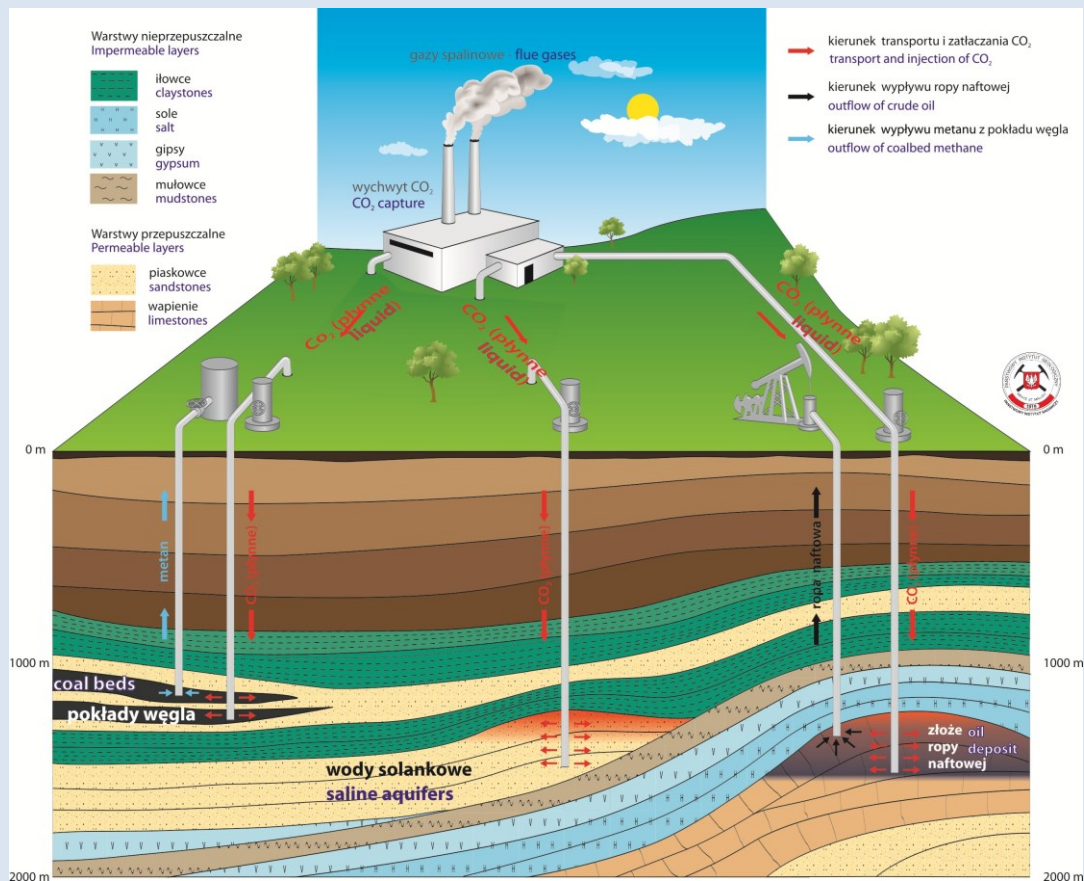


# ROZPOZNANIE FORMACJI I STRUKTUR DO BEZPIECZNEGO GEOLOGICZNEGO SKŁADOWANIA CO<sub>2</sub> WRAZ Z ICH PROGRAMEM MONITOROWANIA (STRESZCZENIE)



MINISTERSTWO  
ŚRODOWISKA

WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA  
ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE  
WYPŁACONE PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ  
OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ

Warszawa 2013



MINISTERSTWO  
ŚRODOWISKA

WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA  
ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE  
WYPŁACONE PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ  
OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ

# ROZPOZNANIE FORMACJI I STRUKTUR DO BEZPIECZNEGO GEOLOGICZNEGO SKŁADOWANIA CO<sub>2</sub> WRAZ Z ICH PROGRAMEM MONITOROWANIA

## *STRESZCZENIE*



Warszawa 2013

**Redakcja opracowania:**

**dr inż. Adam Wójcicki (prace PIG-PIB oraz całość)**

dr hab. inż. Stanisław Nagy, prof. nzw. (prace AGH)

dr hab. inż. Jan Lubaś, prof. nzw. (prace INiG)

dr inż. Jarosław Chećko (prace GIG)

dr hab. inż. Radosław Tarkowski, prof. nzw. (prace IGSMiE PAN)

**Recenzent naukowy:**

dr Jan Szewczyk (opracowanie końcowe - całość)

prof. dr hab. Tadeusz Peryt (współpraca)

**Opracowanie techniczne:**

PIG-PIB

## Spis treści

<b>1. WSTĘP</b> .....	4
<b>Geologiczne składowanie dwutlenku węgla</b> .....	5
<b>2. ZAKRES I ZARYS METODYKI PRAC</b> .....	14
<b>Wybór struktur i szacowanie pojemności składowania</b> .....	20
<b>3. WYNIKI PRAC REGIONALNYCH</b> .....	24
<b>3.1 Poziomy solankowe</b> .....	24
I - Bełchatów .....	26
II - GZW .....	32
III - Mazowsze .....	34
IV - brzeźna strefa Karpat i zapadliska przedkarpackiego .....	47
V - Lubelszczyzna (i Podlasie).....	53
VI - Wielkopolska-Kujawy .....	59
VII - NW Polska .....	73
VIII - Łęba-Bałtyk oraz NE Polska .....	87
Podsumowanie dla formacji i struktur solankowych .....	90
<b>3.2 Złoża węglowodorów</b> .....	100
Podsumowanie dla złóż węglowodorów .....	108
<b>3.3 Pokłady węgla</b> .....	109
Podsumowanie dla pokładów węgla .....	112
<b>4. WYNIKI PRAC SZCZEGÓŁOWYCH</b> .....	113
<b>4.1 Struktury solankowe</b> .....	113
Budziszewice-Zaosie (Bełchatów).....	113
Skoczów-Czechowice (GZW).....	118
Choszczno-Suliszewo (NW Polska) .....	121
Niecka poznańska (Wielkopolska) .....	125
Podsumowanie dla struktur solankowych.....	129
<b>4.2 Struktury naftowe</b> .....	133
Złoże ropy Nosówka .....	133
Złoże gazu Wilków .....	136

Złoże gazu i kondensatu Łąka (wraz z podścielającym poziomem solankowym) ....	139
Podsumowanie dla struktur naftowych .....	142
<b>4.3 Obiekt w pokładach węgla .....</b>	<b>144</b>
Obiekt Pawłowice-Mizerów.....	144
Podsumowanie dla pokładów węgla .....	147
<b>5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....</b>	<b>148</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>152</b>
<b>INDEKS RZECZOWY (DO OPRACOWANIA KOŃCOWEGO) .....</b>	<b>155</b>
<b>WYKONAWCY OPRACOWANIA KOŃCOWEGO .....</b>	<b>159</b>

## 1. WSTĘP

Cele przedsięwzięcia odnosiły się do strategii państwa odnośnie Technologii Czystego Węgla w części nawiązującej do Dyrektywy unijnej o geologicznym składowaniu CO<sub>2</sub> („Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/31/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla oraz zmieniająca dyrektywę Rady 85/337/EWG, Euratom, dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/60/WE, 2001/80/WE, 2004/35/WE, 2006/12/WE, 2008/1/WE i rozporządzenie (WE) nr 1013/2006” – Dyrektywa CCS) oraz zobowiązań naszego kraju wynikających z realizacji protokołu z Kioto i dalszych kroków podjętych przez UE w kierunku redukcji emisji CO<sub>2</sub>.

Cele te dotyczyły w pierwszej kolejności rozpoznawania i udokumentowania formacji i struktur geologicznych odpowiednich do geologicznego składowania CO<sub>2</sub> pochodzącego z dużych, przemysłowych źródeł emisji. Wyniki prac miały być wykorzystane na potrzeby projektów demonstracyjnych CCS elektrowni zeroemisyjnych w horyzoncie czasowym do 2015 roku (w momencie rozpoczęcia prac, w roku 2008, były planowane dwa takie projekty – PGE Bełchatów i PKE & ZAK Kędzierzyn; następnie realizowany był tylko projekt PGE), podmiotów ubiegających się o pozwolenie na budowę nowych bloków energetycznych „CCS ready”, gdzie wymagane jest wskazanie możliwych miejsc składowania CO<sub>2</sub> i wstępne studia wykonalności, komercyjnych instalacji zeroemisyjnych CCS planowanych do budowy po roku 2020+, oraz przez jednostki naukowo - badawcze.

Przedmiotem niniejszego przedsięwzięcia były następujące zagadnienia:

- Podsumowanie dotychczasowego stanu wiedzy dotyczącego geologicznej sekwestracji CO<sub>2</sub>, z uwzględnieniem dotychczasowych prac i badań (w Polsce, w Europie i na świecie);
- Doradztwo dla Ministerstwa Środowiska w zakresie implementacji Dyrektywy CCS;
- Rozpoznawanie formacji i struktur geologicznych odpowiednich do geologicznego składowania CO<sub>2</sub> pochodzącego z przemysłowych źródeł emisji wraz z oszacowaniem krajowych potrzeb i możliwości geologicznego składowania CO<sub>2</sub>;
- Integracja wyników oraz planów badań i prac w zakresie geologicznej sekwestracji CO<sub>2</sub> prowadzonych w Polsce oraz współpraca z europejskimi służbami geologicznymi i innymi podmiotami w Europie i na świecie liczącymi się w tej dziedzinie;
- Opracowanie wielowariantowych (alternatywnych) scenariuszy geologicznej sekwestracji, CO<sub>2</sub> na potrzeby projektów demonstracyjnych CCS elektrowni o obniżonej emisji CO<sub>2</sub> i ewentualnie innych możliwych instalacji CCS;
- Opracowanie programów monitoringu dla wytypowanych struktur geologicznych.

## Geologiczne składowanie dwutlenku węgla

(Adam Wójcicki)

Zatłaczanie CO<sub>2</sub> do górotworu stosuje się od blisko 40 lat w przemyśle naftowym, np. w zabiegach wspomagania wydobycia ropy naftowej (Lake & Walsh, 2008) lub gazu ziemnego. Nowe jest raczej połączenie wychwytywania CO<sub>2</sub> pochodzącego ze spalania paliw kopalnych w elektrowniach lub innych dużych instalacjach przemysłowych z jego transportem celem składowania w formacjach i strukturach geologicznych o odpowiedniej pojemności (stąd skrót **CCS** – ang. Carbon Capture and Storage, czyli wychwytywanie i składowanie dwutlenku węgla).

Dwutlenek węgla występuje w "złożach" albo naturalnych „składowiskach” liczących sobie, podobnie jak złoża ropy naftowej i gazu ziemnego, miliony lat, które mogą zawierać dziesiątki, a nawet setki milionów ton CO<sub>2</sub>, i są niekiedy eksploatowane dla celów komercyjnych (np. na potrzeby przemysłu spożywczego). Jako przykłady z Europy można podać złoża Vichy, St. Parize i Montmiral we Francji, Vorrderhoehn w Niemczech, Florina w Grecji, Latera we Włoszech i Mihalyi na Węgrzech. Największe takie złoża, zawierające setki milionów ton dwutlenku węgla, występują w Stanach Zjednoczonych: McElmo Dome, Sheep Mt., Bravo Dome, Jackson Dome, Labarge i StJohns-Springville (raport IPCC SRCCS, 2007). Świadczy to o trwałości naturalnych "składowisk" dwutlenku węgla, które istnieją od milionów lat.

Dzięki obecnemu stanowi wiedzy w zakresie geologii złożowej wiemy, jakie struktury geologiczne mogą być odpowiednie do składowania antropogenicznego dwutlenku węgla. Przede wszystkim muszą to być naturalne pułapki, co oznacza układ warstw geologicznych uniemożliwiający ucieczkę zatłoczonego medium – najczęściej są to podniesienia strukturalne, tzw. antykliny. Raport IPCC SRCCS, 2007 przedstawia trzy zasadnicze typy struktur geologicznych (opcje geologicznego składowania dwutlenku węgla) odpowiednich do tego celu, w kolejności ich potencjału geologicznego składowania CO<sub>2</sub> (sytuacja ta dotyczy także naszego kraju – Wójcicki, 2008):

- Głębokie poziomy wodonośne-solankowe (głębokość > 800-1000 m), gdzie kolektorami (skałami zbiornikowymi, zbiornikami) są przeważnie piaskowce. Duże struktury tego typu występują także w Polsce, a ich potencjał składowania jest ogromny, wystarczający do "pomieszczenia" emisji największych elektrowni przez cały okres życia instalacji (sięgający nawet setek milionów ton dla pojedynczych struktur). Niestety, ponieważ nie były one przedmiotem poszukiwań za ropą naftową, gazem czy innymi surowcami, często są one słabo rozpoznane. Ponadto praktycznie nie ma dla tych struktur innego zastosowania, a ewentualne konflikty interesów w związku z ich wykorzystaniem

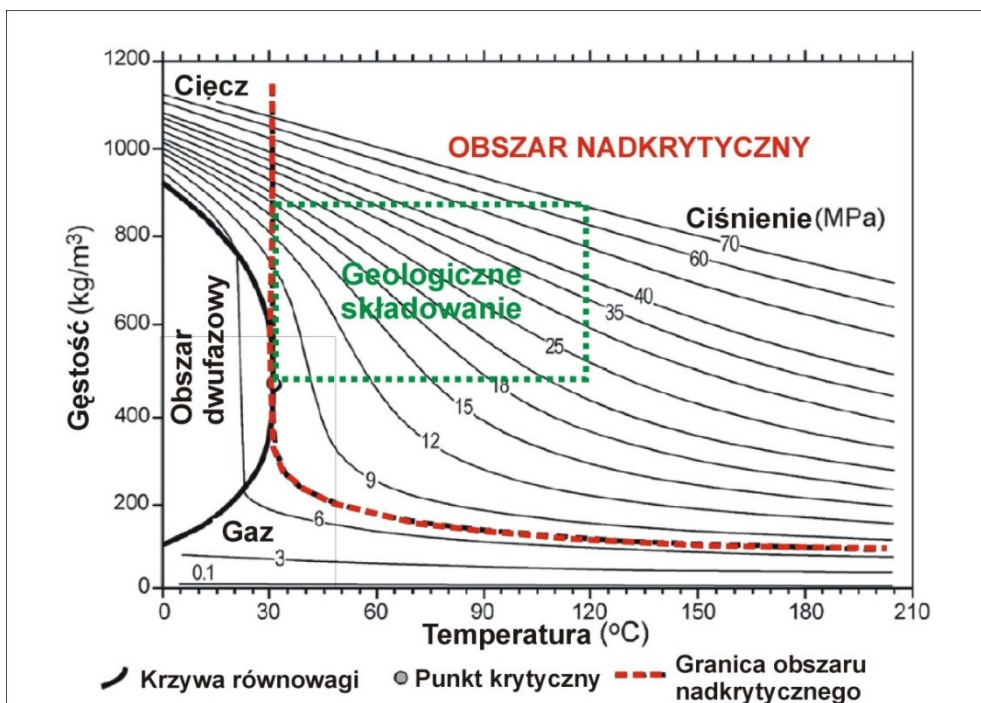
mogą zachodzić praktycznie jedynie w przypadku planowanego w tym samym miejscu, co geologiczne składowanie CO<sub>2</sub>, zakładu geotermalnego.

- Wyeksploatowane całkowicie lub częściowo złoża ropy i gazu. Struktury te są generalnie dobrze rozpoznane i uważane za bezpieczne zbiorniki do składowania dwutlenku węgla, ponieważ utrzymały one ropę naftową, gaz, a niekiedy i towarzyszący im CO<sub>2</sub> przez miliony lat. W przypadku ropy standardowe techniki wydobycia pozostawiają większość zasobów w złożu i stąd zatłaczanie dwutlenku węgla jest stosowane celem wspomaganie wydobycia ropy (EOR – Enhanced Oil Recovery) albo gazu (EGR – Enhanced Gas Recovery), co daje wymierny efekt ekonomiczny. Technologia ta jest szczególnie rozwinięta w USA, gdzie ok. 3000 km rurociągów jest wykorzystywanych do przesyłania CO<sub>2</sub> celem wspomaganie procesów wydobycia ropy naftowej. W Polsce takie złoża są przeważnie zbyt małe jak na potrzeby elektrowni i innych dużych emitentów, natomiast niektóre złoża mogą być odpowiednie na potrzeby emitentów średniej wielkości.
- Głębokie, nieeksploatowane pokłady węgla, zawierające metan. Dwutlenek węgla zatłoczony do tych pokładów jest absorbowany lepiej przez węgiel niż metan i w rezultacie uwalniany jest naturalny gaz wysokometanowy. Efektywność tego sposobu produkcji metanu z pokładów węgla jest znacznie wyższa niż w przypadku klasycznych sposobów i stąd mówimy o wspomaganie wydobycia (CO<sub>2</sub>-ECBMR - Enhanced Coalbed Methane Recovery), która ma istotne znaczenie ekonomiczne. Szczególnie korzystne warunki geologiczno-złożowe występują w basenie węglowym San Juan w Nowym Meksyku, USA, gdzie technologia ta została wdrożona w skali niedużych projektów demonstracyjnych (Davis et al., 2004). W Polsce można praktycznie brać pod uwagę jedynie pokłady na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, lecz w naszych warunkach geologicznych (odmiennych od tych w USA) technologia ta jest obecnie zbyt niedojrzała z punktu widzenia komercyjnego zastosowania i wiążą się z nią konflikty interesów (możliwość wydobycia/gazyfikacji głębokich, aktualnie nieeksploatowanych pokładów węgla).

Dwutlenek węgla w warunkach normalnych jest gazem o gęstości około 2 kg/m<sup>3</sup>. W głębszych warstwach geologicznych jego własności ulegają znacznym zmianom, zależnie od panującego tam ciśnienia i temperatury. Z dotychczasowych doświadczeń wiadomo, że dla geologicznego składowania najkorzystniejsza jest wysokogęstościowa faza nadkrytyczna (**Fig. 1\_1**), ewentualnie ciekła (ciecz w warunkach ciśnienia nadkrytycznego > 7.38 MPa), ale w żadnym wypadku nie może być to obszar dwufazowy czy faza gazowa, gdyż wtedy dwutlenek węgla charakteryzuje się znacznie większą lotnością i mobilnością.

Dla temperatury 31.1 °C i ciśnienia 7.38 MPa wyróżniamy na diagramie (**Fig. 1\_1**) tzw. punkt krytyczny, gdzie spotykają się cztery stany skupienia CO<sub>2</sub>.



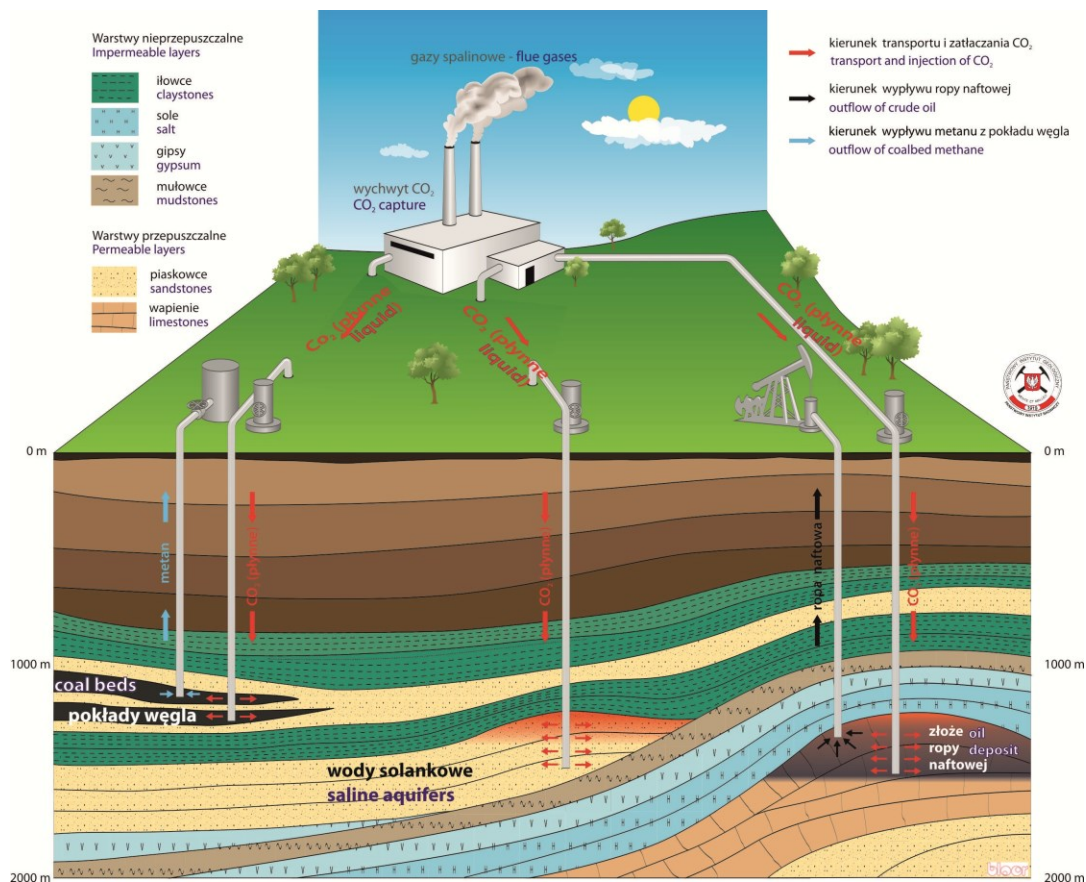


**Fig. 1\_1** Własności fizyczne dwutlenku węgla istotne dla geologicznego składowania (na podstawie raportu IPCC SRCCS, 2007).

Zależnie od temperatury i ciśnienia złożowego, jakie występują w kolektorze (zbiorniku) przyjmuje się, że minimalna głębokość występowania poziomu wodonośnego albo złoża węglowodorów, odpowiednich do geologicznego składowania CO<sub>2</sub>, wynosi 800-1000 metrów, gdyż na takiej głębokości gęstość zatłoczonego dwutlenku węgla jest setki razy większa niż w warunkach normalnych (tzn. występuje on w fazie nadkrytycznej, albo ewentualnie ciekłej, jeśli lokalny gradient geotermiczny jest niski, z tym, że preferujemy fazę nadkrytyczną; w obu przypadkach ciśnienie przekracza wartość 7,38 MPa). W przypadku pokładów węgla kryterium to może być również stosowane, choć rozpatruje się też pokłady nieco płytsze, dla których eksploatacja górnicza jest nieopłacalna (Chiny). Głębokość maksymalna jest związana z właściwościami zbiornikowymi kolektora – na ogół przyjmuje się, że dla głębokości większej niż 3000 metrów zatłaczanie jest nieopłacalne (w przypadku sčerpanych złóż gazu, dla których możemy wykorzystać istniejące otwory, dolną granicę geologicznego składowania określają jedynie właściwości zbiornikowe – w niektórych przypadkach głębokość ta może być nawet większa od 3000 metrów). Oczywiście przy gorszych właściwościach zbiornikowych (w tym przepuszczalności) głębokość ta będzie odpowiednio mniejsza, nawet do 2000 metrów.

Dla typowych wartości gradientu geotermicznego (tj. wzrostu temperatury w głębi Ziemi wraz z głębokością), omawiany przedział głębokości odpowiada z grubsza temperaturom w

kolektorze od 30 do 120 °C (Fig. 1\_1). Gęstość dwutlenku węgla wynosi w takim przypadku od 500 do 900 kg/m<sup>3</sup>, zależnie od ciśnienia złożowego. Należy przy tym zauważyć, że prostokąt odpowiadający tym przedziałom obu parametrów fizycznych, zaznaczony na Fig. 1\_1, ma charakter czysto orientacyjny, często z uwagi na znaczące rozbieżności ciśnienia w złożu i temperatury w obrębie struktur złożowych występujących na podobnych głębokościach.



**Fig. 1\_2** Opcje geologicznego składowania CO<sub>2</sub> – najważniejsza opcja to poziomy wodonośne solankowe, druga to złoża węglowodorów (ropa naftowa i/lub gaz ziemny), trzecia – głębokie pokłady węgla zawierające metan (PIG-PIB, 2009 – wystawa „Klimat a węgiel”).

Podsumowując, struktury złożowe obejmujące albo poziomy wodonośne solankowe albo szcerpane złoża węglowodorów, a także głębokie, nieeksploatowane pokłady węgla zawierające metan (w Polsce w mniejszym stopniu), mogą być odpowiednie do geologicznego składowania antropogenicznego dwutlenku węgla (Fig. 1\_2). W przypadku struktur solankowych kolektory powinny występować w orientacyjnym przedziale głębokości od 800-1000 m do 2000-3000 m (zależnie od warunków geologiczno-

złożowych). Oczywiście nie jest to jedyne kryterium. Bardzo istotne są parametry zbiornikowe kolektora (miąższość, przepuszczalność, porowatość albo szczelinowatość), a także - jakość uszczelnienia, tzn. integralność i miąższość nadkładu (zob. też następny rozdział).

W przypadku szcerp(yw)anych złóż węglowodorów większość z tych kryteriów jest z definicji spełnionych, gdyż, aby była możliwa eksploatacja złoża, musi ono mieć lokalnie dobre własności zbiornikowe, w tym porowatość, przepuszczalność i miąższość kolektora. Węglowodorom na ogół towarzyszy solanka (wody podścielające), a obecność i jakość nadkładu uszczelniającego jest w ogóle warunkiem istnienia złoża. Natomiast w Polsce nie występują złoża na tyle duże, aby można było lokować w pojedynczym złożu węglowodorów emisje największych elektrowni – jest to możliwe jedynie dla mniejszych zakładów przemysłowych i ewentualnie (nie dużych) pojedynczych bloków największych elektrowni.

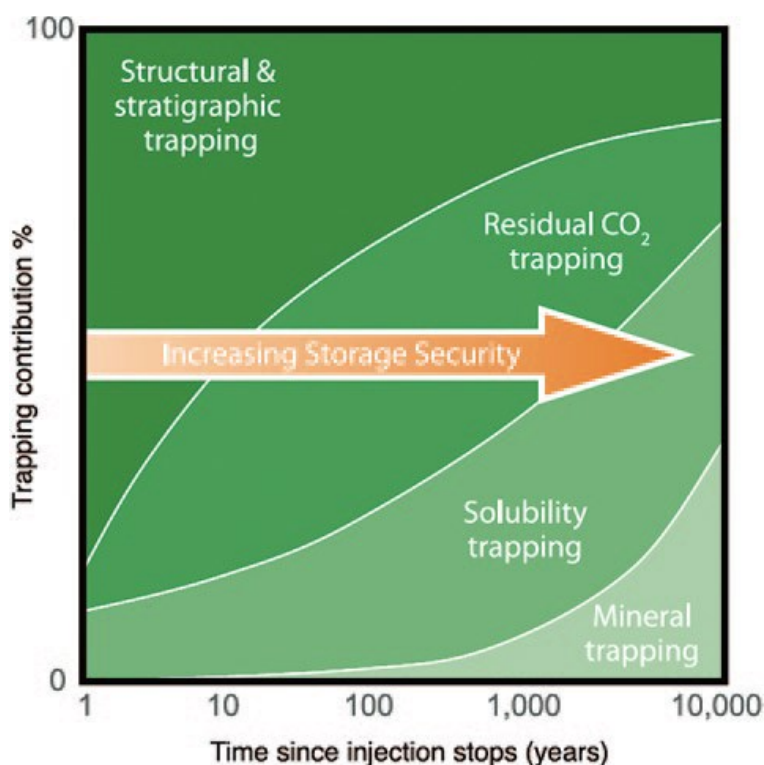
Składowanie dwutlenku węgla w poziomach wodonośnych i szcerpanych złożach węglowodorów wiąże się z następującymi mechanizmami fizykochemicznymi (Chadwick et al., 2008; raport SRCCS IPCC, 2007 - **Fig. 1\_3**):

- przepływ CO<sub>2</sub> wskutek wzrostu ciśnienia w kolektorze spowodowanego zatłaczaniem, wskutek naturalnego gradientu hydraulicznego w kolektorze oraz wyporność wskutek różnicy gęstości CO<sub>2</sub> i wód złożowych (prawo Archimedes); pułapkowanie strukturalno-stratygraficzne (*structural & stratigraphic trapping*),
- uwięzienie CO<sub>2</sub> na ziarnach skały wewnątrz porów (*residual CO<sub>2</sub> trapping*),
- rozpuszczanie CO<sub>2</sub> w wodach złożowych (*solubility trapping*),
- wiązanie chemiczne CO<sub>2</sub> z substancjami mineralnymi (*mineral trapping*),
- dyfuzja i dyspersja CO<sub>2</sub> (niezaznaczone na **Fig. 1\_3**; trwa miliony lat i obejmuje znikomy procent zatłoczonego CO<sub>2</sub>).

W praktyce przy obliczaniu pojemności składowania CO<sub>2</sub> najczęściej bierze się pod uwagę pierwszy mechanizm, z uwagi na fakt, że pozostałe zachodzą w ciągu znacznie dłuższego okresu czasu i ich udział jest znacznie niższy. W okresie funkcjonowania elektrowni wykorzystującej CCS (i niedługo po zaprzestaniu zatłaczania CO<sub>2</sub>), czyli przez dziesiątki lat, jedynie trzeci mechanizm - rozpuszczanie w wodach złożowych - może podnieść zauważalnie efektywność sekwestracji. Szacuje się, że mechanizm ten daje około 5 – 20 % więcej pojemności składowania w poziomach wodonośnych-solankowych (dla wód złożowych o dużym zasoleniu, tzn. o zawartości soli sięgającej setek g/l, daje mniej niż dla wód mniej zasolonych, tzn. o zawartości soli sięgającej dziesiątków g/l). Uwięzienie CO<sub>2</sub> na

ziarnach skały wewnątrz porów ma znaczący udział dopiero wiele lat po zaprzestaniu zatłaczania. Pozostałe mechanizmy (wiązanie z substancjami mineralnymi, dyfuzja i dyspersja) dają przyczynki o kolejne rzędy wielkości mniejsze, w coraz to dłuższych okresach czasu.

Należy przy tym nadmienić, że niemałe ilości dwutlenku węgla rozpuszczone są w wodach złożowych (tzn. występujące tam w sposób naturalny, obok innych substancji, w tym głównie chlorku sodu). Na przykład dla zbiorników Niżu Polskiego w przedziale głębokości 1-2 km, wg informacji zgromadzonych w atlasie hydrogeologicznym (Bojarski, 1996), zawartość CO<sub>2</sub> w solance jest średnio około 0.5 g/l, co daje w skali całego Niżu Polskiego wiele miliardów ton dwutlenku węgla. Natomiast w skałach i minerałach węglanowych w tym przedziale głębokości związana jest daleko większa ilość dwutlenku węgla. Z kolei przy samej powierzchni terenu, w glebie (powietrzu glebowym) stężenie dwutlenku węgla przekracza dziesiątki i setki razy atmosferyczne (IPCC SRCCS, 2007) i podlega znacznym fluktuacjom sezonowym wywołanym przez procesy biochemiczne (wegetacja, działalność mikroorganizmów, itd).

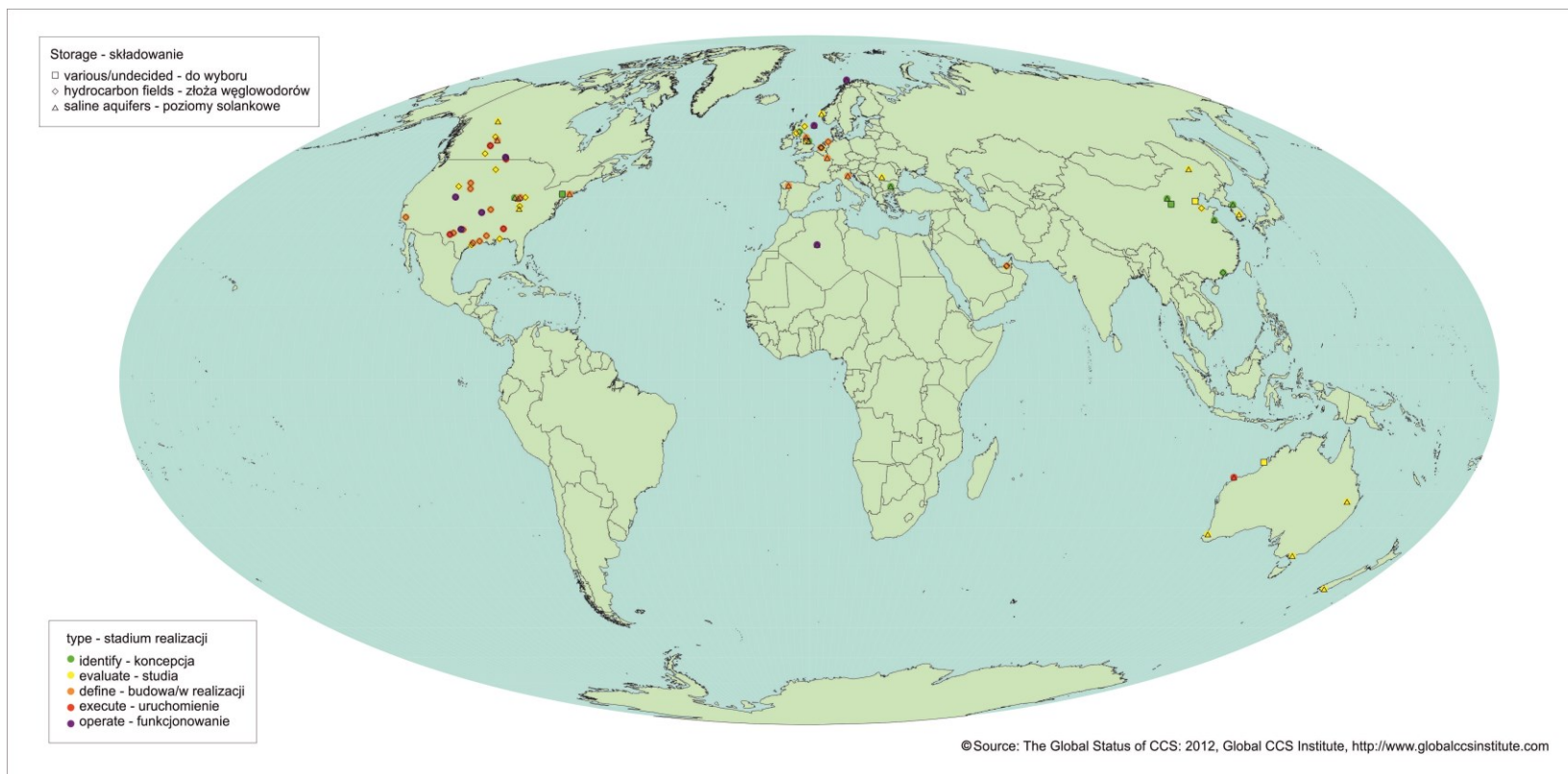


**Fig. 1\_3** Ewolucja mechanizmów pułapkowania CO<sub>2</sub>– udział procentowy (oś pionowa) z upływem czasu w latach po zakończeniu zatłaczania (raport IPCC SRCCS, 2007); patrz objaśnienia powyżej.

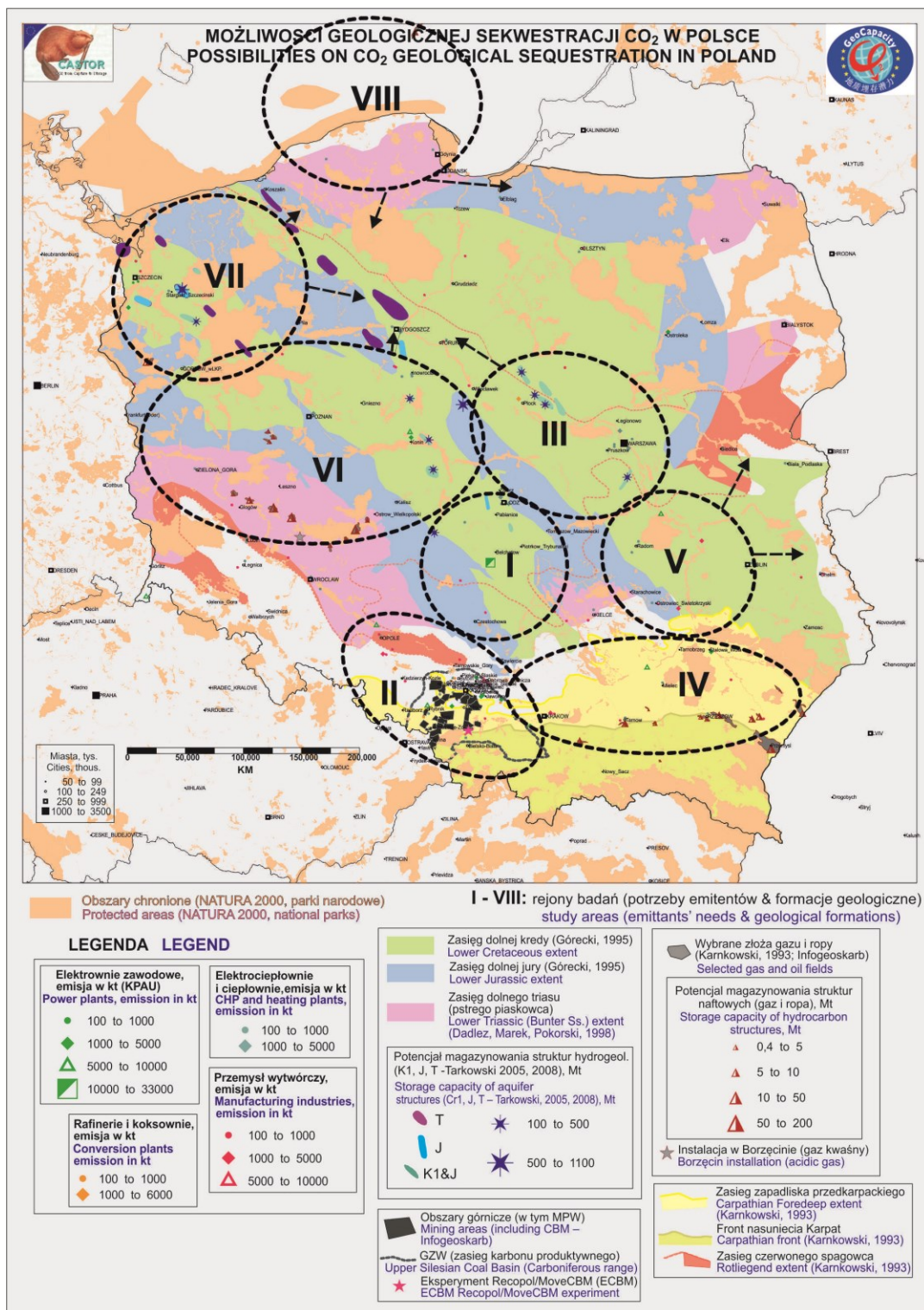
Jeśli chodzi o postępy CCS na świecie, to według Global CCS Institute w roku 2012 zinwentaryzowano ponad 70 dużych projektów (zatłaczanie rzędu 1 mln ton rocznie), znajdujących się w różnym stadium realizacji (Fig. 1\_4). Z tego w pełni funkcjonuje 8 (5 to projekty EOR - w tym Weyburn-Midale, a 3 obejmują składowanie w poziomach solankowych - Sleipner i Snohvit pod dnem Morza Północnego i Barentsa oraz In Salah na Saharze), a 7 znajduje się w fazie rozruchu (5 projektów EOR i dwa w poziomach solankowych - w USA i Australii na lądzie). W Polsce realizowana była wstępna faza projektu demo CCS PGE Bełchatów (2009-12; anulowany w 2013 roku), jako jednego z 6 europejskich projektów finansowanych ze środków EEPR (Europejskiego Programu Naprawy Gospodarki) oraz planowano realizację projektu poligeneracyjnego w Kędzierzynie (do 2010 roku).

Ponadto w Europie i na świecie funkcjonuje szereg projektów pilotażowego zatłaczania CO<sub>2</sub> do struktur geologicznych na lądzie (np. Ketzin w Niemczech, Lacq we Francji, Otway w Australii; GCCSI, 2012).

Doświadczenia polskie w zakresie projektów pilotażowych obejmują zatłaczanie gazu kwaśnego (60% CO<sub>2</sub>, 15% H<sub>2</sub>S, reszta to cięższe węglowodory; w latach 1995-2010 zatłoczono kilka tysięcy ton gazu kwaśnego) będącego produktem oczyszczania gazu ziemnego na złożu Borzęcin koło Trzebnicy na Dolnym Śląsku (Lubaś & Szott, 2010) oraz eksperyment zatłaczania kilkuset ton CO<sub>2</sub> do pokładów węgla, wraz z kompleksowym monitoringiem (lata 2004-2008), w rejonie Kaniowa koło Bielska-Białej na Górnym Śląsku (Jura et al., 2007; Pagnier et al., 2003).



**Fig. 1\_4** Status CCS na świecie - duże projekty zintegrowane (zatlaczanie CO<sub>2</sub> w ilości rzędu 1 mln ton rocznie) wg Global CCS Institute 2012, uaktualnione.



**Fig. 1\_5** Stan wiedzy na temat możliwości geologicznego składowania CO<sub>2</sub> w Polsce w momencie rozpoczęcia prac.

## 2. ZAKRES I ZARYS METODYKI PRAC

(Adam Wójcicki)

Zakres prac przewidzianych umową zasadniczo jest złożony z dwóch wzajemnie zalegających się segmentów (I – regionalnego i II - szczegółowego; patrz też **Fig. 2 1 i 2**).

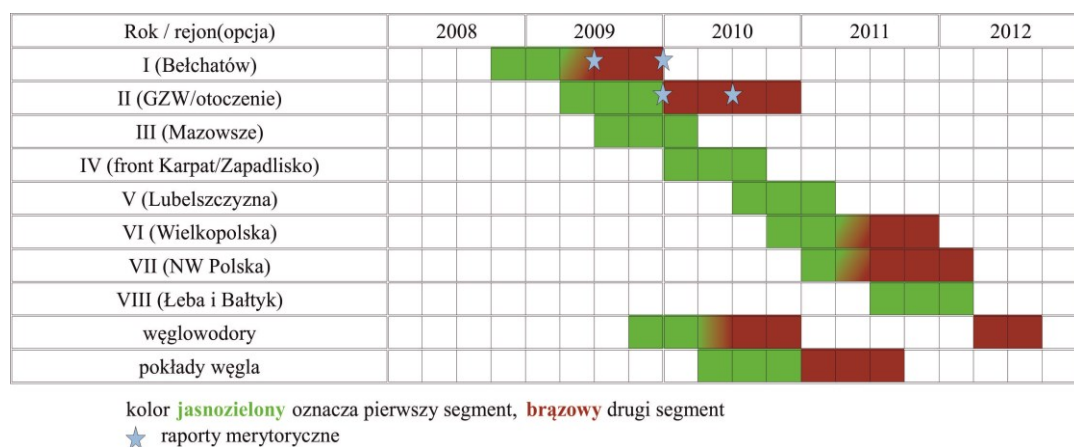
Z uwagi na wielkość, cele, stopień skomplikowania i udział w nim szeregu podmiotów reprezentujących rozmaite środowiska, mających pewne doświadczenia odnośnie zagadnień geologicznego składowania CO<sub>2</sub> i pokrewnych, niniejsze przedsięwzięcie było przedmiotem długotrwałych konsultacji Zamawiającego (Ministerstwa Środowiska; przy czym jego realizacją były też zainteresowane firmy energetyczne, związane z Ministerstwem Gospodarki). Jego koncepcja ulegała kilkakrotnym zmianom, w związku z ówczesnymi potrzebami dwóch projektów demonstracyjnych (PGE Bełchatów i PKE-ZAK Kędzierzyn) wspieranych wtedy przez rząd Polski.

Segment I objął prace dla całego obszaru Polski (**Fig. 1\_5**), w szczególności analizy dla poziomów wodonośnych solankowych w ośmiu rejonach kraju (oznaczone cyframi rzymskimi I-VIII na **Fig. 1\_5**; formacje permsko-mezozoiczne w czterech rejonach: Bełchatowa, Warszawy, Wielkopolski-Kujaw i NW Polski; formacje paleozoiku GZW i jego otoczenia; formacje paleozoiku Lubelszczyzny (i Podlasia); formacje paleozoiku wyniesienia Łeby wraz z sąsiednim obszarem polskiej strefy ekonomicznej Bałtyku; formacje mezozoiku i paleozoiku podłoża brzeżnej strefy Karpat i zapadliska przedkarpacciego) oraz dwóch pozostałych opcji geologicznego składowania CO<sub>2</sub> (sczerpane i nieekonomiczne złoża węglowodorów, głównie w zachodniej i SE Polsce; głębokie nieeksploatowane pokłady węgla, głównie w GZW).

Segment II objął opracowania wielowariantowych (alternatywnych) scenariuszy geologicznej sekwestracji CO<sub>2</sub> dla potencjalnych podziemnych składowisk (położonych w odległości do 80 km od istniejącej albo planowanej instalacji energetycznej) w poziomach wodonośnych solankowych – w rejonie Bełchatowa, rejonie Górnego Śląska oraz w rejonie Wielkopolski i NW Polski; w wyeksploatowanych złożach gazu ziemnego i ropy naftowej – złoża gazu w Polsce zachodniej oraz złoża ropy i złoża gazu w SE części Polski, a także obiektu w pokładach węgla w południowej części Górnego Śląska; w sumie 8 scenariuszy (patrz też (**Fig. 2\_3**, gdzie zaznaczono lokalizację obiektów, dla których realizowano prace szczegółowe w ramach II Segmentu, a także inne wytypowane struktury i formacje geologiczne). W pierwszej kolejności były realizowane dwa scenariusze na potrzeby demonstracyjnych zeroemisyjnych instalacji energetycznych, których projekty złożyły w roku 2008 do Ministerstwa Gospodarki firmy energetyczne (BOT/PGE Elektrownia Bełchatów S.A. dla rejonu Bełchatowa i Południowy Koncern Energetyczny S.A. dla rejonu Górnego Śląska).



Zakres prac przewidziany dla II Segmentu odnosił się do wymogów Dyrektywy w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla. Nakłada ona bardzo ostre wymogi odnośnie udokumentowania możliwości wykorzystania formacji czy struktur geologicznych na potencjalne składowiska (konstrukcja modeli statycznych, dynamicznych, analizy ryzyka, plany monitoringu), nie tylko na potrzeby uzyskania koncesji na składowanie, ale nawet na rozpoznawanie. Zgodnie Aneksem nr 1 do Dyrektywy, dla potencjalnego składowiska musi być wykonana analiza wykorzystująca wyniki nowych badań potencjalnego składowiska i/lub wszelkie dostępne materiały archiwalne, określająca w szczególności wpływ geologicznego składowania CO<sub>2</sub> na środowisko.



**Fig. 2\_1** Orientacyjny harmonogram przedsięwzięcia.

Zgodnie z orientacyjnym harmonogramem (**Fig. 2\_1**) realizowano poszczególne rejony i opcje I Segmentu. W pierwszej połowie realizacji przedsięwzięcia wymagane były, z uwagi na ówczesne potrzeby krajowych projektów demo (Bełchatów, Kędzierzyn), raporty merytoryczne (z I i II Segmentu) możliwe do wykorzystania przez wspomniane projekty, które ubiegały się, bądź zamierzały się ubiegać o środki unijne. Projekt demo CCS PGE Bełchatów był realizowany do końca niniejszego przedsięwzięcia (z uwagi na problemy finansowe, zarząd PGE próbował na wszelkie sposoby wycofać się z projektu, co nastąpiło w końcu w marcu 2013 roku) i na podstawie umowy o współpracy dostarczano PGE wszelkie potrzebne im informacje i materiały.

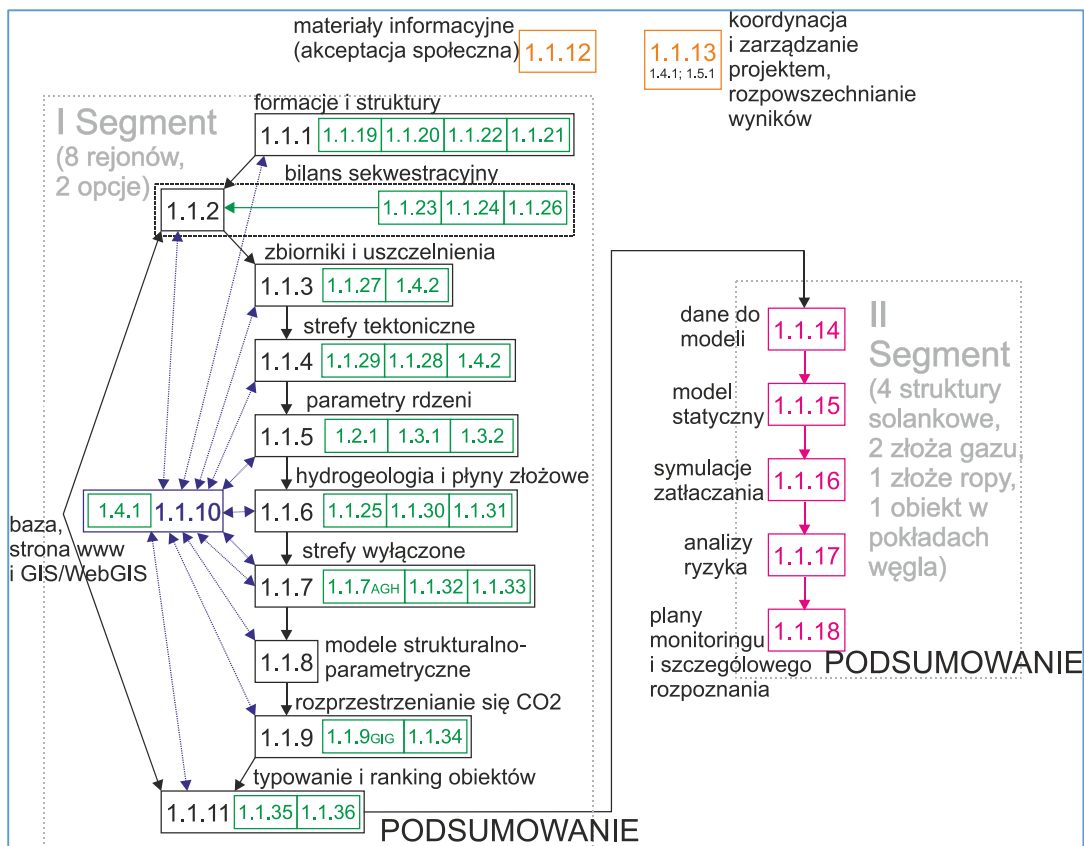


Fig. 2\_2 Struktura przedsięwzięcia.

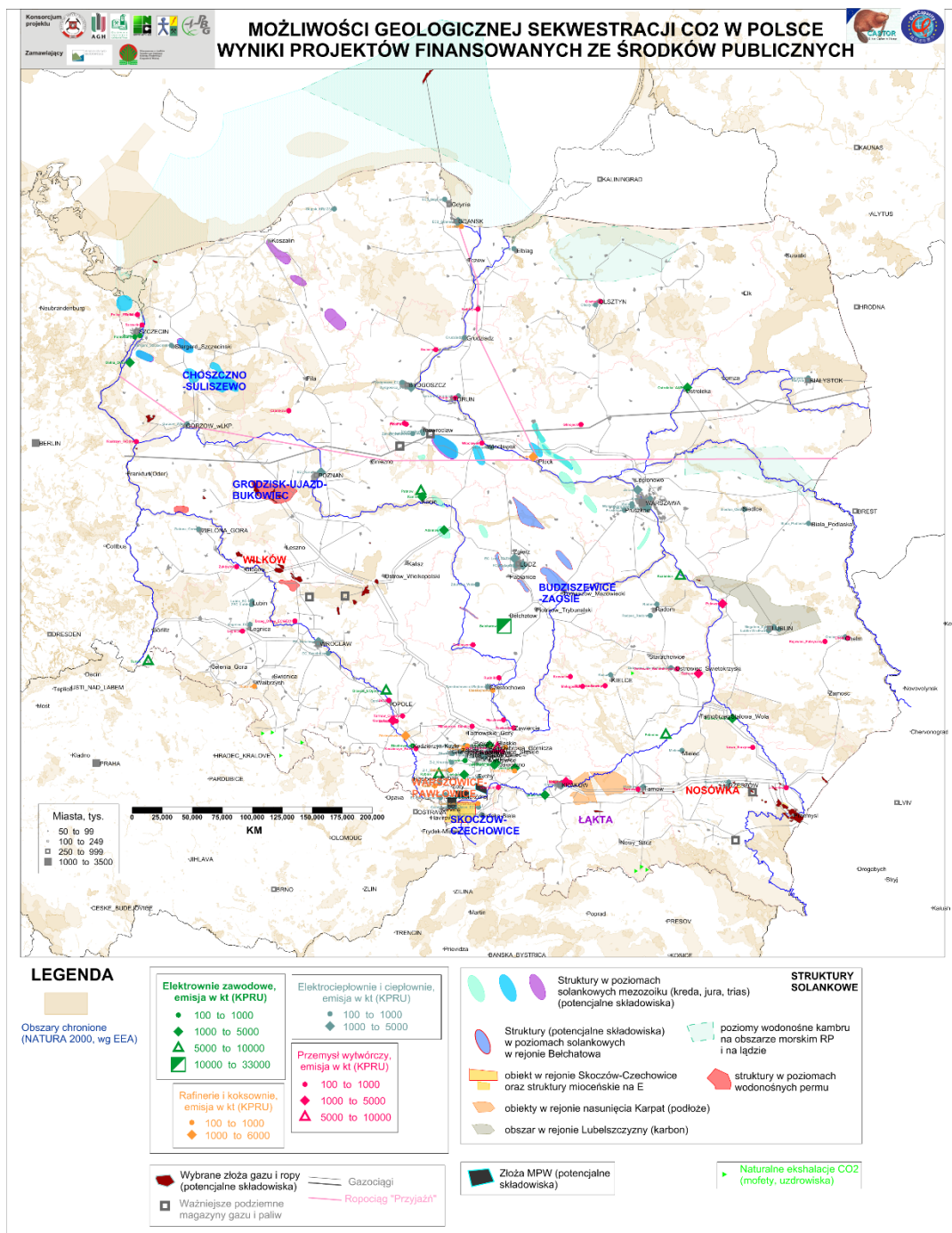
Na Fig. 2\_2 przedstawiono strukturę przedsięwzięcia, z której wynikają ogólne zasady metodyki postępowania w ramach I i II segmentu oraz pozostałych zagadnień, obejmującą następujące zagadnienia:

- 1.1.1 Inwentaryzacja aktualnego stanu wiedzy odnośnie formacji i struktur możliwych do wykorzystania do sekwestracji CO<sub>2</sub>, wstępna weryfikacja (dla poziomów solankowych - kryteria CO<sub>2</sub>STORE podane poniżej, podobnie jak założenia dla pozostałych opcji składowania). W przypadku poziomów solankowych punktem startowym były tu i w następnym punkcie, prace IGSMiE (1.1.19, 1.1.23).
- 1.1.2 Bilans sekwestracyjny dla Polski (aktualizacja/weryfikacja stanu początkowego – 1.1.1 w miarę gromadzenia nowych informacji, pochodzących z analiz wykonanych w ramach niniejszego przedsięwzięcia, z tym, że dopiero zakończenie I segmentu dla danego rejonu/opcji nadawało mu ostateczny kształt).
- 1.1.3 Facje – zbiorniki i uszczelnienia. Objęło to korelacje otworów dla perspektywicznych formacji i struktur (wybranych w 1.1.1), interpretację danych

sejsmicznych (korelacje horyzontów, w niewielkim zakresie analizy atrybutów, z uwagi na słabą jakość przeważającej części dostępnych danych sejsmicznych).

- 1.1.4 Strefy tektoniczne – analiza szczelności, tzn. odpowiedź na pytanie czy strefy uskokowe mogą być drogą ucieczki CO<sub>2</sub> poza dany kompleks składowania.
- 1.1.5 Parametry petrologiczne (skład mineralogiczny, w tym cementów/matrycy skalnej) i petrofizyczne (porowatości, przepuszczalności oraz analizy zintegrowane – lepkości, wypierania solanki z modelu złoża). Wykonano dość obszerne analizy laboratoryjne na dostępnych próbkach rdzeni i zebrano przydatne materiały archiwalne (na potrzeby tego przedsięwzięcia i ew. dalszych badań).
- 1.1.6 Parametry hydrogeologiczne, w tym skład wód złożowych – np. udział poszczególnych jonów, jako wskaźnik, co do możliwości kontaktu solanek w wodami słodkimi (np. czy infiltracja w obrębie struktury miała miejsce współcześnie, czy wiele tysięcy lat temu, czy też dochodziło do mieszania się wód słodkich i solanek w ramach przepływów w regionalnym zbiorniku), zwłaszcza w przypadku GZWP, mineralizacja wód złożowych. Ponadto punkt ten obejmuje zagadnienia reaktywności płynów złożowych/CO<sub>2</sub> ze skałą.
- 1.1.7 Jest to pewnego rodzaju podsumowanie, gdzie analizuje się informacje czy z jakiegoś powodu istnieją przeciwwskazania do wykorzystania formacji czy struktury do sekwestracji (warunki geologiczno-złożowe, obszary chronione, GZWP, koncesje i eksploatacja zasobów górotworu, sieć osadnicza). Występowanie starych otworów wymaga z kolei oceny, czy konieczne będzie ich ponowne zacementowanie (ale jak nie ma żadnych otworów na strukturze to niewiele o niej wiemy).
- 1.1.8 Modele strukturalno-parametryczne formacji dla poszczególnych rejonów – zależnie od dostępnych danych, ich jakości i zasobów ludzkich, konstruowano modele o różnym stopniu złożoności.
- 1.1.9 Modele hydrogeologiczne/regionalnego rozptywu CO<sub>2</sub> - zależnie od dostępnych danych i ich jakości konstruowano modele o różnym stopniu złożoności. Dla przykładu, na obszarze Polski północnej (pogranicze rejonu VII i VIII) ograniczono się do konstrukcji modelu triasu dolnego, zbiornik kambryjski zaś na lądzie był dotychczas bardzo słabo rozpoznany sejsmiką, co powoli zmienia się w związku z poszukiwaniami węglowodorów niekonwencjonalnych.
- 1.1.10 Baza danych oraz aplikacja GIS/WebGIS (ostatnia na stronie projektu). Baza była wykorzystywana na potrzeby wykonawców przedsięwzięcia.

- 1.1.11 Typowanie i ranking struktur - które struktury nadawałyby się lepiej, które gorzej, a które wcale, na potencjalne składowiska CO<sub>2</sub>(w świetle aktualnej wiedzy) i dlaczego. Punkt ten zawiera też podsumowanie wyników całego I Segmentu.
- 1.1.12 Przygotowanie materiałów informacyjnych na potrzeby akceptacji społecznej CCS, udział w seminariach z przedstawicielami społeczności lokalnych.
- 1.1.13 Koordynacja, zarządzanie projektem, rozpowszechnianie wyników, w tym kontakty podmiotami badawczo-rozwojowymi w kraju i zagranicą oraz z partnerami przemysłowymi, konsultacje z MŚ w sprawie implementacji Dyrektywy CCS, itp.
- 1.1.14 (II Segment) Zebranie danych dla składowiska i jego otoczenia, czyli tzw. kompleksu składowania, istotnych dla konstrukcji szczegółowych modeli geologicznych i symulacji zatłaczania.
- 1.1.15 Statyczna charakterystyka kompleksu składowania, czyli budowa jego trójwymiarowego, strukturalno-parametrycznego modelu geologicznego zbiorników, nadkładu/uszczelnień i obszarów połączonych hydraulicznie (model statyczny; analogia 14 i 15 do zakresu punktów 1.1.1-1.1.8 dla prac regionalnych).
- 1.1.16 Komputerowe modele (symulacje) dynamicznych procesów zatłaczania dwutlenku węgla do składowiska z wykorzystaniem ww. modeli statycznych, charakteryzujących w perspektywie krótko i długoterminowej efektywność i bezpieczeństwo składowania (lokowania i wiązania) dwutlenku węgla w zbiornikach.
- 1.1.17 Zagadnienia zarządzania ryzykiem geologicznego składowania CO<sub>2</sub>, w tym wrażliwości zmian poszczególnych parametrów wejściowych ww. symulacji na ich wyniki, ocena ryzyka geologicznego składowania dwutlenku węgla i związanych z tym zagrożeń i skutków dla ludzi i środowiska, wraz z podaniem scenariuszy ich minimalizacji (wg bazy FEP Quintessa albo wymogów programu NER300).
- 1.1.18 Plany monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla (początkowego/szczegółowej charakterystyki składowiska, w trakcie i po zakończeniu zatłaczania), nawiązujące do analiz ryzyka, obejmujące propozycje prac geofizycznych i (bio)geochemicznych, w tym także założenia dla testowego zatłaczania CO<sub>2</sub>. Punkt ten zawiera też podsumowanie wyników całego II Segmentu.



**Fig. 2\_3** Wybrane struktury/obiekty – potencjalne składowiska analizowane w ramach Segmentu II (struktury solankowe Budziszewice-Zaosie, Skoczów-Czechowice, Grodzisk-Ujazd-Bukowiec, Choszczno-Suliszewo; złoża ropy Nosówka, złoża gazu Wilków i Łąka; obiekt w pokładach węgla Warszowie-Pawłowice), na tle emitentów, obszarów chronionych, gazociągów i pozostałych struktur analizowanych w ramach Segmentu I.

## Wybór struktur i szacowanie pojemności składowania

**(Adam Wójcicki, Janusz Jureczka, Radosław Tarkowski, Barbara Uliasz-Misiak, Robert Warzecha, Tadeusz Bromek, Jarosław Chećko, Jan Lubaś, Sławomir Szuflita, Stanisław Nagy, Bartosz Papiernik)**

Do powyższych analiz regionalnych (I Segment) zasadniczo wykorzystywano założenia metodyczne projektu unijnego EU GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen et al., 2009), którego zakres obejmował rozpoznanie możliwości geologicznego składowania CO<sub>2</sub> w Europie, wraz ze wstępnym oszacowaniem potencjału geologicznego składowania dla formacji i struktur w poziomach solankowych, struktur naftowych i pokładów węgla. Projekt ten wykorzystywał i zalecał metodyki postępowania opracowane w ramach szeregu wcześniejszych przedsięwzięć. Natomiast podstawą do analiz szczegółowych w ramach II Segmentu były wymogi dyrektywy CCS (konkretnie Aneksu nr 1 i częściowo Aneksu nr 2).

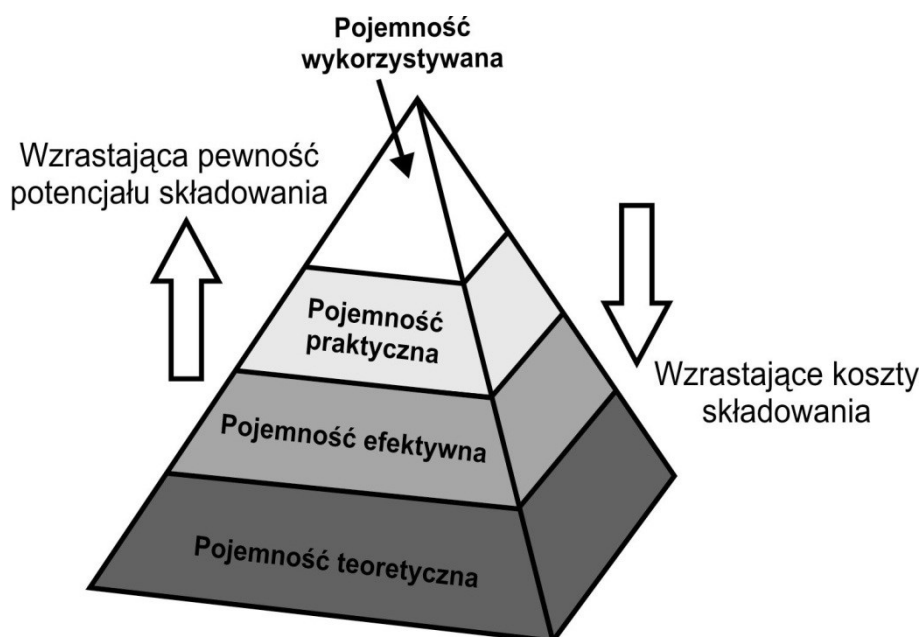
### Struktury i formacje solankowe

Na podstawie Podręcznika Najlepszych Praktyk dla geologicznego składowania CO<sub>2</sub> w poziomach wodonośnych-solankowych (projekt CO<sub>2</sub>STORE – Chadwick et al., 2008) przyjęto następujące kryteria optymalne jakie powinny spełniać te struktury geologiczne – potencjalne składowiska dla dużych projektów CCS, tzn. o strumieniu zatłaczanego CO<sub>2</sub> rzędu milionów ton rocznie:

1. Pojemność składowania struktury wyraźnie większa od całkowitej emisji zakładu przemysłowego;
2. Głębokość występowania kolektora (zbiornika); głębokość minimalna to 800 m (płycej CO<sub>2</sub> nie występuje w fazie nadkrytycznej/ciekłej), maksymalna zależna od własności zbiornikowych – do 3000 m.
3. Miąższość kolektora(ów); minimalna 20 m, najlepiej 30 m i więcej.
4. Porowatość kolektora; minimalna 10% (jeśli mamy ośrodek porowato-szczelinowy i występowanie w obrębie rozpatrywanej formacji złóż węglowodorów potwierdza, że jej własności zbiornikowe są dostateczne, to może być mniejsza), idealna 20% i więcej.
5. Przepuszczalność kolektora; minimalna 10-100 mD, najlepiej, co najmniej 300 mD.
6. Zasolenie (mineralizacja); minimum 30 g/l (=brak kontaktu z użytkowymi wodami słodkimi; jeśli wiemy z innych przesłanek, że taki kontakt nie ma miejsca, wartość minimalna może być niższa).

7. Nadkład (uszczelnienie) pozbawiony uskoków, nieprzepuszczalny, o miąższości minimum 50 m, a najlepiej 100 m (bezpieczna jest wartość 50 metrów dla podstawowego kompleksu uszczelniającego ponad zbiornikiem, bardzo ważna jest integralność uszczelnienia, ponadto pożądane są drugorzędne kompleksy uszczelniające występujące powyżej podstawowego).

