

Spis treści

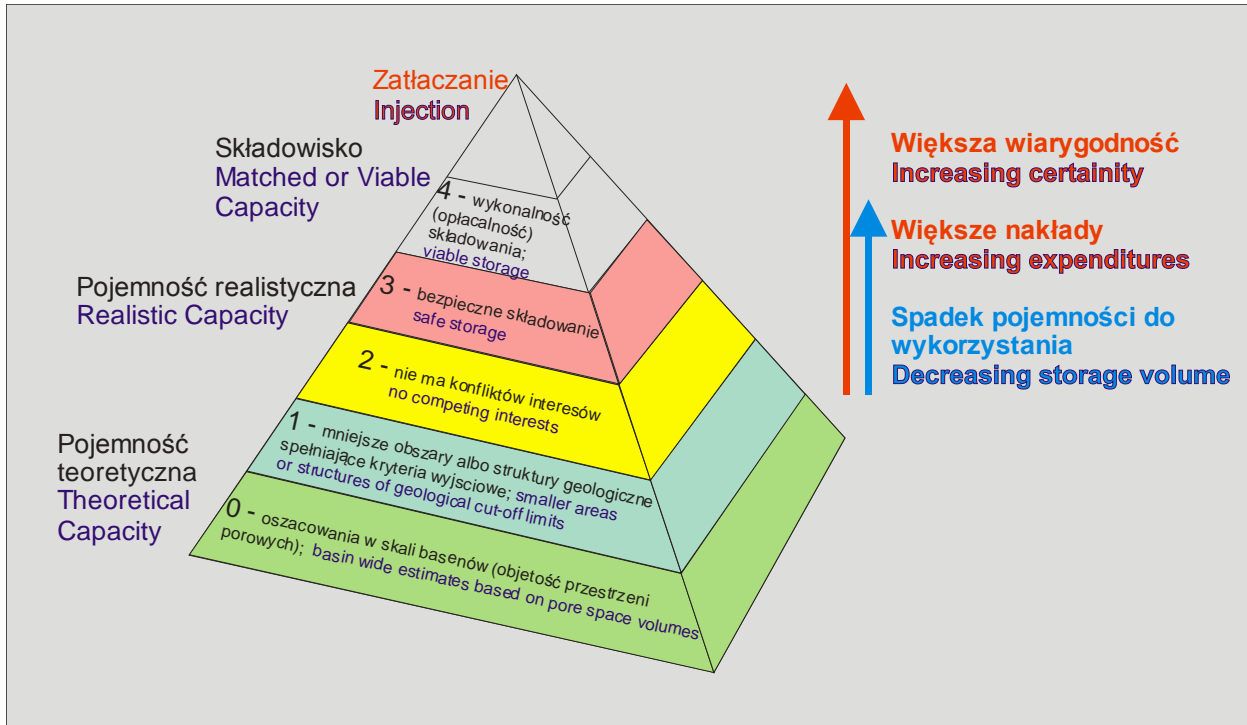
Spis treści	1
1.1.2 OKREŚLENIE (AKTUALIZACJA) BILANSU SEKWESTRACYJNEGO DLA POLSKI	3
Rejon I - Bełchatów	7
Rejon II - GZW	13
Rejon III - Mazowsze	16
Utwory dolnej kredy w rejonie Mazowsza	16
Utwory jury w rejonie Mazowsza	23
Utwory triasu w rejonie Mazowsza	28
Rejon IV - brzeźna strefa Karpat i Zapadliska Przedkarpackiego	29
Kompleks węglanowy	29
Kompleksy klastyczne i podsumowanie	37
Rejon V - Lubelszczyzna (i Podlasie)	42
Utwory karbonu	42
Utwory kambru	45
Rejon VI - Wielkopolska - Kujawy	46
Kompleks czerwonego spągowca	46
Utwory dolnej kredy w rejonie Kujaw	50
Utwory dolnej jury w rejonie Kujaw	55
Utwory dolnego triasu w rejonie Kujaw	58
Rejon VII - NW Polska	60
Utwory dolnej kredy	60
Utwory dolnej jury	61
Utwory triasu	67
Rejon VIII - Łeba-Bałtyk oraz NE Polska	73
Złoża węglowodorów	76

Pokłady węgla.....	81
Metodyka i określenie pojemności składowania dla znanych struktur (1.1.23 - IGSMiE PAN).....	85
Rejon I - Bełchatów	86
Rejon Mazowska (III), linii Kozienice-Lublin (V) oraz Wielkopolski i Kujaw (VI).....	89
Rejon frontu Karpat/zapadliska przedkarpackiego (IV) i NW Polski (VII).....	102
Potencjał składowania dla GZW i pokładów węgla (1.1.24 - GIG).....	114
Poziomy solankowe	114
Zarys budowy geologicznej i ocena parametrów hydrogeologicznych warstw dębowieckich .	114
Przyjęta metodyka oszacowania pojemności składowania CO ₂	123
Oszacowanie masy CO ₂ możliwej do ulokowania w wytypowanym zbiorniku warstw dębowieckich	127
Pokłady węgla.....	136
Wprowadzenie do procesu składowania CO ₂ i uzyskiwania metanu	137
Dobór pokładów węgla do składowania dwutlenku węgla.....	138
Przyjęta metodyka oszacowania pojemności składowania CO ₂ w pokładach węgla.....	139
Warunki złożowe dla struktur naftowych – potencjał składowania (1.1.26 - INiG)	157

1.1.2 OKREŚLENIE (AKTUALIZACJA) BILANSU SEKWESTRACYJNEGO DLA POLSKI

(Adam Wójcicki)

a)



b)

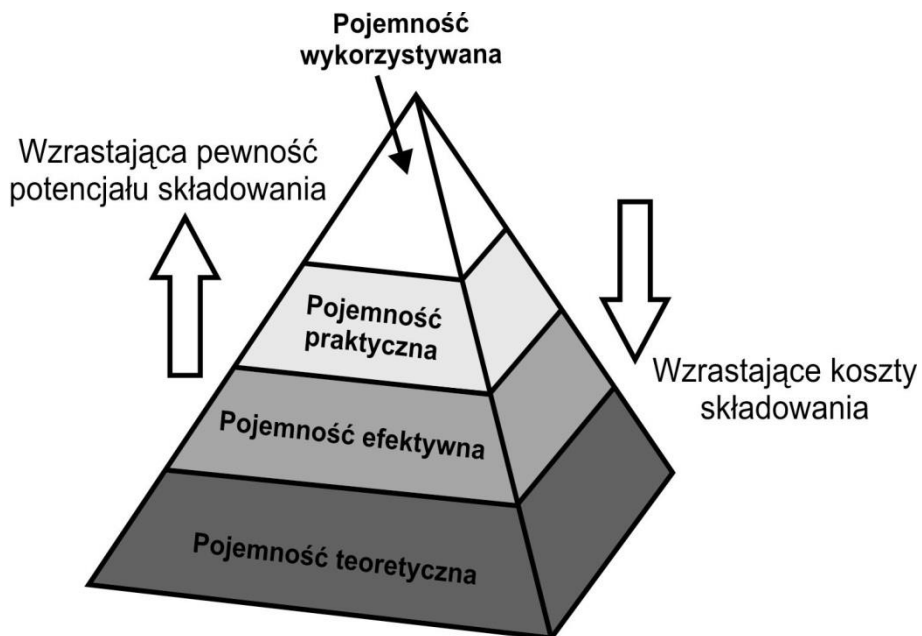


Fig. 1.1.2_1 Piramida geologicznego składowania dla kluczowej opcji – poziomów wodonośnych solankowych (Bachu&Adams, 2003 i CSLF - patrz Vangkilde-Pedersen, 2009)

To co rozumiemy przez bilans sekwestracyjny CO₂ czyli potencjał geologicznego składowania CO₂, na który składa się pojemność analizowanych struktur i formacji geologicznych, stanowi swego rodzaju „zasób”. Podobnie jak w przypadku szacowania zasobów surowców energetycznych, mineralnych czy wód termalnych, w przypadku geologicznego składowania CO₂ istnieją różne kategorie „zasobów” – pojemności potencjału składowania.

W projekcie unijnym EU GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen, 2009) przyjęto następujące kategorie zasobów – pojemności składowania, zobrazowane na **Fig. 1.1.2_1b**:

- teoretyczna pojemność składowania stanowi całkowitą ilość CO₂, jaką może pomieścić dana jednostka geologiczna w całej objętości porowej w odpowiednim przedziale głębokości (faza swobodna i rozpuszczanie CO₂ w płynach złożowych do maksymalnego nasycenia);
- efektywna pojemność składowania jest 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, a w szczególności możliwości rozplywu CO₂);
- praktyczna pojemność składowania jest to pojemność po uwzględnieniu kryteriów technicznych, ekonomicznych, prawnych oraz przeprowadzeniu oceny źródeł emisji w stosunku do miejsc składowania.

W rezultacie nowych badań geologiczno-geofizycznych wszystkie te szacunki mogą ulec przewartościowaniu gdyż oparte są na aktualnie dostępnych informacjach. Poszczególne kategorie pojemności mogą być przedmiotem dalszych wydzieleni, uwzględniających konflikty interesów, bezpieczeństwo składowania i studia wykonalności danego składowiska (**Fig. 1.1.2_1a**). Generalnie pojemność maleje wraz ze stopniem szczegółowości charakterystyki potencjalnych miejsc składowania (**Fig. 1.1.2_1a ib**) zaś koszty pozyskania coraz bardziej szczegółowych i wiarygodnych informacji rosną.

Na użytek niniejszego opracowania można stwierdzić, że dla całego obszaru kraju szacowana była w ramach I Segmentu pojemność statyczna (patrz wzór 1 poniżej) odpowiadająca pojemności efektywnej gdyż dotyczyła wstępnej charakterystyki poszczególnych struktur i obszarów w obrębie jednostek geologicznych, spełniających podstawowe kryteria geologiczno-inżynierskie i uwzględniającej wstępne szacunki efektywności składowania (możliwości rozplywu, określone jakościowo przez występowanie barier dla jego migracji – patrz też zadanie 1.1.23).

Pojemność statyczna obejmuje wolumetryczną pojemność składowania CO₂ obliczoną wykorzystując metodykę zaproponowaną w projekcie EU GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen et al., 2008) oraz pojemność wynikającą z rozpuszczania CO₂ w wodzie złożowej. Pojemność wolumetryczna wyraża się ona następującym wzorem:

$$M_{CO_2s} = A \times h \times \varphi \times \rho_{CO_2} \times C_{efs} \quad (1)$$

gdzie:

M_{CO_2s} – pojemność składowania CO₂ w strukturze geologicznej,

A – powierzchnia,

h – efektywna miąższość,

ϕ – porowatość (efektywna),

ρ_{CO_2} – gęstość CO₂ w warunkach złożowych,

C_{efs} – współczynnik efektywności składowania CO₂ (możliwości jego rozplywu, wynoszący kilka procent dla formacji/basenów i 10-40% dla poszczególnych struktur).

W tym przypadku musimy uwzględnić jeszcze wpływ tzw. wody związanej występującej w przestrzeniach porowych, która generalnie nie daje się zastąpić innymi mediami, jak np. nadkrytycznym dwutlenkiem węgla. Procent objętości przestrzeni porowych, jaki zajmuje woda związana jest zmienny i raczej trudny do dokładnego określenia dla rozpatrywanej struktury, ale generalnie można przyjąć że dla formacji piaskowcowych jest najczęściej rzędu 40%.

Z kolei IPCC SRCCS, 2007 podaje wzór - Enick & Klara (2) na rozpuszczalność CO₂ w solance:

$$w_{CO_2,b} = w_{CO_2,w} \cdot (1.0 - 4.893414 \cdot 10^{-2} \cdot S + 0.1302838 \cdot 10^{-2} \cdot S^2 - 0.1871199 \cdot 10^{-4} \cdot S^3) \quad (2)$$

gdzie $w_{CO_2,b}$ i $w_{CO_2,w}$ to odpowiednio rozpuszczalność CO₂ w solance i wodzie słodkiej a S mineralizacja solanki wyrażona w TDS. Rozpuszczalność solanki w wodzie podaje diagram - Kohl&Nielsen (IPCC SRCCS, 2007).

Natomiast pojemność (dynamiczna) uzyskana w wyniku szczegółowych analiz II Segmentu, obejmujących konkretne scenariusze zatłaczania, choć jeszcze bez analiz ekonomicznych, odpowiada pojemności praktycznej.

Podobnie ma się sprawa ze złożami węglowodorów (patrz też zadanie **1.1.26**) i pokładami węgla (zobacz też zadanie **1.1.24**), gdzie pojemność w oparciu o geometrię i podstawowe parametry zbiornika wyznaczana jest pojemność statyczna – efektywna, a modelowania dynamiczne dla poszczególnych struktur, uwzględniające konkretne scenariusze zatłaczania dla oszacowanie pojemności praktycznej.

Niniejszy tom obejmuje aktualizację i weryfikację informacji opracowanych w ramach „[Interaktywnego atlasu prezentującego możliwości geologicznej sekwestracji CO₂ w Polsce](#)” gdzie wykorzystano zasadniczo analogiczną metodykę szacowania pojemności jak przedstawiona powyżej.

Prace IGSMiE (zadanie **1.1.23**) stanowiły w niniejszym tomie wstępny etap analiz (podsumowanie dotychczasowego stanu wiedzy) jeśli chodzi o poziomy solankowe. Finalne szacunki, uwzględniające informacje będące wynikiem prac wykonanych w rozdziałach **1.1.1**, **1.1.3**, **1.1.4**, **1.1.5**, **1.1.6**, **1.1.7** i **1.1.8**, przedstawiono w kolejnych podrozdziałach dla rejonów **I – VIII**.

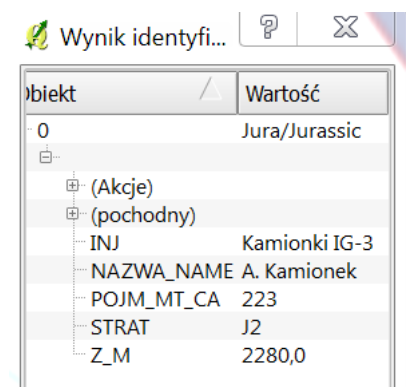
Analogicznie INiG scharakteryzował wstępnie złoża węglowodorów (zadanie **1.1.26**) a GIG – pokłady węgla (i poziomy solankowe w GZW) w ramach zadania **1.1.24**. Wyniki tych prac były ponadto weryfikowane i przedstawione w poniższych podrozdziałach „Złoża węglowodorów” i „Pokłady węgla”.

Finalne szacunki pojemności składowania zawarto w aplikacji GIS/WebGIS (na CD oraz stronie projektu).

Ponieważ przedmiotem rozdziału jest aktualizacja bilansu (zawartego w aplikacji GIS), stąd nie podawano wyników pośrednich i parametrów do obliczeń, które były przedmiotem analiz w innych rozdziałach (wyjąwszy zadanie 1.1.23, które było punktem startowym). Dla wybranych struktur, dla których kompleks składowania występuje relatywnie płytko, podano na rysunkach poniżej (dla poszczególnych rejonów) temperatury w stropie zbiornika („punkty zatłaczania”, czyli istniejące otwory, znajdują się najczęściej w szczycie struktury; tam gdzie występują istotne rozbieżności, temperatury podano dla szczytu struktury, a nie dla istniejącego otworu). Ponadto w rozdziale 1.1.11, w podsumowaniu, podano temperatury w stropie struktur w formie diagramu.

OBJAŚNIENIA

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



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

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 MT, czyli milionach ton).

Rejon I - Bełchatów

Struktury w rejonie Bełchatowa – weryfikacja i uzupełnienia

(Adam Wójcicki i zespoły 1.1.3, 1.1.4, 1.1.5)

Zweryfikowano w oparciu o dostępne dane geofizyczno-geologiczne lokalizację i zasięgi struktur omawianych w 1.1.19 i 1.1.23 oraz innych znanych struktur. Do obliczania (wstępnej) pojemności statycznej struktur zastosowano analogiczną metodykę, jaką zaprezentowało (w zadaniu 1.1.23) IGSMiE PAN (za Vangkilde-Pedersen et al., 2009 i Scholtz et al., 2006), opartą na parametrach geometrycznych i zbiornikowych struktury. Prace wykonano analogicznie jak we wspomnianym w karcie informacyjnej projektu, zamówionym przez Ministerstwo Środowiska temacie „Interaktywny atlas prezentujący możliwości geologicznej sekwestracji CO₂ w Polsce”.

Na Fig. 1.1.2_2 umieszczono następujące poprawione struktury, które poprzednio podało IGSMiE PAN (analizy IGSMiE PAN w zadaniach 1.1.19 i 1.1.23 były punktem startowym – wyniki były weryfikowane i korygowane w ramach realizacji kolejnych zadań I Segmentu, tzn. 1.1.1, 1.1.3-11; zadanie 1.1.2 stanowi wraz z 1.1.11 finał „ciągu technologicznego” I Segmentu): Jeżów, Kliczków, Lutomiersk i Tuszyn. Struktura Budziszewice uzupełniła, jak wcześniej wspomniano, ten zestaw, a ponadto doszła struktura Wojszyce, na pograniczu z rejonem III – Mazowsze (raport - Wójcicki (red.), 2009). Poniżej przedstawiono zbliżenia rejonów struktur w GISie, wraz z ich charakterystyką (Fig. 1.1.2_3-6).

Oszacowana pojemność statyczna/efektywna struktur w tym rejonie wynosi **2 169 mln ton**, z czego około 60% stanowi jedna struktura Wojszyce¹.

¹ Struktura Wojszyce, leżąca na pograniczu rejonów I i III, była analizowana w ramach prac regionalnych dla rejonu III; jest ona zamieszczona w tym podrozdziale z uwagi na fakt, że była ona rozpatrywana jako potencjalne składowisko dla projektu demo CCS PGE Bełchatów.

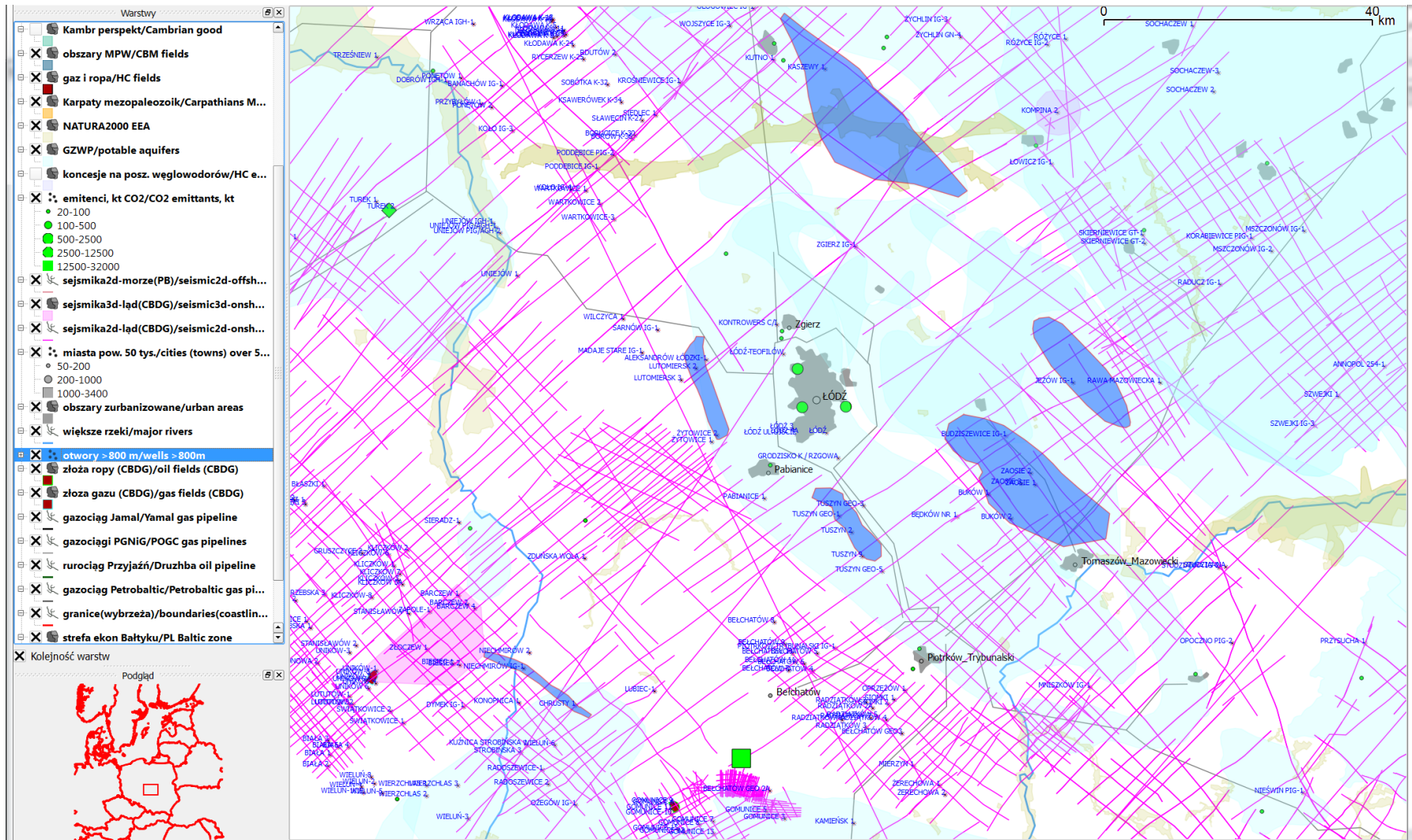


Fig. 1.1.2_2 Poprawione struktury w rejonie Bełchatowa

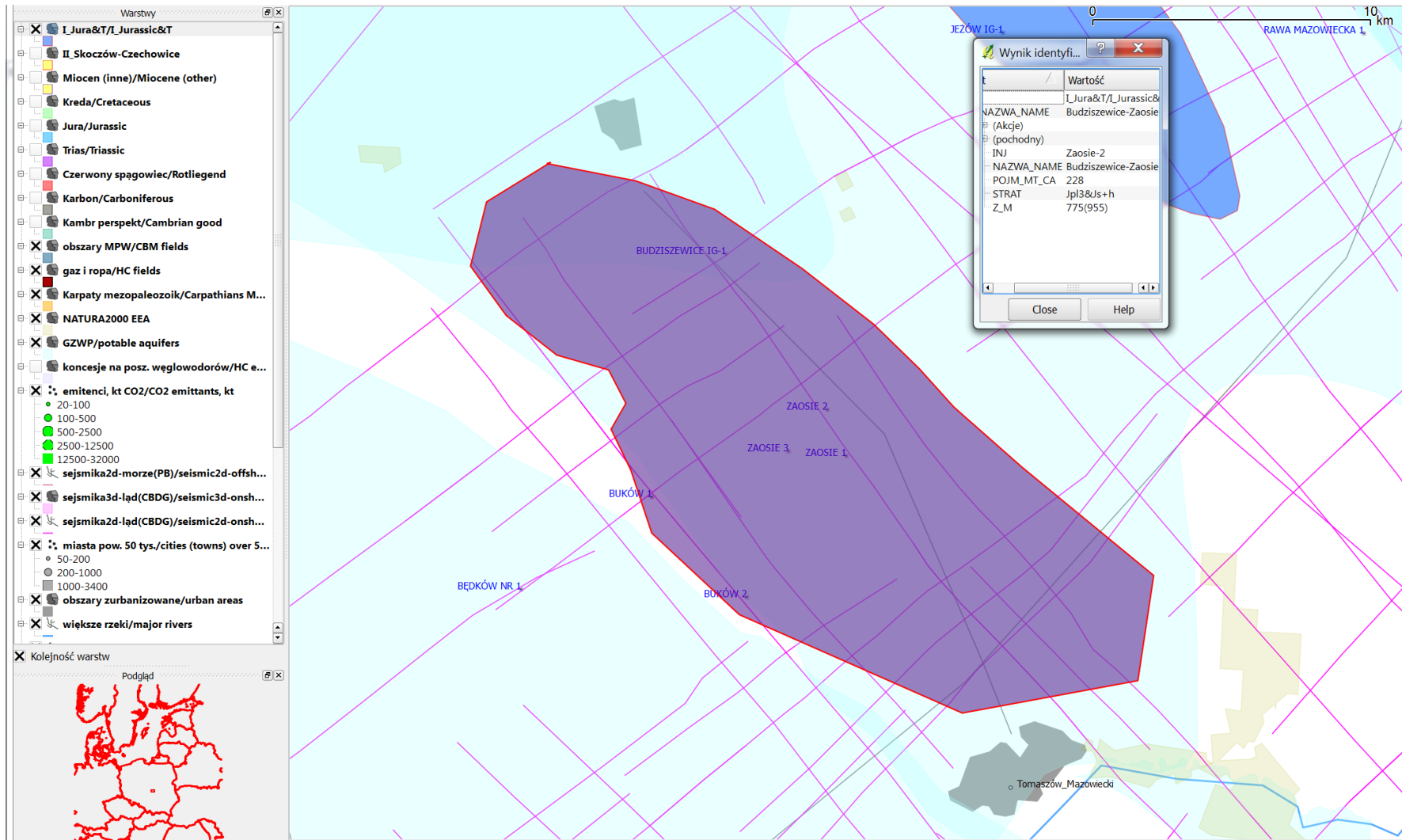


Fig. 1.1.2_3 Struktura Budziszewice-Zaosie

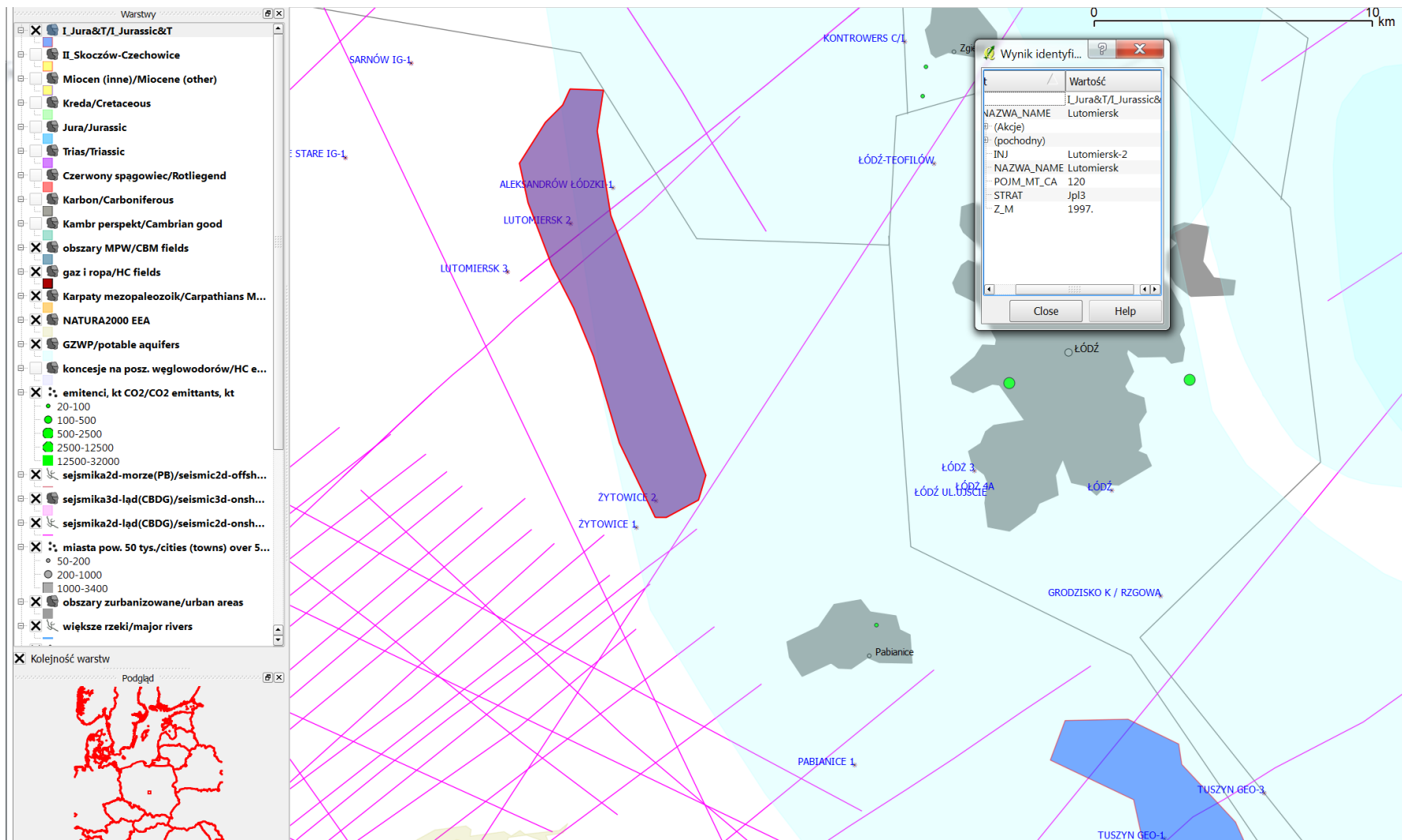


Fig. 1.1.2_4 Struktura Lutomiersk

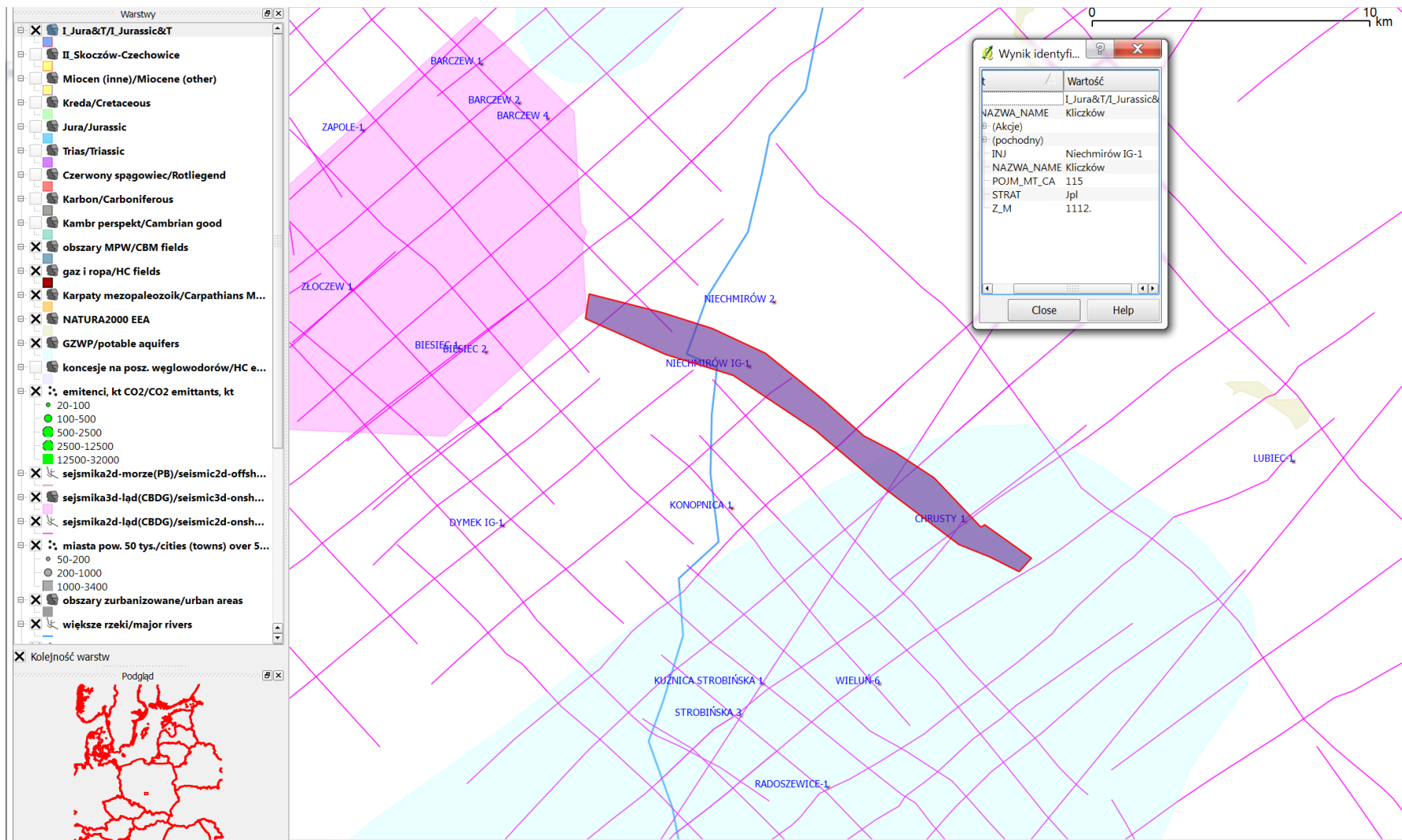


Fig. 1.1.2_5 Struktura Kliczków – J

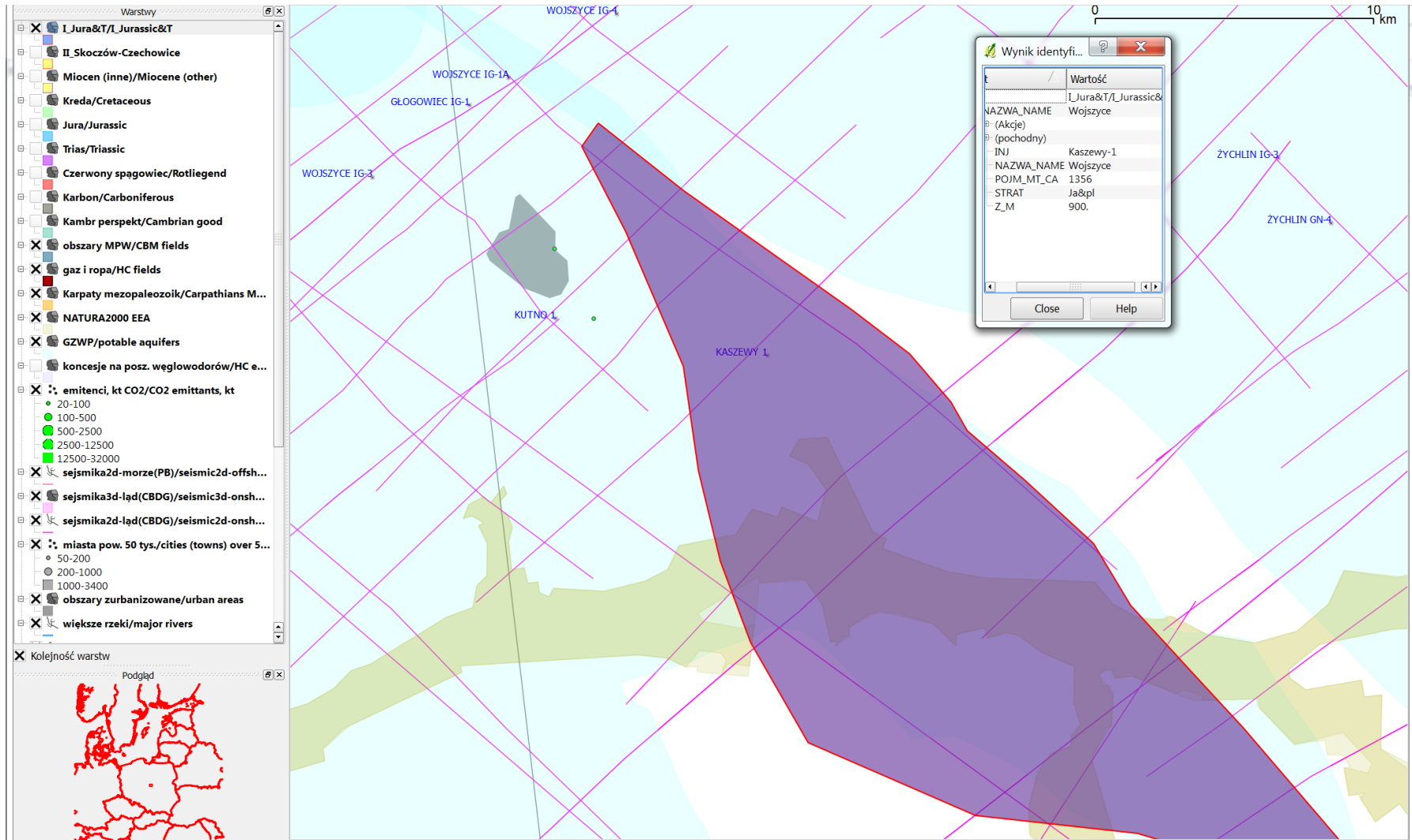


Fig. 1.1.2_6 Struktura Wojszyce (otwór Kaszewy wykonano w ramach projektu demo – Posytnik & Rosa, 2010; temperatura w stropie Ja – 35 °C)

Rejon II - GZW

(Adam Wójcicki, Janusz Jureczka)

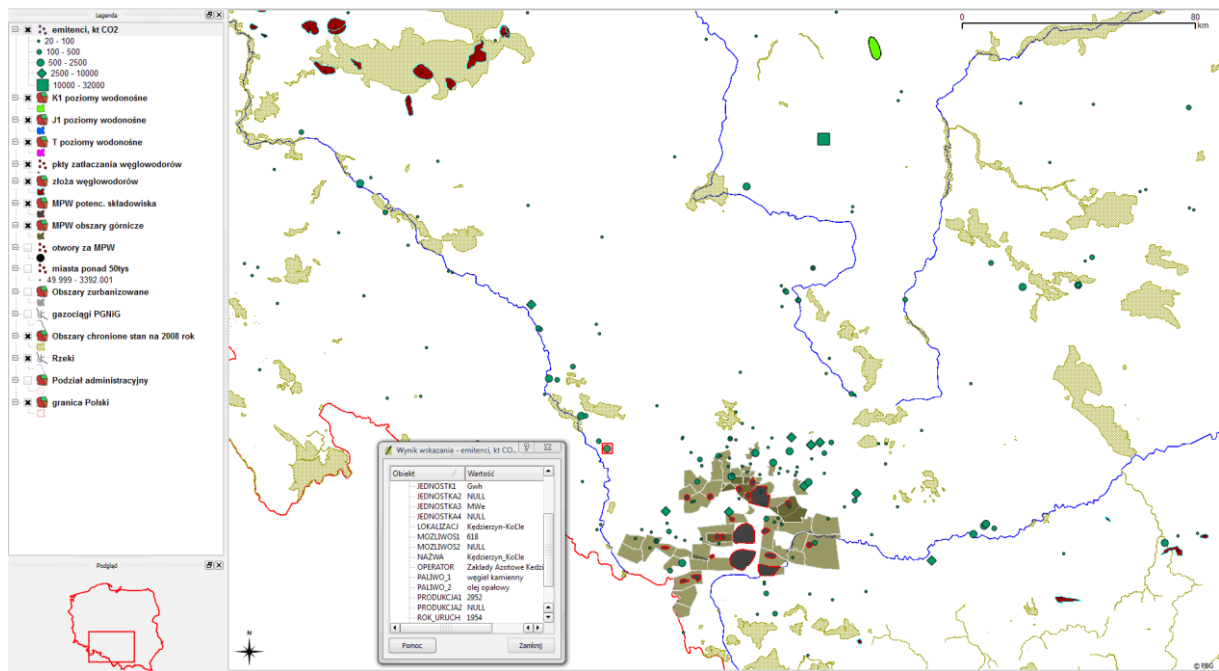


Fig.1.1.2_7 Opcje geologicznego składowania CO2 dla Polski południowej wg "Interaktywnego Atlasu prezentującego możliwości geologicznej sekwestracji CO2 w Polsce".

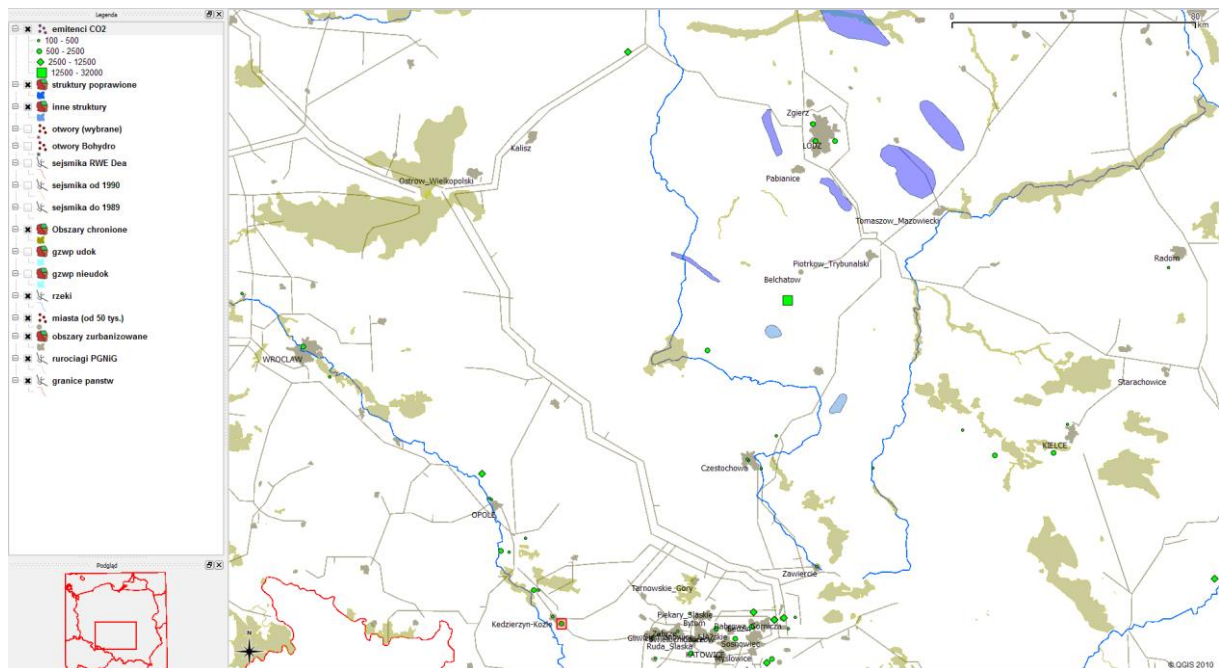


Fig.1.1.2_8 Struktury w poziomach wodonośnych solankowych analizowane dla rejonu Bełchatowa (Wójcicki (red.), 2009).

Pojemności składowania dla poziomów wodonośnych solankowych w Polsce były analizowane w ramach projektu 6PR UE CASTOR WP1.2 – PBG szacował pojemności składowania dla **12** struktur w dolnym triasie, dolnej jurze i dolnej kredzie basenu permomezoicznego (Scholtz *et al.*, 2006; Wójcicki, 2008), spośród tych wytypowanych wstępnie przez IGSMiE PAN (Tarkowski 2005). W projekcie 6PR UE EU GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen, 2008) IGSMiE analizowało opcje składowania w poziomach wodonośnych a PBG opcje dla struktur naftowych i pokładów węgla. IGSMiE przebadalo **18** struktur, w tym te analizowane w projekcie CASTOR WP1.2 (Tarkowski & Uliasz-Misiak 2006). Wykonane prace obejmują fazę rozpoznawania, rankingu i wyboru struktur – możliwych obszarów zatłaczania CO₂, wykorzystując tą samą metodykę jaką stosowano w projekcie 5PR UE GESTCO (Larsen *et al.*, 2003), nawiązującą do najlepszych praktyk projektów unijnych CO₂STORE i SACS dotyczących głębokich poziomów wodonośnych solankowych w Danii, Niemczech, Norwegii i Wielkiej Brytanii (Chadwick *et al.* 2006). Informacje z tych projektów, aktualnie zakończonych, wykorzystano ostatnio jako podstawę do opracowania „[Interaktywnego atlasu prezentującego możliwości geologicznej sekwestracji CO₂ w Polsce](#)”. Według tych wstępnych oszacowań, pojemności składowania dla znanych struktur w poziomach wodonośnych solankowych wynoszą w granicach 3752-8299 mln ton (**Fig.1.1.2_7**). Niestety dla Polski południowej nie ma na **Fig.1.1.2_8** zaznaczonych żadnych struktur w poziomach wodonośnych solankowych w pobliżu Kędzierzyna, co wynika z faktu, że analizowane były najbardziej perspektywiczne poziomy mezozoiczne (występują bardziej na północ) a nie miocen, który jak można zauważyć w poprzednim rozdziale, oraz rozdziałach **1.1.3** i **1.1.6** nie ma tak dobrych własności zbiornikowych. Pozostałe opcje, tzn. składowanie w szcerpanych złożach węglowodorów, bądź głębokich nieeksploatowanych pokładach węgla z możliwością odzysku metanu, nie są przedmiotem niniejszego opracowania (są to osobne zadania realizowane w ramach niniejszego tematu, dla których powstaną analogiczne opracowania).

W ramach I Segmentu dla rejonu Bełchatowa przeanalizowano i zweryfikowano możliwości geologicznego składowania w poziomach wodonośnych solankowych jury położonych bardziej na północ (Wójcicki (red.), 2009), gdzie udokumentowano w sposób bardzo dogłębny szereg struktur, jednakże najbliższa z nich znajduje się w odległości ponad 160 km od Kędzierzyna.

Stąd w ramach niniejszego opracowania przeanalizowano możliwości geologicznego składowania CO₂ w obszarze najbliższym elektrowni poligeneracyjnej Kędzierzyn, tzn. rejon GZW, a konkretnie jego południową część gdzie występują potencjalnie najbardziej perspektywiczne formacje zbiornikowe – warstwy dębowieckie i ewentualnie ich podłoże górnokarbońskie (krakowska seria piaskowcowa, górnośląska seria piaskowcowa). Jako jedyne potencjalne składowisko w tym rejonie w poziomach solankowych mamy obiekt Skoczów-Czechowice (**Fig.1.1.2_9**), w którym kolektorem są głównie warstwy dębowieckie dolnego miocenu, lokalnie zamarskie i ewentualnie stropowa część karbonu – o pojemności około **44 mln ton²**. Zagadnienia pojemności poszczególnych formacji i struktur w tym rejonie GZW przeanalizował szczegółowo GIG w zadaniu **1.1.24**.

² Nie jest to typowa struktura, jak np. brachyantykliny na Niżu 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 (zadanie **1.1.16**, rejon GZW), dające pojemność dynamiczną odpowiadającą połowie wolumetrycznej.

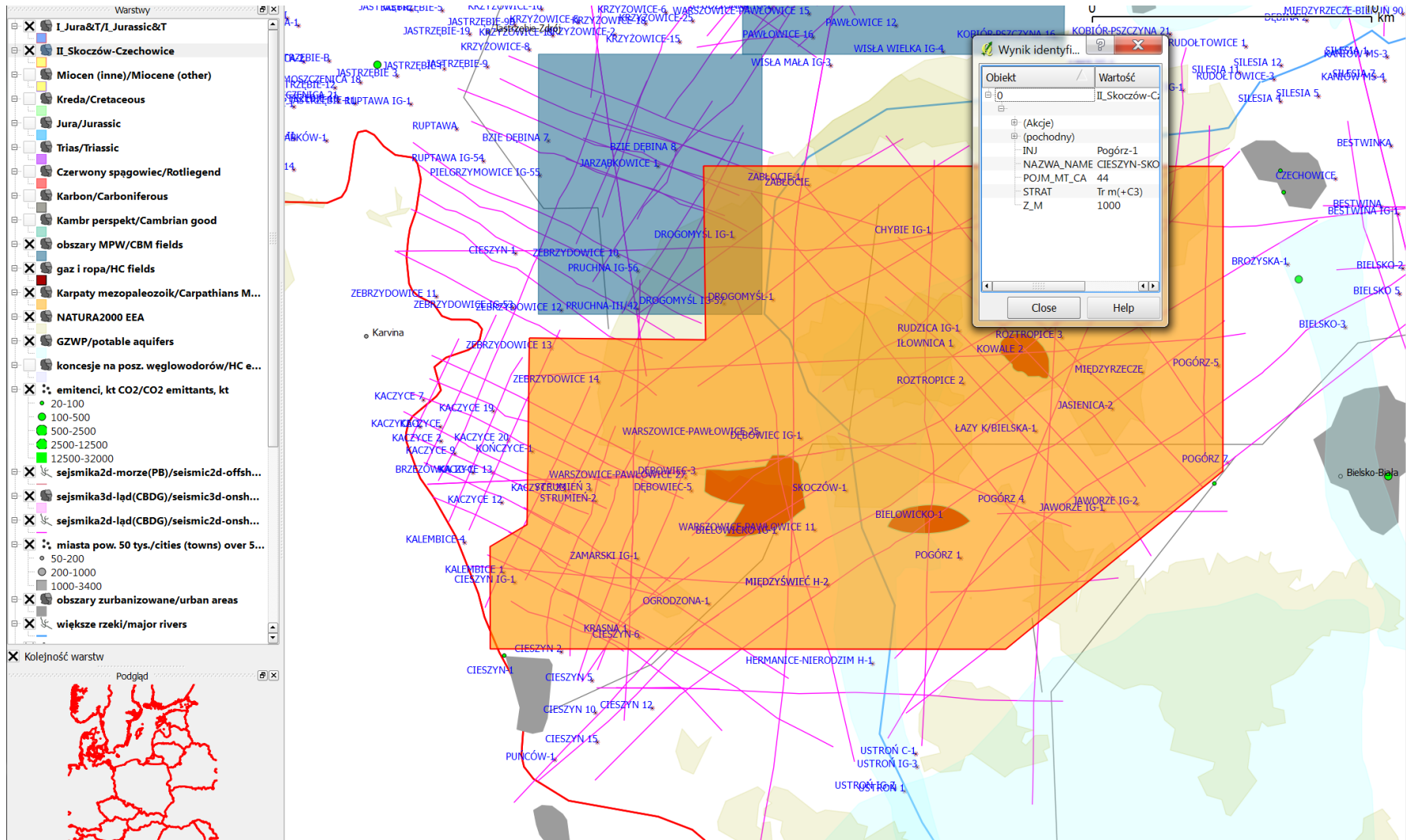


Fig. 1.1.2_9 Obiekt solankowy Skoczów-Czechowice

Rejon III - Mazowsze

(Adam Wójcicki i zespoły 1.1.3, 1.1.4, 1.1.5, 1.1.6)

Utwory dolnej kredy w rejonie Mazowsza

(Adam Wójcicki oraz Grzegorz Wróbel, Lidia Razowska-Jaworek)

Zweryfikowano w oparciu o dostępne dane geofizyczno-geologiczne lokalizację i zasięgi struktur w rejonie Mazowsza, omawianych przez IGSMiE w **1.1.19** i **1.1.23** – antykliny Bielska-Bodzanowa, Dzierżanowa, Kamionek, Lipna, Sierpca, Sochaczewa, Wyszogrodu i struktura Żyrowa.

Antykliny Lipna i Kamionek zostały odrzucone z uwagi na wysoce negatywny wskaźnik geochemiczny wód złożowych (rozdział **1.1.6** – Lidia Razowska-Jaworek), świadczący o braku szczelności nadkładu. Podobna sytuacja ma miejsce w rejonie Płońska (co potwierdzają też wyniki analiz szczelności uskoków – zadanie **1.1.4**, G. Wróbel) jak również Gostynina. Wyniki dla pozostałego obszaru sugerują lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora nowymi pracami geologiczno-geofizycznymi.

Natomiast struktura Żyrowa charakteryzuje się silnym zuskokowaniem kolektora (rozdział **1.1.3** – G. Wróbel), co stanowi bariery dla rozptywu CO₂ w obrębie struktury, zlokalizowanej w rowie (rozdział **1.1.4** - G. Wróbel) co powoduje że jej pojemność jest dość niska (uwzględniono najniższy współczynnik efektywności dla struktury).

Poniżej przedstawiono zakwalifikowane struktury, o łącznym potencjale **1978 mln ton** (podobnie jak dla rejonu Kujaw ich przydatność jest warunkowa): Bielska-Bodzanowa, Dzierżanowa, Sierpca, Sochaczewa, Wyszogrodu i Żyrowa (**Fig. 1.1.2_10-15**).

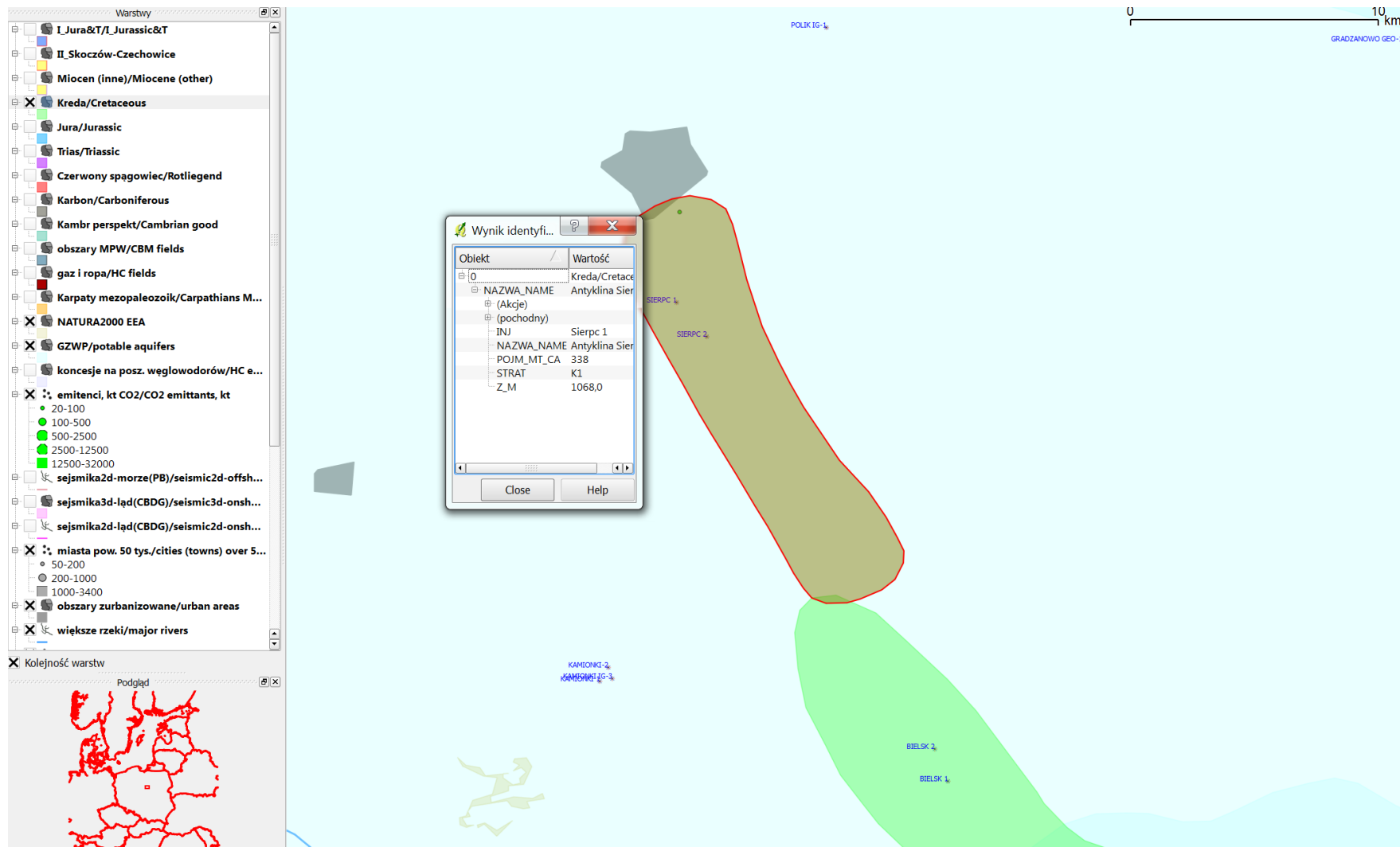


Fig. 1.1.2_10 Antyklina Sierpca w utworach dolnej kredy

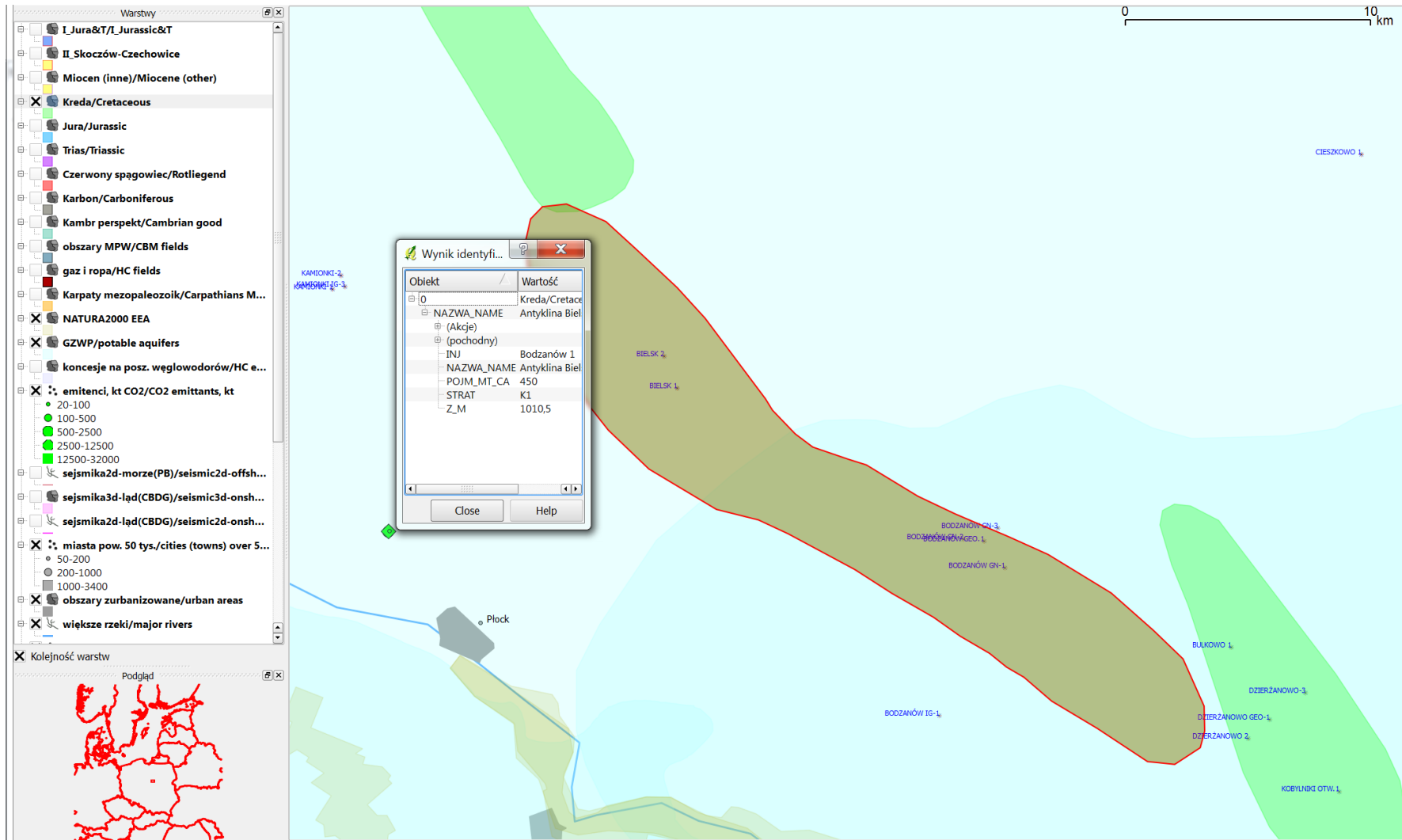


Fig. 1.1.2_11 Antyklina Bielska-Bodzanowa w utworach dolnej kredy

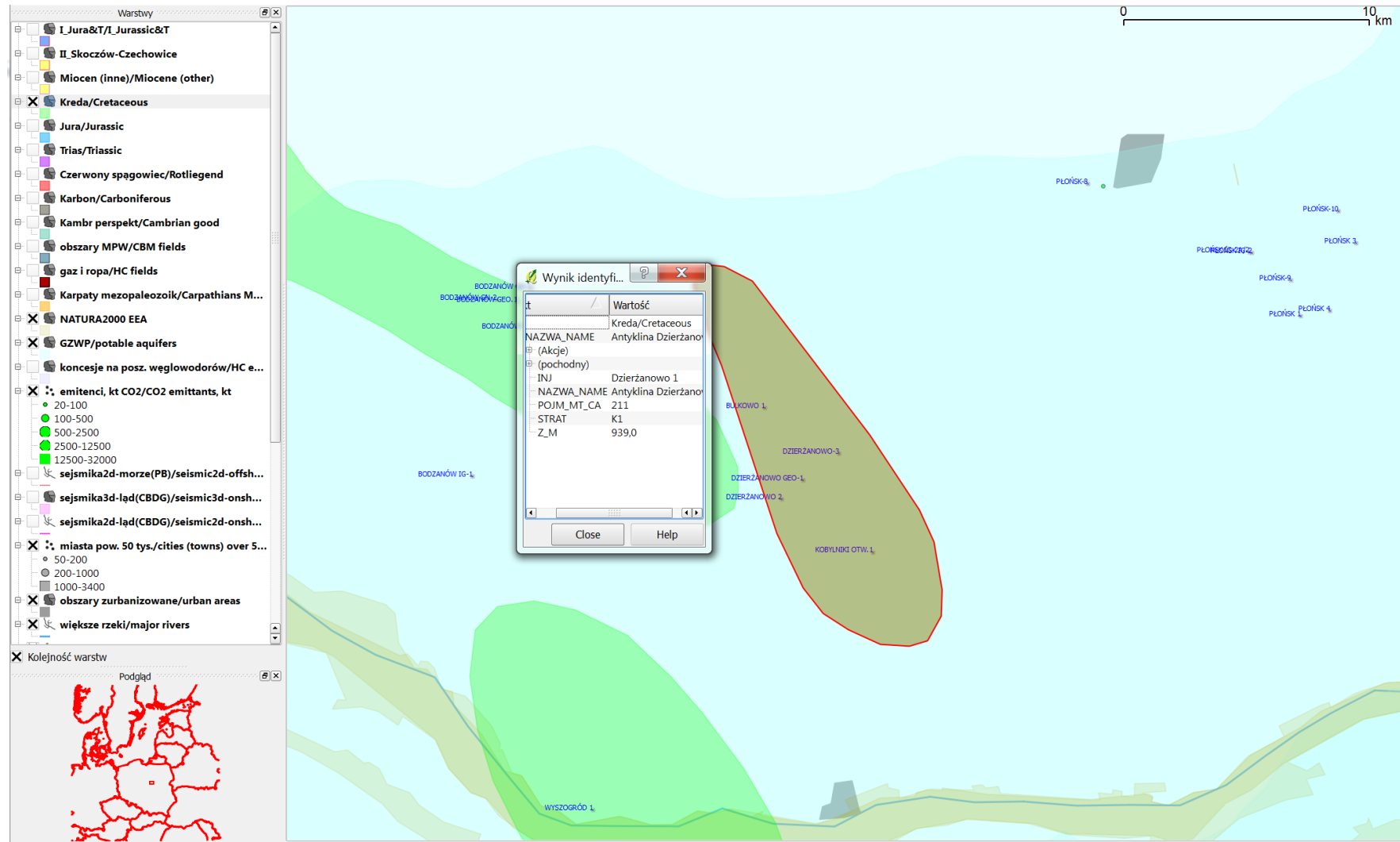


Fig. 1.1.2_12 Struktura Dzierżanowo w utworach dolnej kredy (otwór Dzierżanowo GEO-1 – temperatura 38 °C – Górecki (red.) 2006a)

