Spis treści

Spis treści1
1.1.4 ANALIZA STREF TEKTONICZNYCH
Zasady analizy stref tektonicznych pod kątem szczelności stref uskokowych
Rejon I - Bełchatów6
Analiza potencjału uszczelniającego wybranych stref uskokowych
Rejon II - GZW, oraz Strefy uskokowe i sieć tektoniczna GZW (1.1.29 - AGH)
OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA BUDOWY TEKTONICZNEJ GZW 17
SZCZEGÓŁOWA ANALIZA TEKTONICZNA W WYBRANYCH REJONACH BADAWCZYCH 20
OGÓLNY OBRAZ SIECI TEKTONICZNEJ GZW(MODEL USKOKOWY – FORMAT <i>PETREL</i>)
Rejon III - Mazowsze 40
Analiza szczelności stref tektonicznych dla wybranych stref w rejonie Warszawy
Rejon IV - brzeżna strefa Karpat i Zapadliska Przedkarpackiego
Rejon V - Lubelszczyzna (i Podlasie) 68
Analiza szczelności stref tektonicznych dla wybranych stref w rejonie Lublina
Rejon VI - Wielkopolska - Kujawy
Analiza szczelności stref tektonicznych dla wybranych stref w rejonie Poznania i Kujaw
Analiza potencjału uszczelniającego stref uskokowych występujących w osadach mezozoicznych w rejonie Kujaw
Analiza potencjału uszczelniającego stref uskokowych występujących w osadach klastycznych czerwonego spągowca rejonie Poznania
Rejon VII - NW Polska
Analiza szczelności stref tektonicznych dla wybranych stref w rejonie Szczecina i Koszalina 116
Analiza potencjału uszczelniającego stref uskokowych dla struktur Choszczna i Suliszewa 116
Analiza potencjału uszczelniającego stref uskokowych dla rejonu Koszalina
Rejon VIII - Łeba-Bałtyk oraz NE Polska141
Analiza szczelności stref tektonicznych dla wybranych stref w rejonie NE Polski

Weryfikacja modeli stref uskokowych i ich potencjału uszczelniającego (1.1.28 - AGH)	152
Rejon I - Bełchatów	152
Rejony: Mazowsze, Lubelszczyzna, NW-Polska	155
Model uskokowy osadów pokrywy mezozoicznej na obszarze Mazowsza	158
Model uskokowy Lubelszczyzny	180
Model uskokowy Pomorza	181
Modelowanie wpływu uskoku na rozprzestrzenianie CO ₂	182
Rejony: Wielkopolska, Łeba-Bałtyk	186
Opracowanie materiałów archiwalnych - mapy i przekroje (1.4.2 - PBG)	193
Rejon I - Bełchatów, Pola potencjalne	193
Mapy hydrochemiczne i hydrodynamiczne	200
Rejon GZW (poziomy solankowe) - Pola potencjalne	201
Rejon Wielkopolski/struktur naftowych - Pola potencjalne	207

1.1.4 ANALIZA STREF TEKTONICZNYCH

Zasady analizy stref tektonicznych pod kątem szczelności stref uskokowych (Grzegorz Wróbel)

Strefy uskokowe są niezwykle ważnym elementem w analizie geologicznej struktur perspektywicznych do bezpiecznego składowania CO2. Poprawne zidentyfikowanie i wykartowanie uskoków w obrębie zarówno interwałów zbiornikowych jak i uszczelniających jest kluczowym elementem pozwalającym na wykrycie i ocenę potencjalnych stref nieciągłości w poziomach zbiornikowych i/lub dróg migracji związanych ze strefami uskokowymi.

Zagadnienie drożności / szczelności stref uskokowych w pierwszym przybliżeniu sprowadza się do problemu superpozycji warstw zbiornikowych (rezerwuary) i warstw uszczelniających (interwały ilaste), gdzie warstwy zbiornikowe są uszczelniane przez utwory ilaste znajdujące się po drugiej stronie uskoku. Jednakże, równie często strefy uskokowe, gdzie po obu stronach uskoku występują skały przepuszczające (piaskowce, wapienie), stanowią pułapkę strukturalną, ze względu na obecność skał uskokowych formujących barierę dla przepływu płynów złożowych (**Fig. 1.1.4_1**). Powstawanie skał uskokowych wiąże się bezpośrednio z przemieszczeniem się względem siebie skał o odmiennej litologii (Yielding i in., 1997). Skały uskokowe, będące efektem dezintegracji mechanicznej, obejmują "smar" ilasty (*clay smear*), skały uskokowe ze szkieletem z fyllokrzemianów (*phyllosilicate-framework fault rocks*) oraz mączkę kataklastyczną (*cataclastic gouge*) (Fisher &Knipe, 1998).



Fig. 1.1.4_1Wyidealizowana strefa uskokowa w obrębie sekwencji osadów klastycznych obrazująca efekt rozsmarowania osadów ilastych i ich inkorporowanie w obręb skał uskokowych tworzących jądro uskoku. Strzałkami zaznaczono szerokość strefy uskokowej (F) w miejscach gdzie po przeciwnych stronach uskoku

naprzeciwko występują kolejno: piaskowce – iłowce (sst/shl), łupki – łupki (shl/shl) i piaskowce – piaskowce (sst/sst).

Do analiz potencjału uszczelniającego stref uskokowych wykorzystano program TRIANGLE wchodzący w skład platformy interpretacyjnej TrapTester firmy Badley Geoscience, służącej do różnego rodzaju interpretacji i modelowań strukturalnych. Program TRIANGLE opiera się na ilościowej analizie tak samej superpozycji warstw przepuszczających względem warstw uszczelniających jak i zjawisk związanych z rozprowadzaniem frakcji ilastych wzdłuż płaszczyzny uskoku (Knipe, 1997; Yielding i in.,1997). Idea konstrukcji trójkąta interpretacyjnego, tworzonego przy użyciu tego programu, pokazana jest na **Fig. 1.1.4_2**. Po przecięciu płaskorównoległej sekwencji skał osadowych o zróżnicowanej litologii (czarne warstwy – iłowce, żółte – piaskowce) mamy do czynienia z superpozycją różnych litologii względem siebie. Na trójkącie interpretacyjnym czarne poziome obszary odpowiadają warstwom ilastym w skrzydle wiszącym, czarne ukośne obszary odpowiadają warstwom ilastym w skrzydle zrzuconym. Kolory z kolei odpowiadają rozkładowi parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) kwantyfikującego zdolność uskoku do uszczelniania w związku z rozprowadzaniem frakcji ilastej wzdłuż jego powierzchni.



Fig. 1.1.4_2 Idea trójkąta interpretacyjnego obrazująca superpozycję przepuszczających interwałów zbiornikowych i warstw uszczelniających– podręcznik programu TRIANGLE.

(a) – wizualizacja uskoku pionowego przecinającego płaskorównoległą sekwencję utworów klastycznych o zróżnicowanej litologii (żółte – zbiornikowe piaskowce, czarne – uszczelniające iłowce);

(b) – trójkąt interpretacyjny odpowiadający szaremu obszarowi znajdującemu się pomiędzy przesuniętymi względem siebie blokami uskokowymi z (a). Warstwy ilaste w skrzydle wiszącym są przedstawione jako poziome czarne linie, warstwy ilaste w skrzydle zrzuconym odpowiadają nachylonym czarnym obszarom. Zestawienie po obu stronach uskoku interwałów przepuszczających naprzeciwko przepuszczających zaznaczono na kolorowo w zależności od wartości parametru SGR (patrz tekst) obliczonego dla każdego elementu powierzchni uskokowej (por. Childs i in., 1997).

W roku 1996 na konferencji naukowej Norweskiego Towarzystwa Geologicznego (NPF) Fristad i in. (1997) po raz pierwszy zaprezentowali i opisali, w jaki sposób parametr SGR (*Shale Gouge Ratio*) może być wykorzystywany do predykcji potencjału uszczelniającego stref uskokowych. Fundamentalnym założeniem przy obliczaniu tego algorytmu jest to, że skład mączki uskokowej (*ang. fault-gouge*) w danym punkcie uskoku zależy od składu objętościowego skał tworzących ściany uskoku w tym punkcie (**Fig. 1.1.4_3**). A zatem, rozwój uskoku w czystych piaskowcach generuje kataklazyty, podczas gdy uskokowanie w podatnych skałach ilastych powoduje powstanie smaru ilastego. Na podstawie licznych analiz przeprowadzonych w odsłonięciach oraz wyników badań laboratoryjnych wykazano, iż wartość parametru SGR z przedziału 15–20 stanowi wartość graniczną oddzielającą uskoki przepuszczające od uskoków uszczelniających (Yielding, 2002; Gibson, 1998). Generalnie, więc przyjmuje się, że wartości SGR <20 związane są z kataklazytami rozwiniętymi w obrębie jądra uskoku, natomiast wartości parametru SGR >20 odpowiadają wyższemu potencjałowi uszczelniającemu.



The Shale Gouge Ratio algorithm

Fig. 1.1.4_3 Algorytm wykorzystywany do obliczania parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) - podręcznik programu TRIANGLE (por. Yielding i in., 1997, Manzocchi i in., 1999).

<u>Powyższa metodyka postępowania została wykorzystana w przypadku rejonu Bełchatowa (I), Mazowsza (III), Lubelszczyzny (V), Wielkopolski – Kujaw (VI), NW Polski (VII) oraz rejonu Łeba-Bałtyk i NE Polski (VIII).</u>

Rejon I - Bełchatów

Analiza potencjału uszczelniającego wybranych stref uskokowych (Grzegorz Wróbel)

Do analizy potencjału uszczelniającego stref uskokowych wybrano dwa obiekty: strukturę Kliczkowa oraz strukturę Lutomierska. Obie te struktury zostały rekomendowane do dalszego szczegółowego rozpoznania przez Konsorcjum (wykonawców) projektu.

Do obliczenia potencjału uszczelniającego, wyrażonego parametrem SGR, niezbędne są dane określające ilość materiału ilastego w profilu litologicznym. Dla obu badanych otworów dostępne była wyłącznie krzywa profilowania naturalnego promieniowania gamma (GR) określająca ten parametr. Warto podkreślić, że skala pionowa na figurach z wynikami modelowania podaje głębokość otworu w metrach liczoną od poziomu morza (True Vertical Depth – TVD), a zatem wszystkie wartości głębokości oznaczone jednostką "mppm" (metry poniżej poziomu morza) są zredukowane o wysokość nad poziom morza danego otworu (otwór Niechmirów IG-1 położony jest 170,0mnpm, a otwór Lutomiersk-2 – 164,0mnpm). Na wszystkich figurach przedstawiających rozkład parametru SGR rezerwuary zaznaczone są na pomarańczowo a uszczelnienia na zielono.

Na **Figurach 1.1.4_4 – 1.1.4_23** zaprezentowano wyniki obliczeń parametru SGR dla otworów Niechmirów IG-1 i Lutomiersk-2. Czarna pionowa linia przecinająca pole z rozkładem wartości parametru SGR (trójkąt interpretacyjny), widoczna na wszystkich w/w figurach, oznacza miejsce wskazujące wartość parametru SGR dla zadanej wielkości zrzutu uskoku. Dodatkowo wyniki obliczeń potencjału uszczelniającego dla wszystkich zadanych wielkości zrzutów przedstawiono w dwóch wersjach. Na figurach oznaczonych indeksem "a" oprócz rozkładu wielkości parametru SGR, na trójkącie interpretacyjnym zaznaczono również położenie w profilu litologicznych warstw uszczelniających, wskazując jednocześnie na typ superpozycji, tj. iłowce/iłowce – kolor oliwkowy, iłowce/zbiornikowe – brązowy, zbiornikowe/iłowce – zielony. Na figurach z indeksem "b" zaprezentowano trójkąt interpretacyjny przedstawiający wyłącznie dystrybucję parametru SGR.



Dafred Sale

Justiposition 7 Stale/Stale Bale/Seul Stale/Seul





Fig. 1.1.4_4-6 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) dla otworu Niechmirów IG-1; obliczenia wykonano przy zdefiniowaniu warstw ilastych dla wartości odcięcia 70% zawartości frakcji ilastej. Wielkości zrzutu = 50m, 100 m i 200m.







Fig. 1.1.4_7-9 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Niechmirów IG-1, dla kolektorów jurajskich; obliczenia wykonano przy zdefiniowaniu warstw ilastych dla wartości odcięcia 70% zawartości frakcji ilastej. Wielkości zrzutu = 50m, 100 m i 200m.









Fig. 1.1.4_10-11 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Niechmirów IG-1, dla kolektorów triasowych; obliczenia wykonano przy zdefiniowaniu warstw ilastych dla wartości odcięcia 70% zawartości frakcji ilastej. Wielkości zrzutu = 50m, 100 m i 200m.

Struktura Kliczkowa (Kliczków jura i Kliczków trias)

Struktura Kliczkowa stanowi mezozoiczny rów tektoniczny, który jest południowo-wschodnim przedłużeniem regionalnego systemu dyslokacyjnego Poznań – Kalisz i charakteryzuje się rozciągłością NW-SE (Deczkowski, Gajewska, 1983). Struktura ta została określona jako perspektywiczna ze względu na dobre parametry kolektorskie osadów znajdujących się w środkowej części rowu. Scharakteryzowano tu dwa kolektory jurajskie (dolny bajos + górny toark oraz pliensbach) oraz potencjalny triasowy kolektor w obrębie pstrego piaskowca.

Do analizy potencjału uszczelniającego uskoków charakteryzujących rów Kliczkowa wybrano wiercenie Niechmirów IG-1, które jest zlokalizowane z centralnej, zrzuconej części rowu. W wierceniu tym wyróżniono 3 poziomy zbiornikowe oraz 3 interwały uszczelniające:

1. uszczelnienia

- 1. górny bajos (JBJ3) 580,5-642,0m + 664,0-719,0m
- 2. dolny toark (JTO1) 1000,5-1112,0m
- 3. pstry piaskowiec (TP3+2+1) 2366,0-2548,0m

2. kolektory

- 1. dolny bajos + górny toark (JBJ1+JTO3) 719,0-1000,5m
- 2. pliensbach (JPL) 1112,0-1392,0m
- 3. dolny i środkowy pstry piaskowiec (TP1+2) 2548,0-2670,0m

Analizując wyniki obliczeń parametru SGR dla otworu Niechmirów IG-1 można stwierdzić, że generalnie cały badany interwał głębokościowy, obejmujący oba kolektory jurajskie oraz kolektor triasowy, cechuje się wysokim potencjałem uszczelniającym (**Fig. 1.1.4_4 – 1.1.4_6**). Najniższe wartości parametru SGR, tj. poniżej wartości granicznej SGR=15-20, notowane są dla uskoków o zrzutach rzędu 10-30m, w interwale głębokościowym 2080-2200mppm, czyli powyżej uszczelnienia triasowego (**Fig. 1.1.4_4 – 1.1.4_6** i **Fig. 1.1.4_10 – 1.1.4_11**). Analizując potencjał uszczelniający uskoków w kolektorach jurajskich (**Fig. 1.1.4_7 – 1.1.4_9**) można stwierdzić, że zarówno przy niewielkich zrzutach uskoków, rzędu pojedynczych dziesiątek metrów jak i przy zrzutach kilkusetmetrowych uskoki powinny stanowić barierę dla migracji płynów. Jeszcze lepsze parametry SGR można zaobserwować dla kolektora triasowego (**Fig. 1.1.4_10 – 1.1.4_11**). Jest to związane z dość znacznym jego zaileniem (patrz kolumna *Shale Beds* dla gł. ok. 2375-2500m) co powoduje osiąganie bardzo wysokich wartości potencjału uszczelniającego SGR>50.

Struktura Lutomierska

Struktura Lutomierska to najbardziej na południe wysunięte przedłużenie ciągu grzebieni i słupów solnych przebijających się częściowo przez utwory mezozoiku (Łęczyca – Lutomiersk) lub wprost na powierzchnię podkenozoiczną (Izbica – Kłodawa) (Marek, 1977). W rejonie wierceń Lutomiersk-2 i Lutomiersk-3 zlokalizowany jest węzeł tektoniczny, w którym strefa uskokowa Gopło – Ponętów – Pabianice przecina się z antykliną Lutomierska o prawie południkowym przebiegu (Marek, 1977). Dokładny przebieg strefy uskokowej nie jest możliwy do wyznaczenia ze względu na bardzo słabej jakości obraz sejsmiczny z dwóch starych profili sejsmicznych (23-2-76K i W0010478), które dodatkowo kończą się w pobliżu centrum elewacji tracąc pokrycie sejsmiczne. Informacje z wierceń Lutomiersk-2 i Lutomiersk-3 sugerują wielkość zrzutu na głównym uskoku rzędu 500-1000m, jednakże wydaje się, że jest to wartość mocno zawyżona, na co wskazuje porównanie z pobliską antykliną Tuszyna. Tam w pobliżu strefy uskokowej obserwuje się silne poddarcie warstw, które odpowiada po części za tak zasadnicze przesunięcie pionowe tych samych poziomów stratygraficznych po obu stronach uskoku.

Do analizy potencjału uszczelniającego uskoków charakteryzujących strukturę Lutomierska wybrano wiercenie Lutomiersk-2, które jest zlokalizowane na szczycie struktury. W wierceniu tym wyróżniono 3 poziomy zbiornikowe oraz 3 interwały uszczelniające:

uszczelnienia

```
dolny baton +górny bajos (JBT1+JBJ3) - 1324,0-1349,0m + 1371,0-1477,5m
```

dolny bajos + górny aalen (JBJ1+JA3) – 1667,0-1712,0m

dolnytoark (JTO1) - 2366,0-2548,0m

kolektory

bajos (JBJ1+JBJ3) - 1477,5-1667,0m

dolny aalen + górny toark (JA1+JTO3) – 1712,0-1938,0m

pliensbach + synemur (JPL+JS) - 1997,0-2420,0m

Analiza wyników obliczeń potencjału uszczelniającego SGR uzyskanych dla wiercenia Lutomiersk-2 została przedstawiona na **Figurach 1.1.4_12 – 1.1.4_23**. Obserwujemy tu odmienną sytuację jeżeli chodzi o obliczone wartości parametru SGR w porównaniu z wynikami dla struktury Kliczkowa. Najwyższy kolektor jurajski charakteryzuje się bardzo małym potencjałem uszczelniającym osiągając wartość graniczną SGR=15-20 dopiero dla uskoków o zrzutach ok. 150-200m (**Fig. 1.1.4_15 – 1.1.4_17**). Powoduje to, iż przy mniejszych zrzutach uskoki mogą stanowić drogi lateralnej i wertykalnej migracji CO2. Podobną sytuacją obserwować można dla środkowego kolektora jurajskiego (**Fig. 1.1.4_18 – 1.1.4_20**), z tą różnica, że uskoki tnące rezerwuar aalenu-toarku osiągną wartość progową SGR=15-20 przy zrzutach o wielkości 100-150m. Względnie dobre własności uszczelniające będą miały uskoki tnące najniższy kolektor jurajski, gdzie niski potencjał uszczelniający będą miały wyłącznie uskoki o zrzutach poniżej 50m (**Fig. 1.1.4_21 – 1.1.4_23**). Większe uskoki, a takich spodziewamy się dla tej struktury, powinny stanowić barierę dla przepływu płynów, w tym CO2.







Fig. 1.1.4_12-14 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Lutomiersk-2; obliczenia wykonano przy zdefiniowaniu warstw ilastych dla wartości odcięcia 70% zawartości frakcji ilastej. Wielkości zrzutu = 50m, 100 m i 200m.







Fig. 1.1.4_15-17 Rozkład parametru SGR (*ShaleGouge Ratio*) dla otworu Lutomiersk-2, najwyższy kolektor jurajski; obliczenia wykonano przy zdefiniowaniu warstw ilastych dla wartości odcięcia 70% zawartości frakcji ilastej. Wielkości zrzutu = 50m, 100 m i 200m.







Fig. 1.1.4_18-20 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Lutomiersk-2, środkowy kolektor jurajski; obliczenia wykonano przy zdefiniowaniu warstw ilastych dla wartości odcięcia 70% zawartości frakcji ilastej. Wielkości zrzutu = 50m, 100 m i 200m.







Fig. 1.1.4_21-23 Rozkład parametru SGR (*ShaleGouge Ratio*) dla otworu Lutomiersk-2, najniższy kolektor jurajski; obliczenia wykonano przy zdefiniowaniu warstw ilastych dla wartości odcięcia 70% zawartości frakcji ilastej. Wielkości zrzutu = 50m, 100 m i 200m.

Podsumowując wyniki analizy potencjału uszczelniającego stref uskokowych można stwierdzić, że uskoki formujące rów Kliczkowa powinny stanowić membranę hamującą przepływ lateralny płynów złożowych. W przypadku struktury Lutomierska analiza rozkładu wartości parametru SGR sugeruje występowanie drożnych stref uskokowych, zwłaszcza dla wyższych kolektorów jurajskich, dla uskoków o zrzutach poniżej 150-200m. Uskoki deformujące najniższy kolektor jurajski w świetle wyników analizy parametru SGR wydają się formować bariery dla migracji CO2.

Rejon II - GZW, oraz Strefy uskokowe i sieć tektoniczna GZW (1.1.29 - AGH)

(Janusz Jureczka, Włodzimierz Krieger, Sławomir Wilk – PIG-PIB OG)

(Tomasz Urych, Jarosław Chećko- GIG)

Zgodnie z założeniami Projektu, punkt **1.1.4** "Analiza stref tektonicznych" dla rejonu Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) obejmował także zagadnienia szczegółowe, realizowane przez Główny Instytut Górnictwa (GIG) w ramach punktu **1.1.29** "Strefy uskokowe i sieć tektoniczna GZW", przy współudziale Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego Oddział Górnośląski (PIG-PIB OG).

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA BUDOWY TEKTONICZNEJ GZW

Osady karbonu produktywnego budujące Górnośląskie Zagłębie Węglowe charakteryzują się dużym zróżnicowaniem wykształcenia litologiczno-facjalnego oraz znacznymi zmianami miąższości. Dolną część osadów węglonośnych karbonu reprezentują osady paraliczne, a część górną – osady lądowe. Miąższość utworów karbonu produktywnego na obszarze GZW maleje od północnego-zachodu i zachodu w kierunku południowo-wschodnim i wschodnim. W obrębie utworów węglonośnych karbonu górnego na obszarze GZW wydzielone zostały następujące serie litostratygraficzne:

- seria paraliczna (namur A),
- górnośląska seria piaskowcowa (namur B i C);
- seria mułowcowa (westfal A i B),
- krakowska seria piaskowcowa (westfal C i D).

Szczegółowo charakterystyka poszczególnych serii litostratygraficznych karbonu produktywnego oraz profil podłoża i nadkładu są przedstawione w raporcie z zadań **1.1.1** i **1.1.20**.

Górnośląskie Zagłębie Węglowe charakteryzuje się skomplikowaną budową tektoniczną ze względu na swoją historię geologiczną. Duża różnorodność struktur tektonicznych na tym obszarze jest efektem nakładania się różnowiekowych procesów zachodzących w orogenezie waryscyjskiej i alpejskiej. Budowa Zagłębia powstała w wyniku oddziaływania naprężeń poziomych skierowanych z zachodu oraz południa i południowego wschodu. Naprężenia te były modyfikowane naprężeniami spowodowanymi ruchem bloków głębokiego podłoża. Efektem oddziaływania tych naprężeń było powstanie głównych struktur Zagłębia i ukształtowanie się własności skał budujących górotwór.

Na obszarze GZW można wyróżnić trzy różniące się stylem strefy tektoniczne: strefę fałdową, dysjunktywną i fałdowo-blokową.

