inna.**

Roboty geologiczne zaprojektowano tak, by objęły dwa podstawowe zagadnienia obszaru wysadów. Planowano uzyskanie pełnych profili czwartorzędu wraz z udokumentowaniem ich podłoża w zadanych sytuacjach morfologiczno-strukturalnych. Wykonano zgodnie z projektem robót geologicznych wiercenia pełnordzeniowe: 4 otwory o głębokości 64 do 100m na obszarze badawczym Izbica Kujawska i 5 otworów o głębokości 60m do 100m na obszarze badawczym Łanięta. Zaprojektowano także wykonanie i udokumentowanie wierceń płytkich dla udokumentowania zmienności litologicznej, genetycznej i stratygraficznej osadów w strefie o założonej głębokości 30m od powierzchni terenu. Łącznie wykonano 59 otworów nierdzeniowanych (w tym 3 powtórzenia wierceń w związku z trudnymi warunkami geologicznymi). Wiercenia te były materiałem reperowym dla badań geofizycznych

wykonywanych w postaci profili tomografii elektrooporowej ERT i pionowych sondowań elektrooporowych SGE. Posłużyły także do rozpoznania struktur geologicznych w strefie przypowierzchniowej oraz dla uchwycenia ich związku ze strukturami młodszych okresów czwartorzędu, różnych wiekowo dla obydwu obszarów badawczych. Dla obszaru Izbica Kujawska wykonano 38 wierceń nierdzeniowanych, a dla obszaru Łanięta – 21 wierceń nierdzeniowanych.

Badania geofizyczne, zwłaszcza profile tomografii ERT, wykonane dla zadania PSG pokazują występowanie struktur o niskiej i bardzo niskiej oporności geoelektrycznej, o skomplikowanym kształcie i ograniczonym zasięgu przestrzennym. Dostępne archiwalne analizy litologiczno-petrograficzne z wierceń nie dawały odpowiedzi na przyczynę takiego układu oporności geoelektrycznej struktur. Zakładano jako przyczynę występowanie zdeformowanych osadów ilastych i ilasto-pyłowatych jako osadów o niskiej oporności geoelektrycznej lub (oraz) dużą zawartością substancji mineralnych w wodach wypełniających osady piaszczyste lub inne serie osadów przepuszczalnych.

Dla uchwycenia właściwości geoelektrycznych i oceny ruchliwości substancji uwolnionych ze struktury solnej wykonano analizy wybranych składników składu mineralnego dla 14 próbek wody pobranych z 9 wierceń pełnordzeniowych oraz dla 3 próbek ze strefy przypowierzchniowej z miejsc występowania wsięków wód podziemnych w strefach związanych ze strukturą solną Izbica - Kłodawa – Ozorków, której częścią jest struktura solna Izbica Kujawska. W wierceń nierdzeniowanych wykonano 62 pomiary przewodności elektrolitycznej wody na obszarze badawczym Izbica Kujawska i 18 pomiarów na obszarze badawczym Łanięta. Pomiary wykonano konduktometrem Slandi SC300 używanym przez Państwową Służbę Hydrogeologiczną. Badania wskazały strefy obecności wód o podwyższonej mineralizacji na obydwu obszarach badawczych. Wiercenia pozwoliły uchwycić właściwości litologiczne skał o niskiej oporności w czwartorzędzie. Na obydwu obszarach badawczych znaleziono i udokumentowano miejsca i strefy o podwyższonej mineralizacji wód podziemnych wzbogaconych w substancje mineralne, w czwartorzędzie i jego podłożu.

Zadanie obejmowało również badania wieku bezwzględnego osadów czwartorzędowych. Badania wieku metodą OSL objęły stosunkowo młode osady piaszczyste z górnych części profili czwartorzędowych nad obydwoma wysadami solnymi. Ze względu na cechy metody wyniki badań tych odcinków historii czwartorzędu, obejmującego czas do około 130 tys. lat BP rokują najlepiej pod względem wiarygodności wyników i rozpoznania geologicznego.

Cele badawcze dla poszczególnych próbek związane są ściśle z wynikami robót geologicznych, zwłaszcza najmłodszego okresu glacialnego i jego charakterystyki. Ze względu na brak próbek młodych osadów organicznych w zasięgu metody 14C badań w tym zakresie tematycznym nie wykonywano.

Badania palinologiczne wykonano dla określenia wieku osadów zalegających bezpośrednio pod osadami czwartorzędowymi oraz między seriami osadów czwartorzędowych. Wykorzystano osady organiczne występujące w 5 profilach otworów wiertniczych Izbica Kujawska PIG-1 (osady organiczne paleogenu), Łanięta PIG-2 (osady organiczne czwartorzędu), Łanięta PIG-3 (osady organiczna neogenu) i Łanięta PIG-4 (osady organiczne czwartorzędu i neogenu).

Badaniom próbek wody objęto odcinki poziomów wodonośnych we wszystkich badawczych otworach pełnordzeniowych.

Próbki wody pobierano z warstw wodonośnych nawierconych w trakcie robót geologicznych. Próbki wód podziemnych ze wszystkich pełnordzeniowych otworów wiertniczych poddano badaniom składu chemicznego w Zespole Laboratoriów Państwowego Instytutu Geologicznego –PIB (Sztuczyńska i in., 2017, 2018). Czwartorzędowe jeziorne osady organiczne z otworów Łanięta PIG-2 i Łanięta PIG-4 poddano badaniom palinologicznym w Oddziale Karpackim Państwowego Instytutu Geologicznego – PIG (Granoszewski, 2018). Wykonano badania palinologiczne z organicznych serii neogenu i paleogenu z otworów Izbica Kujawska PIG-1, Łanięta PIG-3 i Łanięta PIG-4 w Zakładzie Geologii Regionalnej PIG-PIB (Słodkowska, 2018).

### **10.3.1 Wykonane prace geologiczne**

W ramach robót geologicznych wykonano 9 wierceń pełnordzeniowych o głębokości od 60 do 100m i łącznym metrażu 784 mb i 59 wierceń nierdzeniowych (płytkich) o głębokości od 5 do 42 m i łącznym metrażu 1600 mb. Na obszarze badawczym Izbica Kujawska wykonano łącznie 42 wiercenia badawcze (4 wiercenia pełnordzeniowe i 38 wierceń nierdzeniowych) o łącznym metrażu 1443 mb, a na obszarze badawczym Łanięta 26 wierceń badawczych (w tym 5 wierceń pełnordzeniowych i 21 wierceń nierdzeniowych) o łącznym metrażu 941 mb.

Wiercenia mechaniczne pełnordzeniowe z użyciem podwójnej rdzeniówki na płuczkę wykonywała Geofizyka Toruń S.A. w dniach 10.08.2017 do 6.09.2017 roku przy pomocy wiertnicy URB 2.5. Wykonano 9 wierceń rdzeniowanych o łącznym metrażu 784 mb z dwóch obszarów badawczych (profile wierceń w załączniki nr 5 do Dokumentacji geologicznej). Przy czym na obszarze badawczym Izbica Kujawska wykonano 4 wiercenia o głębokości od 84,5m do 100,0m, a na obszarze badawczym Łanięta 5 wierceń o głębokości od 60,0m do 100,0m. Po zakończeniu wiercenia były wykonywane pompowania z odcinków, na których umieszczono filtr siatkowy długości od 2-5 m (miejsca pobrania próbek oznaczono na profilach wierceń z załącznikami do Dokumentacji geologicznej nr 5.1 do 5.9). W trakcie prac likwidacyjnych wykonywano pobieranie próbek wody z odcinków z założonym filtrem w celu pompowania wody. Dozór geologiczny wierceń prowadził Program Kartografia Geologiczna i Geologia Regionalna Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego wykonując m.in. uzgodnienie lokalizacji, bieżący dozór wierceń, pobierania rdzenia do skrzynek i ich przewozu do magazynu rdzeni. Dozór geologiczny pobierał próbki do analizy wody i innych prac geologicznych.

Potencjalny wpływ robót geologicznych został zminimalizowany na etapie projektowania poprzez wybór najmniej konfliktowych lokalizacji wierceń, skorygowany jeszcze dla dokładnej lokalizacji by zmniejszyć uciążliwość i wpływ na właściwości gospodarcze robót geologicznych. Planowane prace terenowe zostały wykonane z wykorzystaniem istniejących dróg i ścieżek tak, by nie niszczyć obszarów zielonych i lasów. Punkty dokumentacyjne wykonywano w miejscach odpowiednio oddalonych od pni drzew, aby zapobiec ich ewentualnemu uszkodzeniu.

Po zakończeniu wiercenia wykonywano pozyskiwanie próbek wody do badań składu chemicznego wody podziemnej. Po osadzeniu filtra i uszczelnieniu poziomu wodonośnego, z którego pobierano wodę, kompaktorem odbywało się zatłaczanie powietrza do odcinka z filtrem przy pomocy pompy airlift (airlift pump). Pompowanie wody odbywało się do momentu oczyszczenia wody ze zmętnień. Oczyszczoną wodę pobierano do badań do pojemników zgodnie z metodologią stosowaną w Laboratorium Chemicznym PIG-PIB. Likwidacja wierceń rdzeniowanych odbywała się bezpośrednio po zakończeniu wiercenia i pobraniu próbek wody. Likwidację wykonywano przez zatłoczenie pasty iłowo-cementowej do otworu.

Wiercenia obrotowe z użyciem świdra spiralnego w systemie lekkim (wiercenia płytkie) nierdzeniowane wykonywano w dniach od 25.09.2017 roku do 13.11.2017 roku. Wykonano

59 wierceń nierdzeniowanych (w tym 3 wiercenia powtarzane, bisowane ze względu na problemy techniczne w czasie prac wiertniczych) o łącznym metrażu 1600 mb (profile wierceń w załączniku 6 do Dokumentacji geologicznej). Wiercenia mechaniczne wykonywała Geofizyka Toruń S.A. przy użyciu aparatów wiertniczych PAT i URB2B2 . Dozór geologiczny prowadził Program Kartografia Geologiczna i Geologia Regionalna Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego, który podejmował na bieżąco decyzję o korektach lokalizacji wierceń oraz głębokości wierceń i wykonywaniu pomiarów przewodności elektrolitycznej wody z warstw nawiercanych oraz próbki osadów. Likwidacja otworów materiałem pozyskanym z urobku wiertniczego następowała na bieżąco po odwierceniu i wykonaniu pomiarów.

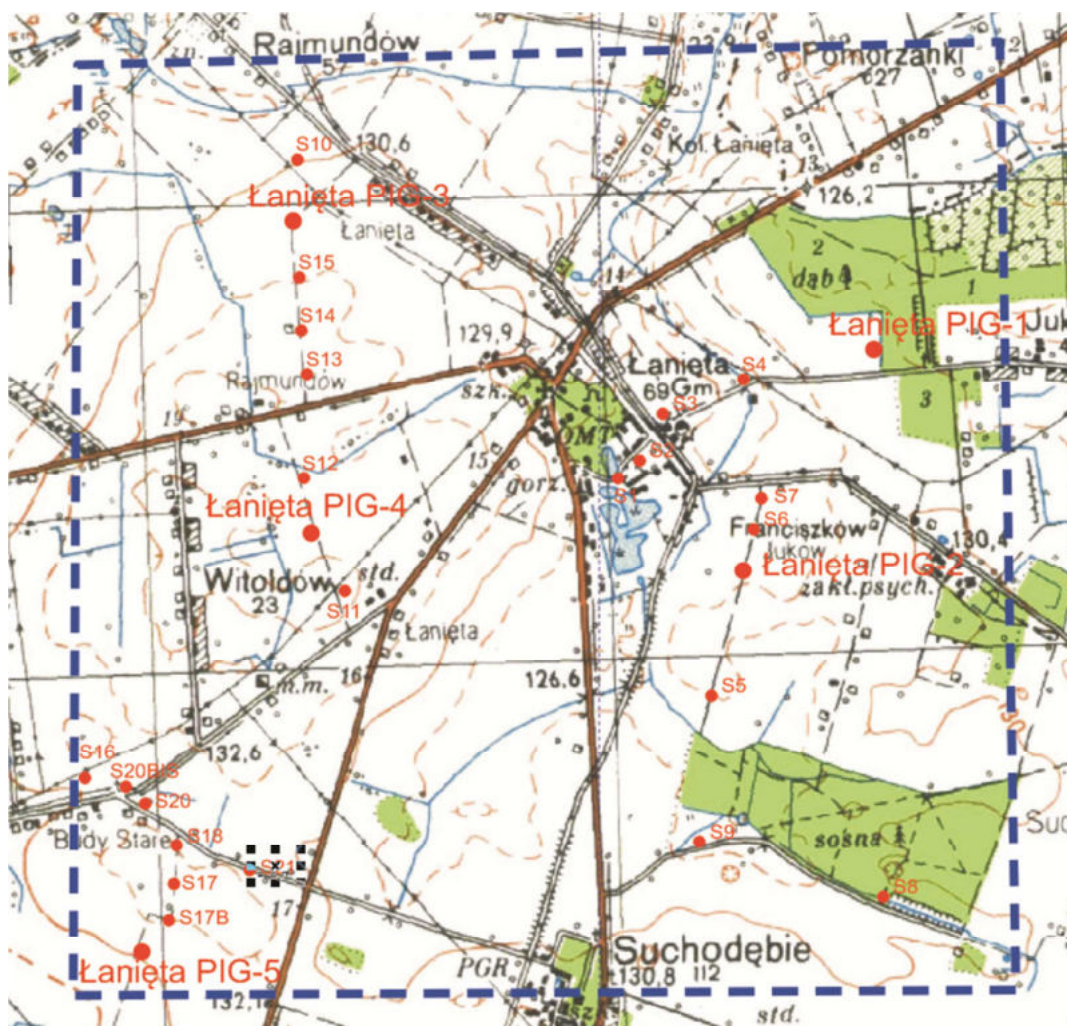
Roboty wiertnicze w jednej lokalizacji trwały: w przypadku wierceń rdzeniowanych maksymalnie 3 dni, najczęściej - 1 lub 2 dni, w przypadku wierceń nierdzeniowanych do kilku godzin. Likwidację wiercenia kończono bezpośrednio po zakończeniu prac tego samego dnia.

Lokalizację otworów geologicznych przedstawiono na Ryc. 61 i Ryc. 62.





Ryc. 61 Lokalizacja otworów badawczych pełnordzeniowych i sond mechanicznych na obszarze Izbica Kujawska.



Ryc. 62 Lokalizacja otworów badawczych pełnordzeniowych i sond mechanicznych na obszarze Łanięta.

Wykonane roboty geologiczne prowadzono by nie spowodowały zmian w środowisku hydrogeologicznym. Nawiercone horyzonty wodonośne były po odwierceniu izolowane i zabezpieczone przed łączeniem różnych poziomów wodonośnych. Bezpośrednio po zakończeniu robót otwory były odpowiednio likwidowane pastą iłowo-cementową w przypadku otworów wiertniczych rdzeniowych lub urobkiem z wiercenia, tak, by poziomy wodonośne odpowiednio zamknąć. Teren prac był uprzątnięty i wyrównywany w sposób przywracający jego stan sprzed robót geologicznych. Zakres i sposób wykonania robót geologicznych nie spowodował zmian w środowisku, w tym na obszarach chronionych, ponieważ potencjalne oddziaływania miały charakter krótkoterminowy i odwracalny. Prace były prowadzone poza obszarami szczególnej ochrony środowiska.

Rdzeń z 4 wierceń pełnordzeniowych z obszaru Izbica Kujawska i 5 wierceń pełnordzeniowych z obszaru Łanięta został umieszczony w skrzynkach podwójnych i złożony jako próbki trwałego przechowywania do Magazynu Rdzeni w Leszczach Narodowego

Archiwum Geologicznego PIG-PIB. Łącznie przekazano osady w 298 skrzynkach podwójnych. W 11 skrzynkach umieszczono osady uchwycone świdrem okienkowym (łącznie dla około 25 mb przypowierzchniowej warstwy osadów czwartorzędowych) przed posadowieniem rdzeniówki oraz 13 skrzynek z materiałem uzyskanym z koryta osadowego, łącznie 48 mb materiału okruchowego. Z 759 mb osadów rdzeniowanych uzyskano i złożono do skrzynek, zabezpieczono i opisano w sposób trwały około 540mb rdzenia wiertniczego jako prób trwałego przechowywania. Średni uzysk rdzenia wynosił ponad 71% w stosunku do pełnej długości profili osadów podlegających rdzeniowaniu.

### 10.3.2 Badania laboratoryjne

#### Badania palinologiczne osadów paleogenu i neogenu

Badania osadów paleogenu i neogenu wykonała w latach 2017-2018 B. Słodkowska z Zakładu Geologii Regionalnej Państwowego Instytutu Geologicznego – PIB w Warszawie (Słodkowska 2018). Objęły one osady 3 profili rdzeniowanych wierceń badawczych: Izbica Kujawska PIG-1 (głębokość 72,9-92,0 m), Łanięta PIG-3 (głębokość 79,6-86,0 m) i Łanięta PIG-4 (głębokość 91,5-95,2). Łącznie wykonano badania z 26 próbek osadów.

W preparatach mikroskopowych analizowano cały zespół materii palinologicznej – palinomorfy (sporomorfy i fitoplankton) oraz palinoklasty (fragmenty drewna, organiczne wyściółki otwornic i agregaty glaukonitu). Frekwencja palinomorf w większości profili była zadawalająca, poza czterema próbkami – dwoma z profilu Izbica Kujawska PIG-2 z gł. 83,3 m i 83,3 m oraz dwoma z profilu Łanięta PIG-3 z gł. 79,8 m i 86,1 m, w których odnotowano stosunkowo niską frekwencję, a przeprowadzona analiza ma charakter jakościowy. Stan zachowania okazów we wszystkich próbkach był dość dobry.

W profilu Izbica Kujawska wydzielono dwa różnowiekowe zespoły, starszy z głębokości 91,9 – 92,0 m należy niewątpliwie do **eocenu górnego**, na co wskazuje obecność indeksowego fitoplanktonu: *Areosphaeridium diktyoplokum*, *Charlesdowniea clathrata*, *Chytresphaeridium parva*, *Enneadocysta pectiniformis*, *Heteraulacacysta porosa*, *Paucilobimorpha incurvata*. Znaczący udział pyłku roślin ciepłolubnych potwierdza również te datowania.

