

Spis treści

Spis treści.....	1
1.1.7 WYZNACZENIE STREF WYŁĄCZONYCH Z SEKWESTRACJI CO ₂	3
Rejon I - Bełchatów.....	3
Rejon II - GZW.....	9
Rejon III - Mazowsze.....	10
Rejon IV - brzeźna strefa Karpat i Zapadliska Przedkarpackiego.....	14
Rejon V - Lubelszczyzna (i Podlasie)	16
Rejon VI - Wielkopolska - Kujawy	19
Rejon VII - NW Polska	22
Rejon VIII - Łeba-Bałtyk oraz NE Polska	25
Złoża węglowodorów	31
Zagadnienia stanu technicznego i szczelności otworów (1.1.7 - AGH)	34
Rejon Bełchatowa.....	34
Rejon GZW.....	38
Badania laboratoryjne zaczynów cementowych i kamieni cementowych stosowanych w otworach wiertniczych dla rejonu Mazowsza i struktur naftowych.....	43
Badania laboratoryjne świeżych i stwardniałych zaczynów cementowych stosowanych w otworach wiertniczych na Lubelszczyźnie i w północno-zachodniej Polsce.....	68
Badania laboratoryjne zaczynów cementowych i kamieni cementowych stosowanych w otworach wiertniczych rejon Wielkopolska.....	94
Zagadnienia stanu technicznego i szczelności otworów - badania laboratoryjne skał o niskiej przepuszczalności	113
Stanowisko badawcze oraz metodyka badań skał o niskiej przepuszczalności	113
Zagadnienia stanu technicznego i szczelności otworów - badania laboratoryjne skał o niskiej przepuszczalności, c.d.	128
Zagadnienia stanu technicznego i szczelności otworów - badania laboratoryjne skał o niskiej przepuszczalności, określenie ciśnienia progowego skał uszczelniających.....	135

Stanowisko badawcze oraz metodyka badań ciśnienia progowego skał.....	141
Przedstawienie modeli układów sekwestracyjnych w Polsce; modele parametryczne – dynamiczne (1.1.32 - AGH)	149
Rejon I - Bełchatów.....	149
Pozostałe rejony (Polska NW, Pomorze, wyniesienie Łeby, Wielkopolska, Mazowsze/Lubelszczyzna)	155
Rozkład podstawowych parametrów zbiornikowych w rejonie Polski północno-zachodniej ..	158
Rozkład podstawowych parametrów zbiornikowych w rejonie Pomorza	160
Rozkład podstawowych parametrów zbiornikowych w rejonie wyniesienia Łeby.....	162
Rozkład podstawowych parametrów zbiornikowych w rejonie Wielkopolski.....	164
Rozkład podstawowych parametrów zbiornikowych w rejonie Mazowsza/Lubelszczyzny	167
Przedstawienie modeli układów sekwestracyjnych w Polsce; modele dla rejonu GZW i pokładów węgla (1.1.33 - GIG)	178
UKŁAD SEKWESTRACYJNY KANIÓW (RECOPOL).....	179

1.1.7 WYZNACZENIE STREF WYŁĄCZONYCH Z SEKWESTRACJI CO₂

Rejon I - Bełchatów

(Adam Wójcicki)

O wyłączeniu może zadecydować występowanie ujęć wodnych, głównych zbiorników wód podziemnych, a także starych zlikwidowanych otworów, co do których zachodzi podejrzenie możliwości ucieczki mediów złożowych wskutek nieszczelności zacementowania. Ostatnie zagadnienie szczegółowo przeanalizował zespół AGH (wybrano najistotniejsze zagadnienia dla tematyki tego rozdziału) o czym poniżej.

Ponadto na końcu tego podrozdziału zamieszczono **zał. 7_1**, w którym przedstawiono schematy likwidacji otworów (schemat A bardziej odpowiada sytuacji z jaką mielibyśmy doczynienia w przypadku likwidacji otworu na obszarze składowiska dwutlenku węgla), a także przykładowy schemat konstrukcji/zarurowania otworu, stosowane w odwiertach naftowych (czyli np. dla otworów Zaosie-1, 2, 3 i Buków 1, 2) i badawczych w Polsce (na podstawie materiałów PGNiG S.A.).

AGH dokonał również analiz układów sekwestracyjnych w wybranym rejonie pod kątem przydatności lub nieprzydatności jako potencjalnych składowisk (zadanie **1.1.32**).

Samo występowanie ujęć wodnych (**Fig. 1.1.7_1**) może być przeciwskazaniem do lokalizacji odwiertu zatłaczającego CO₂ (nie można prowadzić robót geologicznych w strefie ochronnej ujęcia, sięgającej do kilkunastu-kilkudziesięciu metrów od studni – Lidia Razowska-Jaworek), jednakże obecność ujęć w obrębie danej struktury, o powierzchni setek km² nie wyklucza jej przydatności do sekwestracji, jedynie ogranicza możliwości lokalizacji nowych otworów badawczych/monitoringowych i zatłaczających.

Natomiast obecność Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (zwłaszcza górnourajskich i dolnokredowych – patrz rozdział 1.1.6)(**Fig. 1.1.7_2**) wymaga ostrożności przy typowaniu struktury w ich obrębie.

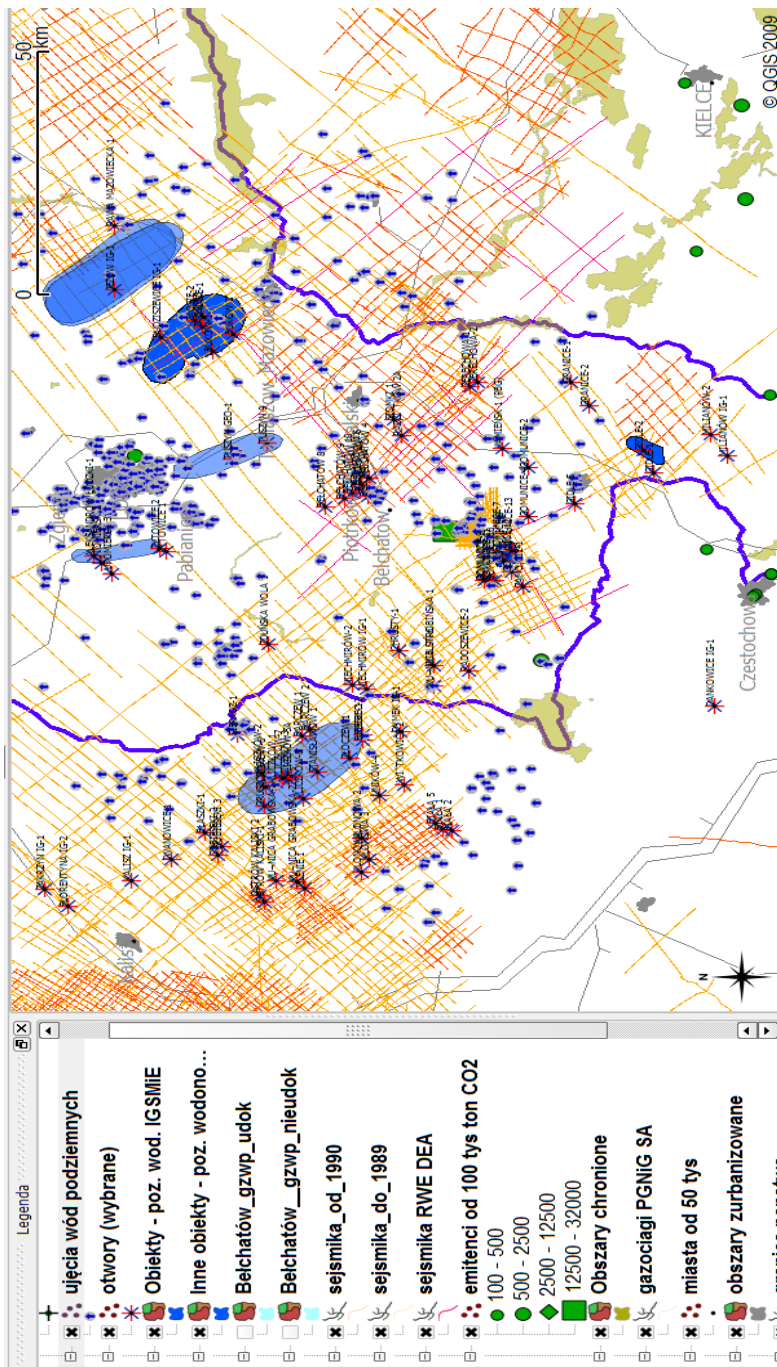


Fig. 1.1.7_1 Ujęcia wód podziemnych w rejonie Bełchatowa (czynne, głębokość ponad 100 metrów)

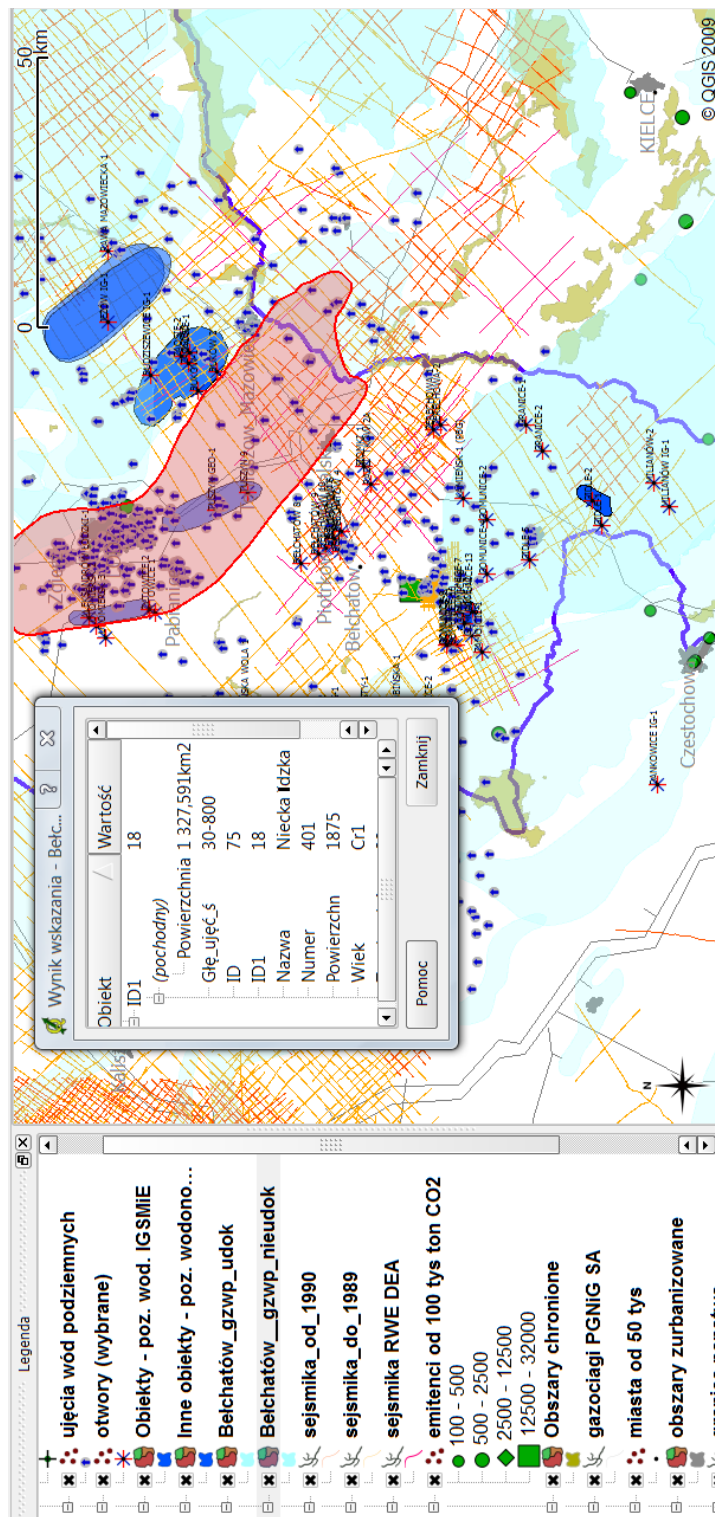
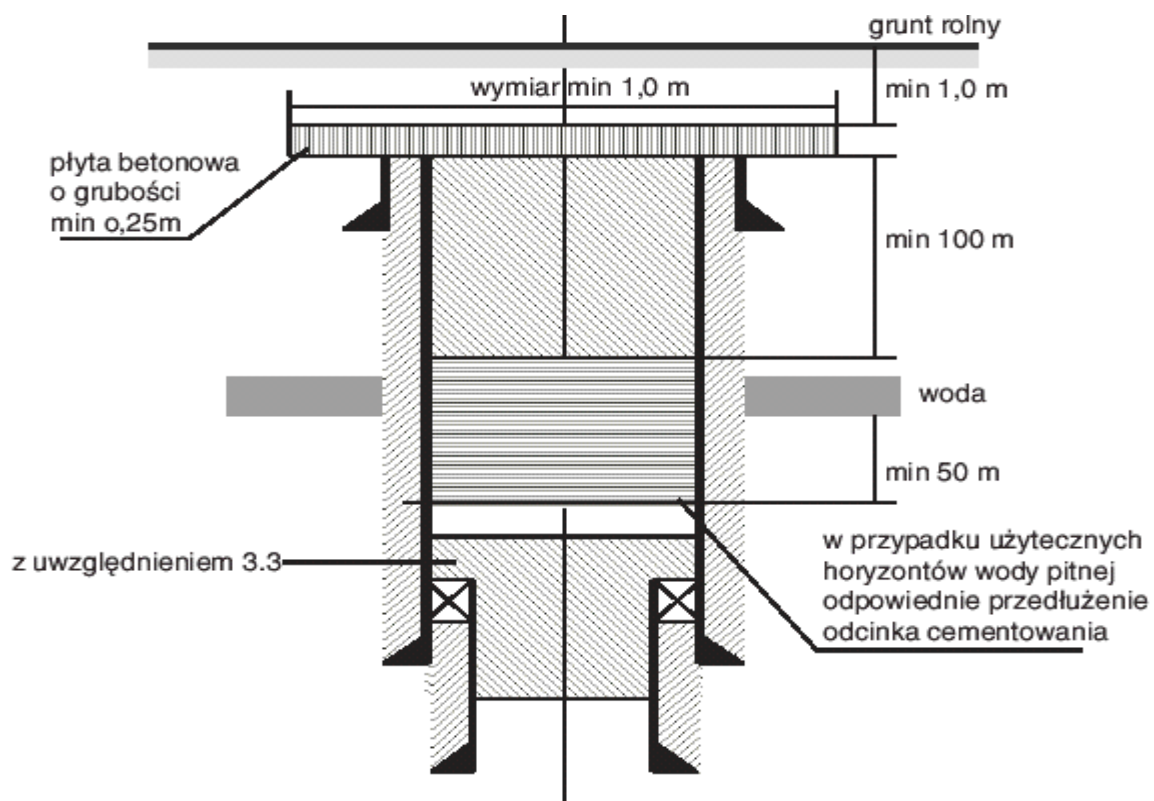
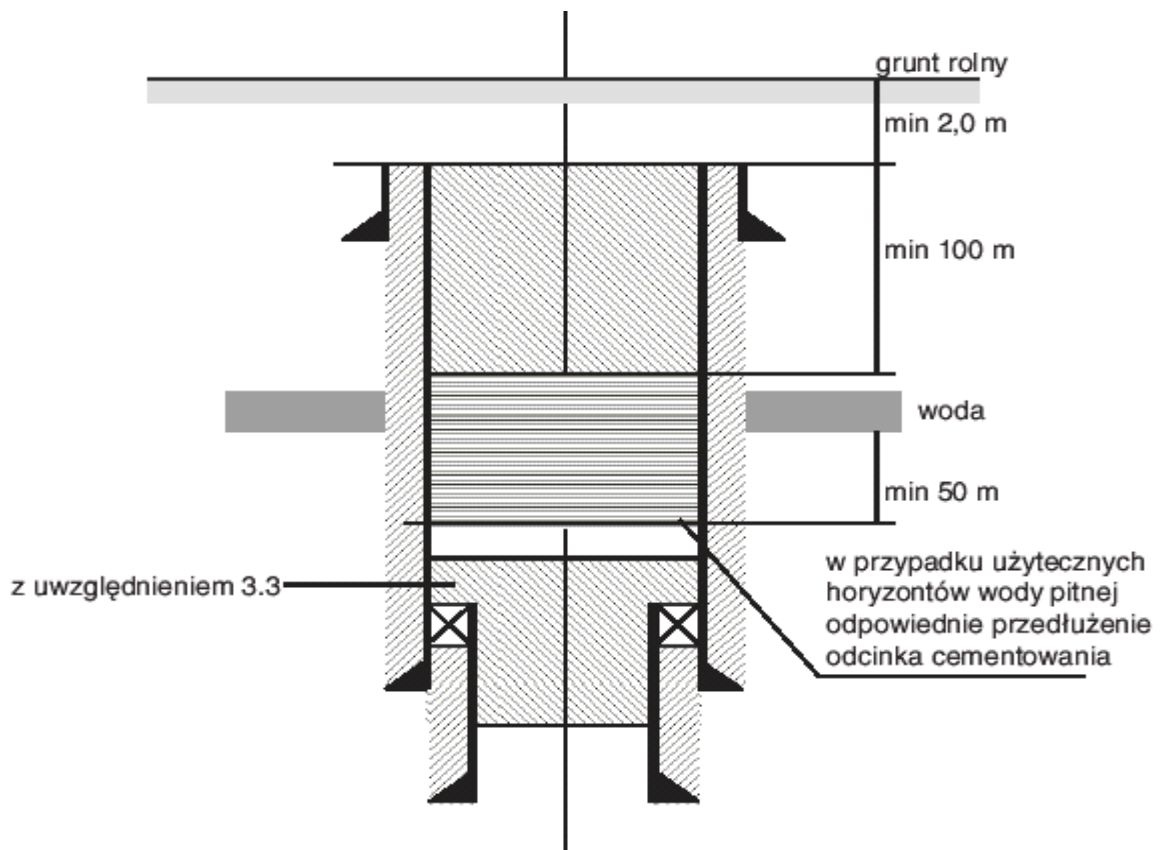


Fig. 1.1.7_2 GZWP w rejonie Bełchatowa (zaznaczony rezerwoy zbiornik dolnokredowy)

Zař. 7_1 Schematy likwidacji typowych otworów, wykonywanych na terenie Polski, a takře schemat zarurowania konstrukcji typowego otworu (na podstawie materiałůw PGNiG)

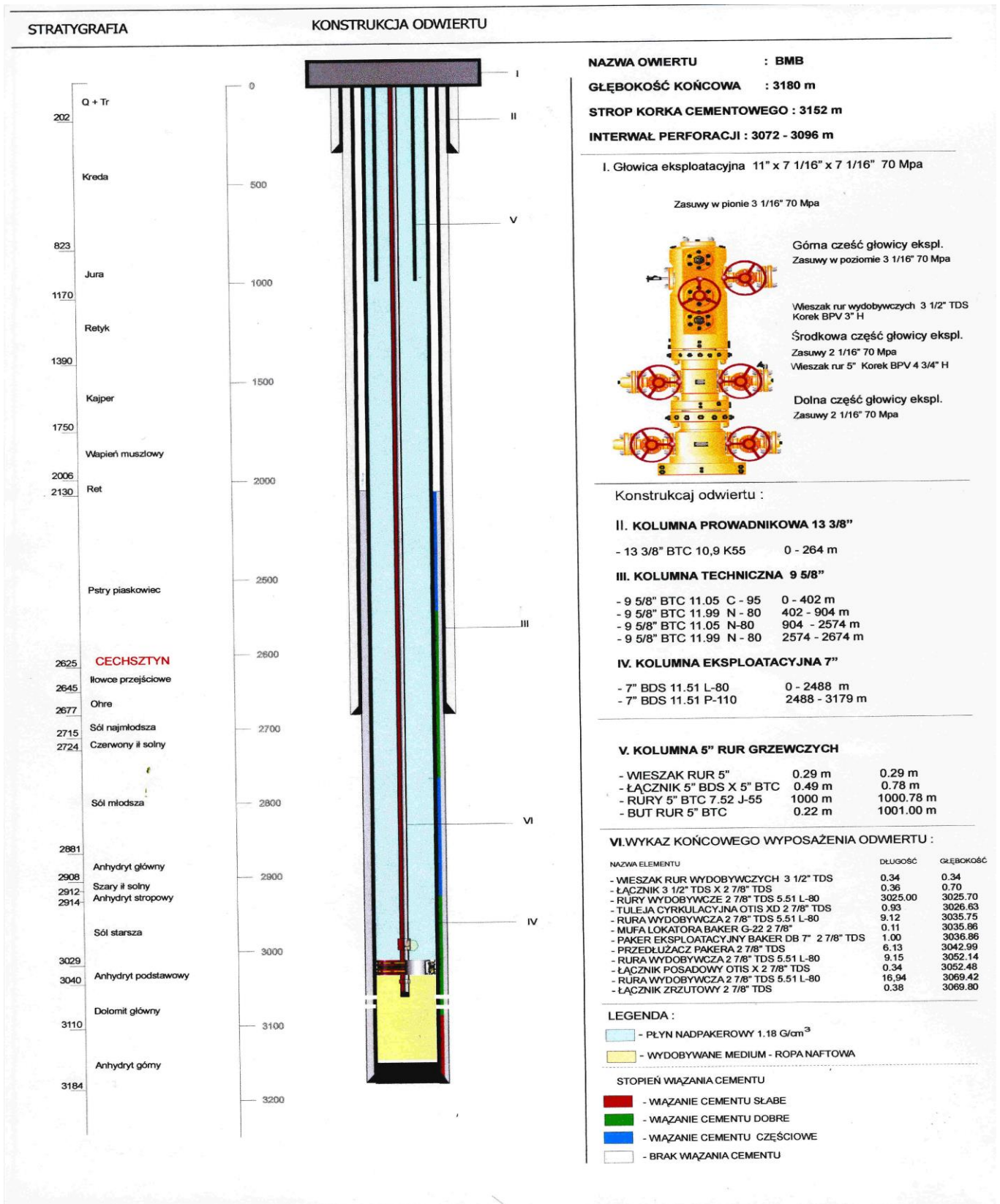


A. Schemat likwidacji części podpowierzchniowej odwiertów z zamknięciem rur



B. Schemat likwidacji części podpowierzchniowej odwiertów bez zamknięcia wylotu rur

C. Przykładowy schemat konstrukcji/zarurowania otworu



Rejon II - GZW

(Janusz Jureczka)

O wyłączeniu danego obiektu/strefy z sekwestracji CO₂ może zdecydować występowanie ujęć wodnych, głównych zbiorników wód podziemnych, a także starych zlikwidowanych otworów, co do których zachodzi podejrzenie możliwości ucieczki mediów złożowych wskutek nieszczelności zacementowania. Ostatnie zagadnienie szczegółowo przeanalizował zespół AGH (wybrano najistotniejsze zagadnienia dla tematyki tego rozdziału) o czym poniżej.

Występowanie ujęć wodnych może być przeciwskazaniem do lokalizacji odwiertu zatłaczającego CO₂ (nie można prowadzić robót geologicznych w strefie ochronnej ujęcia, sięgającej do kilkunastu-kilkudziesięciu metrów od studni), jednakże obecność ujęć w obrębie danej struktury nie wyklucza jej przydatności do sekwestracji. Natomiast obecność Głównych Zbiorników Wód Podziemnych wymaga ostrożności przy typowaniu struktury na ich obszarze. Wspomniane zagadnienia hydrogeologiczne były już analizowane w poprzednim rozdziale (**1.1.6**) – generalnie można stwierdzić, że wybór obszaru najbardziej perspektywicznego (Skoczów – Czechowice – Cieszyn) w żadnym przypadku nie zagraża GZWP na tym obszarze. Podobnie ma się sprawa z zasięgiem eksploatacji górniczej (patrz rozdziały **1.1.3**, **1.1.4** i **1.1.6**), tzn. jednym z najważniejszych kryteriów był brak zagrożeń związanych z pobliską działalnością górniczą.

Pozostaje sprawa zlikwidowanych otworów, co jest istotne na obszarze (południowej) części GZW, gdzie mamy setki otworów wiertniczych przewiercających potencjalny nadkład uszczelniający rozpatrywanych kolektorów. Wynika to z faktu, że jest to nie tylko obszar występowania karbonu węglonośnego, ale też obszar poszukiwań naftowych (strefa frontu Karpat i Zapadliska Przedkarpackiego).

Rejon III - Mazowsze

(Adam Wójcicki)

O wyłączeniu może zdecydować występowanie ujęć wodnych, głównych zbiorników wód podziemnych, a także starych zlikwidowanych otworów, co do których zachodzi podejrzenie możliwości ucieczki mediów złożowych wskutek nieszczelności zacementowania. Ostatnie zagadnienie szczegółowo przeanalizował zespół AGH (wybrano najistotniejsze zagadnienia dla tematyki tego rozdziału), o czym poniżej. AGH dokonał również analiz układów sekwestracyjnych w wybranym rejonie pod kątem przydatności lub nieprzydatności jako potencjalnych składowisk (zadanie 1.1.32).