Obok omawianych powyżej warunków geologiczno-złożowych, wybór i ranking struktur i formacji solankowych był uwarunkowany występowaniem na ich obszarze obszarów chronionych, GZWP, koncesji na poszukiwanie i eksploatację zasobów górotworu, rozwojem sieci osadniczej oraz obecnością emitentów CO<sub>2</sub> w sąsiedztwie struktury.



**Fig. 2\_4** Piramida geologicznego składowania dla kluczowej opcji – poziomów wodonośnych solankowych (Bachu & Adams, 2003 i CSLF - patrz Vangkilde-Pedersen et al., 2009)

Podobnie jak w przypadku szacowania zasobów surowców energetycznych, mineralnych czy wód termalnych, w przypadku geologicznego składowania CO<sub>2</sub> istnieją różne kategorie „zasobów” – pojemności/potencjału składowania. Za projektem unijnym EU GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen et al., 2009) przyjęto następujące kategorie zasobów – pojemności składowania, zobrazowane na **Fig. 2\_4**:

- teoretyczna pojemność składowania stanowi całkowitą ilość CO<sub>2</sub>, jaką może pomieścić dana jednostka geologiczna w całej objętości porowej w odpowiednim przedziale głębokości (faza swobodna i rozpuszczanie CO<sub>2</sub> w płynach złożowych do maksymalnego nasycenia);

- efektywna pojemność składowania to część pojemności teoretycznej, ograniczona przez geologiczno-inżynierskie aspekty szacowania pojemności składowania, wyznaczana na ogół dla poszczególnych struktur lub obszarów w obrębie jednostki geologicznej (uwzględniając ich głębokość, ciśnienie, porowatość, udział nieredukowalnej wody złożowej w porach, a w szczególności współczynnik efektywności składowania); jest to szacowana dla I Segmentu pojemność statyczna obejmująca wolumentryczną pojemność składowania CO<sub>2</sub> oraz pojemność wynikającą z rozpuszczania CO<sub>2</sub> w wodzie złożowej;

- praktyczna pojemność składowania to pojemność po uwzględnieniu kryteriów technicznych, ekonomicznych, prawnych oraz przeprowadzeniu oceny źródeł emisji w stosunku do miejsc składowania; pojemność (dynamiczna) uzyskana w wyniku szczegółowych analiz II Segmentu, obejmujących konkretne scenariusze zatłaczania, odpowiada pojemności praktycznej, choć jeszcze bez analiz ekonomicznych.

Natomiast pojemność wykorzystywana to taka, jaką faktycznie zajmie CO<sub>2</sub> zatłoczony do składowiska w ramach projektu CCS.

W rezultacie nowych badań geologiczno-geofizycznych szacunki pojemności efektywnej i praktycznej mogą ulec przewartościowaniu, gdyż są oparte na aktualnie dostępnych informacjach.

### **Struktury naftowe (złoża ropy naftowej i gazu ziemnego)**

Jeśli chodzi o wybór i ranking struktur naftowych, to sprawa jest generalnie prostsza niż w przypadku struktur i formacji solankowych, ponieważ wiemy że struktura naftowa jest z definicji dobrą pułapką.

W zasadzie mamy dwa przypadki – czy chodzi o wspomaganie wydobycia węglowodorów (głównie, a czasami wyłącznie, ropy naftowej), czy też o samo składowanie dwutlenku węgla w możliwie największej ilości. Złoże ropy powinno być jak największe, ponadto istotne są parametry głębokości, ciśnienia, temperatury, skład ropy i historia jego eksploatacji, które wpływają na efektywność wspomaganie wydobycia ropy. Głównym warunkiem jest dostępność złoża ropy, na którym można by mniej lub bardziej efektywnie wspomagać wydobycie w odpowiednim okresie historii eksploatacji złoża (i czy dostępne będzie CO<sub>2</sub> w odpowiedniej ilości i w odpowiednim okresie czasu). Złoże gazu powinno być również jak największe, występować w podobnym przedziale głębokości, jaki przyjęto dla struktur solankowych (ważna jest głębokość stropu struktury - poniżej 800 m, zapewniająca występowanie CO<sub>2</sub> w fazie nadkrytycznej lub ciekłej) oraz charakteryzować się jak najlepszymi własnościami zbiornikowymi.

Stąd obok wielkości (pierwotnych) zasobów węglowodorów i związanej z nią pojemności składowania dla złoża, istotna jest odległość od emitenta i wielkość jego emisji, związany z



tym czas zapełnienia struktury oraz obecność sieci osadniczej i obszarów chronionych w obrębie struktury i jej sąsiedztwie, a także - co oczywiste - jego dostępność i stopień szczywania. Ponieważ w Polsce mamy generalnie nieduże złoża węglowodorów, przyjęto za wcześniejszymi opracowaniami (np. Wójcicki et al., 2008) kryterium startowe dla złóż ropy - pierwotne zasoby wydobywalne minimum 100 tysięcy ton, dla złóż gazu zaś - pierwotne zasoby wydobywalne minimum 400 mln m<sup>3</sup>.

Podstawą do szacowania pojemności efektywnej-statycznej dla złóż ropy i gazu w I Segmentcie była metodyka zaproponowana w projekcie EU GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen et al., 2009) i projekcie GESTCO (Schuppers et al. 2003), która zawiera się w założeniu, że CO<sub>2</sub> zastępuje w złożu objętościowo wydobyte stamtąd węglowodory (wydobyte standardową technologią). Natomiast zagadnienie wspomagania wydobycia węglowodorów, zwłaszcza ropy naftowej wymagało raczej szacowania pojemności dynamicznych – praktycznych, będących wynikiem symulacji zatłaczania dwutlenku węgla do złoża (co było m.in. przedmiotem prac w ramach II Segmentu dla struktur naftowych).

### **Pokłady węgla**

Analizowano zasadniczo możliwości i potencjał składowania CO<sub>2</sub> z odzyskiem metanu (CO<sub>2</sub>-ECBMR) w głębokich, nieeksploatowanych pokładach węgla na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Pozostałe zagłębia węglowe (Dolnośląskie Zagłębie Węglowe, Lubelskie Zagłębie Węglowe) wydają się nieodpowiednie do składowania CO<sub>2</sub> z uwagi na zagadnienia bezpieczeństwa lub stopień udokumentowania zasobów MPW.

Wyboru i rankingu obszarów perspektywicznych dokonano ze względu na (znane) powszechne występowanie poniżej głębokości 1000 m metanowych pokładów węgla (MPW), parametry tychże pokładów (miąższość, zawartość metanu, przepuszczalność, nasycenie wodą), tektonikę, obecność w nadkładzie karbonu nieprzepuszczalnych utworów miocenu, istnienie dużych powierzchniowo obszarów (występowania MPW) odległych od czynnych kopalń węgla kamiennego oraz niski stopień zurbanizowania (Jureczka i in., 2011) i oddziaływania na środowisko (obszary chronione, GZWP).

Do oszacowania potencjału geologicznego składowania CO<sub>2</sub> w głębokich, nieeksploatowanych pokładach węgla zawierających metan przyjęto metodykę stosowaną w projektach COALSEQ (Davis et al., 2004), GESTCO (Bergen, Wildenborg, 2002; May, 2003; Tongeren, Laenen, 2001) i EU GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen et al., 2009), która jest oparta na oszacowaniu zawartości metanu z punktu widzenia technologii CO<sub>2</sub>-ECBMR oraz współczynnika zastępowania CH<sub>4</sub> przez CO<sub>2</sub> w pokładach węgla.

### 3. WYNIKI PRAC REGIONALNYCH

W niniejszym rozdziale przedstawiono przegląd najistotniejszych wyników opracowania końcowego dla prac regionalnych (Wójcicki [red.], 2013), w tym również ranking i rekomendacje struktur dla poszczególnych obszarów i opcji składowania CO<sub>2</sub>.

#### 3.1 Poziomy solankowe

**(Adam Wójcicki, Janusz Jureczka, Anna Feldman-Olszewska, Anna Becker, Józef Chowaniec, Anna Tomasz, Adam Tomasz, Maria Waksmundzka, Hubert Kiersnowski, Krzysztof Leszczyński, Jolanta Paczeńska, Grzegorz Wróbel, Teresa Adamczak, Lidia Razowska-Jaworek, Zbigniew Kaczorowski, Jacek Chełmiński, Krzysztof Czuryłowicz, Marta Kuberska, Aleksandra Kozłowska, Marek Jarosiński, Grzegorz Pieńkowski, Radosław Tarkowski, Barbara Uliasz-Misiak, Robert Warzecha, Tadeusz Bromek, Jarosław Chećko, Jan Lubaś, Sławomir Szuflika, Grzegorz Leśniak, Stanisław Nagy, Bartosz Papiernik)**

Prace regionalne objęły aktualizację i weryfikację informacji opracowanych w ramach „[Interaktywnego atlasu prezentującego możliwości geologicznej sekwestracji CO<sub>2</sub> w Polsce](#)” (Wójcicki et al., 2008), w nawiązaniu do metodyki projektu EU GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen et al., 2009). Rozpoczęły się one studiami IGSMiE PAN (Tarkowski [red.], 2010), jako wstępnym etapem analiz (podsumowanie dotychczasowego stanu wiedzy). Przedstawione poniżej finalne analizy (najistotniejsze wyniki prac wykonanych w poszczególnych rozdziałach I Segmentu opracowania końcowego - patrz poprzedni rozdział) objęły podsumowanie dotychczas zgromadzonych i opracowanych materiałów, wykonanie bilansu pojemności, rankingu i rekomendacji (uprzednio zweryfikowanych) formacji i struktur w poziomach solankowych.

Najistotniejsze informacje zawarto w aplikacji GIS/WebGIS (na DVD oraz stronie projektu; <http://skladowanie.pgi.gov.pl/co2polska/polska.phtml>). Przedstawiono na poniższych rysunkach zrzuty ekranu wspomnianej aplikacji (**Fig. 3\_1 - 3\_49**), charakteryzujące lokalizację, sytuację i podstawowe parametry rozpatrywanych formacji i struktur. Dla wybranych struktur, dla których kompleks składowania występuje relatywnie płytko, podano temperatury w stropie zbiornika („punkty zatłaczania”, czyli istniejące otwory, znajdują się najczęściej w szczycie struktury; tam gdzie występują istotne rozbieżności, temperaturę podano dla szczytu struktury, a nie dla istniejącego otworu). Ponadto na końcu niniejszego podrozdziału podano temperaturę w stropie (wszystkich wytypowanych) struktur w formie diagramu (**Fig. 3\_50**), a także w **Tabeli 3\_3**, obejmującej również inne parametry tych struktur.

Podrozdział zakończono bilansem pojemności dla poszczególnych rejonów i formacji geologicznych oraz oceną ich przydatności do bezpiecznego geologicznego składowania dwutlenku węgla.

## OBJAŚNIENIA

Przyjęto następujące kody pól charakteryzujące struktury solankowe (dla pokładów węgla i złóż węglowodorów przyjęto analogiczne oznaczenia podstawowych parametrów) dla aplikacji GIS/WebGIS:

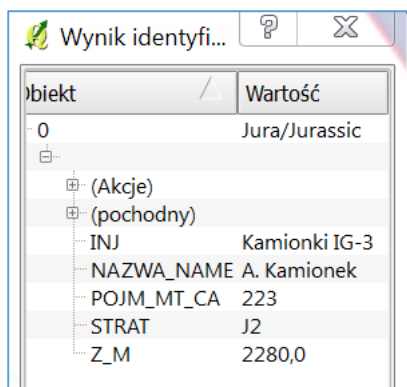
**NAZWA\_NAME** – nazwa struktury/obiektu;

**STRAT** – uproszczona stratygrafia kolektora;

**Z\_M** – orientacyjna głębokość stropu struktury;

**INJ** – orientacyjny punkt zatłaczania (zwykle istniejący otwór na szczycie struktury);

**POJM\_MT\_CA**(*capacity*) – szacunkowa pojemność statyczna (suma pojemności wolumetrycznej i z rozpuszczania) wyrażona w milionach ton (MT).



Obiekt	Wartość
0	Jura/Jurassic
(Akcje)	
(pochodny)	
INJ	Kamionki IG-3
NAZWA_NAME	A. Kamionek
POJM_MT_CA	223
STRAT	J2
Z_M	2280,0

# I - Bełchatów

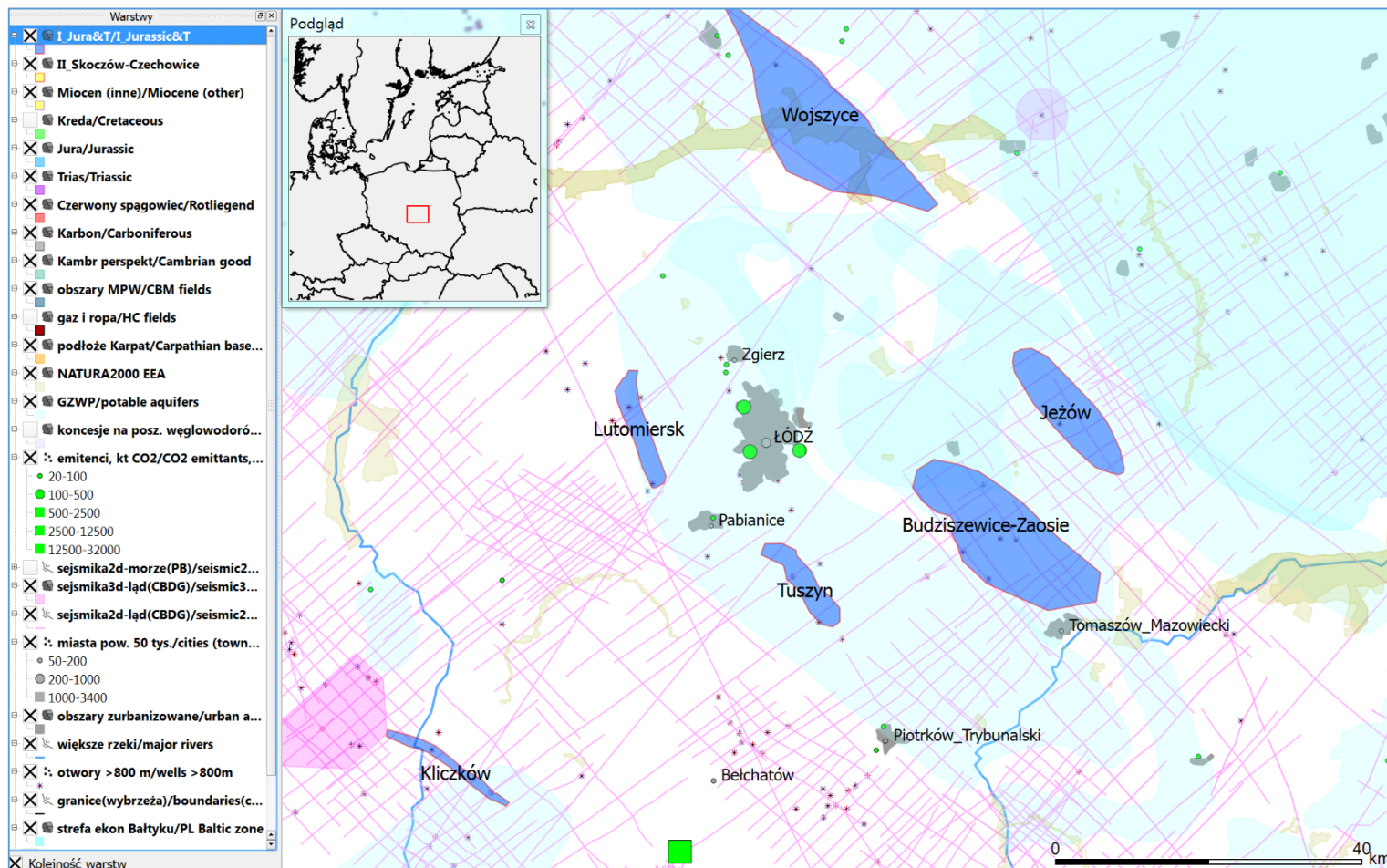


Fig. 3\_1 Wytypowane struktury w rejonie Bełchatowa

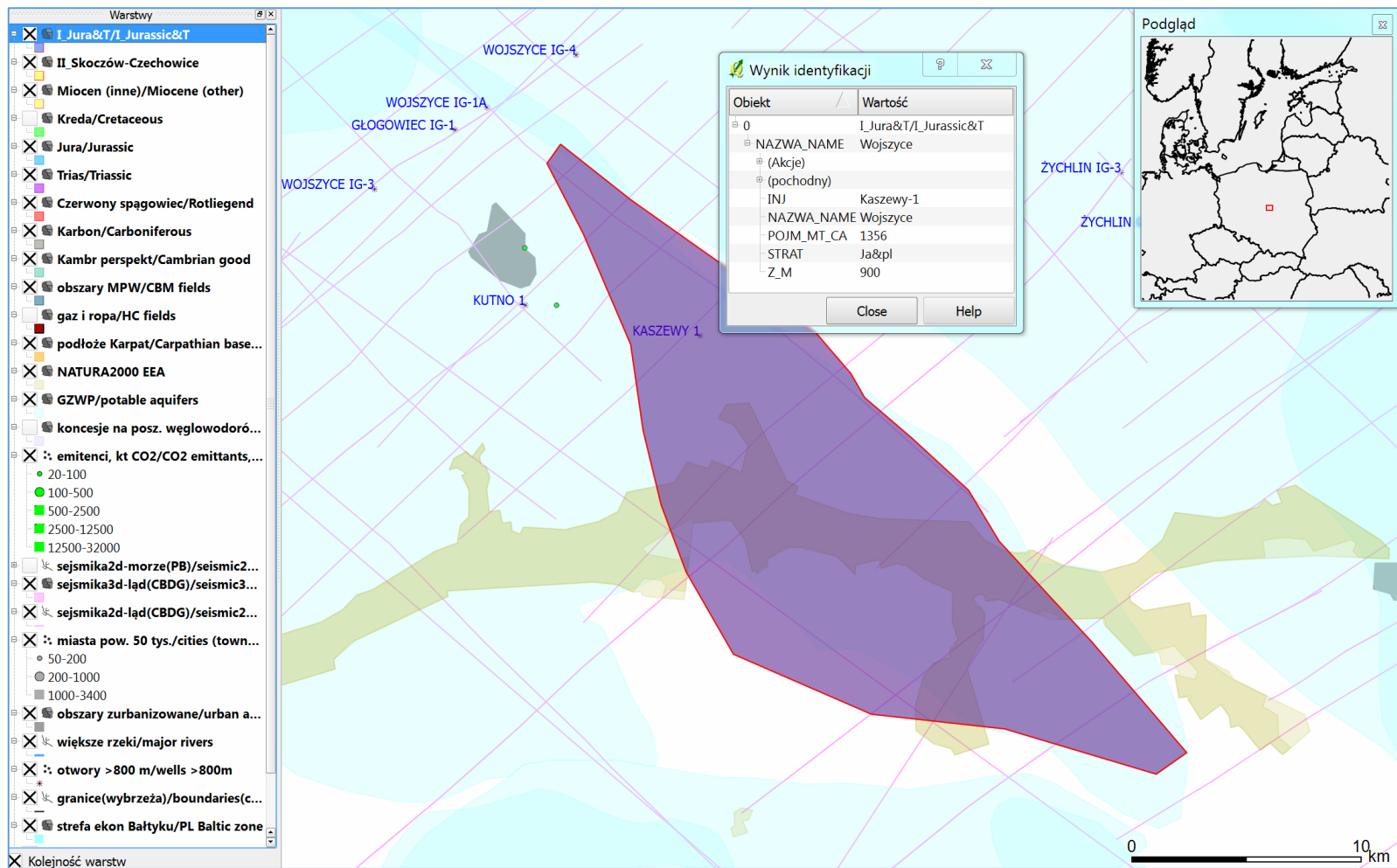


Fig. 3\_2 Struktura Wojszyce (otwór Kaszewy wykonano w ramach projektu demo – Posytniak & Rosa, 2010; temperatura w str. Ja – 35 °C)

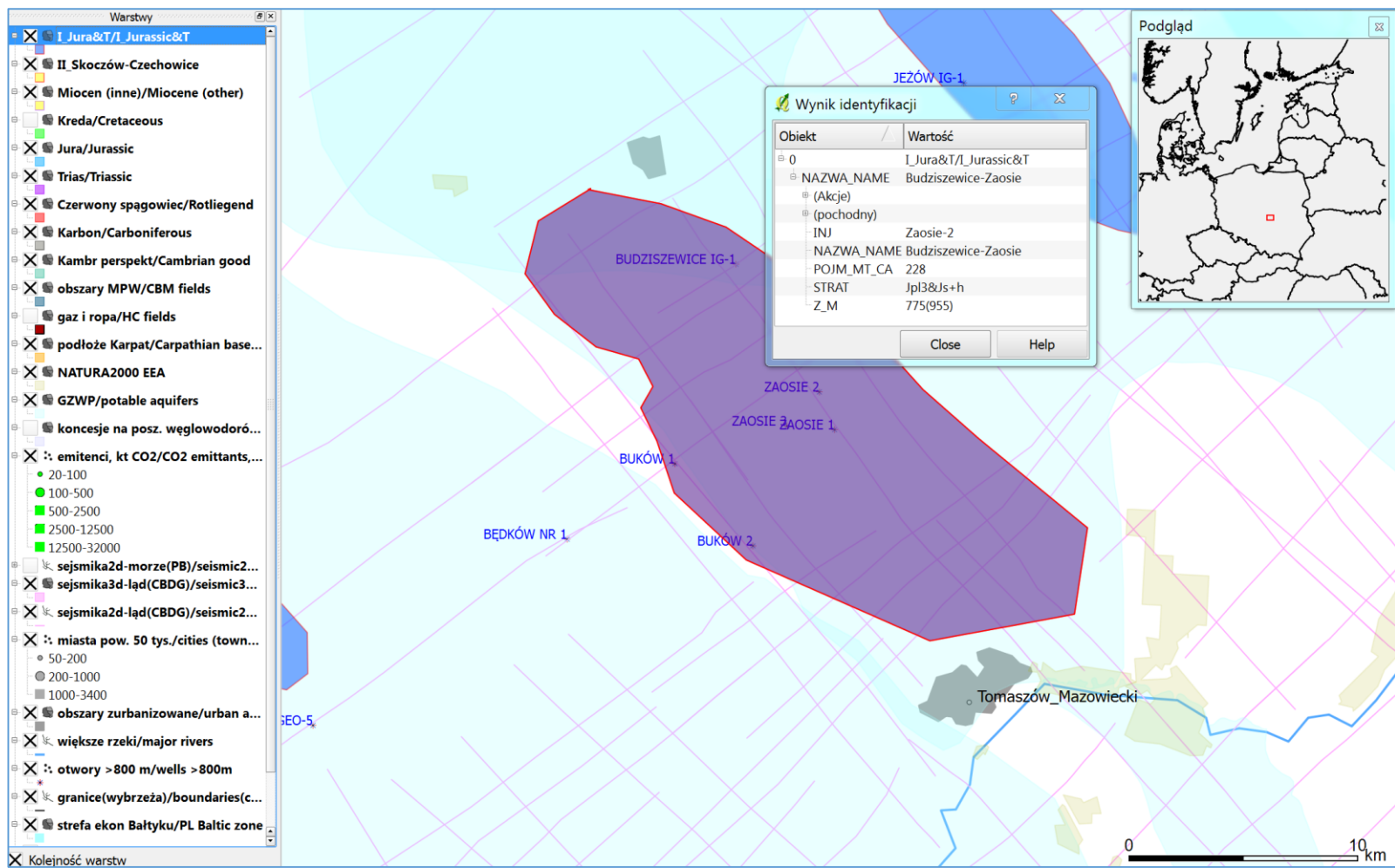


Fig. 3\_3 Struktura Budziszewice-Zaosie (CO<sub>2</sub> w fazie ciekłej, w warunkach ciśnienia nadkrytycznego)

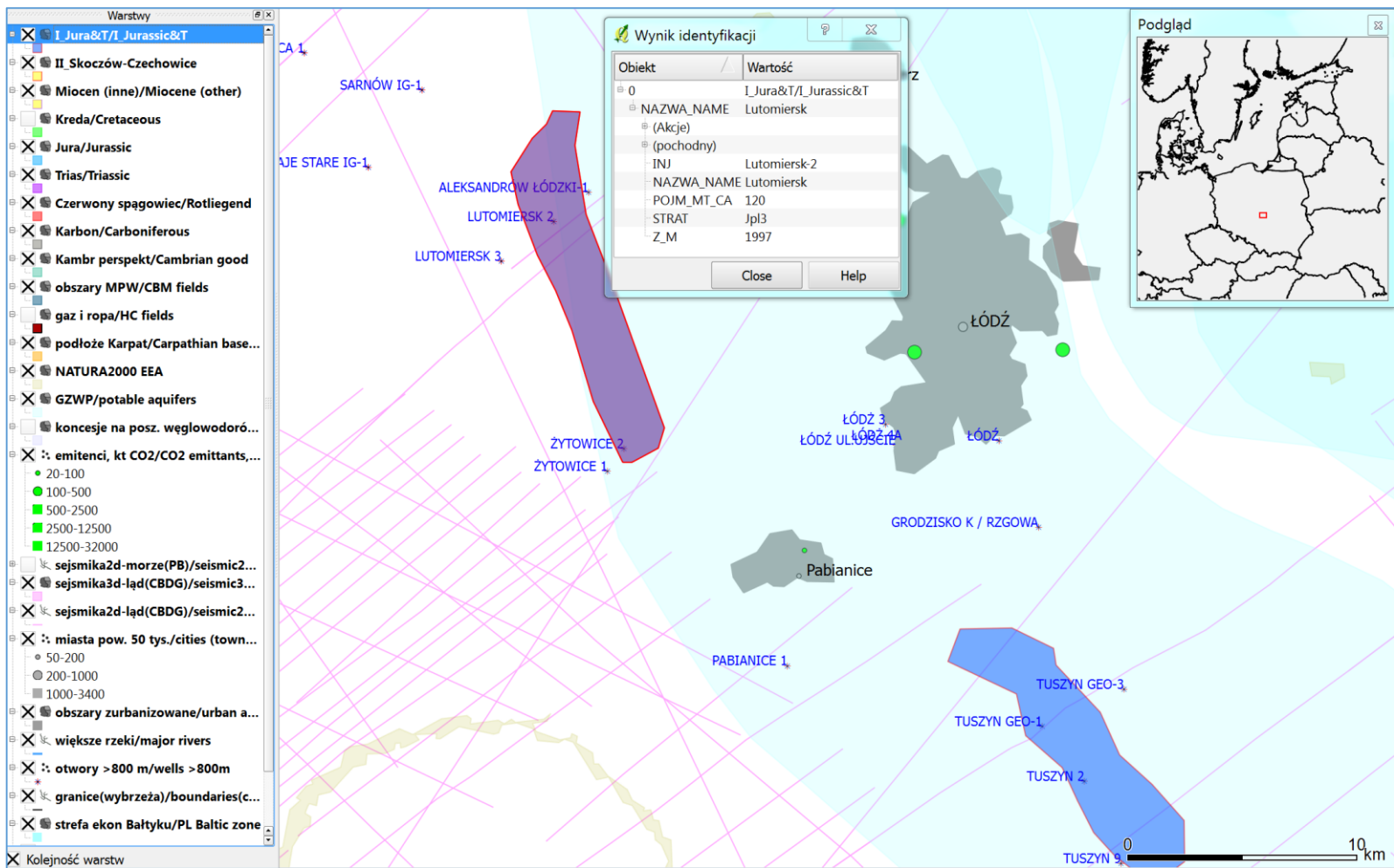


Fig. 3\_4 Struktura Lutomiersk (i Tuszyn)

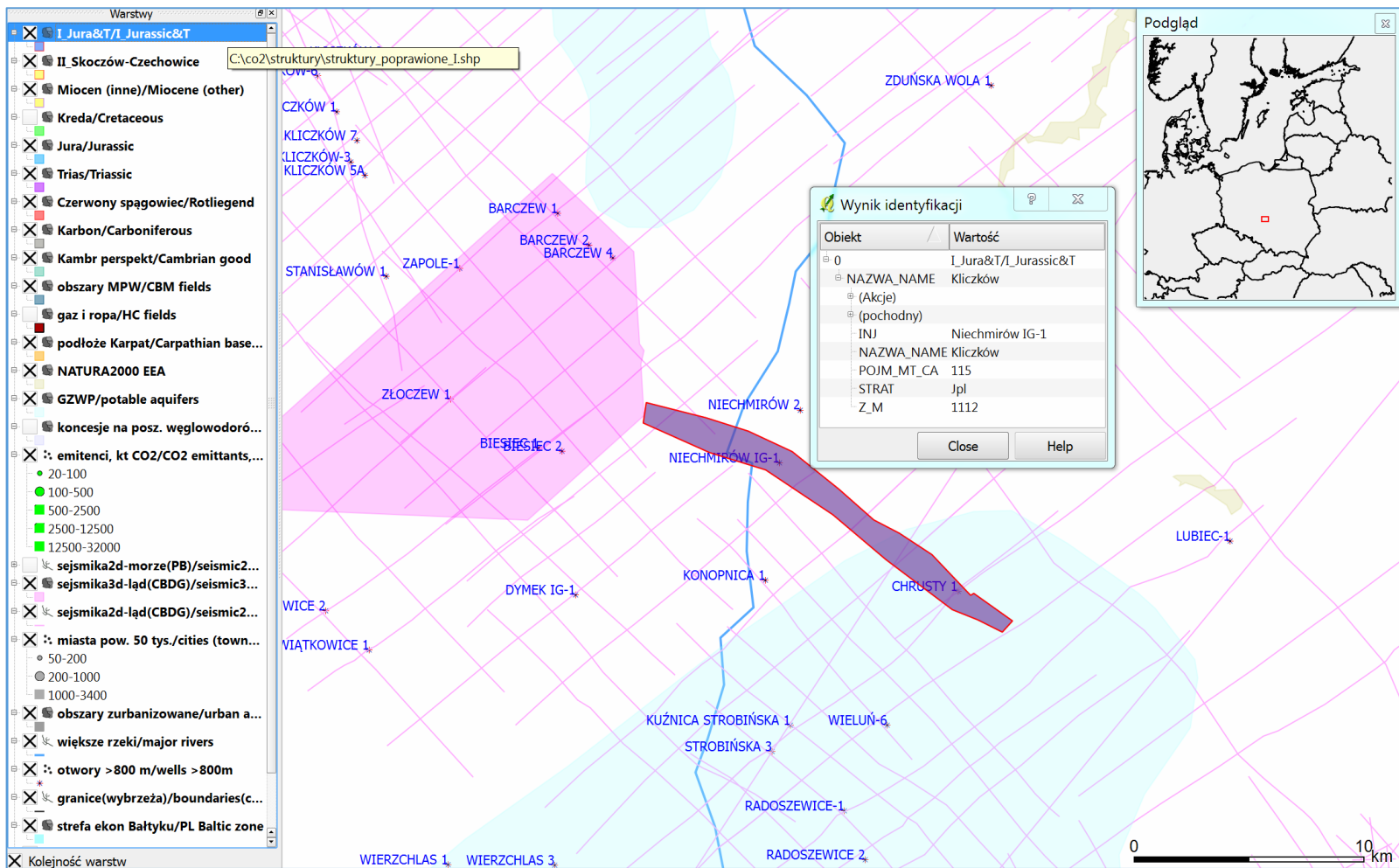


Fig. 3\_5 Struktura Kliczków – J



Prace dla rejonu I (**Fig. 3\_1**) wykonywano w I półroczu 2009 roku. Poniższe struktury mają potencjał składowania wystarczający dla projektu demonstracyjnego (PGE; minimum 45 mln ton przez cały okres życia instalacji), kolejność zaś struktur odpowiada ich rankingowi;

(Wojszyce)<sup>1</sup> - **Fig. 3\_2**

- Budziszewice-Zaosie - **Fig. 3\_3**

- Lutomiersk & Tuszyn - **Fig. 3\_4**

- Kliczków-J - **Fig. 3\_5**

- Jeżów - patrz **Fig. 3\_1**

Struktura Budziszewice-Zaosie (jura dolna) jest najlepiej rozpoznana i sejsmiką i otworami i głównie z tego względu została wybrana do analiz drugiego segmentu (warunkowo).

Struktura Lutomiersk jest bardzo słabo rozpoznana sejsmiką. Leży ona przy walnej strefie uskoku - możliwa migracja zatłaczanego CO<sub>2</sub> i solanki do rezerwowego GZWP aglomeracji łódzkiej ze zbiornika jury środkowej - składowanie głębiej raczej bezpieczne.

Struktura Tuszyn ma podobną sytuację jak Lutomiersk.

Struktura Kliczków-J to właściwie odcinek rowu jurajskiego, do którego prawdopodobnie nie da się zatłoczyć zbyt wielkich ilości dwutlenku węgla. Jest ona niedostatecznie rozpoznana (nie była atrakcyjna dla poszukiwań naftowych).

Struktura Jeżów jest w przypadku kolektorów jury za płytko i nie ma wg sejsmiki dobrego uszczelnienia – możliwe lokowanie jedynie w dolnym triasie.

Struktura Wojszyce (J<sub>2</sub>/J<sub>1</sub>) leży stosunkowo daleko od Bełchatowa i była niedostatecznie rozpoznana sejsmiką i otworami, do momentu wykonania w roku 2010 prac połowych w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów, po czym okazała się najlepsza ze wszystkich.

Poza przypadkiem Wojszyc (obszar NATURA 2000 w centrum, poszukiwania gazu związanego w sąsiedztwie, zakończone jednak niepowodzeniem) nie stwierdzono dla tych struktur istotnych konfliktów interesów, jeśli chodzi o zasoby naturalne, tzn. obszary chronione, poszukiwania i eksploatację surowców oraz GZWP (zbiorniki typowane do sekwestracji oddziela od GZWP setki metrów kompleksów uszczelniających i kolektorów wypełnionych wodami słonawymi). Najwięksi emitenci CO<sub>2</sub> w tym rejonie to elektrownia Bełchatów (gdzie planowano też projekt demo CCS) oraz elektrociepłownię w Łodzi.

---

<sup>1</sup> Struktura Wojszyce leży na pograniczu rejonów I i III. Obok struktur Lutomiersk & Tuszyn została zaproponowana PGE do prac rozpoznawczych w ramach projektu demo CCS.

## II - GZW

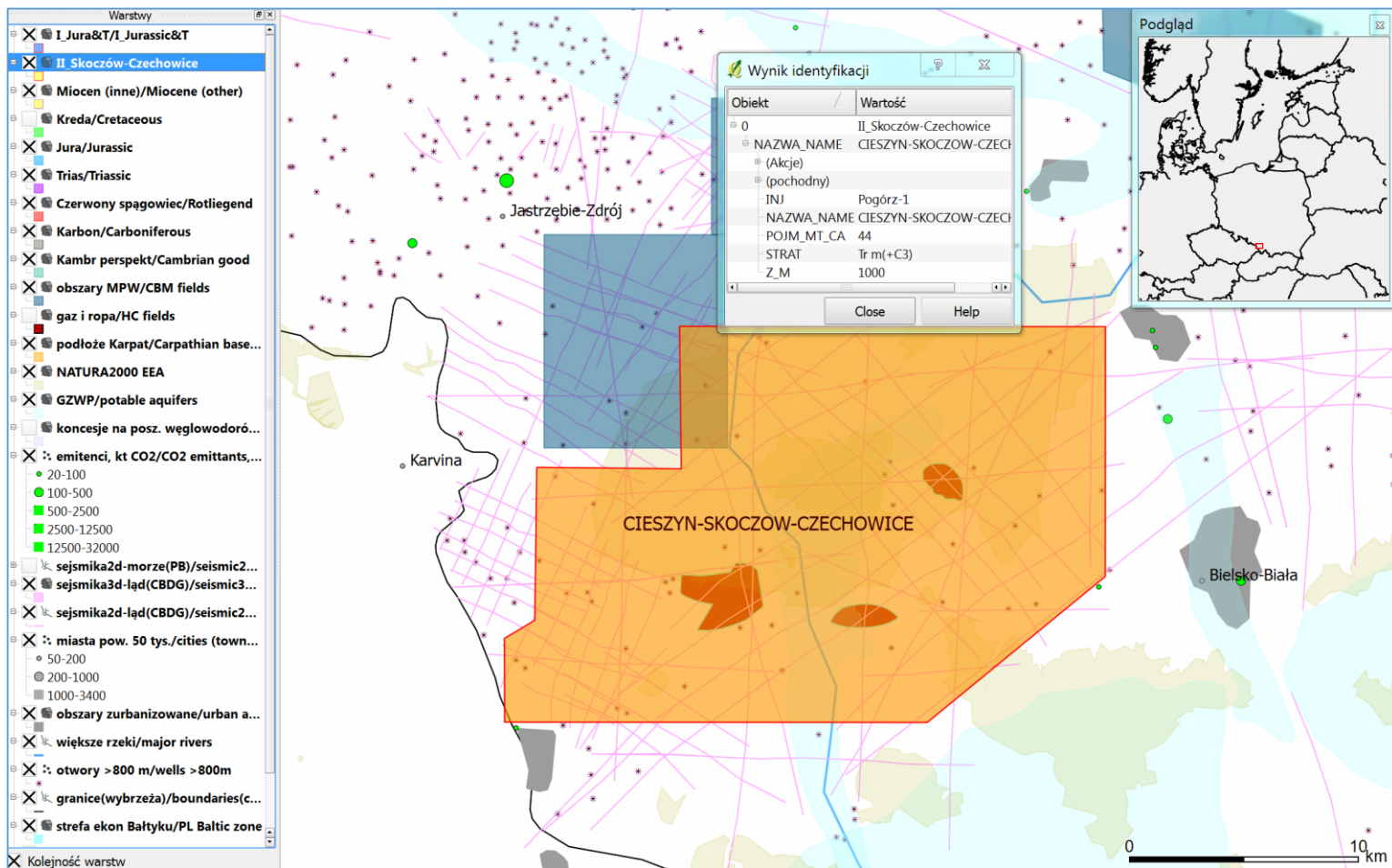


Fig. 3\_6 Obiekt solankowy Skoczów-Czechowice (SW część GZW)

W rejonie GZW wybrano, jako formację perspektywiczną mioceńskie warstwy dębowieckie (piaskowce dolnego miocenu), charakteryzujące się lepszymi własnościami zbiornikowymi niż formacje karbońskie. Pierwotnie wytypowano dwa obiekty położone poza obszarami czynnych kopalń węgla kamiennego, a także poza obszarami aktualnie projektowanych kopalń, charakteryzujące się dobrym uszczelnieniem (Skoczów-Czechowice i Kęty-Andrychów). Pierwszy obiekt jest większy (tzn. o większym potencjale składowania) i lepiej rozpoznany niż drugi, a w szczególności charakteryzuje się lepszymi własnościami zbiornikowymi. Stąd uznano, że najbardziej odpowiedni do geologicznego składowania wydaje się rejon (obiekt) Cieszyn-Skoczów-Czechowice (**Fig. 3\_6**), który został też wybrany jako przedmiot analiz w ramach II Segmentu dla rejonu GZW (warstwy dębowieckie, lokalnie zamarskie i ewentualnie stropowa część karbonu).

Możliwe konflikty interesów odnośnie wykorzystania obszaru tegoż potencjalnego składowiska dotyczą jego fragmentów pokrytych obszarami NATURA 2000, obszarami zurbanizowanymi czy występujących w jego obrębie niewielkich złóż węglowodorów. Dotyczą one jedynie niezbyt wielkiej części obszaru obiektu Skoczów-Czechowice i zostało to uwzględnione przy typowaniu lokalizacji otworów zatłaczających w II Segmentcie.

Jeśli chodzi o pojemność obiektu<sup>2</sup>, to niestety wystarcza on na potrzeby jednego emitenta średniej wielkości – np. niedużego bloku energetycznego albo małej elektrociepłowni (na mapie **Fig. 3\_6** są to np. elektrociepłownie w Bielsku-Białej i Czechowicach Dziedzicach na wschodzie i w Jastrzębiu na północnym zachodzie). Pojemność ta jest za mała dla optymalnego wariantu projektu demonstracyjnego CCS PKE&ZAK Kędzierzyn, zarzuconego w 2010 r., dla którego zgodnie z umową miał być wykonany niniejszy scenariusz i analizy dla rejonu GZW (w instalacji przewidziano wychwyty do 2,8 mln ton, czyli co najmniej 70 mln ton przez cały okres życia zakładu). Stąd ewentualne potrzeby dużych emitentów z rejonu GZW, położonych na północ i północny zachód od omawianego obiektu, mogłyby być zaspokajane w innych, bardziej odległych rejonach kraju (poziomy solankowe w Polsce centralnej, złoża gazu w południowej Wielkopolsce).

---

<sup>2</sup> Nie jest to typowa struktura, jak np. brachyantykliny na Niziu Polskim, a raczej część małego basenu osadowego - stąd współczynnik efektywności składowania i pojemność wolumetryczna są tu raczej niskie, co z drugiej strony potwierdzają wyniki modelowań dynamicznych II Segmentu, dające pojemność dynamiczną odpowiadającą połowie pojemności statycznej.

### III - Mazowsze

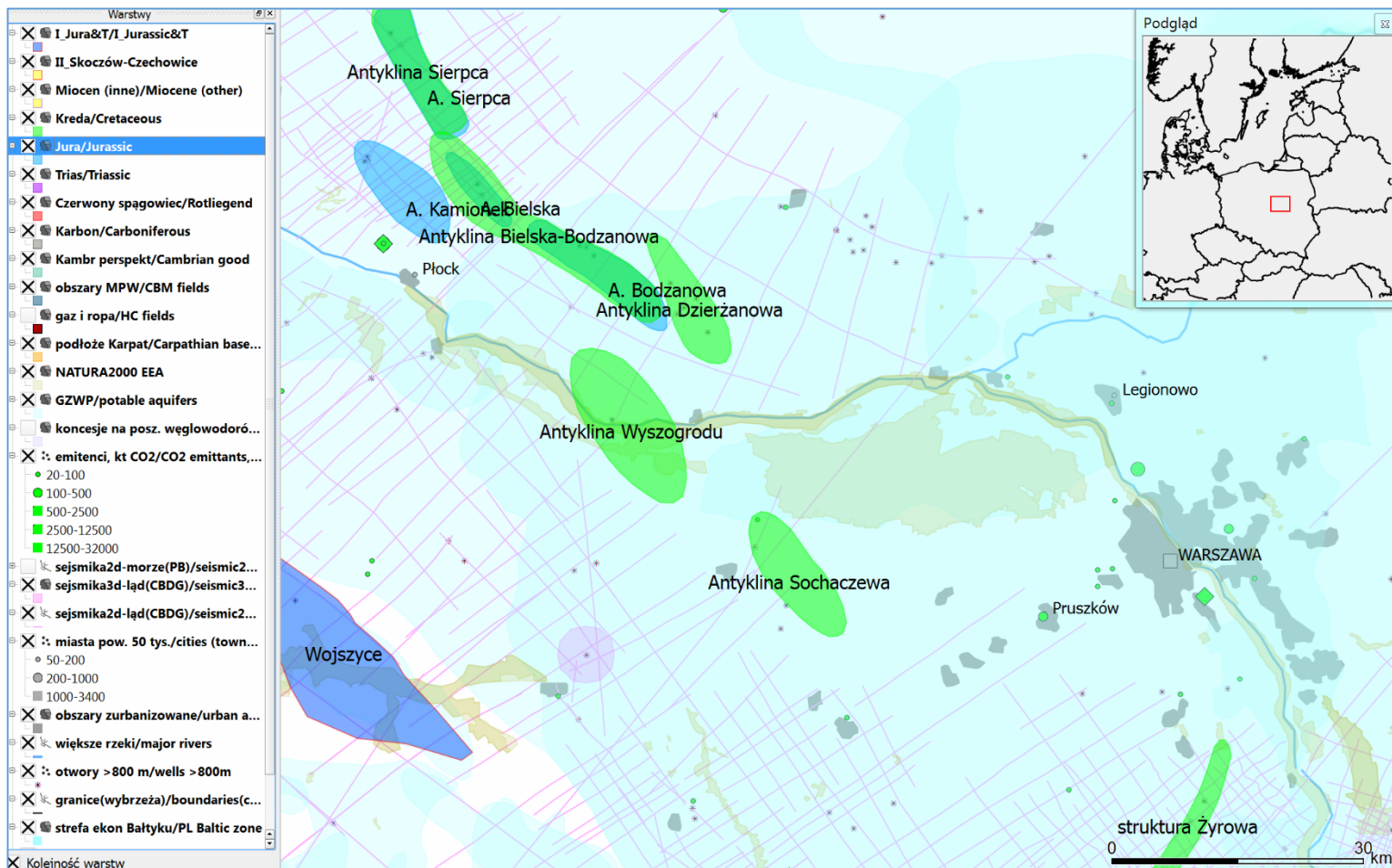


Fig. 3\_7 Wytypowane struktury solankowe w rejonie Mazowsza (jura dolna, środkowa i dolna kreda)



Fig. 3\_8 Antyklina Bielska w utworach jury

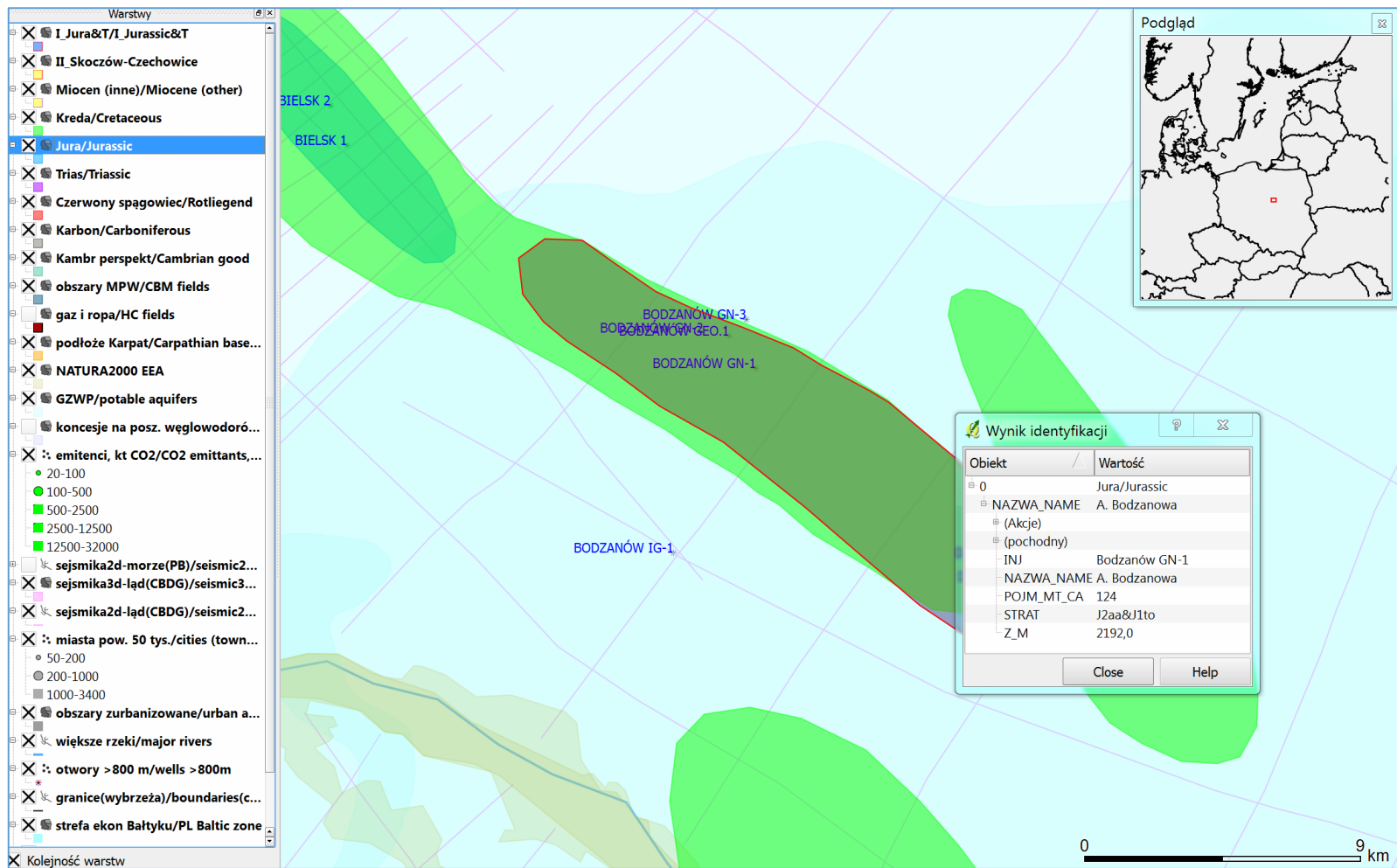


Fig. 3\_9 Antykлина Bodzanowa w utworach jury

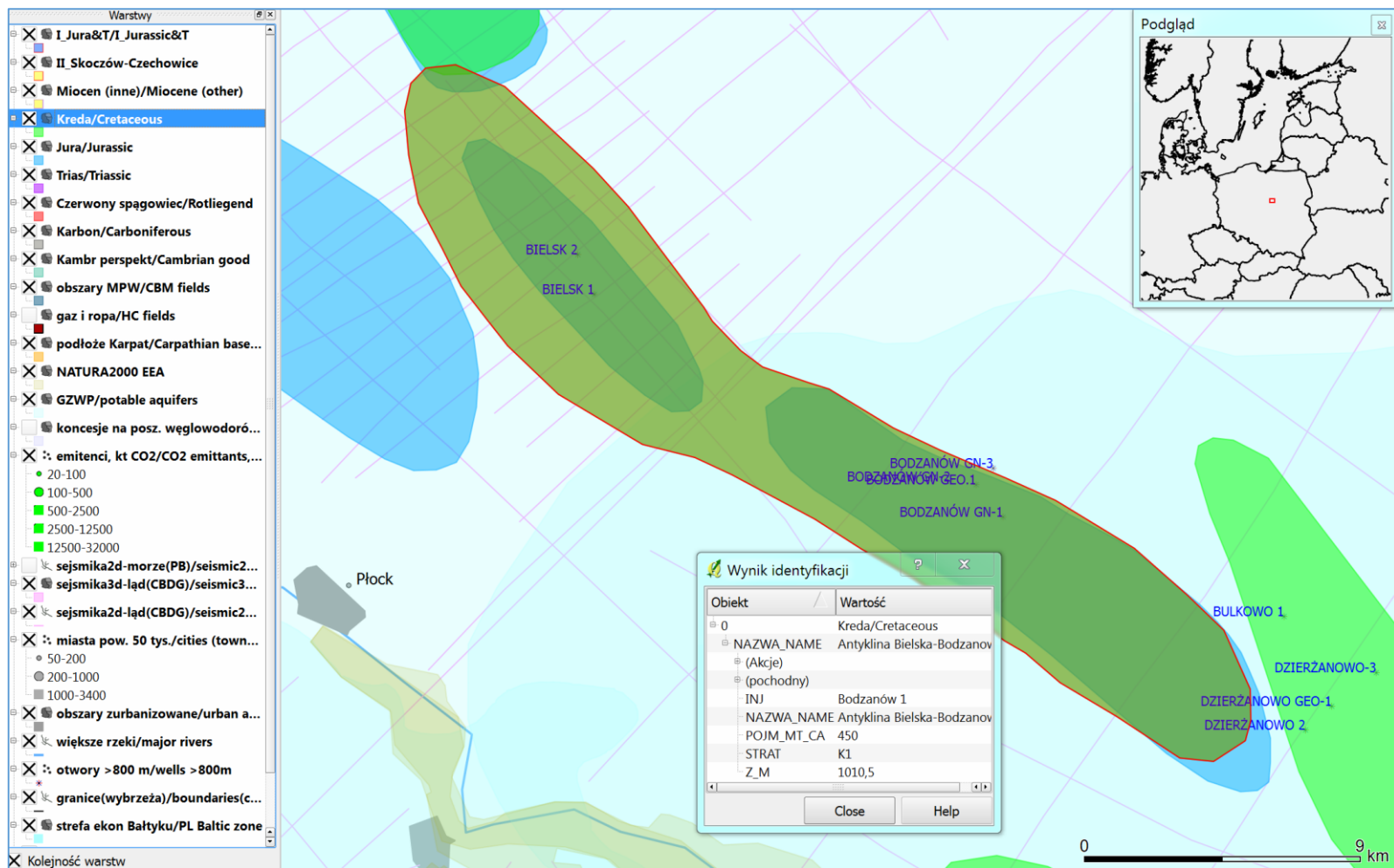


Fig. 3\_10 Antyklina Bielska-Bodzanowa w utworach dolnej kredy

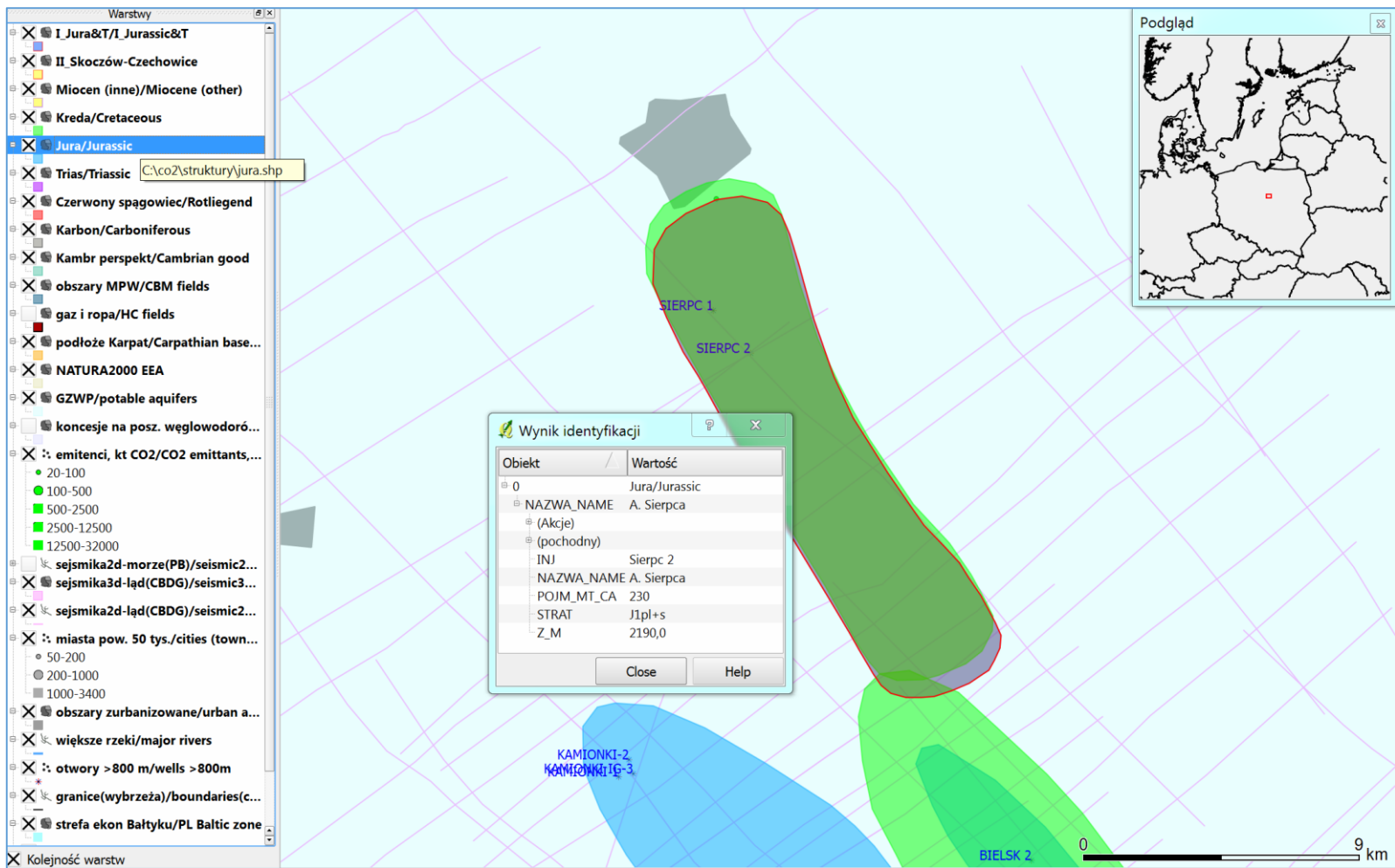


Fig. 3\_11 Antykliną Sierpca w utworach jury



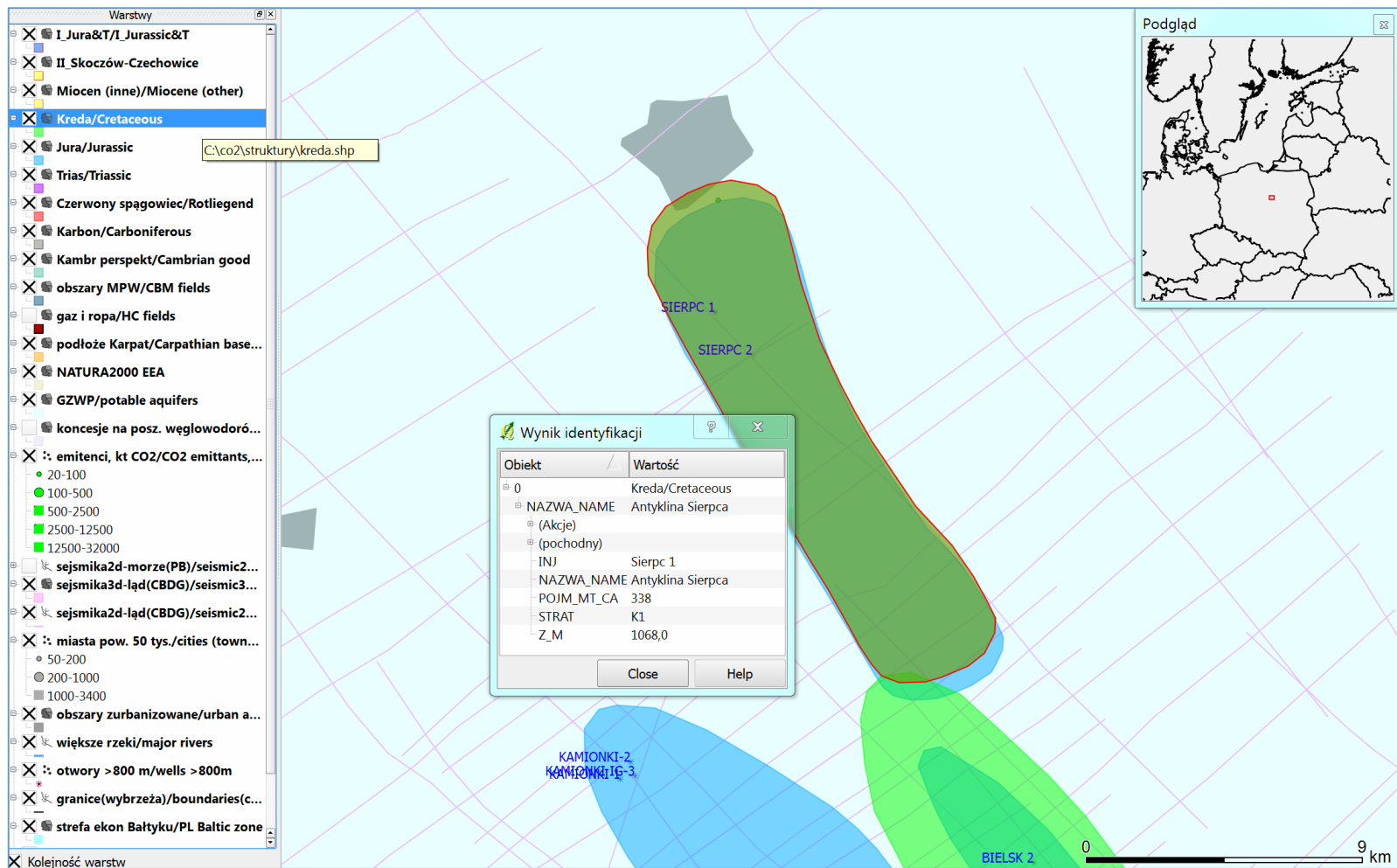


Fig. 3\_12 Antyklina Sierpca w utworach dolnej kredy

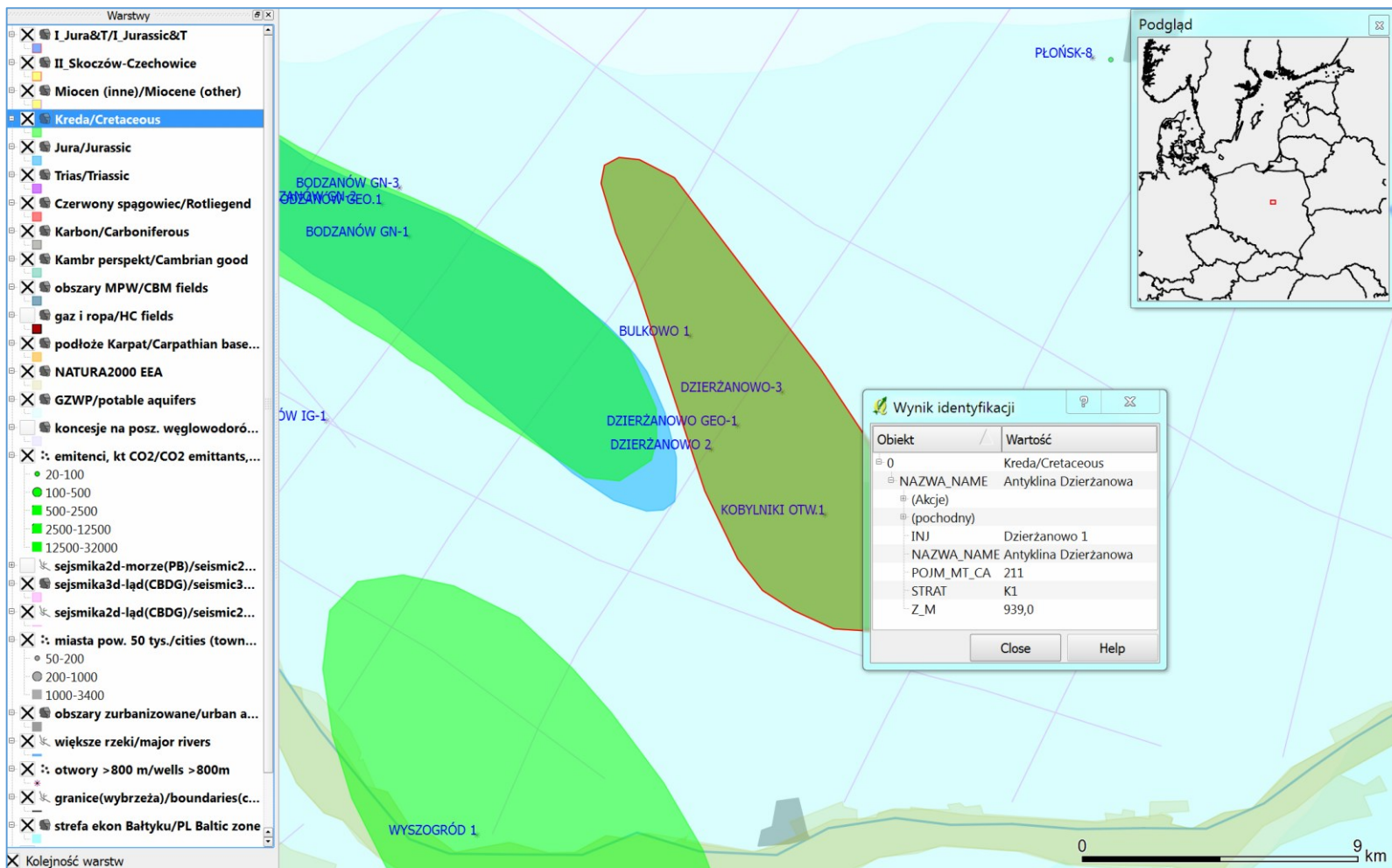


Fig. 3\_13 Struktura Dzierżanowo w utworach dolnej kredy (otwór Dzierżanowo GEO-1 – temperatura 38 °C – Górecki (red.) 2006a)



Fig. 3\_14 Antykлина Kamionek w utworach jury

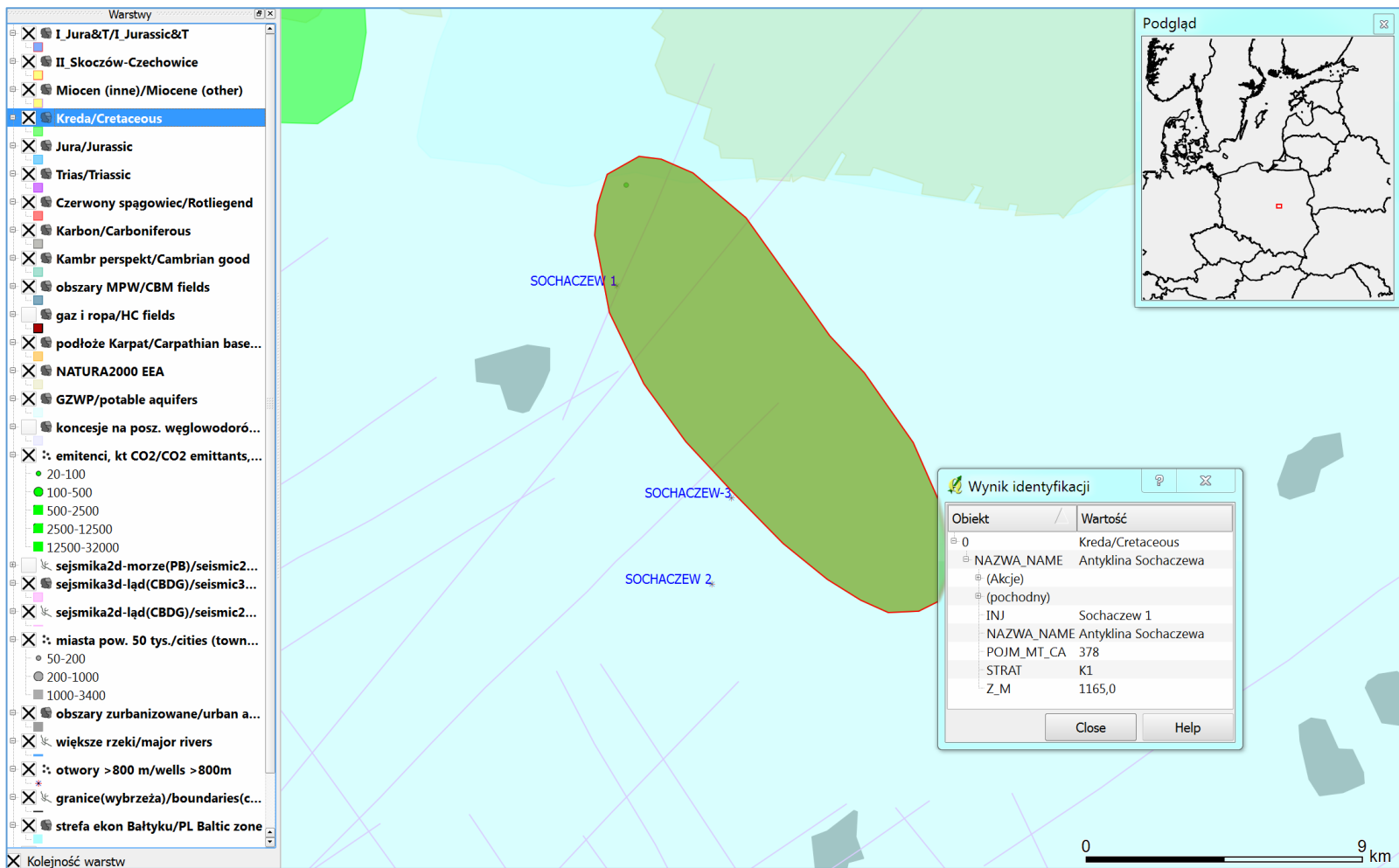


Fig. 3\_15 Antyklina Sochaczewa w utworach dolnej kredy

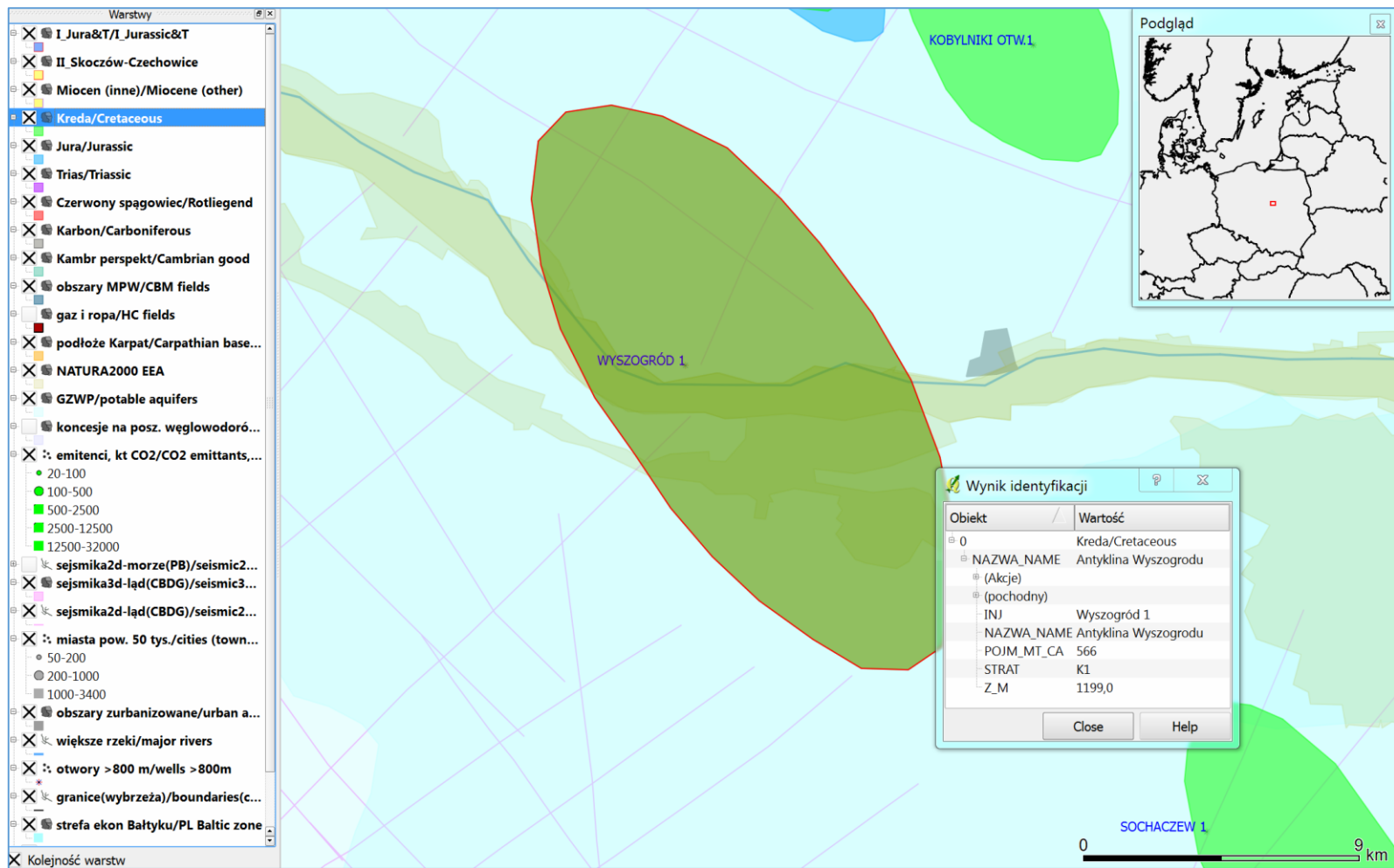


Fig. 3\_16 Antyklina Wyszogrodu w utworach dolnej kredy

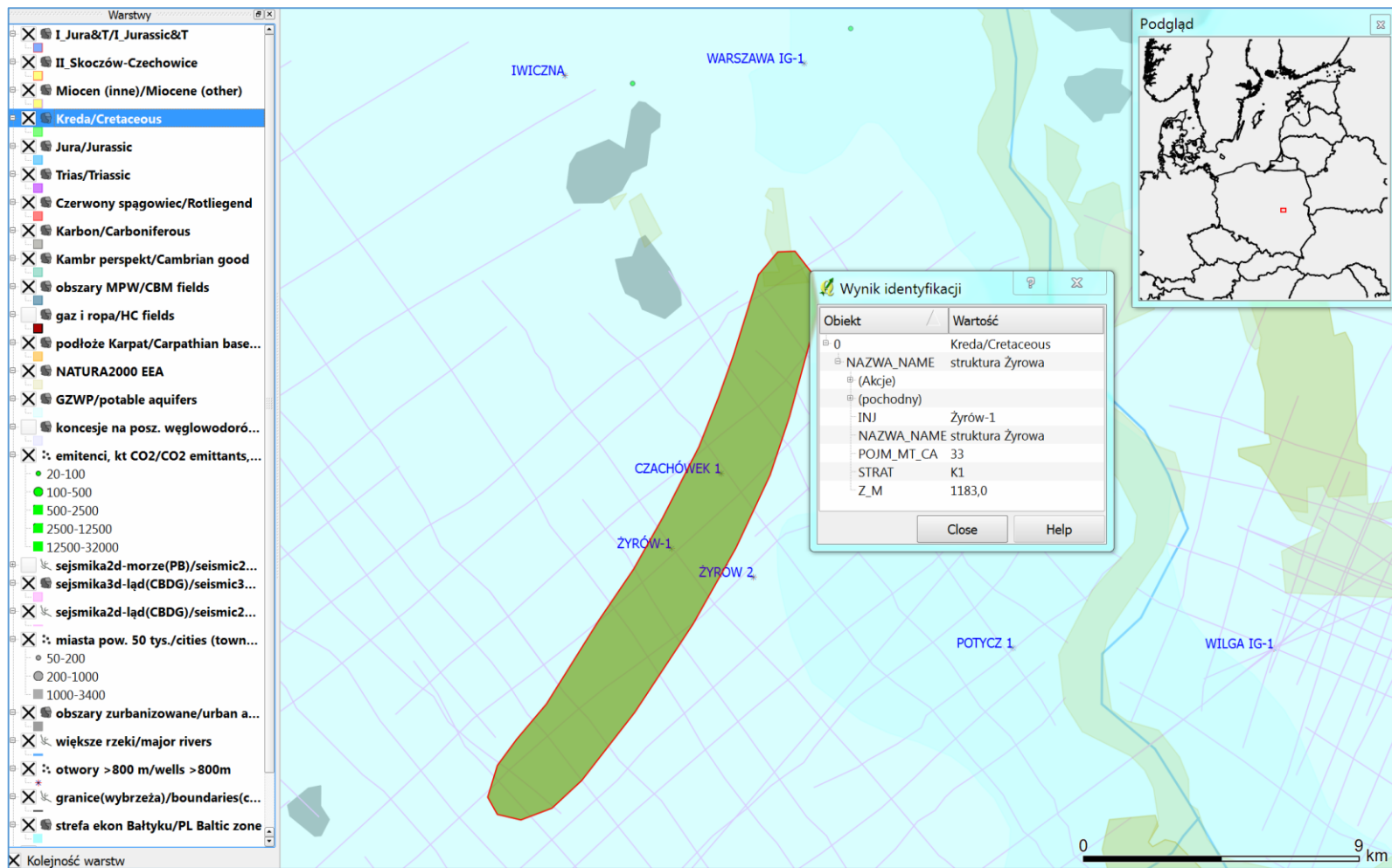


Fig. 3\_17 Struktura Żyrowa w utworach dolnej kredy

W rejonie Mazowsza wytypowano struktury solankowe w jurze dolnej, środkowej i dolnej kredzie (**Fig. 3\_7**). Mamy tu ciąg sąsiadujących lub nakładających się na siebie struktur pomiędzy Warszawą a Płockiem, gdzie z kolei najwięksi emitenci to rafineria w Płocku i elektrociepłownię w Warszawie.