Kolejny jednowiekowy zespół stwierdzono na głębokości 71,7 – 88,1 m w mułku węglistym, pomimo wyraźnej trójdzielności jest to zespół jednego wieku. Zaobserwowane

różnice w składzie spektrów pyłkowo-fitoplanktonowych rejestrują różne etapy rozwoju zbiornika sedymentacyjnego. **Dolnoligoczeński** wiek tego zespołu potwierdza obecność fitoplanktonu: *Deflandrea phosphoritica*, *Membranophoridium aspinatum*, *Rhombodinium draco*, *Wetzelella gochtii*. Najniższa część dolnooligoczeńskiego odcinka profilu z głębokości 84,1 – 88,1 m charakteryzuje się znikomym udziałem pyłku nagozalążkowych i dominacją wysokocięplolubnej roślinności okrytozalążkowych. Występujący pyłek reprezentuje zbiorowisko mezofilnego lasu mieszanego rozwiniętego podczas panowania klimatu ciepłumiarkowanego i subtropikalnego. W wyższej części na głębokości 82,3 – 83,3 m osad stał się bardziej piaszczysty, wzrosła dynamika zbiornika i nastąpiła selekcja zespołu, który tutaj jest dość ubogi, jednak zawiera wskaźnikowe taksony. Górny zespół z głębokości 71,7 – 80,8 m charakteryzuje bogate spektrum z wyraźnym udziałem redeponowanego, eoczeńskiego fitoplanktonu: *Areosphareidium diktyoplokum*, *A. michoudii*, *Cordosphaeridium funiculatum*, *Dracodinium*, *Paucilobimorpha incurvata*, który występuje tu we fragmentach. Notuje się też obecność wymarłego w kredzie rodzaju nagozalążkowych *Classopollis* oraz wśród fitoplanktonu paleoczeńskiego rodzaju *Cerodinium*.

Zespół sporomorf oznaczony w profilu Łanięta PIG-3 był bardzo bogaty i zróżnicowany. Duży udział miały ziarna pyłku krzewiastych zbiorowisk z: *Corylopollis coryloides*, *Cyrillaceaepollenites bruhleensis*, *Ericipites ericius*, mezofilnego lasu mieszanego z: *Pinuspollenites*, *Sequoiapollenites*, *Quercoidites henrici*, *Tricolporopollenites fallax* i *T. pseudocingulum* oraz lasu bagiennego *Nyssapollenites* i *Alnipollenites verus*. Znaczny udział wskaźnikowych gatunków *Ouercooidites henrici* i *Tricolporopollenites pseudocingulum*, jak i cały skład zespołu świadczy o jego **środkomioczeńskim** wieku. Taki zespół jest charakterystyczny dla poziomu pyłkowego **V Quercoidites henrici** związanego z akumulacją II pokładu łuzycyjskiego węgla brunatnego. Osady tego wieku są znane z rowu Nakło-Więcbork i z rowu Kleszczowa (Piwocki i in., 2004).

W profilu Łanięta PIG-4 opisano bogaty i zróżnicowany zespół sporomorf. Zaznacza się w nim pewna dwudzielność, zespół z dolnej części profilu jest uboższy w taksony, pomimo tego wykazuje duże podobieństwo z zespołem z górnej części profilu. Wyraźnie zaznacza się zbiorowisko lasu bagiennego *Alnipollenites verus* i *Nyssapollenites*, duży udział ma też zbiorowisko krzewiastych zarośli: *Corylopollis coryloides*, *Cyrillaceaepollenites megaexactus*, *Ericipites ericius*, *Ilexpollenites*. Szczególny charakter ma próbka z głębokości 92,2 m pobrana z czarnego zwięzłego iltu, masowo występują tu massule paproci wodnej z rodzaju *Azolla/Salvinia*, wyraźnie zaznacza się pyłek roślin zielnych: *Malvacearumpollis*,

*Persicarioipollis*, *Potamogetonacidites*, *Sporotrapoidites illengensis*, a także fitoplankton słodkowodny. Taki skład zespołu sporomorf wskazuje na epizod rozwoju otwartego jeziorzyska, co potwierdza stosunkowo niski udział pyłku drzew. Zespół sporomorf z górnej części profilu Łanięta PIG-4 jest zbliżony do obrazów pyłkowych ze **środkowego miocenu**, poziom pyłkowy **IX Tricolporopollenites pseudocingulum**, który dokumentuje **IA oczkowicki pokład węgla brunatnego**. W profilu ekwiwalentem sedymentacyjnym pokładu są ility węgliste. Dolny odcinek profilu można zaliczyć także do miocenu środkowego, bez dokładniejszego rozdzielenia.

### **Badania palinologiczne osadów czwartorzędowych**

Badania palinologiczne osadów czwartorzędowych wykonał w latach 2017-2018 W. Granoszewski z Oddziału Karpackiego Państwowego Instytutu Geologicznego – PIG w Krakowie (Granoszewski 2018). Objęły one 24 próbki jeziornych osadów organicznych i organiczno-mineralnych z dwóch wierceniach badawczych Łanięta PIG-2 (na głębokości 45,9-29,8 m i Łanięta PIG-4 (na głębokości 40,0-28,3m).

W profilu Łanięta PIG-2 w jednorodnych facjalnie osadach jeziornych W. Granoszewski stwierdził dwa okresu z roślinnością ciepłą rozdzielone okresem chłodu. Skład pyłku wskazywał na klimat ciepły rangi interglacjalnej korelowany z sekwencją mazowiecką, która jest uważana (Granoszewski 2018) za odpowiadająca stadium MIS 11 morskich pięter izotopowych. Po okresie ciepłym w roślinności zapisanej w profilu zaznaczył się okres zimny, a po nim kolejny okres ciepły. Ciepłolubny charakter panującej wówczas roślinności wskazuje na warunki klimatyczne rangi interglacjalnej. Byłby to interglacjal na krzywej tlenowej odpowiadający okresowi MIS 9a. Tak zdefiniowane warunki klimatyczne określałyby okres trwania warunków powstawania jezior w Łaniętach na co najmniej 80 tysięcy lat (od 400-320 tys. lat BP) i były prawdopodobnie zapisem historii obniżenia genezy zapadliskowej istniejącego na wysadzie solnym, wypełnionego osadami jeziornymi w tej części plejstocenu. Jest to prawdopodobnie zapis predyspozycji do powstawania zbiorników kopalnych najdłuższej z dotychczas poznanych w plejstocenie Polski.

Na okres predyspozycji dla powstawania zbiorników jeziornych w Łaniętach miało niewątpliwie wpływ jego usytuowanie nad centralną częścią wysadu Łanięta i był związany z aktywnością wysadu w tym czasie.

### **Badania składu chemicznego wód podziemnych i ich przejawów na powierzchni terenu**

Badania składu chemicznego wody wykonano na próbkach wody pobranych z wierceń rdzeniowanych oraz ze stanowisk na powierzchni terenu. Wykonano badania laboratoryjne 17 próbek wody, w tym 14 próbek z wierceń rdzeniowanych wykonanych w ramach robót geologicznych dla opisywanego zadania. Badania obejmowały wykonanie wybranych składników wody:

- stężenia anionów (F, Cl, NO<sub>2</sub>, Br, NO<sub>3</sub> i SO<sub>4</sub>) metodą chromatografii;
- stężenia pierwiastków (Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na i Sr) metodą emisyjnej spektrometrii atomowej,
- zasadowość ogólna, stężenie HCO<sub>3</sub> metodą spektrofotometryczną;
- stężenie jodków (J) metodą chromatografii jonowej.

Badania wykonano w Laboratorium Chemicznym Zespołu Laboratoriów PIG+PIB w Warszawie ul. Rakowiecka 4. Wyniki badań przedstawiono w Sprawozdaniach z badań laboratoryjnych Laboratorium Chemicznego PIG-PIB dołączonych do Dokumentacji geologicznej.

Wyniki badań wskazują na 3 sposoby mineralizacji osadów.

Skład chemiczny o dominującym udziale pierwiastków Na i anionów Cl wskazuje na znaczny udział w rozpuszczanych w wodzie składnikach soli pochodzącej z rozmywania wysadów solnych. Wody z dużą zawartością jonów Na i Cl zanotowano w północnej części struktury solnej Izbica Kujawska na północ od Wzniesień Izbicy (profil Izbica Kujawska PIG-1, głębokość 75,0-78,0m) oraz o mniejszej zawartości składników w obszarze Wzniesień Izbicy (profil Izbica Kujawska PIG-2 głębokość 67,0-70,0m). Podobny skład chemiczny wód podziemnych znaleziono w wodach z samowypływu z otworu wiertniczego prawdopodobnie wykonanego na przełomie XIX i XX wieku. W miejscowości Zgłowiączka (oznaczenie próbek Izbica W004) odwierconego na początku XX wieku. Miejsce znajduje się około 7 km na północ od struktury solnej Izbica Kujawska.

W okolicach Pełczysk na północny zachód od Ozorkowa (Ozorków W001) na powierzchni terenu w dolinie rzeki Solanki występują wsięki wód podziemnych podsiąkających przez gliniaste utwory powierzchniowe, obficie wzbogacone w jony Na i Cl.

Wody te – podobnie jak w przypadku wód ze Zgłowiączki – występują na przedłużeniu struktury solnej Izbica – Kłodawa – Ozorków.

Wody podziemne o dominującym udziale pierwiastków Ca oraz Mg i anionów  $\text{SO}_4$  występują w Izbicy Kujawskiej pod Wzniesieniami Izbickimi. W profilu Izbica Kujawska PIG-2 z wód z poziomu czwartorzędowego. W tym samym wierceniu wody z poziomu mioceńskiego mają skład sodowo chlorkowy.

Skład chemiczny wody o dominującym udziale  $\text{NO}_3$  stwierdzono w Łaniętach (otwór Łanięta PIG-2), gdzie wody te towarzyszą kilkunastometrowej czwartorzędowej serii organicznej, złożonej z mułków organicznych i gytii.

Z wierceń nierdzeniowanych, płytkich wykonano terenowe pomiary przewodności elektrycznej za pomocą konduktometru Slandi SC300. Badania w sposób pośredni wskazują na stopień obecności substancji mineralnych w badanych wodach.

Wykonano przewodności elektrolitycznej wody: 58 pomiarów przewodności w 32 wierceniach nierdzeniowanych na obszarze badawczym Izbica Kujawska i 17 pomiarów przewodności w 11 wierceniach nierdzeniowanych na obszarze Łanięta. Biorąc jako sytuację reperową wyniki pomiarów przewodności elektrolitycznej wody z wierceń rdzeniowanych, w których wykonano analizy składu mineralnego wody.

Wysoką mineralizację wód podziemnych na obszarze badawczym Izbica Kujawska stwierdzono w Augustynowie w dolnych częściach profili S24, S25, S26 i S27 (pomiary nr 37, 42, 43, 47). Niższą, podwyższoną zawartość minerałów mają wody z górnej części tych stanowisk (np. punkty 40, 46) oraz w Izbicy Kujawskiej w profilu S12 (pomiary 12 i 13). Wszystkie pomiary wskazujące na podwyższoną mineralizację dotyczą strefy w zachodniej części Wzniesieniach Izbickich, nad strukturą solną Izbicy, gdzie badania składu mineralnego wód wykazały podwyższone wartości jonów chlorkowych i sodowych lub też jonów wapniowych i siarkowych wód podziemnych.

Na obszarze badawczym Łanięta podwyższone parametry mineralizacji wód podziemnych stwierdzono w dolnej części profili Łanięta S2, Franciszków S5, Witoldów S10 i Budy Stare S20 (pomiary nr 3, 9, 12 i 17). Podwyższona mineralizacja występuje tu w strefie krawędziowej wysadu Łanięta (profile S2, S10 i S20) oraz na południe od kopalnego obniżenia wypełnionego osadami jeziornymi pochodzącymi z dwóch okresów ciepłych i leżącego w obrębie wysadu Łanięta.

### **Określenie wieku bezwzględnego osadów czwartorzędowych**

Badania objęły 10 próbek osadów piaszczystych z obszarów badawczych Izbica Kujawska (8 oznaczeń) i Łanięta (2 oznaczenia) i zostały wykonane w Centrum Doskonałości GADAM Politechniki Śląskiej w Gliwicach (Moskała, 2017). Próbki pobrano z odsłoneń usytuowanych w obszarach badawczych Izbica Kujawska i Łanięta.

Wszystkie próbki pochodziły z osadów piasków średnioziarnistych bądź piasków różnoziarnistych ze sztucznych bądź naturalnych odsłoneń. Dla uniknięcia naświetlenia pobierano je bezpośrednio do pojemników po usunięciu warstwy naświetlonej współcześnie. Badania zostały nakierowane na oznaczenie najmłodszych serii osadowych czwartorzędu (okres zlodowacenia Wisły i młodsze osady) i ew. oddzielenie ich od serii pochodzących ze starszych okresów czwartorzędu. Oznaczenie wieku bezwzględnego metodą Optycznie Stymulowanej Luminescencji (OSL) sięga do kilkuset tysięcy lat, ale najlepsze i najpewniejsze wyniki osiąga do stukilkudziesięciu tysięcy lat.

Na obszarze badawczym Izbica Kujawska do badań wieku metodą OSL wybrano zaburzone glacitektonicznie osady Wzniesień Izbickich (próbki nr 1, 2, 3, 4, 5) oraz osady sedymentowane w obniżeniach (próbki nr 6, 7, 8). Osady zaburzone glacitektonicznie pochodzą z dolnej części stadiału górnego zlodowacenia Wisły (ich wiek bezwzględny został oznaczony w przedziale 16,20ka – 26,60ka). Wiek osadów pochodzących z wypełnień obniżeń i nie przykrytych najmłodszą gliną zwałową oznaczono w przedziale 10,07 ka – 15,87ka. W przypadku badanej próbki z Długiego (próbka nr 8) osady pochodzą ze starszego etapu powstawania sandru na przedpolu Wzniesień Izbicy Kujawskiej. Oznaczenia wieku osadów zaburzonych glacitektonicznie wskazują na pochodzenie osadów ze stadiału górnego zlodowacenia Wisły, co potwierdza pozycje tych osadów w obrazie tomografii elektrooporowej OSL.

Na obszarze badawczym Łanięta badania ukierunkowano na wyjaśnienie wieku osadów piaszczystych oddzielających dwie najmłodsze serie glin zwałowych. Według dotychczasowych poglądów i ustaleń (m.in. Roman 2011) przyjęto, że gliny zwałowe stanowią jeden poziom glacialnych pochodzący ze zlodowacenia Warty. Osady, z których pobierano próbki do oznaczeń wieku bezwzględnego występują w strefach wychodzi piasków międzyglinowych na powierzchni. Oznaczenia wieku bezwzględnego z tych osadów (próbki nr 9 i 10) wskazują na młody wiek luminescencyjny (10,69 tysięcy lat BP i 12,48 tysięcy lat BP). Wiek luminescencyjny serii ma związek z wtórnym przekształceniem osadów po ich odsłonięciu na powierzchni terenu.



### 10.3.3 Wnioski

Prace geologiczne w zakresie obejmujące roboty geologiczne oraz badania laboratoryjne spełniły wyznaczoną w Projekcie robót geologicznych rolę wobec zadania PSG „Monitoring geodynamiczny w zakresie interferometrii satelitarnej pasa wysadów solnych w Polsce oraz próba określenia ruchliwości soli w czwartorzędzie z wykorzystaniem tomografii elektrooporowej i technik modelowania 3D”. Wyniki robót geologicznych i prac geologicznych z nimi związanych zostały wykorzystane do identyfikacji struktur geologicznych czwartorzędu. Analizowano je zwłaszcza w strefach krawędzi wysadów i zapadlisk subrozyjnych, strefach deformacji glacitektonicznych w obrębie wysadów, czy obszarach wewnątrz zapadlisk subrozyjnych. Wykorzystując wyniki robót geologicznych i prac geologicznych oraz badań geofizycznych wykonanych dla zadania przeprowadzono analizę struktur geologicznych w czwartorzędzie na wybranych obszarach badawczych i ich związku ze strukturą wysadów.

Nad wysadami solnymi Polski środkowej rozpoznaje się zdeformowane glacitektonicznie serie osadów czwartorzędowych. Taki obraz budowy geologicznej czwartorzędu przedstawiają opracowania dotyczące obszarów nad wysadami Łanięta (Roman 1999, 2011) czy też nad pobliskim wysadem Lubień Kujawski (Baraniecka 1988, 1993). Prace geologiczne pozwoliły na weryfikację tego sposobu opisu budowy. Strefy deformacji glacitektonicznych nad wysadami są ograniczone i związane z określonymi częściami struktur solnych: krawędziami struktury, strefami przy krawędziach zapadlisk subrozyjnych.

Na obszarze badawczym Izbica Kujawska obserwuje się wyniesienie paleogeńskich osadów morskich w strefie północnej struktury solnej od strefy nad Wzniesieniami Izbickimi, gdzie brak osadów miocenu, związany z wypiętrzaniem tej części struktury solnej.

Ruchy obniżające zapadlisko subrozyjne Łanięt miały miejsce w paleogenie i w miocenie, czego dowodzi względne wyniesienie osadów.

W obydwu obszarach badawczych w czwartorzędzie zidentyfikowano strefy długotrwałego obniżania, wypełniane seriami zastoiskowymi różnego wieku (Izbica Kujawska, Łanięta) oraz osadami jeziornymi.

Długotrwała sedymentacja w jeziorach czwartorzędowych klimatu ciepłego (okresy MIS11 i MIS 9) oraz zimnego (MIS 10) w Łaniętach (profil Łanięta PIG-2) określa czas trwania tendencji do obniżenia tej części wysadu, wynikający zapewne z ługowania czapy wysadu, na okres około 80-100 tysięcy lat.