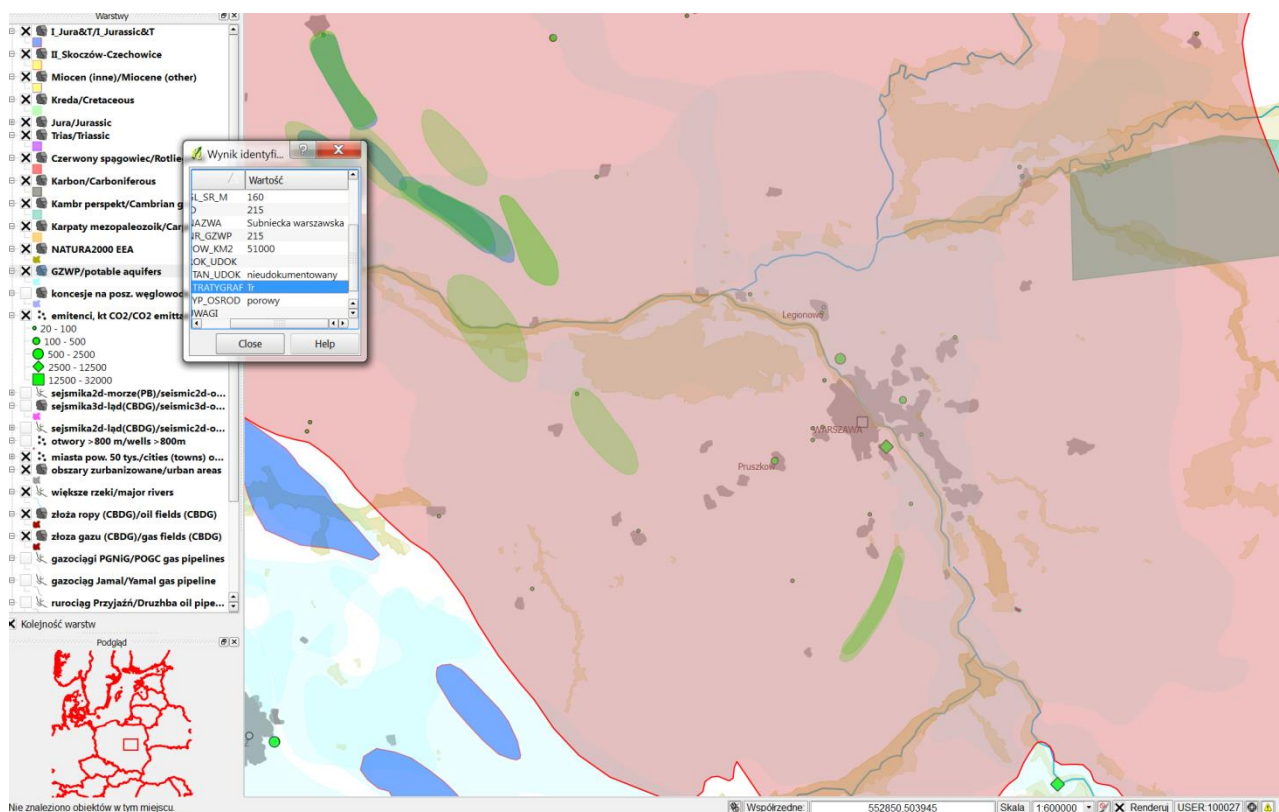


Fig. 1.1.7_3 GZWP w rejonie Mazowsza (zaznaczony rezerwowy zbiornik trzeciorzędowy)

Samo występowanie ujęć wodnych może być przeciwskazaniem do lokalizacji odwiertu zatłaczającego CO₂ (nie można prowadzić robót geologicznych w strefie ochronnej ujęcia, sięgającej do kilkunastu-kilkudziesięciu metrów od studni – Lidia Razowska-Jaworek), jednakże obecność ujęć w obrębie danej struktury, o powierzchni setek km² nie wyklucza jej przydatności do sekwestracji, jedynie ogranicza możliwości lokalizacji nowych otworów badawczych/monitoringowych i zatłaczających.

Natomiast obecność Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (zwłaszcza górnokredowych i dolnokredowych – patrz rozdział 1.1.6)(Fig. 1.1.7_3) wymaga ostrożności przy typowaniu struktury w ich obrębie. W przypadku Mazowsza na obszarze badań występuje niedokumentowany zbiornik trzeciorzędowy (oraz

płytsze – rozpatrujemy zbiornik najgłębiej położony), o możliwej głębokości ujęć sięgającej 160 metrów. Z uwagi na charakterystykę litologiczno-facjalną (patrz rozdział 1.1.3, rejon III) nie wydaje się, aby istniało jakiegokolwiek zagrożenie dla wód słodkich tegoż zbiornika związane ze składowaniem dwutlenku węgla w utworach jury i ewentualnie dolnej kredy, od których dzieli zbiornik wieśset metrów kompleksów uszczelniających.

Występowanie obszarów NATURA2000 na obszarze rozpatrywanej struktury nie wyklucza wykorzystania jej na składowisko CO₂. W przypadku Mazowsza mamy właściwie jeden taki przypadek – antyklinę Wyszogrodu na zachód od Warszawy, która przecina obszar chroniony „Dolina Środkowej Wisły” (Fig. 1.1.7_4). W takim przypadku raczej nie byłoby możliwe zlokalizowanie naziemnej infrastruktury składowiska w obrębie obszaru chronionego, oraz utrudnione byłoby zaprojektowanie optymalnej z ekonomicznego punktu widzenia trasy rurociągu CO₂.

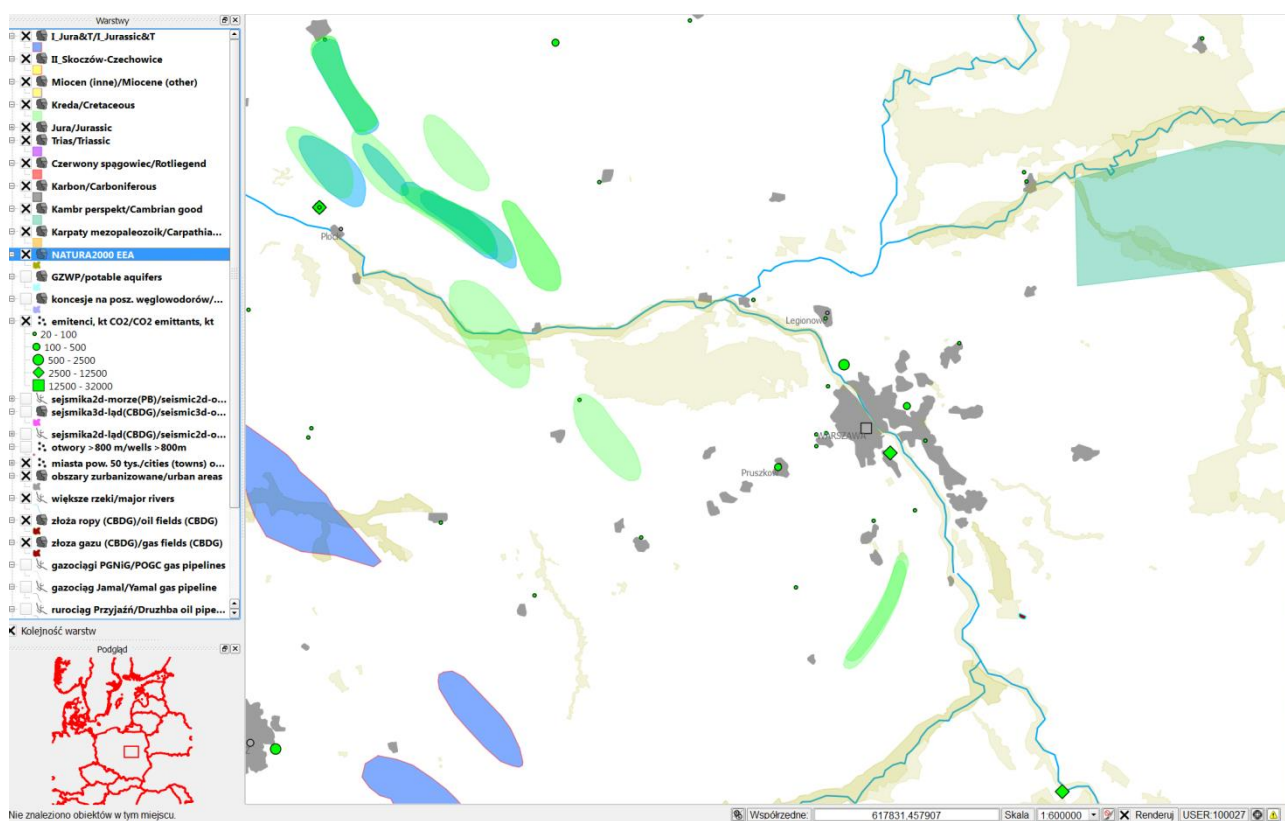


Fig. 1.1.7_4 Obszary NATURA2000 w rejonie Mazowsza

Inny przykład możliwego konfliktu interesów to poszukiwanie i wydobywanie węglowodorów. Obecnie większość terytorium Polski pokryta jest koncesjami na poszukiwanie niekonwencjonalnych i/lub konwencjonalnych złóż węglowodorów. Np. na NW od Warszawy PGNiG SA i Marathon Oil Poland posiadają koncesję poszukiwania gazu w łupkach (Fig. 1.1.7_5), a na południe i SW od Warszawy mamy koncesje poszukiwawcze na konwencjonalne złoża gazu. Z poniżej omówionej mapy prognostycznej (Fig. 1.1.7_6) wynika, że raczej szanse na znalezienie dużych i rozległych złóż gazu w łupkach np. w rejonie

Bodzanowa są raczej niktę i prawdopodobieństwo, że zostaną one odkryte pod którąś ze struktur na NW od Warszawy.

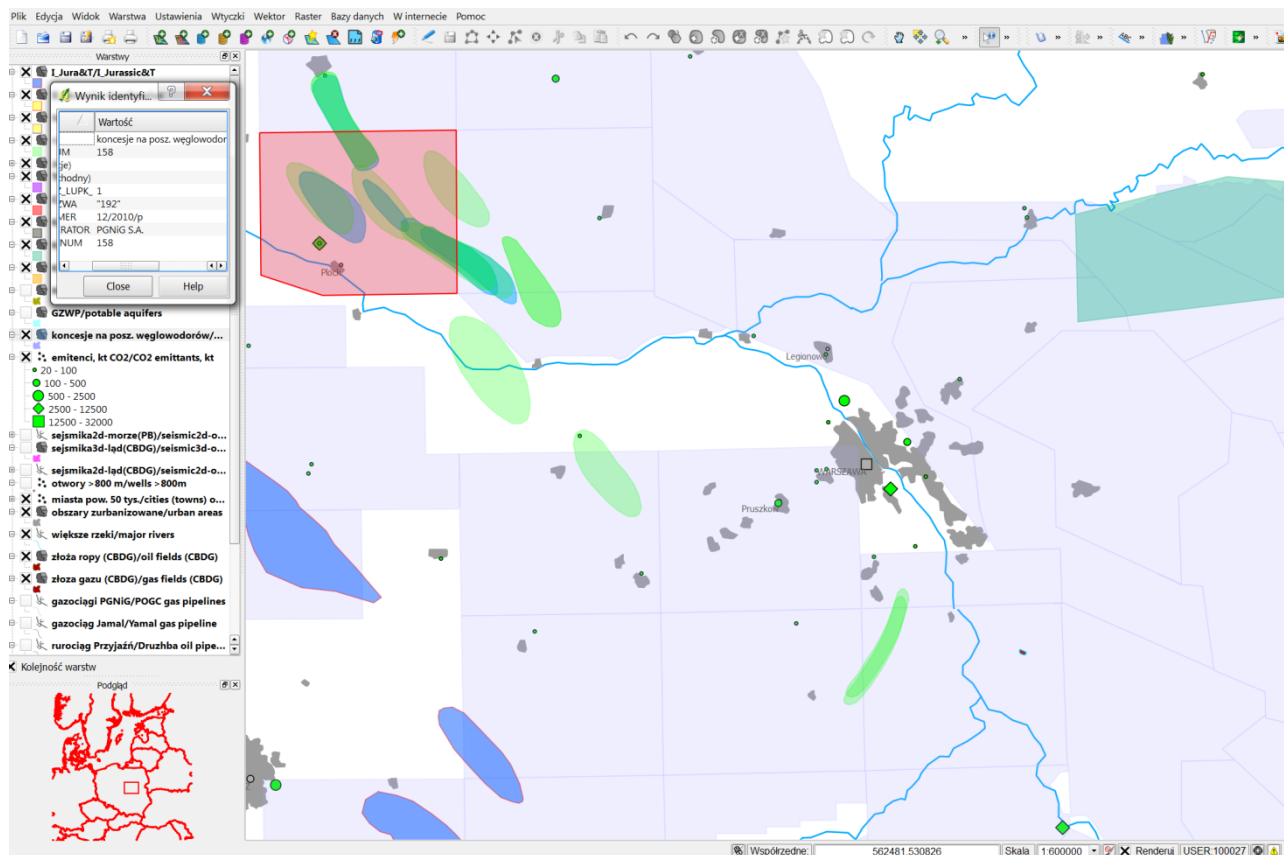


Fig. 1.1.7_5 Koncesje na poszukiwanie niekonwencjonalnych i/lub konwencjonalnych źródeł węglowodorów w rejonie Mazowsza

Bardziej miarodajna w tym przedmiocie może być mapa prognostyczna występowania źródeł gazu łupkowego i ropy łupkowej (Fig. 1.1.7_6). Została ona przygotowana na potrzeby pierwszego raportu PIG-PIB na temat oceny zasobów wydobywalnych niekonwencjonalnych źródeł węglowodorów, opublikowanego w 2012 roku, na podstawie dotychczasowego stanu wiedzy (ale przed odwierceniem najnowszych otworów, których wyniki nie zostały dotąd upublicznione) i zawarte w niej informacje stanowiły podstawę dla dotychczasowych decyzji koncesyjnych Ministerstwa Środowiska.

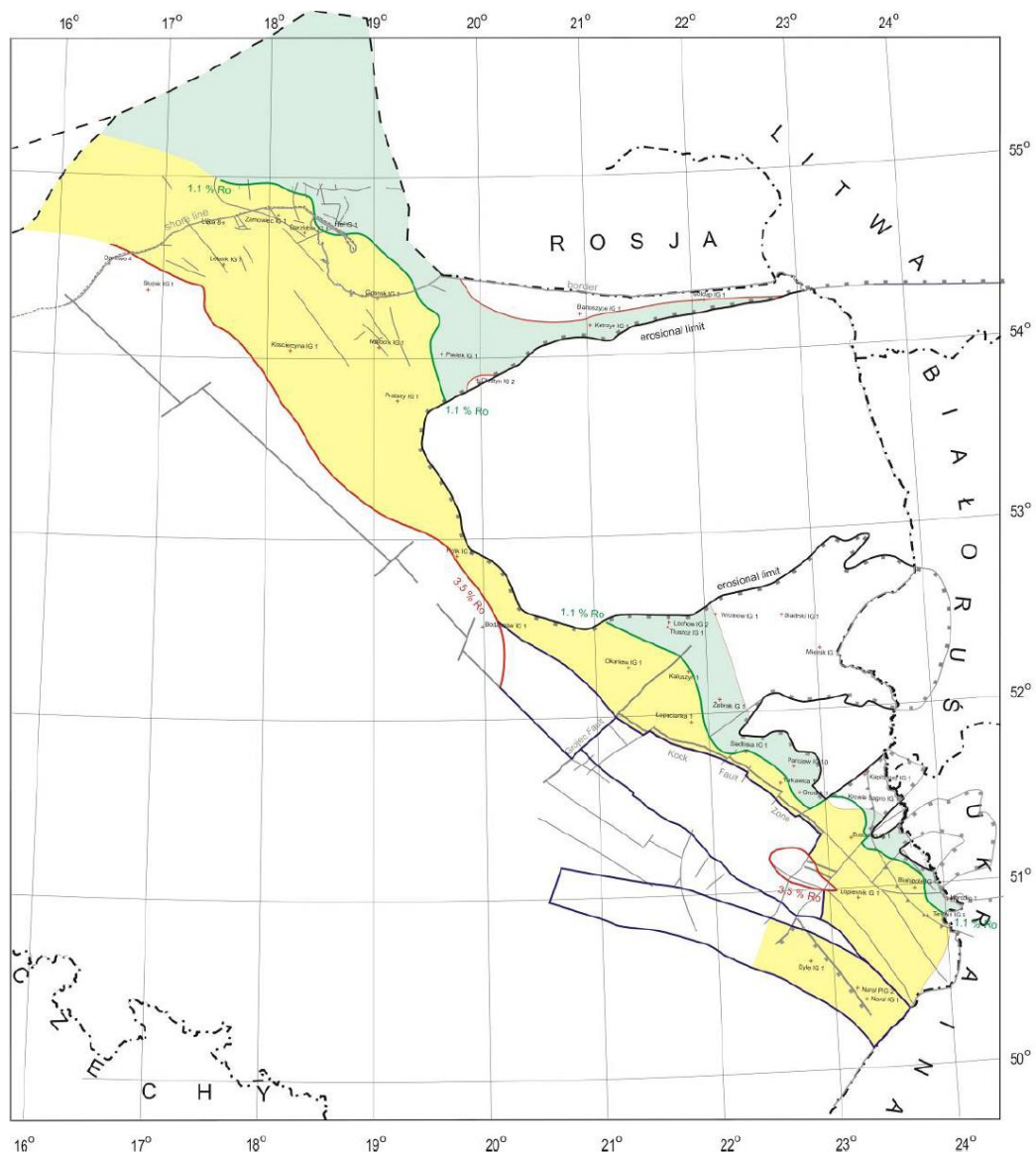


Fig. 1.1.7_6 Obszar zakwalifikowany do obliczeń zasobów gazu ziemnego w łupkach (kolor żółty) i ropy naftowej w łupkach (kolor niebieskozielony) w wariancie maksymalnej miąższości pakietów łupków o zawartości TOC > 2 %, wagowo wyznaczony na podstawie danych z 39 odwiertów badawczych z lat 1950-1990, wg Raportu PIG-PIB (*Ocena zasobów wydobywalnych gazu ziemnego i ropy naftowej w formacjach łupkowych dolnego paleozoiku w Polsce (basen bałtycko-podlasko-lubelski), Raport pierwszy, 2012*).

Rejon IV - brzeżna strefa Karpat i Zapadliska Przedkarpackiego

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

O wyłączeniu danego obiektu/strefy z sekwestracji CO₂ może zadecydować występowanie obszarów ochrony przyrody – Natura 2000, obszarów górniczych, ujęć wodnych, głównych zbiorników wód podziemnych, a także starych zlikwidowanych otworów. W rejonie wyznaczonych zbiorników (**Fig. 1.1.7_7**) mamy do czynienia z obszarami natura 2000 OSO i SOO. Do obszaru Natura 2000 OSO należy Puszcza Niepołomska (PLB1200002). Naturę 2000 SOO reprezentują dwa rejony. Pierwszy z nich to dolina rzeki Gróbki (PLH120067), drugi to rejon „Koło Grobli” (PLH120008). Obszary te obejmują części wydzielonych potencjalnych zbiorników. Zbiorniki te ulokowane będą głęboko pod powierzchnią gruntu. Na powierzchni będą prowadzone w małym zakresie prace wiertnicze. Pomimo to należy się spodziewać protestów ekologów. Lokalizacja na terenie zbiornika obszarów Natura 2000 może mieć też pozytywne znaczenia. Gęstość zaludnienia na tych obszarach jest niewielka, w związku z tym w rejonach tych nie będzie konieczna budowa szczegółowego monitoringu ekshalacji CO₂ na powierzchni terenu. Na terenie wydzielonych zbiorników znajduje się osiem obszarów górniczych. Wszystkie te obszary górnicze znajdują się tylko na obszarze przewidywanego Zbiornika Grobla (**Fig. 1.1.7_7**). Są to obszary:

- Grobla 2 – stan aktualny,
- Grądy Bocheńskie – Borek -stan aktualny,
- Dąbrówka -stan aktualny,
- Rysie i stan aktualny,
- Rajsko -stan aktualny,
- Ryłowa -stan aktualny,
- Szczepanów-2 -stan aktualny,
- Łazy -stan aktualny.

Na obszarach tych wszystkie prace będą musiały być prowadzone z uwzględnieniem prawa górniczego. Wykonane w rejonach tych otwory wiertnicze nie sięgają do warstwy zbiornikowej – dewońsko-karbońskiego kompleksu węglanowego. Problem ujęć i zbiorników wód podziemnych przeanalizowany został szczegółowo w rozdziale 1.1.6. Problematykę niebezpieczeństw wynikających z obecności starych otworów wiertniczych przeanalizował zespół AGH. Zespół AGH dokonał również analiz układów sekwestracyjnych pod kątem przydatności lub nieprzydatności danego obszaru jako obszaru potencjalnych składowisk (zadanie 1.1.21). Problem ten szczegółowo przedstawiony został przy analizie regionu GZW wraz z obrzeżeniem i regionu Bełchatowa.

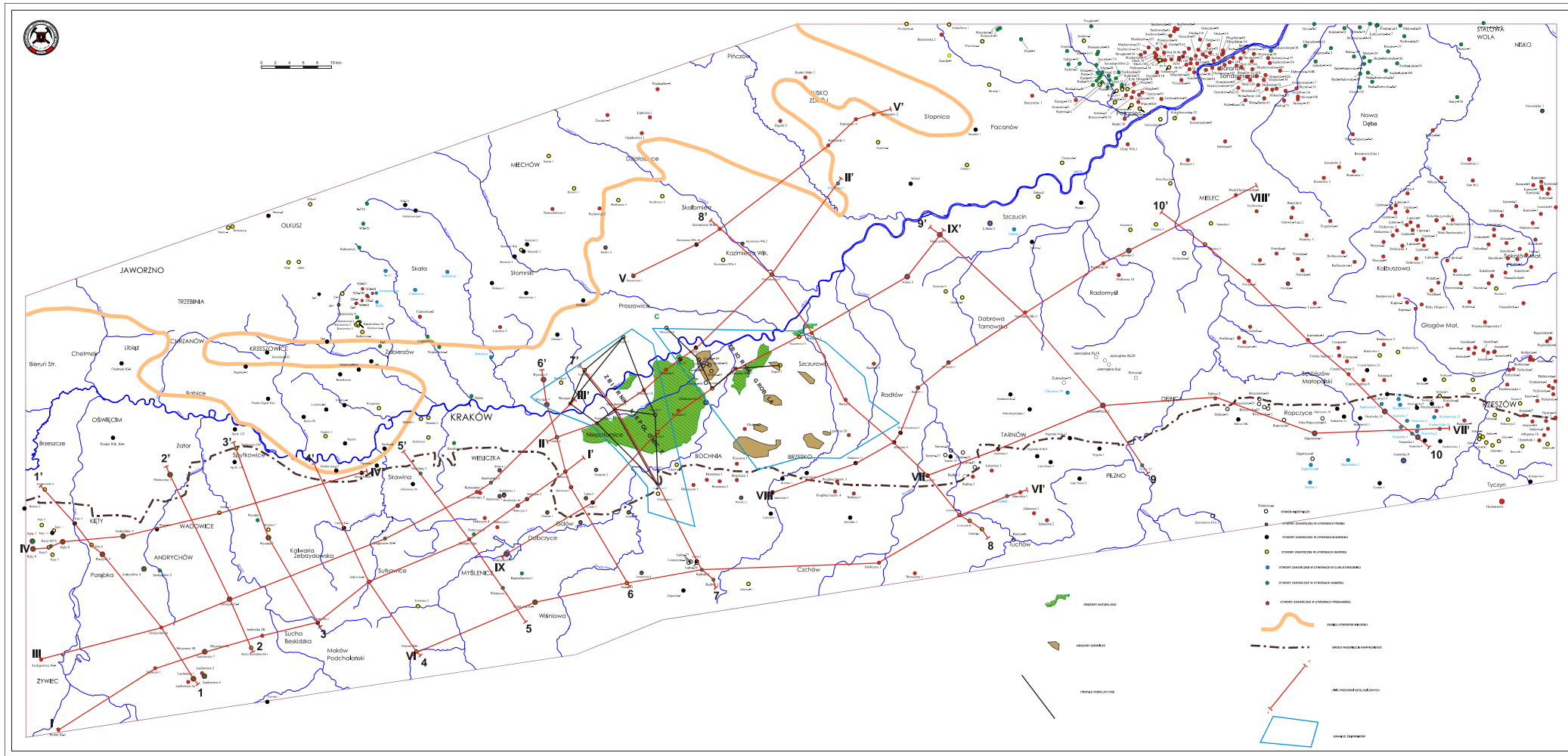


Fig. 1.1.7_7 Lokalizacja obszarów Natura 2000 i obszarów górniczych w rejonie potencjalnych zbiorników CO₂ Niepołomice i Grobla

Rejon V - Lubelszczyzna (i Podlasie)

(Adam Wójcicki)

O wyłączeniu może zdecydować występowanie ujęć wodnych, głównych zbiorników wód podziemnych, a także starych zlikwidowanych otworów, co do których zachodzi podejrzenie możliwości ucieczki mediów złożowych wskutek nieszczelności zacementowania. Ostatnie zagadnienie szczegółowo przeanalizował zespół AGH (wybrano najistotniejsze zagadnienia dla tematyki tego rozdziału) o czym poniżej. AGH dokonał również analiz układów sekwestracyjnych w wybranym rejonie pod kątem przydatności lub nieprzydatności, jako potencjalnych składowisk (zadanie 1.1.32).