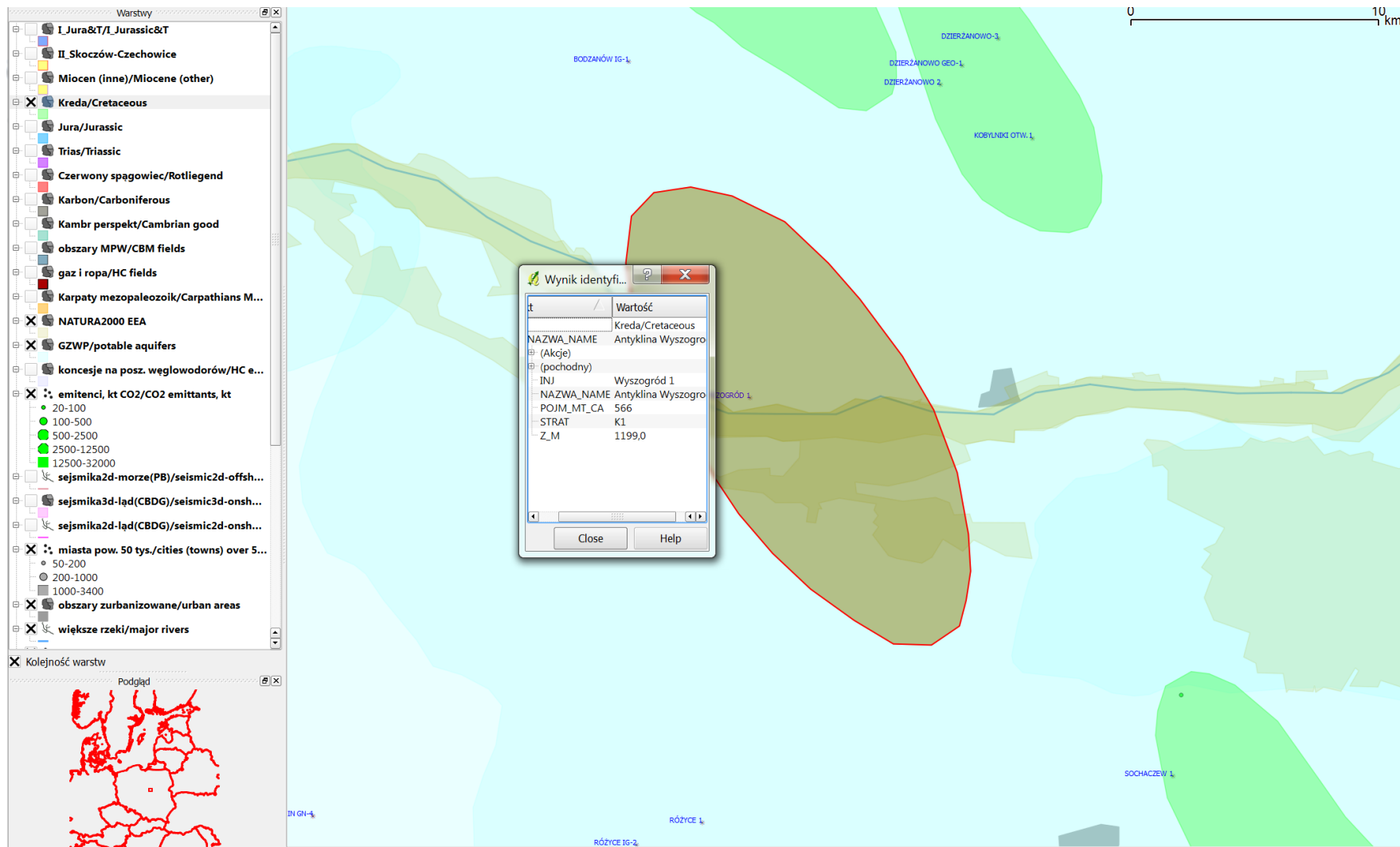


Fig. 1.1.2_13 Antyklina Wyszogrodu w utworach dolnej kredy

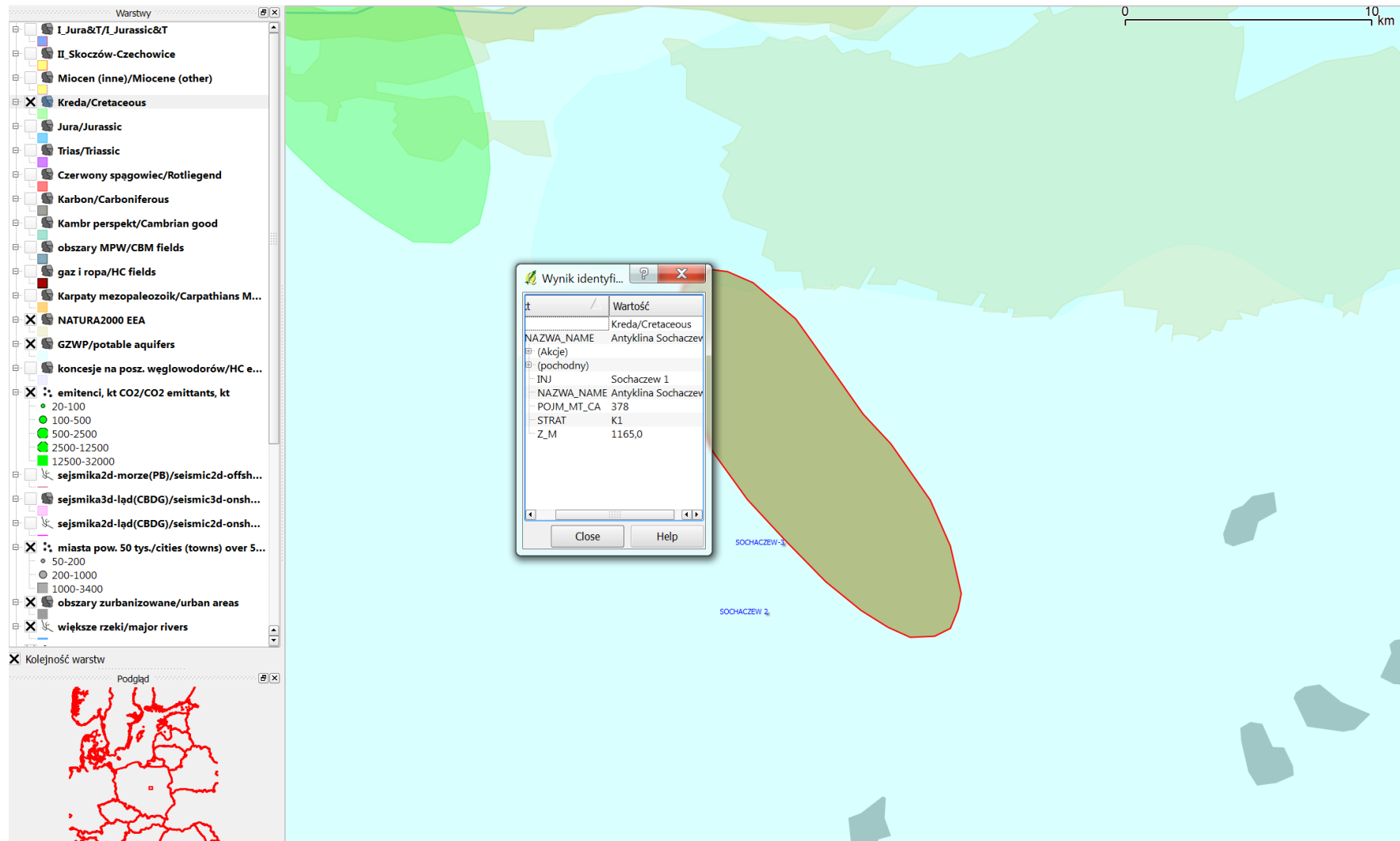


Fig. 1.1.2_14 Antyklina Sochaczewa w utworach dolnej kredy

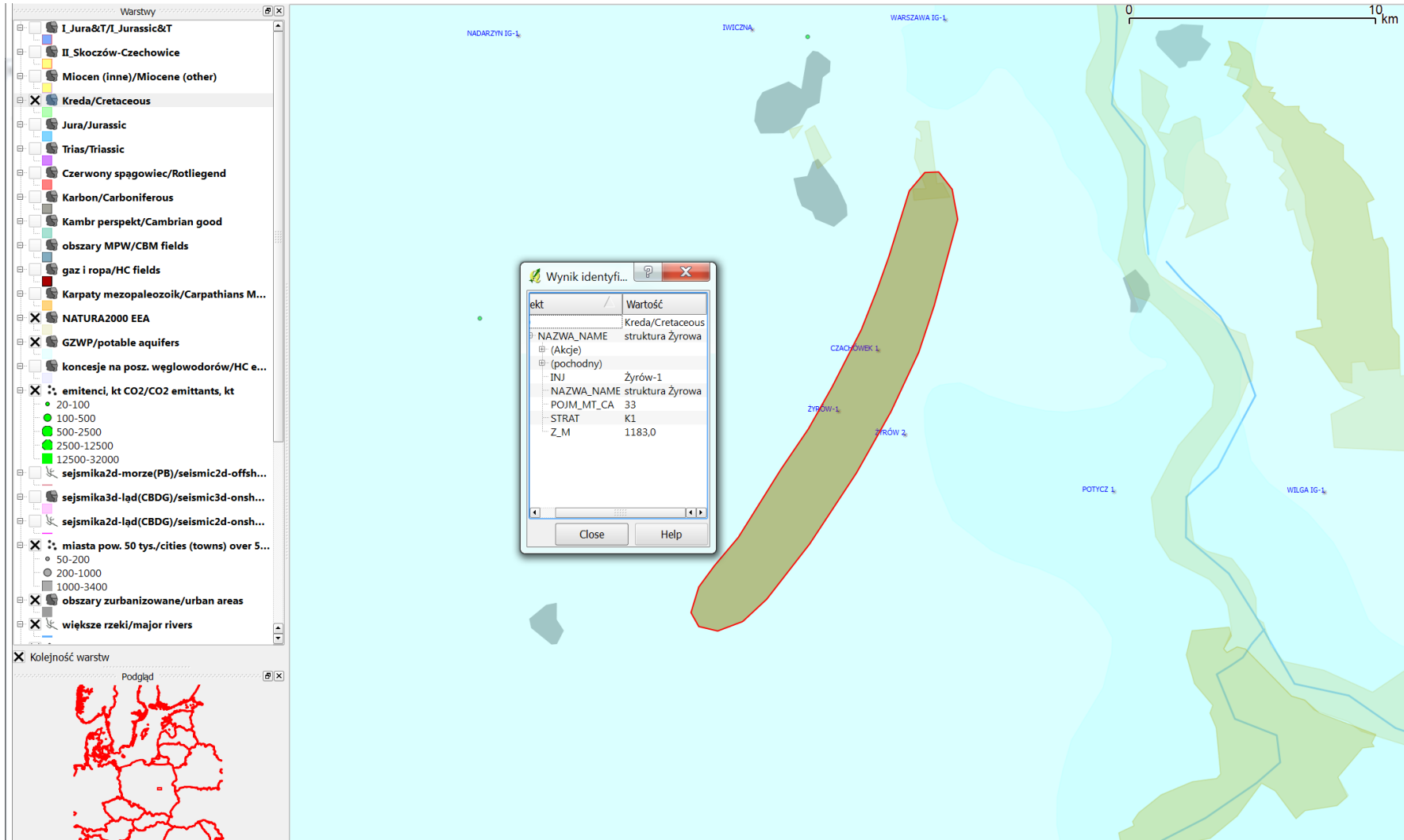


Fig. 1.1.2_15 Struktura Żyrowa w utworach dolnej kredy

Utwory jury w rejonie Mazowsza

(Adam Wójcicki oraz Anna Feldman-Olszewska, Grzegorz Wróbel, Lidia Razowska-Jaworek)

Zweryfikowano w oparciu o dostępne dane geofizyczno-geologiczne lokalizację i zasięgi struktur w rejonie Mazowsza, omawianych przez IGSMiE w **1.1.19** i **1.1.23** – antykliny Lipna, Sierpca, Bielska, Bodzanowa i Kamionek. Główne kolektory to formacja borucicka (środkowa/dolna jura, tzn. dolny aalen i górny toark) oraz głębiej formacje drzewicka, ostrowiecka, olsztyńska oraz zagajska (dolna jura). Te ostatnie jednak często zalegają na głębokościach większych od 2500 m, stąd z ekonomicznego punktu widzenia najbardziej perspektywiczna jest formacja borucicka.

Strukturę Lipna wyeliminowano z uwagi na brak dobrego uszczelnienia w utworach jury (rozdział **1.1.3** – Anna Feldman-Olszewska). Struktura ta ma słabe uszczelnienie w górnej kredzie i prawdopodobnie formacje geologiczne pomiędzy aalenem a górną kredą stanowiłyby kolektywnie dostateczną barierę, ale z punktu widzenia kryteriów CO2STORE (Chadwick et al, 2006) struktura nie kwalifikuje się z punktu widzenia bezpieczeństwa składowania CO2 i możliwości kontroli procesów zatłaczania CO2.

Dla pozostałych czterech struktur (**Fig. 1.1.15 - 18**) otrzymano sumaryczny potencjał składowania **671 mln ton**, co wynika z faktu, że są to struktury niezbyt wielkie i raczej głęboko występujące.

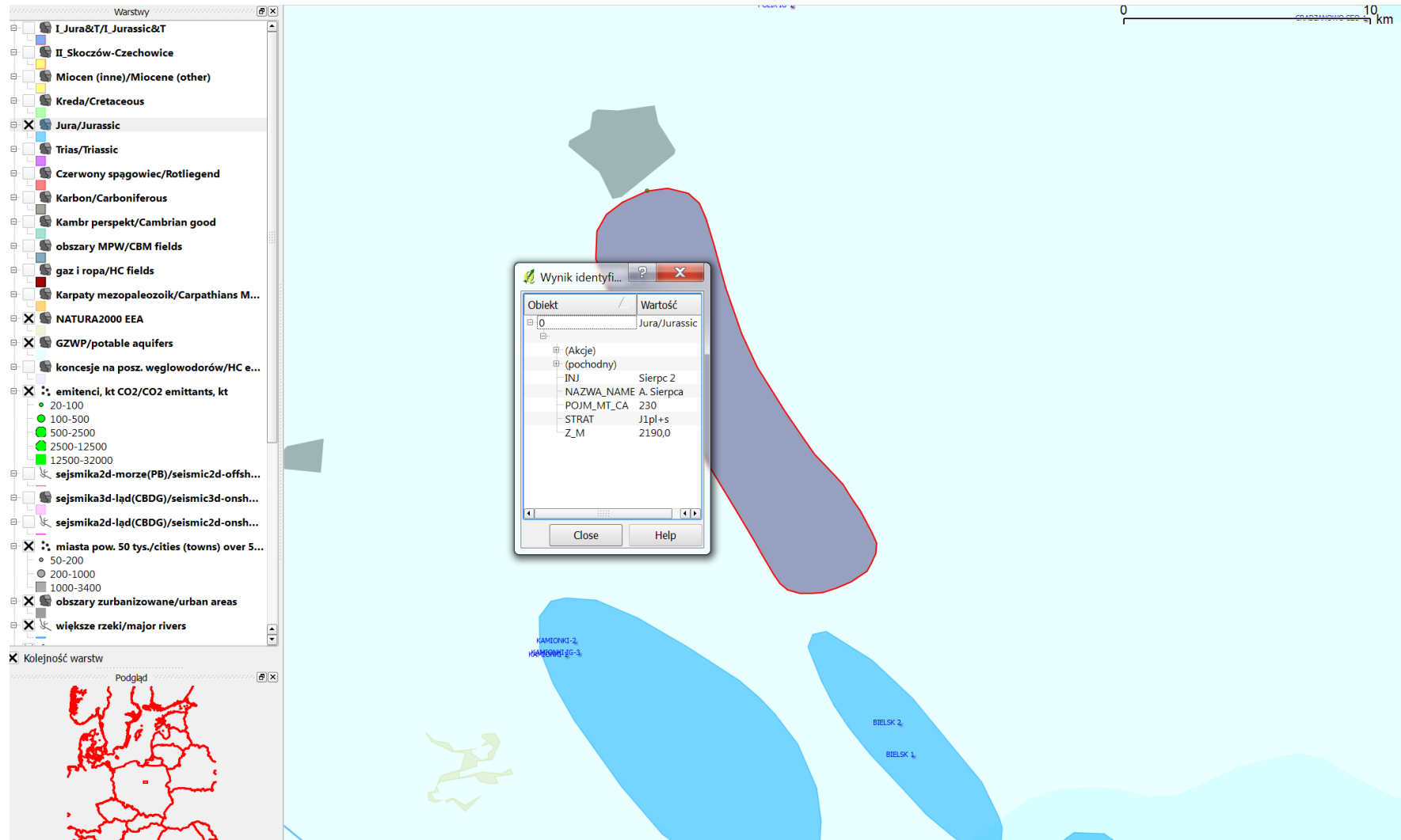


Fig. 1.1.2_15 Antyklina Sierpca w utworach jury

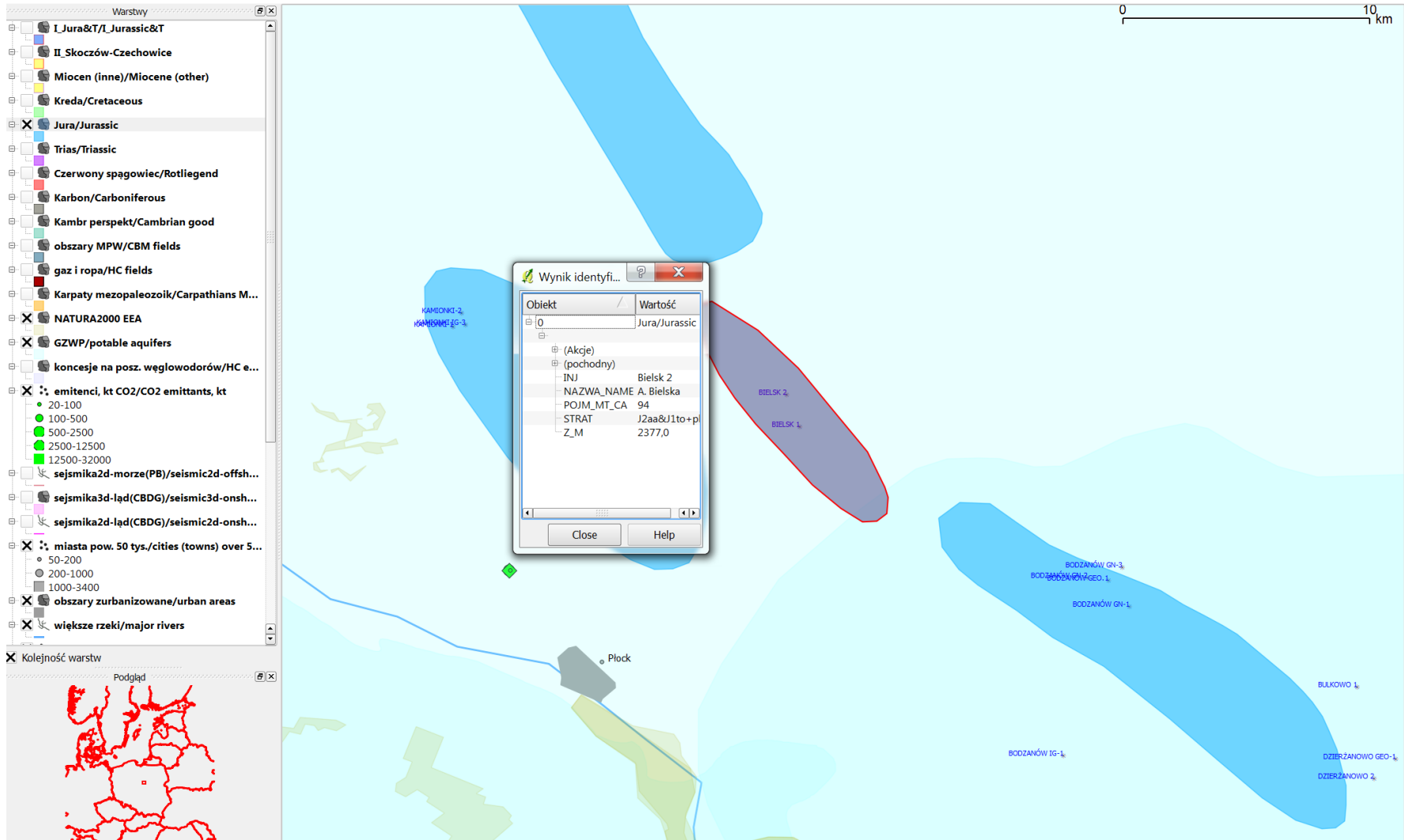


Fig. 1.1.2_17 Antyklina Bielska w utworach jury

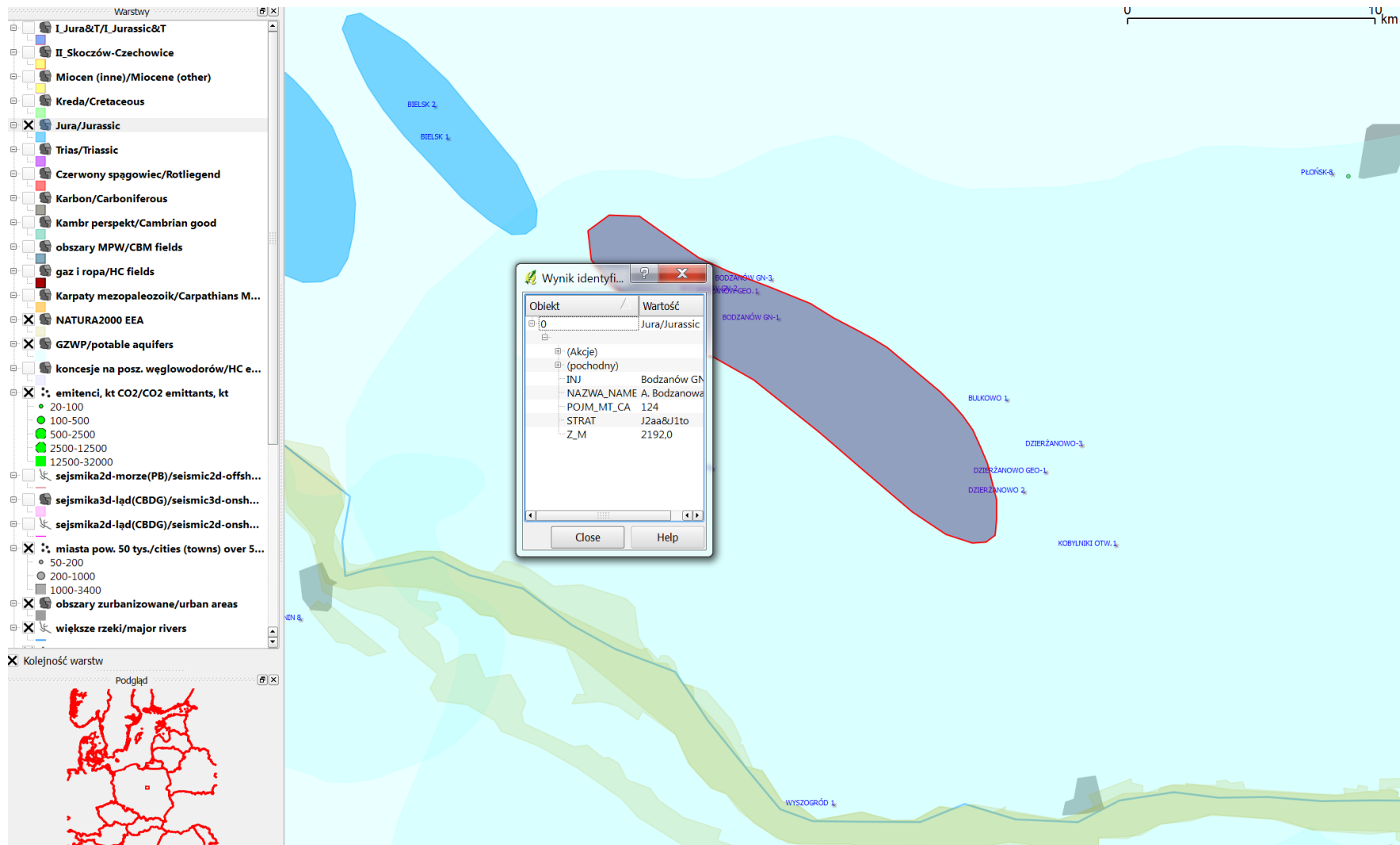


Fig. 1.1.2_17 Antyklina Bodzanowa w utworach jury

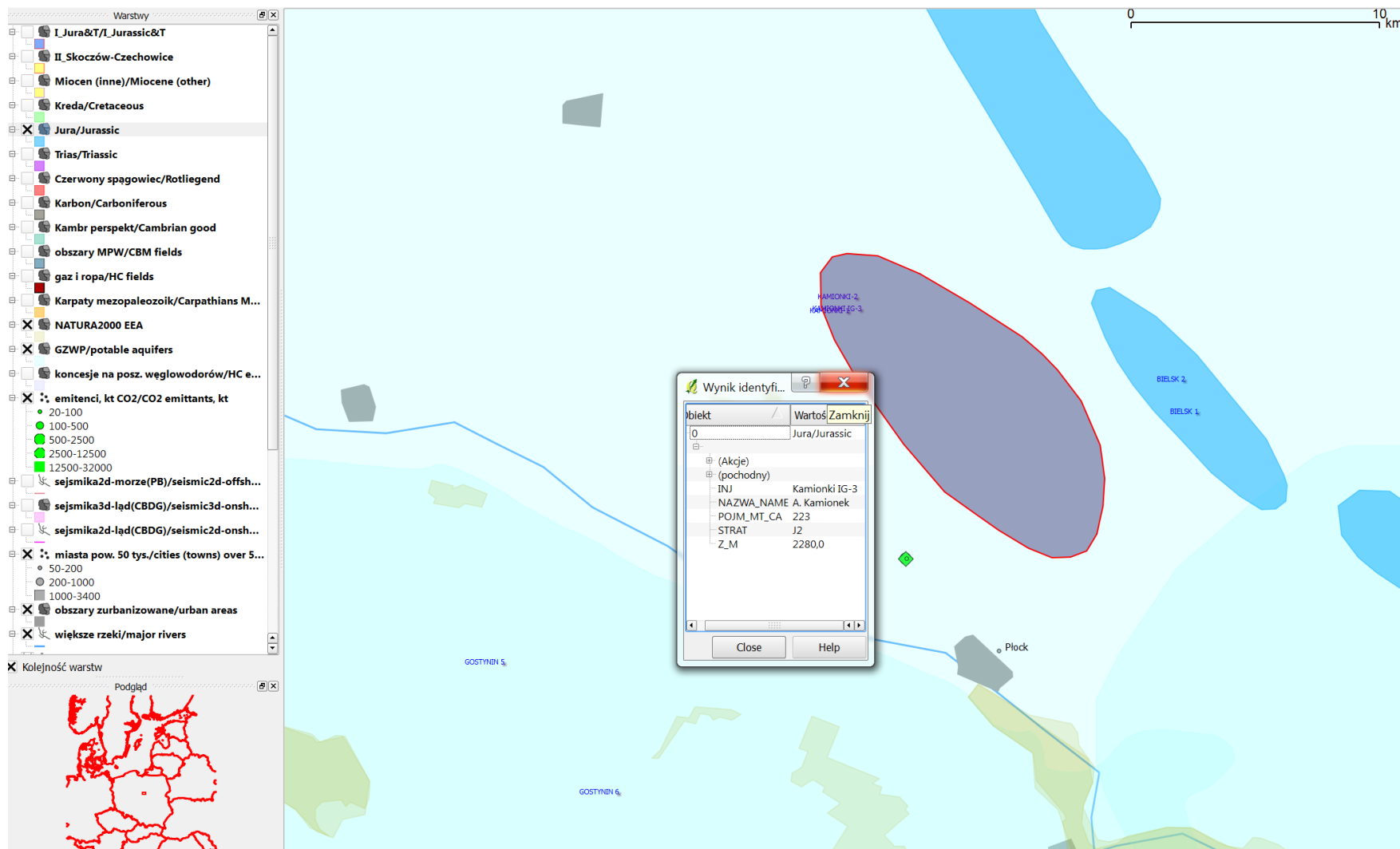


Fig. 1.1.2_18 Antyklina Kamionek w utworach jury

Utwory triasu w rejonie Mazowsza (Adam Wójcicki oraz Anna Becker)

W rejonie Mazowsza nie zakwalifikowano żadnych struktur perspektywicznych w utworach triasu (przynajmniej wg wyników zadań **1.1.19** i **1.1.23**), co wynika generalnie ze znacznej głębokości zalegania formacji triasu (zwłaszcza triasu dolnego) oraz słabych własności zbiornikowych (miąższości, porowatości, przepuszczalności).

Rejon IV - brzeżna strefa Karpat i Zapadliska Przedkarpackiego

Kompleks węglanowy

(Józef Chowaniec, Wojciech Ryłko, Anna Tomasz, Adam Tomasz)

Selekcję struktur przydatnych do składowania CO₂ oparto o podstawowe kryteria geologiczne: głębokość zalegania stropu warstwy solankowej na głębokości, co najmniej 1000 m, ale nie większej niż 3000-3200 m oraz występowanie nad jej stropem utworów nieprzepuszczalnych o miąższości nie mniejszej niż 50 m. To ostatnie kryterium jest spełnione w całym regionie IVA, gdyż wszędzie nadkład stanowi kilkusetmetrowa seria ilastych utworów miocenu (w większości warstwy skawińskie, a dodatkowo w części południowej kompleks utworów fliszowych. Również nieprzepuszczalny ekran stanowią w swojej większości utwory mezozoiku. Przyjęcie tych założeń znacznie ograniczyło możliwości wyznaczenia potencjalnych składowisk w obrębie regionu IVA (zapadlisko przedkarpackie i front Karpat zewnętrznych).

Na podstawie podanych powyżej kryteriów i po określeniu warunków geologicznych, jakie decydują o miejscu składowania oraz po uwzględnieniu aspektów środowiskowych, w tym zwłaszcza uwzględnienia obszarów silnie zurbanizowanych, do dalszych badań zostały wytypowane dwa obszary: pierwszy z nich to rejon Niepołomic „Zbiornik Niepołomice” a drugi to rejon Grobli „Zbiornik Grobla”.

Wytypowane obszary charakteryzują się rzadką zabudową i nie kolidują z występującymi na obszarze IVA rezerwatami przyrody. Częściowo jednak, ponad wytypowanymi obszarami na powierzchni terenu występują obszary Natura 2000. Na wytypowanych obszarach, jako warstwę zbiornikową (magazynową) przyjęto utwory dewońsko-karbońskiej serii węglanowej. Jej szczegółowa charakterystyka litologiczno-facjalna i petrograficzno-petrofizyczna przedstawiona została w rozdziałach 1.1.3 i 1.1.5 (Chowaniec et al. 2010a).

Pojemność podziemnego składowania dwutlenku węgla jest jednym z kluczowych czynników decydujących o przydatności struktury geologicznej do składowania. Pod pojęciem pojemności składowania CO₂ (*storage capacity CO₂*) rozumie się ilość dwutlenku węgla, jaka może być zatłoczona do danej struktury, bezpiecznie i bez skutków ubocznych dla środowiska (Uliasz-Misiak 2008a).

W głębokich solankowych poziomach dwutlenek węgla jest wiązany przy wykorzystaniu trzech głównych mechanizmów: wiązania poprzez rozpuszczanie w wodzie złożowej, mineralnego wiązania poprzez geochemiczne reakcje z płynami złożowymi i skałami zbiornikowymi oraz hydrodynamicznego pułapkowania CO₂ (Bachu ,Adams, 2003). Pojemność składowania we wszystkich rodzajach struktur geologicznych jest determinowana głównie przez: wielkość struktury, porowatość (rozumianą jako objętość porów w skale, część zbiornika, jaka może być wypełniona przez gaz) oraz założone właściwości PVT.

Dla wydzielonych zbiorników „Grobla” i „Niepołomice” oszacowano wolumetryczną pojemność składowania oraz pojemność składowania wynikającą z rozpuszczania CO₂ w wodzie złożowej.

Wolumetryczną pojemność składowania CO₂ obliczono wykorzystując metodykę zaproponowaną w projekcie EU GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen et al., 2008).

$$M_{CO_2} = S * m * \Phi * \rho_{CO_2} * C_{efs}$$

gdzie:

M_{CO_2s} – pojemność składowania CO₂ w strukturze geologicznej,

S – powierzchnia,

m – efektywna miąższość,

Φ – porowatość,

ρ_{CO_2} – gęstość CO₂ w warunkach złożowych,

C_{efs} – współczynnik efektywności składowania CO₂

lub inaczej:

$$M_{CO_2s} = V_{por} * \rho_{CO_2} * C_{efs}$$

gdzie:

V_{por} – objętość przestrzeni porowej zbiornika

Pojemność składowania CO₂ z rozpuszczania w wodzie złożowej oszacowano przy wykorzystaniu kalkulatora on-line (*Sequestration Calculators*) umieszczonego na stronach MID-CARBON. Umożliwia on wyliczenie ilości dwutlenku węgla jaka może rozpuścić się w wodzie zawartej w danej strukturze. Rozpuszczalność CO₂ w wodzie złożowej jest funkcją ciśnienia, temperatury i mineralizacji wody. Ilość dwutlenku węgla, jaka może zostać rozpuszczona w solance zwiększa się wraz ze wzrostem ciśnienia i spadkiem temperatury. Pułapkowanie przez rozpuszczanie jest procesem stałym, zależnym od czasu. Jest on najbardziej efektywny w skali długookresowej. Pojemność składowania wynikająca z rozpuszczania CO₂ jest dużo mniejsza niż pojemność składowania wolumetryczna.

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi potencjalny zbiornik CO₂, niezbędnymi do określenia jego pojemności są:

- średnia głębokość zalegania warstw zbiornikowych (H_{sr})
- efektywna miąższość (m)
- temperatura na poziomie zbiornika (T)
- ciśnienie złożowe w obrębie zbiornika (P)
- porowatość efektywna (Φ)

Średnią głębokość zalegania warstw zbiornikowych (H_{sr}) określono w oparciu analizę przekrojów geologicznych z rozdziałów 1.1.4 i 1.1.1 (Chowaniec i inni 2010a). Dla zbiornika Niepołomice wynosi ona 1500 m, natomiast dla zbiornika Grobla 2250 m.

Efektywną miąższość warstw kolektorskich określono również w oparciu o analizę przekrojów geologicznych oraz o analizę profili korelacyjnych (Chowaniec i inni 2010a). Wynosi ona odpowiednio dla zbiornika Niepołomice 641,0 m i zbiornika Grobla 885,0 m.

Temperaturę na poziomie zbiornika określono z zależności:

$$T = t_0 + G \cdot H_{\text{sr}}$$

gdzie:

T – temperatura na poziomie zbiornika

t_0 – średnia roczna temperatura na głębokości 20 m

G – gradient geotermiczny

H_{sr} – średnia głębokość zalegania warstw zbiornikowych

Wartość gradientu geotermicznego dla obszaru obu zbiorników przyjęto 0.024 °C/m (Oszczykko, Tomasz, 1976a), natomiast temperaturę na głębokości 20 m przyjęto wg. Plewy (Plewa, 1966) i wynosi ona 8 °C. Tak wyliczona temperatura wynosi dla zbiornika Niepołomice 44 °C i dla zbiornika Grobla 62 °C³.

Jako ciśnienia złożowe w obrębie zbiorników przyjęto średnie ciśnienie hydrostatyczne wyliczone dla średniej głębokości zalegania poziomu solankowego, wykorzystując średni gradient hydrostatyczny dla tego obszaru określony przez Oszczykę i Tomasia (Oszczykko, Tomasz, 1976a). Wartość tego gradientu wynosi 0,112 kG/cm₂/m. Gradient ten niewiele odbiega od teoretycznego gradientu hydrostatycznego, który wynosi 0,1 kG/cm₂/m. Tak wyliczone ciśnienia wynoszą odpowiednio 25,2 MPa dla zbiornika Grobla i 16,8 MPa dla zbiornika Niepołomice.

Określenie właściwych wartości porowatości stwarzało pewne trudności. W kolektorach o charakterze szczelinowatym, mikroszczelinowatym, a często kawernistym, wartości tych parametrów określone laboratoryjnie często w istotny sposób odbiegają od rzeczywistych. Sytuacja taka prawdopodobnie jest wynikiem specyfiki poboru prób do badań laboratoryjnych. Pobrane zostają najbardziej zwarte części rdzenia, które nie uległy destrukcji. Oznaczone tak porowatości przepuszczalności są bardzo niskie i nie odpowiadają rzeczywistym parametrom poziomu. Rzeczywiste wartości tych parametrów uzyskać można w wyniku hydrogeologicznego opróbowania poziomu (próbne pompowania, zatłaczanie), lub interpretacji profilowań geofizyki wiertniczej.

Do weryfikacji i określenia rzeczywistych wartości porowatości wykorzystano wyniki badań mikrofacjalnych. Na podstawie wyników analizy litologicznej, mikrofacjalnej i charakteru krzywych profilowań geofizycznych, postawiono granice geologiczne i wydzielono jednorodne kompleksy skalne – serie, którym nadano

³ Temperatura ta odnosi się do średniej głębokości zalegania warstw zbiornikowych, tzn. odpowiednio 1500 i 2250 m, co wiąże się z występowaniem szeregu kolektorów w obrębie miąższego kompleksu karbońsko-dewońskiego (i założenia przez autorów podrozdziału zatłaczania do jednego z głębszych poziomów kolektorskich, a nie do najpłytszego, w stropie kompleksu); w najpłytszych partiach stropu kompleksu karbońsko-dewońskiego temperatura osiąga wartość krytyczną.

oznaczenia od A do E (Chowaniec i inni, 2010a, rozdz. 1.1.3). Każda z nich posiada skróconą charakterystykę litologiczną, mikrofacjalną i jest przyporządkowana do określonego wieku. Tak wydzielonym kompleksom skalnym przypisano określone indywidualne wagi (w) zawierające się w przedziale 1,0 – 2,0. Kompleksom A i B przypisano wagę 2,0, kompleksom C i D wagę 1,25 i kompleksowi C wagę 1,75.

W oparciu o tak przypisane wagi określono średnie wartości porowatości efektywnych dla obu zbiorników z zależności:

$$\Phi = \Phi_L * (A * w_A + B * w_B + C * w_C + D * w_D + E * w_E) / (A+B+C+D+E)$$

gdzie:

Φ_L - średnia porowatość z badań laboratoryjnych

A, B, C, D, E – średnie miąższości kompleksów

w_A, w_B, w_C, w_D, w_E – wagi kompleksów

Dla zbiornika Niepołomice uzyskano wartość porowatości (efektywnej) 8%, a dla zbiornika Grobla 7,8%. Do dalszych obliczeń przyjęto wartość porowatości 8%.

Tak określone parametry zbiorników pozwalają na ich lokalizację na diagramach przemian fazowych CO₂ (Fig. 1.1.2_19, 20).

Odczytane z diagramów przejść fazowych gęstości CO₂ w warunkach złożowych wynoszą odpowiednio dla zbiornika Niepołomice 700 kg/m³, a dla zbiornika Grobla 740 kg/m³.

Podstawowe parametry przyjęte od obliczenia (M_{CO_2s}) pojemności składowania CO₂ w strukturze geologicznej dla zbiornika Niepołomice przedstawiono w Tabeli 1.1.2_1:

Tabela 1.1.2_1 Parametry zbiornika Niepołomice

Nazwa parametru	Wartość
S– powierzchnia,	269 km ²
m– efektywna miąższość	0,641 km
Φ – porowatość	8%
ρ_{CO_2} – gęstość CO ₂ w warunkach złożowych	700 kg/m ³

C_{efs} – współczynnik efektywności składowania CO ₂	0,20
---	------

Wyliczona w ten sposób pojemności składowania CO₂ w strukturze geologicznej dla zbiornika Niepołomice wynosi 1932 Mt.

Pojemność składowania CO₂ z rozpuszczania w wodzie złożowej oszacowano przy wykorzystaniu kalkulatora (*Sequestration Calculators*) umieszczonego na stronach MID-CARBON. Przyjęto następujące parametry:

Temperatura złoża – 44 °C

Mineralizacja wód złożowych – 100 g/l

Ciśnienie złożowe – 16,8 MPa

Powierzchnia zbiornika – 269 km²

Miąższość warstwy zbiornikowej – 641 m

Porowatość – 8%

W wyniku otrzymano ilość rozpuszczonego CO₂ w solance równą 639 Mt.

Całkowita ilość dwutlenku węgla możliwa do składowania w zbiorniku Niepołomice wynosi więc 2571 Mt.

Podstawowe parametry przyjęte od obliczenia (M_{CO_2s}) pojemności składowania CO₂ w strukturze geologicznej dla zbiornika Grobla przedstawiono w **Tabeli 1.1.2_2**:

Tabela 1.1.2_2 Parametry zbiornika Grobla

Nazwa parametru	Wartość
S– powierzchnia,	442,4 km ²
m– efektywna miąższość	0,885 km
Φ– porowatość	8%
ρ_{CO_2} – gęstość CO ₂ w warunkach złożowych	740 kg/m ³
C_{efs} – współczynnik efektywności składowania CO ₂	0,20

Wyliczona w ten sposób pojemności składowania CO₂ w strukturze geologicznej dla zbiornika Grobla wynosi 4426 Mt.

Pojemność składowania CO₂ z rozpuszczenia w wodzie złożowej oszacowano przy wykorzystaniu kalkulatora (*Sequestration Calculators*) umieszczonego na stronach MID-CARBON. Przyjęto następujące parametry:

Temperatura złoża – 62 °C

Mineralizacja wód złożowych – 100 g/l

Ciśnienie złożowe – 25,2 MPa

Powierzchnia zbiornika – 422,4 km²

Mięższość warstwy zbiornikowej – 885 m

Porowatość – 8%

W wyniku otrzymano ilość rozpuszczonego CO₂ w solance równą 1077 Mt.

Całkowita ilość dwutlenku węgla możliwa do składowania w zbiorniku Grobla wynosi więc 5503 Mt.

Lokalizację zbiorników wraz z ich pojemnościami składowania przedstawiono na **Fig. 1.1.2_21**.

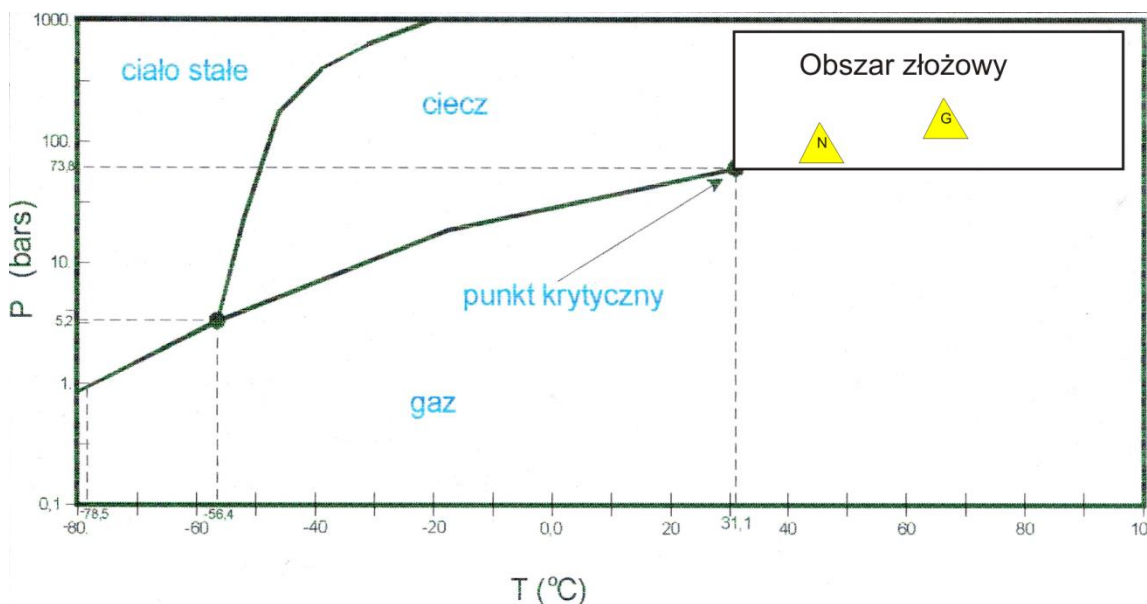
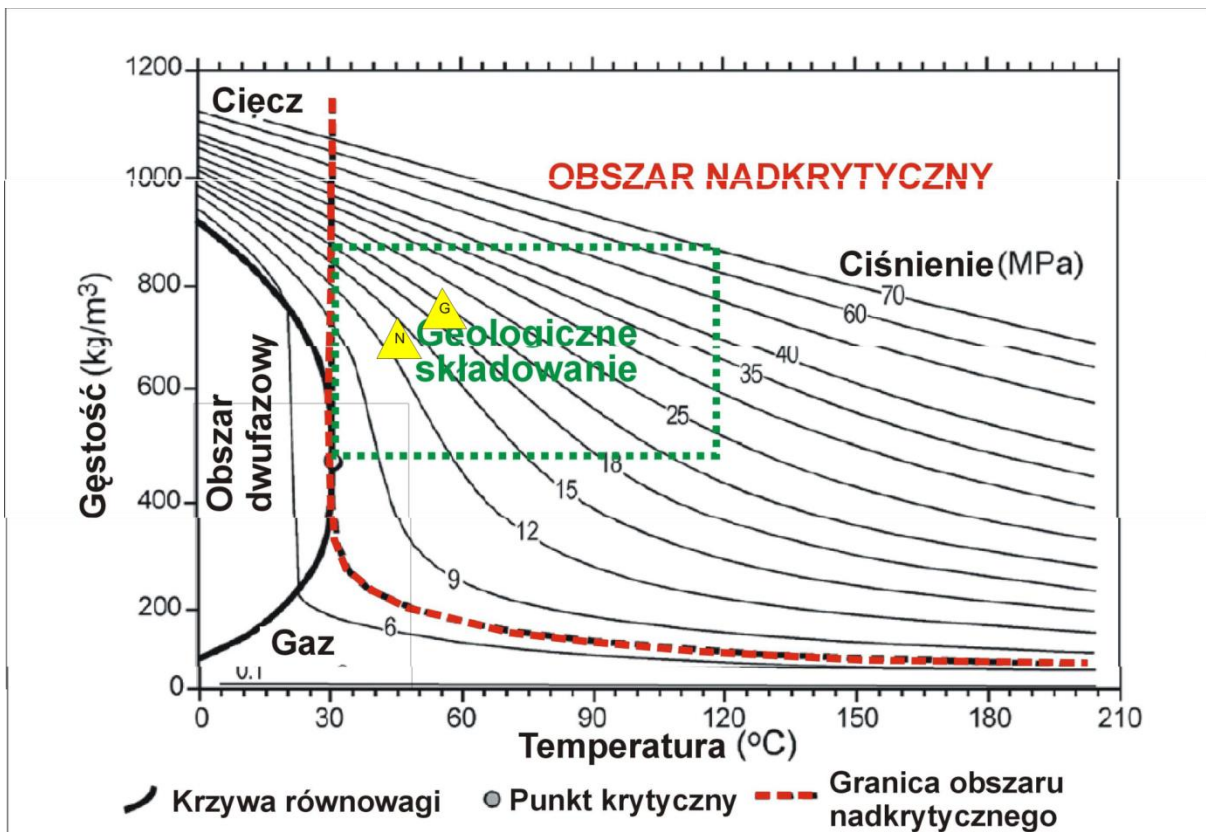


Fig. 1.1.2_19 Diagram przemian fazowych CO₂ (za IPCC, 2007)



 Zbiornik Grobla

 Zbiornik Niepołomice

Fig. 1.1.2_20 Diagram fazowy CO₂ – zależność gęstości CO₂ od temperatury i ciśnienia złożowego (za IPCC, 2007)

LOKALIZACJA ZBIORNIKÓW NIEPOŁOMICE I GROBLA NA TLE SZKICU ADMINISTRACYJNO GOSPODARCZEGO

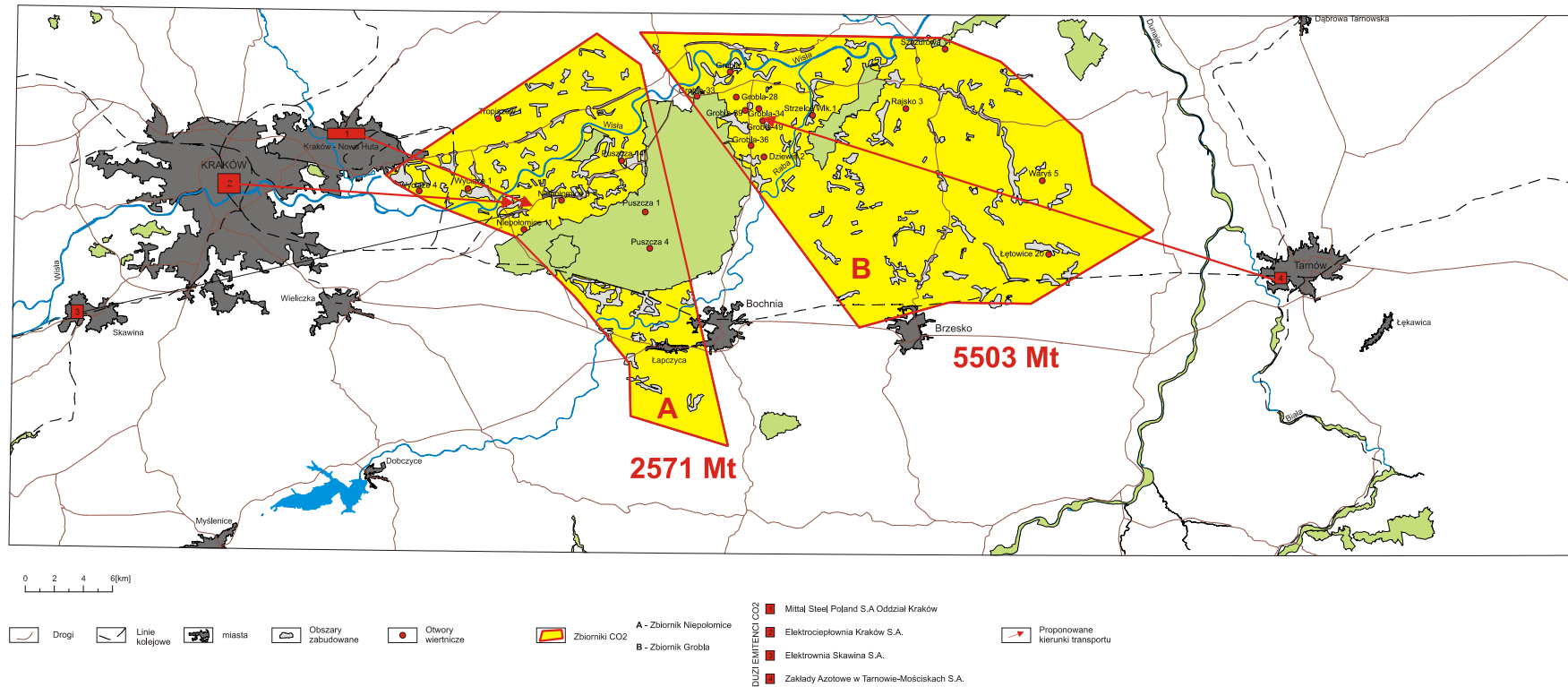


Fig. 1.1.2_21 Lokalizacja zbiorników Niepołomice i Grobla

Kompleksy klastyczne i podsumowanie (Adam Wójcicki i zespół 1.1.3)

W rozdziale **1.1.3** dla rejonu IVA analizowany był ponadto rejon Zatoki Gdowskiej, zazębiający się częściowo z obszarem zbiornika Niepołomice, omawianego powyżej. Kolektorem w rejonie Zatoki Gdowskiej są utwory piaskowców i zlepieńców jury klastycznej, zasadniczo środkowej.

Własności kolektora zmieniają się od przeciętnych do dobrych a rozpatrywany obszar jest relatywnie niewielki. Nie jest to typowa struktura typu antykliny jak na Niżu ale raczej obszar/obiekt jak w przypadku rejonu GZW (Skoczowa-Czechowic). Stąd efektywność składowania odpowiada tu raczej wartościom dla fragmentu regionalnego zbiornika – formacji geologicznej niż dla pojedynczej dobrej struktury, choć jak wspomniano, własności zbiornikowe kolektora są raczej dobre, przynajmniej w rejonie wytypowanym do zatłaczania (**Fig. 1.1.2_22**). Pojemność obiektu jest niezbyt duża – niewiele ponad 50 mln ton.

Natomiast kompleksy węglanowe scharakteryzowane na poprzednich stronach (Chowaniec i in. – zespół Oddziału Karpackiego PIG – nie ingerowano w opracowanie autorskie, pozostawiając dla porównania bardziej optymistyczny punkt widzenia) wydają się mieć przeszacowany potencjał składowania. W przypadku ośrodka szczelinowo-porowego, jakim są węglany porowatość efektywna jest bardzo zmienna i raczej niska (ale z kolei zatłaczanie CO₂ i związane z tym zjawiska reaktywności CO₂-solanka-skała zbiornikowa powodują polepszenie własności zbiornikowych – kolektor węglanowy występuje np. w złożu ropy Nosówka, dla którego przeprowadzono analizy szczegółowe w ramach II Segmentu, w tym symulacje zatłaczania w zadaniu **1.1.16**, otrzymując bardzo obiecujące wyniki), co zresztą potwierdzają analizy przedstawione w rozdziale **1.1.5** dla rejonu IVA. Ponadto efektywność składowania odpowiada tu raczej wartościom dla fragmentu regionalnego zbiornika – formacji geologicznej niż dla pojedynczej dobrej struktury. Natomiast bezpieczeństwo składowania zapewniają miększe kompleksy uszczelniające miocenu, a także utwory nasunięcia Karpat (w skrajnie południowej części obu obszarów).

W związku z powyższym przyjęto efektywność składowania o rząd wielkości niższą, podobnie jak efektywną miąższość kolektorów w obrębie węglanowego kompleksu dewońsko karbońskiego. Otrzymane pojemności nie przekraczają 100 mln ton dla obu obiektów (zbiorników Niepołomice i Grobla - **Fig. 1.1.2_23 i 24**).

W zadaniu **1.1.23** IGSMiE przeanalizował struktury solankowe we wschodniej części brzeżnej strefy Karpat/Zapadliska (**Fig. 1.1.2_25**), przy lub w obrębie złóż gazu (poziomy kolektorskie niewypełnione gazem). Chociaż lokalnie przy złożach gazu (ale dalej już raczej nie) własności zbiornikowe kolektorów mioceńskich są stosunkowo dobre (podobnie jak np. dla jury w rejonie Zatoki Gdowskiej) to z uwagi na małą ich miąższość otrzymane pojemności są bardzo małe – największe dla struktury Malawa – 14 mln ton, pozostałe mają parę mln ton albo poniżej 1 mln. Z punktu widzenia sekwestracji są one nieistotne, chyba że byłyby traktowane łącznie z sąsiednimi złożami gazu. W sumie dla wschodniej części brzeżnej strefy Karpat/Zapadliska otrzymano dla nich pojemność składowania poniżej 25 mln ton. W rozdziale **1.1.1** ten rejon wschodni (IVB) został określony jako nieperspektywiczny w przypadku geologicznego składowania CO₂ w poziomach solankowych.

Podsumowując dla całej brzeżnej strefy Karpat/Zapadliska potencjał składowania w poziomach solankowych wynosi **253 mln ton**, co odpowiada jednej przeciętnej strukturze mezozoicznej na Niżu Polskim.

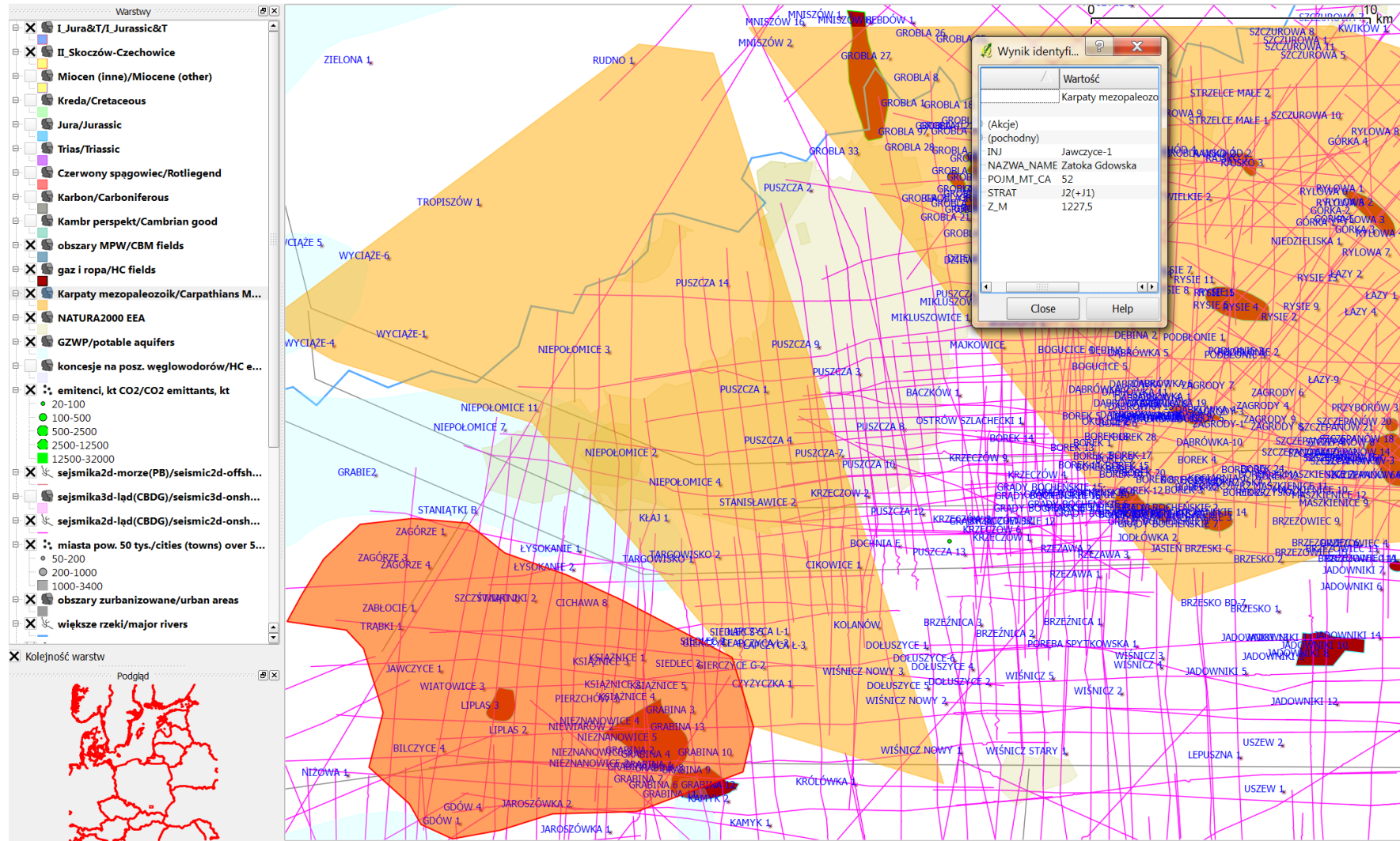


Fig. 1.1.2_22 Obiekt solankowy Zatoka-Gdowska (jura klastyczna)

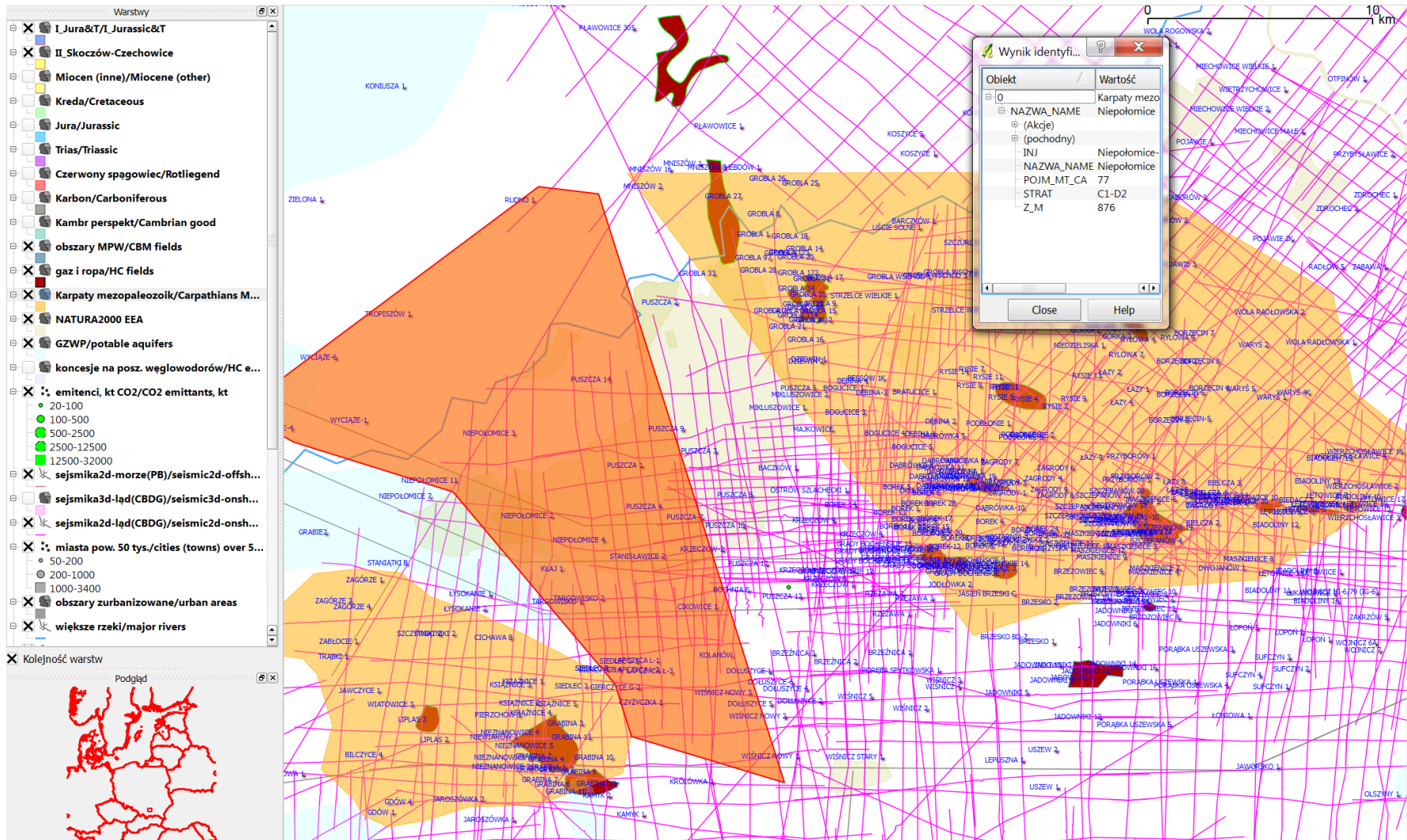


Fig. 1.1.2_23 Obiekt solankowy Niepołomice (karbońsko-dewoński kompleks węglanowy)

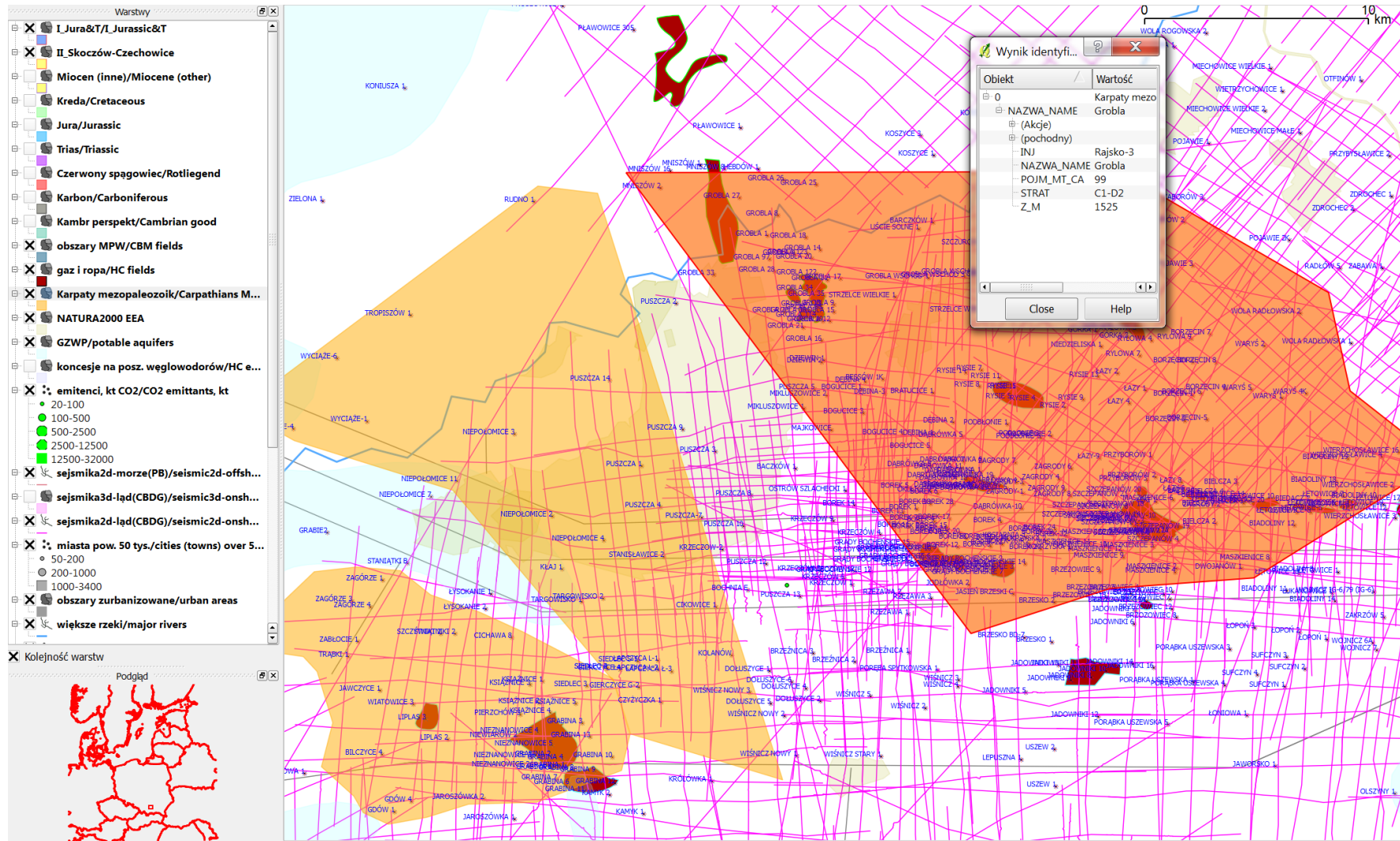


Fig. 1.1.2_24 Obiekt solankowy Grobla (karbońsko-dewoński kompleks węglanowy)

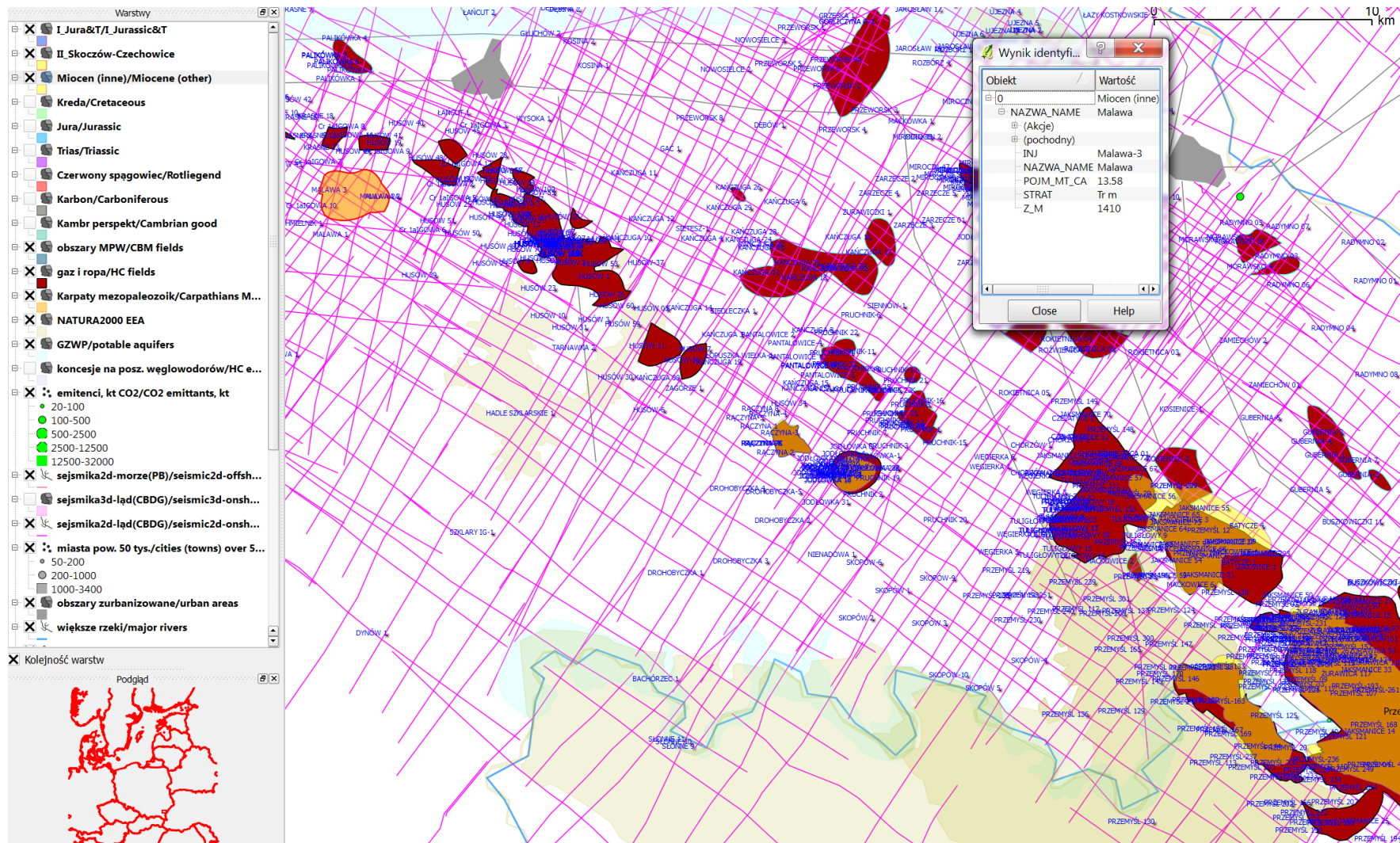


Fig. 1.1.2_25 Struktury solankowe w miocenie we wschodniej strefie frontu Karpat

Rejon V - Lubelszczyzna (i Podlasie)

(Adam Wójcicki oraz Maria Waksmundzka, Krzysztof Czuryłowicz, Jolanta Paczeńska)

Utwory karbonu

W zadaniu **1.1.23** IGSMiE analizował obiekty/struktury solankowe w utworach karbonu górnego na północ, NW i zachód od Lublina: blok Stężycy, blok Rycic, blok Baranowa, blok Abramowa, blok ĆSM.