Obniżenia na południe od Wzniesień Izbickich i obszar Wzniesień Izbickich podlegały deformacjom glaciektonicznym w wielu epizodów glacialnych, które osiągnęły tego obszaru. Wskazują na to zarówno wyniki prac geologicznych jak też wyniki profilowania geofizycznego (ERT).

Znalezione miejsca i strefy występowania wód podziemnych wzbogaconych w substancje mineralne pochodzące ze struktury solnej Izbica Kujawska. Strefa ta przy północnym zakończeniu struktury solnej Izbica – Kłodawa – Ozorków. W Augustynowie stwierdzono tu laboratoryjnie występowanie wód mineralnych wzbogaconych w Na i Cl. Występują one tu w strefie kontaktu ze strukturą solną na odcinku ponad 1km.

Inne miejsca wzbogacenia w substancje mineralne pochodzące z wysadu solnego lub jego czapy stwierdzona na zachód od strefy struktury solnej Izbica Kujawska w Gaju Stolarskim i w Podhulance. Na obszarze wysadu Łanięta wody takie stwierdzono w wielu miejscach przy krawędziach wysadu: w Łaniętach, Budach Starych i Suchodębiu.

Badania wykazały występowanie zróżnicowanych stref o specyficznej budowie geologicznej. W czwartorzędzie odmienne cechy litologiczne a także strefy sedimentacji znaleziono przy strefach zmian w obrębie i na granicach struktur solnych. Mogą to być informacje potrzebne dla identyfikacji struktur geologicznych wysadów solnych jak też stref w ich obrębie. Wielokrotność podobnych środowisk sedimentacyjnych, odnawiających się po kolejnych transgresjach lądolodu wskazuje na stałą tendencje ruchów w dół lub w górę, w obrębie wysadu. Tańsze i łatwiej dostępne badania struktur przypowierzchniowych czwartorzędu powinny być pomocne dla rozeznaniu stref wglębnych struktur solnych.

Prace geologiczne wskazują na rozbieżności między obrazem budowy geologicznej opartym na archiwalnych profilach wierceń surowcowych i dokumentujących z nastawieniem na rozpoznanie struktur geologicznych czwartorzędu. Dla weryfikacji modelu budowy geologicznej kenozoiku takich miejsc i oparcie się przy formułowaniu wniosków dotyczących budowy geologicznej nadkładu wysadów, zwłaszcza zaś czwartorzędu, na profilach poszukiwawczych w celu dokumentowania surowców w pokrywie permomezozoicznej może prowadzić do błędnych wniosków i założeń.

## **11 Analiza struktur czwartorzędowych i ich korelacja ze współczesną aktywnością wysadów**

**Szczegółowy opis analizy stanowi raport z Zadania nr 10.2 wraz z załącznikami.**

Kompleks strukturalny kenozoiku pokrywa wysady solne Polski środkowej warstwą o zmiennej grubości i wykształceniu litologicznym. Ze względu na diametralnie odmienne warunki powstawania osadów, a zwłaszcza na szczególną dominującą kreatywną rolę lądolodów w czwartorzędzie na tym obszarze kompleksy osadów - czwartorzędowych oraz neogeńskich i paleogeńskich - trzeba traktować odrębnie. Lądolody oddziaływały dynamicznie zmieniając warunki hydrogeologiczne, a zwłaszcza sedymentacyjne przez raptowne zmiany warunków sedymentacji na obszarze oddziaływania, zmienność warunków hydrograficznych i hydrogeologicznych czy też nacisk dynamiczny i statyczny na obszary pokrywane i uwalniane od lodu. Celem tego podzadania jest analiza struktur na obszarach badawczych związanych z wysadami Łanięt, Izbicy Kujawskiej i Wapna, wybranymi jako obszary badawcze dla zadania Państwowej Służby Geologicznej „Monitoring geodynamiczny w zakresie interferometrii satelitarnej pasa wysadów solnych w Polsce oraz próba określenia ruchliwości soli w czwartorzędzie z wykorzystaniem tomografii elektrooporowej i technik modelowania 3D”.

Dotychczasowe opracowania regionalne przedstawiającej czwartorzęd obszaru wysadów na Szczegółowych mapach geologicznych Polski w skali 1:50.000 (m.in. Baraniecka, 1988, 1993, Roman 1999, 2011, Brzeziński 2009, 2015) w sposób generalny wskazują na różnice w budowie geologicznej między wysadami i ich otoczeniem a obszarami je otaczającymi. Charakter i skalę tej odrębności potwierdziły wykonane dla tego zadania państwowej służby geologicznej profile geoelektryczne ERT (G. Pacanowski i in., raport 9) dla obszarów wysadów Izbicy Kujawskiej, Łanięt, Wapna i innych obszarów, jak również sondowania geoelektryczne SGE wykonane dla obszarów badawczych.

Uchwycenie zmienności czwartorzędu nad wysadami solnymi i w strefie bezpośredniego oddziaływania wysadów była założeniem dla podjęcia i wykonania badań tomografii elektrooporowej ERT. Wykonano je wzdłuż profili długości od 800 m do 2 km zależnie od możliwości terenowych rozłożenia profili aparaturowych. Szczegółowe strefy i miejsca wybierano mając na uwadze wskazania w kierunku badania związku z wysadem i jego częściami oraz dominującymi lub charakterystycznymi elementami powierzchni terenu. Wzięto pod uwagę także morfologiczne zróżnicowanie powierzchni terenu, formy powierzchni i ich genezę.

Profile tomografii elektrooporowej ERT miały z założenia dostarczać informację o zmienności warunków w strefie miąższości do 100-130 m obejmującej czwartorzęd oraz strefę poniżej czwartorzędu obejmującą neogen oraz stropową część paleogenu i stosunkowo precyzyjnie określać tej zmiany miejsce. Jest to ważna cecha, którą można użyć do porównań np. z powierzchnią terenu.

Badania ERT przynoszą informacje dotyczące wąskich, niewielkich stref. Dlatego do umieszczenia ich śledzenia warunków oporności elektrycznej na całości obszaru użyto sondowań SGE. Metoda nie daje tak precyzyjnych informacji o charakterze oporności osadów. Pozwala za to na odczytanie warunków oporności elektrycznej w ujęciu bardziej syntetycznym. Przynosi porównanie stref badanych tomografią elektrooporową ERT i umożliwia odniesienie ich do całości obszaru badań i jego cech geologicznych. Funkcje reperów o litologii, genezie i wieku osadów spełniają osady uzyskane z wierceń pełnordzeniowych, sond mechanicznych oraz badania wieku osadów organicznych wybranych, szczególnych serii osadów.

Specyficznym poligonem dla badań współczesnej aktywności wysadów jest obszar po katastrofie jaką było zalanie kopalni soli kamiennej w Wapnie w dniu 5 sierpnia 1977 roku. Zniszczeniu uległy elementy czapy wysadu jako naturalna bariera przed kontaktem wód podziemnych ze zwierciadłem solnym. Powstały zarówno pustki po krasowieniu czapy solnej, jak również (np. otwór Wapno L2, przekrój E-E') strefy głębokiego wnikania osadów przepojonych wodą do wnętrza struktury solnej.

Na pozostałych obszarach badawczych występują przejawy współczesnej ruchliwości soli w postaci zasolenia wód podziemnych. Notuje się je na obszarze Izbicy Kujawskiej, gdzie znaleziono w północnej części struktury solnej strefę, w której dochodzi do wymywania halitu z wysadu. Halit w postaci mineralnej jest odprowadzany w kierunku północnym w rejon rzeki Zgłowiączki i miejscowości Zgłowiączka. Zgłowiączka była miejscem, w którym w średniowieczu wydobywano solankę w celu pozyskania soli. Nagromadzenie solanki w rejonie Zgłowiączki było spowodowane przemieszczaniem wód słonych od granicy struktury solonej Izbicy Kujawskiej na północ do Zgłowiączki oddalonej od granicy wysadu około 10 km.

Inkluzje i wrostki halitu nie są opisywane w obrębie czapy wysadu Izbicy Kujawskiej, wysadu Łanięta. Obecny stan wiedzy o ruchliwości wód i ługowania wysadów, którego efektem jest wzbogacanie wód podziemnych w substancje mineralne (głównie halit i siarczany) z wysadu i jego czapy należy uznać za początkowy.

### 11.1 Obszar Wapna – szczególny poligon badań i obserwacji skutków ruchliwości wysadu

Specyficznym poligonem dla badań współczesnej aktywności wysadów jest obszar po katastrofie jaką było zalanie kopalni soli kamiennej w Wapnie w dniu 5 sierpnia 1977 roku. Obszar badawczy Wapno obejmuje teren wysadu Wapno i obszar wokół niego. Osady wysadu i jego czapy były obiektem eksploatacji przemysłowej. Początkowo eksploatowano metodą odkrywkową gipsy odsłaniające się w strefie przypowierzchniowej w zachodniej części miejscowości Wapno, następnie wyrobisko porzucona a jego misa tzw. „gipsiak”, zapełniła się wodą. Od lat 20-tych XX wieku rozpoczęto eksploatację soli w kopalni głębinowej Wapno. Kopalnia w latach 50-tych została rozbudowana, zwiększono kilkakrotnie jej wydobywanie. Eksploatowanych i przygotowywanych do eksploatacji było 9 poziomów. Problemem stały się ograniczone wycieki wody, która dostawała się zwłaszcza do górnych poziomów kopalni ze skał nadkładu.

Katastrofalne zalanie wodami podziemnymi poziomu eksploatacyjnego trzeciego kopalni nastąpiło w dniu 5 sierpnia 1977 roku. Zachwiana została statyka górotworu. Próby ratowania kopalni przez wtłaczanie wód do szybu zakończyły się rozległym osiadaniem gruntu, który objął dużą część miejscowości Wapno w dniu 5 sierpnia 1977 roku. W kopalni zaprzestano działalności wydobywczej, a miejscowość Wapno stała się kilkakrotnie mniejsza jak w latach działania kopalni soli. Staw w miejscu „gipsiaka” spłynął. Bezpośrednim powodem katastrofy było powstanie połączeń hydraulicznych między wyrobiskami a warstwami wodonośnymi. By zapobiec powstawaniu zapadlisk po wymywaniu soli i niszczeniu konstrukcji kopalni zdecydowano się na sztuczne zalanie kopalni wykorzystując wpompowywanie wody z Jeziora Czeszewskiego. 22 października 1977 roku doszło do powstania dużego zapadliska w centralnej części miejscowości Wapno, zniszczeniu uległo 40 domów a rozmiary zapadliska zmusiły do ewakuacji około 1,400 ówczesnych mieszkańców Wapna.

Badania geologiczne w strefie wysadu Wapna (Rasała i in. 2010) stwierdzają m.in. występowanie wód podziemnych z podwyższoną zawartością chlorków i siarczków. Autorzy wskazują na dwie strefy, którymi odprowadzane są wody:

- strefę północną i północno wschodnią, gdzie notowano w otworach badawczych (otwory M7 i C2; w dokumentacji) zawartość halitu 72,5 g NaCl/l oraz zawartość siarczanów 3,726 g CaSO<sub>4</sub>/l o natężeniu przepływu wód podziemnych 345m<sup>3</sup>/dobę;

- strefę północno zachodnią wysadu, gdzie przyjęto średnią zawartość halitu 20g NaCl/l i podobną zawartość siarczanów jak w strefie północnej i północno wschodniej.



*Fot. 1. Wapno. Widok od strony tzw. „gipsiaka”. Widoczne obrywy przy zespole niewielkich zapadliskach widocznych wzdłuż krawędzi dawnego obniżenia po eksploatacji gipsów.*

Na obszarze po eksploatacji gipsu, gdzie w czasie działania kopalni funkcjonował zbiornik-staw, obecnie obserwowane są procesy osuwania gruntu. Przy wschodniej i południowo wschodniej krawędzi obniżenia po eksploatacji gipsów występują zespoły niewielkich zapadlisk. Obserwuje się je także w dnie tej części obniżenia, gdzie również występują zapadliska.



*Fot. 2. Nieużytkowany gospodarczo teren po eksploatacji gipsów. Zachodnia część obszaru poeksploatacyjnego. Sierpień 2017 rok.*

W południowo zachodniej części wyrobiska znaczne różnice wysokości gruntów wskazują na świeżą zapadliskową genezę tego zjawiska.



*Fot. 3. Niewielkie zapadlisko na wschód od ulicy Solnej w Wapnie. Sierpień 2016 rok.*

W zapadlisku, które powstało na wschód od ulicy Solnej widoczne były fragmenty zburzonego budynku. Obszar został po katastrofalnych osunięciu gruntów wyburzony i splantowany z wykorzystaniem elementów po zniszczonej zabudowie miejscowości.

## **11.2 Analiza struktur geologicznych (wyniki badań geofizycznych ERT i SGE oraz analiz grawimetrycznych)**

### **11.2.1 Obszar Izbica Kujawska**

Na północ od Wzniesień Izbickich przeprowadzono niemal równoległe do ich przebiegu przekrój ERT 9. Wykazuje on rozległą wysoko podniesioną strukturę (zespół struktur) o niskich oporach utworów badanych. W wodach czwartorzędowych w pobliżu granicy z osadami podłoże wykazuje przewodność elektryczną 5670  $\mu\text{S}$ . Badany skład mineralny wody wykazał znaczne ilości halitu w wodzie (3,84 g/l wody). Mniejsze zawartości halitu w wodzie podziemnej stwierdzono m.in. w innych miejscach badań (np. otwór Izbica Kujawska PIG-2), gdzie na głębokości 28,0-30,0 m czwartorzędowe wody podziemne mają zawartość siarczanów około 0,9 gCaSO<sub>4</sub>/litr wody przy przewodności elektrycznej 1701  $\mu\text{S}$ , a na głębokości 67,0-70,0 m w piętrze wodonośnym neogenu zawartość halitu około 1gNaCl/litr przy wartości elektrooporności 2874  $\mu\text{S}$ .

W rejonie, gdzie stwierdzono występowanie wód wzbogaconych w halit przeprowadzono przekrój ERT 9. Odcinek przekroju długości co najmniej 800 m ma stwierdzone cechy zwiększonej elektrooporności w wyniku zasolenia wód podziemnych. Wskazują na to wyniki pomiarów przewodności elektrycznej w sondach mechanicznych wykonanych wzdłuż przekroju. W zachodniej części przekroju w wierceniach płytkich nierzedzeniowych uzyskano podwyższone wyniki przewodności na głębokości około 35-40 m od powierzchni, rzędu 1210 – 1644  $\mu\text{S}$  (sondy Iz24 i Iz25). W części wschodniej na głębokości około 40 m przewodność elektryczna wzrasta do 4010 i 4460  $\mu\text{S}$  (Sondy Iz27 i Iz26). Cały przekrój pokazuje obecność stref o niskich opornościach występujących w utworach piaszczystych i piaszczysto – ilastych poprzedzielanych wąskimi strefami o wyższych opornościach. W strefie tej stwierdzono największą oporność elektryczną wód w strefie przypowierzchniowej wysadu badanej do głębokości 30, a maksymalnie do 40 m od powierzchni terenu, wynikającą z zasolenia wód, zapewne warstwami nieprzepuszczalnymi, które separują poszczególne części górotworu wzbogacone w solankę. Nie prowadzono bezpośrednich badań składu mineralnego wód podziemnych tej części przekroju. Charakterystyczne dla obszaru wysadów i obserwowane także w innych miejscach jest



mieszanie się wód słodkich obecnych przy powierzchni gruntu z głębiej zalegającymi wodami wzbogaconymi w halit czy też siarczany. Wskazują na to wyniki przewodności elektrycznej tym wyższe im głębiej miało miejsce badanie.

Przekrój Izbica Kujawska ERT 5 leży na peryferiach struktury solnej Izbica, na południe od Wzniesień Izbickich. Od południowego zachodu na wysokości 30-80 m n.p.m. występuje strefa niskiej oporności geoelektrycznej występująca w postaci bloków rozdzielonych. Strefa ta wykazuje niskie oporności geoelektryczne. Należy wiązać je z osadami ilastymi i pylastymi miocenu środkowego i górnego (formacja poznańska) których strop stwierdza się na podobnych wysokościach na profilu (np. wiercenie Izbica Kujawska S16, strop na wysokości 87 m n.p.m.). W odcinku przekroju ERT 5 między 380 a 430 m na wysokościach od 40 m p.p.m. do powyżej 30 m n.p.m. utwory skalne charakteryzują stosunkowo niższe oporności. Strefa ta występuje przy krawędzi struktury solnej Izbica Kujawska i może mieć związek z podsiąkami wód o zwiększonej mineralizacji pochodzących z wysadu lub jego czapy gipsowej. Strefie o obniżonych oporach towarzyszą od strony struktury solnej utwory o jednolitych, wyższych oporach. Ten zespół osadów jest prawdopodobnie częścią struktury czwartorzędowej, która w profilach wierceń surowcowych (dokumentujących położenie osadów solnych i struktury wysadu Izbicy) występuje jako głęboko wycięte w osadach neogenu a także paleogenu struktura czwartorzędowa. Tego typu struktury zbudowane z piasków drobnoziarnistych oraz lokalnie z glin zwałowych i mułków były opisywane jako struktury o założeniach tektonicznych (Braniecka 1975, 1993, Brzeziński 2013). Badaniami przewodności elektrycznej w wierceniach do 30 m w tym obszarze nie zidentyfikowano stref o podwyższonej zawartości substancji mineralnych.

Szczególnie eksponowanymi formami powierzchni na obszarze struktury solnej Izbica Kujawska są Wzniesienia Izbickie. Tworzą zespół pagórków o wysokościach względnych przekraczających 40 m rozciągniętych w kierunkach WNW-ESE na odcinku długości ponad 5 km. Wzniesienia Izbickie od strony zachodniej występują nad strukturą solną Izbicy, gdy od strony wschodniej sięgają poza obszar struktury.