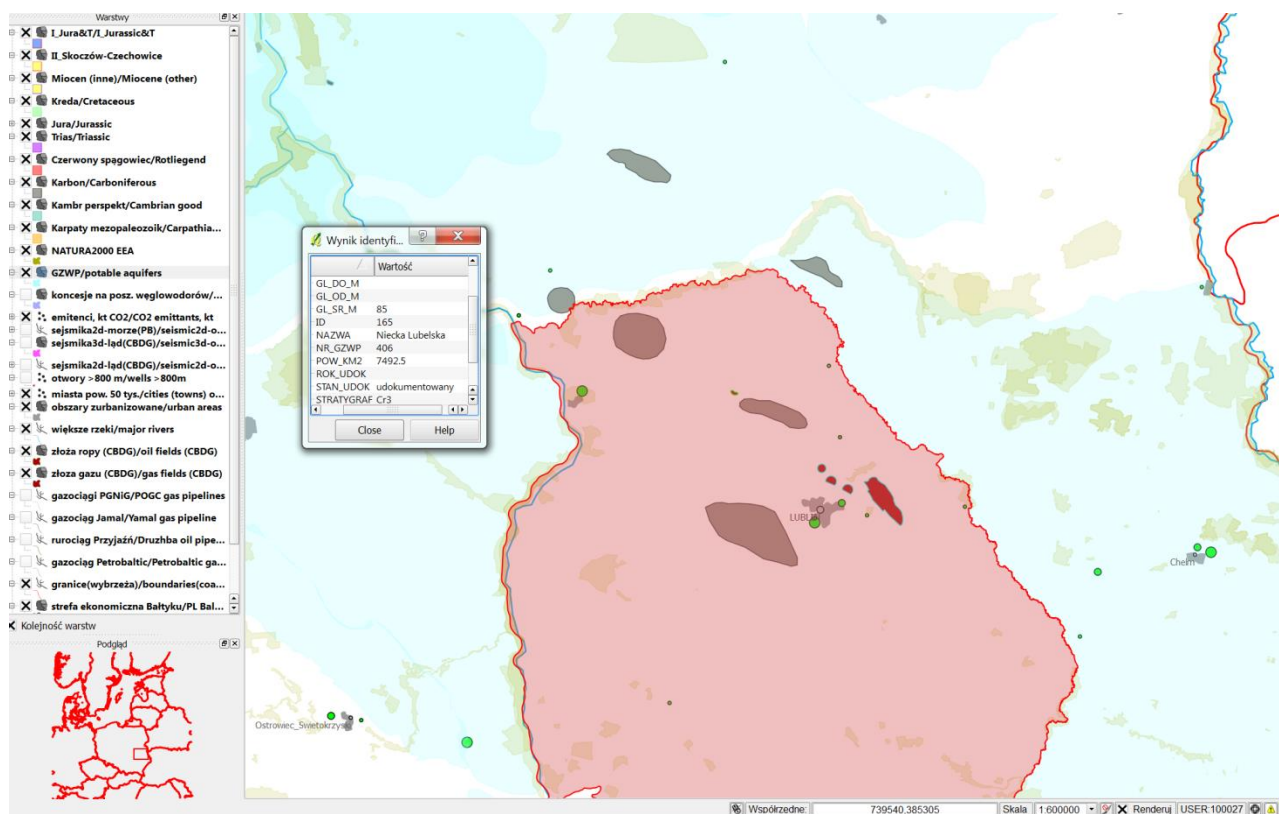


Fig. 1.1.7_8 GZWP w rejonie Lubelszczyzny (zaznaczony zbiornik górnokredowy)

Samo występowanie ujęć wodnych może być przeciwskazaniem do lokalizacji odwiertu zatłaczającego CO₂ (nie można prowadzić robót geologicznych w strefie ochronnej ujęcia, sięgającej do kilkunastu-kilkudziesięciu metrów od studni – Lidia Razowska-Jaworek), jednakże obecność ujęć w obrębie danej struktury, o powierzchni setek km² nie wyklucza jej przydatności do sekwestracji, jedynie ogranicza możliwości lokalizacji nowych otworów badawczych/monitoringowych i zatłaczających.

Natomiast obecność Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (zwłaszcza górnokredowych i dolnokredowych – patrz rozdział 1.1.6) (Fig. 1.1.7_8) wymaga ostrożności przy typowaniu struktury w ich obrębie. W przypadku Lubelszczyzny na obszarze badań występuje udokumentowany zbiornik górnokredowy (oraz

płytsze – rozpatrujemy zbiornik najgłębiej położony), o możliwej głębokości ujęć rzędu 85 metrów. Z uwagi na charakterystykę litologiczno-facjalną (patrz rozdział 1.1.3, rejon V) nie wydaje się, aby istniało jakiegokolwiek zagrożenie dla wód słodkich tegoż zbiornika związane ze składowaniem dwutlenku węgla w utworach górnego karbonu, od których dzieli zbiornik wieleset metrów kompleksów uszczelniających.

Występowanie obszarów NATURA2000 na obszarze rozpatrywanej struktury nie wyklucza wykorzystania jej na składowisko CO₂. W przypadku Lubelszczyzny właściwie nie mamy takich przypadków, jedynie niektóre struktury występują w pobliżu obszarów chronionych (Fig. 1.1.7_9).

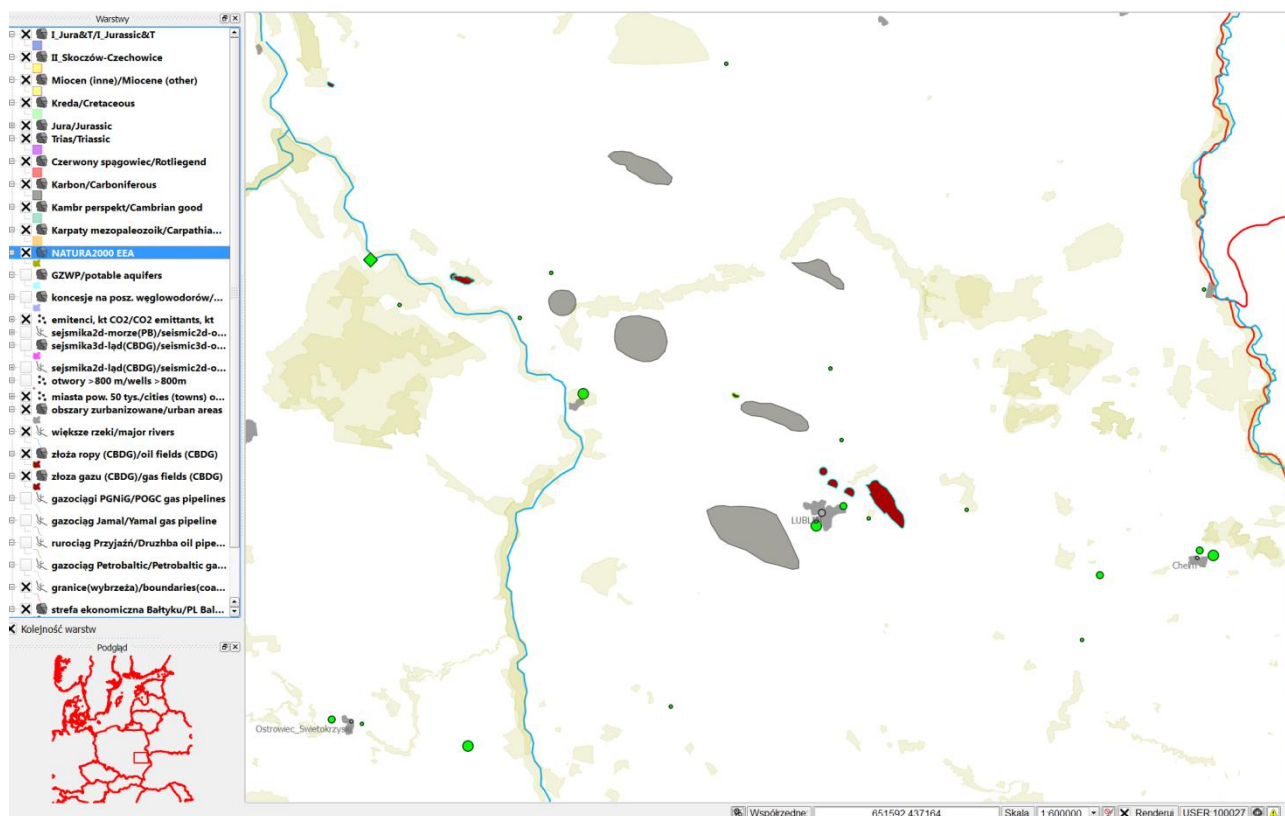


Fig. 1.1.7_9 Obszary NATURA2000 w rejonie Lubelszczyzny

Inny przykład możliwego konfliktu interesów to poszukiwanie i wydobycie węglowodorów. Obecnie większość terytorium Polski pokryta jest koncesjami na poszukiwanie niekonwencjonalnych i/lub konwencjonalnych złóż węglowodorów. W rejonie Lubelszczyzny prowadzi się eksploatację i poszukiwania konwencjonalnych złóż węglowodorów oraz poszukuje gazu w łupkach (Fig. 1.1.7_10). Z mapy prognostycznej (Fig. 1.1.7_6) wynika, że raczej szanse na znalezienie dużych i rozległych złóż gazu w łupkach na północ i NW od Lublina są raczej nikłe, większe jest prawdopodobieństwo, że zostaną one odkryte dalej na NE od Lublina, np. w rejonie Parczewa.

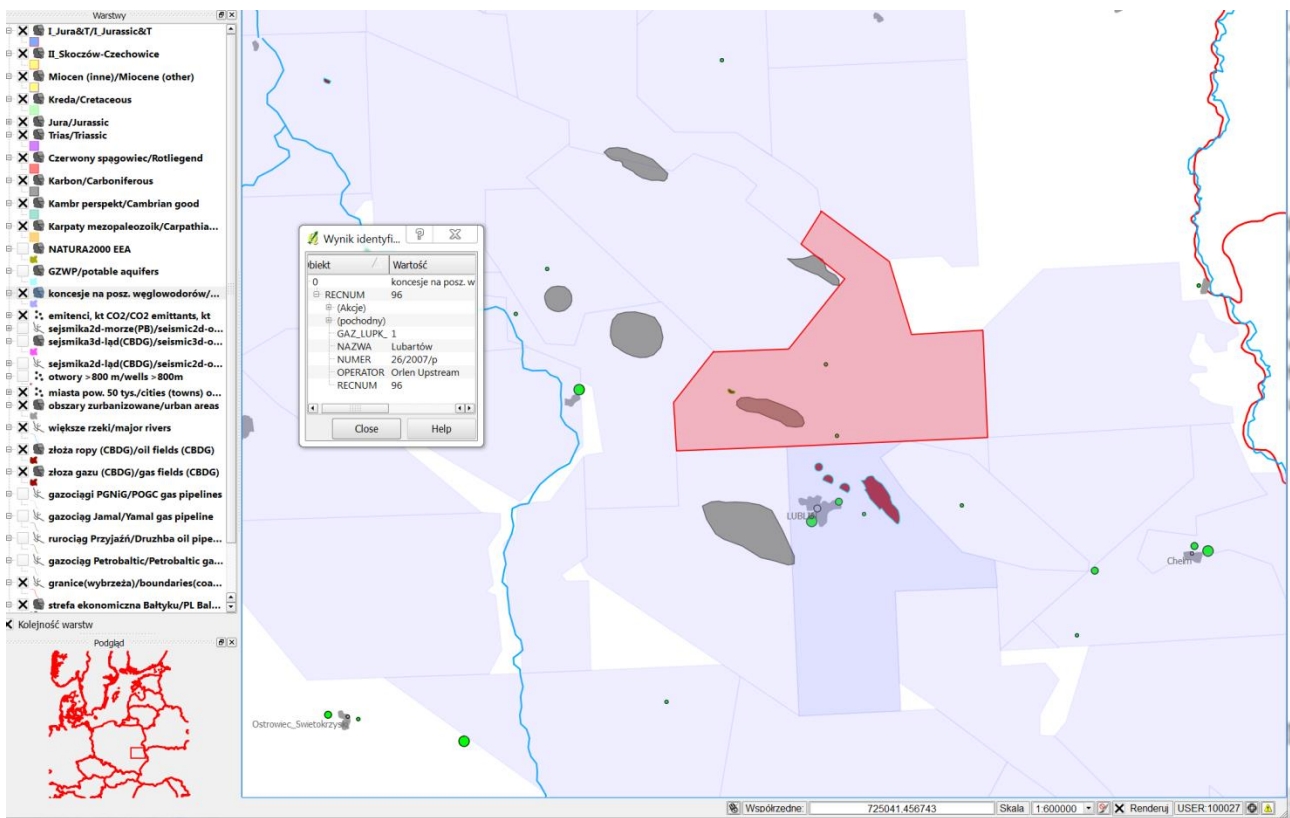


Fig. 1.1.7_10 Koncesje na poszukiwanie niekonwencjonalnych i/lub konwencjonalnych złóż węglowodorów w rejonie Lubelszczyzny

Rejon VI - Wielkopolska - Kujawy (Adam Wójcicki)

O wyłączeniu może zdecydować występowanie ujęć wodnych, głównych zbiorników wód podziemnych, a także starych zlikwidowanych otworów, co do których zachodzi podejrzenie możliwości ucieczki mediów złożowych wskutek nieszczelności zacementowania. Ostatnie zagadnienie szczegółowo przeanalizował zespół AGH (wybrano najistotniejsze zagadnienia dla tematyki tego rozdziału) o czym poniżej. AGH dokonał również analiz układów sekwestracyjnych w wybranym rejonie pod kątem przydatności lub nieprzydatności jako potencjalnych składowisk (zadanie 1.1.32).

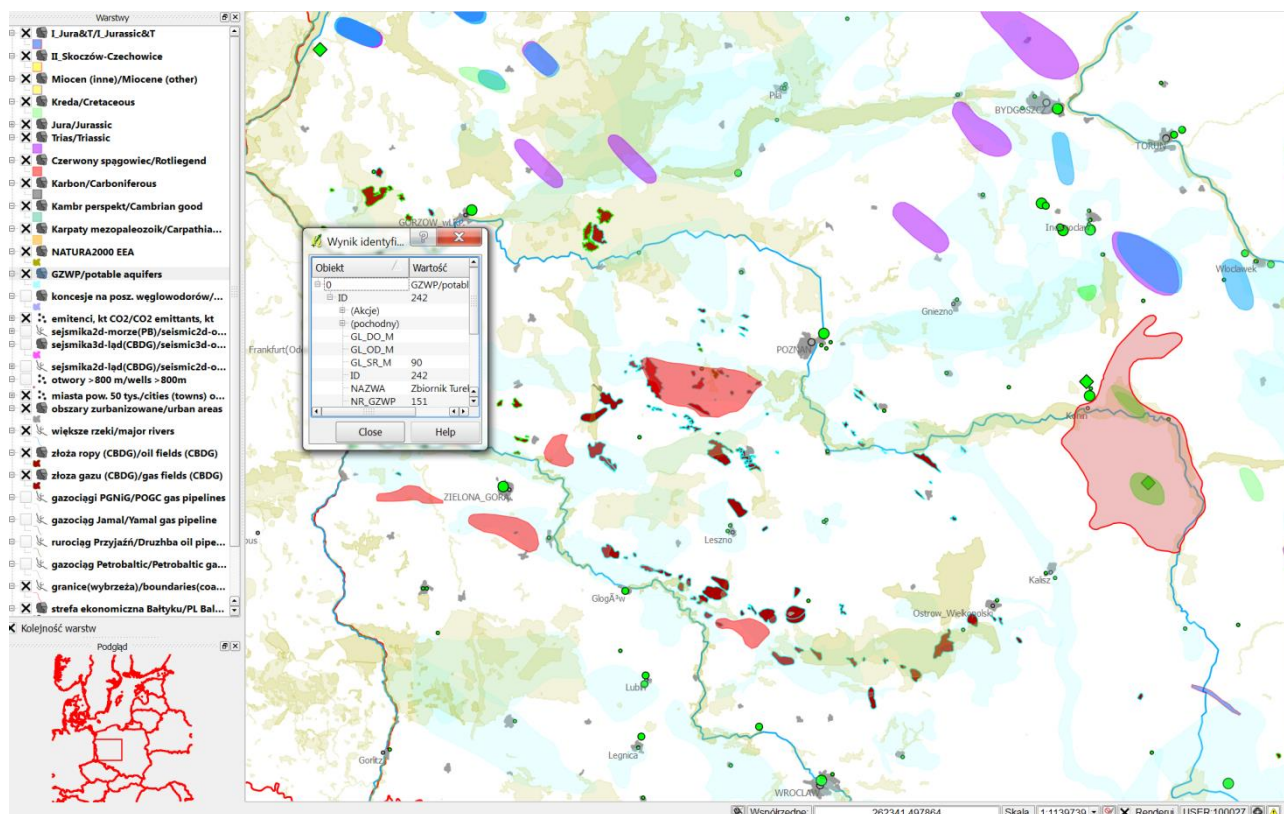


Fig. 1.1.7_11 GZWP w rejonie Wielkopolska-Kujawy (zaznaczony zbiornik górnokredowy)

Samo występowanie ujęć wodnych może być przeciwskazaniem do lokalizacji odwiertu zatłaczającego CO₂ (nie można prowadzić robót geologicznych w strefie ochronnej ujęcia, sięgającej do kilkunastu-kilkudziesięciu metrów od studni – Lidia Razowska-Jaworek), jednakże obecność ujęć w obrębie danej struktury, o powierzchni setek km² nie wyklucza jej przydatności do sekwestracji, jedynie ogranicza możliwości lokalizacji nowych otworów badawczych/monitoringowych i zatłaczających.

Natomiast obecność Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (zwłaszcza górnokredowych i dolnokredowych – patrz rozdział 1.1.6) (Fig. 1.1.7_11) wymaga ostrożności przy typowaniu struktury w ich obrębie. W przypadku Wielkopolski mamy najczęściej do czynienia ze zbiornikami kenozoicznymi, jedynie w rejonie

południowych Kujaw (struktura Turka) na obszarze badań występuje udokumentowany zbiornik górnokredowy, o możliwej głębokości ujęć rzędu 90 metrów. Z uwagi na charakterystykę litologiczno-facjalną (patrz rozdział 1.1.3, rejon V) nie wydaje się, aby istniało znaczne zagrożenie dla wód słodkich tegoż zbiornika związane ze składowaniem dwutlenku węgla w utworach dolnej kredy, od których dzieli zbiornik wieleset metrów kompleksów uszczelniających, ale strukturę Turka należałoby wnikliwie przeanalizować pod kątem jakości i integralności uszczelnienia.

Występowanie obszarów NATURA2000 na obszarze rozpatrywanej struktury nie wyklucza wykorzystania jej na składowisko CO₂. W przypadku Wielkopolski, niektóre struktury występują w pobliżu obszarów chronionych (Fig. 1.1.7_12) albo niewielkie obszary chronione w obrębie dużych struktur (np. megastruktura na SW od Poznania). Na obszarze Kujaw mamy strukturę Trzeźniewa otoczoną obszarem chronionym „Dolina Środkowej Warty”, co może wykluczyć ją jako przyszłe składowisko CO₂.

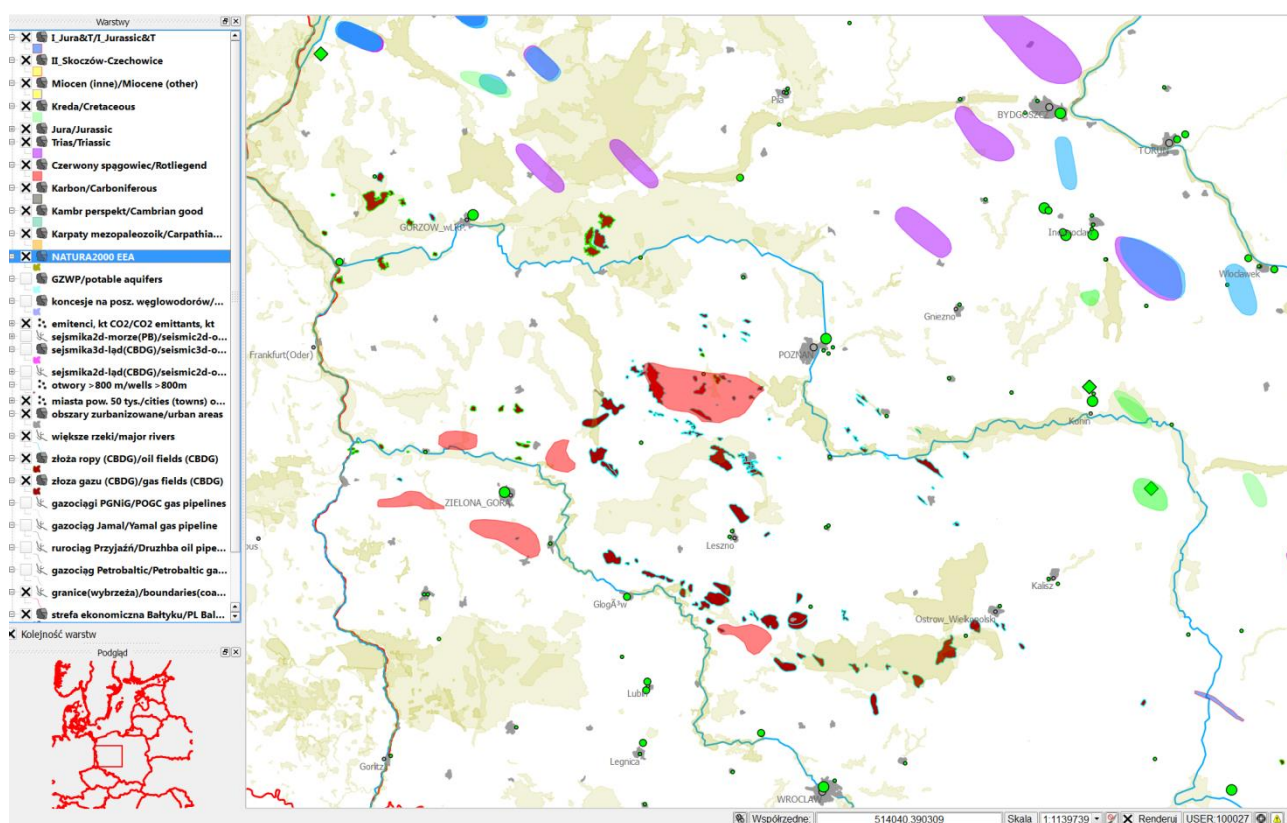


Fig. 1.1.7_12 Obszary NATURA2000 w rejonie Wielkopolska-Kujawy

Inny przykład możliwego konfliktu interesów to poszukiwanie i wydobycie węglowodorów. Obecnie większość terytorium Polski pokryta jest koncesjami na poszukiwanie niekonwencjonalnych i/lub konwencjonalnych złóż węglowodorów. W rejonie południowej, zachodniej i centralnej Wielkopolski prowadzi się eksploatację i poszukiwania konwencjonalnych złóż węglowodorów oraz poszukuje gazu w łupkach – to głównie w południowej części (Fig. 1.1.7_13). Z mapy prognostycznej (Fig. 1.1.7_6) nie wynika

czy są szanse na znalezienie dużych i rozległych złóż gazu w łupkach na obszarze południowej części Monokliny Przesudeckiej, np. pod strukturą Kowalowo (Fig. 1.1.7_13).