Strefa tektoniki fałdowej obejmuje struktury o kierunku NNE-SSW, występujące wzdłuż zachodniego obrzeżenia Zagłębia, od Ostrawy przez Rybnik do Gliwic (**Fig. 1.1.4_24**). Występują tu niesymetryczne fałdy, z zaznaczającymi się brachysynklinami (nieckami) i strukturami antyklinalnymi, zwanymi zaburzeniami,

które miejscami przechodzą w nasunięcia. Na obszarze rybnickim można wyróżnić kolejno, od zachodu ku wschodowi, następujące struktury: niecka jejkowicka, nasunięcie michałkowickie (rybnickie), niecka chwałowicka i nasunięcie orłowskie (boguszowickie). Na obszarze Gliwic oba zaburzenia przechodzą w strefę ścieśnionych i stromych fałdów.

Strefa tektoniki fałdowej graniczy od wschodu ze strefą tektoniki dysjunktywnej. Na obszarze rozgraniczającym obie strefy, różniące się stylem tektoniki, występuje szereg struktur takich jak: synklina i siodło Jastrzębia, fałd Sośnicy-Knurowa, niecka Concordii.

Największy obszar w GZW zajmuje **strefa tektoniki dysjunktywnej**. Główna strukturą jest tu niecka główna, ukształtowana na bloku centralnym. Struktura ta jest rozległą niecką o upadach warstw do 15°. Ku północy niecka główna przechodzi w strukturę antyklinalną – siodło główne, W siodle głównym zaznacza się kilka kopuł. Od zachodu ku wschodowi są to kopuły: Zabrza, Chorzowa, Mysłowic i Sosnowca. Dalej w kierunku północnym siodło główne przechodzi w strukturę synklinalną – nieckę bytomską.

Strefa tektoniki dysjunktywnej charakteryzuje się występowaniem równoleżnikowych rowów i zrębów tektonicznych o dużej amplitudzie zrzutów, przeważnie w kierunku południowym. Przeważają uskoki normalno-zrzutowe o dużych kątach nachylenia płaszczyzn uskokowych (65-80°). Elementy strukturalne w centralnej i wschodniej części GZW wykazują kierunek NW-SE. Ważniejsze z nich tworzą uskoki późnowaryscyjskie, jak uskok Zawada – Bełk – Oświęcim – Nowe Dwory o zrzucie do 300-400 m, uskok Żory – Piasek – Jawiszowice – Wysoka o zrzucie do 1200 m i uskok Gorzyce – Bzie Zameckie – Czechowice – Kęty o zrzucie do 400-500 m. Dyslokacjami późnomioceńskimi są uskoki: kłodnicki, książęcy, będziński oraz rów Zawady, rów Chrzanów – Krzeszowice i uskok Czechowice – Marcyporęba. W czeskiej części zagłębia na obszarze niecki karwińskiej występują uskoki: bludowicki, hrabiowski, rychwałdzki o zrzucie do 450 m, dąbrowski o zrzucie powyżej 500 m, a także uskoki: Olzy, stonawski i albrechcicki (Gabzdyl, Gorol, 2008).

Strefa fałdowo-blokowa zaznacza się w skrajnie północnej części GZW i w północno-wschodnim obrzeżeniu Zagłębia. Charakteryzuje się ona obecnością wydłużonych, niesymetrycznych struktur fałdowych (brachyfałdy, łuski), poprzecinanych uskokami o przebiegu południkowym.

Przedstawiony poniżej szkic tektoniczny GZW – **Fig. 1.1.4_24** (Kotas, 1972) prezentuje wymienione struktury tektoniczne oraz położenie wybranych rejonów badawczych w utworach krakowskiej serii piaskowcowej i górnośląskiej serii piaskowcowej karbonu górnego oraz warstw dębowieckich miocenu.



(Kotas,

granica GZW; KSP1 – rejon Polanka-Zator-Spytkowice, KSP2 – rejon Pszczyna-Ćwiklice, KSP3 – rejon Zgon-Kobiór, GSP1 – rejon Zebrzydowice-Drogomyśl-Chybie, GSP2 – rejon Pawłowice-Pszczyna Ćwiklice, GSP3 – rejon Piasek-Studzienice, DEB – subregion w obrębie warstw dębowieckich

SZCZEGÓŁOWA ANALIZA TEKTONICZNA W WYBRANYCH REJONACH BADAWCZYCH Krakowska seria piaskowcowa

Krakowska seria piaskowcowa stanowi najmłodszą jednostkę litostratygraficzną karbonu produktywnego GZW. Serię budują głównie osady gruboklastyczne, udział piaskowców i zlepieńców w profilu serii przekracza 70 %. Seria dzieli się na dwa ogniwa: warstwy łaziskie (westfal C) i warstwy libiąskie (westfal D). Warstwy łaziskie są zbudowane ze skał gruboklastycznych z ławicami mułowców i iłowców z pokładami węgla (pokłady 201-218). Miąższość tych warstw zawiera się w przedziale od 500 do 900 m i występuję w nich 17 pokładów węgla (Gabzdyl, Gorol, 2008). Warstwy libiąskie stanowią kompleks piaskowców arkozowych z cienkimi ławicami mułowców i iłowców. Profil tych warstw składa się z dziewięciu pokładów węgla (pokłady 110-119). Miąższość warstw libiąskich dochodzi do 525 m (Gabzdyl, Gorol, 2008).

W utworach krakowskiej serii piaskowcowej na podstawie kryteriów geologicznych wyznaczono trzy potencjalne dla składowania CO2 rejony badawcze, położone w centralnej i wschodniej części GZW(pod przykryciem ilastych utworów miocenu):

- Zgoń-Kobiór
- Pszczyna-Ćwiklice
- Polanka-Zator-Spytkowice.

Rejon Zgoń-Kobiór

Rejon zlokalizowany jest generalnie na południowy-zachód i południe od miasta Tychy, na obszarze następujących złóż rezerwowych węgla kamiennego: Za Rowem Bełckim, Żory-Suszec, Kobiór-Pszczyna.

Geologicznie omawiany rejon jest położony częściowo w zachodniej części niecki głównej (na jej północnym skłonie) gdzie zuskokowanie jest większe niż w pozostałych jej częściach. Obszar ten rozciąga się wzdłuż dużej strefy uskokowej Bełk-Oświęcim, a jego zdecydowanie większa część znajduje się w skrzydle zrzuconym uskoku bełskiego o amplitudzie zrzutu 300-400 m w kierunku południowym. Ponadto omawiany rejon rozcięty jest przez tzw. rów Zawady o amplitudach zrzutu 200-300 m.

Od północy wyznaczony rejon Zgoń-Kobiór częściowo graniczy z obszarem górniczym kopalni Bolesław Śmiały, gdzie wskaźnik zuskokowania osiąga wartość 91,3 m/ha. Przy wschodniej granicy rejonu znajdują się kopalnie Piast i Ziemowit (wskaźniki zuskokowania odpowiednio 46,2 m/ha i 48 m/ha).Silnie zuskokowane obszary górnicze, położone najbliżej omawianego rejonu, to kopalnia Dębieńsko na zachodzie oraz kopalnia Krupiński na południu.

Budowę strukturalną i tektoniczną rejonu Zgoń-Kobiór przedstawia Fig. 1.1.4_25



Fig. 1.1.4_25 Mapa tektoniczna rejonu Zgon-Kobiór w obrębie krakowskiej serii piaskowcowej

Rejon Pszczyna-Ćwiklice

Rejon Pszczyna-Ćwiklice znajduje się na wschód o miejscowości Pszczyna i prawie w całości położony jest na obszarze złoża rezerwowego węgla kamiennego Kobiór- Pszczyna. Geologicznie zlokalizowany jest w centralnej części niecki głównej (w obrębie jej południowego skłonu), w skrzydle zrzuconym regionalnej strefy uskokowej Żory-Jawiszowice. Strefa ta ma zróżnicowaną amplitudę zrzutu sięgającą 1000 m w kierunku południowym.



Fig. 1.1.4_26 Mapa tektoniczna rejonu Pszczyna-Ćwiklice w obrębie krakowskiej serii piaskowcowej.

Zuskokowanie tej części niecki głównej, w której znajduje się omawiany rejon badawczy waha się w przedziale 25-65 m/ha. Rejon ten graniczy na południu i na wschodzie z obszarami górniczymi kopalni Brzeszcze-Silesia. We wschodnim obszarze górniczym (Ruch Brzeszcze) wskaźnik zuskokowania wynosi 33,6 m/ha, a w południowym (Ruch Silesia) – 47,8m/ha. Budowę strukturalną i tektoniczną rejonu przedstawia **Fig. 1.1.4_26**.

Rejon Polanka-Zator-Spytkowice

Rejon badawczy Polanka-Zator-Spytkowice zlokalizowany jest we wschodniej części GZW, na wschód od miejscowości Oświęcim, na obszarze następujących złóż rezerwowych węgla kamiennego: Oświęcim-Polanka, Zator, Spytkowice, a w niewielkiej części także Wisła I – Wisła II i Wisła Północ.

Rejon Polanka-Zator-Spytkowice zlokalizowany jest we wschodniej części niecki głównej, a część północnowschodnia leży w rejonie synkliny Nieporaz-Brodła. W tej części zagłębia zuskokowanie waha się w przedziale 25-65 m/ha. Obszar omawianego rejonu częściowo w niewielkiej, północno-zachodniej części graniczy z obszarem KWK Janina, gdzie wskaźnik zuskokowania wynosi 31,5 m/ha. Na zachód od omawianego subregionu usytuowane są obszary górnicze kopalni Piast oraz Brzeszcze-Silesia. Wartości wskaźnika zuskokowania w rejonie tych kopalń wynoszą odpowiednio 46,2 m/ha i 33,6 m/ha. **Fig. 1.1.4_27** przedstawia budowę strukturalną i tektoniczną w rejonie Polanka-Zator-Spytkowice.



Fig. 1.1.4_27 Mapa tektoniczna rejonu Polanka-Zator-Spytkowice w obrębie krakowskiej serii piaskowcowej

Górnośląska seria piaskowcowa

Górnośląska seria piaskowcowa zbudowana jest głównie z osadów gruboklastycznych (piaskowce, zlepieńce). Skałom tym towarzyszą wkładki skał ilasto-mułowcowych oraz nieliczne pokłady węgla, przeważnie o znacznej miąższości. Miąższość górnośląskiej serii piaskowcowej w zachodniej części GZW sięga 1000-1100 m. Miąższość ta maleje w kierunku wschodnim, a pokłady węgla łączą się i wyklinowują). Zawartość skał grubookruchowych w budowie serii zawiera się w przedziale 30-90 %, jednak na ogół przekracza 50 %. Utwory fitogeniczne stanowią przeważnie 6-9 %, a w niektórych przypadkach nawet 10 %. Osady GSP rozpoczynają sedymentację osadów lądowych karbonu produktywnego GZW. Osady te zalegają bezpośrednio na utworach serii paralicznej. Na znacznym obszarze GZW granica pomiędzy utworami górnośląskiej serii piaskowcowej a utworami serii paralicznej przebiega w spągu pokładu 510.Natomiast w zachodniej części granica ta biegnie wzdłuż powierzchni rozmycia erozyjnego występującego w spągu kompleksu piaszczysto-zlepieńcowatego. We części wschodniej występuje przerwa sedymentacyjna, która obejmuje kolejne odcinki GSP, jak i wyżej leżące utwory serii mułowcowej. Seria ta dzieli się na dwa ogniwa litostratygraficzne: warstwy siodłowe (namur B) i warstwy rudzkie *sensu stricto* (namur C).

Warstwy siodłowe stanowią kompleks grubych ławic żwirowców i szarogłazowych piaskowców oraz mułowców i iłowców z pokładami węgla (pokłady 501-510). Miąższość warstw siodłowych w okolicach Jastrzębia wynosi od 240 do 290 m i maleje w kierunku wschodnim. Górna granica tych warstw została wyznaczona przez strop pokładu 501. Warstwy rudzkie *s.s.* zbudowane są głównie z piaskowców z ławicami żwirowców, a także mułowców i iłowców, głównie w części stropowej. Miąższość tych warstw sięga 800 m. Pokłady węgla występujące w tych warstwach mają zróżnicowaną miąższość do 6-8 m (pokłady 408-419). Górna granica warstw rudzkich została wyznaczona ponad pokładem 407 w stropie poziomu z fauną słodkowodną.

W utworach górnośląskiej serii piaskowcowej na podstawie kryteriów geologicznych wyznaczono trzy potencjalne dla składowania CO2 rejony badawcze, położone w centralnej i południowej części GZW(pod przykryciem ilastych utworów miocenu):

- Zebrzydowice-Drogomyśl-Chybie
- Pszczyna-Ćwiklice
- Polamka-Zator-Spytkowice.

Rejon Zebrzydowice-Drogomyśl-Chybie

Rejon Zebrzydowice-Drogomyśl-Chybie znajduje się w południowej części GZW, generalnie na południe od regionalnej strefy uskokowej Bzie-Czechowice. W przeważającej części rejon ten nie pokrywa się z obszarami złóż rezerwowych węgla kamiennego. Jedynie jego zachodnia część położona jest na obszarze złoża rezerwowego Bzie-Dębina oraz Zebrzydowice. Ponadto niewielki fragment obszaru w jego południowo-zachodniej części wchodzi w obręb zlikwidowanej KWK Morcinek. Omawiany rejon jest stosunkowo słabo zaangażowany tektonicznie. Na **Fig. 1.1.4_28** przedstawiono budowę strukturalną i tektoniczną omawianego rejonu.



Fig. 1.1.4_28 Mapa tektoniczna rejonu Zebrzydowice-Drogomyśl-Chybie w obrębie górnośląskiej serii piaskowcowej

Rejon Piasek - Studzienice

Rejon Piasek-Studzienice zlokalizowany jest w centralnej części GZW w skrzydle wiszącym regionalnej strefy uskokowej Żory-Jawiszowice-Wysoka, której amplitudy zrzutu w omawianym rejonie w utworach górnośląskiej serii piaskowcowej sięgają ok. 550 m na południe.

Omawiany rejon prawie w całości położony jest na obszarze złoża rezerwowego węgla kamiennego Kobiór – Pszczyna. Na zachodzie graniczy z obszarem górniczym KWK Krupiński, a na wschodzie – z KWK Piast, gdzie wskaźnik zuskokowania osiąga wartość 46,2 m/ha. Rejon ten położony jest w centralnej części niecki głównej (na południowym skłonie), gdzie zuskokowanie waha się w przedziale 25-65 m/ha. Budowę strukturalną i tektoniczną rejonu Piasek-Studzienice przedstawia **Fig. 1.1.4_29**.

Rejon Pawłowice-Pszczyna-Ćwiklice

Rejon Pawłowice-Pszczyna-Ćwiklice położony jest w obrębie niecki głównej (południowy skłon) pomiędzy dwoma regionalnymi strefami uskokowymi: Żory-Jawiszowice i Bzie-Czechowice. Omawiany rejon wchodzi w obręb następujących złóż rezerwowych węgla kamiennego: Kobiór-Pszczyna, Ćwiklice – Międzyrzecze-Bieruń, Warszowice-Pawłowice Północ, Pawłowice, Studzionki-Mizerów.

Południowa część rejonu Pawłowice-Pszczyna-Ćwiklice graniczy ze strefą uskokową Bzie-Czechowice. Amplitudy zrzutu w tym rejonie wahają się w granicach 400-500 m, na południe. Na zachodzie omawiany rejon graniczy z KWK Pniówek, a przy jego wschodniej granicy zlokalizowana jest kopalnia Brzeszcze-Silesia. Część obszaru usytuowana jest w zachodniej części niecki głównej, a więc w rejonie dosyć znacznie zaangażowanym tektonicznie (wskaźnik zuskokowania w granicach 75-90 m/ha).

Budowę strukturalną i tektoniczną rejonu Pawłowice-Pszczyna-Ćwiklice przedstawia Fig. 1.1.4_29.



Fig. 1.1.4_29 Mapa tektoniczna rejonów Piasek-Studzienice oraz Pawłowice-Pszczyna-Ćwiklice wytypowanych w obrębie górnośląskiej serii piaskowcowej



Fig. 1.1.4_30 Mapa stropu utworów dębowieckich na wytypowanym obszarze.

Warstwy dębowieckie

Warstwy dębowieckie zaliczane są do osadów miocenu (neogen), występujących w głębokich rynnach erozyjnych w południowej części GZW i jego obrzeżeniu. Utwory te wykształcone są w postaci skał gruboklastycznych: zlepieńców i piaskowców (sporadycznie przewarstwianych skałami drobnoklastycznymi: mułowcami i iłowcami). Miąższość warstw dębowieckich na ogół rzadko przekracza 100-120 m, ale miejscami osiąga nawet 250-260 m.

W utworach warstw dębowieckich na podstawie kryteriów geologicznych wyznaczono dwa potencjalne dla składowania CO2 rejony badawcze:

- Cieszyn-Skoczów-Czechowice

- Kęty-Andrychów.

W obu wyznaczonych rejonach nie stwierdzono zaangażowania tektonicznego w utworach mioceńskich, w związku z tym nie konstruowano map tektonicznych. Zaangażowanie tektoniczne (stosunkowo słabe) wykazują tylko utwory zalegające w podłożu warstw dębowieckich – karbonu oraz dewonu. Dla rejonu Cieszyn-Skoczów-Czechowice w związku z realizacją innych zadań Projektu wykonano szereg map geologicznych oraz przekroje geologiczne prezentujące budowę strukturalną podłoża (zadania **1.1.20** i **1.1.24**) Jedną z nich, z położeniem tego rejonu badawczego przedstawia **Fig. 1.1.4_30**.

STOPIEŃ ZAANGAŻOWANIA TEKTONICZNEGO OBSZARU GZW

W przypadku podziemnego składowania dwutlenku węgla występują problemy szczelności struktury przeznaczonej na podziemne składowisko. Obejmują one zagadnienia związane ze szczelnością geologiczną i techniczną. Jedne i drugie są bardzo ważne i wymagają dokładnych badań i analiz jeszcze przed rozpoczęciem składowania CO₂. Szczelność struktury geologicznej czy wybranego obiektu jest podstawowym kryterium oceny i wyboru danego obiektu dla celów podziemnego składowania dwutlenku węgla. Nieszczelna struktura geologiczna stwarza zagrożenie dla środowiska naturalnego i ludności. Dyskwalifikuje to jej przydatność dla celów unieszkodliwienia antropogenicznej emisji dwutlenku węgla (Tarkowski, Stopa, 2007).

Rozważając możliwość zatłaczania dwutlenku węgla do utworów węglonośnych karbonu zalegających poniżej poziomów eksploatacyjnych kopalń węgla kamiennego, należy mieć na uwadze fakt, iż zatłaczany gaz ma tendencję do migracji do położonych wyżej wyrobisk górniczych. Drogę ucieczki gazu mogą stanowić uskoki, towarzyszące im szczeliny i spękania, a także zlikwidowane otwory. Szczególnie ważne jest to na obszarze GZW charakteryzującym się silnym zaangażowaniem tektonicznym, na co dowodem są liczne uskoki o dużym zasięgu głębokościowym, a także towarzyszące im strefy spękań, szczelin oraz brekcji tektonicznych.

Miarą stopnia zaangażowania tektonicznego obszaru jest wskaźnik zuskokowania. Oblicza się go w oparciu o wskaźnik gęstości powierzchniowej uskoków, który określa stosunek sumarycznej długości uskoków do powierzchni jednostkowej (Chudzicka, 1980). Wskaźnik gęstości powierzchniowej uskoków oblicza się wg następującego wzoru:

$$G_p = \frac{L_u}{F}$$

gdzie:

Lu- sumaryczna długość wszystkich uskoków w obrębie wydzielonej powierzchni jednostkowej, [m],

F – powierzchnia jednostkowa, [10 000 m²],

przy czym przez długość uskoku należy rozumieć linię intersekcji płaszczyzny uskoku z powierzchnią spągu pokładu w rzucie poziomym.

Na postawie obliczonej gęstości powierzchniowej w poszczególnych polach oblicza się wskaźnik zuskokowania

$$W_u = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n G_{pi} \frac{m}{1000m^2}$$

gdzie:

G_{pi}- wskaźnik gęstości powierzchniowej uskoków w polu jednostkowym,

i – liczba pól jednostkowych.

Stopień zaangażowania tektonicznego obszaru GZW został wyznaczony na postawie sieci dyslokacji nieciągłych przedstawionych na *Mapie węglozasobności dla interwału 500 – 750 m p.p.m.* z Atlasu geologicznego GZW w skali 1: 300 000 (Kwarciński et al., 1999). Usytuowanie wytypowanych rejonów badawczych na tle sieci uskokowej przedstawione zostało na **Figurach 1.1.4_25 - 29**. Przy obliczaniu wskaźników zuskokowania obszarów górniczych przyjmuje się powierzchnię jednostkową jako 10 000 m², a więc 1 ha. Wyznaczając w tym zadaniu rejony mniej i bardziej zaangażowane tektonicznie, obszar GZW pokryto siatką obliczeniową, której jednostką elementarną jest kwadrat o boku 1000 m, a więc powierzchnię jednostkową stanowi 1 km². Aby dokładniej scharakteryzować stopień zaangażowania tektonicznego obszaru GZW obliczono także procentowy udział powierzchni w określonych przedziałach gęstości powierzchniowej uskoków względem obszaru obliczeniowego. Wyniki tych obliczeń zamieszczono w **Tabeli 1.1.4_1**. Wyniki analizy stopnia zaangażowania tektonicznego poszczególnych subregionów przedstawiono w **Tabeli 1.1.4_2 i 3** oraz na **Figurach 1.1.4_32 - 37**.

Klasa	Przedział wartości	Liczba pól	Udział %
I	$G_p = 0$	5776	75.25
Π	$0 < G_p < = 1000$	6973	15.59
II	$1000 < G_p <=$ 3000	698	9.09
IV	$3000 < G_p <=$ 5000	5	0.07
V	$G_{p} < 5000$	0	0

Tabela 1.1.4_1 Procentowy udział powierzchni w określonych przedziałach gęstości powierzchniowejuskoków względem całego obszaru obliczeniowego GZW.

Tabela 1.1.4_2.Wskaźnik zuskokowania i procentowy udział powierzchni w określonych przedziałach gęstości powierzchniowej uskoków względem obszaru obliczeniowego rejonów badawczych w obrębie KSP

Udział powierzchni obszaru o określonej gęstości	Rejony badawcze w obrębie krakowskiej serii piaskowcowej			
powierzchniowej uskoków [%]	Polanka - Zator - Spytkowice	Pszczyna - Ćwiklice	Zgon - Kobiór	
G _p = 0	36	35,8	42	
0 <g<sub>p<=1000</g<sub>	38,6	32,8	32,8	
1000 <gp<=3000< td=""><td>25</td><td>31,4</td><td>25,2</td></gp<=3000<>	25	31,4	25,2	
3000 <g<sub>p<= 5000</g<sub>	0,4	0	0	
G _p < 5000	0	0	0	
Wu [m/ha]	7,1	6,9	6	

Tabela 1.1.4_3 Wskaźnik zuskokowania i procentowy udział powierzchni w określonych przedziałach gęstości powierzchniowej uskoków względem obszaru obliczeniowego rejonów badawczych w obrębie GSP

Udział powierzchni obszaru o określonej gęstości	Rejony badawcze w obrębie górnośląskiej serii piaskowcowej			
powierzchniowej uskoków [%]	Piasek - Studzienice	Pawłowice – Pszczyna - Ćwiklice	Zebrzydowice - Drogomyśl - Chybie	
$G_p = 0$	42,9	45,6	59,5	
0 <g<sub>p<=1000</g<sub>	35,7	34	33,8	
1000 <g<sub>p<=3000</g<sub>	21,4	20,4	6,2	
3000 <g<sub>p<= 5000</g<sub>	0	0	0,5	
G _p < 5000	0	0	0	
Wu [m/ha]	5,3	6,5	3,7	



Fig. 1.1.4_31

Wytypowane subregiony w obrębie KSP i GSP na tle mapy dyslokacji nieciągłych GZW

(skala mapy 1 : 500 000)



Fig. 1.1.4_32 Mapa wartości wskaźnika gęstości powierzchniowej uskoków w rejonie Polanka - Zator -Spytkowice.