Przekrój Izbica Kujawska ERT 4 wkracza na obszar struktury solnej od zachodu. W początkowym odcinku po 400 metr przekroju występuje na wysokości bezwzględnej od 10 m n.p.m. do 60-90 m n.p.m. Wysokość stropu a także charakter górnej części tej struktury odpowiada sposobowi deformacji glacitektonicznych, które były notowane w osadach formacji poznańskiej (miocen środkowy i górny) pod Wzniesieniami Izbickimi i wokół nich. Dolna część struktury o obniżonych oporach odpowiada osadom miocenu dolnego

i środkowego. Charakterystyczne dla tej strefy jest niższe występowanie stropu osadów niskooporowych (50-60 m n.p.m.) w obrębie wysadu jak na zachód od niego (około 90 m n.p.m.) i strefa graniczna tej sytuacji około 170 metra od początku przekroju w strefie krawędzi struktury solnej Izbica Kujawska. Obniżenie nad strefą krawędziową struktury solnej Izbicy Kujawskiej wypełniają osady czwartorzędu, głównie zapewne zlodowaceń południowopolskich.

Badania składu chemicznego (wiercenie Izbica Kujawska PIG-3) i przewodności elektrycznej (wiercenia płytkie Izbica Kujawska S13, S14) wód podziemnych nie wykazują zwiększonej mineralizacji wód w górnej części profilu. Wyniki dokumentują jedynie skład mineralny górnej części struktury niskooporowej. Brak badań składu chemicznego dolnej części struktury niskooporowej uniemożliwia sformułowanie wniosków co do ew. obecności wód zmineralizowanych pochodzących z rozmywania struktury wysadu w tej części struktury. Choć takiej ewentualności na obecnym stanie badań nie można wykluczyć.

Na obszarze struktury solnej Izbica Kujawska obniżenie w podłożu występuje w odcinku o metrażu 420 m do 800 m. Obejmuje ono osady neogenu i paleogenu. Największe przegłębienie osiąga w zachodniej części, a wypłyca się ku wschodowi. Powyżej opisywanego obniżenia, w jego środkowej części występuje drugie, które wypełniają osady czwartorzędu.

Przekrój Izbica Kujawska ERT 2 o kierunku SSW – NNE jako przedłużenie przekroju ERT 4 rozpoczynającym się na strukturze solnej na kulminacji jednego ze Wzniesień Izbickich i biegnącego na południe w rejon obniżeń poza wzniesienia. Na Wzniesieniach Izbickich po ich część dolną (do około 400 metra przekroju) występują charakterystyczne obniżenia z utworami o niskiej oporności geoelektrycznej wypełnione osadami neogenu i paleogenu. Podobnie jak w przekroju Izbica Kujawska ERT 4 największe przegłębienia występują w południowo zachodniej brzeżnej części obydwu struktur wydzielonych tu na obszarze Wzniesień. W tej strefie zbadano wody w profilu Izbica Kujawska PIG-2. Zarówno w poziomie czwartorzędowym (2 pomiary składu mineralnego wody) jak też w poziomie paleogenu (1 pomiar) wykazują one podwyższoną zawartość substancji mineralnych. W przypadku poziomu wodonośnego czwartorzędowego są to podwyższone ilości wapnia (Ca do 260 mg/l), sodu (Na do 103 mg/l) i siarczanów (SO<sub>4</sub> do 680 mg/l), w poziomie wodonośnym paleogenu podwyższone ilości sodu (Na 382 mg/l), także wapnia (131 mg/l) oraz chloru (Cl 620 mg/l). Dominacja siarczanów i wapnia w poziomie czwartorzędowym

przy zdecydowanie większej ilości sodu i chloru w poziomie paleogenu prawdopodobnie wskazuje na inne źródła zasilania w te substancje obydwu poziomów wodonośnych.

### 11.2.2 Obszar Łanięta

Wykonano 6 profili tomografii elektrooporowej ERT na obszarze badawczym Łanięta.

Na profilu Łanięta ERT 1 usytuowane zostało wiercenie Łanięta PIG-2 z dwoma seriami organicznymi i nieprzewierconymi do głębokości 100 m utworami czwartorzędu. Wiercenie dokumentuje osady jeziorne w dwóch okresach ciepłych czwartorzędu korelowanych (Granoszewski 2019) ze schyłkowym okresem ciepłym interglacjału mazowieckiego (MIS-11c) i z kolejnym okresem interglacialnym nazywanym okresem zbójno (MIS-9). Wody poziome towarzyszące osadom organicznym w tym profilu wykazują znaczną zawartość azotanów ( $\text{NO}_3$ ) powstającą z rozkładu substancji organicznej z serii jeziornej. Osady zlodowaceń południowopolskich oraz wstępujące powyżej nich osady jeziorne wypełniają obniżenie widoczne w postaci warstw o niższej oporności między 600 a 850 metrem profilu 1. Tendencję do obniżania tego fragmentu profilu potwierdza występowanie dwóch jeziornych okresów ciepłych czwartorzędu oddalonych od siebie wiekowo o 80-100 tysięcy lat. Powyżej serii jeziornych profile wierceń (Łanięta PIG-2, Łanięta S6 i S5) oraz profil tomografii elektrooporowej pokazują brak zaburzeń i poziome ułożenie poszczególnych serii osadowych. Brak także podstaw do przeciągania osadów jeziornych daleko poza profil Łanięta PIG-2. W naturalnym kierunku niewielkiego obniżania terenu ku północy taką możliwość zamyka profil Łanięta 7 /Ł-7/, w którym wysoko zalegają osady miocenu dolnego i środkowego oraz nie stwierdzono osadów jeziornych w czwartorzędzie.

W północnej części profilu powyżej 900 metra jego długości występuje strefa o niskich opornościach. Towarzyszy jej niewielka mineralizacja wód podziemnych wywołująca zwiększoną przewodność elektryczną piętra czwartorzędowego notowana pod glinami zwałowymi zlodowacenia warty (1066 $\mu\text{S}$ ; zasolenie 0,5 mg/l – pomiar terenowy). Można ją łączyć z niewielkim przesiąkaniem wód zmineralizowanych z czapy solnej.

Przekrój Łanięta ERT 1 poprowadzono przez południową część wysadu Łanięta. Stabilne warunki oporności geoelektrycznej osadów dolnej części przekroju potwierdzają mapy oporności geoelektrycznej obszaru badawczego Łanięta na głębokości 63, 125 i 250 m. W okolicach otwory Łanięta PIG-2 warstwy niskooporowe związane są z mineralizacją wód wywołaną procesami rozkładu substancji organicznej zawartej w gytiach i mułkach

humusowych kopalnego jeziora, które zaznacza się zmniejszeniem oporności geoelektrycznej między 650 a 850 m profilu i notowane jest zwiększoną przewodnością wód podziemnych w jego otoczeniu. Na północ od profilu Łanięta 7 notowana jest warstwa niskooporowa na podobnej wysokości jak osady kopalnego zbiornika jeziornego opisane powyżej. Podwyższona zawartość substancji mineralnych (sonda S7, na wysokości około 115 m n.p.m. – 1066  $\mu\text{S}$ ) i brak osadów organicznych może świadczyć o innym źródle mineralizacji wód podziemnych jak serie organiczne czwartorzędu.

Przekrój wzdłuż profilu ERT Łanięta 4 (załącznik 10.2.11 od Raportu 10.2) przez zapadlisko Łanięt z północy na południe. Granica wysadu Łanięta na podstawie danych grawimetrycznych (Musiatewicz, raport 10.4) przebiega około 500 m od początku profilu. Na głębokości 25 występuje w tej strefie ugięcie osadów w stropowej części przekroju. Ugięcie na zewnątrz od wysadu widoczne w postaci obniżenia kolejno od dołu warstw niskooporowych i wyskooporowych występuje od wysokości 80-110 m n.p.m. do powierzchni.

Profil Łanięta ERT 3 rozpoczyna się w miejscowości Łanięta i ciągnie po północno wschodnią granicę wysadu (Musiatewicz, raport 10.4). Obraz geoelektryczny wskazuje na znaczne różnice oporności elektrycznej osadów przy niespokojnym ich ułożeniu sięgającym niemal do powierzchni terenu. Między 200 m a 520 metrem profilu w czwartorzędzie widoczne jest uginanie i obniżanie kolejnych warstw o zmiennej oporności geoelektrycznej. Także w profilach wierceń archiwalnych (Łanięta 6/Ł-6/, Łanięta nr banku HYDRO 4810059) zanotowano znaczną zmienność litologiczną. Zmienność litologiczną i genetyczną w stropowej części czwartorzędu potwierdzają wiercenia (Łanięta S1, S2, S3 i S4) wykonane dla niniejszego zadania PSG (raport 17). Notuje się także w osadach międzyglinowych pojedyncze miejsca o zwiększonej przewodności elektrycznej (Łanięta S2: 1030  $\mu\text{S}$  na głębokości 22 m).

Profil Łanięta ERT 4 przebiega przez najwyższe części obszaru wysadu Łanięta. Jest to jednocześnie obszar zapadliska subrozyjnego Łanięt (Kasiński 2004). W północnej części profilu widoczne jest obniżenie obejmujące osady neogenu i starszej części czwartorzędu (osady zlodowaceń południowopolskich) leżące między 140 m a 650 m rozciągłości profilu. Na odcinku 370-450 m od początku profilu ERT 4 występuje strefa pionowego zalegania utworów o niskich opornościach. Występuje ona w strefie krawędzi wysadu Łanięta. Rozległa warstwa niskooporowa jest związana z występowaniem w tej części powierzchni 2D przekroju osadów ilastych miocenu (Łanięta PIG-3). Na odcinku profilu między

odległościami 550-1000 m również warstwę niskooporową tworzą osady ilaste miocenu i oligocenu, prawdopodobnie zdeformowane i poprzerywane uskokami. Na tym odcinku a także dalej do 1400 m przekroju mogą występować lokalne podsiąkania wód piętra paleogenu wzbogaconych w substancje mineralne z czapy solnej lub wysadu. Na odcinku 1450-1700 m profilu ERT w czwartorzędzie notowane jest obniżenie. Wypełniają je osady ilasto-pylaste zastoisk i gliny zwałowe o niskich opornościach (Łanięta PIG-4) wskazujące na względne obniżanie tej części obszaru wysadu Łanięt w okresie zlodowaceń południowopolskich.

Profil Łanięta ERT 5 charakteryzuje niewyraźne ugięcie w górnej części utworów czwartorzędowych między 160 m a 280 m profilu. Pionowo ułożona struktura o niskich wartościach oporności elektrycznej (poniżej 30  $\Omega$ m) o kształcie diapiru występuje w miejscu słabo widocznej w terenie kulminacji obszaru wysadu solnego Łanięta.

W przekroju Łanięta ERT 6 występują skośne powierzchnie oddzielające utwory o różnej oporności geoelektrycznej. Takie powierzchnie można zidentyfikować pomiędzy 100 a 600 m długości przekroju. Z ogólnej budowy geologicznej można wysnuć wniosek, że osady objęte strukturami to osady miocenu i czwartorzędu. Rozległe owalne struktury niskooporowe mogą obrazować osady ilaste miocenu, które w południowej części wysadu solnego Łanięt podlegały deformacjom glacitektonicznymi.

Przekrój Łanięta ERT 2 (wzdłuż profilu Łanięta ERT 2) przy wschodniej granicy wysadu obejmuje znaczna część strefy przywysadowej. Granica wysadu solnego Łanięta przebiega około 400 m od początku profilu ERT. Na zewnątrz obszaru wysadu ugięcie warstw wskazujące na zmianę warunków oporności elektrycznej osadu. Na wschód od strefy wysadowej od 800 m od początku profilu występują oporności elektryczne osadów o niewielkiej zmienności w profilu pionowym.

### **11.2.3 Obszar Wapno**

Przekrój wzdłuż profilu ERT Wapno 1 (załącznik 10.2.10 do Raportu nr 10.2) biegnie na północny zachód od wysadu Wapno, po północnej stronie obniżenia, którym biegnie kanał Wapno – Laskowica. Pomiedzy 500 – 770 m długości profilu występują warstwy niskooporowe prawdopodobnie związane z mineralizacją wód wglębnych piętra oligoceńsko-miocenkiego przy strukturze wysadu, w tym na bezpośrednim kontakcie z wysadem (metraż:

700-770 m od początku profilu). Dość czytelny jest układ osadów z warstwą osadów niskooporowych prawdopodobnie formacji poznańskiej miocenu górnego.

Przekrój wzdłuż profilu ERT Wapno 2 na zachód od wysadu Wapno przecina obniżenie, którym prowadzi kanał Wapno – Laskowica i biegnie przez wysoczyznę na zachód od wysadu. Budowa obniżenia i wysoczyzny jest podobna. Występowanie warstwy niskooporowej (na wysokości 35-50 m n.p.m.). Wyraźne „ciągnięcie” osadów niskooporowych na krawędziach formy moreny martwego lodu (interpretacja: Chachaj, 2005) zapewne świadczy o glacitektonicznej genezie zdeformowanych osadów stropu czwartorzędu.

Przekrój geologiczny wzdłuż profilu ERT Wapno 3 (załącznik 10.3.12 do Raportu nr 10.3) rozpoczyna się na zachód od wysadu i przebiega wkraczając na strukturę wysadową w strefie deformowanej po katastrofalnym zalaniu kopalni soli w Wapnie w 1977 roku. Między 350 a 550(600) m profilu zarysowuje się strefa o wyraźnie pionowej zmienności oporności elektrycznej. Leży w strefie między zachodnimi zboczami obniżenia a strukturą wysadu określoną na podstawie danych grawimetrycznych (Musiatewicz, 2019, raport 10.4), okalająca wysad od strony zachodniej. Warstwy niskooporowe w obrębie wysadu oraz w strefie okalającej są strefą zmineralizowaną. Na obszarze wysadu Wapna w strefie od powierzchni do 50 m n.p.m. występuje nieregularna zmienność warunków elektrooporności. Może mieć związek z inną charakterystyką oporności osadów zatłaczanych by wypełnić pustki po katastrofie w kopalni.

Przekrój wzdłuż profilu ERT Wapno 4 biegnie od wysadu na północny wschód rozpoczynając się na obszarze deformacji powstałych w wyniku ruchów gruntu po katastrofalnym zalaniu kopalni soli. Struktura wysadu kończy się około 250-300 m od początku profilu (na podstawie danych grawimetrycznych; Raport nr 10.4). Ten fragment profilu ma warstwy niskooporowe w układzie pionowym, co może być związane ze strukturą wysadu. Część górna podlegała deformacjom w wyniku katastrofy w kopalni Wapno, która tu sięgnęła aż po granicę wysadu. Poza wysadem zmienność warunków oporności przypomina zmienność na północny zachód od wysadu (przekrój Wapno 1).

#### **11.2.4 Obszar Łęczycza (z okolicami Ozorkowa)**

Profil tomografii elektrooporowej ERT w Błoniu koło Łęczyczy (Załącznik 10.2.12 do Raportu nr 10.2) i w okolicach Ozorkowa (profile Ozorków 1 – 3) wykazują obecność wód zasolonych płytko pod powierzchnia terenu. W Błoniu, gdzie badano skład mineralny,

występują chlorki. Zyskano zawartość Cl około 2,1 g/l wody przy oporności elektrycznej 4580 g/l wody. W Ozorkowie pełny skład halitu wynosił 1,7 g/litr przy przewodności elektrycznej 3956  $\mu$ S.

## **12 Analiza struktur czwartorzędowych dla określenia struktur tektonicznych (ciągłych i nieciągłych) związanych z oddziaływaniem wysadu**

Jednym z problemów badawczych zadania państwowej służby geologicznej „Monitoring geodynamiczny w zakresie interferometrii satelitarnej pasa wysadów solnych w Polsce oraz próba określenia ruchliwości soli w czwartorzędzie z wykorzystaniem tomografii elektrooporowej i technik modelowania 3D” był problem uchwycenia ruchliwości soli uwalnianych z wysadów solnych i ich czapy. Ruchliwość soli rozumiana jako substancje, ale także przemieszczane fragmenty skał wysadu, uwalniane w wyniku oddziaływania zdarzeń typowych dla czwartorzędu Polski środkowej, jak nacisk lądolodu, deformacje osadów podłoża lądolodu, zmiany siły nacisku lądolodu na podłoże i ich wpływ na uruchomienie struktur. Współwystępowały one tu z procesami uznawanymi za neotektoniczne w czasie czwartorzędu.

### **Pełen opis analiz stanowi raport z Zadania nr 10.3 wraz z załącznikami.**

Do przedstawienia tego zadania wykorzystano wyniki prac geofizycznych: tomografii elektrooporowej ERT i sondowań geoelektrycznych SGE z wynikami przedstawionymi na całym obszarze badawczym (Pacanowski i inni, 2016, raport 9) i analiz archiwalnych badań grawimetrycznych (Raport nr 10.4) o różnej szczegółowości dla poszczególnych obszarów badawczych. Sieć sondowań SGE i analizy grawimetryczne wykonano dla obszarów badawczych Izbica Kujawska, Łanięta, Wapno i Łęczycza.

Należy podkreślić, że uzyskane tą drogą wyniki badań charakteryzuje różna szczegółowość. Zwłaszcza w przypadku badań geoelektrycznych (Pacanowski i in., 2016, Raport nr 9) należy tą okoliczność uwzględniać przy analizach. W szczególności dotyczy to porównywania wyników i szukania podobnych wąskich stref o wyraźnie różnej oporności elektrycznej z profili ERT na mapach oporności odczytanych z sondowań SGE. Tym niemniej przyjęta przez wykonawców metoda przedstawienia zmienności warunków elektrooporowości na mapach oporności zależnie od głębokości od powierzchni terenu (na głębokości 4 m, 16 m, 32 m, 64 m, 125 m i 250 m) wnosi do analiz przestrzennych dużo ważnych informacji.

W przypadku map grawimetrycznych (Raport nr 10.4) jednoznacznie obserwowana jest prawidłowość, że im większa ilość pomiarów tym łatwiej zgrywają się obrazy z danymi geologicznymi. Przykładem tej prawidłowości jest obszar badawczy Wapno, gdzie sieć pomiarów mikrogravimetrycznych pozwoliła na szczegółowe wytyczenie krawędzi w obrębie górotworu, co pozwoliło precyzyjniej określić sposób wykształcenia i charakter zmienności osadów kenozoiku w obrębie nadkładu wysadu.