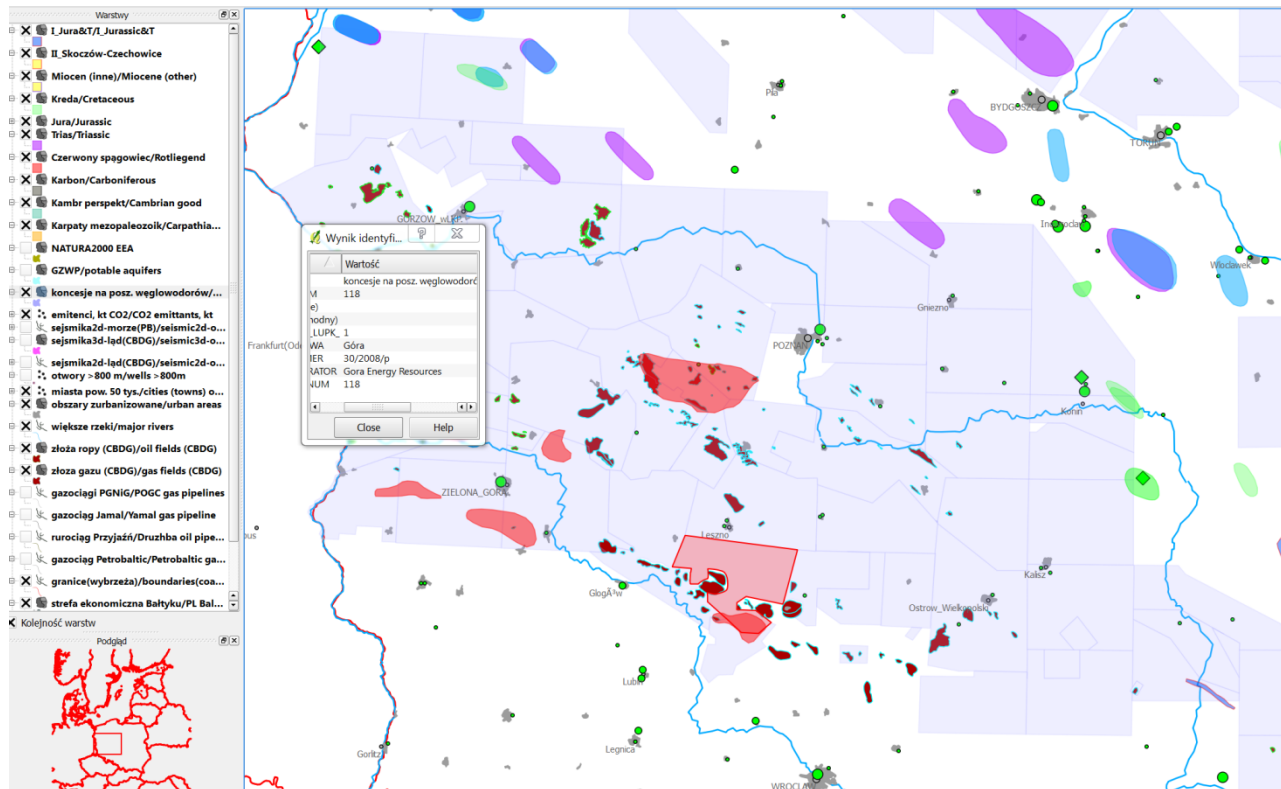


Fig. 1.1.7_13 Koncesje na poszukiwanie niekonwencjonalnych i/lub konwencjonalnych złóż węglowodorów w rejonie Wielkopolski

Rejon VII - NW Polska

(Adam Wójcicki)

O wyłączeniu może zdecydować występowanie ujęć wodnych, głównych zbiorników wód podziemnych, a także starych zlikwidowanych otworów, co do których zachodzi podejrzenie możliwości ucieczki mediów złożowych wskutek nieszczelności zacementowania. Ostatnie zagadnienie szczegółowo przeanalizował zespół AGH (wybrano najistotniejsze zagadnienia dla tematyki tego rozdziału), o czym poniżej. AGH dokonał również analiz układów sekwestracyjnych w wybranym rejonie pod kątem przydatności lub nieprzydatności jako potencjalnych składowisk (zadanie 1.1.32).

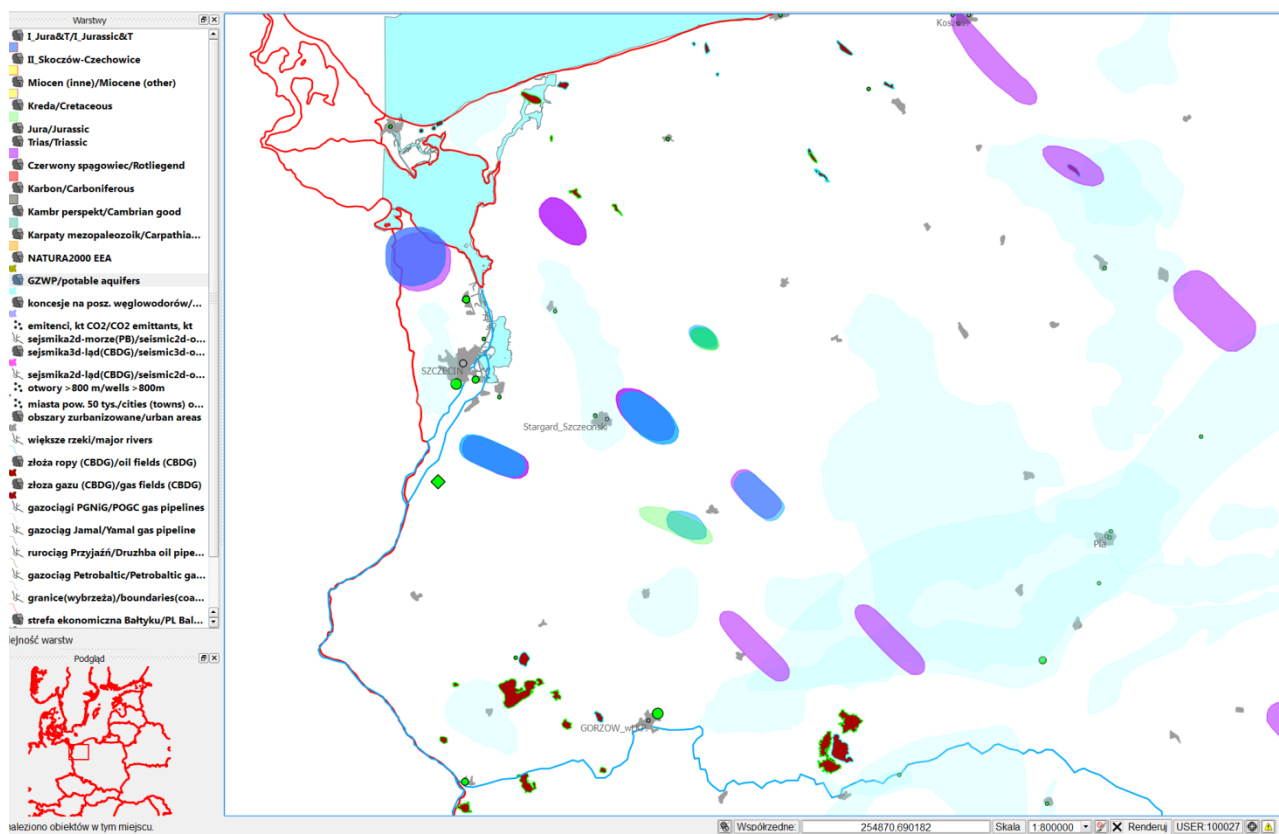


Fig. 1.1.7_14 GZWP w rejonie NW Polski

Samo występowanie ujęć wodnych może być przeciwwskazaniem do lokalizacji odwiertu zatłaczającego CO₂ (nie można prowadzić robót geologicznych w strefie ochronnej ujęcia, sięgającej do kilkunastu-kilkudziesięciu metrów od studni – Lidia Razowska-Jaworek), jednakże obecność ujęć w obrębie danej struktury, o powierzchni setek km² nie wyklucza jej przydatności do sekwestracji, jedynie ogranicza możliwości lokalizacji nowych otworów badawczych/monitoringowych i zatłaczających.

Natomiast obecność Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (zwłaszcza górnourajskich i dolnokredowych – patrz rozdział 1.1.6)(Fig. 1.1.7_14) wymaga ostrożności przy typowaniu struktury w ich obrębie. W

przypadku NW Polski na obszarach rozpatrywanych struktur mamy do czynienia ze zbiornikami kenozoicznymi.

Występowanie obszarów NATURA2000 na obszarze rozpatrywanej struktury nie wyklucza wykorzystania jej na składowisko CO₂. W przypadku NW Polski, niektóre struktury obejmują częściowo obszary chronione (Fig. 1.1.7_15 – np. Puszcza Drawska) albo są nimi częściowo otoczone. W takim przypadku raczej nie byłoby możliwe zlokalizowanie naziemnej infrastruktury składowiska w obrębie obszaru chronionego, oraz utrudnione byłoby zaprojektowanie optymalnej z ekonomicznego punktu widzenia trasy rurociągu CO₂.

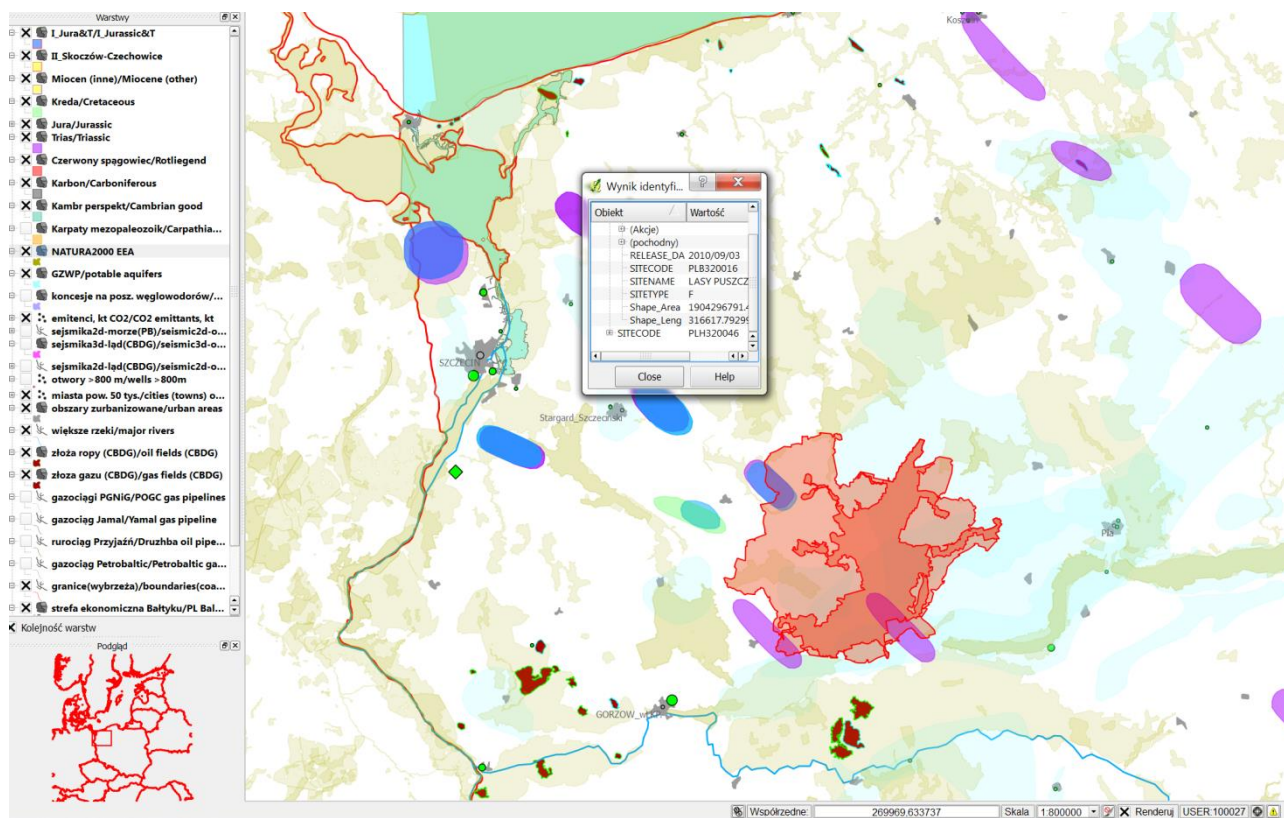


Fig. 1.1.7_15 Obszary NATURA2000 w rejonie NW Polski

Inny przykład możliwego konfliktu interesów to poszukiwanie i wydobycie węglowodorów. Obecnie większość terytorium Polski pokryta jest koncesjami na poszukiwanie niekonwencjonalnych i/lub konwencjonalnych złóż węglowodorów. Na północnym południowym skraju obszaru NW Polski prowadzi się eksploatację konwencjonalnych złóż węglowodorów oraz poszukuje konwencjonalnych złóż węglowodorów (Fig. 1.1.7_16). Z mapy prognostycznej (Fig. 1.1.7_6) wynika że szanse na znalezienie dużych i rozległych złóż gazu w łupkach istnieją dalej na wschód, północny wschód, w obrębie rejonu VIII (Fig. 1.1.7_16).

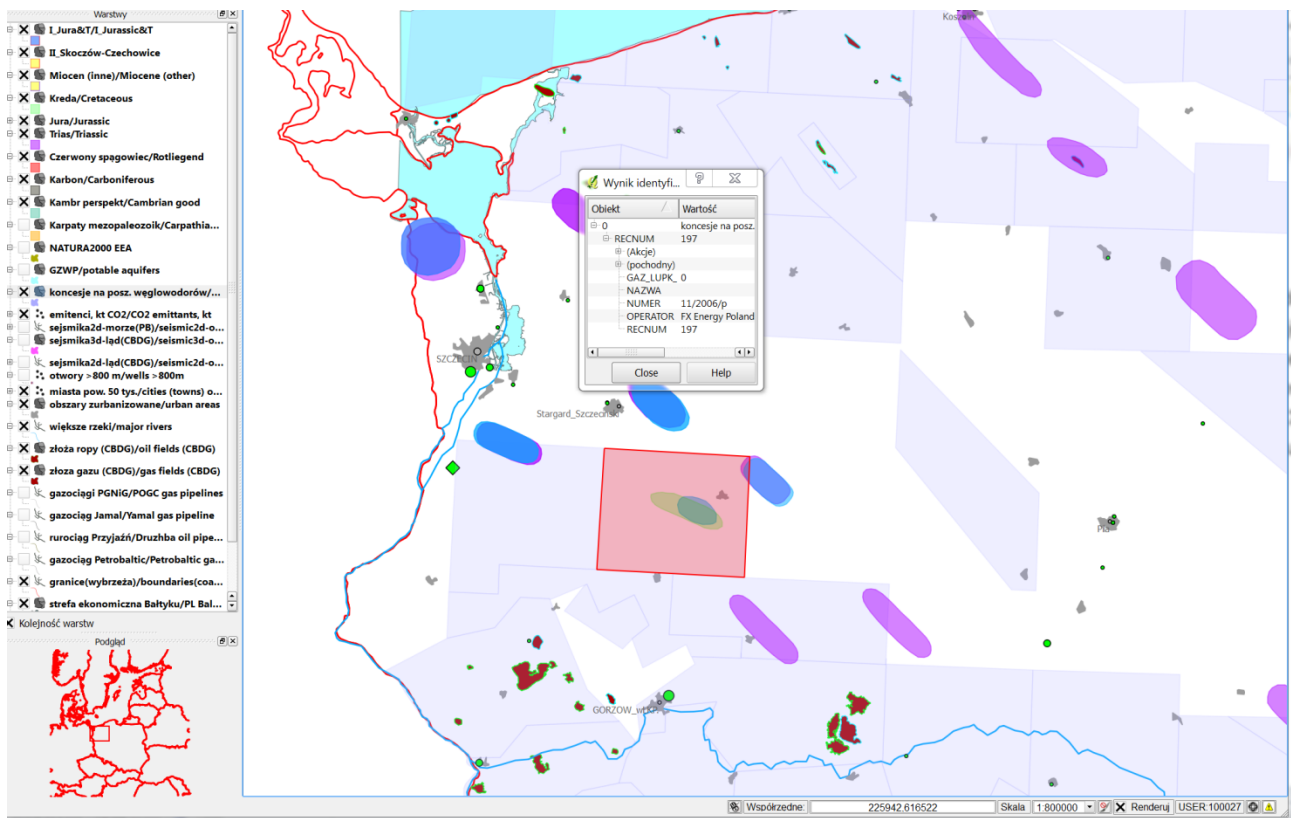


Fig. 1.1.7_16 Koncesje na poszukiwanie niekonwencjonalnych i/lub konwencjonalnych złóż węglowodorów w rejonie NW Polski

Rejon VIII - Łeba-Bałtyk oraz NE Polska

(Adam Wójcicki)

O wyłączeniu danego obszaru może zdecydować występowanie ujęć wodnych, głównych zbiorników wód podziemnych, a także starych zlikwidowanych otworów, co do których zachodzi podejrzenie możliwości ucieczki mediów złożowych wskutek nieszczelności zacementowania. Ostatnie zagadnienie szczegółowo przeanalizował zespół AGH (wybrano najistotniejsze zagadnienia dla tematyki tego rozdziału), o czym poniżej. AGH dokonał również analiz układów sekwestracyjnych w wybranym rejonie pod kątem przydatności lub nieprzydatności jako potencjalnych składowisk (zadanie 1.1.32).

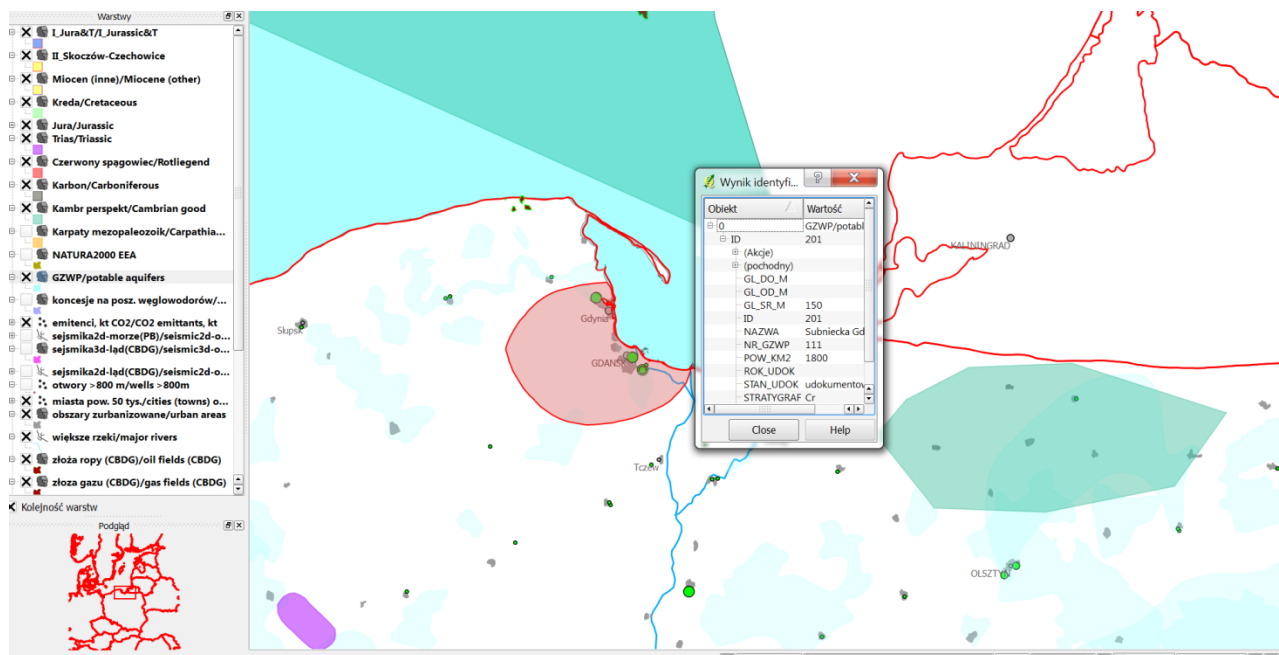


Fig. 1.1.7_17 GZWP w rejonie VIII

Samo występowanie ujęć wodnych może być przeciwskazaniem do lokalizacji odwiertu zatłaczającego CO₂ (nie można prowadzić robót geologicznych w strefie ochronnej ujęcia, sięgającej do kilkunastu-kilkudziesięciu metrów od studni – Lidia Razowska-Jaworek), jednakże obecność ujęć w obrębie danej struktury, o powierzchni setek km² nie wyklucza jej przydatności do sekwestracji, jedynie ogranicza możliwości lokalizacji nowych otworów badawczych/monitoringowych i zatłaczających.

Natomiast obecność Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (zwłaszcza górnourajskich i dolnokredowych, jeśli potencjalne składowiska obejmują kolektory mezozoiczne – patrz rozdział 1.1.6)(Fig. 1.1.7_17) wymaga ostrożności przy typowaniu struktury w ich obrębie. W przypadku Polski północnej wraz z fragmentem NE części Polski na obszarach perspektywicznych dla geologicznego składowania CO₂ (w utworach kambru na lądzie – na wschód od Elbląga) mamy do czynienia ze zbiornikami czwartorzędowymi. W rejonie Trójmiasta występuje użytkowy zbiornik kredowy, ale nie mamy tu żadnych struktur perspektywicznych dla składowania CO₂, czy to mezozoicznych czy też innych.

Występowanie obszarów NATURA2000 na obszarze rozpatrywanej struktury nie wyklucza wykorzystania jej na składowisko CO₂. W przypadku rejonu VIII obszar perspektywiczny dla składowania w kolektorach kambru obejmują częściowo obszary chronione (**Fig. 1.1.7_18** – np. rozległa Ostoja Warmińska przy granicy z Rosją, czy znacznie mniejsza powierzchniowo Dolina Pasłęki). W takim przypadku raczej nie byłoby możliwe zlokalizowanie naziemnej infrastruktury składowiska w obrębie obszaru chronionego, przez co ewentualnie utrudnione byłoby zaprojektowanie optymalnej z ekonomicznego punktu widzenia trasy rurociągu CO₂ (w obszarze przygranicznym nie byłoby problemu, prędzej w przypadku emitentów na zachód od doliny Pasłęki).

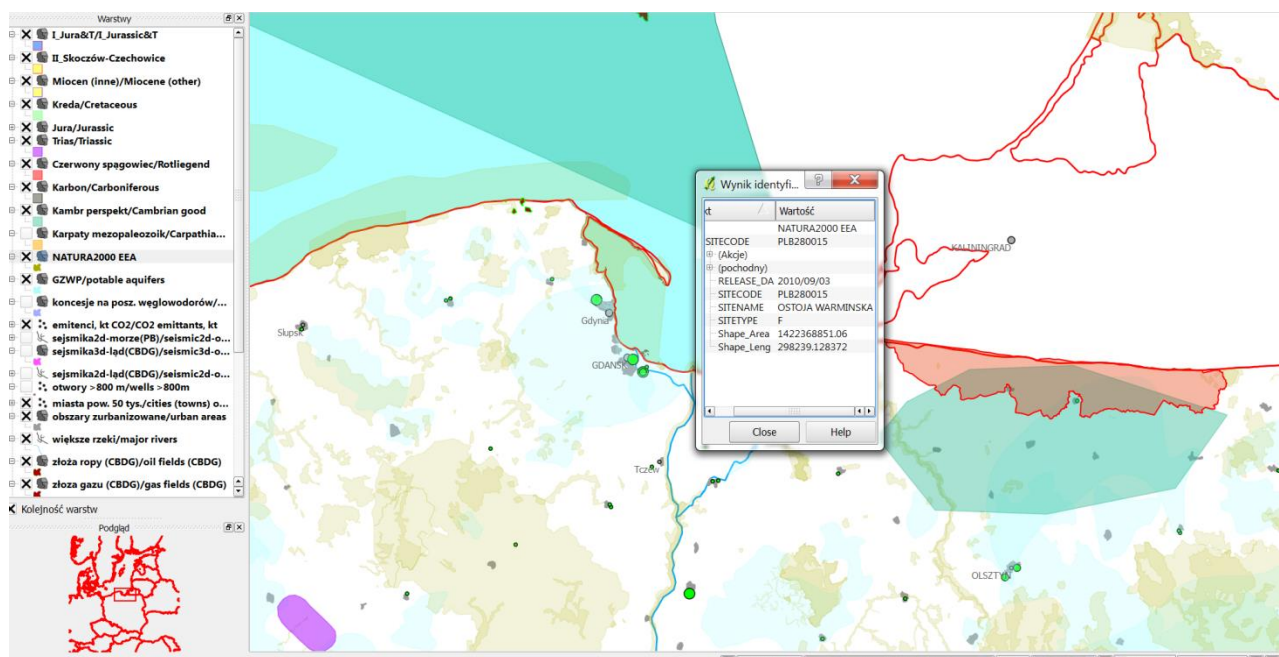


Fig. 1.1.7_18 Obszary NATURA2000 w rejonie VIII

Inny przykład możliwego konfliktu interesów to poszukiwanie i wydobycie węglowodorów. Obecnie większość terytorium Polski pokryta jest koncesjami na poszukiwanie niekonwencjonalnych i/lub konwencjonalnych złóż węglowodorów. Na obszarze lądowym rejonu VIII poszukuje się niekonwencjonalnych złóż węglowodorów (**Fig. 1.1.7_19**). Z mapy prognostycznej (**Fig. 1.1.7_6**) wynika, że we wschodniej części obszaru lądowego rejonu VIII (obszar kambru perspektywiczny dla geologicznego składowania CO₂) może występować ropa łupkowa, ale szanse są nikłe to to obszar peryferyjny (**Fig. 1.1.7_19**). W części zachodniej, na obszarze województwa pomorskiego, szanse są znaczne, jeśli chodzi o występowanie gazu w łupkach (**Fig. 1.1.7_6**), ale z kolei nie ma tam struktur perspektywicznych dla geologicznego składowania CO₂.