W oparciu o analizy wykonane w rozdziale **1.1.3** dla rejonu Lubelszczyzny dla utworów karbonu (M. Waksmundzka) oraz model kolektorów i uszczelnień karbonu wykonany w rozdziale **1.1.8** dla tego rejonu (Krzysztof Czuryłowicz) dokonano weryfikacji stref perspektywicznych dla geologicznego składowania CO₂.

Na podstawie tych informacji wykreślono obszar perspektywiczny, w którym występują odpowiednie facje kolektorskie i uszczelnienia. Obszar ten rozciąga się od Stężycy do Lublina i dalej na wschód/północny wschód (**Fig. 1.1.2_26**). Problem stanowi fakt znacznej zmienności parametrów zbiornikowych w pionie i poziomie kompleksu namursko-westfalskiego i istnienie wielu poziomów kolektorskich o niewielkiej miąższości. Stąd podano wartość dla kolektora regionalnego, która ma charakter orientacyjny i odnosi się raczej do dolnej granicy pojemności składowania całej strefy perspektywicznej (**193 mln ton**).

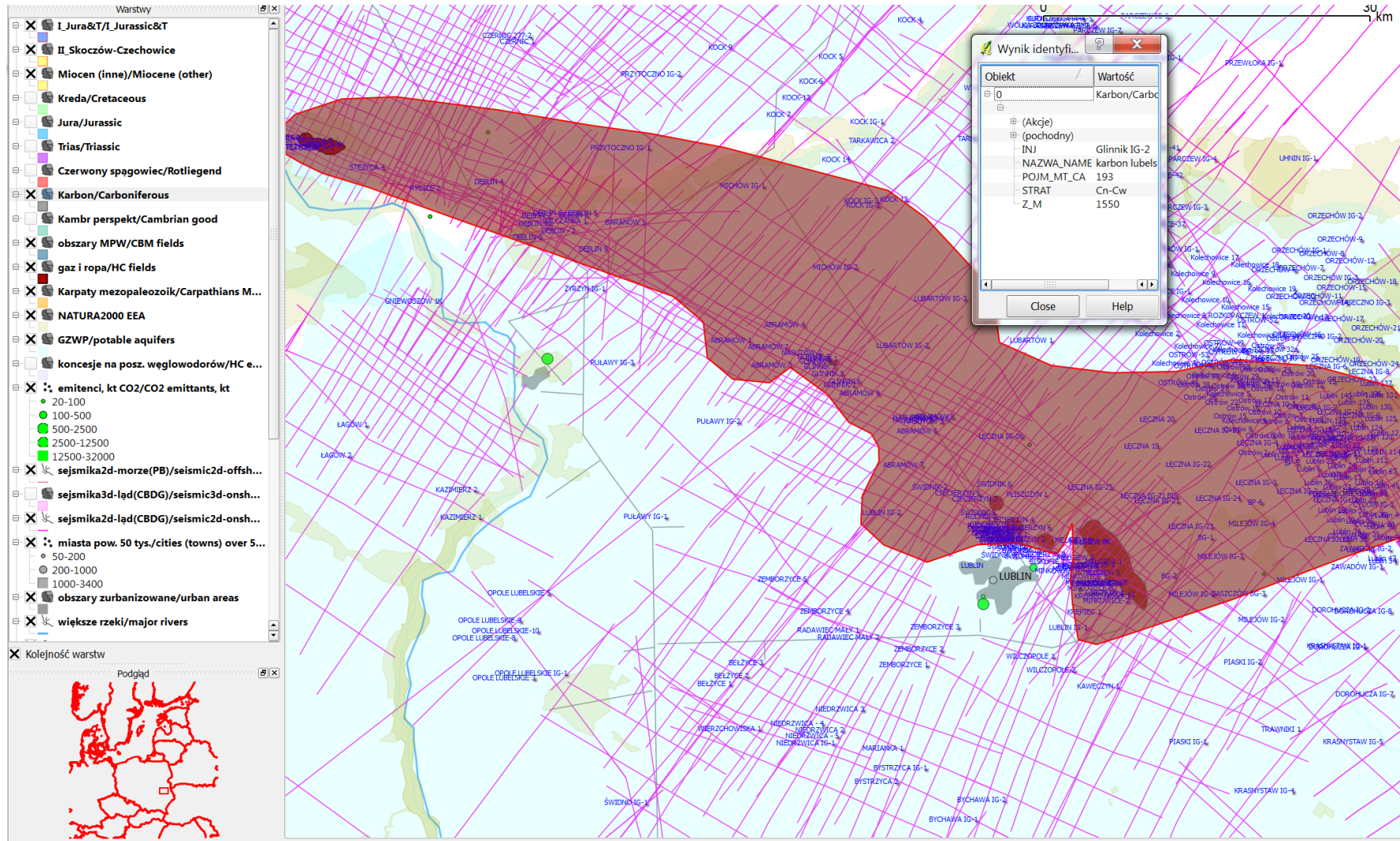


Fig. 1.1.2_26 Obszar perspektywiczny dla składowania CO2 w karbonie, w rejonie Lubelszczyzny

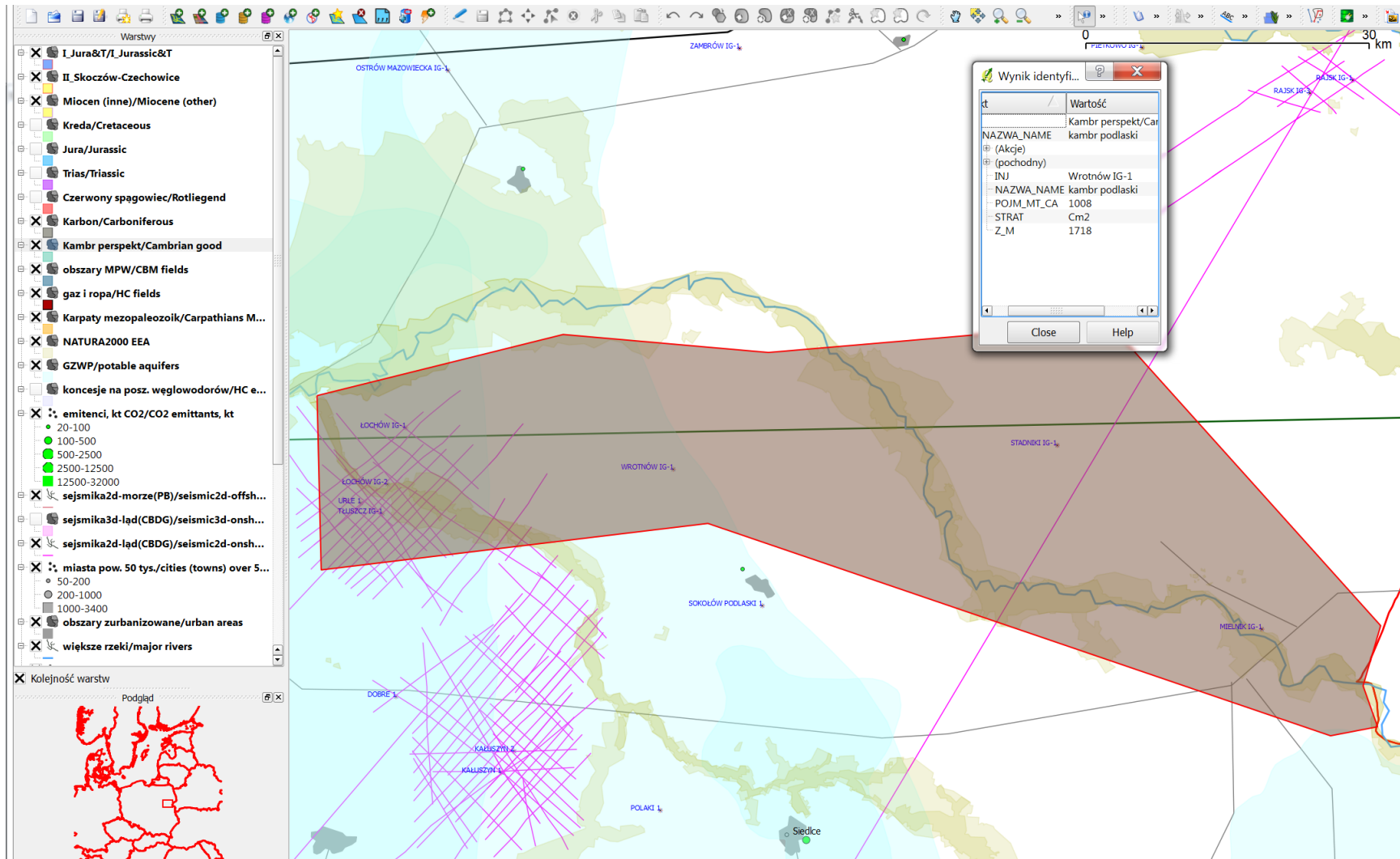


Fig. 1.1.2_27 Obszar perspektywiczny dla składowania CO2 w kambrze, w rejonie Podlasia

Utwory kambru

Natomiast w rejonie Podlasia w rozdziale **1.1.1** (Jolanta Paczeńska) stwierdzono w kilku otworach, niekiedy znacznie oddalonych od siebie, występowanie dwóch piaskowcowych poziomów kolektorskich kambru o miąższości sumarycznej wynoszącej co najmniej 200 metrów i dobrych własnościach zbiornikowych. Jednakże obszar ten (**Fig. 1.1.2_27**) prawie nie jest rozpoznany sejsmiką (tylko skrajnie zachodni fragment) i stad jedyne wiarygodne informacje na temat budowy strukturalnej kompleksu kambryjskiego pochodzą właściwie tylko z ekstrapolacji danych ze wspomnianych otworów. Mamy tu, więc kolektor regionalny, a właściwie kilka mniejszych obszarów wokół otworów Tłuszcz IG1, Łochów IG1, Łochów IG 2, 7- Wrotnów IG 1, Stadniki IG 1, 10-Mielnik IG.

Stąd podana, dość znaczna, wartość dla kolektora regionalnego (**Fig. 1.1.2_27**) ma charakter bardzo orientacyjny (przyjęto niski współczynnik efektywności z uwagi na fakt, że mamy kolektor regionalny, ponadto prawdopodobnie występujący w obrębie stref rowów i horstów podłoża prekambryjskiego) i odnosi się raczej do dolnej granicy pojemności składowania całej strefy perspektywicznej (**1008 mln ton**).

Rejon VI - Wielkopolska - Kujawy

Kompleks czerwonego spągowca (Adam Wójcicki, Hubert Kiersnowski)

Analizowano następujące struktury/obiekty solankowe w utworach piaskowcowych (górnego) czerwonego spągowca:

- Grodzisk-Ujazd-Bukowiec-Paproć (megastruktura Niecki Poznańskiej)
- Kowalowo (niedaleko złóż gazu Wiewierz i Żuchłów)
- Radnica (na ENE od Krosna Odrzańskiego)
- Stare Kramsko (koło Babimostu)
- Dachów (na wschód od Gubina)
- Nowa Sól

Struktury Stare Kramsko, Dachów i Nowa Sól zostały odrzucone z uwagi na słabe własności zbiornikowe, zasadniczo poniżej wartości granicznych/ostrzegawczych podręcznika najlepszych praktyk CO2STORE (Chadwick et al., 2006) oraz relatywnie słabe rozpoznanie sejsmiką.

W ramach zadania **1.1.3** dla obszaru VI, dla utworów permu (H. Kiersnowski) analizowano ponadto złożę gazu Bogdaj-Uciechów gdzie poziom gazonośny podściela solanka, ale złoża gazu, jako inny typ potencjalnych składowisk, są rozpatrywane w osobnym podrozdziale poniżej.

Megastruktura Niecki Poznańskiej (**Fig. 1.1.2_28**) charakteryzuje się dostatecznymi, lokalnie raczej dobrymi własnościami zbiornikowymi (zadanie **1.1.22** i **1.1.15**) i szczelnym nadkładem (**zadanie 1.1.4**). Występuje stosunkowo głęboko, na granicy zalecanej przydatności do sekwestracji, ale za to posiada ogromny potencjał składowania.

Struktura Kowalowo(**Fig. 1.1.2_29**) posiada raczej dobre własności zbiornikowe i mięszszy nadkład cechsztyński. Występuje stosunkowo płytko, w otoczeniu/sąsiedztwie złóż gazu w południowej części Monokliny Przedsudeckiej.

Obiekt Radnica(**Fig. 1.1.2_30**) 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.

Podsumowując, bilans pojemności składowania struktur/obiektów w poziomach solankowych czerwonego spągowca zamyka się w naszym przypadku liczbą **1014 mln ton**, co należy traktować jak dolną granicę, umiarkowanie pesymistyczną.

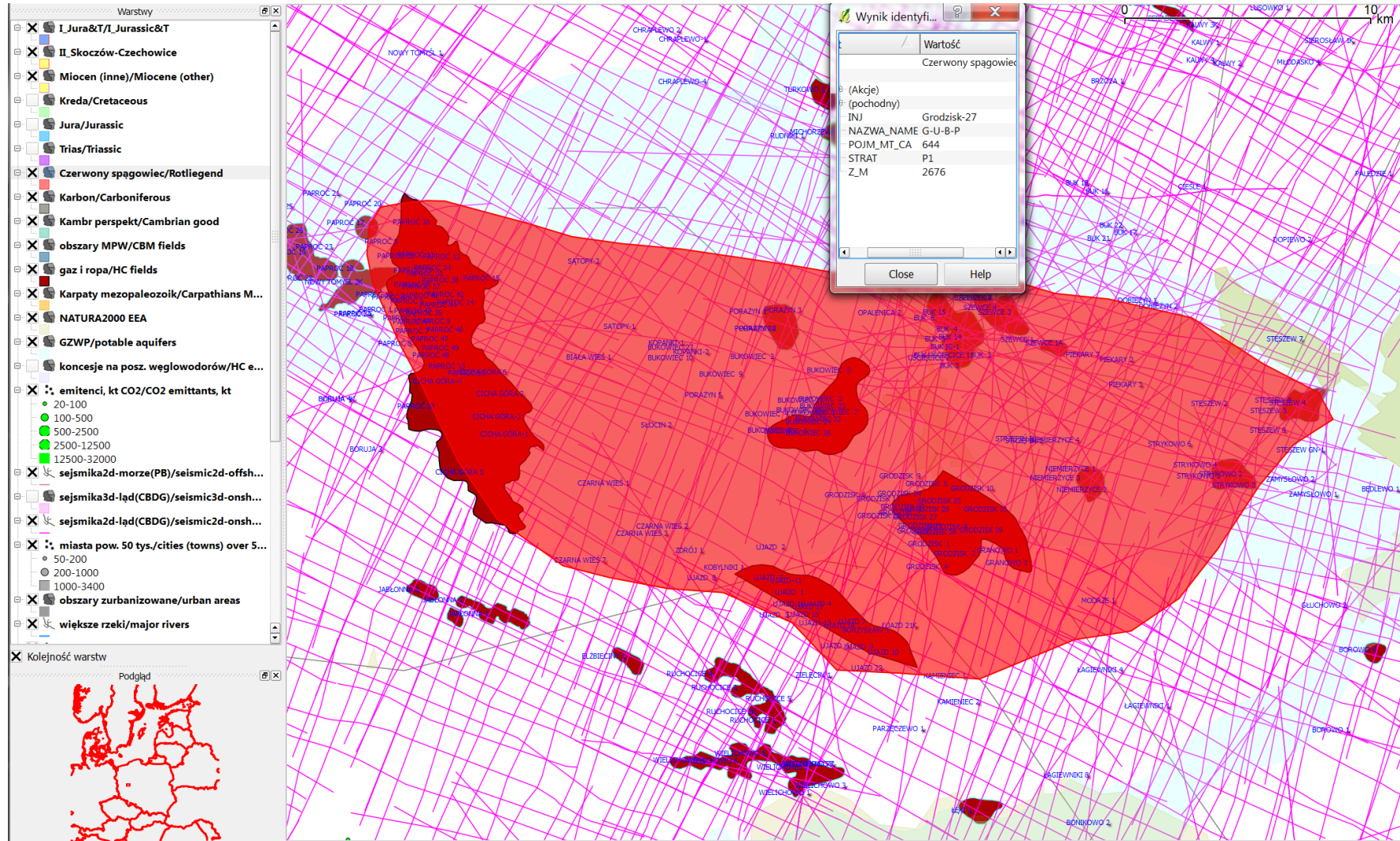


Fig. 1.1.2_28 Megastruktura Niecki Poznańskiej (obiekt Grodzisk-Ujazd-Bukowiec-Paproc) w utworach czerwonego spągowca

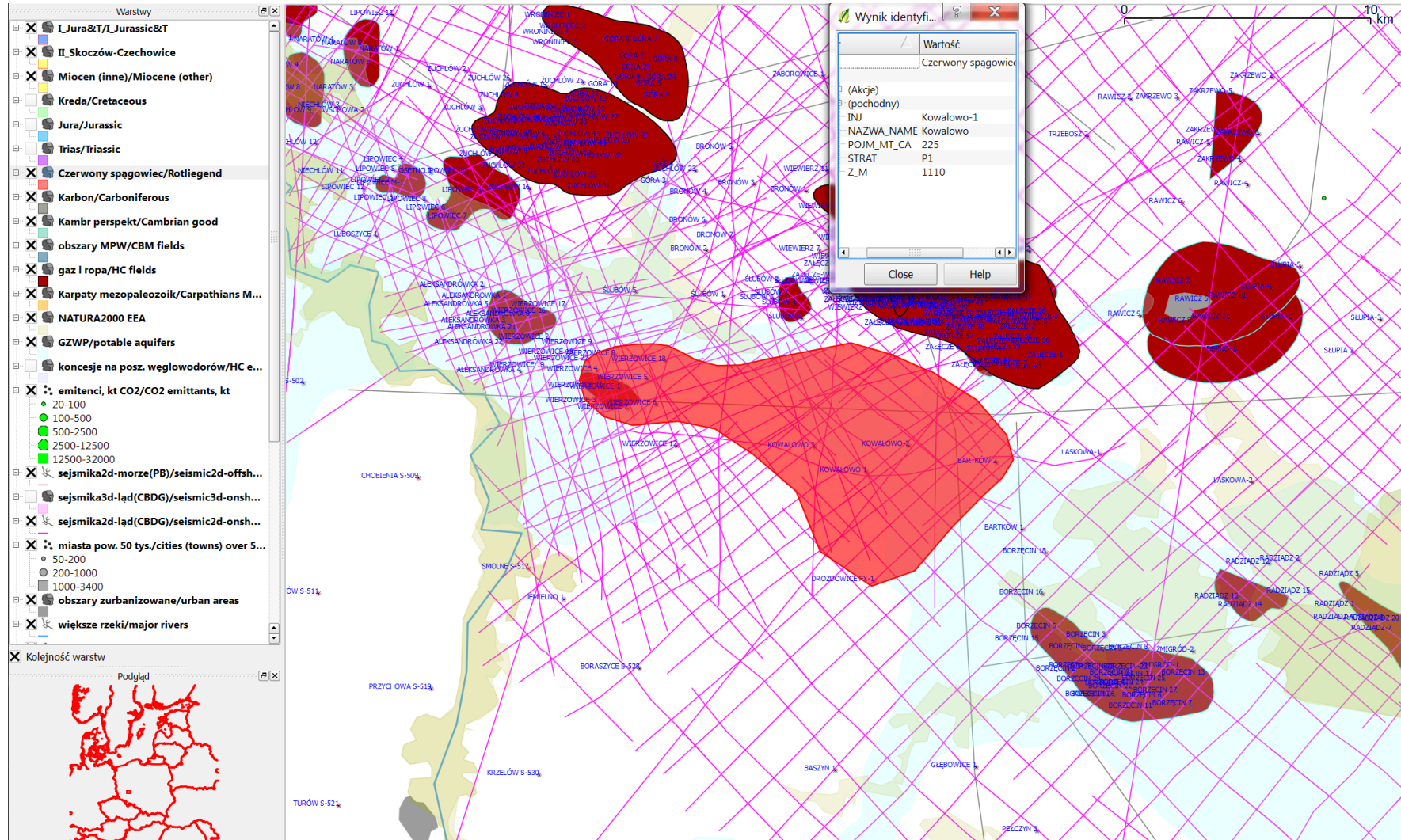


Fig. 1.1.2_29 Struktura Kowalowo w utworach czerwonego spągowca

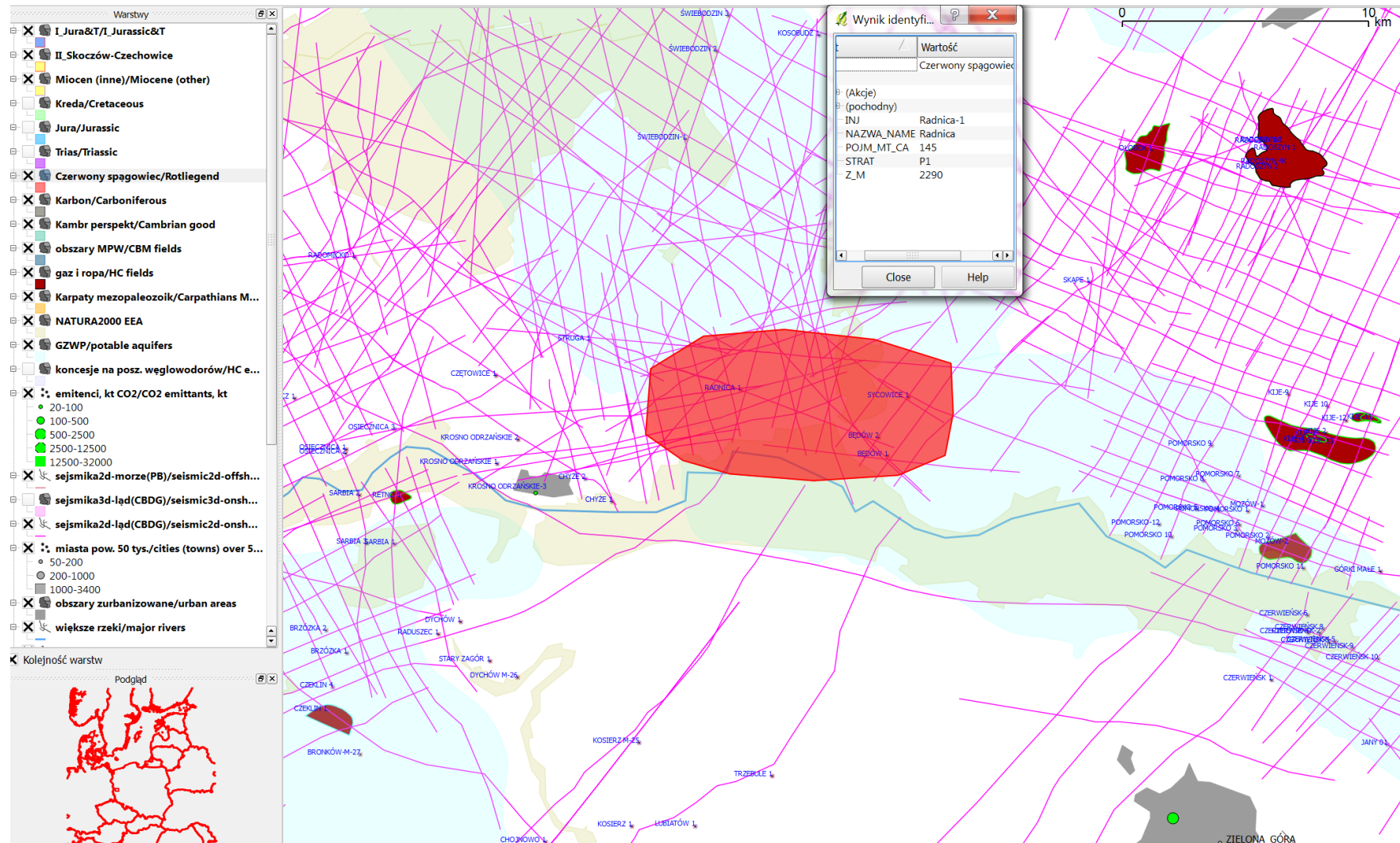


Fig. 1.1.2_30 Obiekt Radnica w utworach czerwonego spągowca

Utwory dolnej kredy w rejonie Kujaw

(Adam Wójcicki oraz Grzegorz Wróbel, Krzysztof Leszczyński, Marta Kuberska, Aleksandra Kozłowska)

Zweryfikowano w oparciu o dostępne dane geofizyczno-geologiczne lokalizację i zasięgi struktur w rejonie Konina (i dalej na SE), omawianych przez IGSMiE w **1.1.19** i **1.1.23** – antykliny Strzelna, Trześniewa, Turka i Wartkowic.

W zadaniu **1.1.4** (G. Wróbel) stwierdzono dla otworu Koło IG-3, leżącego w sąsiedztwie struktur Trześniewa, Turka i Wartkowic problem ze szczelnością uskoków bezpośrednio ponad stropem kolektora – formacji mogileńskiej. Natomiast analizy laboratoryjne próbek skał uszczelniających z tego rejonu (zadanie **1.1.15**), podobnie jak rezultaty IGSMiE, wskazują, że zarówno utwory klastyczno węglanowe (mułowce wapniste) jak i bardziej rozpowszechnione w kompleksie uszczelniającym węglany są nieprzepuszczalne (przepuszczalność poniżej dokładności pomiarów INiG w zadaniu **1.3.2**). Ponadto kompleks uszczelnień w nadkładzie dolnej kredy ma tu miąższość ponad 1000 m. Z kolei wyniki analiz geochemicznych wód złożowych (zadanie **1.1.6**, L. Razowska-Jaworek) sugerują lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora. Stąd pozostawiono struktury w dolnej kredzie, ale ich przydatność do składowania nie jest do końca pewna. Ponadto problemem jest lokalizacja struktury Trześniew, prawie w całości w obszarze NATURA2000.

Struktury Strzelna, Trześniewa, Turka i Wartkowic przedstawione są na **Fig. 1.1.2_31 – 34**. Pod względem pojemności należą do obiektów o średniej wielkości. W sumie ich pojemność wynosi **508 mln ton**.

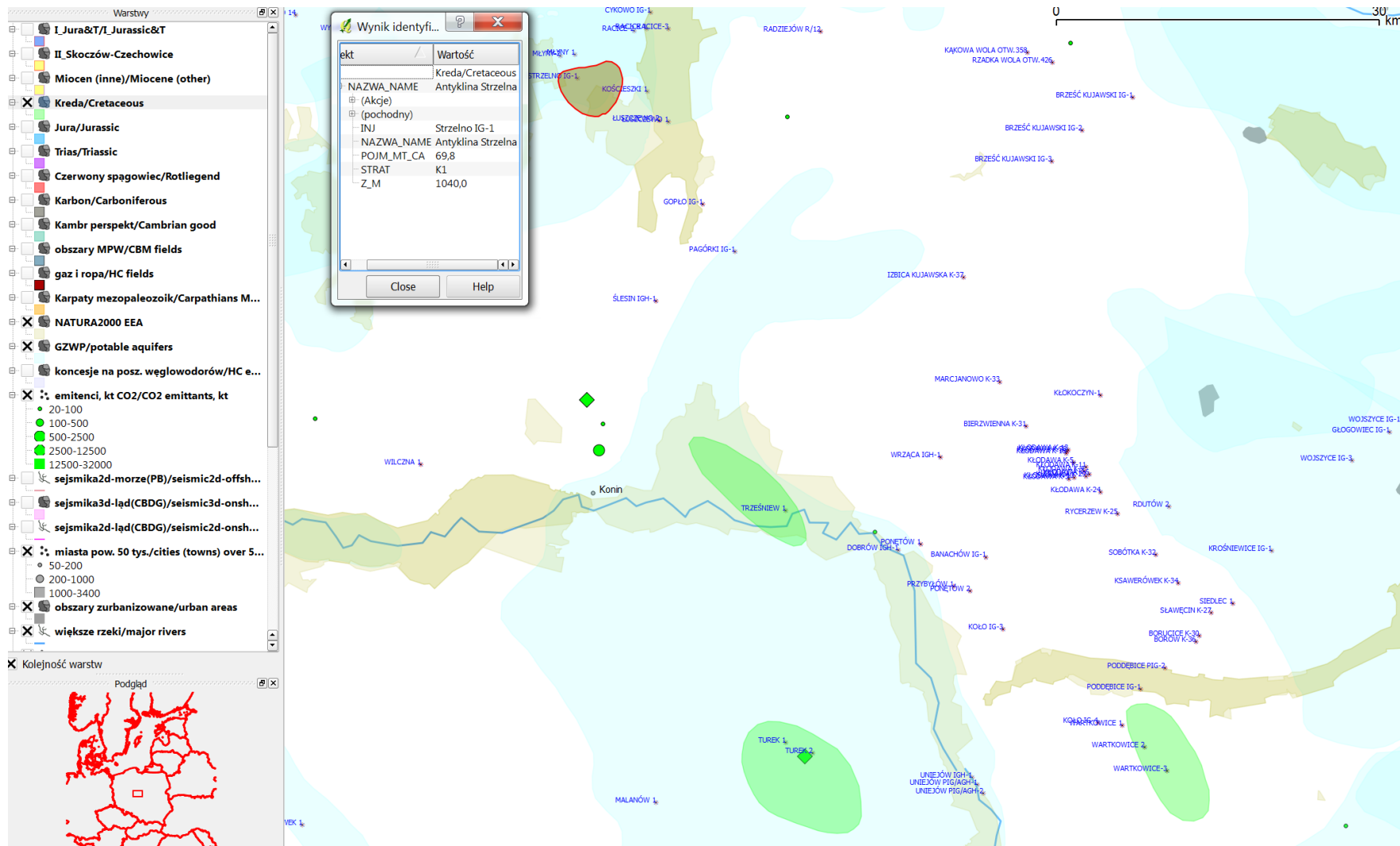


Fig. 1.1.2_31 Struktura – antyklina Strzelno w utworach dolnej kredy

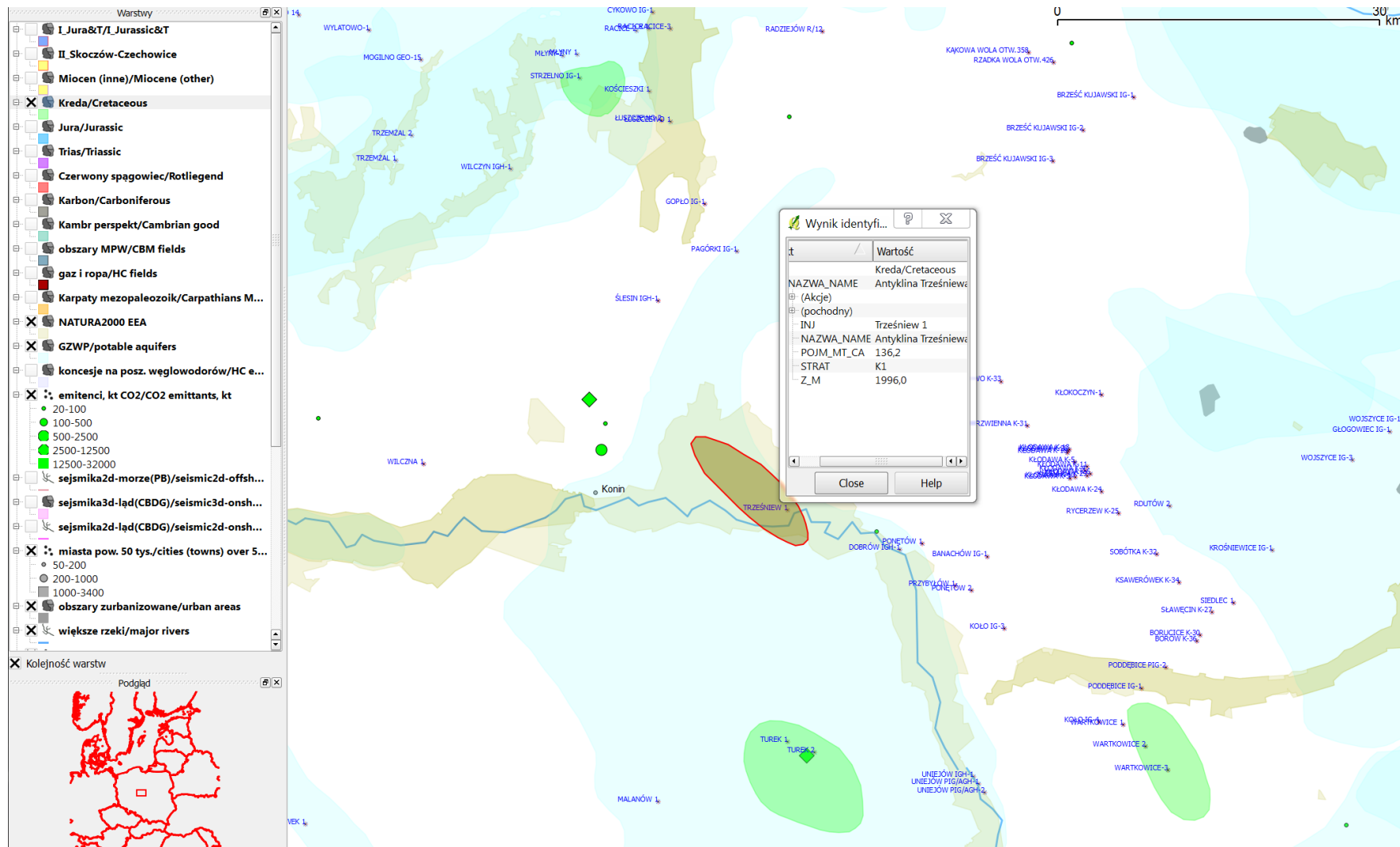


Fig. 1.1.2_32 Struktura – antyklina Trzeźń w utworach dolnej kredy

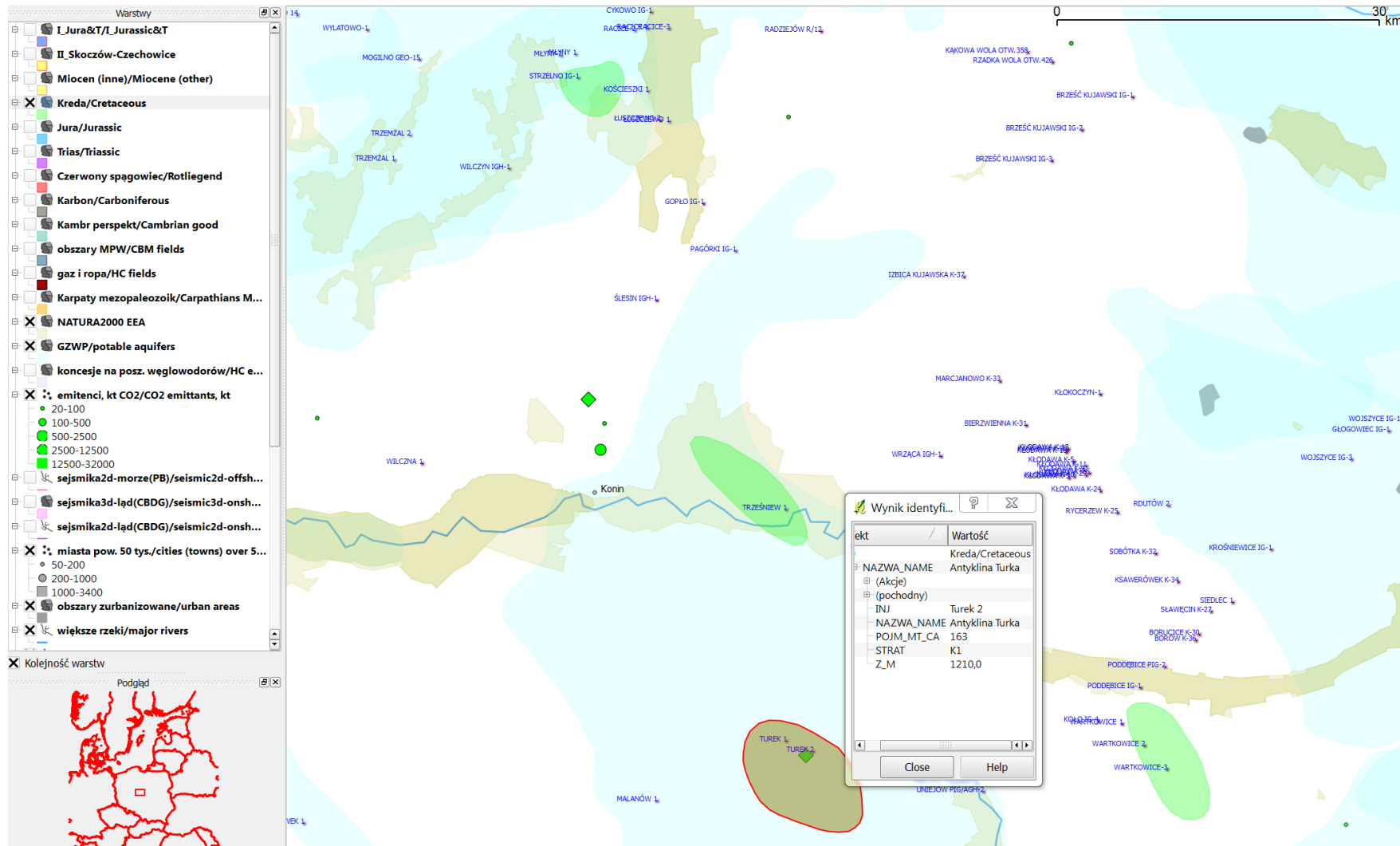


Fig. 1.1.2_33 Struktura – antyklina Turek w utworach dolnej kredy

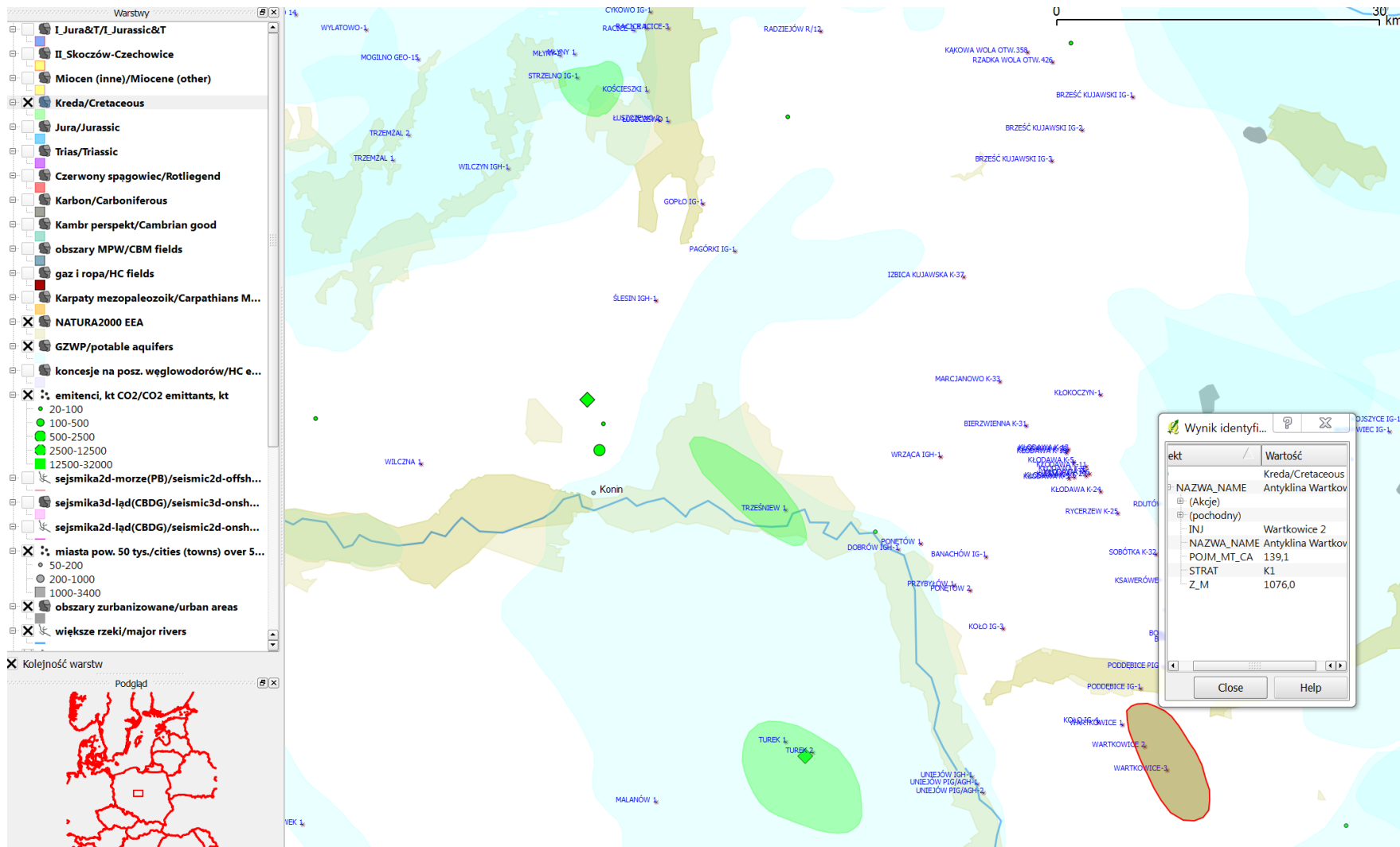


Fig. 1.1.2_34 Struktura – antyklina Wartkowice w utworach dolnej kredy

Utwory dolnej jury w rejonie Kujaw (Adam Wójcicki oraz Anna Olszewska-Feldman)

Zweryfikowano w oparciu o dostępne dane geofizyczno-geologiczne lokalizację i zasięgi struktur w rejonie Kujaw, omawianych przez IGSMiE w **1.1.19** i **1.1.23** – antykliny Brześcia Kujawskiego (koło Włocławka) i Konar (koło Inowrocławia), natomiast struktury Nowa Wieś Wielkie nie rozpatrywano, ponieważ brak jest w jej obrębie wierceń.

Antykliny Brześcia Kujawskiego i Konar obejmują miąższe zbiorniki formacji borucickiej (górny toark oraz w mniejszym stopniu dolny aalen) a także szereg zbiorników w obrębie formacji drzewickiej i ostrowieckiej (dolny pliensbach – górny synemur). Jest to przykład wielopoziomowego systemu sekwestracyjnego o znacznej pojemności, zwłaszcza w przypadku antykliny Brześcia Kujawskiego (zadanie **1.1.3** dla rejonu Kujaw – A. Olszewska-Feldman). Własności zbiornikowe kolektorów w strukturze Konar okazały się lepsze niż to przyjęto w zadaniu **1.1.23**.

Pojemność składowania formacji jurajskich w rejonie Kujaw wynosi (dla dwóch struktur - **Fig. 1.1.2_35 i 36**) **1819 mln ton**.

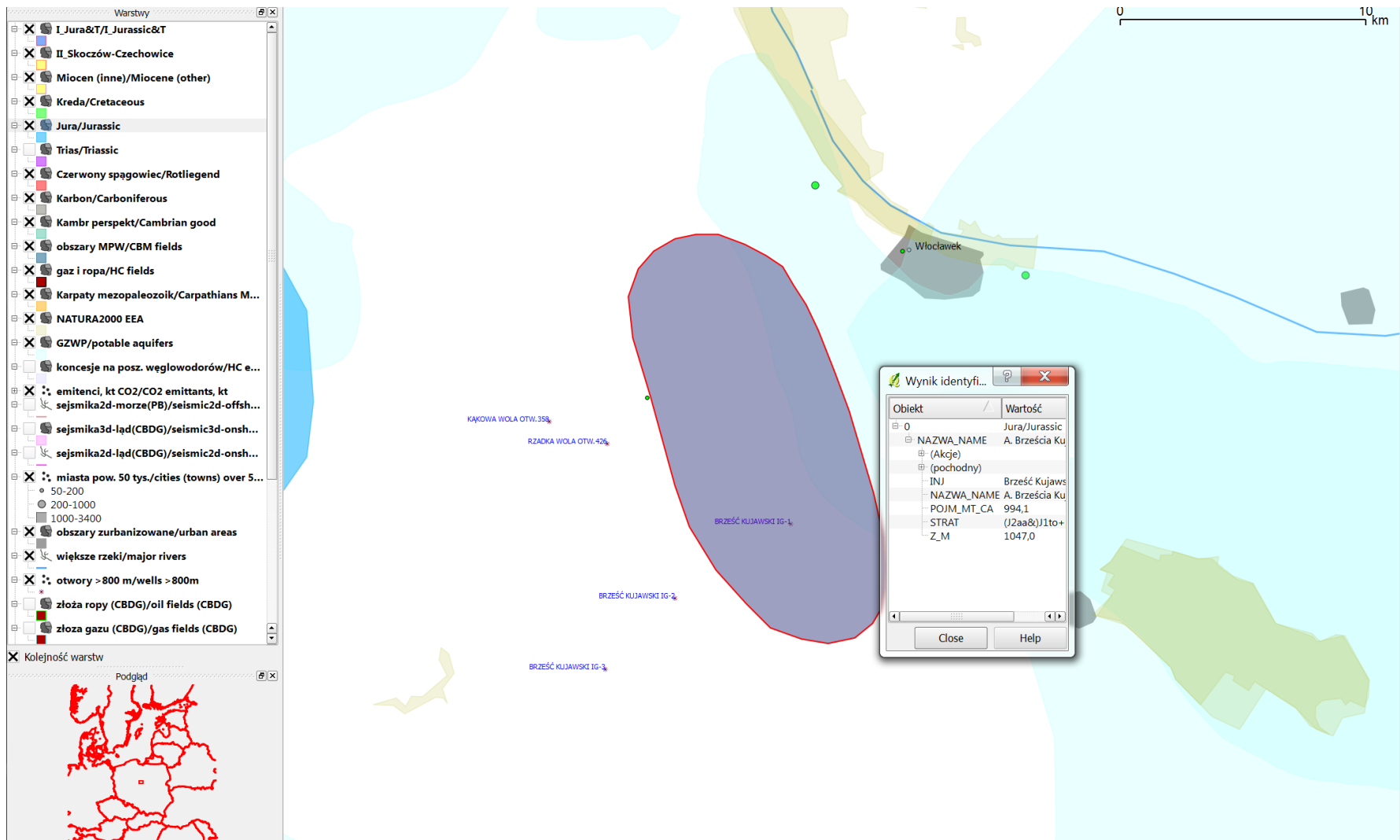


Fig. 1.1.2_35 Struktura – antyklina Brześcia Kujawskiego w utworach jury (otwór Brześć Kujawski IG-1 – temperatura 45 °C – Górecki (red.) 2006a)

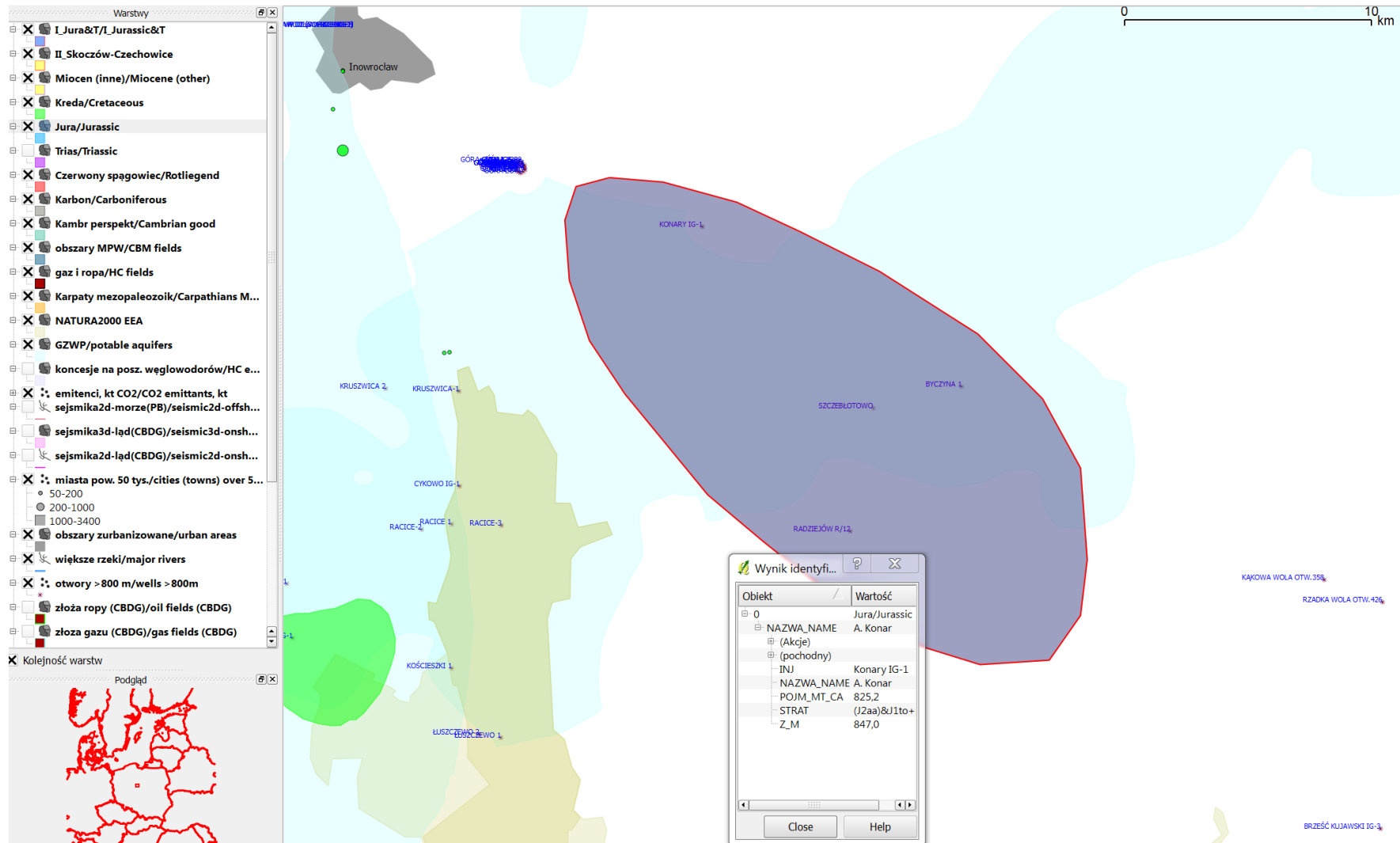


Fig. 1.1.2_36 Struktura – antyklina Konar w utworach jury (otwór Konary IG-1 – temperatura 45 °C – Górecki (red.) 2006a)

Utwory dolnego triasu w rejonie Kujaw (Adam Wójcicki)

Spośród zakwalifikowanych struktur dolnego triasu w rejonie Kujaw mamy tylko jedną – antyklinę Konar w utworach pstrego piaskowca. Po zweryfikowaniu parametrów złożowych w stosunku do wyników zadania **1.1.23** otrzymano nieco mniejszą pojemność (**Fig. 1.1.2_37**). Struktura charakteryzuje się relatywnie niskim udziałem utworów piaskowcowych w kompleksie pstrego piaskowca.

Stąd potencjał dla dolnego triasu w rejonie Kujaw przyjmujemy jako **243 mln ton**.

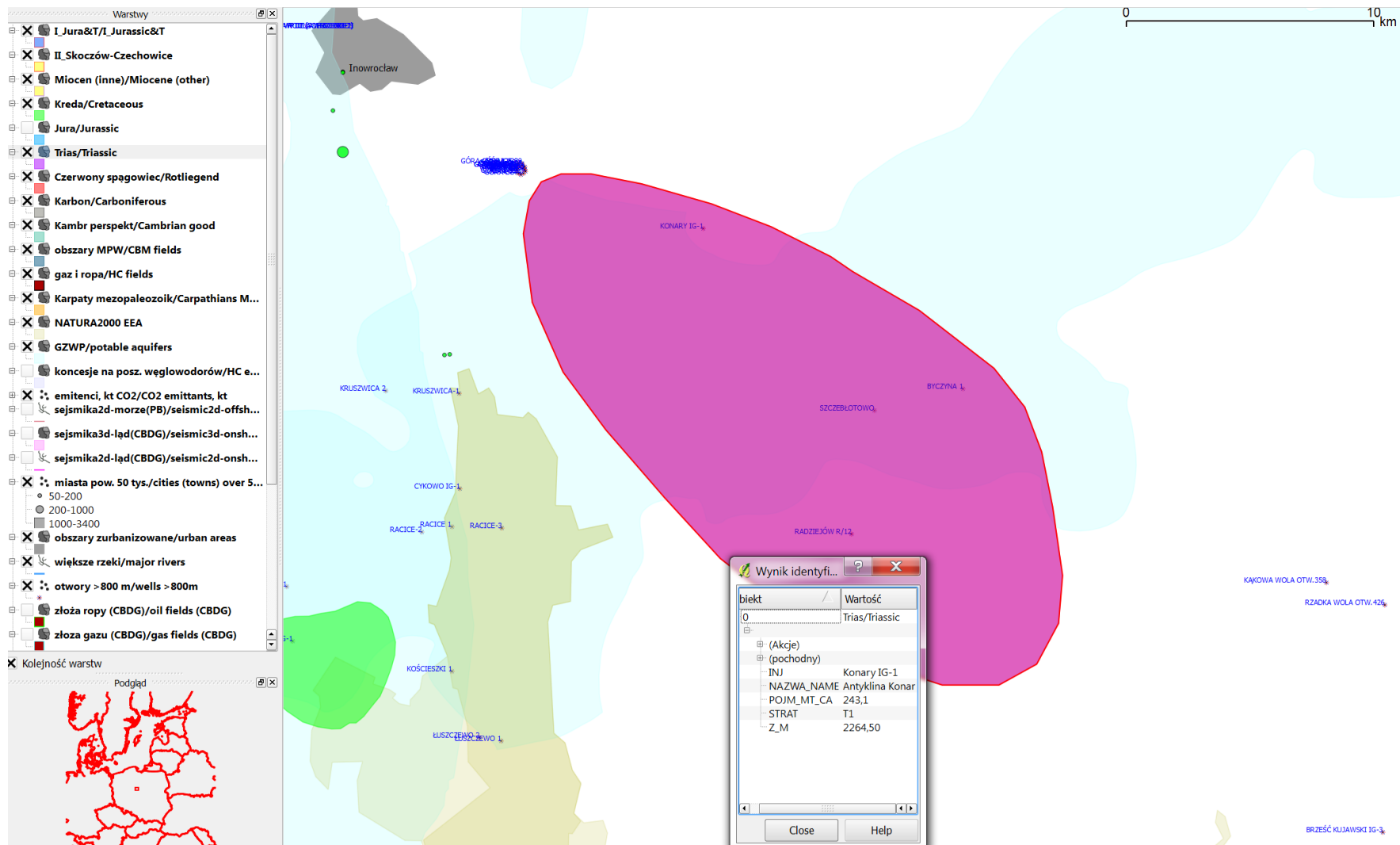


Fig. 1.1.2_37 Struktura – antyklina Konar w utworach triasu dolnego

Rejon VII - NW Polska

Utwory dolnej kredy (Adam Wójcicki)

Antykliny Choszczna i Oświna(rejon Stargardu Szczecińskiego) - struktury w utworach dolnej kredy, podane w „Interaktywnym atlasie prezentującym możliwości geologicznej sekwestracji...” zostały odrzucone z uwagi na niezbyt korzystne w tym rejonie wskaźniki geochemiczne (rozdział **1.1.6**) dla dolnej kredy, mogące świadczyć o możliwości kontaktu wód złożowych z płycej występującymi wodami podziemnymi lub infiltracyjnymi (czyli, o słabej jakości uszczelnienia). Do podobnych wniosków doszło IGSMiE w zadaniu **1.1.19** (rozdział **1.1.1**). Antyklina Oświna leży poza tym w obszarze NATURA2000.

Utwory dolnej jury

(Adam Wójcicki oraz Anna Feldman-Olszewska, Grzegorz Wróbel)

Zweryfikowano w oparciu o dostępne dane geofizyczno-geologiczne lokalizację i zasięgi struktur w rejonie NW Polski, omawianych przez IGSMiE w **1.1.19** i **1.1.23** – antykliny Chabowa, Choszczna, Suliszewa, Marianowa, Trzebieży i Oświna. Główne kolektory to formacja komorowska (dolny pliensbach) jak również utwory synemuru i hettangu.

Strukturę Oświna wyeliminowano z uwagi na słabe parametry zbiornikowe, w tym zasadniczo miąższość kolektora (rozdział **1.1.3** – Anna Feldman-Olszewska), co przy niewielkim jej obszarze daje znikomą pojemność (przynajmniej w porównaniu z pozostałymi strukturami). Antyklina Oświna leży poza tym w obszarze NATURA2000.