Fig. 1.1.4_33 Mapa wartości wskaźnika gęstości powierzchniowej uskoków w rejonie Pszczyna - Ćwiklice.



Fig. 1.1.4_34 Mapa wartości wskaźnika gęstości powierzchniowej uskoków w rejonie Zgon – Kobiór.



Fig. 1.1.4_35 Mapa wartości wskaźnika gęstości powierzchniowej uskokóww rejonie Zebrzydowice -Drogomyśl - Chybie.



Fig. 1.1.4_36 Mapa wartości wskaźnika gęstości powierzchniowej uskoków w rejonie Pawłowice - Pszczyna – Ćwiklice.



Fig. 1.1.4_37 Mapa wartości wskaźnika gęstości powierzchniowej uskokóww rejonie Piasek - Studzienice.



Fig. 1.1.4_38 Mapa wartości wskaźnika zuskokowania na obszarze GZW. Wskaźnik zuskokowania dla całego badanego obszaru, wynosi 2,51 m/ha. Należy zaznaczyć, że podczas obliczeń brano pod uwagę tylko uskoki główne, co jest zapewne przyczyną stosunkowo niskiej wartości wskaźnika zuskokowania. Ponadto, jak wynika z informacji zamieszczonych w **Tabeli 1.1.4_1**, 75 % całego badanego obszaru stanowią pola jednostkowe, w których nie występowały uskoki (G_p=0).

Podczas analizy tektonicznej obszaru GZW (Jurczak-Drabek, Kwarciński 2001), przeprowadzonej na podstawie mapy geologiczno-strukturalnej karbonu w skali 1:100 000 (Buła, Kotas 1994), potwierdzono główne kierunki biegu uskoków i nasunięć (**Fig. 1.1.4_39**). Obliczenia mające na celu uzyskanie wartości średniego wskaźnika zuskokowania, wykazały, że wartość tego wskaźnika dla uskoków i nasunięć regionalnych dla całego obszaru GZW wynosi k_p= 7,07 m/ha. Należy przy tym zaznaczyć, że wartość tego wskaźnika w odniesieniu do uskoków i nasunięć o zrzutach mniejszych od 100 m silnie zależy od stopnia rozpoznania geologicznego.





Dokładniejsze dane dotyczące stopnia zaangażowania tektonicznego uzyskano po przeprowadzeniu szczegółowej analizy tektonicznej dla obszaru niecki głównej (Jurczak-Drabek, Kwarciński 2001). Wykorzystano w tym celu mapy strukturalne pokładów węgla dla obszarów górniczych następujących kopalń: "Krupiński", "Silesia", "Żory", "Pniówek". Analizowano wszystkie uskoki i nasunięcia o wartości zrzutu >= 1 m. W efekcie wykazano znaczne zróżnicowanie wskaźnika zuskokowania dla poszczególnych złóż. Średnia wartość wskaźnika zuskokowania w zachodniej części niecki głównej GZW zawiera się w przedziale od 75 do 90 m/ha. Natomiast wartość ta dla centralnej i wschodniej części niecki głównej waha się w granicach od 25 do 65 m/ha.
OGÓLNY OBRAZ SIECI TEKTONICZNEJ GZW(MODEL USKOKOWY – FORMAT PETREL)

Opracowanie przestrzennego modelu dyslokacji występujących na obszarze GZW było niezbędne do stworzenia statycznego modelu parametrycznego dla tego rejonu. Modelowanie sieci uskokowej (*fault modeling*) stanowi pierwszy etap tworzenia modelu przestrzennego odzwierciedlającego budowę strukturalną danego obszaru (*structural modeling*). Modelowanie dyslokacji nieciągłych na obszarze GZW wykonane zostało za pomocą oprogramowania *Petrel* firmy *Schlumberger*.

Tworzenie modelu uskoków w tym programie może być przeprowadzone na podstawie danych dotyczących przebiegu linii uskoków, interpretacji sejsmicznych, map strukturalnych, a także przy wykorzystaniu danych opracowanych wcześniej w innych programach. Kąt upadu powierzchni uskokowej, azymut, długość i kształt uskoków są definiowane przez pionowe linie określane w programie Petrel jako *KeyPillars*. Linie te pełnią funkcję filarów, w oparciu o które budowany jest, w procesie tzw. *Pillar griddingu,* szkielet pierwotnego modelu 3D. W zależności od kształtu i kąta upadu powierzchni danego uskoku, dla każdego z nich, a także jego części, można zadeklarować typ linii, za pomocą których będzie kształtowany przebieg powierzchni uskokowej. Uskoki pionowe modelowane są przy użyciu linii pionowych kształtujących uskok za pomocą dwóch punktów (*VerticalPillar*). Uskoki liniowe o nachylonej powierzchni także kształtowane są w oparciu o dwa punkty, ale typ linii o nazwie *LinearPillar* daje możliwość dowolnego sterowania kątem upadu powierzchni uskokowej. Uskoki listryczne (o zmiennym kącie upadu) mogą być modelowane za pomocą linii krzywych kształtujących powierzchnię uskokową przy wykorzystaniu trzech punktów (*ListricPillar*) lub za pomocą pięciu punktów (*CurvedPillar*). Modelowane uskoki mogą wygasać, wzajemnie się przecinać, rozgałęziać, czy też ulegać pionowemu ścinaniu. Na etapie procesu modelowania sieci uskokowej wszystkie uskoki musza być ze sobą odpowiednio połączone.

Skomplikowana budowa geologiczna GZW, charakteryzująca się zaawansowaną tektoniką fałdową i uskokową, sprawiła, że proces modelowania uskoków był złożony i czasochłonny.

Model uskokowy GZW (*Fault model*) opracowano w oparciu o dane Głównego Instytutu Górnictwa oraz o linie dyslokacji nieciągłych (uskoki, nasunięcia) zawartych na mapach węglozasobnościz Atlasu geologicznego GZW w skali 1 : 300000 (Kwarciński et al., 1999). Modelowanie nieciągłości na obszarze GZW zostało przeprowadzone dla utworów karbonu produktywnego. W efekcie wykonano dwa modele uskokowe. Pierwszy z nich opracowano dla przedziału głębokościowego od stropu karbonu do 1400 m p.p.m. Modelowany bieg powierzchni poszczególnych uskoków, kąty upadu oraz ich zasięg głębokościowy został ukształtowany w oparciu o sieć uskokową w poszczególnych interwałach głębokości. Opracowany model składa się z 258 uskoków. Ponad połowę z nich stanowią uskoki listryczne (53 %), a więc posiadające wklęsłą lub wypukłą powierzchnią uskokową. Pozostałą część stanowią uskoki modelowane liniowo z nachyloną powierzchnią uskokową (47 %). Drugi z wykonanych modeli uskokowych opracowano dla przedziału głębokości od 600 m p.p.m. do 1400 m p.p.m. Model składa się z 227 uskoków, z czego 93 % stanowią uskoki modelowane liniowo, a 7 % - uskoki listryczne. W obydwu opracowanych modelach nie występują uskoki pionowe (**Fig. 1.1.4_40** i **41**).



Fig. 1.1.4_40 Rozmieszczenie modelowanych nieciągłości na obszarze GZW (od stropu karbonu do 1400 m ppm)



Fig. 1.1.4_41 Rozmieszczenie modelowanych nieciągłości na obszarze GZW (od 600 do 1400 m p.p.m.).

Rejon III - Mazowsze

Analiza szczelności stref tektonicznych dla wybranych stref w rejonie Warszawy (Grzegorz Wróbel)

Przedstawione opracowanie prezentuje wyniki prac wykonanych w ramach projektu "Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania" dla rejonu III (Mazowsze). Przedmiotem tych prac była analiza szczelności wybranych stref tektonicznych zidentyfikowanych w trakcie interpretacji strukturalnej danych sejsmicznych (zadanie **1.1.3** - rejon III). Strefy uskokowe są niezwykle ważnym elementem w analizie geologicznej struktur perspektywicznych do bezpiecznego składowania CO2. Poprawne zidentyfikowanie i wykartowanie uskoków w obrębie zarówno interwałów zbiornikowych jak i uszczelniających jest kluczowym elementem pozwalającym na wykrycie i ocenę potencjalnych stref nieciągłości w poziomach zbiornikowych i/lub dróg migracji związanych ze strefami uskokowymi.

Wykorzystano metodykę postępowania omówioną w pracach dla rejonu Bełchatowa (I).

Analiza potencjału uszczelniającego wybranych stref uskokowych

Do analizy potencjału uszczelniającego stref uskokowych wybrano uskoki główne deformujące trzy struktury: s. Dzierżanowa, s. Płońska oraz s. Żyrowa-Czachówka (**Fig. 1.1.4_45**). Każda z ww. struktur cechuje się nieco odmiennym rozwojem strukturalnym, jak również zróżnicowaną wielkością zrzutów oraz wiekiem aktywności uskoków zinterpretowanych w ich obrębie. Najbardziej złożonym, kilkuetapowym rozwojem strukturalnym charakteryzuje się s. Dzierżanowa, z kolei s. Żyrowa-Czachówka była aktywna najprawdopodobniej jedynie w późnej kredzie/paleogenie, w trakcie inwersji bruzdy środkowopolskiej.

Do obliczenia potencjału uszczelniającego, wyrażonego parametrem SGR, niezbędne są dane określające ilość materiału ilastego w profilu litologicznym. Dla badanych otworów dostępne była wyłącznie krzywa profilowania naturalnego promieniowania gamma (GR) określająca ten parametr. Warto zaznaczyć, że skala pionowa na figurach z wynikami modelowania podaje głębokość otworu w metrach liczoną od poziomu morza (True Vertical Depth – TVD), a zatem wszystkie wartości głębokości oznaczone jednostką "mppm" (metry poniżej poziomu morza) są zredukowane o wysokość nad poziom morza danego otworu (otwór Dzierżanowo GEO-1 położony jest 125mnpm, otwór Płońsk IG-2 – 120mnpm, a otwór Żyrów-1 – 130 m npm). Na wszystkich figurach przedstawiających rozkład parametru SGR poziomy kolektorskie, które zostały wydzielone w ramach zadania **1.1.3**, zaznaczono na żółto, natomiast wytypowane poziomy uszczelniające na zielono.

Na **Fig. 47-50**, **52-55**, **57-58** zaprezentowano wyniki obliczeń parametru SGR dla otworów Dzierżanowo GEO-1, Płońsk IG-2 i Żyrów-1. Czarna pionowa linia przecinająca pole z rozkładem wartości parametru SGR (trójkąt interpretacyjny), widoczna na wszystkich w/w figurach, oznacza miejsce wskazujące wartość parametru SGR dla zadanej wielkości zrzutu uskoku.

Struktura Dzierżanowa

Struktura Dzierżanowa to antyklina o przebiegu NW-SE (**Fig. 1.1.4_42**), która charakteryzuje się kilkuetapowym rozwojem strukturalnym, a ostatecznie uformowana została w wyniku późnokredowej inwersji bruzdy środkowopolskiej. Do analizy potencjału uszczelniającego uskoków przecinających antyklinę Dzierżanowa wybrano wiercenie Dzierżanowo GEO-1. W wierceniu tym scharakteryzowano 6 poziomów zbiornikowych oraz 1 interwał uszczelniający (**Fig. 1.1.4_43**).

Analizując wyniki obliczeń parametru SGR dla otworu Dzierżanowo GEO-1 można stwierdzić, że generalnie cały badany interwał głębokościowy, obejmujący wszystkie kolektory jurajskie, cechuje się stosunkowo dobrym potencjałem uszczelniającym, pomimo obecności tylko jednego poziomu uszczelniającego (**Fig. 1.1.4_44**). Najniższy poziom zbiornikowy, tj. synemur dolny – hetang (JS1+H-k) jedynie przy zrzutach uskoków poniżej 10-15m może być drożny, natomiast przy większych uskokach potencjał uszczelniający osiąga wartości SGR > 30 (**Fig. 1.1.4_45**). Kolektor pliensbachu górnego cechuje się bardzo dobrym uszczelnieniem przy wartościach zrzutu uskoku powyżej 100m (**Fig. 1.1.4_46**). Z kolei kolektor toarku górnego największe wartości parametru SGR osiąga dla niewielkich uskoków < 10m, aczkolwiek większe uskoki również charakteryzują się parametrem SGR > 30 oznaczającym szczelny uskok. Dwa najwyższe poziomu zbiornikowe cechują się dobrym i bardzo dobrym (dla zrzutów powyżej 50-70m) poziomem szczelności uskoków (**Fig. 1.1.4_47**).

Struktura Płońska

Jest to antyklina górnokredowa rozwinięta ponad rowem tektonicznym wieku późnojurajskiego. Rozciągłość tej struktury ma w przybliżeniu kierunek wschód-zachód (**Fig. 1.1.4_42**). Do analizy potencjału uszczelniającego uskoków przecinających strukturę Płońska wybrano wiercenie Płońsk IG-2. W wierceniu tym scharakteryzowano 3 poziomy zbiornikowe oraz 2 interwały uszczelniające (**Fig. 1.1.4_48**).

Analiza potencjału uszczelniającego uskoków wyrażonego parametrem SGR pokazuje duże zróżnicowanie tego parametru dla poszczególnych poziomów zbiornikowych (Fig. 1.1.4_49). Najlepszymi własnościami uszczelniającymi cechują się uskoki przecinające najniższy kolektor, tj. hetangu-synemuru dolnego (JS1+H-k) (Fig. 1.1.4_50). Parametr SGR dla uskoków o zrzutach ponad 50m osiąga tu wartości >50 świadczące o dobrym uszczelnieniu. Jedynie mniejsze uskoki mogą tworzyć potencjalne drogi migracji CO2. Najgorsze parametry uszczelniające cechują się uskoki przecinające poziom zbiornikowy górnego toarku (JTO3-k) (Fig. 1.1.4_52). W tym przypadku zarówno dla mniejszych wartości zrzutów uskoków jaki i dla zrzutów rzędu 200m poziom uszczelnienia jest stosunkowo niski (SGR ok. 20).

Struktura Żyrowa - Czachówka

Struktura Żyrowa-Czachówka to półrów / rów mezozoiczny o stosunkowo niewielkiej szerokości, rzędu 2-2,5km, oraz rozciągłości NE-SW, który rozwinął się ponad walną strefą uskokową, tj. uskokiem Grójca. Do analizy potencjału uszczelniającego uskoków deformujących strukturę Żyrowa-Czachówka wybrano wiercenie Żyrów-1, które jest zlokalizowane w bezpośrednim sąsiedztwie struktury. W wierceniu tym wyróżniono 1 poziom zbiornikowy oraz 2 interwały uszczelniające (**Fig. 1.1.4_53**). Wyniki analiz potencjału uszczelniającego pokazują, że uskoki ograniczające strukturę Żyrowa cechują się bardzo wysokimi wartościami parametru SGR (**Fig. 1.1.4_54**). Dodatkowo w profilu otworu występuje bardzo dużo warstw ilastych (udział iłowców wynosi ok. 87%) co powoduje, że przy każdej wielkości zrzutu uskoku naprzeciw piaskowców, po drugiej stronie płaszczyzny uskokowej, występują warstwy ilaste, bądź strefa uskokowa zawiera znaczna ilość materiału frakcji ilastej (**Fig. 1.1.4_55**). Taka konfiguracja powoduje, że strefa uskokowa powinna stanowić mocą membranę dla przepływu CO2.

Podsumowanie

Podsumowując wyniki analizy potencjału uszczelniającego stref uskokowych można stwierdzić, że uskoki formujące rów Żyrowa-Czachówka powinny stanowić mocną membranę hamującą przepływ lateralny płynów złożowych. W przypadku struktury Płońska analiza rozkładu wartości parametru SGR sugeruje występowanie szczelnych stref uskokowych, zwłaszcza w niższych poziomach kolektorów jurajskich, dla uskoków o zrzutach powyżej 100-150m. Uskoki deformujące najwyższy kolektor jurajski w świetle wyników analizy parametru SGR wydają się formować słabe bariery dla przepływu CO2 lub wręcz drogi migracji.



Fig. 1.1.4_42 Mapa lokalizacyjna profili sejsmicznych i otworów wiertniczych oraz analizowanych struktur geologicznych w rejonie III (Mazowsze).



Fig. 1.1.4_43 Fragment profilu otworu Dzierżanowo GEO-1 z zaznaczonymi poziomami zbiornikowymi (żółte warstwy) i uszczelniającymi (zielone warstwy).



Fig. 1.1.4_44 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Dzierżanowo GEO-1 dla różnych wielkości zrzutu uskoku: (a) 50m, (b) 100m i (c) 200m.



Fig. 1.1.4_45 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Dzierżanowo GEO-1 dla kolektorów hetangu-synemuru dolnego (JS1+H-k) oraz synemuru-pliensbachu dolnego (JS1+PL-k). Wielkości zrzutu uskoku: (a) 50m, (b) 100m.



Fig. 1.1.4_46 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Dzierżanowo GEO-1 dla kolektorów pliensbachu górnego (JPL3-k) oraz toarku górnego (JTO3-k). Wielkości zrzutu uskoku: (a) 50m, (b) 100m.



Fig. 1.1.4_47 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Dzierżanowo GEO-1 dla kolektorów aalenu dolnego (JA1-k?) oraz bajosu dolnego (JBJ1-k). Wielkości zrzutu uskoku: (a) 50m, (b) 100m.



Fig. 1.1.4_48 Fragment profilu otworu Płońsk IG2 z zaznaczonymi poziomami zbiornikowymi (żółte warstwy) i uszczelniającymi (zielone warstwy).



Fig. 1.1.4_49 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Płońsk IG-2 dla różnych wielkości zrzutu uskoku: (a) 50m, (b) 100m i (c) 200m.



Fig. 1.1.4_50 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Płońsk IG-2 dla kolektora hetangusynemuru dolnego (JS1+H-k). Wielkości zrzutu uskoku: (a) 50m, (b) 100m.



Fig. 1.1.4_51 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Płońsk IG-2 dla kolektora synemuru górnego -pliensbachu (JPL+S2-k). Wielkości zrzutu uskoku: (a) 50m, (b) 100m.



Fig. 1.1.4_52 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Płońsk IG-2 dla kolektora toarku górnego (JTO3-k). Wielkości zrzutu uskoku: (a) 50m, (b) 100m.



Fig. 1.1.4_53 Fragment profilu otworu Żyrów-1 z zaznaczonymi poziomami zbiornikowymi (żółte warstwy) i uszczelniającymi (zielone warstwy).



Fig. 1.1.4_54 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Żyrów-1 dla różnych wielkości zrzutu uskoku: (a) 50m, (b) 100m i (c) 200m.



Fig. 1.1.4_55 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Żyrów-1 dla kolektora synemuru górnego -pliensbachu (JPL+S2-k?). Wielkości zrzutu uskoku: (a) 100m, (b) 150m

Rejon IV - brzeżna strefa Karpat i Zapadliska Przedkarpackiego

(Zbigniew Buła, Ryszard Habryn, Józef Chowaniec, Piotr Freiwald, Tomasz Koziara, Piotr Owsiak, Andrzej Piotrowski, Wojciech Ryłko, Rafał Sikora, Anna Tomaś, Adam Tomaś)

Wytypowane w rozdziale **1.1.1** (IV) rejony (zbiorniki) do magazynowania CO2 to zbiorniki Kalwaria Zebrzydowska, Gdowa, Niepołomic i zbiornik Grobla.

Zbiornik Niepołomice

Zbiornik Niepołomice ograniczony jest ze wszystkich stron dyslokacjami szczególnie dobrze widocznymi na mapie strukturalnej spagu kompleksu dewońsko karbońskich skał weglanowych (Fig. 1.1.4_56, Fig. 1.1.4_57) oraz na mapie geologiczno-strukturalnej stropu paleozoiku. Od zachodu zbiornik ten ograniczony jest strefą rozłamową Lubliniec Kraków (L-K). Tą strefę rozłamową prześledzono na przekrojach geologicznych podłużnych IX-IX', II-II', III-III' i poprzecznym 6-6' (Fig. 1.1.4_58, Fig. 1.1.4_59, Fig. 1.1.4_60, Fig. 1.1.4_61). Widoczne jest podniesienie strefy Niepołomic w stosunku do przylegającego do niej od zachodu rowu Liplasu. Na przekroju geologicznym IX-IX' (Fig. 1.1.4_58), wzdłuż strefy tektonicznej Lubliniec-Kraków zrzut w kierunku zachodnim w obrąbie kompleksu węglanowego wynosi 700m. Ku górze wielkość tego zrzutu wygasa osiągając w spągu utworów jurajskich 50 m i nie przekraczając 25 m w stropie tych utworów. Uskok ten całkowicie wygasa w stropie utworów platformowych. Od góry przykryty jest siedmiuset metrowym uszczelniającym kompleksem utworów neogenu. Na tej granicy tektonicznej możliwy jest kontakt zbiornika Niepołomice z utworami permotriasu rowu Liplasu, również mogącego stanowić potencjalny zbiornik (Zbiornik Liplasu). Na przekroju geologicznym II-II' zanika kontakt Zbiornika Niepołomice z rowem Liplasu. Rów Liplasu nie sięga tak daleko ku północy.. W obrębie utworów prekambru obserwujemy zrzut ku zachodowi rzędu 700m, takiej samej wielkości jak na przekroju geologicznym IX-IX'. W spągu utworów jurajskich wielkość zrzutu nie przekracza już 150m wygasając całkowicie w obrębie utworów kredowych. Nad tą wygaśniętą już dyslokacją zalega uszczelniający kompleks utworów neogenu o miąższości 700m. Na przekroju III-III' w obrębie utworów prekambru wielkość zrzutu ku zachodowi wynosi około 800m. Analogicznie jak to obserwowano na przekrojach geologicznych IX-IX' i II-II' dyslokacja ta wygasa ku górze . W spągu utworów jury wielkość zrzutu jest rzędu 75 m. Dyslokacja ta całkowicie wygasa w obrębie utworów kredy. Nad nią zalega uszczelniający kompleks utworów neogenu o miąższości 550m.

Jest to pozytywna cecha stwarzająca możliwość połączenia zbiorników Niepołomic i Liplasu (wypełniony utworami permo – triasu) w jeden zbiornik o znacznie większej pojemności.

Wschodnią granicę Zbiornika Niepołomice stanowi podniesienie Puszczy. Granicę tą możemy prześledzić na przekrojach geologicznych IX-IX' i II-II'. Ma ona również charakter tektoniczny dużej dyslokacji. Na przekroju IX-IX' kompleks węglanowy zbiornika kontaktuje z utworami ediakaru podniesienia (horstu) Puszczy. Strefa dyslokacyjna ograniczająca od południowego zachodu horst Puszczy zaznacza się w obrębie utworów ediakaru, kambru, węglanowego kompleksu dewońskiego i sięga aż po utwory permo-triasu. Miąższości utworów jury stwierdzone w otworach Puszcza 3 i Puszcza 4 wykluczają jej kontynuowanie się wyżej w utworach jurajskich. Opierając się na wynikach otworów Puszcza 3, Mikluszowice 1 i Strzelce Wielkie 1 możemy przyjąć, że wielkość wyniesienia utworów ediakaru w obrębie podniesienia Puszczy w stosunku do otworu Strzelce Wielkie 1 wynosi około 2700m. Dyslokacja ta ma charakter uszczelniający. Podobne stosunki tektoniczne obserwujemy również na przekroju II-II'. W obrębie utworów prekambru na wschodniej granicy Zbiornika Niepołomice obserwujemy zrzut, w kierunku zachodnim, wielkości około 700

m. Ku górze w utworach jury i kredy wielkość zrzutu jest nieznaczna rzędu 20 m. Dyslokacja nie przechodzi do utworów miocenu o miąższości 250m.

Północną granicę Zbiornika Niepołomice wyznacza dyslokacja o przebiegu SW-NE. Na północ od niej znajdują dwie duże struktury. Bardziej zachodnia to horst Rzeszotar, bardziej wschodnia to obniżenie Marszowic. Wzdłuż tej dyslokacji utwory prekambru zrzucone są ku południowi o 1000 m. Dyslokacja ta wygasa w spągu utworów jurajskich. Wyraźnie widać, że odgrywa ona rolę uszczelniającą.