## 12.1 Izbica Kujawska

Czapa wysadu występuje na różnej wysokości. W północnej części od 26 m n.p.m. w Izbicy Kujawskiej PIG-1 i 93,1 m p.p.m. w Augustynowie 1 do 123,6 m p.p.m. w Izbicy Kujawskiej 37. W części południowej znana jest w Podtymieniu K-69 na wysokości 303,5 m p.p.m. oraz w otworze Izbica Kujawska 70, gdzie występuje poniżej 489,5 m p.p.m. Wysokość wysadu najpłycej stwierdzono w Augustynowie (220,7 m p.p.m.) i w Izbicy Kujawskiej K37 (244,5 m p.p.m.).

Pomiary przewodności elektrycznej wykonano dla ponad 50 miejsc, przy czym 22 pomiary wykonano z wód na powierzchni terenu. Miejsca pomiarów znajdowały się na wysadzie Izbicy Kujawskiej, jej przedłużeniu ku północy, a także na strukturze solnej Izbica – Kłodawa – Ozorków oraz w niecce przywysadowej po jej zachodniej stronie.

Przewodność elektryczna na obszarze wysadu Izbica Kujawska w zakresie wartości niskich. Jedynie w strefie od Zagrodnicy (punkt IZ09) na południe od Wzniesień Izbicy Kujawskiej oraz na północ od Wzniesień (punkt IZ06) wartości przewodności elektrycznej są podwyższone. Na północ od wysadu Izbicy Kujawskiej Zgłowiączkę ciągnie się pas, szerokości do 1,5 km, w którym występuje podwyższona wysoka i bardzo wysoka przewodność elektryczna i wynoszą od 2088  $\mu\text{S}$  (punkt IZ14) do 7080  $\mu\text{S}$  (punkt IZ17). Wysoka przewodność elektryczna notowana jest w wierceniach Izbica Kujawska PIG-1 i w sondach mechanicznych wykonanych dla niniejszego opracowania (sondy S24, S25, S26, S27). Południowa część strefy zasolenia wód jest udokumentowana wysoką opornością na głębokościach 63, 125 i 250 m.

Na południe od wysadu Izbica Kujawska na obszarze struktury solnej Izbica – Kłodawa - Ozorków w strefie badań przewodność elektryczna (czyli zasolenie wód) jest niska.



Na zachód od wysadu i struktury solnej obserwuje się podwyższoną przewodność elektryczną, stwierdzaną punktowo. W okolicach Pohulanki podwyższone wielkości notuje się w wierceniu Izbica Kujawska PIG03 i w sondzie mechanicznej S12. Podwyższona przewodność elektryczna na powierzchni notowana była na północ od Gaju Stolarskiego (punkty IZ08, IZ07, IZB\_W09).

Strefa pod Wzniesieniami Izbicy Kujawskiej ma niskie zasolenie wód. Jest pośrednio notowane także w profilach ERT i mapach przewodności elektrycznej, na których strefa wzniesień przerywa ciągłość „struktur geologicznych” obserwowaną na północ i południe od niej.

Strefa na zachód od wysadu to niecka przywysadowa. Podwyższone zasolenie wiąże się ze strefami dyslokacji po obydwu stronach niecki. Podwyższone wartości przewodności elektrycznej notuje się tu od strony wysadu i struktury solnej oraz od strony niecki mogileńsko-lódzkiej.

Do obszaru oddziaływania wysadu Izbicy włączono strefę na północ od niej. W pasie szerokości ponad 2 km rozciągającym się na północ od wysadu ponad 8 km i sięgającym po miejscowość Zgłowiączka nad rzeką o tej samej nazwie, występują podsiąkające wody podziemne zasolone. Stwierdzono je w Zdrojówce (wartość 2088  $\mu\text{S}$ ) ok. 1,5 km na północ od wysadu Izbicy Kujawskiej, w Sarnowie (1512  $\mu\text{S}$ ) 2,5 km od wysadu oraz w kilku miejscach w dolinie Zgłowiączki, gdzie w Janiszewie odnotowano najwyższy pomiar przewodności elektrycznej w tej dolinie: 7080  $\mu\text{S}$ .

## 12.2 Łanięta

Strop czapy wysadu leży na wysokości 37 m n.p.m. do 22 m p.p.m. w części południowo wschodniej oraz 66 m p.p.m. do 94 m p.p.m. w zapadlisku leżącym w północno zachodniej części wysadu.

Pomiary konduktometrem wykonano na obszarze wysadu Łanięta oraz wokół niego, łącznie ponad 30 pomiarów w tym 9 pomiarów na powierzchni terenu.

Zaznacza się wyraźna różnica w wartościach przewodności elektrycznej. Jest związana bezpośrednio z dwoma częściami: wysadu południowo wschodnią i północno zachodnią, które rozdziela połoga, ale dobrze zarysowana w morfologii krawędź. W części północno zachodniej na powierzchni i w sondach mechanicznych notuje się niską przewodność

elektryczną (niskie zasolenie wód). Natomiast w części południowo wschodniej zasolenie wód jest podwyższone (np. punkt La 01 – 1128  $\mu\text{S}$  , czy sonda S5 na głębokości 26 m – 1020  $\mu\text{S}$ ). W tej strefie, w obniżeniu podłoża leżą osady kopalne jeziora z okresu MIS-9 – MIS 11, którego czas funkcjonowania należy określać na około 100 lat.

Podwyższone zasolenie notuje się na obrzeżach wysadu od strony północnej na powierzchni (La04-1650  $\mu\text{S}$ ) i w sondach mechanicznych (S10: na głębokości 28 m - 1068  $\mu\text{S}$ ) i na powierzchni od strony zachodniej (La08 - 1346  $\mu\text{S}$ ). Jednak najwyższe zasolenie zanotowano na powierzchni terenu. W środkowej części wysadu w pobliżu krawędzi oddzielającej obydwie części wysadu punkcie La06 i wyniosło ono 2663  $\mu\text{S}$ . Miejsce leży w północnej części strefy dyslokacyjnej, która to strefa funkcjonowała intensywnie w paleogenie i neogenie, oddzielając zapadlisko Izbicy (Kasiński 2004) od części południowo wschodniej nie poddanej tak intensywnym procesom ługowania soli, anhydrytów i gipsów z wysadu i jego czapy.

Podwyższone zasolenie przy krawędziach wysadu oraz w strefie dyslokacji w obrębie wysadu zapewne ma związek z aktywnością wysadu.

### 12.3 Wapno

Wykonano 10 pomiarów przewodności elektrycznej z wód w miejscach podsiąkania wód podziemnych (3 pomiary) z małych stawów (2 pomiary) i z niewielkich cieków (3 pomiary). Pomiary koncentrowały się wokół wysadu Wapno. Jedyne 1 punkt pomiarowy był na obszarze wysadu (WA06).

W przypadku wysadu Wapno wokół obserwuje się lekko podwyższoną przewodność elektryczną wynikającą z niewielkiego nasycenia mineralnego pochodzącego najprawdopodobniej z rozmywania czapy wysadu. Bardzo wysoką przewodność elektryczną stwierdzono w rejonie niewielkiego zbiornika w SE części dawnego „gipsiaka” (WA06 – przewodność 7954  $\mu\text{S}$ ), stawu po eksploatacji gipsu, obecnie wyschniętego i zasypanego. Może mieć związek ze szczególnymi właściwościami chemizmu miejsca ze względu na ingerencje człowieka przez eksploatację czapy wysadu oraz rekultywację po katastrofie w kopalni Wapno i jej późniejsze skutki. Natomiast wysoką przewodność notowaną na północy zachód od wysadu w kierunku na Stołęzyn (WA04 - 3338  $\mu\text{S}$ ) należy wiązać z rozmywaniem północnej krawędzi wysadu.

Wysad Wapna wpływa na zasolenie wód gruntowych wokół niego. Dla ew. wniosków do monitoringu mogą mieć znaczenie wysokie wartości zasolenia przy zachodniej krawędzi wysadu. Obszar od strony zachodniej i północno zachodniej jest słabo zbadany, brak też miejsc, w których można dokonać pomiarów przewodności (strugi i rowy najczęściej suche).

#### **12.4 Pozostałe obszary badań i analiz**

W okolicy Pełczyc i Solcy Wielkiej w dolinie rzeki Słonki na przedłużeniu ku południowi struktury solnej Izbica Kujawska-Kłodawa- Ozorków leży obszar Natura 2000 o nazwie Słone Łąki w Pełczycach. Obszar jest objęty systemem ochrony Natura 2000 ze względu na wystąpienia zespołów roślinnych słonolubnych.. W miejscowości Pełczyska pobrano do analiz składu chemicznego przesączające się na powierzchnię terenu wody podziemne. Próbka ta (oznaczona OZO W001) zawierała 1,7 g NaCl/l i 0,31 gCaSO<sub>4</sub>/l przy pomiarze przewodności elektrycznej wody 3856  $\mu$ S. Wykazała obecność wód z podwyższoną zawartością halitu oraz siarczanów. Analizy grawimetryczne wykazały (Raport z zadania 10.4), że okolicach Pełczysk mają grawimetryczne cechy łączące je ze strukturą solną Izbica Kujawska – Kłodawa – Ozorków.

W okolicach Pełczysk prowadzono analizy terenowe, których efektem było m.in. wykonanie 21 pomiarów przewodności elektrycznej wód przesączających się w dolinie i licznych podmokłych obniżeniach. Wśród nich 13 pomiarów wskazało na podwyższoną przewodność elektryczną w wyniku rozpuszczenia w wodzie substancji mineralnych. Najwyższą wartość przewodności (9920  $\mu$ S) uzyskano z wody podziemnej wypływającej ze źródła położonego w miejscowości Kolonia Wróblew, około 2 m powyżej dna doliny Słonki, na wschód od doliny. Obszar występowania wód słonych należy do obszarów Natura 2000 i nosi nazwę Słone Łąki w Pełczyskach. Jest objęty dyrektywą siedliskową jako obszar ochrony siedlisk roślinności słonolubnej i Obszar należy do gminy Ozorków w powiecie zgierskim województwa łódzkiego.

W okolicach Błonia na północ od Łęczycy, w obniżeniu, którym obecnie płynie Bzura wykonano 3 pomiary przewodności elektrycznej, przy czym w dwóch miejscach, dla weryfikacji powtarzalności wyników, wykonano je rok po roku. Pomiary potwierdziły występowanie niewielkiego zasolenia wód na obszarze łąk doliny Bzury. Najwyższą stwierdzoną jego wartość w punkcie BLO2 zanotowano jako 3836  $\mu$ S. W 2018 roku wykonano badanie składu mineralnego wód przesiąkających w dolinie Bzury w Błoniu pod Łęczycą. Wynik badania próbki (próbka nr 1010/18/15). Woda zawierała 3,1 g anionu Cl na

litr (Sztuczyńska i in., 2028). W okolicach Błonia pod Łęczycą w dolinie Bzury funkcjonował w latach 1977-2013 rezerwat przyrody florystyczny ze względu na występowanie roślinności słonolubnej. Ze względu na zanik głównych zespołów roślinności słonolubnej rezerwat został zlikwidowany. Wykonany w tym obszarze profil tomografii elektrooporowej (profil ERT-8 dla obszaru badawczego Łęczycy, Pacanowski i in., 2016, raport z zadania 9) wykazał niskie oporności wód gruntowych bezpośrednio pod powierzchnią gruntu lub na małej głębokości, co potwierdza, że jest to obszar występowania wód zasolonych w tej części doliny Bzury. Profil ERT-8 prawdopodobnie wskazuje również na strefę, z której wody zasolone pochodzą: analizowany w zachodniej części przekroju, gdzie wskazuje na występowania na głębokości ponad 70 m utworów o niskiej oporności w strefie krawędziowej. Badania wykazały obecność podwyższonej zawartości halitu w wodzie przesiąkającej na powierzchnię terenu. Obszar leży na terenie gminy Łęczycy w powiecie łęczyckim województwa łódzkiego.

## **12.5 Analiza struktur tektonicznych na obszarach badawczych**

### **12.5.1 Wysad Łanięta**

Wysad solny Łanięta jest pniem solnym o wyrównanej powierzchni zwierciadła solnego, które leży na głębokości około 250 m (Werner 1961, Orska, Werner 1974). Jest częścią grzebienia solnego Brześć Kujawski – Wojszyce (Dadlez, Marek 1974). Usytuowany jest w segmencie kujawskim antyklinorium śródpolskiego (Żelaźniewicz i in., 2011).

Upady warstw mierzone dla wysadu i jego czapy do głębokości 300 m wskazują (Tarka, 1992) na stosunkowo umiarkowane upady rzędu 60°, największe w części NW (71°) malejące ku północnemu wschodowi i południowemu zachodowi. Według Tarki (1992) w wysadzie Łanięta znajduje się antyklina soli starszej o przebiegu osi NW-SE, na której to soli warstwy bardziej połogie. Zwraca uwagę na niezgodność tektoniki wewnętrznej i kształtu wysadu.

Na powierzchni podkenozoicznej towarzyszą osadom wysadu Łanięt osady jury górnej. Nad wysadem Łanięt niemal połowę jego obszaru zajmuje obniżenie wypełnione osadami paleogenu i neogenu. Występujące tu osady środowisk lądowych i morskich paleogenu leżą w obniżeniu na wysokości około 100 – 50 m p.p.m., czyli ponad 150 m niżej od osadów podkenozoicznych otoczenia wysadu oraz pozostałej części struktury wysadu

zbudowanej z osadów czapy ilasto-gipsowej. Głęboko usytuowane osady pochodzą z paleocenu (Grabowska, 1974) i eocenu górnego (Odrzywolska-Bieńkowska, Pożaryska 1984). Nad nimi występują osady mioceńskie i prawdopodobnie także oligoceńskie. Powstały one w rezultacie zapełniania zapadliska subrozyjnego (Kasiński 2004). Jest to główny czas zapełniania zapadliska. Świadczą o tym także zwiększone miąższości węgla brunatnego, które stwierdzono w otworach archiwalnych (np. Łanięta Ł-1 i Łanięta Ł-4).

Zwierciadło solne jest na całym obszarze wysadu na podobnej wysokości. Nie notuje się obniżenia powierzchni zwierciadła pod obszarem zapadliska. To co wyróżnia osady tej części wysadu to charakter czapy wysadu. Pod zapadliskiem stwierdzono w otworach kartograficznych struktury solnej liczne okruchy gipsów, anhydrytów i ilowców (m.in. Łanięta Ł-1 i Łanięta Ł-4). Dokumentują one kruszenie czapy wywołane osłabieniem struktury czapy. Są przesłanką do zapadliskowego charakteru tej części wysadu.

Również w czwartorzędzie notowane jest występowanie na obszarze zapadliska obniżeń o charakterze zbiorników zastoiskowych i zimnych jezior (otw. Łanięta PIG-4).

Jednak obecnie cały obszar zapadliska subrozyjnego jest wraz z przykawędziową północną i północno zachodnią częścią wysadu najwyżej wyniesionym obszarem wysadu Łanięt. Tworzy tu kopułowego kształtu wzniesienie, wyższe około 7-10 m od pozostałej części powierzchni nad wysadem oraz 12-15 m nad otaczające je obniżenia na północny wschód i zachód od wysadu.

Zdaniem autora może to świadczyć o charakterze procesów subrozyjnych zachodzących na obszarze zapadliska. W okresach wzmożonego rozpuszczania czapy gipsowej, co prawdopodobnie zostało w paleogenie wywołane eoceńskim zalewem morskim i długotrwałym oddziaływaniem wód morskich na czapę gipsową i samą strukturę co wywołało uruchomienie lub skokowe zwiększenie subrozji tej części wysadu i powstawanie w wyniku tego zapadliska.

Na wysadzie poza zapadliskiem notowane są także, zwłaszcza w czwartorzędzie, procesu powstawania obniżeń i długotrwałego utrzymywania się nich. Taki mechanizm doprowadził do powstania środowiska jeziornego w plejstocenie środkowym we wschodniej części wysadu w Teodozjowie (otw. Łanięta PIG-2). W czasie ponad 80 tysięcy lat obejmujących dwa okresy ciepłe i przedzielający je okres zimny (Granoszewski 2019). Obniżenie w Teodozjowie funkcjonowało w okresie MIS 9e – MIS 11. Później nie notowano

w tym obszarze predyspozycji do obniżania tej części wysadu. Obecnie miejsce położone jest na niewielkim wyniesieniu.

### 12.5.2 Wysad Wapno

Wysad Wapna leży w osi antykliny leżącej w ciągu struktur solnych Piła – Wapno – Damasławek – Mogilno. Wysad ma na powierzchni podkenozoicznej kształt owalu rozciągniętego zgodnie z osią ciągu struktur solnych. Wysad Wapno jest słupem solnym przebijającym się do powierzchni podkenozoicznej w południowej części segmentu pomorskiego antyklinorium śródpolskiego. Według badań sejsmicznych (Midura, Hałoń 1963) struktura Wapna leży w osi antykliny solnej o przebiegu NWW- SEE wyniesionych nad segment mogileńsko-łódzki synklinorium szczecińsko – miechowskiego i łączy ze segmentem kujawskim antyklinorium śródpolskiego. Według Jaworskiego (1970) ruch ku górze mas solnych spowodował wypiętrzenie skał górn jurajskich i redukcję w strefie przywysadowej utworów dolnokredowych.

Wysad Wapna ma postać słupa o wymiarach 350 x 900 m (Rasała, 2014) i rozciągłość zgodną z kierunkiem antykliny solnej. Zasięg lateralny czapy jest większy jak wysadu, na granicach wysadu otulając jego ściany. Zwierciadło solne występuje na wysokości od 60 m p.p.m. do 110 m p.p.m., najwyżej w centralnej części wysadu. Wychodnie soli kamiennych podlegały nierównomiernemu ługowaniu, co spowodowało deniwelacje czapy ilasto – gipsowej, które sięgały do 60 m. Obecnie czapa wysadu miejscami sięga do powierzchni terenu.