Powierzchnię struktury Suliszewa powiększono zgodnie z wynikami interpretacji sejsmicznej (zadanie **1.1.3** dla rejonu VII – Grzegorz Wróbel) obejmując obszary wokół otworów Pławno 1 i Radęcin 1 oraz skorygowano w ten sam sposób zasięg struktury Choszczno (obie struktury rozdzielone są niewielkim przegięciem, w zasadzie można mówić o kulminacjach obiektu Choszczno-Suliszewo-Radęcin-Pławno). Wniosek z sejsmiki jest ponadto taki, że brak jest stref tektonicznych w kompleksie składowania przecinających i kolektory i podstawowe uszczelnienie (zwykle jest to dolny toark – formacja ciechocińska), mogących stanowić potencjalne wertykalne drogi ucieczki CO₂. Uszczelnienie to jest praktycznie nieprzepuszczalne według analiz AGH (**zadanie 1.1.7**, omówione też w zadaniu **1.1.8**).

Dla pozostałych pięciu struktur (**Fig. 1.1.38 - 42**) otrzymano przeważnie istotnie większe pojemności gdyż stwierdzono większe miąższości przydatnych kolektorów oraz ich porowatości (dla struktur Choszczno-Suliszewo(-Radęcin-Pławno) wykonano modele w II segmencie, stąd ich parametry są dość dobrze rozpracowane – wykonano m.in. interpretację porowatości i przepuszczalności z krzywych geofizyki wiertniczej, a interpretacja była kalibrowana wynikami analiz laboratoryjnych) niż założono to w zadaniu **1.1.23**. Należy przy tym zauważyć, że antyklina Trzebieży nie jest rozpoznana sejsmika a Chabowa – bardzo słabo.

Natomiast struktura Marianowo jest rozważana jako lokalizacja podziemnego magazynu gazu

(<http://www.mg.gov.pl/Fundusze+UE/POIS/Aktualnosci/Informacje+archiwalne>).

Natomiast wskaźniki geochemiczne (rozdział **1.1.6** – L. Razowska-Jaworek) wskazują, że istnieje możliwość kontaktu solanek dolnej jury z płycej występującymi wodami podziemnymi (ale raczej nie użytkowymi, ponieważ zasolenie wód złożowych dolnej jury jest rzędu 100 g/l).

Sumaryczny potencjał składowania dla NW Polski w utworach jury wynosi stąd **2122 mln ton**.

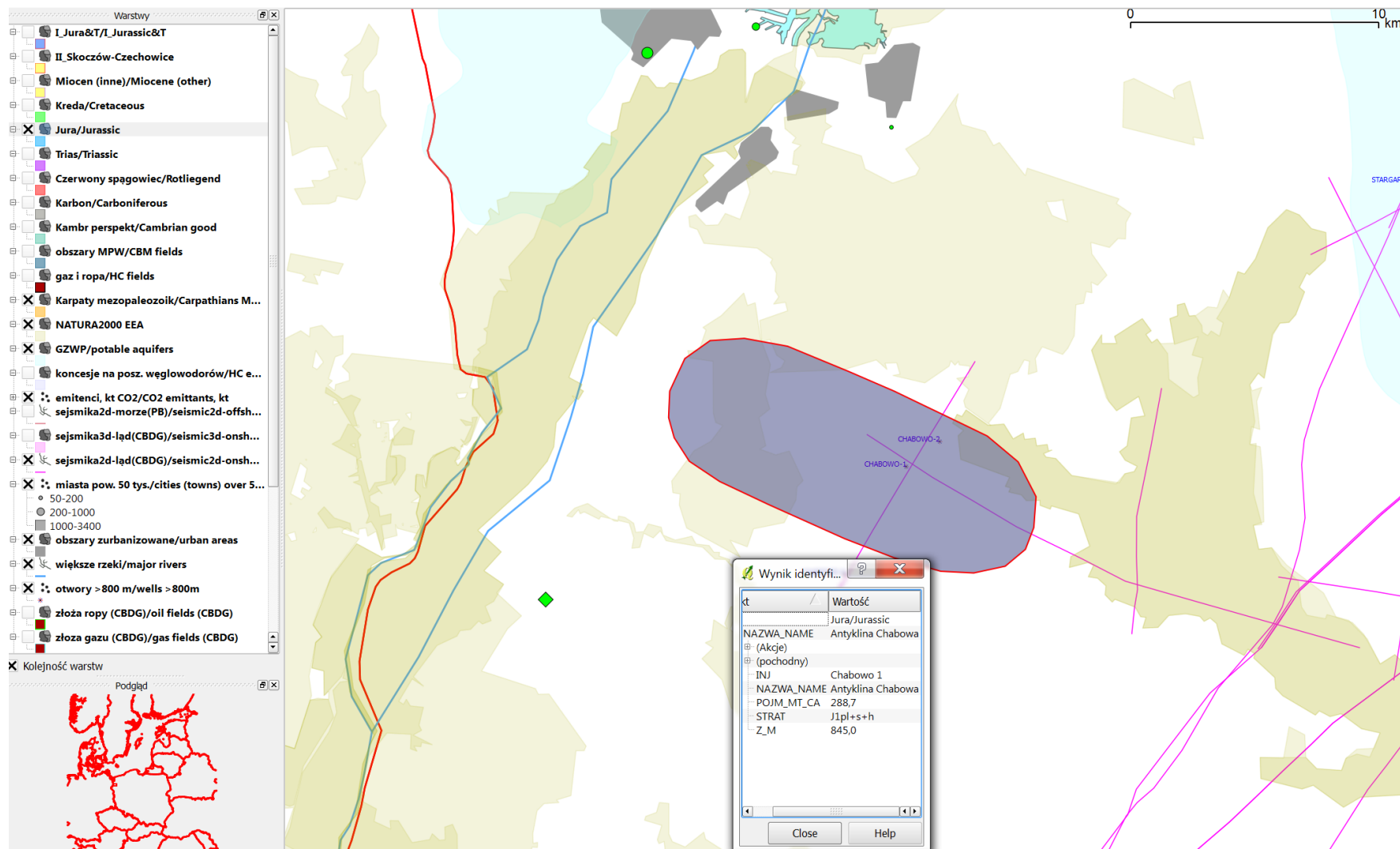


Fig. 1.1.2_38 Struktura – antyklina Chabowa w utworach dolnej jury (otwór Chabowo-1 – temperatura 40 °C – Górecki (red.) 2006a)

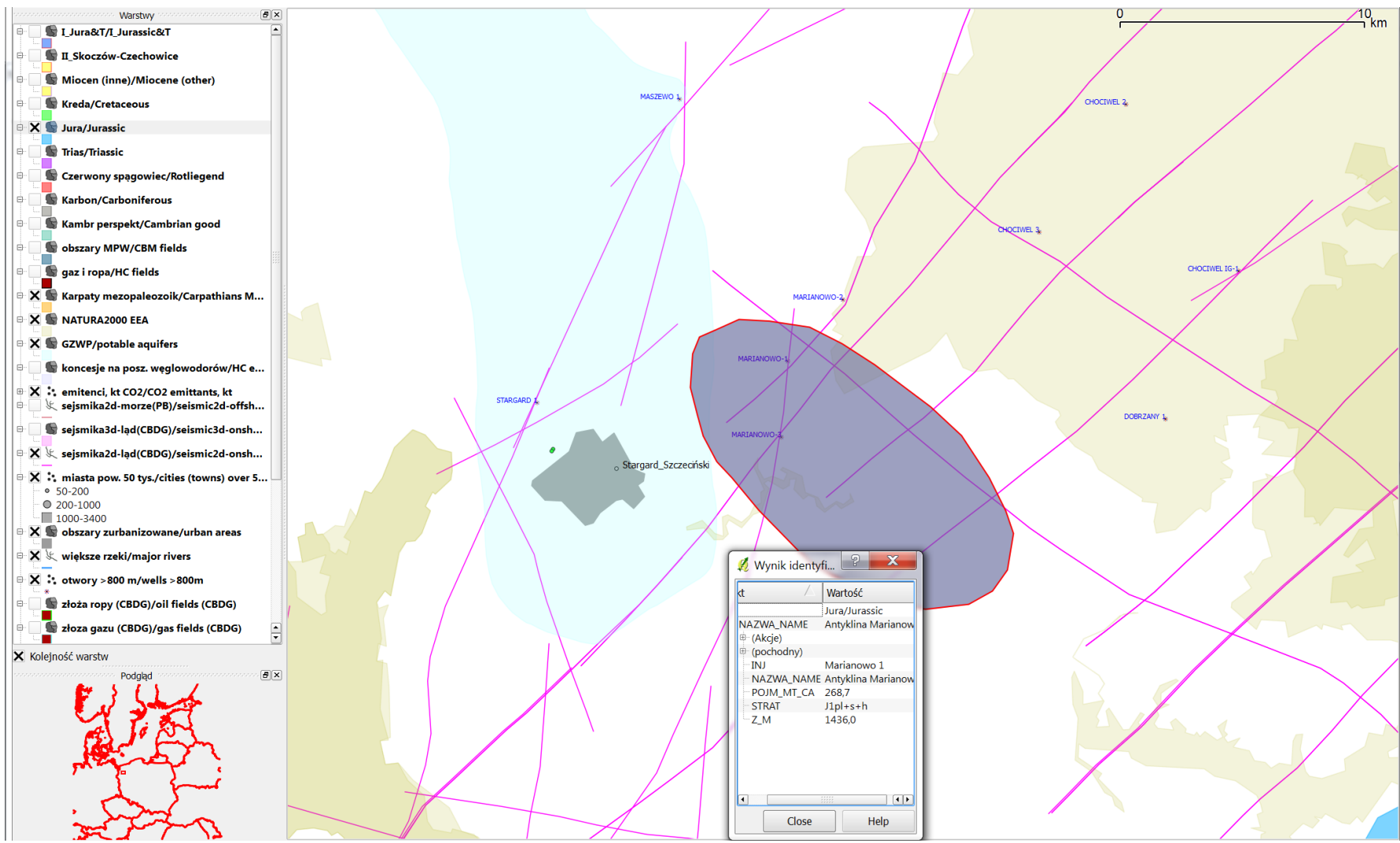


Fig. 1.1.2_39 Struktura – antyklina Marianowa w utworach dolnej jury

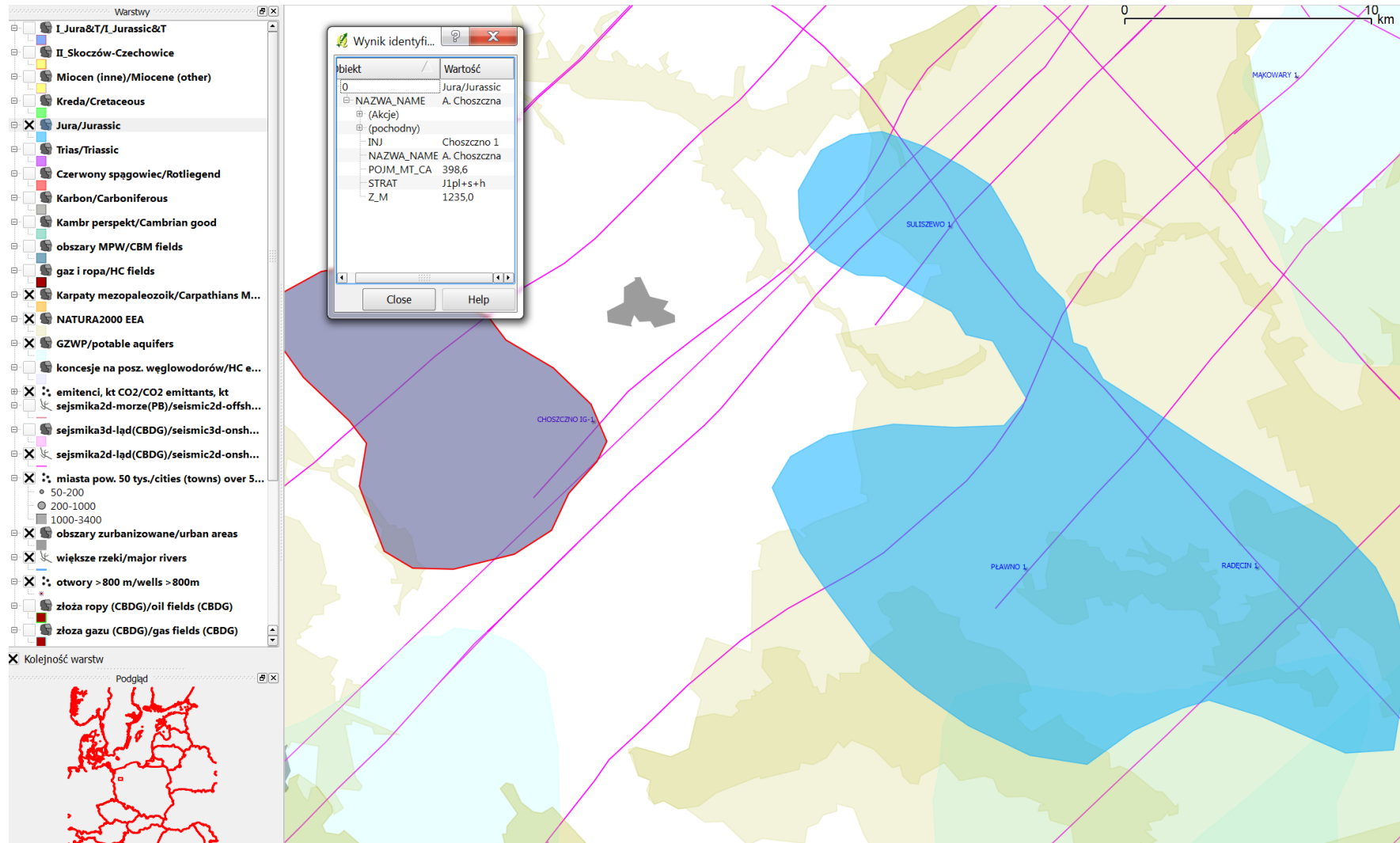


Fig. 1.1.2_40 Struktura – antyklina Choszczyna w utworach dolnej jury (kulminacja na głębokości 970 m – temperatura 37 °C – Górecki (red.) 2006a)

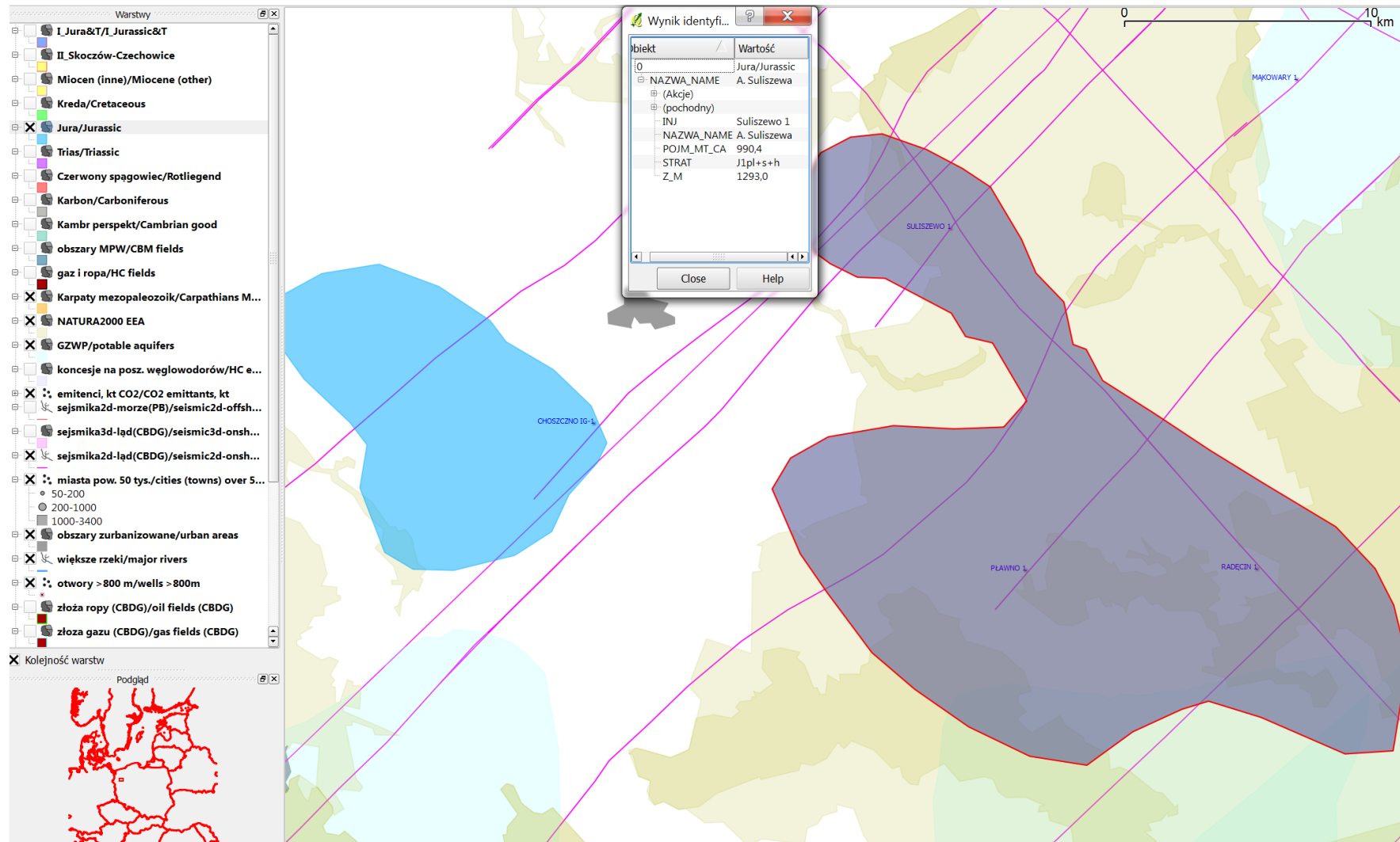


Fig. 1.1.2_41 Struktura – antyklina Suliszewa w utworach dolnej jury (kulminacja na głębokości 1220 m – temperatura 44,5 °C – Górecki (red.) 2006a)

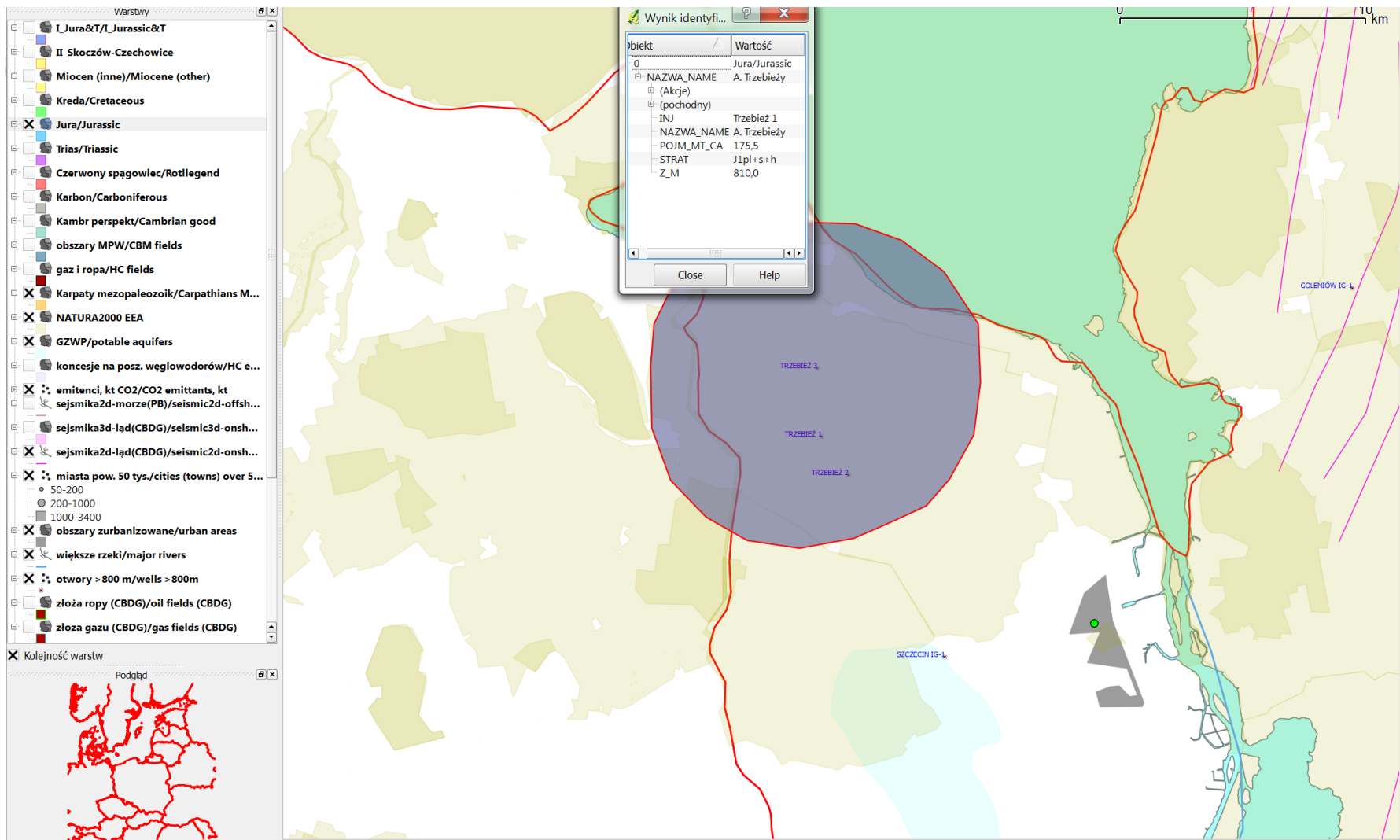


Fig. 1.1.2_42 Struktura – antyklina Trzebieży w utworach dolnej jury

Utwory triasu

(Adam Wójcicki oraz Anna Becker, Grzegorz Wróbel)

Zweryfikowano w oparciu o dostępne dane geofizyczno-geologiczne lokalizację i zasięgi struktur w rejonie NW Polski (i dalej na SE), omawianych przez IGSMiE w **1.1.19** i **1.1.23** oraz z „Interaktywnego atlasu prezentującego możliwości geologicznej sekwestracji CO₂...” – antykliny Szubina, Huty Szklanej, Janowca-Wągrowca, Koronowa-Wilcze, Rokity, Marianowa T, Chabowa T, Debrzna, Wierzchowa i Koszalina.

Główne kolektory to dolny trias - pstry piaskowiec, lokalnie górny trias – piaskowiec trzciniowy, poziomy w kajprze.

Spośród rozważanych struktur, antyklina Szubina została odrzucona ze względu na słabe własności zbiornikowe kajpru (który występuje zresztą za płytko aby dwutlenek węgla mógł przejść w fazę nadkrytyczną) i pstrego piaskowca (zadanie **1.1.3** – A. Becker) a poza tym możliwe zagrożenie dla integralności uszczelnienia przez występowanie uskoków tnących nadkład i wygasających w potencjalnych zbiornikach. Również wyeliminowano antyklinę Huty Szklanej, charakteryzującą się słabymi parametrami zbiornikowymi i w konsekwencji minimalną pojemnością przy znacznej głębokości występowania (słabych) kolektorów pstrego piaskowca. Struktura Janowca-Wągrowca nie posiada wg analiz z rozdziału **1.1.3** (A. Becker) żadnego kolektora nawierconego więcej niż jednym otworem (ten sam poziom w triasie dolnym może być słabym kolektorem w jednym otworze a w sąsiednim nie mieć wcale własności kolektorskich) i stąd również została odrzucona. Zaś struktura Koronowo-Wilcze, choć rozległa, obejmuje drobne nieciągłe przewarstwienia słabych kolektorów w masie iłowców i mułowców, z jakich zbudowany jest w tym miejsce kompleks pstrego piaskowca – też została wykluczona (**1.1.3** – A. Becker). W szczycie antykliny Rokity brak jest kolektora, przyzwoity kolektor pstrego piaskowca jest poza strukturą, ale lokalnie nie ma uszczelnienia – struktura odrzucona.

Pozostają antykliny Chabowa i Marianowa w górnym triasie w rejonie Szczecina (**Fig. 1.1.2_43** i **44**). Charakteryzują się one stosunkowo niewielką pojemnością – kolektor górnotriasowy jest drugorzędny w stosunku do dolnej jury (są to też i głównie struktury w jurze).

Natomiast struktury Debrzna, Wierzchowa i Koszalina w rejonie Koszalina (**Fig. 1.1.2_45 - 47**) obejmują bardziej miąższe kolektory (często o podobnej porowatości jak trias górny) w dolnym triasie i ich pojemności są nieco większe.

W sumie tak oszacowany potencjał składowania dla utworów triasu w NW Polsce wynosi **836 mln ton**.

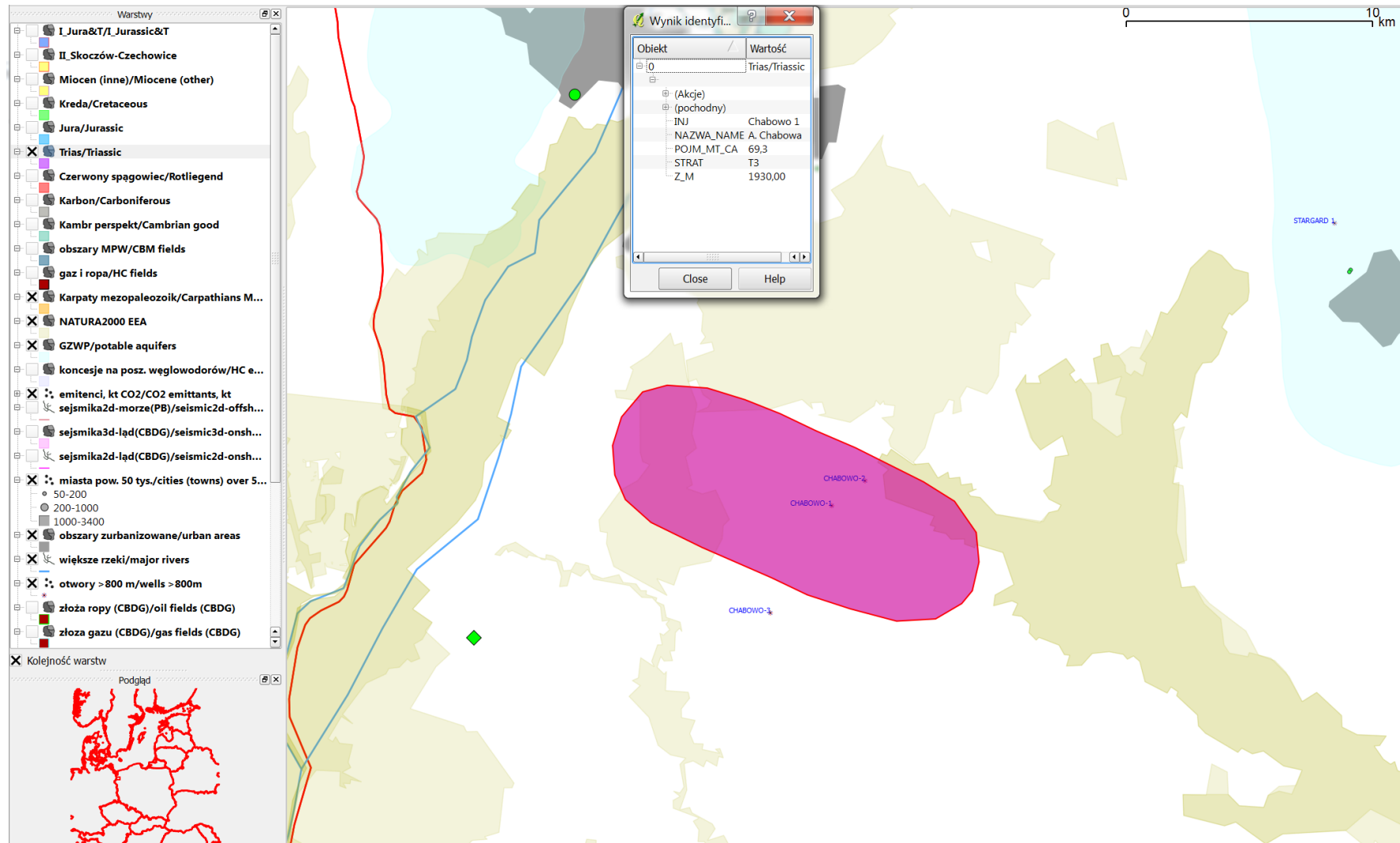


Fig. 1.1.2_43 Struktura – antyklina Chabowa w utworach górnego triasu

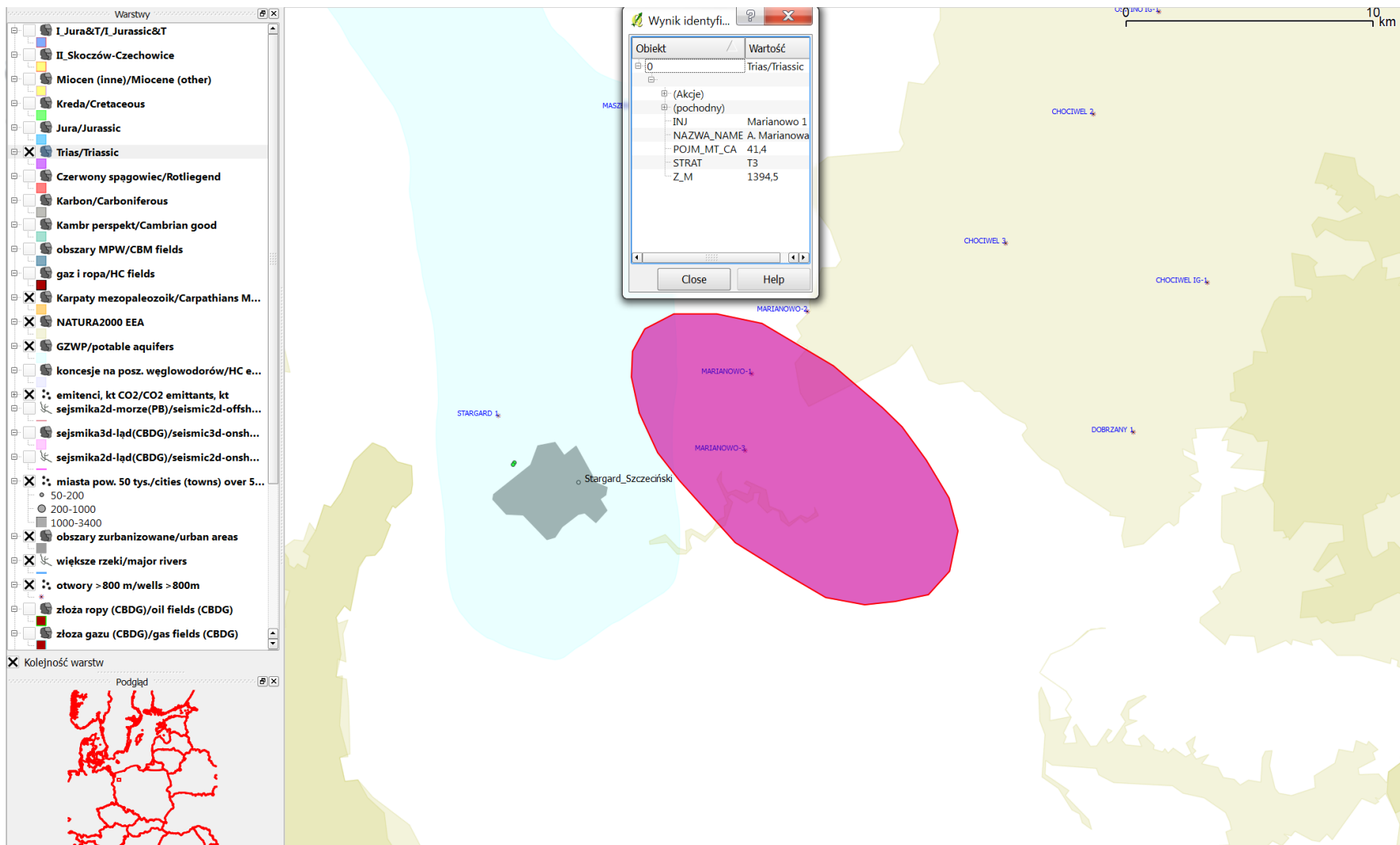


Fig. 1.1.2_44 Struktura – antyklina Marianowa w utworach górnego triasu

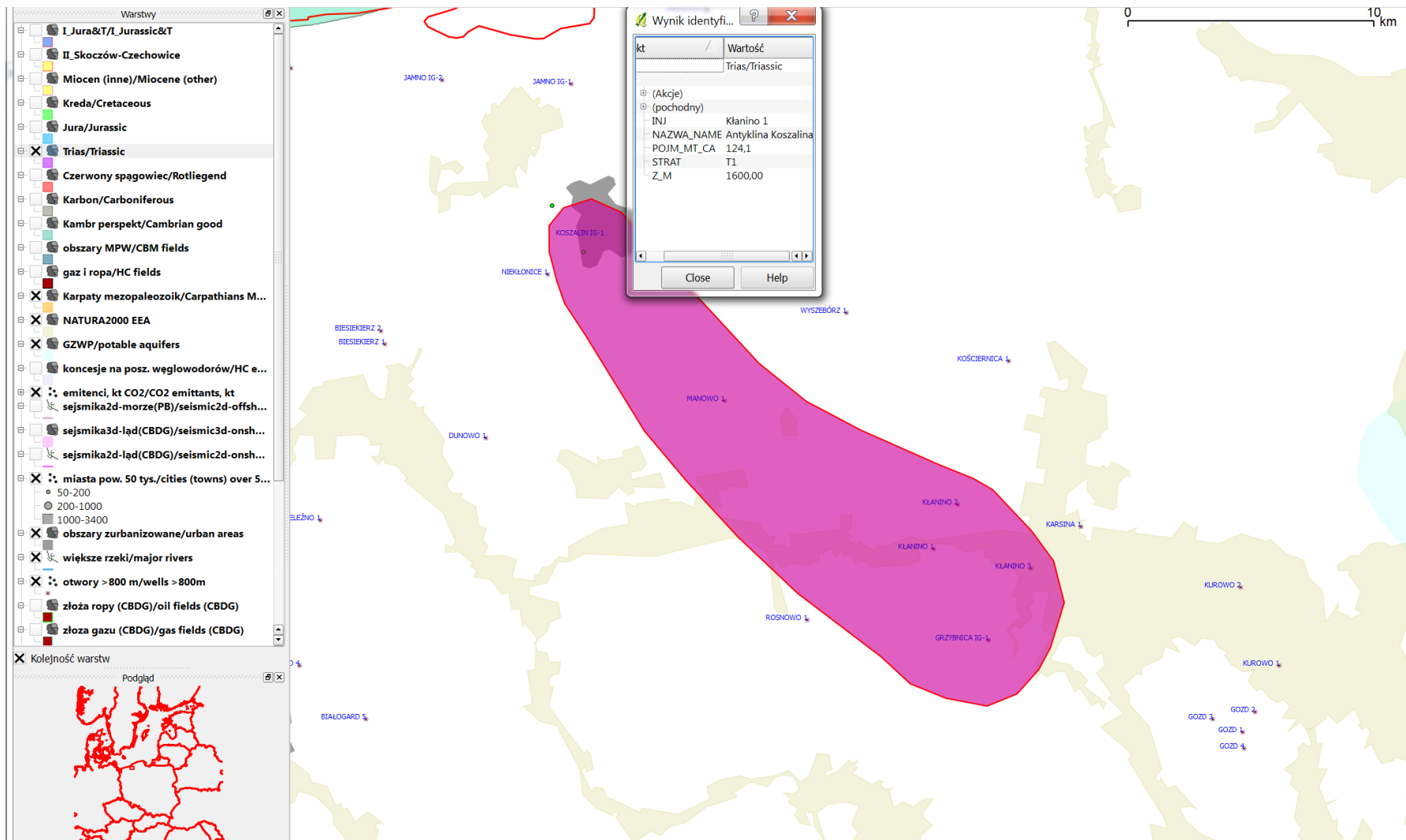


Fig. 1.1.2_45 Struktura – antyklina Koszalina w utworach dolnego triasu

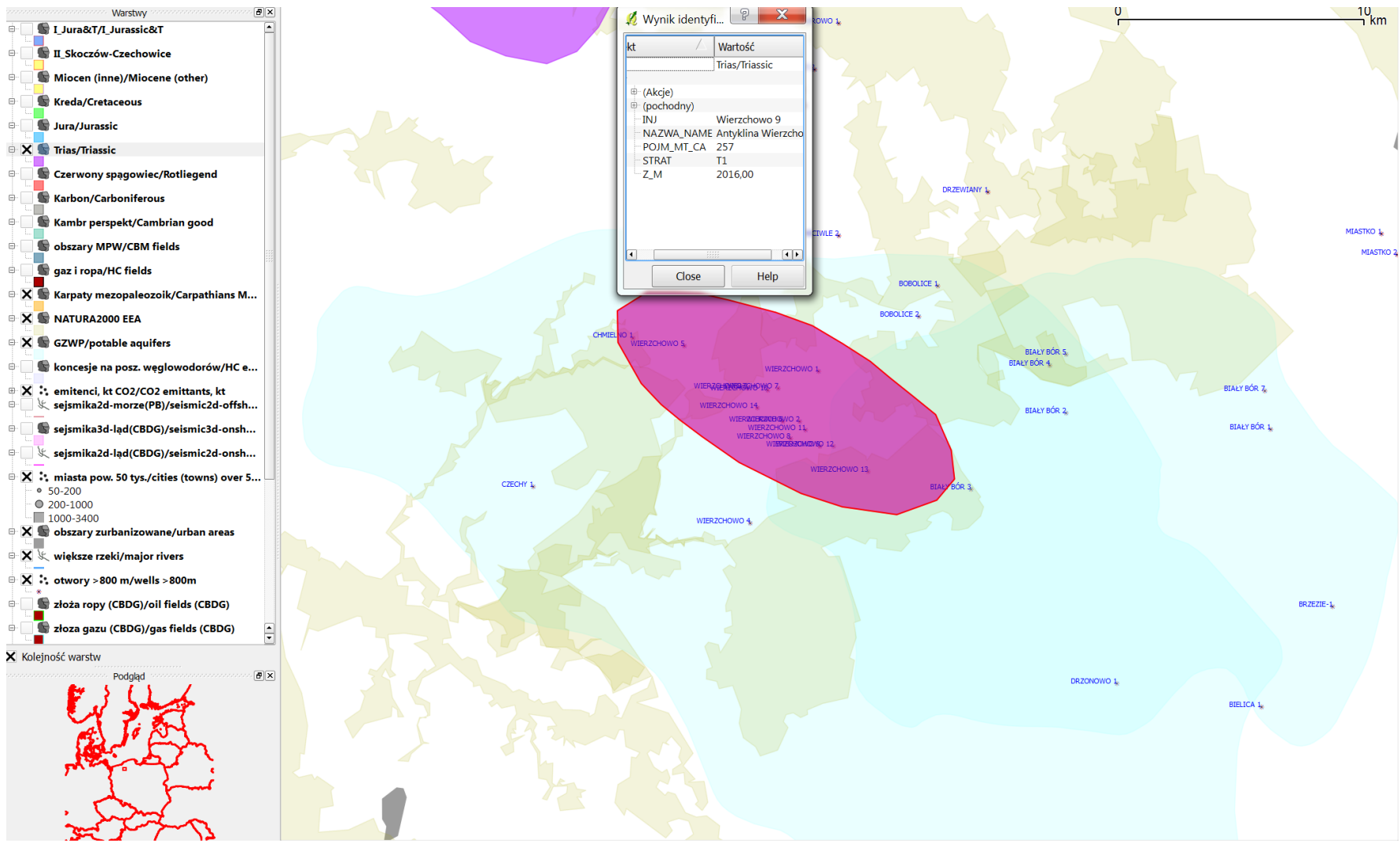


Fig. 1.1.2_46 Struktura – antyklina Wierchowa w utworach dolnego triasu

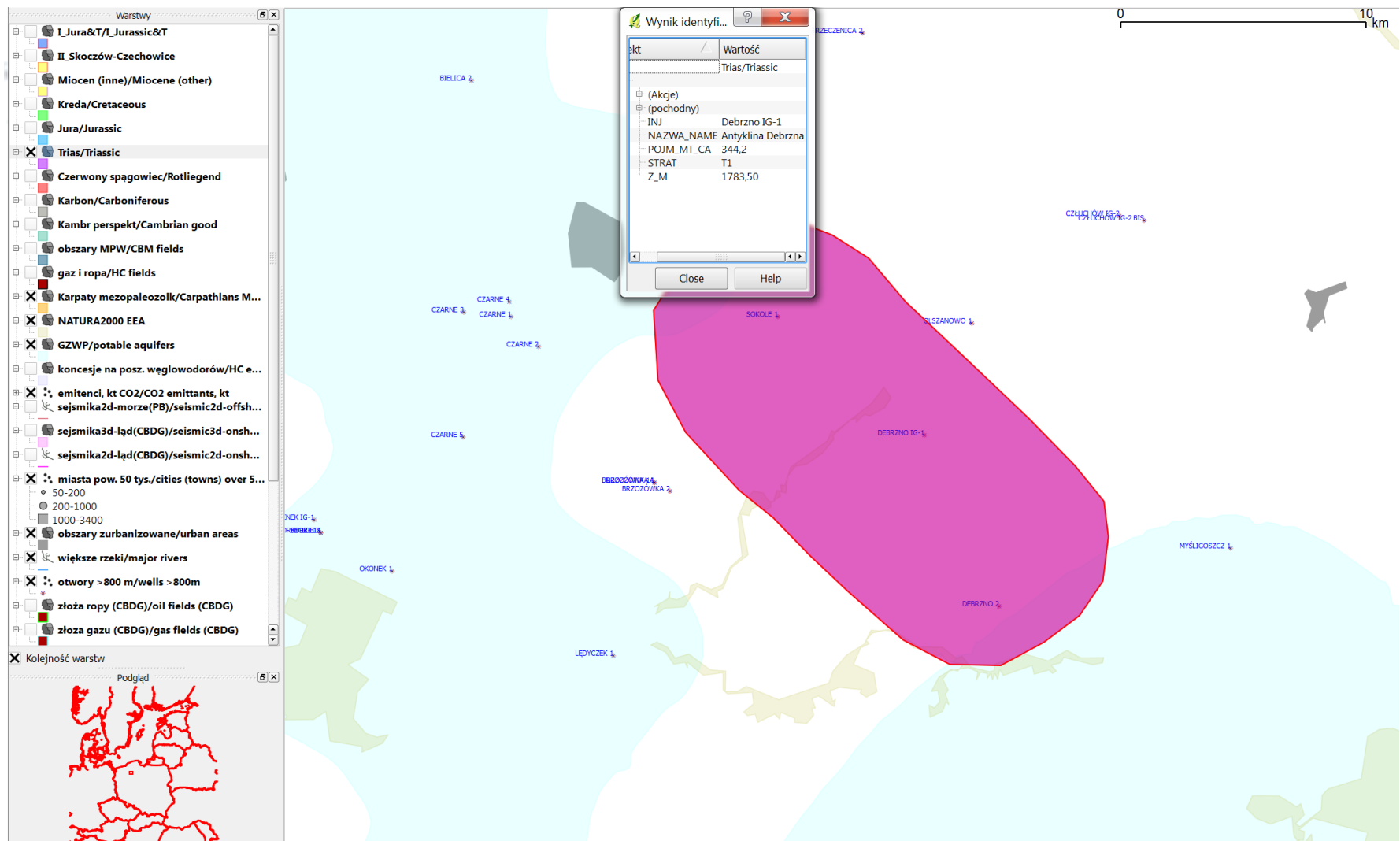


Fig. 1.1.2_47 Struktura – antykлина Debrzna w utworach dolnego triasu

Rejon VIII - Łeba-Bałtyk oraz NE Polska

(Adam Wójcicki oraz Jolanta Paczeńska, Anna Becker)

Dla rejonu VIII, czyli Polski północnej wraz ekonomiczną strefą Bałtyku, oraz północno-wschodniej podstawowym kolektorem są formacje piaskowców kambryjskich (zasadniczo kambru środkowego). Struktury w obrębie triasu na pograniczu rejonu VIII i VII zostały przedyskutowane w podrozdziale dotyczącym rejonu VII (struktury w rejonie Koszalina). Natomiast na lądzie w obszarze ścisłego rejonu VIII, tzn. mniej więcej na terytorium województwa pomorskiego wykluczono z rozważań formacje i struktury w obrębie triasu dolnego z uwagi na niedostateczne własności zbiornikowe i/lub nieodpowiednią głębokość.

Jak podano w rozdziałach **1.1.1, 1.1.3 – 1.1.8**, w rejonie VIII mamy dwa obszary występowania kolektora kambryjskiego perspektywiczne dla geologicznego składowania dwutlenku węgla.

W pierwszym, na morzu – blok B, albo północny, na **Fig. 1.1.2_48** zaznaczono obszar zbiornika kambryjskiego – regionalnego kolektora w obrębie polskiej strefy ekonomicznej Bałtyku, dla odpowiedniego do składowania CO₂ przedziału głębokości. Zgodnie z wynikami rozdziałów **1.1.1, 1.1.3, 1.1.8** i **1.1.9**, zbiornik o dostatecznych własnościach występuje w północnej części tego obszaru (południową granicę wspomnianego podobszaru wyznaczają lokalizacje złóż węglowodorów). 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 (np. złożo B3).

Stąd podana wartość dla podobszaru kolektora regionalnego (**Fig. 1.1.2_48**) ma charakter bardzo orientacyjny i odnosi się raczej do dolnej granicy pojemności składowania strefy najbardziej perspektywicznej (**861 mln ton**)

Natomiast obszar lądowy, położony generalnie na wschód od Elbląga, w pobliżu granicy z rosyjskim obwodem kaliningradzkim (**Fig. 1.1.2_49**), charakteryzuje się raczej dobrymi własnościami zbiornikowymi (patrz też rozdziały **1.1.1, 1.1.3, 1.1.8** dla rejonu VIII).

Podobnie jak w przypadku bloku B, najbardziej perspektywiczna wydaje się część wytypowanego obszaru. Jest to strefa na podniesieniu podłoża prekambryjskiego w rejonie otworów Pieszkowo 1, Zaręby 2, Henrykowo 1, Gładysze 1 - w części północnej, dostatecznie rozpoznanej sejsmiką 2D.

Podana wartość dla ww. podobszaru kolektora regionalnego (**Fig. 1.1.2_49**) ma charakter bardzo orientacyjny i odnosi się raczej do dolnej granicy pojemności składowania strefy najbardziej perspektywicznej (**776 mln ton**).

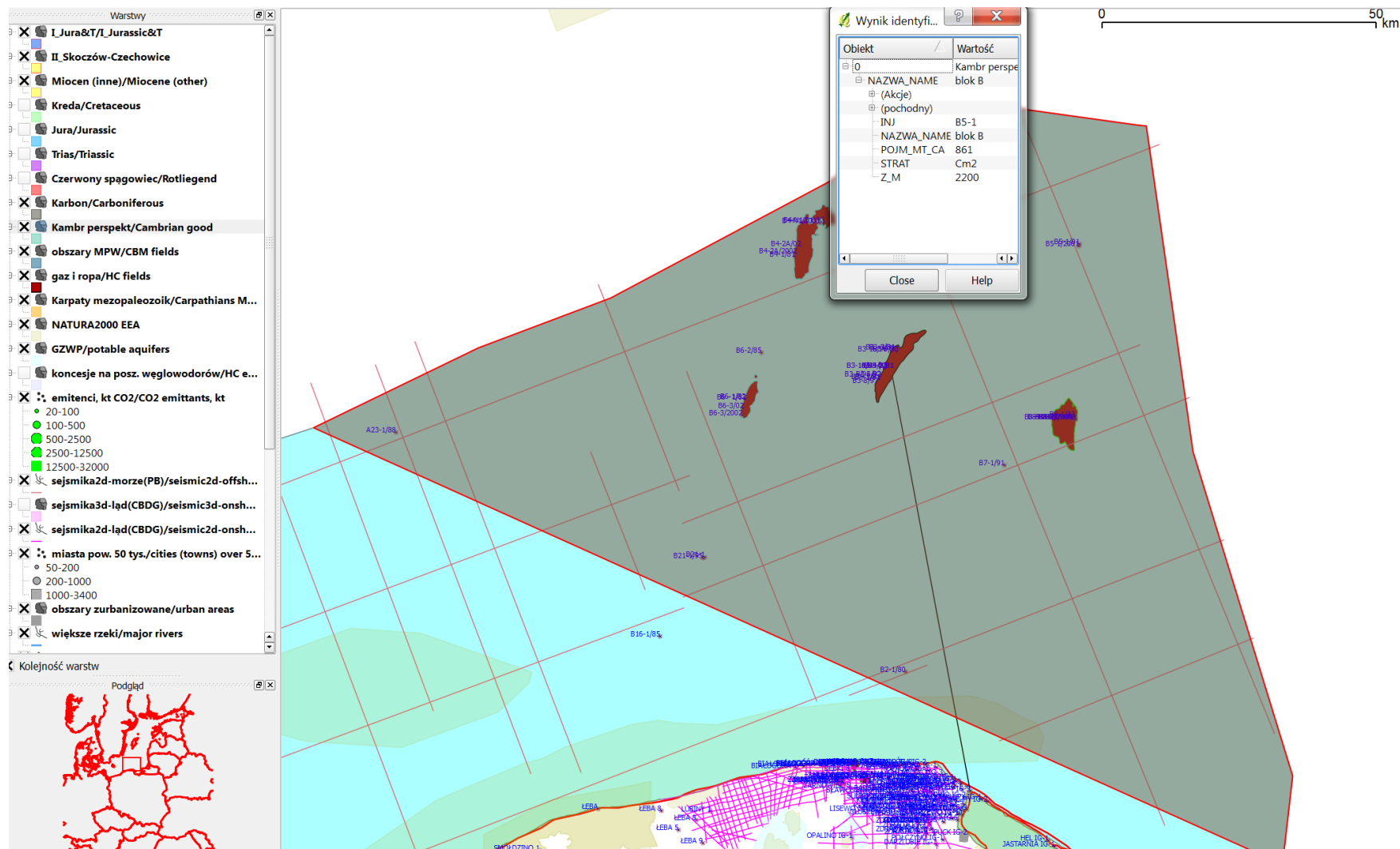


Fig. 1.1.2_48 Obszar perspektywiczny dla składowania CO₂ w kambrze, na morzu, rejon VIII – blok B, północny

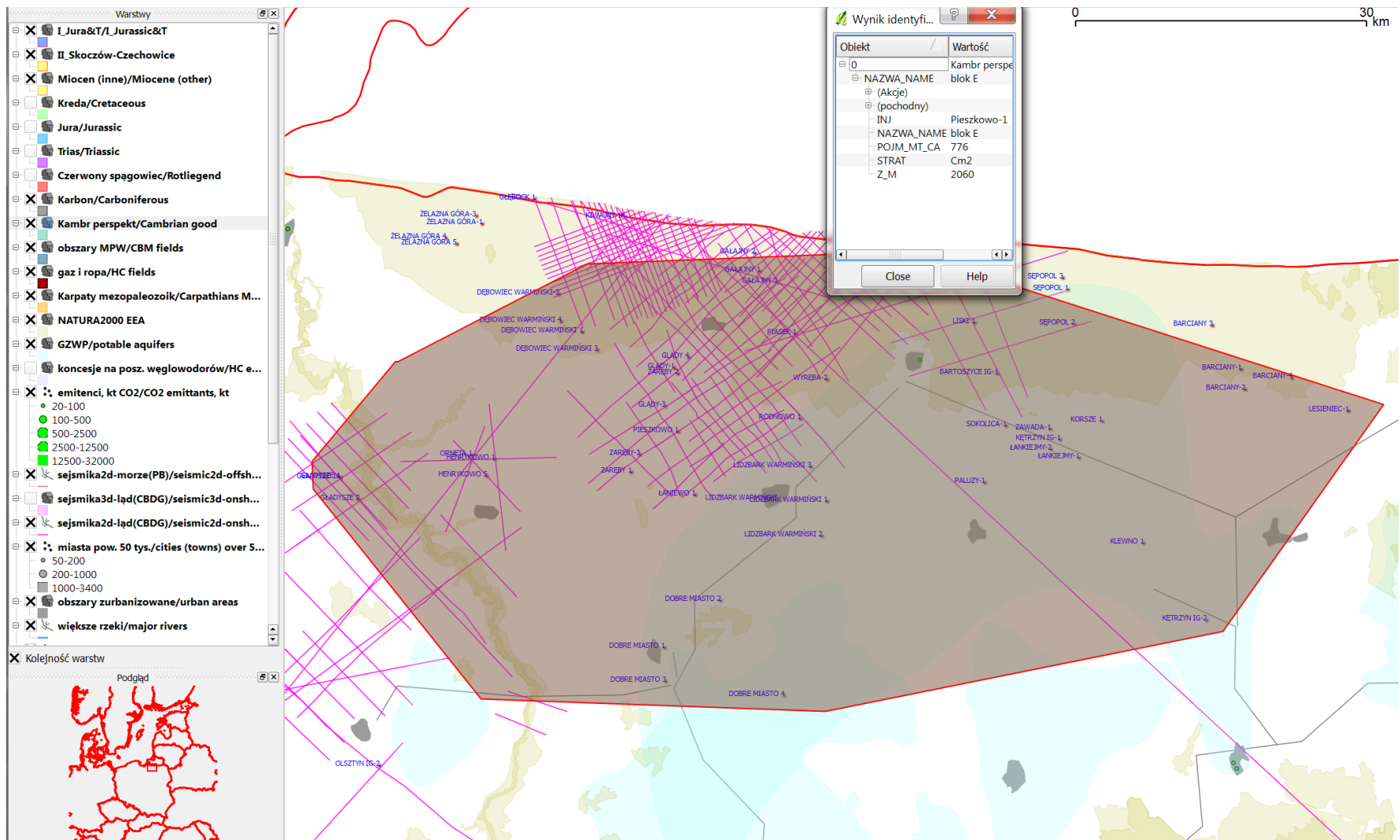


Fig. 1.1.2_48 Obszar perspektywiczny dla składowania CO₂ w kambrze, na lądzie, rejon VIII – blok E

Złóża węglowodorów

(Adam Wójcicki)

Podobnie jak w przypadku „[Interaktywnego atlasu prezentującego możliwości geologicznej sekwestracji CO2 w Polsce](#)” do szacowania pojemności efektywnej-statycznej wykorzystano metodykę zaproponowaną w projekcie EU GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen, 2009) i projekcie GESTCO (Schuppers et al. 2003), która zawiera się w założeniu, że CO2 zastępuje objętościowo węglowodory wydobyte ze złoża (standardową technologią – zagadnienie wspomagania wydobycia węglowodorów, zwłaszcza ropy naftowej wymaga szacowania pojemności dynamicznych – praktycznych, będących wynikiem symulacji zatłaczania dwutlenku węgla do złoża).

W warunkach złożowych CO2 na głębokości ponad 800 metrów, to znaczy praktycznie w we wszystkich złożach węglowodorów, jakie rozpatrujemy, nie jest gazem lecz występuje w nieco innej fazie – nadkrytycznej, o względnie dużej gęstości, średnio 0,7 g/cm³ (IPCC, 2005), a więc nieco mniejszej od gęstości ropy, która wynosi zwykle 0,8-0,9 g/cm³ i ponieważ ropa jest cieczą jej gęstość w złożu i po wydobyciu na powierzchnię Ziemi nie różni się wiele. Z kolei gaz ziemny w warunkach złożowych jest daleko bardziej skompresowany niż na powierzchni Ziemi. Stąd objętości odpowiadające zasobom wydobywalnym w złożach jakie możemy „zapełnić” CO2 liczy się dzieląc masę ropy przez jej gęstość w warunkach złożowych a dla złóż gazu dzieląc objętość zasobów wydobywalnych (odniesioną do powierzchni) przez odpowiedni współczynnik kompresji do warunków złożowych (zwykle rzędu 200-300, co oznacza, że gaz ziemny, który na powierzchni jest nieco lżejszy od powietrza, osiąga w złożu gęstość ponad 0,2 g/cm³, czasem jeszcze większą – patrz Schuppers et al., 2003). Mnożąc otrzymaną objętość przez gęstość CO2 w warunkach złożowych (która zależy od temperatury i ciśnienia – IPCC, 2005) otrzymujemy pojemności składowania.

Wzór do obliczania pierwszego przybliżenia (efektywnej) pojemności składowania ma więc postać następującą:

$$M_{CO_2} = V \times \rho_{CO_2}$$

gdzie

M_{CO_2} - maksymalna pojemność składowania CO2,

V - objętość zajmowana w złożu przez zasoby wydobywalne przed rozpoczęciem eksploatacji

ρ_{CO_2} - gęstość CO2 w złożu

Dla złóż ropy i gazu objętość zajmowana w złożu przez zasoby wydobywalne przed rozpoczęciem eksploatacji (zasoby wydobywalne pierwotne) liczona jest w różny sposób

1. Złóża ropy

$$V = UR_0 / \rho_0$$

gdzie:

UR_0 - zasoby wydobywalne pierwotne ropy wyrażone w mln ton,

ρ_o - gęstość ropy w złożu wyrażona w tonach na m³.

2. Złoża gazu

$$V = UR_g / ex$$

gdzie:

UR_g - zasoby wydobywalne pierwotne gazu wyrażone w mld m³,

ex - współczynnik ekspansji gazu - o ile większa jest objętość gazu na powierzchni Ziemi (zasoby liczy się dla warunków panujących na powierzchni Ziemi) w porównaniu z warunkami panującymi w złożu.

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, etc.). W stosunku do bazy „Interaktywnego atlasu...” wprowadzono zmiany wynikające z ujednoczenia list złóż z CBDG (te same nazwy i podział złóż na części wynikający z historii eksploatacji). Zaktualizowano też informacje o statusie i parametrach złóż, usunięto niektóre złoża, które są wykorzystywane i przeznaczone definitywnie do innych celów czy też, których eksploatacji nie rozpoczęto, mimo że wcześniej były takie plany. Dodano też niektóre złoża, których eksploatację na pełną skalę rozpoczęto w międzyczasie (np. nieduże złożo ropy Radoszyn w zachodniej Polsce) lub też nie zostały wcześniej uwzględnione ze względu na zbyt dużą głębokość występowania (Nosówka - ropa). Należy przy tym zauważyć, że jako potencjalne składowiska CO₂ rozpatrujemy złoża szcerpane – obecnie lub w przyszłości (które raczej już były/są eksploatowane na pełną skalę od pewnego czasu). Jeśli złożo nie jest jeszcze eksploatowane to oczywiście może nie być z niego jeszcze wszystkich parametrów produkcyjnych potrzebnych do szacowania pojemności. Stąd w niniejszej liście złóż może nie być tych dopiero co odkrytych i/lub jeszcze w pełni niezagospodarowanych.

W aplikacji GIS/WebGIS uwzględniono wspomnianą wyżej, zaktualizowaną, zweryfikowaną i uzupełnioną listę złóż – potencjalnych składowisk CO₂. Ponadto zamieszczono warstwy numeryczne wszystkich złóż – ropy i gazu z bazy CBDG.

W sumie uwzględniono, jako potencjalne składowiska 48 złóż (właściwie to o kilka mniej, bo niektóre składają się z 2-4 rozłącznych części) występujących w Polsce zachodniej, północno-zachodniej, południowo-wschodniej i jedno na Bałtyku (B3 – szcerpane w istotnym stopniu)(**Fig. 1.1.2_50**). W sumie mają one pojemność **784 mln ton**. Na **Fig. 1.1.2_51** i **52** przedstawiono przykładowe złoża gazu i ropy naftowej (spośród największych – o pojemnościach około 92 i 33 mln ton, a więc stanowiące istotny procent potencjału złóż węglowodorów, z których większość ma pojemności kilka-kilkanaście mln to a jedynie kilka posiem ponad 20 mln ton – przeważnie są to złoża gazu).