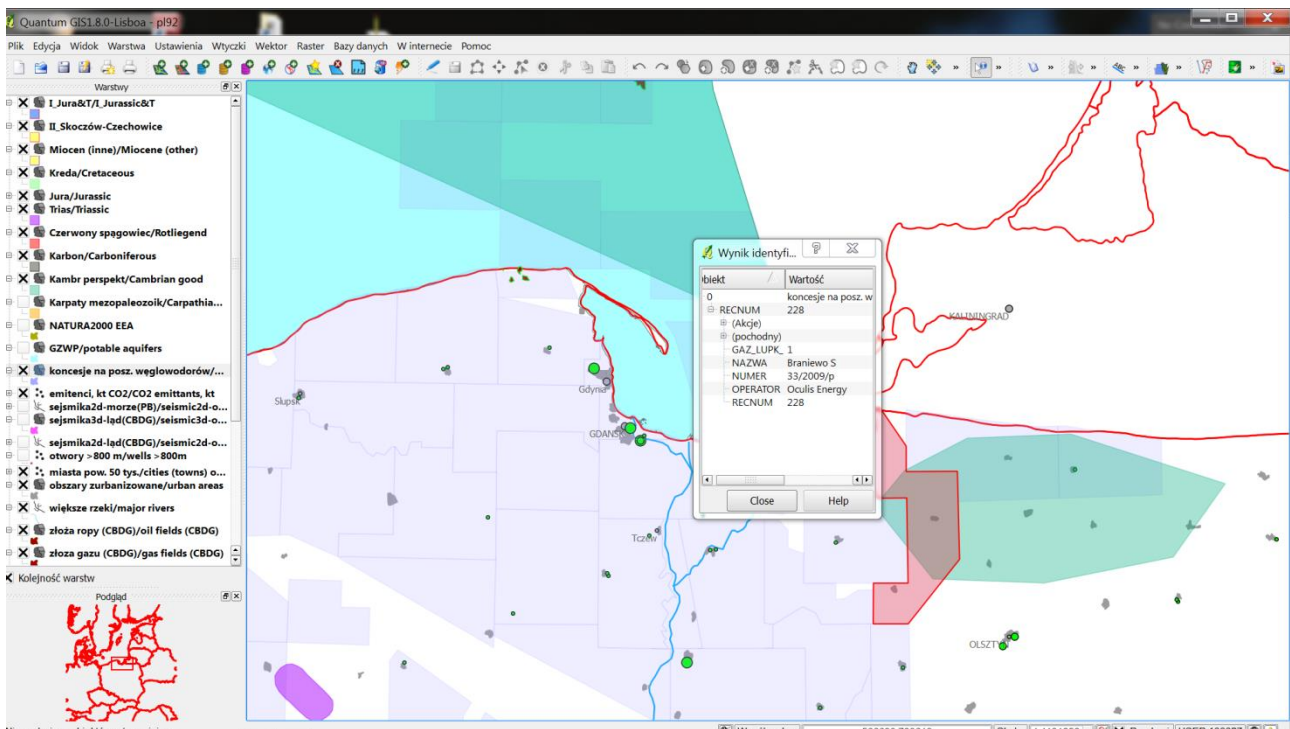


Fig. 1.1.7_19 Koncesje na poszukiwanie niekonwencjonalnych i/lub konwencjonalnych źródeł węglowodorów w rejonie VIII

Natomiast obszar morski obejmuje koncesje na wydobycie oraz poszukiwania zarówno węglowodorów konwencjonalnych jak i niekonwencjonalnych (LOTOS - Petrobaltic). Zatlaczanie CO₂ do poziomów solankowych, w obrębie których występują i są eksploatowane konwencjonalne złoża ropy i gazu wcale nie musi oznaczać konfliktu interesów. Wręcz przeciwnie, można w ten sposób wspomagać i intensyfikować wydobycie węglowodorów.

Na razie nie zostały odkryte żadne niekonwencjonalne złoża węglowodorów na obszarze koncesji morskich LOTOS – Petrobaltic (**Fig. 1.1.7_20**), a przynajmniej nic o tym nie wiadomo. Według mapy prognostycznej (**Fig. 1.1.7_6**) mogą tam ewentualnie występować raczej złoża ropy w łupkach dolnopaleozoicznych (sylur?) niż gazu, ale na jakiej części obszaru zbiornika kambryjskiego ewentualnie występują i jeśli tak czy ich eksploatacja mogłaby kolidować ze składowaniem CO₂, pozostaje sprawą otwartą.

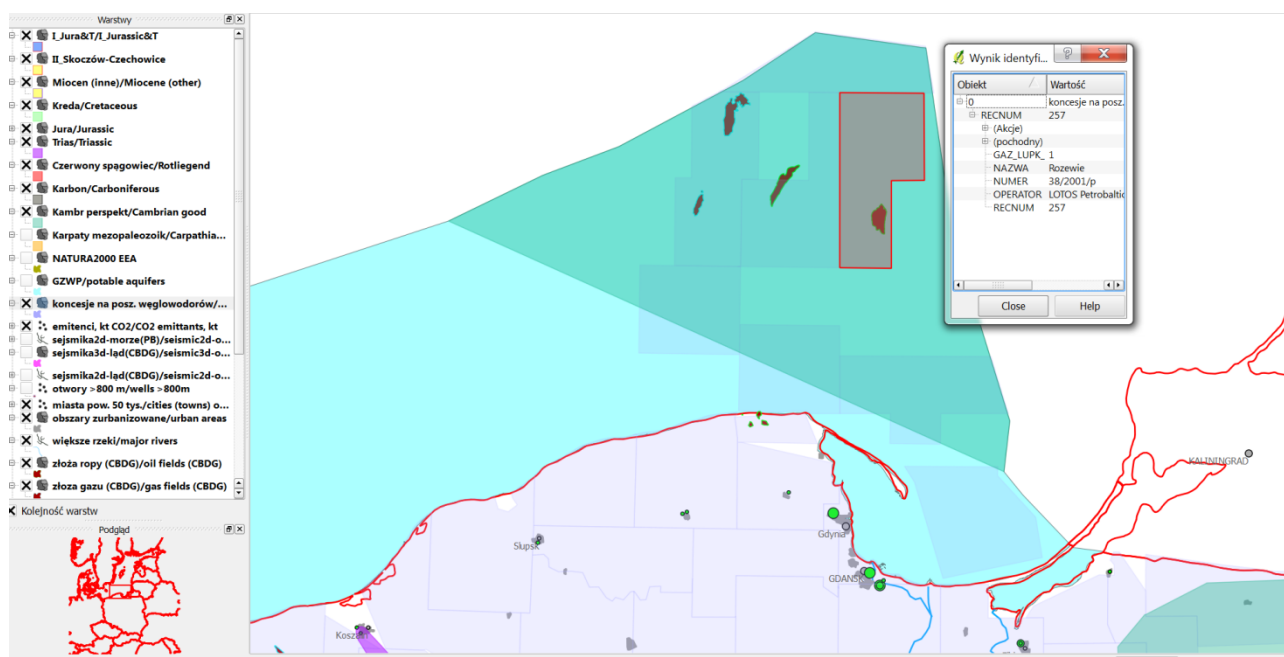


Fig. 1.1.7_20 Koncesje na poszukiwanie niekonwencjonalnych i/lub konwencjonalnych złóż węglowodorów na obszarze morskim w rejonie VIII

Natomiast zagrożenia dla integralności uszczelnienia, wiążące się z ewentualnymi dyslokacjami w obrębie utworów syluru i ordowiku uszczelniających kolektor kambryjski można przeanalizować pośrednio. W ramach przedsięwzięcia realizowanego przez Petrobaltic w współpracy z PIG i przedsiębiorstwem Kronos „Badania geochemiczne osadów Południowego Bałtyku pod kątem analizy skażeń geogenicznych i poszukiwań naftowych” wykonano analizy na profilach geochemicznych przebiegających po dnie Bałtyku. Stwierdzono zarówno na obszarach znanych złóż węglowodorów jak i poza nimi obecność metanu w osadach dennych i przyległej warstwie wody. Na całym obszarze perspektywnym dla geologicznego składowania CO₂ (**Fig. 1.1.7_21**) w sąsiedztwie złóż węglowodorów stwierdzono śladowe wycieki metanu, prawdopodobnie związane z jego migracją przez kompleks uszczelniający w przedziale czasowym na tyle długim, że zachowały się złoża. Należy uznać te śladowe wycieki za wskaźnik jakości uszczelnienia – metan jest daleko bardziej mobilny niż nadkrytyczny CO₂, stąd jeśli metanu ucieka niewiele, CO₂ w warunkach nadkrytycznych zostanie uwięziony. Poza obszarem perspektywnym, w zachodniej części obszaru morskiego rejonu VIII (**Fig. 1.1.7_22**) stwierdzono wycieki o nieco większej intensywności, co prawdopodobnie w połączeniu z historią pogrążania się tej części basenu spowodowało że złoża węglowodorów tam się nie zachowały (ponadto w tym obszarze przebiega strefa T-T). Z tego wniosek, że w obszarze morskim na północ i NW od Słupska jakość uszczelnienia kolektora kambryjskiego, nie jest tak dobra jak w rejonie bloku B, co zresztą uwzględniono przy określeniu obszaru perspektywnego dla utworów kambru w polskiej części Bałtyku (**Fig. 1.1.7_20**).

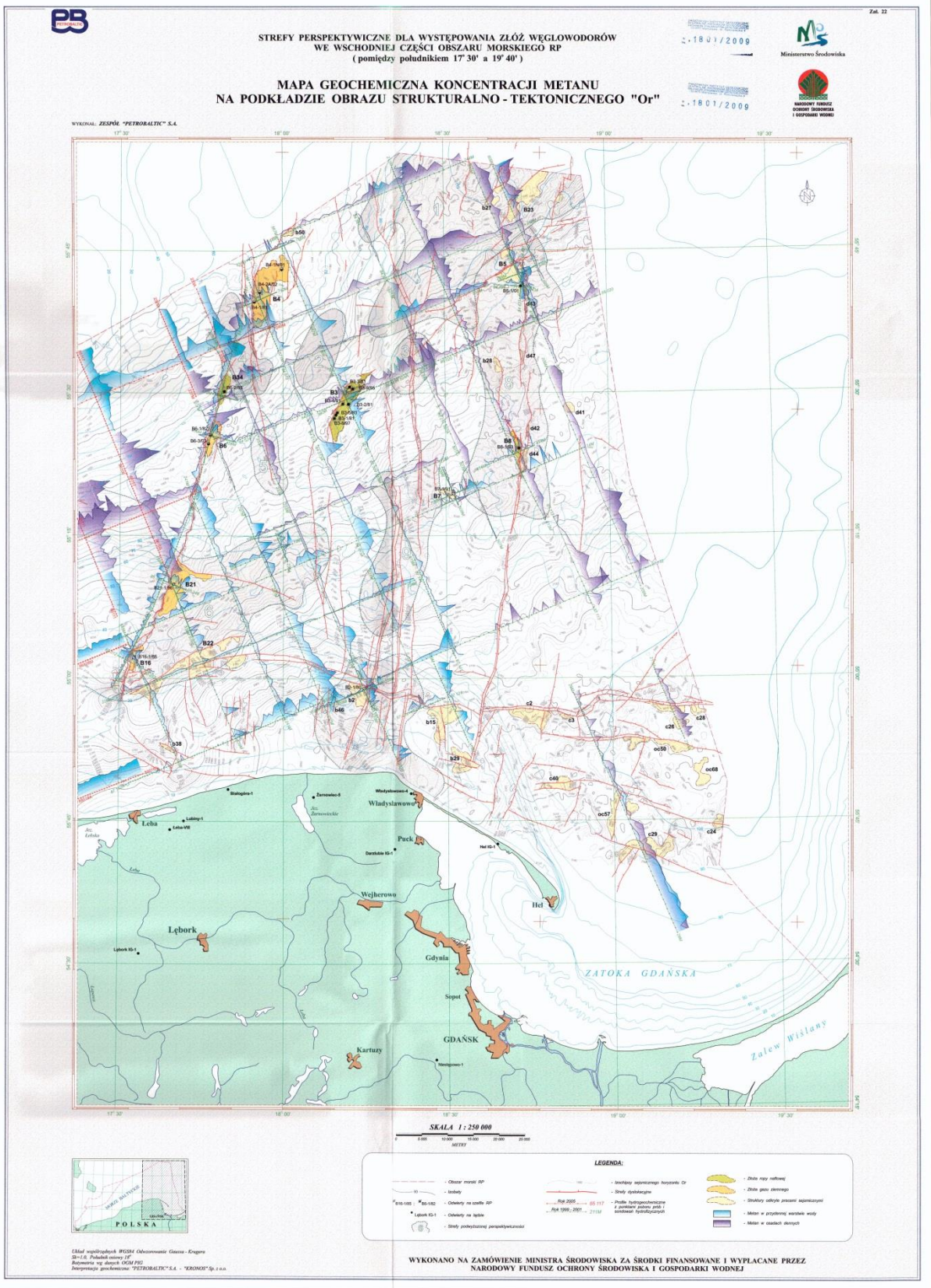


Fig. 1.1.7_21 Mapa geochemiczna koncentracji metanu we wschodniej części obszaru morskiego w rejonie VIII (Anolik i in., 2006 - 2008)



Fig. 1.1.7_22 Mapa geochemiczna koncentracji metanu w zachodniej części obszaru morskiego w rejonie VIII (Anolik i in., 2006 - 2008)

Złoże węglowodorów

O wyłączeniu danego obszaru może zdecydować występowanie ujęć wodnych, głównych zbiorników wód podziemnych, a także starych zlikwidowanych otworów, co do których zachodzi podejrzenie możliwości ucieczki mediów złożowych wskutek nieszczelności zacementowania. Ostatnie zagadnienie szczegółowo przeanalizował zespół AGH (wybrano najistotniejsze zagadnienia dla tematyki tego rozdziału), o czym poniżej.

W przypadku złóż węglowodorów ich eksploatacja czy dalsze wykorzystanie nie powinny stanowić zagrożenia dla poziomów wodonośnych, nawet głębokich, ponieważ problemy te powinny być rozwiązane na etapie przyznawania/przedłużania koncesji eksploatacyjnych. Problemem może być jakość zacementowania otworów, rodzaj cementu – jak wspomniano poniżej, w części zadania **1.1.7** realizowanej przez AGH, zawsze istnieje pewne zagrożenie dla szczelności starych otworów, wskutek oddziaływania CO₂ na kamień cementowy, zależnie od rodzaju i wieku cementu oraz rodzaju skał i solanek w obrębie kolektora. Dotyczy to zarówno otworów zlikwidowanych (przez zamknięcie korkiem cementowym wszystkich kolektorów) jak i wykorzystanych aktualnie do produkcji węglowodorów i monitoringu, które są zacementowane w przedziałach głębokości ponad kolektorami.

Wiek otworów ma tu decydujące znaczenie – np. wiele otworów eksploatacyjnych na obszarze SE Polski (**Fig. 1.1.7_23**) pochodzi jeszcze z lat 1960-tych (oraz starszych) i 1970-tych a na obszarze zachodniej Polski – często z lat 1970-tych i 1980-tych (**Fig. 1.1.7_24**), podobnie jak w rejonie Kamienia Pomorskiego (**Fig. 1.1.7_25**) w NE Polsce. Natomiast otwory do eksploatacji węglowodorów na morzu (**Fig. 1.1.7_25**) są nieco młodsze – z lat 1980-tych i późniejszych. Często zdarza się, że na jednym obszarze złożowym mamy otwory produkcyjne, które oddzielają przedziały dziesięcioleci.

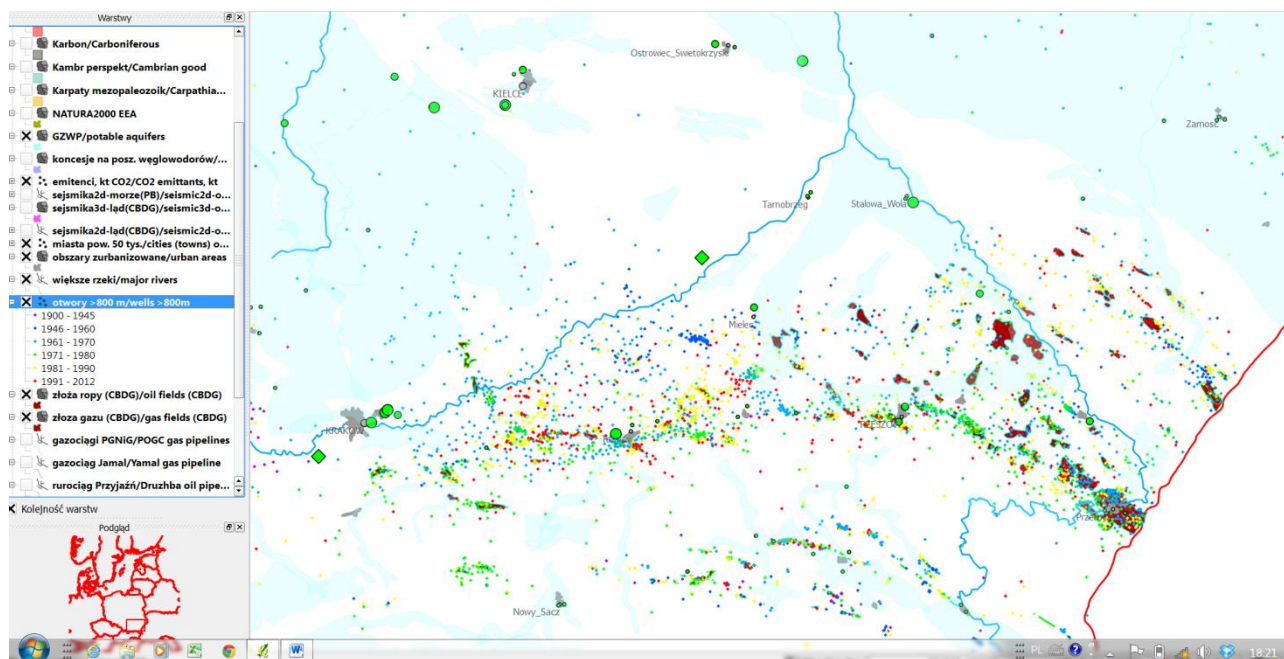


Fig. 1.1.7_23 Otwory i złoża węglowodorów w SE Polsce

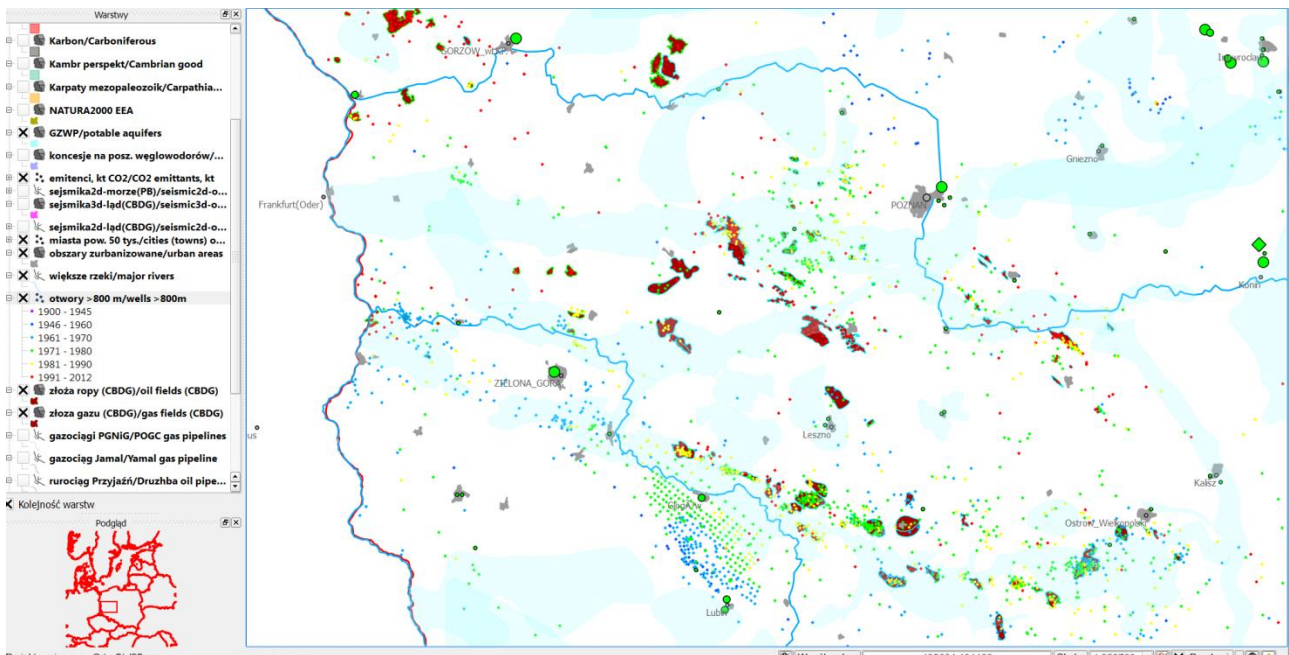


Fig. 1.1.7_24 Otwory i złoża węglowodorów w zachodniej Polsce

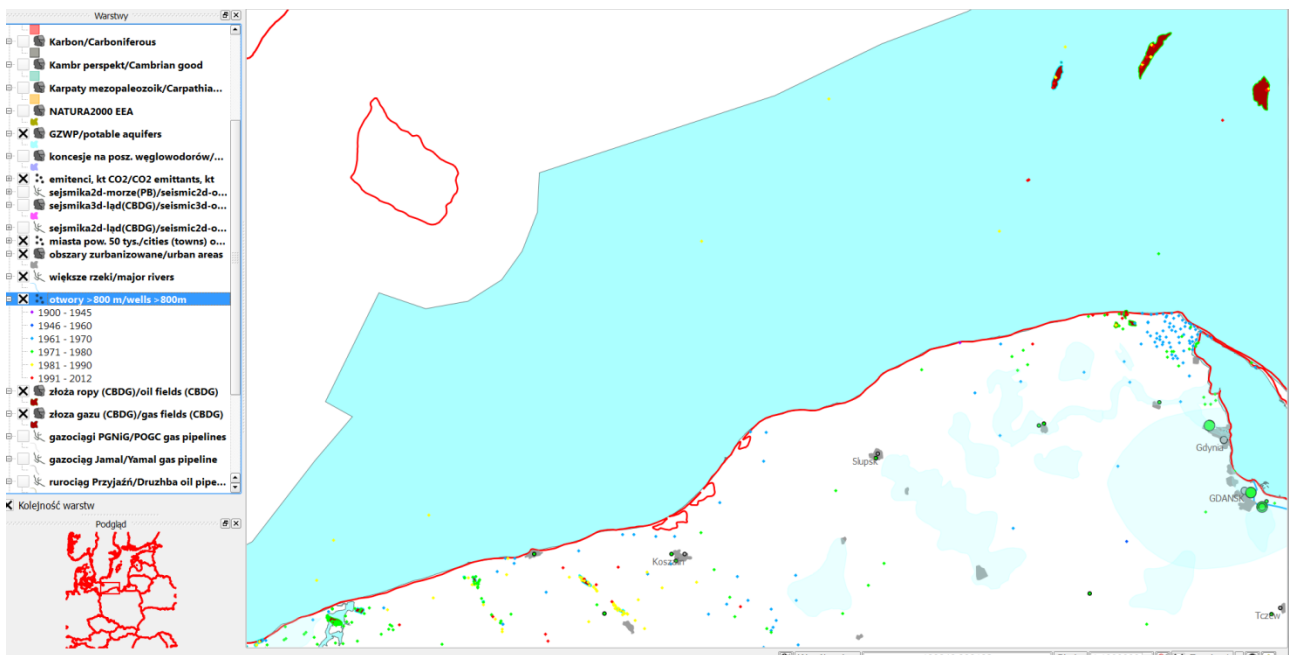


Fig. 1.1.7_25 Otwory i złoża węglowodorów w Polsce północnej/strefie ekonomicznej Bałtyku

Natomiast obszary chronione NATURA 2000 na ogół powstały później niż zostały odkryte i zagospodarowane złoża węglowodorów (przynajmniej ogromna większość z nich). Stąd z punktu widzenia składowania CO₂ w szcerpanych złożach węglowodorów istotna będzie ich dostępność, tzn. obecność

obszarów chronionych pomiędzy złożem a emitentem ewentualnie zainteresowanym jego wykorzystaniu na składowisko CO₂.

Zagadnienia stanu technicznego i szczelności otworów (1.1.7 - AGH)

Rejon Bełchatowa

(Andrzej Gonet, Dorota Polak, Stanisław Stryczek, Rafał Smulski, Rafał Wiśniowski)

Na podstawie danych przemysłowych oraz rozeznania literaturowego dotyczącego trudności występujących podczas wykonywania zabiegów cementowania w otworach wiertniczych na Niżu Polskim oraz przyczyn braku skuteczności cementowania kolumn rur okładzinowych można stwierdzić, że spowodowane są one:

- skomplikowanymi warunkami geologiczno-technicznymi w poszczególnych otworach wiertniczych,
- stanem fizyczno-mechanicznym zaczynu cementowego, który ulega zmianom w różnych stadiach wiązania, począwszy od stanu płynnego przez stan żelu do stanu nieprzepuszczalnej substancji po jej całkowitym związaniu (stwardniały zaczyn cementowy),
- wpływem rozkładu ciśnień (porowych, złożowych i szczelinowania) w górotworze na możliwość migracji gazu ziemnego w przestrzeni pozarurowej.