Główne zbiorniki w jurze to formacja borucicka (środkowa/dolna jura) oraz głębiej występujące formacje dolnej jury. Te ostatnie jednak często zalegają na głębokości większej od 2500 m, stąd z ekonomicznego punktu widzenia najbardziej perspektywiczna jest formacja borucicka. W przypadku kredy dolnej sugeruje się lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora nowymi pracami geologiczno-geofizycznymi.

Dla struktury solankowych w rejonie Mazowsza można z punktu widzenia potrzeb emitentów, pojemności, bezpieczeństwa i wykonalności składowania dokonać następującego rankingu i podać orientacyjne scenariusze składowania:

- antykliny Bielska-Bodzanowa (poziomy solankowe w jurze – dwa sąsiadujące elementy Bielsk i Bodzanów - **Fig. 3\_8** i **Fig. 3\_9**, ponad nimi nierozdzielony element Bielsk-Bodzanów w kredzie dolnej - **Fig. 3\_10**) w sumie o największym potencjale, wystarczającym na potrzeby i Warszawy i Płocka;
- antyklina Sierpca (poziomy solankowe w jurze - **Fig. 3\_11** i dolnej kredzie - **Fig. 3\_12**) o potencjale w zasadzie wystarczającym na potrzeby zarówno Warszawy, jak i Płocka czy ewentualnie Płocka i innych, mniejszych emitentów położonych na zachód (Włocławek) czy na NW (Toruń);
- antyklina Dzierżanowa (dolna kreda - **Fig. 3\_13**), położona niedaleko od Warszawy i w miarę dobrze rozpoznana, o pojemności dostatecznej na potrzeby dwóch elektrociepłowni warszawskich;
- antyklina Kamionek (jura - **Fig. 3\_14**), położona niedaleko Płocka, o pojemności dostatecznej na potrzeby rafinerii w Płocku;
- antykliny Sochaczewa i Wyszogrodu (dolna kreda - **Fig. 3\_15** i **16**), słabiej rozpoznane, każda z nich może stanowić strukturę rezerwową dla Warszawy;
- struktura Żyrów (dolna kreda - **Fig. 3\_17**), silnie zuskokowana i stąd o dość małej pojemności, może być użyteczna dla pobliskich małych emitentów z aglomeracji warszawskiej, z tym, że jej szczelność wymagałaby szczegółowych badań<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Koreferent (J. Szewczyk, 2013) stwierdził, że z pewnością ma tam miejsce łączność hydrauliczna kredy dolnej z jurą (ale wody użytkowe występują w dolnym trzeciorzędzie).

Podsumowując, rekomendowany scenariusz dla składowania CO<sub>2</sub> w przypadku dużych emitentów z Warszawy obejmuje wykorzystanie struktury Dzierżanowa, ewentualnie struktur Bielsk-Bodzanów albo np. struktury Sochaczewa. Dla Płocka odpowiednie byłoby wykorzystanie struktur Bielsk-Bodzanów, albo struktury Sierpca, albo Kamionek.

Jeśli chodzi o konflikty interesów wykorzystania zasobów naturalnych to dla rejonu III brak jest istotnego zagrożenia dla użytkowych wód podziemnych, obszary NATURA 2000 występują tylko w obrębie jednej struktury (antyklina Wyszogrodu), perspektywy zaś na odkrycie gazu w łupkach na obszarze wytypowanych struktur wydają się nikłe (Raport PIG-PIB, 2012).



#### IV - brzeźna strefa Karpat i zapadliska przedkarpackiego

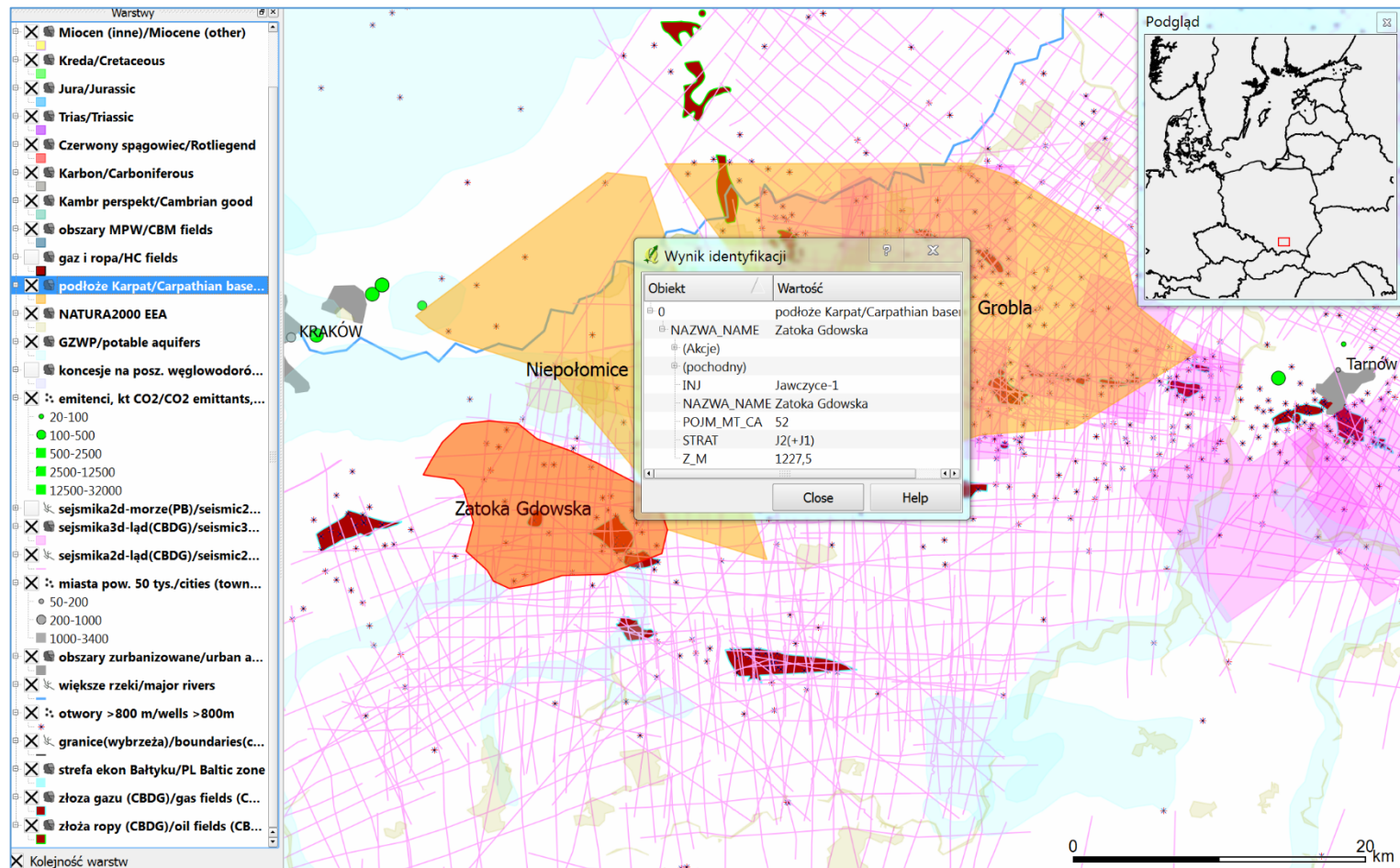


Fig. 3\_18 Obiekt solankowy Zatoka Gdowska (jura klastyczna)

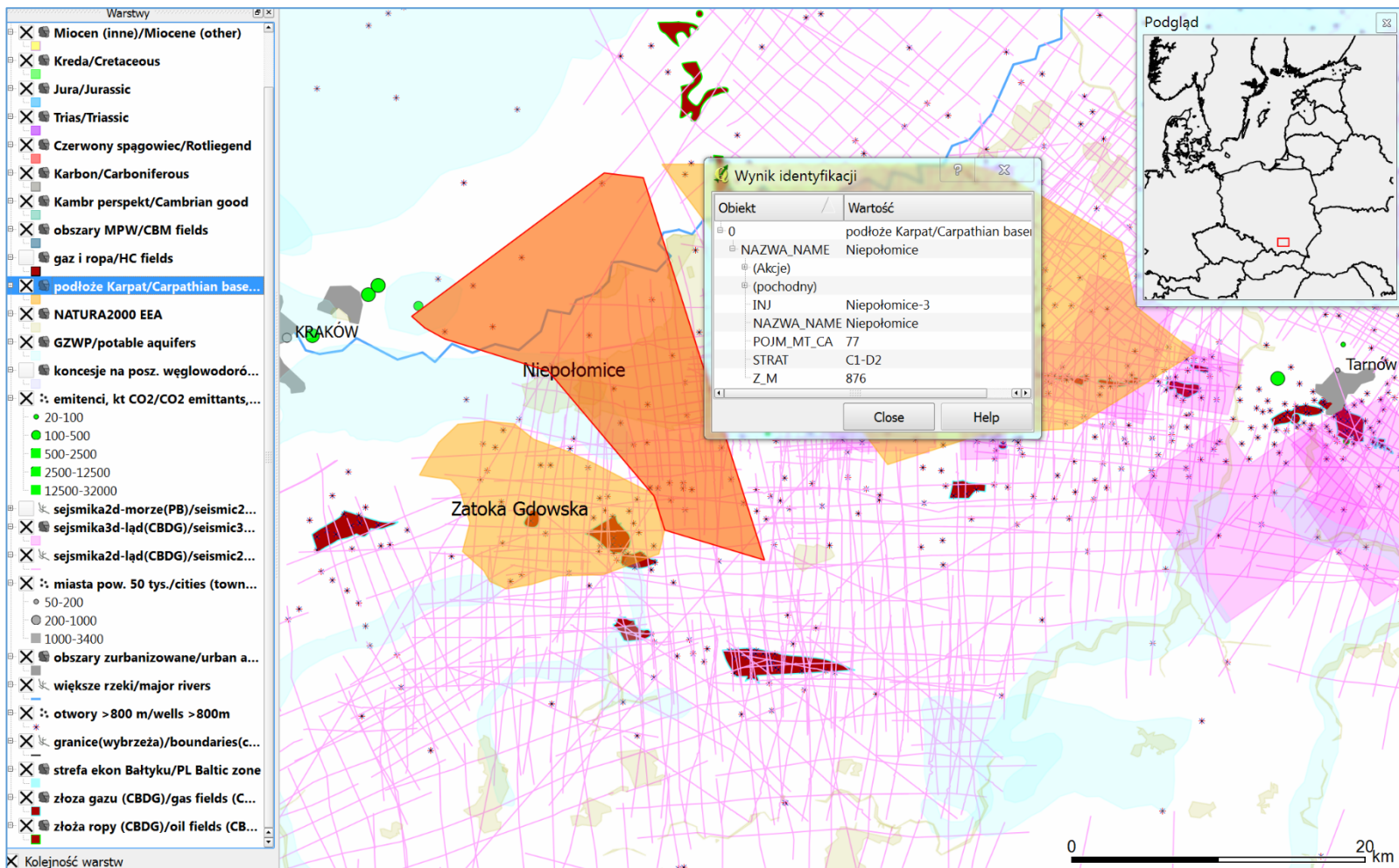


Fig. 3\_19 Obiekt solankowy Niepołomice (karbońsko-dewoński kompleks węglanowy)

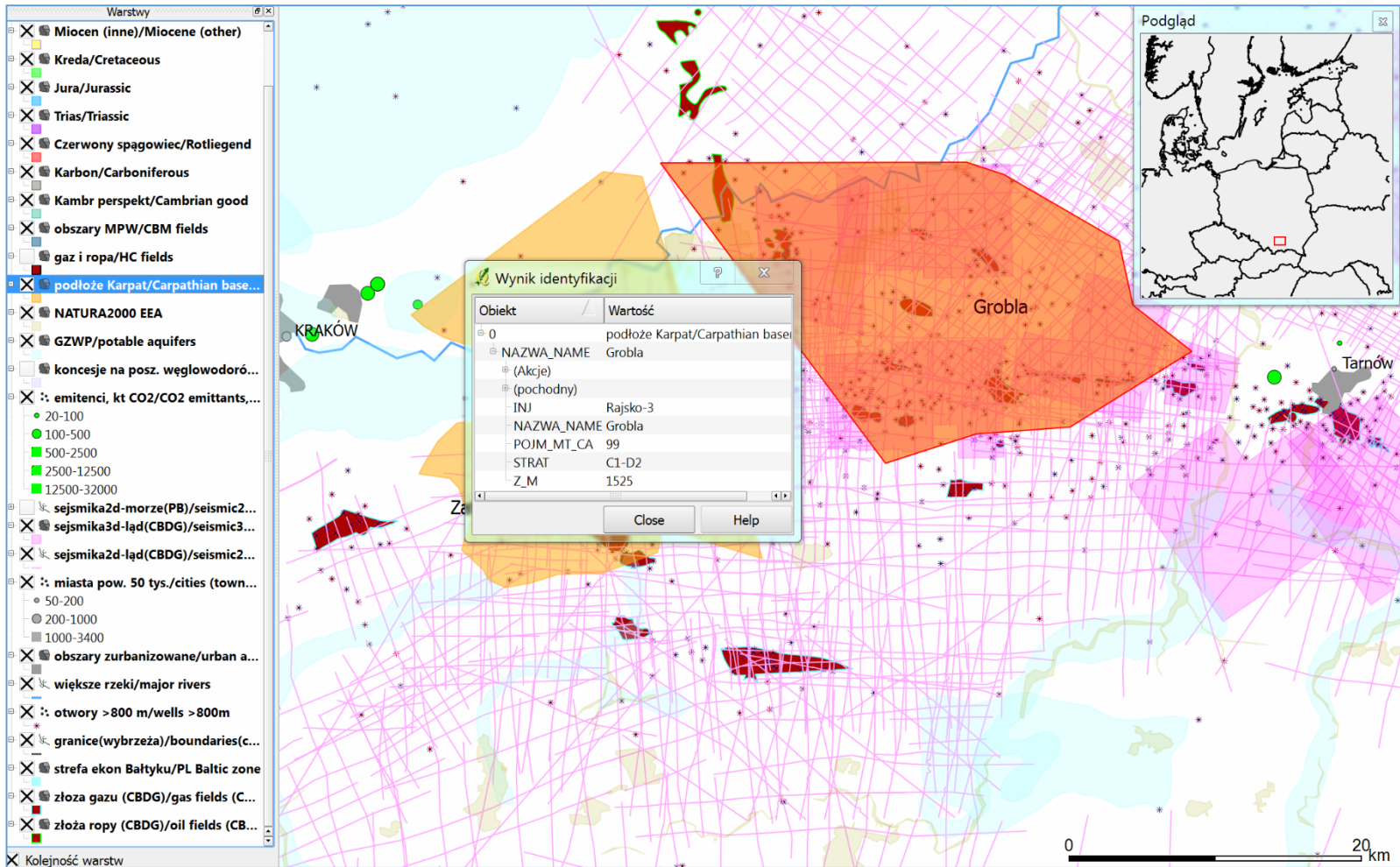


Fig. 3\_20 Obiekt solankowy Grobla (karbońsko-dewoński kompleks węglanowy)

W obszarze zachodnim IVA (generalnie między Krakowem a Tarnowem) wytypowano, po uwzględnieniu aspektów środowiskowych i gęstości sieci osadniczej, dwa zbiorniki w utworach karbońsko-dewońskiego kompleksu węglanowego: „Zbiornik Niepołomice” (**Fig. 3\_19**) i „Zbiornik Grobla” (**Fig. 3\_20**). Nieprzepuszczalny nadkład zbiorników stanowi kilkusetmetrowa seria ilastych utworów miocenu, a dodatkowo w części południowej kompleks utworów fliszowych, co - obok istnienia złóż węglowodorów - świadczy w tym przypadku o możliwości bezpiecznego składowania CO<sub>2</sub> w węglanach (wszystkie pozostałe struktury solankowe występują w utworach klastycznych, głównie piaskowcach).

W obszarze IVA analizowany był ponadto rejon Zatoki Gdowskiej (**Fig. 3\_18**), zazębiający się częściowo z obszarem zbiornika Niepołomice, omawianego powyżej. Kolektorem w rejonie Zatoki Gdowskiej są utwory piaskowców i zlepieńców jury klastycznej, zasadniczo środkowej.

Potencjalne składowiska w rejonie IVA nie są strukturami typu antykliny jak na Niżu, ale raczej obszarami/obiektami, jak w przypadku rejonu GZW (Skoczowa-Czechowic), tzn. fragmentami regionalnego zbiornika – formacji geologicznej, ograniczonymi przez strefy dyslokacyjne. Efektywność składowania jest w związku z tym raczej niska.

Sugerowany ranking obiektów:

- Zatoka Gdowska (**Fig. 3\_18** - utwory klastyczne jury, bardziej przewidywalne, jeśli chodzi o parametry złożowe i zachowanie się CO<sub>2</sub> zatłoczonego do kolektora od zbiorników węglanowych);
- zbiorniki węglanowe Niepołomice (**Fig. 3\_19**) i Grobla (**Fig. 3\_20**) (równoważna pozycja; zbiornik Niepołomice ma więcej obszarów chronionych a zbiornik Grobla - złóż gazu na swoim obszarze; pierwszy jest łatwiej dostępny od strony Krakowa a drugi - Tarnowa); w przypadku ośrodka szczelinowo-porowego, jakim są węglany, własności zbiornikowe są bardzo zmienne i raczej słabe (ale z kolei zatłaczanie CO<sub>2</sub> i związane z tym zjawiska reaktywności CO<sub>2</sub>-solanka-skała zbiornikowa mogą spowodować polepszenie własności zbiornikowych – jak w przypadku złoża ropy naftowej Nosówka, analizowanego w II Segmencie).

Maksymalny realny scenariusz dla aglomeracji krakowskiej to wykorzystanie łącznie zbiornika Niepołomice i Zatoki Gdowskiej oraz ewentualnie niedużego, pobliskiego złoża gazu Łąka na potrzeby Huty Arcelor Mittal (elektrociepłownia, wielki piec oraz cementownia w Nowej Hucie) i elektrociepłowni w Krakowie, ale również jest możliwe, że po szczegółowych badaniach geologiczno-geofizycznych okaże się, że obydwa obiekty wystarczą tylko na potrzeby Nowej Huty (a na potrzeby elektrociepłowni miejskiej w Krakowie trzeba będzie wykorzystać jeszcze obiekt Grobla). Natomiast w przypadku

obiekty Grobla nie będzie problemem zaspokojenie potrzeb instalacji Zakładów Azotowych w Tarnowie.

Rejon wschodni (IVB), obejmujący małe struktury w formacjach miocenu na wschód od Rzeszowa w sąsiedztwie złóż, został określony jako nieperspektywiczny w przypadku geologicznego składowania CO<sub>2</sub> w poziomach solankowych. Chociaż lokalnie przy złożach gazu własności zbiornikowe kolektorów mioceńskich są stosunkowo dobre, to z uwagi na małą ich miąższość otrzymane pojemności są bardzo małe – największe dla struktury Malawa (**Fig. 3\_21**). Z punktu widzenia sekwestracji są one nieistotne, chyba że byłyby traktowane łącznie z sąsiednimi złożami gazu (struktura Malawa sąsiaduje ze złożami gazu Husów-Albigowa-Krasne).

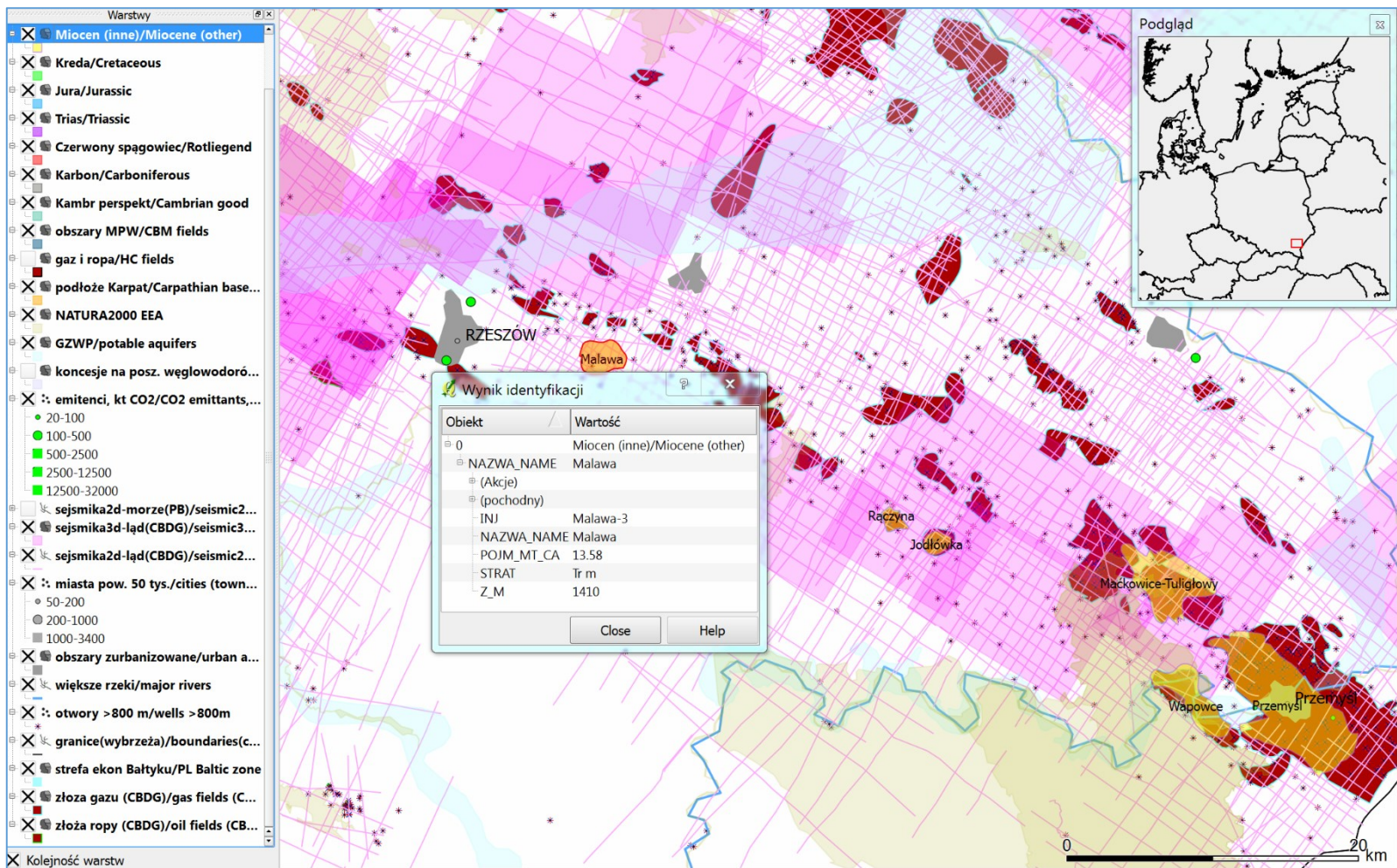


Fig. 3\_21 Struktury solankowe w miocenie we wschodniej strefie frontu nasunięcia Karpat

## V - Lubelszczyzna (i Podlasie)

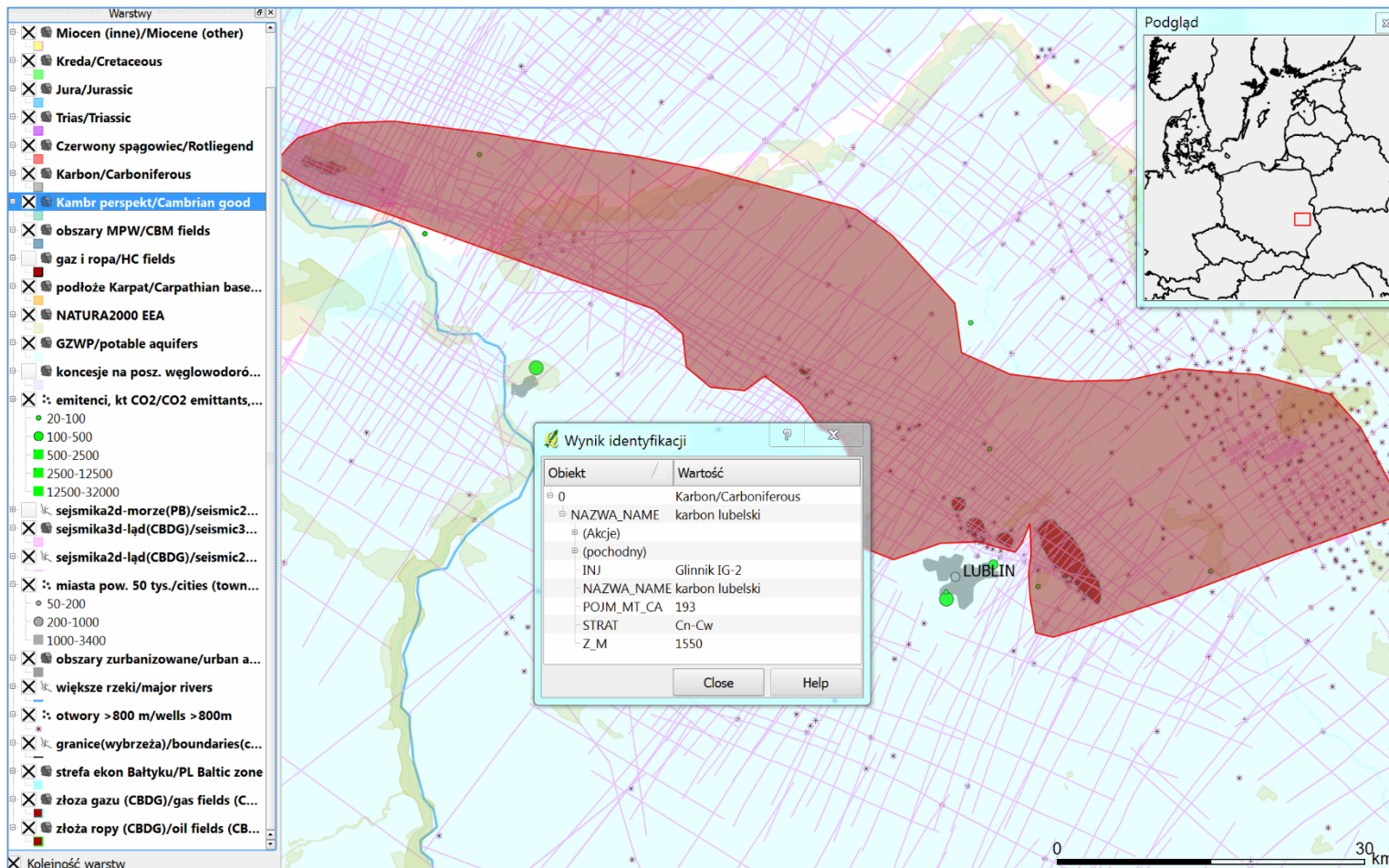


Fig. 3\_22 Obszar perspektywny dla składowania CO2 w karbonie, w rejonie Lubelszczyzny

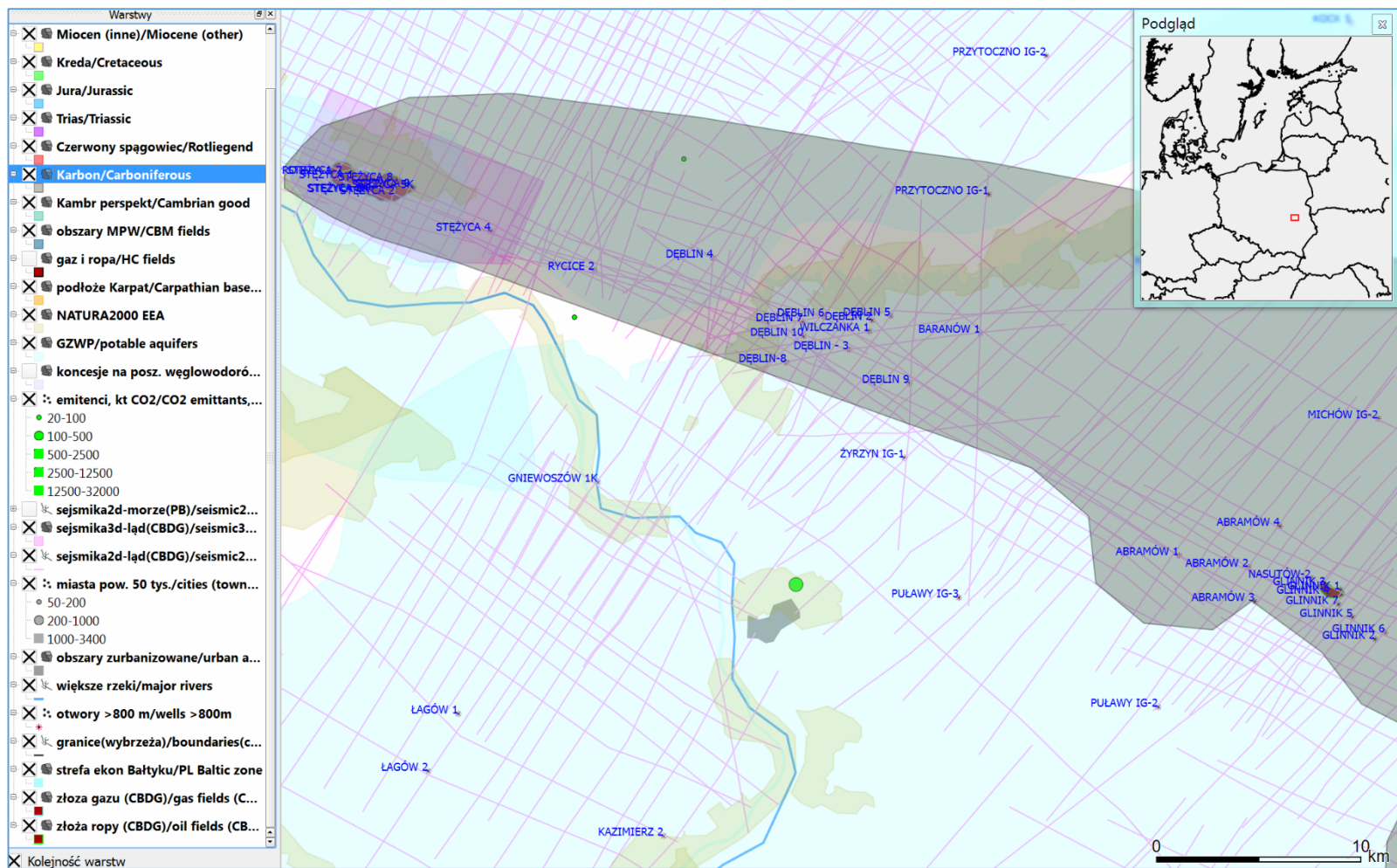


Fig. 3\_22A Część NW.



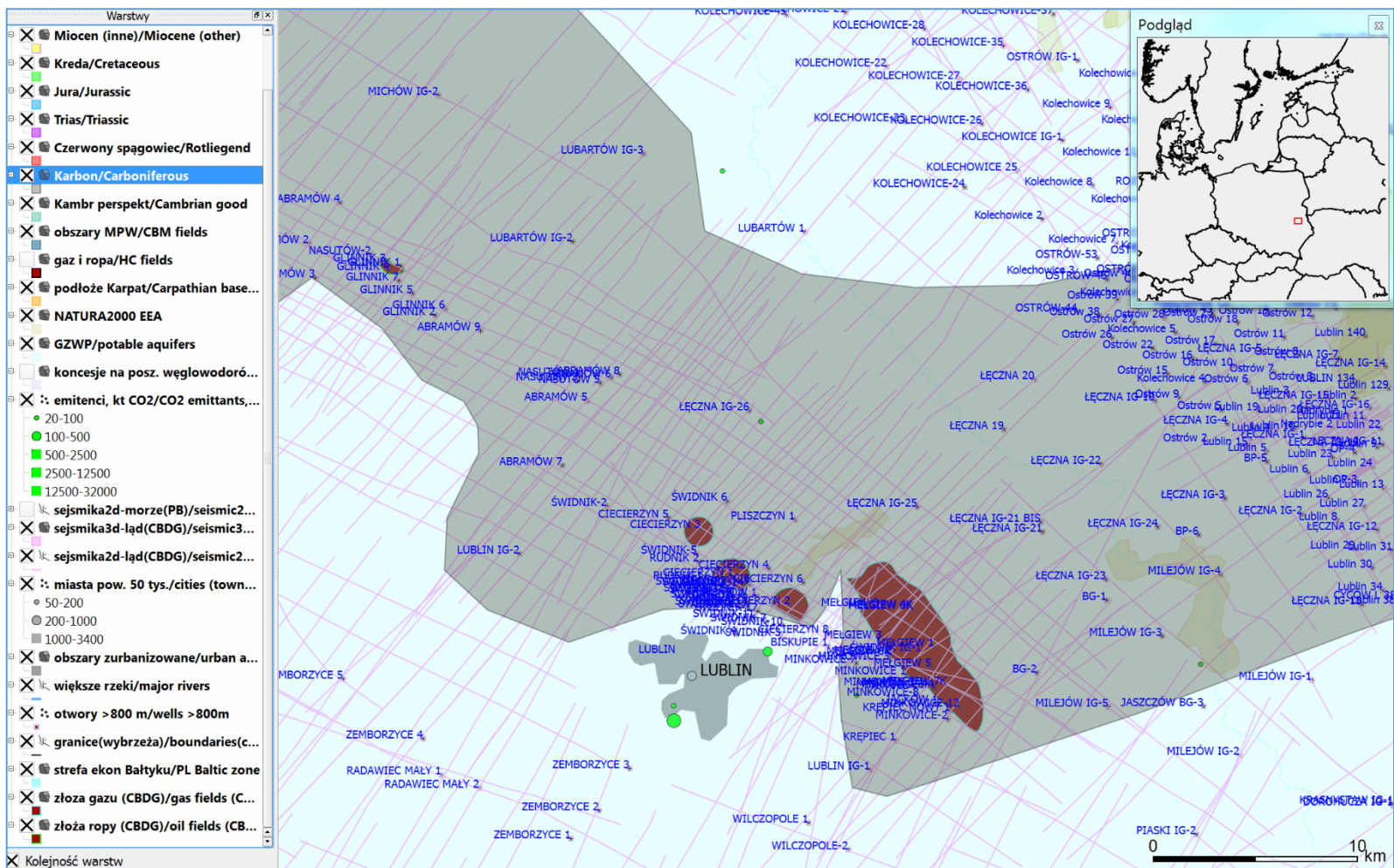


Fig. 3\_22B Część SE.

Na obszarze Lubelszczyzny określono obszar perspektywiczny, w którym występują odpowiednie facje kolektorskie i uszczelnienia w obrębie utworów karbonu górnego (namur-westfal). Obszar ten rozciąga się od Stężycy do Lublina i dalej na wschód/północny wschód (**Fig. 3\_22**). Problem stanowi fakt znacznej zmienności parametrów zbiornikowych w pionie i poziomie kompleksu namursko-westfalskiego i istnienie wielu poziomów kolektorskich o niewielkiej miąższości.

W rezultacie szacowana pojemność dla kolektora regionalnego (C3) ma charakter orientacyjny i dotyczy raczej dolnej granicy pojemności składowania dla całej strefy perspektywicznej (**Fig. 3\_22**). Dlatego nie można podać rankingu struktur, a jedynie możliwe scenariusze dla obszaru perspektywicznego dla sekwestracji w rejonie Lubelszczyzny.

W jego obrębie można podać wiele potencjalnych punktów zatłaczania, zależnie od potrzeb (czy elektrociepłowni z Lublina, czy instalacje Zakładów Azotowych Puławy): Stężycza 1, 2; Rycice 2; Dęblin 7; Wilczanka 1; Abramów 1; Kock 2; Glinnik 2; Lubartów IG-3; Nasutów 1; Lublin IG-2; Łączna IG-25; Świdnik IG-1; Lublin IG-1; Piaski IG-2; Łączna IG-13; Busówno IG-1; Łączna IG-9. Orientacyjnie można powiedzieć, że otwory od Stężycy 1 do Glinnika 2 i Nasutowa 1 włącznie mogą być odpowiednie dla Puław (zachodnia część mapy **Fig. 3\_22**; patrz **Fig 3\_22A**) zaś od Glinnika 2 i Nasutowa 1 do Łącznej IG-9 – dla elektrociepłowni w Lublinie (**Fig 3\_22B**).

Jeśli chodzi o konflikty interesów wykorzystania zasobów naturalnych, to dla rejonu Lubelszczyzny brak jest istotnego zagrożenia dla użytkowych wód podziemnych, czy też obszarów NATURA 2000, perspektywy zaś na odkrycie gazu w łupkach na wytypowanym obszarze wydają się nikłe (Raport PIG-PIB, 2012).

Natomiast w rejonie Podlasia stwierdzono w kilku otworach występowanie dwóch piaskowcowych poziomów kolektorskich kambru o dobrych własnościach zbiornikowych, jednakże obszar ten (**Fig. 3\_23**) prawie nie jest rozpoznany sejsmiką (z wyjątkiem skrajnie zachodniego fragmentu) i stąd jedyne wiarygodne informacje na temat budowy strukturalnej kompleksu kambryjskiego pochodzą z ekstrapolacji danych z kilku otworów. Mamy tu, więc kolektor regionalny, a właściwie kilka mniejszych obszarów wokół otworów Tłuszcz IG-1, Łochów IG-1, Łochów IG-2, Wrotnów IG-1, Stadniki IG-1 i Mielnik IG-1, prawdopodobnie w obrębie stref rowów i horstów podłoża prekambryjskiego. Szacowana pojemność dla kolektora regionalnego (**Fig. 3\_23**) ma charakter bardzo orientacyjny (umiarkowanie pesymistyczny), a współczynnik efektywności składowania jest tu raczej niski.

Dlatego nie można tu podać rankingu struktur, a jedynie możliwe scenariusze dla obszaru perspektywnego dla sekwestracji w rejonie Podlasia.

Ww. otwory można przyjąć jako potencjalne punkty zatłaczania dla różnych scenariuszy. Jednak jedynym większym emitentem w pobliżu jest elektrownia w Ostrołęce (około 55 km na NW od obszaru), abstrahując od położonych w podobnej odległości na SW elektrociepłowni warszawskich, dla których scenariusze sekwestracji analizowano już w przypadku struktur z rejonu III. Pozostali emitenci w tym rejonie to małe i bardzo małe ciepłownie i elektrociepłownie miejskie (największą z nich jest elektrociepłownia w Siedlcach) oraz inne niewielkie, lokalne zakłady przemysłowe. W związku z powyższym ranking tych możliwych miejsc zatłaczania przedstawia się następująco, jeśli chodzi o korzystne własności zbiornika i występowanie po drodze obszarów NATURA 2000:

- Stadniki IG-1;
- Wrotnów IG-1 i Mielnik IG-1;
- Tłuszcz IG-1, Łochów IG-1, Łochów IG-2.

Odnosnie konfliktów interesów wykorzystania zasobów naturalnych, to dla rejonu Podlasia brak jest istotnego zagrożenia dla użytkowych wód podziemnych, czy też obszarów NATURA 2000, wytypowany zaś obszar wydaje się nieperspektywny dla występowania gazu w łupkach (Raport PIG-PIB, 2012).

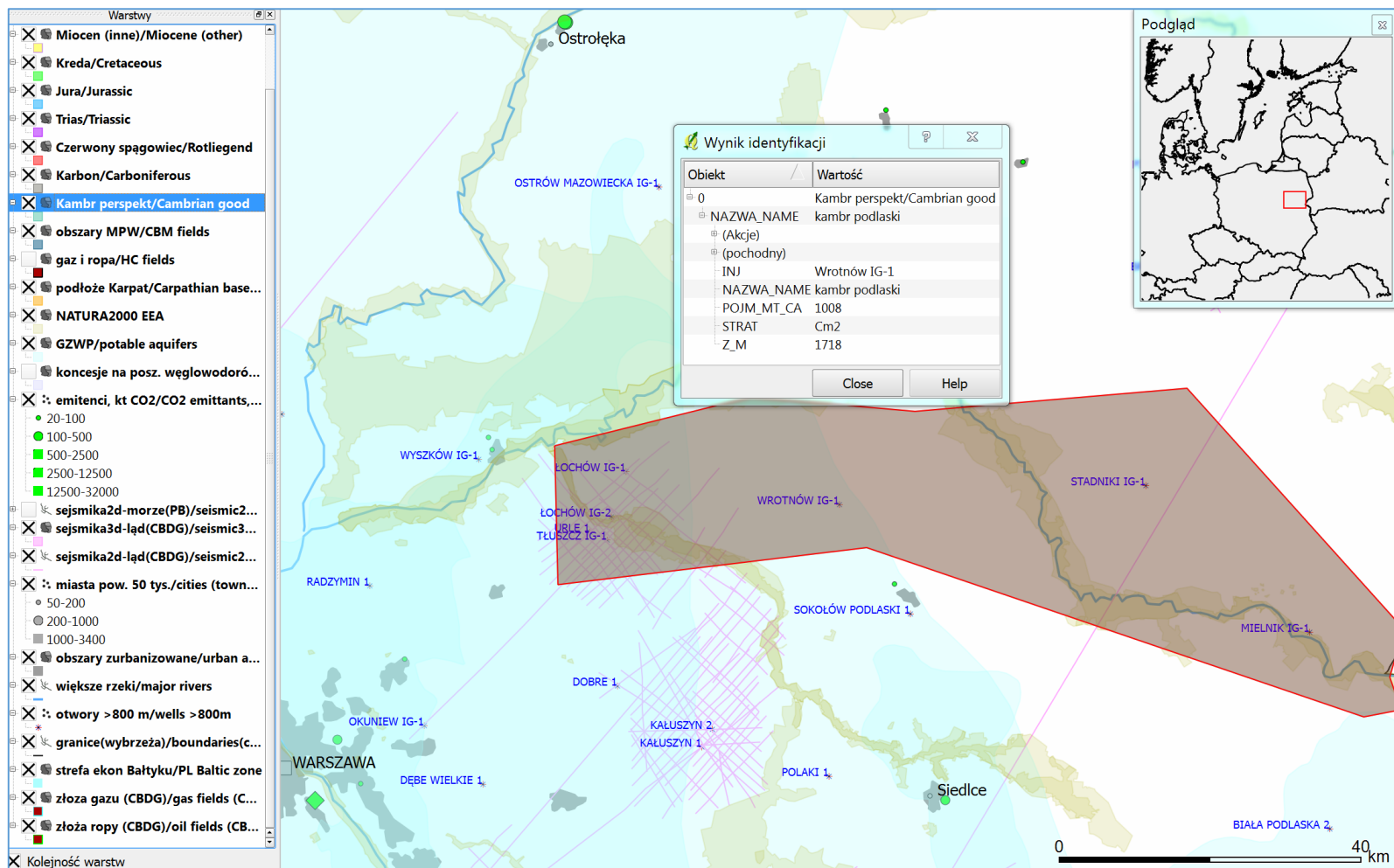


Fig. 3\_23 Obszar perspektywny dla składowania CO2 w kambrze, w rejonie Podlasia

## VI - Wielkopolska-Kujawy

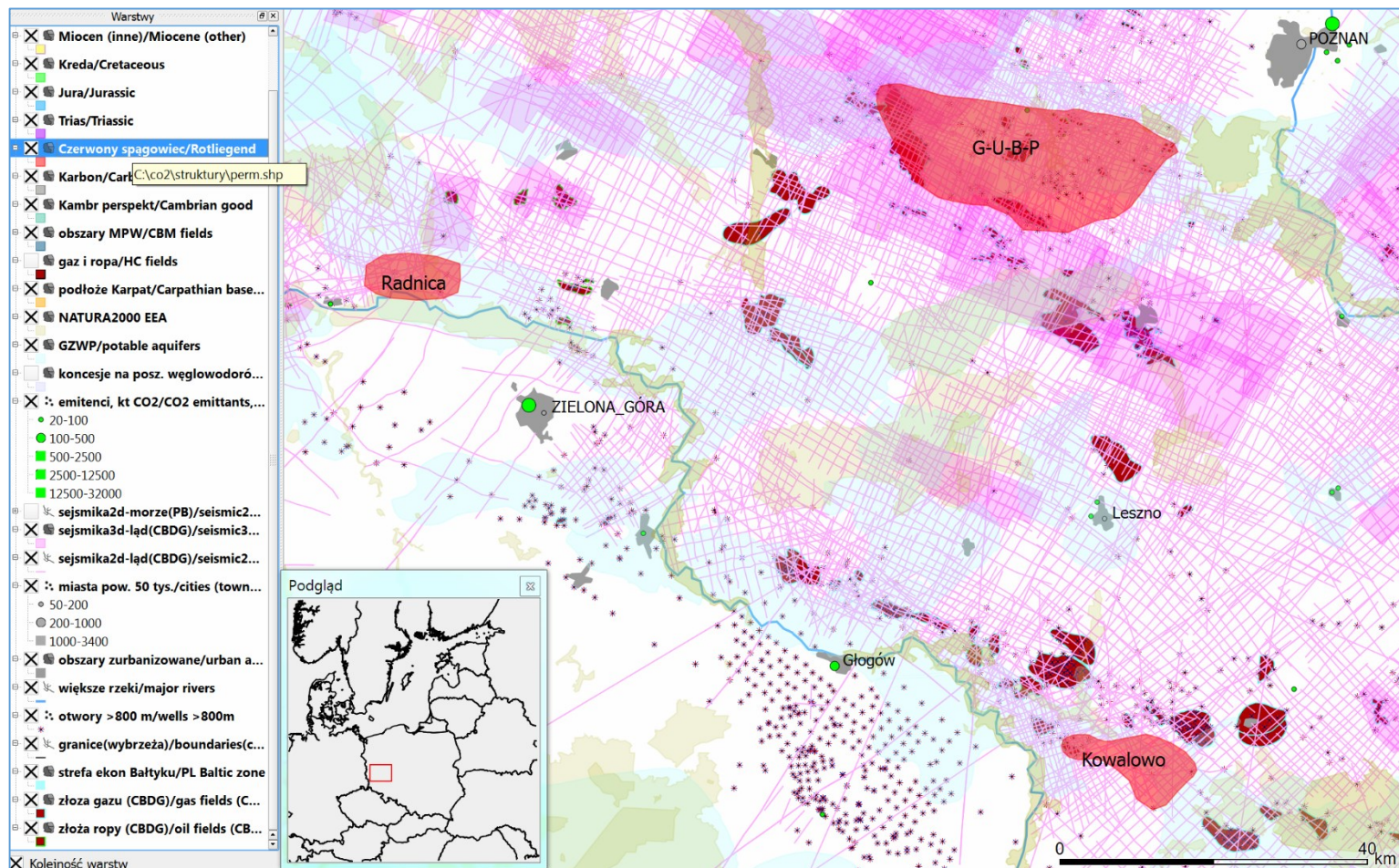


Fig. 3\_24 Struktury w utworach permu w rejonie VI

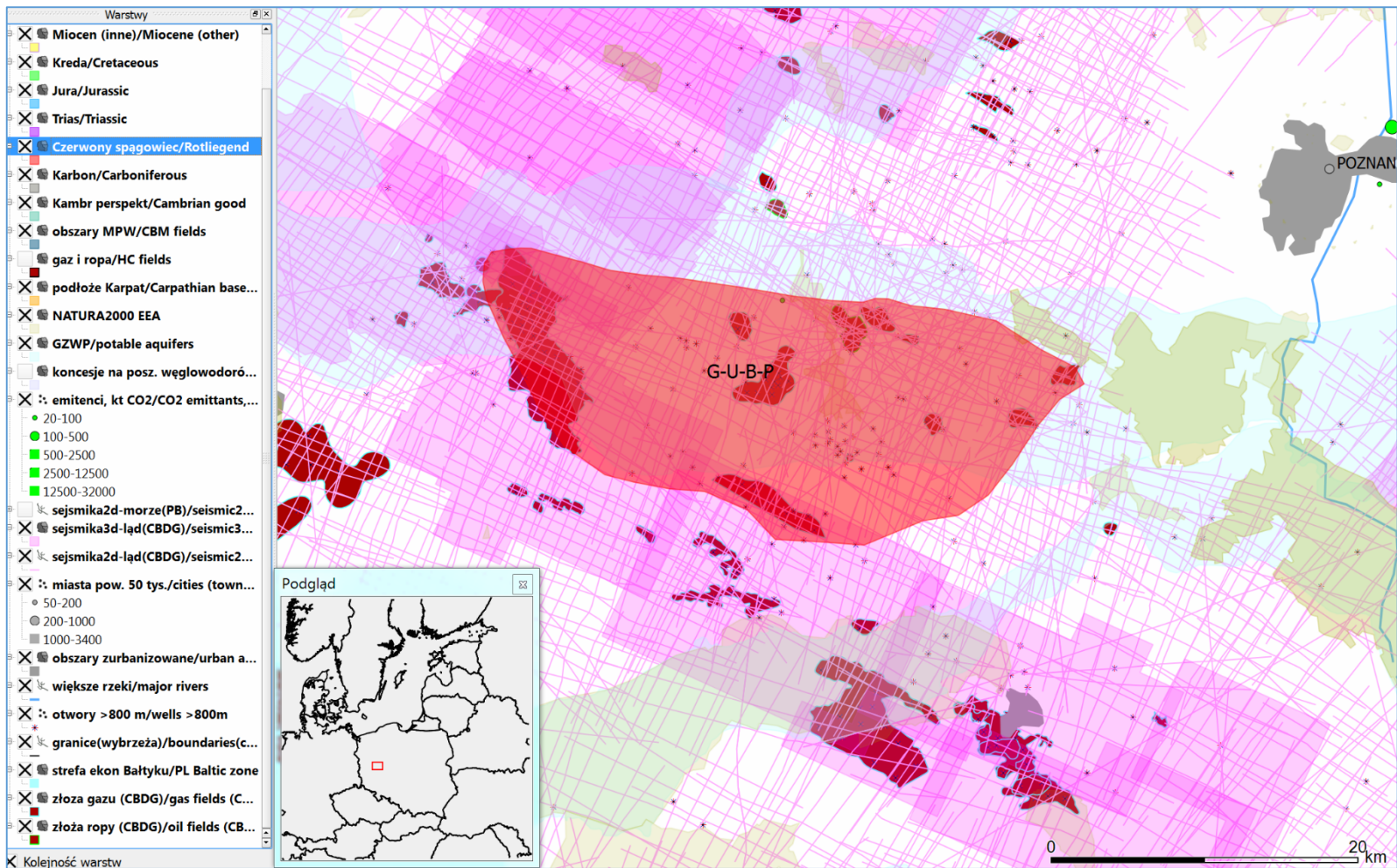


Fig. 3\_25 Megastruktura Niecki poznańskiej (obiekt Grodzisk-Ujazd-Bukowiec-Paproć) w utworach czerwonego spągowca

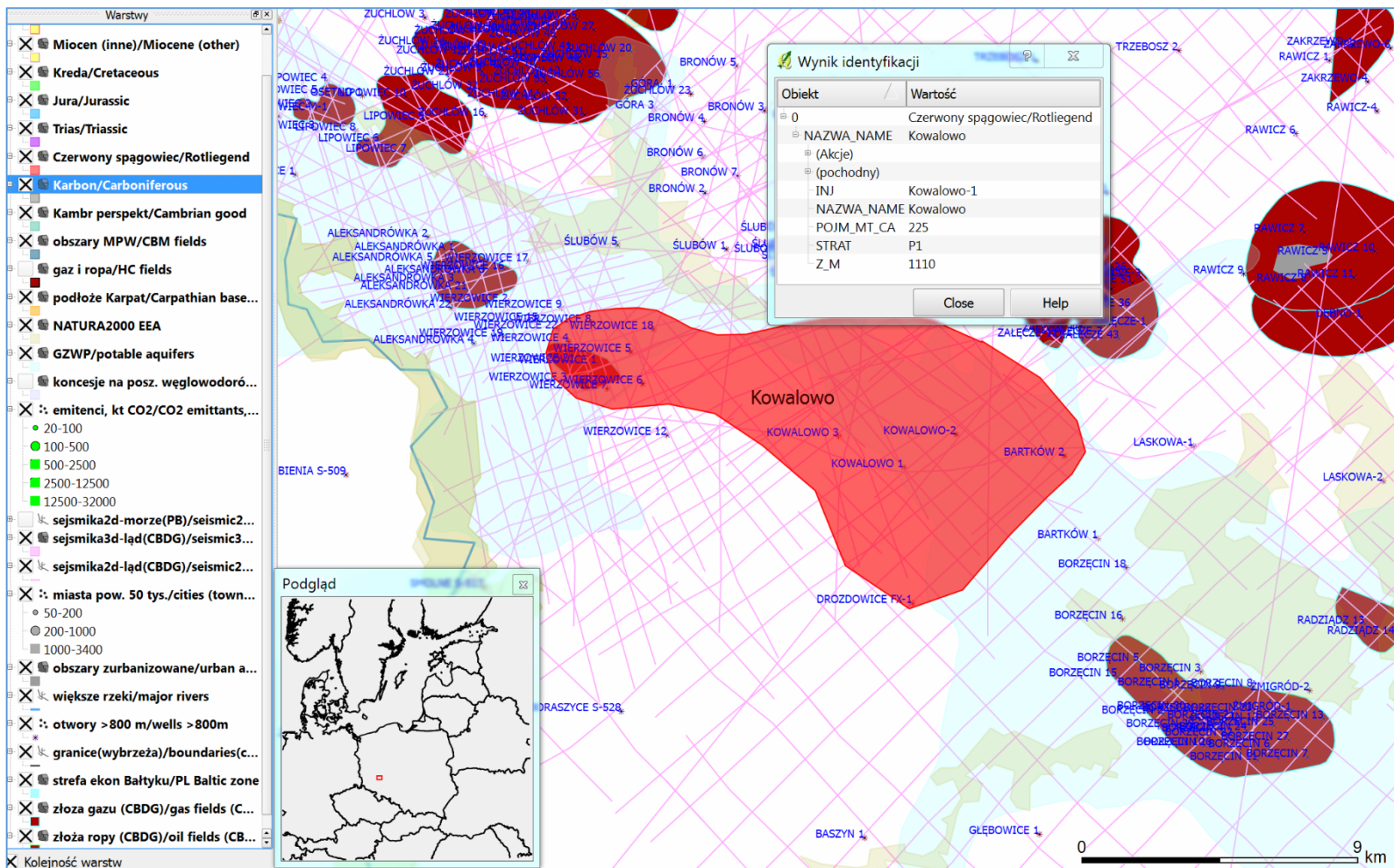


Fig. 3\_26 Struktura Kowalowo w utworach czerwonego spągowca

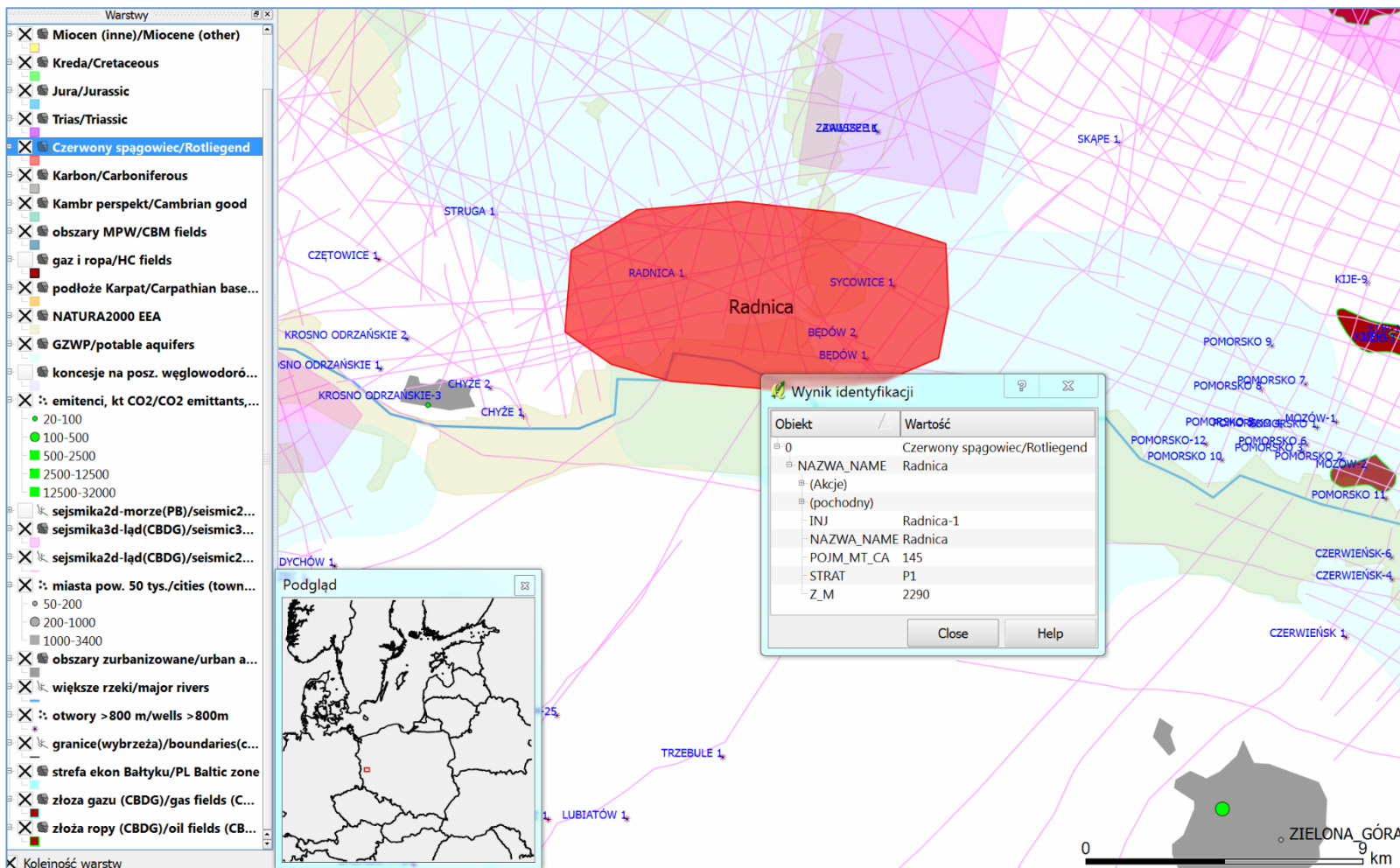


Fig. 3\_27 Obiekt Radnica w utworach czerwonego spągowca



Dla obszaru Wielkopolski/monokliny przedsudeckiej (**Fig. 3\_24**) zakwalifikowano trzy struktury w permie (czerwonym spągowcu), podane poniżej w kolejności ich rankingu, wraz z propozycjami scenariuszy CCS.