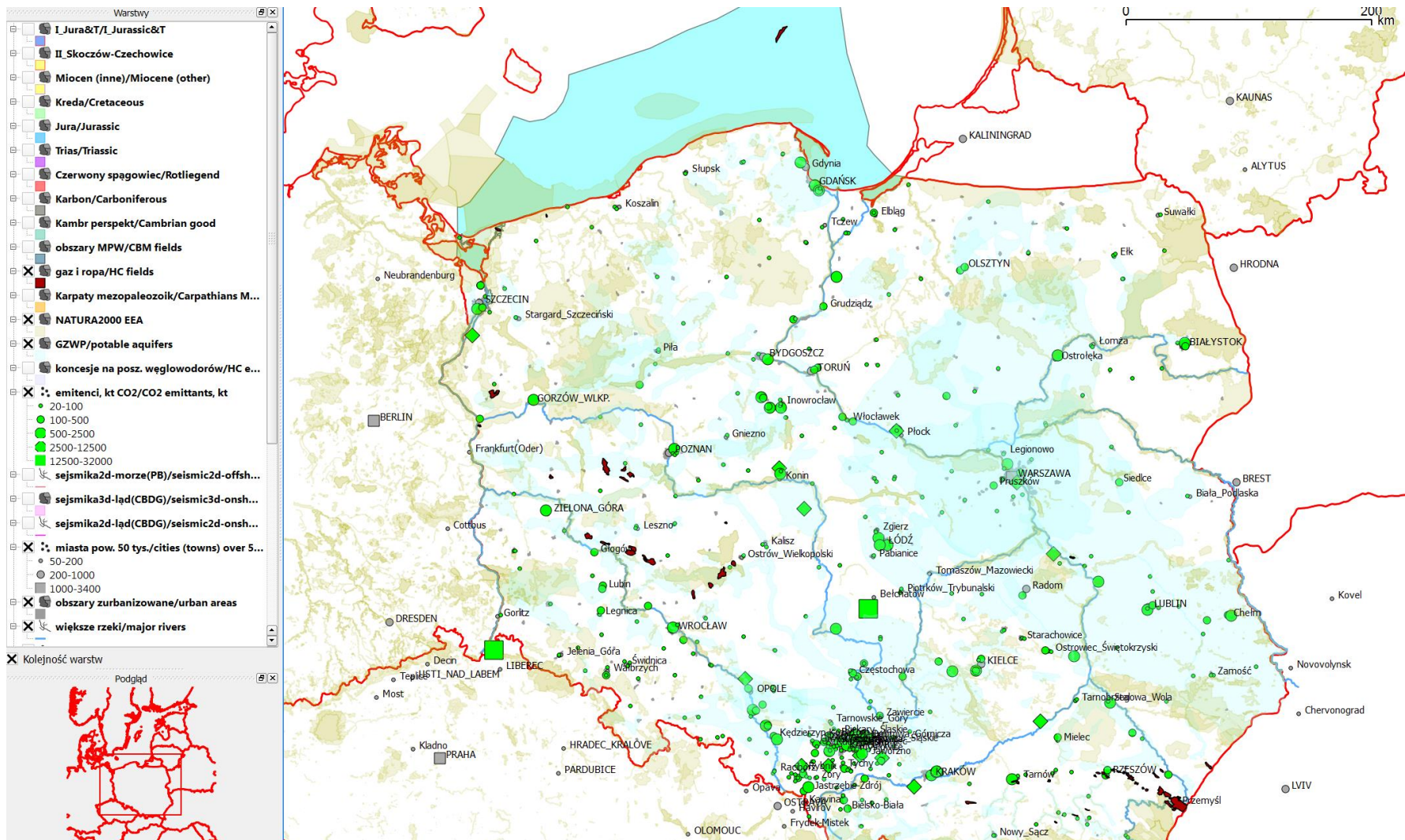


Fig. 1.1.2_50 Rozpatrywane złoża węglowodorów

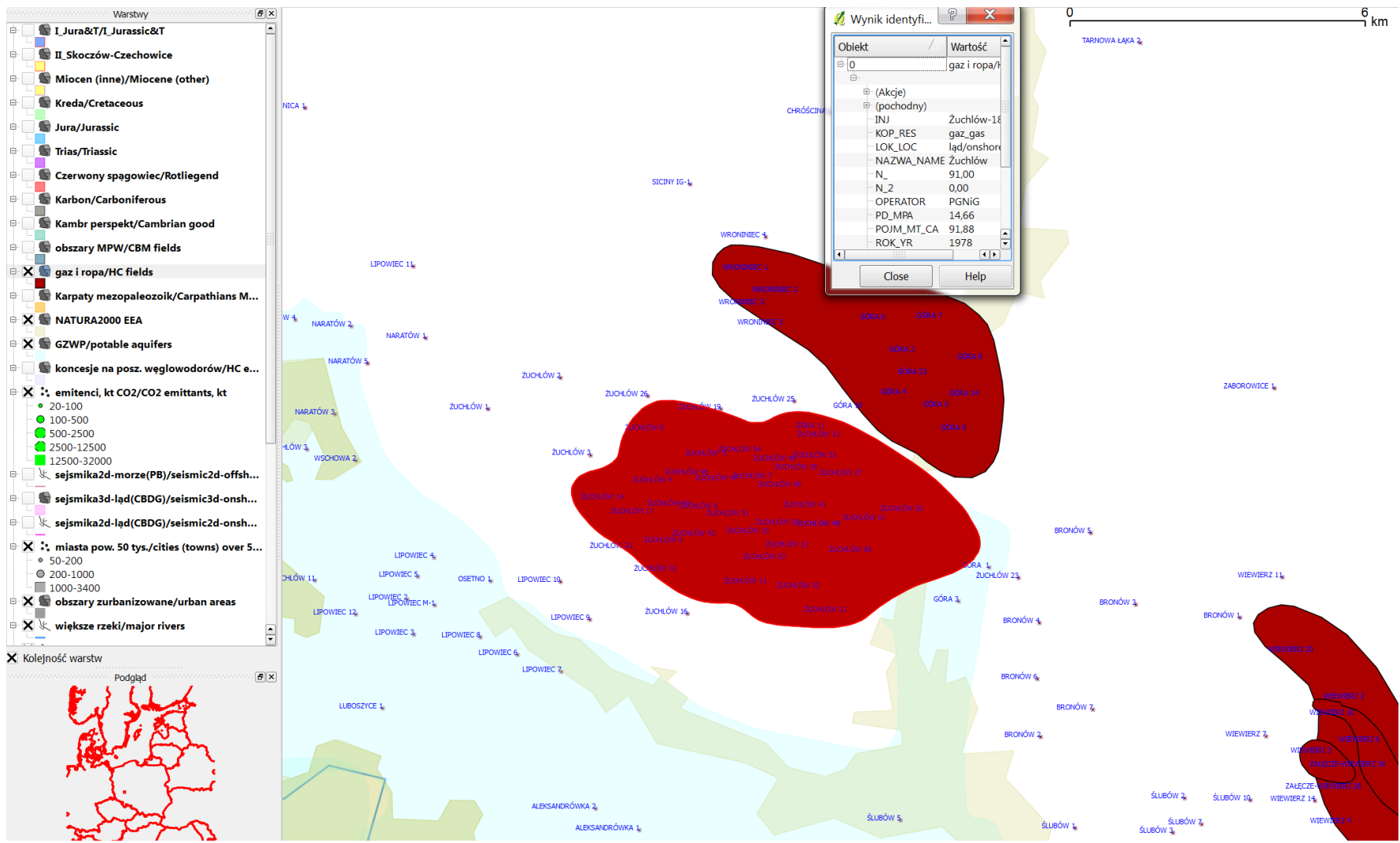


Fig. 1.1.2_51 Złoże gazu Żuchłów (koło Głogowa)

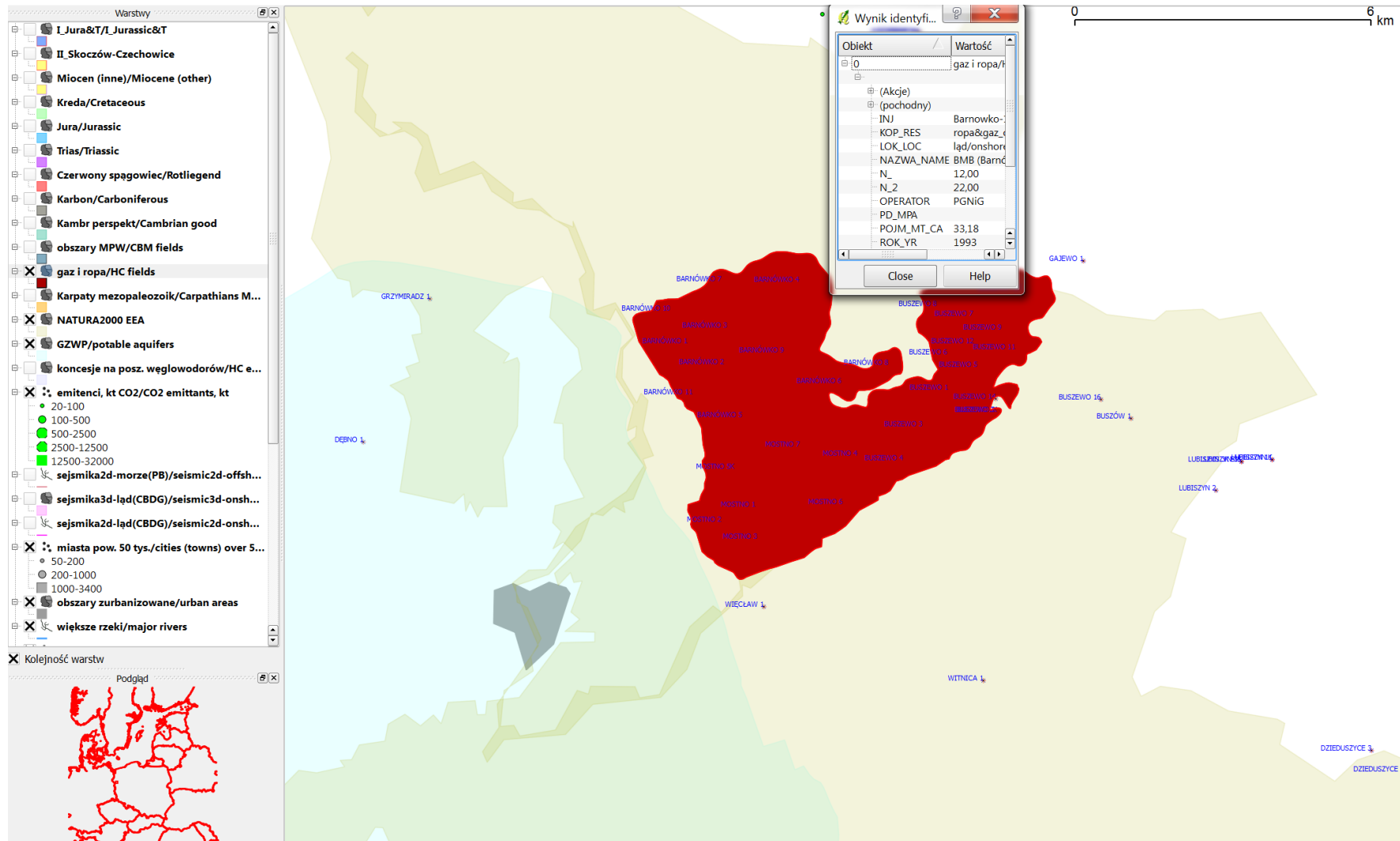


Fig. 1.1.2_52 Złoże ropy Barnówko-Mostno-Buszewo (koło Gorzowa Wlkp.)

Pokłady węgla

(Janusz Jureczka, Adam Wójcicki)

Zgodnie z wynikami prac wykonanych w innych zadaniach I Segmentu (**1.1.1, 1.1.8, 1.1.9, 1.1.20, 1.1.24, 1.1.31, 1.1.35**), a także analizami informacji z otworów wiertniczych i map strukturalnych, potencjalne pod kątem składowania CO₂ rejony badań (**Fig. 1.1.2_53**) znajdują się w centralnej i południowej części zagłębia na obszarze rozległej struktury zwanej niecką główną ku południowi przechodzącej w drugą strukturę brachysynklinalną – nieckę skoczowską.

Zostały one wybrane ze względu na powszechne występowanie poniżej głębokości 1000 m metanowych pokładów węgla, obecność w nadkładzie karbonu nieprzepuszczalnych utworów miocenu, istnienie dużych powierzchniowo obszarów odległych od czynnych kopalń węgla kamiennego oraz niski stopień zurbanizowania (Jureczka i in. 2011).

Są to następujące trzy rejony, położone generalnie na północ od obiektu solankowego Skoczów-Czechowice:

Rejon Studzienice-Międzyrzecze w centralnej części GZW – w skrzydle wiszącym uskoku jawiszowickiego, bezpośrednio na zachód od kopalni „Brzeszcze” i zamkniętej kopalni „Czczott” (**Fig. 1.1.2_54**);

Rejon Pawłowice-Mizerów w centralnej części GZW – w skrzydle wiszącym uskoku ruptawskiego, bezpośrednio na wschód od kopalni „Pniówek” (**Fig. 1.1.2_53**);

Rejon Bzie-Drogomyśl w południowo-zachodniej części GZW – w skrzydle zrzuconym uskoku ruptawskiego, bezpośrednio na południe od kopalni „Pniówek” (**Fig. 1.1.2_55**).

Pojemności (statyczne-efektywne) obiektów zostały wyznaczone przez GIG we współpracy ze specjalistami z Oddziału Górnośląskiego PIG-PIB (**zadanie 1.1.24**) zgodnie z metodyką stosowaną w projekcie EU GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen, 2009) i projekcie GESTCO.

Bilans pojemności efektywnej dla wszystkich trzech obiektów (największą ma obiekt Pawłowice-Mizerów, wytypowany do analiz II Segmentu – 8,35 mln ton) w pokładach węgla wynosi **20,2 mln ton**.

Pomijając konflikty interesów (eksploatacja, stopień zurbanizowania) można zgrubnie oszacować że dla całego GZW w przedziale głębokości 1-2 km potencjał zatłaczania CO₂ dla wspomaganie wydobywania metanu pokładów węgla może sięgać maksymalnie do 100 mln ton.

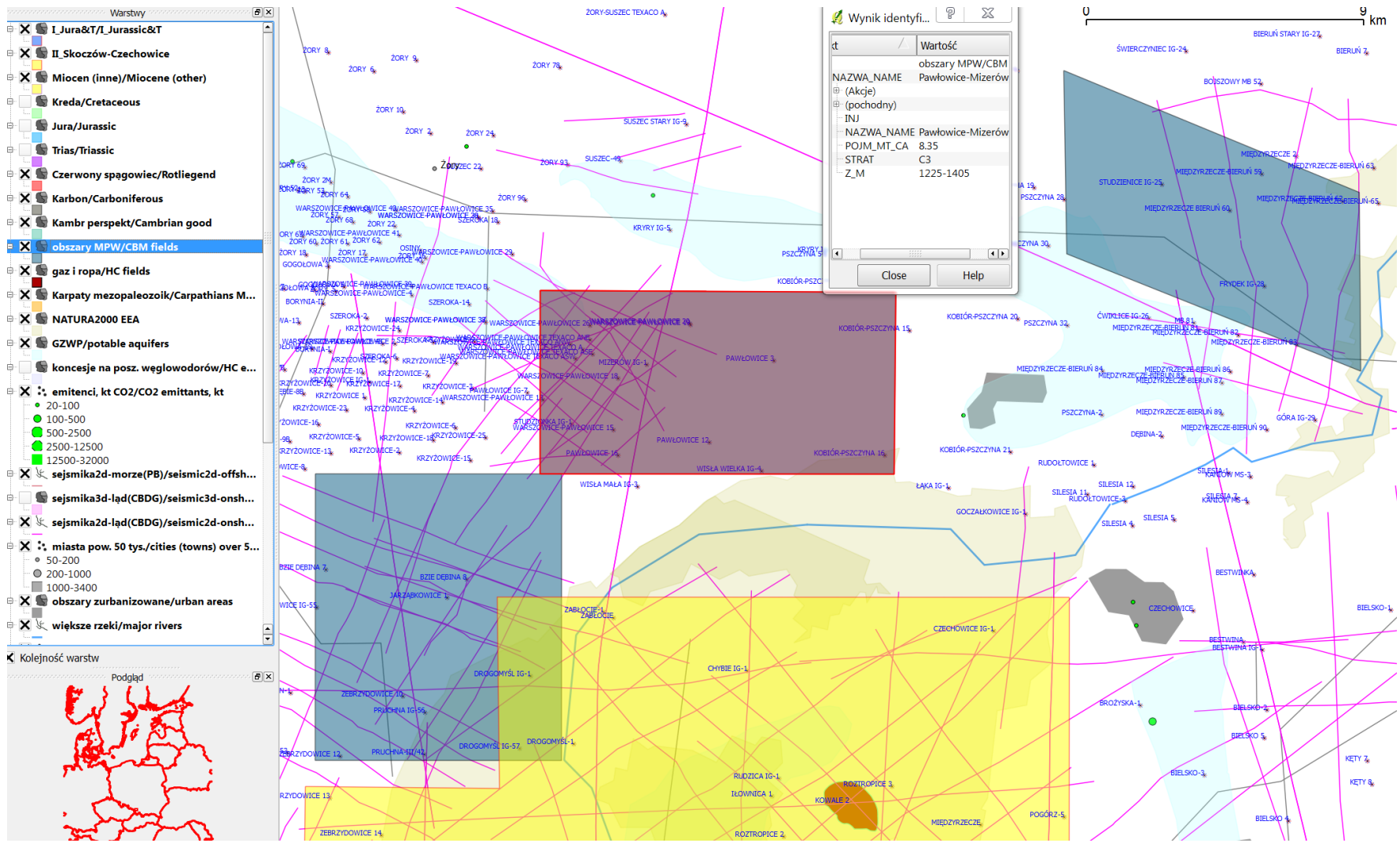


Fig. 1.1.2_53 Obiekt w pokładach węgla Pawłowice-Mizerów

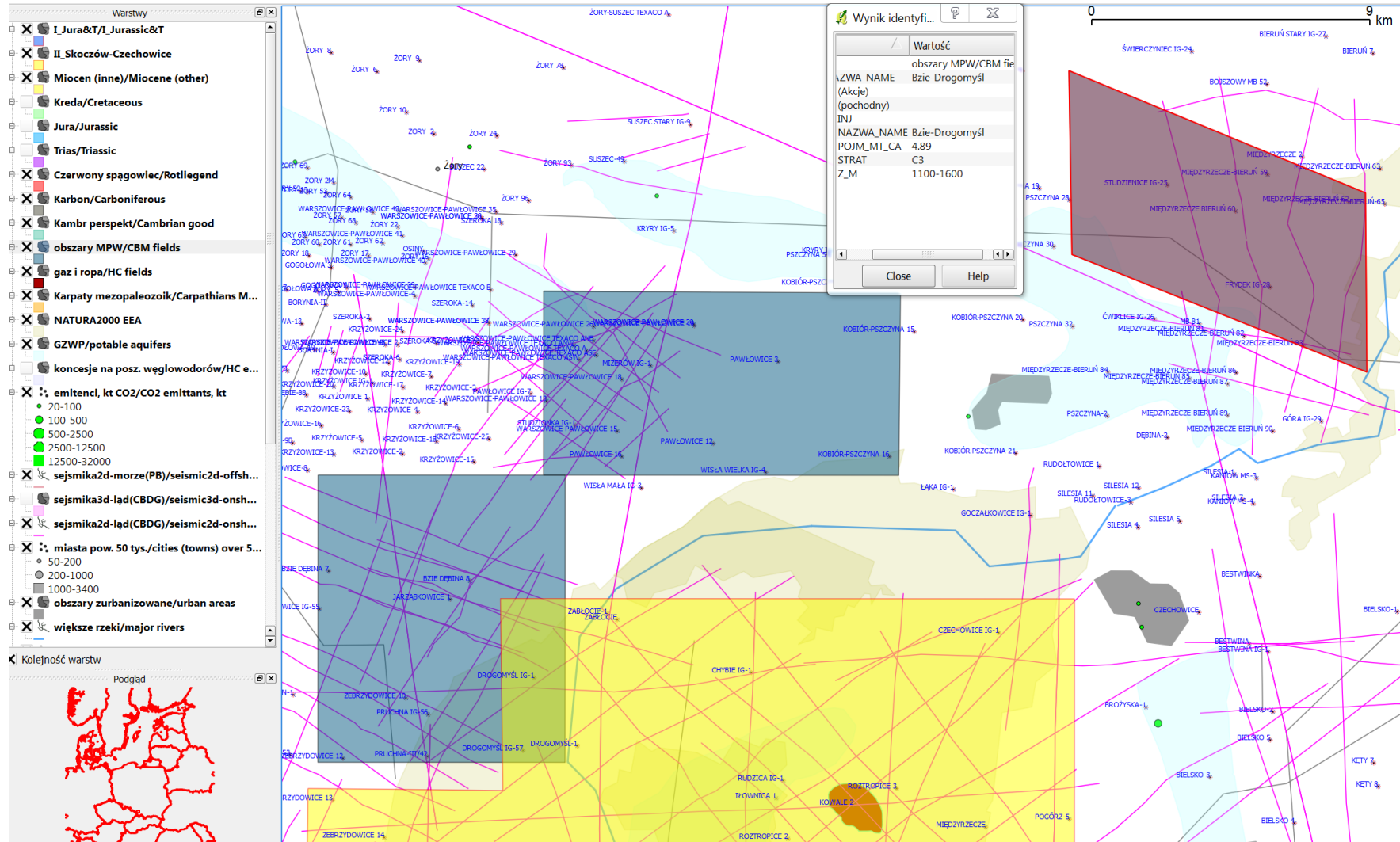


Fig. 1.1.2_54 Obiekt w pokładach węgla Studzienice-Międzyrzecze

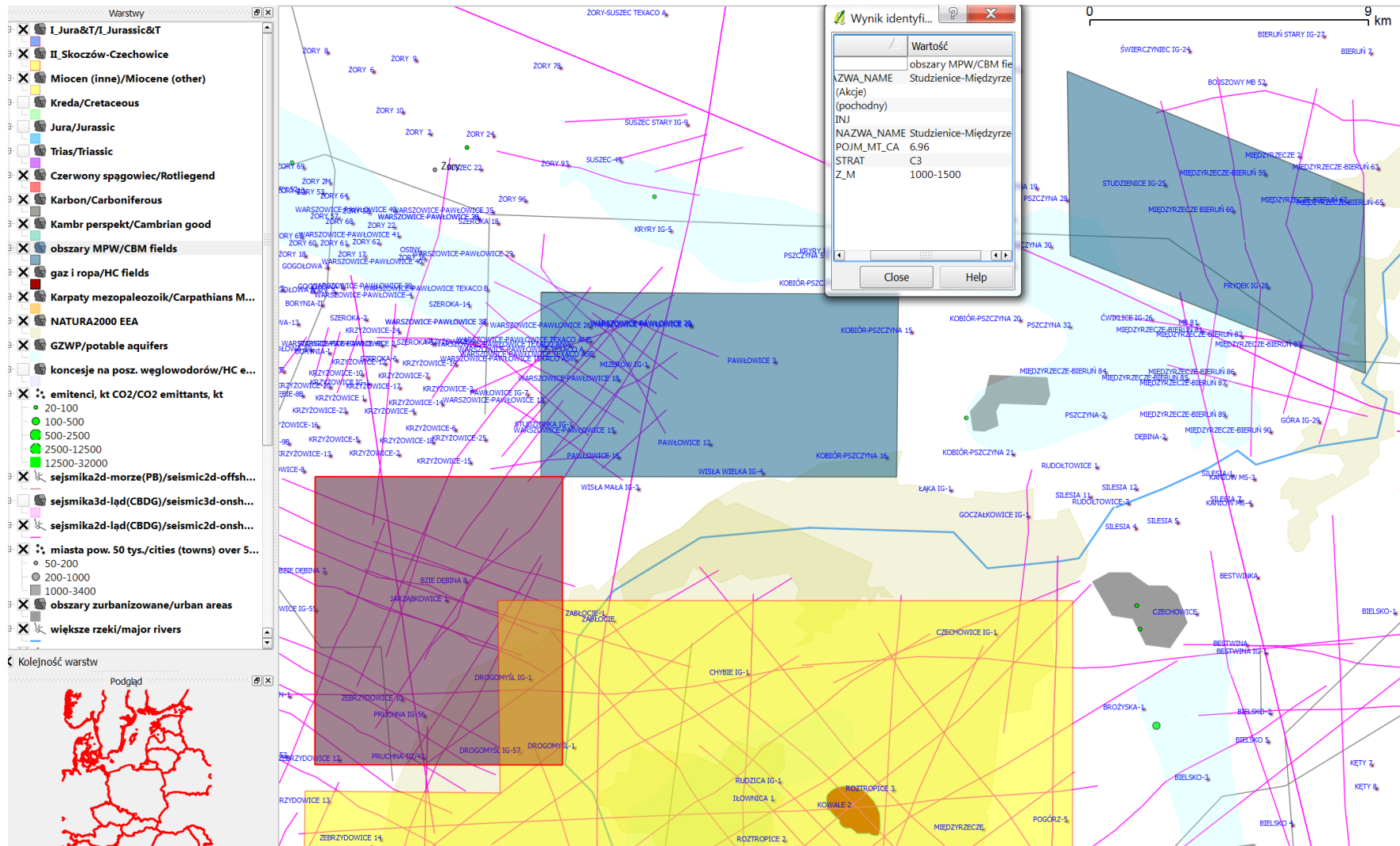


Fig. 1.1.2_55 Obiekt w pokładach węgla Biechów-Drogomyśl

Metodyka i określenie pojemności składowania dla znanych struktur (1.1.23 - IGSMiE PAN)

Zakres prac objął przedstawienie zasad określania pojemności składowania struktur w poziomach wodonośnych solankowych oraz oszacowanie pojemności składowania CO₂ (pojemność wolumetryczna i pojemność z rozpuszczania) dla struktur wytypowanych w zadaniu Charakterystyka znanych struktur mezozoicznych (1.1.19 – IGSMiE PAN) w rejonie Bełchatowa. Dane do oszacowań pojemności rozważanych struktur geologicznych do składowania dwutlenku węgla zestawiono na podstawie materiałów własnych IGSMiE PAN. Obliczenia pojemności składowania CO₂ w pułapkach strukturalnych wykonano w oparciu o metodykę stosowaną w projekcie EU GeoCapacity. Pojemność z rozpuszczania w wodzie złożowej oszacowano w oparciu o kalkulator on-line umieszczony na stronach MID-CARBON.

Pojemność podziemnego składowania dwutlenku węgla jest jednym z kluczowych czynników decydujących o przydatności struktury geologicznej do składowania. Pod pojęciem pojemności składowania CO₂ (storage capacity CO₂) rozumie się ilość dwutlenku węgla, jaka może być zatłoczona do danej struktury, bezpiecznie i bez skutków ubocznych dla środowiska (Uliasz-Misiak 2008).

W głębokich solankowych poziomach dwutlenek węgla będzie wiązany przy wykorzystaniu trzech głównych mechanizmów: wiązania poprzez rozpuszczanie w wodzie złożowej, mineralnego wiązania poprzez geochemiczne reakcje z płynami złożowymi i skałami zbiornikowymi oraz hydrodynamicznego pułapkowania CO₂ (Bachu i Adams, 2003). Pojemność składowania we wszystkich rodzajach struktur geologicznych jest determinowana głównie przez: wielkość struktury, porowatość (rozumianą jako objętość porów w skale, część zbiornika, jaka może być wypełniona przez gaz) oraz założone właściwości PVT.

Dla struktur zlokalizowanych w rejonie Bełchatowa oszacowano wolumetryczną pojemność składowania oraz pojemność składowania wynikającą z rozpuszczania CO₂ w wodzie złożowej. Wolumetryczną pojemność składowania CO₂ obliczono wykorzystując metodykę zaproponowaną w projekcie EU GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen et al., 2008). Wyraża się ona następującym wzorem:

$$M_{CO_2s} = A \times h \times \varphi \times \rho_{CO_2} \times C_{efs}$$

gdzie:

M_{CO_2s} – pojemność składowania CO₂ w strukturze geologicznej,

A – powierzchnia,

h – efektywna miąższość,

φ – porowatość,

ρ_{CO_2} – gęstość CO₂ w warunkach złożowych,

C_{efs} – współczynnik efektywności składowania CO₂.

Wolumetryczną pojemność składowania CO₂ obliczono na podstawie dostępnych danych dotyczących wybranych struktur tektonicznych: powierzchni, efektywnej miąższości, porowatości. Gęstość CO₂ w warunkach złożowych oszacowano na podstawie tabel i nomogramów (Span i Wagner 1996). Współczynnik efektywności składowania CO₂ przyjęto na poziomie 20%. Pojemność ta jest praktycznie niezależna od czasu, zależy jedynie od charakterystyki pułapki.

Rozpuszczalność CO₂ w wodzie złożowej jest funkcją ciśnienia, temperatury i mineralizacji wody. Ilość dwutlenku węgla jaka może zostać rozpuszczona w solance zwiększa się wraz ze wzrostem ciśnienia i spadkiem temperatury. Pułapkowanie przez rozpuszczanie jest procesem stałym, zależnym od czasu. Jest on najbardziej efektywny w skali długookresowej. Pojemność składowania wynikająca z rozpuszczania CO₂ jest dużo mniejsza niż pojemność składowania w strukturalnych i stratygraficznych pułapkach ponieważ dwutlenek węgla musi mieć kontakt z nienasyconą wodą, aby nastąpiło rozpuszczanie.

Rejon I - Bełchatów

(Radosław Tarkowski, Sylwester Marek, Barbara Uliasz-Misiak)

Przedmiotem oszacowania było pięć struktur (**Fig. 1.1.23_1, Tabela 1.1.23_1 i 1.1.23_2**): antyklina Jeżowa - J, antyklina Jeżowa - T, rów Kliczkowa, antyklina Lutomierska i antyklina Tuszyna⁴. Oszacowano wolumetryczną pojemność składowania oraz pojemność składowania wynikającą z rozpuszczania CO₂ w wodzie złożowej. Pojemność składowania CO₂ z rozpuszczania w wodzie złożowej oszacowano przy wykorzystaniu kalkulatora on-line (Sequestration Calculators) umieszczonego na stronach MID-CARBON. Umożliwia on wyliczenie ilości dwutlenku węgla, jaka może rozpuścić się w wodzie zawartej w danej strukturze.

⁴ Jest to opracowanie autorskie zespołu IGSMiE (chodzi o całość zadania 1.1.23), stanowiące punkt startowy do rozważań, którego wyniki były przedmiotem weryfikacji i korekty w ramach I Segmentu. Dla przykładu - antyklina Jeżowa-J została odrzucona, ponadto stwierdzono, że objętość kolektora T1, o co najwyżej dostatecznych własnościach zbiornikowych i w konsekwencji pojemność, są w najlepszym przypadku o rząd wielkości mniejsze.

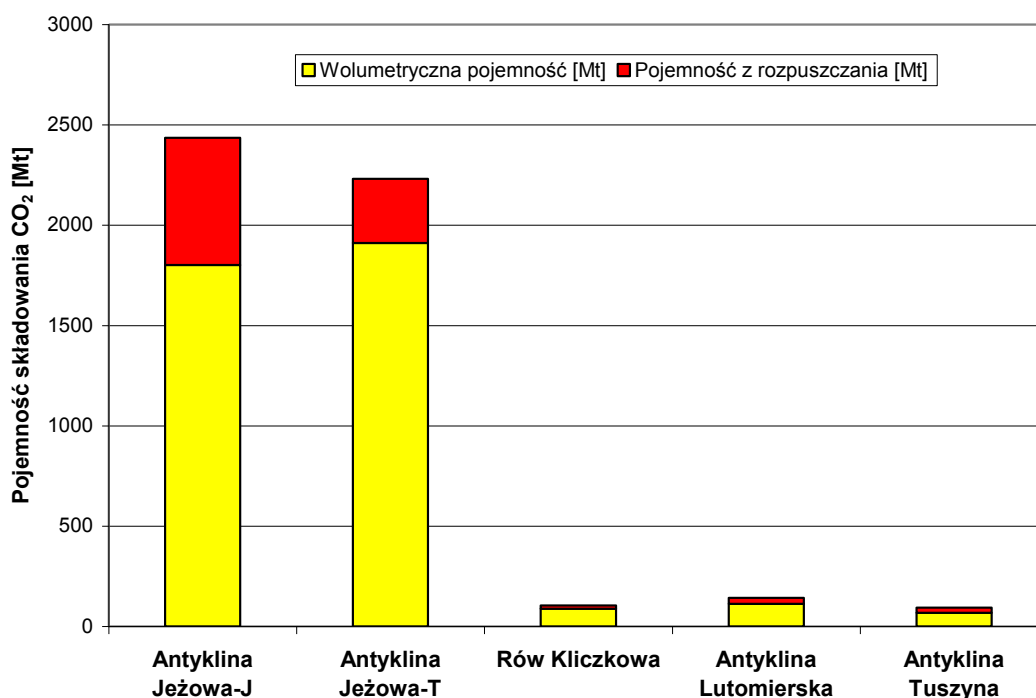


Fig. 1.1.23_1 Pojemność składowania CO₂ (wolumetryczna i z rozpuszczenia) w strukturach zlokalizowanych w rejonie Bełchatowa

Tabela 1.1.23_1 Wolumetryczna pojemność składowania CO₂ w strukturach zlokalizowanych w rejonie Bełchatowa (obszar I)

	Antyklina Jeżowa-J	Antyklina Jeżowa-T	Rów Kliczkowa	Antyklina Lutomska	Antyklina Tuszyna
Powierzchnia struktury [km ²]	250,0	250,0	250,0	45,0	24,0
Miąższość poziomu do składowania CO ₂ [m]	240,0	360,0	36,0	150,0	95,0
Porowatość ⁵ poziomu do składowania CO ₂	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3
Udział piaskowców w poziomie do składowania CO ₂	0,9	0,7	0,7	0,8	0,9
Objętość porowa poziomu do składowania CO ₂ [km ³]	10,8	12,6	0,6	0,8	0,5
Gęstość CO ₂ [kg/m ³]	834,0	758,4	700,6	739,5	693,1
Wolumetryczna pojemność składowania CO₂ [Mt]	1801,3	1911,1	88,3	112,3	67,2

⁵ Orientacyjne wartości średnie dla kolektorów, na podstawie danych laboratoryjnych oraz wyników analiz danych karotazowych (jeśli były dostępne). Uwaga dotyczy wszystkich struktur i rejonów analizowanych w zadaniu 1.1.23

Tabela 1.1.23_2 Pojemność z rozpuszczania CO₂ w strukturach zlokalizowanych w rejonie Bełchatowa (obszar I)

	Antyklina Jeżowa-J	Antyklina Jeżowa-T	Rów Kliczkowa	Antyklina Lutomierska	Antyklina Tuszyna
Powierzchnia struktury [km ²]	250,0	250,0	250,0	45,0	24,0
Miąższość efektywna poziomu do składowania CO ₂ [m]	216,0	252,0	25,2	112,5	80,8
Porowatość poziomu do składowania CO ₂	0,2	0,2	0,1	0,15	0,25
Ciśnienie złożowe [MPa]	7,5	31,9	9,4	17,8	7,4
Temperatura złożowa [°C]	16,4	70,6	33,4	50,0	34,8
Gęstość CO ₂ [kg/m ³]	834,0	758,4	700,6	739,5	693,1
Mineralizacja średnia [g/dcm ³]	8	360	237,5	102,5	0,25
Pojemność z rozpuszczania [Mt]	633,7	320,2	15,8	30,1	26,5

Rejon Mazowska (III), linii Koziencice-Lublin (V) oraz Wielkopolski i Kujaw (VI) (Radosław Tarkowski, Sylwester Marek, Barbara Uliasz-Misiak)

Zakres prac obejmował zasady określania pojemności składowania struktur w poziomach wodonośnych solankowych oraz oszacowanie pojemności składowania CO₂ (pojemność wolumetryczna i pojemność z rozpuszczania) dla wytypowanych przez IGSMiE PAN w zadaniu 1.1.19 (Charakterystyka znanych struktur mezozoicznych – etap 2) struktur w obszarze III (rejon Mazowska), V (rejon linii Koziencice-Lublin) i VI (rejon Wielkopolski i Kujaw).

Dane do oszacowań pojemności struktur geologicznych rozważanych do składowania dwutlenku węgla zestawiono na podstawie materiałów własnych IGSMiE PAN. Obliczenia pojemności składowania CO₂ w pułapkach strukturalnych wykonano w oparciu o metodykę stosowaną w projekcie EU GeoCapacity. Pojemność z rozpuszczania w wodzie złożowej oszacowano w oparciu o kalkulator on-line umieszczony na stronach MID-CARBON.

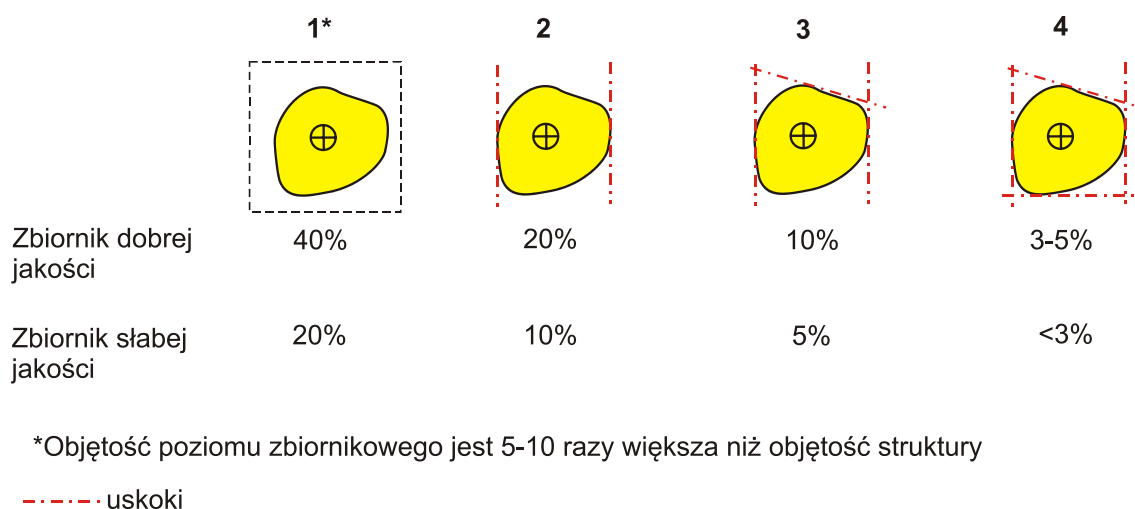


Fig. 1.1.23_2 Współczynnik efektywności składowania - podejście praktyczne (*rule-of-thumb*)(Raport D24-Storage capacity standards)

W oszacowaniach pojemności wykonanych w ramach projektu EU GeoCapacity zaproponowano, aby wartość współczynnika efektywności składowania przyjmować w zależności od tego czy struktura rozważana jako miejsce składowania jest zamknięta, częściowo zamknięta lub otwarta oraz od jakości zbiornika. W projekcie zaproponowano dwa podstawowe podejścia do oceny współczynnika efektywności składowania przy oszacowaniu pojemności rule-of-thumb (wartość współczynników dobierana w oparciu o doświadczenie np. z magazynów gazu ziemnego) lub inżynierii złożowej. Struktura otwarta jest to struktura nieoddzielona od całego poziomu wodonośnego granicami strukturalnymi lub litologicznymi. Struktura zamknięta to struktura oddzielona od poziomu wodonośnego np. uskoki. W przypadku struktur otwartych i częściowo zamkniętych, gdy istnieje połączenie między pułapką a poziomem wodonośnym

przyjęto, że współczynnik efektywności składowania wynosi od 10% do 40% (dla struktur o dobrych parametrach zbiornikowych) i od 5% do 20% (dla zbiorników o niskich parametrach zbiornikowych). Dla struktur zamkniętych współczynnik ten przyjmuje wartości od poniżej 3% do 5%. Przy zastosowaniu podejścia inżynierii złożowej, zwłaszcza w strukturach zamkniętych, przy doborze wielkości współczynnika efektywności składowania uwzględnia się dopuszczalny wzrost ciśnienia w strukturze, ściśliwość skał i płynów lub zasięg strefy oddziaływania zatłaczania dwutlenku węgla. Takie podejście sugeruje, że zakres wartości współczynnika efektywności składowania zależy od głębokości (tj. ciśnienia) i stosunku objętości pułapki do objętości poziomu wodonośnego. Dla poziomów do składowania zalegających na głębokości 2 000 m i stosunkami objętości pułapki do objętości poziomu wodonośnego 5, 10, 50 i 100, współczynnik efektywności składowania wynosi odpowiednio 1%, 2%, 10% i 20% (**Fig. 1.1.23_2**) zakładając maksymalny wzrost średniego ciśnienia 10% w stosunku do ciśnienia hydrostatycznego i całkowitą ściśliwość (pory + płyny) rzędu 10-4/bar-1 (Raport D24-Storage capacity standards).

Pojemność składowania CO₂ znanych struktur mezozoicznych w obszarze III, V i VI

Przedmiotem oszacowania były 34 struktury w obszarze III, V i VI:

- - rejon Mazowska (obszar III) - antyklina Bielska-Bodzanowa-K, antyklina Bielska-J, Bodzanowa-J, antyklina Dzierżanowa, antyklina Gostynina, antyklina Kamionek-K, antyklina Kamionek-J, antyklina Lipna-K, antyklina Lipna-J, antyklina Sierpca-K, antyklina Sierpca-J, antyklina Sochaczewa, antyklina Wyszogrodu, antyklina Żyrowa-Czachówka,
- - rejon linii Kozienice-Lublin (obszar V) - blok Stężycy, blok Rycic, blok Abramowa, blok Baranowa, blok Ciecierzyna-Świdnika-Minkowic,
- - rejon Wielkopolski i Kujaw (obszar VI) - antyklina Brześcia Kujawskiego-J (borucickie), antyklina Brześcia Kujawskiego-J (sławęcińskie), antyklina Gopła-K, antyklina Gopła-J, antyklina Janowca, antyklina Konar-J, antyklina Konar-T, antyklina Nowa Wieś Wielkie, antyklina Ponętowa, rów Siekierok, antyklina Strzelna, antyklina Szubina, antyklina Trześniewa, antyklina Turka, antyklina Wartkowic.

Oszacowano pojemność składowania w przestrzeni porowej struktur oraz pojemność składowania wynikającą z rozpuszczania CO₂ w wodzie złożowej. Pojemność składowania CO₂ z rozpuszczania w wodzie złożowej oszacowano przy wykorzystaniu kalkulatora on-line (Sequestration Calculators) umieszczonego na stronach MID-CARBON. Umożliwia on wyliczenie ilości dwutlenku węgla, jaka może rozpuścić się w wodzie zawartej w danej strukturze.

Pojemność składowania CO₂ rozważanych struktur w poszczególnych obszarach wynosi:

- obszar III - 5896,2 Mt, w tym 4347,7 Mt pojemność składowania w przestrzeni porowej i 1548,5 Mt – pojemność z rozpuszczania,
- obszar V - 616,2 Mt, w tym 502,7 Mt pojemność składowania w przestrzeni porowej i 113,5 Mt – pojemność z rozpuszczania,

- obszar VI - 4399,3 Mt, w tym 3398,0 Mt pojemność składowania w przestrzeni porowej i 1001,3 Mt – pojemność z rozpuszczania.

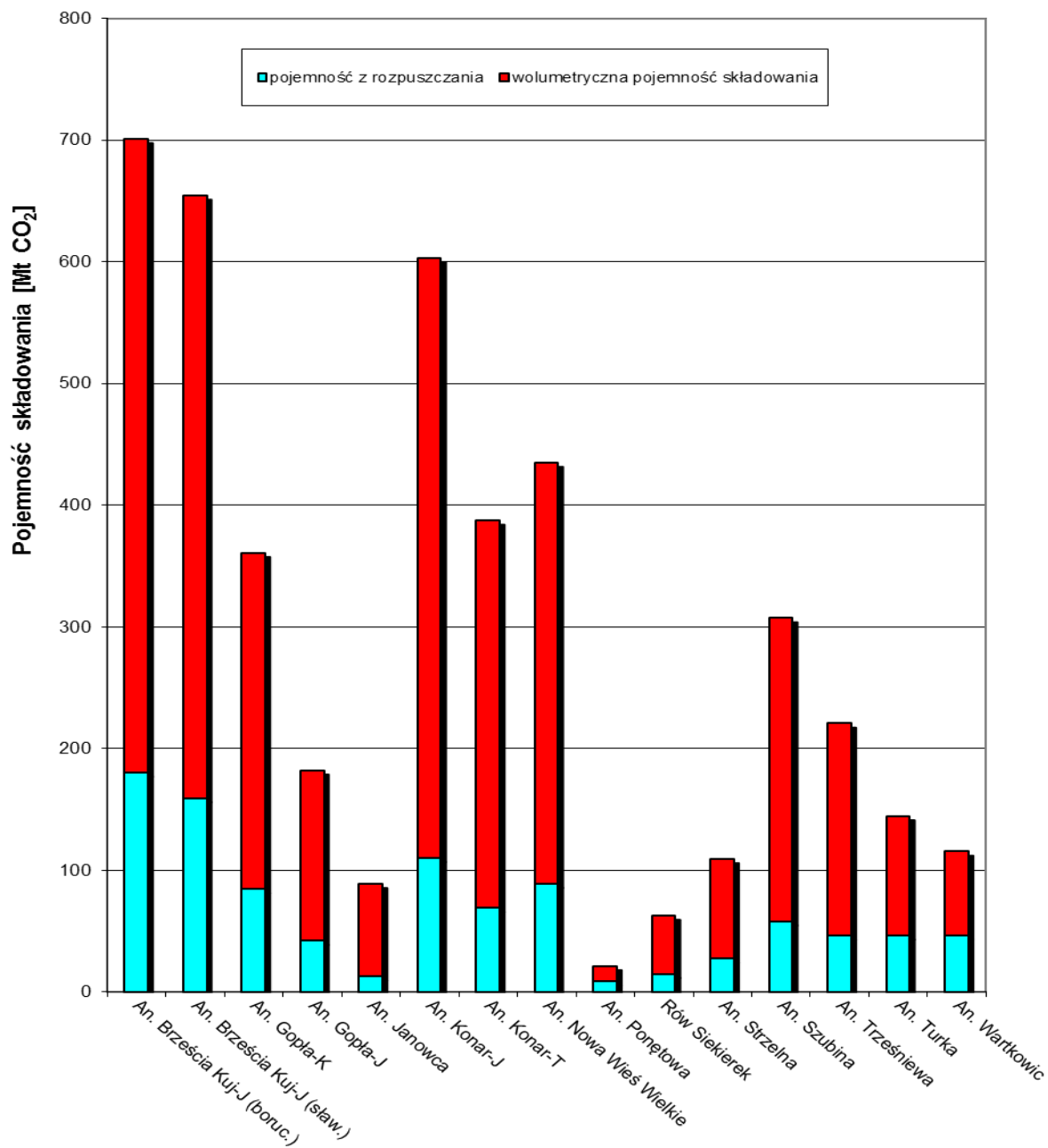


Fig. 1.1.23_3 Pojemność składowania CO₂ (w przestrzeni porowej i z rozpuszczania) w strukturach zlokalizowanych w rejonie Mazowsza (obszar III)

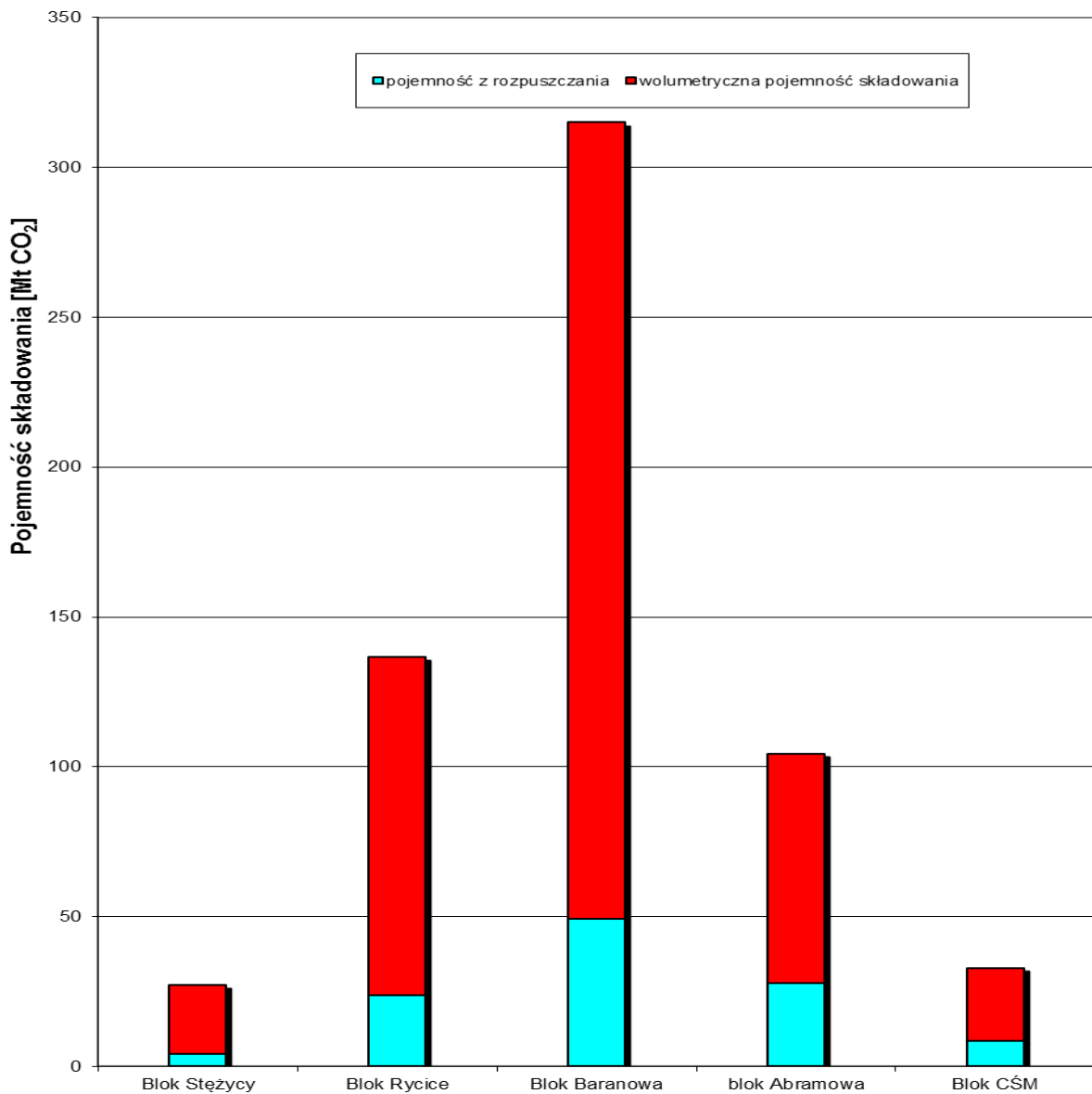


Fig. 1.1.23_4 Pojemność składowania CO₂ (w przestrzeni porowej i z rozpuszczania) w strukturach zlokalizowanych w rejonie linii Kozienice-Lublin (obszar V)

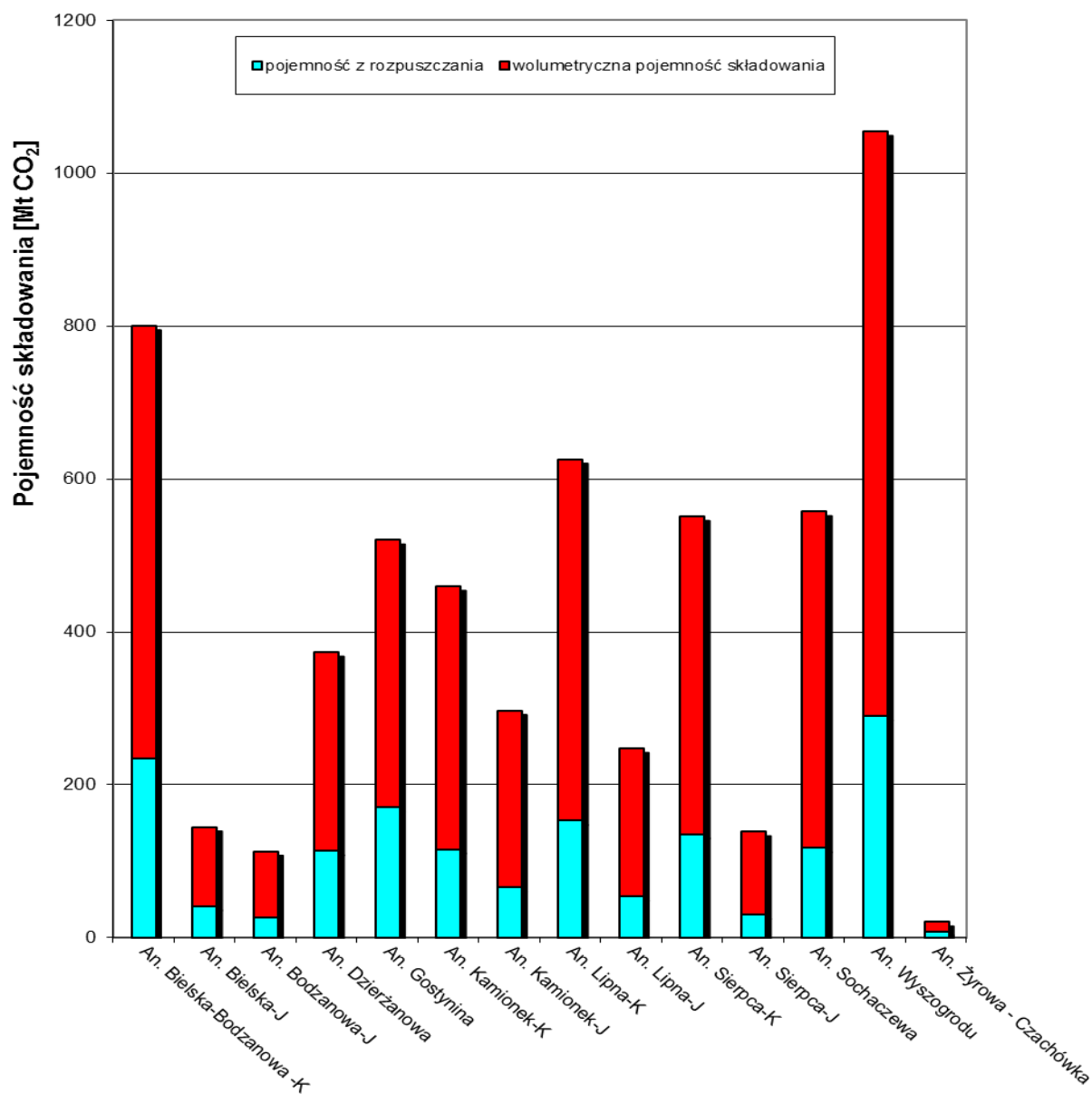


Fig. 1.1.23_5 Pojemność składowania CO₂ (w przestrzeni porowej i z rozpuszczania) w strukturach zlokalizowanych w rejonie rejon Wielkopolski i Kujaw (obszar VI)

Podsumowanie

Dla struktur wytypowanych do składowania CO₂ w mezozoicznych solankowych poziomach w rejonie Mazowsza, linii Koziernice-Lublin, rejon Wielkopolski i Kujaw obliczono pojemność składowania CO₂ w przestrzeni porowej oraz dokonano oszacowania pojemności składowania wynikającej z rozpuszczania CO₂ w wodzie złożowej (**Fig. 1.1.23_3 – 5; Tabela 1.1.23_3 - 8**). Całkowita pojemność składowania CO₂ dla wytypowanych struktur wynosi 10911,7 Mt (8248,4 Mt – w przestrzeni porowej, 2663,2 Mt – z rozpuszczania).

Pojemność składowania w przestrzeni porowej dla poszczególnych struktur jest bardzo zróżnicowana i waha się od 12,1 (antyklina Żyrowa-Czachówka) do 764,7 Mt (antyklina Wyszogrodu) dwutlenku węgla.

Pojemność z rozpuszczania CO₂ jest mniejsza niż pojemność w przestrzeni porowej i wynosi od 4,2 (blok Stężycy) do 289,3 Mt (antyklina Wyszogrodu).

Tabela 1.1.23_3 Pojemność składowania CO₂ w przestrzeni porowej w strukturach zlokalizowanych w rejonie Mazowsza (obszar III)

	Powierzchnia struktury [km ²]	Miąższość poziomu do składowania CO ₂ [m]	Porowatość poziomu do składowania CO ₂	Udział piaskowców w poziomie do składowania CO ₂	Współczynnik efektywności składowania	Gęstość CO ₂ [kg/m ³]	Pojemność składowania CO ₂ w przestrzeni porowej [Mt]
Antyklina Bielska-Bodzanowa -K	100,0	160,0	30%	80%	20%	737	566,2
Antyklina Bielska-J	22,0	275,0	15%	80%	20%	712	103,4
Antyklina Bodzanowa-J	30,0	170,0	15%	80%	20%	712	87,1
Antyklina Dzierżanowa	75,0	144,0	20%	85%	20%	708	259,8
Antyklina Gostynina	500,0	130,0	10%	70%	20%	768	349,4
Antyklina Kamionek-K	75,0	170,0	20%	85%	20%	793	343,7
Antyklina Kamionek-J	75,0	170,0	15%	85%	20%	712	231,5
Antyklina Lipna-K	75,0	150,0	30%	85%	20%	824	472,7
Antyklina Lipna-J	75,0	139,0	15%	85%	20%	728	193,4
Antyklina Sierpca-K	75,0	146,0	30%	80%	20%	790	415,3
Antyklina Sierpca-J	75,0	65,0	15%	85%	20%	872	108,4
Antyklina Sochaczewa	85,0	135,0	30%	80%	20%	799	440,0

Antyklina Wyszogrodu	150,0	135,0	30%	80%	20%	787	764,7
Antyklina Żyrowa - Czachówka	12,5	45,0	30%	90%	20%	797	12,1

Tabela 1.1.23_4 Pojemność z rozpuszczania CO₂ w strukturach zlokalizowanych w rejonie Mazowsza (obszar III)

	Powierzchnia struktury [km ²]	Miąższość efektywna poziomu do składowania CO ₂ [m]	Porowatość poziomu do składowania CO ₂	Ciśnienie złożowe [MPa]	Temperatura złożowa [°C]	Gęstość CO ₂ [kg/m ³]	Mineralizacja średnia [g/dcm ³]	Pojemność z rozpuszczania [Mt]
Antyklina Bielska-Bodzanowa -K	100,0	128,0	30%	10,1	22,6	737	2,3	233,7
Antyklina Bielska-J	22,0	220,0	15%	23,1	48,4	712	100,0	40,9
Antyklina Bodzanowa-J	30,0	136,0	15%	23,1	48,4	712	100,0	25,4
Antyklina Dzierżanowa	75,0	122,4	20%	10,1	23,6	708	10,0	113,0
Antyklina Gostynina	500,0	91,0	10%	21,0	53,2	768	112,5	170,2
Antyklina Kamionek-K	75,0	144,5	20%	13,4	28,6	793	30,0	115,3
Antyklina Kamionek-J	75,0	144,5	15%	23,2	49,8	712	106,5	65,1
Antyklina Lipna-K	75,0	127,5	30%	12,8	27,0	824	25,0	152,5

Antyklina Lipna-J	75,0	118,2	15%	25,9	51,5	728	103,0	53,7
Antyklina Sierpca-K	75,0	116,8	30%	10,6	22,6	790	39,0	135,0
Antyklina Sierpca-J	75,0	55,3	15%	20,7	41,2	872	39,0	29,6
Antyklina Sochaczewa	85,0	108,0	30%	12,1	27,2	799	5,5	116,9
Antyklina Wyszogrodu	150,0	108,0	30%	11,8	26,7	787	5,5	289,3
Antyklina Żyrowa - Czachówka	12,5	40,5	30%	11,4	24,0	797	27,5	7,9

Tabela 1.1.23_5 Pojemność składowania CO₂ w przestrzeni porowej w strukturach zlokalizowanych w rejonie linii Koziernice-Lublin (obszar V)

	Powierzchnia struktury [km²]	Miąższość poziomu do składowania CO₂ [m]	Porowatość poziomu do składowania CO₂	Współczynnik efektywności składowania	Gęstość CO₂ [kg/m³]	Pojemność składowania CO₂ w przestrzeni porowej [Mt]
Blok Stężycy	12,0	7-60	10%-20%	20%	815-849	23,0
Blok Rycic	19,0	30-200	10%-15%	20%	815-833	112,8
Blok Baranowa	54,0	8-100	10%-14%	20%	815-856	265,8
Blok Abramowa	27,0	12-70	10%	20%	802-853	76,8

Blok CŚM	20,0	15-45	8,50%-12%	20%	850-859	24,4
----------	------	-------	-----------	-----	---------	------

Tabela 1.1.23_6 Pojemność z rozpuszczania CO₂ w strukturach zlokalizowanych w rejonie linii Kozienice-Lublin (obszar V)

	Powierzchnia struktury [km ²]	Miąszość efektywna poziomu do składowania CO ₂ [m]	Porowatość poziomu do składowania CO ₂	Ciśnienie złożowe [MPa]	Temperatura złożowa [°C]	Gęstość CO ₂ [kg/m ³]	Mineralizacja średnia [g/dcm ³]	Pojemność z rozpuszczania [Mt]
Blok Stężycy	12,0	7-60	10%-20%	14,0-25,5	27,8,0-50,7	815-849	100-220	4,2
Blok Rycic	19,0	30-200	10%-15%	13,5-23,7	26,8-47,2	815-833	150-180	23,9
Blok Baranowa	54,0	8-100	10%-14%	13,6-24,7	27,0-47,2	815-856	150-220	49,3
Blok Abramowa	27,0	12-70	10%	8,8-19,8	17,4-39,4	802-853	50-90	27,7
Blok CŚM	20,0	15-45	8,50%-12%	7,6-9,0	15,1-17,8	850-859	50-90	8,5

Tabela 1.1.23_7 Pojemność składowania CO₂ w przestrzeni porowej w strukturach zlokalizowanych w rejonie rejon Wielkopolski i Kujaw (obszar VI)

	Powierzchnia struktury [km ²]	Mięszość poziomu do składowania CO ₂ [m]	Porowatość poziomu do składowania CO ₂	Udział piaskowców w poziomie do składowania CO ₂	Współczynnik efektywności składowania	Gęstość CO ₂ [kg/m ³]	Pojemność składowania CO ₂ w przestrzeni porowej [Mt]
Antyklina Brześcia Kujawskiego-J (borucickie)	122,5	240,0	15%	85%	20%	694	520,5
Antyklina Brześcia Kujawskiego-J (sławęcińskie)	119,0	235,0	15%	85%	20%	694	495,1
Antyklina Gopła-K	100,0	100,0	20%	85%	20%	813	276,4
Antyklina Gopła-J	100,0	85,0	15%	70%	20%	784	140,0
Antyklina Janowca	150,0	130,0	10%	27,5%	20%	710	76,1
Antyklina Konar -J	250,0	160,0	10%	80%	20%	770	492,8
Antyklina Konar -T	250,0	500,0	10%	17,5%	20%	728	318,3
Antyklina Nowa Wieś Wielkie	105,0	200,0	15%	70%	20%	784	345,9
Antyklina Ponętowa	16,3	130,0	15%	80%	10%	505	12,8
Rów Siekierok	187,5	60,0	10%	60%	10%	708	47,8
Antyklina Strzelna	24,0	130,0	20%	85%	20%	773	82,0
Antyklina Szubina	200,0	159,0	10%	50%	20%	783	249,1

Antyklina Trzešniewa	50,0	130,0	20%	85%	20%	789	174,4
Antyklina Turka	84,0	90,0	20%	90%	20%	360	98,0
Antyklina Wartkowic	49,5	130,0	20%	80%	10%	668	68,8

Tabela 1.1.23_8 Pojemność z rozpuszczania CO₂ w strukturach zlokalizowanych w rejonie rejon Wielkopolski i Kujaw (obszar VI)

	Powierzchnia struktury [km ²]	Miąszość efektywna poziomu do składowania CO₂ [m]	Porowatość poziomu do składowania CO₂	Ciśnienie złożowe [MPa]	Temperatura złożowa [°C]	Gęstość CO₂ [kg/m ³]	Mineralizacja średnia [g/dcm ³]	Pojemność z rozpuszczania [Mt]
Antyklina Brześcia Kujawskiego-J (borucickie)	122,5	204,0	15%	9,7	29,0	694	44,5	180,8
Antyklina Brześcia Kujawskiego-J (sławęcińskie)	119,0	199,8	15%	11,9	35,8	694	44,5	159,8
Antyklina Gopła-K	100,0	85,0	20%	6,5	17,1	813	30,0	84,8
Antyklina Gopła-J	100,0	59,5	15%	15,4	40,5	784	30,0	42,5
Antyklina Janowca	150,0	35,8	10%	22,4	53,7	710	208,0	13,1
Antyklina Konar -J	250,0	128,0	10%	9,6	26,0	770	150,0	110,6

Antyklina Konar -T	250,0	87,5	10%	26,3	71,8	728	150,0	69,4
Antyklina Nowa Wieś Wielkie	105,0	140,0	15%	15,5	40,1	784	100,0	89,4
Antyklina Ponętowa	16,3	104,0	15%	12,5	55,8	505	100,0	8,9
Rów Siekierok	187,5	36,0	10%	13,2	47,1	708	350,0	15,3
Antyklina Strzelna	24,0	110,5	20%	11,1	24,9	773	30,5	27,7
Antyklina Szubina	200,0	79,5	10%	10,4	28,0	783	137,5	58,5
Antyklina Trzešniewa	50,0	111,8	20%	16,8	41,7	789	92,0	46,6
Antyklina Turka	84,0	81,0	20%	12,0	64,8	360	75,0	46,8
Antyklina Wartkowic	49,5	104,0	20%	9,8	36,8	668	30,0	47,0

Rejon frontu Karpat/zapadliska przedkarpackiego (IV) i NW Polski (VII)

(Radosław Tarkowski, Sylwester Marek, Barbara Uliasz-Misiak)

Zakres prac obejmował zasady określania pojemności składowania struktur w poziomach wodonośnych solankowych oraz oszacowanie pojemności składowania CO₂ (pojemność wolumetryczna i pojemność z rozpuszczania) dla wytypowanych przez IGSMiE PAN w zadaniu 1.1.19 (Charakterystyka znanych struktur mezozoicznych – Etap 3) struktur w obszarze IV (rejon frontu Karpat/zapadliska przedkarpackiego), VII (rejon NW Polski).

Podstawy metodyczne wyznaczania pojemności składowania w poziomach wodonośnych solankowych

Pojemność składowania CO₂ jest to ilość gazu, jaką można umieścić w rozpatrywanej strukturze geologicznej. Jest ona determinowana przez: wielkość struktury, miąższość utworów do składowania, ich porowatość, właściwości PVT, gęstość CO₂, rodzaj płynów złożowych wypełniających strukturę oraz skalę czasową (Uliasz-Misiak, 2008).

W głębokich solankowych poziomach dwutlenek węgla będzie wiązany przy wykorzystaniu trzech mechanizmów: wiązania poprzez rozpuszczanie w wodzie złożowej, mineralnego wiązania poprzez geochemiczne reakcje z płynami złożowymi i skałami zbiornikowymi oraz hydrodynamicznego pułapkowania CO₂ (Bachu i Adams, 2003). Pojemność składowania we wszystkich rodzajach struktur geologicznych jest determinowana głównie przez: wielkość struktury, porowatość (rozumianą jako objętość porów w skale, część zbiornika, jaka może być wypełniona przez gaz) oraz założone właściwości PVT. Oceny pojemności składowania CO₂ w głębokich poziomach wodonośnych dokonane przez różnych autorów charakteryzują się dużym zróżnicowaniem, ze względu na różne metody i wykorzystane dane oraz poziom ich wiarygodności, uwzględnione mechanizmy pułapkowania.