Osady czwartorzędu nie tworzą jednolitej pokrywy nad wysadem, ale występują w głębokich rowach powstałych po ługowaniu soli. Identyfikuje się dwa lub trzy poziomy glin zwałowych w obrębie wysadu rozdzielone piaskami wodnolodowcowymi. Ich wykształcenie litologiczne i miąższości nie odbiegają od podobnych serii w okolicach Podolina na zachód od wysadu Wapna.

Analiza badań mikrosejsmicznych (Raport z zadania nr 10.4) wskazuje na występowanie w obrębie struktury wysadu na różnych jego głębokościach krawędzi, na których występuje zmiana litologii osadów. Układ krawędzi ma charakter nieuporządkowany, mimo to krawędzie dają się odnaleźć w strukturze czapy solnej przy identyfikowaniu utworów kenozoiku nad strukturą solną. Krawędzie wysadu po stronie zachodniej i południowo zachodniej są podkreślone przez rozcięcia, w które włożone zastały osady

wodnolodowcowe zlodowacenia warty i zlodowacenia wisły. Ich odnawianie po okresach transgresji lądolodu może mieć związek z tektoniką struktury solnej.

### **12.5.3 Struktura solna Izbica – Kłodawa – Ozorków (ze struktura solną Izbicy Kujawskiej)**

Struktura solna Izbica - Kłodawa - Ozorków powstała wzdłuż zdyslokowanej krawędzi tektonicznej struktury określanej jako segment kujawskiego antyklinorium śródpolskiego (Żelaźniewicz i in. 2011). Struktura powstała wzdłuż południowo zachodniej krawędzi tektonicznej o założeniach paleozoicznych (Marek, Raczyńska 1974). Struktura solna ma długość 65 km i jest pochylona z NE na SW. Jest grzebieniem solnym częściowo przebijającym się przez osady mezozoiku. Buduje zachodnią krawędź segmentu kujawskiego antyklinorium śródpolskiego.

W części objętej obszarem badań struktura solna Izbica – Kłodawa – Ozorków nie przebija się do powierzchni podkenozoicznej. Na powierzchni podkenozoicznej zaznaczają się ogniowa stratygraficzne jury środkowej i górnej.

Wielkość struktury solnej Izbica Kujawska szacuje się na 4 km długości i 2km szerokości (Raport nr 4.2). W oparciu o numeryczny model terenu Autorzy wskazują na wyraźne podniesienie wysadu w zachodniej części. Strukturę solną przecina wał moreny wyciśnięcia o przebiegu WNW – ESE. Zwierciadło solne opada z północy na południe od około 224 m p.p.t. do 556 m p.p.t. Leży więc ono najwyżej na północy, w strefie, w której struktura solna Izbica – Kłodawa - Ozorków kończy się.

Struktura ta w północnej części miejscowości Izbica Kujawska sięga do osadów kenozoiku. W obrazie oporności elektrycznej osadów na linii Wzniesień Izbickich zmienia się charakterystyka oporności osadów (Raport nr 9). Na głębokości 250 m, czyli w pobliżu wysokości zwierciadła soli (załącznik 10.3.5 do Raportu nr 10.3) widoczne jest zmiana położenia osadów najniższej oporności. Szerokość strefy zmiany oporności można szacować na około 1km.

Na obszarze struktury solnej Izbicy Kujawskiej w paleogenie powstało zapadlisko subbrozyjne (Kasiński 2004). Jego zasadnicze wypełnienie pochodzi z eocenu górnego, kiedy to wypełniły je osady morskie z fauną (Odrzywolska-Bieńkowa, 1966). W północnej części struktury, na północ od linii Wzniesień Izbickich Osady eocenu górnego wstępują na wysokości 31,0 m n.p.m. (otw. Izbica Kujawska PIG-2). Na północ od Wzniesień Izbickich

występują także osady ilaste czapy wysadu Izbicy położone w Augustynowie (otw. Izbica Kujawska PIG-1) na wysokości 26 m n.p.m.

W czwartorzędzie linia Wzniesień Izbickich była obszarem, na którym dochodziło wielokrotnie do deformacji glacitektonicznych. Obserwowane były w osadach zlodowaceń południowopolskich i środkowopolskich, w których występują także zdeformowane osady miocenu formacji poznańskiej. Wzniesienia Izbickie będące moreną wyciśnięcia w części kulminacji mają wychodnie piaszczystych osadów starszych, pochodzących z wcześniejszego etapu transgresji lądolodu w stadiale górnym zlodowacenia wisły.

Po stronie Wzniesień Izbickich występują osady zastoisk z okresu zlodowaceń odry i warty, wskazujące, że po ustąpieniu kolejnych lądolodów obszar ten był obniżeniem.

Zakres analiz i wniosków szczegółowych:

- na obszarze struktury znaleziono dwa szlaki przepływu wód zasolonych. Ich usytuowanie w północnej i południowej części wydłużonej struktury solnej, wynika z procesów ewolucji całej struktury solnej;

- po zachodniej stronie struktury występują strefy, których wody podziemne są w kontakcie z halitem struktury solnej. Występują one w okolicach Gaju koło Izbicy Kujawskiej i Błonia koło Łęczycy;

- Wzniesienia Izbickie są związane z rozwojem struktury solnej, oddzielają część północną będącą wysadem solnym od pozostałej części struktury Izbica – Kłodawa – Ozorków;

- głęboko założone obniżenie w rejonie Krzepocina na południowy zachód od Łęczycy zapewne ma związek z czwartorzędowym rozwojem tej części struktury solnej.

## 12.6 Wnioski

Struktury solne na obszarach badawczych wykazują aktywność w kenozoiku. W paleogenie powstały struktury zapadlisk subrozyjnych wewnątrz struktur solnych. Wykorzystanie wielu metod pomiarowych, analiz i obserwacji terenowych pozwoliło na usystematyzowanie analiz i korygowanie wniosków z badań i obserwacji prowadzonych w ramach zadania PSG.



Osady paleogenu występują w Izbicy Kujawskiej i Łaniętach w zapadliskach subbrozyjnych. Tam też trwało obniżanie w paleogenie i neogenie wywołane subbrozyjnym rozmywaniem centralnych części wysadów. Ługowanie soli i czapy wysadowej trwa obecnie i jest potwierdzone obecnością wód zasolonych na obszarze i w pobliżu struktur solnych (wysad Wapna, struktura solna Izbicy Kujawskiej, południowa część struktury solnej Izbica – Kłodawa – Ozorków, wysad Łanięt).

W czwartorzędzie w centralnej części wysadów tworzyły się obniżenia wypełniane osadami jeziornymi (Łanięta, Izbica Kujawska). Na krawędziach wysadów miało miejsce zwiększanie miąższości struktur czwartorzędowych związane zapewne z ruchliwością samego wysadu.

W obrębie wysadów notuje się ługowanie soli i rozmywanie struktury wysadu. Procesy te zachodzą na znaczna skalę w Wapnie, gdzie wzmożenie procesów nastąpiło po katastrofalnym zalaniu kopalni soli wodami podziemnymi (Rasała i in. 2013). W postaci nie wywołanej zdarzeniami katastrofalnymi ługowanie stwierdzono w północnej części struktury solnej Izbicy Kujawskiej, a także w innych częściach struktury solnej Izbica – Kłodawa – Ozorków: w okolicach Błonia koło Łęczycy w dolinie Bzury oraz na południowym zakończeniu struktury w okolicach Pełczyc. Wzbogacanie wody w substancje mineralne pochodzące najprawdopodobniej z rozmywania osadów struktur solnych stwierdzono w obszarze Łanięta i Izbica Kujawska.

Badania miały charakter sprawdzających i powinny być elementem prac syntetyzujących.

## **13 Opracowanie i udostępnienie wyników**

### **13.1 Mapy odkryte wysadów**

Jednym z efektów zadania są cztery mapy geologiczne nieseryjne: mapy odkryte wybranych struktur z naniesionymi granicami intersekcyjnymi wysadów solnych. Mapy zostały przygotowane w postaci wydruku jako załączniki do Raportu nr 11.1 o numerach: 11.1.1, 11.1.2, 11.1.3 i 11.1.4 oraz w formie elektronicznej, jako baza danych w systemie GIS) zapisane na płycie CD. Podstawowe dane do map zostały wygenerowane na podstawie modeli 3D (Zadanie 11.2, Raport nr 11.2): izolnie spągu utworów czwartorzędowych oraz miąższość czwartorzędu. Mapy zawierają również granice wysadów solnych wyznaczone na podstawie analiz danych grawimetrycznych (Zadanie 10.4, Raport 10.4) oraz lokalizację

wykorzystanych do analiz otworów wierceń geologicznych archiwalnych (Zadanie 4.3, Raport nr 4.3) oraz nowych wykonanych w projekcie (Zadanie 16 i 17, dokumentacja geologiczna inna).

### **Spis map**

- 1) Załącznik 11.1.1 do Raportu nr 11.1

Szkic odkryty czwartorzędu na obszarze wysadu solnego Izbica Kujawska w skali 1:25 000

- 2) Załącznik 11.1.2 do Raportu nr 11.1

Mapa miąższości czwartorzędu na obszarze wysadu solnego Izbica Kujawska w skali 1: 25 000

- 3) Załącznik 11.1.3 do Raportu nr 11.1

Szkic odkryty czwartorzędu na obszarze wysadu solnego Łanięta w skali 1:10 000

- 4) Załącznik 11.1.4 do Raportu nr 11.1

Mapa miąższości czwartorzędu na obszarze wysadu solnego Łanięta w skali 1: 10 000

## **13.2 Kompleksowe modele strukturalne osadów czwartorzędowych**

Z uwagi na utylitarny charakter prowadzonych prac modelarskich zdecydowano się na wykonanie odmiennych modeli strukturalnych.

Modele wykonywane były w oprogramowaniu gOcad firmy Paradigm (obecnie Emerson) oraz oprogramowania wspomagającego ArcMap (ESRI) i Qgis. W oparciu o dane wsadowe dokonywano interpretacji danych w środowisku 3D oraz ich weryfikacji. Następnie ze zgromadzonych i zestawionych w układzie PL-1992 elementów liniowych (zdigitalizowane przekroje i mapy) oraz punktowych (punkty pomiaru i wydzielenia litologiczne i stratygraficzne w otworach wierceń) dokonywano interpolacji powierzchni stropowych wykorzystując algorytm Discrete Smooth Interpolation (Mallet, 2002, Mallet, 2008), przy zastosowaniu zmiennych parametrów (gęstości siatki gridu, stosunków pomiędzy sąsiadującymi punktami). Podczas prac posiłkowano się pomiarami i obserwacjami zdobytymi dzięki wykonanym otworom badawczym.

Wizualizację modeli przedstawiono w przeglądarce Geo3D (STĘPIEŃ U. 2008), umożliwiającej wykonywanie map ścięcia oraz przekrojów po dowolnej linii cięcia (wykonana w ramach prac PSG).

Szczegółowy opis modeli znajduje się w Raporcie nr 11.2. Modele zostały zapisane jako załączniki do Raportu nr 11.2 w formie elektronicznej wraz z aplikacją Geo3D do ich przeglądania.

### **Spis modeli**

1) Załącznik 11.2.1 do Raportu nr 11.2

Model strukturalny warstw o odmiennym współczynniku przewodności elektrycznej obszaru Izbicy Kujawskiej (Model nr 1)

2) Załącznik 11.2.2 do Raportu nr 11.2

Model strukturalny stratygraficzny obszaru Izbicy Kujawskiej (Model nr 2)

3) Załącznik 11.2.3 do Raportu nr 11.2

Model strukturalny wydzielen litologiczno-stratygraficznych dla rejonu wysadu solnego w Łaniętach (Model nr 3)

4) Załącznik 11.2.4 do Raportu nr 11.2

Model strukturalny wydzielen litologiczno-stratygraficznych dla rejonu wysadu solnego w Wapnie (Model nr 4)

### **13.3 Publikacje i wystąpienia naukowe**

W trakcie realizacji zadania zostało zaprezentowanych siedem posterów na różnych konferencjach międzynarodowych, zawierających wyniki realizowanych prac. Poniższy spis zawiera ich tytuły, autorów, konferencję na której zostały zaprezentowane oraz informacje o publikacji pokonferencyjnej. **Streszczenia, artykuły oraz miniatury posterów zostały przedstawione w Raporcie nr 11.3**

#### **Spis publikacji**

**1. Tytuł: PGI's open source toolbox for interferometric time-series processing and data analysis: status review**

Autorzy: Perski, Zbigniew (1); Marinkovic, Petar (2)

1: Polish Geological Institute - National Research Institute, Poland; 2: PPO.Labs, The Netherlands

Konferencja: Poster zaprezentowano na konferencji Europejskiej Agencji Kosmicznej "Fringe 2015", która odbyła się 23-27 Marca 2015 w siedzibie ESA-ESRIN we Frascati we Włoszech.

**2. Tytuł: Integrated monitoring of salt domes geodynamics in Poland by means of InSAR, CRs and historical data analysis**

Autorzy: Perski, Zbigniew (1); Marinkovic, Petar (2); Przyłucka, Maria (1); Pacanowski, Grzegorz (1); Kowalski, Zbigniew (1); Wojciechowski, Tomasz (1)

*1: Polish Geological Institute National Research Institute, Poland; 2: PPO.Labs, The Netherlands*

Konferencja: Poster zaprezentowano na konferencji Europejskiej Agencji Kosmicznej "Fringe 2017", która odbyła się 5-9 czerwca w Aalto University w Helsinkach.

**3. Tytuł: On integrated geodynamical monitoring of salt domes in Poland by means of INSAR, CRs and geodetic observations**

Autorzy: Perski, Zbigniew (1); Marinkovic, Petar (2); Wojciechowski, Tomasz (1); Nescieruk, Piotr (1); Przyłucka, Maria (1); Kowalski, Zbigniew (1); Graniczny, Marek (1)

*1: Polish Geological Institute - National Research Institute, Poland; 2: PPO.Labs, The Netherlands*

Konferencja: Poster zaprezentowano na konferencji Europejskiej Agencji Kosmicznej „Living Planet Symposium”, która odbyła się w Pradze w Czechach w dniach 9-13 maja 2016.

**4. Tytuł: Integracja wglębnych danych geologicznych i geofizycznych w celu uszczegóławiania budowy geologicznej wysadów solnych na przykładzie wysadu Łanięta**

Autorzy: Jacek Chełmiński (1), Grzegorz Czapowski (1), Zbigniew Małolepszy (1), Łukasz Nowacki (1), Olga Rosowiecka (1), Urszula Stępień (1)

*1: Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy*

Konferencja: Poster został zaprezentowany na konferencji XXI Międzynarodowe Sympozjum Solne „Quo Vadis Sal”, która odbyła się w Zawoi w dniach 05-08 października 2016.

Publikacja: Chełmiński, J., Czapowski, G., Małolepszy, Z., Nowacki, Ł., Rosowiecka, O., & Stępień, U. (2016). Integracja wglębnych danych geologicznych i geofizycznych w celu uszczegóławiania budowy geologicznej wysadów solnych na przykładzie wysadu Łanięta. *Przegląd Solny*, 12:98-113.

**5. Tytuł: Co w wysadzie solnym piszczy czyli narzędzia do przeglądania modeli geologicznych 3D**

Autorzy: Urszula Stępień (1), Jacek Chełmiński (1), Grzegorz Czapowski (1), Zbigniew Małolepszy (1), Łukasz Nowacki (1)

*1: Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy*

Konferencja: Poster został zaprezentowany na konferencji XXII Międzynarodowe Sympozjum Solne „Quo Vadis Sal”, która odbyła się w Wieliczce w dniach 04-07 października 2017.

## **6. Tytuł: Dies diem docet – od prostych wizualizacji po złożone modele geologiczne 3D na przykładzie wybranych struktur solnych**

Autorzy: Zbigniew Małolepszy (1), Jacek Chełmiński (1), Grzegorz Czapowski (1), Łukasz Nowacki (1), Urszula Stępień (1)

*1: Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy*

Konferencja: Poster został zaprezentowany na konferencji XXIII Międzynarodowe Sympozjum Solne „Quo Vadis Sal”, która odbyła się w dniach 10-13 października 2018 w Uniejowie.

7. Tytuł: Wyniki zastosowania technik modelowania 3D w interpretacji budowy geologicznej osadów czwartorzędowych w nadkładzie wysadów solnych na przykładzie wysadów Izbica Kujawska i Łanięta

Autorzy: Łukasz Nowacki (1), Jacek Chełmiński (1), Grzegorz Czapowski (1), Urszula Stępień (1), Ewa Szykaruk (1)

*1: Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy*

Konferencja: Poster został zaprezentowany na konferencji XXIV Międzynarodowe Sympozjum Solne „Quo Vadis Sal”, która odbyła się w dniach 9-12 października 2019 w Żninie.

## **14 Podsumowanie i wnioski**

Prace geologiczne w zakresie obejmującym roboty geologiczne oraz badania laboratoryjne a także pomiary geodezyjne i opracowania danych satelitarnych spełniły wyznaczoną w Projekcie robót geologicznych rolę wobec zadania PSG „Monitoring geodynamiczny w zakresie interferometrii satelitarnej pasa wysadów solnych w Polsce oraz próba określenia ruchliwości soli w czwartorzędzie z wykorzystaniem tomografii elektrooporowej i technik modelowania 3D”.

Nad wysadami solnymi Polski środkowej rozpoznaje się zdeformowane glacitektonicznie serie osadów czwartorzędowych. Taki obraz budowy geologicznej czwartorzędu przedstawiają opracowania dotyczące obszarów nad wysadami Łanięta (Roman 1999, 2011) czy też nad pobliskim wysadem Lubień Kujawski (Baraniecka 1988, 1993). Przeprowadzone w niniejszym zadaniu prace geologiczne pozwoliły na weryfikację tego sposobu opisu budowy. Okazuje się, że strefy deformacji glacitektonicznych nad wysadami są ograniczone i związane z określonymi częściami struktur solnych: krawędziami struktury, strefami przy krawędziach zapadlisk subbrozyjnych.