- Megastruktura Niecki poznańskiej (Grodzisk-Ujazd-Bukowiec-Paproć - **Fig. 3\_25**) charakteryzuje się dostatecznymi, lokalnie raczej dobrymi własnościami zbiornikowymi i szczelnym nadkładem. Występuje stosunkowo głęboko, na granicy zalecanej przydatności do sekwestracji, ale za to posiada ogromny potencjał składowania. Leży ona w pobliżu (odległość około 20 km) aglomeracji poznańskiej gdzie mamy duże przemysłowe źródła emisji (elektrociepłownie) a zatłaczanie CO<sub>2</sub> do kolektora solankowego czerwonego spągowca wspomogłoby w dalszej perspektywie efektywność wykorzystania występujących w jej stropie złóż gazu (wybrana też do II Segmentu).

- Struktura Kowalowo (**Fig. 3\_26**) posiada raczej dobre własności zbiornikowe i mięszczy nadkład cechsztyński. Występuje stosunkowo płytko, w otoczeniu/sąsiedztwie złóż gazu w południowej części monokliny przedsudeckiej. W jej bezpośrednim sąsiedztwie nie ma większych emitentów CO<sub>2</sub> natomiast około 50 km na SE znajduje się aglomeracja wrocławska z dwiema dużymi elektrociepłowniami.

- Obiekt Radnica (**Fig. 3\_27**) posiada raczej dobre własności zbiornikowe (najlepsze z trzech struktur/obiektów tu rozpatrywanych), mimo relatywnie znacznej głębokości. Nie jest to typowa struktura antyklinalna, ale raczej fragment/undulacja skłonu zachodniej części monokliny przedsudeckiej. Problemem może tu być sąsiedztwo obszaru NATURA przy jej południowym skraju (co oznacza utrudnienia dla przyszłych prac polowych dla pełniejszego rozpoznania obszaru). Najbliższym większym emitentem jest Zielona Góra (elektrociepłownia).

Składowanie w utworach czerwonego spągowca nie stanowi zagrożenia dla GZWP w utworach neogenu, jakie występują na tym obszarze (rozdziela je 1-2 km skał, w tym setki metrów nieprzepuszczalnych soli cechsztyńskich). Sąsiedztwo obszarów NATURA 2000 nie stanowi poważniejszych konfliktów interesów, podobnie jak obecność licznych szcerpanych złóż węglowodorów. Problemem mogłoby być odkrycie nowych złóż węglowodorów w obrębie rozpatrywanych struktur i ich zagospodarowanie.

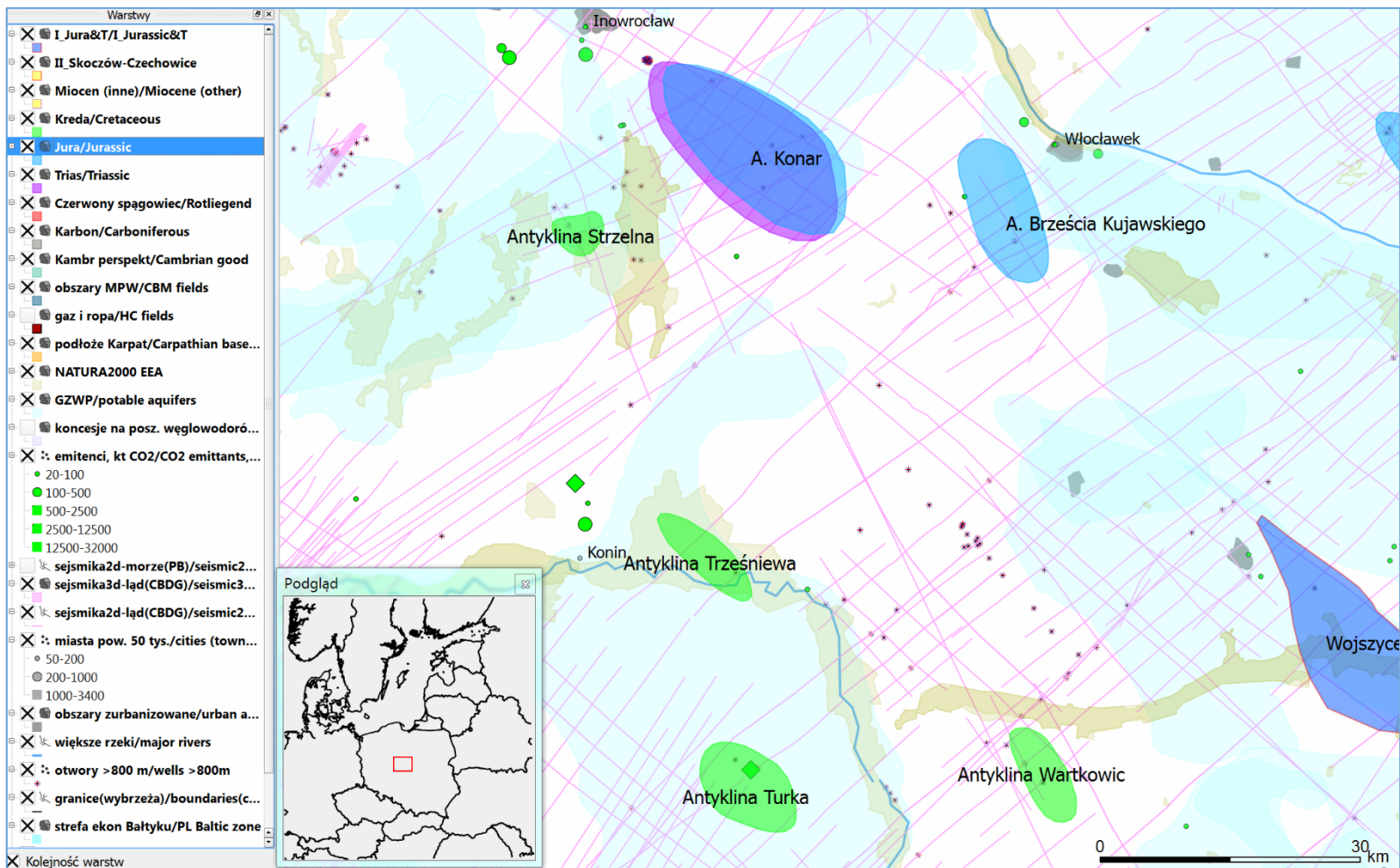


Fig. 3\_28 Struktury w utworach mezozoiku w rejonie VI

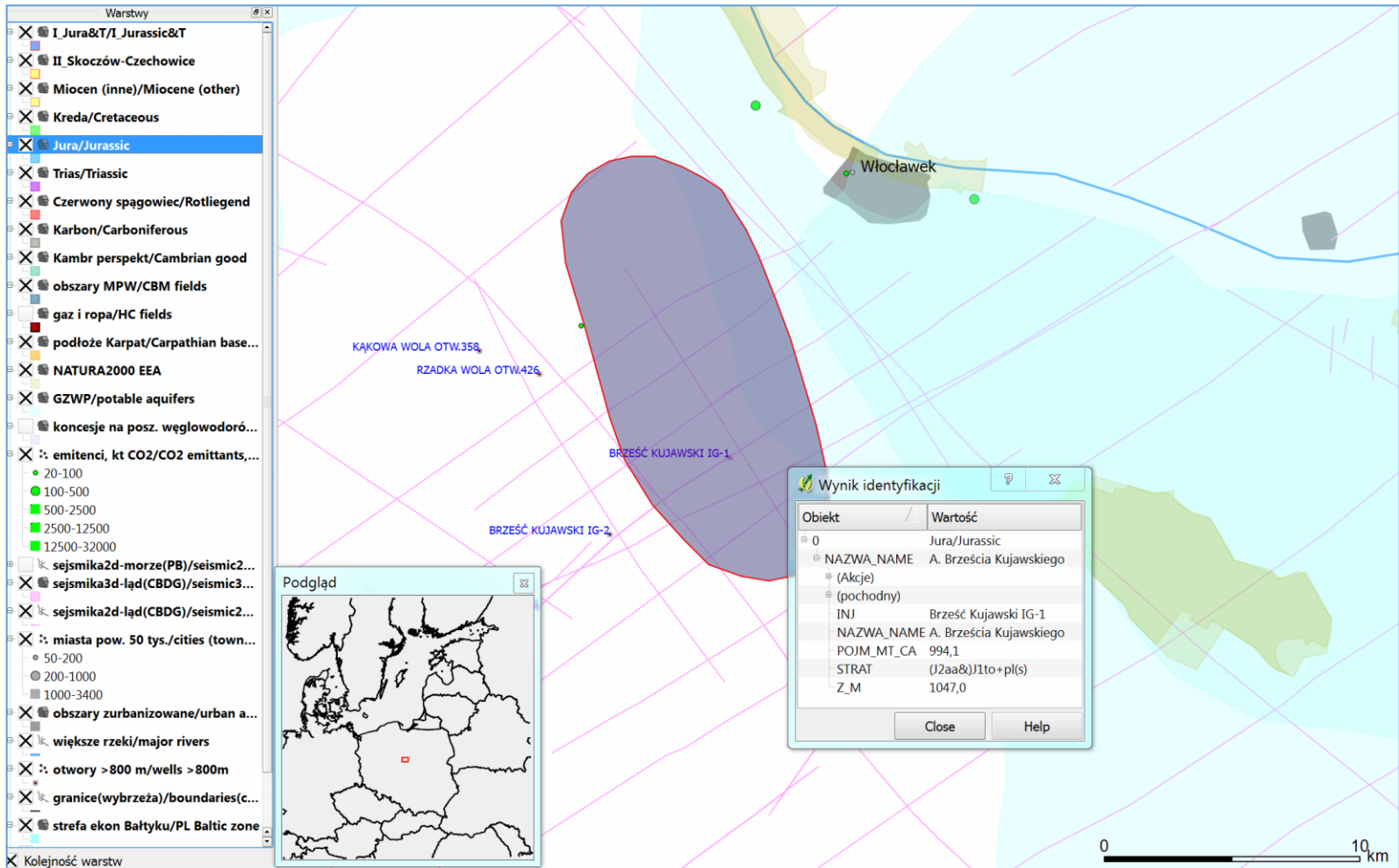


Fig. 3\_29 Struktura – antykлина Brześcia Kujawskiego w utworach jury (otwór Brześć Kujawski IG-1 – temperatura 45 °C – Górecki (red.) 2006a)

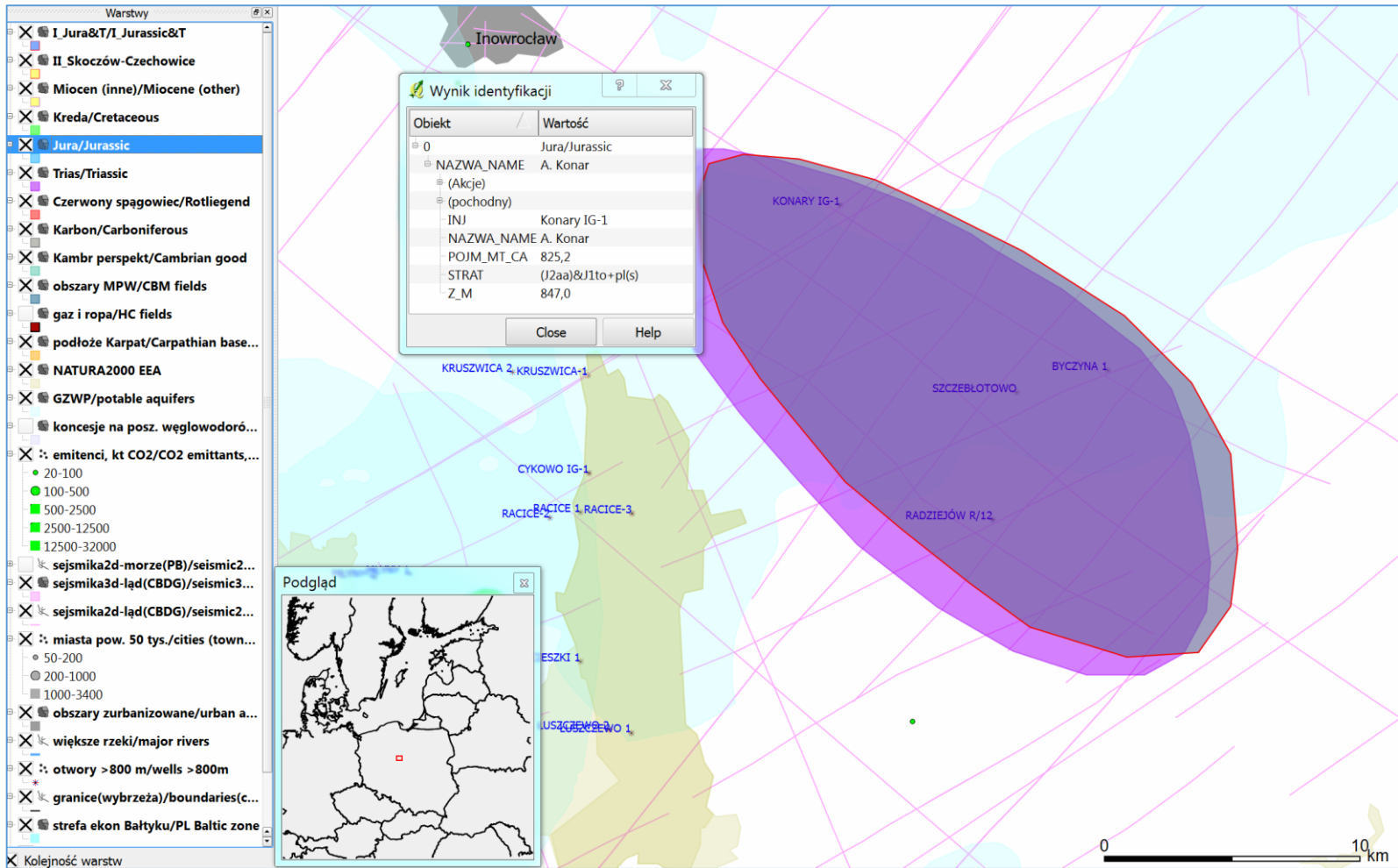


Fig. 3\_30 Struktura – antykлина Konar w utworach jury (otwór Konary IG-1 – temperatura 45 °C – Górecki (red.) 2006a)

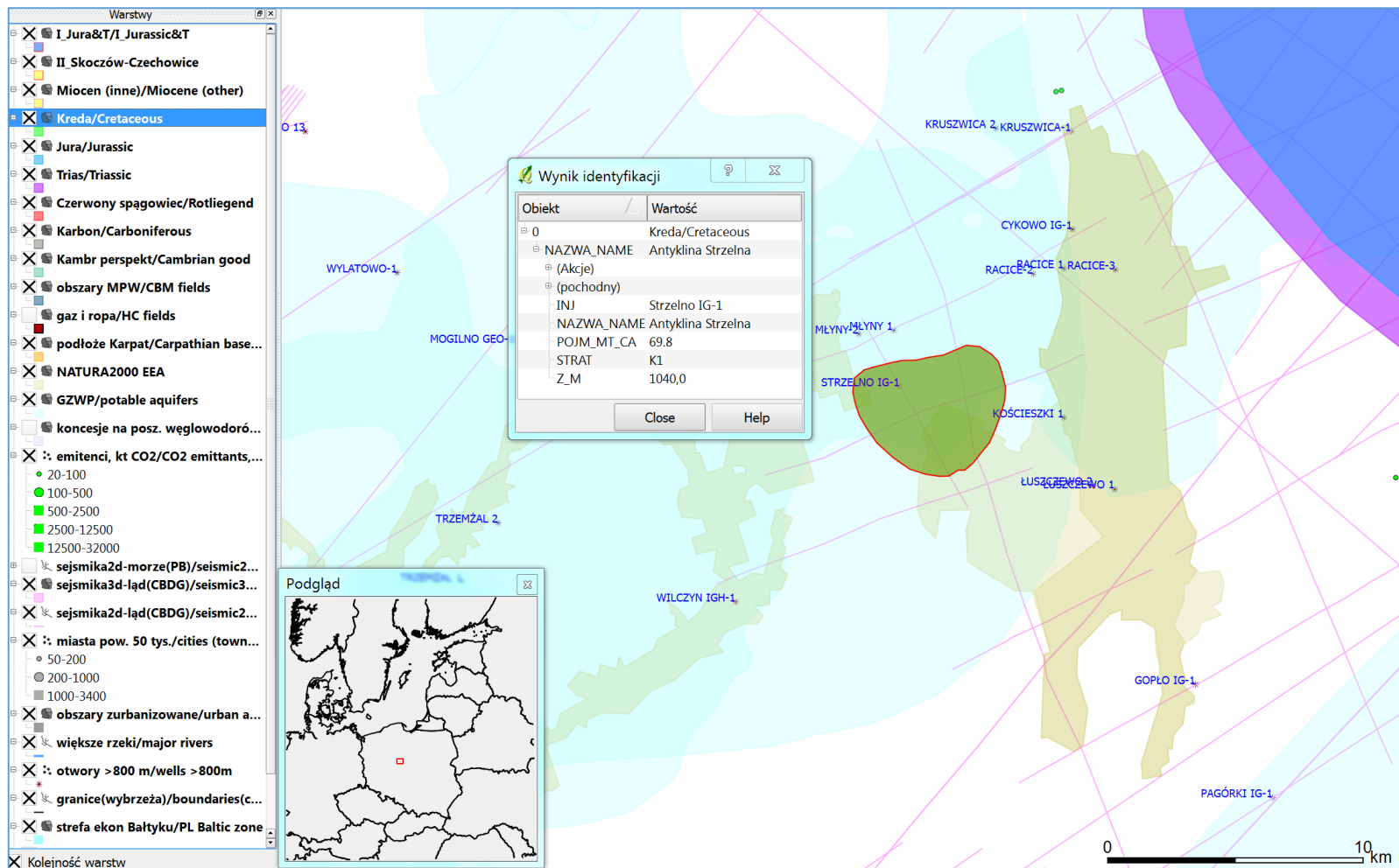


Fig. 3\_31 Struktura – antyklina Strzelno w utworach dolnej kredy

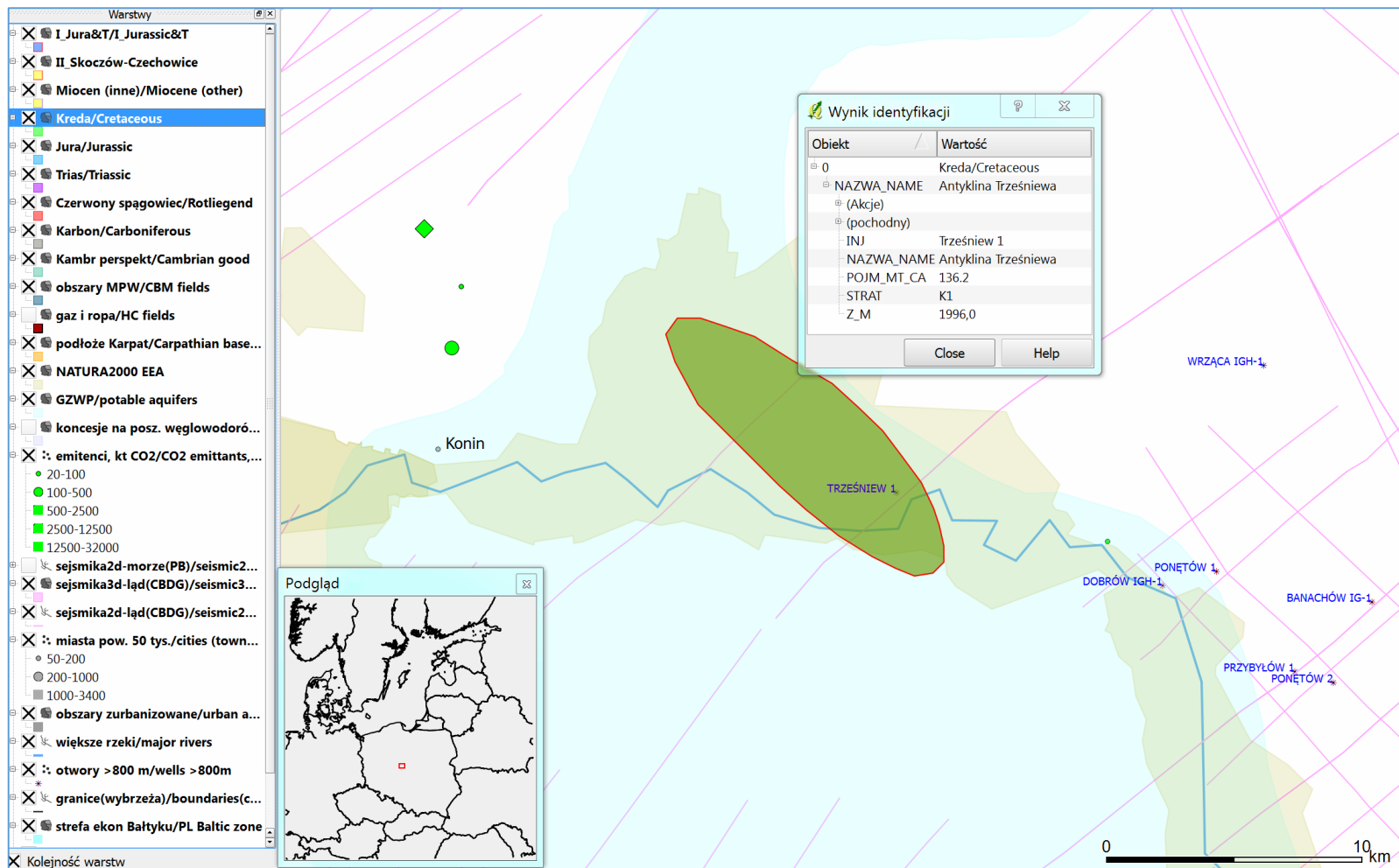


Fig. 3\_32 Struktura – antyklina Trześńiew w utworach dolnej kredy

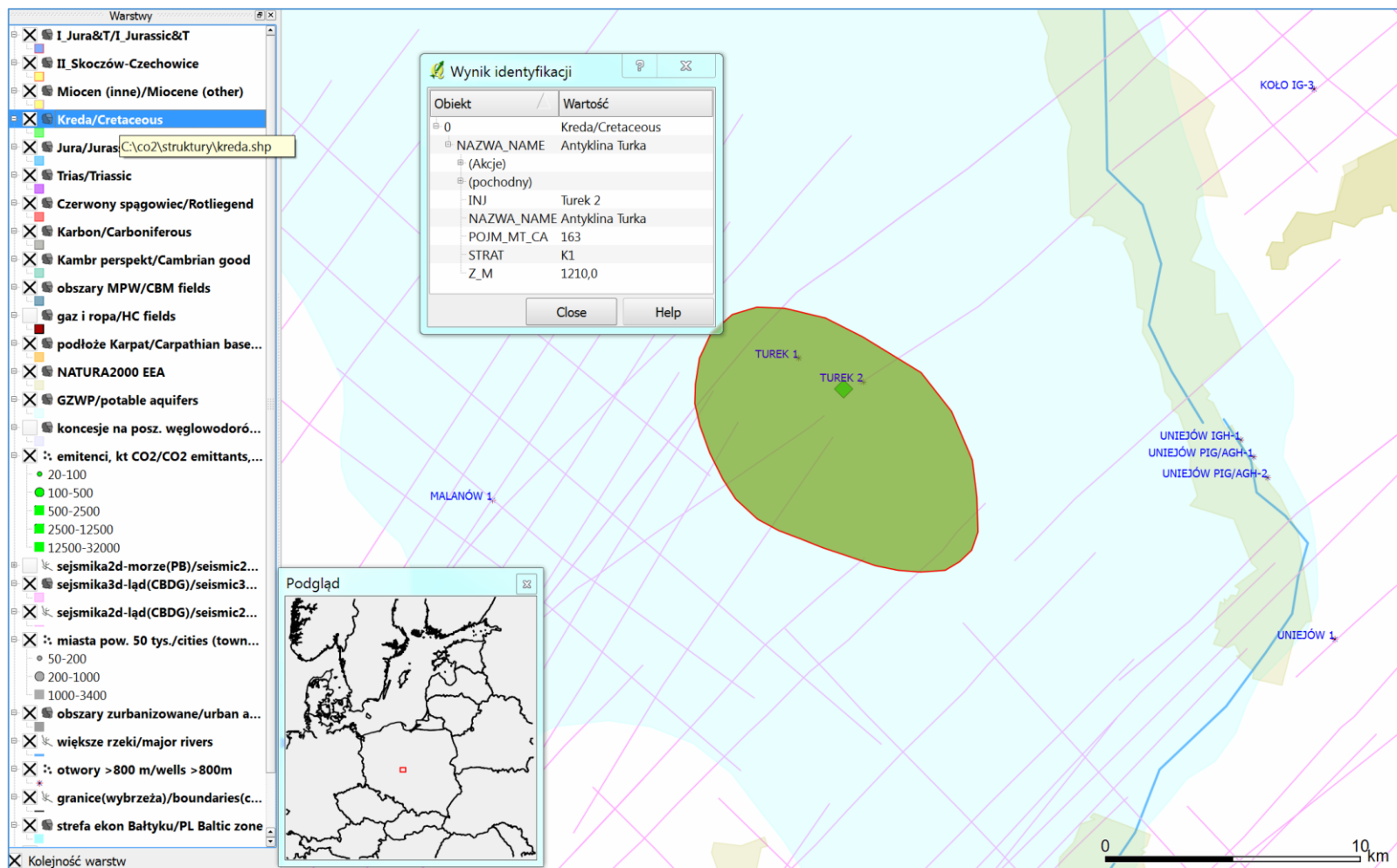


Fig. 3\_33 Struktura – antyklina Turek w utworach dolnej kredy

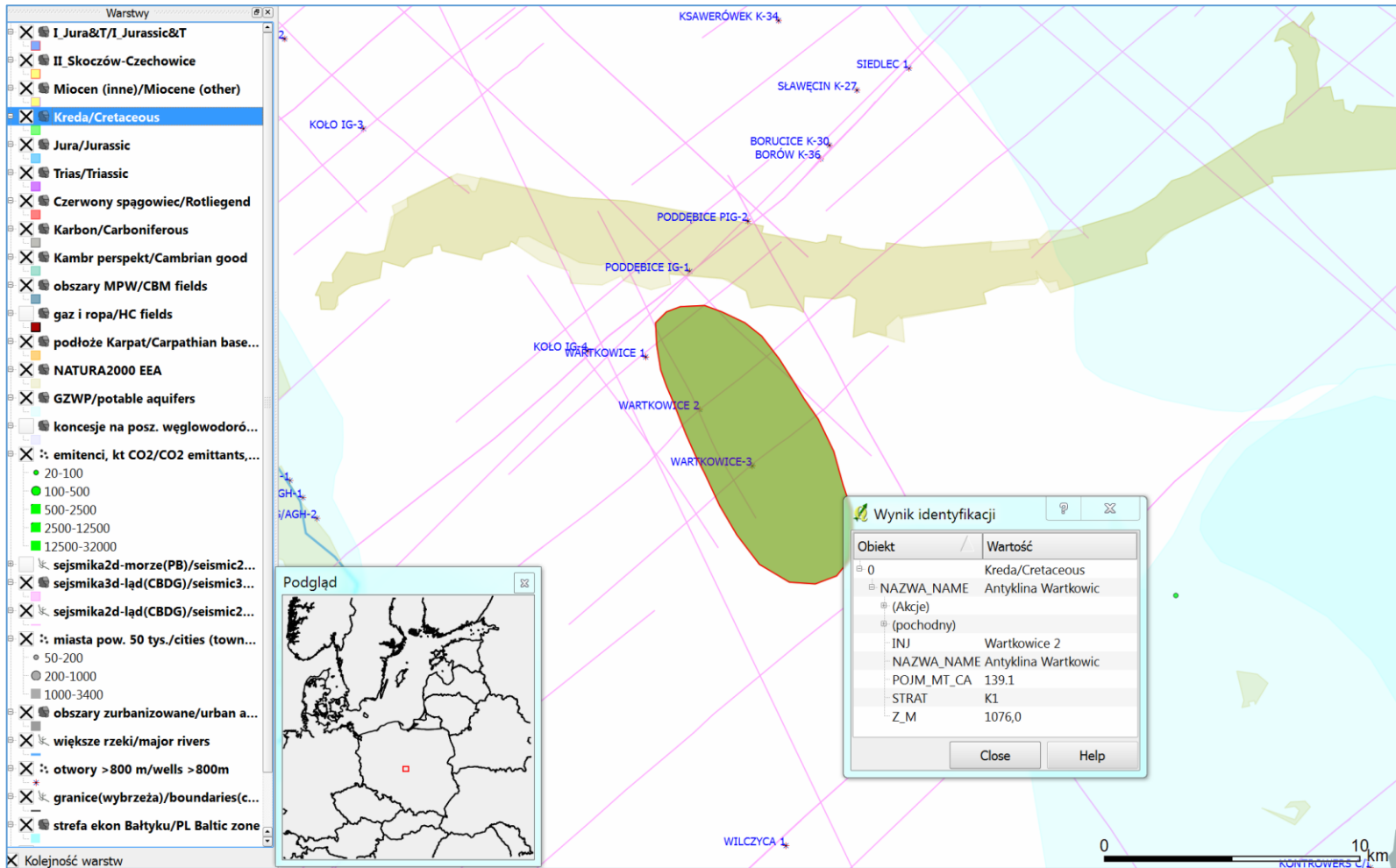


Fig. 3\_34 Struktura – antyklina Wartkowie w utworach dolnej kredy



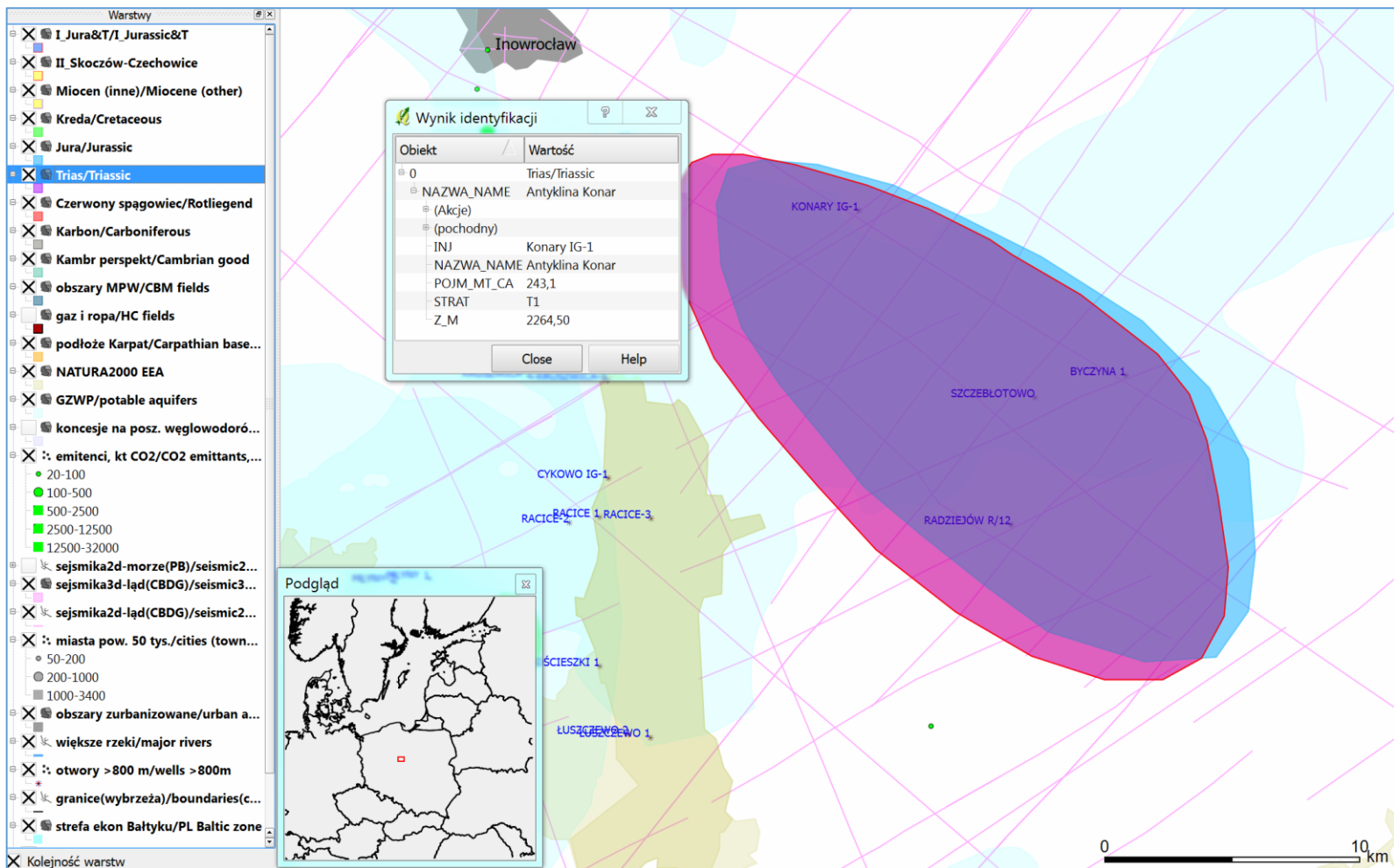


Fig. 3\_35 Struktura – antyklina Konar w utworach triasu dolnego

Dla obszaru wschodniej Wielkopolski-Kujaw oraz przyległego obszaru niecki mogileńsko-łódzkiej wytypowano struktury w kredzie jurze i triasie (**Fig. 3\_28**).

Z punktu widzenia bezpieczeństwa składowania, wykonalności i własności zbiornikowych można ustalić następujący ranking i propozycje scenariuszy sekwestracji:

- Antyklina Brześcia Kujawskiego (**Fig. 3\_29**) obejmuje miąższe zbiorniki formacji borucickiej (najwyższa dolna i w mniejszym stopniu środkowa jura) a także szereg zbiorników w obrębie formacji drzewickiej i ostrowieckiej (dolna jura). Jest to przykład wielopoziomowego systemu sekwestracyjnego o znacznej pojemności. Najbliższym większym emitentem są Zakłady Azotowe (i ciepłownia miejska) we Włocławku, ale potencjał struktury wystarczyłby z nadstatkiem do składowania emisji z położonych w odległości około 55 km elektrowni PAK na węgiel brunatny w Koninie.

- Antyklina Konar (**Fig. 3\_30**) obejmuje zbiorniki formacji borucickiej (J1/J2) a także szereg zbiorników w obrębie formacji drzewickiej i ostrowieckiej (J1) oraz w utworach pstręgo piaskowca. W odległości do około 25 km na NW, w rejonie Inowrocławia znajduje się kilka większych i mniejszych przemysłowych źródeł emisji CO<sub>2</sub> (elektrociepłownie zakładów sodowych w Inowrocławiu i Janikowie, ciepłownia miejska, cementownia w Piechcinie), których emisje po przeliczeniu na dziesiątki lat funkcjonowania instalacji, odpowiadają ułankowi potencjału struktury.

- Antykliny Strzelna, Trześniewa, Turka i Wartkowic (**Fig. 3\_31 - 34**) to struktury w kredzie dolnej, średniej wielkości, których przydatność do składowania nie jest do końca pewna (uszczelnienie kredy dolnej to kompleks węglanowo-marglisto-mułowcowy o miąższości ok. kilometra, raczej nieprzepuszczalny wg analiz laboratoryjnych I i II Segmentu; uskoki w spągu kompleksu mogą być nieszczelne, ale w świetle analiz geochemicznych raczej nie ma tu zagrożenia dla GZWP w utworach górnej kredy - lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kompleksu składowania). Jedna-dwie struktury wystarczyłyby do składowania emisji z elektrowni PAK na węgiel brunatny Adamów w Turku (zakład leży w obrębie struktury Turka). Antyklina Trześniewa leży w większości w obszarze NATURA 2000.

- Antyklina Konar w utworach dolnego triasu - pstręgo piaskowca (**Fig. 3\_35**) charakteryzuje się względnie niskim udziałem utworów piaskowcowych w kompleksie pstręgo piaskowca i raczej słabymi własnościami zbiornikowymi, co wiąże się ze stosunkowo dużą głębokością występowania zbiornika. Może być ona ewentualnie wykorzystana wraz ze strukturą w jurze (wielopoziomowy system sekwestracyjny).

## VII - NW Polska

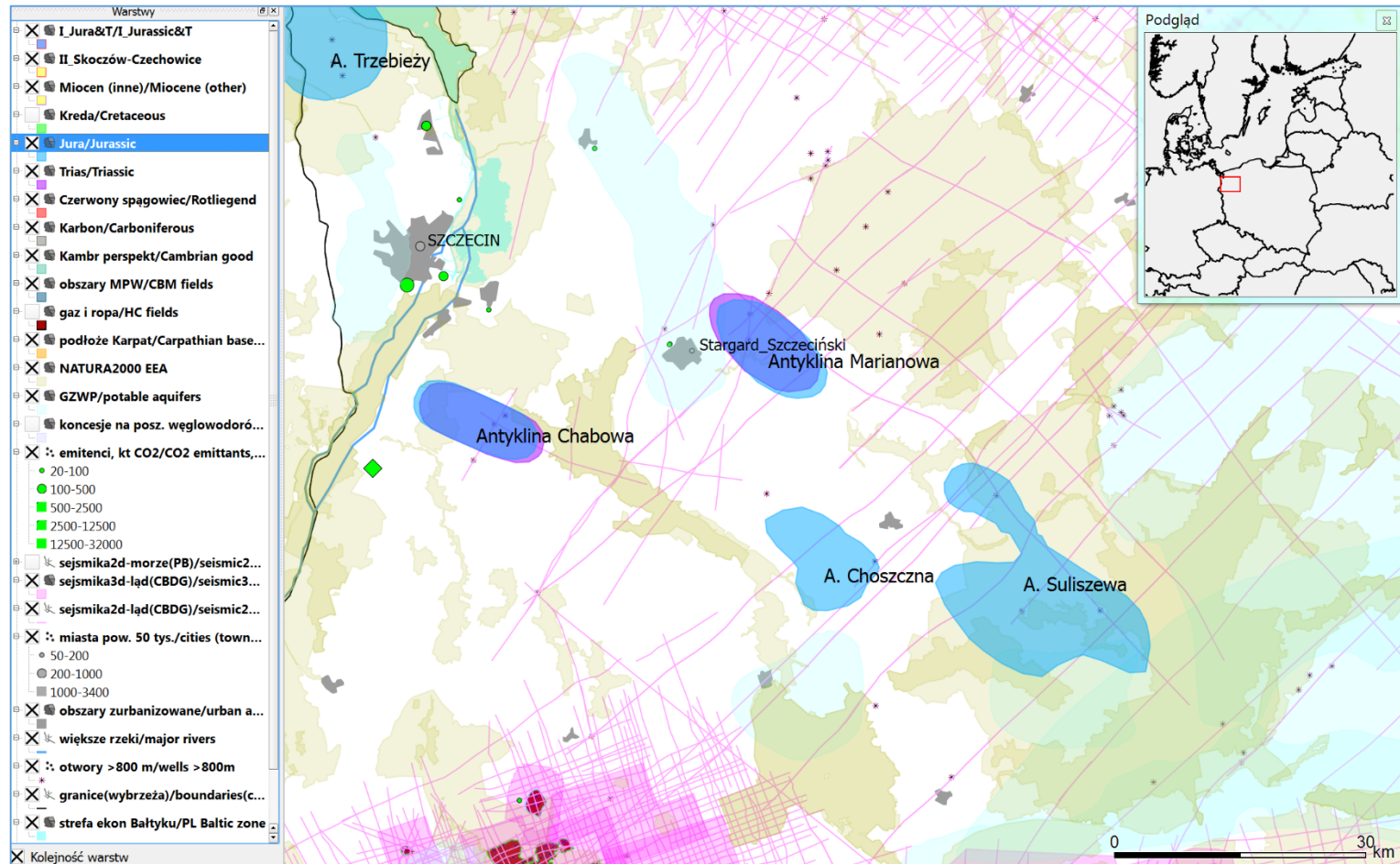


Fig. 3\_36 Struktury w utworach jury (i triasu górnego) w rejonie Szczecina

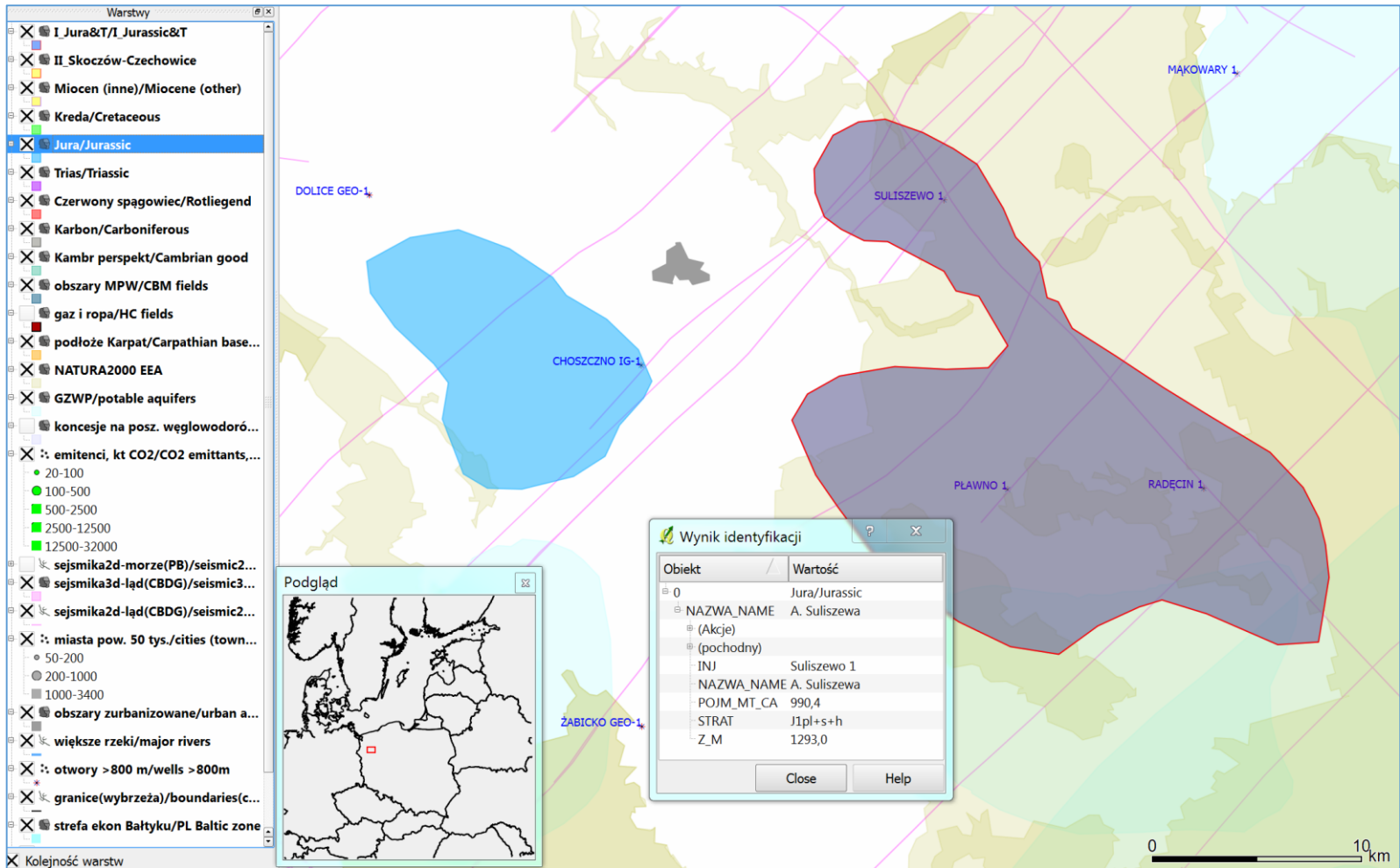


Fig. 3\_37 Struktura – antyklina Choszczna w utworach dolnej jury (kulminacja na głębokości 970 m – temperatura 37 °C – Górecki (red.) 2006a)

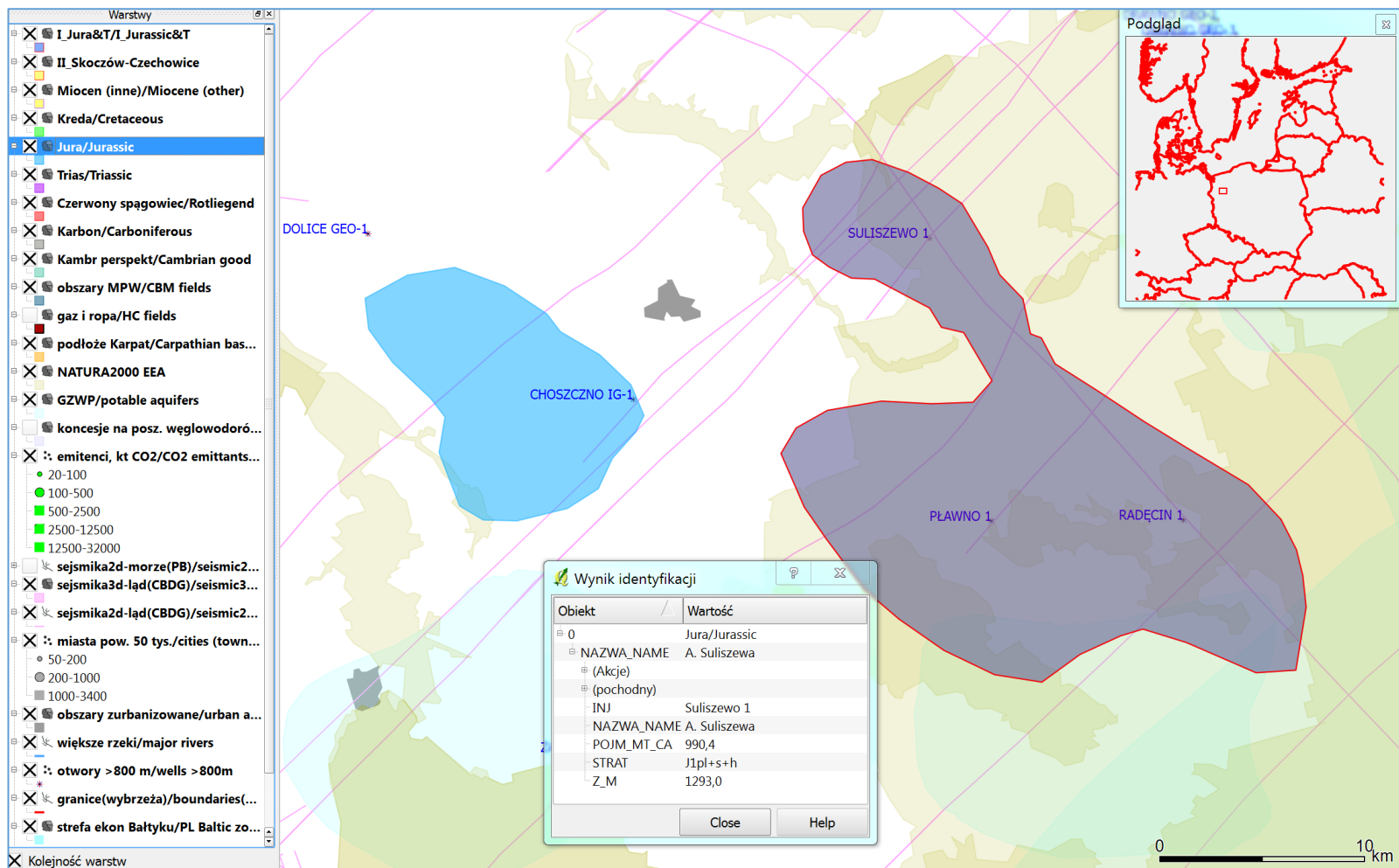


Fig. 3\_38 Struktura – antyklina Suliszewa w utworach dolnej jury (kulminacja na głębokości 1220 m – temperatura 44,5 °C – Górecki (red.) 2006a)

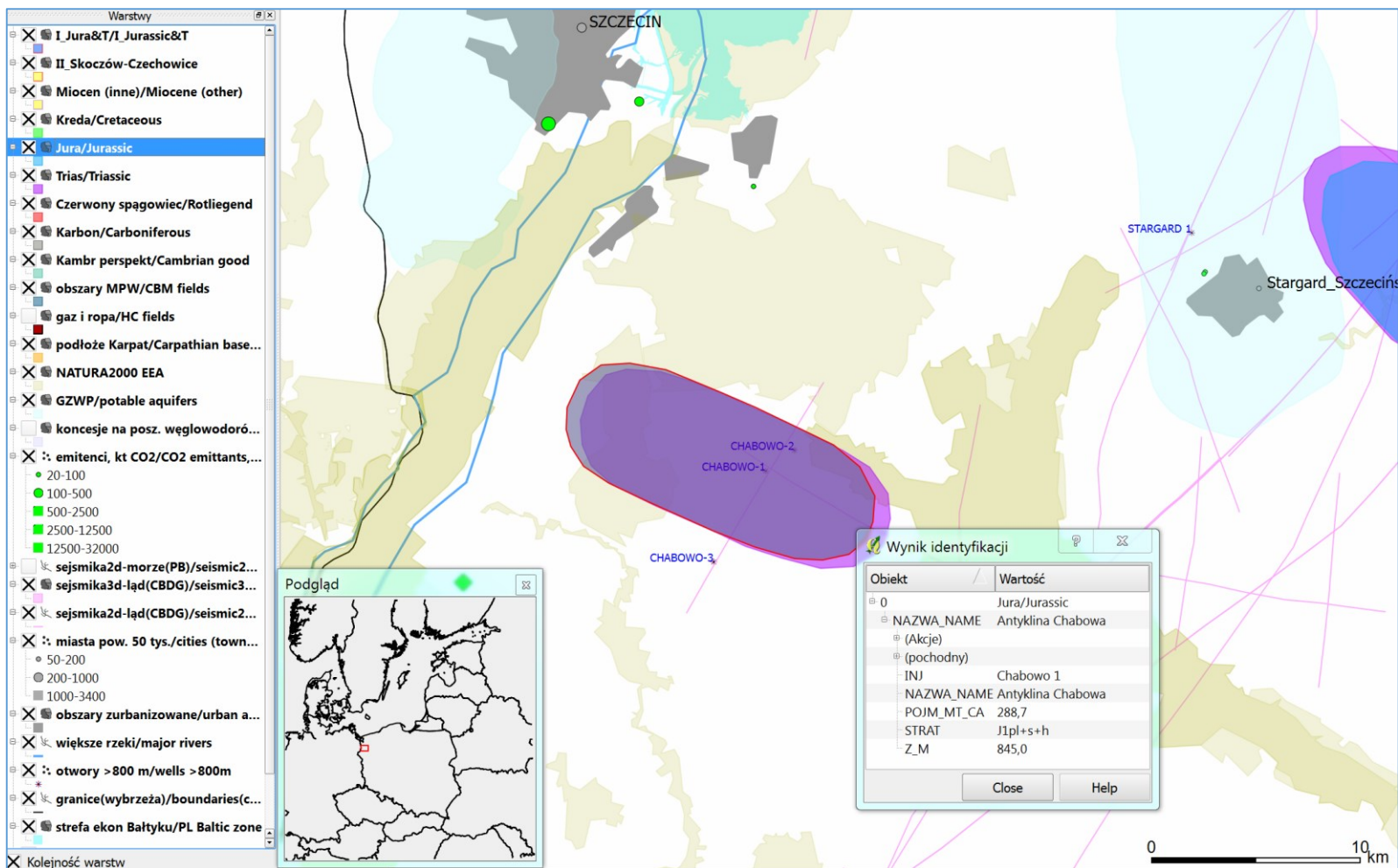


Fig. 3\_39 Struktura – antyklina Chabowa w utworach dolnej jury (otwór Chabowo-1 – temperatura 40 °C – Górecki (red.) 2006a)

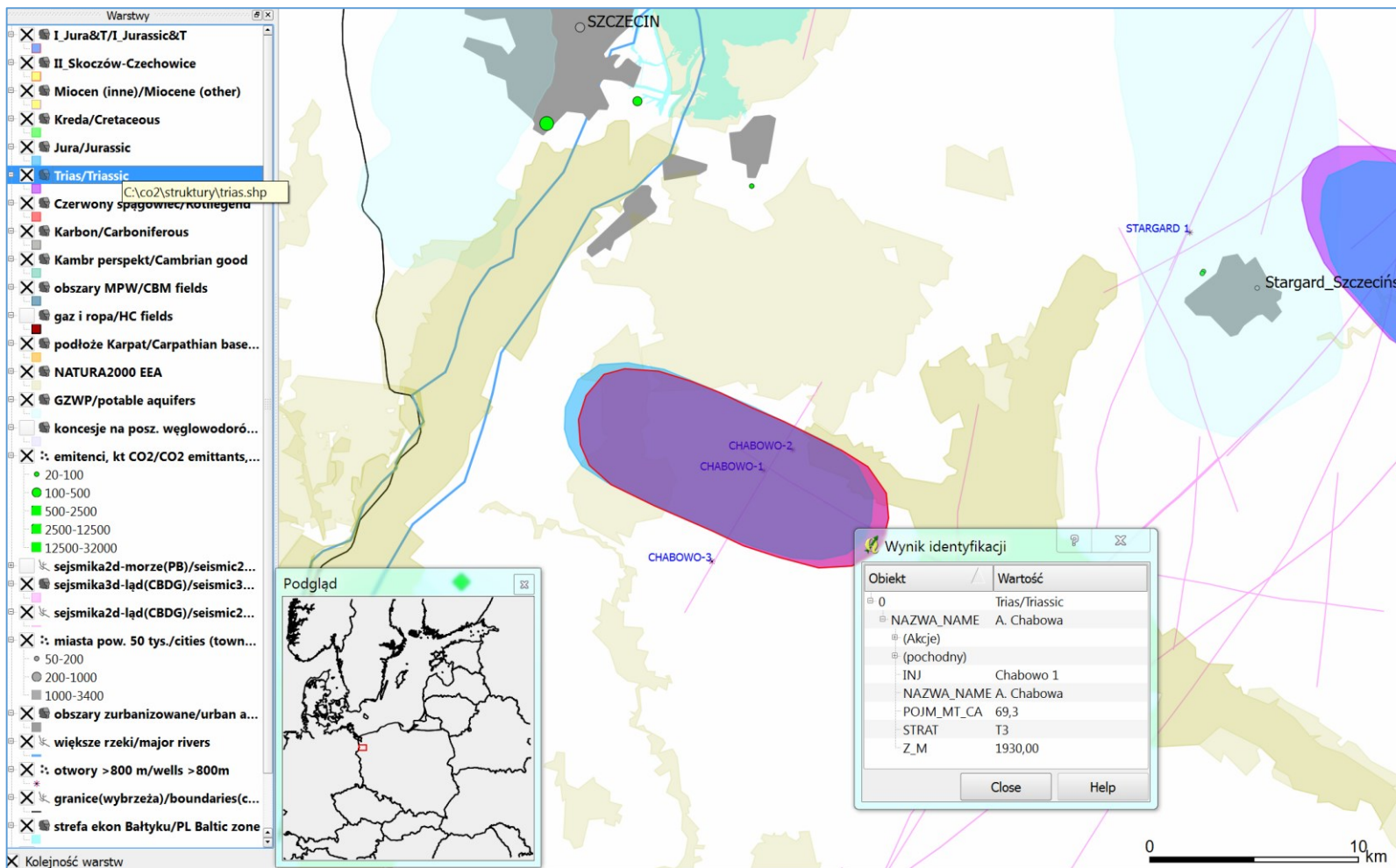


Fig. 3\_40 Struktura – antyklina Chabowa w utworach górnego triasu

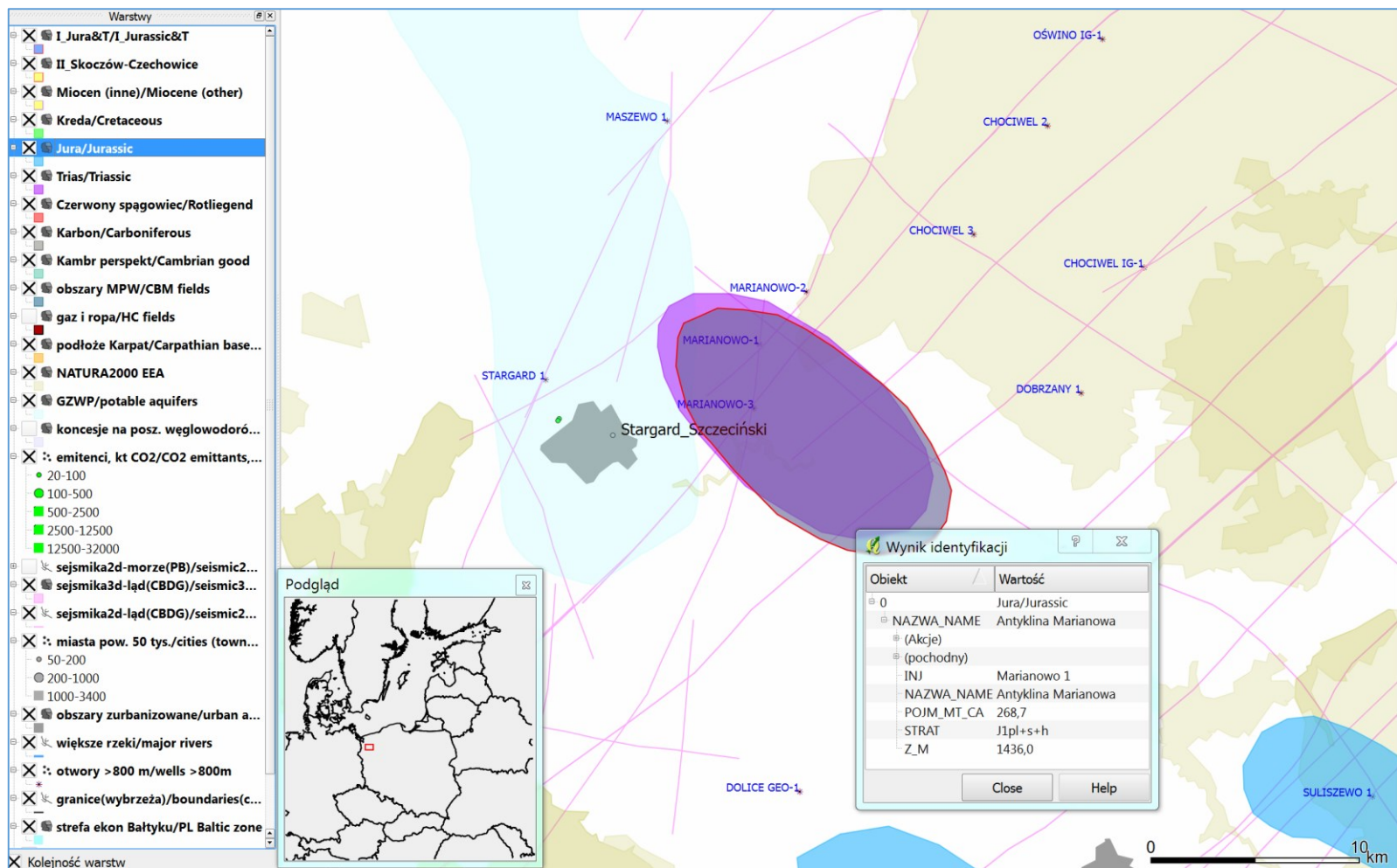


Fig. 3\_41 Struktura – antyklina Marianowa w utworach dolnej jury



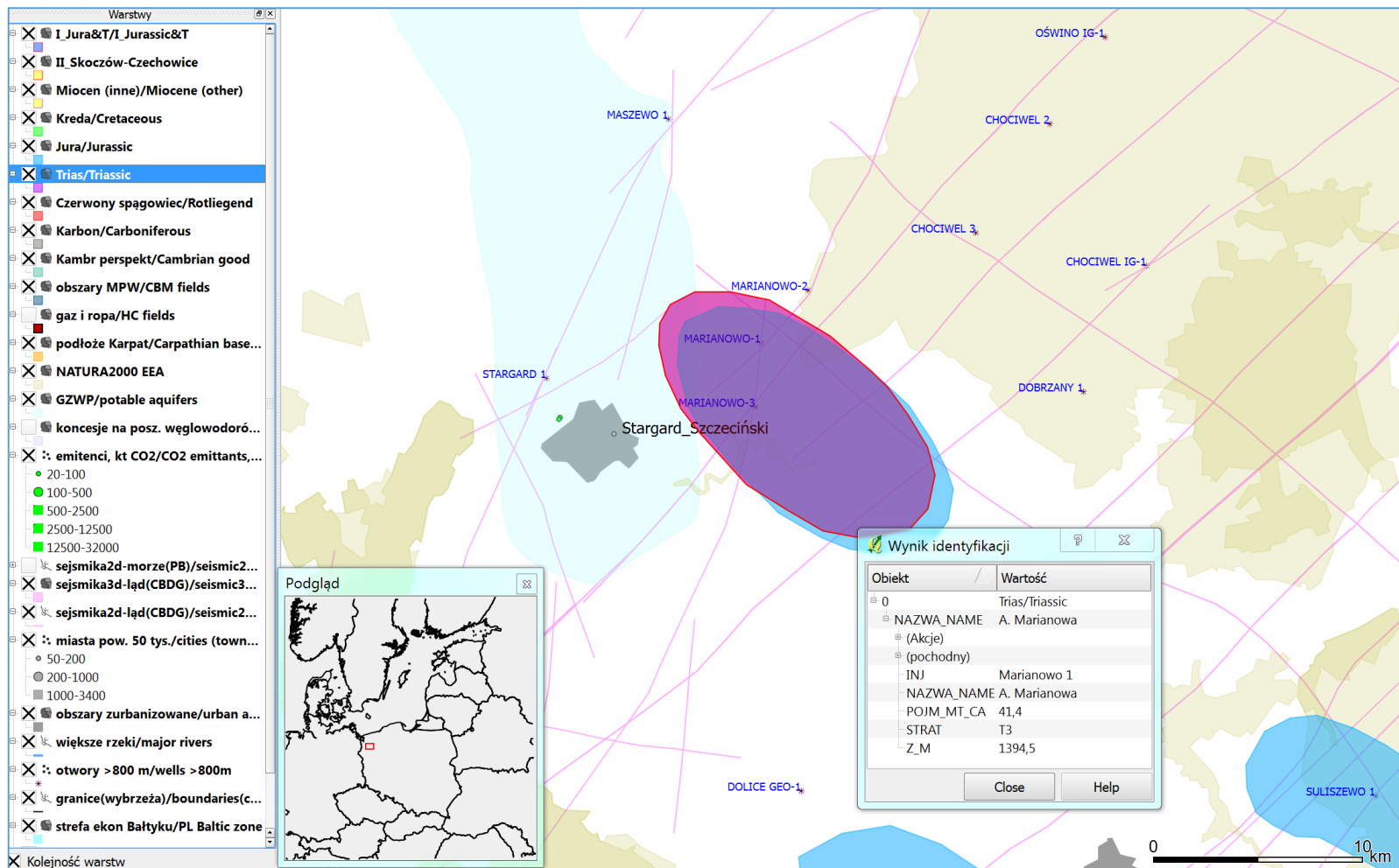


Fig. 3\_42 Struktura – antyklina Marianowa w utworach górnego triasu

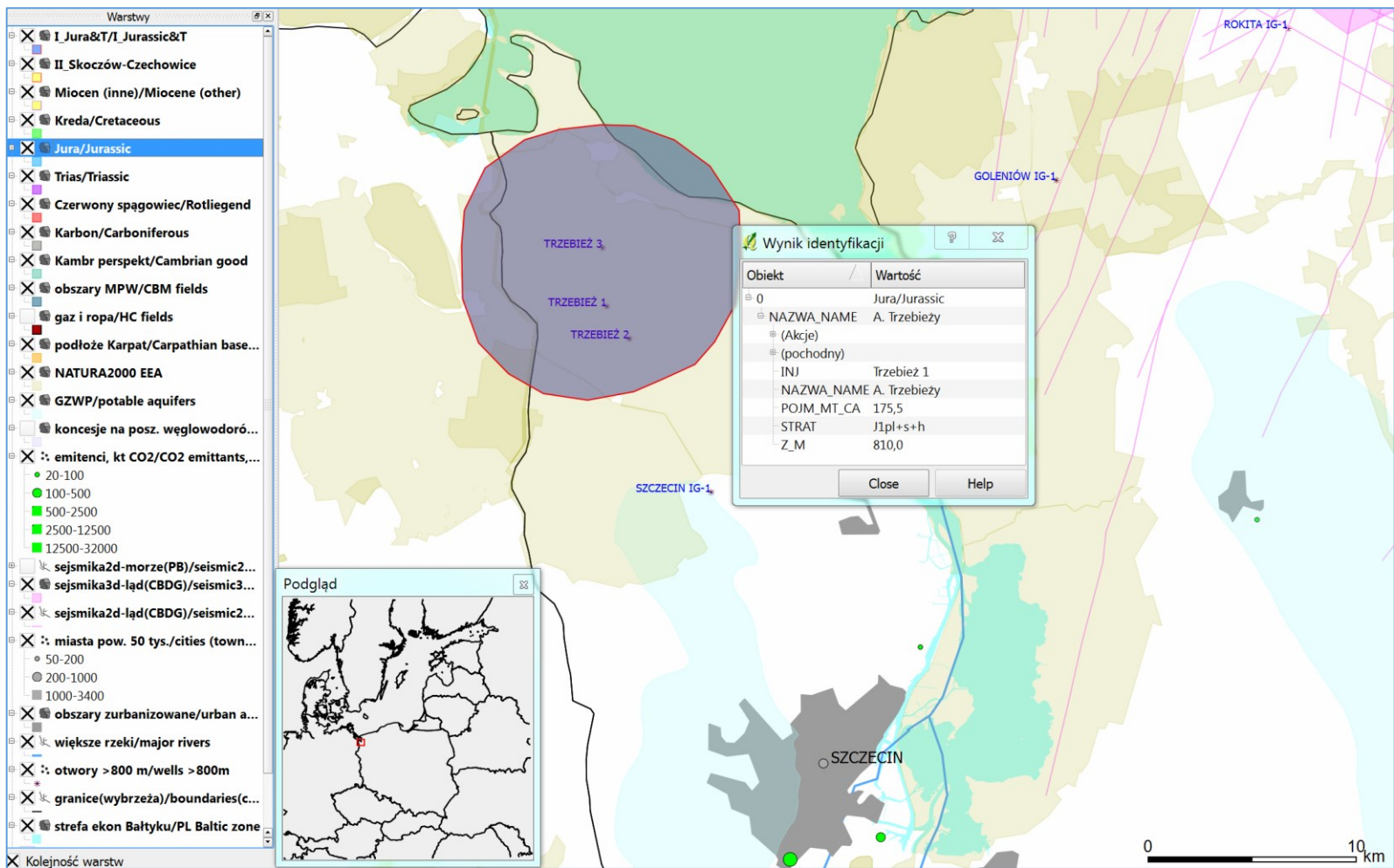


Fig. 3\_43 Struktura – antykлина Trzebieży w utworach dolnej jury

W rejonie Szczecina wytypowano szereg struktur w obrębie dolnej jury oraz górnego triasu (**Fig. 3\_36**). Z punktu widzenia bezpieczeństwa składowania, wykonalności i własności zbiornikowych można dla nich ustalić następujący ranking i propozycje scenariuszy sekwestracji:

- Antyklina Choszczna-Suliszewa (**Fig. 3\_37, 38**) w utworach dolnej jury o doskonałych własnościach zbiornikowych, raczej szczelne w świetle aktualnie dostępnych informacji (sejsmika), z nieprzepuszczalnym nakładem uszczelniającym. Mniejsza z nich – Choszczno - wystarczy na potrzeby wszystkich emitentów w rejonie Szczecina (duża elektrownia Dolna Odra, elektrownie i elektrociepłownie w Szczecinie, huta, zakłady chemiczne w Policach), nawet włączając elektrociepłownię w Gorzowie Wlkp. i innych pomniejszych emitentów na południe od Szczecina i zachód od Gorzowa Wlkp. Antyklina Suliszewa (Radęcina-Pławna), również o znacznej pojemności, w większości leży na obszarze NATURA 2000 i stąd niewielka jej część może być dostępna do lokowania otworów zatłaczających. Wybrano je do analiz II Segmentu;

- Antyklina Chabowa (**Fig. 3\_39, 40**), która obejmuje poziomy kolektorskie dolnej jury i górnego triasu (podwójna struktura), również może pomieścić emisje elektrowni Dolna Odra i aglomeracji szczecińskiej, od których obu jest oddalona o mniej niż 20 km. Słabo rozpoznana sejsmiką;

- Antyklina Marianowa (**Fig. 3\_41, 42**) to również podwójna struktura (dolna jura – podstawowy kolektor, górny trias - drugorzędny), o podobnym potencjale jak antyklina Chabowa, jednak jest rozpatrywana jako potencjalny, strategiczny (euro-)magazyn gazu na potrzeby podmiotów polskich i niemieckich;

- Antyklina Trzebieży jest (**Fig. 3\_43**) położona na północ od Szczecina, przy Zalewie, to struktura o najmniejszym potencjale w tym obszarze (rejon Szczecina), ale też z nadatkiem starczyłaby na potrzeby aglomeracji szczecińskiej. Nie jest rozpoznana sejsmiką. Prawie całość struktury to obszar NATURA 2000.