Jednym ze sposobów uwzględnienia licznych aspektów związanych z pojemnością składowania CO₂, m. in. różnych procesów zależnych od czasu, skal oszacowań oraz typów zbiorników, jest stosowanie klasyfikacji pojemności składowania opartej na koncepcji piramidy zasobów przedstawionej przez McCabe (1998) do oceny zasobów węglowodorów w skali świata (Bachu i in., 2007). Przy ocenie pojemności składowania CO₂ rozpatruje się uwarunkowania geologiczne, hydrogeologiczne, techniczne, ekonomiczne stosując różnego rodzaju piramidy „*High Level Capacity Pyramid*”, „*Technico-Economic Pyramid*” And „*Trap Type And Effectiveness Pyramid*”. Piramida techniczno-ekonomiczna stosowana jest, jako podstawowa przy szacowaniu pojemności składowania dwutlenku węgla. Uwzględnia ona zasadnicze czynniki decydujące o możliwości i wielkości składowania, umożliwia dokonywanie ocen w różnych skalach od kraju do miejsca składowania. Wyróżnia się w niej cztery kategorie techniczno – ekonomiczne (Uliasz-Misiak, 2009):

- teoretyczną pojemność składowania (*Theoretical Capacity*) jest to maksymalna całkowita ilość CO₂, jaką jednostka geologiczna może pomieścić,
- efektywną pojemność składowania (*Effective Capacity*) - część pojemności teoretycznej, jaka może być dostępna do składowania przy uwzględnieniu dodatkowych kryteriów wynikających z przyjętej technologii składowania,

- praktyczną pojemność składowania (*Practical Capacity*) - część pojemności efektywnej, którą określa się przy uwzględnieniu technicznych, ekonomicznych i prawnych barier dla składowania dwutlenku węgla,
- dopasowaną (wykorzystywaną) pojemność składowania (*Matched Storage Capacity*) - część pojemności praktycznej otrzymywana przez porównanie wielkości emisji z dużych punktowych źródeł z pojemnością miejsca geologicznego składowania, przy uwzględnieniu pojemności, chłonności i prędkości zatłaczania.

Zgodnie z tym podziałem pojemność teoretyczna odpowiada całkowitej objętość porów w danej strukturze, jest ona nierealistyczna, ponieważ nie można wypełnić wszystkich porów w zbiorniku. Pojemność efektywna to ta część zbiornika, która może być wykorzystana do składowania dwutlenku węgla przy uwzględnieniu ograniczeń geologicznych i inżynierskich. Istnieje wiele metodologii szacowania pojemności składowania, z tego powodu oceny tej wielkości bardzo różnią się między sobą (Bachu i in., 2007). Najprostsze metodyki bazują na obliczeniach wykonanych w oparciu o wzory i mało szczegółowe dane. Pozwalają one dla wstępnie wytypowanych miejsc składowania uzyskać informacje potrzebne do podjęcia decyzji o wykonywaniu dla tych struktur szczegółowej analizy. Oceny tego rodzaju uwzględniają tylko jeden mechanizm pułapkowania, nie bierze się w nich pod uwagę skali czasowej. Najbardziej dokładne i wiarygodne wyniki oszacowań pojemności składowania otrzymuje się w wyniku modelowania zatłaczania dwutlenku węgla dzięki uwzględnieniu większości lub wszystkich mechanizmów pułapkowania i skali czasowej. Z powodu wysokich kosztów symulacji nie wykonuje się ich tylko w celu oszacowania pojemności składowania dwutlenku węgla.

W przypadku szacowania efektywnej pojemności składowania dwutlenku węgla w przestrzeni porowej (wolumetrycznej), dla danej struktury zlokalizowanej w poziomie wodonośnym wykorzystuje się wzory uwzględniające objętość porową, gęstość dwutlenku węgla w warunkach złożowych oraz współczynnik efektywności składowania. Dwa pierwsze czynniki można oszacować mając dane geologiczno-złożowe dotyczące danej struktury. Największy problem stwarza dobór współczynnika efektywności składowania. Na wielkość współczynnika efektywności składowania wpływają bardzo zróżnicowane czynniki między innymi przepuszczalność, niejednorodność zbiornika, głębokość jego zalegania, temperatura, mineralizacja wód.

Współczynnik efektywności szacuje się na różne sposoby, zależne od liczby danych, którymi dysponujemy. Jeżeli dysponujemy odpowiednią liczbą danych geologiczno-złożowych dotyczących potencjalnych struktur do składowania dwutlenku węgla można zastosować analizę statyczną. Przy posiadaniu niewielu danych, przy doborze współczynnika efektywności składowania stosujemy podejście oparte na doświadczeniach np. z magazynowania gazu ziemnego wykorzystane np. w projekcie EU GeoCapacity.

Jedną z pierwszych metodyk szacowania współczynnika efektywności zaproponował Doughty i in. (2001). Zdefiniowali oni współczynnik efektywności składowania, który redukuje pojemność teoretyczną do efektywnej. Wartość tego współczynnika waha się więc od 0 do 1. Przy najniższej wartości (0) składowanie nie jest możliwe, najwyższa wartość (1) odpowiada całej dostępnej pojemności porów (całkowita objętość porów zredukowana przez rezydualne nasycenie wodą). Współczynnik ten jest definiowany, jako iloczyn czterech czynników: wewnętrznego współczynnika pojemności (C_i), geometrycznego współczynnika pojemności (C_g), współczynnika niejednorodności pojemności (C_h) i średniej porowatości formacji. Wewnętrzny współczynnik pojemności jest sumą części przestrzeni porowej zajętej przez CO_2 w fazie

gazowej i przez rozpuszczony gaz. Geometryczny współczynnik pojemności bierze pod uwagę zmniejszenie pojemności składowania związane z częściowym udostępnieniem przez otwory, segregację grawitacyjną i zanurzające się poziomy wodonośne. Współczynnik niejednorodności pojemności uwzględnia niejednorodności w przepuszczalności powodujące zmniejszenie lub zwiększenie dostępnej pojemności składowania (Doughty i in., 2001).

Pojemność składowania może być rozważana również w różnej skali czasowej. W zależności od czasu, jaki upłynął od zatłoczenia CO₂ dominują różne mechanizmy składowania (pułapkowanie strukturalne i stratygraficzne, gazu rezydualnego, rozpuszczanie, mineralne, pułapkowanie hydrodynamiczne). Poszczególne mechanizmy pułapkowania w procesie podziemnego składowania CO₂ oddziałują w różnym czasie. Kilka z nich działa natychmiast, w czasie i po zakończeniu zatłaczania: fizyczne pułapkowanie, gaz rezydualny, hydrodynamiczne i adsorpcyjne pułapkowanie. Mechanizmy chemicznego pułapkowania takie jak rozpuszczanie i wytrącanie minerałów działają w dużo dłuższym okresie czasu, rzędu setek tysięcy lat (Uliasz-Misiak 2008). Uwzględniając czynnik czasu Kopp i inni (2009) rozszerzyli równanie zaproponowane przez Doughty i innych (2001) na obliczenie współczynnika efektywności składowania biorąc pod uwagę fakt, że po kilkudziesięciu, kilkuset latach objętość porowa zajęta przez dwutlenek węgla w fazie wolnej jest znacznie mniejsza niż objętość porowa, którą zajmuje gaz rozpuszczony w wodzie złożowej. Zaproponowano wprowadzenie zamiast pojedynczych współczynników pojemności (wewnętrznego, geometrycznego i niejednorodności) dwóch współczynników odnoszących się do części zbiornika zajętej przez dwutlenek węgla w fazie gazowej i rozpuszczony w wodzie. W tym przypadku współczynnik efektywności składowania jest sumą iloczynów współczynników wewnętrznego, geometrycznego, niejednorodności i porowatości dla fazy gazowej i gazu rozpuszczonego w wodzie (Kopp i in., 2009b). Przeanalizowano zależność ilości składowanego gazu (założono zatłaczanie roczne 1 Mt CO₂) od współczynnika efektywności składowania oraz jego poszczególnych elementów dla określonych przypadków. Rozpatrywano różne formacje do składowania: „średnią” o średnich parametrach wyliczonych w oparciu o analizy statystyczne, zbiorników „ciepłych” (o wysokim gradiencie geotermalnym), „zimnych” (niski gradient geotermalny), dla zbiorników zalegających płytko i głęboko oraz dla miejsc składowania zlokalizowanych w basenie Alberta (Kanada) (Kopp i in., 2009a). We wszystkich analizowanych przypadkach współczynnik efektywności składowania wahał się od 0,0117 do 0,036. Dla przypadku „średniego” maksymalna wartość geometrycznego współczynnika pojemności wynosiła 0,279, wewnętrznego współczynnika dotyczącego części CO₂ w fazie gazowej - 0,3325 i współczynnika efektywności składowania - 0,0188. Wielkości te zostały osiągnięte po 3,85 latach, czyli po zatłoczeniu 3,85 Mt CO₂ (Kopp i in., 2009b).

Metodykę szacowania współczynnika efektywności składowania w poziomach wodonośnych, złożach węglowodorów i pokładach węgla przedstawiono w „*Methodology for Development of Geologic Storage Estimates for Carbon Dioxide*” (2008). Wykorzystano ją przy wykonaniu oszacowań pojemności składowania w atlasie sekwestracji dwutlenku węgla dla obszarów USA i Kanady. Współczynnik efektywności składowania dla poziomów wodonośnych ma kilka składników odzwierciedlających szereg fizycznych barier powodujących, że dwutlenek węgla nie będzie się kontaktował z całą przestrzenią porową basenu lub struktury. Przy szacowaniu współczynnika efektywności uwzględniono czynniki związane z przestrzenią porową basenu lub struktury i lokalnymi efektami w formacji w obszarze zatłaczania dwutlenku węgla. Założono, że otwory zatłaczające będą zlokalizowane w regularnej siatce na obszarze basenu lub struktury do składowania, w celu maksymalizacji ilości składowanego dwutlenku węgla. Współczynnik efektywności składowania szacowany jest, jako iloczyn następujących czynników (Methodology..., 2008):

- iloraz całkowitej powierzchni do powierzchni, jaka może być odpowiednia do składowania, część basenu jaka może być wykorzystana do składowania,
- iloraz miąższości całkowitej do efektywnej, część struktury, jaka spełnia minimalne kryteria porowatości i przepuszczalności,
- iloraz porowatości całkowitej do efektywnej,
- powierzchniowa efektywność zastępowania, część powierzchni wokół otworu zatłaczającego i profilu pionowego (miąższości), jaka może kontaktować się z CO₂,
- pionowa efektywność zastępowania,
- grawitacja, część miąższości, jaka może kontaktować się z dwutlenkiem węgla w wyniku różnicy gęstości pomiędzy gazem i wodą,
- mikroskopowa efektywność zastępowania, część przestrzeni porowej wodą, którą może zastąpić dwutlenek węgla.

Każdemu z czynników przypisano pewien zakres zmienności wynikający z różnej litologii i warunków sedimentacji, maksimum i minimum oznacza sensowne najwyższe i najniższe wartości dla każdego z parametrów (**Tabela 1.1.23_9**).

Tabela 1.1.23_9 Czynniki uwzględnione przy obliczaniu współczynnika efektywności składowania w poziomach wodonośnych i ich zakres (Metodology..., 2008)

Czynnik	Zakres
iloraz powierzchni odpowiedniej do składowania do całkowitej powierzchni	0,2 - 0,8
iloraz miąższości efektywnej do całkowitej	0,25 – 0,75
iloraz porowatości efektywnej do całkowitej	0,6 – 0,95
powierzchniowa efektywność zastępowania	0,5 – 0,8
Pionowa efektywność zastępowania,	0,6 – 0,9
grawitacja	0,2 – 0,6
mikroskopowa efektywność zastępowania	0,6 – 0,8

Wyniki symulacji Monte Carlo czynników do obliczania współczynnika efektywności składowania z prawdopodobieństwem 15%, 50% i 85% wykonane dla 6 przypadków, różniących się między sobą rozkładem parametrów wykazały, że najniższa wartość współczynnika efektywności składowania wynosi (dla basenów sedimentacyjnych, a nie struktur) 0,01 a najwyższa 0,04 dla poziomów wodonośnych z obszaru Kanady i USA (Metodology..., 2008).

Inne podejście do problemu szacowania współczynnika efektywności składowania zaproponowano w projekcie EU GeoCapacity. Rozważano w nim dwa podstawowe podejścia do oceny tego współczynnika *rule-of-thumb* (wartość współczynników dobierana w oparciu o doświadczenie np. z magazynów gazu ziemnego) lub inżynierii złożowej.

W ujęciu „praktycznym” zaproponowano, aby wartość współczynnika efektywności składowania przyjmować w zależności od tego czy struktura rozważana, jako miejsce składowania jest zamknięta, częściowo zamknięta lub otwarta oraz od jakości zbiornika. Struktura otwarta jest to struktura nieoddzielona od całego poziomu wodonośnego granicami strukturalnymi lub litologicznymi. Struktura zamknięta to struktura oddzielona od poziomu wodonośnego np. uskokami. W przypadku struktur otwartych i częściowo zamkniętych, gdy istnieje połączenie między pułapką a poziomem wodonośnym przyjęto, że współczynnik efektywności składowania wynosi od 10% do 40% (dla struktur o dobrych parametrach zbiornikowych) i od 5% do 20% (dla zbiorników o niskich parametrach zbiornikowych). Dla struktur zamkniętych współczynnik ten przyjmuje wartości od poniżej 3% do 5% (Raport D24-Storage capacity standards) (Fig. 1.1.23_2).

Przy zastosowaniu podejścia inżynierii złożowej, zwłaszcza w strukturach zamkniętych, przy doborze wielkości współczynnika efektywności składowania uwzględnia się dopuszczalny wzrost ciśnienia w strukturze, ścisłość skał i płynów lub zasięg strefy oddziaływania zatłaczania dwutlenku węgla. Takie podejście sugeruje, że zakres wartości współczynnika efektywności składowania zależy od głębokości (tj. ciśnienia) i stosunku objętości pułapki do objętości poziomu wodonośnego. Dla poziomów do składowania zalegających na głębokości 2000 m i stosunków objętości pułapki do objętości poziomu wodonośnego 5, 10, 50 i 100, współczynnik efektywności składowania wynosi odpowiednio 1%, 2%, 10% i 20%, zakładając maksymalny wzrost średniego ciśnienia 10% w stosunku do ciśnienia hydrostatycznego i całkowitą ścisłość (pory + płyny) rzędu $10^{-4}/\text{bar}^{-1}$ (Raport D24-Storage capacity standards).

Pułapkowanie przez rozpuszczanie polega na rozpuszczaniu CO_2 w wodzie podziemnej. Rozpuszczalność dwutlenku węgla wzrasta ze wzrostem ciśnienia i obniża się wraz ze wzrostem temperatury i mineralizacji wody. Pułapkowanie przez rozpuszczanie jest procesem zależnym od czasu. Jest on najbardziej efektywny w skali długookresowej. Proces rozpuszczania jest najbardziej aktywny po zakończeniu zatłaczania i może być poprawnie szacowany tylko poprzez modelowanie komputerowe, w skali lokalnej lub miejsca składowania. Pojemność składowania wynikająca z rozpuszczania CO_2 jest mniejsza niż pojemność składowania w strukturalnych i stratygraficznych pułapkach, ponieważ dwutlenek węgla musi mieć kontakt z nienasyconą wodą aby nastąpiło rozpuszczanie.

Teoretyczna pojemność składowania CO_2 poprzez rozpuszczanie obliczana jest w oparciu o porowatość i miąższość poziomu wodonośnego oraz zawartości dwutlenku węgla w wodzie (początkową i po nasyceniu gazem). Teoretyczna pojemność składowania oszacowana dla całego poziomu wodonośnego jest mało wiarygodna, głównie z powodu założenia, że CO_2 nasyci wodę w przestrzeni porowej całego poziomu wodonośnego. Konieczne jest określenie efektywnej pojemności składowania, który można określić poprzez symulację komputerową (Uliasz-Misiak, 2008).

Pojemność składowania CO_2 znanych struktur w miocenie w obszarze IV i struktur mezozoicznych w obszarze VII

Przedmiotem oszacowania pojemności składowania dwutlenku węgla było 17 struktur zlokalizowanych w

obszarze IV w utworach miocenu i w obszarze VII w utworach mezozoiku:

- rejon frontu Karpat/zapadliska przedkarpackiego (obszar IV) – obiekt Jodłówka, Malawa, Przemyśl, Wapowce, Maćkowce-Tuligłowy i Rączyna;
- rejon NW Polski (obszar VII) – antyklina Chabowa-T, antyklina Chabowa-J, antyklina Choszczna, antyklina Huty Szklanej, antyklina Marianowa-J, antyklina Marianowa-T, antyklina Oświna-K, antyklina Oświna-J, antyklina Rokity, antyklina Suliszewa, antyklina Trzebieży.

Oszacowano efektywną pojemność składowania w przestrzeni porowej struktur oraz teoretyczną pojemność składowania wynikającą z rozpuszczania CO₂ w wodzie złożowej. Pojemność składowania CO₂ z rozpuszczania w wodzie złożowej oszacowano przy wykorzystaniu kalkulatora on-line (Sequestration Calculators) umieszczonego na stronach MID-CARBON. Umożliwia on wyliczenie ilości dwutlenku węgla, jaka może rozpuścić się w wodzie zawartej w danej strukturze.

Pojemności składowania CO₂ wolumetryczna i z rozpuszczania obiektów zlokalizowanych w obszarze IV (**Tabela 1.1.23_10 i 11**) zostały oszacowane dla kilku poziomów w każdym obiekcie. Wartości pojemności przedstawione dla każdego z obiektów są sumą pojemności dla obiektu Jodłówka jednego poziomu wodonośnego, obiektu Malawa – 5 poziomów, obiektu Przemyśl – 10 poziomów, obiektu Wapowce – 7 poziomów, obiektu Maćkowice-Tuligłowy - 10 poziomów, obiektu Rączyna – 2 poziomów. Podane dane są uśrednionymi wartościami porowatości, ciśnienia i temperatury złożowej. Powierzchnia obiektu i miąższość poziomu do składowania CO₂ to sumy tych parametrów wszystkich poziomów wodonośnych w danym obiekcie.

Pojemności składowania CO₂ wolumetryczna i z rozpuszczania zostały oszacowane dla 11 struktur zlokalizowanych mezozoicznych poziomach wodonośnych w obszarze VII (**Tabela 1.1.23_12i 13**).

Sumaryczna pojemność składowania CO₂ rozważanych struktur w poszczególnych obszarach wynosi:

- obszar IV – 14,3 Mt efektywna pojemność składowania w przestrzeni porowej i 10,6 Mt – teoretyczna pojemność z rozpuszczania,
- obszar VII – 1171,1 Mt efektywna pojemność składowania w przestrzeni porowej i 401,5 Mt – teoretyczna pojemność z rozpuszczania.

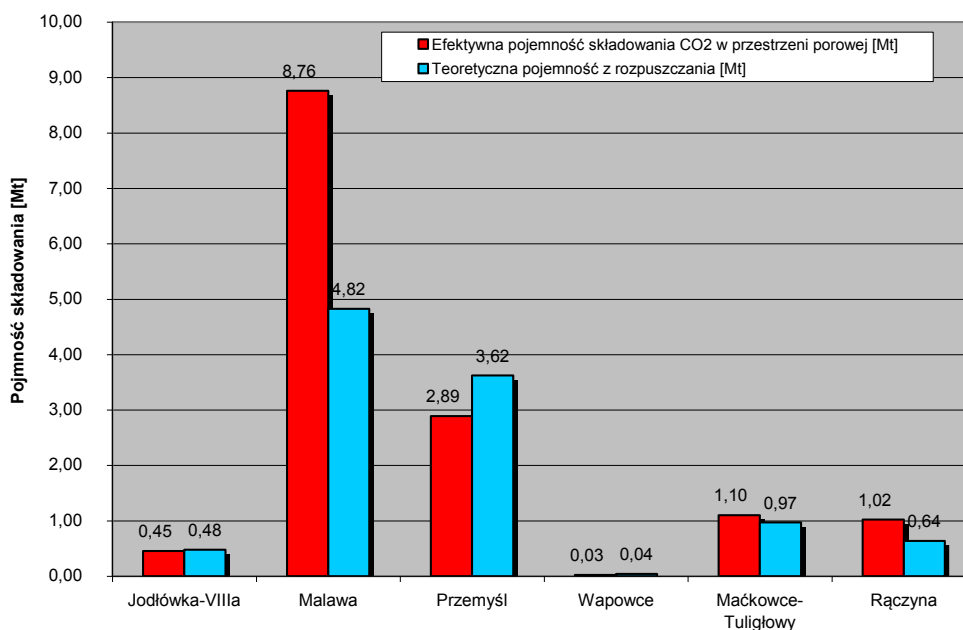


Fig. 1.1.23_6 Pojemność składowania CO₂ dla obiektów zlokalizowanych w rejonie frontu Karpat/zapadliska przedkarpackiego (obszar IV)⁶

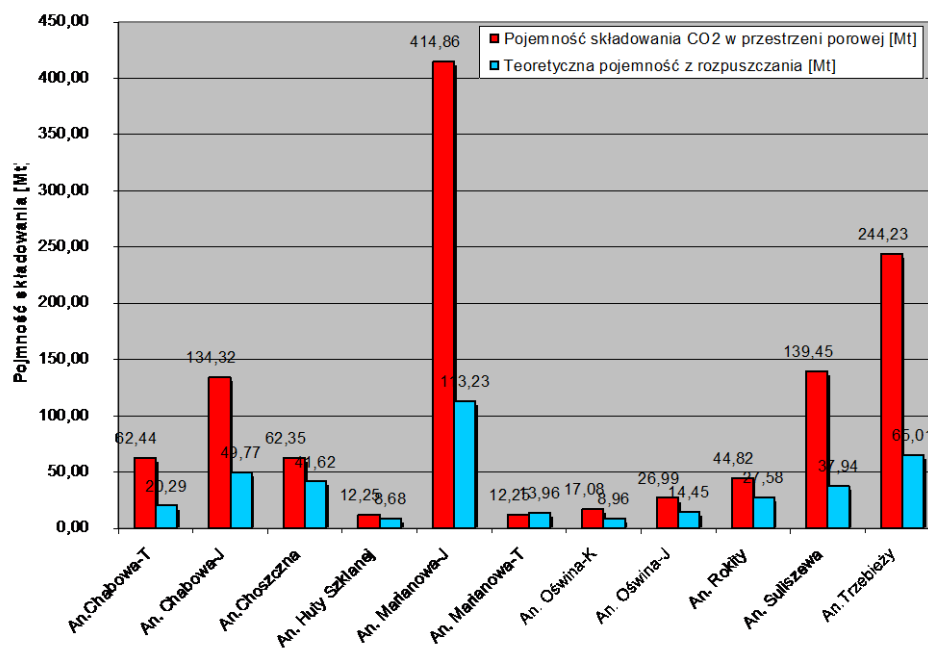


Fig. 1.1.23_7 Pojemność składowania CO₂ w strukturach zlokalizowanych w rejonie NW Polski (obszar VII)

⁶ Patrz przypis 4

Tabela 1.1.23_10 Efektywna pojemność składowania CO₂ w przestrzeni porowej w obiektach zlokalizowanych w rejonie frontu Karpat/zapadliska przedkarpackiego (obszar IV)

Nazwa obiektu	Powierzchnia struktury [km ²]	Mięszość efektywna poziomu do składowania CO ₂ [m]	Porowatość poziomu do składowania CO ₂ [%]	Współczynnik efektywności składowania [%]	Pojemność składowania CO ₂ w przestrzeni porowej [Mt]
Jodłówka	1,6	60,0	15%	5%	0,45
Malawa	3,1	375,0	17%	10%	8,76
Przemysł	10,6	215,0	18%	5%	2,89
Wapowce	2,0	36,0	14%	5%	0,03
Maćkowce-Tuligłowy	4,0	154,0	18%	10%	1,10
Rączyna	1,2	110,0	17%	10%	1,02

Tabela 1.1.23_11 Teoretyczna pojemność z rozpuszczania CO₂ w obiektach zlokalizowanych w rejonie frontu Karpat/zapadliska przedkarpackiego (obszar IV)

	Powierzchnia struktury [km ²]	Mięszość efektywna poziomu do składowania CO ₂ [m]	Porowatość poziomu do składowania CO ₂ [%]	Ciśnienie złożowe [MPa]	Temperatura złożowa [°C]	Mineralizacja średnia [g/dcm ³]	Teoretyczna pojemność z rozpuszczania [Mt]
Jodłówka	1,6	60,0	15%	23,7	78,6	79,5	0,48

Malawa	3,1	375,0	17%	20,9	61,6	103,8	4,82
Przemysł	10,6	215,0	18%	14,5	22,6	36,6	3,62
Wapowce	2,0	36,0	14%	21,8	70,2	44,8	0,04
Maćkowce-Tuligłowy	4,0	154,0	18%	16,9	61,4	29,0	0,97
Rączyna	1,2	110,0	17%	16,6	59,3	53,7	0,64

Tabela 1.1.23_12 Efektywna pojemność składowania CO₂ w przestrzeni porowej w strukturach zlokalizowanych w rejonie NW Polski (obszar VII)

Nazwa struktury	Powierzchnia struktury [km ²]	Miąższość poziomu do składowania CO ₂ [m]	Porowatość poziomu do składowania CO ₂ [%]	Współczynnik efektywności składowania [%]	Pojemność składowania CO ₂ w przestrzeni porowej [Mt]
Antyklina Chabowa-T	87,0	67,0	17%	20%	62,44
Antyklina Chabowa-J	87,0	125,0	18%	20%	134,32
Antyklina Choszczna	102,0	79,5	15%	10%	62,35
Antyklina Huty Szklanej	100,0	114,0	10%	5%	12,25
Antyklina Marianowa-J	160,0	112,0	20%	20%	414,86
Antyklina Marianowa-T	101,5	82,0	15%	5%	12,25

Antyklina Oświna-K	25,0	62,5	20%	10%	17,08
Antyklina Oświna-J	25,0	110,0	15%	10%	26,99
Antyklina Rokity	72,0	200,0	10%	5%	44,82
Antyklina Suliszewa	60,0	93,0	20%	20%	139,45
Antyklina Trzebieży	137,5	60,0	20%	20%	244,23

Tabela 1.1.23_13 Teoretyczna pojemność z rozpuszczania CO₂ w strukturach zlokalizowanych w rejonie NW Polski (obszar VII)

	Powierzchnia struktury [km ²]	Miąższość efektywna do poziomu składowania CO ₂ [m]	Porowatość poziomu składowania [%]	Ciśnienie CO ₂ złożowe [MPa]	Temperatura złożowa [°C]	Mineralizacja średnia [g/dcm ³]	Teoretyczna pojemność rozpuszczania [Mt]
Antyklina Chabowa-T	87,0	40,2	17%	13,7	63,8	105,8	20,3
Antyklina Chabowa-J	87,0	87,5	18%	8,7	44,8	77,3	49,8
Antyklina Choszczna	102,0	71,6	15%	12,0	39,9	112,5	41,6
Antyklina Huty Szklanej	100,0	34,2	10%	30,1	61,0	314,0	8,7
Antyklina Marianowa-J	160,0	100,8	20%	14,7	54,8	110,0	113,2

Antyklina Marianowa-T	101,5	22,1	15%	20,0	85,8	67,5	14,0
Antyklina Oświna-K	25,0	43,8	20%	12,2	36,7	90,0	9,0
Antyklina Oświna-J	25,0	99,0	15%	23,3	61,3	104,0	14,4
Antyklina Rokity	72,0	150,0	10%	17,9	36,9	250,0	27,6
Antyklina Suliszewa	60,0	83,7	20%	12,7	43,3	100,0	37,9
Antyklina Trzebieży	137,5	54,0	20%	8,4	18,6	100,0	65,0

Podsumowanie

Dla struktur wytypowanych do składowania CO₂ w mezozoicznych solankowych poziomach w rejonie frontu Karpat/zapadliska przedkarpackiego i NW Polski obliczono pojemności składowania CO₂ w przestrzeni porowej oraz dokonano oszacowania pojemności składowania wynikającej z rozpuszczania CO₂ w wodzie złożowej.

Pojemność składowania w przestrzeni porowej dla poszczególnych struktur jest bardzo zróżnicowana. Większe pojemności składowania charakteryzują struktury mezozoiczne zlokalizowane na Niżu Polskim, wahają się one od 12,125 Mt (antyklina Huty Szklanej i Marianowa-T) do do 414,9 Mt (antyklina Marianowa-J) dwutlenku węgla. Struktury zlokalizowane w utworach miocenu mają dużo mniejsze pojemności od 0,03 Mt (obiekt Wapowce) do 8,76 Mt (obiekt Malawa).

Teoretyczna pojemność z rozpuszczania CO₂ jest mniejsza niż pojemność w przestrzeni porowej. Dla struktur z obszaru VII pojemność ta waha się od około 8 Mt (antyklina Huty Szklanej i Marianowa-T) do 113,2 Mt (antyklina Marianowa-J). Pojemność z rozpuszczania dla struktur z obszaru IV wynosi od 0,04 (obiekt Wapowce) do 4,82 Mt (obiekt Malawa).

Potencjał składowania dla GZW i pokładów węgla (1.1.24 - GIG)

Poziomy solankowe

(Robert Warzecha, Tadeusz Bromek)

W ramach niniejszego projektu na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego wytypowano rejony do składowania CO₂ w obrębie, których zostaną wyznaczone zbiorniki przeznaczone do podziemnego składowania dwutlenku węgla. Wytypowano rejony w utworach krakowskiej serii piaskowcowej (KSP), górnośląskiej serii piaskowcowej (GSP) oraz w utworach warstw dębowieckich. Wszystkie wyznaczone rejony są badane pod kątem możliwości lokowania CO₂ w głębokich poziomach solankowych.

Oszacowanie pojemności składowania CO₂ dla rejonu obejmującego warstwy dębowieckie zostało wykonane w oparciu o przekazane przez PIG-PIB następujące mapy w skali 1:50000:

- miąższości miocenu nieprzepuszczalnego;
- miąższości utworów warstw dębowieckich;
- stropu i spągu utworów warstw dębowieckich;
- przekroje geologiczne oraz dane z badań hydrogeologicznych na podstawie, których sporządzono mapy parametrów hydrogeologicznych.

Po dokonaniu analizy wyżej wymienionych materiałów określono granice zbiornika w oparciu o przyjęte kryteria geologiczne, przeznaczonego pod przyszłe lokowanie CO₂. Zbiornik został podzielony na bloki obliczeniowe. Dla każdego bloku wykonano następujące obliczenia:

- powierzchni [m²],
- średniej miąższości warstw dębowieckich [m],
- średniej porowatości efektywnej [%],

przyjęto również współczynnik efektywności oraz gęstość CO₂ w warunkach złożowych, a także rozpuszczalność CO₂ w wodzie.

Zarys budowy geologicznej i ocena parametrów hydrogeologicznych warstw dębowieckich

Warstwy dębowieckie występują w południowej części GZW, stanowiąc pas o szerokości do 25 km. Zlokalizowane są w spągowej części miocenu w postaci utworów piaszczysto-zlepieńcowatych. Zalegają przeważnie bezpośrednio na utworach karbonu lub starszego miocenu a także lokalnie na utworach serii węglanowej dolnego karbonu i dewonu bądź na serii terygenicznego dolnego dewonu i kambriu. Ocenia się, że obszar ich występowania wynosi 1750 km².

Warstwy dębowieckie zbudowane są ze zlepieńców, brekcji i piaskowców. W profilu pionowym tych warstw obserwuje się zmianę wielkości ziarn od największych w części spągowej (do około 40 cm) do drobnych w stropie (piaskowce różnoziarniste). Obserwuje się również zmiany uziarnienia w płaszczyźnie poziomej. Grubsze frakcje przeważają w części południowej, zaś w kierunku północnym wielkość ziarn wyraźnie się zmniejsza.

Petrograficznie ziarna są mocno zróżnicowane. Głównie są to okruchy skał karbońskich (ilasto-mułowcowe i piaskowcowe) oraz okruchy skał węglanowych, magmowych i metamorficznych.

Miąższości opisywanych warstw są zmienne w przedziale od 25 m do 300 m, średnio około 70 m. Zróżnicowanie miąższości wynika z położenia i form morfologicznych podłoża paleozoicznego. Głębokość zalegania warstw dębowieckich waha się przeważnie w przedziale od 500 m do 1300 m ppt. Najpłycej występują w części zachodniej i na północ od Bielska i Kęt (od 500 m do 900 m), natomiast w obszarze na wschód od Jaworza i na południe od Bielska po Andrychów głębokość ta osiąga od 900 m do 1300 m ppt. Na wschód od Andrychowa warstwy te występują na głębokości od 1000 m do prawie 2400 m.

Zbiornik wodonośny warstw dębowieckich przykryty jest mioceńskimi osadami formacji skawińskiej, tylko w części południowej występuje bezpośrednio pod utworami fliszu karpackiego. Zbiornik ten jest nieodnawialny i zawiera wody paleoinfiltracyjne. Rozpoznanie hydrogeologiczne nie jest równomierne. Najlepiej rozpoznane są części: północno-zachodnia, południowo-zachodnia i zachodnia omawianego obszaru.

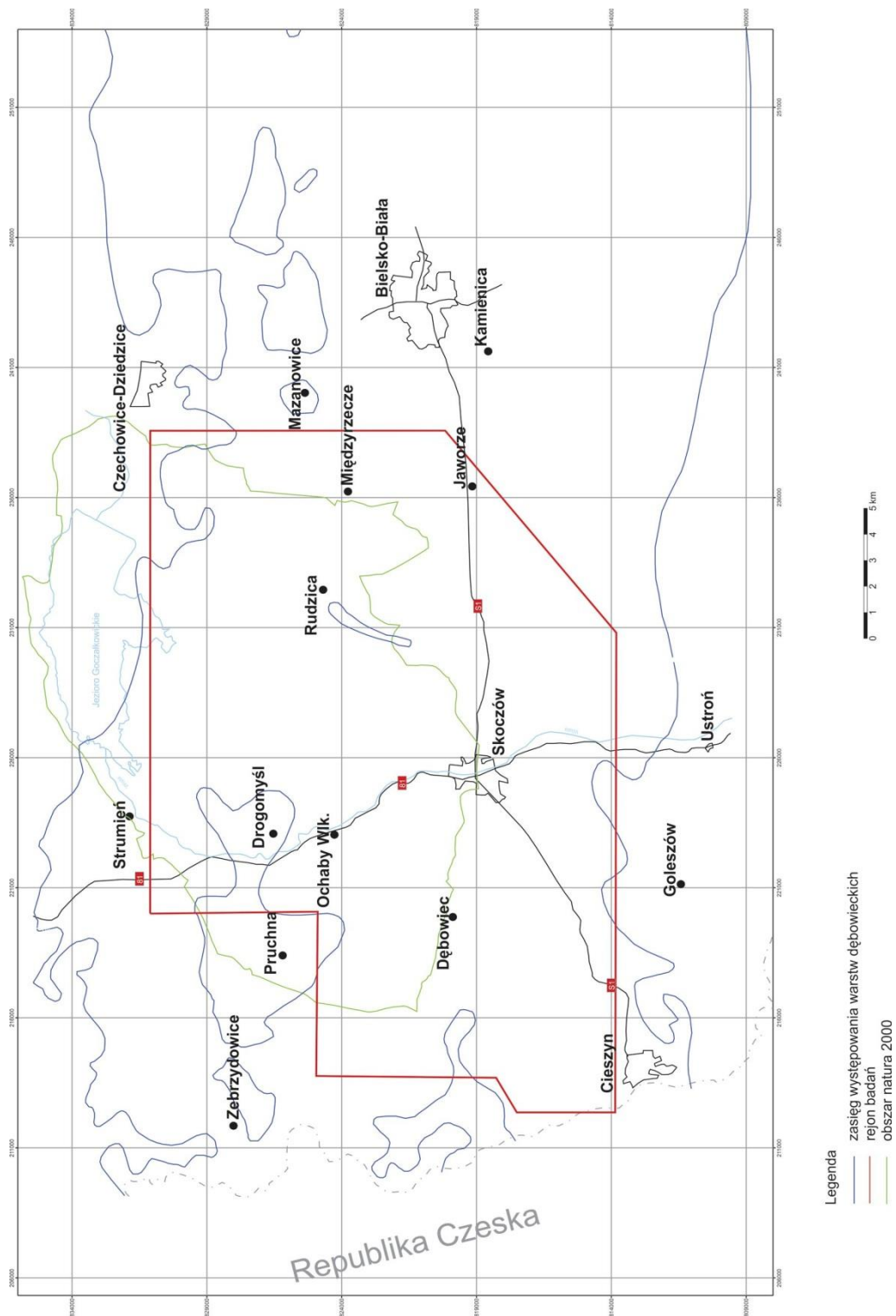
Porowatość efektywna skał w rejonie wyznaczonego zbiornika jest zmienna i zawiera się w przedziale od 7% do 18,8%, a wartość średnia wynosi 11,2%. Współczynnik filtracji kształtuje się w zakresie od $4,2 \cdot 10^{-9}$ do $1,9 \cdot 10^{-4}$ m/s, przyjmując wartość średnią $7 \cdot 10^{-6}$ m/s. Ciśnienia piezometryczne wynoszą od 2,9 MPa do 10,4 MPa. Wodonośność zlepieńców i piaskowców wyrażona wartością wydatków jednostkowych wynosi od 0,00038 m³/h·1mS do 0,3521 m³/h·1mS. Średnio wydatek wynosi 0,0407 m³/h·1mS.

Ogólna mineralizacja wyrażona wartościami suchej pozostałości kształtuje się w przedziale od 30,0 do 65,3 g/dm³. Są to wody słone i solanki głównie typu Cl-Na oraz rzadziej Cl-Na-Ca. Odczyn (pH) waha się w granicach od 5,2 do 9,9.

Zbiornik warstw dębowieckich jest bardzo rozległy, ma dość dobre parametry hydrogeologiczne oraz izolowany jest od góry szczelną i grubą serią utworów nieprzepuszczalnych.

Ze względu na zróżnicowaną miąższość utworów, głębokość ich zalegania, stan dotychczasowego rozpoznania geologicznego i hydrogeologicznego oraz położenie w stosunku do terenów chronionych i wyrobisk górniczych kopalń węgla w zbiorniku tym można wydzielić kilka obszarów, które mogą być rozpatrywane jako miejsca ewentualnego składowania CO₂.

Charakterystykę wymienionych kompleksów wodonośnych opracowano korzystając m.in. z następujących prac: Bromek T. i in. 2009, Buła Z. i in. 1994, Gajowiec B. i in. 1994, Wilk Z. 2003.



Rys. 1.1.24_1 Mapa sytuacyjna rejonu badań.

Dotychczasowe rozpoznanie warunków geologicznych, hydrogeologicznych i górniczych z wykorzystaniem informacji geofizycznych i środowiskowych pozwoliły na wyznaczenie najbardziej korzystnej części warstw dębowieckich, jako ewentualnego zbiornika składowania CO₂ (Fig. 1.1.24_1).

Dotychczas opracowane klasyfikacje pojemności składowania dwutlenku węgla (CSLF, CO2CRC, Uliasz-Misiak) w głównej mierze opierają się na metodach używanych przy klasyfikacji złóż ropy naftowej i gazu ziemnego. Są one oparte na koncepcji piramidy zasobów węglowodorów przedstawionej przez McCabe (1998).

Klasyfikacja opracowana przez Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF) uwzględnia trzy sposoby oceny pojemności składowania CO₂:

- na podstawie piramidy wysokiego poziomu pojemności składowania (**Fig.1.1.24_2**).



Fig. 1.1.24_2 Piramida wysokiego poziomu pojemności składowania CO₂ w strukturach geologicznych (CSLF, 2005).

W górnej części piramidy występują składowiska charakteryzujące się dobrymi warunkami geologicznymi o dużej pojemności i niskich kosztach składowania. Przy czym pojemność składowania w wierzchołku piramidy jest znacznie mniejsza niż u jej podstawy, która charakteryzuje się „słabymi” warunkami geologicznymi i wysokimi kosztami składowania.

- poprzez techniczno-ekonomiczną piramidę pojemności składowania (**Fig.1.1.24_3**), pokazującą zależność pomiędzy teoretyczną, efektywną, praktyczną i wykorzystywaną pojemność składowania.

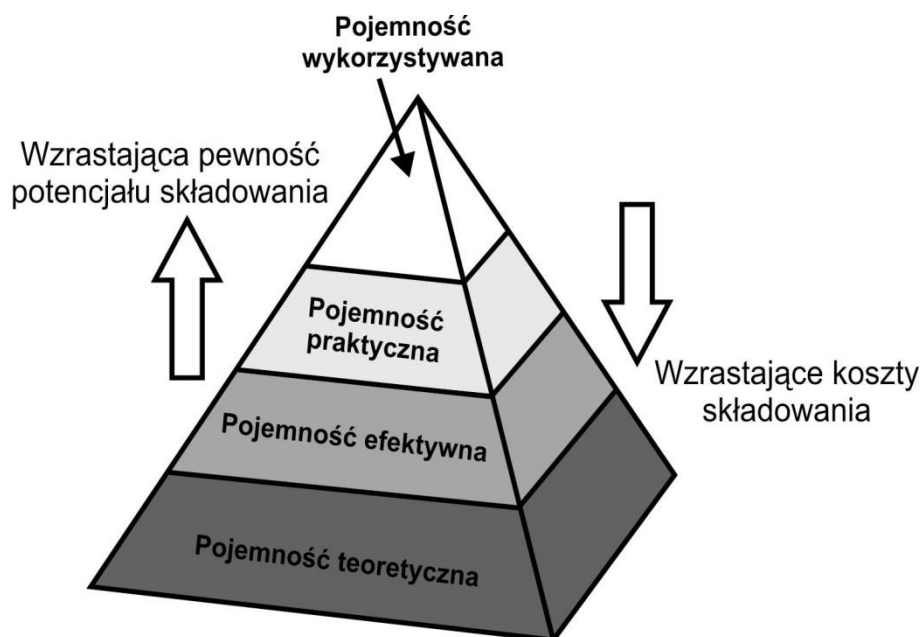


Fig. 1.1.24_3 Techniczno-ekonomiczna piramida pojemności składowania CO₂ w strukturach geologicznych (CSLF, 2008)

- teoretyczna pojemność składowania stanowi całkowitą ilość CO₂, jaką może pomieścić dana jednostka geologiczna. Ta część piramidy zakłada, że w całej objętości porowej będzie możliwe składowanie lub/i zatłoczony dwutlenek węgla osiągnię w wyniku rozpuszczania, w płynach złożowych maksymalne nasycenie;
 - efektywna pojemność składowania jest to część pojemności teoretycznej, pomniejszonej o geologiczno-inżynierskie aspekty szacowania pojemności składowania tj.: głębokość, ciśnienie, porowatość. Może ona ulegać zmianie w przypadku poszerzenia badań o dodatkowe dane geologiczne;
 - praktyczna pojemność składowania jest to pojemność po uwzględnieniu kryteriów technicznych, ekonomicznych, prawnych oraz przeprowadzeniu oceny źródeł emisji w stosunku do miejsc składowania. Podobnie jak w przypadku efektywnej pojemności składowania również tutaj mogą nastąpić zmiany pojemności wywołane zmianami wyżej wspomnianych kryteriów;
- oraz piramidę uwzględniającą rodzaj pułapek wraz z mechanizmem składowania i jego efektywnością (**Fig.1.1.24_4**).

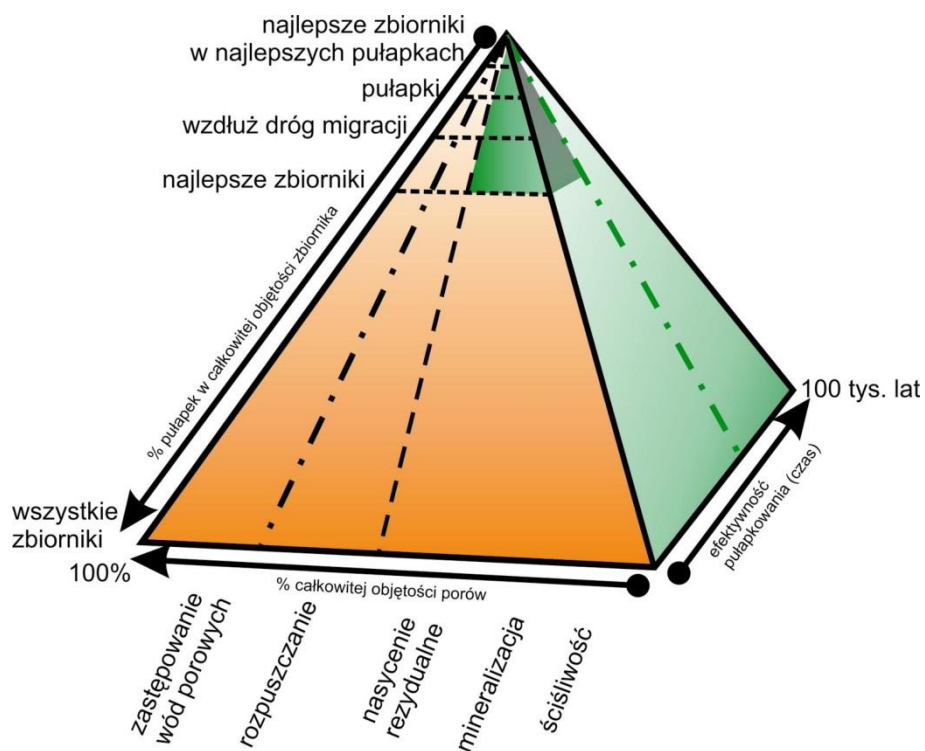


Fig.1.1.24_4 Piramida pojemności składowania CO₂ typu pułapki i efektywności w strukturach geologicznych (CSLF, 2005).

Ten typ piramidy przedstawia relację pomiędzy rodzajem pułapki, mechanizmem składowania i jego efektywnością w czasie.

W perspektywie długoterminowej w zbiorniku mogą zachodzić procesy, w trakcie których mechanizmy składowania będą się wzajemnie wykluczać, współdziałać lub konkurować.

Klasyfikacja Cooperative Research Center for Greenhouse Gas Technologies (CO₂CRC), kładzie główny nacisk na przestrzeń porową struktury i niepewność jej oszacowania. Została opracowana w oparciu o klasyfikację CSLF oraz zasobów węglowodorów SPE (**Fig.1.1.24_5**).

W niniejszym podziale całkowita objętość porowa jest definiowana jako szacowana całkowita objętość porów w analizowanych basenach sedymentacyjnych lub miejscach składowania oraz objętość jeszcze niezdefiniowana.

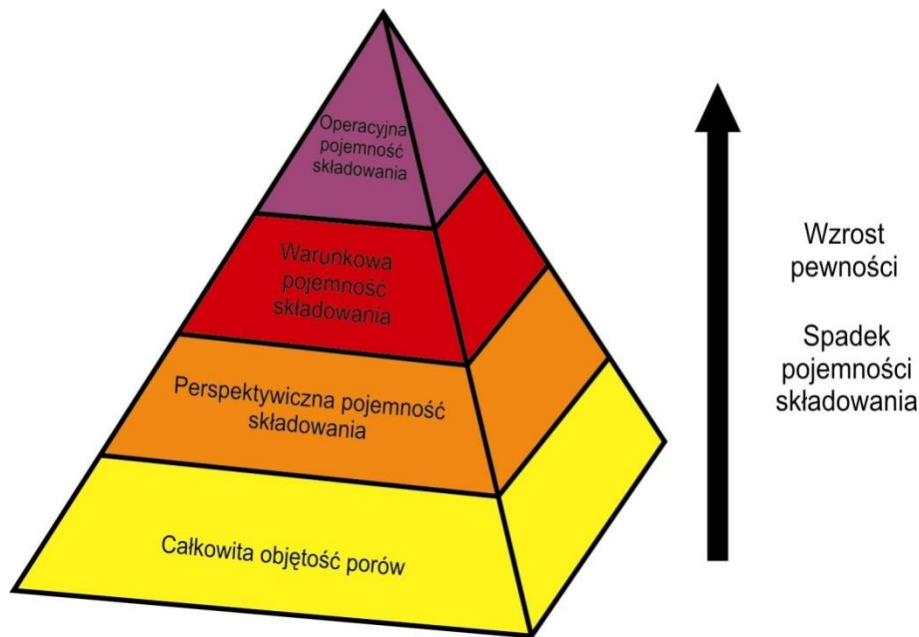


Fig.1.1.24_5 Klasyfikacja pojemności składowania (CO2CRC, 2008).

Dzielimy ją (objętość porową) na:

- teoretyczną i nieudokumentowaną objętość porową, czyli taką która obecnie nie jest dostępna, ale może być wykorzystana w przyszłości. Perspektywiczna pojemność składowania jest to wielkość przestrzeni porowej w nieodkrytych miejscach składowania, w których z punktu widzenia technicznego i ekonomicznego będzie możliwe składowanie dwutlenku węgla.
- stwierdzoną objętość porowa jest to objętość porowa struktury geologicznej, obliczana na podstawie istniejących danych. Dzieli się na:
 - ⤴ operacyjną pojemność składowania określającą objętość przestrzeni porowej, która może być dostępna w badanym miejscu składowania z punktu widzenia technicznego i ekonomicznego. Obliczana jest na podstawie istniejących danych. W tej kategorii dodatkowo wyróżniamy: stwierdzoną, stwierdzoną i prawdopodobną oraz stwierdzoną, prawdopodobną i możliwą odpowiednio z prawdopodobieństwem 10%, 50% i 90%;
 - ⤴ warunkową pojemność składowania będącą operacyjną pojemnością składowania poszerzoną o aspekt przewidywanych przyszłych uwarunkowań techniczno-ekonomicznych;

Zarówno warunkową jak i perspektywiczną pojemność składowania CO₂ wyznaczamy z różną niepewnością tj.: minimalnym, średnim i maksymalnym oszacowaniem. Zakres zależy od ilości i jakości danych na podstawie, których wykonane są badania. Dla obu kategorii oszacowanie wyznacza się z prawdopodobieństwem 10, 50 i 90% odpowiednio dla wysokiego, niskiego i optymalnego oszacowania.

W Polsce została zaproponowana klasyfikacja pojemności składowania dwutlenku węgla (Uliasz-Misiak, 2008), oparta na założeniach z klasyfikacji CSLF (CSLF 2005, 2008) oraz klasyfikację zasobów węglowodorów SPE/WPC/AAPG (Nieć, 2006; Demirmen, 2007; Reserves and..., 2007; Uliasz-Misiak, 2008).

W niniejszej klasyfikacji (**Tabela 1.1.24_1**) wyróżniamy pojęcie teoretycznej pojemności składowania stanowiącej ilość dwutlenku węgla jak może być zmagazynowana w całkowitej przestrzeni porowej danej struktury.

Tab. 1.1.24_1 Klasyfikacja pojemności składowania CO₂ (wg Uliasz-Misiak, 2008).

Teoretyczna pojemność składowania				
Efektywna pojemność składowania CO ₂			Warunkowa pojemność składowania CO ₂	Niedostępna pojemność składowania CO ₂
Efektywna stwierdzona pojemność składowania CO ₂	Efektywna prawdopodobna pojemność składowania CO ₂	Efektywna możliwa pojemność składowania CO ₂		

Dzielimy ją na:

- efektywną pojemność składowania, którą definiujemy jako ilość dwutlenku węgla, który może być składowany w rozpoznanych strukturach geologicznych uwzględniając przy tym aspekty geologiczne, techniczne i środowiskowe tj.: głębokość, miąższość, przepuszczalność, porowatość, mało przepuszczalni odpowiednio miąższy nadkład charakteryzujący się brakiem uskoków, odległość od emitenta, transport. Szacowanie pojemności wykonuje się na podstawie dostępnych danych, jako część przestrzeni porowej danej struktury. Z uwagi na gwarantowane prawdopodobieństwo zatłoczenia CO₂ w ilości obliczonej, efektywną pojemność składowania dzielimy na:

- efektywną stwierdzoną pojemność składowania – gwarantowane prawdopodobieństwo 90%;

- efektywną prawdopodobną pojemność składowania – gwarantowane prawdopodobieństwo 50%;

- efektywną możliwą pojemność składowania – gwarantowane prawdopodobieństwo 10%;

- warunkową pojemność składowania jest pojemnością, która w chwili obecnej nie może być wykorzystana ze względów technicznych lub środowiskowych. Stanowi ona ilość dwutlenku węgla, jaka może być składowana w danej strukturze geologicznej, spełniającej kryteria geologiczne jak w przypadku efektywnej

pojemności składowania;

- niedostępna pojemność składowania oznacza pojemność, która obecnie nie może być wykorzystana gdyż nie spełnia przyjętych kryteriów przydatności do składowania.

Szacowanie teoretycznej, efektywnej i warunkowej pojemności składowania może odbywać się we wszystkich skalach oszacowań, podczas gdy pojemność efektywna stwierdzona, prawdopodobna i możliwa jedynie w skali miejsca składowania dwutlenku węgla.

Kryteria do wyboru miejsc składowania

Na chwilę obecną nie ma jednolitych kryteriów typowania miejsc składowania dwutlenku węgla. W pracy kryteria geologiczne zostały opracowane w oparciu o Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers (Chadwick et al., 2006) (Tab. 1.1.24_2), gdzie zestawiono podstawowe parametry mające wpływ na wybór miejsca składowania tj.:

- całkowita pojemność składowania;
- głębokość zalegania skał zbiornikowych, ich miąższość i tektonika;
- porowatość, przepuszczalność i mineralizacja formacji przeznaczonych do lokowania CO₂;
- tektonika skał nadkładu i ich miąższość;

Tabela 1.1.24_2 Kryteria wyboru miejsc składowania (Best practice..., 2006).

Kryteria	Wskaźniki pozytywne
Całkowita pojemność składowania	większa niż całkowita ilość CO ₂ wyprodukowana przez źródło emisji
Głębokość	> 1000 m < 2500 m
Miąższość	> 50 m
Porowatość	> 20 %
Przepuszczalność	> 300 mD
Mineralizacja	> 100 g/dm ³
Uskoki	brak uskoków

Mięszczość nadkładu	> 100 m
---------------------	---------

Na podstawie przeprowadzonych analiz w niniejszym opracowaniu zaproponowano własne kryteria, które dają możliwość prowadzenia dalszych badań na omawianym terenie (**Tabela 1.1.24_3**). Modyfikacją zostały poddane następujące parametry:

- ♣ głębokość;
- ♣ porowatość;
- ♣ przepuszczalność;
- ♣ mineralizacja;

Tab. 1.1.24_3 Kryteria wyboru miejsc składowania

Kryteria	Zaproponowane wskaźniki
Całkowita pojemność składowania	>40 Mt
Głębokość	> 800 m < 2500 m
Mięszczość	> 50 m
Porowatość efektywna	> 9 %
Przepuszczalność	~100 mD
Mineralizacja	> 30 g/dm ³
Uskoki	brak uskoków
Mięszczość nadkładu	> 100 m

Przyjęta metodyka oszacowania pojemności składowania CO₂

Wstępną selekcję struktury geologicznej przydatnej do składowania CO₂ przeprowadza się z uwzględnieniem parametrów zalecanych w przyjętych kryteriach. Jeżeli dla rozpatrywanej struktury spełnione są wymagania w zakresie głębokości zalegania, mięszczości warstwy izolacyjnej, mineralizacji wody, korzystnej tektoniki oraz ekonomicznie uzasadnionej odległości od emitenta, to można wyznaczyć granicę zbiornika wykorzystując informacje dotyczące mięszczości warstw zbiornika ich porowatości efektywnej i przepuszczalności. Parametry te najlepiej przedstawić

w formie izolinii ich średnich wartości ważonych. Określenie średniej miąższości wymaga wykonania mapy izopach i oszacowania powierzchni ograniczonej sąsiednimi izopachami, a następnie obliczenie średniej ważonej.

Wyznaczenie średniej ważonej miąższości zalecane jest zawsze, gdy stwierdzone otworami wiertniczymi miąższości warstw są wyraźnie zróżnicowane.

Podobnie można określić, jako średnie wartości innych parametrów zbiornika z tym, że np. w przypadku porowatości efektywnej najpierw określa się średnią ważoną dla poszczególnych interwałów miąższości, dla których oznaczono porowatość efektywną, a następnie wykonuje mapę równych wartości ważonych i podobnie jak dla miąższości określa się średnie ważone wartości porowatości efektywnej dla całego zbiornika.

Wykorzystując mapy izoliniowe poszczególnych parametrów z określeniem wymaganych kryteriów wartości granicznych można wyznaczyć zasięg (granice) ocenianego zbiornika. Będzie to w każdym przypadku powierzchnia o kształcie zależnym od przebiegu poszczególnych izolinii granicznych (progowych).

Dysponując powierzchnią zbiornika i jego średnią miąższością oraz porowatością efektywną można określić objętość por stanowiących podstawę oszacowania pojemności zbiornika.

Teoretyczna pojemność składowania wykorzystaniem wolnych przestrzeni V wynosi:

$$V = A \times h \times \varphi \quad (1)$$

gdzie:

- A – powierzchnia zbiornika, m²;
- h – średnia miąższość warstw zbiornika, m;
- φ – współczynnik porowatości efektywnej, liczba niemianowana <1.

Dodatkową pojemność uzyska się uwzględniając ściśliwość górotworu i wody zawartej w porach, spowodowanej zwiększeniem ciśnienia złożowego wskutek zatłaczania:

$$V_{spr} = A \times h \times \beta^* \times H_n \quad (2)$$

gdzie:

V_{spr} – pojemność sprężysta, m³;

β^* – współczynnik pojemności sprężystej określanej jako:

$$\beta^* = \beta_s + \varphi \times \beta_w$$

gdzie:

➤ β_s i β_w – współczynnik ściśliwości objętościowej odpowiednio skały i wody, MPa⁻¹;

- H_n – nadciśnienie przyjęte przy zatłaczaniu, MPa;
- A, h i φ – jak we wzorze (1).

Dwutlenek węgla wtłaczany do utworów geologicznych będzie w górotworze zatrzymany z wykorzystaniem w uproszczeniu następujących mechanizmów:

1. wypełniania wolnych przestrzeni związanych z porowatością efektywną międzyziarnową i szczelinową;
2. rozpuszczaniem w wodzie porowej (solance);
3. geochemicznego wiązania z minerałami skał zbiornikowych i wiązania z mineralnymi składnikami wody złożowej

W przypadku gdy zatłaczanie odbywać się będzie do zbiornika z poziomem wodonośnym o zwierciadle napiętym gdzie pory otwarte w całości wypełnione są wodą to masa zatrzymanego CO₂ związana będzie z jego rozpuszczaniem, a jej teoretyczna wielkość wyniesie:

$$Q_r = A \times h \times \varphi \times (m_{CO_2} - m_x) \times C_{ef} \quad (3)$$

gdzie:

1. Q_r – rozpuszczona masa CO₂ w wodzie, kg;
2. A, h, φ – jak we wzorze (1);
3. m_{CO_2} – masa CO₂, która może się rozpuścić w 1 m³ wody, (40÷60 kg/m³ – Holt i in., 1995);
4. m_x – masa CO₂ zawarta w 1 m³ wody złożowej;
5. C_{ef} – współczynnik skuteczności (sprawności) składowania.

W przypadku zbiorników nie w pełni zawodnionych wodą, które można scharakteryzować stopniem wypełnienia wodą zbiornika S , masę składowanego dwutlenku węgla można oszacować wg wzoru:

$$Q_s = A \times h \times \varphi \times (1 - S) \times \rho_{CO_2} \times C_{ef} \quad (4)$$

gdzie:

- Q_s – masa składowanego CO₂ w części zbiornika nie wypełnionego wodą;
- A, h, φ i C_{ef} – jak we wzorze (3);
- ρ_{CO_2} – gęstość CO₂ w zależności od występującego ciśnienia i temperatury.

Uwzględniając dodatkową masę CO₂ jaką można składować w zbiorniku wynikającą ze ściśliwości skał i wody porowej Q_{spr} oraz masę związaną z ewentualnymi reakcjami geochemicznymi z minerałami skałotwórczymi i wodą Q_m , można z pewnym uproszczeniem, wstępnie z uwzględnieniem aktualnego rozpoznania, oszacować masę CO₂, którą będzie można ulokować w rozpatrywanym zbiorniku jako sumę $Q_r + Q_s + Q_{spr} + Q_m = Q$.

Przy ocenie masy składowanego CO₂ podstawową trudność stanowi określenie wartości współczynnika skuteczności (sprawności) składowania. Rozrzut jego wartości jest bardzo duży i współczynnik ten waha się od 1÷40%. Dla formacji regionalnych przyjmuje się 1÷4%, a dla indywidualnych struktur 3÷40% (Vangkilde-Pedersen i in., 2009). Najlepiej jest skorzystać (o ile to możliwe) z wyników doświadczalnych.

Podobnie trudno jest określić, jaka część wtłaczanego CO₂ będzie zaangażowana w reakcje ze skałami i częściami mineralnymi zawartymi w wodzie złożowej. Zagadnienie to rozwiązuje się z pomocą modelowania, ale konieczna jest znajomość składu mineralnego skał zbiornika oraz składu chemicznego wody.

Oszacowanie masy CO₂ możliwej do ułożenia w wytypowanym zbiorniku warstw dębowieckich

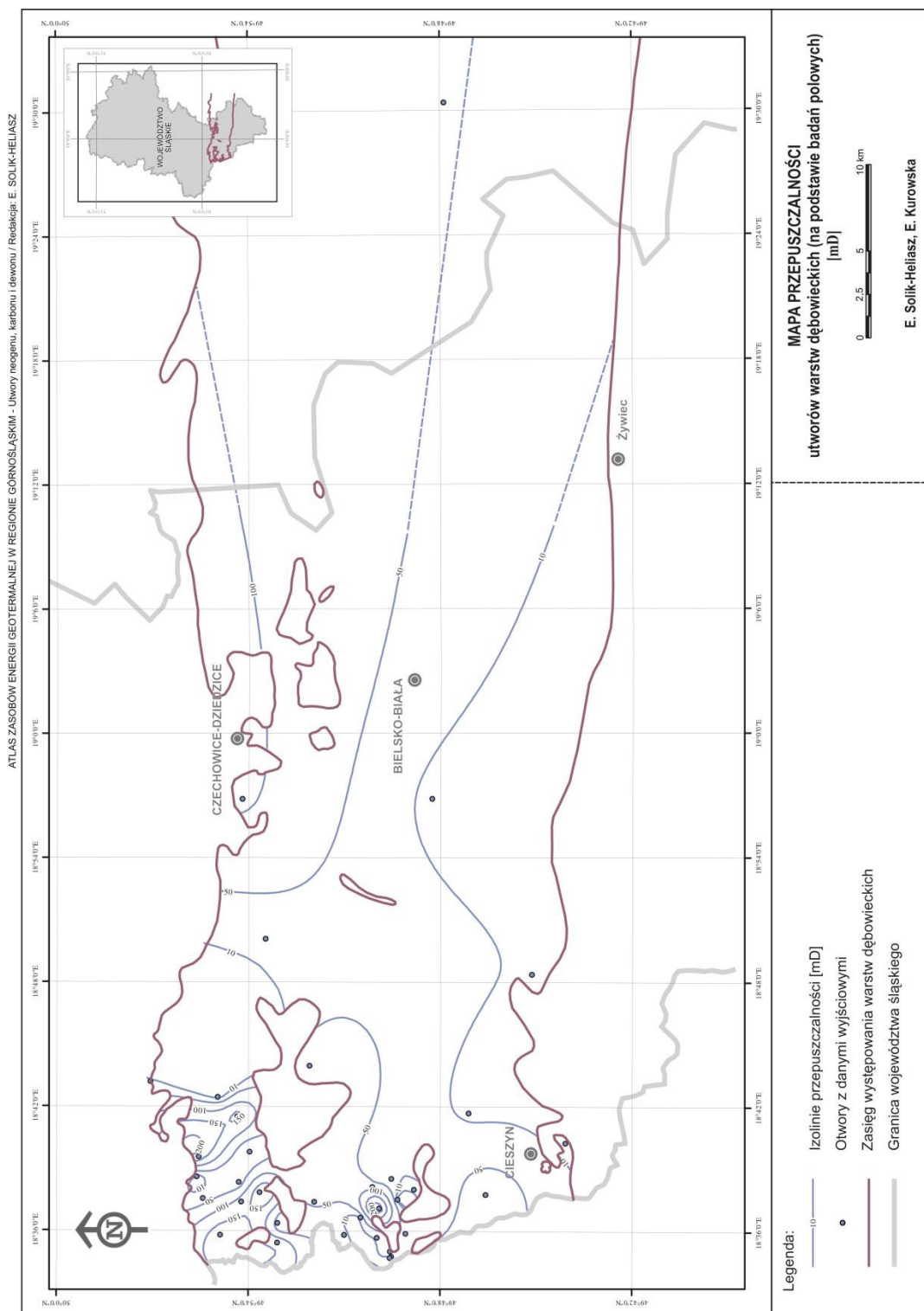


Fig. 1.1.24_6 Mapa przepuszczalności utworów warstw dębowieckich na podstawie badań polowych (Solik-Heliasz, 2009).