Na obszarze badawczym Izbica Kujawska obserwuje się wyniesienie paleogeńskich osadów morskich w strefie północnej struktury solnej od strefy nad Wzniesieniami Izbickimi, gdzie brak osadów miocenu, związany jest z wypiętrzaniem tej części struktury solnej. W świetle danych interferometrycznych obszar ten nie podlega współcześnie deformacjom.

Ruchy obniżające zapadlisko subrozcyjne Łanięt miały miejsce w paleogenie i w miocenie, czego dowodzi względne wyniesienie osadów. W obydwu obszarach badawczych w czwartorzędzie zidentyfikowano strefy długotrwałego obniżania, wypełniane seriami zastoiskowymi różnego wieku (Izbica Kujawska, Łanięta, Wapno) oraz osadami jeziornymi.

Długotrwała sedimentacja w jeziorach czwartorzędowych klimatu ciepłego (okresy MIS11 i MIS 9) oraz zimnego (MIS 10) w Łaniętach (profil Łanięta PIG-2) określa czas trwania tendencji do obniżenia tej części wysadu na okres co najmniej 80-100 tysięcy lat. Na obszarze poligonu Łanięta notowano niewielką strefę obniżania (2-5 mm/rok) w latach 1992 – 2000. Nie potwierdzono tego zjawiska w obrazie danych Sentinel-1 (2014-2019).

Obniżenia na południe od Wzniesień Izbickich i obszar Wzniesień Izbickich podlegały deformacjom glacictektonicznym z wielu epizodów glacialnych, które osiągnęły tego obszaru. Wskazują na to zarówno wyniki prac geologicznych jak też wyniki profilowania geofizycznego (ERT).

Badania wykazały występowanie zróżnicowanych stref w obrębie czwartorzędu, o specyficznej budowie geologicznej. Odmienne cechy litologiczne a także strefy sedimentacji znaleziono przy granicach struktur solnych ale także w ich wnętrzu. Na obszarze Wapno zachodzi zbieżność zmian budowy geologicznej osadów kenozoiku ze strefami krawędziowymi wyznaczonych przy analizie i interpretacji szczegółowego zdjęcia grawimetrycznego (Raport nr 10.4), które to strefy wyznaczają odmienną budowę geologiczną w obrębie i na granicach struktur solnych. Mogą to być informacje potrzebne dla identyfikacji struktur geologicznych wysadów solnych jak też stref w ich obrębie. Wielokrotność podobnych środowisk sedimentacyjnych, odnawiających się po kolejnych transgresjach lądolodu wskazuje na stałą tendencje ruchów w obrębie wysadu. Współcześnie występujące obniżanie terenu Wapna kształtuje się w postaci niecki obniżeniowej, której zasięg dobrze koreluje się z zarysem granic stropu wysadu. Trzeba jednak pamiętać, że deformacje te są dalekim echem antropogenicznych osiadań pogórnicych i katastrofy z 1977 roku.

Badania, analizy i obserwacje, jakie poczyniono na czterech obszarach badawczych prowadzą do konkluzji o ruchliwości wysadów solnych w kenozoiku. Z paleogenu struktur solnych w Łaniętach i Wapnie wynika znaczne obniżania części wysadu w czasie zalewów morskich w eocenie górnym oraz oligocenie. W przypadku północnej części wysadu Izbica Kujawska osady morskie eocenu i oligocenu zostały wyniesione: osady morskie eocenu do wysokości około 30 m n.p.m., a brakiczne i morskie osady oligocenu dolnego do wysokości

około 60 m n.p.m. co podkreśla skalę podniesienia struktury solnej Izbicy Kujawskiej od dolnego oligocenu. Nad wysadem Łanięt dochodziło do ruchu w miocenie i po nim. Między obszarem zapadliska subrozynnego, które było szczególnie obniżane w eocenie górnym, a obszarem północnej krawędzi wysadu doszło do obniżenia zalegania II łużyckiej grupy pokładów węgla na obszarze zapadliska. Jego skalę można szacować na około 30 m.

Na obszarze struktur solnych tomografia elektrooporowa i grawimetria odsłania zmienność położenia struktur i zależność od wewnętrznej budowy obszarów struktur solnych. Szczególnie jest to zauważalne na obszarze wysadu Wapna, gdzie duże nasycenie robotami geologicznymi daje pojęcie o zmienności litologicznej i stratygraficznej osadów nadkładu soli kamiennej. Zmienność budowy geologicznej utworów nadkładu złoża dobrze opisują struktury nieciągłe o stosunkowo niedużych wysokościach względnych wyznaczone (Musierowicz 2019, raport 10.4) nad wysadem Wapna. Jest to też ilustracja zmienności litostratygraficznej przywysadowej części struktury solnej, jej zmienności i wpływu na różnowiekowe osady nadkładu.

Tomografia elektrooporowa pokazuje bardzo zmienny obraz oporności elektrycznej elementów i struktur geologicznych nad wysadami solnymi. Zwłaszcza tam, gdzie dodatkowym elementem jest zasolenie wód podziemnych obraz elektrooporowy ulega zmianom. Na obszarach znacznego zasolenia wód podziemnych (np. w północnej części struktury solnej Izbicy niskie oporności zacierają obraz zmienności litologicznej. Tam gdzie zasolenie jest niewielkie (np. w strefach krawędzi wysadu Łanięt) podkreśla ono cechy struktur geologicznych.

Należy tu jednak podkreślić, że tomografia elektrooporowa ERT jako czuły element pomiaru oporności elektrycznej dobrze definiuje strefy zwiększonej mineralizacji i zasolenia wód podziemnych, dając dobrą wskazówkę do analiz przepływów wód zasolonych od źródła zasolenia. Sondowania geoelektryczne SGE dało dodatkowy argument dla ukierunkowania przepływów wód podziemnych od wysadów.

Z kolei przeprowadzone analizy różnych zestawów niezależnych danych radarowych, przetwarzanych różnymi metodami pokazały spójny obraz deformacji. Wyraźnie niestabilne pozostają wysady dla których prowadzona jest lub była w przeszłości eksploatacja podziemna. W świetle tych kompleksowych wyników jeszcze większe uzasadnienie znajduje decyzja o monitorowaniu rejonu Wapna. Współczesna dynamika pasa wysadów solnych jest niewielka, naturalne ruchy są w granicach 1- 2mm/rok. Wielkości te są na granicy błędów pomiarowych. Tak niewielkie deformacje były możliwe do stwierdzenia dzięki danym

Sentinel-1 z 5-cio letniego okresu obserwacji. Regionalna analiza danych historycznych z lat 1992 – 2010 okazała się być niepełna z uwagi na bardzo niepełne archiwa – dane radarowe dla terenu Polski gromadzono wówczas sporadycznie, w długich odstępach czasowych.

Wykorzystanie wielu metod pomiarowych, analiz i obserwacji terenowych pozwoliło na usystematyzowanie analiz i korygowanie wniosków z badań i obserwacji prowadzonych w ramach zadania PSG.

## 15 Literatura

- Balwierz Z., 1999 — Wyniki analizy pyłkowej osadu ze stanowiska Łanięta. Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- Bamler, R., Hartl, P., 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Probl.* 14, R1–R54.
- Baraniecka M. D., 1975 - Zależność wykształcenia osadów czwartorzędowych od struktur i dynamiki podłoża w środkowej części Nizy Polskiego, *Z Badań Czwartorzędu w Polsce. Biuletyn I. G.*, nr 288, Tom 16: 5-93.
- Baraniecka M.D., 1988 - Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50.000 arkusz Lubień Kujawski (479), Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa
- Baraniecka M.D., 1993 - Objasnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1:50.000 arkusz Lubień Kujawski (480), Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa
- Bażyński J., Graniczny M., 1978 - Fotolineamenty i ich znaczenie w geologii, *Przeł. Geol.*, 26, 288-296.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E., 2002. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 40, 2375–2383.
- Bestyński Z., 2011 – Metody geofizyczne w geologii inżynierskiej, *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 446: 175-182
- Bocheńska T., Dowgiałło J., Kleczkowski A., Szczepański S., Witczak S., Krajewski S., Macioszczyk A., Macioszczyk T., Małecka D., Rogóż M., Rózkowski A., Sadurski A., 2002 — Słownik hydrogeologiczny (red. nauk. J. Dowgiałło i in.). Wyd. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa: 128–129
- Brożek B., Tatarski A., 1983 - Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w wysadzie solnym „Damasławek”, kat. C2. t. II, część hydrogeologiczna. CAG PIG-PIB nr 46067, Warszawa
- Brzeziński M., 2008 - Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50.000 arkusz Brześć Kujawski (441, N-34-122B), Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa
- Brzeziński M., 2009 - Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50.000 arkusz Izbica Kujawska (479, N-34-122D), Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa



- Brzeziński M., 2013 – Objasnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1:50.000 arkusz Izbica Kujawska (479), Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa
- Brzeziński M., 2015 – Objasnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1:50.000 arkusz Brześć Kujawski (441), Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa
- Bürgmann, R., Rosen, P.A., Fielding, E.J., 2000. Synthetic Aperture Radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 28, 169–209.
- Cattabeni, M., Monti-Guarnieri, A., Rocca, F., 1994. Estimation and Improvement of Coherence in SAR Interferograms. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS '94*, 720–722.
- Chachaj J., 2005 a – Objasnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1:50.000 arkusz Kcynia (356), Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa
- Chachaj J., 2005 b - Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50.000 arkusz Kcynia (356, N-33-119B), Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa
- Chełmiński J., Czapowski G., Małolepszy Z., Nowacki Ł., Rosowiecka O., Stępień U., 2016 - Integracja wglębnych danych geologicznych i geofizycznych w celu uszczegółowienia budowy geologicznej wysadów solnych na przykładzie wysadu Łanięta. *Przegląd Solny (Salt Review), Rocznik Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego, 2016, t. 12: 51-55, Kraków.*
- Ciuk, E., 1993 - O węglach brunatnych w wysadzie solnym w Łaniętach w województwie płockim i o ich własnościach chemiczno-technologicznych. In: I. Lipiarski [ed.]: *Mat. 16. Symp. „Geologia formacji węglonośnych Polski”*. 16; 7-12, Wyd. Akad. Górn.-Hutn., Kraków.
- Czapowski G, Bukowski K., 2009 – Złoża soli w Polsce – stan aktualny i perspektywy zagospodarowania, *Przegląd Geologiczny*, vol. 57, no 9: 798 – 811.
- Czapowski G., Kasiński J., Krzywiec P., Polechońska O., Tomassi-Morawiec H., Wróbel G., Burliga S., Wilkosz P., 2005 – Ocena złóż solnych w rejonie Pomorza i Kujaw pod kątem ich przydatności do eksploatacji metodą otworową. IKS SOLINO S.A, Inowrocław.
- Czapowski G., Tomassi-Morawiec H., Tadych J., Grzybowski Ł. & Szyrak T., 2009 - Wykształcenie i tektonika utworów solnych cechsztynu w wysadzie solnym Góra koło Inowrocławia w świetle wyników kompleksowych badań geochemiczno-litologicznych w wybranych otworach wiertniczych. *Prz. Geol.*, vol. 57, no 6: 494-503. Warszawa
- Dąbrowski S., Owczarczak B., 2002 - Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami, arkusze Izbica Kujawska – 479/ PIG-PIB. Warszawa
- Dadlez R. (ed.), 1998 – Mapa tektoniczna kompleksu cechsztyńsko-mezozoicznego na Niżu Polskim w skali 1:500 000, PIG Warszawa.
- Dadlez R., 1997 – Ogólne rysy tektoniczne bruzdy środkowopolskiej. W: Marek S., Pajchłowa M. (ed.), 1997 – *Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce. Prace Państwowego Instytutu Geologicznego t. 153: 410-414. Warszawa.*
- Dadlez R., 1998 – Mapa tektoniczna cechsztyńsko–mezozoicznego kompleksu strukturalnego na Niżu Polskim 1 : 500 000, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa

- Dadlez R., 2001 - Przekroje geologiczne przez bruzdę śródpolską. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Dadlez R., Marek S. 1974 - Budowa geologiczna Polski. Tektonika: 280–304. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- Dadlez R., Marek S., Pokorski J., 2000 - Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku, 1:1 000 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- Dahlin T. & Zhou B., 2004 – A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays, *Geophysical Prospecting*, 52, 379:398
- Dębski J. 1963 - Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w wysadzie solnym Łanięta, gmina Łanięta, pow. Kutno, woj. Łódź. Instytut Geologiczny, Warszawa, 1963 r., NAG PIG-PIB nr 3928/413.
- Dutkiewicz L., 1991 - Objasnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1:50.000 arkusz Parzęczew (589), Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa
- Dutkiewicz L., 1989 - Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50.000 Parzęczew (589), Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa
- Dygor S. 1977 – Uwagi o wpływie obszarów zaburzonych glacictektonicznie na warunki geotechniczne górotworu, II sympozjum glacictektoniki. *Badania Geologiczne Struktur Glacictektonicznych*, Zielona Góra, 25:38
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 1999. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99*, 1–3.
- Franceschetti, G., Iodice, A., Ricco, D., 2002. A canonical problem in electromagnetic backscattering from buildings. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40, 1787-1801.
- Garlicki A., Szybist A., 1986. Salinarne osady polskiego cechsztynu z solami potasowo-magnezowymi. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, T.2, z 3-4, 389-404
- Garlicki A. (red.), 1998 - Uzupełniające rozpoznanie wysadu solnego Damasławka, Etap 2. Arch. PAA. Warszawa.
- Garlicki, A., I A. Szybist, 1988 "Saline deposits of Polish Zechstein with potash salt." *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 2 (1986): 391-404.
- Gątaszewski L., 1955 - Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej „WAPNO”. NAG PIG-PIB nr 3725/159, 11091, Warszawa.
- Goldstein, R.M., Zebker, H.A., Werner, C.L., 1988. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Sci.* 23, 713–720.
- Górski J., Rasała M., 2008 - Hydrogeologia wybranych wysadów solnych regionu kujawskiego – aspekty poznawcze i utylitarne -- *Geologos, Monographiae* 5
- Grabowska I., 1964 – Orzeczenie dotyczące prób z wiercenia Łanięta 4 (ark. Kłodawa). Archiwum NAG PIG-PIBBB. Warszawa
- Graniczny M., 1978 – Wybrane przykłady zastosowania technik teledetekcyjnych w badaniach geologicznych, *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii*, Tom XXV, zeszyt 2 (59): 75 – 81.
- Graniczny M., 1989 - Fotolineamenty i ich znaczenie geologiczne, *Instr. i Met. Bad. Geol. PIG*, Zeszyt 50: 72.

- Graniczny M., Kowalski Z., 2014 – Rozpoznanie i kartograficzny obraz neotektonicznej i współczesnej mobilności obszaru Polski w kontekście lokalizacji elektrowni jądrowych (PLEJ), mapa lineamentów teledetekcyjno – geofizycznych, NAG – PIG-PIB
- Graniczny M., 2016 - Wstępna analiza struktur solnych pod kątem ich mobilności tektonicznej. Raport 4.1. PIG-PIB
- Granoszewski W., 2018 – Analiza palinologiczna kopalnych osadów jeziornych z Łaniet. Profile Łanietta PIG-2 i Łanietta PIG-4. Oddział Karpacki PIG-PIB. Kraków. Mps
- Hanssen, R.F., 2005. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis, 2nd ed. Springer Verlag, Heidelberg.
- Hartl, P., Reich, M., Thiel, K.-H., Xia, Y., 1993. SAR interferometry applying ERS-1: some preliminary test results, in: ESA SP-359. 219–222.
- Henderson, F.M., Lewis, A.J., 1998. Principles and applications of imaging radar. Manual of remote sensing, 3rd edn, vol 2. John Wiley, New York
- Hobbs W.H., 1904 - Lineaments of the Atlantic Border Region, GSA Bull., 15: 483-506.
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., Arıkan, M., 2012. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. Tectonophysics 514-517, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., Kampes, B., 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other non-urban areas using InSAR persistent scatterers. Geophys. Res. Lett. 31, L23611, doi:10.1029/2004GL021737.
- Inglada J., Souyris J.-C., Henry C., 2004. ASAR multi-polarization images phase difference: assessment in the framework of persistent scatterer interferometry. Proceedings of the ENVISAT & ERS Symposium, 6-10 September 2004, Salzburg (Austria).
- Janczyk-Kopikowa Z., 1965 — Flora interglacjalna eemskiego w Kaliskiej koło Chodcza na Kujawach. Biul. Inst. Geol., 187
- Jarosiński M., 2013 – Rola czynnika tektonicznego w destabilizacji struktur solnych: współczesne zagrożenia geodynamiczne w Polsce. Przegląd Solny/Salt Review, Rocznik PSGS, 2013, vol. 9: 83-85. Kraków (ISSN 2300-9349).
- Jarosiński M., Czapowski G., Burliga S., Garlicki A., 2000 - Badania nadkładu i czapy wysadu „Damasławek” - zintegrowany model geofizyczno-geologiczny. Posiedz. Nauk. Państw. Inst. Geol., 56: 45-16. Warszawa.
- Kacprzak L., 2005 - Baza danych GIS MHP 1:50.000 Pierwszy poziom wodonośny Brześć Kujawski (441). PIG-PIB. Warszawa
- Kasiński J. R., 2004 - Paleogen i neogen w zapadliskach i rowach tektonicznych In: T.M. Peryt, M. Piwocki, [eds.]: Budowa geologiczna Polski. Stratygrafia. Trzeciorzęd. 3: 3a: 134-161, Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- Kasiński J. R., G. Czapowski, P. Krzywiec, M. Piwocki, 2002 - Halokineza a powstawanie złóż węgla brunatnego - studium przywysadowych złóż węgla z obszaru Niżu Polskiego. Państw. Inst. Geol., 1-149., CAG PIG, Warszawa.
- Kasiński J.R., M. Jasionowski, K. Niczyporuk, 1999 - Mapa geologiczno-gospodarcza Polski w skali 1:50 000, arkusz Izbica Kujawska (479). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- Keller G.V. & Frischknecht F.C., 1966 – Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press Inc., Oxford