W rejonie Szczecina mamy więc problem z wykorzystaniem potencjału struktur, wielokrotnie przekraczającego potrzeby emitentów, natomiast odległość do innych dużych emitentów w Polsce jest znaczna, ok. 200 km i więcej, stąd ewentualnie możliwe byłoby lokowanie emisji z pobliskich zakładów w Niemczech (ale składowanie transgraniczne nie jest na razie przewidziane w implementacji Dyrektywy CCS do polskiego prawa).

Na rozpatrywanym obszarze GZWP występują w utworach kenozoiku, stąd sekwestracja w formacjach jury dolnej i triasu górnego nie stanowi dla nich zagrożenia. Analizy geochemiczne sugerują, że lokalnie (ale poza strukturami) może dochodzić do kontaktu solanek dolnej jury z wyżej występującymi solankami/wodami słonawymi. W rejonie Szczecina prowadzi się eksploatację konwencjonalnych złóż węglowodorów (poza strukturami) oraz poszukuje konwencjonalnych złóż węglowodorów.

W rejonie Koszalina wytypowano struktury w obrębie dolnego triasu (**Fig. 3\_44**). Struktury w triasie dolnym nie mają tak dobrych własności zbiornikowych i pojemności jak te w jurze w rejonie Szczecina, natomiast większe pojemności niż struktury w rejonie Szczecina w triasie górnym (drugorzędny poziom dla struktur jurajskich), co wynika z większych miąższości kolektorów dolnego triasu, przy porównywalnych własnościach zbiornikowych. Stąd poniższe zestawienie to dalszy ciąg rankingu dla rejonu NW Polski.

- Antyklina Debrzna (**Fig. 3\_45**) leży pomiędzy Koszalinem a Bydgoszczą. Najbliższy emitent to zakłady drzewne w Szczecinku (52 tys. ton), następnie Piła (ciepłownie miejskie) w odległości około 50 km, a dopiero w odległości ponad 60 km mamy Bydgoszcz z elektrociepłowniami, których emisje struktura pomieściłaby z nadatkiem;

- Antykliny Wierzchowa i Koszalina (**Fig. 3\_46 i 47**) wydają się odpowiednie do lokowania CO<sub>2</sub> z niewielkich (pod względem emisji) ciepłowni w Koszalinie i Słupsku (odległość około 60 km), przy czym wymagałoby to wykorzystania jedynie drobnego ułamka potencjału każdej ze struktur.

Jeszcze bardziej niż w rejonie zachodnim, we wschodniej części rejonu VII zaznacza się brak dużych emitentów, mogących wykorzystać potencjał struktur. Najbliższym dużym emitentem jest Bydgoszcz, z którego jest jednak równie blisko do ogromnych struktur mezozoicznych w rejonie Kujaw.

Niewielkie fragmenty struktur pokrywają obszary NATURA 2000, nie ma zagrożenia składowaniem CO<sub>2</sub> w dolnym triasie dla GZWP w utworach kenozoiku. W obrębie struktury Wierzchowo leży małe, praktycznie szcerpane złożo gazu, w rejonie zaś Koszalina poszukuje się konwencjonalnych złóż węglowodorów.

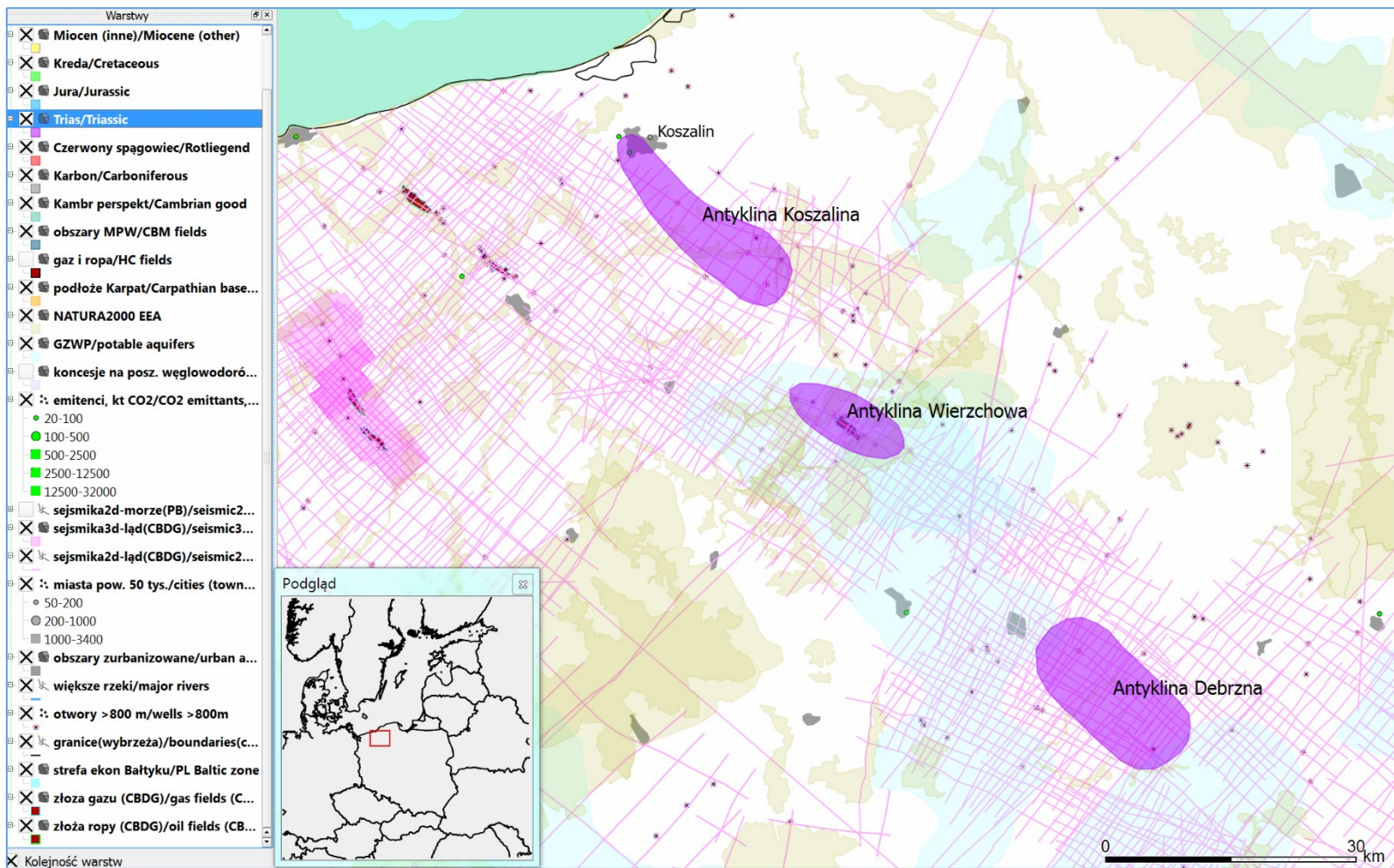


Fig. 3\_44 Struktury w utworach triasu dolnego w rejonie Koszalina

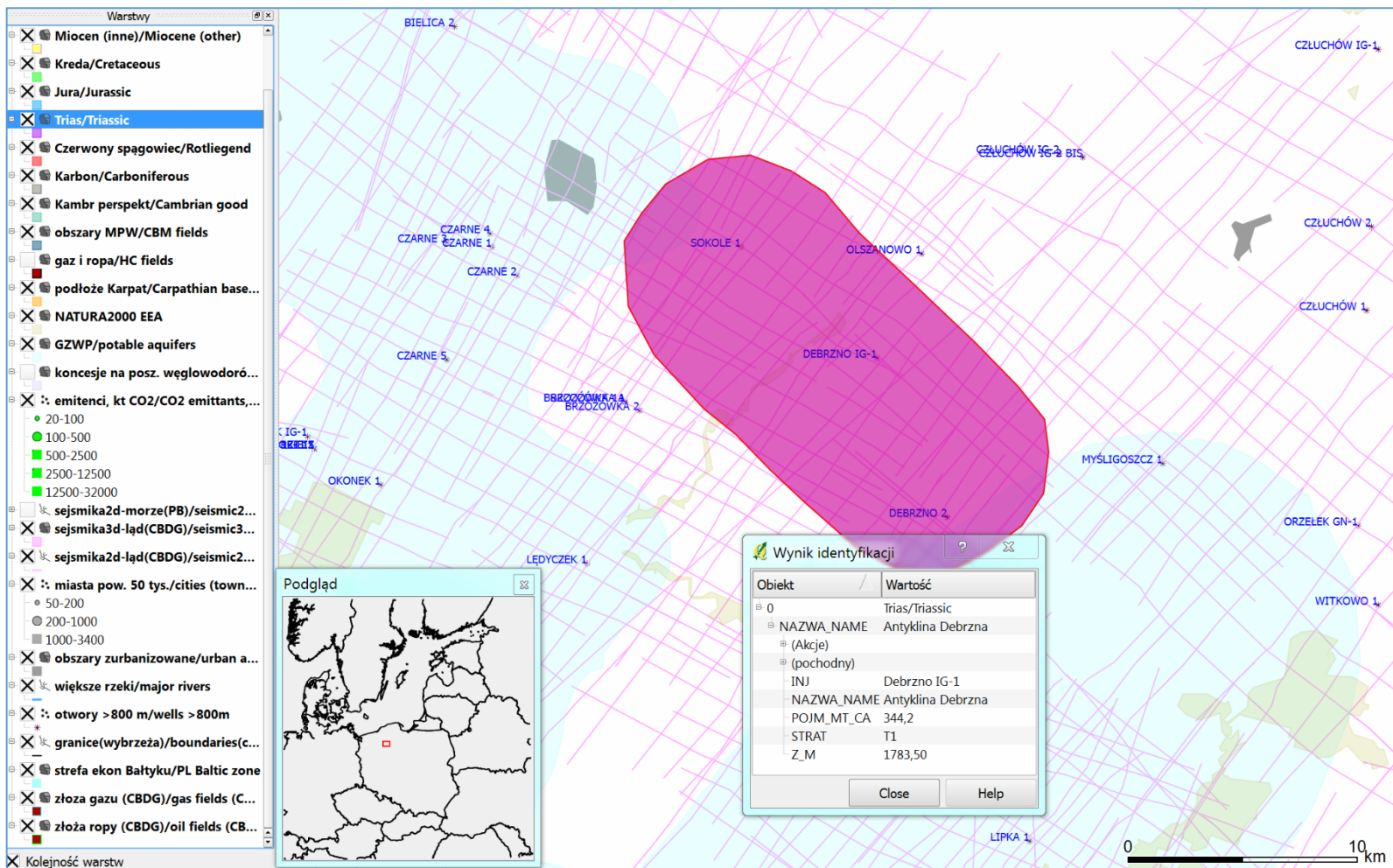


Fig. 3\_45 Struktura – antyklina Debrzna w utworach dolnego triasu

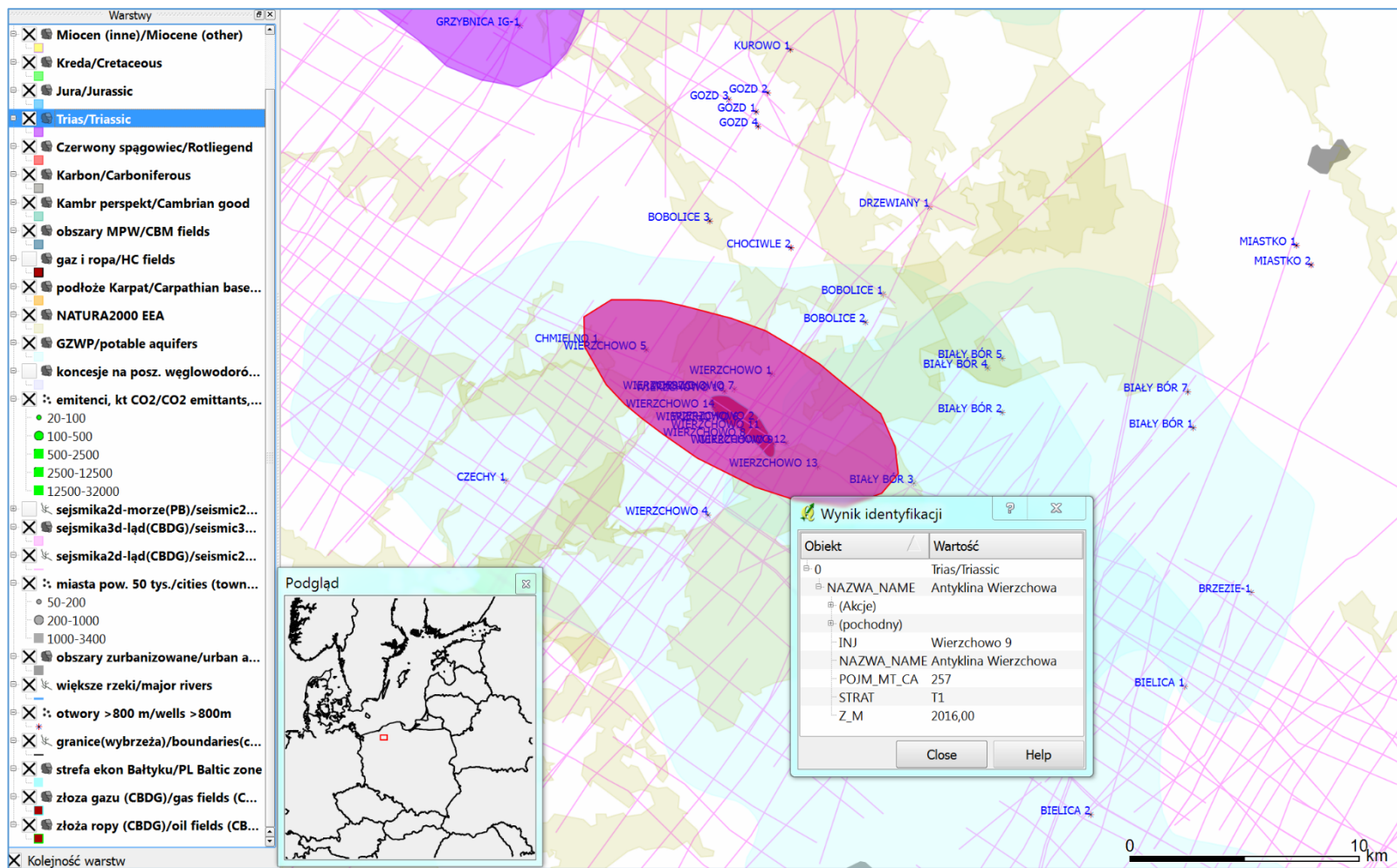


Fig. 3\_46 Struktura – antyklina Wierzychowa w utworach dolnego triasu

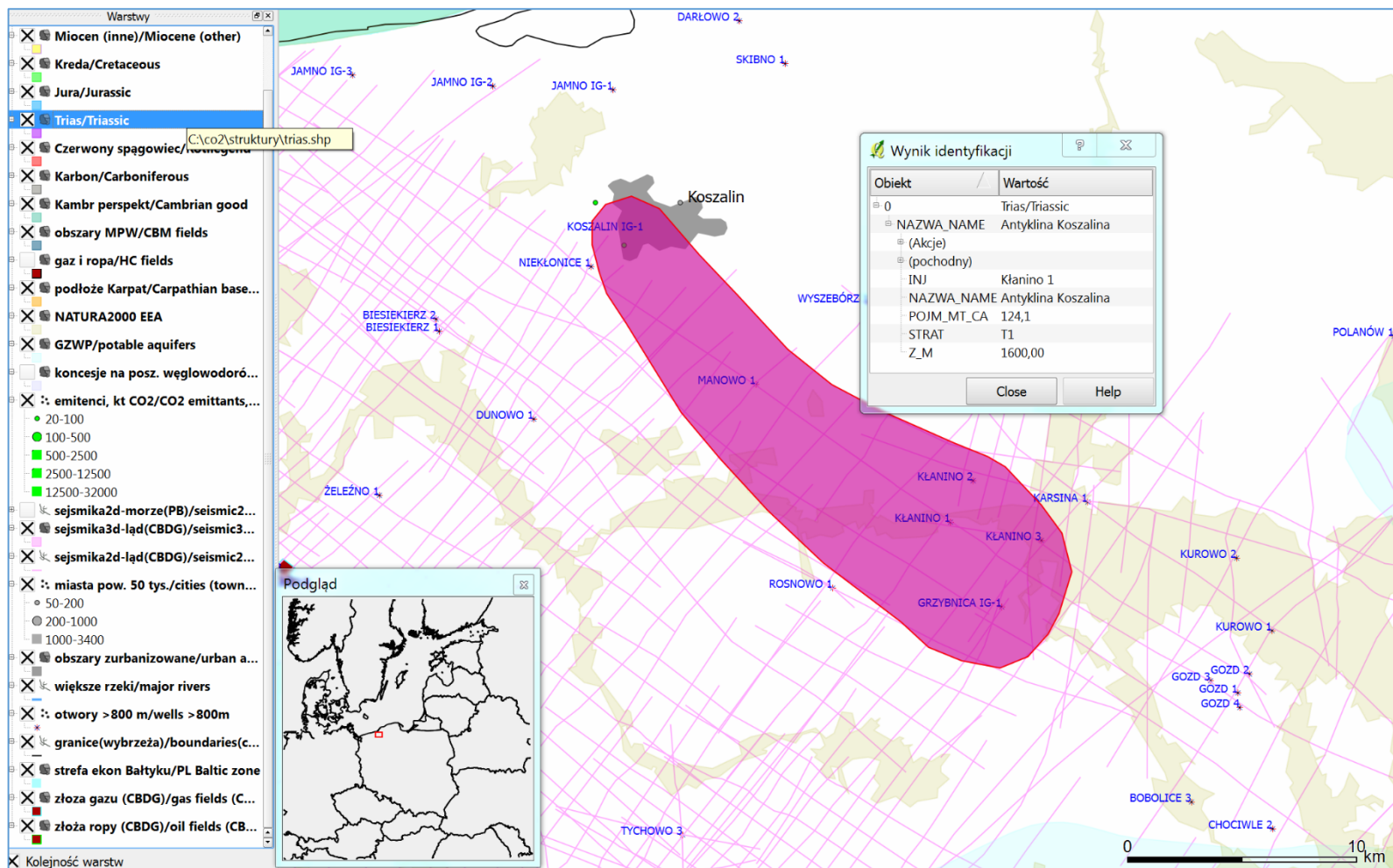


Fig. 3\_47 Struktura – antyklina Koszalina w utworach dolnego triasu



## VIII - Łeba-Bałyk oraz NE Polska

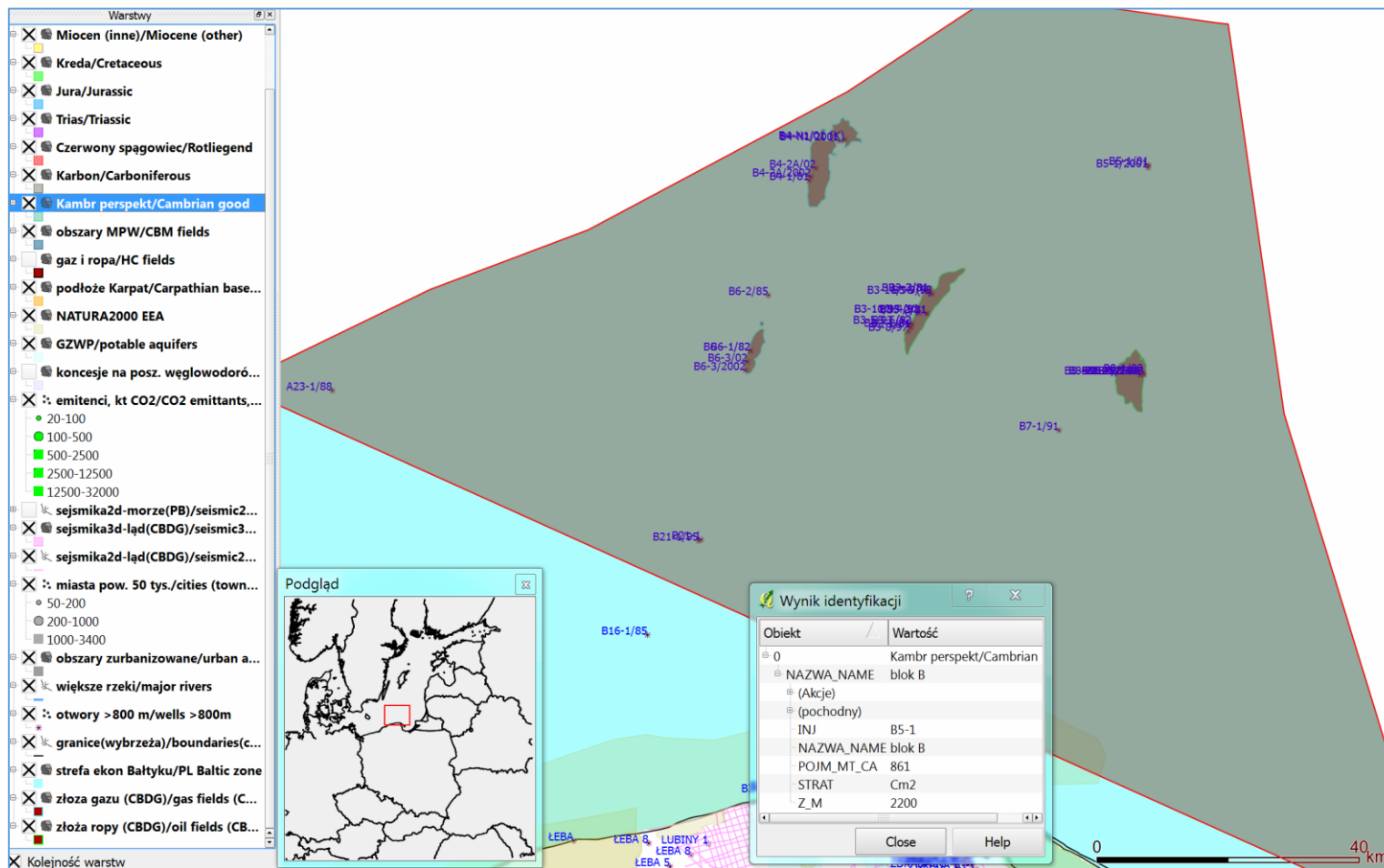


Fig. 3\_48 Obszar perspektywiczny dla składowania CO2 w kambrze, na morzu, rejon VIII – blok B, północny

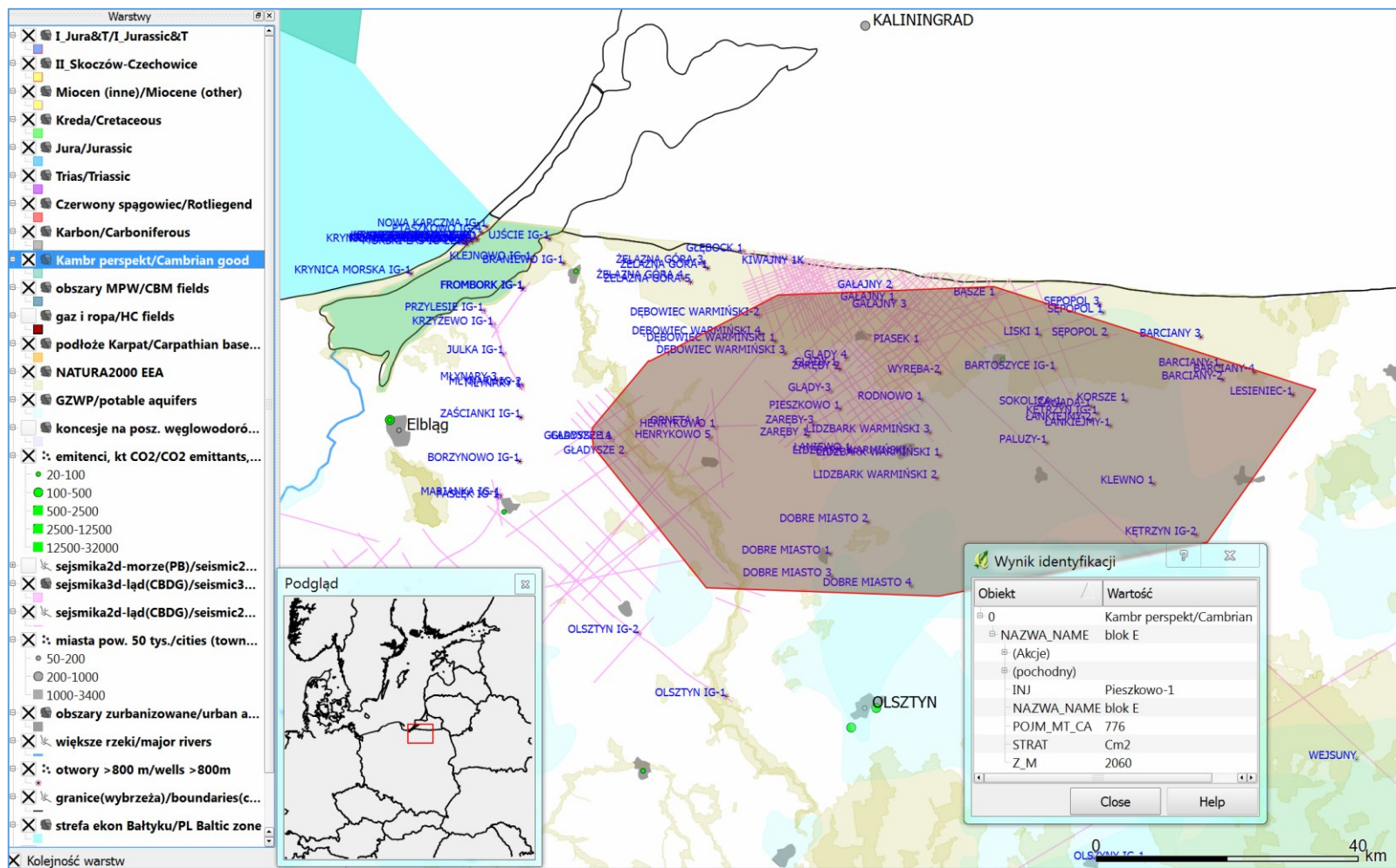


Fig. 3\_49 Obszar perspektywiczny dla składowania CO2 w kambrze, na lądzie, rejon VIII – blok E

Dla rejonu VIII, czyli Polski północnej wraz ekonomiczną strefą Bałtyku, oraz północno-wschodniej podstawowym kolektorem są formacje piaskowców kambryjskich (zasadniczo kambriu środkowego). Mamy tu dwa obszary występowania kolektora kambryjskiego perspektywiczne dla geologicznego składowania dwutlenku węgla. Są to zbiorniki regionalne, stąd nie podajemy w tym rejonie rankingu struktur.

W pierwszym, na morzu – blok B, albo północny, na **Fig. 3\_48** zaznaczono obszar zbiornika kambryjskiego – regionalnego kolektora w obrębie polskiej strefy ekonomicznej Bałtyku, dla odpowiedniego do składowania CO<sub>2</sub> przedziału głębokości i o dostatecznych własnościach zbiornikowych (im dalej na północ i NE, tym lepszych), obejmującego złoża węglowodorów o różnym stopniu szcerpania (złoża ropy B3 jest praktycznie szcerpane). Jest to zbiornik regionalny o skomplikowanej tektonice, złożony z szeregu bloków przedzielonych strefami uskokowymi, które lokalnie mogą być barierą dla rozptywu mediów złożowych, o czym świadczy występowanie pułapek węglowodorowych w sąsiedztwie niektórych stref uskokowych. Podana wartość pojemności dla tegoż podobszaru kolektora regionalnego (**Fig. 3\_48**) ma charakter bardzo orientacyjny i dotyczy raczej dolnej granicy pojemności składowania strefy najbardziej perspektywicznej.

Możliwy scenariusz wykorzystania poziomów solankowych kolektora kambryjskiego na morzu objąłby lokowanie emisji emitentów z Trójmiasta (większość to instalacje w Gdańsku – elektrociepłownie miejskie, rafinerie LOTOSU i niezbyt wielka elektrociepłownia w Gdyni). Wymaga to drobnego ułamka pojemności strefy perspektywicznej. Możliwa też jest współpraca z partnerami bałtyckimi (Finlandia, Szwecja) w zakresie wykorzystania regionalnego kolektora kambryjskiego w południowym i środkowym Bałtyku dla potrzeb wszystkich zainteresowanych (na razie regulacje prawne w zakresie implementacji dyrektywy unijnej w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla nie przewidują składowania transgranicznego).

Natomiast obszar lądowy, blok E, położony generalnie na wschód od Elbląga, w pobliżu granicy z rosyjskim obwodem kaliningradzkim (**Fig. 3\_49**), charakteryzuje się raczej dobrymi własnościami zbiornikowymi. Najbardziej perspektywiczna wydaje się część wytypowanego obszaru leżąca na podniesieniu podłoża prekambryjskiego w rejonie otworów Pieszkowo 1, Zaręby 2, Henrykowo 1, Gładysze 1 - w części północnej, dostatecznie rozpoznanej sejsmiką 2D (**Fig. 3\_49**). Podana wartość pojemności dla tegoż podobszaru kolektora regionalnego (bloku E) ma charakter bardzo orientacyjny i dotyczy raczej dolnej granicy pojemności składowania. Poza położonymi w odległości około 80 km na zachód emitentami z Trójmiasta, w sąsiedztwie bloku E leżą nieduże elektrociepłownie i ciepłownie w Elblągu i Olsztynie, dla lokowania emisji, których wystarczyłby drobny ułamek pojemności zbiornika.

### Podsumowanie dla formacji i struktur solankowych

Dla poziomów/zbiorników solankowych w obrębie ośmiu rejonów kraju przeanalizowano następujące formacje perspektywiczne:

I (Bełchatów) – Jura (piaskowce J1, J2), T;

II (GZW) – Miocen;

III (Mazowsze) - Jura (piaskowce J1, J2), T, Cr1;

IV (front nasunięcia Karpat/zapadlisko) – podłoże (K - Cm);

V (Lubelszczyzna) – Karbon (piaskowce C3), J, Cm;

VI (Wielkopolska-Kujawy) – Perm (P1), T, J, Cr;

VII (NW) – Jura (piaskowce J1), T3, T1;

VIII (Łeba-Bałtyk, w tym obszar morski, oraz NE Polska) – Cm2.

Dla rejonu Bełchatowa przeanalizowano szereg struktur w obrębie jury - niektóre z nich obejmują także poziomy solankowe w triasie (głównie w pstrym piaskowcu). Są to raczej duże struktury, o pojemności statycznej (efektywnej) od kilkudziesięciu do setek mln ton CO<sub>2</sub> każda, a w jednym przypadku nawet większej, dobrych własnościach zbiornikowych i wielopoziomowych kompleksach uszczelniających. Wytypowano do dalszych analiz w ramach II segmentu strukturę Budziszewice, dla której były dostępne informacje umożliwiające skonstruowanie wiarygodnych modeli. Nie ma tu raczej konfliktów z eksploatacją konwencjonalnych i niekonwencjonalnych złóż węglowodorów, obecność zaś zbiorników wód podziemnych w kredzie lokalnie może ograniczyć wykorzystanie najpłytszych zbiorników środkowojurajskich, tam gdzie analizy geochemiczne wskazują na możliwość kontaktu solanek z wodami podziemnymi (np. rejon Lutomiernik-Tuszyn).

W rejonie GZW wyznaczono, jako zbiornik, formację piaskowców warstw dębowieckich w obrębie miocenu (ewentualnie warstw zamarskich i stropowej części górnego karbonu), występującą w południowej części rozpatrywanego obszaru. Wspomniane piaskowce charakteryzują się przeciętnymi własnościami zbiornikowymi i raczej niską pojemnością składowania (statyczna/efektywna - około kilkudziesięciu mln ton). Brak jest raczej konfliktów interesów z eksploatacją węglowodorów; pewien problem może stanowić wyłączenie fragmentów obszaru wskutek występowania obszarów chronionych NATURA 2000 i innych (z lokalizacji instalacji zatłaczania).

W rejonie Mazowsza (emitenci Warszawa - Płock) perspektywiczne są w zasadzie wszystkie formacje mezozoiczne - od triasu dolnego do kredy dolnej. Większość struktur

zlokalizowanych jest między Warszawą a Płockiem i mają one pojemności rzędu setek mln ton CO<sub>2</sub> każda, dobre własności zbiornikowe oraz wielopoziomowe uszczelnienia (najwyższe to miąższe kompleksy węglanowo-klastyczne dolnej kredy, co najmniej dwa w środkowej jurze oraz przynajmniej jedno w dolnej jurze). Zazębiają się one częściowo z zasięgiem peryferyjnej strefy możliwego występowania złóż gazu w łupkach. Ponieważ w kredzie nie ma tu zbiorników wód podziemnych (najgłębszy znajduje się w paleogenie) nie wydaje się, aby składowanie CO<sub>2</sub> stanowiło jakiegokolwiek zagrożenie dla wód pitnych. Poza jednym przypadkiem obszary chronione NATURA 2000 nie występują w obrębie struktur.

W rejonie brzeżnej strefy Karpat i zapadliska przedkarpackiego poziomy solankowe perspektywiczne dla składowania CO<sub>2</sub> występują w podłożu mezozoiczno-paleozoicznym w zachodniej części obszaru (między Krakowem a Tarnowem). Utwory miocenu w obrębie zapadliska przedkarpackiego nie są perspektywiczne poza obszarami/sąsiedztwem złóż gazu. Wyznaczono trzy obiekty - rejon składowania - jeden w klastycznych utworach jury w rejonie Zatoki Gdowskiej (na południe od Niepołomic) oraz dwa sąsiadujące z nim zbiorniki Niepołomice i Grobla w utworach węglanowych paleozoiku. Realistyczne pojemności składowania obiektów wynoszą około kilkadziesiąt mln ton każdy, przy czym dla zbiorników węglanowych szacunki są obciążone znacznie większą dozą niepewności niż dla klastycznych. Fragmenty obszarów zbiorników węglanowych obejmują obszary chronione NATURA2000, nie ma natomiast istotnych konfliktów interesów z eksploatacją węglowodorów.

W rejonie Lubelszczyzny mamy zbiorniki w utworach górnego karbonu o przeciętnych do lokalnie dobrych własnościach zbiornikowych i dobrym uszczelnieniu w najwyższej części górnego karbonu, głównie w rejonie na północ i NW od Lublina. Pojemność tej strefy to sto kilkadziesiąt mln ton. Najgłębszy zbiornik wód podziemnych występuje w formacjach górnej kredy (między nim a karbonem jest szereg barier stąd nie należy spodziewać się zagrożeń). Obszar perspektywiczny do składowania CO<sub>2</sub> zazębia się częściowo z zasięgiem peryferyjnej strefy możliwego występowania złóż gazu w łupkach. Na północ i północny wschód, w rejonie Podlasia, występuje słabo rozpoznany zbiornik kambryjski, o potencjale być może miliarda ton.

W rejonie Wielkopolski podstawowy zbiornik - permski to formacja piaskowców czerwonego spągowca o przeciętnych do dobrych własnościach zbiornikowych, przykryta miąższym kompleksem cechsztyńskim o doskonałych właściwościach uszczelniających. Pojemności struktur permskich wynoszą do stu-paruset mln ton. Zbiorniki wód podziemnych na obszarze struktur permskich są wieku kenozoicznego. Cały obszar obejmuje koncesje na poszukiwanie i wydobycie węglowodorów, ale zatłaczanie CO<sub>2</sub> do poziomów solankowych niekoniecznie musi przeszkadzać w eksploatacji zagospodarowanych złóż gazu - może nawet poprawić efektywność wydobycia. Fragmenty

obszarów perspektywicznych obejmują lub sąsiadują z obszarami NATURA2000. W rejonie Kujaw (rejon Konina z otoczeniem) występują perspektywiczne zbiorniki dolnej kredy i jury o pojemnościach stu-paruset mln ton.

W rejonie NW Polski mamy szereg struktur o pojemnościach setek mln ton (w szczególności w rejonie Szczecina i Koszalina) ze zbiornikami w obrębie dolnej jury, górnego i dolnego triasu, o dobrych własnościach zbiornikowych i dobrym uszczelnieniu. Na obszarze tym mamy zasadniczo kenozoiczne zbiorniki wód podziemnych (raczej nie ma zagrożenia) i w zasadzie brak konfliktów z eksploatacją węglowodorów.

Rejon Polski północnej i Bałtyku to głównie zbiornik kambryjski, zarówno na morzu (obejmuje eksploatowane złoża ropy i gazu), jak i na lądzie o pojemnościach kilkuset mln ton dla każdego z podobszarów i dobrym uszczelnieniu. Obszar lądowy (na wschód od Elbląga) obejmuje częściowo obszary chronione i koncesje poszukiwacze na węglowodory niekonwencjonalne (obszar peryferyjny, raczej mało perspektywiczny). Na obszarze morskim (wschodnia część polskiej strefy ekonomicznej Bałtyku) LOTOS wystąpił o koncesje na poszukiwanie węglowodorów niekonwencjonalnych (wg Raportu PIG-PIB, 2012 są tam perspektywy dla występowania ropy łupkowej).

### Potencjał geologicznego składowania CO<sub>2</sub> dla Polski

Poniżej w **Tabelach 3\_1 i 2** przedstawiono bilans potencjału składowania określonego w I segmencie (pojemności statyczne - efektywne) dla poziomów solankowych na obszarze Polski w rozbiciu na rejony badań i formacje geologiczne.

**Tabela 3\_1** Bilans pojemności składowania dla poziomów solankowych w Polsce w rozbiciu na rejony

<i>Rejon</i>	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>	<i>VI</i>	<i>VII</i>	<i>VIII</i>
<b><i>Ilość struktur</i></b>	5	1	10	9	n/a	10	10	n/a
<b><i>Pojemność mln t</i></b>	2169	44	2649	253	1008	3584	2958	1637

**Tabela 3\_2** Bilans pojemności składowania dla poziomów solankowych w Polsce w rozbiciu na formacje

<i>Formacja</i>	<i>miocen</i>	<i>kreda</i>	<i>jura</i>	<i>trias</i>	<i>perm</i>	<i>C3</i>	<i>C3-D2</i>	<i>kambr</i>
<b><i>Ilość struktur</i></b>	7	10	16	7	3	n/a	2	n/a
<b><i>Pojemność mln t</i></b>	69	2486	6452	1460	1014	193	176	2645

W przypadku poszczególnych rejonów (**Tabela 3\_1**) często mamy do czynienia ze strukturami i formacjami geologicznymi o różnym wieku, które też różnią się stopniem wiarygodności oszacowania potencjału składowania, a także bezpieczeństwa składowania.

Dla rejonu I (Bełchatów) zasadniczo uwzględniono w bilansie składowania struktury jurajskie (4 struktury – klastyczna jura dolna oraz najniższa środkowa), dla których wspomniany stopień wiarygodności jest stosunkowo duży (np. Budziszewice-Zaosie), choć również zmienny dla poszczególnych struktur (chodzi o ilość i jakość dostępnych danych geofizycznych). Wyjątkiem jest jedna struktura dolnotriasowa (Jeżów T), dla której oszacowania oparte są na niepewnych i fragmentarycznych informacjach o własnościach zbiornikowych pstrego piaskowca.

Rejon II (GZW) obejmuje obiekt Skoczów-Czechowice, o względnie dużym stopniu wiarygodności oszacowania potencjału składowania (warstwy dębowieckie – klastyczny dolny miocen).

Rejon III (Mazowsze) obejmuje struktury jurajskie (4 – klastyczna jura środkowa i/lub dolna) i dolnokredowe (6), dla których stopień wiarygodności oszacowania potencjału składowania, związany z jakością i ilością dostępnych danych geologiczno-geofizycznych jest relatywnie duży. Natomiast pewne wątpliwości może budzić sprawa bezpieczeństwa składowania w utworach dolnej kredy (też utwory klastyczne, ale nadkład uszczelniający zbudowany jest utworów węglanowo-klastycznych), w szczególności w przypadku struktury Żyrowa.

Rejon IV (brzeźna strefa Karpat i zapadliska przedkarpackiego) obejmuje dwa obiekty w karbońsko-dewońskiej formacji węglanowej podłoża zapadliska i nasunięcia karpackiego, dla których oszacowanie potencjału składowania charakteryzuje się raczej niskim stopniem wiarygodności, oraz jeden obiekt w utworach klastycznych jury środkowej podłoża zapadliska i nasunięcia karpackiego, o zdecydowanie lepszej wiarygodności. Ponadto we wschodniej części rejonu IV mamy jeszcze kilka struktur o bardzo małym potencjale (ale

wiarygodnym), które mogłyby być wykorzystane jedynie łącznie z pobliskimi szczypanymi złożami gazu.

Rejon V (Lubelszczyzna oraz Podlasie) obejmuje formację klastycznego karbonu górnego o bardzo zmiennych własnościach zbiornikowych (ale nie ma tu raczej problemu z jakością i ilością dostępnych danych geologiczno-geofizycznych), a jego NE część obejmuje formację klastycznego kambru środkowego na obszarze Podlasia, słabo, albo całkowicie nierozpoznaną badaniami sejsmicznymi. Stąd, z różnych względów, wiarygodność wartości pojemności przyjętych w bilansie nie jest zbyt wysoka, lecz możemy tu mówić raczej o niedoszacowaniu niż przeszacowaniu pojemności.

Rejon VI (Wielkopolska-Kujawy) obejmuje trzy dolnopermskie struktury (megastruktura Niecki poznańskiej i dwie mniejsze – kolektorem są utwory klastyczne czerwonego spągowca), dość dobrze rozpoznane, jeśli chodzi o dane geofizyczno-geologiczne, stąd stopień wiarygodności oszacowania potencjału składowania jest dla nich względnie duży. Ponadto w rejonie Kujaw uwzględniono w bilansie jedną strukturę dolnotriasową i dwie jurajskie (też klastyczne), o znacznym stopniu wiarygodności oszacowania potencjału składowania. Istnieją natomiast wątpliwości odnośnie bezpieczeństwa i wykonalności składowania w przypadku trzech struktur dolnokredowych w rejonie Kujaw (gdzie nadkład uszczelniający zbudowany jest utworów węglanowo-klastycznych).

W rejonie VII (NW Polska) mamy 6 struktur triasowych i 4 jurajskie (we wszystkich przypadkach mamy kolektory klasyczne). Struktury te różnią się pomiędzy sobą ilością i jakością dostępnych danych geologiczno-geofizycznych, lecz ogólnie sytuacja geologiczna („podręcznikowe” struktury antyklinalne, dobre naturalne pułapki związane z „poduszkami” solnymi w podłożu – np. struktury jurajskie Choszczno i Suliszewo) implikuje stosunkowo duży stopień wiarygodności oszacowania potencjału.

Rejon VIII obejmuje formację klastycznego kambru środkowego, dla której wiarygodność wartości pojemności przyjętej w bilansie nie jest zbyt wysoka, lecz możemy tu mówić raczej o niedoszacowaniu niż przeszacowaniu pojemności.

Regionalne kolektory kambru (V, VIII) i karbonu (V) (nie są to struktury!) mają szacunkowy potencjał **2838 mln ton**.

W sumie dla 45 struktur (I, II, III, IV, VI, VII) mamy pojemność **11 657 mln ton** (bez struktur dolnokredowych - **9171 mln ton**, dla 35 struktur/obiektów).



## Warunki termodynamiczne dla struktur solankowych

Dla zilustrowania jednego z najistotniejszych czynników wpływających na bezpieczeństwo geologicznego składowania CO<sub>2</sub> dla struktur solankowych - stanu skupienia w jakim będzie się znajdował dwutlenek węgla zatłoczony do górotworu, wynikającego z panujących tam warunków termodynamicznych, zestawiono odnośne parametry na **Fig. 3\_50**. Na figurze zestawiono wartości ciśnienia i temperatury złożowej dla wytypowanych struktur i formacji solankowych. Dla typowych struktur antyklinalnych przyjęto wartości temperatury i ciśnienia złożowego występujące w ich szczytowych partiach. Temperatury i ciśnienia oszacowano na podstawie informacji z otworów, Atlasów geotermalnych (Górecki (red.) 2006a, b) i innych opracowań oraz założeń atlasu hydrochemiczno-hydrodynamicznego (Bojarski, 1996). Wyjątkiem są tu obiekty i formacje nieukształtowane w formie antyklin (fragmenty regionalnych basenów sedimentacyjnych), dla których przyjmowano wartości średnie głębokości występowania stropu zbiornika (jak dla obiektu Skoczów-Czechowice w obrębie warstw dębowieckich, gdzie przyjęto średnią z przedziału głębokości 800-1000 m, odpowiadającemu temperaturom 32-36 °C; podobnie postąpiono dla formacji karbonu lubelskiego, kambru bałtyckiego i podlaskiego) czy też średnią głębokość występowania najlepszego zbiornika w obrębie węglanowego kompleksu karbońsko-dewońskiego w podłożu zapadliska przedkarpackiego i brzeżnej strefy Karpat (obiekty Niepołomice i Grobla).

Informacje te zestawiono na tle granic przejść fazowych dwutlenku węgla występującego w warunkach złożowych (**Fig. 3\_50**). Wyróżnia się w tym przypadku 3 fazy – gazową, ciekłą i nadkrytyczną (IPCC SR CCS, 2007), w zależności od tego czy ciśnienie złożowe lub temperatura przekracza wartość krytyczną. W naszym przypadku żadna ze struktur nie charakteryzuje się warunkami termodynamicznymi umożliwiającymi występowanie CO<sub>2</sub> w fazie gazowej, choć dla kilku struktur wartości ciśnienia lub temperatury zbliżają się obszarowi, gdzie CO<sub>2</sub> występuje w fazie gazowej (np. w szczycie struktury B-Z dla zbiornika górnego pliensbachu CO<sub>2</sub> może występować w fazie ciekłej w warunkach ciśnienia nadkrytycznego; dla położonego 180 m głębiej zbiornika synemuru i hetangu dwutlenek węgla będzie w tym przypadku występować tylko w fazie nadkrytycznej).

Ponadto poniżej przedstawiono rozkład temperatury na mapie w skali całego kraju dla formacji, która ma największe znaczenie dla geologicznego składowania dwutlenku węgla (dolna jura). Aplikację GIS/WebGIS uzupełniono o warstwę obejmującą rozkład temperatury w stropie jury dolnej (na podstawie Atlasu geotermalnego – Górecki (red.) 2006a – **Fig. 3\_51**). Wspomniana mapa przedstawia jakościowo zmienność temperatur, związaną zarówno z głębokością występowania formacji dolnej jury jak i z rozkładem strumienia ciepłego (Szewczyk & Gientka, 2009).

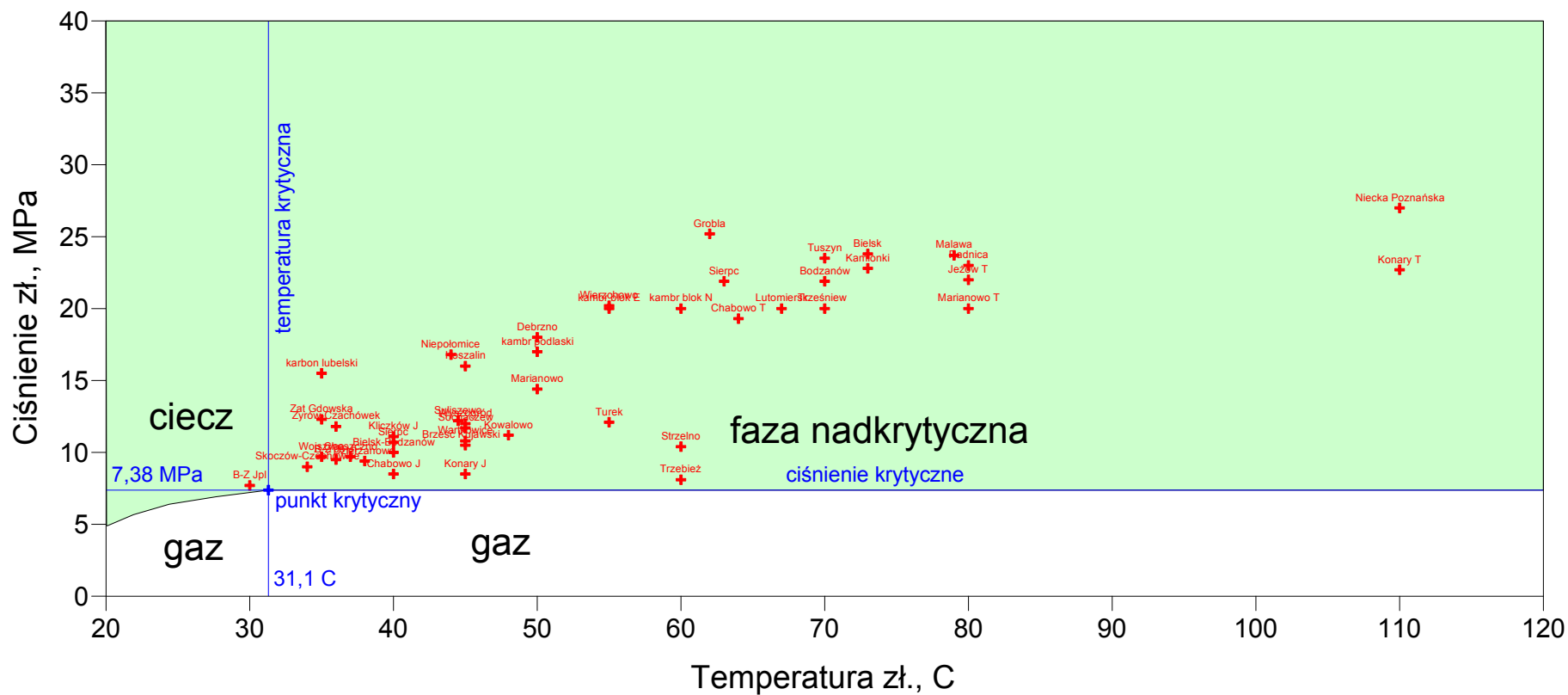


Fig. 3\_50 Warunki termodynamiczne dla wytypowanych struktur i formacji solankowych (granice przejść fazowych za IPCC SR CCS, 2007)

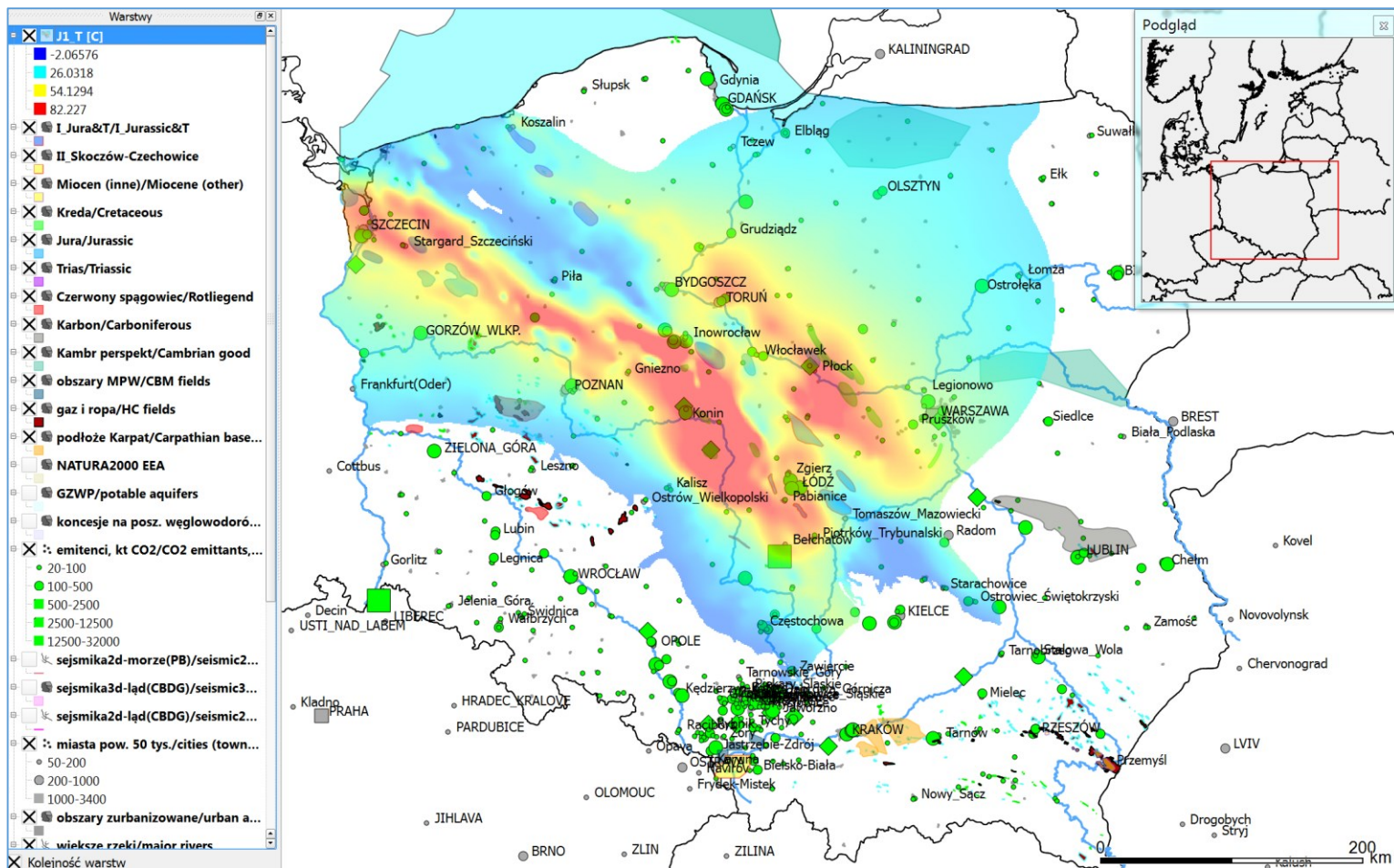


Fig. 3\_51 Aplikacja GIS - mapa rozkładu temperatury w stropie jury dolnej (na podstawie Górecki (red.), 2006a); patrz też

<http://skladowanie.pgi.gov.pl/co2polska/polska.phtml>

**Tabela 3\_3** Parametry oraz pojemności statyczne (efektywne) dla struktur i formacji solankowych

Rejon	Nazwa	Stratygrafia	Obszar, km2	Miąższość kolektora, m	Głębokość, m	Średnia przepuszczalność, mD	Średnia porowatość, %	Zasolenie g/l	Temperatura, °C	Ciśnienie złożowe, MPa	Efektywność składowania, %	Pojemność składowania wolumetryczna, Mt	Pojemność składowania z rozpuszczania, Mt	Pojemność sumaryczna, Mt
I	Budziszewice-Zaosie	J1	217	53	775	300	15	10	30(36)	7,7(9,5)	20	134,6	93,6	228,2
I	Lutomiersk	J1(J1/J2)	36	230	1997	150	15	100	67	20	15	78,2	42,4	120,7
I	Tuszyn	J1	37	120	2265	150	15	37	70	23,5	15	43,8	30,6	74,4
I	Kliczków J	J1	21	300	1112	150	20	127	40	11,1	15	77,1	38,0	115,1
I	Jeżów T	T1	98	300	2392	20	11	360	80	24	20	263,9	6,1	270,0
I	Wojszyce	J	260	200	900	300	20	10	35	9,7	20	811,2	544,7	1355,9
II	Skoczów-Czechowice	miocen	350	40	1000	40	12	35	34	9		44 <sup>4</sup>		
III	Bielsk-Bodzanów	Cr1	100	128	1011	1000	30	2,3	40	10	15	241,9	208,8	450,8
III	Dzierżanowo	Cr1	75	122	939	1000	20	10	38	9,4	15	115,3	95,8	211,1
III	Sierpc	Cr1	75	116	1068	1000	30	39	40	10,7	20	219,2	118,8	338,0
III	Sochaczew	Cr1	85	108	1165	1000	30	5,5	45	11,7	20	231,3	147,4	378,8
III	Wyszogród	Cr1	150	108	1199	1000	30	5,5	45	12	15	306,2	260,2	566,4
III	Żyrow	Cr1	40	40	1183	1000	30	27,5	36	11,8	5	10,1	23,1	33,2
III	Sierpc	J	75	150	2190	200	15	10	63	21,9	20	141,8	88,4	230,1
III	Bielsk	J	22	220	2377	200	15	39	73	23,8	20	61,0	33,0	94,0
III	Bodzanów	J	30	200	2192	200	15	5,5	70	21,9	20	75,6	48,2	123,8
III	Kamionki	J	75	144	2280	200	15	5,5	73	22,8	20	136,1	86,7	222,8
IV	Niepołomice	D	269	64	876	10	8	30	44	16,8	2	11,6	65,5	77,0
IV	Grobla	D	442,4	50	1525	10	8	30	62	25,2	2	14,9	84,1	99,0
IV	Zat. Gdowska	J	115	50	1228	100	14	30	35	12,3	4	13,5	38,3	51,8

<sup>4</sup> Szacowane przez GIG; metodyka EU GeoCapacity daje, przy założeniu współczynnika efektywności składowania 2%; wartości około 14,1 mln pojemności wolumetrycznej i 77,9 mln ton pojemności z rozpuszczania (razem 92,1 mln ton).

IV	Malawa	Trm	3,1	375	1410	82	17		79	23,7	10	8,8	4,8	13,6
V	Lubelszczyzna	C3	2000	30	1550	50	5	30	35	15,5	4	50,4	142,6	193,0
V	kambr podlaski	Cm	650	200	1718	200	15	30	50	17	1	81,9	926,8	1008,7
VI	Niecka poznańska (G- U-B-P)	P1	470	200	2676	60	10	30	110	27	5	197,4	446,8	644,2
VI	Radnica	P1	65	100	2290	40	17	30	80	23	20	92,8	52,5	145,3
VI	Kowalowo	P1	90	175	1110	20	16	30	48	11,2	10	105,8	119,8	225,6
VI	Strzelno	Cr1	24	110,5	1040	700	20	30	60	10,4	20	44,6	25,2	69,8
VI	Trześńew	Cr1	50	110,5	1996	300	20	70	70	20	20	92,8	43,4	136,2
VI	Turek	Cr1	84	81	1210	1000	20	90	55	12,1	20	114,3	48,7	163,0
VI	Wartkowice	Cr1	49,5	104	1076	700	20	15	45	10,8	20	86,5	52,6	139,1
VI	Konary	J	250	160	847	300	15	5,5	45	8,5	20	504,0	321,2	825,2
VI	Brześć Kujawski	J	122	348,5	1047	300	17	5,5	45	10,5	20	607,1	387,0	994,1
VI	Konary	T1	250	87,5	2265	100	10	150	110	22,7	20	183,8	59,4	243,1
VI	Chabowo J	J1	87	160	845	1000	17	77	40	8,5	20	198,8	89,9	288,7
VII	Choszczno	J1	102	168	1235	1000	20	112	37	9,7	20	287,9	110,8	398,6
VII	Suliszewo	J1	300	127	1293	1500	22	100	44,5	12,2	20	704,1	286,3	990,4
VII	Marianowo	J1	160	72	1436	1000	20	110	50	14,4	20	193,5	75,1	268,7
VII	Trzebież	J1	137,5	54	810	700	20	100	60	8,1	20	124,7	50,7	175,5
VII	Chabowo T	T3	87	40	1930	200	17	106	64	19,3	20	49,7	19,7	69,3
VII	Marianowo T	T3	101,5	22	1395	100	15	67,5	80	20	20	28,1	13,3	41,4
VII	Debrzno	T1	150	160	1784	100	15	110	50	18	15	226,8	117,4	344,2
VII	Wierzchowo	T1	160	120	2016	100	14	110	55	20,2	15	169,3	87,7	257,0
VII	Koszalin	T1	70	100	1600	100	15	100	45	16	20	88,2	35,9	124,1
VIII	blok N(B)	Cm	2200	70	2200	50	10	30	60	20	2	129,4	732,0	861,3
VIII	blok E	Cm	1000	100	2060	200	15	30	55	20	1	63,0	713,0	776,0

## 3.2 Złoża węglowodorów

(Adam Wójcicki, Jan Lubaś, Sławomir Szuflika)

Potrzebne dane zgromadzono/zaktualizowano na podstawie informacji z dokumentacji geologiczno-złożowych dostępnych w Centralnym Archiwum Geologicznym, Archiwum PGNiG i dostępnych publikacji (dane otworowe, mapy strukturalne, przekroje, mapy parametrów złożowych, itd.) oraz bazy „Interaktywnego atlasu...” (Wójcicki et al., 2008).

Jeśli chodzi o struktury naftowe, to mamy dwa przypadki: wspomaganie wydobycia węglowodorów - szerp(yw)ane złoża ropy naftowej, w mniejszym stopniu gazu ziemnego - albo samo składowanie dwutlenku węgla w możliwie największej ilości (szczerpane duże złoża gazu, składające się najlepiej z jednego - dwóch poziomów gazonośnych). Kryteria wyboru dla złóż węglowodorów podano w rozdziale 2.1. Na ich podstawie zaproponowano, jako potencjalne składowiska CO<sub>2</sub>, 38 złóż (w tym niektóre wieloczęściowe) występujących w Polsce zachodniej, północno-zachodniej, południowo-wschodniej i jedno na Bałtyku (B3 – szczerpane w istotnym stopniu); Fig. 3\_52, A, B.