Nie można rozpatrywać przyczyn braku dobrego wiązania stwardniałego zaczynu cementowego ze skałą i/lub rurą okładzinową bez uwzględnienia profilu geologiczno-złożowego. Tylko ich dokładne powiązanie decyduje o doborze konstrukcji otworu, sposobie rurowania i cementowania. Dla zdecydowanej większości otworów wiertniczych główne problemy w przekroju geologicznym Niżu Polskiego można opisać następująco:

- ✓ utwory retyku i kajpru podatne są na kawernowanie i sypanie, zwłaszcza skał ilastych;
- ✓ utwory pstręgo piaskowca charakteryzują się normalnym gradientem ciśnienia złożowego (0,0107 MPa/m) oraz niskim - w zdecydowanej większości przypadków - gradientem ciśnienia szczelinowania (0,014 -0,018 MPa/m) oraz podatnością na rozplukiwanie;
- ✓ utwory cechsztyńskie, będące naprzemianległym układem skał pochodzenia węglanowego i chemicznego ze sporadycznymi warstwami skał ilastych, stwarzają szczególne zagrożenia ze względu na:
 - niespodziewane dopływy zgazowanych wód złożowych (solanek) z pułapek w cyklotemie Ohre i/lub Leine, znajdujących się pod anomalnie wysokim ciśnieniem,
- ✓ dopływ gazu ziemnego lub solanek o normalnym gradiencie ciśnienia złożowego (0,0107-0,011 MPa/m) z utworów czerwonego spągowca oraz "normalne" wartości gradientu ciśnienia szczelinowania (0,018 -0,021 MPa/m).

Przeprowadzane na bieżąco przez Serwisy Cementacyjne analizy cementowania w otworach wiertniczych na Niżu Polskim wykazują, że najczęstsze przyczyny braku dobrego wiązania stwardniałego zaczynu cementowego z rurą okładzinową lub skałą, to:

- nieusunięty osad filtracyjny lub istnienie kanalików z płuczką wiertniczą w interwałach między-powierzchniowych,
- istnienie kanalików lub powierzchni z wolną wodą,
- nadmierne nagromadzenie naprężeń w układzie rura okładzinowa - kamień cementowy,
- nadmierne nagromadzenie naprężeń hydraulicznych w układzie skała zbiornikowa - kamień cementowy lub otwór wiertniczy - rura okładzinowa i kamień cementowy,
- nadmierne naprężenia termalne (np. nadmierne spadki temperatur podczas próbnej eksploatacji itp.)
- objętościowa kurczliwość cementu,
- brak szorstkości powierzchni rury okładzinowej.

Dodatkową trudnością podczas opracowywania receptur zaczynów uszczelniających dla cementowania otworów wiertniczych na Niżu Polskim jest odpowiedni dobór składników zaczynu pod kątem trwałości korozyjnej stwardniałych zaczynów w warunkach otworowych.

Trwałość stwardniałego zaczynu cementowego w agresywnym środowisku otworu wiertniczego zależy głównie od chemicznej aktywności produktów hydratacji materiału wiążącego w stosunku do otaczającego środowiska. Wiązanie i twardnienie zaczynu cementowego w kontakcie z wodami złożowymi, zawierającymi jony agresywne, prowadzić może do powstawania związków chemicznych o małej wytrzymałości mechanicznej lub niewykazujących właściwości wiążących. W miarę upływu czasu może dochodzić do zwiększenia przepuszczalności stwardniałego zaczynu cementowego oraz obniżenia jego wytrzymałości mechanicznej i przyczepności do stali oraz skały.

Do podstawowych kryteriów odporności stwardniałych zaczynów cementowych na agresję, spowodowaną chemicznym oddziaływaniem środowiska, zaliczyć należy:

- możliwie najniższą zawartość Ca(OH)_2 (portlandytu),
- obecność w stwardniałym zaczynie jak największej ilości fazy CSH,
- niską zawartość fazy C_3A w cemencie,
- możliwie najniższą porowatość ogólną (z maksymalnym udziałem porów żelowych i możliwie najniższym porów kapilarnych).

Szczegółowy obraz mechanizmu korozji i zmian, zachodzących pod jej wpływem w mikrostrukturze stwardniałego zaczynu cementowego w konkretnych warunkach złożowych, można uzyskać poprzez przeprowadzenie wieloletnich obserwacji popartych badaniami próbek, poddanych działaniu roztworów o składach, odpowiadających wodom złożowym w określonych temperaturach. Długoletnie badania oddziaływania środowiska otworu wiertniczego na parametry stwardniałych zaczynów cementowych mogą przyczynić się do oceny przydatności różnych rodzajów zaczynów cementowych do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w danych warunkach geologiczno - złożowych.

Obserwowane w praktyce uszkodzenia stwardniałego zaczynu cementowego wskutek korozji chemicznej są różnorodne i trudne do usystematyzowania ze względu na nakładanie się na siebie różnych zjawisk. Przy zetknięciu z wodą i rozpuszczonymi w niej składnikami reakcje korozji pomiędzy zaczynem cementowym a czynnikami agresywnymi można przedstawić, jako zakłócenie stanu równowagi w stwardniałym zaczynie przez ługowanie i odprowadzanie składników na zewnątrz oraz jako reakcje prowadzące do zniszczenia jego mikrostruktury przez powstawanie związków o niskiej wytrzymałości lub związków pęczniejących. Poznanie całości zagadnienia korozji stwardniałego zaczynu cementowego i właściwa ocena konkretnych przypadków jest bardzo trudna ze względu na dużą ilość występujących w tym procesie czynników.

Zagadnienie trwałości stwardniałych zaczynów jest szczególnie istotne przy cementowaniu otworów wiertniczych przeznaczonych do sekwestracji CO₂.

Otwory wiertnicze przeznaczone do zatłaczania CO₂ stanowią potencjalną drogę dla wycieków magazynowanego dwutlenku węgla. Wycieki CO₂ mogą zachodzić poprzez lub wzdłuż otworu po zatłoczeniu CO₂ i problem ten dotyczy wszystkich rodzajów geologicznego magazynowania CO₂. W przypadku składowania w złożach ropy naftowej i gazu, problem ten dotyczy nie tylko otworów do zatłaczania CO₂, ale również otworów uprzednio zlikwidowanych korkami cementowymi. Z tego względu bardzo ważny z punktu widzenia bezpieczeństwa ekologicznego składowania CO₂ jest dobór odpowiedniego cementu przy projektowaniu i wykonywaniu otworu do zatłaczania CO₂ oraz następnie jego likwidowania. Wycieki poprzez skorodowany zaczyn cementowy są określane jako znaczące ryzyko dla środowiska naturalnego.

Wycieki poprzez uszkodzenia stwardniałego zaczynu uszczelniającego górotwór spowodowane są zachodzącą korozją węglanową. Korozja węglanowa lub kwasowęglanowa spowodowana jest obecnością w wodzie lub powietrzu agresywnego CO₂ i polega ona na ługowaniu z cementu wapnia, najpierw wolnego Ca(OH)₂, a w miarę jego wymycia także z uwodnionych krzemianów i glinianów. Jest to spowodowane tworzeniem kwaśnego węglanu wapniowego i odprowadzenia go na zewnątrz.

Nagromadzenie tylu trudności, które mogą oddziaływać w połączeniu z przedstawioną charakterystyką geologiczno-złożową, wskazuje na złożoność procesów technologii cementowania, dlatego nie jest możliwe stosowanie standardowych technologii z wykorzystaniem "prostych" zaczynów cementowych, gdyż nie ma pewności przeprowadzenia skutecznego zabiegu cementowania otworu wiertniczego.

Poniżej zestawiono krótką charakterystykę oddziaływania na stwardniały zaczyn cementowy najczęściej występujących w wodach złożowych związków chemicznych.

- chlorek sodowy NaCl – jeśli występuje jako czysta sól, jest w zasadzie nieszkodliwy, natomiast bardzo stężone roztwory NaCl mogą powodować ługowanie wodorotlenku wapniowego ze stwardniałego zaczynu cementowego (agresywność zostaje zwiększona przy obecności soli substancji towarzyszących, zwłaszcza siarczanu magnezowego i chlorku magnezowego).
- chlorek wapniowy CaCl₂ – stosowany jest jako domieszka do zaczynu w celu przyspieszenia wiązania. Jego roztwory o niewielkim nasyceniu nie są szkodliwe w stosunku do stwardniałego zaczynu, jednak roztwory stężone (bliskie granicy nasycenia) przy stałym oddziaływaniu mogą powodować uszkodzenia wskutek tworzenia się soli Friedela.

- chlorek magnezowy $MgCl_2$ – łatwo rozpuszczalny w wodzie, w stosunku do stwardniałego zaczynu cementowego jest silnie agresywny,
- siarczan magnezowy $MgSO_4$ – reprezentuje połączoną agresywność siarczanową i magnezową. Ze względu na dużą rozpuszczalność $MgSO_4$ jony siarczanowe mogą łatwo przenikać do tworzywa i tworzyć głównie sól Candlota, ale także gips. W wyniku podwójnej wymiany powstaje równocześnie trudno rozpuszczalny wodorotlenek magnezowy, nie wykazujący właściwości wiążących.
- siarczan sodowy Na_2SO_4 – w stosunku do stwardniałego zaczynu cementowego jest silnie agresywny, powodując typową agresywność siarczanową,
- siarczan potasowy K_2SO_4 – powoduje podobnie jak siarczan sodowy korozję siarczanową,
- siarczan wapniowy $CaSO_4$ – działa na stwardniały zaczyn znacznie słabiej niż siarczany omówione wcześniej. Wynika to zarówno z jego małej rozpuszczalności, jak również z tego, że nie reaguje z $Ca(OH)_2$, a tylko z C_3A , przy czym po wyczerpaniu C_3A reakcja ustaje.
- węglan sodowy Na_2CO_3 – w stosunku do stwardniałego zaczynu jest w zasadzie nieszkodliwy, jednak ze względu na krystalizację z dużą ilością cząsteczek wody i zwiększenie przy tym objętości może być przyczyną pewnych uszkodzeń.
- węglan magnezowy $MgCO_3$ – trudno rozpuszczalny w wodzie, w stosunku do stwardniałego zaczynu jest obojętny, ale w obecności kwasu węglowego rozpuszcza się, tworząc szkodliwy kwaśny węglan magnezowy $Mg(HCO_3)_2$.
- chlorek potasowy KCl , węglan sodowy Na_2CO_3 , kwaśny węglan sodowy $NaHCO_3$, węglan wapniowy $CaCO_3$ – są nieszkodliwe dla stwardniałego zaczynu cementowego.

Rejon GZW

(Stanisław Stryczek, Andrzej Gonet, Rafał Wiśniowski)

Zabieg cementowania rur okładzinowych jest jednym z ważniejszych etapów prac wiertniczych, mających na celu m.in. izolację stref produkcyjnych, poziomów wodnych oraz odcinków ucieczki płuczki wiertniczej. W ostatnim okresie czasu w górnictwie naftowym zwraca się coraz większą uwagę na przestrzeganie pewnych zasad, dotyczących zarówno przygotowania otworu do rurowania, techniki i technologii cementowania, jak i czynności prowadzonych w otworze po ww. zabiegu, bowiem od jakości wykonania tych prac często zależy przyszła eksploatacja z odwiertu. Nie można powiedzieć, że któryś z tych etapów jest ważniejszy od drugiego, gdyż np. zbagatelizowanie czynności w fazie przygotowania otworu do rurowania czy przy zapuszczaniu rur do otworu spowoduje, że niezależnie od jakości wykonania samego zabiegu ocena skuteczności zacementowania rur, przeprowadzona na podstawie profilowań geofizyki wiertniczej, będzie negatywna. Kompleksowa ocena, analizująca także przyczyny braku skuteczności związania kamienia cementowego z rurą, wymaga wiedzy z zakresu różnych dyscyplin naukowo-technicznych. Coraz częściej oceny te są dyskutowane w gronie wiertników, przedstawicieli serwisów cementacyjnych i geofizyków.

Dla rozpoznania trudności związanych z uzyskaniem właściwego uszczelnienia kolumn rur okładzinowych, które wystąpiły na obszarze frontu Karpat i Zapadliska (część zachodnia) przeprowadzono analizy z otworów odwierconych. Z analizy wynika, że jedynie około 15 % w pełni spełniły swoje zadania, uzyskując przepływy gazu o wartości przemysłowej.

Można zauważyć, że przy wierceniu wszystkich otworów napotkano na poważne trudności wiertnicze wynikające z występowania złożonych warunków geologicznych na obszarze Zapadliska Przedkarpackiego oraz Karpat. Do utrudnień tych można zaliczyć występowanie zróżnicowanych ciśnień złożowych i porowych oraz niskich gradientów ciśnień szczelinowania. Poważne trudności obserwowano przy doborze receptur płuczek wiertniczych mających wpływ na stateczność ściany otworu wiertniczego. Trudności te powodowały znaczne przedłużenie czasu wiercenia, liczne przychwytywania przewodu wiertniczego, które niejednokrotnie wymuszały konieczność zbaczania otworu, a nawet doprowadzały do konieczności likwidacji otworów wiertniczych ze względów technicznych. Na podstawie analizy raportów wiertniczych oraz wiadomości zawartych w licznych publikacjach można stwierdzić, że:

1. Analiza rozkładu anomalnie wysokich ciśnień porowych i złożowych pozwala stwierdzić, że problem ten nie jest w pełni poznany i zachodzi potrzeba dalszych badań nad genezą tych ciśnień, a także nad możliwościami prognozowania ciśnień w oparciu o pomiary sejsmiczne.
2. Znajomość miejsca występowania anomalnie wysokich ciśnień i ich wielkości powinna pomóc przy stosowaniu blokatorów przepływu gazu przez kamień cementowy. Być może, że jednym z wyjść będzie konieczność stosowania pakierów rurowych nad strefą anomalnie wysokich ciśnień porowych i złożowych.
3. Rozkład ciśnienia porowego, złożowego, szczelinowania i geostatycznego powinien być rozpoznany przed przystąpieniem do projektowania otworów wiertniczych w oparciu o wcześniej uzyskane dane z pomiarów sejsmiki oraz dane uzyskiwane z wcześniej wykonanych otworów lub bieżących pomiarów geofizyki wiertniczej i danych wiertniczych.
4. Problem braku wiązania cementu na przeciw skał ilastych przenoszących anomalnie wysokie ciśnienie porowe (AWCP) można tłumaczyć następująco: po wytłoczeniu zaczynu cementowego rozpoczyna on

wiązanie poprzez tworzenie struktury. W tym czasie, ciśnienie panujące w nim jest równe ciśnieniu wody zarobowej. Jeżeli ciśnienie porowe w skałach jest znacznie większe od ciśnienia hydrostatycznego cieczy zarobowej następuje odprężanie skały i tworzenie sieci mikropęknięć, którymi gaz znajdujący się pod anomalnie wysokim ciśnieniem przepływa do tworzącej się struktury cementu, czyniąc z niej strukturę podobną do pumeksu lub niszcząc ją.

5. Obserwowane ekshalacje gazu z przestrzeni pozarurowej lub międzyrurowej wynikają prawdopodobnie z tego, iż wielkość ciśnienia porowego jest większa aniżeli wytrzymałość lateksu użytego jako czynnika zapobiegającego migracji gazu przez wiążący kamień cementowy. Zagadnienie to wymaga dalszych badań laboratoryjnych i przemysłowych.

6. Zagadnienie anomalnie wysokich ciśnień porowych i złożowych nie jest w pełni poznane i wymaga dalszych badań, a zwłaszcza w zakresie stosowania blokatorów przepływu gazu przez kamień cementowy. Być może, że jednym ze środków będzie konieczność stosowania pakierów rurowych w Karpatach nad strefą anomalnie wysokich ciśnień porowych i złożowych.

7. Należy maksymalnie możliwie skrócić czas kontaktu skał ilastych z płuczką wiertniczą, której właściwości oraz chemizm powinny być szczególnie wnikliwie dobrane w celu niedopuszczenia do zachwiania stateczności ściany otworu wiertniczego.

8. Największy wpływ na zachowanie się analizowanych skał ilastych (miocenijskich) ma pęcznienie w obecności wody słodkiej, które w pewnych przypadkach przekracza 50%. Drugim parametrem mogącym mieć istotny wpływ na stateczność skał ilastych w odsoniętej partii otworu jest pole powierzchni aktywnej, które w połączeniu ze współczynnikiem hydratacji decyduje o wielkości ciśnienia pęcznienia.

9. Zasadniczym wnioskiem wynikającym z wykonanych pomiarów pęcznienia jest stwierdzenie, że filtrat z zaczynu cementowego nie wpływa, lub też wpływa w minimalnym stopniu na zmiany objętości próbek poddanych wcześniej działaniu filtratu z płuczki wiertniczej.

10. W odniesieniu do niektórych skał ilastych, poddanych działaniu filtratu płuczkowego, obserwuje się skurcz skały po jej kontakcie z filtrem zaczynu cementowego. Zjawisko to wymaga dalszych badań w celu poznania przyczyn tego stanu rzeczy.

11. W wielu przypadkach, gdy skały ilaste posiadające wysoką podatność na hydratację i dyspersję są zaburzone tektonicznie oraz występują w nich anomalnie wysokie ciśnienia, to można się spodziewać występowania poważnych problemów w czasie wiercenia i cementowania otworu wiertniczego.

12. Projektowanie i wykonywanie skomplikowanych przypadków cementowania rur okładzinowych powinno być realizowane przez wyspecjalizowane jednostki usługowe, dysponujące zarówno nowoczesnym sprzętem do cementowań, jak też najnowszą technologią wykonywania tych zabiegów (np. Serwis Cementacyjny w Wołominie).

Zagadnienia wypływów (ekshalacji) gazu ziemnego na powierzchnię ziemi z przestrzeni międzyrurowych otworu, na skutek jego migracji ze złoża przez wiążący zaczyn cementowy lub po jego związaniu zostało „dostrzeżone” dopiero na początku lat 60-tych. Z tego okresu pochodzą pierwsze publikacje wskazujące na

zależność skuteczności cementowania rur okładzinowych i możliwość migracji gazu od takich czynników jak spadek ciśnienia w czasie wiązania cementu, niepełne wypieranie płuczki przez zaczyn cementowy w czasie cementowania, nieszczelności występujące na kontakcie związanego cementu z rurami i na kontakcie ze ścianą otworu, odkształcenia rur pod wpływem zmian ciśnienia (próby szczelności) i innych. W następnych dziesięcioleciach zwiększa się systematycznie liczba publikowanych opracowań i patentów opartych na wynikach różnorodnych badań laboratoryjnych oraz obserwacji i pomiarów w warunkach kopalnianych. Efektem tych prac jest odkrywanie coraz to nowych czynników techniczno-technologicznych i geologicznych, wpływających na występowanie migracji i ekshalacji gazu w otworze, które stanowiły podstawę doskonalenia technologii cementowania oraz potrzebnego do tego celu sprzętu. Pomimo jednak kontynuowanych badań i różnych opracowań z włączeniem techniki komputerowej nadal istnieje pewien odsetek cementowań nieskutecznych (nieudanych), czego wyrazem są ekshalacje gazu ziemnego.

Problematyką migracji i ekshalacji gazowych zajmowało się wielu ludzi nauki, realizując różne badania laboratoryjne i przemysłowe oraz specjalistów technicznych związanych bezpośrednio z wykonawstwem cementowań. Świadczy o tym wiele dziesiątków publikacji ukazujących się zagranicą, a także w kraju, w których autorzy opisują mniej lub bardziej szczegółowo wpływ różnych czynników geologicznych, technologicznych i organizacyjnych na wyniki cementowania rur okładzinowych w otworze gazowym. Podkreśla się, że o ile przepływy (przecieki) pozarurowe ropy naftowej i wody złożowej występują sporadycznie i są na ogół łatwe do opanowania, to migracje i ekshalacje gazu ziemnego są dość częste i eliminowanie ich stanowi bardzo złożony problem.

Na złożoność problematyki zapobiegania migracji pozarurowej i wypływu gazu wskazuje duża ilość wymienionych przez niektórych autorów czynników i uwarunkowań, od których uzależniona jest w różnym stopniu skuteczność cementowania rur okładzinowych.

Celowe będzie wyszczególnienie w określonym porządku tych czynników, zarówno obiektywnych jak i subiektywnych, gdyż powinny one być brane pod uwagę przy wykonywaniu wszelkich analiz nieudanych cementowań a ponadto wskazują na duży zakres prac związanych z tego rodzaju analizą.

W skrótovej formie wspomniane czynniki można uszeregować następująco:

- geologiczne, do których zalicza się temperaturę, ciśnienie (górotworu i złożowe), litologiczną i fizyczną charakterystykę skał (porowatość, szczelinowatość, przepuszczalność, wytrzymałość mechaniczną, gradient szczelinowania itd), tektoniczne zaburzenia, rodzaje płynów złożowych, ilość i miąższość warstw przepuszczalnych, odległości między warstwami produktywnymi i wodonośnymi i inne;
- techniczne, t.j. jakość rur okładzinowych (wady materiałowe) i stan ich powierzchni zewnętrznej, szczelność połączeń gwintowych, uzbrojenie kolumny rur (but, zawór zwrotny, pierścien oporowy, centralizatory, skrobaki, turbulizatory, mufa wielostopniowego cementowania, klocki cementacyjne, pakery rurowe), charakterystyka i sprawność urządzeń i sprzętu cementacyjnego, możliwości techniczne i sprawności aparatury kontrolno-pomiarowej itd.;
- technologiczne, do których należą, konstrukcja otworu długość i średnica kolumn rur, w tym długość w nieorurowanym odcinku otworu, wielkość poprzecznego przekroju przestrzeni pierścieniowej, ewentualne komplikacje w czasie rurowania, stan techniczny i przygotowanie otworu do rurowania i cementowania, koncentryczność kolumny rur w otworze, rodzaje i parametry płuczki wierniczej, w tym

również charakterystyka osadu filtracyjnego, skład, objętość i parametry zaczynu cementowego (zaczynów cementowych), sporządzanie zaczynów cementowych, wytłaczanie zaczynu poza rury (charakter przepływu), poruszanie i obracanie kolumną rur w czasie cementowania, ciśnienia wywierane w otworze i przestrzeni międzyrurowej po ukończeniu cementowania;

- mechaniczne: udary i wibracje świda i przewodu wiertniczego podczas zwiercania korka cementowego, buta i dalszego wiercenia, perforacja rur, zmiany ciśnienia w otworze przy wykonywaniu opróbowań i zabiegów stymulacyjnych;
- organizacyjne, obejmujące wyposażenie i dyspozycyjność zaplecza laboratoryjno-badawczego, przygotowanie teoretyczne i przygotowanie zawodowe służby cementacyjnej. projekty rurowania i cementowania oraz zakres wykorzystywania informacji geofizycznej, geologicznej i wiertniczej przy ich opracowywaniu, zgodność wykonawstwa zabiegu cementacyjnego z projektem i ewentualne komplikacje, czynności po cementowaniu.

Do podstawowych kryteriów odporności stwardniałych zaczynów cementowych na agresję, spowodowaną chemicznym oddziaływaniem środowiska, zaliczyć należy:

- możliwie najniższą zawartość Ca(OH)_2 (portlandytu),
- obecność w stwardniałym zaczynie jak największej ilości fazy CSH,
- niską zawartość fazy C_3A w cemencie,
- możliwie najniższą porowatość ogólną (z maksymalnym udziałem porów żelowych i możliwie najniższym porów kapilarnych).

Szczegółowy obraz mechanizmu korozji i zmian, zachodzących pod jej wpływem w mikrostrukturze stwardniałego zaczynu cementowego w konkretnych warunkach złożowych, można uzyskać poprzez przeprowadzenie wieloletnich obserwacji popartych badaniami próbek, poddanych działaniu roztworów o składach, odpowiadających wodom złożowym w określonych temperaturach. Długoletnie badania oddziaływania środowiska otworu wiertniczego na parametry stwardniałych zaczynów cementowych mogą przyczynić się do oceny przydatności różnych rodzajów zaczynów cementowych do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w danych warunkach geologiczno - złożowych.

Obserwowane w praktyce uszkodzenia stwardniałego zaczynu cementowego wskutek korozji chemicznej są różnorodne i trudne do usystematyzowania ze względu na nakładanie się na siebie różnych zjawisk. Przy zetknięciu z wodą i rozpuszczonymi w niej składnikami reakcje korozji pomiędzy zaczynem cementowym a czynnikami agresywnymi można przedstawić, jako zakłócenie stanu równowagi w stwardniałym zaczynie przez ługowanie i odprowadzanie składników na zewnątrz oraz jako reakcje prowadzące do zniszczenia jego mikrostruktury przez powstawanie związków o niskiej wytrzymałości lub związków pęczniejących. Poznanie całości zagadnienia korozji stwardniałego zaczynu cementowego i właściwa ocena konkretnych przypadków jest bardzo trudna ze względu na dużą ilość występujących w tym procesie czynników.