- Ketelaar, G., 2008. Monitoring surface deformation induced by hydrocarbon production using satellite radar interferometry. Delft Institute of Earth Observation and Space Systems, 2008. 256.
- Kjerulf T., 1879 - Udsigt over det sydlige Norges geologi, W.C. Fabritius Christiania
- Klatkova H., 1993 - Objasnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1:50.000 arkusz Zgierz (590), Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa
- Klatkova H., Kamiński J., Szafrńska D., 1991 - Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50.000 arkusz Zgierz (590), Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa
- Knothe, S., 1984. Prognozowanie wpływów eksploatacji górniczej. Wyd. Śląsk.
- Kondracki J., 2010 – Geografia regionalna Polski, PWN Warszawa
- Kornowska I., 1983 - Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w wysadzie solnym „Damasławek”, kategoria rozpoznania C2, gmina: Żnin i Janowiec Wielkopolski, woj. bydgoskie. NAG PIG-PIB nr 14611.
- Kozydra Z., Brzeziński M., 1996 - Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50.000 arkusz Sompolno (478, N-34-122C), Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa
- Kozydra Z., Brzeziński M., 2013 – Objasnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1:50.000 arkusz Sompolno (478), Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa
- Krupiński K., 1995 - Stratygrafia pyłkowa i sukcesja roślinności interglacjału mazowieckiego. Acta Geogr. Lodz. 70.
- Krupiński K., 1999 — Badania paleobotaniczne osadów jeziornych z Żarowa. Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, ark. Izbica Kujawska. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- Krzywiec P., 2000 - O mechanizmach inwersji bruzdy środkowopolskiej – wyniki interpretacji danych sejsmicznych. Biuletyn PIG, t. 393: 135-166. Warszawa.
- Krzywiec P., 2004a - Triassic evolution of the Kłodawa salt structure: basement-controlled salt tectonics within the Mid-Polish Trough (central Poland). Geological Quarterly, vol. 48, no 2: 123-134. Warszawa.
- Krzywiec P., 2004b - Basement vs. salt tectonics within the Mid-Polish Trough (central Poland) and their influence on sedimentary systems - Triassic evolution of the Kłodawa salt structure. Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft „GeoLeipzig2004“, Leipzig, Germany, 29.09 – 01.10, 34: 259.
- Krzywiec P., 2009 – Geometria i ewolucja wybranych struktur z obszaru Nizy Polskiego w świetle danych sejsmicznych, Przegląd Geologiczny, vol. 57, nr 9: 812 – 818.
- Krzywiec P., Jarosiński M., Twarogowski J., Burliga S., Szewczyk J., Wybraniec S., Czapowski G., Zientara P., Petecki Z., Garlicki A., 2000 - Geofizyczno-geologiczne badania stropu i nadkładu wysadu solnego „Damasławek”. Prz. Geol., 48 (11): 1005-1014. Warszawa.
- Krzywiec P., Kasiński J. R., 2005 - Pokłady węgla brunatnego w obrazie płytkiej sejsmiki refleksyjnej In: I. Lipiarski [ed.]: 28. Symp.: „Geologia formacji węglonośnych Polski”, 28: 53-59, Wyd. Akad. Gór.-Hutn., Kraków.
- Krzywiec P., Królikowski Cz., Jarosiński M., Szewczyk J., Wybraniec S., Czapowski G., Ziętara P., Petecki Z., Twarogowski J., Józwiak W., Żółtowski Z., Garlicki A., Burliga

- S., 1999 – Rozpoznanie budowy wewnętrznej czapy gipsowo-anhydrytowej wysadu solnego Damasławek płytkimi badaniami sejsmicznymi. Temat nr 4.94.9865.01.0. 1-74. Arch. Państw. Agen. Atomistyki, Warszawa
- Loke M. H. & Barker R. D., 1996 – Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131:152
- Loke M.H., 2004 – Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys, [www.ualberta.ca](http://www.ualberta.ca).
- Loke M.H., Alfouzan F. A. & Nawawi M.N.M. 2007 – Optimisation of electrode arrays used in 2D resistivity imaging surveys, *ASEG Extended abstracts 2007* (1) 1-4
- Marek S., Raczyńska A., 1974 – Lokalne formy strukturalne Polski środkowej w: Budowa geologiczna Polski t. IV Tektonika cz. 1 Niż Polski. IG Warszawa
- Marinkovic, P., Ketelaar, G., van Leijen, F., Hanssen, R., 2007. InSAR quality control: Analysis of five years of corner reflector time series. *Proceedings of Fringe 2007 Workshop* (ESA SP-649), Frascati, Italy, 26-30.
- Marinkovic, P., Ketelaar, G., van Leijen, F., Hanssen, R., 2007. InSAR quality control: Analysis of five years of corner reflector time series. *Proceedings of Fringe 2007 Workshop* (ESA SP-649), Frascati, Italy, 26-30.
- Massonnet, D., Feigl, K.L., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Rev. Geophys.* 36, 441–500.
- MIDAS, <http://geoportal.pgi.gov.pl/portal/page/portal/MIDASGIS/start>, dostęp 02-2014.
- Moska P., 2018 – Sprawozdanie z wykonania pomiarów wieku luminescencyjnego 11 próbek z okolic Izbicy Kujawskiej I Łanięt. GADAM Centre. Gliwice Absolute Dating Methods Centre. Mps
- Mrozek K., Sokołowski J., Wróbel J., 1961 - Odkrycie wysadowej struktury solnej koło Damasławka na Kujawach. *Przeg. Geol.*, vol. 8, nr 11: 579-586. Warszawa.
- Mrozek K., Sokołowski J., Wróbel J., 1961 - Odkrycie wysadowej struktury solnej koło Damasławka na Kujawach. *Przeg. Geol.*, vol. 8, nr 11: 579-586. Warszawa.
- Musiataewicz M., 2019. Analiza i opracowanie wyników monitoringu geodynamicznego, przyczyn i skutków ruchliwości soli. Raport zadania 10.4.
- O'Leary D.W., Friedman J.D., Pohn H.A., 1976 - Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms, *GSA Bull*, 87: 1463-1469
- Odrzywolska-Bieńkowska E., 1966 – O mikropaleontologicznej granicy eocenu i oligocenu na Kujawach. *Kwart. Geol.* 10, 1. IG. Warszawa
- Odrzywolska-Bieńkowska, E., K. Pożaryska, 1984 - Priabonian foraminifers of the Polish Lowlands. *Acta. Palaeont. Polon.*, 29:3-4; 107-156, Warszawa.
- Orska J., Werner Z., 1987 – Sole kamienne i potasowe, Budowa geologiczna Polski, Tom VI Złóża surowców mineralnych (pod redakcją R. Osiki): 418 – 438. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Ostaficzuk S., 1981 - Lineamenty jako odwzorowanie zjawisk tektonicznych na tle wybranych przykładów z Polski, *Biul. Geol. UW*: 29: 195-267.
- Ostrowski C., Ostrowska K., Piśuła M., 2010 – Opracowanie badań mikrograwimetrycznych w rejonie byłej kopalni soli w Wapnie, *Arch. Hydro-Nafta Sp. z o.o.* 2010 r.

- Pacanowski G., Czarniak P., Sobótka P., Piechota A., Bąk T., 2017 – Raport z badań geofizycznych wykonanych metodą tomografii elektrooporowej i pionowych sondowań geoelektrycznych dla wysadów Łanięta, Wapno i struktury solnej Izbica Kujawska – Łęczycza. Raport zadanie 9.1, 9.2. PIG-PIB. Warszawa
- Pacanowski G., Sokołowska M., Mieszkowski R., 2016 — Rola obrazowania elektrooporowego w uszczegółowieniu skomplikowanej budowy geologicznej wzgórza Morasko w Poznaniu. *Prz. Geol.*, 64, 4: 238–244.
- Papiernik B. 2012. Mapa trendu strukturalnego powierzchni stropu cechcztynu w skali 1: 1 000 000. W: Wójcicki A., Sowizdzał A., Bujakowski W. (red) Ocena potencjału, bilansu cieplnego i perspektywicznych struktur geologicznych dla potrzeb zamkniętych systemów geotermicznych (Hot Dry Ricks) w Polsce. Raport Końcowy projektu.
- Parecka K., 1980. - Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w wysadzie solnym Łanięta, gmina Łanięta, woj. Płock, kat. C1. Kombinat Geologiczny – Północ, Zakład Projektów i Dokumentacji Geologicznych, Warszawa, 1980 r. NAG PIG-PIB nr 13772.
- Perissin, D., 2006. SAR super-resolution and characterization of urban targets. Ph.D.thesis, Politecnico di Milano, Italy.
- Perski, Z., 1999. Osiadania terenu GZW pod wpływem eksploatacji podziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). *Przegląd Geol.* 2, 171–174.
- Perski, Z., Ketelaar, G., Mróz, M., 2006. Interpretacja danych ENVISAT/ASAR o przemiennej polaryzacji na obszarach zurbanizowanych w kontekście charakterystyki stabilnych rozpraszaczy (Persistent Scatterers). *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 16, 467 – 482.
- Piątkowska A., Czuryłowicz K., Przyłucka M., 2014 - Model przestrzenny struktury solnej Inowrocławia a wizualizacja przemieszczeń powierzchni terenu zarejestrowanych na podstawie badań interferometrycznych, *Przegląd Geologiczny*, vol 62, nr 2: 97 – 102.
- Piątkowska A., Surafa M., Perski Z., Graniczny M., 2012a - Application of SRA Interferometric methods to identify the mobility of the area above the salt diapir in Inowrocław and the regional salt structures in Central Poland, *Geology & Geophysics and Environment*, vol. 38, no. 2: 209 – 220.
- Piątkowska A., Surafa M., Perski Z., Graniczny M., 2012b - Zastosowanie satelitarnej interferometrii radarowej do identyfikacji mobilności form solnych Centralnej Polski na przykładzie wysadu solnego Inowrocławia, *Biuletyn PIG*, nr. 452: 237 – 244.
- Piotrowska K., 2011 - Baza danych GIS MHP 1:50.000 Pierwszy poziom wodonośny Kcynia (356). PIG-PIB. Warszawa
- Poborski J, 1960 – Cechsztyńskie zagłębienie solne Europy środkowej na ziemiach Polski, *Pr. Inst. Geol.*, T. 30, cz. 2.
- Poborski J, 1964 – Stosunki facjalne w zagłębieniu cechsztyńskim w Polsce, *Kwart. Geol.*, Tom 8, nr 1.
- Poborski J., 1955 – Zestawienie i opracowanie materiałów dla całości struktury solnej Izbica-Łęczycza. Poz. planu PH-5. IG, Warszawa, CAG nr: 3927/203.
- Požaryska K., Odrzywolska-Bieńkowska, 1982 – Wpływ tektoniki na sedymentację w trzeciorzędzie na Niżu Polskim. *Przeg. Geol.*
- Požaryski W., 1953 – Osady morskie oligocenu młodszego na Kujawach. *Biuletyn IG* 87. Warszawa
-

- Prati, C., Rocca, F., Monti Guarnieri, A., 1993. SAR interferometry experiments with ERS-1, in: ESA SP-359. pp. 991–993.
- Przyłucka M., 2016 - Wyznaczenie struktur solnych dla badań szczegółowych, zdefiniowanie obszaru poligonu badawczego, opracowanie projektu robót geologicznych. Raport 4.5. PIG-PIB
- Rasała M., 2000 - Budowa geologiczna wysadu solnego Damasławka. Pr. Dypl. Cz. I, Arch. IG UAM Poznań.
- Rasała M., 2005 - Właściwości hydrauliczne masywu czapy gipsowej wysadu solnego Wapna. Współczesne Problemy Hydrogeologii. Tom XII. Wyd. Uniw. M. Kopernika, Toruń: 589-595.
- Rasała M., 2006 - Problemy modelowania matematycznego przepływu wód podziemnych w rejonie wysadów solnych na przykładzie struktury Wapna. *Geologos*, 10: 215-225.
- Rasała M., Górski J., Karcz P., Kortas G., Maj A., Hermanowski P., Ratajczak R., Grzybowski Ł., Tunak A., Wilkosz P., Begier M., Mięzałik Ł., 2013 – Dokumentacja geologiczna określająca stopień zagrożenia terenu pogórniczego kopalni soli w Wapnie w zakresie określenia jego przydatności do zagospodarowania i rewiatlizacji. Hydro-Nafta Spółka z o.o., Piła, listopad 2013,
- Richter- Bernburg G., 1955 – Über saline Sedimentation, *Z. Deustch Geol. Gesell.* Bd.: 105.
- Roman M., 1999 - Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50.000 arkusz Gostynin (481, N-34-123D). Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa
- Roman M., 2011 – Objaśnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1:50.000 arkusz Gostynin (481), Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa
- Rudzki M. & Krawiec A., 2007 – Ocena zanieczyszczenia wód podziemnych z wykorzystaniem metody tomografii elektrooporowej. *Współczesne problemy hydrogeologii*, tom XIII, część 2, 335:343, Kraków 2007
- Ryżak R., 1979 — Problemy interpretacji hydrogeologicznej wyników pomiarów elektrooporowych. *Prz. Geol.*, 8: 462–466.
- Sękiewicz J., 1960 — Wysad solny okolicy Izbicy Kujawskiej ze szczególnym uwzględnieniem litologii cechsztynu. Praca dypl. CAG PIG 3927/243.
- Ślizowski J., Lankof L., Wojtuszevska K., 2007 – Geomechaniczna ocena optymalnej głębokości komór magazynowych gazu ziemnego w polskich złożach soli kamiennej. *WUG, Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, nr 6 (154): 50-61. Katowice.
- Ślizowski K., Köhsling J., Lankof L., 2004 – Uwarunkowania podziemnego składowania odpadów niebezpiecznych w Polsce. 1-264. *Studia, Rozprawy, Monografie* nr 129. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Ślizowski K., Saługa P., 1996 - Surowce mineralne Polski. Surowce chemiczne - sól kamienna. 1-178. Wyd. Centrum PPGSMiE PAN, Kraków.
- Słodkowska B., 2018 – Badania palinologiczne osadów paleogenu I neogenu z wierceń Izbica Kujawska PIG-2, Łanięta PIG-3 I Łanięta PIG-4. Mps. Zakład Geologii Regionalnej PIG-PIB. Warszawa

- Sobolewska A., Żerebiec-Chmielecka A., Kurkiewicz M., 2018 – Baza danych GIS MHP 1:50.000 Pierwszy poziom wodonośny Gostynin (481). PIG-PIB. Warszawa
- Solon J., Borzykowski J., Bidłasik M., Richling A., i in., 2018 - Physico-geographical mesoregions of Poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data. *Geographica Polonica* vol. 91. Iss. 2, Warszawa
- Stępień U., 2017 - Zebranie materiałów geologicznych, geodezyjno - kartograficznych, sejsmologicznych i strukturalnych. Raport 4.3. PIG-PIB
- Stępiak, K., Baryła, R., Wielgosz, P., Kurpiński, G., 2013. Optimal data processing strategy in precise GPS leveling networks. *Acta Geodyn. Geomater.*, Vol 10, No. 4 (172), 443 – 452.
- Straburzyńska R., Trzeciakowska M., 2002 - Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami, arkusz Sompolno – 478. PIG-PIB. Warszawa
- Sztuczyńska i in., 2018 – Sprawozdanie z badań do umowy nr 1010/18. Mps. Zespół Laboratoriów Laboratorium Chemiczne PIG-PIB. Warszawa.
- Szuflicki M., Malon A., Tymiński M. (red.) 2016 - Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych Polsce wg stanu na 31.XII.2015 r. PIG-PIB, Warszawa.
- Szymanko J., Stenzel P., 1973 — Metody geofizyczne w badaniach hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich. Wydaw. Geol., Warszawa
- Tarka R., 1992 – Tectonics of some salt deposits in Poland based on mesostructural analysis. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, t. 137: 1-43. Warszawa.
- Twarogowski J., Bruszeńska B., Czapowski G., Dąbrowska B., Zientara P., 2002 - Kompleksowe badanie budowy geologicznej struktur przypowierzchniowych z zastosowaniem analiz danych geologiczno-geofizycznych na przykładzie rozpoznania wysadu solnego „Damaśławek” i jego otoczenia. *Prz. Geol.*, 50 (12): 116. Warszawa.
- Werner Z., 1974 - Projekt badań rozpoznawczych wysadu solnego Damaśławek, pow. Żnin, woj. bydgoskie. NAG PIG-PIB nr 440/74.
- Włostowski J., Gregosiewicz R., 2002 - Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami, arkusz Gostynin – 481. PIG-PIB. Warszawa
- Wołkowicz, T. Smakowski, S. Speczik (red.), 2011, „Bilans perspektywicznych zasobów kopalin Polski wg stanu na 31.XII 2009 r.”, 1-261. PIG-PIB, Warszawa.
- Wolnowski T., 1993 - Budowa geologiczna wysadu solnego Damaśławka w oparciu o przekroje sejsmiki refleksyjnej. *Mat. Konf. Nauk.-Tech.* „Wykorzystanie wysadów solnych jako magazynów gazu ziemnego na przykładzie podziemnego magazynu gazu Mogilno”, 40-41. Piła, czerwiec 1993.
- Woźny E., 1966 – Fauna oligoceńska z otworu wiertniczego Izbica Kujawska. *Kwart. Geol.* 10, 4. Warszawa
- Zborowski K., Piortowska K., 2008 - Baza danych GIS MHP 1:50.000 Pierwszy poziom wodonośny Izbica Kujawska (479). PIG-PIB. Warszawa
- Zebker, H.A., Villasenor, J., 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 30, 950–959.
- Żelaźniewicz A., Aleksandrowski P., Buła Z., Karnkowski P.H., Konon A., Oszczytko N., Ślęczka A., Żaba J., Żytko K., 2011 – Regionalizacja tektoniczna Polski. Komitet Nauk Geologicznych PAN, Wrocław.



Ziábka Z., Kaczamarczyk E., Kolasa T., Szlegel J., Tutka E., Ślizowska E., Tarczyński R., 1977 – Dokumentacja geologiczna zasobów złoża soli kamiennej ‘WAPNO’ w kategorii A+B+C1+C2, m. Wapno, gm. Wapno, woj. Piła. NAG PIG-PIB nr 3725/363, Warszawa.