Dla wytypowanych 10 złóż ropy (i gazu) można zaproponować następujący ranking:

- BMB (*pojemność statyczna 33,2 mln ton*) (NW Polska),
- B3 (*7 mln ton*) (Bałtyk),
- Kamień Pomorski (*3,9*) (NW Polska),
- Nosówka (*1,4*) (front nasunięcia Karpat/zapadlisko przedkarpackie),
- Radoszyn (*1,1*) (NW Polska),
- Górzycza (*2,5*) (NW Polska),
- Węglówka (*1,9*) (Karpaty),
- Lubaczów (*6,1*) (front nasunięcia Karpat/zapadlisko przedkarpackie; wstępnie zagospodarowane - głównie gaz ziemny),
- Jaszczew (*10,4*) (Karpaty),
- Osobnica (*0,7*) (Karpaty).

Podobnie w przypadku złóż gazu można zaproponować następujący ranking:

- Załęcze-Wiewierz, Żuchłów (82,9 i 91,9 mln ton) (południowa Wielkopolska/Dolny Śląsk),
- Bogdaj-Uciechów (53,5) (południowa Wielkopolska),
- Wilków, Jodłówka (13,6 i 15,5) (południowa Wielkopolska/Dolny Śląsk, front nasunięcia Karpat/zapadlisko przedkarpackie),
- Tarchały (11,7) (południowa Wielkopolska),
- Tarnów Jura, Łąka (10,1; 10,4) (front nasunięcia Karpat/zapadlisko przedkarpackie),
- Paproć, Brzostowo, Bukowiec, Czeszów (9,5; 9,1; 2,4; 5,8) (Wielkopolska),
- Gorzysław, Góra, Jarocin, Ujazd (2,4; 3,1; 1,9; 6,2) (Wielkopolska)
- Grochowice, Grodzisk Wlkp. (7,6; 6,1) (Wielkopolska).
- Przemyśl, Husów<sup>5</sup>-Albigowa-Krasne (244,6; 35,2) (front nasunięcia Karpat/zapadlisko przedkarpackie),
- Jarosław, Mirocin (28,6; 19,3) (front nasunięcia Karpat/zapadlisko przedkarpackie),
- Tarnów miocen (5,9) (front nasunięcia Karpat/ zapadlisko przedkarpackie),
- Kielanówka, Pilzno S, Rączyna, Zalesie (8,5; 9; 0,5; 3,2; 8,7) (fr. Karpat/ zapadlisko przedkarpackie),
- Stężycza (2,5) (Lubelszczyzna).

Z punktu widzenia projektów CCS warte uwagi są możliwie największe złoża, jak np. złożo gazu Żuchłów (**Fig. 3\_53** - koło Głogowa, w sąsiedztwie elektrociepłowni zagłębia miedziowego LGOM i około 70 km od Wrocławia; sąsiaduje z nim złożo Załęcze-Wiewierz, o niewiele mniejszej pojemności) oraz złożo ropy BMB (**Fig. 3\_54** - koło Gorzowa, gdzie jednak nie ma zbyt dużych emitentów i stąd możliwy jest scenariusz wykorzystania złoża na składowisko, a wcześniej, do CO<sub>2</sub>-EOR, dla elektrowni Dolna Odra, położonej w odległości około 50 km).

---

<sup>5</sup> Z wyłączeniem części struktury Husów, wykorzystywanej na magazyn gazu.

Analizy dotyczące wykonalności i opłacalności zastosowania CO<sub>2</sub> do wspomagania wydobywania ropy i gazu dla 10 wytypowanych złóż były przedmiotem przedsięwzięcia realizowanego przez INiG i PIG-PIB na zlecenie Ministerstwa Środowiska (Lubaś (red.), 2012).

Typowanie złóż, dla których następnie przeprowadzono analizy szczegółowe w ramach II Segmentu, było przedmiotem konsultacji przedstawicieli konsorcjum realizującego niniejsze przedsięwzięcie (INiG) ze specjalistami i decydentami PGNiG SA (właściciela koncesji eksploatacyjnych na wszystkich złożach). W rezultacie wybrano struktury - złoża ropy Nosówka oraz złoża gazu Wilków (a także Łąka), w oparciu o kryteria, na podstawie których sporządzono powyższe rankingi, jak również uwzględniono politykę PGNiG SA odnośnie możliwego przyszłego wykorzystania struktur (np. na magazyny gazu).



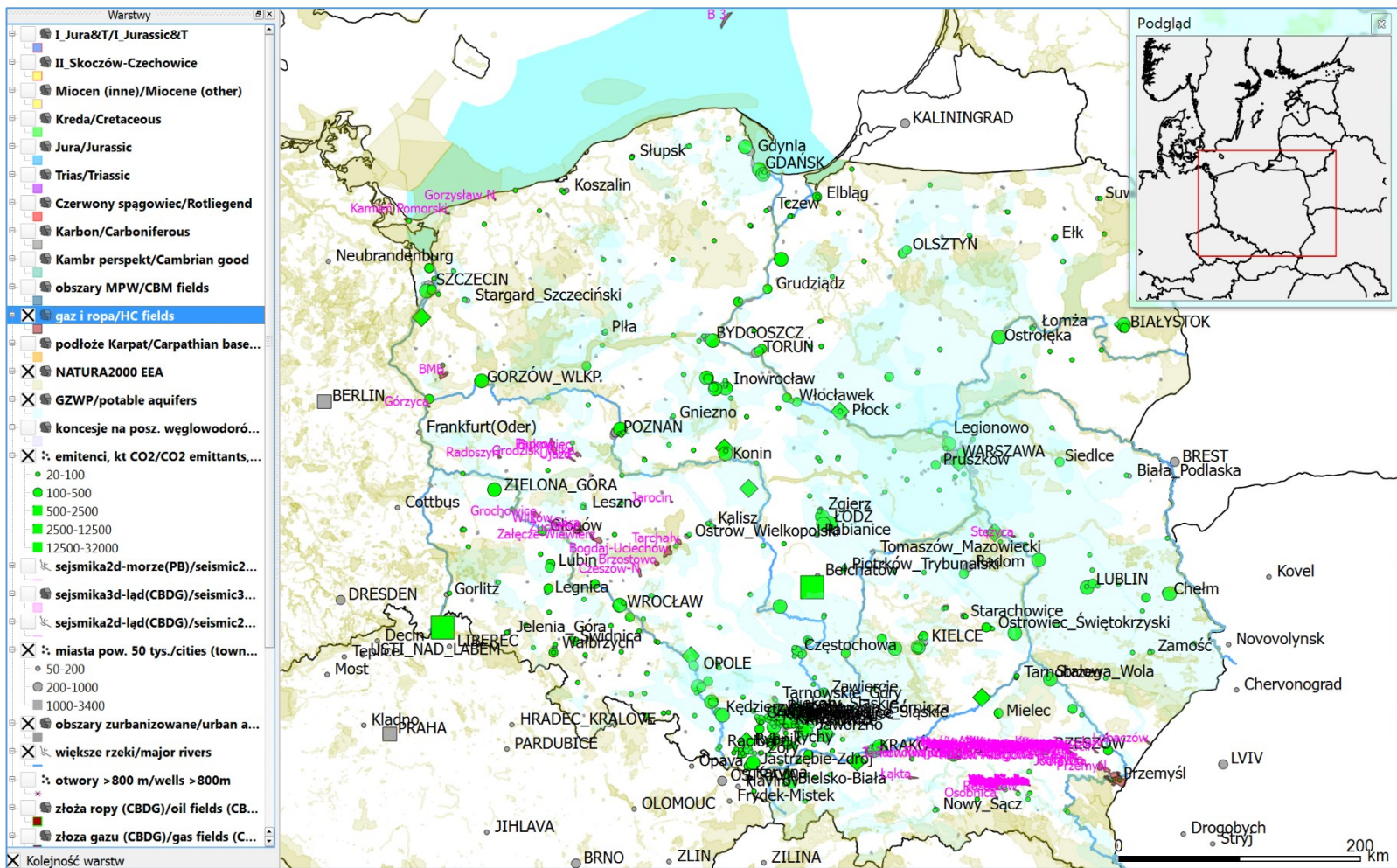


Fig. 3\_52 Rozpatrywane złoża węglowodorów

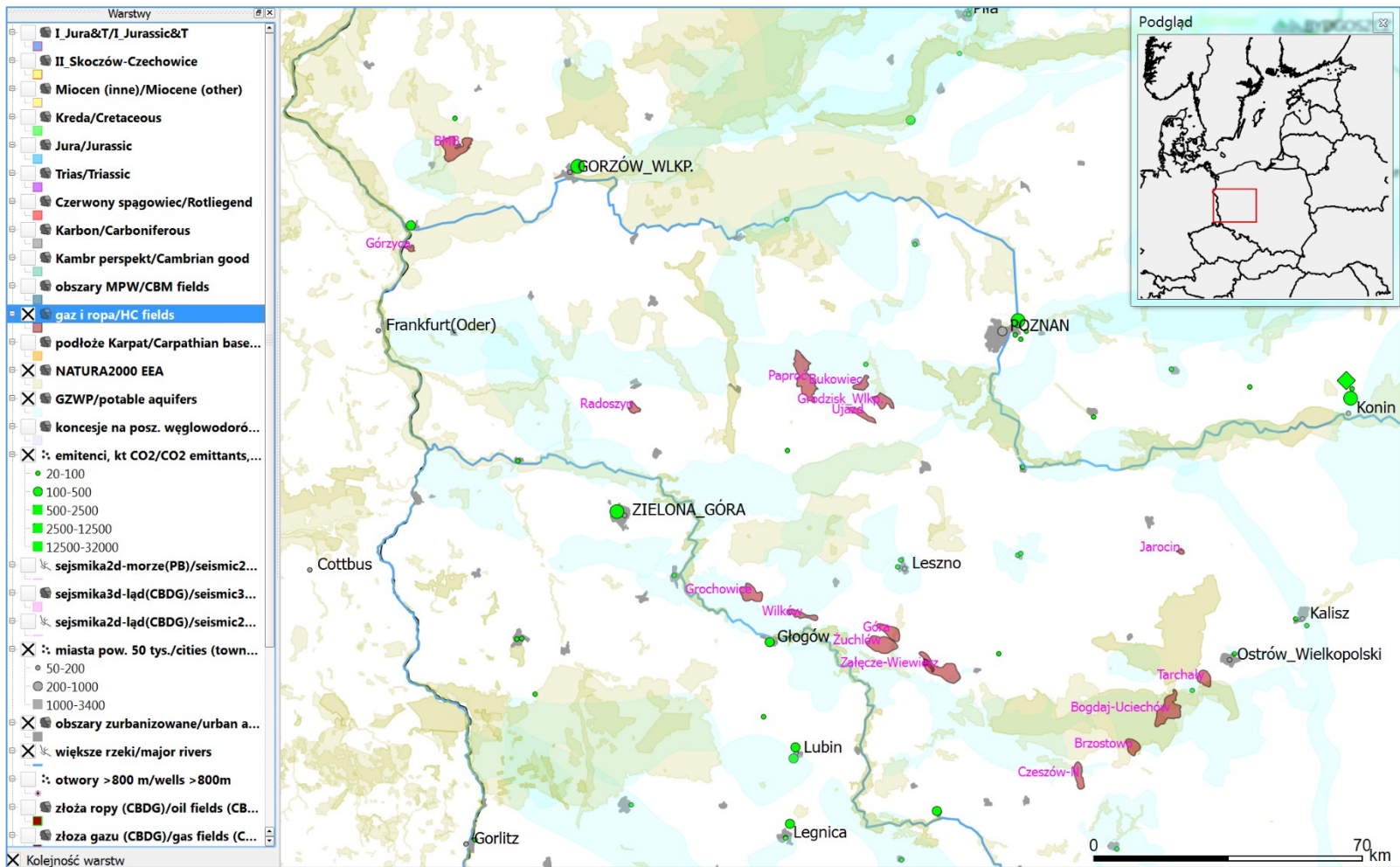


Fig. 3\_52A Złoża węglowodorów - Polska zachodnia

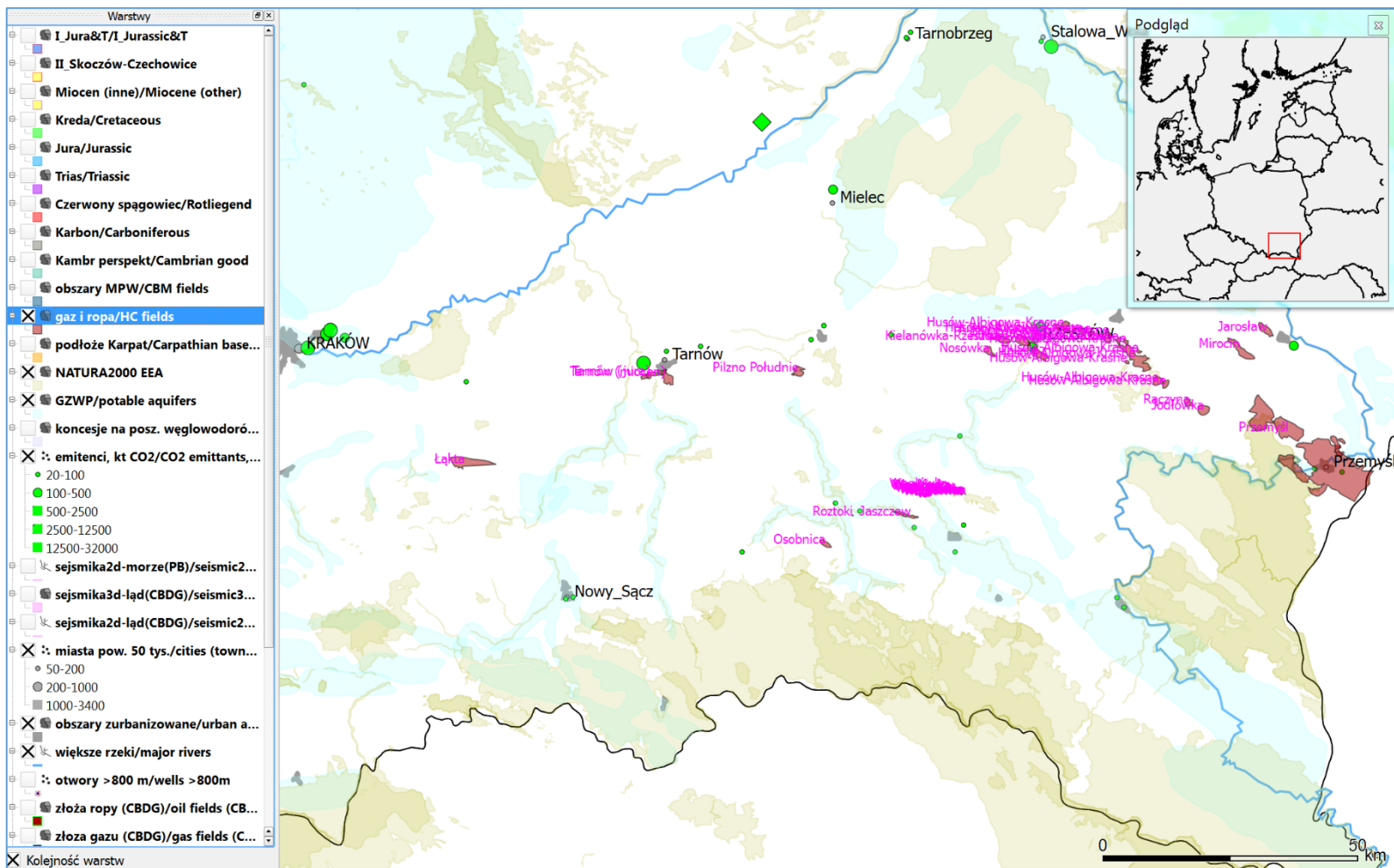


Fig. 3\_52B Złoża węglowodorów - Polska południowo-wschodnia

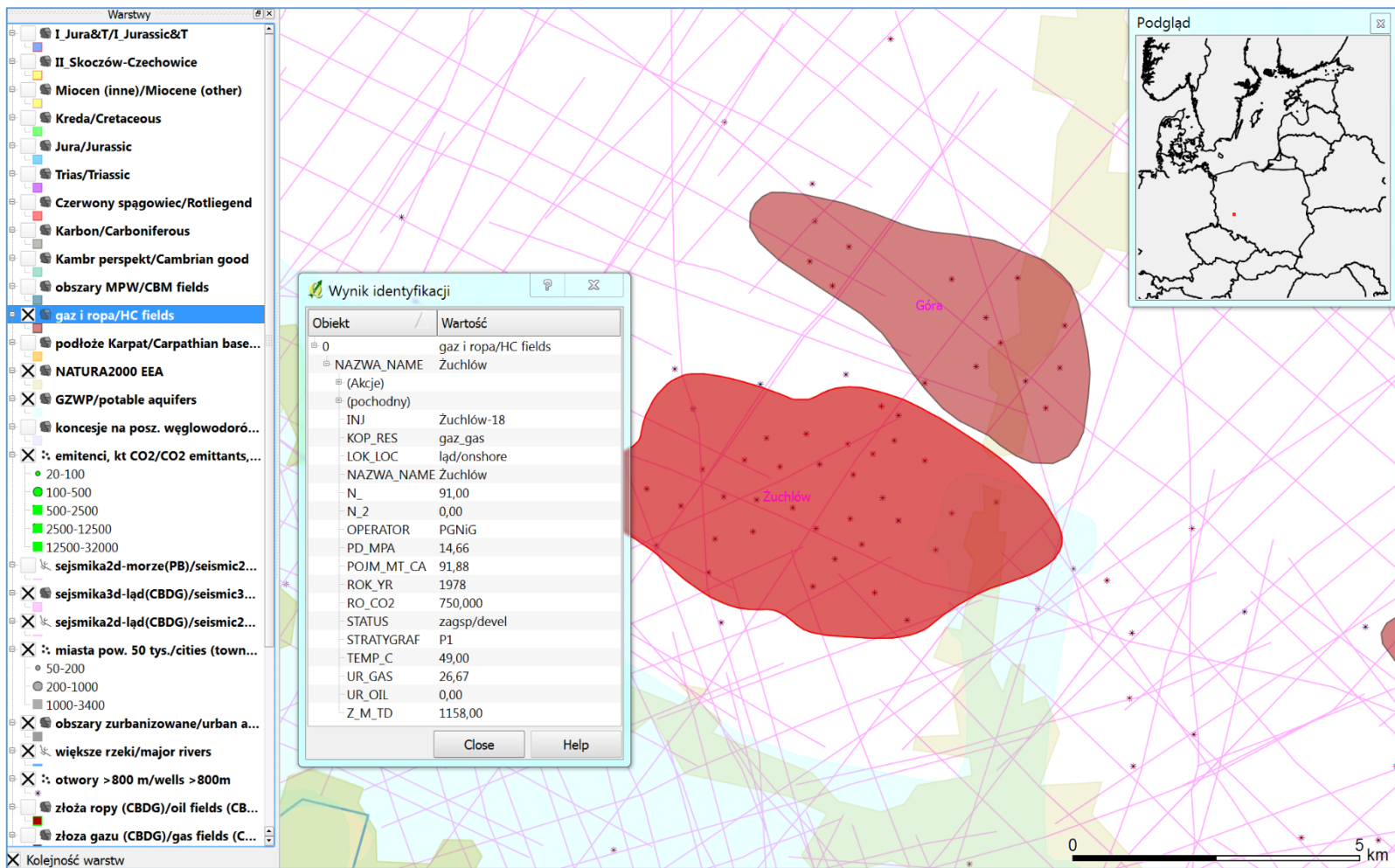


Fig. 3\_53 Złoże gazu Żuchłów (koło Głogowa)

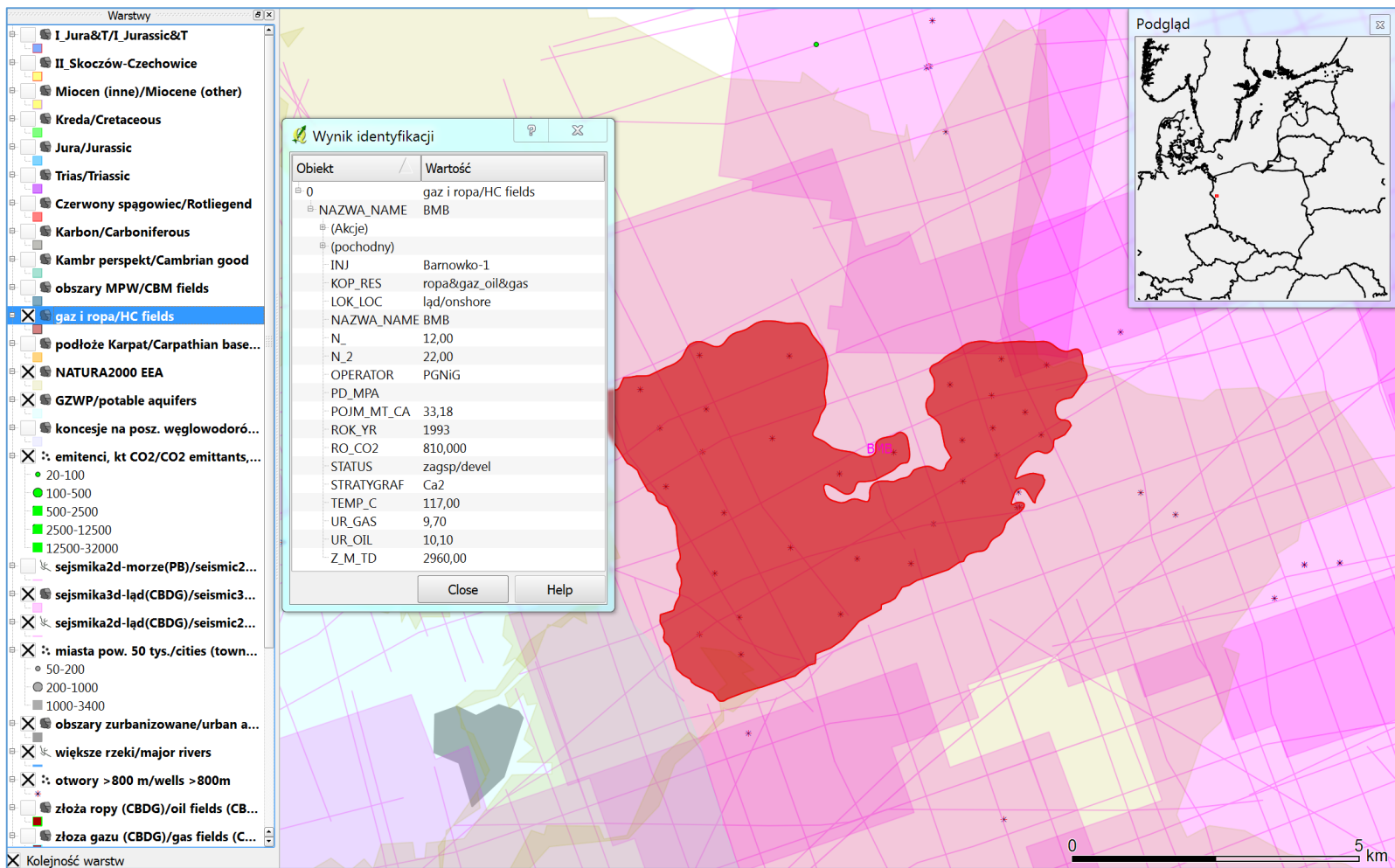


Fig. 3\_54 Złoże ropy Barnówko-Mostno-Buszewo (BMB - koło Gorzowa Wlkp.)

## Podsumowanie dla złóż węglowodorów

W przypadku złóż węglowodorów do sekwestracji może być użytecznych kilkadziesiąt struktur o odpowiedniej wielkości pierwotnych zasobów wydobywalnych i odpowiednim stopniu szczypania.

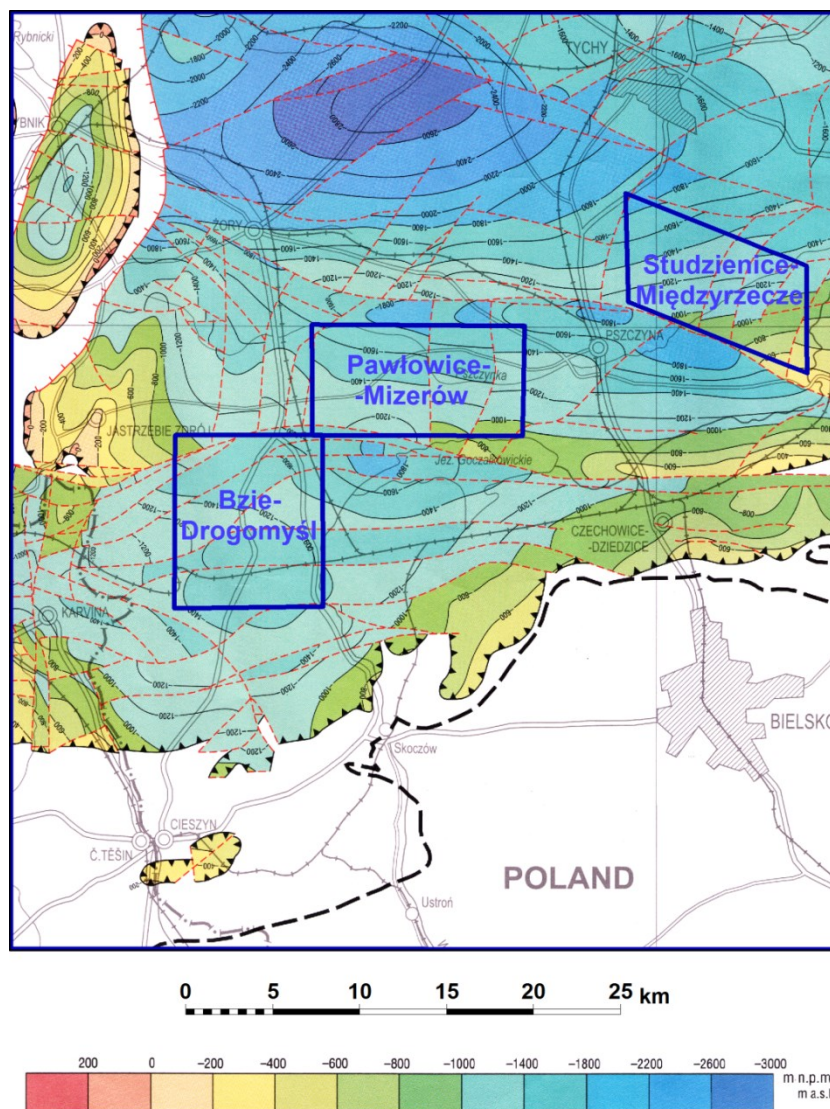
Eksploatowane i wytypowane złoża węglowodorów grupują się w dwóch głównych prowincjach naftowych. Pierwsza z nich to rejon brzeżnej strefy Karpat (fliszowych) i zapadlisko przedkarpackie – SE część kraju, gdzie eksploatacja ropy naftowej i gazu ziemnego była prowadzona od wielu dziesięcioleci (ropy od II połowy XIX wieku). Węglowodory, głównie gaz ziemny, występują tam w formacjach neogenu (miocen), paleogenu i kredy. Druga prowincja to Polska zachodnia, gdzie złoża gazu występują w utworach permskich - cechsztynu i czerwonego spągowca. W NW części kraju mamy nieliczne złoża ropy i gazu (a nie samego gazu), z których największe – BMB koło Gorzowa Wlkp. (pojemność 30-40 mln ton) nie jest szczypane w znacznym stopniu, jeśli chodzi o pierwotne zasoby wydobywalne ropy, a mniejsze złożo Kamień Pomorski w rejonie Wolina – w znacznym stopniu. Poza tymi prowincjami mamy jedyne eksploatowane od dłuższego czasu złożo ropy naftowej na Bałtyku – B3 i niewielkie złożo gazu i ropy Stężycza na Lubelszczyźnie. Pojemności składowania złóż wynoszą najczęściej od kilku do kilkudziesięciu mln ton CO<sub>2</sub>. Cztery złoża gazu: Przemyśl na SE i Żuchłów, Załęcze-Wiewierz i Bogdaj-Uciechów na zachodzie, mają pojemności składowania ponad 50 mln ton. Dla kilku złóż ropy (NW Polska, SE Polska, Bałtyk) możliwe byłoby zatłaczanie CO<sub>2</sub>, przeważnie na niewielką skalę, celem wspomaganie wydobycia ropy naftowej, co prawdopodobnie byłoby opłacalne ekonomicznie nawet przy obecnych cenach uprawnień ETS. Wspomaganie wydobycia węglowodorów przez zatłaczanie CO<sub>2</sub> jest możliwe także dla szczypanych złóż gazu, raczej tych największych, ale ewentualny przychód z takiej działalności byłby daleko mniejszy w przeliczeniu na tonę zatłoczonego CO<sub>2</sub> niż w przypadku złóż ropy.

Potencjał do składowania w strukturach naftowych jest rzędu **784 – 1021 mln ton**. Są to w większości szczypane złoża gazu; udział rozpatrywanych kilku złóż ropy naftowej, o różnym stopniu szczypania, stanowi mniej niż 10% powyższych wartości.

### 3.3 Pokłady węgla

(Janusz Jureczka, Adam Wójcicki, Jarosław Chećko, Robert Warzecha, Tadeusz Bromek)

Wyniki prac wykonanych w ramach I Segmentu sugerują, że potencjalne pod kątem składowania CO<sub>2</sub> rejony badań znajdują się w centralnej i południowej części Górnosląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) (Fig. 3\_55).



**Fig. 3\_54** Położenie regionu centralno-południowego na tle mapy strukturalnej spągu górnośląskiej serii piaskowcowej (Jureczka i in., 2005)

Są to następujące trzy rejony, położone generalnie na północ od obiektu solankowego Skoczów-Czechowice (**Fig. 3\_55 i 56**), o zbliżonej przydatności i parametrach:

- ❖ Rejon Pawłowice-Mizerów w centralnej części GZW, na wschód od kopalni „Pniówek”;
- ❖ Rejon Studzienice-Międzyrzecze w centralnej części GZW;
- ❖ Rejon Bzie-Drogomyśl w południowo-zachodniej części GZW, na południe od kopalni „Pniówek”.

Obszar obejmujący te trzy rejony wydaje się najbardziej perspektywiczny do zastosowania technologii CO<sub>2</sub>-ECBMR. Ponieważ zmienność lateralna rozkładu metanonośności pokładów węgla w określonych interwałach głębokości jest stosunkowo nieznaczna i wartości metanonośności porównywalne dla wszystkich trzech rejonów, rejon Pawłowice-Mizerów wybrano do dalszych analiz II Segmentu z uwagi na najlepsze rozpoznanie zawartości metanu w pokładach węgla w otworach.

Przemysłowe wykorzystanie technologii CO<sub>2</sub>-ECBMR może objąć zatłoczenie do 200 tys. ton CO<sub>2</sub> do jednego otworu poziomego (przez parę lat – cały okres życia projektu ECBM) celem uzyskania produkcji kilkudziesięciu mln m<sup>3</sup> metanu (Davis et al., 2004). Dla tego celu nie warto budować rurociągu lecz raczej przewozić zakupiony CO<sub>2</sub> cysternami transportem drogowym lub kolejowym. W rejonie Górnego Śląska CO<sub>2</sub> jest np. produkowany na terenie Zakładów Azotowych Kędzierzyn.



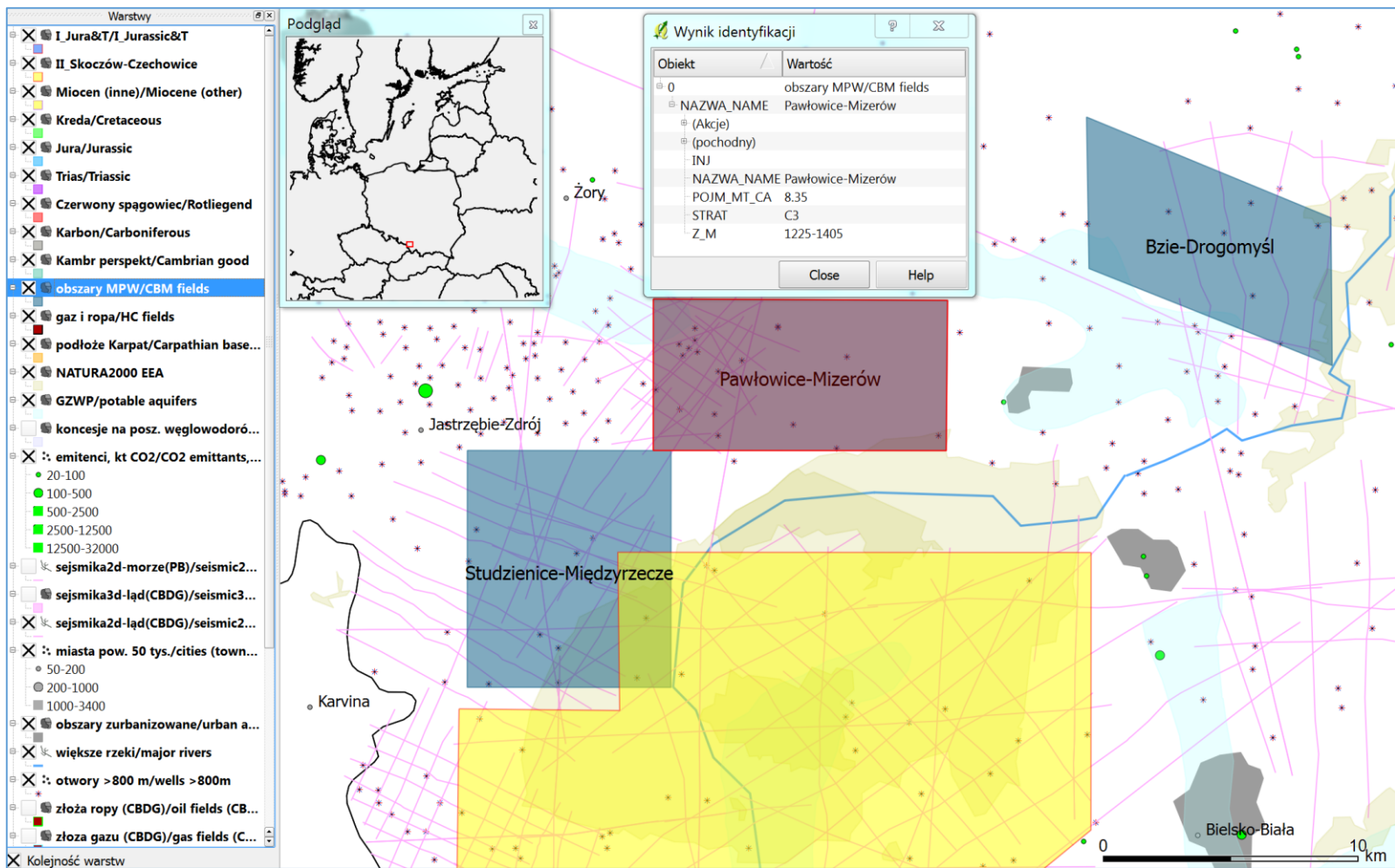


Fig. 3\_55 Obiekt w pokładach węgla Pawłowice-Mizerów

### Podsumowanie dla pokładów węgla

Jeśli chodzi o zatłaczanie CO<sub>2</sub> do nieeksploatowanych pokładów węgla celem wspomagania wydobycia metanu pokładów węgla, to ograniczono się do analiz dla Zagłębia Górnośląskiego (GZW), a dokładniej - do jego części centralno-południowej. Analizy posłużyły do wskazania trzech małych obszarów w części centralno-południowej GZW gdzie zastosowanie technologii CO<sub>2</sub>-ECBMR jest bezsprzecznie możliwe w realistycznej perspektywie czasowej. Pozostałe zagłębia węglowe (Dolnośląskie Zagłębie Węglowe, Lubelskie Zagłębie Węglowe) wydają się nieodpowiednie do składowania CO<sub>2</sub> z uwagi na zagadnienia bezpieczeństwa lub stopień udokumentowania zasobów MPW.

Ze względu na budowę geologiczną GZW, odległość od czynnych kopalń węgla kamiennego oraz brak zwartej zabudowy - chodzi o możliwe konflikty interesów i bezpieczeństwo składowania - do dalszych prac został wybrany obszar centralny i południowy; wyznaczono tam trzy rejony i poddano je szczegółowej analizie pod względem geologii, węglizacji, podstawowych parametrów chemiczno-technologicznych węgla i metanoności. Spośród tych trzech rejonów głębokimi wierceniami najlepiej został rozpoznany rejon Pawłowice-Mizerów.

Potencjał dla pokładów węgla można szacować na **20 – 100 mln ton**. Pierwsza wartość odnosi się dla możliwych koncesji na rozpoznanie w obrębie GZW - trzech rejonów w części centralno-południowej GZW, o pojemności **5-8 mln ton CO<sub>2</sub>** każdy, przy czym pojemności dotyczą składowania tylko w dwóch relatywnie miększych pokładach węgla (każdy o grubości kilku metrów) występujących na całym obszarze perspektywnym. Druga wartość odpowiada hipotetycznie obszarowi GZW, gdzie składowanie CO<sub>2</sub> byłoby możliwe, choć w gorszych warunkach złożowych, w przedziale głębokości 1-2 km.

## 4. WYNIKI PRAC SZCZEGÓŁOWYCH

W rezultacie prac regionalnych (I Segmentu) wytypowano szereg obiektów w poziomach solankowych (w tym ewentualnie na potrzeby planowanych na początku realizacji tematu projektów demonstracyjnych CCS w Bełchatowie i Kędzierzynie), złóż węglowodorów i obiekt w pokładach węgla, będących przedmiotem analiz szczegółowych ("case studies").

Prace szczegółowe (II Segmentu) dla tych obiektów objęły wstępną charakterystykę potencjalnych składowisk zgodnie z zaleceniami podanymi w załączniku nr 1 do Dyrektywy unijnej w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla.

### 4.1 Struktury solankowe

**(Adam Wójcicki, Janusz Jureczka, Sylwia Kijewska, Michał Wojtowicz, Marta Kuberska, Maciej Tomaszczyk, Jarosław Chećko, Aleksandra Koteras, Stanisław Nagy, Bartosz Papiernik, Radosław Tarkowski)**

#### Budziszewice-Zaosie (Bełchatów)

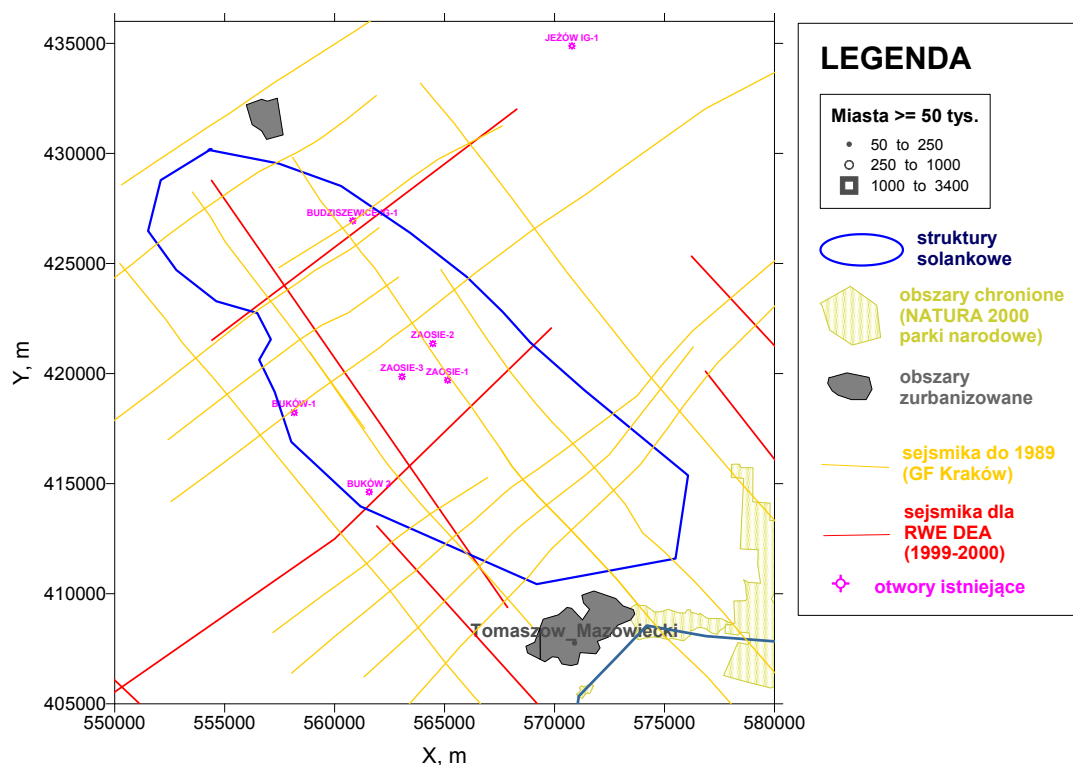


Fig. 4\_1 Otwory i profile sejsmiczne w rejonie struktury

Struktura Budziszewice-Zaosie (**Fig. 4\_1, 2, 4**), położona pomiędzy Tomaszowem Mazowieckim a Łodzią (patrz też rozdział 3.1, rejon I), nawiercona jest pięcioma otworami, a na jej obszarze wykonano w latach 1970-2000 kilkanaście profili sejsmicznych, z których tylko część nadawała się do wykorzystania do konstrukcji modelu statycznego/geologicznego/strukturalno-parametrycznego struktury (**Fig. 4\_2**).

Podstawowe kolektory to piaskowce dolnej jury (analizowano też scenariusz sekwestracji dla piaskowców dolnego triasu - INiG), o miąższości ok. 50-100 m. Występują one w obrębie górnego pliensbachu (formacji drzewickiej; na głębokości 770 m w szczycie struktury), o porowatości efektywnej ok. 14-25% wg danych laboratoryjnych i przepuszczalności ok. 300 mD oraz synemuru i hettangu (formacja ostrowiecka, lokalnie zagajska), o porowatości z analiz laboratoryjnych ok. 14-20% i przepuszczalności jak w górnym pliensbachu. Wg danych karotażowych porowatość efektywna piaskowców dolnej jury wynosi ok. 15%. Uszczelnieniem podstawowym jest dolny toark (formacja ciechocińska) o miąższości ok. 100 m, nad nią występuje nieprzepuszczalny górny aalen o nieco mniejszej miąższości, pomiędzy zaś kolektorami górnego pliensbachu oraz synemuru występuje słabe (zwłaszcza w szczycie struktury) uszczelnienie. Wskaźnik ostrzegawczy stanowi niska mineralizacja solanek w kolektorach dolnej jury (kilka g/l), która jednak może być związana z zasilaniem z wychodni Gór Świętokrzyskich (w przypadku struktury Wojszyce mineralizacja też jest dość niska) bądź wodami reliktowymi (?).

W oparciu o model statyczny/geologiczny jury (**Fig. 4\_3**), wykonano symulacje zatłaczania CO<sub>2</sub> dla scenariuszy obejmujących lokalizację otworów w szczycie struktury (AGH - program GEM - 1 otwór poziomy, albo 2-4 otwory pionowe; przykład na **Fig. 4\_4**), bądź na jej skłonie (GIG - program TOUGH2), z uwzględnieniem czterech otworów pionowych. Przyjęto zatłaczanie w takich ilościach, jakie planowano w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów (około 2 mln ton rocznie), z wyjątkiem jednego wariantu pilotażowego zatłaczania (20 kt/rok). W obu scenariuszach wykonano symulacje zachowania się zatłaczanego CO<sub>2</sub> przez dziesiątki, setki i tysiące lat. Okazało się, że zatłaczanie na zboczu struktury w mniejszym stopniu zaburza istniejące pole ciśnień i szybciej powracają w tym przypadku pierwotne warunki złożowe, niż w przypadku zatłaczania w szczycie struktury.

W oparciu o wyniki symulacji zatłaczania i model geologiczny wykonano wstępną analizę ryzyka. Problem do rozwiązania stanowi tu, obok zamknięcia struktury na NW (kierunek Koluszki-Łódź), jakość uszczelnienia w szczycie struktury. Do tego celu potrzebne byłoby szczegółowe rozpoznanie i monitoring zerowy struktury, dla których założenia przygotowano w ramach niniejszego przedsięwzięcia (**Fig. 4\_4**), obok planów monitoringu środowiskowego wokół otworów zatłaczających (IGSMiE PAN), a także przykładowych projektów na wykonanie pilotażowego zatłaczania (PIG-PIB i AGH).

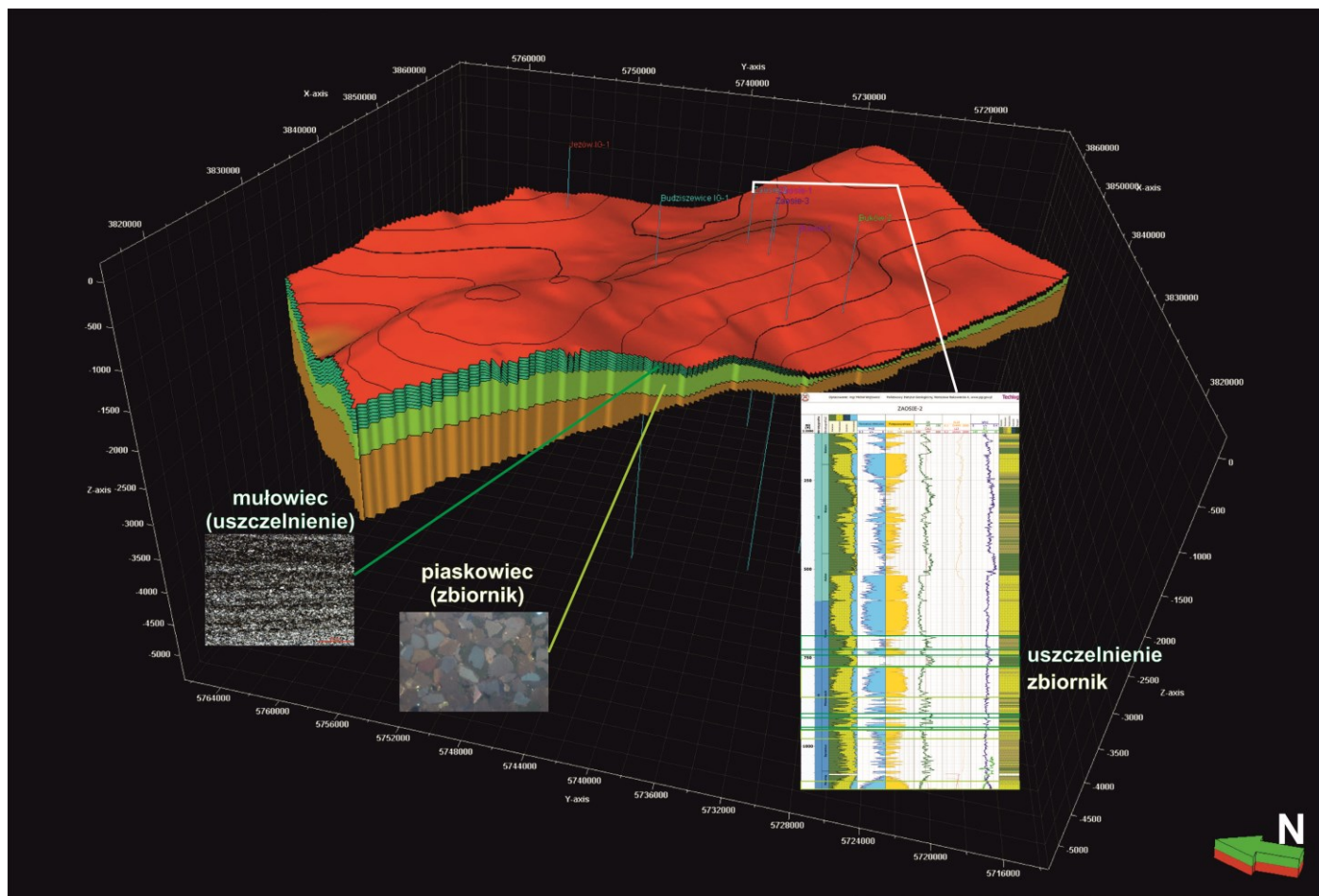


Fig. 4\_2 Model struktury Budziszewice-Zaosie (B-Z; program Petrel), z przykładem interpretacji karotażu i próbkami skał (zdjęcia pod mikroskopem)

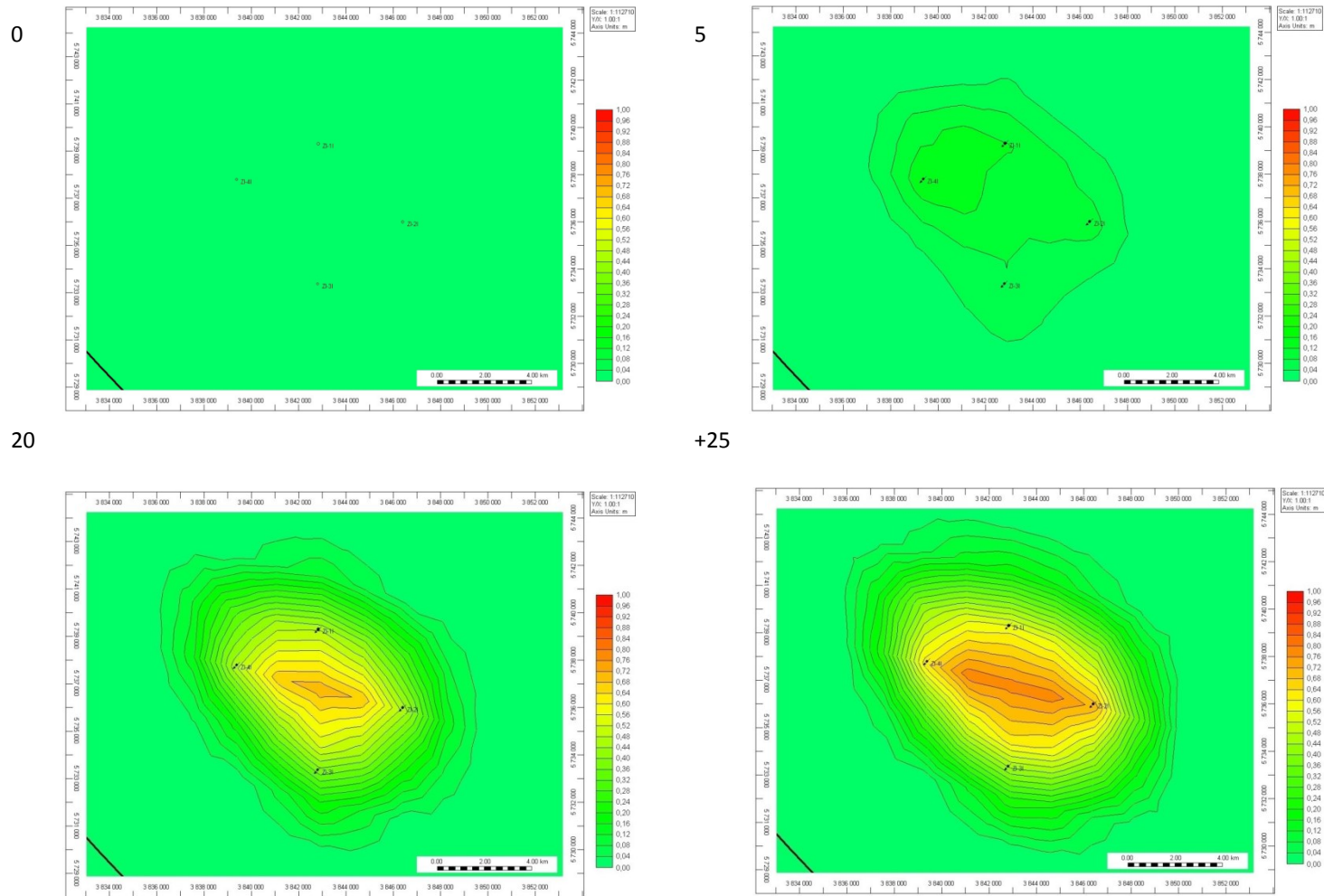


Fig. 4\_3 Przykładowe symulacje zataczania do zbiorników dolnej jury (Jp13, Js+h) struktury B-Z; 0, 5 i 20 lat zataczania i 25 lat po jego zakończeniu.

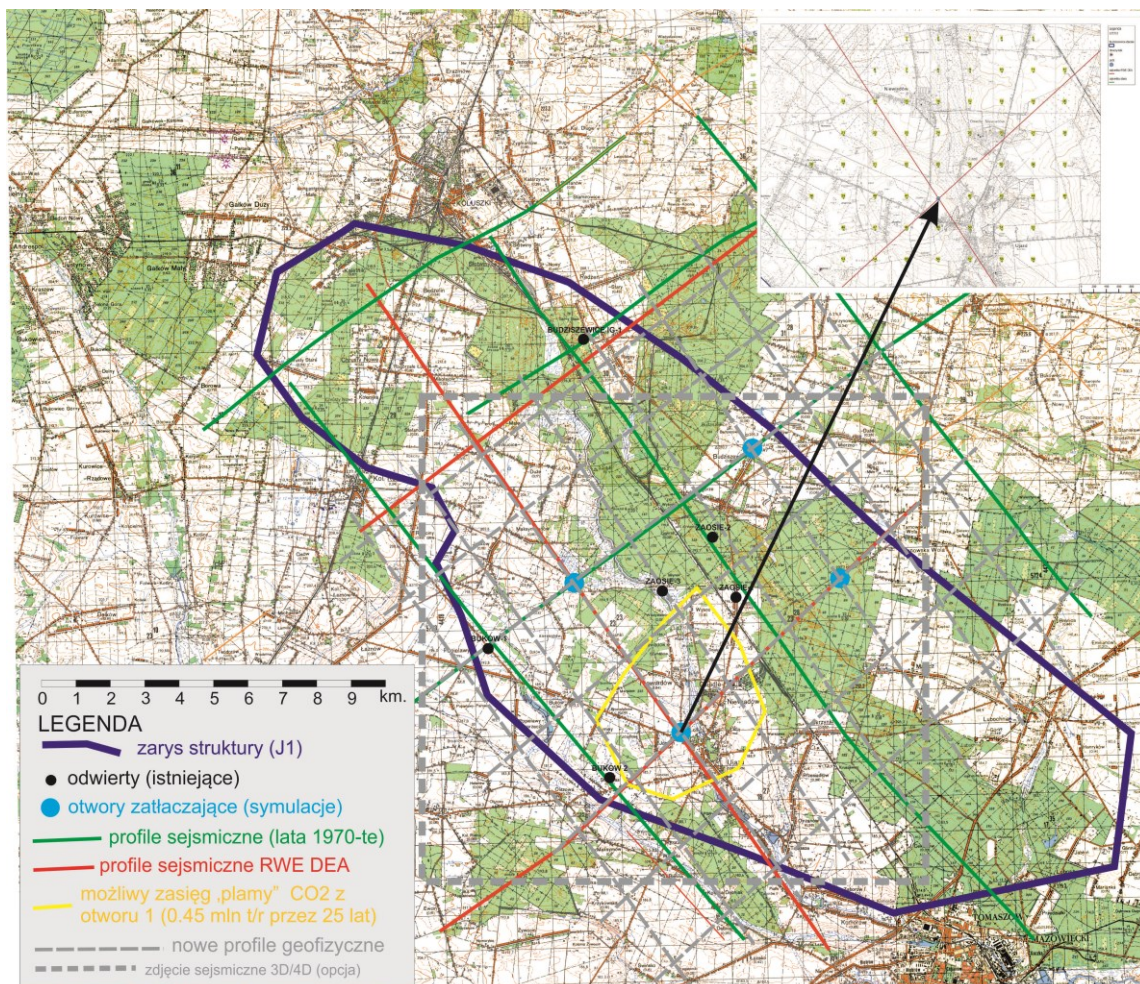


Fig. 4\_4 Lokalizacje otworów symulacyjnych i proponowane badania polowe (rozpoznanie szczegółowe, monitoring zerowy).

### Skoczów-Czechowice (GZW)

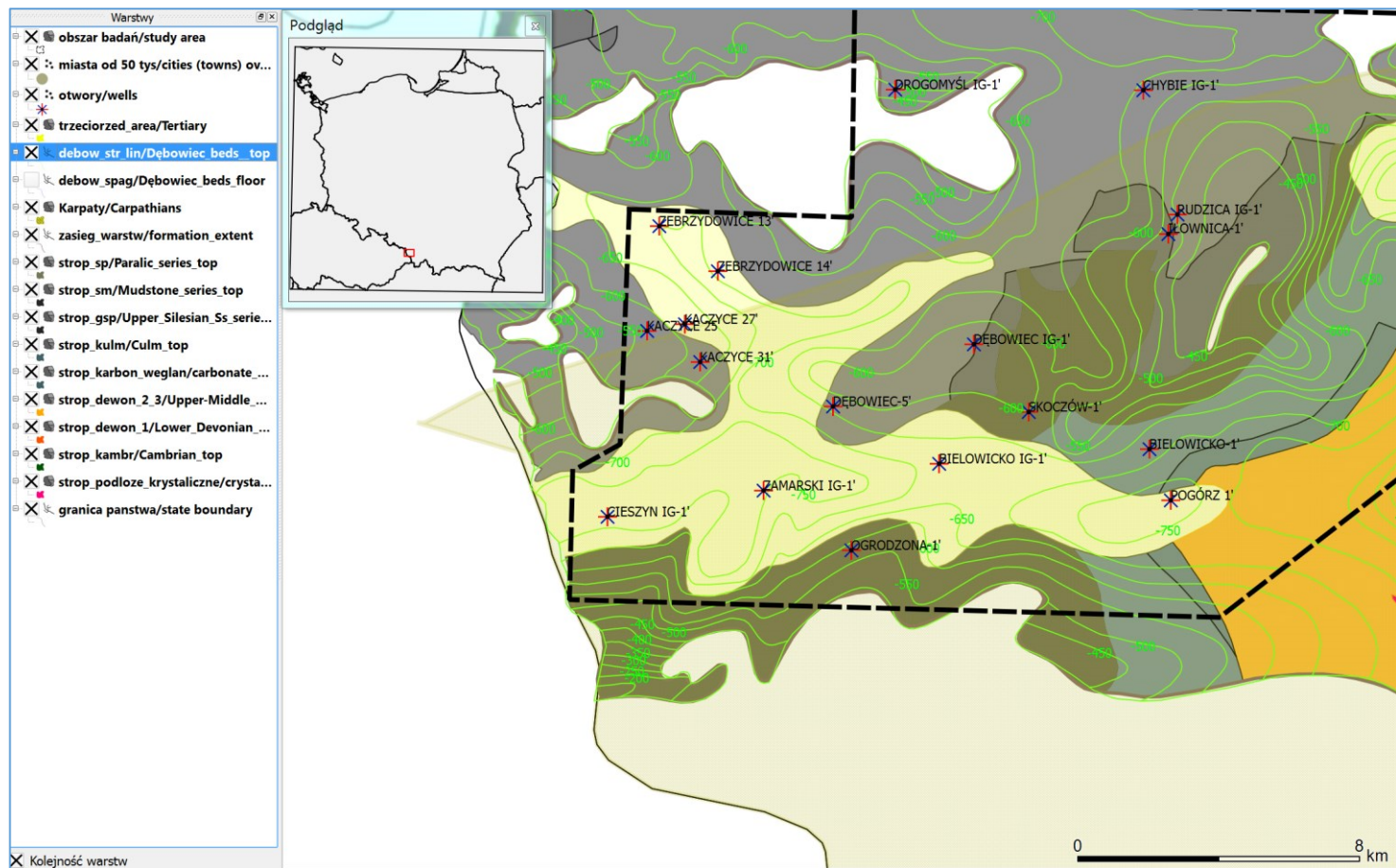
Obszar badań pokryty jest stosunkowo gęsto otworami przewiercającymi miocen i jego podłoże (**Fig 4\_5**), ale w niewielu zachowały się rdzenie (w tym w jednym otworze PIG). Praktycznie we wszystkich głębokich otworach dostępne są wyniki profilowań geofizyki wiertniczej, ale tylko dla niewielu prowadzona była interpretacja pod kątem określenia litologii i parametrów petrofizycznych, co wynikało z faktu, że rozpoznanie obszaru badań było w większym stopniu ukierunkowane na potrzeby dokumentowania zasobów węgla kamiennego w górnym karbonie, niż np. dla określenia własności nadkładu miocenińskiego.

Analizy petrofizyczne i petrograficzne na próbkach rdzeni dostępne były w większości otworów i to głównie one były, obok archiwalnych map strukturalnych (sejsmicznych) i geologicznych, podstawą do opracowania przez GIG modelu statycznego w programie Petrel (**Fig. 4\_6**). W przypadku formacji piaskowcowych i zlepieńcowych warstw dębowieckich porowatość efektywna wynosi średnio niewiele ponad 10% (minimum dla geologicznego składowania) a przepuszczalność średnio około 40 mD; podobne własności charakteryzują lokalnie występujące poniżej warstwy zamarskie (o niewielkiej miąższości). W przypadku podłoża miocenu (górnym karbon) w obrębie krakowskiej serii piaskowcowej obserwujemy lokalnie nieco lepsze własności zbiornikowe niż dla warstw dębowieckich, a dla górnośląskiej serii piaskowcowej – gorsze (PIG-PIB OG).

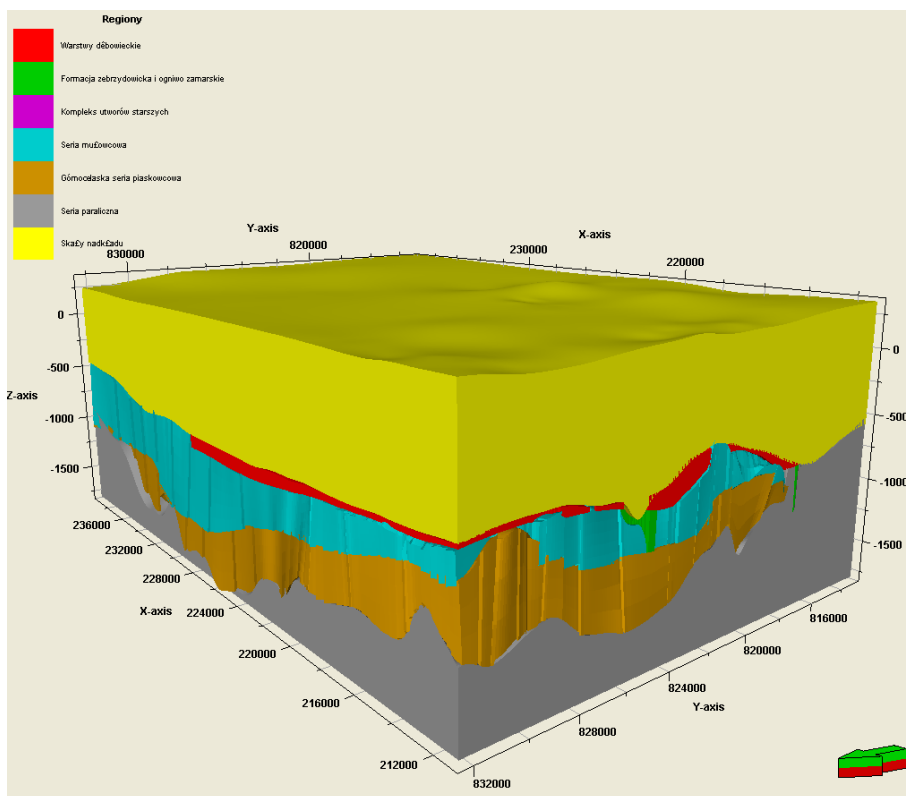
Przeprowadzono (GIG – program TOUGH2) symulacje zatłaczania dwutlenku węgla do struktury zbiornikowej w obrębie dolnego osadów miocenu (warstwy dębowieckie i lokalnie zamarskie), w jednym oraz czterech otworach (**Fig. 4\_7**), przyjmując odpowiednio 0,45 i 0,25 mln ton CO<sub>2</sub> na otwór, w okresie 25 lat. Takie scenariusze zatłaczania CO<sub>2</sub> wynikały z własności zbiornikowych kolektorów, jak również gwarantowały wzrost ciśnienia złożowego w stropie zbiornika o najwyżej kilkanaście procent, wykluczający rozszczelnienie kompleksu składowania. W sumie udało się zatłoczyć 25 mln ton CO<sub>2</sub>, co odpowiada emisjom instalacji energetycznej średniej wielkości.

Chociaż obiekt wydaje się bezpieczny jako potencjalne składowisko CO<sub>2</sub>, to jego wykorzystanie wymagałoby dodatkowych, szczegółowych badań geologicznych i geofizycznych (nowych otworów, sejsmiki) oraz przeanalizowania zagrożeń dla wyrobisk górniczych kopalń węgla kamiennego Morcinek, Bzie i ewentualnie Pniówek. Konieczne byłoby też rozpoznanie stanu likwidacji wszystkich otworów znajdujących się w zasięgu składowanego CO<sub>2</sub>, jak również wpływu składowania na pobliski zbiornik geotermalny w rejonie Jaworza. W związku z powyższym opracowano dlań plan szczegółowego rozpoznania i monitoringu zerowego (w tym sieci sejsmologicznej - GIG), jak również założenia dla wykonania otworu do testowego zatłaczania CO<sub>2</sub> w rejonie Iskrzyczyna (PIG-PIB i AGH; jeden z otworów do symulacji zatłaczania na **Fig. 4\_7**).