Południową granicę zbiornika Niepołomice stanowi dyslokacja Sobniów – Czchów o przebiegu NWW-SEE. Na północ od tej dyslokacji, w obrębie zbiornika, następuje wyraźne podniesienie utworów paleozoiku. Wielkość podniesienia ocenić można na 800m. Dyslokacja ta nie sięga wyżej, przemieszcza ona jedynie utwory paleozoiku. W południowej części zbiornika, na północ od dyslokacji Sobniów-Czchów następuje systematyczne podnoszenie się kompleksu węglanowego, wzdłuż szeregu dyslokacji niższego rzędu. Układ stref dyslokacyjnych rozważyć można na przekroju geologicznym 7-7'. W części podkarpackiej zbiornika , pomimo jego zdyslokowania mamy do czynienia z korzystną sytuacją uszczelniającą. Składają się na to dwa składniki. Po pierwsze dyslokacje nie przechodzą poza utwory paleozoiku, po drugie istnieje miąższy kompleks utworów ekranujących składający się z utworów jury platformowej, osadów neogenu autochtonicznego, osadów neogenu allochtonicznego-jednostki zgłobickiej oraz utworów fliszu karpackiego. Na obszarze pozakarpackim zbiornika sytuacja się komplikuje. Dyslokacje obecne poprzednio jedynie w paleozoiku kontynuują się wyżej, dochodzącaż do spągu neogenu. Kompleksem uszczelniającym są tu jedynie utwory neogenu autochtonicznego o miąższości rzędu 750-300m.

Zbiornik Grobla

Zbiornik Grobla obejmuje otwory dewońsko-karbońskiego kompleksu węglanowego. Na obszarze proponowanego zbiornika spąg dewońsko-karbońskiego kompleksu węglanowego zalega na głębokościach od 3400 m do 1600 m. W centrum zbiornika w stropie dewońsko-karbońskiego kompleksu węglanowego pojawiają się utwory kulmu i permu. Od zachodu zbiornik ten ograniczony jest wyniesieniem Puszczy. Wyniesienie to ma charakter horstu na którym brak utworów paleozoicznych. Kontakt zbiornika Grobla z podniesieniem Puszczy możemy prześledzić na przekrojach geologicznych II-II' i IX-IX'. Na przekroju IX-IX' granicą tą jest pionowa dyslokacja sięgająca aż utworów kredy. Utwory ediakaru, stanowiące spąg zbiornika wzdłuż tej dyslokacji są zrzucone ku wschodowi o 2600 m. Wielkość zrzutu stwierdzono na podstawie zalegania stropu utworów ediakaru w otworach Mikluszowice 1 i Strzelce Wielkie 1. Wielkość zrzutu ku górze wygasa. W utworach jury wynosi ona około 170m. Potwierdzają to wyniki otworów Dziewin 2 i Strzelce Wielkie 1. W nadkładzie tej dyslokacji zalegają utwory miocenu o miąższości 550 m.

Na przekroju geologicznym II-II', o kierunku SWW-NEE, utwory ediakaru ulegają również zrzutowi ku wschodowi o 1800m. Dyslokacja ta jak wszystkie inne wygasa ku górze. W utworach mezozoiku obserwowany zrzut jest znikomy, nie większy niż 50 m. Pokrywa mioceńska w tym miejscu ma miąższość 250 m.

Wschodnią granicę zbiornika Niepołomice stanowi wielka strefa dyslokacyjna Tarnów-Radłów-Dobiesławice (T-R-D) o kierunku NW-SE. W części północno-wschodniej zbiornika jego ograniczeniem jest również podniesienie Kwikowa w obrębie którego na utworach ediakaru zalegają bezpośrednio osady mezozoiku.

(jura i kreda). Granicę tą możemy prześledzić na przekrojach geologicznych IX-IX' oraz VIII-VIII' (**Fig. 1.1.4_62**). Na przekroju IX-IX', wzdłuż dyslokacji Tarnów-Radłów-Dobiesławice obserwujemy zrzut utworów ediakaru ku południowemu zachodowi, w stosunku do otworu Kwików 1 rzędu 525 m. Dyslokacja ta w utworach mezozoiku charakteryzuje się znacznie mniejszym zrzutem rzędu 75 m. Dalej ku górze dyslokacja ta wygasa w spągu utworów neogenu. Miąższość utworów neogenu nad dyslokacją wynosi 525 m. Dokumentuje to otwór Szczurowa 11.

Na przekroju VIII-VIII' obserwujemy wzdłuż tej dyslokacji, w jej południowo zachodnim skrzydle, obserwujemy podniesienie dewońsko-karbońskiego kompleksu węglanowego o 800 m, w stosunku do skrzydła północno-wschodniego. Ku górze dyslokacja ta przedłuża się w utwory jury i kredy. Utwory jurajskie w skrzydle południowo-zachodnim są w przeciwieństwie do utworów paleozoiku zrzucone. Wielkość zrzutu wynosi 75 m. Porównując kierunki pionowych przesunięć na przekrojach IX-IX' i VIII-VIII' należy przyjąć, iż uskok ten ma charakter nożycowy. Tym samym rozwarcie uskoku następuje w kierunku południowo wschodnim.

Granica północna zbiornika Grobla przebiega wzdłuż równoleżnikowej dyslokacji łączącej północne zworniki podniesień Puszczy (na zachodzie) i Kwikowa (na wschodzie). Granica południowa zbiornika Grobla przebiega wzdłuż dyslokacji Brzesko-Wierzchosławice (B-W) o kierunku zbliżonym do równoleżnikowego. Dyslokację tą można prześledzić wzdłuż przekroju geologicznego poprzecznego 8-8' (**Fig. 1.1.4_63**). Dyslokacja ta zdaje się być południowym ograniczeniem, rozumianego w szerszym niż dotychczas zakresie, podniesienia Kwikowa. Południowo-wschodnie skrzydło tej dyslokacji jest zrzucone o około 350 m. Z przekroju tego (8–8`) wynika, że znajdujemy się już w marginalnej południowo-wschodniej części zbiornika Grobla. Miąższość dewońsko-karbońskiego kompleksu węglanowego spada tu do około 100 m. Centrum zbiornika jest pocięte szeregiem drugorzędnych dyslokacji o nieregularnym, chaotycznym przebiegu. Dyslokacje te zaznaczają się głównie w utworach ediakaru i paleozoiku. W mezozoiku ulegają one stopniowemu wygaszeniu. Nie obserwuje się ich w stanowiących ekran utworach neogenu.



Fig. 1.1.4_56 Lokalizacja potencjalnych zbiorników CO2 w dewońsko-karbońskim kompleksie węglanowym na tle mapy strukturalnej spągu kompleksu dewońskokarbońskich skał węglanowych na bloku górnośląskim i małopolskim wg. Z. Buła, R. Habryn (red., 2008) skala 1:200 000



Fig. 1.1.4_57 Lokalizacja potencjalnych zbiorników CO2 w dewońsko-karbońskim kompleksie węglanowym na tle mapy geologicznej odkrytej po karbon na bloku górnośląskim i małopolskim wg Z. Buła, R. Habryn (red., 2008) skala 1:50 000



Fig. 1.1.4_58 Przekrój geologiczny podłużny Wiśniowa – Mędrzechów (IX-IX')



Fig. 1.1.4_59 Przekrój geologiczny podłużny Grabie -Strużyska (II-II')



Fig. 1.1.4_60 Przekrój geologiczny podłużny Łodygowice – Wyciąże (III-III') 4-63



Fig. 1.1.4_61 Przekrój geologiczny poprzeczny Tarnawa-Wyciąże (6-6')



Fig. 1.1.4_62 Przekrój geologiczny podłużny Jadowniki-Wola Cholerzowska (VIII-VIII')



Fig. 1.1.4_63 Przekrój geologiczny poprzeczny Garbek – Kazimierza Wielka (8-8')



Fig. 1.1.4_64 Przekrój geologiczny poprzeczny Rajbrot - Tropiszów (7-7')

Rejon V - Lubelszczyzna (i Podlasie)

Analiza szczelności stref tektonicznych dla wybranych stref w rejonie Lublina (Grzegorz Wróbel)

Przedstawione opracowanie prezentuje wyniki prac wykonanych w ramach projektu "Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO2 wraz z ich programem monitorowania" dla rejonu V (Lubelszczyzna). Przedmiotem tych prac była analiza szczelności wybranych stref tektonicznych zidentyfikowanych w rejonie badań. Strefy uskokowe są niezwykle ważnym elementem w analizie geologicznej struktur perspektywicznych do bezpiecznego składowania CO2. Poprawne zidentyfikowanie i wykartowanie uskoków w obrębie zarówno interwałów zbiornikowych jak i uszczelniających jest kluczowym elementem pozwalającym na wykrycie i ocenę potencjalnych stref nieciągłości w poziomach zbiornikowych i/lub dróg migracji związanych ze strefami uskokowymi.

Wykorzystano metodykę postępowania omówioną w pracach dla rejonu Bełchatowa (I).

Analiza potencjału uszczelniającego stref uskokowych dla struktury Abramowa-Nasutowa

Do analizy potencjału uszczelniającego stref uskokowych wybrano uskoki główne deformujące najbardziej perspektywiczną z wstępnie wytypowanych struktur geologicznych – antyklinę Abramowa-Nasutowa (**Fig. 1.1.4_65**). Zlokalizowana jest ona w środkowej części jednostki tektonicznej wyższego rzędu, tj. wyniesienia centralnego Stężyca – Mełgiew, której oś ma kierunek w przybliżeniu zgodny z osią rowu lubelskiego, tj. NW-SE. W obrębie wspomnianego powyżej wyniesienia centralnego odkryto większość złóż węglowodorów na Lubelszczyźnie. Rozwój strukturalny omawianej jednostki wiąże się z końcowym i zarazem głównym etapem inwersji rowu lubelskiego w późnym westfalu (Narkiewicz i in., 1998).

Do obliczenia potencjału uszczelniającego, wyrażonego parametrem SGR, niezbędne są dane określające ilość materiału ilastego w profilu litologicznym. Dla badanych otworów dostępne były zarówno krzywe profilowań naturalnego promieniowania gamma (GR) jak również krzywe określające udział procentowy iłowców w profilu otworu (VSH) (**Fig. 1.1.4_66, 67, 68**). Warto zaznaczyć, że skala pionowa na figurach z wynikami modelowania podaje głębokość otworu w metrach liczoną od poziomu morza (True Vertical Depth Sub-Sea – TVDSS), a zatem wszystkie wartości głębokości oznaczone jednostką "m ppm" (metry poniżej poziomu morza) są zredukowane o wysokość nad poziom morza danego otworu (otwór Abramów-1 położony jest 155 m npm, otwór Glinnik-2 – 175 m npm, a otwór Abramów-8 – 202 m npm). Na wszystkich figurach przedstawiających rozkład parametru SGR poziomy kolektorskie, które zostały wydzielone w ramach zadania **1.1.3**, zaznaczono na żółto, natomiast wytypowane poziomy uszczelniające na zielono.

Na Fig. 1.1.4_67 – 69, 71-73 i 75-77 zaprezentowano wyniki obliczeń parametru SGR dla otworów, odpowiednio, Abramów-1, Glinnik-2 i Abramów-8. Czarna pionowa linia przecinająca pole z rozkładem wartości parametru SGR (trójkąt interpretacyjny), widoczna na wszystkich w/w figurach, oznacza miejsce wskazujące wartość parametru SGR dla zadanej wielkości zrzutu uskoku. Dodatkowo

wyniki obliczeń potencjału uszczelniającego dla wszystkich zadanych wielkości zrzutów przedstawiono w dwóch wersjach. Na figurach oznaczonych indeksem "a" oprócz rozkładu wielkości parametru SGR, na trójkącie interpretacyjnym zaznaczono również położenie w profilu litologicznych warstw uszczelniających, wskazując jednocześnie na typ superpozycji, tj. iłowce/iłowce, iłowce/piaskowce, piaskowce/iłowce. Na figurach z indeksem "b" zaprezentowano trójkąt interpretacyjny przedstawiający wyłącznie dystrybucję parametru SGR.

Struktura Abramowa – Nasutowa

Struktura Abramowa – Nasutowa zlokalizowana jest w centralnej części basenu lubelskiego, ok. 10km na północ od Lublina. Jest to antyklina przyuskokowa o przebiegu NW-SE (**Fig. 1.1.4_65**), która rozwinęła się w wyniku inwersji późnopaleozoicznego (dewońsko-karbońskiego) basenu lubelskiego w późnym westfalu. Do analizy potencjału uszczelniającego uskoków, przecinających antyklinę Abramowa – Nasutowa wykorzystano trzy głębokie wiercenia rozpoznające te strukturę i zlokalizowane w różnych jej częściach. Otwór Abramów-1 położony w północno-zachodniej części struktury, otwór Glinnik-2 usytuowany w centralnej części struktury oraz otwór Abramów-8 zlokalizowany na południowo-wschodnim jej krańcu (**Fig. 1.1.4_65**). W wierceniach tych w obrębie karbonu scharakteryzowano od 1 do 3 poziomów zbiornikowych oraz interwałów uszczelniających. Większość perspektywicznych poziomów sekwestracyjnych zlokalizowanych jest w namurze (**Fig. 1.1.4_66, 70, 74**) z wyjątkiem jednego, który jest wieku dolnowestfalskiego w otworze Abramów-8 (**Fig. 1.1.4_74**).

Wyniki analiz potencjału uszczelniającego dla wszystkich 3 wierceń pokazują dobre lub bardzo dobre uszczelnienie w obrębie całego profilu karbonu. Ma to związek ze znacznym udziałem iłowców w profilu litologicznym karbonu, który w otworze Abramów-1 osiąga ponad 73%, a w otworze Abramów-8 ponad 67%. Jedynie w otworze Glinnik-2 procentowy udział osadów ilastych i piaskowcowych jest bardziej wyrównany, tj. odpowiednio ok. 54%-46%.

W przypadku profilu otworu Abramów-1 dla każdej analizowanej wartości zrzutu uskoku, tj. 50m, 100m i 200m uskoki przecinające perspektywiczne horyzonty namuru powinny stanowić solidne uszczelnienie (**Fig. 1.1.4_67, 68, 69**). Wartości parametru SGR jedynie lokalnie, dla uskoków o zrzutach do 100m spadają do poziomu 30<SGR<50 (**Fig. 1.1.4_68**). Dla większych zrzutów potencjał uszczelniający osiąga maksymalne wartości.

Potencjał uszczelniający uskoków obliczony w oparciu o profil litologiczny otworu Glinnik-2 charakteryzuje się stosunkowo niższymi wartościami niż dla otworu Abramów-1. Największe wartości parametru SGR notowane są w wyższej partii karbonu, w westfalu, gdzie dominuje SGR >50 (**Fig. 1.1.4_71**). W namurze, gdzie zlokalizowane są wszystkie poziomy kolektorskie, parametr SGR osiąga maksymalne wartości tylko lokalnie. Przy uskoku o zrzucie od około 100 do 200m obserwujemy występowanie po obu stronach uskoku dwóch wytypowanych kolektorów, CN-k1 w skrzydle wiszącym i CN-k2 w skrzydle zrzuconym (**Fig. 1.1.4_72, 73**). Przy zrzutach do ok. 120m strefa uskokowa pomiędzy tymi kolektorami charakteryzuje się maksymalnymi potencjałem uszczelniającym. Wraz ze wzrostem wielkości zrzutu parametr SGR, kwantyfikujący potencjał uszczelniający spada do 30<SGR<50. Niemniej jednak można zakładać, że w takiej sytuacji, czyli

zestawienia naprzeciw siebie obu ww. kolektorów, strefa uskokowa będzie odgrywać rolę silnej membrany uniemożliwiającej łączność hydrauliczną obu kolektorów.

Podobne wyniki analiz potencjału uszczelniającego, jak w przypadku wiercenia Abramów-1, obserwujemy w otworu Abramów-8 (Fig. 1.1.4_75, 76, 77). Tu również dominują maksymalne wartości parametru SGR, tj. powyżej 50. Jedynie dla najwyższego poziomu zbiornikowego (CW1-k3) lokalnie obserwujemy spadek wartości parametru SGR do poziomu 30-50, dla uskoków o zrzutach do ok. 150m. W przypadku większych uskoków potencjał uszczelniający uskoków w całym analizowanym przedziale głębokościowym osiąga najwyższe wartości (Fig. 1.1.4_77). Dla uskoku o zrzucie ok. 200m obserwujemy występowanie naprzeciw siebie, po dwóch stronach uskoku, wyższego kolektora namuru (CN-k2) w skrzydle wiszącym oraz kolektora dolnego westfalu (CW1-k3) w skrzydle zrzuconym (Fig. 1.1.4_77). W takiej sytuacji jedynie uszczelnienie strefy uskokowej może przeciw ograniczać lub uniemożliwiać przepływ płynów złożowych i zarazem kontakt hydrauliczny pomiędzy kolektorami. W przypadku otworu Abramów-8, strefa uskokowa w tym miejscu charakteryzuje się maksymalnymi wartościami. Podsumowując wyniki analiz szczelności uskoków dla karbonu w rejonie wyniesienia centralnego można stwierdzić, że uskoki przecinające poziomy perspektywiczne dla sekwestracji CO2 wykazują się wysokim potencjałem uszczelniającym.



Fig. 1.1.4_65 Mapa lokalizacyjna profili sejsmicznych i otworów wiertniczych oraz analizowanych struktur geologicznych w rejonie V (Lubelszczyzna).



Fig. 1.1.4_66 Fragment profilu otworu Abramów-1 z zaznaczonym poziomem zbiornikowym (żółta warstwa) i uszczelniającym (zielona warstwa).




Fig. 1.1.4_67 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Abramów-1 dla wielkości zrzutu uskoku 50m





Fig. 1.1.4_68 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Abramów-1 dla wielkości zrzutu uskoku 100m.





Fig. 1.1.4_69 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Abramów-1 dla wielkości zrzutu uskoku 200m.



Fig. 1.1.4_70 Fragment profilu otworu Glinnik-2 z zaznaczonymi poziomami zbiornikowymi (żółte warstwy) i uszczelniającymi (zielone warstwy).





Fig. 1.1.4_71 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Glinnik-2 dla wielkości zrzutu uskoku 50m.





Fig. 1.1.4_72 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Glinnik-2 dla wielkości zrzutu uskoku 100m.





Fig. 1.1.4_73 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Glinnik-2 dla wielkości zrzutu uskoku 200m.



Fig. 1.1.4_74 Fragment profilu otworu Abramów-8 z zaznaczonymi poziomami zbiornikowymi (żółte warstwy) i uszczelniającymi (zielone warstwy).





Fig. 1.1.4_75 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Abramów-8 dla wielkości zrzutu uskoku 50m.





Fig. 1.1.4_76 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Abramów -8 dla wielkości zrzutu uskoku 100m.





Fig. 1.1.4_77 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Abramów-8 dla wielkości zrzutu uskoku 200m

Rejon VI - Wielkopolska - Kujawy

Analiza szczelności stref tektonicznych dla wybranych stref w rejonie Poznania i Kujaw (Grzegorz Wróbel)

Przedstawione opracowanie prezentuje wyniki prac wykonanych w ramach projektu "Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO2 wraz z ich programem monitorowania" dla rejonu VI (Wielkopolska-Kujawy). Przedmiotem tych prac była analiza szczelności potencjalnych stref uskokowych, które mogą występować zarówno w osadach klastycznych czerwonego spągowca jak i w mezozoicznych osadach jurajsko-kredowych. Strefy uskokowe są niezwykle ważnym elementem w analizie geologicznej struktur perspektywicznych do bezpiecznego składowania CO2. Poprawne zidentyfikowanie i wykartowanie uskoków w obrębie zarówno interwałów zbiornikowych jak i uszczelniających jest kluczowym elementem pozwalającym na wykrycie i ocenę potencjalnych stref nieciągłości w poziomach zbiornikowych i/lub dróg migracji związanych ze strefami uskokowymi.

Wykorzystano metodykę postępowania omówioną w pracach dla rejonu Bełchatowa (I).

Analiza potencjału uszczelniającego stref uskokowych występujących w osadach mezozoicznych w rejonie Kujaw

Do analizy potencjału uszczelniającego stref uskokowych wybrano mezozoiczne profile litologicznostratygraficzne z dwóch otworów wiertniczych zlokalizowanych na wschód od Poznania: Byczyna-1 i Koło IG-3 (**Fig. 1.1.4_78**). Dla otworu Byczyna-1 (**Fig. 1.1.4_79**) scharakteryzowano uskoki przecinające wytypowane poziomy sekwestracyjne w obrębie osadów jurajskich. Z kolei dla otworu Koło IG-3 opisano potencjalne uskoki tnące wytypowane kredowe poziomy sekwestracyjne, jak również 2 kolektory jurajskie odpowiadające głównym poziomom zbiornikowym wytypowanym w otworze Byczyna-1, tj. JA1-k+JTO3-k oraz JBJ1-k (**Fig. 1.1.4_79**).

Do obliczenia potencjału uszczelniającego, wyrażonego parametrem SGR, niezbędne są dane określające ilość materiału ilastego w profilu litologicznym. Dla badanych otworów dostępne były wyłącznie krzywe profilowań naturalnego promieniowania gamma (GR), która w przypadku otworu Byczyna-1 dodatkowo nie była skalibrowana do uniwersalnych jednostek API (**Fig. 1.1.4_79**). Warto zaznaczyć, że skala pionowa na figurach z wynikami modelowania podaje głębokość otworu w metrach liczoną od poziomu morza (True Vertical Depth Sub-Sea – TVDSS), a zatem wszystkie wartości głębokości oznaczone jednostką "m ppm" (metry poniżej poziomu morza) są zredukowane o wysokość nad poziom morza danego otworu (otwór Byczyna-1 położony jest 90 m npm, a otwór Koło IG-3 – 110 m npm). Na wszystkich figurach przedstawiających rozkład parametru SGR poziom kolektorski, który został wydzielony w ramach zadania **1.1.3**, zaznaczono na żółto, natomiast wytypowany poziom uszczelniający na zielono.

Na Fig. 1.1.4_80 - 85 i 87 - 90 oraz 92 - 95 zaprezentowano wyniki obliczeń parametru SGR dla otworów, odpowiednio, Byczyna-1 i Koło IG-3 dla kredy oraz jury. Czarna pionowa linia przecinająca

pole z rozkładem wartości parametru SGR (trójkąt interpretacyjny), widoczna na wszystkich w/w figurach, oznacza miejsce wskazujące wartość parametru SGR dla zadanej wielkości zrzutu uskoku. Dla otworu Byczyna-1 wartości parametru SGR wahają się od 1000 do 3000 co wynika z faktu, iż dostępna krzywa profilowania naturalnego promieniowania gamma (GR) nie była skalibrowana do standardowych jednostek API.

Otwór Byczyna-1 położony jest na NE skrzydle antykliny Konar (**Fig. 1.1.4_78**). W wierceniu tym scharakteryzowano 5 poziomów zbiornikowych (JS-k1, JS-k2, JPL3-k, JTO3-k+JA1-k i JBJ1-k) oraz 6 interwałów uszczelniających (JPL1-u, JTO1-u, JA3-u, JBJ3-u, JBT1-u i JBT2-u) (**Fig. 1.1.4_78**), jednakże najważniejszym kolektorem jest poziom piaskowcowy JTO3-k+JA1-k (**Fig. 1.1.4_79**).