Wycieki poprzez uszkodzenia stwardniałego zaczynu uszczelniającego górotwór spowodowane są zachodzącą korozją węglanową. Korozja węglanowa lub kwasowęglanowa spowodowana jest obecnością w wodzie lub powietrzu agresywnego CO₂ i polega ona na ługowaniu z cementu wapnia, najpierw wolnego Ca(OH)₂, a w miarę jego wymycia także z uwodnionych krzemianów i glinianów. Jest to spowodowane tworzeniem kwaśnego węglanu wapniowego i odprowadzenia go na zewnątrz.

Nagromadzenie tyłu trudności, które mogą oddziaływać w połączeniu z przedstawioną charakterystyką geologiczno-złożową, wskazuje na złożoność procesów technologii cementowania, dlatego nie jest możliwe stosowanie standardowych technologii z wykorzystaniem "prostych" zaczynów cementowych, gdyż nie ma pewności przeprowadzenia skutecznego zabiegu cementowania otworu wiertniczego w dłuższej perspektywie.

W praktyce oznacza to, że przy ocenie ryzyka geologicznego składowania dla wybranej struktury (obiektu) należy zawsze uwzględniać nieszczelność starych otworów¹ w sąsiedztwie planowanej lokalizacji otworów zatłaczających. Wynika to także z faktu, że zatłaczany dwutlenek węgla może teoretycznie oddziaływać z cementem w starych, zlikwidowanych otworach przez okres wielu dziesiątków a nawet (lecz w coraz mniejszym stopniu) setek lat. Sprawy te będą przedmiotem prac w kolejnym etapie dla rejonu (południowej części) GZW, dla wytypowanego potencjalnego składowiska. Należy przy tym nadmienić, że obecność starych/wcześniej wykonanych otworów na obszarze potencjalnego składowiska jest jednak pożądana, gdyż to dzięki nim właśnie dysponujemy wiarygodną informacją o własnościach górotworu.

¹ Przy likwidacji składowiska należy koniecznie ponownie zacementować wszystkie stare (i nowe) otwory.

Badania laboratoryjne zaczynów cementowych i kamieni cementowych stosowanych w otworach wiertniczych dla rejonu Mazowsza i struktur naftowych

(Stanisław Stryczek, Andrzej Gonet, Rafał Wiśniowski)

Otwory wiertnicze przeznaczone do zatłaczania CO₂ stanowią potencjalną drogę dla wycieków magazynowanego ditlenku węgla. Wycieki CO₂ mogą zachodzić poprzez lub wzdłuż otworu po zatłoczeniu CO₂ i problem ten dotyczy wszystkich rodzajów geologicznego magazynowania CO₂. W przypadku składowania w złożach ropy naftowej i gazu, problem ten dotyczy nie tylko otworów do zatłaczania CO₂, ale również otworów uprzednio zlikwidowanych korkami cementowymi. Z tego względu bardzo ważny z punktu widzenia bezpieczeństwa ekologicznego składowania CO₂ jest dobór odpowiedniego rodzaju cementu przy projektowaniu i wykonywaniu otworu do zatłaczania CO₂ oraz następnie jego likwidowania. Wycieki poprzez skorodowany stwardniały zaczyn cementowy są określane jako znaczące ryzyko dla środowiska naturalnego.

Wycieki poprzez uszkodzenia stwardniałego zaczynu uszczelniającego górotwór spowodowane są zachodzącą korozją węglanową. Korozja węglanowa lub kwasowęglanowa spowodowana jest obecnością w wodzie lub powietrzu agresywnego CO₂ i polega ona na ługowaniu z cementu wapnia, najpierw wolnego Ca(OH)₂,

a w miarę jego wymycia także z uwodnionych krzemianów i glinianów. Jest to spowodowane tworzeniem kwaśnego węglanu wapniowego i odprowadzenia go na zewnątrz.

Konstrukcja odwiertów do iniekcji CO₂ rozpoczyna się od wiercenia otworów, po czym następuje faza wykańczania odwiertów, konieczna przed rozpoczęciem iniekcji CO₂. W ramach wykańczania otworów, faza cementacji powinna dać gwarancje skutecznej oraz długotrwałej izolację odwiertu począwszy od zbiornika (strefy deponowania) aż do powierzchni ziemi oraz izolację pomiędzy utworami geologicznymi. Krytycznym technicznym problemem dla odizolowania zmagazynowanego CO₂ jest odporność chemiczna stwardniałego zaczynu cementowego w ciągu upływającego czasu. Tradycyjne spoiwa hydrauliczne, używane do izolacji odwiertów w przemyśle naftowym i gazowym to systemy oparte na cemencie portlandzkim. Zaletami tych systemów jest niski koszt i skuteczność cementowania tradycyjnych odwiertów. Jednakże wiadomo, że cement jest termodynamicznie niestabilny w środowisku bogatym w CO₂. Ma on tendencję do gwałtownej degradacji, gdy jest narażony na działanie takich kwaśnych gazów, gdyż reaguje z wodorotlenkiem wapnia powstającym z uwodnionego krzemianu wapnia. Ponieważ węglany są rozpuszczalne w środowisku o niskim pH, proces uwęglania (karbonizacji) cementu nie będzie zjawiskiem prowadzącym do samouszczelniania powłoki cementowej. Pewne dane zostały ostatnio opublikowane na temat tego rodzaju środowiska. Ponadto przeprowadzono ostatnio analizy jednej próbki cementu pobranej z odwiertu naftowego przystosowanego do magazynowania CO₂. Chociaż wspomina się o podobnym procesie karbonizacji, próbka cementu zachowała swoją strukturalną integralność po 30 latach przebywania w środowisku podobnym do zbiorników CO₂. Co więcej, przeprowadzone ostatnio badania eksperymentalne dla obszarów stykowych pomiędzy stwardniałym zaczynem cementowym a górotworem oraz cementem i obudową wykazały podobieństwo zachodzących tam reakcji chemicznych.

Długoterminowa żywotność izolacji oraz integralność otworów iniekcyjnych CO₂ musi być poprawiona, aby zapewnić długoletnie bezpieczeństwo dla środowiska. Dostępne są doniesienia o licznych awariach w procesie iniekcji CO₂ do adoptowanych odwiertów wydobywczych ropy naftowej, przy czym te awarie są spowodowane niezadowalającymi właściwościami izolacyjno-uszczelniającymi stwardniałego zaczynu cementowego. Uszkodzenia warstwy cementowej na odcinku iniekcji lub powyżej mogą powodować powstawanie kanałów, którymi dwutlenek węgla może migrować z powrotem na powierzchnię. To zjawisko może nastąpić wiele szybciej, niż przesiąkanie geologiczne.

Optymalizacja zaawansowanych systemów pozwalających na długoterminową izolację odwiertów jest krytycznym czynnikiem, pozwalającym na bezpieczne i wydajne podziemne przechowywanie dwutlenku węgla i w ten sposób utrzymanie gazów cieplarnianych z daleka od atmosfery przez długi okres czasu.

Karbonatyzacja

Działanie CO₂ w stosunku do stwardniałych zaczynów uszczelniających ma miejsce nawet przy jego niskich stężeniach. W rzeczywistości gazowy CO₂ nie jest aktywny, natomiast w obecności wilgoci, reaguje ze hydratyzowanym cementem.

Spośród hydratów w zaczynie cementowym najłatwiej z CO₂ reaguje Ca(OH)₂, tworząc CaCO₃, ale działaniu dwutlenku węgla ulegają także inne hydraty, w efekcie obok CaCO₃ powstają uwodnione tlenki krzemu, glinu i żelaza. Teoretycznie, taki kompletny rozkład składników wapniowych w hydratyzowanym zaczynie cementowym jest chemicznie możliwy nawet przy niskim stężeniu CO₂. W stwardniałym zaczynie cementowym zawierającym tylko cement portlandzki interesująca jest jedynie karbonatyzacja Ca(OH)₂. Jednakże, gdy Ca(OH)₂ ulegnie wyczerpaniu, np. skutkiem wtórnych reakcji z pucolaną, możliwa jest karbonatyzacja uwodnionego krzemianu wapniowego, C-S-H. Kiedy to nastąpi, nie tylko wzrasta zawartość CaCO₃, ale tworzy się równocześnie żel krzemionkowy, który odkłada się w porach, większych niż 100 nm, co ułatwia dalszą karbonatyzację.

Tempo karbonatyzacji zależy od wielu czynników, jak zawartość cementu, czas trwania działania CO₂, wilgotność stwardniałego zaczynu, zawartość wolnego, czyli zdatnego do reakcji wapna w kamieniu cementowym itd. Gdy warstwa skarbonatyzowana osiągnie powierzchnię kolumny rur okładzinowych i ochrona stali przed korozją przestaje istnieć, zaczyna się proces korozji stali, w wypadku, gdy jest dostatecznie dużo wody i tlenu. Jednym z najważniejszych czynników wpływających na szybkość karbonatyzacji stwardniałego zaczynu jest jego opór przeciw wnikaniu mediów gazowych. Objętość porów i struktura porów określają tempo, w jakim przebiega karbonatyzacja.

Karbonatyzacja sama przez się nie powoduje uszkodzeń i niszczenia stwardniałego zaczynu cementowego, jej skutki są jednak poważne. Jednym z nich jest skurcz karbonatyzacyjny. W odniesieniu do trwałości znaczenie karbonatyzacji związane jest z faktem, że obniża ona pH roztworów w porach stwardniałego zaczynu cementowego z poziomu od około 12,6 - 13,5 do wartości około 9. Gdy cały Ca(OH)₂ ulegnie karbonatyzacji wartość pH spada do 8,3.

Otulona zhydratyzowanym zaczynem cementowym stal (kolumna rur okładzinowa) ulega pasywacji szybko wytwarzając cienką *warstwę pasywacyjną*, która silnie przylega do stali i zabezpiecza ją przed reakcjami z

tlenem i wodą, tj. przed tworzeniem się rdzy i przed korozją. Zachowanie pasywacji uwarunkowane jest zachowaniem dostatecznie wysokiego pH roztworu wodnego będącego w kontakcie z warstwą pasywacyjną. Tak więc, gdy strefa niskiego pH dotrze do powierzchni stali, zabezpieczająca warstwa tlenku zostaje usunięta i następuje korozja, o ile tlen i wilgoć są obecne w dostatecznej ilości. Z tego powodu ważne jest, aby znać głębokość karbonatyzacji i wiedzieć, czy front karbonatyzacji osiągnął powierzchnię kontaktu stwardniałego zaczynu z kolumną rur okładzinowych wykonanych ze stali. W gruncie rzeczy, z uwagi na obecność mineralnych dodatków w zaczynie, „front” karbonatyzacji nie przesuwają się w formie linii idealnie prostej. Można również zauważyć, że jeśli obecne są rysy, wówczas CO₂ może przez nie wnikać tak, że front karbonatyzacji przemieszcza się lokalnie od rys już spenetrowanych. W wielu przypadkach, jeśli nastąpiła karbonatyzacja częściowa, korozja może wystąpić nawet wówczas, gdy główny front karbonatyzacji znajduje się jeszcze o kilka milimetrów od powierzchni stali.

Karbonatyzacja zachodzi stopniowo od zewnętrznej strony stwardniałego zaczynu cementowego, wystawionego na kontakt z CO₂, ale odbywa się to w malejącym tempie, ponieważ CO₂ musi dyfundować przez system porów zawierający już skarbonatyzowaną powierzchniową strefę stwardniałego zaczynu cementowego. Dyfuzja taka jest procesem powolnym, jeśli pory w zhydratyzowanym stwardniałym zaczynie cementowym wypełnione są wodą, to dyfuzja CO₂ w wodzie przebiega o cztery rzędy wielkości wolniej niż w powietrzu. Z drugiej strony, jeśli ilość wody w porach jest niedostateczna, wówczas CO₂ pozostaje w formie gazowej i nie wchodzi w reakcje ze zhydratyzowanym cementem. Wynika stąd, że szybkość karbonatyzacji zależy od zawartości wilgoci w betonie, która zmienia się wraz z odległością od powierzchni. Skutkiem tej zmiennej sytuacji, szybkość transportu CO₂ do postępującego frontu karbonatyzacji w betonie nie może być określona wprost z równania dyfuzji. Największa szybkość karbonatyzacji obserwowana jest przy wilgotności względnej pomiędzy 50% i 70%.

W stałych warunkach wilgotnościowych głębokość karbonatyzacji rośnie proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z czasu, co jest charakterystyczne raczej dla sorpcji niż dla dyfuzji, ale karbonatyzacja pociąga za sobą interakcje pomiędzy CO₂, a układem porów. Jest zatem możliwe wyrażenie głębokości karbonatyzacji D w milimetrach, jako następującej zależności:

$$D = K t^{0,5}$$

gdzie:

K - współczynnik karbonatyzacji w mm/rok^{0,5},

t - okres ekspozycji w latach.

Wartości K wynoszą w przypadku betonu o niskiej wytrzymałości, często powyżej 3 lub 4 mm/rok^{0,5}. Inny sposób przedstawienia tego problemu to uświadomienie sobie, że w stwardniałym zaczynie cementowym o stosunku wodno-cementowym równym 0,60, głębokość karbonatyzacji 15 mm zostanie osiągnięta po 15 latach a przy stosunku wodno-cementowym wynoszącym 0,45 - dopiero po 100 latach.

Wyrażenie, w którym występuje pierwiastek kwadratowy z czasu nie jest przydatne wówczas, gdy warunki ekspozycji na oddziaływania zewnętrzne nie są ustalone. W szczególności, gdy powierzchnia stwardniałego zaczynu cementowego wystawiona jest na zmienną wilgotność, z okresowym nawilżaniem, szybkość

karbonatyzacji zmniejsza się skutkiem spowolnienia dyfuzji CO₂ przez nasycone pory stwardniałego zaczynu cementowego.

Zmiany temperatury mają mały wpływ na karbonatyzację, jednak należy zauważyć, że duży wzrost temperatury podwyższa szybkość karbonatyzacji.

Podstawowym czynnikiem, od którego zależy karbonatyzacja, jest dyfuzyjność stwardniałego zaczynu cementowego. Dyfuzyjność jest funkcją układu porów w stwardniałym zaczynie cementowym, w czasie kiedy zachodzi dyfuzja CO₂. W związku z tym, znaczenie mają:

- rodzaj cementu,
- stosunek wodno-cementowy ,
- stopień hydratacji.

Wszystkie te czynniki wpływają również na wytrzymałość stwardniałego zaczynu cementowego. Z tego powodu mówi się często, że szybkość karbonatyzacji jest po prostu funkcją wytrzymałości związanego i stwardniałego zaczynu cementowego. Chociaż w zasadzie jest to prawda, takie twierdzenie stanowi jednak nadmierne uproszczenie, gdyż podawana wartość wytrzymałości nie odnosi się do stwardniałego zaczynu znajdującego się w warunkach otworowych eksponowanego na działanie CO₂.

Rozwiązania alternatywne w stosunku do posługiwania się wytrzymałością, obejmują przedstawianie karbonatyzacji jako funkcji:

- stosunku wodno-cementowego,
- funkcji zawartości cementu,
- obu tych wielkości.

Brakuje podstaw fizycznych do uwzględnienia czynnika uwzględniającego zawartości cementu w recepturze zaczynu cementowego. Co się tyczy stosunku wodno-cementowego, to podejście to wcale nie można uważać za lepsze niż posługiwanie się jako parametrem wytrzymałością stwardniałego zaczynu. W gruncie rzeczy ani wytrzymałość, ani stosunek wodno-cementowy nie zawierają informacji dotyczących mikrostruktury stwardniałego zaczynu cementowego w powierzchniowej strefie stwardniałego zaczynu podczas przebiegu dyfuzji CO₂.

Ponieważ obecnie szeroko są stosowane cementy mieszane ważne jest, aby wiedzieć jak karbonatyzacja przebiega w stwardniałych zaczynach zawierających dodatki mineralne (popioły lotne oraz mielone granulowane żużle wielkopieczowe). Publikowane były liczne artykuły podające wyniki porównawczych prób karbonatyzacji w zaczynach bez lub z dodatkiem tych materiałów, jednak porównań dokonywano opierając się na różnych podstawach. Dane takie nie nadają się do użytecznych uogólnień, a zwłaszcza co jest istotne przy wyborze receptury zaczynu cementowego do oceny charakterystyk karbonatyzacyjnych konkretnie proponowanej receptury zaczynu uszczelniającego.

Punktem wyjścia przy ocenie przebiegu karbonatyzacji jest znajomość mikrostruktury i innych właściwości stwardniałego zaczynu cementowego, wynikających ze stosowania rozmaitych materiałów wiążących, z

uwagi na to jak właściwości owe wpływają na karbonatyzację. Podkreślić należy dwa spostrzeżenia w odniesieniu do popiołów lotnych klasy F. Przede wszystkim krzemionka zawarta w popiele lotnym reaguje z Ca(OH)_2 utworzonym w wyniku hydratacji cementu portlandzkiego. W rezultacie, zawartość Ca(OH)_2 w stwardniałym zaczynie cementowym jest niższa tak, że do związania Ca(OH)_2 w CaCO_3 potrzebna jest mniejsza ilość CO_2 . Bier wykazał, że głębokość karbonatyzacji jest większa, gdy zawartość Ca(OH)_2 w zaczynie cementowym jest niższa. Wynika stąd, że obecność popiołu lotnego przyspiesza karbonatyzację. Występuje jednak także inny efekt reakcji pomiędzy krzemionką a Ca(OH)_2 , a mianowicie powstanie bardziej zwartej mikrostruktury stwardniałego zaczynu cementowego, co powoduje zmniejszenie dyfuzyjności i ograniczenie szybkości karbonatyzacji.

Pytanie jakie należy postawić brzmi: który efekt jest dominujący? Jednym z ważnych czynników jest jakość pielęgnacji. Właściwa pielęgnacja jest konieczna do tego, aby mogły zajść reakcje pucolanowe. Stwardniałe zaczyny wykonywane przy zastosowaniu cementu z domieszką do 30% popiołu lotnego, o faktycznej wytrzymałości ponad 35 MPa, wykazywały nie zwiększoną lub jedynie marginalnie zwiększoną karbonatyzację.

Stosowanie granulowanych, mielonych żużli wielkopieczowych stawia właściwej pielęgnacji wymagania jeszcze wyższe. Źle pielęgnowany stwardniały zaczyn zawierający żużel wielkopieczowy bardzo szybko ulega karbonatyzacji. Już po jednorocznej ekspozycji stwierdzano, że głębokość warstwy skarbonatyzowanego zaczynu jest rzędu 10 do 20 mm. Wysoka zawartość żużla wielkopieczowego prowadzi do zwiększenia głębokości karbonatyzacji. Jednakże, gdy zawartość żużla w cemencie mieszanym jest poniżej 50%, a stwardniały zaczyn wystawiony jest na działanie CO_2 o koncentracji 0,03%, wówczas następuje tylko nieznaczne zwiększenie karbonatyzacji.

Techniki laboratoryjne, które można zastosować celem wyznaczenia głębokości karbonatyzacji, obejmują analizę:

- chemiczną,
- rentgenowską ,
- strukturalną,
- spektroskopii w podczerwieni ,
- termograwimetryczną.

Aby określić jak szybko w danym stwardniałym zaczynie cementowym może zachodzić karbonatyzacja zastosować można badanie przyspieszone. Polega ono na wystawieniu próbki stwardniałego zaczynu na oddziaływanie gazów wzbogaconych w CO_2 o stężeniu c_s procent. Głębokość karbonatyzacji po pewnym czasie ekspozycji t_t może być następnie wykorzystana do oszacowania czasu t_s , po którym ta sama głębokość karbonatyzacji osiągnięta zostanie przy stężeniu c_s występującym w warunkach eksploatacyjnych. Podstawę stanowi założenie, że czas jest odwrotnie proporcjonalny do stężenia CO_2 :

$$t_t : t_s = c_s : 100$$

W metodzie szwajcarskiej stosowany jest czysty CO₂ (stężenie 100%); stężenie CO₂ wynosi częściej 4% lub 5%. Aby karbonatyzacja mogła postępować dalej wilgotność względna powinna wynosić 60 do 70%.

Szczególne ostrożności wymagane są przy interpretacji wyników prób przyspieszonych, nie tylko dlatego, że karbonatyzacja *in situ* (tzn. w otworze wiertniczym) jest pod silnym wpływem rzeczywistych warunków ekspozycji, zwłaszcza zwilżania stwardniałego zaczynu przez wody złożowe, niejednokrotnie silnie zmineralizowane, ale również dlatego, że wysokie stężenie CO₂ zakłóca występujące procesy chemiczne zachodzące w procesie wiązania i twardnienia zaczynu.

Karbonatyzacja może mieć pewne konsekwencje pozytywne. Ponieważ CaCO₃ zajmuje objętość większą niż Ca(OH)₂, porowatość stwardniałego zaczynu po karbonatyzacji, zmniejsza się. Również woda wydzielająca się w wyniku przejścia Ca(OH)₂ podczas karbonatyzacji w CaCO₃ może pomóc przy uwadnianiu cementu dotychczas niezhydratyzowanego. Zmiany te są korzystne, a efektem ich jest zwiększona twardość powierzchni, zwiększona wytrzymałość przy powierzchni, obniżona przepuszczalność powierzchni, zredukowane odkształcenia wilgotnościowe i zwiększona odporność na te formy agresji, które zależne są od przepuszczalności. Z drugiej strony, karbonatyzacja przyspiesza korozję chlorkową zarówno stwardniałego zaczynu cementowego jak i stali, z której wykonana jest kolumna rur okładzinowych.

Badania laboratoryjne zaczynów uszczelniających do cementowania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych przeznaczonych do zatłaczania CO₂ dla rejonu Mazowsza i struktur naftowych.

Podstawowe problemy, jakie występują przy cementowaniu odwiertów przeznaczonych do zatłaczania CO₂ należy rozwiązywać poprzez racjonalny dobór rodzaju i parametrów technologicznych stosowanych zaczynów uszczelniających.

W tym aspekcie należy uwzględnić następujące kierunki działania:

zmniejszanie przepuszczalności stwardniałych cementów przez stosowanie cementów z dodatkami, takimi jak mielony granulowany żużel wielkopiecowy i popiół lotny, będącymi środkiem do poprawy trwałości w dłuższym okresie czasu, lub przez stosowanie cementów "plastycznych",

zmiana gatunku cementu na taki, który ma znacznie większą odporność na działanie CO₂. Cementy takie mogą obejmować mieszanki cementu glinowy-fosforan, które osiągnęły pewne interesujące sukcesy na tym polu, lub inne warianty, jak mielony granulowany żużel wielkopiecowy aktywowany krzemianem sodu lub mieszaniny mielonego granulowanego żużla wielkopiecowego i popiołu lotnego aktywowanego krzemianem sodu, które również okazały się obiecujące,

w szczególnych warunkach, w których spoiwo zawierające uwodnione krzemiany wapniowe może w obecności nadmiaru wody zawierającej CO₂ stracić swą zdolność wiązania w wyniku przemiany w niewiążący taumazyt (złożony uwodniony węglano-krzemiano-siarczan wapniowy o niezwykłym wzorze w stanie czystym: Ca₆[Si(OH)₆]₂(CO₃)₂(SO₄)₂·24H₂O lub prostszym: CaCO₃·CaSO₄·CaSiO₃·15H₂O), konieczne jest odpowiednie zmniejszenie przepuszczalności.

zapewnienie, by dla przeprowadzenia udanego cementowania użyty zaczyn uszczelniający był dostatecznie plastyczny dla zapobieżenia działaniu CO₂, Zapewnienie plastyczności może być zrealizowane w różny sposób, między innymi drogą zmniejszenia porowatości i przepuszczalności przez wypełnienie porów cząstkami stałymi, a także przez cementowanie z użyciem czynnika wywołującego pęcznienie.

Zaczyny uszczelniające sporządzone na osnowie cementu portlandzkiego wykazują wiele wad: długi czas wiązania, nieodpowiednie właściwości reologiczne, mała odporność na czynniki korozyjne.

W związku z powyższym w ostatnich latach prowadzone są intensywne badania nad dalszym rozwojem spoiw i nieorganicznych dodatków o właściwościach hydraulicznych bądź pucolanowych w celu uzyskania nowej generacji spoiw specjalnych o zwiększonej trwałości.

Otrzymuje się je poprzez modyfikację składu odpowiednio zestawionych i przygotowanych zaczynów sporządzonych na osnowie bądź to cementów portlandzkich bądź wieloskładnikowych cementów powszechnego użytku.

Zgodnie z normami PN-EN-197-1 „Cement-Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku” oraz PN-EN-197 – 2 „Cement – Część 2 : Ocena zgodności” w bardzo dużej grupie cementów z udziałem składników pucolanowych wyodrębnia się cementy popiołowe zawierające popiół lotny krzemionkowy

(V) ze spalania węgla kamiennego.