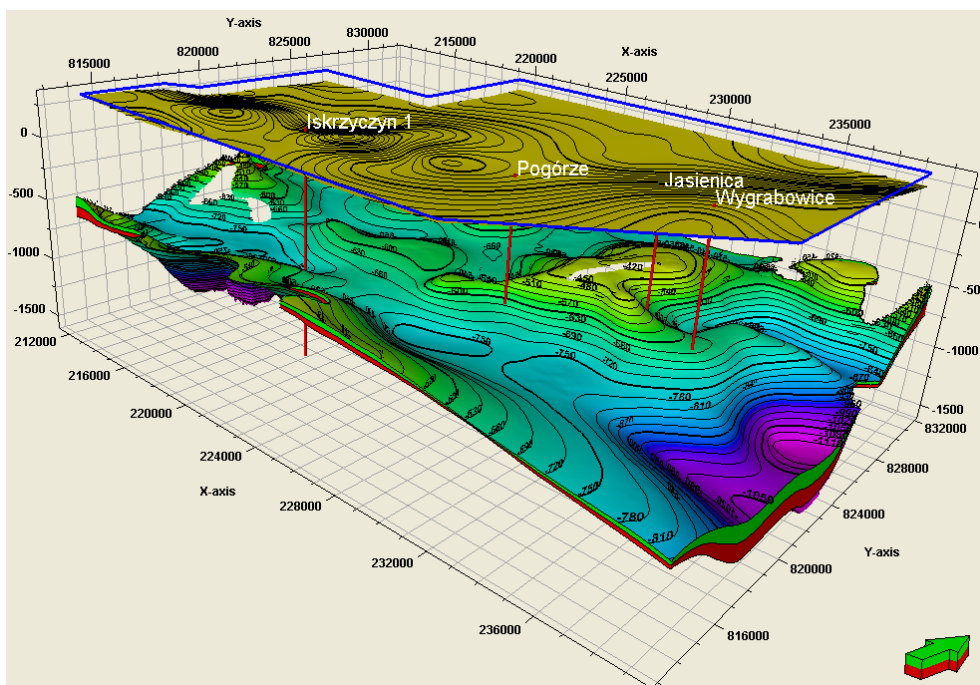




**Fig. 4\_5** Zestawienie danych geologicznych dla obszaru badań; mapa stropu warstw dębowieckich w formie izolinii (p.p.m., powierzchnia terenu występuje na obszarze badań na wysokości 250-300 m n.p.m.), dla ich podłoża zaznaczono odpowiednimi kolorami zasięgi poszczególnych formacji geologicznych.



**Fig. 4\_6** Model geologiczny (statyczny) obiektu Skoczów-Czechowice



**Fig. 4\_7** Strop warstw dębowieckich wraz z powierzchnią terenu oraz otworami iniekcyjnymi

### Choszczno-Suliszewo (NW Polska)

Struktura Choszczno-Suliszewo(-Pławno-Radęcin) położona jest na obszarze NW Polski, w odległości około 60 km na SE od aglomeracji szczecińskiej (**Fig. 4\_8**). Rejon struktury rozpoznany jest 28 otworami, przy czym na jej obszarze i w bezpośrednim otoczeniu dostępne były informacje z 12 otworów: w kilku informacje odnośnie własności zbiornikowych i hydrogeologicznych oraz rdzenie, a dla pięciu krzywe geofizyki wiertniczej (**Fig. 4\_9**), o jakości umożliwiającej interpretację zailenia i własności zbiornikowych z karotazu. Na obszarze badań występuje kilkanaście profili sejsmicznych o raczej słabej jakości (głównie sprzed trzech dekad), których interpretacja, wykonana przez PIG-PIB, posłużyła do uszczegółowienia i uzupełnienia map strukturalnych opracowanych przez AGH. Perspektywiczne zbiorniki w rejonie struktury obejmują piaskowce dolnej jury (górnny pliensbach, a zwłaszcza synemur, a także hettang – patrz **Fig. 4\_9**, uszczelnienie zaś stanowi dolny toark, nie licząc kompleksów środkowojurajskich, ponadto pomiędzy obydwoma kolektorami występuje uszczelnienie o niewielkiej miąższości).

Informacje te posłużyły do skonstruowania modelu statycznego (geologicznego) przez AGH, który był podstawą dla szeregu wariantów symulacji zatłaczania. Otrzymane wyniki wskazują na bardzo dobre własności zbiornikowe - zailenie kolektorów jest rzędu 20%, porowatość rzędu 20%, a przepuszczalność minimum 1000 mD.

Przeprowadzono (AGH – symulator GEM) symulacje zatłaczania do poszczególnych kulminacji struktury (**Fig. 4\_10**; po 1 mln ton CO<sub>2</sub>/rok, przez 25 lat, a dla kulminacji Suliszewa dodatkowo wariant 2 mln ton/rok, aż do momentu wypełnienia struktury – jej pojemność całkowita wyniosła 634 mln ton). Równolegle GIG wykonał symulacje zatłaczania programem Eclipse 300, zakładając wydajności zatłaczania 1 i 2 mln ton/rok dla kulminacji Choszczna i Suliszewa. W modelu zaobserwowano lokalnie gorsze parametry uszczelnienia w szczycie kulminacji Choszczno i możliwe przenikanie CO<sub>2</sub> z kolektora górnego pliensbachu do uszczelnienia dolnego toarku przy znacznym zwiększeniu ciśnienia w zbiorniku.

Obok problematycznego uszczelnienia w szczycie kulminacji Choszczno (interpretacja sejsmiki PIG-PIB nie wykryła nieciągłości w nadkładzie uszczelniającym, natomiast analizy współczynników odbicia IGSMiE PAN – Dzięwińska & Tarkowski, 2012 - sugerują taką możliwość) problemem może tu być szczelność starych, zlikwidowanych otworów wiertniczych (zastosowanie cementów nieodpornych na korozję węglanową). Istotna jest również niepewność odwzorowania geometrii struktury (sejsmika o słabej jakości) oraz rozkładu parametrów zbiornikowych i filtracyjnych w przypadku całego obiektu Choszczno-Suliszewo(-Radęcin-Pławno).

Stąd przed podjęciem decyzji inwestycyjnej niezbędne byłoby szczegółowe rozpoznanie i monitoring zerowy struktury, w zakresie analogicznym jak dla struktury B-Z.

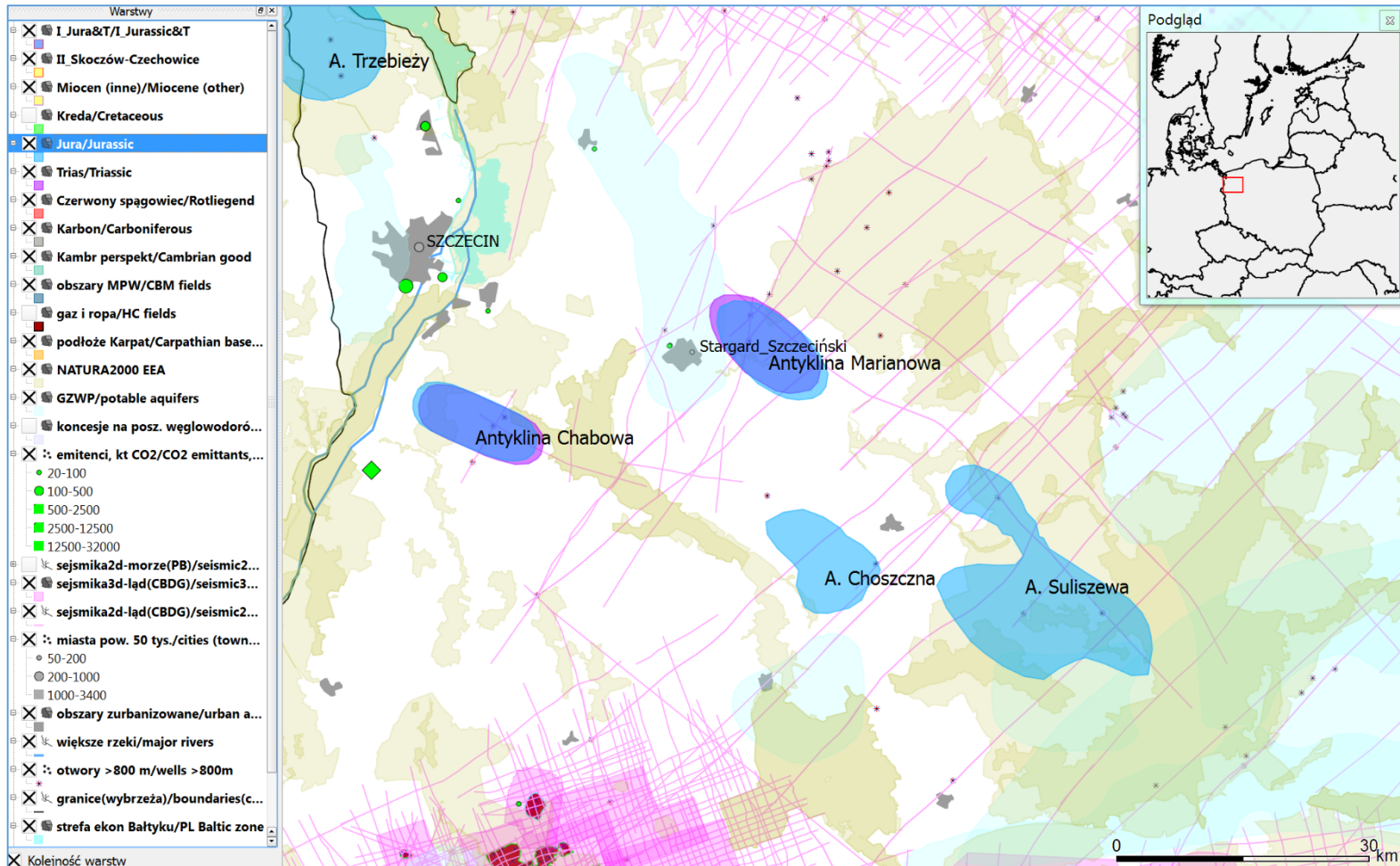
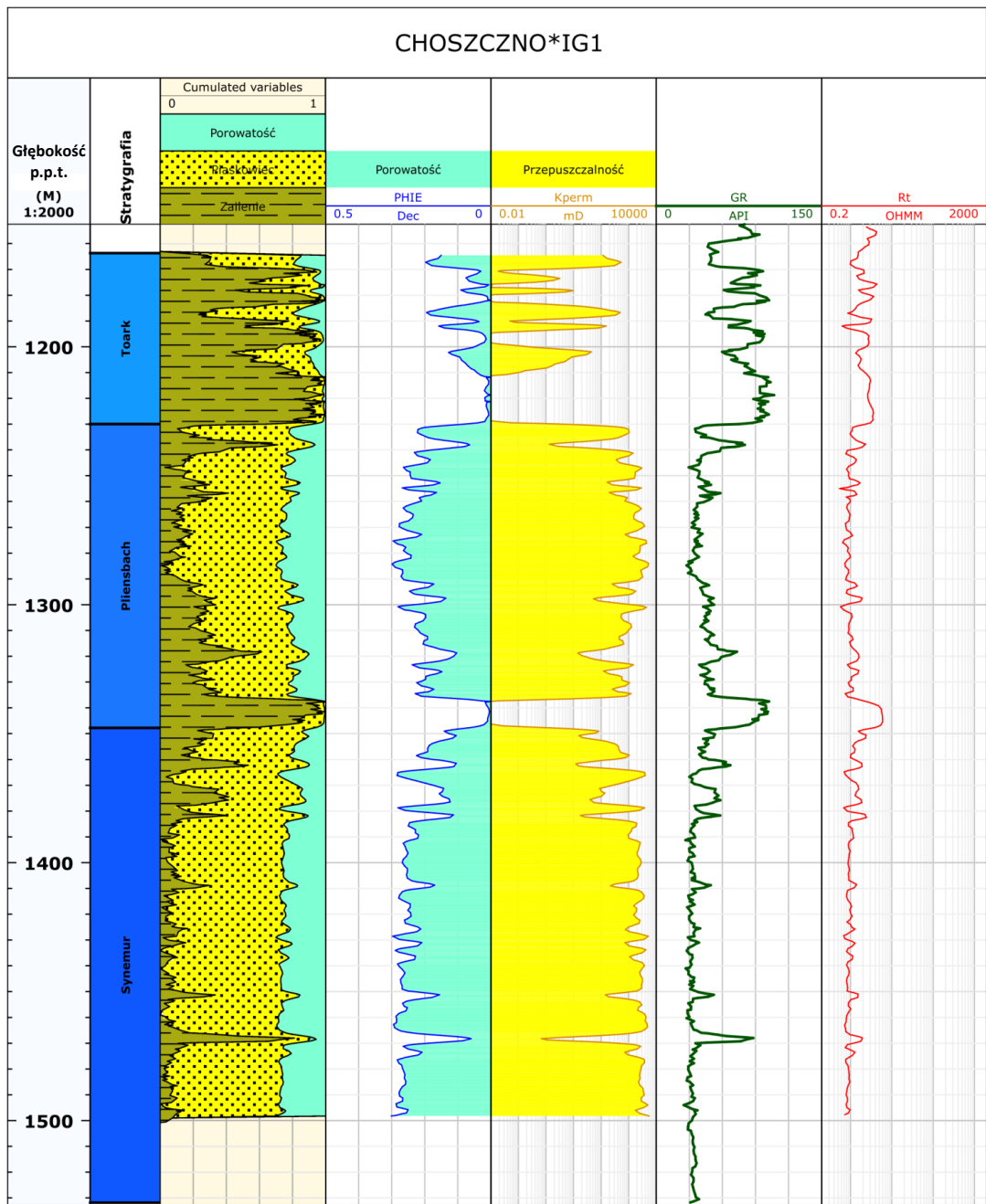


Fig. 4\_8 Lokalizacja struktury Choszczno-Suliszewo(-Radęcin-Pławno) oraz otworów i profili sejsmicznych w jej rejonie



**Fig. 4\_9** Wyniki interpretacji petrofizycznej krzywych geofizyki wiertniczej na przykładzie otworu Choszczno IG-1, obejmujące interpretację litologii, zailenia, porowatości efektywnej i przepuszczalności

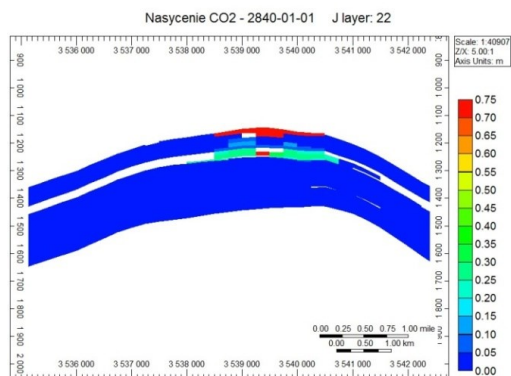
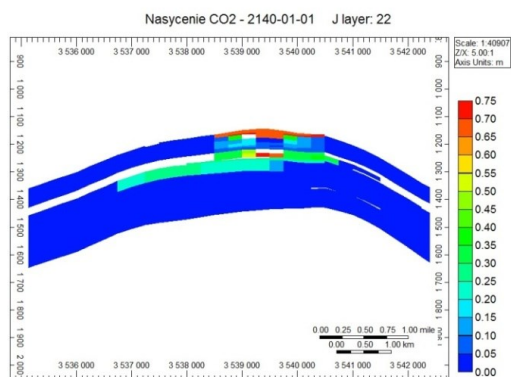
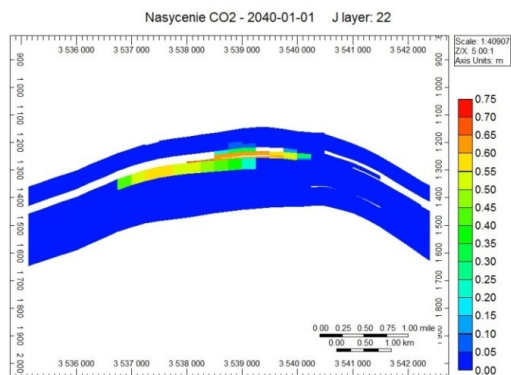
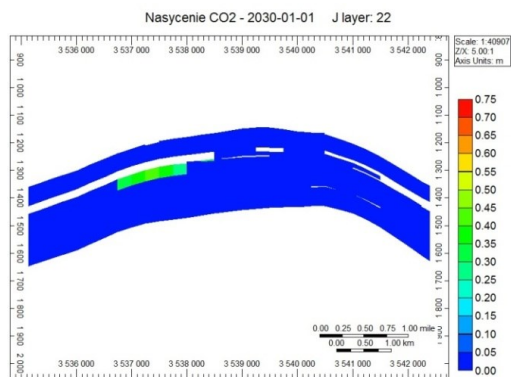


Fig. 4\_10 Migracja CO<sub>2</sub> do stropu pliensbachu w szczycie kulminacji Suliszewa.

### Niecka poznańska (Wielkopolska)

Dla potrzeb składowania CO<sub>2</sub>, określono (INiG) południowo-zachodni fragment niecki poznańskiej (ok. 20 km na SW od Poznania), który ograniczony jest od zachodu i południa wałem wolsztyńskim (**Fig. 4\_11**). W kierunku północno wschodnim nasycone wodą, utwory czerwonego spągowca zanurzają się do głębokości 5 km, co również stanowi swego rodzaju zamknięcie, gdyż zatłaczane gazy mają tendencję do przemieszczania się ku górze. Całość przykryta jest szczelnie ewaporatami cechsztyńskimi. Wydzielony fragment stanowi więc doskonałą megastrukturę dla potrzeb sekwestracji CO<sub>2</sub>. Omawiany fragment niecki poznańskiej posiada znaczną miąższość zbiornika, co przy o dobrych własnościach kolektorskich (jak na utwory czerwonego spągowca – wg informacji z otworów, archiwalnych analiz laboratoryjnych, porowatość efektywna serii złożowej sięga kilkunastu %, przepuszczalność zaś nierzadko przekracza 100 mD) stwarza wyjątkowo korzystne i unikalne warunki geologiczne dla przyszłej sekwestracji CO<sub>2</sub>.

W procesie konstrukcji modelu statycznego/geologicznego (INiG) wykorzystano regionalne i szczegółowe (obszary złóż) mapy strukturalne stropu czerwonego spągowca (PGNiG) oraz informacje z otworów, w tym dane karotażowe i laboratoryjne o parametrach zbiornikowych utworów czerwonego spągowca. Otrzymany model zbiornika (program Petrel - **Fig. 4\_12**) składa się z 10 warstw, różniących się rozkładem parametrów zbiornikowych.

Symulacje zatłaczania CO<sub>2</sub> wykonano według dwóch scenariuszy, obejmujących zatłaczanie 3 lub 7 otworami przez 50 lat (co dało zmagazynowanie w strukturze odpowiednio 10,6 oraz 24,7 mln ton CO<sub>2</sub> - **Fig. 4\_13**). W obu przypadkach symulowano również zachowanie się płynów złożowych w okresie relaksacji tj., 300 lat po zakończeniu zatłaczania.

Przeprowadzono analizę ryzyka na podstawie bazy Quintessa FEP, z której wynika, że najistotniejsze jest potwierdzenie szczelności struktury przez określenie parametrów nadkładu uszczelniającego w obrębie cechsztynu ponad zbiornikiem, na całym obszarze, na jaki w przyszłości może oddziaływać zatłoczony CO<sub>2</sub>. Poza tym istotna jest właściwa likwidacja starych otworów występujących w zasięgu zatłoczonego dwutlenku węgla.

Jak to jest chyba regułą w przypadku struktur solankowych, modele kompleksu składowania dla Niecki poznańskiej charakteryzują się zbyt niską szczegółowością, aby mogły być podstawą do zaprezentowania rzetelnego programu monitoringu efektu zatłaczania CO<sub>2</sub> do formacji skalnych. Dlatego do opracowania docelowego programu monitoringu proponuje się sporządzenie studium wykonalności (w tym modelowania pola falowego i inwersji sejsmicznej, celem weryfikacji danych sejsmicznych), celem zaprojektowania sejsmiki 4D, uznawanej za najbardziej poprawną technologię monitoringu (Jędrzejowska-Tyczkowska i in., 2004).

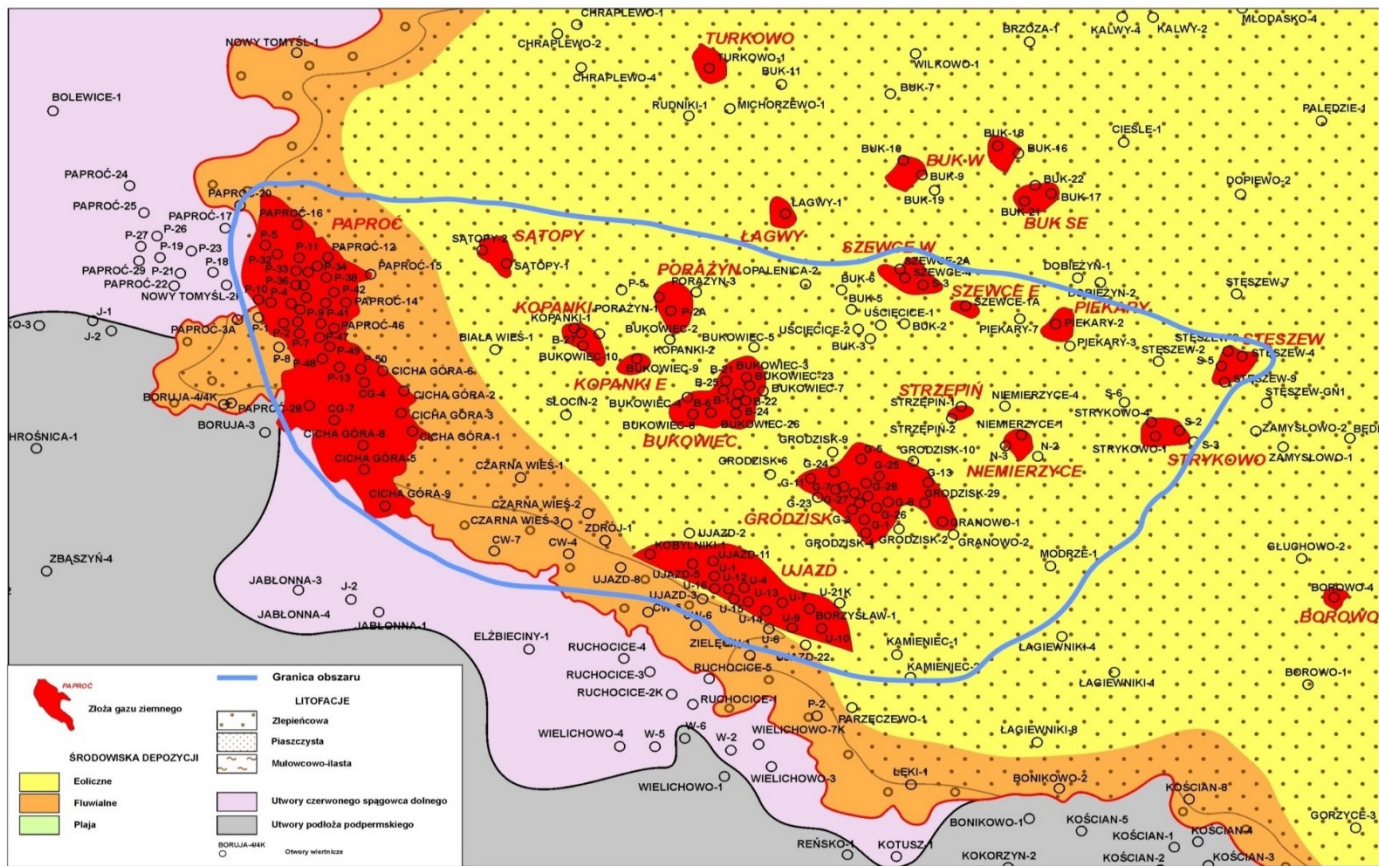


Fig. 4\_11 Fragment mapy niecki poznańskiej z zaznaczonymi granicami omawianego obszaru



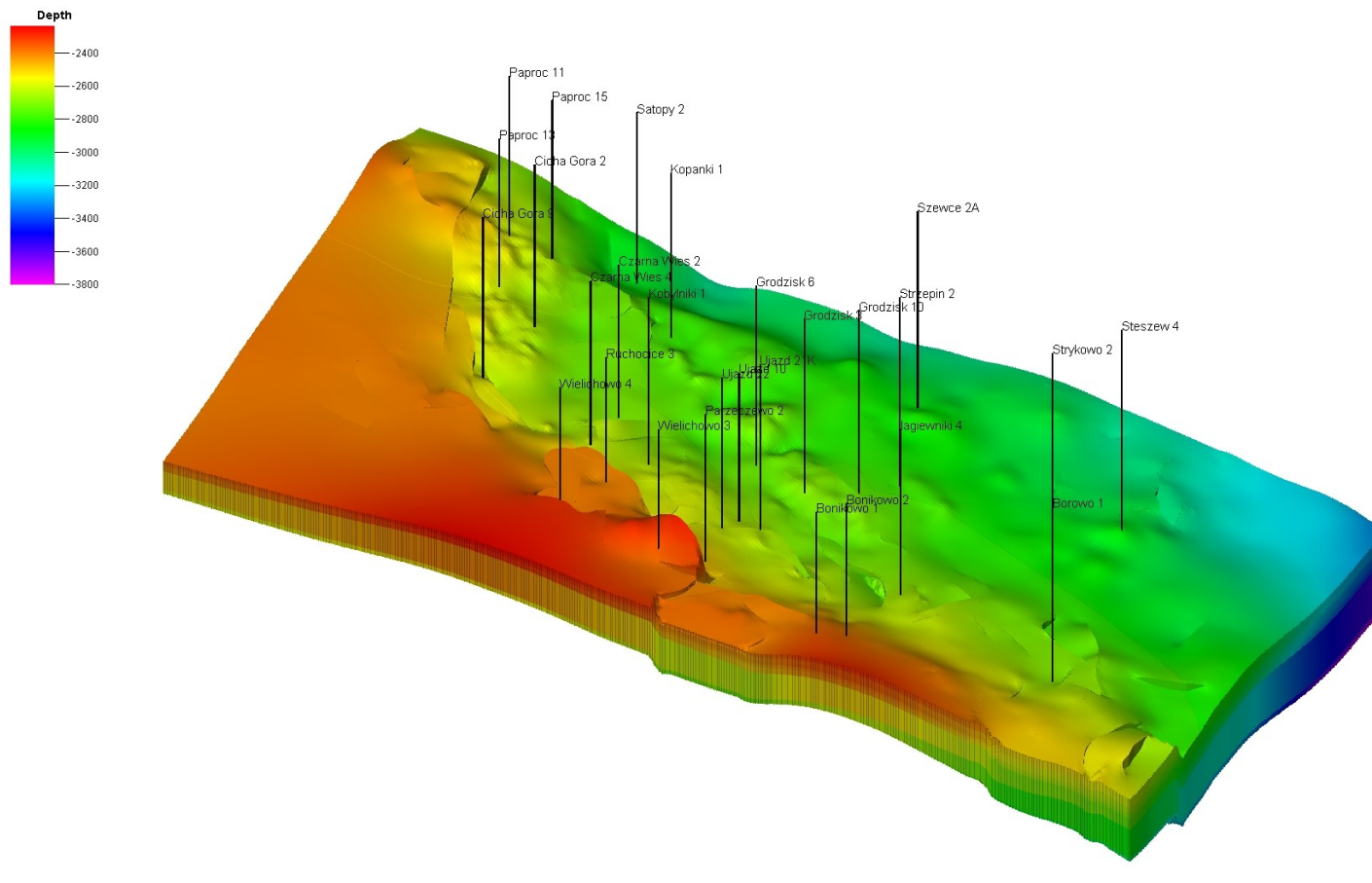
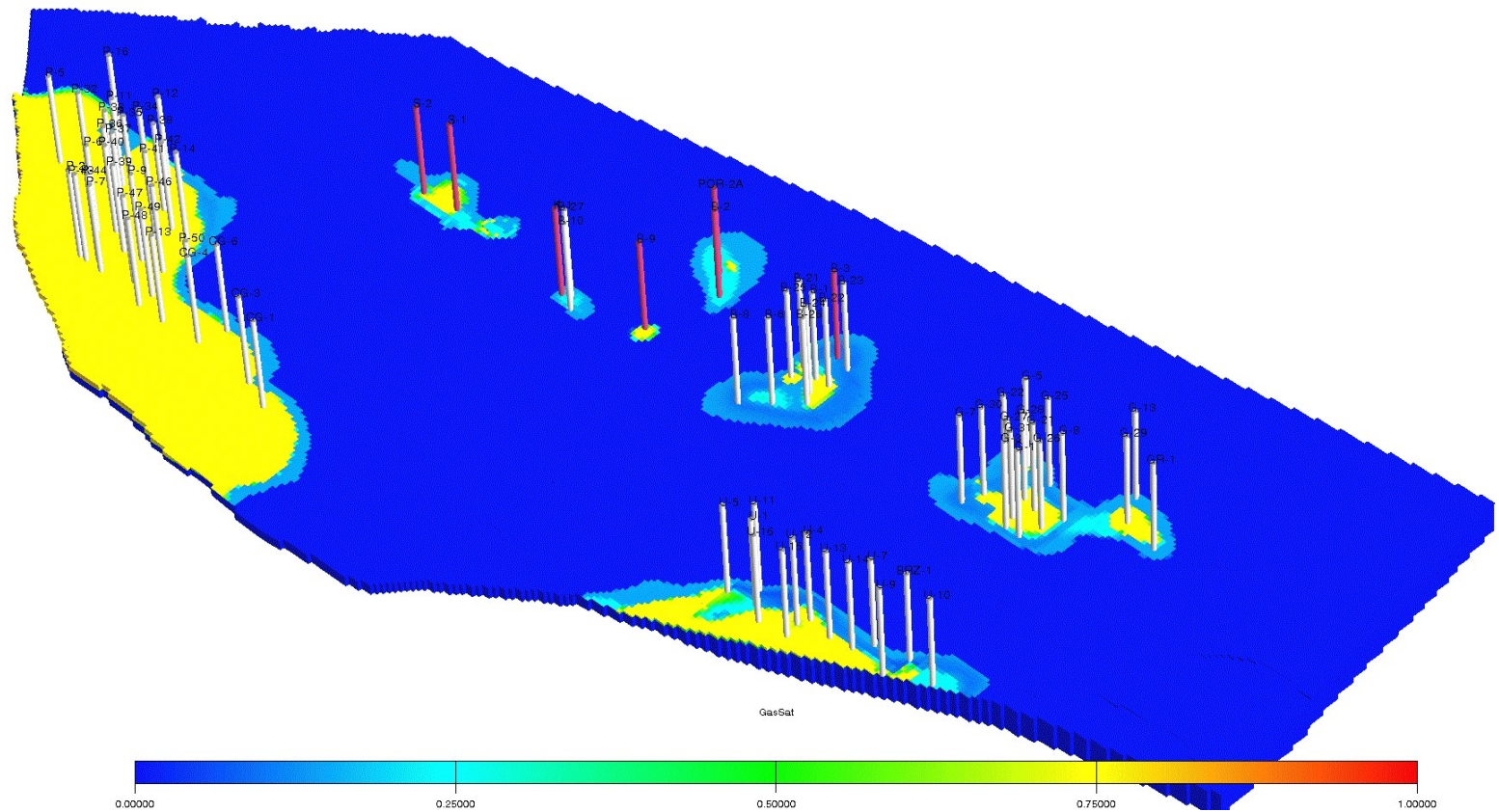


Fig. 4\_12 Przestrzenny widok bryły modelu obiektu niecka poznańska

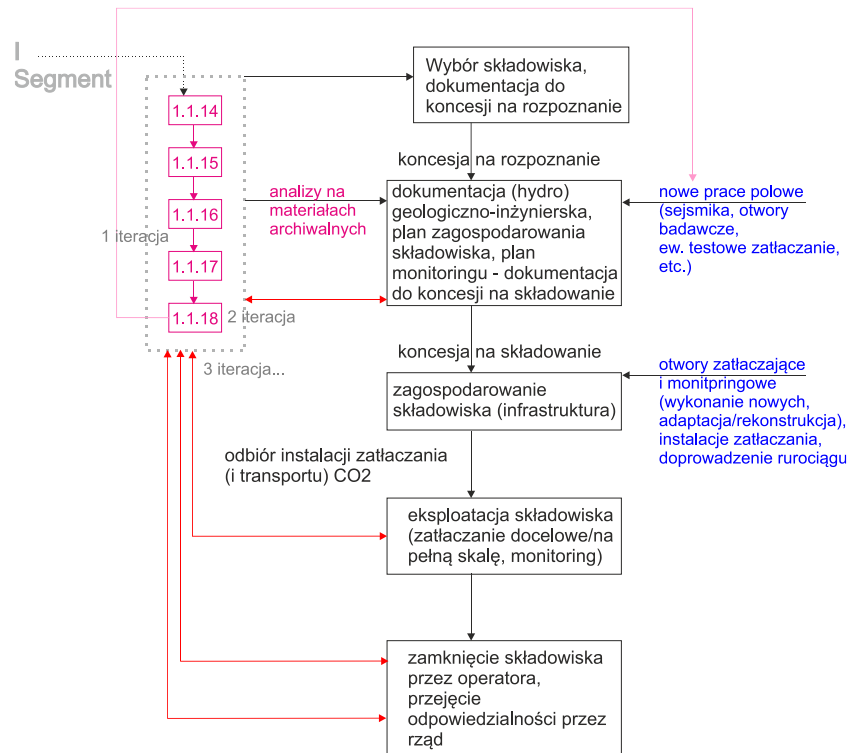


**Fig. 4\_13** Struktura niecki poznańskiej - rozmieszczenie odwiertów w obrębie lokalnych podniesień strukturalnych (czerwone – zatłaczanie dla 2 wariantu)

## Podsumowanie dla struktur solankowych

### Struktura Budziszewice-Zaosie

Opracowanie dla struktury Budziszewice-Zaosie (położona około 60 km od elektrowni Bełchatów) stanowiło pierwszą w naszym kraju próbę kompleksowego scharakteryzowania potencjalnego składowiska dwutlenku węgla zgodnie z wymogami Dyrektywy unijnej w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla (2009/31/WE). Struktura ta była najlepiej rozpoznana otworami (6 otworów) i sejsmiką (3 profile z lat 1999-2000, 6 profili z lat 1970-tych nadających się do wykorzystania) spośród wszystkich rozpatrywanych w rejonie Bełchatowa, zanim wykonano nowe prace polowe w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów. Nie spełnia ona idealnie wszystkich podręcznikowych kryteriów przydatności na potencjalne składowisko dla projektu demonstracyjnego, ale tylko dla niej można było przeprowadzić w miarę wiarygodne analizy przewidziane w ramach II segmentu, w oparciu o dostępne materiały archiwalne.



**Fig. 4\_14** Relacja prac wykonanych w ramach II segmentu, np. dla struktury B-Z, do cyklu życia projektu demonstracyjnego CCS, w przypadku (hipotetycznym) wybrania struktury na składowisko.

Struktura Budziszewice posiada dwa kolektory o dobrych własnościach, przydatne do geologicznego składowania dwutlenku węgla w utworach jury dolnej (bezpieczny jest kolektor synemuru, ale jest on w szczytowej części struktury lokalnie połączony z płytszym kolektorem górnego pliensbachu; główne uszczelnienie stanowią utwory dolnego toarku)

oraz w mniejszym stopniu triasu dolnego. Dla scenariuszy zatłaczania uzyskano, zależnie od ilości oraz konfiguracji otworów zatłaczających i wykorzystanych kolektorów, pojemność dynamiczną, czyli praktyczną w granicach **50 - 120 mln ton**, a statyczną, efektywną dwukrotnie większą. Zatłaczanie do formacji synemuru (i lokalnie hettangu) byłoby bezpieczne i wykonalne, najlepiej w otworach położonych na skłonie struktury, pod warunkiem przeprowadzenia zaproponowanego programu monitoringu zerowego (stan początkowy struktury, przed zatłaczaniem), który dałby w rezultacie model struktury o stopniu szczegółowości wystarczającym na potrzeby projektu demonstracyjnego. Obok założeń projektu prac geologicznych na potrzeby monitoringu potencjalnego składowiska sporządzono także projekty robót geologicznych dla otworów do pilotażowego zatłaczania dwutlenku węgla.

W tym przypadku (jest to właściwie reguła dla struktur solankowych), dostępne dane geologiczno-geofizyczne (1 iteracja - **Fig. 4\_14**) byłyby niewystarczające do sporządzenia dokumentacji do koncesji na składowanie. Do tego celu niezbędne byłyby wyniki nowych prac polowych, wykonanych w ramach koncesji na rozpoznanie (2 iteracja - **Fig. 4\_14**, które objęłyby także monitoring zerowy - założenia opracowano w ramach II Segmentu) i dopiero odpowiedziałyby na pytanie, czy struktura faktycznie nadaje się do składowania założonych ilości CO<sub>2</sub>, natomiast zakres prac wykonanych w ramach II Segmentu pozwolił na określenie obszaru naszej niewiedzy.

### **Obiekt Skoczów-Czechowice**

Z przeprowadzonej oceny występujących w profilu geologicznym Górnośląskiego Zagłębia Węglowego kompleksów skał średnio- i gruboklastycznych wynika, że najkorzystniejszymi parametrami, pod kątem składowania CO<sub>2</sub>, charakteryzują się warstwy dębowieckie.

Biorąc pod uwagę parametry geologiczne (miąższość zbiornika i głębokość jego zalegania) i hydrogeologiczne, a także stan dotychczasowego rozpoznania geologicznego i hydrogeologicznego oraz położenie w stosunku do kopalń węgla kamiennego, można stwierdzić, że największe potencjalne możliwości daje obszar rozciągający się od Cieszyna i Skoczowa po Czechowice-Dziedzice (dalsze badania i ewentualna lokalizacja instalacji składowania możliwe byłyby w południowej i wschodniej części tego obszaru, na skłonach obiektu, który nie ma jednak charakteru antykliny, lecz zagłębienia), analizowany zaś również rejon Andrychów-Kęty koło Bielska-Białej jest mniej perspektywiczny.

Ten rejon występowania zbiornika warstw dębowieckich został poddany szczegółowej analizie w zakresie możliwości bezpiecznego składowania CO<sub>2</sub>. Obliczone statyczne, efektywne pojemności składowania CO<sub>2</sub> dla warstw dębowieckich w badanym rejonie zostały oszacowane na 40–60 Mt, natomiast dynamiczne, praktyczne, niestety tylko na **20-25 mln ton** CO<sub>2</sub>. Stąd składowisko może jedynie wystarczyć na potrzeby emitenta CO<sub>2</sub>

średniej wielkości z rejonu GZW, a nie nadaje się np. do składowania emisji z elektrowni zawodowych.

### **Struktura Choszczno-Suliszewo(-Radęcin-Pławno)**

Antykliny Choszczna i Suliszewa (-Radęcina-Pławna) są położone w południowo-zachodniej części niecki szczecińskiej w strefie granicznej z przyległym na południe blokiem Gorzowa. Właściwie jest to struktura Choszczno-Suliszewo-Radęcin-Pławno z czterema kulminacjami. Kolektorem są tu piaskowce dolnej jury o znakomitych własnościach zbiornikowych, a analizowany kompleks składowania obejmuje utwory od dolnego toarku (podstawowe uszczelnienie) poprzez pliensbach, synemur i hettang (kolektory).

Założono szereg wariantów zatłaczania CO<sub>2</sub>, obejmujących poszczególne kulminacje struktury, zarówno dla założonej ilości otworów i okresu funkcjonowania projektu CCS (25 lat – w sumie **100 mln ton** pojemności dynamicznej, przy założeniu stałej wydajności zatłaczania standardowo 1 mln ton CO<sub>2</sub>/rok/otwór), jak i dla zatłaczania do momentu całkowitego wypełnienia – otrzymano maksymalną pojemność dynamiczną **634 mln ton** – bliską pojemności statycznej, określającej całkowity potencjał składowania zbiornika.

Wykonane modelowania wskazują zatem na bardzo dobre i stabilne warunki dla węgłbnego magazynowania CO<sub>2</sub> w strukturze. Jej potencjał magazynowy wydaje się być ogromny, a ryzyko błędnej oceny pojemności zdaje się być nieznaczne. Do czynników stanowiących o ewentualnym ryzyku składowania CO<sub>2</sub> w tym rejonie należy zaliczyć przede wszystkim niską jakość oraz ilość danych definiujących parametry zbiornikowe i filtracyjne poziomów uszczelniających i zbiornikowych. Słabe jest też rozpoznanie tektoniki struktur, co uniemożliwia jednoznaczne wykluczenie możliwości migracji CO<sub>2</sub> z kompleksu składowania do jego nadkładu. W rozpatrywanym rejonie występuje 19 otworów wiertniczych, które mogą być drogą migracji zatłoczonego CO<sub>2</sub> i stąd istotne jest szczegółowe rozpoznanie ich stanu technicznego i sposobów likwidacji.

Problem stanowi (nie)dostępność kulminacji Pławno-Radęcin, gdzie występują obszary NATURA2000, a częściowo także Suliszewo gdzie obszary chronione sąsiadują z lokalizacją zatłaczania. Jedynie kulminacja Choszczno położona jest z dala od obszarów chronionych.

W przypadku podjęcia decyzji o składowaniu CO<sub>2</sub> w analizowanych strukturach antyklinalnych niezbędne będzie wykonanie zdjęcia sejsmiki 3D, które umożliwi bardzo szczegółowe odwzorowanie ich geometrii i wiarygodne rozpoznanie porowatości z wykorzystaniem inwersji sejsmicznej. Zastosowanie sejsmiki 4D umożliwiłoby monitorowanie bezpieczeństwa napełnianej struktury.

Struktura jest odpowiednia dla zaspokojenia potrzeb emitentów CO<sub>2</sub> z aglomeracji szczecińskiej i ewentualnie elektrowni Dolna Odra.

## Niecka poznańska

Obiekt zlokalizowany jest w północnej części monokliny przedsudeckiej w obrębie jednostki regionalnej – niecki poznańskiej, ograniczonej od S i SW wyniesieniem wolsztyńskim. Kolektor obejmuje piaszczyste utwory górnego czerwonego spągowca. Pomiaru nasycenia wód głębszych gazem ziemnym w kolektorze wykazały znaczną zawartość rozpuszczonego gazu. Migrujący poprzez fazę wodną gaz po wypełnieniu lokalnych niewielkich pułapek został zablokowany od góry szczelnym ekranem ewaporatów cechsztyńskich i zaczął rozprzestrzeniać się na boki megastruktury. Cały więc poziom czerwonego spągowca wypełniony jest wodą nasyconą gazem ziemnym, jedynie niewielkie podniesienia morfologiczne bądź jego wyklinowania w postaci pułapek litologicznych wypełnione są (lub były) gazem.

Wykonano symulacje zatłaczania do megastruktury niecki poznańskiej, przyjmując dwa warianty zatłaczania: 3 lub 7 otworów przez 50 lat, o wydajności około 73 tys. ton CO<sub>2</sub> rocznie każdy, co dało sumaryczną ilość zatłoczonego CO<sub>2</sub> w granicach **11 - 25 mln ton** (na potrzeby emitenta z Poznania średniej wielkości). Struktura posiada (statyczną) pojemność sekwestracyjną przewyższającą o rząd wielkości założone ilości zatłaczanego CO<sub>2</sub>. Na aktualnym etapie rozpoznania struktury, własności warstw wodonośnych nie gwarantują wystarczających chłonności dla zatłoczenia CO<sub>2</sub> poniżej limitu na maksymalne ciśnienie denne i wymagają przeprowadzenia intensywnych zabiegów stymulacyjnych. Stąd przyjęto stosunkowo niewielką wydajność zatłaczania w pojedynczym otworze, która nie stanowiłaby żadnego zagrożenia dla szczelności nadkładu. Ponadto istotna jest szczelność starych otworów, które licznie nawiercają rozpatrywany obszar, w aspekcie oddziaływania z fazą wolną CO<sub>2</sub> i dwutlenkiem węgla rozpuszczonym w solance.

Procesowi zatłaczania CO<sub>2</sub> do struktury towarzyszą zjawiska:

- konwekcja fazy CO<sub>2</sub> do wyżej położonych warstw struktury, równoczesnej z efektem rozpuszczania CO<sub>2</sub> w solance w stopniu ograniczającym jego migrację zarówno w kierunku pionowym (do stropu struktury), jak i kierunkach lateralnych mogących stanowić potencjalną drogę ucieczki CO<sub>2</sub> poza strukturę,
- wypieranie przez CO<sub>2</sub> metanu z solanki i jego migrację do stropu struktury zasilającą naturalne pułapki gazu ziemnego zlokalizowane na strukturze – proces ten zachodzi jednak w wolnym tempie, rzędu setek lat.

Mamy tu, więc do czynienia z formą wspomaganą wydobywania gazu, chociaż w bardzo rozległym horyzoncie czasowym.

## 4.2 Struktury naftowe

Jan Lubaś, Wiesław Szott, Halina Jędrzejowska-Tyczkowska, Stanisław Nagy, Bartosz Papiernik, Adam Wójcicki

### Złoże ropy Nosówka

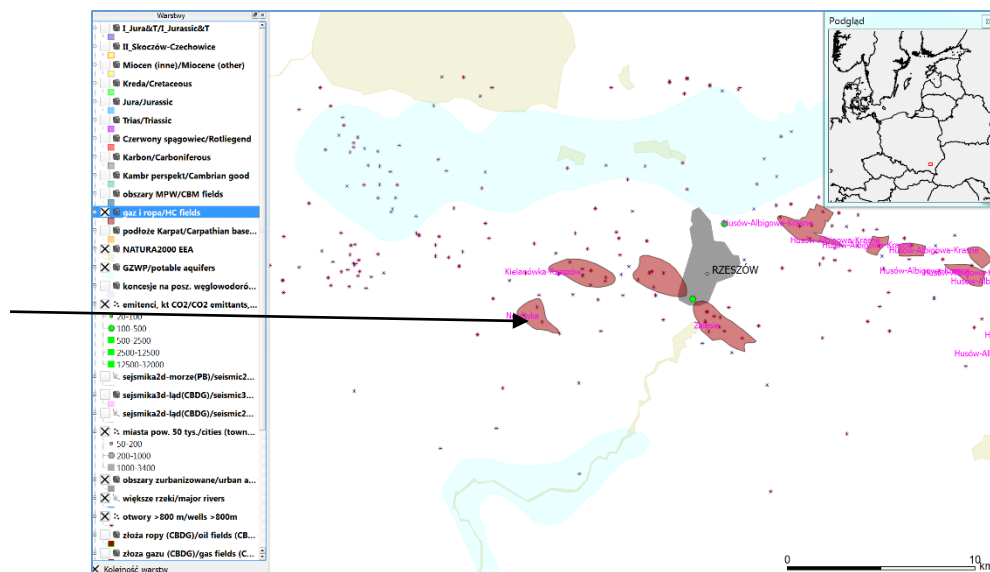


Fig. 4\_15 Złoże ropy naftowej Nosówka

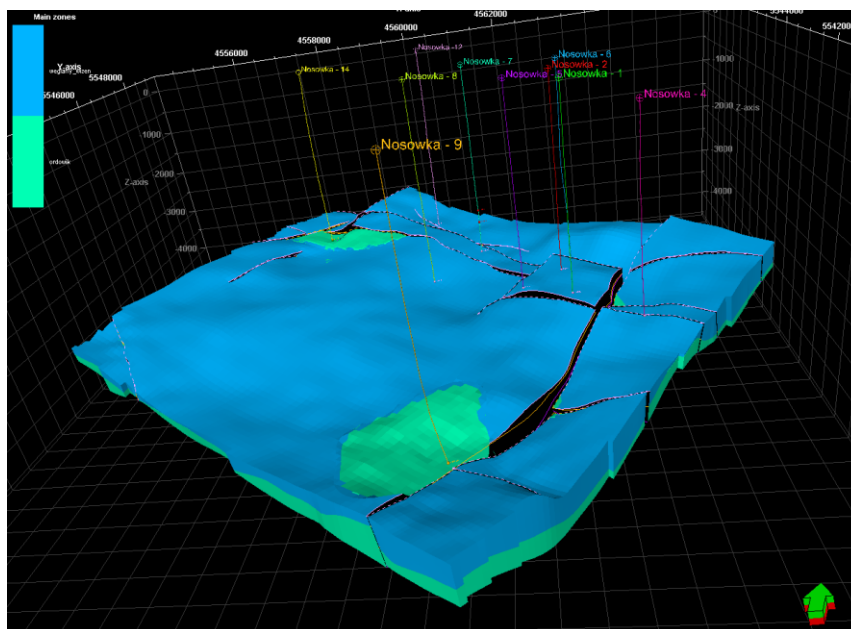


Fig. 4\_16 Model kolektorów wigniewu (niebieski) i utworów ordowiku (turkusowy)

Złoże ropy Nosówka położone jest na zachód od Rzeszowa (**Fig. 4\_15**), w brzeżnej strefie nasunięcia Karpat (w SW części zatoki rzeszowskiej) i występuje w utworach podłoża paleozoicznego (nad nim, w utworach miocenu, występuje ponadto złożę gazu).

Wykonano (INIG, podobnie jak pozostałe poniższe analizy) przestrzenny statyczny model roponośnych, węglanowych (wapienie i wapienie dolomityczne) utworów karbonu dolnego (wizen) obejmujący strukturalny model obiektu złożowego (program Petrel - **Fig. 4\_16**), zdefiniowany przez powierzchnie stropu utworów węglanowych i poniżej zalegających utworów ordowiku oraz powierzchnie uskoków, a także parametryczne modele zailenia, porowatości, przepuszczalności i nasycenia wodą złożową. Wykorzystano do tego celu wyniki archiwalnego zdjęcia 3D oraz informacje z 10 otworów położonych na obszarze badań. Wg informacji z otworów porowatość efektywna w obrębie struktury wynosi 3,4% (ale jest to kolektor porowo-szczelinowy) a przepuszczalność średnia 30 mD.

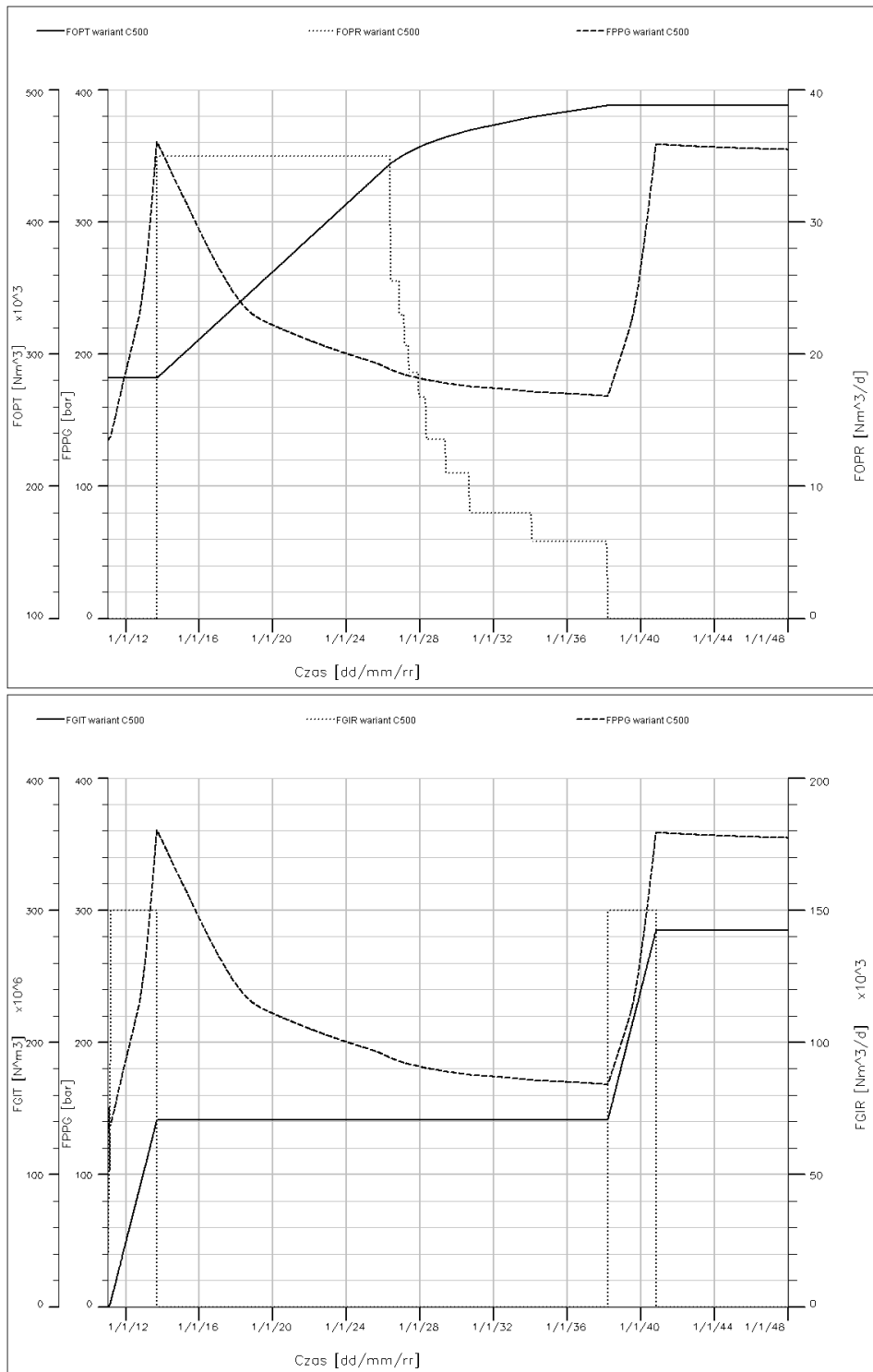
Model geologiczny (styczny) struktury uzupełniono o elementy niezbędne do przeprowadzenia wielowariantowych i długoczasowych symulacji eksploatacji złoża z równoczesną sekwestracją dwutlenku węgla tj., własności transportowe w układzie skała-płyny złożowe, termodynamiczne własności płynów złożowych i ich wzajemne oddziaływanie. Do wykonania modelowań wykorzystano programy Petrel i Eclipse 300 firmy GeoQuest Schlumberger. Przeanalizowano wpływ sposobu eksploatacji na możliwy do uzyskania stopień szczypania złoża oraz zdolność sekwestracyjną struktury dla dwóch wybranych wartości maksymalnego dopuszczalnego wykładnika gazowego.

Najbardziej obiecujące wyniki otrzymano dla wariantu zakładającego wydobycie ropy naftowej odwiertami Nosówka-1 i Nosówka-5 (we wszystkich wariantach przedmiotem analiz był blok centralny, pozostałe partie złoża są dotychczas nieeksploatowane), poprzedzone wstępną sekwestracją CO<sub>2</sub>, poprzez zatłaczanie odwiertem Nosówka-2, przy czym eksploatacja rozpoczyna się w chwili osiągnięcia przez średnie ciśnienie złożowe pierwotnej wartości (**Fig. 4\_17**). W wariantcie tym uzyskano stopień szczypania złoża około 64%, co oznacza zysk na poziomie około 130 tys. Nm<sup>3</sup> ropy naftowej w porównaniu z odpowiednim wariantem bazowym (przy zatłoczeniu około 0,55 mln ton CO<sub>2</sub>).

Przeprowadzona analiza ryzyka (Quintessa FEP) wykazała, że największe ryzyko składowania CO<sub>2</sub> w strukturze związane jest z wystąpieniem erupcji w odwiercie zatłaczającym. Natomiast odwierty mogą stanowić ryzyko w dłuższej skali czasu po zakończeniu zatłaczania CO<sub>2</sub>, chociaż badania wykazały że zaczyny cementowe używane do cementowania rur okładzinowych w otworach na złożu są odporne na korozję węglanową. Ewentualna migracja ponad nadkład złoża nie stanowi zagrożenia.

Do monitorowania procesu zatłaczania CO<sub>2</sub> zaproponowano sejsmikę 4D/3C, poprzedzoną opracowaniem stosownego studium wykonalności (dla planu monitoringu).





**Fig 4\_17** Wariant optymalny zatłaczania do złoża Nosówka; góra - sumaryczne wydobycie ropy (FOPT), wydajność wydobywania ropy (FOPR), średnie ciśnienie (FPPG); dół - zatłaczanie sumaryczne  $\text{CO}_2$  (FGIT), wydajność zatłaczania  $\text{CO}_2$  (FGIR), średnie ciśnienie (FPPG).

## Złoże gazu Wilków

Złoże Wilków(-Szlichtyngowa) położone jest na obszarze monokliny przedsudeckiej, niedaleko Głogowa (Fig. 4\_18) i występuje w piaskowcach czerwonego spągowca (P1).

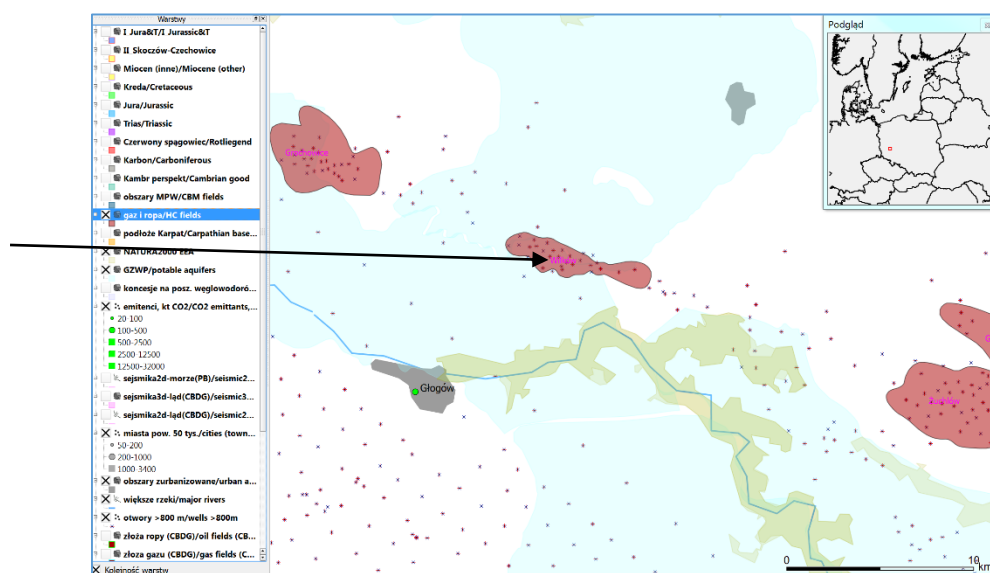


Fig. 4\_18 Złoże gazu ziemnego Wilków

Dla obszaru złoża dostępne były informacje z 34 otworów oraz archiwalne dane sejsmiczne (mapy strukturalne stropu P1). Średnia porowatość efektywna serii złożowej wynosi 13% wg karotażu (około 15% wg badań laboratoryjnych), zailenie 20-30%, przepuszczalność rzędu zaś - kilkudziesięciu mD (średnio 67 mD wg badań laboratoryjnych). Informacje te posłużyły do konstrukcji modelu statycznego (AGH) (Fig. 4\_19), który był podstawą do sporządzenia modelu symulacyjnego.

Model symulacyjny (AGH) skalibrowano w oparciu o dostępne informacje na temat historii eksploatacji złoża (dane PGNiG, baza MIDAS – Fig. 4\_20). Do zatłaczania CO<sub>2</sub> wybrano 5 odwiertów i przyjęto docelową wydajność zatłaczania na poziomie 1.8 Mt CO<sub>2</sub>/rok, przy czym wydajność poszczególnych odwiertów była sterowana „automatycznie” na podstawie ich potencjału (odnotowanej wcześniej produkcji gazu).

Jeśli za dopuszczalne maksymalne ciśnienie złożowe na koniec zatłaczania przyjmą ciśnienie początkowe, to sumaryczna ilość zatłoczonego CO<sub>2</sub> wynosi ok. 10,0 Mt (po 5,6 roku zatłaczania), jeśli dopuścimy przewyższenie ciśnienia końcowego o 10% względem początkowego, to pojemność struktury wzrasta do 11,3 Mt (Fig. 4\_21). Natomiast sumaryczne wydobycie gazu jest minimalnie mniejsze niż w przypadku wariantu bez zatłaczania dla tego samego czasu (bo wyłączono niektóre otwory produkcyjne).

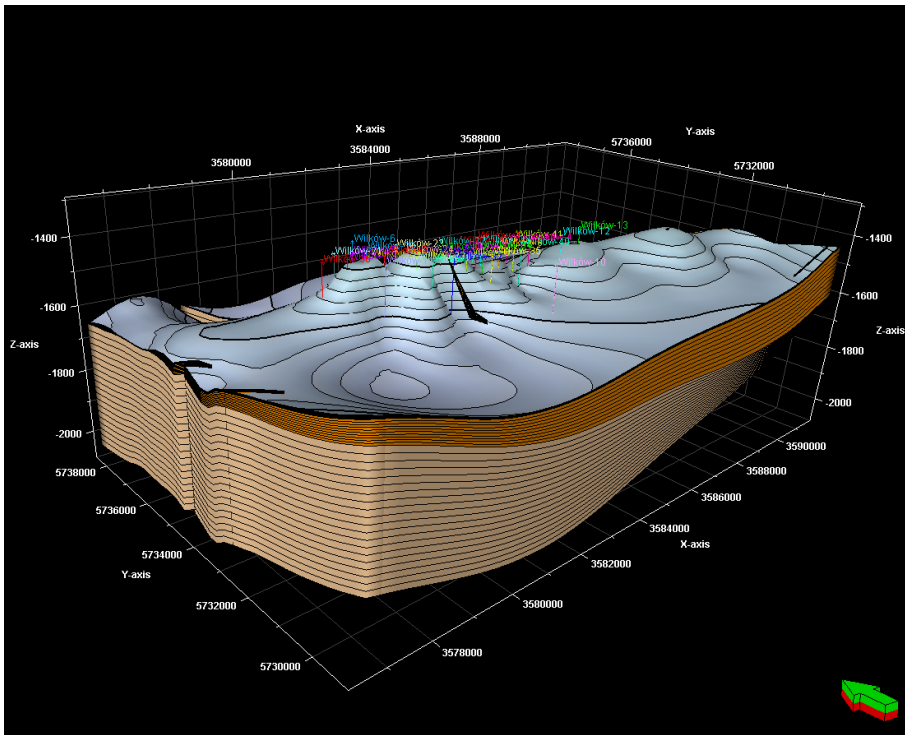


Fig. 4\_19 Model złoża Wilków w utworach czerwonego spągowca

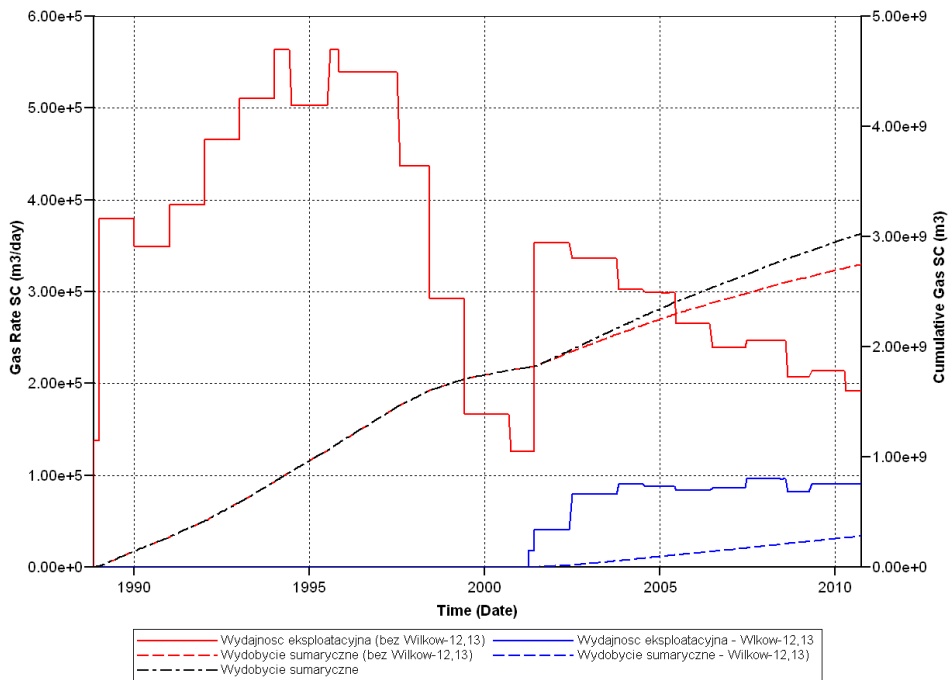
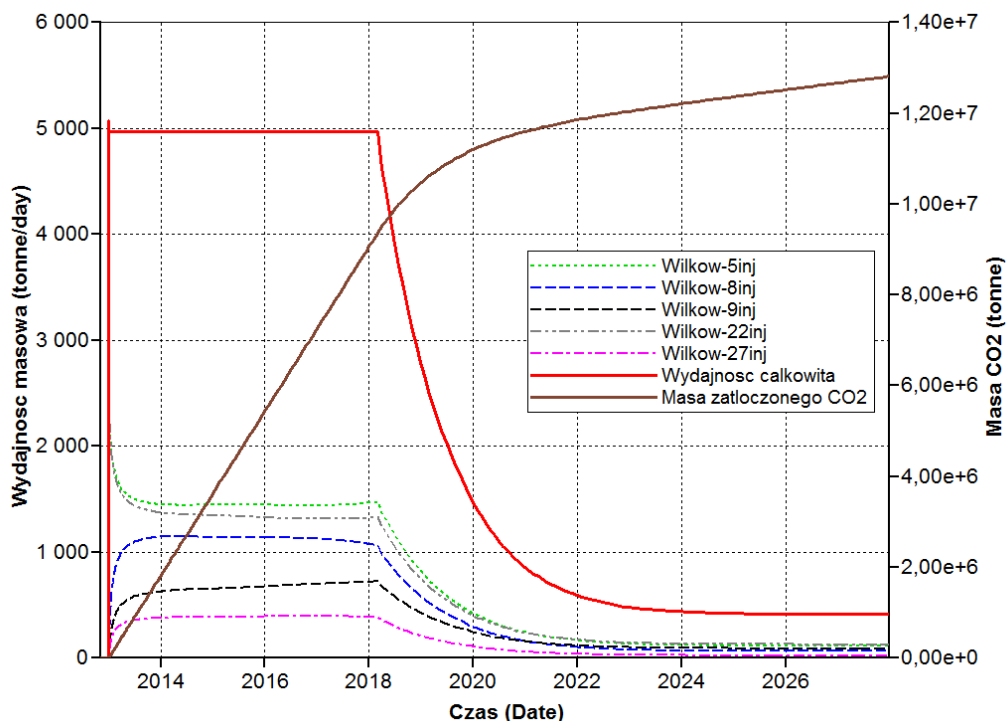


Fig. 4\_20 Historia eksploatacji złoża Wilków



**Fig. 4\_21** Wydajność poszczególnych odwiertów zatłaczających na złożu Wilków, całkowita wydajność zatłaczania oraz całkowita masa zatłoczonego CO<sub>2</sub>.