Wyniki analiz potencjału uszczelniającego uskoków pokazują, że przy uskokach o zrzutach powyżej 50m następuje występowanie naprzeciw siebie, po obu stronach uskoku, górnej części kolektora JTO3-k+JA1-k w skrzydle wiszącym i kolektora JBJ1-k w skrzydle zrzuconym (**Fig. 1.1.4_80**). Dla uskoków o zrzutach powyżej ok. 100m wartość parametru SGR spada do 1400-1600 (**Fig. 1.1.4_82** i **82**) co oznacza poziom graniczny pomiędzy uskokami szczelnymi i drożnymi. Dla jeszcze większych wartości zrzutu uskoku, tj. ok. 200m, potencjał uszczelniający stref uskokowych oddzielających dolną część kolektora JTO3-k+JA1-k od kolektora JBJ1-k (**Fig. 1.1.4_83**) osiąga wartość krytyczną SGR = 1300-1400 co oznacza duże prawdopodobieństwo łączności hydraulicznej przez strefę uskokowa pomiędzy tymi dwoma kolektorami. Tak niski poziom potencjału uszczelniającego utrzymuje się do miejsca, gdzie kolektor w skrzydle zrzuconym przesunie się na wysokość dolnotoarckiego uszczelnienia (JTO1-u).

Dla większych wartości zrzutów uskoków, tj. powyżej ok. 300m (**Fig. 1.1.4_84** i **85**) wartość parametru SGR nie spada poniżej 1400, co oznacza, że potencjał uszczelniający utrzymuje się w strefie przejściowej pomiędzy uskokami szczelnymi i drożnymi oraz powyżej tego poziomu. Generalnie potencjał uszczelniający uskoków dla utworów jurajskich w otworze Byczyna-1 można ocenić jako niski, a lokalnie krytyczny.

Otwór Koło IG-3 zlokalizowany jest pomiędzy 3 kredowymi strukturami geologicznymi wytypowanymi wstępnie jako potencjalne podziemne składowiska CO2: antykliną Trześniowa na NW, antykliną Wartkowic na SE i antykliną Turka na SW (**Fig. 1.1.4_78**). W wierceniu Koło IG-3 przeanalizowano zarówno dolnokredowe kolektory (CrA1+2-k i CrW1B-k) (**Fig. 1.1.4_86**), dla których uszczelnienie stanowią utwory kredy górnej, jak i główne jurajskie poziomy zbiornikowe (JTO3+JA1 i JBJ1) (**Fig. 1.1.4_91**).

Generalnie potencjał uszczelniający uskoków przecinających utwory kredowe w otworze Koło IG-3 charakteryzuje się wysokimi wartościami parametru SGR: 30-50 i więcej. Jedynie lokalnie przy małych zrzutach uskoków, tj. do ok. 50m, gdy po obu stronach uskoku znajdują się piaskowce górnego kolektora kredowego wartości parametru SGR są mniejsze od 20 (**Fig. 1.1.4_85** i **86**). Oznacza to, że występuje tam duże prawdopodobieństwo łączności hydraulicznej pomiędzy zuskokowanymi blokami kolektora CrA1+2-k. W przypadku dolnego kolektora (CrW1B-k) obserwujemy wysoki potencjał uszczelniający dla uskoku oddzielającego go od górnego kolektora, tj. przy zrzutach rzędu 100-150m (**Fig. 1.1.4_89** i **90**).

Wyniki analiz potencjału uszczelniającego uskoków dla utworów jurajskich w otworze Koło IG-3 pokazują wysokie wartości parametru SGR, tj. powyżej 30, w całym analizowanym profilu. Oznacza to, iż uskoki deformujące poziomy sekwestracyjne w rejonie omawianego otworu powinny stanowić barierę dla migracji płynów.

Analiza potencjału uszczelniającego stref uskokowych występujących w osadach klastycznych czerwonego spągowca rejonie Poznania

Do analiz potencjału uszczelniającego stref uskokowych występujących w obrębie utworów podcechsztyńskich wybrano profile litologiczno-stratygraficzne z dwóch otworów wiertniczych zlokalizowanych na południowy-zachód od Poznania: Buk-10 i Bukowiec-2 (**Fig. 1.1.4_96**).

Na analizowanym obszarze w obrębie podłoża pod-cechsztyńskiego powszechnie występują uskoki tnące osady czerwonego spągowca (oraz utwory niżej leżące). Uskoki te nie kontynuują się jednak w utworach młodszych, zaliczanych do górnego permu, który stanowi znakomity regionalny poziom uszczelniający dla złóż w czerwonym spągowcu. Ze względu na występowanie zwartej pokrywy ewaporatów cechstyńskich przykrywających perspektywiczne piaskowce górnego czerwonego spągowca (oznaczone jako "Pscg" na **Fig. 1.1.4_97 - 106**) w trakcie analiz potencjału uszczelniającego uskoków skupiono się wyłącznie na uskokach występujących w obrębie utworów pod-cechsztyńskich.

Tak jak wspomniano w poprzednim rozdziale, do obliczenia potencjału uszczelniającego, wyrażonego parametrem SGR, niezbędne są dane determinujące zawartość materiału ilastego w profilu litologicznym. Dla obu analizowanych otworów dostępne były, oprócz krzywych profilowań naturalnego promieniowania gamma (GR) skalibrowanych w jednostkach API, krzywe VSH określające procentową zawartość frakcji ilastej. Dane te pozwalają uzyskać bardziej precyzyjne wyniki w tego typu analizach. Podobnie jak w przypadku powyżej analizowanych otworów skala pionowa na figurach z wynikami modelowania podaje głębokość otworu w metrach liczoną od poziomu morza (True Vertical Depth Sub-Sea – TVDSS), a zatem wszystkie wartości głębokość nad poziom morza danego otworu (otwór Buk-10 położony jest 82,5 m npm, a otwór Bukowice-2 – 90,8 m npm). Na wszystkich figurach przedstawiających rozkład parametru SGR poziom kolektorski czerwonego spągowca, zaznaczono na żółto, natomiast uszczelniające utwory cechsztynu na zielono.

Na Fig. 1.1.4_98 - 101 i 103 - 106 zaprezentowano wyniki obliczeń parametru SGR dla otworów, odpowiednio, Buk-10 i Bukowiec-2. Czarna pionowa linia przecinająca pole z rozkładem wartości parametru SGR (trójkąt interpretacyjny), widoczna na wszystkich w/w figurach, oznacza miejsce wskazujące wartość parametru SGR dla zadanej wielkości zrzutu uskoku.

Wyniki obliczeń potencjału uszczelniającego uskoków dla obu omawianych otworów są bardzo podobne. Pole rozkładu wartości parametru SGR zdominowane jest przez wartości 0,0 – 0,2, jedynie lokalnie dla otworu Buk-10 dla zrzutów poniżej 50m SGR osiąga wartości 0,2-0,3. Oznacza to, iż uskoki przecinające utwory czerwonego spągowca są drożne dla przepływu płynów, bez względu na wielkość zrzutu uskoku.



Fig. 1.1.4_78 Mapa lokalizacyjna otworów wiertniczych z zaznaczoną lokalizacją analizowanych mezozoicznych wierceń w rejonie VI (Wielkopolska)



Fig. 1.1.4_79 Fragment profilu otworu Byczyna-1 z zaznaczonymi poziomami zbiornikowymi (żółte warstwy) i uszczelniającymi (zielone warstwy)



Fig. 1.1.4_80 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) dla otworu Byczyna-1 dla wielkości zrzutu uskoku 50m



Fig. 1.1.4_81 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) dla otworu Byczyna-1 dla wielkości zrzutu uskoku 100m



Fig. 1.1.4_82 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) dla otworu Byczyna-1 dla wielkości zrzutu uskoku 150m



Fig. 1.1.4_83 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) dla otworu Byczyna-1 dla wielkości zrzutu uskoku 200m



Fig. 1.1.4_84 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) dla otworu Byczyna-1 dla wielkości zrzutu uskoku 300m



Fig. 1.1.4_85 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) dla otworu Byczyna-1 dla wielkości zrzutu uskoku 400m



Fig. 1.1.4_86 Fragment profilu otworu Koło IG-3 z zaznaczonymi kredowymi poziomami zbiornikowymi (żółte warstwy)



Fig. 1.1.4_87 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) w obrębie dolnej kredy dla otworu Koło IG-3 dla wielkości zrzutu uskoku 25m



Fig. 1.1.4_88 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) w obrębie dolnej kredy dla otworu Koło IG-3 dla wielkości zrzutu uskoku 50m



Fig. 1.1.4_89 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) w obrębie dolnej kredy dla otworu Koło IG-3 dla wielkości zrzutu uskoku 100m



Fig. 1.1.4_90 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) w obrębie dolnej kredy dla otworu Koło IG-3 dla wielkości zrzutu uskoku 150m



Fig. 1.1.4_91 Fragment profilu otworu Koło IG-3 z zaznaczonymi jurajskimi poziomami zbiornikowymi (żółte warstwy) i uszczelniającymi (zielone warstwy)



Fig. 1.1.4_92 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) w obrębie jury dla otworu Koło IG-3 dla wielkości zrzutu uskoku 50m



Fig. 1.1.4_93 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) w obrębie jury dla otworu Koło IG-3 dla wielkości zrzutu uskoku 100m



Fig. 1.1.4_94 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) w obrębie jury dla otworu Koło IG-3 dla wielkości zrzutu uskoku 150m



Fig. 1.1.4_95 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) w obrębie jury dla otworu Koło IG-3 dla wielkości zrzutu uskoku 200m



Fig. 1.1.4_96 Mapa lokalizacyjna otworów wiertniczych z zaznaczoną lokalizacją analizowanych permskich wierceń w rejonie VI (Wielkopolska).



Fig. 1.1.4_97 Fragment profilu otworu Buk-10 z zaznaczonym poziomem zbiornikowym czerwonego spągowca (żółta warstwa) i uszczelnieniem utworami cechsztynu (zielona warstwa)



Fig. 1.1.4_98 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) dla otworu Buk-10 dla wielkości zrzutu uskoku 50m



Fig. 1.1.4_99 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) dla otworu Buk-10 dla wielkości zrzutu uskoku 100m


Fig. 1.1.4_100 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) dla otworu Buk-10 dla wielkości zrzutu uskoku 150m



Fig. 1.1.4_101 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) dla otworu Buk-10 dla wielkości zrzutu uskoku 200m



Fig. 1.1.4_102 Fragment profilu otworu Bukowiec-2 z zaznaczonym poziomem zbiornikowym czerwonego spągowca (żółta warstwa) i uszczelnieniem utworami cechsztynu (zielona warstwa)



Fig. 1.1.4_103 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) dla otworu Bukowiec-2 dla wielkości zrzutu uskoku 50m



Fig. 1.1.4_104 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) dla otworu Bukowiec-2 dla wielkości zrzutu uskoku 100m



Fig. 1.1.4_105 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) dla otworu Bukowiec-2 dla wielkości zrzutu uskoku 150m



Fig. 1.1.4_106 Rozkład parametru SGR (Shale Gouge Ratio) dla otworu Bukowiec-2 dla wielkości zrzutu uskoku 200m

Rejon VII - NW Polska

Analiza szczelności stref tektonicznych dla wybranych stref w rejonie Szczecina i Koszalina (Grzegorz Wróbel)

Przedstawione opracowanie prezentuje wyniki prac wykonanych w ramach projektu "Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO2 wraz z ich programem monitorowania" dla rejonu VII (NW Polska). W trakcie interpretacji danych sejsmicznych dla wybranych struktur z rejonu Szczecina nie zidentyfikowano żadnych stref uskokowych, dlatego przedmiotem prac dla tego rejonu była analiza szczelności potencjalnych stref tektonicznych, które mogą występować w osadach mezozoicznych. Z kolei w rejonie Koszalina perspektywiczne utwory triasowe zdeformowane są różnej skali uskokami związanymi z rozwojem i inwersją bruzdy środkowopolskiej. Strefy uskokowe są niezwykle ważnym elementem w analizie geologicznej struktur perspektywicznych do bezpiecznego składowania CO2. Poprawne zidentyfikowanie i wykartowanie uskoków w obrębie zarówno interwałów zbiornikowych jak i uszczelniających jest kluczowym elementem pozwalającym na wykrycie i ocenę potencjalnych stref nieciągłości w poziomach zbiornikowych i/lub dróg migracji związanych ze strefami uskokowymi.

Wykorzystano metodykę postępowania omówioną w pracach dla rejonu Bełchatowa (I).

Analiza potencjału uszczelniającego stref uskokowych dla struktur Choszczna i Suliszewa

Do analizy potencjału uszczelniającego stref uskokowych wybrano profile litologiczno-stratygraficzne skonstruowane dla dwóch struktur zlokalizowanych w rejonie Szczecina – struktury Choszczna i struktury Suliszewa. Interpretacja strukturalna danych sejsmicznych wykonana w ramach niniejszego projektu nie wykazała deformacji nieciągłych w kompleksie jurajsko-triasowym ww. struktur. Jednakże, w podsumowaniu wyników interpretacji sejsmicznej wskazano na niską jakość danych sejsmicznych, co może mieć wpływ na wiarygodność i jednoznaczność interpretacji. Dlatego w tym opracowaniu rozważano potencjał uszczelniający ewentualnych, teoretycznych uskoków, które mogłyby powstać w osadach mezozoicznych budujących struktury Choszczna i Suliszewa. Rozważano różne wielkości zrzutów uskoków, również takie które mogłyby być poniżej rozdzielczości analizowanych danych sejsmicznych. Obie omawiane struktury to antykliny, które rozwinęła się ponad poduszkami solnymi na przełomie kredy górnej i paleogenu, w trakcie inwersji bruzdy środkowopolskiej.

Do obliczenia potencjału uszczelniającego, wyrażonego parametrem SGR, niezbędne są dane określające ilość materiału ilastego w profilu litologicznym. Dla badanych otworów dostępne była wyłącznie krzywa profilowania naturalnego promieniowania gamma (GR) określająca ten parametr. Warto zaznaczyć, że skala pionowa na figurach z wynikami modelowania podaje głębokość otworu w metrach liczoną od poziomu morza (True Vertical Depth Sub-Sea – TVDSS), a zatem wszystkie wartości głębokości oznaczone jednostką "m ppm" (metry poniżej poziomu morza) są zredukowane o wysokość nad poziom morza danego otworu (otwór Choszczno IG-1 położony jest 65 m npm, a otwór Radęcin-1 – 77,5 m npm). Na wszystkich figurach przedstawiających rozkład parametru SGR poziomy kolektorskie, które zostały wydzielone w ramach zadania **1.1.3**, zaznaczono na żółto, natomiast wytypowane poziomy uszczelniające na zielono.

Na **Figurach 108 - 110, 112 - 114** zaprezentowano wyniki obliczeń parametru SGR dla otworów Choszczno IG-1 i Radęcin-1. Czarna pionowa linia przecinająca pole z rozkładem wartości parametru SGR (trójkąt interpretacyjny), widoczna na wszystkich w/w figurach, oznacza miejsce wskazujące wartość parametru SGR dla zadanej wielkości zrzutu uskoku. Dodatkowo wyniki obliczeń potencjału uszczelniającego dla wszystkich zadanych wielkości zrzutów przedstawiono w dwóch wersjach. Na figurach oznaczonych indeksem "a" oprócz rozkładu wielkości parametru SGR, na trójkącie interpretacyjnym zaznaczono również położenie w profilu litologicznych warstw uszczelniających, wskazując jednocześnie na typ superpozycji, tj. iłowce/iłowce, iłowce/piaskowce, piaskowce/iłowce. Na figurach z indeksem "b" zaprezentowano trójkąt interpretacyjny przedstawiający wyłącznie dystrybucję parametru SGR.

Struktura Choszczna

Struktura Choszczna to antyklina o przebiegu NW-SE (**Fig. 1.1.4_107**), która rozwinęła się ponad poduszką solną na przełomie kredy górnej i paleogenu, w trakcie inwersji bruzdy środkowopolskiej. Do analizy potencjału uszczelniającego uskoków, które teoretycznie mogą deformować antyklinę Choszczna wykorzystano jedyne głębokie wiercenie rozpoznające te strukturę – Choszczno IG-1. W wierceniu tym scharakteryzowano 2 poziomy zbiornikowe (JPL3-k i JH+S-k) oraz 2 interwały uszczelniając(JTO1-u i JPL1-u) (**Fig. 1.1.4_108**).

Wyniki analiz potencjału uszczelniającego pokazują, że przy niewielkich uskokach o zrzutach do 10-15m, wielkość przesunięcia pionowego nie przekracza miąższości zarówno dolnego jak i górnego poziomu uszczelniającego. Nie ma zatem możliwości kontaktu, poprzez strefę uskokową, dolnego i górnego kolektora, jak również górnego kolektora z wyżej leżącymi osadami jury środkowej (**Fig. 1.1.4_109**).

Uskoki o zrzutach powyżej 20m powodują występowanie naprzeciw siebie, po dwóch stronach uskoku, górnej części dolnego kolektora (JH+S-k) i dolnej części górnego kolektora (JPL3-k) (**Fig. 1.1.4_110**). W przypadku zrzutów do 60-70m strefa uskokowa powinna być mocną membraną uszczelniającą i barierą dla przepływu płynów występujących w kolektorach. Wartości parametru SGR osiągają wtedy maksymalne wartości (> 50).

W przypadku uskoków o zrzutach przekraczających ok. 80m, gdy dolny poziom zbiornikowy (JH+S-k) znajdujący się w skrzydle wiszącym występuje naprzeciw górnego poziomu zbiornikowego (JPL3-k) w skrzydle zrzuconym, strefa uskokowa stanowi stosunkowo słabszą barierę uszczelniającą – SGR o wartościach 30-50 (**Fig. 1.1.4_111**). Może to w pewnych warunkach nasycenia kolektora CO2 (duża różnica ciśnień w obu kolektorach) doprowadzić do łączności hydraulicznej dolnego i górnego kolektora.

Rozważane trzy wielkości uskoków mogących teoretycznie występować w obrębie utworów mezozoicznych struktury Choszczna charakteryzują się dobrym potencjałem uszczelniającym. Najmniejsze uskoki o zrzutach do 10-15m, które na słabej jakości danych sejsmicznych mogą być elementami poniżej rozdzielczości danych sejsmicznych, wykazują dobry potencjał uszczelniający w najwyższych partiach obu kolektorów wygenerowany poprzez obecność warstw uszczelniających (JTO1-u i JPL1-u) po drugiej stronie strefy uskokowej. Uskoki o większych zrzutach również powinny stanowić barierę dla przepływu mediów złożowych, z tą różnicą, że w tym przypadku po obu stronach strefy uskokowej znajdują się poziomy zbiornikowe, tj. JH+S-k i JPL3-k.

Struktura Suliszewa

Struktura Suliszewa to antyklina o przebiegu NW-SE, która ukształtowała się, podobnie jak powyżej omówiona antyklina Choszczna, na przełomie kredy i paleogenu, w trakcie inwersji bruzdy środkowopolskiej. Do analizy potencjału uszczelniającego stref uskokowych wybrano otwór Radęcin-1, zlokalizowany w południowo południowo-wschodniej kulminacji struktury Suliszewa (por. zadanie **1.1.3**). W otworze tym, podobnie jak w wierceniu Choszczno IG-1, zinterpretowano 2 poziomy zbiornikowe (JH+S-k i JPL3-k) i dwa poziomu uszczelniające (JPL1-u i JTO1-u) (**Fig. 1.1.4_112**).

Analizując wyniki potencjału uszczelniającego założonych, teoretycznych stref uskokowych w obrębie struktury Suliszewa można wysnuć podobne wnioski jak w przypadku struktury Choszczna. Ma to oczywiście związek z podobnym wykształceniem litologicznym tej części profilu otworu, w której zlokalizowane są poziomy sekwestracyjne.

Przy mniejszych uskokach o zrzutach do 20m, czyli takich które najczęściej są poniżej rozdzielczości danych sejsmicznych, przystropowe części obu kolektorów uszczelnione są przez warstwy ilaste znajdujące się po drugiej tronie uskoku (**Fig. 1.1.4_113**). Przy większych wartościach zrzutu uskoku, w sytuacji zestawienia dolnego poziomu zbiornikowego (JH+S-k) naprzeciw górnego poziomu zbiornikowego (JPL3-k) najważniejszą role odgrywa strefa uskokowa sama w sobie. Przy zrzutach uskoku do ok. 60m potencjał uszczelniający uskoku osiąga maksymalne wartości (SGR >50) (**Fig. 1.1.4_114**). Strefa uskokowa przy większych wartościach zrzutów, tj. powyżej 60-70m charakteryzuje się nieco mniejszym potencjałem uszczelniającym (SGR 30-50), który jednakże powinien zapewniać membranę uszczelniającą rozdzielającą oba kolektory.

Górna część górnego poziomu zbiornikowego (JPL3-k) w analizowanym zakresie wielkości zrzutu uskoku, tj. od 0 do ok. 150m, ma zapewnione uszczelnienie, które dla mniejszych uskoków tworzone jest przez górny poziom uszczelniający. Z kolei dla zrzutów powyżej 40-50m wynika z wysokiego potencjału uszczelniającego strefy uskokowej oraz dodatkowo z obecności przewarstwień ilastych występujących w dolnej części utworów jury środkowej (**Fig. 1.1.4_115**).



Fig. 1.1.4_107 Mapa lokalizacyjna profili sejsmicznych i otworów wiertniczych oraz analizowanych struktur geologicznych w Szczecina (NW Polska).



Fig. 1.1.4_108 Fragment profilu otworu Choszczno IG-1 z zaznaczonymi poziomami zbiornikowymi (żółte warstwy) i uszczelniającymi (jasnoszare warstwy)



Fig. 1.1.4_109 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Choszczno IG-1 dla wielkości zrzutu uskoku 10m



Fig. 1.1.4_110 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Choszczno IG-1 dla wielkości zrzutu uskoku 50m



Fig. 1.1.4_111 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Choszczno IG-1 dla wielkości zrzutu uskoku 80m



Fig. 1.1.4_112 Fragment profilu otworu Radęcin-1 z zaznaczonymi poziomami zbiornikowymi (żółte warstwy) i uszczelniającymi (jasnoszare warstwy).



Fig. 1.1.4_113 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Radęcin-1 dla wielkości zrzutu uskoku 10m



Fig. 1.1.4_114 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Radęcin-1 dla wielkości zrzutu uskoku 60m



Fig. 1.1.4_115 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Radęcin-1 dla wielkości zrzutu uskoku 100m

Analiza potencjału uszczelniającego stref uskokowych dla rejonu Koszalina

Do analiz potencjału uszczelniającego uskoków w rejonie Koszalina wybrano profile litologicznostratygraficzne z dwóch struktur: struktury Koszalina i struktury Debrzna (**Fig. 1.1.4_116**). W rejonie tym osady mezozoiczne deformowane są licznymi uskokami, których powstanie związane jest w rozwojem i inwersją bruzdy środkowopolskie, jak również z wpływem ewaporatowych utworów cechsztynu na tektonikę nieciągłą. Dlatego w analizach poniżej opisanych rozważano szerokie spektrum uskoków o zrzutach od 50m do 200m w przypadku otworu Dunowo-1 (**Fig. 1.1.4_118 – 1.1.4_121**) oraz 275m dla otworu Debrzno-2 (**Fig. 1.1.4_123 – 1.1.4_126**).

Tak jak wspomniano w poprzednim rozdziale, do obliczenia potencjału uszczelniającego, wyrażonego parametrem SGR, niezbędne są dane determinujące zawartość materiału ilastego w profilu litologicznym. Dla obu badanych otworów dostępne były wyłącznie krzywe profilowania naturalnego promieniowania gamma (GR) określające ten parametr (**Fig. 1.1.4_117 i 1.1.4_122**). Warto zaznaczyć, że skala pionowa na figurach z wynikami modelowania podaje głębokość otworu w metrach liczoną od poziomu morza (True Vertical Depth Sub-Sea – TVDSS), a zatem wszystkie wartości głębokośći oznaczone jednostką "m ppm" (metry poniżej poziomu morza) są zredukowane o wysokość nad poziom morza danego otworu (otwór Dunowo-1 położony jest 39mnpm, a otwór Debrzno-2 – 160 m npm). Na wszystkich figurach przedstawiających rozkład parametru SGR poziomy kolektorskie w dolnym triasie, które zostały wydzielone w ramach zadania **1.1.3**, zaznaczono na żółto, natomiast wytypowane poziomy uszczelniające na zielono.