Omawiany zbiornik charakteryzuje się wystarczającą miąższością, występowaniem dobrej izolacji nadkładu, małym zaangażowaniem tektonicznym, występowaniem napiętego poziomu wodonośnego o zasoleniu powyżej 30 g/dm³, porowatością od 9% do 18% oraz zmienną przepuszczalnością (określoną zbyt małą ilością oznaczeń) mieszczącą się w przedziale od 1 do 363 mD. W rejonie wyznaczonego zbiornika przepuszczalność określona badaniami polowymi zawiera się w przedziale 10÷100 mD (Rys. 1.1.24_6).

Zbiornik ten spełnia zalecane przez światowych specjalistów większość kryteriów. Stosunkowo niska przepuszczalność i średnia porowatość upoważniają jedynie do wykonania oszacowania jego pojemności i masy CO₂ możliwej do ewentualnego eksperymentalnego składowania.

Oszacowanie pojemności przeprowadzono metodą blokową o siatce 2km x 2km określając dla każdego bloku średnią miąższość warstw zbiornika i średnią porowatość. Następnie zakładając, że wszystkie wolne przestrzenie w skałach są wypełnione wodą i przyjmując, że zatłaczany CO₂ będzie się rozpuszczał w ilości średnio 50 kg/m³ wody (solanki), a współczynnik skuteczności składowania wyniesie 20%, oszacowano ewentualną masę Q_r możliwą do ulokowania w zawodnionych przestrzeniach porowych (Tab. 1.1.24_4).

Oszacowano również dodatkową pojemność zbiornika wynikającą ze ściśliwości skały i wody, przyjmując, $\beta_s = 2,2 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$, $\beta_w = 3,9 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$, przy nadciśnieniu 3 MPa.

$$Q_{spr} = V_{spr} \times \rho_{CO2} \times C_{ef}$$

$$V_{spr} = A \times h \times (\beta_s + f_i \times \beta_w) \times H_n$$

$$Q_{spr} = 43\,520\,000 \text{ Mg}$$

Pomijając ze względu na brak danych masę dwutlenku węgla, która wejdzie w reakcje z minerałami można oszacować, że zbiornik warstw dębowieckich w granicach określonych na Fig. 1.1.24_7 może (realistycznie biorąc) pozwolić na ulokowanie około **44 mln ton⁷ CO₂**.

⁷ Pojemność dynamiczna otrzymana w rozdziale 1.1.16 dla obiektu Skoczów-Czechowice wynosi około połowy tej wartości, co potwierdza wiarygodność powyższego oszacowania.

Tabela 1.1.24_4 Zestawienie tabelaryczne wyników obliczeniowych.

Numer bloku	Powierzchnia bloku [m ²]	Średnia porowatość efektywna	Średnia miąższość [m]	Objętość por [m ³]	m _{CO2} -m _x =0,05 Mg	C _{ef} =0,2	Szacunek masy CO ₂ możliwej Q _r do składowania w Mg
1	3349000	0,126	70	29538180,00	1476909,00	295381,80	39422406
2	3448000	0,104	79	28328768,00	1416438,40	283287,68	
3	3213000	0,110	83	29201350,50	1460067,53	292013,51	
4	4229000	0,117	102	50253207,00	2512660,35	502532,07	
5	4208000	0,123	87	45029808,00	2251490,40	450298,08	
6	4304000	0,122	88	46207744,00	2310387,20	462077,44	
7	1882000	0,101	125	23760250,00	1188012,50	237602,50	
8	4000000	0,110	140	61320000,00	3066000,00	613200,00	
9	4539000	0,107	82	39825186,00	1991259,30	398251,86	
10	2999000	0,106	85	27020990,00	1351049,50	270209,90	
11	2338000	0,117	80	21883680,00	1094184,00	218836,80	
12	2294000	0,127	104	30299152,00	1514957,60	302991,52	

13	2049000	0,140	102	29259720,00	1462986,00	292597,20
14	2285000	0,109	85	21073412,50	1053670,63	210734,13
15	2973000	0,098	85	24638737,50	1231936,88	246387,38
16	2419000	0,094	141	31890886,50	1594544,33	318908,87
17	5249000	0,109	134	76666894,00	3833344,70	766668,94
18	5040000	0,142	137	97702920,00	4885146,00	977029,20
19	4386000	0,166	156	113237748,00	5661887,40	1132377,48
20	3550000	0,152	130	70148000,00	3507400,00	701480,00
21	1461000	0,132	109	21020868,00	1051043,40	210208,68
22	3663000	0,115	135	56868075,00	2843403,75	568680,75
23	3472000	0,111	135	52027920,00	2601396,00	520279,20
24	4000000	0,107	146	62196000,00	3109800,00	621960,00
25	1929000	0,097	125	23268562,50	1163428,13	232685,63
26	5491000	0,113	133	82524239,00	4126211,95	825242,39
27	5146000	0,137	187	131354223,00	6567711,15	1313542,23
28	5095000	0,139	150	106230750,00	5311537,50	1062307,50

29	4000000	0,131	212	110664000,00	5533200,00	1106640,00
30	4000000	0,123	183	90036000,00	4501800,00	900360,00
31	4000000	0,119	156	74256000,00	3712800,00	742560,00
32	4000000	0,128	173	88576000,00	4428800,00	885760,00
33	4000000	0,118	175	82600000,00	4130000,00	826000,00
34	4088000	0,099	133	53826696,00	2691334,80	538266,96
35	4310000	0,099	83	35236405,00	1761820,25	352364,05
36	4000000	0,115	157	72220000,00	3611000,00	722200,00
37	5146000	0,134	204	140146164,00	7007308,20	1401461,64
38	3256000	0,113	155	56776500,00	2838825,00	567765,00
39	5584000	0,104	182	105185808,00	5259290,40	1051858,08
40	5290000	0,105	174	96648300,00	4832415,00	966483,00
41	5342000	0,111	154	90904814,00	4545240,70	909048,14
42	4000000	0,115	193	88394000,00	4419700,00	883940,00
43	4000000	0,102	149	60494000,00	3024700,00	604940,00
44	3707000	0,093	118	40680618,00	2034030,90	406806,18

45	3957000	0,095	137	51500355,00	2575017,75	515003,55
46	4000000	0,102	168	68544000,00	3427200,00	685440,00
47	4000000	0,114	187	85272000,00	4263600,00	852720,00
48	4849000	0,130	198	124813260,00	6240663,00	1248132,60
49	2762000	0,109	78	23374806,00	1168740,30	233748,06
50	3892000	0,107	80	33159840,00	1657992,00	331598,40
51	3181000	0,098	110	34116225,00	1705811,25	341162,25
52	3037000	0,095	201	57991515,00	2899575,75	579915,15
53	4000000	0,095	209	79002000,00	3950100,00	790020,00
54	4000000	0,094	206	77291200,00	3864560,00	772912,00
55	4000000	0,098	208	81369600,00	4068480,00	813696,00
56	3937000	0,104	234	95810832,00	4790541,60	958108,32
57	2583000	0,114	244	71848728,00	3592436,40	718487,28
58	3861000	0,103	77	30472942,50	1523647,13	304729,43
59	4000000	0,100	86	34228000,00	1711400,00	342280,00
60	2066000	0,091	226	42629430,80	2131471,54	426294,31

61	4000000	0,093	208	77376000,00	3868800,00	773760,00
62	4953000	0,101	174	87302568,60	4365128,43	873025,69
63	4607000	0,095	77	33700205,00	1685010,25	337002,05
64	2542000	0,095	137	33014479,20	1650723,96	330144,79

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza warunków geologicznych, hydrogeologicznych, górniczych z uwzględnieniem informacji z badań geofizycznych i warunków środowiskowych w szeroko rozumianych warstwach dębowieckich wydzielono rejon (**Fig.1.1.24_1**) spełniający podstawowe kryteria zbiorników przewidzianych do składowania CO₂.

Granice tego rejonu określono wykorzystując wartości progowe ujęte w kryterium miąższości warstwy i porowatości efektywnej z uwzględnieniem występowania warstwy izolacyjnej, głębokości występowania warstw zbiornikowych, przepuszczalności, mineralizacji wody, zaburzeń tektonicznych oraz odległości zbiornika od emitenta.

Dla tak wyznaczonego zbiornika wykonano mapy warstwiczne poszczególnych parametrów oraz przekroje geologiczne, a także wstępnie przeprowadzono oszacowanie pojemności zbiornika i określono masę CO₂, którą można by składować w tym zbiorniku.

Uzyskane rezultaty wskazują, że zbiornik może być wykorzystany po wykonaniu otworu z kompletem badań wymaganych dla założonego celu i przeprowadzeniu eksperymentalnego zatłaczania. Jednakże jego pojemność jest niewystarczająca dla maksymalnego zapotrzebowania elektrowni poligeneracyjnej w Kędzierzynie ($2.9 \text{ mln ton} \times 25 \text{ lat} = 73 \text{ mln ton} \ll 44 \text{ mln ton}$), stąd można ewentualnie rozpatrywać formacje dolnokarbońskie w podłożu zbiornika warstw dębowieckich, jako dodatkowe zbiorniki – szczegółowa analiza zostanie przeprowadzona w II segmencie (następny raport dla rejonu GZW).

Mapa wynikowa z zasięgiem zbiornika i blokami obliczeniowymi pojemności

Zat. 8

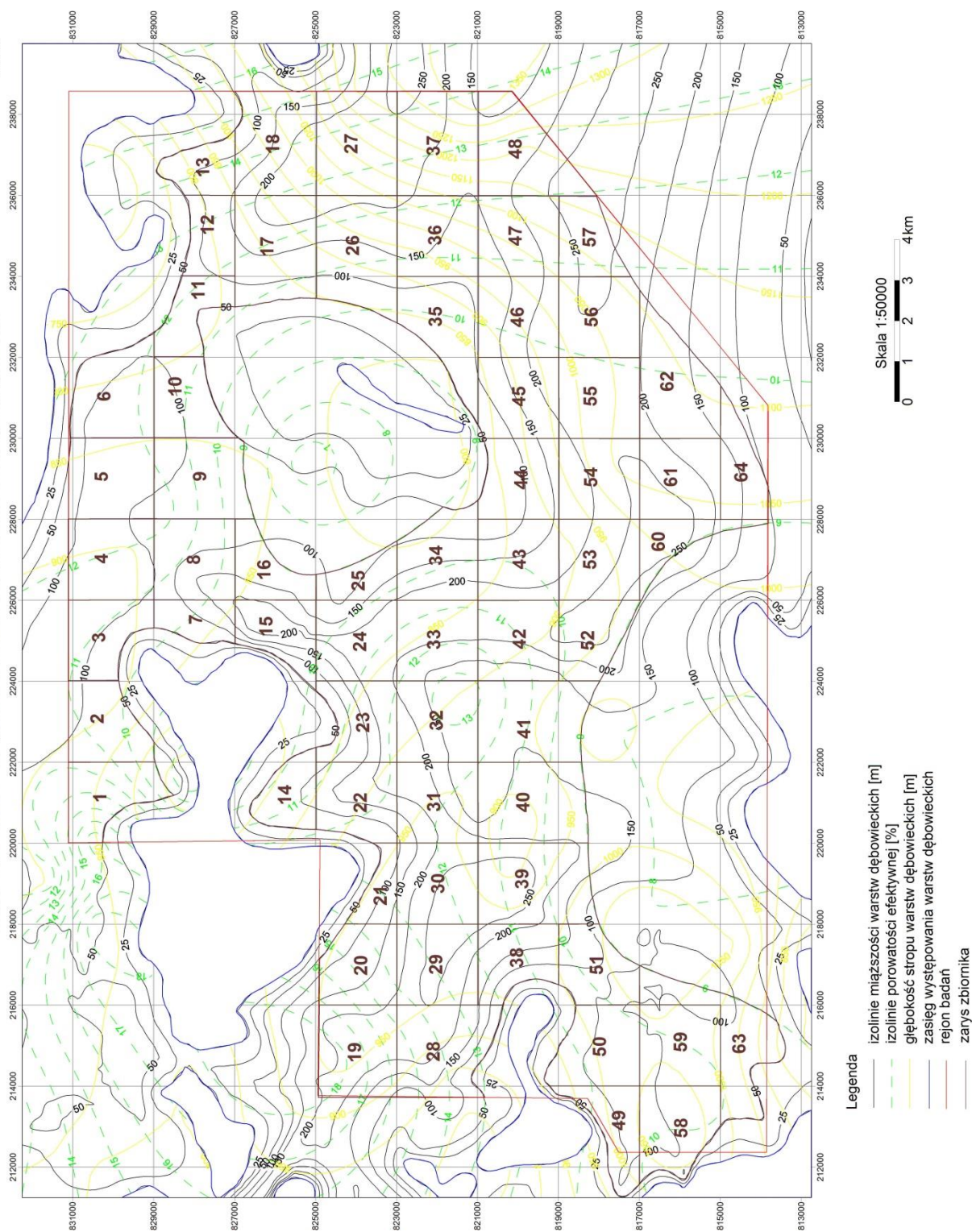


Fig.1.1.24_7 Mapa wynikowa do obliczeń pojemności geologicznego składowania CO₂ w zbiorniku warstw dębowieckich.

Pokłady węgla

(Robert Warzecha, Tadeusz Bromek, Jarosław Chećko, Eleonora Solik-Heliasz, Magdalena Głogowska, Tomasz Urych, Michał Gut)

Podziemne składowanie dwutlenku węgla polegające na jego separacji, wychwytywaniu, transporcie i składowaniu w formacjach geologicznych jest obecnie jedną z obiecujących metod mających na celu zmniejszenie emisji CO₂ do atmosfery. Przeprowadzenie operacji składowania CO₂ jest przewidziane w rejonach występowania złóż ropy, gazu, poziomów solankowych oraz nieeksploatowanych pokładów węgla.

Badania dotyczące możliwości lokowania i szacowania pojemności składowania CO₂ w pokładach węgla zawierających metan były i są przedmiotem prac zarówno na kontynencie europejskim (RECOPOL, EU Geo-Capacity, GESTCO), jak i w pozostałych częściach świata m.in. Stanach Zjednoczonych i Kanadzie. W oparciu o dotychczasowe doświadczenia generalnie można stwierdzić, że metodyka określania potencjału geologicznego składowania CO₂ w głębokich, nieeksploatowanych pokładach węgla zawierających metan jest oparta na oszacowaniu zawartości metanu z punktu widzenia technologii CO₂-ECBMR oraz współczynnika zastępowania CH₄ przez CO₂ w pokładach węgla (Davis et al., 2004; Bergen, Wildenborg, 2002; May, 2003; Tongeren, Laenen, 2001; Wójcicki, 2009).

Obecnie nie ma przyjętych jednolitych kryteriów typowania miejsc składowania CO₂ w pokładach węgla. Generalnie wybiera się pokłady węgla, zawierające dostatecznie dużą ilość metanu, którego wydobycie przy jednoczesnym zatłoczeniu CO₂ jest ekonomicznie uzasadnione. Jednocześnie brane pod uwagę pokłady węgla, jako nadające się do składowania CO₂ powinny zalegać głębiej niż te, które są lub mogą być eksploatowane w przyszłości. Powyższe kryteria w znaczny sposób ograniczają ilość potencjalnych pokładów węgla nadających się do składowania CO₂. W przypadku GZW rozważane są tylko pokłady węgla znajdujące się na głębokości większej niż 1000m.

W ramach niniejszego projektu została rozważona możliwość składowania dwutlenku węgla w nieeksploatowanych pokładach węgla z jednoczesnym procesem pozyskania metanu. Wytypowane przez PIG trzy rejony do magazynowania dwutlenku węgla: Bzie-Drogomyśl (rejon I), Pawłowice (rejon II), Międzyrzecze-Bieruń (rejon III) znajdują się w centralnym i południowym regionie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. We wszystkich trzech rejonach występują pokłady węgla kamiennego zawierające metan, a ich głębokość zalegania jest większa niż 1000m.

Oszacowanie pojemności składowania CO₂ obejmujące wyżej wymienione rejony zostało wykonane w oparciu o przekazane przez PIG następujące mapy w skali 1:25000:

- mapy węglazasobności;
- mapę metanonośności;

przekroje geologiczne oraz bazę danych z badań otworowych. Wyżej wymienione mapy zostały załączone w zadaniu **1.1.20**.

W pracy przedstawiono metodykę i wyniki, oceny teoretycznej pojemności składowania dwutlenku węgla w pokładach węgla w centralnym i południowym regionie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW).

W dalszych badaniach przed przystąpieniem do próbnego zatłaczania CO₂ należałoby również uwzględnić oddziaływanie dwutlenku węgla na zbiorniki wód podziemnych oraz uzyskać uzgodnienia dotyczące ewentualnego wykorzystania rozważanych pokładów węgla jako paliwa.

Wprowadzenie do procesu składowania CO₂ i uzyskiwania metanu

Składowanie CO₂ w pokładach węgla jest jednym ze sposobów przeciwdziałania degradacji środowiska naturalnego w zakresie zmiany klimatu. Zmiany te związane są z globalnym ociepleniem wynikającym ze wzrastającej emisji CO₂ do atmosfery. Podobne acz wielokrotnie większe skutki powoduje emisja metanu. Stąd pomysł by z jednej strony pozbywać się CO₂ przez jego zatłoczenie do metanonośnych pokładów węgla, a z drugiej strony odzyskiwać CH₄ i wykorzystywać go do celów gospodarczych.

Powszechnie przyjmuje się, że węgiel kamienny charakteryzuje się dwukrotnie wyższą pojemnością sorpcyjną CO₂ względem CH₄. Zatłaczany dwutlenek węgla do złoża węglowego będzie sorbowany i równocześnie będzie wypierał zawarty w nim metan. Technologia ta w świecie, a także w Polsce była wypróbowana i stwarza duże nadzieje na jej przemysłowe zastosowanie stąd dość szerokie zainteresowanie problematyką badawczą związaną ze składem petrograficznym różnych węgli oraz ich związku z własnościami fizycznymi i chemicznymi poszczególnych macerałów. Szczególnie istotne znaczenie mają badania dotyczące gromadzenia, przepływow i zachowania się gazów w pokładach węgla.

Większość modeli opisujących przepływy gazu w węglu zakłada, że matryca węglowa ma kształt prostopadłościanów rozdzielonych systemem poziomych i pionowych szczelin. Układ i rozwartość szczelin decydują o przepuszczalności i stanowią o makroporach, natomiast mikropory o średnicy mniejszej niż 2 nm decydują o adsorpcji gazu, który może się przemieszczać tylko na zasadzie procesu dyfuzji. Przepuszczalność pokładów węgla jest bardzo zróżnicowana i mieści się w granicach od dziesiątych części mD do kilkudziesięciu mD, a rzadko przekracza setki mD. Sieć spękań związanych z kłiważem węgla oraz system mikropor decydują o pojemności magazynowej oraz o możliwości przepływu gazu i wody. Zdesorbowany metan może się przemieszczać w pokładzie węgla w dwojaki sposób tj.:

- poprzez dyfuzję w matrycy węglowej;
- przez przepływ w szczelinach.

Istotną rolę w procesie pozyskiwania metanu odgrywa przepływ przez system spękań. W warunkach naturalnych pory i szczeliny wypełnione są wodą, która blokuje przepływ gazu oraz uniemożliwia wypełnienie por zatłaczanym gazem. Może jedynie sprzyjać rozpuszczaniu się gazu w wodzie. Ewentualne zatłaczanie CO₂, wywołanie desorpcji metanu i jego przepływ w kierunku otworu drenażowego wymaga często długotrwałego odwadniania pokładu węgla. W praktyce poprawę przepuszczalności uzyskuje się poprzez stymulowane szczelinowanie pokładu. Przepuszczalność węgla jest podstawowym parametrem decydującym o efektywności procesu składowania CO₂ i odzyskiwania metanu. Znane jest zjawisko zmniejszania się przepuszczalności skał w tym węgla wraz z głębokością ich zalegania. Czynnikiem ten determinuje głębokość, do której proces składowania CO₂ w pokładach węgla może być rozważany.

Generalnie, w zależności od warunków lokalnych, przyjmuje się, że jest to głębokość 1200÷1500m. Jak już wspomniano o przepuszczalności węgla decydują szczeliny, których rozwartość maleje wraz ze wzrostem ciśnienia efektywnego będącego różnicą ciśnień całkowitych i ciśnienia porowego. Warto tu również zauważyć, że proces absorpcji (pochłaniania) dwutlenku węgla, szczególnie przy wyższych ciśnieniach, prowadzi do pęcznienia węgla, a w konsekwencji do zmniejszenia pierwotnej porowatości i przepuszczalności.

Dobór pokładów węgla do składowania dwutlenku węgla

Podstawowym wymogiem niezbędnym do wytypowania pokładów węgla dla składowania CO₂ jest ich metanonośność tzn. taka zawartość metanu, którego odzyskanie będzie korzystne gospodarczo. Proces składowania CO₂ będzie elementem wspomagającym maksymalne uzyskanie CH₄. Równie istotna jest głębokość zalegania pokładu. Zgodnie z obowiązującymi w Polsce kryteriami bilansowości dla pokładów występujących do głębokości 1000m są szacowane zasoby bilansowe i pozabilansowe, które podlegają ochronie. W związku z tym składowanie CO₂ może być rozważane poniżej tej głębokości. Trzeba zwrócić jednak uwagę, że w niektórych przypadkach głębokość dokumentowania zasobów węgla (na zasadzie odstępowania od obowiązujących kryteriów) wynosi 1100m.

Wytypowane do składowania pokłady węgla muszą być rozważane z uwzględnieniem geologicznego aspektu ich usytuowania przestrzennego tzn. :

- nie mogą być zaburzone tektonicznie głównie tektoniką dysjunktywną;
- powinny być izolowane odpowiednim nadkładem o własnościach nieprzepuszczalnych;
- charakteryzować się słabym zawodnieniem, najlepiej wodą o małym zasoleniu.

Ponadto pokłady wytypowane do składowania CO₂ z jednoczesnym wydobywaniem metanu powinny:

- charakteryzować się wystarczającą przepuszczalnością, najlepiej powyżej 5 mD;
- powinny charakteryzować się wysoką zawartością metanu;
- powinny mieć dostateczną pojemność składowania, nie mniejszą niż 200 tys. Mg;
- nie mogą być aktualnie i w przyszłości eksploatowane.

Przyjęta metodyka oszacowania pojemności składowania CO₂ w pokładach węgla

Zgodnie z przyjętą zasadą, że składowanie CO₂ będzie procesem wspomagającym odzyskiwanie metanu z wytypowanych pokładów węgla założono, że o potencjalnej pojemności składowania w głównej mierze decydować będzie zawartość metanu (zasoby geologiczne) w tych pokładach.

Do oceny ilości metanu V w m^3 niezbędna jest znajomość:

- powierzchni pokładu, P w m^2 ;
- miąższości pokładu, h w m ;
- metanonośności, M w m^3/Mg_{csw} ;
- gęstości (ciężaru objętościowego węgla), γ_w [Mg/m^3];
- zawartości popiołu, a w % lub ułamku jedności;
- zawartości wilgoci, m w % lub ułamku jedności;

$$V = P \cdot h \cdot M \cdot \gamma_w \cdot (1 - a - m), [m^3]$$

Zawartość gazu w określonej temperaturze zależy od ciśnienia, to znaczy zdolność adsorpcji zwiększa się ze wzrostem ciśnienia do określonej zawartości V_g , wyznaczonej asymptotą do izotermi Langmuira (Bachu, 2007). Z drugiej strony zdolność adsorpcji gazu maleje wraz ze wzrostem temperatury. Powoduje to, że na pewnej głębokości zmniejsza się zdolność adsorpcji gazu. Jeśli pokład jest całkowicie nasycony gazem to $V = V_g$ w przeciwnym razie $V < V_g$.

Jak już wcześniej wspomniano, proces lokowania CO₂ w głębokich pokładach węgla polegający na uwalnianiu z matrycy CH₄ i magazynowaniu w jego miejsce CO₂ jest bardzo złożony i nie do końca wyjaśniony. Zdolność niektórych węgli do adsorpcji CO₂ może być kilka razy większa niż w przypadku CH₄. Generalnie przy ocenie potencjalnej pojemności składowania przyjmuje się, że wskaźnik ten wynosi 2. Nie jest również do końca jednoznaczne czy przy wysokiej temperaturze i ciśnieniu z jakim mamy do czynienia na głębokości powyżej 1000m, gdzie występują warunki nadkrytyczne, a CO₂ nie jest w stanie gazowym, proces przemieszczania się takiego medium jest możliwy. Jest to tym bardziej wątpliwe, że bardzo niska przepuszczalność pokładów węgla na omawianej głębokości, może być zmniejszona prawie o dwa rzędy wielkości (White i in., 2005) w wyniku procesu pęcznienia węgla pod wpływem oddziaływania CO₂. Stąd do oceny pojemności masowej składowania w obliczeniach przyjmuje się gęstość CO₂ w warunkach naturalnych.

Przy ocenie pojemności trzeba również uwzględnić zawodnienie pokładu węgla. Woda zawarta w spękaniach i szczelinach utrudniać będzie przepływ CO₂ oraz częściowe jego rozpuszczenie. W przypadku, gdy prowadzić się będzie wyprzedzające odwadnianie pokładu wytwarzać będzie się podciśnienie, co

korzystnie wpłynie na desorpcje metanu oraz przepływ dwutlenku węgla. Trzeba jednak pamiętać, że odpompowana woda z dużych głębokości jest przeważnie silnie zasolona, co niesie za sobą konieczność jej utylizacji na powierzchni terenu.

Uwzględniając powyższe uwagi, można na poziomie wstępnego rozpoznania warunków zalegania metanonośnych pokładów węgla oszacować ich pojemność masową Q_{CO_2} związaną ze składowaniem dwutlenku węgla.

Wychodząc z objętości metanu zawartego w suchej i bezpopiołowej masie węgla można napisać, że:

$$Q_{CO_2} = V \cdot \gamma_{CO_2} \cdot b \cdot x_1 \cdot x_2$$

gdzie:

V – zawartość metanu w węglu, m^3 ;

γ_{CO_2} - gęstość objętościowa CO_2 , Mg/m^3 ;

b – współczynnik zastępowania metanu dwutlenkiem węgla ($b = 2$);

x_1 – współczynnik wydobywania;

x_2 – współczynnik kompletności;

czyli:

$$Q_{CO_2} = P \cdot h \cdot M \cdot \gamma_w \cdot (1 - a - m) \cdot \gamma_{CO_2} \cdot b \cdot x_1 \cdot x_2, [Mg]$$

Oszacowanie masy CO_2 możliwej do ulokowania w wytypowanych rejonach składowania

Po wykonaniu analizy powyższych materiałów określono granice poszczególnych bloków, przeznaczonych pod przyszłe składowanie CO_2 . Bloki zostały wyznaczone głównie w oparciu o budowę tektoniczną i stopień rozpoznania otworami wiertniczymi. Przyjęto następującą numerację wytypowanych rejonów:

- Bzie-Drogomyśl „I” (Fig. 1.1.1_24_8);
- Pawłowice „II” (Fig. 1.1.1_24_9);
- Międzyrzecze-Bieruń „III” (Fig. 1.1.1_24_10).

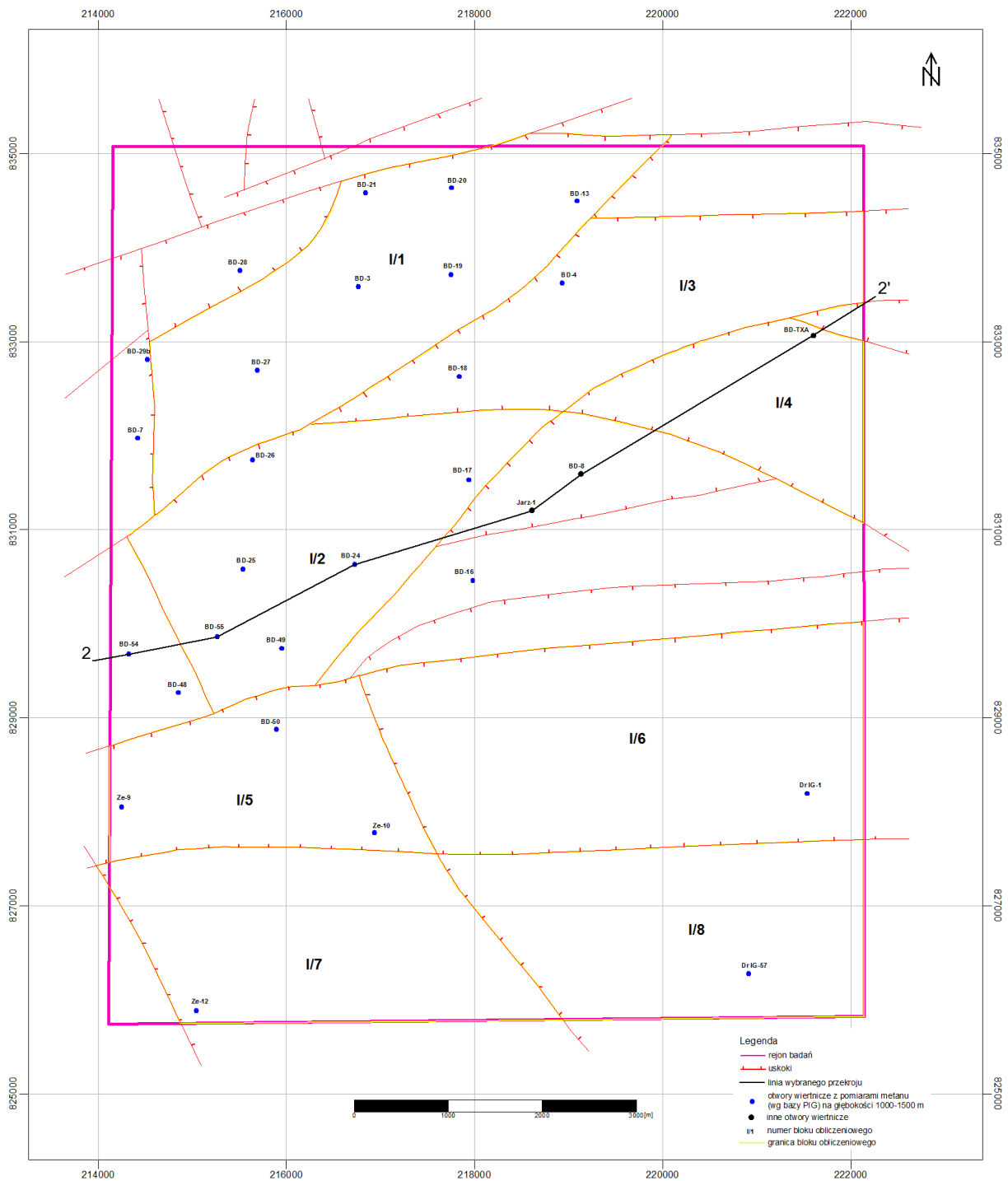


Fig. 1.1.1_24_8 Schematyczna mapa rejonu I (Bzie-Drogomyśl).

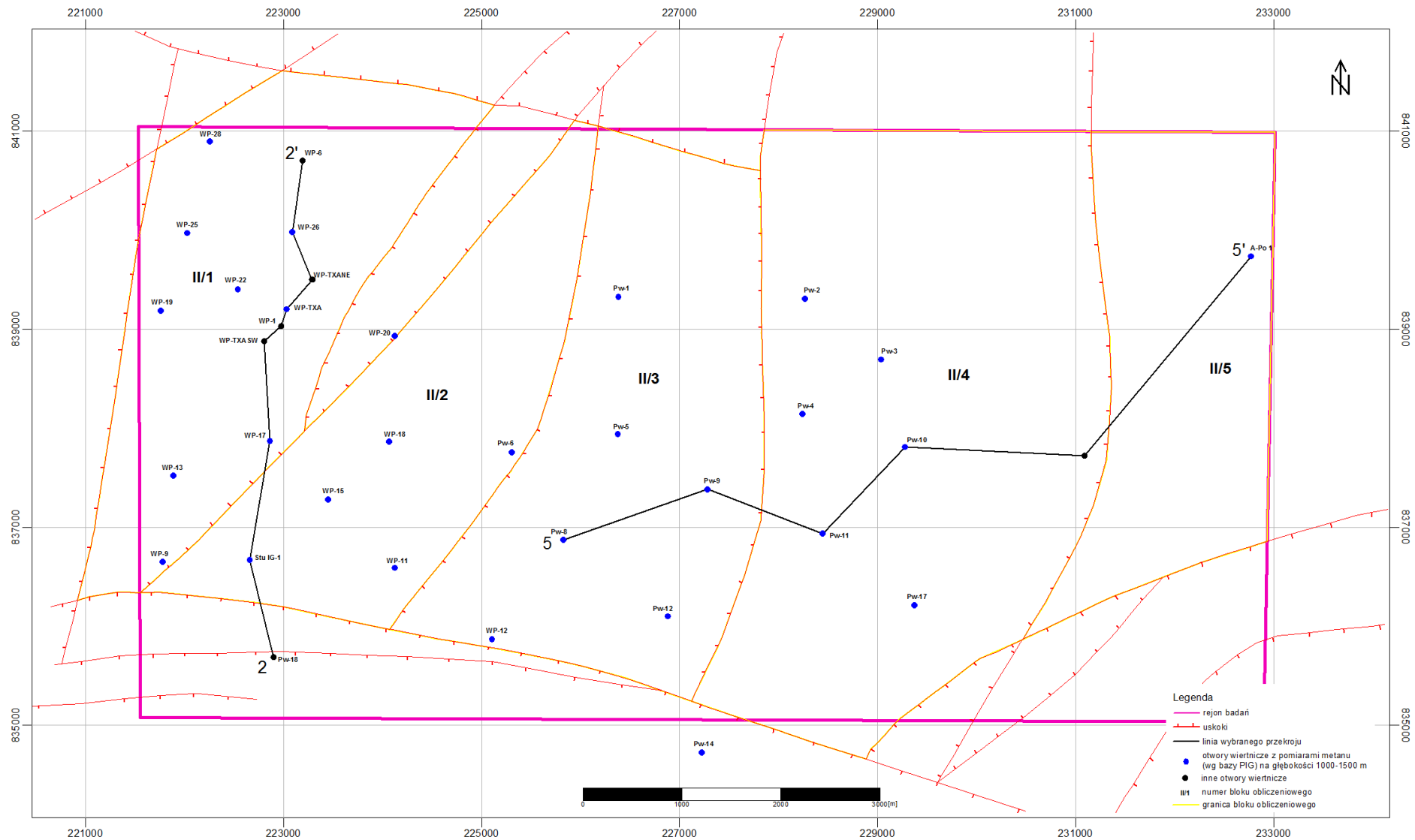


Fig. 1.1.1_24_9 Schematyczna mapa rejonu II (Pawłowice).

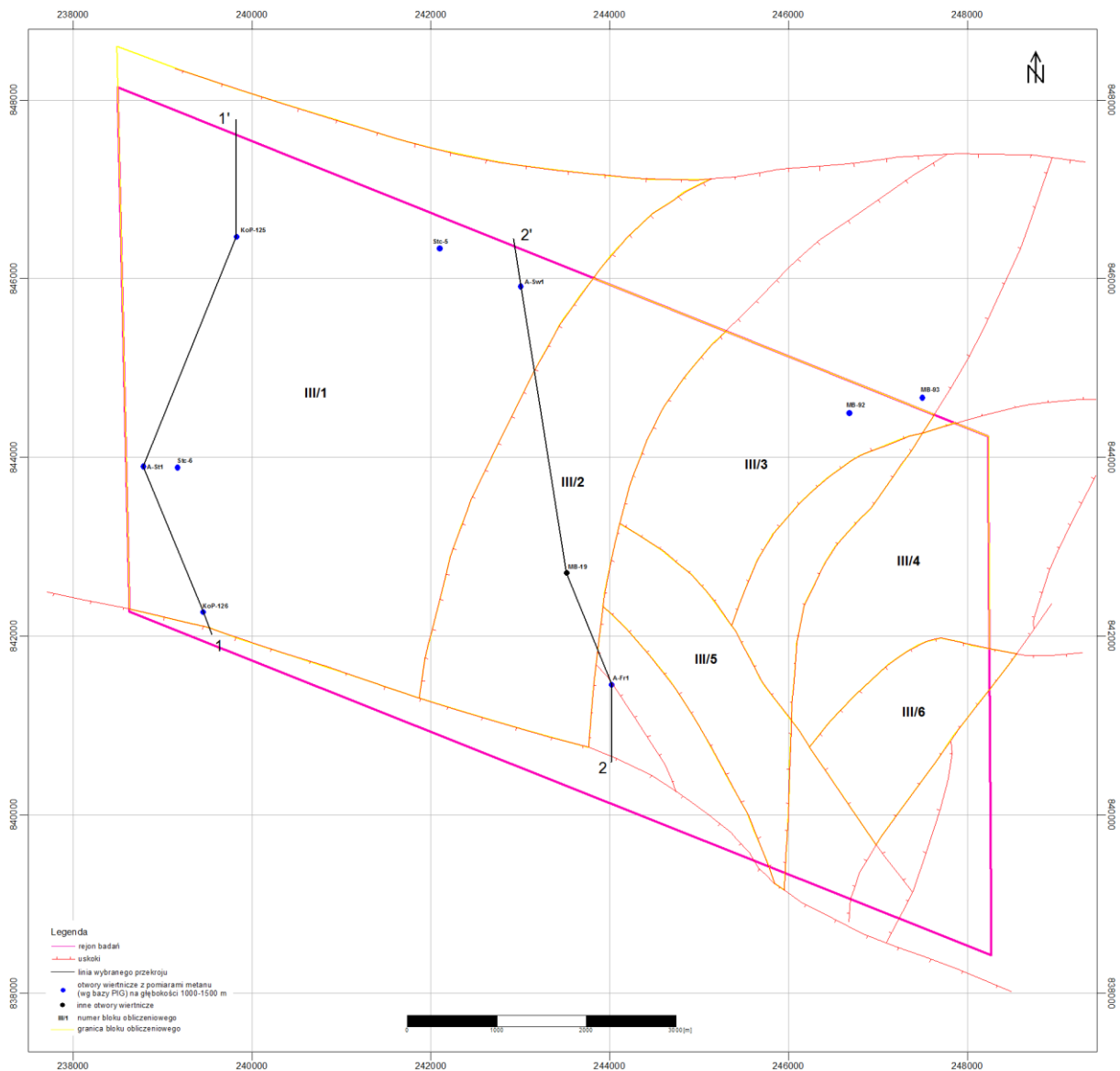


Fig. 1.1.1_24_10 Schematyczna mapa rejonu III (Międzyrzecze-Bieruń).

W obrębie rejonów wytypowane bloki zostały ponumerowane, nawiązując pierwszą rzymską cyfrą do rejonu, w którym się znajdują. Linie przekrojów zaznaczonych na powyższych mapach przedstawiono na **Fig. 1.1.24_11 - 15**.

Do oszacowania pojemności składowania CO₂ wykorzystano informację z następujących otworów wiertniczych (**Tabela 1.1.1_24_5 - 7**).

Uzyskane z powyższych otworów informacje zestawiono w arkuszach obliczeniowych (**Tabela 1.1.1_24_8 - 10**).

Tabela 1.1.1_24_5 Rejon I

Blok I/1				
Nazwa otworu	Symbol	x	y	z
BZIE DEBINA 13	BD-13	834490,99	219078,14	263,63
BZIE DEBINA 19	BD-19	833707,01	217740,11	272,11
BZIE DEBINA 20	BD-20	834633,02	217748,42	272,76
BZIE DEBINA 21	BD-21	834577,20	216835,19	269,75
BZIE DEBINA 28	BD-28	833753,74	215500,99	261,43
BZIE DEBINA 27	BD-27	832691,15	215683,97	262,50
BZIE DEBINA 3	BD-3	833587,22	216761,41	254,24
BZIE DEBINA 7	BD-7	831974,04	214415,45	272,08
BZIE DEBINA 29bis	BD-29b	832809,56	214518,83	273,34

Blok I/3				
Nazwa otworu	Symbol	x	y	z
BZIE DEBINA 18	BD-18	832627,80	217835,63	260,46
BZIE DEBINA 4	BD-4	833620,86	218920,43	269,97

Blok I/6				
Nazwa otworu	Symbol	x	y	z
DROGOMYSL IG-1	DRIG-1	828192,03	221531,82	260,67

Blok I/2				
Nazwa otworu	Symbol	x	y	z
BZIE DEBINA 17	BD-17	831526,84	217933,43	262,09
BZIE DEBINA 24	BD-24	830624,91	216721,22	260,62
BZIE DEBINA 25	BD-25	830575,48	215537,17	237,88
BZIE DEBINA 49	BD-49	829736,45	215953,55	232,64
BZIE DEBINA 55	BD-55	829862,42	215262,47	247,46
BZIE DEBINA 26	BD-26	831742,63	215635,72	241,50
BZIE DEBINA 16	BD-16	830451,13	217978,36	248,56
BZIE DEBINA 48	BD-48	829262,94	214849,02	246,88
BZIE DEBINA 54	BD-54	829673,35	214329,37	242,5

Blok I/5				
Nazwa otworu	Symbol	x	y	z
BZIE DEBINA 50	BD-50	828873,43	215892,24	258,95
ZEBRZYDOWICE 10	ZE-10	827776,48	216939,04	264,13
ZEBRZYDOWICE 9	ZE-9	828047,85	214252,41	236,35

Blok I/7				
Nazwa otworu	Symbol	x	y	z
ZEBRZYDOWICE 12	ZE-12	825881,48	215051,06	270,08

Tabela 1.1.1_24_6 Rejon II

Blok II/1					Blok II/2				
Nazwa otworu	Symbol	x	y	z	Nazwa otworu	Symbol	x	y	z
WARSZOWICE PAWLOWICE 13	WP-13	837530,3 2	221887,2 1	267,8 1	STUDZIONKA IG-1	STUIG- 1	836684,1 9	222665,1 5	270,0 7
WARSZOWICE PAWLOWICE 17	WP-17	837884,0 2	222864,3 5	265,5 0	WARSZOWICE PAWLOWICE 11	WP-11	836605,3 6	224129,0 6	256,4 4
WARSZOWICE PAWLOWICE 22	WP-22	839412,9 4	222538,3 9	258,2 8	WARSZOWICE PAWLOWICE 18	WP-18	837871,8 4	224071,0 9	261,3 3
WARSZOWICE PAWLOWICE 26	WP-26	839993,4 2	223087,5 5	258,7 5	WARSZOWICE PAWLOWICE 15	WP-15	837292,3 9	223454,7 2	262,2 0
WARSZOWICE PAWLOWICE 28	WP-28	840905,9 5	222250,3 9	257,4 8	WARSZOWICE PAWLOWICE 20	WP-20	838942,2 8	224120,8 2	257,8 8
WARSZOWICE PAWLOWICE 9	WP-9	836663,5 6	221784,4 4	274,1 2	PAWLOWICE 6	PW-6	837767,8 0	225307,1 0	255,9 6
WARSZOWICE PAWLOWICE TEXACO A	WP-TXA	839212,8 8	223033,7 8	257,6 0					
WARSZOWICE PAWLOWICE 25	WP-25	839982,7 8	222027,7 2	261,6 0					
WARSZOWICE PAWLOWICE 19	WP-19	839196,4 2	221758,6 8	261,8 5					
Blok II/3					Blok II/4				
Nazwa otworu	Symbol	x	y	z	Nazwa otworu	Symbol	x	y	z
PAWLOWICE 1	PW-1	839338,3 0	226378,8 0	256,2 9	PAWLOWICE 10	PW-10	837821,3 0	229276,7 0	254,2 4
PAWLOWICE 5	PW-5	837951,7	226375,2	256,4	PAWLOWICE 11	PW-11	836947,2 0	228446,7 0	254,9 9
					PAWLOWICE 17	PW-17	836225,8 0	229370,8 0	257,3 3
					PAWLOWICE 2	PW-2	839320,0 0	228261,1 0	262,5 2
					PAWLOWICE 3	PW-3	838707,2	229031,6	262,7

		0	0	5
PAWLOWICE 8	PW-8	836886,0 0	225826,3 0	262,7 5
PAWLOWICE 9	PW-9	837392,9 0	227288,1 0	256,0 8
WARSZOWICE PAWLOWICE 12	WP-12	835878,9 1	225109,6 8	268,5 6
PAWLOWICE 12	PW-12	836110,8 0	226884,5 0	257,7 1

		0	0	3
PAWLOWICE 4	PW-4	838152,3 0	228237,6 0	257,1 0
PAWLOWICE 14	PW-14	834735,8	227228,1	267,3 6

Blok II/5

Nazwa otworu	Symbol	x	y	z
AMOCO-PORĘBA 1	A-PO1	839743,9 0	232761,1 0	283,7 5
PSZCZYNA 81	PsZ-81	836032,5 0	231202,5 0	259,7 4

Tabela 1.1.1_24_7 Rejon III

Blok III/1				
Nazwa otworu	Symbol	x	y	z
AMOCO-STUDZIENICE 1	A-ST1	843902,60	238762,60	254,72
AMOCO-SWIERCZYNIEC 1	A-SW1	845924,60	242984,70	244,25
STUDZIENICE 5	STC-5	846355,31	242072,12	244,93
STUDZIENICE 6	STC-6	843888,74	239145,83	256,53
KOBIÓR PSZCZYNA 125	KOP-125	846485,20	239798,52	251,99
KOBIÓR PSZCZYNA 126	KOP-126	842274,93	239435,73	246,74

Blok III/3				
Nazwa otworu	Symbol	x	y	z
MIEDZYRZECZE BIERUN 93	MB-93	844692,30	247477,85	233,30
MIEDZYRZECZE BIERUN 92	MB-92	844515,76	246664,24	236,02
MIEDZYRZECZE BIERUN 17	MB-17	845405,31	247720,78	241,15

Blok III/2				
Nazwa otworu	Symbol	x	y	z
AMOCO-FRYDEK 1	A-Fr1	841470,1	244013,2	243,8

Tabela 1.1.1_24_8 Rejon I

Blok I/1												
Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobywania	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
BD-13	4,775	26,60	1,39	0,163	0,008	8783000	1174934258,5	0,5	0,4	2	0,0019	892950,0
BD-19	2,217	27,10	1,45	0,239	0,011							
BD-20	2,978	29,24	1,38	0,138	0,011							
BD-21	3,404	28,45	1,37	0,135	0,012							
BD-27	5,088	22,40	1,48	0,276	0,009							
BD-3	6,544	24,60	1,45	0,223	0,009							
BD-7	6,025	36,55	1,44	0,161	0,009							
BD-29b	3,777	33,10	1,49	0,219	0,005							
BD-28	2,874	28,29	1,18	0,161	0,009							
Średnia bloku	4,187	28,48	1,40	0,191	0,009							

Blok I/2												
Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobywania	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
BD-17	5,416	33,10	1,40	0,169	0,010	7617000	1200719391,5	0,5	0,4	2	0,0019	912546,7
BD-26	5,751	35,38	1,42	0,185	0,006							
BD-24	6,124	26,93	1,35	0,111	0,010							
BD-25	4,866	20,90	1,41	0,178	0,010							
BD-49	3,191	23,50	1,46	0,274	0,009							
BD-55	5,889	32,00	1,49	0,193	0,007							
BD-16	4,904	32,60	1,36	0,101	0,009							
BD-48	4,160	13,00	1,45	0,235	0,008							
BD-54	4,500	28,40	1,40	0,104	0,018							
Średnia bloku	4,978	27,31	1,42	0,172	0,010							

Blok I/3												
Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobywania	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
BD-18	5,341	27,67	1,41	0,164	0,009	6304000	1280846928,2	0,5	0,4	2	0,0019	973443,7
BD-4	8,849	22,20	1,49	0,241	0,006							
Średnia bloku	7,095	24,94	1,45	0,202	0,008							

Blok I/4												
Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobywania	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
	7,095	24,06	1,45	0,202	0,008	3658000	717151610,7	0,5	0,4	2	0,0019	545035,2

Blok I/5												
Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobywania	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
BD-50	5,004	35,05	1,17	0,175	0,009	4726000	601813391,7	0,5	0,4	2	0,0019	457378,2
ZE-10	3,678	20,99	1,41	0,154	0,008							
ZE-9	2,885	34,05	1,43	0,180	0,009							
Średnia bloku	3,855	30,03	1,34	0,170	0,009							

Blok I/6

Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobywania	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
DRIG-1	3,068	22,10	1,40	0,158	0,014	10890000	859232820,6	0,5	0,4	2	0,0019	653016,9

Blok I/7

Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobywania	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
ZE-12	2,369	32,15	1,43	0,188	0,008	6924000	604736953,8	0,5	0,4	2	0,0019	459600,1

Suma pojemności masowej rejonu I [Mg]

4893970,9

Tabela 1.1.1_24_9 Rejon II

Blok II/1

Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobywania	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
WP-13	7,735	18,88	1,36	0,092	0,005	10740000	2051574579,4	0,5	0,4	2	0,0019	1559196,7
WP-17	7,525	18,06	1,34	0,117	0,009							
WP-22	7,762	19,58	1,36	0,086	0,009							
WP-26	6,113	31,45	1,35	0,091	0,011							
WP-28	6,779	29,35	1,36	0,098	0,007							
WP-9	6,394	12,45	1,32	0,092	0,010							
WP-TXA	7,226	31,65	1,35	0,079	0,009							
WP-25	9,998	18,23	1,41	0,158	0,012							
WP-19	6,084	15,67	1,34	0,084	0,008							
Średnia bloku	7,291	21,70	1,35	0,100	0,009							

Blok II/2

Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobywania	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
PW-6	3,265	29,01	1,46	0,100	0,008	8631000	1285592975,5	0,5	0,4	2	0,0019	977050,7
STUIG-1	5,559	23,42	1,38	0,123	0,006							
WP-11	7,707	12,67	1,38	0,122	0,009							
WP-18	7,141	17,14	1,38	0,130	0,010							
WP-15	6,891	13,96	1,39	0,155	0,006							
WP-20	6,619	23,22	1,38	0,126	0,009							
Średnia bloku	6,197	19,90	1,39	0,126	0,008							

Blok II/3

Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobywania	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
PW-1	2,492	30,14	1,29	0,090	0,007	12300000	2412237338,4	0,5	0,4	2	0,0019	1833300,4
PW-5	4,200	29,81	1,46	0,100	0,008							
PW-8	6,235	27,45	1,40	0,133	0,008							

PW-9	4,669	25,44	1,38	0,097	0,014							
WP-12	8,760	22,70	1,32	0,078	0,003							
PW-12	6,932	30,71	1,71	0,093	0,009							
Średnia bloku	5,548	27,71	1,43	0,099	0,008							

Blok II/4

Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobywania	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
PW-10	4,521	31,17	1,45	0,125	0,012	19520000	3753994426,9	0,5	0,4	2	0,0019	2853035,8
PW-11	4,142	45,65	1,35	0,075	0,004							
PW-17	5,508	53,98	1,39	0,101	0,007							
PW-2	4,803	23,27	1,38	0,116	0,009							
PW-3	4,390	23,74	1,45	0,164	0,009							
PW-4	5,850	21,68	1,40	0,140	0,008							
PW-14	4,780	27,83	1,46	0,174	0,007							
Średnia bloku	4,856	32,47	1,41	0,128	0,008							

Blok II/5

Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobywania	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
A-PO1	5,716	25,10	1,24	0,078	0,007	7888000	1477543564,6	0,5	0,4	2	0,0019	1122933,1
Psz-81	5,781	31,42	1,28	0,078	0,007							
Średnia bloku	5,748	28,26	1,26	0,078	0,007							

Suma pojemności masowej rejonu II [Mg] 8345516,6

Tabela 1.1.1_24_10 Rejon III

Blok III/1

Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobywania	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
A-ST1	6,586	33,90	1,42	0,147	0,016	26990000	2787599353,1	0,5	0,4	2	0,0019	2118575,5
A-SW1	6,686	18,75	1,52	0,147	0,016							
STC-5	5,855	6,10	1,23	0,225	0,021							
STC-6	8,464	24,17	1,15	0,147	0,009							
KOP-125	4,205	6,60	1,32	0,112	0,023							
KOP-126	1,541	10,60	1,35	0,104	0,013							
Średnia bloku	5,556	16,69	1,33	0,147	0,016							

Blok III/2

Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobywania	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
A-Fr1	8,948	41,30	1,32	0,094	0,011	8407000	3674654871,6	0,5	0,4	2	0,0019	2792737,7

Blok III/3

Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobywania	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]

MB-93	6,619	27,41	1,39	0,159	0,021	5227000	739389016,8	0,5	0,4	2	0,0019	561935,7
MB-92	7,605	7,80	1,31	0,132	0,015							
Średnia bloku	7,112	17,61	1,35	0,145	0,018							

Blok III/4

Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobycia	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
	7,112	16,29	1,35	0,145	0,018	9648000	1262824051,2	0,5	0,4	2	0,0019	959746,3

Blok III/5

Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobycia	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
	7,112	18,51	1,35	0,145	0,018	2449000	364233317,5	0,5	0,4	2	0,0019	276817,3

Blok III/6

Symbol otw.	Śr. waż. met. [m ³ /Mg csw]	Sum. miąższ. [m]	Śr. waż. gęst. [Mg/m ³]	Śr. waż. pop. [-]	Śr. waż. wilg. [-]	Powierzchnia [m ²]	Zasoby metanu [m ³]	Współ. wydobycia	Współ. kompletności	Współ. zastępowania metanu CO ₂	Gęstość CO ₂ [Mg/m ³]	Poj. masowa [Mg]
	7,112	13,32	1,35	0,145	0,018	3120000	333920655,6	0,5	0,4	2	0,0019	253779,7

Suma pojemności masowej rejonu III [Mg] 6963592,2

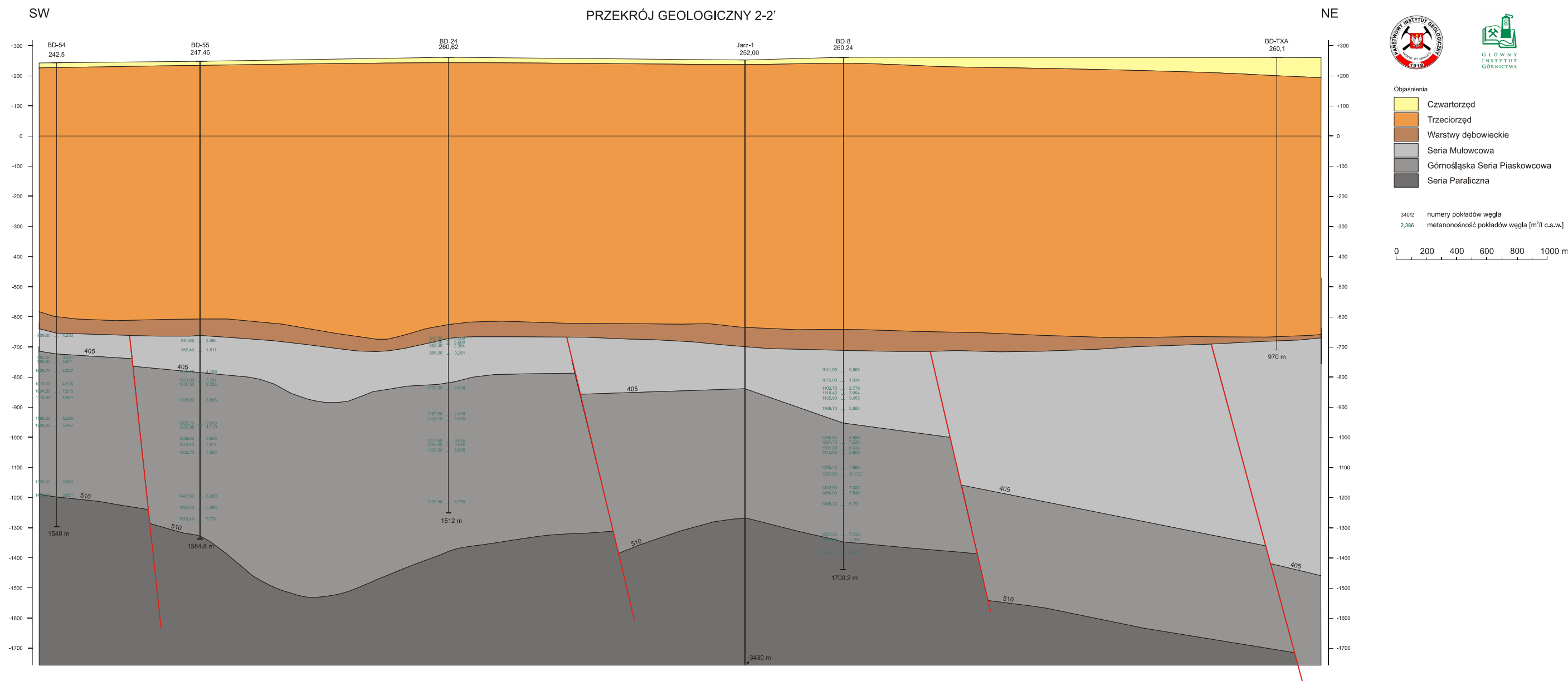
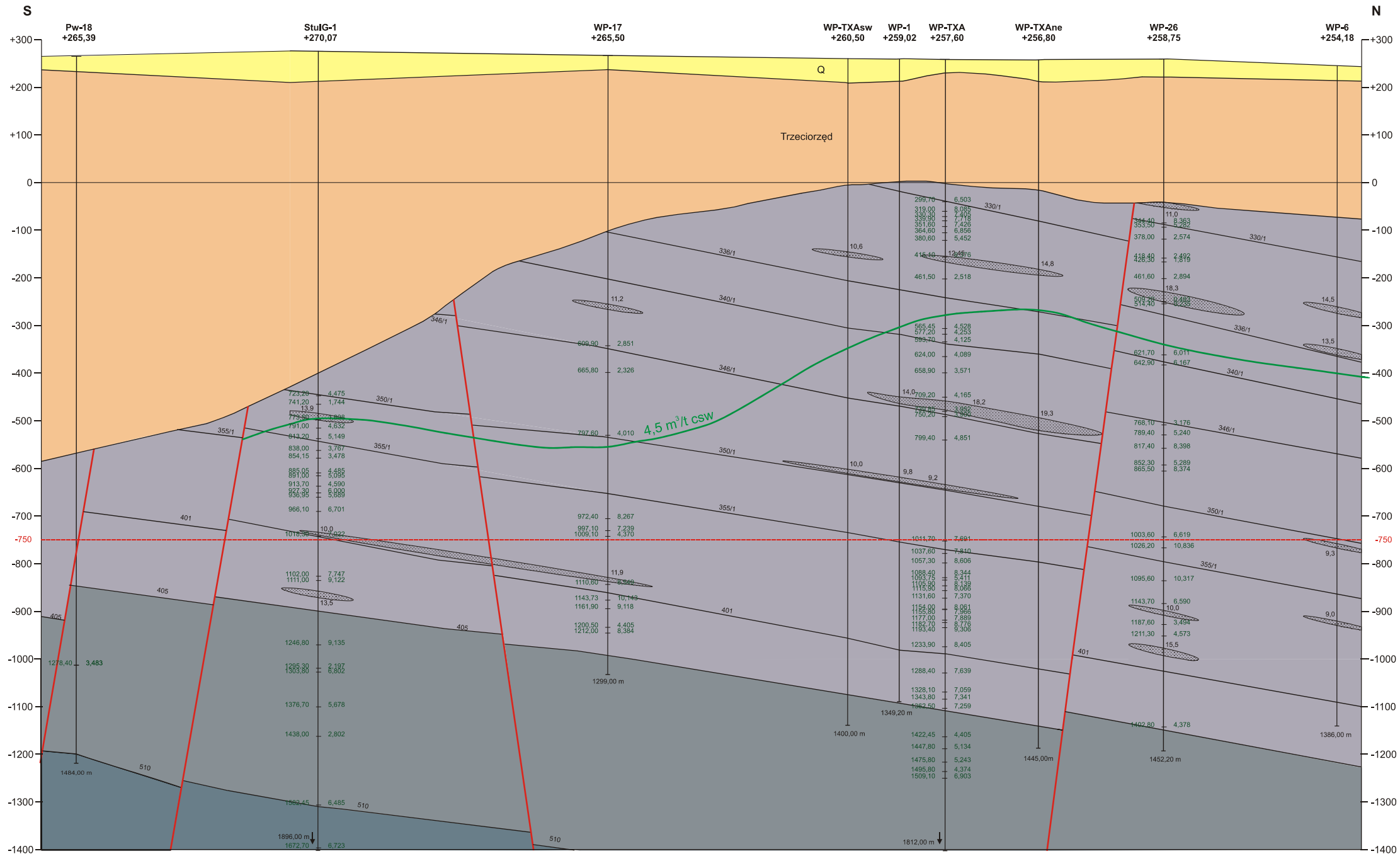


Fig. 1.1.1_24_11 Przekrój geologiczny 2-2' (rejon I)

PRZEKRÓJ GEOLOGICZNY 2-2'



Objaśnienia:

- czwartorzęd
- trzeciorzęd - miocen
- karbon - seria mułowcowa
- karbon - górnośląska seria piaskowcowa
- karbon - seria paraliczna
- rzędna -750m n.p.m.
- strop strefy metanowej
- 25,0 ławice piaskowców i ich miąższość [m]
- 340/2 numery pokładów węgla
- 2,386 metanonośność pokładów węgla [m³/t c.s.w.]