Ryzyka związane ze składowaniem CO<sub>2</sub> w przypadku struktury Wilków odnoszą się głównie do niepewności modelu złożowego, związanej z niedostateczną ilością danych nt. parametrów zbiornikowych (np. przepuszczalności), słabej jakości sejsmiki oraz niepełnych danych eksploatacyjnych.

Opracowano założenia dla wykonania otworu do testowego zatłaczania CO<sub>2</sub> na obszarze złoża (PIG-PIB i AGH), a także dla monitoringu środowiskowego (IGSMiE PAN) oraz grawimetrycznego, elektrooporowego i elektromagnetycznego (PBG) dla obszaru obejmującego wytypowane lokalizacje (5) otworów zatłaczających.

### Złoże gazu i kondensatu łąkta (wraz z podścielającym poziomem solankowym)

Złoże łąkta leży w brzeżnej strefie nasunięcia Karpat, w utworach podłoża mezozoicznego, w odległości około 40 km na SE od Krakowa (**Fig. 4\_22**).

Model symulacyjny omawianej struktury (**Fig. 4\_23**), wykonany, podobnie jak dalsze analizy, przez INiG, obejmuje horyzont zbiornikowy w utworach dolomitycznych i wapiennych malmu oraz piaskowcowych cenomanu. W modelu uwzględniono warstwy podścielające horyzont zbiornikowy celem poprawnego uwzględnienia napływu wody podścielającej złoże gazu, jak również strefy wód okalających złoże. Opracowano prognozy sekwestracji CO<sub>2</sub> dla czterech scenariuszy różniących się systemem odwiertów zatłaczających oraz kryteriami limitującymi proces sekwestracji. We wszystkich przypadkach symulowano również zachowanie się płynów złożowych w okresie relaksacji, tj. 1000 lat po zakończeniu zatłaczania. Przeanalizowano wpływ zatłaczania CO<sub>2</sub> do struktury na wielkość wydobycia gazu, jednakże celem modelowań była maksymalizacja pojemności sekwestracyjnej rozpatrywanego obiektu. W pracy wykorzystano programy do modelowania i symulacji Petrel i Eclipse 300 firmy GeoQuest Schlumberger.

Wyniki symulacji zatłaczania sugerują, że struktura posiada ograniczoną pojemność sekwestracyjną (4-8 mln ton CO<sub>2</sub>, zależnie od wariantu) z powodu dużej aktywności wód złożowych objawiających się wysokim ciśnieniem złożowym pomimo stosunkowo wysokiego szcerpania jej zasobów gazu ziemnego. Maksymalizacja pojemności sekwestracyjnej wymaga zastosowania strategii jednoczesnego zatłaczania CO<sub>2</sub> i wydobycia gazu ziemnego pozostałego w złożu (dzięki temu uzyskamy dodatkowe wydobycie około 0,4 mld Nm<sup>3</sup> gazu). Natomiast wykorzystanie istniejącego systemu odwiertów do realizacji powyższej strategii wymaga rekonstrukcji odwiertów wydobywczych położonych w szczycie struktury i przystosowania peryferyjnych odwiertów zawadzionych do zatłaczania CO<sub>2</sub>.

Jeśli chodzi o ryzyka związane z zatłaczaniem CO<sub>2</sub> do struktury, to istotna jest jedynie szczelność istniejących odwiertów, których cementowanie wykonano zaczynami tworzącymi kamień cementowy nie odporny na działanie CO<sub>2</sub>. Stąd należałoby podjąć odpowiednie prace rekonstrukcyjne podwyższające wytrzymałość zastosowanych korków cementowych.

Na potrzeby zaprojektowania monitoringu w trakcie zatłaczania i zerowego, wykonano analizy pola prędkości i inwersję sejsmiczną, celem otrzymania bardziej szczegółowego i wiarygodnego modelu struktury (problemem jest, co prawda w mniejszym stopniu niż przy strukturach solankowych, zróżnicowana i często słaba jakość sejsmiki oraz informacji z otworów).

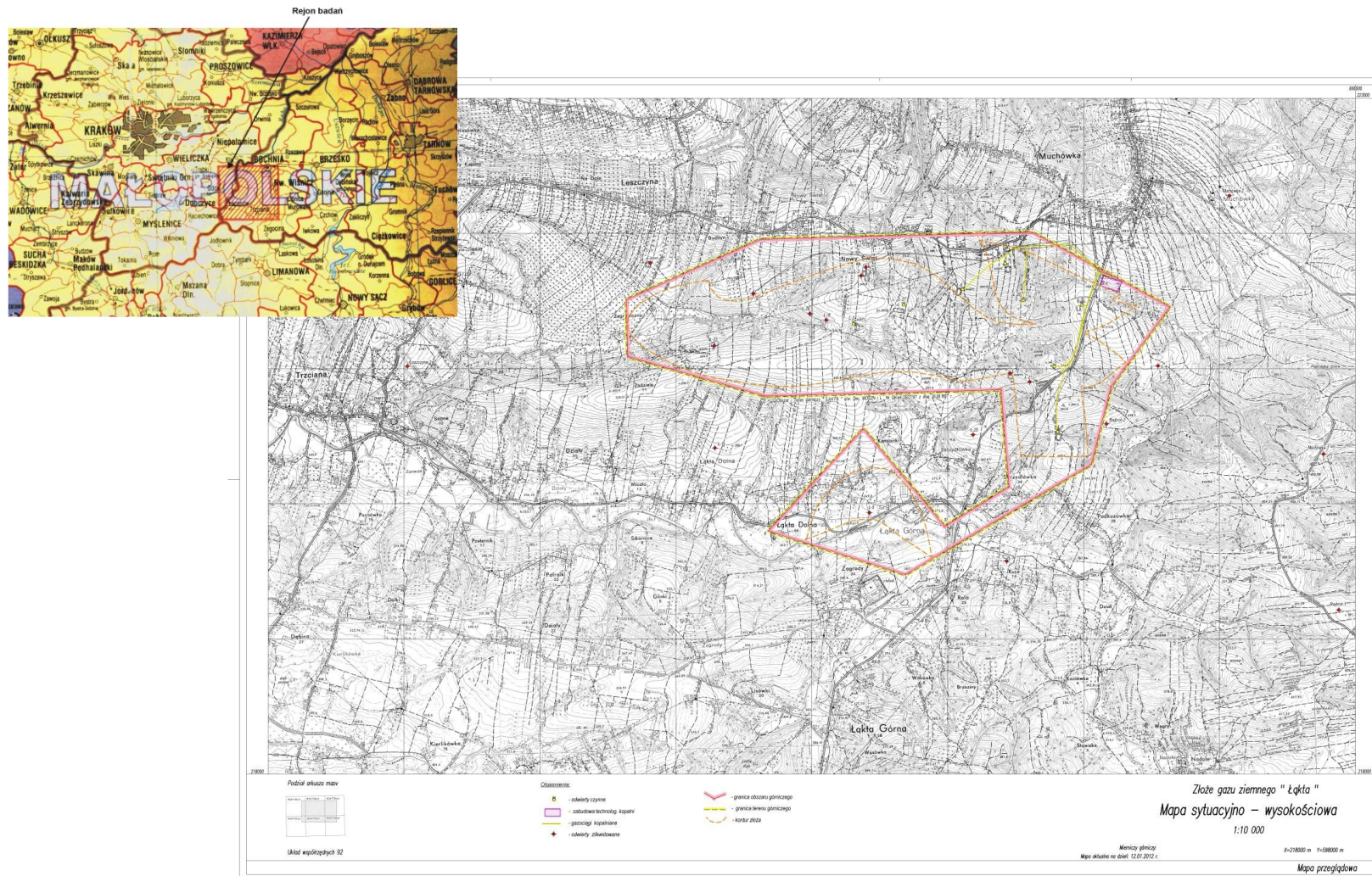
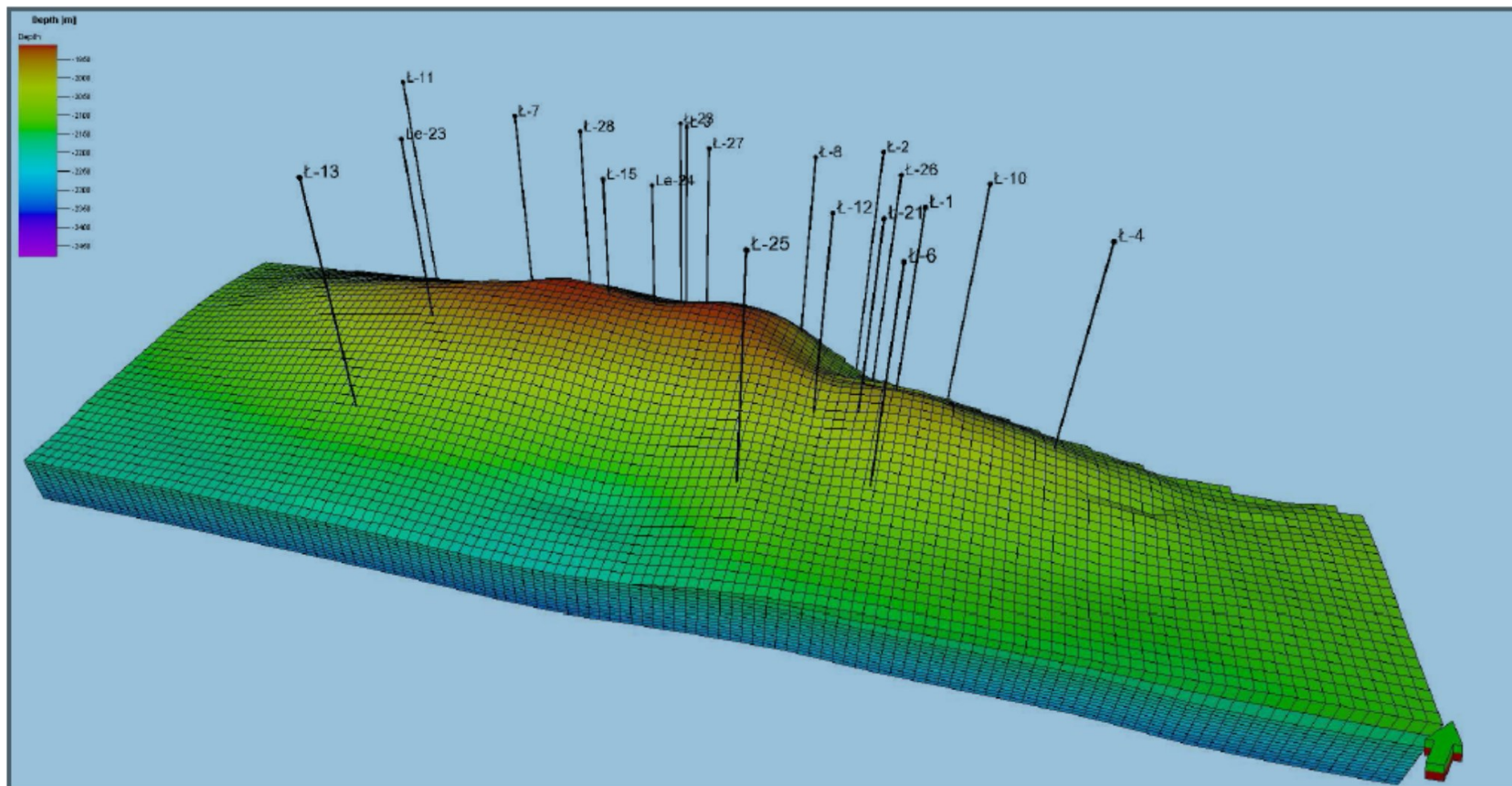


Fig. 4\_22 Lokalizacja rozpatrywanego obiektu - złoża gazu i kondensatu Łątko (wraz z podścielającym poziomem solankowym)



**Fig. 4\_23** Widok przestrzenny modelu symulacyjnego struktury złoza łąka.

## Podsumowanie dla struktur naftowych

### Złoże ropy Nosówka

Złoże ropy naftowej Nosówka położone jest w brzeżnej strefie Karpat fliszowych, w południowo - zachodniej części tzw. zatoki rzeszowskiej. Akumulacja ropy naftowej związana jest skałami węglanowymi, reprezentowanymi przez wapień i wapień dolomityczne wżenu (karbon dolny).

Skonstruowano dynamiczny model symulacyjny złoża Nosówka w utworach wżenu w celu zweryfikowania możliwości składowania CO<sub>2</sub> przy równoczesnej dalszej eksploatacji złoża i wykonano kilka wariantów zatłaczania. Najbardziej obiecujące wyniki otrzymano dla wariantu zakładającego wydobycie ropy naftowej dwoma odwiertami, poprzedzone wstępną sekwestracją CO<sub>2</sub>, poprzez zatłaczanie jednym (trzecim) odwiertem, przy czym eksploatacja rozpoczyna się w chwili osiągnięcia przez średnie ciśnienie złożowe pierwotnej wartości (a po zakończeniu wydobycia ropy ponownie dotłaczanie CO<sub>2</sub> do momentu osiągnięcia przez średnie ciśnienie złożowe pierwotnej wartości). W wariacie tym uzyskano stopień sczerpania złoża na poziomie około 64%, co oznacza zysk na poziomie około 130 tys. Nm<sup>3</sup> ropy naftowej w rezultacie wstępnej sekwestracji CO<sub>2</sub>, w porównaniu z odpowiednim wariantem bazowym. W takim przypadku przewidziano zatłoczenie około 0,55 mln ton CO<sub>2</sub> (wstępna sekwestracja CO<sub>2</sub> przed produkcją ropy i dotłaczanie CO<sub>2</sub> po jej zakończeniu – obydwie fazy po około 2,5 roku). Potrzebny CO<sub>2</sub> (w ilości 100 tys. ton/rok) mógłby pochodzić od niedużego emitenta z Rzeszowa lub Tarnowa (Zakłady Azotowe). Taki projekt CCS, ze wspomaganie wydobycia ropy, ma szansę realizacji w najbliższej przyszłości i mógłby być nawet opłacalny ekonomicznie (vide projekt Weyburn w Kanadzie/USA).

### Złoże gazu Wilków

Złoże gazu ziemnego Wilków jest złożem związanym z przystropową partią piaszczystych utworów czerwonego spągowca. Zlokalizowane jest na monoklinie przedsudeckiej w obrębie jednostki regionalnej – depresji zielonogórskiej ograniczonej od północy wyniesieniem wolsztyńskim, a od południa blokiem przedsudeckim.

Wyniki symulacji pokazują, iż przy zatłaczaniu z zadaną wydajnością CO<sub>2</sub> bardzo szybko wypełnia strukturę, a wzrost jego udziału w produkowanym gazie (a co za tym idzie, spadek zawartości węglowodorów) powoduje szybkie wyłączenie kolejnych odwiertów. Całkowita ilość zatłoczonego CO<sub>2</sub> (pojemność struktury) zależy od przyjętego dopuszczalnego maksymalnego ciśnienia złożowego na koniec zatłaczania oraz założonej ilości otworów zatłaczających (5 otworów). Jeżeli za ciśnienie dopuszczalne przyjmujemy ciśnienie początkowe, sumaryczna ilość zatłoczonego dwutlenku węgla wynosi ok. **10,0 Mt** (stan osiągnięty po 5 latach i 7 miesiącach zatłaczania). Jeżeli dopuścimy przewyższenie ciśnienia



końcowego o ok. 10% względem początkowego, pojemność struktury wzrasta do **11,3 Mt**. Jest to pojemność dynamiczna, praktyczna, natomiast pojemność statyczna, efektywna, obrazująca całkowity potencjał struktury, jest nieco większa. Nie uzyskano przy tym istotnego wspomaganie wydobycia gazu, stąd złożo Wilków nadaje się jedynie na składowisko CO<sub>2</sub> dla któregoś z niedużych emitentów z Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (najbliżej jest elektrociepłownia w Głogowie).

### **Złożo gazu i kondensatu Łąka wraz z podścielającym poziomem solankowym**

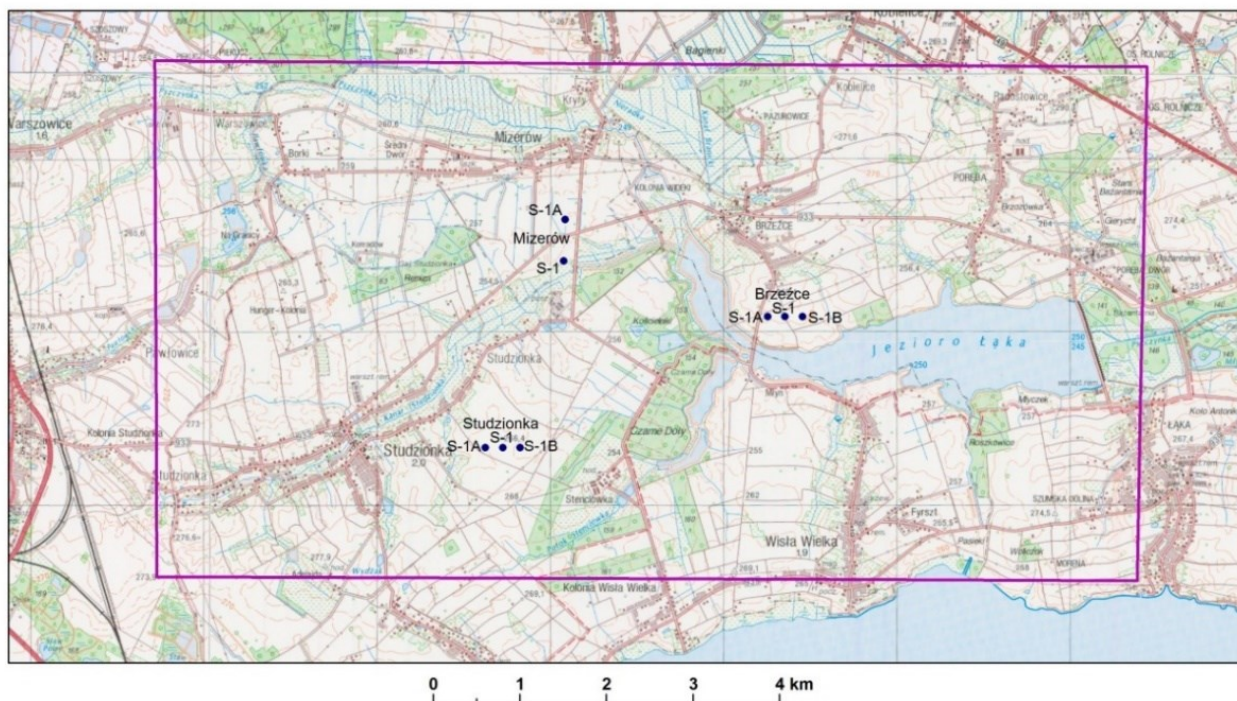
Złożo gazu i kondensatu Łąka położone jest w brzeżnej strefie Karpat fliszowych. Akumulacja ropy naftowej związana jest skałami węglanowymi, reprezentowanymi przez kawernisto-szczelinowate wapienie górnej jury oraz piaskowcami cenomanu.

Symulacje zatłaczania CO<sub>2</sub> wskazują że struktura posiada ograniczoną pojemność sekwestracijną z powodu dużej aktywności wód złożowych objawiających się wysokim ciśnieniem złożowym, pomimo stosunkowo wysokiego szczytowania jej zasobów gazu ziemnego. Maksymalizacja pojemności sekwestracyjnej wymaga zastosowania strategii jednoczesnego zatłaczania CO<sub>2</sub> i wydobycia gazu ziemnego pozostałego w złożu. Wykorzystanie istniejącego systemu odwiertów do realizacji powyższej strategii wymaga rekonstrukcji odwiertów wydobywczych położonych w szczycie struktury i przystosowania peryferyjnych odwiertów zawodnionych do zatłaczania CO<sub>2</sub>. Zależnie od ilości odwiertów zatłaczających (4 - 9) zmagazynowano w strukturze od około **4 do 8 mln ton CO<sub>2</sub>** (pojemność dynamiczna – wyższa wartość stanowi około 80% pojemności statycznej samego złoża) w ciągu dwudziestu kilku lat. Pozwoliłoby to na dodatkowe wydobycie około 0,4 mld m<sup>3</sup> gazu. Realizacja takiego projektu CCS wymagałaby dostarczenia kilkuset tysięcy ton CO<sub>2</sub> od emitenta średniej wielkości z Krakowa lub Tarnowa.

### 4.3 Obiekt w pokładach węgla

(Janusz Jureczka, Jarosław Chećko, Iwona Jelonek, Adam Wójcicki)

#### Obiekt Pawłowice-Mizerów



#### Objaśnienia

- projektowany otwór

Fig. 4\_24 Lokalizacja wytypowanego rejonu w pokładach węgla i otworów zatańczających.

W ramach I Segmentu wytypowano obszar potencjalnego składowiska w pokładach węgla kamiennego, z możliwością wspomaganą wydobycia metanu, Pawłowice-Mizerów (ściśły obszar składowiska: Studzionka-Mizerów – **Fig. 4\_24**), przy czym jako kolektory wybrano pokłady 405 i 510, o miąższości kilku metrów każdy, występujące na głębokości 1-2 km.

Obszar badań pokryty jest stosunkowo gęsto otworami nawiercającymi karbon (132 w rejonie Pawłowice-Mizerów i jego sąsiedztwie). Wg danych archiwalnych przepuszczalność węgla w tym rejonie GZW wynosi ok. 1 mD, a porowatości - 3%. Natomiast nowe pomiary przepuszczalności dla wytypowanych pokładów dały przepuszczalność węgla ok. 2-3 mD (poziome i pionowe). Zawartość metanu w pokładach węgla to 2,5-10 m<sup>3</sup>/t c.s.w.; średnio około 5 m<sup>3</sup>/t (złóże MPW o wystarczających lub dobrych parametrach), węgle zaś charakteryzują się wysoką zawartością wityryny (70-90%). Przypuszczalnie solanki występujące w obrębie skał klastycznych górnośląskiej serii piaskowcowej i serii mułowcowej, gdzie znajdują się rozpatrywane pokłady węgla, to wody reliktowe.

Skonstruowano model statyczny (geologiczny) karbonu produktywnego (GIG – **Fig. 4\_25**) w oparciu o informacje z 34 otworów, obejmujący pokłady węgla i skały płone (klastyczne). Górny pokład (405) przykryty jest nieprzepuszczalnym kompleksem iłowcowo-mułowcowym.

Skonstruowany model statyczny był podstawą do badań symulacyjnych (GIG – program ECLIPSE z opcją ECBM), dla wytypowanych lokalizacji otworów w obrębie bloków o najlepszych własnościach zbiornikowych (**Fig. 4\_24**). Przyjęto wariant pilotażowego zatłaczania (podobnie jak w projekcie RECOPOL; Jura et al., 2007) do otworów pionowych w lokalizacjach/wariantach Brzeźce i Mizerów - zatłaczanie przez 1 rok kilkuset ton CO<sub>2</sub>, przy sumarycznej produkcji metanu około 50 tys. m<sup>3</sup>, a także przemysłowego zatłaczania (w małej skali, przez okres 1-5 lat) z zastosowaniem otworów poziomych, w lokalizacji Mizerów. W ostatnim przypadku zatłoczenie 35 - 203 tys. ton CO<sub>2</sub>, dało sumaryczną produkcję 36 - 62 mln m<sup>3</sup> metanu, czyli około 500 m<sup>3</sup> metanu na 1 tonę zatłoczonego CO<sub>2</sub> co daje nadzieję na opłacalne ekonomicznie zastosowanie CO<sub>2</sub>-ECBMR w przyszłości.

Opracowano założenia konstrukcji otworów iniekcyjnych i produkcyjnych dla obu wariantów (PIG-PIB i AGH), a także dla monitoringu środowiskowego (IGSMiE PAN), sejsmologicznego, tomografii pasywnej (GIG) i grawimetrycznego (PBG) dla wytypowanych lokalizacji otworów.

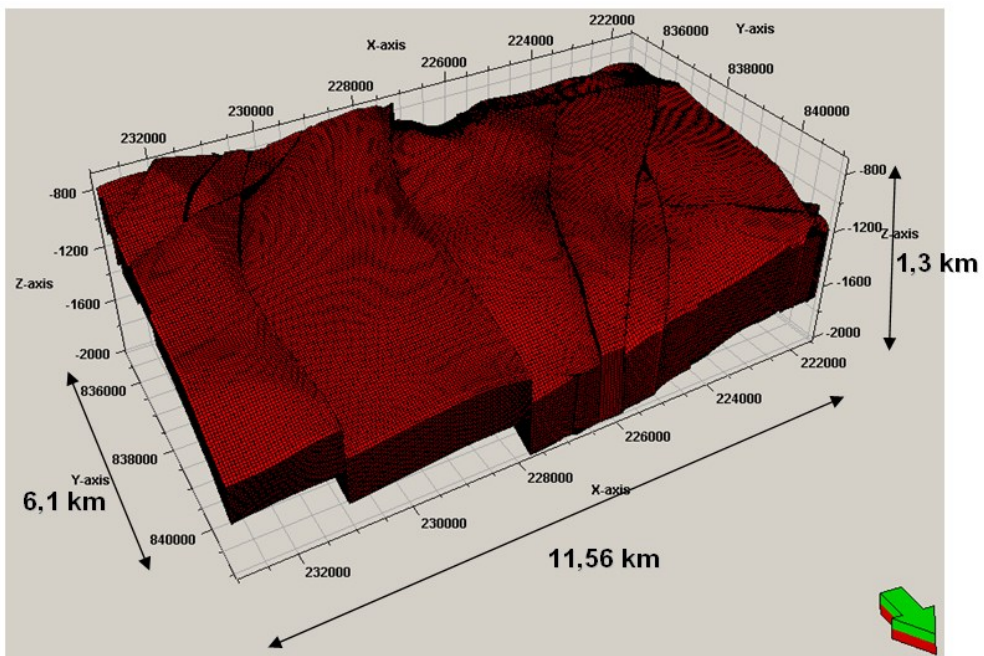


Fig. 4\_25 Struktura modelu numerycznego pokładów węgla.

### Podsumowanie dla pokładów węgla

Badania związane ze składowaniem CO<sub>2</sub> w głęboko zalegających, nieeksploatowanych pokładach węgla w połączeniu z odzyskiem metanu z tych pokładów (technologia ECBM) na obecnym etapie są nadal w fazie rozpoznawczej, nie tylko w skali Polski, ale i świata.

Z przeprowadzonej analizy regionalnej, wynika, że korzystne warunki dla lokalizacji składowisk występują głównie w centralno-południowej części GZW, w pokładach węgla górnośląskiej serii piaskowcowej oraz serii mułowcowej. Wstępne oszacowanie pojemności składowania CO<sub>2</sub> wykonano dla wytypowanego tam rejonu badawczego Pawłowice-Mizerów, dla którego opracowano szczegółowy, statyczny model strukturalno-parametryczny pokładów węgla górnośląskiej serii piaskowcowej. Obliczone (statyczne, efektywne) pojemności składowania dla tych pokładów oszacowane zostały na **8,3 Mt**. Tego rzędu pojemność składowania w przypadku połączenia z eksploatacją metanu może być wykorzystana przez lokalne mniejsze zakłady przemysłowe. Wykonano scenariusze zatłaczania CO<sub>2</sub> do pokładów węgla z odzyskiem metanu, z których najbardziej obiecujący objął zatłaczanie do 200 tys. ton CO<sub>2</sub> z wykorzystaniem otworu poziomego, co dało produkcję około 60 mln m<sup>3</sup> metanu. Nie oznacza to, że dynamiczna pojemność składowania w rejonie badawczym Pawłowice-Mizerów wynosi jedynie 200 tys. ton, lecz że do wykorzystania potencjału pokładów węgla potrzebne byłoby odwiercenie parudziesięciu otworów iniekcyjnych (poziomych).

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

(Adam Wójcicki)

Wyniki prac zarówno I jak i II Segmentu będą przydatne na potrzeby przyszłych decyzji koncesyjnych Ministerstwa Środowiska na rozpoznawanie potencjalnych składowisk oraz dla podmiotów ubiegających się o pozwolenie na budowę nowych bloków „CCS ready”, gdzie wymagane jest wskazanie miejsc składowania (dla których dany podmiot w przyszłości ubiegałby się o koncesje na rozpoznanie potencjalnych składowisk) i wstępne studia wykonalności.

Ponieważ nie mamy już (bądź jeszcze) w Polsce projektów demonstracyjnych CCS, wyniki prac niniejszego przedsięwzięcia będą w najbliższym czasie przydatne do studiów CCS-ready, jakich wymaga Dyrektywa w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla (wstępne studia wykonalności dla wychwytu, transportu i składowania CO<sub>2</sub> – w ostatnim przypadku podaje się co najmniej dwa równoważne, wstępne scenariusze składowania oraz harmonogram rzeczowo-finansowy prac potrzebnych do dalszego rozpoznania i zagospodarowania potencjalnych składowisk) od firm starających się o pozwolenia na budowę nowych bloków energetycznych.

Jeśli chodzi o odpowiedź na pytanie czy geologiczne składowanie CO<sub>2</sub> jest możliwe i bezpieczne do realizacji na obszarze Polski na skalę demonstracyjną lub przemysłową, to nie jesteśmy w stanie jednoznacznie odpowiedzieć na to pytanie na obecnym stanie wiedzy w przypadku struktur solankowych<sup>6</sup> (sprawa szcerpanych złóż węglowodorów nie budzi raczej wątpliwości, pokłady zaś węgla mają znaczenie marginalne).

W ramach niniejszego przedsięwzięcia wskazano i wstępnie scharakteryzowano formacje i struktury gdzie składowanie CO<sub>2</sub> byłoby możliwe, pod warunkiem wykonania dalszych badań w ramach koncesji na rozpoznanie składowisk. Wyniki te stanowią podstawę dla

---

<sup>6</sup> Nie należy przez to rozumieć, że składowanie CO<sub>2</sub> w tychże strukturach i formacjach jest tak niebezpieczne, jak to podnoszą różni samozwańcy "eksperci" (nie tylko w Polsce), w tym nawet osoby z tytułem profesora, lub utrzymujący, że takowy posiadają, ale z dziedzin raczej odległych od geologii, wypowiadając się w sprawach wykraczających poza ich kompetencje (nie legitymując się przy tym żadnym poważnym dorobkiem naukowym z tej problematyki), bo np. przeczytały w streszczeniu broszury propagandowej Greenpeace (Rochon, 2008) czy w Wikipedii, że coś się stało na wulkanie w Afryce (katastrofalna erupcja limniczna w jeziorze Nyos w Kamerunie w 1986 r.). Greenpeace jest zwolennikiem jak najszybszej likwidacji energetyki opartej na paliwach kopalnych, a przynajmniej na węglu, a wspomniana broszura podaje CCS jako przeszkodę dla rozwoju energetyki odnawialnej (wydana została w 2008 r., kiedy Komisja Europejska uruchamiała program EEPR, z którego następnie finansowano projekty demonstracyjne CCS, lobby zaś OZE walczyło o subsydia, ponieważ skutek kryzysu i rozpoczynającej się rewolucji łupkowej, powodujących spadek cen energii produkowanej z paliw kopalnych, dalsze dotowanie energetyki odnawialnej zaczęło budzić wątpliwości).

sporządzenia projektów robót geologicznych na wykonanie prac na potrzeby szczegółowego rozpoznania potencjalnego składowiska i ewentualnie monitoringu stanu początkowego, w tym nowych otworów badawczych (ewentualnie otworów do testowego zatłaczania CO<sub>2</sub>), nowych prac sejsmicznych i innych prac geofizycznych.

W ramach prac regionalnych (I Segmentu) dokonano oszacowania potencjału składowania dwutlenku węgla dla rozpatrywanych formacji i struktur geologicznych. Szacunki te dotyczą pojemności statycznej, efektywnej.

Oszacowany (w dużym przybliżeniu) potencjał składowania dla poziomów solankowych wynosi **11 657 mln ton** dla 45 struktur w formacjach paleozoiku, mezozoiku (największy potencjał, zwłaszcza dla jury) i kenozoiku (miocenu). Jeśli pominąć struktury kredowe, pozostaje 9 171 mln ton dla 35 struktur. Natomiast dla regionalnych kolektorów kambru i karbonu potencjał ten oszacowano na **2 838 mln ton**. Stąd dla poziomów solankowych mamy potencjał składowania w granicach **12 009 - 14 495 mln ton**.

Potencjał do składowania w strukturach naftowych to **784 – 1021 mln ton**. Są to w większości szcerpane złoża gazu; udział rozpatrywanych kilku złóż ropy naftowej, o różnym stopniu szcerpania, stanowi mniej niż 10% powyższych wartości.

Potencjał dla pokładów węgla można szacować na **20 – 100 mln ton** (pierwsza wartość dla możliwych koncesji na rozpoznanie w obrębie GZW, druga dla całego GZW – pokłady węgla na głębokościach 1-2 km).

Podsumowując, potencjał składowania poziomów solankowych jest o rząd wielkości większy od struktur naftowych (o około 14 razy), pokładów węgla mikroskopijny, a całość starczy teoretycznie na pół wieku emisji zakładów przemysłowych objętych ETS w Polsce (która wynosi około 200 mln ton CO<sub>2</sub> rocznie).

W rezultacie prac regionalnych (I Segmentu) wytypowano szereg obiektów w poziomach solankowych (w tym dwa na potrzeby planowanych na początku realizacji tematu projektów demonstracyjnych CCS w Bełchatowie i Kędzierzynie oraz po jednej strukturze w rejonie Szczecina i w rejonie Poznania), złóż węglowodorów (jedno złożo ropy i dwa złoża gazu) i obiekt w pokładach węgla, będących następnie przedmiotem analiz szczegółowych ("case studies") w II Segmentcie. Prace te objęły wstępną charakterystykę potencjalnych składowisk zgodnie z zaleceniami podanymi w załączniku nr 1 do Dyrektywy unijnej w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla.

Istotne wnioski merytoryczne z modelowań prowadzonych dla ww. obiektów w ramach II Segmentu to fakt, że zarówno pojemność jak i bezpieczeństwo składowania CO<sub>2</sub> w danej strukturze zależy znacząco od konfiguracji otworów zatłaczających (w tym usytuowania na strukturze i odległości pomiędzy iniektorami) i ilości CO<sub>2</sub> jakie przyjmuje dany otwór

globalnie i na jednostkę czasu (od tego zależy pole ciśnień w kolektorze i nadkładzie uszczelniającym, rozkład plamy CO<sub>2</sub> w przestrzeni i czasie - w trakcie i po zakończeniu zatłaczania, od czego z kolei zależy intensywność innych mechanizmów wiązania CO<sub>2</sub> - głównie rozpuszczania w solance oraz, w mniejszym stopniu, wiązania fizycznego i chemicznego z ziarnami skały).

Wyniki te uzyskano dzięki przyjęciu rozmaitych scenariuszy zatłaczania, różniących się stopniem szczegółowości/obszarem modelu (a także metodyką jego konstrukcji), lokalizacją otworów iniekcyjnych, kolektorem, do którego zatłaczano CO<sub>2</sub>, ilością zatłaczanego CO<sub>2</sub>, czasem zatłaczania, okresem symulacji zachowania się CO<sub>2</sub> po zakończeniu zatłaczania (a poza tym prowadzono modelowania reaktywności CO<sub>2</sub>-solanka-skała).

Celem tych działań było rozpoznanie możliwego zachowania się CO<sub>2</sub> w obrębie rozpatrywanych formacji i struktur, w oparciu o dostępne dane. Był to pierwszy przypadek w naszym kraju, gdzie przeanalizowano z punktu widzenia wymogów (Aneksu nr 1) Dyrektywy w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla szereg struktur – potencjalnych składowisk CO<sub>2</sub>. Jako pierwsza charakteryzowana była struktura Budziszewice-Zaosie i stąd dla niej i jej otoczenia wykonano najwięcej tego typu analiz.

Należy przy tym nadmienić, że stopień rozpoznania struktury solankowej nigdy nie będzie wystarczająco dokładny do prowadzenia wiarygodnych, wielowariantowych symulacji zatłaczania przed rozpoczęciem samego zatłaczania, natomiast model poprawiony o wyniki nowych prac polowych wykonanych dla dokładniejszego rozpoznania struktury będzie bardziej wiarygodny od zaprezentowanych w niniejszym opracowaniu, model poprawiony o wyniki nowych prac szczegółowych wykonanych dla określenia docelowej lokalizacji zatłaczania CO<sub>2</sub> będzie jeszcze bardziej wiarygodny, a jeszcze bardziej byłby wiarygodny model uwzględniający wyniki ewentualnego testowego/doświadczalnego zatłaczania (na małą skalę - do 100 kt/otwór), a najbardziej wiarygodne modelowania procesów zatłaczania CO<sub>2</sub> mogą być prowadzone w oparciu o wyniki monitoringu zatłaczania dwutlenku węgla do składowiska.

Inwestycja polegająca na składowaniu CO<sub>2</sub> w dużej skali (miliony ton CO<sub>2</sub> rocznie) wymaga uprzedniego, wieloetapowego rozpoznania składowisk. To co wykonano dla struktur solankowych w ramach I i II Segmentu jest zaledwie wstępem do takiego rozpoznania, prowadzonego w ramach stosownej koncesji i obejmującego wykonanie prac polowych o coraz to większym stopniu szczegółowości i kosztach (jest tu pewna analogia do poszukiwań naftowych, gdzie od stwierdzenia możliwości występowania złoża do jego udokumentowania i zagospodarowania też mamy szereg etapów).



Wytypowane składowisko jest przedmiotem wieloetapowego monitoringu (prowadzonego przed rozpoczęciem zatłaczania CO<sub>2</sub>, w trakcie zatłaczania i przez długi okres po zakończeniu eksploatacji składowiska), który ma za zadanie wykryć ewentualną migrację CO<sub>2</sub> poza kompleks składowania (dopuszczalna do 1% całkowitej ilości składowanego CO<sub>2</sub> w ciągu całego okresu istnienia składowiska, tzn. około 5000 lat - Chadwick et al., 2008) oraz, jeszcze bardziej nieprawdopodobny, wyciek na powierzchnię. W przypadku migracji CO<sub>2</sub> poza kompleks składowania, która jest procesem długotrwałym, zachodzi po drodze rozpuszczanie w solance w zbiorniku ponad kompleksem składowania, następnie zatrzymywanie na występujących powyżej tegoż zbiornika skałach nieprzepuszczalnych, adsorpcja, mineralna sekwestracja, redukujące drastycznie jego strumień. Stąd wyciek (na powierzchnię) właściwie jest możliwy tylko w przypadku nieszczelności odwiertów, dlatego zalecane jest po zakończeniu zatłaczania zacementowanie otworów wykonanych (czy rekonstruowanych) w obrębie składowiska, z wykorzystaniem specjalnych zaczynów, odpornych na korozję CO<sub>2</sub>. Natomiast wyniki analiz prowadzonych w ramach niniejszego przedsięwzięcia przez AGH sugerują, że takie prace należy również wykonać dla starych, zlikwidowanych otworów w obrębie składowiska, gdyż stosowane dotychczas standardowo cementy nie są odporne na długotrwałe oddziaływanie CO<sub>2</sub>.

Ryzyka wiążące się z geologicznym składowaniem CO<sub>2</sub> nie są większe niż w innych przypadkach ingerencji w górotwór - magazynowania węglowodorów, poszukiwań i eksploatacji węglowodorów niekonwencjonalnych (znane są działania pseudoekologów i innych „ekspertów” przeciwko wydobyciu gazu z łupków, używających podobnego typu argumentów jak przy krytyce CCS) i konwencjonalnych, a nawet, do pewnego stopnia, geotermii (np. w Gironie w Hiszpanii doszło do skażenia wód pitnych wodami złożowymi zawierającymi metale ciężkie; w Bazylei zaś, w Szwajcarii, szczelinowanie w ramach projektu geotermalnego spowodowało wstrząsy sejsmiczne; warto też wspomnieć, że duży projekt geotermalny obejmuje przetłaczanie podobnych ilości płynu jak np. projekt demonstracyjny CCS, tzn. milion ton rocznie i więcej).

Należy przy tym nadmienić, że środki ostrożności podjęte przy wyborze składowisk CO<sub>2</sub>, ich zagospodarowaniu, eksploatacji, i po jej zakończeniu (Dyrektywa CCS i jej implementacja do prawa krajowego), są daleko bardziej restrykcyjne niż dla innych powyższych przypadków ingerencji w górotwór.

## LITERATURA

Bergen van F., Wildenborg T., 2002 - *Inventory of storage potential of Carboniferous coal layers in the Netherlands. TNO Report NITG 02-031-B (GESTCO), Utrecht.*

Bojarski L., 1996 – *Atlas hydrochemiczny i hydrodynamiki paleozoiku i mezozoiku oraz ascensyjnego zasolenia wód podziemnych na Niżu Polskim* Wyd. Geol.

Chadwick A., Arts R., Bernstone C., May F., Thibeau S., Zweigl P., 2008 - *Best practice for the storage of CO<sub>2</sub> in saline aquifers. Keyworth, Nottingham, British Geological Survey.*

Davis D., Oudinot A., Sultana A., Reeves S., 2004 - *Coal-Seq 2.2: A Screening Model for ECBM Recovery and CO<sub>2</sub> Sequestration in Coal. Topical Report and Users Manual — ARI and US Department of Energy (www.coal-seq.com).*

Dyrektywa 2009/31/WE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO i RADY z dnia 23 kwietnia 2009 w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla oraz zmieniająca Dyrektywy Rady 85/337/EWG, 96/61/WE, Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/60/WE, 2001/80/WE, 2004/35/WE, 2006/12/WE i Rozporządzenie (WE) nr 1013/2006 oraz *Accompanying document to the proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the geological storage of carbon dioxide Impact Assessment.*

Dziewińska L., Tarkowski R., 2012 - *Budowa geologiczna struktury Choszczna (niecka szczecińska) w świetle interpretacji sekcji efektywnych współczynników odbicia dla potrzeb podziemnego składowania CO<sub>2</sub>. Gospodarka Surowcami Mineralnymi T. 28, z. 1, s. 173-184.*

Górecki W. (red.) 2006a - *Atlas zasobów geotermalnych formacji mezozoicznej na Niżu Polskim. Atlas of geothermal resources of Mesozoic formations in the Polish Lowlands. AGH, 2006. 484s., Kraków.*

Górecki W. (red.) 2006b - *Atlas zasobów geotermalnych formacji paleozoicznej na Niżu Polskim. Atlas of geothermal resources of Mesozoic formations in the Polish Lowlands. AGH, 2006. 484s., Kraków.*

Jura B., Krzystalik P., Skiba J. 2007 - *RECOPOL and MOVECBM projects, opportunities and challenges - CO<sub>2</sub>NET Seminar, 6-7th November 2008, Lisbon, Portugal.*

Jureczka J., Dopita M., Gałka M., Krieger W., Kwarciański J., Martinec P., 2005 – *Atlas geologiczno-złożowy polskiej i czeskiej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Państwowy Instytut Geologiczny, Ministerstwo Środowiska, Warszawa.*

Jureczka J., Zdanowski A., Ichnatowicz A., Krieger W., Wilk S., 2011 - *Węgiel kamienny. [w]: S. Wołkowicz, T. Smakowski, S. Speczik (red.) Bilans perspektywicznych zasobów kopalin Polski. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Ministerstwo Środowiska, Warszawa. pp. 51-63.*

Jędrzejowska-Tyczkowska H. i in., 2004 - *First Experience with 4D seismic in Poland; Feasibility Studies of BMB Field. EAGE 66th Conference and Exhibition, Paris, June 2004.*

Lake L.W., Walsh M.P., 2008 - *Enhanced Oil Recovery (EOR) Field Data Literature Search. Technical Report for Danish North Sea Partner, Danish Energy Agency, Mærsk Olie og Gas AS.*

Lubaś, J. Szott W., 2010 - *15-year experience of acid gas storage in the natural gas structure of Borzęcin - Poland. Nafta-Gaz LXVI, maj 2010, pp. 333-338.*

Lubaś, J. (red.), 2012 - *Program wspomaganie wydobycia ropy naftowej i gazu ziemnego z krajowych złóż węglowodorów przy zastosowaniu podziemnego zatłaczania CO<sub>2</sub>. Raport z tematu dla MŚ, CAG W-wa.*

May F., 2003 - *CO<sub>2</sub> storage capacity in unminable coal beds in Germany. GESTCO Project report, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.*

Pagnier H., van Bergen F., van der Meer L., 2003 - *Field experiment of ECBM in the Silesian Coal Basin of Poland RECOPL). International Coalbed Methane Symposium 2003, Tuscaloosa, Alabama (USA), May 5-9.*

Posyniak A., Rosa W., 2010 – *Dokumentacja końcowa otworu wiertniczego Kaszewy-1. Archiwum PGE GiEK Bełchatów.*

Raport PIG-PIB, 2012 - *Ocena zasobów wydobywalnych gazu ziemnego i ropy naftowej w formacjach łupkowych dolnego paleozoiku w Polsce (basen bałtycko-podlasko-lubelski), Raport pierwszy, 2012.*

Rochon E. (red.), 2008 - *False Hope - why carbon capture and climate won't save the climate. Greenpeace International.*

Schuppers J. D., Holloway S., May F., Gerling P., Bøe R., Magnus C., Riis F., Osmundsen P.T., Larsen M., Andersen P. R., Hatzilyannis G., 2003 - *Storage capacity and quality of hydrocarbon structures in North Sea and the Aegean region. GESTCO WP2 Final Report, TNO, Utrecht.*

*Special Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change on Carbon Capture and Storage (IPCC SRCSS) 2007 - Cambridge University Press, Cambridge; also at IPCC website: [www.ipcc.ch/ipccreports/special-reports.htm](http://www.ipcc.ch/ipccreports/special-reports.htm).*

Szewczyk J., Gientka D., 2009 – *Terrestrial heat flow density in Poland - a New approach Geological Quarterly, 53(1); 125 - 140.*

Tarkowski [red.], 2010 - *Potencjalne struktury geologiczne do składowania CO<sub>2</sub> w utworach mezozoiku Niżu Polskiego (Charakterystyka oraz ranking), autorzy: L. Dziewińska, S. Marek, Tarkowski R., Uliasz-Misiak B, [w:] "Studia Rozprawy i Monografie", nr 164, IGSMiE PAN, 2010, 138 s.*

Tongeren van P.C.H., Laenen B., 2001– *Coalbed methane potential of the Campine Basin (N. Belgium) and related CO<sub>2</sub>-sequestration possibilities. GESTCO WP Report, VITO.*

Wójcicki A., 2008 - *CO<sub>2</sub> Storage Potential in Poland (after CASTOR WP1.2), First EAGE CO<sub>2</sub> Geological Storage Workshop, Budapest 29-30th September (referat).*

Wójcicki A., Lisowski K., Tarkowski R., Uliasz-Misiak B., 2008 - *Interaktywny atlas prezentujący możliwości geologicznej sekwestracji w Polsce, w skali 1:500 000. Raport z tematu dla MŚ, CAG W-wa. Strona atlasu: <http://skladowanie.pgi.gov.pl/co2atlas/atlas.phtml>.*

Wójcicki A. (red.), 2013 - *Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO<sub>2</sub> wraz z ich programem monitorowania, Raport końcowy. Strona projektu: <http://skladowanie.pgi.gov.pl>.*

Vangkilde-Pedersen T., Anthonsen K. L., Smith N., Kirk K., Neele F., van der Meer B., Le Gallo Y., Bossie-Codreanu D., Wojcicki A., Le Nindre Y.-M., Hendriks C., Dalhoff F., Peter Christensen N. P., 2009 - *GHGT-9 Assessing European capacity for geological storage of carbon dioxide – the EU GeoCapacity project, energy Procedia – Elsevier, No. 1 (2009), pp 2663-2670.*

## INDEKS RZECZOWY (DO OPRACOWANIA KOŃCOWEGO)

Poniżej zestawiono wybrane, najistotniejsze informacje związane z realizacją niniejszego przedsięwzięcia, dla których podano odnośniki do poszczególnych rozdziałów opracowania końcowego

(<https://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/bin/view/CO2/WynikiPrac>).

### Objaśnienia symboli

Dla przykładu,

**I-1, 15, 100-101** oznacza strony 15 i 100-101 rozdziału 1 prac regionalnych;

zaś **II-14, 44-46** odpowiednio strony 44-46 rozdziału 14 prac szczegółowych;

patrz też Spis rozdziałów opracowania końcowego w teczce nr 1 wersji papierowej opracowania lub na stronie projektu:

<https://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/bin/view/CO2/WynikiPrac>.

I Segment (prace regionalne): I-0, 12; I-11, 82

II Segment (prace szczegółowe): I-0, 12

Baza danych: I-10, 2, 11; III-13, 13

Broszury informacyjne: III-12, 6

Budziszewice-Zaosie struktura: I-1, 12-13; I-3, 29; I-7, 3, 154; I-9, 93; I-11, 3; II-14, 4; II-15, 5; II-16, 4; II-17, 5; II-18, 6, 118, 506, 514

Choszczno-Suliszewo struktura: I-2, 61; I-3, 308, 355; I-4, 117; II-14, 48, 236; II-15, 152, 231; II-16, 111, 238; II-17, 163, 289; II-18, 126, 509, 521

CO<sub>2</sub>STORE kryteria: I-0, 19; I-1, 10-11, 128, 197

Geologiczne składowanie CO<sub>2</sub>: I-0, 16-20

Mechanizmy składowania CO<sub>2</sub>: I-0, 20

Metodyka prac I Segment: I-0, 12-15

Niecka poznańska: I-1, 239-243; I-2, 46; I-11, 34; II-14, 114; II-15, 185; II-16, 150; II-17, 209; II-18, 226, 510

Petrofizyczne analizy: I-5, 16, 110, 128, 145, 167; I-7, 113, 128, 135

Petrologiczne analizy: I-5, 16, 103; II-15, 68, 113, 279, 387

Pojemność dynamiczna: I-2, 5

Pojemność statyczna, szacowanie: I-2, 3-6, 29-33; I-2, 85-86, 117-126, 139, 160; I-11, 90

Pokłady węgla: I-1, 191-195; I-2, 81, 143; I-7, 178; I-8, 75; I-9, 79; I-11, 50, 60

obiekt Pawłowice-Mizerów: I-2, 81, 143; I-11, 50, 60; II-14, 355; II-15, 405; II-16, 359; II-17, 491; II-18, 427, 513

Poziomy solankowe: I-0, 16;

Reaktywność CO<sub>2</sub>-solanka-skała: I-6, 209, 219, 223, 232; II-14, 15, 66, 288

Rejon<sup>7</sup> I – Bełchatów

---

<sup>7</sup> Formacje i struktury solankowe.

formacje: I-1, 6-7; I-3, 4, 43-45; I-5, 4, 18; I-6, 12; I-8, 2; I-9, 3

struktury: I-2,7; I-4, 9; I-7, 3; I-11, 3

#### Rejon II – GZW

formacje: I-1, 26-30; I-3, 64-66; I-4, 26; I-5, 20; I-6, 32, 295; I-8, 20; I-9, 9

struktury: I-2, 14, 128; I-7, 9; I-11, 7, 53;

#### Rejon III – Mazowsze

formacje: I-1, 34-39; I-3,130; I-4,158; I-5,44; I-6, 73; I-7, 167; I-8, 26; I-9, 15

struktury: I-2, 16; I-3, 73, 110; I-4, 41; I-7,3; I-11, 9

#### Rejon IV – Karpaty/zapadlisko

formacje: I-1, 48-56, 128-130, 312-318; I-3,137, 169, 231; I-5, 57; I-6, 98; I-8, 33

struktury: I-2, 29, 37; I-4, 56; I-7, 14; I-11, 12, 26

#### Rejon V – Lubelszczyzna (i Podlasie)

formacje: I-1, 134-144, 394-397; I-3, 235, 250; I-4, 180; I-5, 64, 66, 73; I-6, 126;  
I-8, 37; I-9, 22

struktury: I-2, 42; I-4, 69; I-7, 16; I-11, 29, 33

#### Rejon VI – Wielkopolska-Kujawy

formacje: I-1, 150-156; I-3, 254, 279, 284, 297, 300; I-5, 73; I-6,156; I-7, 164; I-8, 46;  
I-9, 37

struktury: I-2, 46, 50, 55, 58; I-3, 257, 283; I-4, 86; I-7, 19; I-11, 34, 35

#### Rejon VII – NW Polska

formacje: I-1, 157-162; I-3, 306, 323, 365; I-4, 181; I-5, 77; I-6, 179; I-7, 158; I-8, 56;  
I-9, 43

struktury: I-2, 60, 61, 67; I-3, 308, 355; I-4, 117; I-7, 22; I-11, 38

#### Rejon VIII – Łeba-Bałtyk i NE Polska

formacje: I-1, 170-181, 452-471; I-3, 375; I-4, 142; I-5, 83; I-6, 205; I-7, 25; I-7, 160;  
I-8, 64; I-9, 51

struktury: I-2, 756; I-11, 43

Skoczów-Czechowice obiekt: I-2, 14, 128; I-7, 9; I-11, 7,53; II-14, 18; II-15, 76; II-16, 58; II-17, 61; II-18, 54, 295, 508

Solanka, skład: I-6, 4, 38, 249, 295

Strona www projektu: I-10, 15; III-13, 17

Struktury solankowe IGSMiE: I-1, 197-238; I-2, 86-113;

Symulacje zatłaczania CO<sub>2</sub>: I-6, 245; I-7, 149; I-9, 3, 9, 15, 22, 37, 43, 51, 55, 66, 79, 93, 98, 103; II-16, 10, 22, 38, 58, 91, 115, 135, 150, 238, 275, 310, 361, 402

Szczelność uskoków: I-4,3, 27, 155

Szczelność otworów: I-7, 6, 34, 38, 43, 68, 94

Wojszyce struktura: I-2, 12; I-3, 73; I-11, 3

Zakres prac I Segment: I-0, 7-11; I-11, 82

Zakres prac II Segment: II-0, 8-11, 13;

Złoża węglowodorów: I-1, 184-188, 333-375; I-2, 76,157; I-6, 278; I-7, 31; I-8, 69; I-11, 47,66

    złoże ropy Nosówka: I-11, 77; II-14, 329; II-15, 327; II-16, 285; II-17, 376; II-18, 295,355,511

    złoże gazu Wilków: I-11, 77; II-14, 278; II-15, 289, 364; II-16, 266; II-17, 351; II-18, 341, 406, 511

    złoże gazu Łąka – obiekt 3a (złoże gazu + podścielający poziom solankowy); II-18, 512



## WYKONAWCY OPRACOWANIA KOŃCOWEGO

### (Komitet Programowy)

Imię i nazwisko	Instytucja	Imię i nazwisko	Instytucja	Imię i nazwisko	Instytucja	Imię i nazwisko	Instytucja	Imię i nazwisko	Instytucja	Imię i nazwisko	Instytucja
<b><u>dr inż. Adam Wójcicki</u></b>	PIG-PIB	<b><u>dr hab. inż. Stanisław Nagy, prof. nzw.</u></b>	AGH	<b><u>dr hab. inż. Jan Lubaś, prof. nzw.</u></b>	INIG	prof. dr hab. inż. Józef Dubiński	GIG	<b><u>dr hab. inż. Radosław Tarkowski, prof. nzw.</u></b>	IGSMiE PAN	<b><u>mgr Tomasz Bak</u></b>	PBG
dr hab. Marek Jarosiński, prof. nzw.	PIG-PIB	prof. dr hab. inż. Jakub Siemek	AGH	dr hab. Piotr Such	INIG	dr hab. inż. Jan Wachowicz, prof. nzw.	GIG	dr hab. inż. Barbara Uliasz-Misiak	IGSMiE PAN	mgr Agnieszka Dziasek	PBG
mgr Katarzyna Sobień	PIG-PIB	prof. dr hab. inż. Andrzej Gonet	AGH	prof. dr hab. inż. Halina Jędrzejowska-Tyczkowska	INIG	<b><u>dr hab. inż. Grzegorz Mutke, prof. nzw.</u></b>	GIG	prof. dr hab. inż. Sylwester Marek	IGSMiE PAN	Zdzisław Żuk	PBG
prof. dr hab. Grzegorz Pieńkowski	PIG-PIB	prof. dr hab. inż. Stanisław Stryczek	AGH	dr inż. Grzegorz Leśniak	INIG	dr Joanna Martyka	GIG	dr Lidia Dzięwińska	IGSMiE PAN	mgr inż. Cezary Ostrowski	PBG
dr Anna Feldman-Olszewska	PIG-PIB	prof. dr hab. inż. Henryk Marczak	AGH	dr inż. Irena Matyasik	INIG	dr inż. Jarosław Chečko	GIG	dr inż. Magdalena Wdowin	IGSMiE PAN	mgr inż. Grzegorz Pacanowski	PBG
mgr Hubert Kiersnowski	PIG-PIB	dr hab. inż. Rafał Wiśniowski	AGH	dr Wiesław Szott	INIG	Marzena Majer	GIG	dr hab. inż. Krzysztof Labus	IGSMiE PAN	dr inż. Marek Wojdyła	PBG
dr Anna Becker	PIG-PIB	dr hab. inż. Ludwik Zawisza, prof. nzw.	AGH	dr inż. Tadeusz Szpunar	INIG	dr inż. Magdalena Glogowska	GIG	mgr inż. Maria Oniszk	IGSMiE PAN	mgr Krzysztof Lisowski	PBG
dr Maria Waksmundzka	PIG-PIB	dr inż. Rafał Smulski	AGH	mgr inż. Józef Such	INIG	mgr inż. Karol Kura	GIG	mgr inż. Katarzyna Batkiewicz	IGSMiE PAN		
dr hab. Jolanta Paczeńska	PIG-PIB	dr hab. inż. Czesław Rybicki	AGH	mgr Barbara Darlak	INIG	mgr inż. Robert Warzecha	GIG	mgr inż. Bogusław Liszka	IGSMiE PAN		

dr Krzysztof Leszczyński	PIG-PIB	mgr inż. Łukasz Klimkowski	AGH	mgr inż. Sławomir Szuflika	INIG	dr Eleonora Solik-Heliasz	GIG	mgr Wojciech Królik	IGSMiE PAN		
mgr Leszek Skowroński	PIG-PIB	dr inż. Jacek Blicharski	AGH	mgr inż. Lidia Dudek	INIG	dr inż. Tadeusz Bromek	GIG	mgr inż. Aleksandra Kutyba	IGSMiE PAN		
mgr inż. Teresa Adamczak-Biały	PIG-PIB	dr inż. Jan Macuda	AGH	mgr inż. Małgorzata Słota	INIG	dr inż. Adam Lurka	GIG	dr inż. Wiesław Sroczyński	IGSMiE PAN		
dr Jan Szewczyk	PIG-PIB	mgr inż. Rafał Sedlaczek	AGH	mgr inż. Małgorzata Włodarczyk	INIG	dr inż. Krystyna Stec	GIG	mgr inż. Katarzyna Luboń	IGSMiE PAN		
mgr inż. Michał Wojtowicz	PIG-PIB	mgr inż. Dorota Polak	AGH	mgr inż. Krzysztof Sowiżdżał	INIG	mgr inż. Tomasz Urych	GIG	Tomasz Trzupek	IGSMiE PAN		
dr hab. Magdalena Sikorska-Jaworowska, prof. nzw.	PIG-PIB	mgr inż. Tomasz Włodek	AGH	mgr inż. Marcin Warnecki	INIG	mgr inż. Michał Gut	GIG				
dr Aleksandra Kozłowska	PIG-PIB	mgr inż. Krzysztof Polański	AGH	mgr inż. Jerzy Kuśnierczyk	INIG	mgr inż. Jacek Skiba	GIG				
mgr Małgorzata Potońska	PIG-PIB	<b>prof. dr hab. inż. Wojciech Górecki</b>	AGH	mgr inż. Andrzej Gołąbek	INIG	mgr inż. Bartłomiej Jura	GIG				
dr Marta Kuberska	PIG-PIB	dr inż. Bartosz Papiernik	AGH	mgr Konrad Ziemiński	INIG	dr inż. Piotr Rosmus	GIG				
dr Leszek Krzemiński	PIG-PIB	dr inż. Anna Sowiżdżał	AGH	mgr inż. Paweł Budak	INIG	dr inż. Aleksandra Koterak	GIG				
dr hab. Katarzyna Jarmolowicz-Szulc, prof. nzw.	PIG-PIB	mgr inż. Marek Hajto	AGH	dr inż. Piotr Łętkowski	INIG	mgr Michał Bednarski	GIG				
dr Magdalena Pańczyk	PIG-PIB	dr inż. Grzegorz Machowski	AGH	dr inż. Marcin Rzepka	INIG	mgr inż. Robert Warzecha	GIG				
Leszek Giro	PIG-PIB	mgr inż. Michał Maruta	AGH	dr Krystyna Żukowska	INIG	mgr inż. Robert Siata	GIG				

dr Grzegorz Zieliński	PIG-PIB	mgr inż. Andrzej Pasternacki	AGH	mgr inż. Krzysztof Miłek	INIG	mgr inż. Jacek Chodacki	GIG				
mgr Joanna Roszkowska-Remin	PIG-PIB	mgr inż. Grzegorz Pelka	AGH	Andrzej Rychlicki	INIG	dr Przemysław Bukowski	GIG				
Piotr Lampart	PIG-PIB	mgr inż. Wojciech Luboń	AGH	mgr inż. Bogdan Filar	INIG	mgr Iwona Augustyniak	GIG				
mgr Wanda Narkiewicz	PIG-PIB	mgr inż. Aurelia Zając	AGH	mgr inż. Mariusz Miziołek	INIG	mgr inż. Anna Wątor	GIG				
mgr inż. Grzegorz Wróbel	PIG-PIB	mgr inż. Marzena Gancarz	AGH	mgr inż. Barbara Piesik-Buś	INIG						
mgr inż. Sylwia Kijewska	PIG-PIB	mgr inż. Wojciech Machowski	AGH	mgr inż. Jadwiga Zamojcin	INIG						
mgr Katarzyna Pisaniec	PIG-PIB	mgr inż. Michał Michna	AGH	mgr inż. Marcin Kremieniewski	INIG						
mgr inż. Paweł Poprawa	PIG-PIB	mgr inż. Barbara Czopek	AGH	mgr inż. Wacława Piesik-Buś	INIG						
dr Zdzisław Petecki	PIG-PIB	Urszula Bryła	AGH	mgr inż. Marek Stadtmuller	INIG						
inż. Jacek Chelmiński	PIG-PIB	mgr inż. Ewa Zubel	AGH	mgr Iwona Byś	INIG						
dr Ewa Szykaruk	PIG-PIB	mgr inż. Julian Krach	AGH	mgr inż. Mariusz Słyś	INIG						
dr inż. Marcin Słodkowski	PIG-PIB	Anna Źoldani -Szelest	AGH	mgr Edyta Dębińska	INIG						
mgr Maciej Tomaszczyk	PIG-PIB	mgr inż. Joanna Rams	AGH	mgr inż. Łukasz Kuć	INIG						
mgr Łukasz Nowacki	PIG-PIB			inż. Andrzej Szwagrzyk	INIG						
mgr Krzysztof Czuryłowicz	PIG-PIB			Marta Kyś	INIG						
dr Lidia Razowska-	PIG-PIB			Stanisław Biały	INIG						

Jaworek											
dr inż. Jadwiga Wagner	PIG-PIB			Władysław Socha	INIG						
mgr inż. Zbigniew Kaczorowski	PIG-PIB			inż. Władysława Kędra	INIG						
prof. dr hab. Jacek Motyka	PIG-PIB			inż. Zenobia Kaźna	INIG						
mgr Anna Chmura	PIG-PIB			Irena Irlík	INIG						
Jolanta Kublik	PIG-PIB			Dorota Piróg	INIG						
mgr inż. Piotr Matyjasik	PIG-PIB			Szczepan Filip	INIG						
mgr inż. Marta Wróblewska	PIG-PIB										
mgr Iwona Duliban	PIG-PIB										
Tadeusz Grudzień	PIG-PIB										
Małgorzata Kielan	PIG-PIB										
mgr Janusz Jureczka	PIG-PIB										
mgr Włodzimierz Krieger	PIG-PIB										
mgr inż. Michał Rolka	PIG-PIB										
mgr inż. Marek Gałka	PIG-PIB										
mgr inż. Sławomir Wilk	PIG-PIB										
mgr Jan Kwarciański	PIG-PIB										
dr inż. Zbigniew Buła	PIG-PIB										
mgr Ryszard Habryn	PIG-PIB										
mgr Andrzej Piotrowski	PIG-PIB										
mgr Rafał Sikora	PIG-PIB										
dr Monika Konieczńska	PIG-PIB										
dr Wojciech	PIG-PIB										

Wolkowicz											
mgr Dariusz Choromański	PIG-PIB										
dr hab. inż. Józef Chowaniec	PIG-PIB										
dr inż. Anna Tomáš	PIG-PIB										
dr inż. Adam Tomáš	PIG-PIB										
dr inż. Wojciech Ryłko	PIG-PIB										
dr inż. Leszek Jankowski	PIG-PIB										
dr inż. Robert Kopciowski	PIG-PIB										
dr Małgorzata Jugowiec-Nazarkiewicz	PIG-PIB										
mgr inż. Piotr Freiwald	PIG-PIB										
mgr inż. Tomasz Koziała	PIG-PIB										
mgr inż. Piotr Owsiak	PIG-PIB										
mgr inż. Robert Patorski	PIG-PIB										
dr Wojciech Brochwicz-Lewiński	PIG-PIB										
mgr Anna Majewska	PIG-PIB										
mgr Anna Bagińska	PIG-PIB										
mgr Kamila Janus	PIG-PIB										
mgr Dorota Obarowska	PIG-PIB										

## WYKONAWCY (KONSORCJUM):

Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy (PIG-PIB; lider konsorcjum)

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie (AGH)

Instytut Nafty i Gazu (INiG)

Główny Instytut Górnictwa (GIG)

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN (IGSMiE PAN)

Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych sp. z o.o. (PBG)

## RAPORT KOŃCOWY

<https://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/bin/view/CO2/WynikiPrac>

## INTERAKTYWNY ATLAS (WEBGIS)

<http://skladowanie.pgi.gov.pl/co2polska/polska.phtml>