Na Figurach 1.1.4_118 – 1.1.4_121 i Figurach 1.1.4_123 – 1.1.4_126 zaprezentowano wyniki obliczeń parametru SGR dla otworów Dunowo-1 i Debrzno-2. Czarna pionowa linia przecinająca pole z rozkładem wartości parametru SGR (trójkąt interpretacyjny), widoczna na wszystkich w/w figurach, oznacza miejsce wskazujące wartość parametru SGR dla zadanej wielkości zrzutu uskoku. Dodatkowo wyniki obliczeń potencjału uszczelniającego dla wszystkich zadanych wielkości zrzutów przedstawiono w dwóch wersjach. Na figurach oznaczonych indeksem "a" oprócz rozkładu wielkości parametru SGR, na trójkącie interpretacyjnym zaznaczono również położenie w profilu litologicznych warstw uszczelniających, wskazując jednocześnie na typ superpozycji, tj. iłowce/iłowce, iłowce/piaskowce, piaskowce/iłowce. Na figurach z indeksem "b" zaprezentowano trójkąt interpretacyjny przedstawiający wyłącznie dystrybucję parametru SGR.

Struktura Koszalina

Struktura Koszalina to antyklina o rozciągłości NW-SE, położona w północnej części niecki pomorskiej (**Fig. 1.1.4_116**). Do analizy potencjału uszczelniającego uskoków, które mogą deformować antyklinę Koszalina wykorzystano wiercenie rozpoznające SW część struktury – Dunowo-1. W wierceniu tym scharakteryzowano 2 poziomy zbiornikowe (TP2-k1 i TP2-k2) oraz 4 interwały uszczelniając (TP2-u1, TP2-u2, TK-u i TRNR-u) (**Fig. 1.1.4_117**).

Wyniki analiz potencjału uszczelniającego pokazują, że najniższe wartości parametru SGR, kwantyfikującego poziom uszczelnienia uskoków, skoncentrowane są wokół głównego kolektora triasowego – TP2-k2 (**Fig. 1.1.4_118 - 1.1.4_121**). Przy uskokach o zrzutach ponad 100m dolna część omawianego poziomu

zbiornikowego notuje bardzo niskie wartości parametru SGR, tj. poniżej 2000. Oznacza to, iż w miejscach tych strefa uskokowa może stanowić miejsce ucieczki i przeciekania przez uskok CO2. Dla uskoków o zrzutach większych niż ok. 200m potencjał uszczelniający strefy uskokowej wzrasta do poziomu SGR 2250-2750 co sprawia, że uskok powinien stanowić dobrą barierę dla migracji CO2.

Dolny poziom kolektorski (TP2-k1) położony jest pomiędzy dwoma warstwami uszczelniającymi (TP2-u1 i TP2-u2), co sprawia, że kolektor ten posiada bardzo dobre uszczelnienie uskokowe. Początkowo, przy małych zrzutach uskoków do ok. 100m, uszczelnienie uskokowe stanowią warstwy uszczelniające znajdujące się po drugiej stronie strefy uskokowej (Fig. 1.1.4_118 - 1.1.4_119). Przy większych zrzutach uskoków, ok. 150-200m (Fig. 1.1.4_120 - 1.1.4_121) poziom zbiornikowy TP2-k1 w skrzydle wiszącym znajduje się naprzeciw poziomu zbiornikowego TP2-k2 w skrzydle zrzuconym. Strefa uskokowa przy takiej konfiguracji warstw charakteryzuje się bardzo wysokimi wartościami parametru SGR 2750-3500 co wskazuje na wysoki potencjał uszczelniający.

Struktura Debrzna

Struktura Debrzna podobnie jak struktura Koszalina ma rozciągłość NW-SE (**Fig. 1.1.4_116**). Do analizy potencjału uszczelniającego uskoków, które mogą deformować antyklinę Debrzna wykorzystano wiercenie rozpoznające te strukturę – Debrzno2. W wierceniu tym scharakteryzowano 2 poziomy zbiornikowe (TP2-k1 i TP2-k2) oraz 2 interwały uszczelniając (dolny TP2-u i górny TK-u1, TK-u i TRNR-u) (**Fig. 1.1.4_122**).

Wyniki analiz potencjału uszczelniającego pokazują, że cały charakteryzowany profil otworu cechuje się bardzo dobrym uszczelnieniem. Pole rozkładu wartości parametru SGR zdominowane jest przez wartości 1750 – 2500 (**Fig. 1.1.4_122 – 1.1.4_126**). Oznacza to, że uskoki przecinające utwory triasowe są szczelne dla przepływu płynów, bez względu na wielkość zrzutu uskoku.



Fig. 1.1.4_116 Mapa lokalizacyjna profili sejsmicznych i otworów wiertniczych oraz analizowanych struktur geologicznych w rejonie Koszalina (NW Polska).



Fig. 1.1.4_117 Fragment profilu otworu Dunowo 1 z zaznaczonymi poziomami zbiornikowymi (żółte warstwy) i uszczelniającymi (jasnoszare/zakreskowane warstwy)



Fig. 1.1.4_118 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Dunowo 1 dla wielkości zrzutu uskoku 50m 4-132



Fig. 1.1.4_119 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Dunowo 1 dla wielkości zrzutu uskoku 100m 4-133



Fig. 1.1.4_120 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Dunowo 1 dla wielkości zrzutu uskoku 150m 4-134



Fig. 1.1.4_121 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Dunowo 1 dla wielkości zrzutu uskoku 200m 4-135



Fig. 1.1.4_122 Fragment profilu otworu Debrzno 2 z zaznaczonymi poziomami zbiornikowymi (żółte warstwy) i uszczelniającymi (zakreskowane warstwy)



Fig. 1.1.4_123 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Debrzno 2 dla wielkości zrzutu uskoku 50m 4-137



Fig. 1.1.4_124 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Radęcin-1 dla wielkości zrzutu uskoku 100m 4-138



Fig. 1.1.4_125 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Debrzno 2 dla wielkości zrzutu uskoku 200m 4-139



Fig. 1.1.4_126 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Debrzno 2 dla wielkości zrzutu uskoku 275m 4-140

Rejon VIII - Łeba-Bałtyk oraz NE Polska

Analiza szczelności stref tektonicznych dla wybranych stref w rejonie NE Polski (Grzegorz Wróbel)

Przedstawione opracowanie prezentuje wyniki prac wykonanych dla rejonu VIII (Łeba-Bałtyk oraz NE Polska), konkretnie syneklizy perybałtyckiej w rejonie Bartoszyce-Kętrzyn. W trakcie interpretacji danych sejsmicznych dla wybranych struktur z omawianego rejonu nie zidentyfikowano żadnych stref uskokowych istotnych dla bezpieczeństwa składowania, dlatego przedmiotem tych prac była analiza szczelności potencjalnych stref tektonicznych, które mogą występować w osadach paleozoicznych. Strefy uskokowe są niezwykle ważnym elementem w analizie geologicznej struktur perspektywicznych do bezpiecznego składowania CO2. Poprawne zidentyfikowanie i wykartowanie uskoków w obrębie zarówno interwałów zbiornikowych jak i uszczelniających jest kluczowym elementem pozwalającym na wykrycie i ocenę potencjalnych stref nieciągłości w poziomach zbiornikowych i/lub dróg migracji związanych ze strefami uskokowymi.

Wykorzystano metodykę postępowania omówioną w pracach dla rejonu Bełchatowa (I).

Analiza potencjału uszczelniającego stref uskokowych

Do analizy potencjału uszczelniającego stref uskokowych wybrano profile litologiczno-stratygraficzne z dwóch otworów wiertniczych zlokalizowanych na wschód od Elbląga, w rejonie Bartoszyce-Kętrzyn: Barciany-1 i Pieszkowo-1 (**Fig. 1.1.4_127**). W publikacjach (np. Stolarczyk, 2004; Poprawa i in., 2006) oraz archiwalnych dokumentacjach badań sejsmicznych dotyczących tego rejonu (Knieszner, Majak, Łuszcz, 1988; 1989) opisywane były strefy uskokowe deformujące osady dolnopaleozoiczne wraz z prekambryjskim podłożem. Wyraźnie zaznaczają się one w obrębie utworów syluru, dochodząc do powierzchni niezgodności kątowej występującej w spągu permo-mezozoiku, nie kontynuują się jednak w utworach młodszych, zaliczanych do górnego permu (Poprawa i in., 2006). Stwierdzono występowanie stromo zapadających ku północnemu-wschodowi, zaś w południowej części basenu, gdzie przeważa zapadanie na południe, uskoków o charakterze odwróconym. Zrzut tych uskoków mieści się zwykle w zakresie 50-200 m (op. cit.).

Do obliczenia potencjału uszczelniającego, wyrażonego parametrem SGR, niezbędne są dane określające ilość materiału ilastego w profilu litologicznym. Dla badanych otworów dostępne były wyłącznie krzywe profilowań naturalnego promieniowania gamma (GR), które dodatkowo nie były skalibrowane do uniwersalnych jednostek API (**Fig. 1.1.4_128, 132**). Warto zaznaczyć, że skala pionowa na figurach z wynikami modelowania podaje głębokość otworu w metrach liczoną od poziomu morza (True Vertical Depth Sub-Sea – TVDSS), a zatem wszystkie wartości głębokości oznaczone jednostką "m ppm" (metry poniżej poziomu morza) są zredukowane o wysokość nad poziom morza danego otworu (otwór Barciany-1 położony jest 59 m npm, a otwór Pieszkowo-1 – 120 m npm). Na wszystkich figurach przedstawiających rozkład parametru SGR poziom kolektorski, który został wydzielony w ramach zadania **1.1.3**, zaznaczono na żółto, natomiast wytypowany poziom uszczelniający na zielono.

Na Fig. 1.1.4_129 - 131 i 133 - 136 zaprezentowano wyniki obliczeń parametru SGR dla otworów, odpowiednio, Barciany-1 i Pieszkowo-1. Czarna pionowa linia przecinająca pole z rozkładem wartości parametru SGR (trójkąt interpretacyjny), widoczna na wszystkich w/w figurach, oznacza miejsce wskazujące wartość parametru SGR dla zadanej wielkości zrzutu uskoku. Dodatkowo wyniki obliczeń potencjału uszczelniającego dla wszystkich zadanych wielkości zrzutów przedstawiono w dwóch wersjach. Na figurach oznaczonych indeksem "a" oprócz rozkładu wielkości parametru SGR, na trójkącie interpretacyjnym zaznaczono również położenie w profilu litologicznych warstw uszczelniających, wskazując jednocześnie na typ superpozycji, tj. iłowce/iłowce, iłowce/piaskowce, piaskowce/iłowce. Na figurach z indeksem "b" zaprezentowano trójkąt interpretacyjny przedstawiający wyłącznie dystrybucję parametru SGR.

Uskoki w dolnym paleozoiku w rejonie Elbląga

Obszar badań, obejmujący osady dolnego paleozoiku w rejonie na wschód od Elbląga, leży w obrębie basenu bałtyckiego, a dokładniej w jego południowo-wschodniej części określanej jako synekliza perybałtycka (Stolarczyk i in., 2004). Dzisiejszy obraz strukturalny basenu bałtyckiego ukształtowany został w głównej mierze podczas orogenezy kaledońskiej, której efektem są deformacje tektoniczne powstałe w reżimie kompresyjnym bądź transpresyjnym.

Do analiz potencjału uszczelniającego uskoków przecinających osady dolnego paleozoiku w rejonie Elbląga wybrano dwa głębokie wiercenia zlokalizowane na wschód od Elbląga: Barciany-1 i Pieszkowo-1 (**Fig. 1.1.4_127**). W wierceniach tych scharakteryzowano główny poziom zbiornikowy obejmujący osady kambru środkowego (CM2-k) oraz generalny poziom uszczelniający składający się z utworów ordowiku i syluru (S+O-u) (**Fig. 1.1.4_128** i **132**). Analizowano uskoki o zrzutach 50, 100 i 150m, tj. takie jakie opisywano w osadach dolnego paleozoiku w tym rejonie.

Wyniki analiz potencjału uszczelniającego dla obu wierceń pokazują bardzo dobre uszczelnienie w obrębie całego profilu syluru charakteryzujące się maksymalnymi wartościami parametru SGR > 2000, niezależnie od wielkości analizowanego zrzutu uskoku (**Fig. 1.1.4_129 - 131, 133 - 136**). Z kolei w ordowiku obserwujemy różne wskazania poziomu uszczelnienia, co bezpośrednio wiąże się ze zmienną litologią w profilu osadów tego wieku. W miejscach, gdzie występują poziomy węglanowe potencjał uszczelniający uskoków notuje niższe wartości, natomiast w obrębie iłowców można zaobserwować bardzo dobre uszczelnienie. Generalnie w analizowanych osadach kambru, ordowiku i syluru udział iłowców w profilu litologicznym osiąga bardzo wysokie wartości: ok. 73,5% w wierceniu Barciany-1 i ok. 82% w otworze Pieszkowo-1. Sprawia to, iż strefy uskokowe deformujące utwory dolnego paleozoiku stanowią pewne uszczelnienie i nie powinny być zagrożeniem dla poziomów sekwestracyjnych wytypowanych w osadach środkowego kambru.



Fig. 1.1.4_127 Mapa lokalizacyjna profili sejsmicznych i otworów wiertniczych oraz analizowanych struktur geologicznych w rejonie VII (NW Polska). 4-143



Fig. 1.1.4_128 Fragment profilu otworu Barciany 1 z zaznaczonym poziomem zbiornikowym (żółta warstwa) i uszczelniającym (jasnoszara warstwa)


Fig. 1.1.4_129 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Barciany 1 dla wielkości zrzutu uskoku 50m



Fig. 1.1.4_130 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Barciany 1 dla wielkości zrzutu uskoku 100m



Fig. 1.1.4_131 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Barciany 1 dla wielkości zrzutu uskoku 150m



Fig. 1.1.4_132 Fragment profilu otworu Pieszkowo 1 z zaznaczonym poziomem zbiornikowym (żółta warstwa) i uszczelniającym (zielona warstwa)



Fig. 1.1.4_133 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Pieszkowo 1 dla wielkości zrzutu uskoku 50m



Fig. 1.1.4_134 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Pieszkowo 1 dla wielkości zrzutu uskoku 50m



Fig. 1.1.4_135 Rozkład parametru SGR (*Shale Gouge Ratio*) dla otworu Pieszkowo 1 dla wielkości zrzutu uskoku 150m

Weryfikacja modeli stref uskokowych i ich potencjału uszczelniającego (1.1.28 - AGH)

Rejon I - Bełchatów

(Jakub Siemek, Stanisław Nagy, Bartosz Papiernik, Łukasz Klimkowski, Rafał Sedlaczek)

Przedmiotem tego zagadnienia była analiza nieciągłości utworów dolnej jury oraz nadkładu do celów magazynowania CO2, w skali regionalnej. Do analizy wykorzystano dane dostarczone przez PIG, dane laboratoryjne INIG oraz własne dane w zbiorach WNIG AGH. Wykorzystano także przestrzenny 3D model komputerowy obrazujący zmienność litologiczno – zbiornikową klastycznych utworów jury, tzw. statyczny model parametryczny, wykonany przez zespół pracowników Katedry Surowców Energetycznych pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Wojciecha Góreckiego.



Fig. 1.1.28_1 Rozmieszczenie schematyczne nieciągłości modelowanych w uproszczony sposób w badanym rejonie.

Ze względu na regionalny charakter modelu i brak interpretacji sejsmicznych opracowano stosunkowo uproszczony model uskokowy *Fault Model*, zakładający, że wszystkie uskoki są pionowe bądź mają liniowo nachyloną powierzchnię.

Dane wejściowe stanowiły nieciągłości uwzględnione na szczegółowych mapach strukturalnych. Pozwoliły one na opracowanie modelu obejmującego 118 uskoków składających się 3340 linii kształtowania (pillars). 69 % nieciągłości w chodzących to uskoki .pionowe, 30 % liniowe.

Duża ilość uskoków, ich skomplikowane relacje przestrzenne, połączone ze słabą kontrolą danymi sprawiają, spowodowały, że procedura modelowania uskoków była czasochłonna, a powstały model lokalnie np. w strefie rygla Radomska ma ograniczoną dokładność. Na **Fig. 1.1.28_1** pokazano rozmieszczenie schematyczne – nieciągłości – modelowanych pionowo w badanym rejonie. Model uskoków pionowych rozpatrywany będzie szczegółowo w modelu statycznym dla II Segmentu – zad.**1.1.15**.

Na etapie modelowań szczegółowych systemów sekwestracyjnych (w Segmencie II) niezbędne będzie opracowanie dla wytypowanych stref modelu uskokowego, który z jednej strony będzie bardziej precyzyjnie oddawał geometrię stref uskokowych, a z drugiej będzie mniej skomplikowany, jeśli chodzi o ilość dyslokacji¹.

Szczegółowy model wariantowy oddziaływania stref łuskowych na proces magazynowania zostanie wykonany w oparciu o analizę zailenia w warstwach toarku, bajosu i batonu.

¹ Co zrealizowano w ramach prac II segmentu dla tegoż rejonu, tzn. zadania 1.1.15 - patrz np. strona 15-12.

Rejony: Mazowsze, Lubelszczyzna, NW-Polska

(Bartosz Papiernik, Michał Michna, Wojciech Górecki, Łukasz Klimkowski, Rafał Sedlaczek, Stanisław Nagy)

Wgłębne magazynowanie CO₂ wiąże się z ryzykiem wycieku, a do najwyższych czynników ryzyka należy zaliczyć występowanie uskoków przecinających nadkład (uszczelnienie) struktury magazynowej (Sikora 2009). Występowanie i rola dyslokacji w procesie migracji, pułapkowania i rozpraszania węglowodorów jest przedmiotem zainteresowania naftowych inżynierów złożowych od lat. Strukturalno–geologiczne uwarunkowania szczelności uskoków są intensywnie analizowane od końca lat 80-tych. Komputerowe modelowanie przewodności hydraulicznej stref uskokowych od połowy lat 90 ubiegłego wieku. W polskiej geologii modelowanie szczelności uskoków jest zagadnieniem raczkującym. W Polsce dotychczas wykonywano nieliczne jednowymiarowe 1D komputerowe modelowania szczelności.

W ramach realizacji zadania **1.1.28** na AGH zespół pracowników KSE we współpracy z PIG-PIB Warszawa, podjął przygotowania do przeprowadzenia przestrzennych (3D) modelowań regionalnych stref uskokowych na obszarze Mazowsza, Lubelszczyzny, NW-Polski. Główny wysiłek badawczy skierowano na obszar Mazowsza, gdzie zespół KSE otrzymał od kooperantów z PIG wystarczającą ilość zweryfikowanych danych stratygraficznych, a przede wszystkim interpretacji litologiczno złożowych krzywych geofizycznych pozwalających opracować wiarygodny, regionalny model strukturalno-parametryczny dla obszaru Mazowsza i NE obrzeżenia Lubelszczyzny.

Zagadnienia szczelności uskoków

Modelowanie uskoków ma kluczową rolę w trakcie tworzenia statycznego modelu komputerowego jak również w późniejszych symulacjach zatłaczania CO₂. Podczas gdy uskoki stanowią stosunkowo niewielką część ogólnej wielkości modelowanej bryły, mogą silnie wpływać na przepuszczalność i kierunek przepływu.

Własności petrofizyczne, które zmienione są w trakcie procesów tektonicznych w dużej mierze zależą od takich czynników jak rodzaj skał goszczących, mechanizmów deformacyjnych czy historii naprężeń (Knipe et al. 1998).

Uskoki należy rozpatrywać nie jako pojedyncze elementy, lecz jako obiekty, wokół których istnieje pewna strefa. Strefę tę określa się mianem strefy uskokowej powstającej w wyniku istnienia naprężeń w skale. W strefie tej oprócz głównej płaszczyzny uskokowej obecne jest wiele mniejszych spękań, które niszczą skały budujące uskok.

Do kompleksowego wyznaczania miejsc, w których znajdują się uskoki należy wykorzystywać sejsmikę 3D, która od kilkudziesięciu lat przeszła poważne zmiany dzięki czemu w obecnej chwili rozdzielczość tej metody pozwala na relatywnie dokładne wykartowanie stref deformacyjnych. Do poprawy wiedzy na temat uskoków przyczyniły się również badania mikrostrukturalne oraz analizy parametrów petrofizycznych dokonywanych na rdzeniach pobranych w sąsiedztwie uskoków lub też z próbek lub analiz w odsłonięciach (Knipe 1989, Knipe et al. 1997, Gibson 1998).

Szczelność uskoków

Strefa uskokowa ma ogromny wpływ na zachowanie cieczy złożowych. szczegółowe zrozumienie procesów tworzących i kontrolujących rozwój uskoków są wymagane do przewidywania późniejszego zachowania płynów złożowych.

Poprawne modelowanie uskoków pozwala określić ich charakter, który może być dwojaki. Uskoki mogą być barierą w migracji medium złożowego bądź też powodować nieszczelność całego układu. Dlatego też należy dokonać wszelkich starań, aby jak najdokładniej wykartować te nieciągłości.

Elementami krytycznymi stref uskokowych, które są niezbędne w ocenie szczelności oraz do późniejszej symulacji złożowej lub zatłaczania CO2 należą:

- rozmiar strefy zniszczonej przez uskok

- charakterystyka skupień uskoków

- rozstęp uskoku (fault offset)
- orientacja deformacji znajdujących się w strefie uskokowej
- miąższość uskokowanych warstw

Powyższe elementy zostały opisane dokładnie przez Knipe-a (Knipe et al. 1998, Knipe et al. 1997).

Autorzy zajmujący się problematyką szczelności uskoków wyróżnili kilka procesów, które mają wpływ na obecność uszczelnienia lub stref przepuszczalnych w strefach uskokowych (Mitra 1988, Knipe 1989, Knipe 1992a, Knipe 1993a,b). Należą do nich:

- deformacje powodujące spadek porowatości poprzez dezagregację,

- mieszanie i ślizganie się krawędzi ziaren,

- kataklazę,
- dyfuzyjny transfer masy (diffusive mass transfer),
- cementację,

- tworzenie się smaru składającego się z minerałów ilastego i fyllokrzemianów.

Komputerowe modelowanie uskoków

Należy zwrócić uwagę, że nie tylko obecność ale również orientacja uskoków ma istotną rolę w ocenie szczelności układu (Knipe et al. 1998). Do prawidłowego modelowania ścieżek rozpływu oraz barier którymi mogą być uskoki konieczna jest dokładna analiza statystyczna rozkładu uskoków w przestrzeni trójwymiarowej a nie jedynie określenie trendów lub głównych kierunków grup uskoków.

Można wyróżnić dwie główne zmienne, które należy modelować w celu określenia szczelności oraz przepływów. Pierwszą z nich jest całkowita miąższość w poprzek ścieżki przepływu medium złożowego

przez strefę uskokową (tzn. całkowita miąższość wszystkich analizowanych uskoków wzdłuż ścieżek przepływu) zależy ona od częstości występowania uskoków wzdłuż ścieżek przepływu i nie jest równoważna miąższości strefy zniszczonej przez uskok (Knipe et al. 1998, Knott 1993). Druga zaś to połączenia uskoków z niskimi przepuszczalnościami w strefie uskokowej (w przypadku gdy skały zbiornikowe są dobrze uszczelnione to jedynie charakter połączenia uskoków kontroluje migrację medium złożowego.

Połączenie dwóch wcześniej wymienionych czynników będzie kontrolować przewodność efektywną strefy uskokowej.