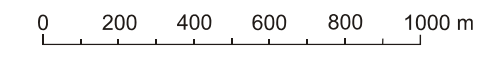


Fig. 1.1.1_24_12 Przekrój geologiczny 2-2' (rejon II)

PRZEKRÓJ GEOLOGICZNY 5-5'

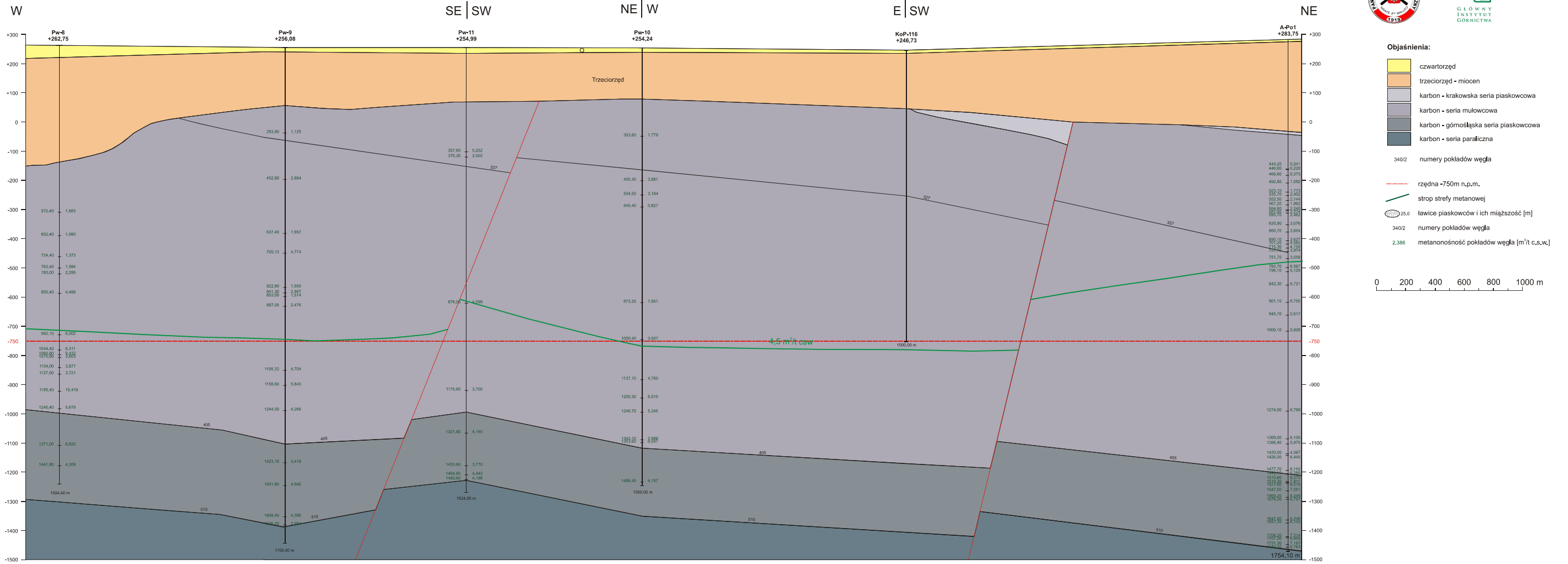


Fig. 1.1.1_24_13 Przekrój geologiczny 5-5' (rejon II)

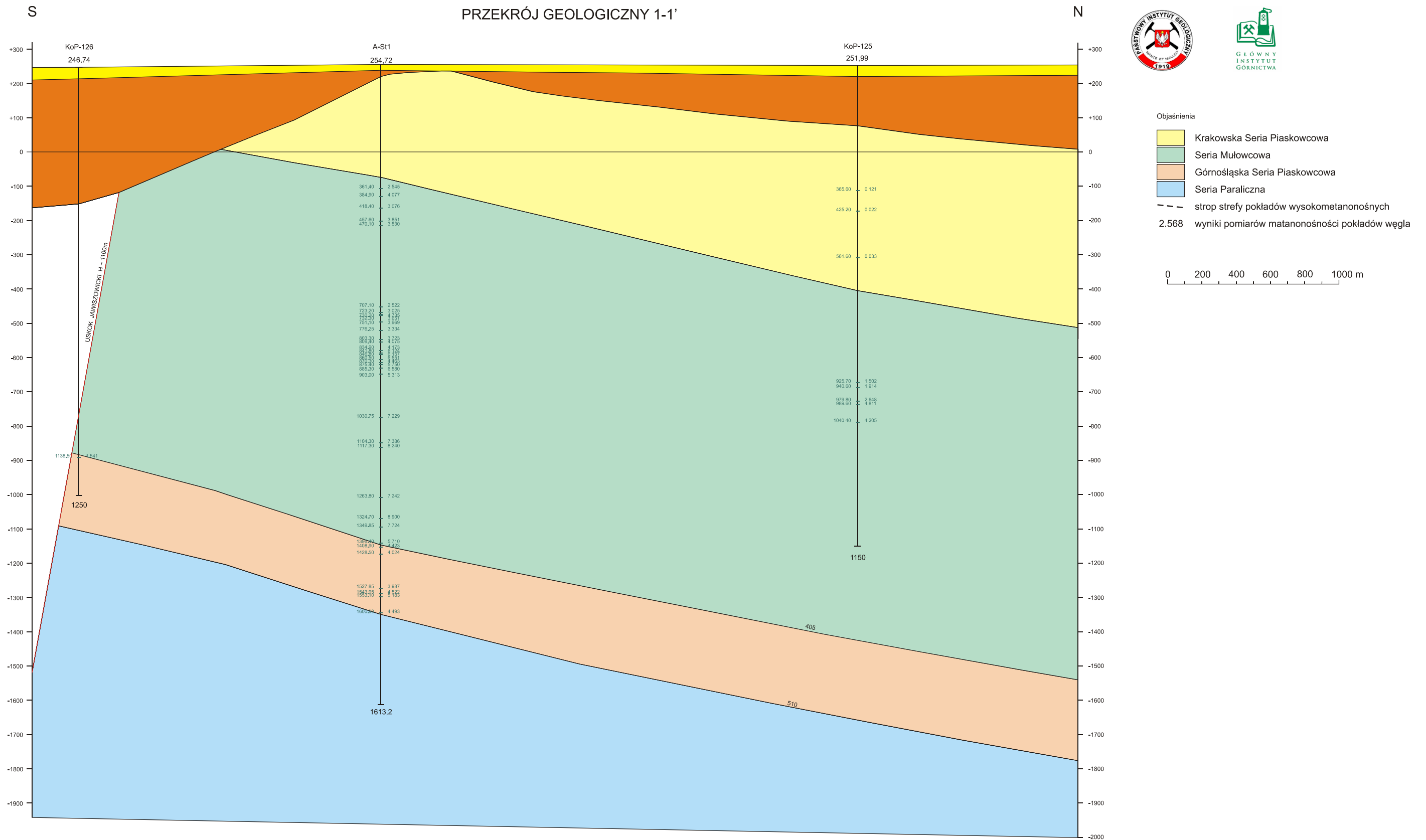


Fig. 1.1.1_24_14 Przekrój geologiczny 1-1' (rejon III)

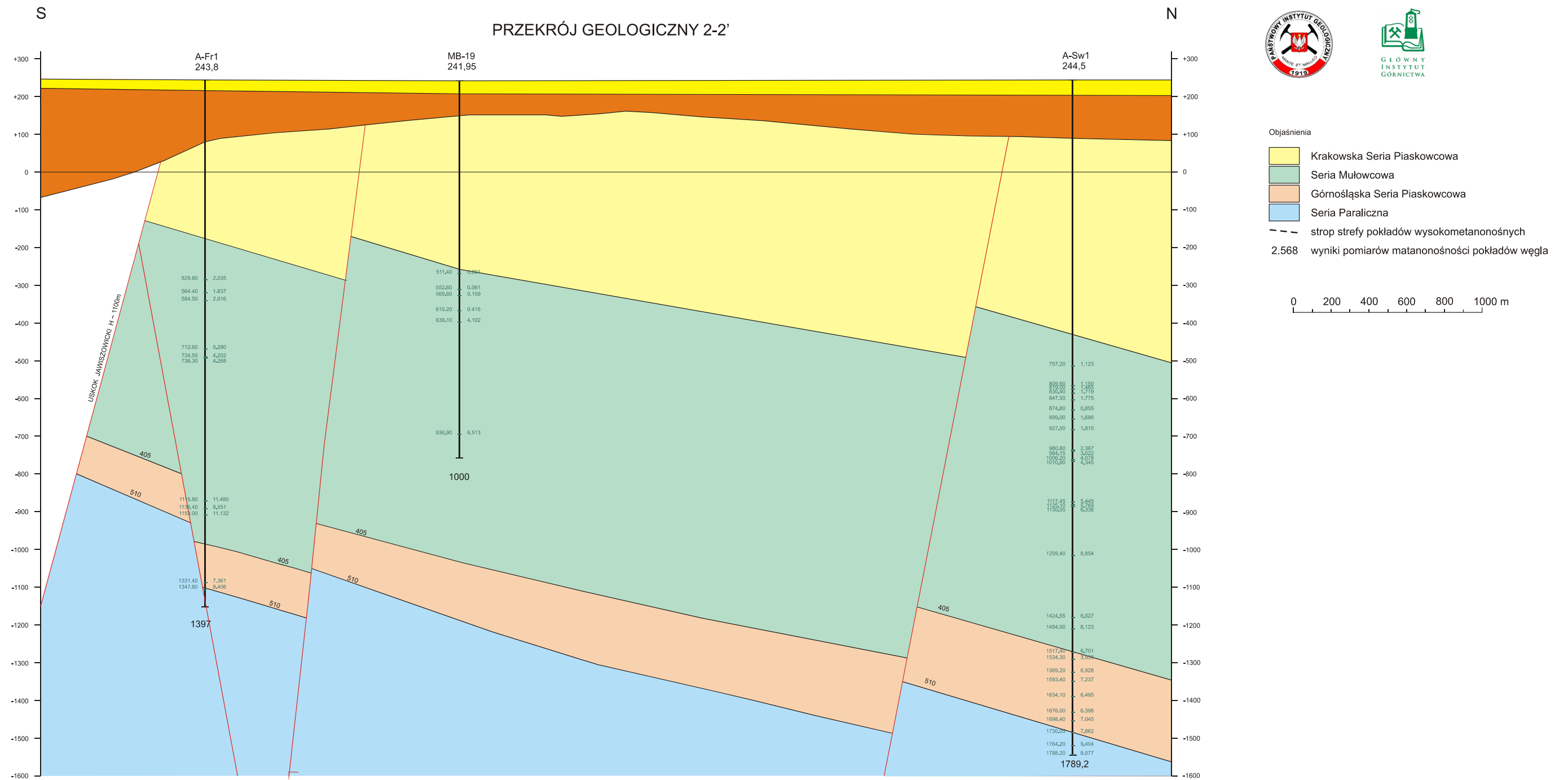


Fig. 1.1.1_24_15 Przekrój geologiczny 2-2' (rejon III)

Podsumowanie

Pojemność składowania CO₂ w pokładach węgla została oszacowana w trzech rejonach wytypowanych przez PIG, tj. Bzie-Drogomyśl (rejon I), Pawłowice (rejon II), Międzyrzecze-Bieruń (rejon III). Rejony te znajdują się w centralnej i południowej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego.

Analiza została przeprowadzona dla pokładów węgla znajdujących się na głębokości od 1000 do 1500 m, charakteryzujących się zawartością metanu, którego odzyskanie przy jednoczesnym zatłaczaniu dwutlenku węgla będzie korzystne z ekonomicznego punktu widzenia. Węgłe na tych głębokościach w oparciu o naszą wiedzę i literaturę odznaczają się bardzo niskimi przepuszczalnościami, a także występowaniem wysokich ciśnień i temperatur. Wytypowane rejony charakteryzują się występowaniem zaburzeń tektonicznych.

Do oszacowania pojemności wykorzystano informacje dotyczące:

- powierzchni pokładów węgla m²;
- miąższości pokładów węgla, m;
- zawartości metanu, m³/Mg_{csw};
- parametrów jakościowych węgla, tj:
 - zawartości wilgoci, %;
 - zawartości popiołu, %;
 - gęstości, Mg/m³.

W oparciu o rozpoznane zaburzenia tektoniczne w obrębie poszczególnych rejonów wyznaczono bloki obliczeniowe, dla których określono powierzchnię i sumaryczną miąższość pokładów węgla oraz średnią ważoną wcześniej wymienionych parametrów w przedziale głębokościowym 1000÷1500m.

Korzystając z zasad obliczania pojemności składowania CO₂ dla pokładów węgla przyjętych w literaturze oszacowano pojemności w poszczególnych blokach obliczeniowych. W efekcie wyznaczono następujące pojemności:

- rejon I (Bzie-Drogomyśl): 4 893 970 Mg;
- rejon II (Pawłowice): 8 345 516 Mg;
- rejon III (Międzyrzecze-Bieruń): 6 963 592 Mg.

Na bazie obecnego rozpoznania oszacowane wielkości składowania CO₂ dla pokładów węgla należy traktować jako wstępne, a ewentualne przeprowadzenie eksperymentalnego zatłaczania musi być poprzedzone szczegółowymi badaniami⁸.

⁸ Projekt RECOPOL potwierdził (choć z trudem) możliwość zatłaczania/składowania CO₂ z odzyskiem metanu na niewielką skalę w warunkach polskich (Jura et al., 2007); jest to raczej problem techniczno-ekonomiczny

Warunki złożowe dla struktur naftowych – potencjał składowania (1.1.26 - INiG)

(Grzegorz Leśniak, Tadeusz Szpunar, Paweł Budak, Jan Lubaś, Lidia Dudek, Małgorzata Słota)

W ramach opracowania wykonano mapy cyfrowe złóż wytypowanych przez PGNiG (Fig. 1.1.26_1 - 15), na podstawie dostarczonej przez PGNiG archiwalnej dokumentacji poszczególnych rejonów złożowych:

Wykonano mapy: Nosówka (strop roponośnych utworów węglanowych wizenu), Zalesie (strop I horyzontu gazonośnego), Wilków (strop czerwonego spągowca), Jodłówka (strop horyzontu XI a) Kielanówka - Rzeszów (strop horyzontu gazonośnego K-1), Pilzno - Południe (strop horyzontu IV), Kielanówka – Rzeszów (strop horyzontu gazonośnego Rzeszów 5), Tarnów V (strop poziomego gazonośnego D), Wilków (mapa porowatości mapa przepuszczalności), Bogdaj – Uciechów (mapa strukturalna wapienia podstawowego, mapa porowatości wapienia podstawowego, mapa strukturalna stropu czerwonego spągowca, mapa przepuszczalności czerwonego spągowca, mapa porowatości czerwonego spągowca)

Mapy wykonano przy pomocy programu Surfer w układzie „1942”.

Na podstawie dostarczonych przez PGNiG S.A danych dotyczących warunków złożowych (ciśnienie początkowe, aktualne, temperatura złożowa) oraz historii eksploatacji dla poszczególnych złóż wyliczono ilości CO₂ (tony) możliwe do zatłoczenia na obecnym etapie eksploatacji złoża (tab.1).

Przy konstrukcji poniższej **Tabeli 1.1.26_1** założono, że w okresie eksploatacji złoża nie doszło do jego kompacji w wyniku nacisku skał nadkładu, któremu przeciwstawia się również malejące w miarę wydobywania gazu/ropy ciśnienie złożowe. Oznacza to również, że parametry złoża, takie jak porowatość i przepuszczalność, nie uległy zmianie.

W obliczeniach przyjęto następujące uproszczone składy gazu:

- a) Bogdaj Uciechów: 54% metan, 46% azot
- b) Wilków: 37,6% metan, 62,4% azot
- c) Kamień Pomorski: 80% metan, 20% azot
- d) Pozostałe złoża: 98% metan, 2% azot

Przyjęto również następujące wartości gęstości ropy:

- a) Nosówka: 0,7185 ton/m³
- b) Kamień Pomorski: 0,86 ton/m³

Tabela 1.1.26_1 Parametry wytypowanych złóż węglowodorów

Nazwa złoża	Temperatura złożowa	Początkowe ciśnienie złożowe	Aktualne ciśnienie złożowe	Współczynnik $Z(p_{pocz}, T_{złoż})$	Ilość wydobytego gazu	Ilość wydobytej ropy/kondensatu	Współczynnik objętościowy ropy/kondensatu	Objętość porowa całego złoża (na podstawie map i współczynnika porowatości)	Objętość zajmowana przez wydobyte media w warunkach złożowych	Gęstość CO ₂ w początkowym ciśnieniu złożowym i temperaturze złożowej	Ilość CO ₂ którą można zmagazynować w objętości jaką zajmowały wydobyte media w warunkach złożowych
	°C	MPa	MPa		m ³	tony		m ³	m ³	kg/m ³	(tony)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Kamień Pomorski	89,9	44,63	21,19	–	266 000 000	1 895 226	1,42	6 882 000	3 129 327	860	2 691 221
Nosówka	102,0	35,71	12,56	–	320 003	228 883	1,21	–	385 453	720	277 526
Bogdaj Uciechów	59,5	15,77	3,75	0,9550	11 591 427 000	–		14 826 384 776	80 901 098	610	49 349 670
Jodłówka	117,3	32,40	19,07	1,0336	463 842 946	–		5 258 994	1 991 590	630	1 254 702
Kielanówka	77,0	22,97	16,90	0,9284	1 096 100 000	–		10 005 842	5 376 908	685	3 683 182
Pilzno	66,0	(12,8-17,5) średnie 15,15	11,00	0,8903	12 708 316	–		7 390 564	87 754	585	51 336
Rzeszów	69,0	22,98	16,90	0,9173	917 370 030	–		70 890 420	4 340 964	695	3 016 970
Tarnów	39,0	15,10	5,00	0,8410	13 355 229	–		128 829 253	80 442	715	57 516

Wilków	63,0	16,81	7,31	0,9863	29229346	-		47 617 685	197 735	670	133 822
Zalesie	68,5	(22,66-29,83) średnie 26,24	18,00	0,9394	3 339 651	-		48 680 335	14 152	750	10 614
										RAZEM	60 526 559

W kolumnie 10 powyższej tabeli podano objętości, jakie wydobyte media zajmowałyby po sprowadzeniu do warunków złożowych. Zatłoczenie do złoża płynu zajmującego w podanych warunkach złożowych objętości podane w tej kolumnie spowodowałoby wzrost ciśnienia złożowego do wartości początkowego ciśnienia złożowego przy założeniu niezmięnionej temperatury w złożu. Jak wynika z wykresu przemian fazowych dwutlenku węgla w przypadku każdego rozpatrywanego złoża CO₂ znajduje się w fazie nadkrytycznej. Na podstawie wykresu zależności gęstości CO₂ od ciśnienia, dla określonej temperatury można określić ilość CO₂ (w tonach), która wprowadzona do złoża spowoduje wzrost ciśnienia do początkowego ciśnienia złożowego. Początkowe ciśnienie złożowe przyjęto, jako wartość graniczną gwarantującą szczelność złoża.

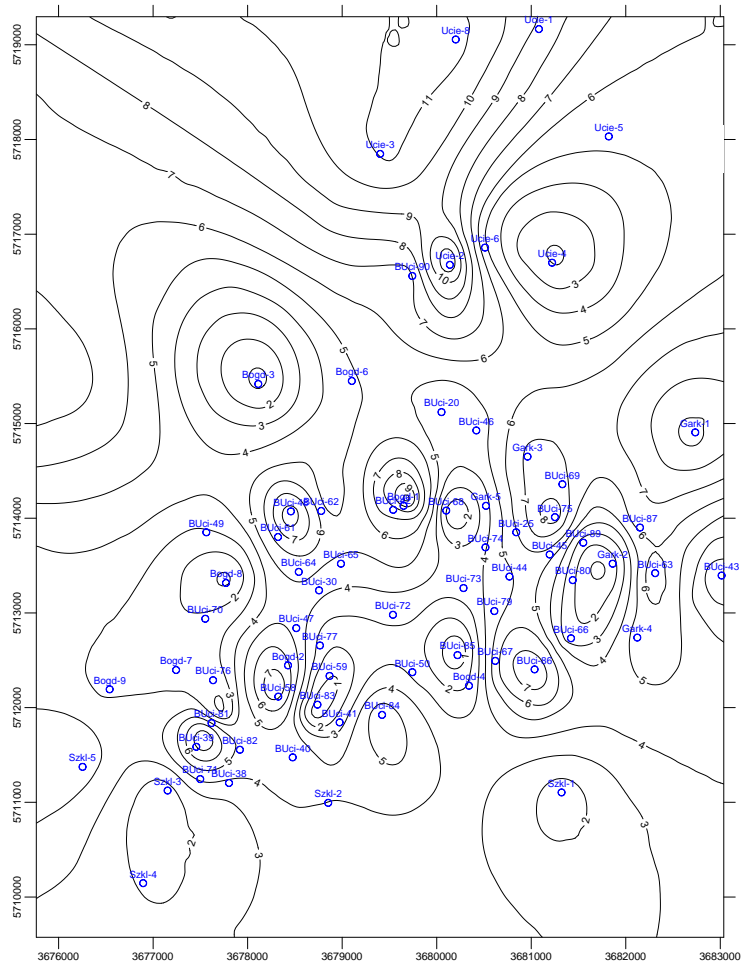
Zdaniem autorów rozpatrywane teoretyczne ilości CO₂, które można wprowadzić do złoża w miejsce objętości, jakie zajmowały w złożu wydobyte gaz/ropa, nie jest zagadnieniem właściwie postawionym. Eksploatacja złoża odbywa się na przestrzeni lat i wprowadzenie do złoża objętości CO₂ odpowiadającej objętości wydobytych mediów nie jest możliwe w rozsądnym czasie. Należy rozpatrywać możliwości wtłaczania CO₂ do poszczególnych otworów na złożu znając powierzchnię obszaru drenażu, przepuszczalność, miąższość złoża, gęstości i lepkości CO₂ dla ciśnień z zakresu od ciśnienia początkowego do maksymalnego ciśnienia tłoczenia, aktualne ciśnienie złożowe, maksymalne ciśnienie dopuszczalne (na przykład szczelinowania) itp. Takie podejście sprowadziłoby zagadnienie zatłaczania CO₂ do problemu technicznego: określenia ilości i wytypowania otworów, do których można wtłoczyć X ton CO₂ w czasie T nie przekraczając ciśnienia dopuszczalnego dla każdego z otworów dla przyjętego wydatku tłoczenia.

Fig. 1.1.26_1

ZŁOŻE GAZU ZIEMNEGO BOGDAJ-UCIECHÓW

MAPA POROWATOŚCI WAPIENIA PODSTAWOWEGO

skala 1 : 25 000



Legenda:

- - odwierty
- △ - izobaty porowatości wapienia podstawowego

Wydruk komputerowy (skala 1:10 000)
układ "1942"

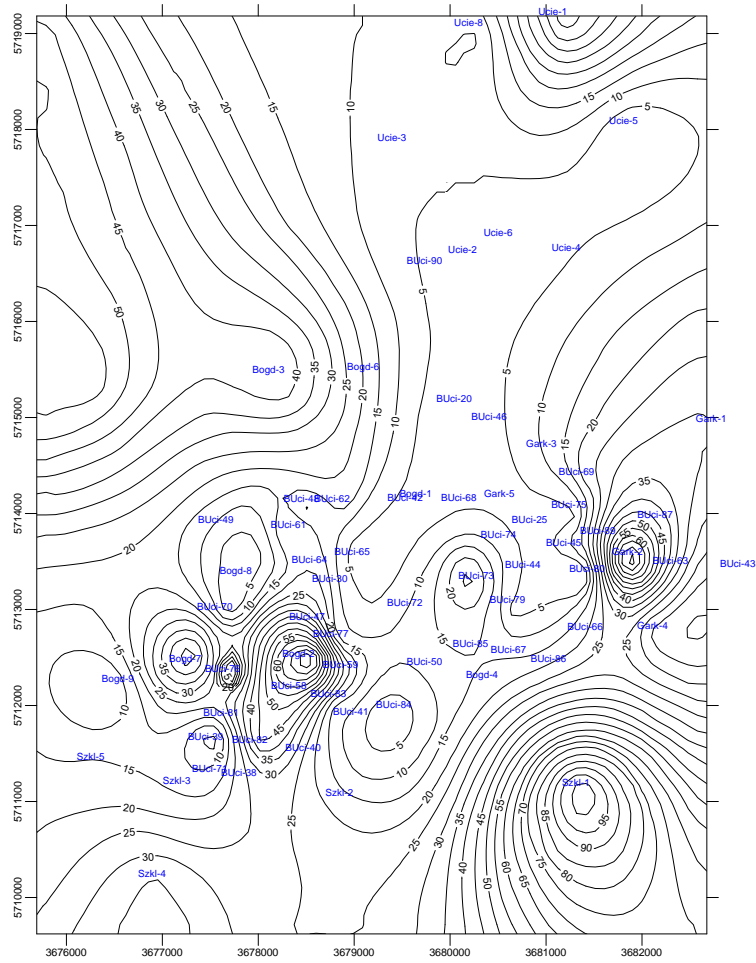
Opracowanie graficzne: Maciej Gliniak

Fig. 1.1.26_2

ZŁOŻE GAZU ZIEMNEGO BOGDAJ-UCIECHÓW

MAPA PRZEPUSZCZALNOŚCI CZERWONEGO SPĄGOWCA

skala 1 : 25 000



Legenda:

○ - odwierty

△ - izobaty przepuszczalności czerwonego spągowca

Wydruk komputerowy (skala 1:25 000)
układ "1942"

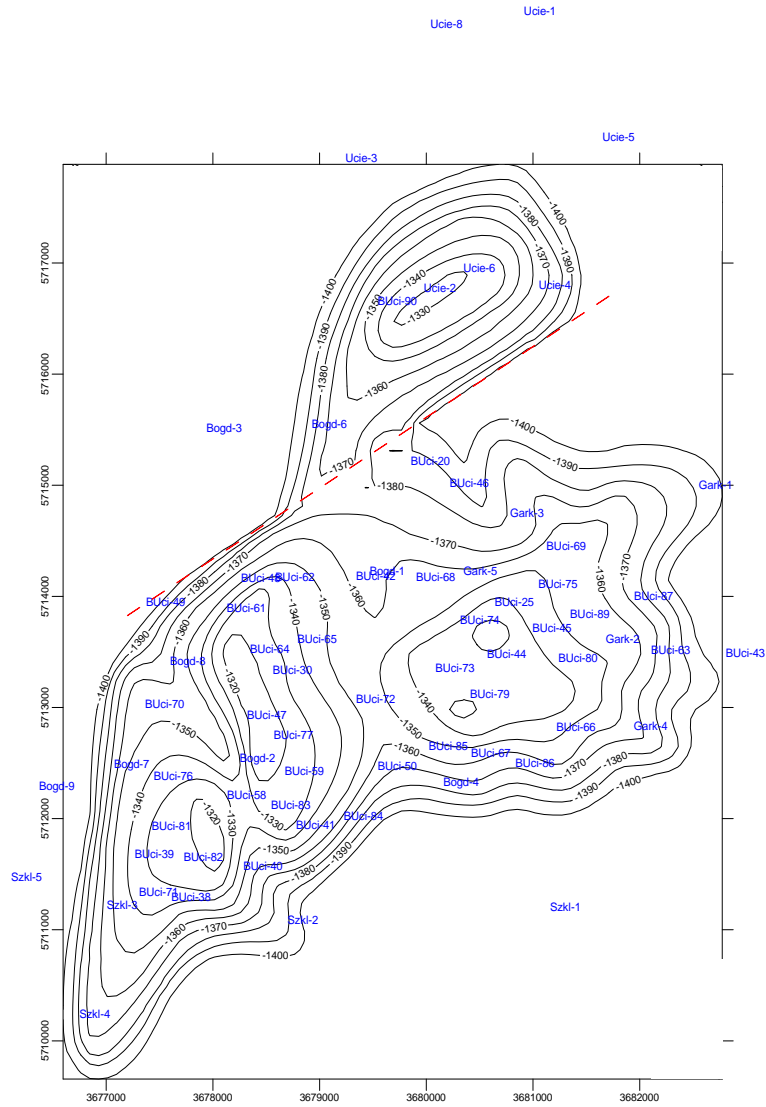
Opracowanie graficzne: Maciej Gliniak

Fig. 1.1.26_3

ZŁOŻE GAZU ZIEMNEGO BOGDAJ-UCIECHÓW

MAPA STRUKTURALNA STROPU CZERWONEGO SPĄGOWCA

skala 1 : 25 000



- Legenda:
○ - odwierty
△ - izobaty
△ - dyslokacje

Wydruk komputerowy (skala 1:25 000)
układ "1942"

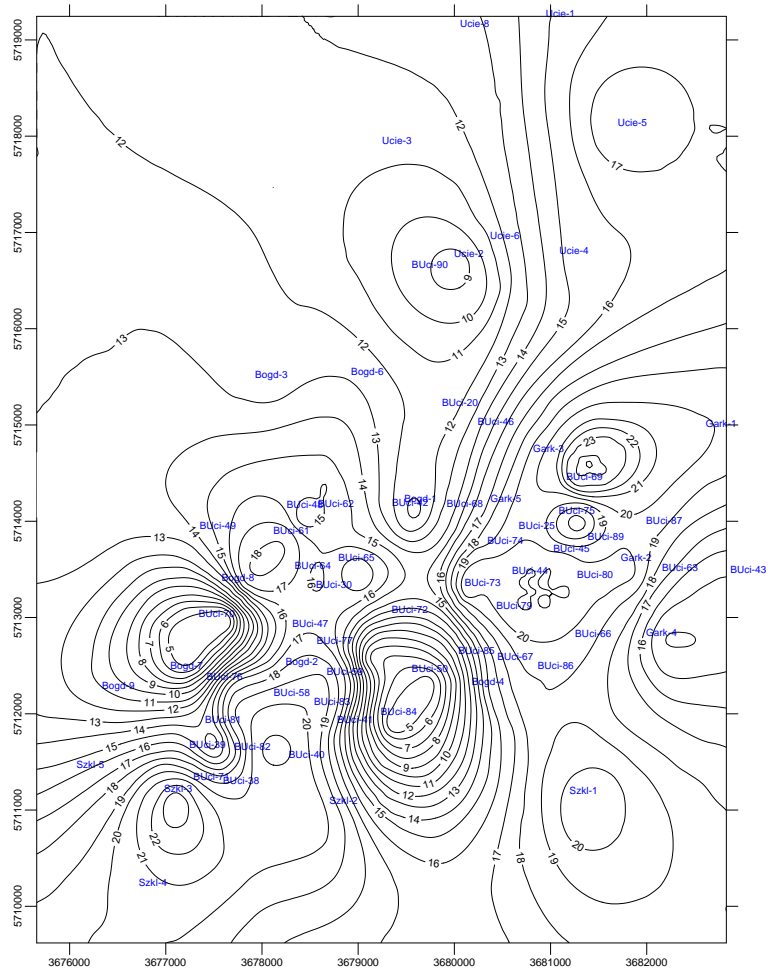
Opracowanie graficzne: Maciej Gliniak

Fig. 1.1.26_4

ZŁOŻE GAZU ZIEMNEGO BOGDAJ-UCIECHÓW

MAPA POROWATOŚCI CZERWONEGO SPĄGOWCA

skala 1 : 25 000



Legenda:

- - odwierty
- △ - izobaty porowatości czerwonego spągowca

Wydruk komputerowy (skala 1:25 000)
układ "1942"

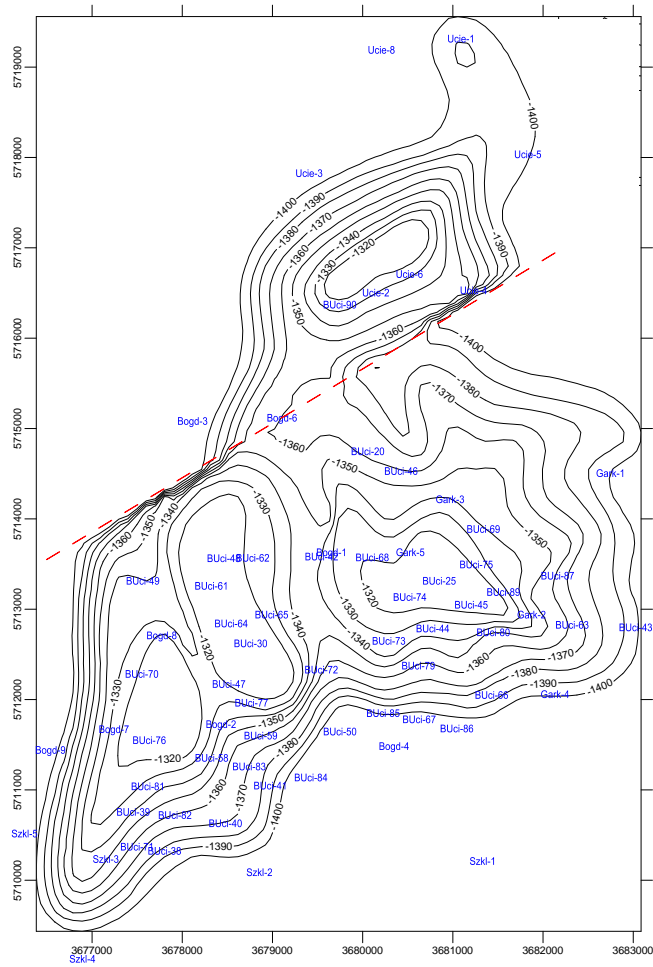
Opracowanie graficzne: Maciej Gliniak

Fig. 1.1.26_5

ZŁOŻE GAZU ZIEMNEGO BOGDAJ-UCIECHÓW

MAPA STRUKTURALNA STROPU WAPIENIA PODSTAWOWEGO

skala 1 : 25 000



Legenda:
○ - odwierty
△ - izobaty
△ - dyslokacje

Wydruk komputerowy (skala 1:25 000)
układ "1942"

Opracowanie graficzne: Maciej Gliński

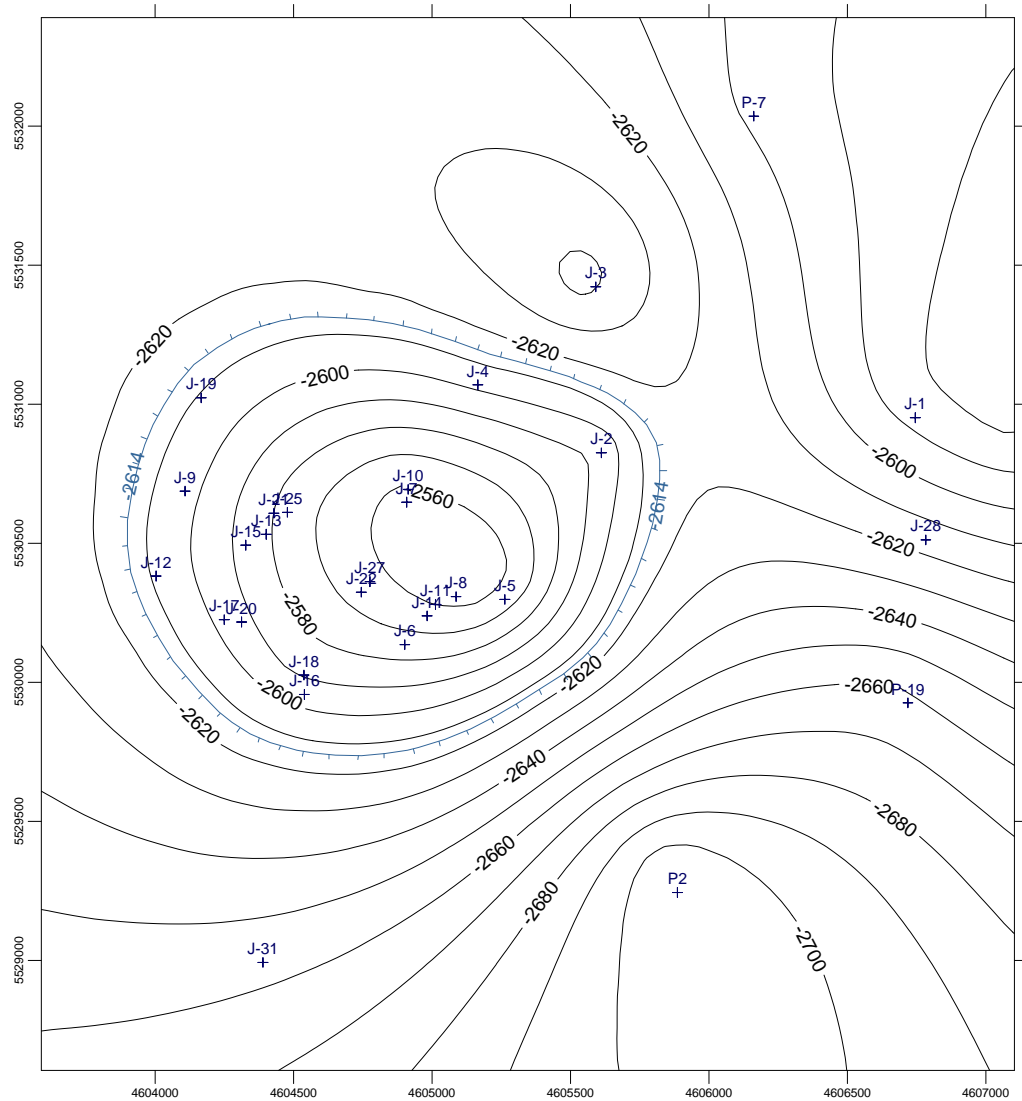
Fig. 1.1.26_6

ZŁOŻE GAZU ZIEMNEGO JODŁÓWKA

Opracował: mgr inż. Piotr Przybyła

MAPA STRUKTURALNA STROPU HOR. XIa

skala 1 : 10 000



Legenda:

- 2620 - izobaty stropu poziomu gazonośnego
- kontur złoża
- + - odwierty

Wydruk komputerowy (skala 1: 10 000)
układ "1942"

Opracowanie graficzne: mgr inż. Małgorzata Słota

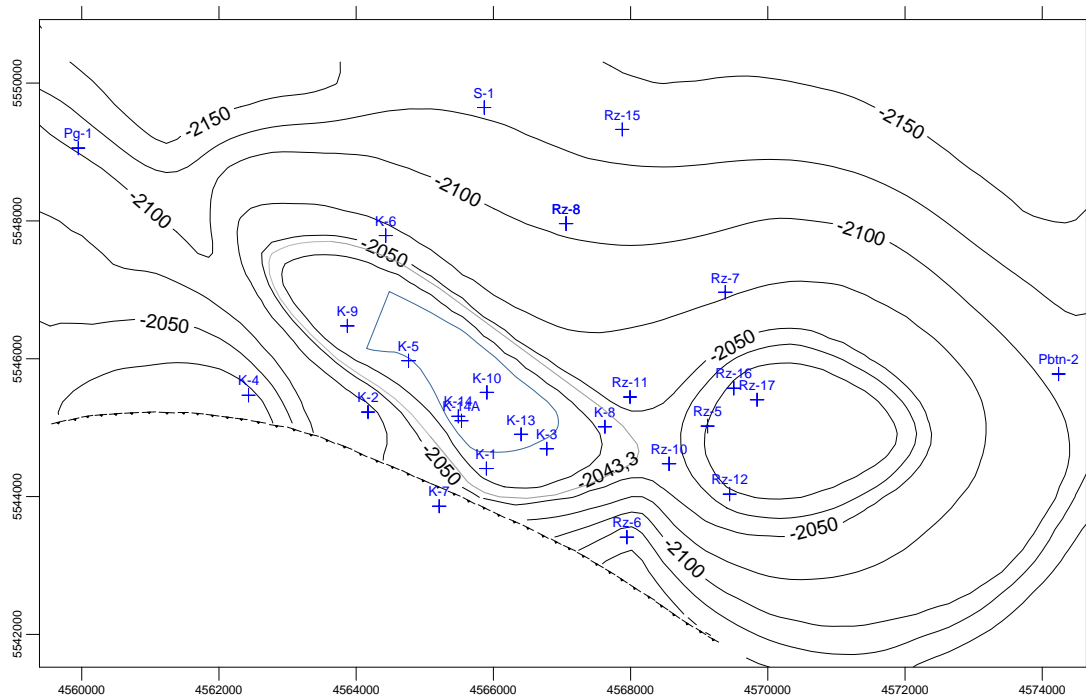
Fig. 1.1.26_7

ZŁOŻE GAZU ZIEMNEGO - REJON: KIELANÓWKA-RZESZÓW






Autorzy: U. Baran, T. Mikucka-Reguła

SZKIC STRUKTURALNY STROPU HORYZONTU GAZONOŚNEGO "K-1"

skala 1 : 25 000



Legenda:

-  - granica nasunięcia karpacko - stebnickiego
-  -2025- - izobaty stropu poziomu gazonośnego "K-1"
-  - kontur wody podścielającej
-  - obszar dokumentowanych zasobów w kategorii B
-  - odwierty

Wydruk komputerowy (skala 1: 25 000)
układ "1942"

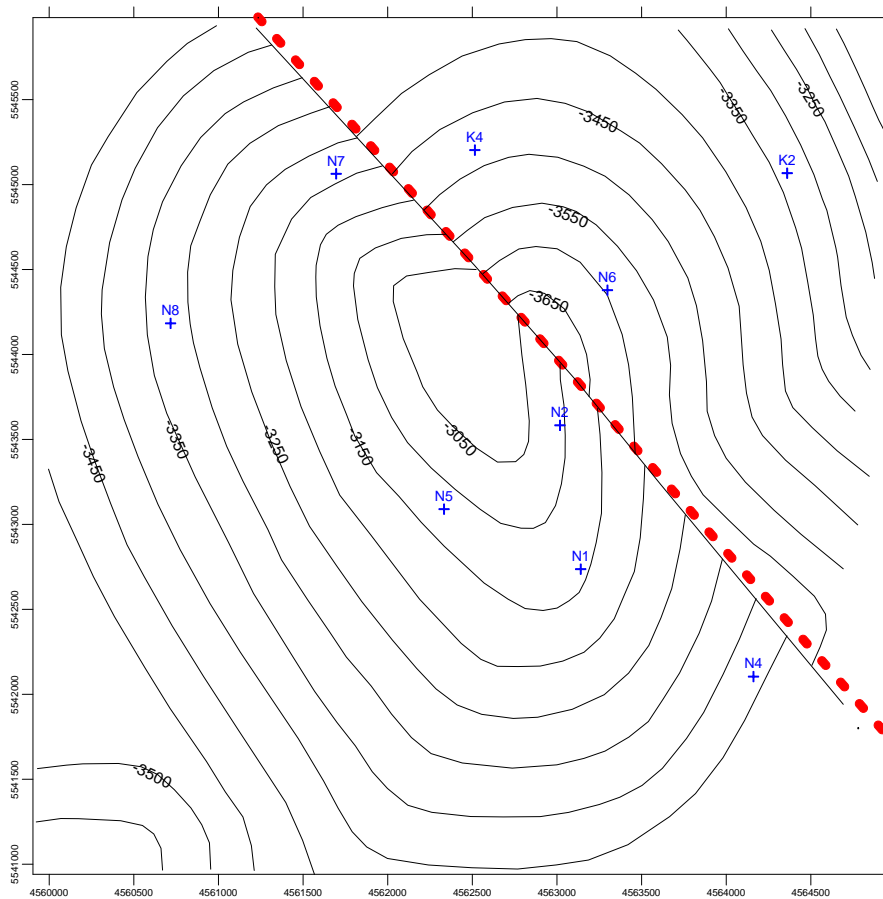
Opracowanie graficzne: mgr inż. Małgorzata Słota

Fig. 1.1.26_8

ZŁOŻE ROPY NAFTOWEJ NOSÓWKA

SZKIC STRUKTURALNY
STROPU ROPONOŚNYCH UTWORÓW WĘGLANOWYCH WIZENU

skala 1 : 10 000



Wydruk komputerowy (skala 1:10 000)
układ "1942"

Legenda:

- + - odwierty
- 3250 - izobaty stropu utworów węglanowych wizenu

Opracowanie graficzne: mgr inż. Lidia Dudek

Fig. 1.1.26_9

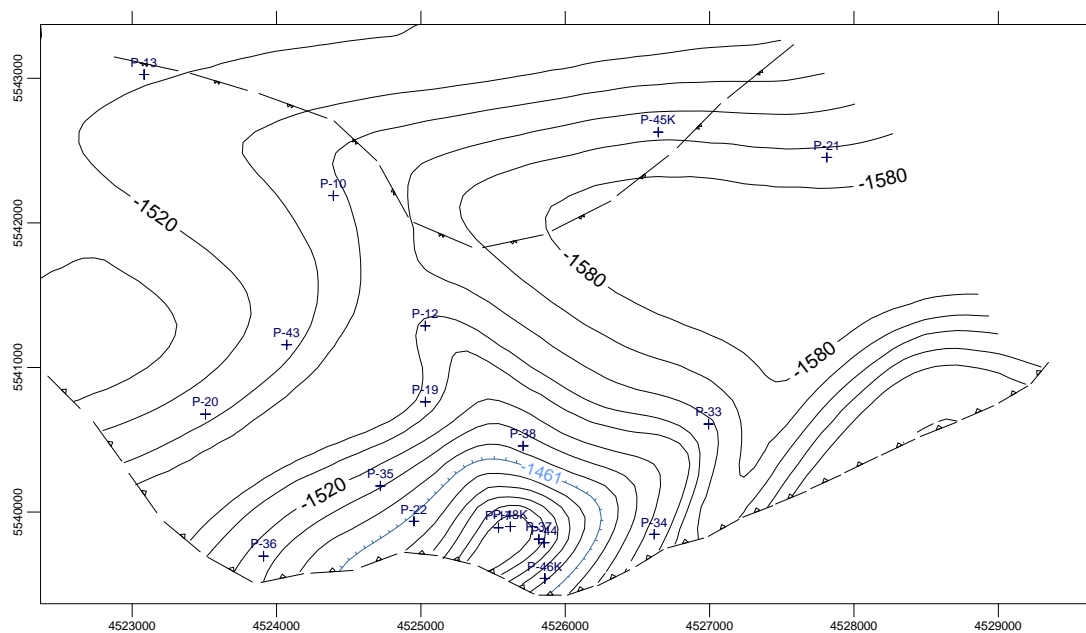
ZŁOŻE GAZU ZIEMNEGO - PILZNO - POŁUDNIE

Opracował: mgr inż. Roman Dusza

z późniejszymi zmianami wg mgr inż. Wojciecha Mercika

MAPA STRUKTURALNA STROPU HOR. IV

skala 1 : 25 000



Legenda:

- granica sedymentacyjna stropu hor. IV
- 1520 - izobaty stropu poziomu gazonośnego
- kontur złoża
- + - odwierty

Wydruk komputerowy (skala 1: 25 000)
układ "1942"

Opracowanie graficzne: mgr inż. Małgorzata Słota

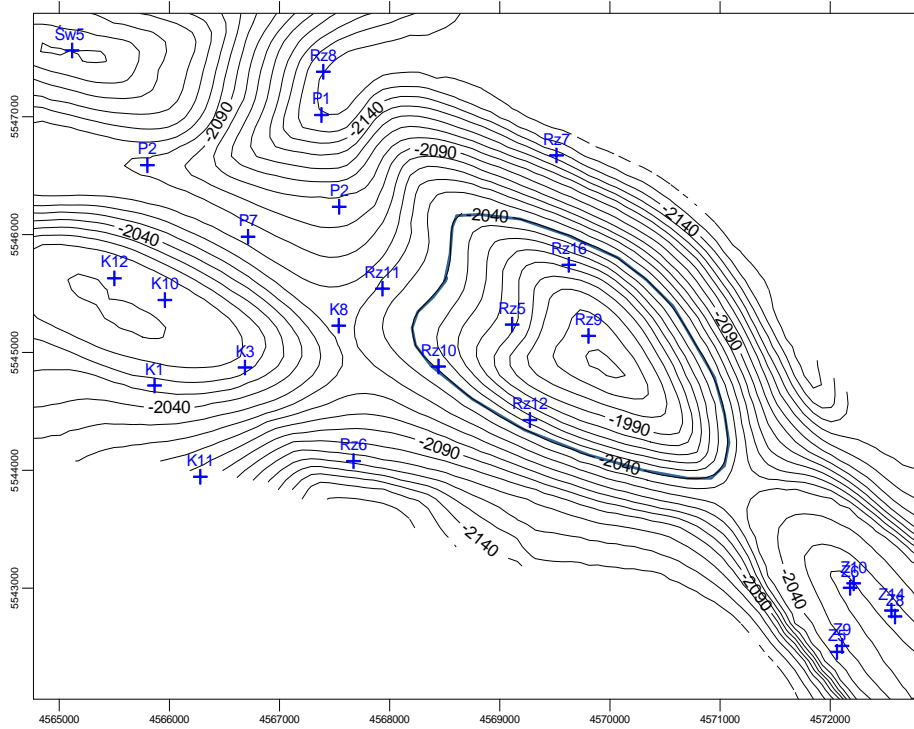
Fig. 1.1.26_10

ZŁOŻE GAZU ZIEMNEGO KIELANÓWKA - RZESZÓW




Opracował: St. Gąsior

MAPA STRUKTURALNA STROPU HORYZONTU GAZONOŚNEGO RZ. 5

skala 1 : 10 000



Legenda:

-  - odwiarty
-  - zasięg złoża
-  -1500 - warstwie stropu horyzontu

Wydruk komputerowy (skala 1:10 000)
układ "1942"

Opracowanie graficzne: mgr inż. Lidia Dudek

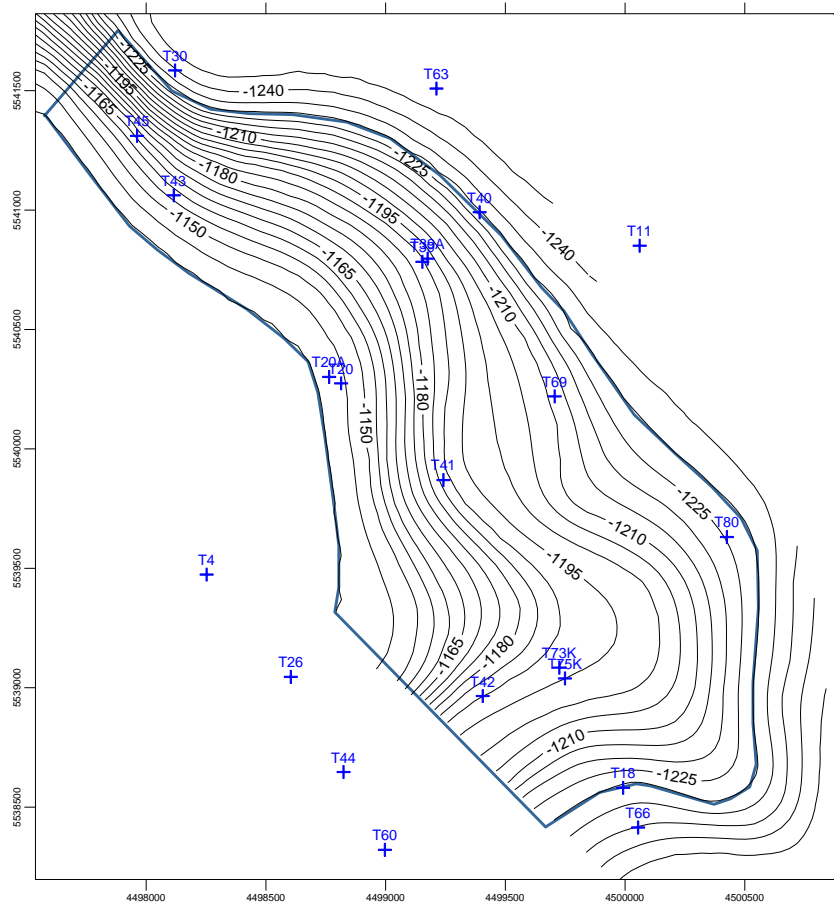
Fig. 1.1.26_11

ZŁOŻE GAZU ZIEMNEGO TARNÓW V




Autorzy: U. Baran, E. Jawor

MAPA STROPU POZIOMU GAZONOŚNEGO D

skala 1 : 10 000



Legenda:

-  - odwierty
-  - zasięg złoża
-  -1500 - izobaty stropu miocenu

Opracowano z arkuszy zbiorczych Geofizyki Kraków
394 - Tarnów, 395 - Dębica, 414 - Brzesko, 415 - Pilzno
(skala 1: 50 000)
Wydruk komputerowy (skala 1: 10 000)
układ "1942"

Opracowanie graficzne: mgr inż. Lidia Dudek

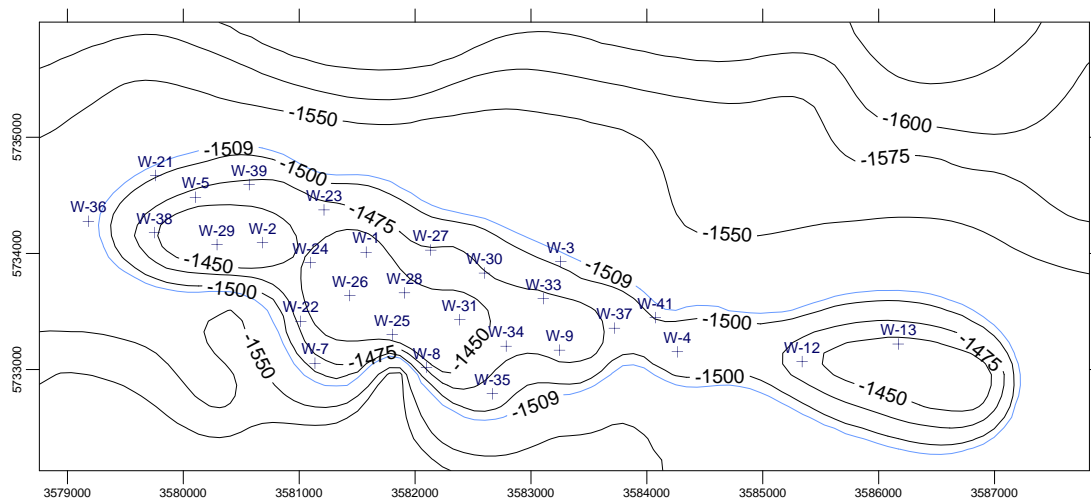
Fig. 1.1.26_12

ZŁOŻE GAZU ZIEMNEGO WILKÓW

Opracowali: J.Tenerowicz, A. Żołnierczuk

MAPA STRUKTURALNA STROPU CZERWONEGO SPĄGOWCA

skala 1 : 25 000



Legenda:

- 1550— - izobaty stropu czerwonego spągowca
- - kontur złoża
- + - odwierty

Wydruk komputerowy (skala 1: 25 000)
układ "1942"

Opracowanie graficzne: mgr inż. Małgorzata Słota

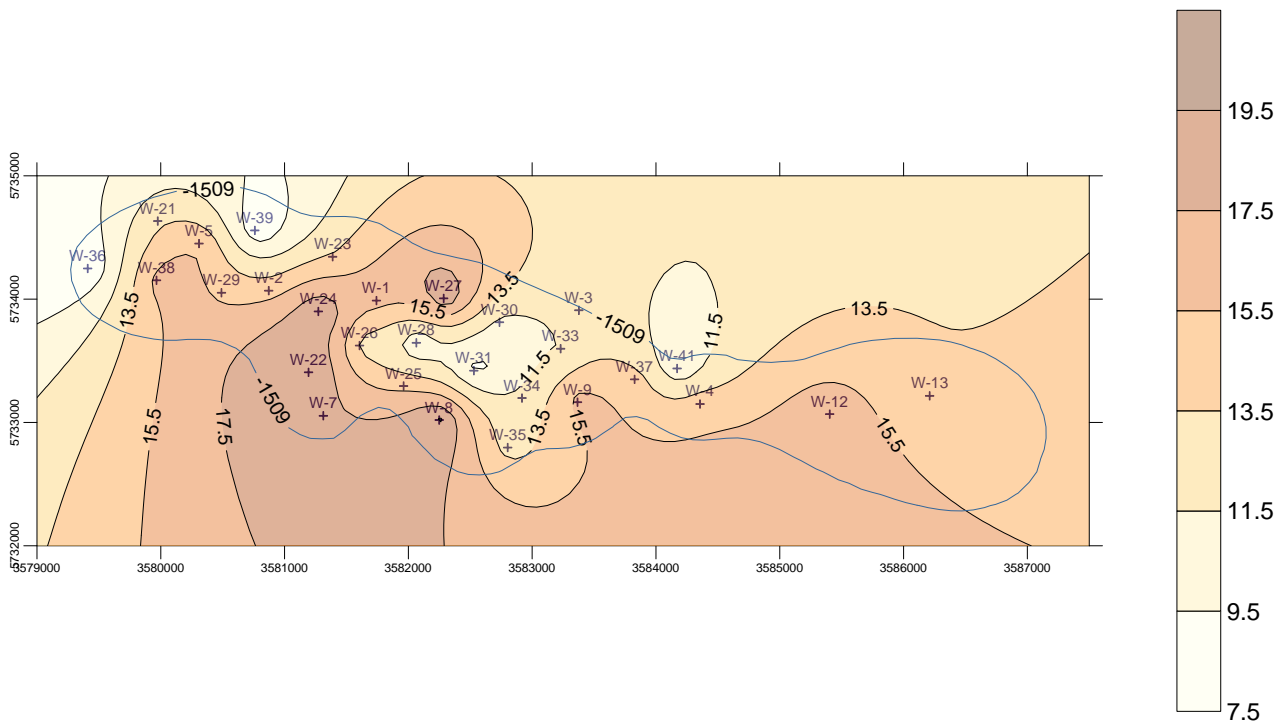
Fig. 1.1.26_13

ZŁOŻE GAZU ZIEMNEGO WILKÓW

Opracował: J.Tenerowicz

MAPA POROWATOŚCI

skala 1 : 25 000



Legenda:

- 17,5 — - izolnie porowatości
- - kontur złoža
- + - odwierty

Wydruk komputerowy (skala 1: 25 000)
układ "1942"

Opracowanie graficzne: mgr inż. Małgorzata Słota

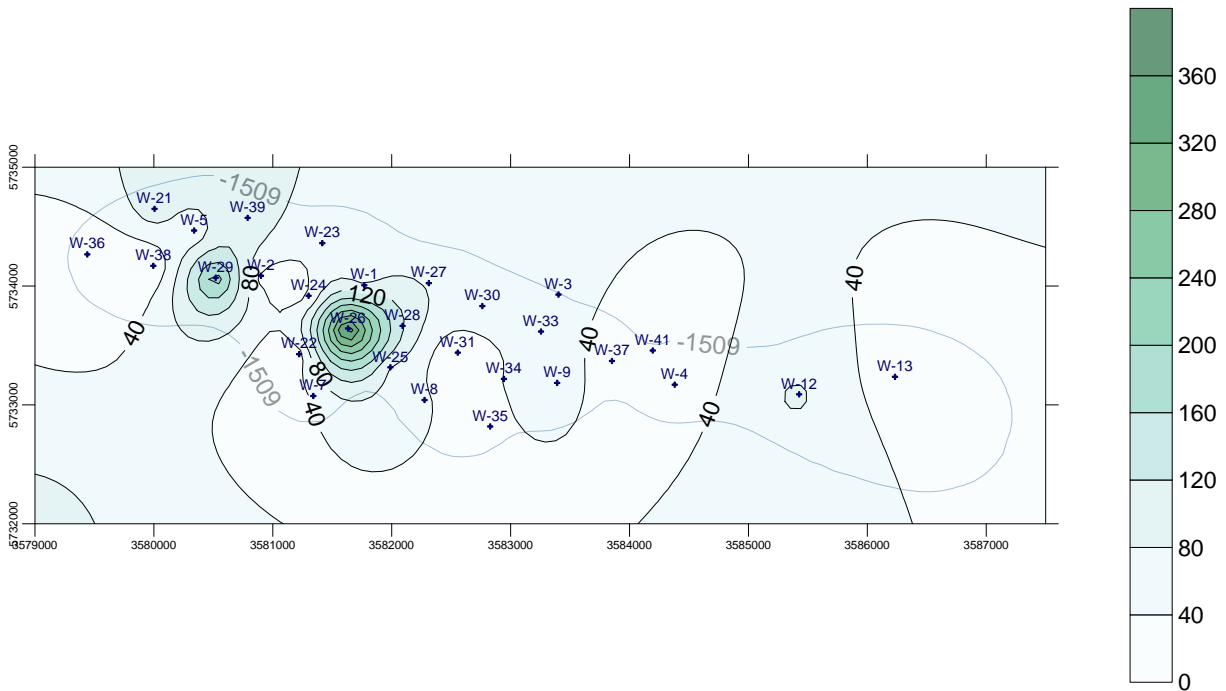
Fig. 1.1.26_14

ZŁOŻE GAZU ZIEMNEGO WILKÓW

Opracował: J.Tenerowicz

MAPA PRZEPUSZCZALNOŚCI

skala 1 : 25 000



Legenda:

- 40 — - izolinie przepuszczalności
- - kontur złoża
- + - odwierty

Wydruk komputerowy (skala 1: 25 000)
układ "1942"

Opracowanie graficzne: mgr inż. Małgorzata Słota

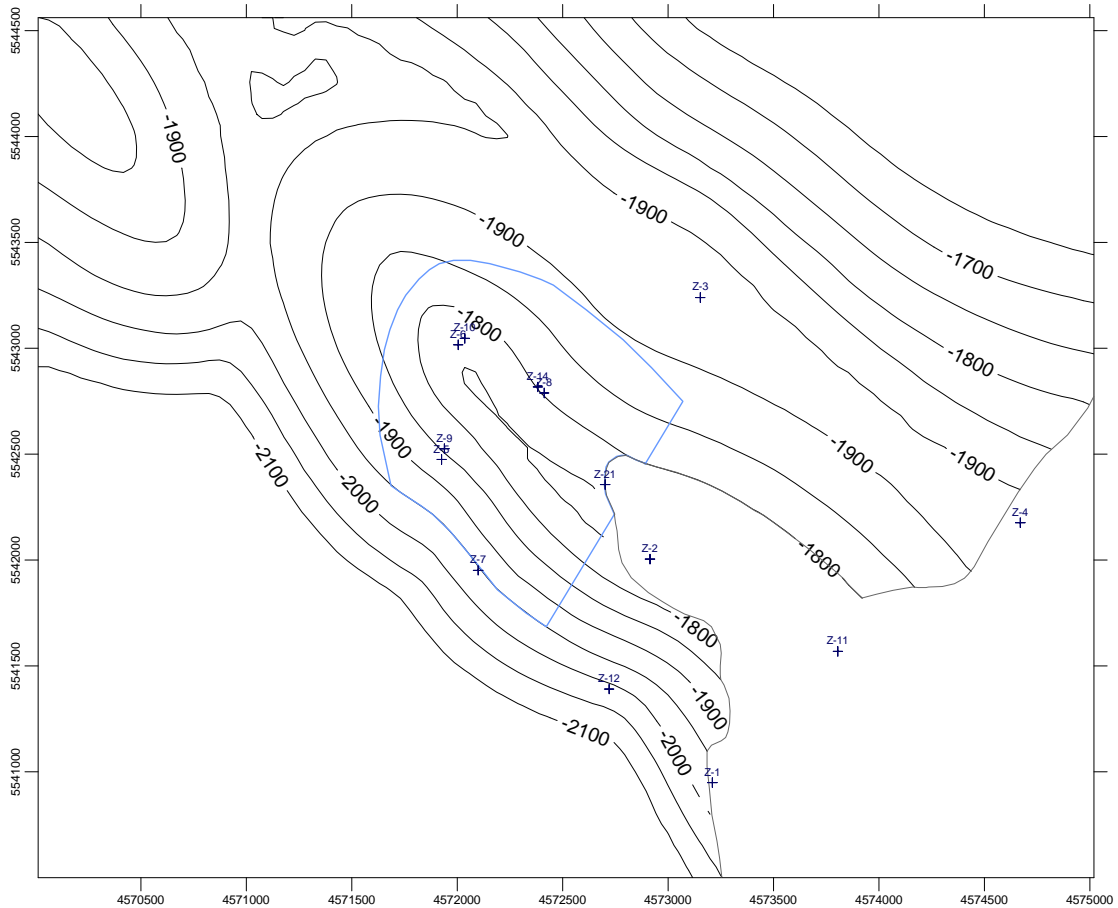
Fig. 1.1.26_15

ZŁOŻE GAZU ZIEMNEGO - REJON ZALESIE





Opracowali: Z. Barys, G. Świętnicka, K. Zychowicz

MAPA STRUKTURALNA STROPU I HOR. GAZONOŚNEGO

skala 1 : 10 000



Legenda:

-  - granica zasięgu hor. I
-  -1900- - izobaty stropu hor. gazonośnego
-  - obszar dokumentowanych zasobów w kat. C
-  - odwierty

Wydruk komputerowy (skala 1:10 000)
układ "1942"

Opracowanie graficzne: mgr inż. Małgorzata Słota