Ważnym problemem, z którym należy liczyć się w trakcie oceny szczelności uskoków jest dokładne odwzorowanie powierzchni strukturalnych będących stropami potencjalnych horyzontów uszczelniających. Ograniczona rozdzielczość metody sejsmicznej może również prowadzić do błędnego określenia zrzutu uskoku a co za tym idzie błędnej interpretacji nakładania się horyzontów w skrzydłach wiszącym i zrzuconym w uskoku toteż należy dokonać kilkukrotnych analiz z różnymi wielkościami zrzutów uskoków. Najpowszechniejszą metodą, jaką stosuje się do tego celu jest sporządzanie diagramów Allana (Allan 1989) polegających na wyrysowaniu horyzontów nakładających się w płaszczyźnie uskoku (**Fig. 1.1.28_2**).



Fig. 1.1.28_2Przykładowy diagram Allana obrazujący nakładanie się litologii

Model uskokowy osadów pokrywy mezozoicznej na obszarze Mazowsza

Na podstawie regionalnych modeli strukturalnych opracowanych w KSE (m.in. Górecki et al. 2006, Papiernik et al. 2008).

Metodyka konstruowania modelu strukturalno-parametrycznego 3D w programie Petrel 2009 obejmuje kolejno: - stworzenie modelu uskokowego, - opracowanie modelu szkieletowego, stworzenie modeli granic strukturalnych, - wprowadzenie warstwowania, - modelowanie litologiczno –parametryczne, - modelowanie uskoków (Papiernik 2010).

Modelowania w tak przedstawionym zakresie na chwile bieżącą przedstawiono wyłącznie dla obszaru Mazowsza, gdzie w ramach prac konsorcjum zebrano ilość danych wystarczającą do przeprowadzenia modelowania uskoków.

Model uskokowy

Ze względu na regionalny charakter modelu i brak interpretacji sejsmicznych opracowano stosunkowo uproszczony model uskokowy (*Fault Model*), zakładający, że wszystkie uskoki są pionowe bądź mają liniowo nachyloną powierzchnię.

Dane wejściowe stanowiły nieciągłości uwzględnione na szczegółowych mapach strukturalnych. Pozwoliły one na opracowanie modelu obejmującego 34 uskoków- składających się z 798 linii kształtowania (*pillars*). 76 % tychże nieciągłości to uskoki pionowe, 24 % liniowe.

Duża ilość uskoków, ich skomplikowane relacje przestrzenne, połączone ze słabą kontrolą danymi sprawiają, spowodowały, że procedura modelowania uskoków była czasochłonna, a powstały model lokalnie ma ograniczoną dokładność.

Na etapie modelowań szczegółowych systemów sekwestracyjnych niezbędne będzie opracowanie dla wytypowanych stref modelu uskokowego, który z jednej strony będzie bardziej precyzyjnie oddawał geometrię stref uskokowych, a z drugiej będzie mniej skomplikowany, jeśli chodzi o ilość dyslokacji.



Fig. 1.1.28_3Model uskokowy Mazowsza (Fault model)

Przestrzenny model szkieletowy (Pillargriding)

Przedstawiony model uskokowy kształtuje wewnętrzną budowę modelu 3D. Dalszy etap jego horyzontalnego podziału stanowiła procedura tzw. pillargriddingu, - obliczenia 3 powierzchni szkieletowych składających się z oczek o nieregularnym kształcie, uwarunkowanym przebiegiem dyslokacji i założoną wielkością wstępnego spacjowania współrzędnych stratygraficznych (I,J) przestrzennego modelu. Autorzy opracowali bardzo "gęsty" model 3D o spacjowaniu I,J 1000m x 1000m. odzwierciedla on kształt granic sekwencji stratygraficznych stropu kenozoiku oraz stropu cechsztynu , zgodnie z wejściowymi gridami 2D. Powstały grid 3D składa się on z ponad 16 000 000m komórek.

Wynikowa osnowa geometryczna składa się z 236 x 222 x 316 węzłów.



Fig. 1.1.28_4Model uskokowy i grid szkieletowy (pillargrid) wynikowej osnowy geometrycznej

Wprowadzenie sekwencji stratygraficznych (zones) i warstw (layers)

Po zakończeniu procedury modelowania uskoków i opracowaniu modelu szkieletowego dokonano podziału pionowego przestrzeni na sekwencje stratygraficzne.

W wyniku zastosowania procedury *Makehorizons*. Na podstawie regularnych modeli strukturalnych (grid 2D) obliczono horyzonty, stanowiące granice sekwencji. Sekwencje podzielono wewnętrznie na proporcjonalne warstwy (*proportionallayering*).



Fig. 1.1.28_5Podział modelu na sekwencje stratygraficzne

Ostatecznie powstał model obejmujący następujące sekwencje podzielone na warstwy:

Kreda górna (39 warstw)

Kreda dolna (15 warstw)

Jura górna (29 warstw)

Jura środkowa (39 warstw)

Jura dolna (48 warstw)

Trias górny (49 warstw)

Trias środkowy (13 warstw)

Trias dolny (83 warstw)

Model parametryczny zmienności litologiczno- facjalnej

Wewnętrzną zmienność litologiczno – facjalną modelu 3D można rekonstruować według dwóch podstawowych schematów. W prostszym zmienność litologiczna i facjalna oraz parametry zbiornikowe są modelowane niezależnie. Współcześnie modelowanie własności ośrodka geologicznego najczęściej odbywa się jednak według schematu dwuetapowego. Pierwszym krokiem jest na ogół stworzenie modelu litologiczno-facjalnego, który wraz z wcześniej przyjętym typem warstwowania będzie w dalszej części sterował procesem interpolacji parametrów zbiornikowych. Niezależnie od przyjętego schematu modelowania, przestrzenna estymacja modelu 3D, odbywa się "wzdłuż" wyznaczonych warstw (*layers*), wg zasad interpolacji numerycznej znanych od lat 60-tych (Davis 1986, Swan, Sandilands 1992, Jones et al. 1992).

Modelowanie litologiczne

Dane wejściowe

Dane wejściowe do opracowania regionalnego model stanowiły wyniki interpretacji litologiczno złożowych krzywych geofizycznych. Podstawowy materiał wejściowy obejmował krzywe litologiczne, krzywe zailenia i porowatości całkowitej i efektywnej. Przygotował je w 26 odwiertach (**Tabela 1.1.28_1**) Jan Szewczyk (PIG Warszawa).

Tabela 1.1.28	1	Odwierty	/w	vkorz	vstane w	procedurze	modelowni	a statvcznego
149014 11110		oamere		,	, scance	proceduree		

Lp.	Nazwa	Lp.	Nazwa
1	Bielsk-2	14	Płońsk IG-2
2	Bodzanów GN-1	15	Polik IG-1
3	Bodzanów IG-1	16	Rębków-1
4	Czachówek-1	17	Sierpc-2
5	Dzierżanowo GEO-1	18	Skierniewice GT-1
6	Gostynin IG-1A	19	Sochaczew-1
7	Gradzanowo-2	20	Wielgie IG-2
8	Kamionki IG-3	21	Wilga IG-1
9	Lipno-1	22	Wojszyce IG-4
10	Łowicz IG-1	23	Wyszogród-1
11	Mszczonów IG-1	24	Żychlin GN-4
12	Nadarzyn IG-1	25	Żyrów-1
13	Okuniew IG-1	26	Żyrów-2

Wyniki

Na podstawie przekodowanych danych opracowano litologiczne modele otworowe (procedura petrela *Scaleup*) z wykorzystaniem statystycznego algorytmu **Najczęstszy przypadek** *(most of)* używanego dla danych typu dyskretnego. Dokładność dopasowania litologii w krzywych i modelu jest w tym przypadku uzależniona od gęstości pionowego podziału sekwencji stratygraficznych (*zones*) na warstwy (*layers*).. Dla większości profilu osiągnięta dokładność modelu otworowego jest odpowiednio wysoka, jednak w niektórych strefach, zwłaszcza tam, gdzie występują liczne przewarstwienia o małej miąższości przybliżona modelem litologia jest statystycznie najlepszym przybliżeniem (**Fig. 1.1.28_5**)



Fig. 1.1.28_5 Porównanie danych wejściowych i wyniku modelowania otworowego litologii (uwaga – dla otworu Bielsk-1 nie były dostępne dane wejściowe w formie interpretacji litologiczno-facjalnej, jedynie krzywe nieprzetworzone).

Sporządzono 2 modele litologiczne wykorzystując do tego celu 2 algorytmy w programie Petrel:

Pierwszy model litologiczny został sporządzony przy pomocy algorytmu Truncated Gaussian Simulation. Wynik modelowania można zaobserwować na diagramie płotowym pseudo 3D (**Fig. 1.1.28_6**).

Drugi model został sporządzony przy pomocy algorytmu Indicator Kriging. Efekt modelowania można zaobserwować na diagramie płotowym (**Fig. 1.1.28_7**).



Fig. 1.1.28_6 Model litologiczny wykonany przy użyciu algorytmu Truncated Gaussian Simulation



Fig. 1.1.28_7 Model litologiczny wykonany przy użyciu algorytmu Truncated Gaussian Simulaltion

Modele parametrów petrofizycznych

Dane wejściowe do modelowania przestrzennej zmienności parametrów zbiornikowych wykazują zmienność ciągłą, w modelowania ich zmienności są stosowane, inne algorytmy niż w przypadku modelu facjalnego. Na tym etapie pracy stosunkowo często wykorzystywane są techniki deterministyczne. Do najprostszych należy algorytm najbliższego sąsiada (*Closest, ClosestNeighbour*). Nieco bardziej złożone są algorytmy z grupy "odwrotnej" odległości (*MovingAverage* (Petrel 2007 Manual), *WeightedAverage*). Jako technika wspomagające inne algorytmy, aplikowane są tzw. algorytmy funkcyjne - na ogół trendy wielomianowe (Davis 1986, Petrel 2007 Manual). Najbardziej złożone algorytmy deterministyczne wykorzystywane do opracowania modelu petrofizycznego to kriging uniwersalny (Deutsch, Journel 1998) stosowany z (lub bez) trendem zewnętrznym (*ExtrenalDrift*) (Dubrule 2003), wspomagany wykorzystaniem wariogriamów analizowanych parametrów, bądź procedurami co-krigingu, transformacją danych oraz krzywymi prawdopodobieństwa zmian modelowanego parametru.

Oprócz metod deterministycznych do modelowania zmienności parametrów zbiornikowych wykorzystywane są również algorytmy stochastyczne oparte na podejściu iteratywnym, sekwencyjnym lub bezpośrednim (Dubrule 1998). Niezależnie od podejścia, algorytmy stochastyczne umożliwiają tzw. modelowanie warunkowane (Conditional), które gwarantuje, że w takcie każdej symulacji statystycznej modele 3D i otworowy, w miejscu przecięcia zawsze będą zgodne. Do najczęściej stosowanych algorytmów stochastycznych współcześnie należy sekwencyjny *Sequential Gaussian Simulation* SGS (Gomez-Hernandez, Journel 1993, Dubrule 1998 (Petrel 2007 Manual)).

Dane wejściowe

Dane wejściowe do opracowania przedstawianych modeli stanowiły krzywe zailenia oraz porowatości całkowitej i efektywnej opracowane przez J Szewczyka w 26 odwiertach położonych na obszarze badań (**Tabela 1.1.28_1**).

Wszystkie modele otworowe obliczono stosując uśrednianie arytmetyczne w warstwach, połączone ze statystycznym sterowaniem przy pomocy krzywej litologicznej

Przestrzenne modele zailenia (Vsh), porowatości efektywnej oraz przepuszczalności obliczono za pomocą algorytmu *KrigingInterpolation*. Wstępne analizy statystyczne pokazały, że dla zgromadzonego zestawu danych wejściowych zastosowanie wyżej wymienionego algorytmu było słuszne.



Fig. 1.1.28_8 Modele otworowe zailenia (Vsh) I porowatości (PHI) na tle wejściowych krzywych geofizycznych

W modelowaniach parametrów petrofizycznych zdecydowano się zastosować metody deterministyczne, aby w bardziej ciągły sposób zrekonstruować rozprzestrzenienie potencjalnych zbiorników, a także uszczelnień. Zastosowanie technik stochastycznych nie daje takiej możliwości gdyż metody te z założenie "nie uznają" istnienia w pełni ciągłej zmienności parametrów. Jednakże na tym etapie w procesie estymacji przyjęto możliwe silne założenia geologiczne, przekraczające dokładność analizy statystycznej leżącej u podstaw geostatystycznego określenia kształtu wariogramów.

Dzięki zastosowaniu opisanej procedury w nieznacznym stopniu podniesiono lateralną ciągłość modelowanych parametrów (zarówno litologii, jak i parametrów zbiornikowych). Należy jednak zauważyć, że ten mocno trendowy obraz może ulec drastycznej zmianie w przypadku zwiększenia jego szczegółowości, np. w wyniku wykorzystania atrybutów sejsmicznych z profili 2D.

Model zailenia – wyniki

Model zailenia powstał jako pierwszy, modelowanie wykonano z zastosowaniem algorytmu KrigingInterpolation. Modelowanie wykonano oddzielnie dla poszczególnych sekwencji (*zones*). Procedura modelowania była sterowana modelem litologicznym. Syntetyczne wyniki modelowania zailenia przedstawia **Fig. 1.1.28_9**, Natomiast bardziej szczegółowej analizy rozmieszczenia warstw potencjalnie zbiornikowych i uszczelniających w profilu można dokonać na przekroju **Fig. 1.1.28_10**.



Fig. 1.1.28_9 Model zailenia utworów Mazowsza wykonany algorytmem KrigingInterpolation



Fig. 1.1.28_10 Rozkład zailenia wzdłuż przekroju A-A'

Model porowatości efektywnej – wyniki

Model zailenia powstał jako drugi model parametrów zbiornikowych. Modelowanie wykonano z zastosowaniem algorytmu KrigingInterpolation, stosując generalnie takie same parametry modelowania jak zastosowane do obliczenia modelu zailenia. Także w tym przypadku modelowanie wykonano oddzielnie dla poszczególnych sekwencji (*zones*) przy zastosowaniu sterowania modelem litologicznym.

Syntetyczne wyniki modelowania porowatości efektywnej przedstawiono na diagramie płotowym pseudo 3D **Fig. 1.1.28_11**. Bardziej precyzyjny wgląd w przestrzenną zmienność umożliwia przekrój **Fig. 1.1.28_12**.



Fig. 1.1.28_11 Model porowatości utworów Mazowsza wykonany algorytmem KrigingInterpolation



Fig. 1.1.28_12 Rozkład porowatości wzdłuż przekroju A-A'

Model przepuszczalności – wyniki

Model przepuszczalności powstał dzięki zastosowaniu algorytmu *KrigingInterpolation* podobnie jak w modelowaniu zailenia oraz porowatości. Również w tym przypadku modelowanie wykonano oddzielnie dla poszczególnych sekwencji (*zones*) przy zastosowaniu sterowania modelem litologicznym.

Syntetyczne wyniki modelowania przepuszczalności efektywnej przedstawiono na diagramie płotowym pseudo 3D **Fig. 1.1.28_13**. Bardziej precyzyjny wgląd w przestrzenną zmienność umożliwia przekrój **Fig. 1.1.28_14**.



Fig. 1.1.28_13 Model porowatości utworów Mazowsza wykonany algorytmem KrigingInterpolation



Fig. 1.1.28_14 Rozkład przepuszczalności wzdłuż przekroju A-A'

Analiza uskoków modułem Fault Analysis w programie Petrel 2009

Klasyfikacja uskoków

Pierwszym etapem modelowania przepuszczalności uskoków jest ich grupowanie w zestawy o podobnych właściwościach bazujących na wyinterpretowanej ich historii i ewolucji. Grupy wspomnianych uskoków można umieścić w odrębnych folderach w obrębie modelu co sprawia że modelowanie uskoków będzie szybsze i prostsze.

W trakcie modelowania parametrów uskoków obliczane zostają parametry dla każdej pary stykających się komórek leżących po przeciwnych uskoku. Oznacza to, że do obliczenia będą wykonywane dla co najmniej dwukrotnie większej ilości ścian komórek leżących przy uskoku niż dla pełnych komórek. Zwykle ilość obliczanych wartości jest większa szczególnie w przypadku gdy warstwowanie modelu jest gęste.

Fisher i Knipe zaproponowali schemat klasyfikacyjny, który wykorzystuje zailenie skał goszczących i stopień lityfikacji, który miał miejsce w trakcie fałdowania. Inne czynniki, które należy włączyć to:

warunki geologiczne występujące w trakcie i po powstaniu uskoków (stan naprężeń, temperatura, obecność płynów hydrotermalnych)

rodzaj uskoków (normalne, odwrócone, przesuwcze, mieszane)

czy wystąpiły kompleksowe ruchy w czasie wraz z wielokrotnym przemieszczaniem w różnych warunkach

Bazując na historii geologicznej uskoków można podzielić je w następujący sposób:

- uszczelniające współczynnik przewodności =0
- otwarte współczynnik przewodności =1
- częściowo uszczelniające współczynnik przewodności pomiędzy 1 a 0

- zmiennie uszczelnione - współczynnik przewodności zależy od lokalnych warunków geologicznych które ograniczają przepuszczalność.

Uskoki mogą być modelowane jako uszczelnienie do czasu aż nie zostanie osiągnięte ciśnienie szczelinowania. Dla uskoków o zmiennym uszczelnieniu należy obliczyć ich przewodność. W takim przypadku wyznaczone muszą zostać przepuszczalność i miąższość. Zawartość mączki ilastej (*shale gouge ratio*) jest wymagane tylko w przypadku obliczania z równania Manzocchi-ego (Manzocchi et al., 1999).

W programie Petrel istnieją następujące metody określenia parametrów uskoków (Fig. 1.1.28_15):

Stała wartość – do uskoku zostaje przypisana stała wartość przepuszczalności uskoku

Metodą równania standardowego (równania Manzocchi-ego)

Ważone proporcjonalnie w zależności od litologii - Wartości podane są dla każdej facji geologicznej w gridzie. Wartości dla każdej ściany komórki uskoku zostanie obliczona w oparciu o komórki, które w przeszłości były przesuwane względem siebie.

Nakładające się litologie – wartości zostaną przypisane w zależności od kombinacji nakładających się litologii po przeciwnych stronach uskoku.

Second Se									
Defined calculations Image: Constraint of the second se	Permeability Shale Thi	ckness Grid prope	rties						
	Method: 🥥 Standard equation								
	م م م	¹¹ 4 ² 0.25 3 5		?					
	Shale threshol Displacement threshol	d 1 d 99999		?					
Equation name: Equation 2									
l			🗸 Apply	🗙 Cancel					

Fig. 1.1.28_15 Okno wyboru metody określenia parametrów uskoków

Wstępne –wyniki modelowania uskoków na obszarze Mazowsza

Na analizowanym obszarze zostało przeprowadzone modelowanie uskoków mezozoicznych o wymienionych w poprzednim rozdziale. Oprócz modelowania geometrii uskoków została też przeprowadzona ich analiza parametryczna (*Faultanalysis*).

Metodą równania standardowego obliczono parametry 26 uskoków. Do parametrów tych należą:

- Współczynnik przewodności (TransmissibilityMultiplier)
- Zawartość mączki ilastej ShaleGouge Ratio (SGR)
- Przepuszczalność uskoków (Faultpermeability)
- Przemieszczenie się uskoków (Faultdisplacement)

Współczynnik przewodności (TransmissibilityMultiplier)

Współczynnik przewodności został obliczony korzystając z opcji Standard Equation. Wykonano 3 warianty rozkładu współczynnika przewodności. Dla lepszej wizualizacji wyniki przedstawiono na pojedynczym uskoku wspomagając się modelem zailenia.

Wariant 1

W pierwszym wariancie obliczania współczynnika przewodności wykorzystano następujące ustawienia:

Próg zailenia–1

Próg maksymalnego zrzutu uskoku – 250m

Wartość zailenia została wyznaczona z modelu litologicznego

Rozstęp między skrzydłami uskoku został ustalony z zależności – Zrzut uskoku X 0.01.

Rozkład współczynnika przewodności przedstawia Fig. 1.1.28_16.

W miejscach oznaczonych kolorem czerwony współczynnik przewodności jest równy 1. Dla tak przyjętych parametrów średnia wartość współczynnika przewodności dla wariantu 1 wynosi 0,85. Brak wyraźnej korelacji między modelem zailenia oraz współczynnikiem przewodności dla tego uskoku świadczy o błędnym dobraniu progu zailenia.



Fig. 1.1.28_16 Wariant 1 rozkładu współczynnika przewodności

Wariant 2

W drugim wariancie obliczania współczynnika przewodności wykorzystano następujące ustawienia:

Próg zailenia– 0,8

Próg maksymalnego zrzutu uskoku – 250m

Wartość zailenia została wyznaczona z modelu litologicznego

Rozstęp między skrzydłami uskoku został ustalony z zależności – Zrzut uskoku X 0.01.

Rozkład współczynnika przewodności przedstawia Fig. 1.1.28_17.



Fig. 1.1.28_17 Wariant 2 rozkładu współczynnika przewodności

Średnia wartość współczynnika przewodności dla wariantu 2 wynosi 0,84 co jest wartością bardzo zbliżona do tej z wariantu 1. Potwierdza to również Rys.3.5.3 Tylko w nielicznych miejscach (lewa strona obserwowanego uskoku) zmieniły się nieznacznie wartości współczynnika przewodności. W pozostałych partiach uskoku wartości te nie uległy zmianie. Podobnie jak w wariancie 1 również i tu możemy stwierdzić że próg zailenia został błędnie dobrany

Wariant 3

W trzecim wariancie obliczania współczynnika przewodności wykorzystano następujące ustawienia:

Próg zailenia– 0,2

Próg maksymalnego zrzutu uskoku – 250m

Wartość zailenia została wyznaczona z modelu litologicznego

Rozstęp między skrzydłami uskoku został ustalony z zależności – Zrzut uskoku X 0.01.



Fig. 1.1.28_18 Wariant 3 rozkładu współczynnika przewodności

Średnia wartość współczynnika przewodności dla wariantu 3 wynosi 0,2 co wyraźnie można zauważyć na **Fig. 1.1.28_18**. Korelacja między współczynnikiem przewodności a modelem zailenia jest wyraźnie widoczna szczególnie na przykładzie górno jurajskich piaskowców odznaczających się bardzo niskimi wartościami zailenia (kolor fioletowy na modelu zailenia). Horyzont ten doskonale koreluje się z rozkładem współczynnika przewodności na uskoku. W miejscach gdzie występują wspomniane piaskowce współczynnik przewodności jest równy 1. Można sądzić, że w tym przypadku parametry zostały dobrane prawidłowo i poprawnie odwzorowują współczynnik przewodności.

Zawartość mączki ilastej - ShaleGouge Ratio (SGR)

Parametr Zawartość mączki ilastej *Shale***Gouge Ratio (SGR) Został określony dzięki wykorzystaniu** opcji *Standard Equation* w module *FaultAnalisys*. Rozkład tego parametru na powierzchni uskokowej jest dokładnym odwzorowaniem wartości zailenia pochodzącego z modelu zailenia. Wartości zailenia zostały przypisane z modelu w miejscach gdzie płaszczyzna uskoku przecina model zailenia. Rozkład parametru SGR obrazuje **Fig. 1.1.28_19**.



Fig. 1.1.28_19 Model zawartości mączki ilastej- ShaleGouge Ratio (SGR)

Modele przemieszczenia uskoków (Faultdisplecement)

Dzięki procedurze FaultAnalisys było możliwe określenie przesunięcia uskoków szczególnie widoczne w rejonach gdzie występuje tektonika solna. Wartość tego parametru waha się od 0 do 100m. Rozkład stref obrazujący przemieszczenie uskoków na tle stropu triasu dolnego przedstawia **Fig. 1.1.28_20**.



Fig. 1.1.28_20 Diagram pseudo 3D obrazujący parametr Faultdisplecement

Model przepuszczalności uskoków (Faultpermeability)

Określono również parametr przepuszczalności uskoków (Faultpermeability). Do tego celu wykorzystano procedurę Standard Equation. Wartości przepuszczalności uskoków wahają się w przedziale od 0.088 mD do 0.182mD. Przestrzenny rozkład tego parametru tle stropu triasu dolnego widoczny jest na Fig. 1.1.28_21.



Fig. 1.1.28_21 Diagram pseudo 3D obrazujący model przepuszczalności uskoku parametr Faultpermeability

Model uskokowy Lubelszczyzny

Pokrywa osadów mezozoicznych na obszarze Lubelszczyzny ma stosunkowo niewielką miąższość w tej sytuacji wydaje się, że większe możliwości sekwestracji dwutlenku węgla w strefie lubelskiej należy wiązać z utworami paleozoiku, zwłaszcza. karbonu. Przeanalizowanie tej strefy wymaga interpretacji podstawowych krzywych geofizycznych i danych laboratoryjnych. W obecnej chwili istnieją tylko regionalne modele strukturalne (m.in. Górecki et al. 2006a,b, Papiernik et al. 2005, 2008) umożliwienie stworzenie modeli uskokowych i strukturalnych. Na obecnym etapie autorzy wykonali wstępny model uskokowy rejonu Lubelszczyzny. Wyznaczono 171 uskoków paleozoicznych (**Fig. 1.1.28_22**). Wszystkie uskoki ze względu na brak danych określono jako liniowe. Model składa się z 1947 "pilarów".



Fig. 1.1.28_22 Model uskokowy Lubelszczyzny
Model uskokowy Pomorza

Podobnie jak w przypadku modelowania Lubelszczyzny wykonano również wstępny model uskokowy Pomorza (**Fig. 1.1.28_23**). Na obecnym etapie prac zostały wykonane 37 uskoków mezozoicznych. Wszystkie uskoki z tego rejonu zostały wyznaczone jako uskoki liniowe. Model ten składa się z 589 pilarów. Dalsza część prac będzie obejmowała w miarę możliwości kształtowanie uskoków na podstawie interpretacji profili sejsmicznych jak również analizę parametrów tych uskoków podobnie jak w przypadku przeprowadzonej analizy modelu uskokowego Mazowsza, będzie to jednak możliwe dopiero po opracowaniu przez PGI Warszawa danych geofizycznych – otworowych i sejsmicznych i opracowaniu modelu statycznego omawianego rejonu. W chwili obecnej zespól KSE opracował regionalny model uskokowy mezozoiku jest przygotowany do szybkiego opracowania osnowy geometrycznej modelu parametrycznego na obszarze Pomorza (Papiernik et al. 2008).



Fig. 1.1.28_23 Regionalny model uskokowy utworów pokrywy mezozoicznej ma Pomorzu

Modelowanie wpływu uskoku na rozprzestrzenianie CO₂

Założono wyidealizowany stan po zakończeniu zatłaczania z niewielką wydajnością w długim okresie czasu. Przyjęto nasycenie wodą związaną na poziomie 20%, a zatem nasycenie CO2 w strefie składowania wynosi 80%. Nasycenie wody powyżej i poniżej "chmury" CO2 wynosi 100%, a maksymalne nasycenie rezydualne gazu w modelu to 20%. W takich warunkach siły wyporności sprawiają, iż składowany gaz migruje zgodnie z preferencyjnymi kierunkami.

Model oparty jest na dwuwymiarowej (2D) siatce typu *nonorthogonalcorner point* zbudowanej z bloków o wymiarach 1[m]x1[m]x1[m] po obu stronach uskoku. Miąższość warstwy wynosi 50[m], a zrzut uskoku 50%. Parametry uskoku, traktowanego jako potencjalny kierunek migracji CO2(**Fig. 1.1.28_24**), modelowane są poprzez mnożnik przepuszczalności strefy uskokowej (FTM) w stosunku do przepuszczalności poziomej warstw (w zakresie od 0 do 0.1). Współczynnik 0 odpowiada uskokowi całkowicie szczelnemu.

Okazuje się, że przy założonej przepuszczalności poziomej rzędu 100 mD, już przy mnożniku przepuszczalności uskoku równym 0.01 (co daje 1 mD przepuszczalności uskoku) migracja poprzez strefę zrzutu jest bardzo wyraźna. Bardzo duży wpływ na taką sytuację ma niewątpliwie przepuszczalność pionowa warstw skalnych. Przy założeniu 10% anizotropii przepuszczalności pionowej w stosunku do poziomej (KV = 10 mD) migracja CO2 w kierunku stropu (a tym samym w kierunku strefy uskokowej) jest bardzo intensywna (**Fig. 1.1.28_25, 26**). Dopiero znaczna anizotropia przepuszczalności (Kv/KH poniżej 0.01) powoduje istotne ograniczenie migracji w kierunku pionowym. Jednakże w skali kilkuset lat migracja poprzez strefę uskokową o choćby niewielkiej przepuszczalności jest bardzo prawdopodobna.



Fig. 1.1.28_24 Model 2D strefy uskokowej; kolor pomarańczowy reprezentuje strefę nasycenia CO2, kolor niebieski – solankę



100 lat

500 lat



Fig. 1.1.28_25 Porównanie zachowania "chmury" CO2 w kontakcie ze strefą uskokową o różnych przepuszczalnościach po 10, 100 i 500 latach (FTM – FaultTransmissibilityMultiplier); K_V/K_H = 0.1



100 lat

500 lat



Fig. 1.1.28_27 Zmiana mechanizmu migracji CO₂ w przypadku znacznej anizotropii przepuszczalności (K_V/K_H = 0.01 – 0.0001); FTM = 0.01

Podsumowanie

Przedstawione wyniki modelowania komputerowego wymagają dalszej analizy mającej na celu poprawne zrozumienie metodologii przetwarzania numerycznego wyników oraz wpływu poszczególnych elementów modelu na jakość analizy stref uskokowej. Poprawa jakości modelowania musi obejmować m.in. bardziej precyzyjne określenie geometrii uskoków (z wykorzystaniem interpretacji sejsmiki w domenie głębokościowej), a także podniesienie szczegółowości modelu parametrycznego umożliwiające m.in. poprawne określenie wzorca nakładania warstw zbiornikowych i uszczelniających (Juxtaposition diagram).

Rejony: Wielkopolska, Łeba-Bałtyk

(Bartosz Papiernik, Michał Michna, Wojciech Górecki, Łukasz Klimkowski, Stanisław Nagy)

Wykonano również wstępny model uskokowy Wielkopolski (Fig. 1.1.28_29). Na obecnym etapie prac zostały wykonane 37 uskoków mezozoicznych. Wszystkie uskoki z tego rejonu zostały wyznaczone jako uskoki liniowe. Model ten składa się z 589 pilarów. Dalsza część prac będzie obejmowała w miarę możliwości kształtowanie uskoków na podstawie interpretacji profili sejsmicznych jak również analizę parametrów tych uskoków podobnie jak w przypadku przeprowadzonej analizy modelu uskokowego Mazowsza, będzie to jednak możliwe dopiero po opracowaniu przez PGI Warszawa danych geofizycznych– otworowych i sejsmicznych i opracowaniu modelu statycznego omawianego rejonu. W chwili obecnej zespól KSE opracował regionalny model uskokowy mezozoiku, przygotowany do szybkiego opracowania osnowy geometrycznej modelu parametrycznego na rozpatrywanym obszarze Pomorza (Fig. 1.1.28_28) (Papiernik et al.2008).







Fig. 1.1.28_29 Mapa lokalizacji otworów nawiercających strop utworów kredy dolnej w rejonie Wielkopolski

Modebwanie wpływu uskoku na rozprzestrzenianie CO2

Założono wyidealizowany stan po zakończeniu zatłaczania z niewielką wydajnością w długim okresie czasu. Przyjęto nasycenie wodą związaną na poziomie 20%, a zatem nasycenie CO2 w strefie składowania wynosi 80%. Nasycenie wody powyżej i poniżej "chmury" CO2 wynosi 100%, a maksymalne nasycenie rezydualne gazu w modelu to 20%. W takich warunkach siły wyporności sprawiają, iż składowany gaz migruje zgodnie z preferencyjnymi kierunkami.

Model oparty jest na dwuwymiarowej (2D) siatce typu *nonorthogonal cornerpoint* (Ry) zbudowanej z bloków o wymiarach 1[m]x1[m]x1[m] po obu stronach uskoku. Miąższość warstwy wynosi 50[m], a zrzut uskoku 50%. Parametry uskoku, traktowanego jako potencjalny kierunek migracji CO2, modelowane są poprzez mnożnik przepuszczalności strefy uskokowej (FTM) w stosunku do przepuszczalności poziomej warstw (w zakresie od 0 do 0.1). Współczynnik 0 odpowiada uskokowi całkowicie szczelnemu.

Okazuje się, że przy założonej przepuszczalności poziomej rzędu 100md, już przy mnożniku przepuszczalności uskoku równym 0.01 (co daje 1 mD przepuszczalności uskoku) migracja poprzez strefę zrzutu jest bardzo wyraźna. Bardzo duży wpływ na taką sytuację ma niewątpliwie przepuszczalność pionowa warstw skalnych. Przy założeniu 10% anizotropii przepuszczalności pionowej w stosunku do poziomej (KV=10 md) migracja CO2 w kierunku stropu (a tym samym w kierunku strefy uskokowej) jest bardzo intensywna (**Fig. 1.1.28_31, 32**). Dopiero znaczna anizotropia przepuszczalności (Kv/KHponiżej0.01) powoduje istotne ograniczenie migracji w kierunku pionowym. Jednakże w skali kilkuset lat migracja poprzez strefę uskokową o choćby niewielkiej przepuszczalności jest bardzo prawdopodobna.



Fig. 1.1.28_30 Model 2D strefy uskokowej; kolor pomarańczowy reprezentuje strefę nasycenia CO2, kolor niebieski– solankę



Fig. 1.1.28_31 Zmiana nasycenia gazem oraz prędkości gazu w stropie warstwy (po 10, 30 i 50 latach zatłaczania oraz po 10, 50, 100 i 250 latach po zakończeniu zatłaczania)



Fig. 1.1.28_32 Zmiana nasycenia gazem, prędkości gazu i wody w stropie warstwy i przekroju równoległym do kierunku przepływu wody (po 10, 30 i 50 latach zatłaczania oraz po 10, 50, 100 i 250 latach po zakończeniu zatłaczania)

Podsumowanie

Przedstawione wyniki modelowania komputerowego wymagają dalszej analizy mającej na celu poprawne zrozumienie metodologii przetwarzania numerycznego wyników oraz wpływu poszczególnych elementów modelu na jakość analizy stref uskokowej. Poprawa jakości modelowania musi obejmować m.in. bardziej precyzyjne określenie geometrii uskoków(z wykorzystaniem interpretacji sejsmiki w domenie głębokościowej), a także podniesienie szczegółowości modelu parametrycznego umożliwiające m.in. poprawne określenie wzorca nakładania warstw zbiornikowych i uszczelniających (Juxtaposition diagram).

Opracowanie materiałów archiwalnych - mapy i przekroje (1.4.2 - PBG)

Rejon I - Bełchatów, Pola potencjalne (Zdzisław Żuk)

Pomiary grawimetryczne w rozpatrywanym obszarze zostały wykonane w latach 60, 70 i 80 ubiegłego wieku. Średnia gęstość pomiarów wynosi ok. 3 pkt/km². Pomiary magnetyczne ΔT wykonane zostały w latach 90 ub. wieku i na początku wieku bieżącego ze średnią gęstością 2.5 pkt/km². Ponieważ lokalizacja danych grawimetrycznych jest w układzie Borowej Góry, zachodziła konieczność ich transformacji do układu 42. Z uwagi na niemożność matematycznego przeliczenia układu Borowa Góra na układ 42, wykorzystano opracowaną nową mapę grawimetryczną Monokliny Przedsudeckiej wykonaną w PGNiG w 2001 roku, której zasięg częściowo pokrywa wschodnią i południową część tematu. Wyliczona średnia poprawka na współrzędne prostokątne w układzie Borowej Góry (w układzie lokalnym z południkiem odniesienia 19°) wynosi: po osi X: -120m i po osi Y: -66m. Mapy i "gridy" anomalii Bouguera (**Fig. 1.4.2_1**) i anomalii ΔT (**Fig. 1.4.2_2**) opracowano z dokładnością dla map w skali 1 : 50 000.

Dla mapy anomalii Bouguera wykonano następujące transformacje i mapy:

Filtr częstotliwościowy BTWR dla umownego przedziału głębokości 800-2000m przedstawionego na Fig.
1.4.2_3

- Mapę pionowych granic gęstości (uskoki, pionowe kontakty litologiczne) wyznaczonych przy pomocy zmodyfikowanej metody Linssera i metody "pokryć wielokrotnych" przedstawioną na zał. **Fig. 1.4.2_4**

- Mapę osi maksymalnego gradientu poziomego (uskoki, kontakty litologiczne) wyznaczonych przy pomocy metody "pokryć wielokrotnych" przedstawioną na **1.4.2_5**.



Fig. 1.4.2_1 Mapa anomalii Bouguera dla rejonu Bełchatowa (z otoczeniem)



Fig. 1.4.2_2 Mapa anomalii magnetycznych ΔT dla rejonu Bełchatowa (z otoczeniem)



1.4.2_3 Mapa rezydualnych anomalii grawimetrycznych, dla orientacyjnej głębokości penetracji 0.8-2 km, w rejonie Bełchatowa (z otoczeniem)



Fig. 1.4.2_4 Mapa pionowych granic gęstości według grawimetrii, w rejonie Bełchatowa (z otoczeniem)



Fig. 1.4.2_5 Mapa osi maksymalnego gradientu poziomego (grawimetria), w rejonie Bełchatowa (z otoczeniem).

Celem transformacji było wydzielenie lokalnych struktur anomalnych a także określenie charakteru i przebiegu stref tektonicznych w przedziale głębokości 0 – 3000m. Na mapach pionowych granic gęstości i osi gradientu poziomego wyróżniono różnymi kolorami trzy przedziały głębokości: 0-1000m, 1000-2000m i 2000-3000m. Z analizy tych map wynika, że wyznaczone linie tektoniczne na mapach pionowych granic gęstości i osi maksymalnego gradientu poziomego dobrze ograniczają zasięg wyznaczonych struktur, szczególnie od strony wschodniej i zachodniej, natomiast od strony południowej i północnej przedstawiony obraz wskazuje na bardziej skomplikowaną budowę tektoniczną.

Do wykonania prac wykorzystano oprogramowanie komercyjne SURFER, a także programy własne: GRID, TRANGRID, GENRYS, PLOTVIEW, PIGRLIN, PROFTEKT.

Mapy hydrochemiczne i hydrodynamiczne (Zdzisław Żuk)

Dla potrzeb zadania wykonano kalibrację i digitalizację map hydrochemicznych i hydrodynamicznych z atlasu hydrogeologicznego Polski L. Bojarskiego w skali 1: 1 000 000. Operacje te przeprowadzono dla następujących horyzontów stratygraficznych: kredy dolnej, jury górnej, jury dolnej i utworów pstrego piaskowca. Na każdej mapie zdigitalizowano ponad 20 warstw tematycznych w postaci wielokątów. linii, punktów i tekstu (zapisane na CD).

Dodatkowo wykonano digitalizację dwóch map czasowych granic sejsmicznych: stropu jury środkowej i spągu jury.

Do digitalizacji wykorzystano własny program DIGIMAP.

Rejon GZW (poziomy solankowe) - Pola potencjalne (Zdzisław Żuk)

Dane grawimetryczne zebrano z obszaru w południowej części GZW, leżącego pomiędzy miejscowościami Bielsko-Biała i Cieszyn, na północy dochodzącego do jez. Goczałkowickiego. Obszar ten zajmuje powierzchnię 672 km².

Źródłowy materiał pomiarowy z obszaru tego tematu zawarty jest w dwóch archiwalnych dokumentacjach badań grawimetrycznych:

- "Dokumentacja półszczegółowych badań grawimetrycznych, temat: Górnośląskie Zagłębie Węglowe 1972 r." – J. Reczek, PBG.
- "Dokumentacja szczegółowych badań grawimetrycznych temat: Kaczyce Brzezówka 1978-79 r." T. Kleszcz, PBG.

Zdjęcie półszczegółowe charakteryzowało się zagęszczeniem ok. 4 pkt./km² i dokładnością typową dla tego typu prac, mieszczącą się w przedziale: ± 0.041 mgal. Celem badań było m. in. dostarczenie informacji o wgłębnych strukturach GZW, w szczególności głębokości zalegania utworów dewonu i podłoża krystalicznego.

Zdjęcie szczegółowe miało zagęszczenie ok. 27 pkt./km² i dokładność pomiarów w przedziale: +/- 0.014 mGal. Celem badań było zbadanie tektoniki karbonu i jego nadkładu pod kątem rozpoznania złóż węgli kamiennych.

W latach osiemdziesiątych ub. wieku w ramach tematu "Mapa grawimetryczna Polski - ark. Cieszyn" (J. Grzywacz, S. Szczypa) materiał źródłowy ujednolicono i zakodowano na komputerowe nośniki.

W końcu lat dziewięćdziesiątych Przemysł Naftowy zainicjował dostosowanie pomiarów grawimetrycznych wykonanych w starym układzie (ukł. BG) do układu geodezyjnego (ukł. 42), obowiązującego w sejsmice. Ze względu na wymogi interpretacji kompleksowej, dane grawimetryczne zostały przeliczone do układu 42. Przyokazjiudoskonalonowieleelementówprzetwarzaniadanychgrawimetrycznychpoprzez:

- uaktualnienie formuły pola normalnego w obliczeniach katalogu anomalii Bouguera,
- znaczne poszerzenie zakresu obliczeń poprawki topograficznej,
- zastosowanie nowej, rozszerzonej postaci algorytmu obliczeń anomalii Bouguera.

Do opracowania wykorzystano archiwalną mapę anomalii Bouguera ze zmienną gęstością redukcji opracowaną w dokumentacji pt. "Określenie perspektyw poszukiwawczych złóż węglowodorów w rejonie Jastrzębie-Strumień-Kęty" wykonaną przez PBG w 2005 roku.

Dla mapy anomalii Bouguera (Fig. 1.4.2_6) wykonano następujące transformacje i mapy:

Filtr częstotliwościowy BTWR dla umownego przedziału głębokości 800-2000m (Fig. 1.4.2_7)

Mapę pionowych granic gęstości (uskoki, pionowe kontakty litologiczne) wyznaczonych przy pomocy zmodyfikowanej metody Linssera i metody "pokryć wielokrotnych" (**Fig. 1.4.2_8**)

Mapę osi maksymalnego gradientu poziomego (uskoki, kontakty litologiczne) wyznaczonych przy pomocy metody "pokryć wielokrotnych" (**Fig. 1.4.2_9**)

Celem transformacji było wydzielenie lokalnych struktur anomalnych a także określenie charakteru i przebiegu stref tektonicznych w przedziale głębokości istotnym dla geologicznej sekwestracji CO2. Na mapach pionowych granic gęstości i osi gradientu poziomego wyróżniono różnymi kolorami dwa przedziały głębokości: 0-2000m i 2000-5000m.

Do wykonania zadania PBG wykorzystało oprogramowanie komercyjne SURFER, a także programy własne: GRID, TRANGRID, GENRYS, PLOTVIEW, PIGRLIN, PROFTEKT.



Fig. 1.4.2_6 Mapa anomalii Bouguera dla południowej części GZW



Fig. 1.4.2_7Mapa rezydualnych anomalii grawimetrycznych, dla orientacyjnej głębokości penetracji 0.8-2 km, dla południowej części GZW



Fig. 1.4.2_8 Mapa osi maksymalnego gradientu poziomego (grawimetria), dla południowej części GZW



Fig. 1.4.2_9 Mapa pionowych granic gęstości według grawimetrii, dla południowej części GZW

Rejon Wielkopolski/struktur naftowych - Pola potencjalne (Zdzisław Żuk)

1. Mapa grawimetryczna

Obszar wyznaczony do opracowania i zajmuje powierzchnię 551 km². Ograniczony jest współrzędnymi geodezyjnymi w układzie 92: xmin = 294 km, xmax = 323 km, ymin = 422 km, ymax = 441 km. Do opracowania wykorzystano archiwalne dane pomiarowe. Z uwagi na to, że pomiary grawimetryczne opracowane były w układzie Borowa Góra, należało na wstępie przetworzyć je do standardów UE.

Dane przeliczone zostały przy następujących założeniach:

- transformacji współrzędnych punktów pomiaru z układu Borowa Góra na układ 42

- wprowadzeniu w miejsce systemu poczdamskiego systemu IGSN71,

- zastosowanie nowej formuły pola normalnego siły ciężkości dla elipsoidy WGS84,

- formuły obliczania poprawek topograficznych w promieniu do 166,7 km,

- wprowadzeniu nowej poprawki do obliczeń anomalii Bouguera uwzględniającej krzywiznę Ziemi.

Zastosowanie nowej formuły do obliczeń pola normalnego siły ciężkości związane jest z postępem w określaniu parametrów elipsoidy. Dla bardziej pełnego uwzględnienia wpływu rzeźby terenu, niezależnie od dotychczas określanych poprawek topograficznych do odległości 22,5 km z otoczenia punktów pomiarowych, określono poprawki do odległości 166,7 km oraz uwzględniono wpływ krzywizny Ziemi (poprawka Bullarda).

Następnie lokalizacja punktów grawimetrycznych została przeliczona do układu PUWG 92. Tak skonstruowane dane zostały wykorzystane do sporządzenia mapy anomalii Bouguera uwzględniając wartość gęstości w warstwie redukcyjnej 2.65 g/cm³ (**Fig. 1.4.2_10**)

Dla mapy anomalii Bouguera wykonano następujące transformacje i mapy:

• Filtr częstotliwościowy BTWR dla umownego przedziału głębokości 800-2000m przedstawionego na Fig. 1.4.2_11

• Mapę osi maksymalnego gradientu poziomego wyznaczonych przy pomocy metody "pokryć wielokrotnych" przedstawioną na Fig. 1.4.2_12

• Mapę pionowych granic gęstości wyznaczonych przy pomocy zmodyfikowanej metody Linssera i metody "pokryć wielokrotnych" przedstawioną na **Fig. 1.4.2_13**

• Mapę gęstości grawimetrycznych elementów liniowych przedstawioną na Fig. 1.4.2_14

Celem transformacji było wydzielenie lokalnych struktur anomalnych a także określenie charakteru i przebiegu stref tektonicznych w przedziale głębokości 0 – 3000m. Na mapach pionowych granic gęstości i osi gradientu poziomego wyróżniono różnymi kolorami trzy przedziały głębokości: 0-1 km, 1-2 km, 2-3km. Mapy gęstości grawimetrycznych elementów liniowych są wynikiem analizy i sumowania linii otrzymanych metodą "pokryć wielokrotnych" zarówno osi gradientu poziomego jak i pionowych granic gęstości.

Do wykonania zadania wykorzystano oprogramowanie komercyjne SURFER, a także programy własne: GRID, TRANGRID, GENRYS, PLOTVIEW, PIGRLIN, PROFTEKT.



Fig. 1.4.2_10 Mapa anomalii Bouguera



Fig. 1.4.2_11 Mapa grawimetryczna. Anomalie rezydualne w przedziale 800-2000m



Fig. 1.4.2_12 Mapa osi maksymalnego gradientu poziomego



Fig. 1.4.2_13 Mapa pionowych granic gęstości



Fig. 1.4.2_14 Mapa gęstości grawimetrycznych elementów liniowych

2. Digitalizacja map strukturalnych i złożowych.

Digitalizację przeprowadzono dla map dostarczonych przez PIG w postaci obrazów rastrowych. Do opracowania użyto własnych programów: DIGIMAP i GRIDIZOL.

Zdigitalizowano następujące mapy (na CD):

- Mapę strukturalną stropu pstrego piaskowca środkowego w skali 1:50000
- Mapę strukturalną stropu czerwonego spągowca w skali 1:25000

Digitalizacja obejmowała takie obiekty jak izolinie, uskoki, zasięgi.

Zdigitalizowane mapy przetworzono do postaci "gridów" w formacie SURFER o oczku siatki 100 m.