Popiół lotny (V) stosowany jest jako składnik:

drugorzędny cementu portlandzkiego CEM I (do 5% wagowo),

główny cementu:

portlandzkiego popiołowego CEM II ,

cementu pucolanowego CEM IV,

cement wieloskładnikowy CEM V.

Powyższe normy wyróżniają:

cementy portlandzkie popiołowe w dwóch odmianach CEM II/A-V i CEM II/B-V zawierające odpowiednio do 20 i 35 % (wagowo) popiołu lotnego krzemionkowego,

cementy pucolanowe w dwóch odmianach CEM IV /A i CEM IV/B mogące w swym składzie zawierać odpowiednio do 35 i 55 % (wagowo) popiołu lotnego krzemionkowego,

cementy wieloskładnikowe w dwóch odmianach CEM V/A i CEM V/B zawierające odpowiednio do 30 i 50 % dodatków o właściwościach pucolanowych.

Właściwości fizyczne popiołów lotnych i ich mechanizm działania w procesie hydratacji

Popioły lotne składają się w przeważającej części z kulistych cząstek o średnicy od ułamka μm do około 150 μm . Średnie wartości ziaren popiołów kształtują się na poziomie 7-12 μm . Pozostałości niespalonego węgla w formie okruchów o nieregularnych kształtach, zawarte są we frakcji powyżej 45 μm . Ze względu na obecność znacznej liczby cząstek bardzo drobnych, o średnicach nie przekraczających 3 μm , powierzchnie właściwe popiołów osiągają wysokie wartości, od 200 m^2/kg do 1000 m^2/kg wg Blane'a. Gęstości właściwe popiołów, zawarte są na ogół w granicach 1700 – 2700 kg/m^3 i są one niższe od gęstości cementu, zaś gęstości nasypowe mogą wynosić 600 – 900 kg/m^3 . Ich porowatość wewnętrzna wynosi od 0,6 do 0,7 m^3/kg .

Popiół lotny krzemionkowy (V) wykorzystywany do produkcji cementu portlandzkiego popiołowego CEM II oraz cementów CEM IV oraz CEM V musi spełniać określone kryteria jakościowe. Popiół V powinien zawierać maksymalnie 5% reaktywnego tlenku wapniowego CaO, a zawartość strat prażenia nie powinna przekraczać 5%.

Popiół lotny krzemionkowy jest materiałem chemicznie czynnym, ponieważ zawiera aktywną krzemionkę, która nadaje mu właściwości pucolanowe, tj. zdolność do reagowania z wodorotlenkiem wapniowym w środowisku wodnym, z utworzeniem związków o właściwościach hydraulicznych.

Wpływ popiołów lotnych na proces hydratacji jest stale badany i jak dotąd nie przedstawiono pełnego podsumowania zjawisk zachodzących w układzie cement-popiół-woda. Niemniej jednak wiadomo, że składniki popiołu wykazują skłonność do wchodzenia w reakcję z jonami Ca^{2+} , pochodzącymi z hydrolizy krzemianów wapniowych w środowisku wodnym z utworzeniem tzw. faz C-S-H – produktów bardzo podobnych do hydratów powstających wskutek uwodnienia alitu i belitu. Fazy C-S-H wykazują w obecności popiołu niższą średnią zawartość CaO. Zawartość $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w produktach hydratacji ulega generalnie zmniejszeniu, nie tylko na skutek reakcji pucolanowej wiązania jonów Ca^{2+} przez krzemionkę z popiołu, ale również w efekcie obniżenia udziału klinkieru w cemencie. Aktywny tlenek glinu z popiołu tworzy uwodnione gliniany, etryngit, monosiarczanoglinian wapniowy i hydrogelenit.

Efekt działania popiołu zależy od jego rozdrobnienia i zawartości substancji aktywnej. Powierzchnie ziaren popiołu, zwłaszcza przy wysokiej zawartości frakcji drobnych, ułatwiają nukleację produktów hydratacji z fazy ciekłej, podobnie jak każdy, nawet nieaktywny wypełniacz o mikronowej wielkości cząstek.

W celu zwiększenia tempa przebiegu reakcji pucolanowej popioły poddaje się wspólnemu przemiałowi z klinkierem portlandzkim. Wywołuje to mikropęknięcia w szklistej otoczce na kulistych ziarnach popiołu, a tym samym zwiększa ich reaktywność.

Ponadto w czasie wspólnego przemiału drobne ziarna popiołu ulegają dobremu wymieszaniu z klinkierem, co zapewnia uzyskanie cementu o wysokim stopniu jednorodności. Natomiast grubsze, niedomielone frakcje popiołu, podobnie jak ziarna popiołu niepoddanego procesowi mielenia, wykazują zdecydowanie mniejszą aktywność pucolanową. Wprowadzone do zaczynu pełnią praktycznie rzecz biorąc tylko rolę „mikrokruszywa”, przyczyniając się tym samym jedynie do pewnej poprawy stopnia upakowania tekstury stwardniałego zaczynu.

Pamiętać należy również, że wprowadzenie dodatku popiołu do cementu jest zawsze związane z obniżeniem zawartości klinkieru w cemencie, a więc z podwyższeniem współczynnika wodno-cementowego. Wprowadzenie popiołu do hydratyzującego układu wiąże się również zawsze z zakłóceniem istniejących równowag – obecne w niewielkich ilościach w popiele alkalia i siarczany przechodząc do roztworu wywierają wielorakie działanie – nie tylko przyspieszające, ale również opóźniające pewne procesy. Stąd obserwuje się na ogół mniejsze lub większe opóźnienie wiązania i szybkości wzrostu wytrzymałości w początkowym okresie twardnienia, jak również obniżenie ciepła hydratacji cementów z dodatkiem popiołów.

Charakterystyka popiołów fluidalnych

Popioły fluidalne są rezultatem spalania fluidalnego. Spalanie węgla w złożu fluidalnym należy do najbardziej korzystnych sposobów wytwarzania energii zapewniających niską emisję NO_x , z wysokim stopniem odsiarczania spalin i wysoką skutecznością wypalania paliwa. Popioły otrzymywane w kotłach fluidalnych składają się z nieregularnych ziaren zdehydratyzowanych minerałów tworzących pierwotnie skałę płoną i mających niemal amorficzną strukturę o dużej powierzchni właściwej. Ma on dużo lepsze właściwości fizyczne w odróżnieniu od popiołu z kotłów konwencjonalnych i może wchodzić w reakcje chemiczne. Istotnie wyższa zawartość wapna stanowi o różnicy między nimi. Wykazują również różnice w składzie mineralnym.

Proces spalania w kotle fluidalnym przebiega w temperaturze $860\text{ }^{\circ}\text{C}$, czyli w takiej gdzie nie tworzą się stałe cząstki tlenków azotu. Materiał złoża jest utworzony z popiołu powstającego ze spalania paliwa oraz z kamienia wapiennego, który jest stosowany do wychwytywania siarki uwalnianej w procesie spalania. Poprzez dodanie kamienia wapiennego do złoża osiąga się wysoki stopień retencji siarki, przy niskim stosunku molowym Ca/S.

Popioły fluidalne składają się najczęściej z:

- amorficznych lub słabo skryształizowanych produktów całkowitej lub częściowej dehydroksylacji substancji ilastych w łupkach stanowiących skałę płoną w złożach węgla,
- anhydrytu stanowiącego produkt odsiarczania,
- w niewielkich ilości siarczynu wapnia CaSO_3 ,
- nieprzereagowanego sorbent CaCO_3 ,
- CaO i produktów jego hydratacji,
- niespalonego węgla.

Odpady paleniskowe z kotłów fluidalnych mają inny skład chemiczny oraz fizyczne właściwości niż odpady paleniskowe z kotłów pyłowych. Wynika to z niższej temperatury spalania oraz dodawania do węgla kamienia wapiennego i innych dodatków. W zależności od zawartości w węglu siarki i popiołu, w kotłach fluidalnych powstaje więcej odpadów niż w kotłach pyłowych (o 20-80%). Zawierają one głównie związki krzemu, wapnia, siarki i glinu. Udział poszczególnych składników w całkowitej masie odpadów wynosi:

- gipsu bezwodnego (anhydrytu), CaSO ₄	6-35%
- trójtlenku siarki, SO ₃	3-20%
- wolnego tlenku wapnia, CaO	1-25%
- związku krzemu i glinu (illitu)	do 50%
- składników bezpostaciowych	20-30%
- części palnych	1-3%

Gęstość właściwa popiołów fluidalnych zawarta jest w granicach 2500 - 2750 kg/m³. Przeważają w nich ziarna blaszkowate o średnicy (zastępczej) poniżej 20 μm, których udział w masie odpadów stanowi 50-70% .

Prowadzone badania laboratoryjne w kraju i za granicą nad wykorzystaniem popiołów fluidalnych jako dodatku do cementów powszechnego użytku wykazały, że popioły fluidalne wywierają swój wpływ na niektóre parametry użytkowe cementów takie jak czas wiązania oraz wytrzymałości mechaniczne w przeciwieństwie do tradycyjnie stosowanego popiołu lotnego z kotłów pyłowych.

Badania laboratoryjne

Celem przeprowadzonych badań laboratoryjnych było udowodnienie następującej tezy : dodatek popiołu fluidalnego w odpowiednich koncentracjach w stosunku do masy suchego cementu portlandzko popiołowego rodzaju CEM II/B-V 32,5 R powinien wpłynąć dodatnio na parametry technologiczne świeżego i stwardniałego zaczynu cementowego przeznaczonego do cementowania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych przeznaczonych do podziemnej sekwestracji CO₂. Badania laboratoryjne parametrów technologicznych zaczynów uszczelniających przeprowadzono w oparciu o następujące normy:

PN – EN 197 – 1: 2002, Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.

PN - EN 196-1 : 1996. Metody badania cementu. Oznaczanie wytrzymałości. Grudzień 1996.

PN - EN 196-3 : 1996. Metody badania cementu. Oznaczanie czasów wiązania i stałość objętości. Grudzień 1996 r.

PN – EN ISO 10426 – 1. Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 1. Specyfikacja.

PN – EN ISO 10426 – 2. Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2: Badania cementów wiertniczych. 2003.

W przeprowadzanych badaniach zmiennymi były:

współczynnik w/c,

koncentracja popiołu fluidalnego w zaczynie.

Współczynnik wodno-mieszaninowy (cement wraz z popiołem fluidalnym) dla badanych zaczynów uszczelniających wynosił: 0,4; 0,5; 0,6; oraz 0,7. Popiół fluidalny był przemielony do powierzchni $400 \frac{m^2}{kg}$,

zaś jego gęstość wynosiła $2758 \frac{kg}{m^3}$

Popiół fluidalny był dodawany do cementu portlandzkiego w ilościach 5%; 7% i 10% wagowo w stosunku do masy suchego cementu.

Opracowanie wyników z badań laboratoryjnych.

Receptury oraz parametry technologiczne świeżych zaczynów uszczelniających wytypowanych do badań laboratoryjnych przedstawiono w **Tabela 1.1.7_1**.

Tabela 1.1.7_1 Wyniki badań laboratoryjnych świeżego zaczynu uszczelniającego z różną koncentracją popiołu fluidalnego.

L.p	Oznaczenia zaczynu uszczelniającego [-]	Gęstość [kg/m ³]	Odstój [%]	Rozlewność wg stożka Az N II [mm]	Lepkość względna wg kubka Forda nr.4 [s]	Filtracja właściwa [cm ³ /s]
1	04 – 0%	1860	n.m.	120	n.m.	52/16
2	04 – 5%	1845	n.m	130	n.m	59/20
3	04 – 7%	1840	n.m	135	n.m	60/21
4	04 – 10%	1840	n.m	145	n.m	61/22
5	05 – 0%	1750	0,2	150	38	62/17
6	05 – 5%	1745	0,25	170	29	71/21
7	05 – 7%	1740	0,3	175	28	72/23
8	05 – 10%	1735	0,45	185	28	74/22
9	06 – 0%	1690	0,6	190	23	77/17
10	06 – 5%	1680	3,5	195	21	82/21
11	06 – 7%	1670	4	200	19	84/23
12	06 – 10%	1655	4,4	210	17	86/24
13	07 – 0%	1620	1,5	n.m.	16	88/17
14	07 – 5%	1610	6	n.m	14	94/21
15	07 – 7%	1600	9,4	n.m	13	95/22
16	07 – 10%	1600	14	n.m	13	97/23

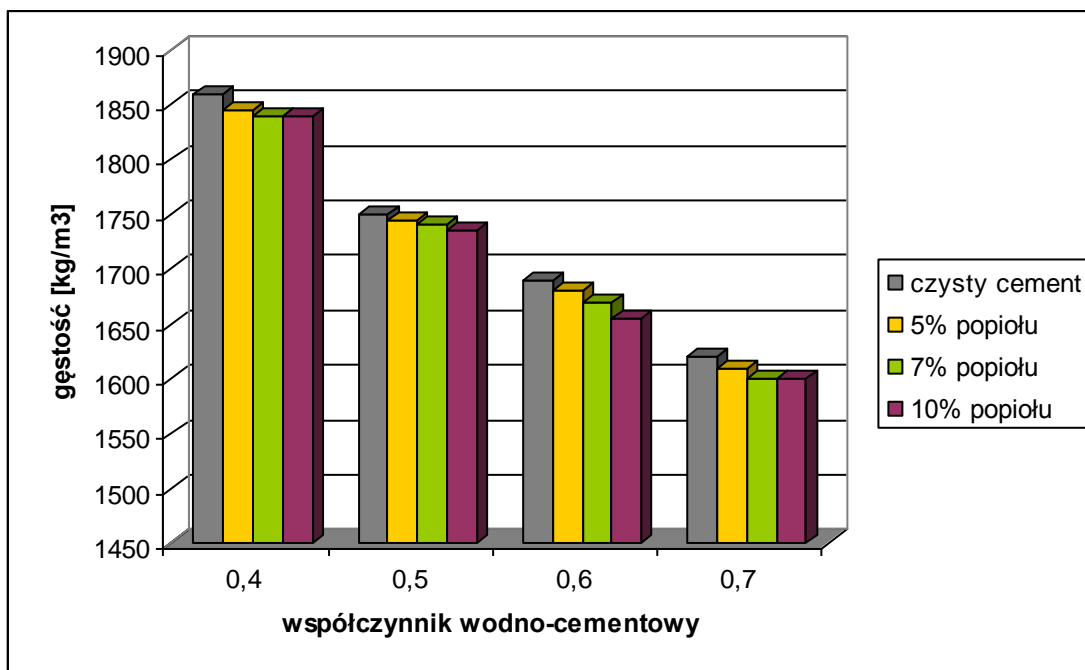


Fig.1.1.7_26 Wpływ popiołu fluidalnego na gęstość poszczególnych współczynników wodno – cementowych.

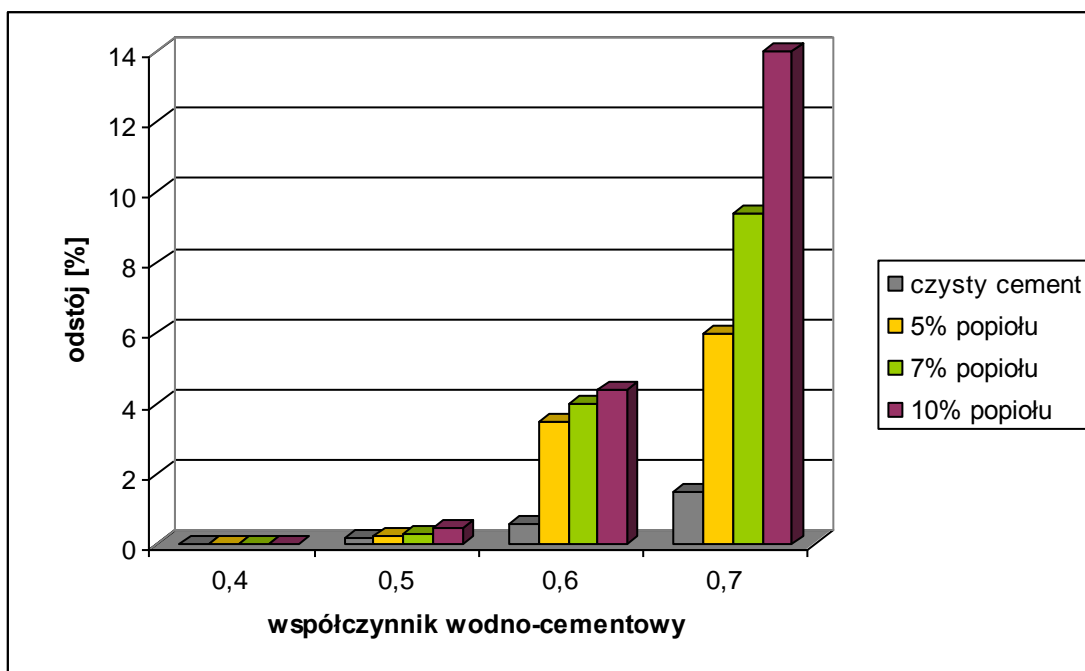


Fig.1.1.7_27 Wpływ popiołu fluidalnego na odstój poszczególnych współczynników wodno – cementowych.

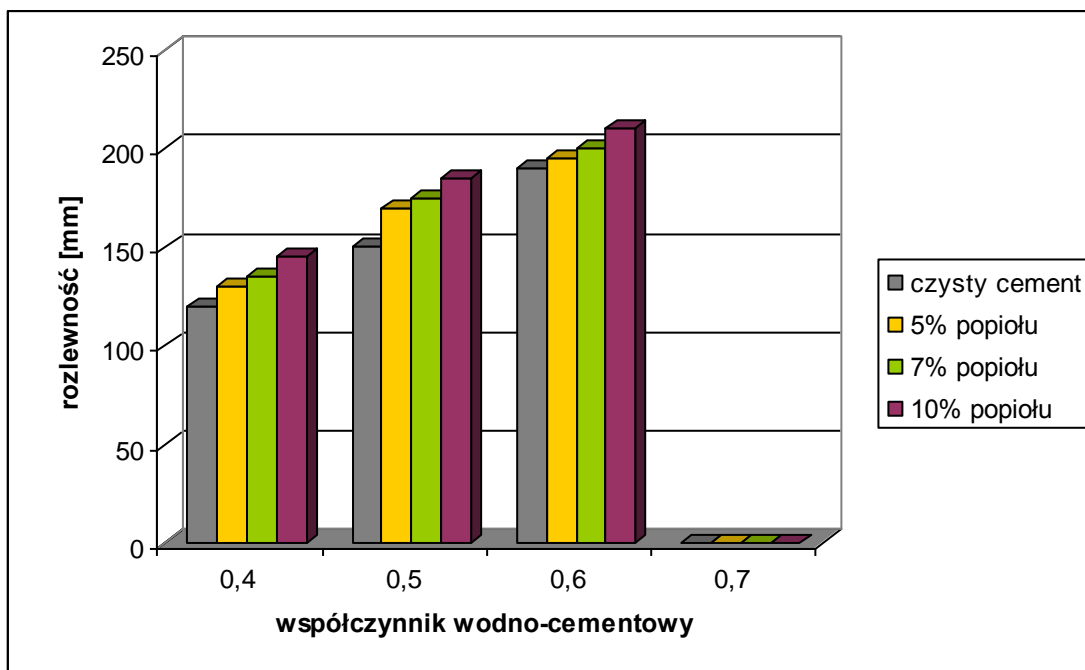


Fig.1.1.7_28 Wpływ popiołu fluidalnego na rozlewność poszczególnych współczynników wodno – cementowych.

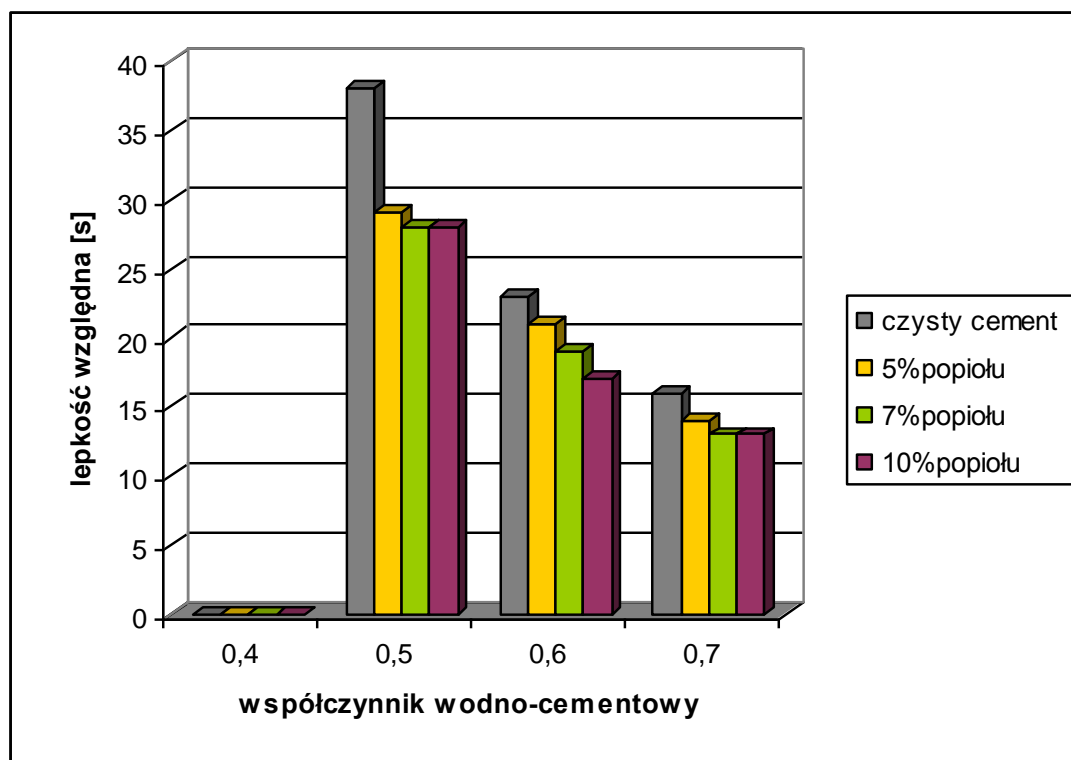


Fig.1.1.7_29 Wpływ popiołu fluidalnego na lepkość względną poszczególnych współczynników wodno – cementowych.

W celu wyboru optymalnego modelu reologicznego zaczynu uszczelniającego sporządzonego według określonej receptury, poddawano analizie najczęściej stosowane w praktyce modele płynów wiertniczych. Parametry reologiczne poszczególnych modeli obliczano wykorzystując analizę regresji, stosując metodę najmniejszych kwadratów.

W Katedrze Wiertnictwa i Geoinżynierii na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH opracowano zasady wyznaczania parametrów reologicznych oraz metodykę doboru optymalnego modelu reologicznego cieczy wiertniczej. Został również opracowany program numeryczny Rheo Solution, wspomagający proces doboru modelu reologicznego dla rzeczywistej cieczy wiertniczej w tym również różnego typu zaczynów uszczelniających. W **Tabelach 1.1.7_2, 3 i 4** przedstawiono obliczone parametry reologiczne dla analizowanych modeli z zaznaczeniem modelu optymalnego dla każdej z receptur.

Tabela 1.1.7_2 Parametry reologiczne zaczynu cementowego o współczynniku wodno-mieszaninowym 0,4.

Parametry reologiczne		Oznaczenie zaczynu cementowego			
		04 – 0%	04 – 5%	04 – 7%	04 – 10%
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa*s]	0,2208	0,216	0,2144	0,2047
	Współczynnik korelacji [-]	0,7132	0,7761	0,8011	0,8241
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa*s]	n.m	n.m	n.m	n.m
Model Binghama	Lepkość plastyczna [Pa*s]	0,1675	0,17	1,1715	0,1643
	Granica płynięcia [Pa]	34,4215	29,7692	27,6498	26,0764
	Współczynnik korelacji [-]	0,8819	0,8968	0,9029	0,9249
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa*s]	n.m	n.m	n.m	n.m
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa*s ⁿ]	7,7929	5,8666	5,2731	4,7181
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4648	0,5057	0,5193	0,5344
	Współczynnik korelacji [-]	0,9745	0,9754	0,9756	0,9859
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa*s]	0,1214	0,1302	0,1336	0,1270
	Granica płynięcia [Pa]	14,8477	11,4985	10,2099	9,7611
	Współczynnik korelacji [-]	0,9156	0,9230	0,9266	0,9463
Model	Granica płynięcia [Pa]	- 21,0249	-17,8629	-15,4314	-12,2485

Herschel-Bulkleya	Współczynnik konsystencji [Pa*s ⁿ]	20,7491	16,1173	13,5747	11,6536
	Wykładnik potęgowy [-]	0,32293	0,3624	0,3854	0,3987
	Współczynnik korelacji [-]	0,9813	0,9827	0,9816	0,9944

Tabela 1.1.7_3 Parametry reologiczne określone dla zaczynu cementowego o współczynniku wodno-mieszaniowym 0,5.

Parametry reologiczne		Oznaczenie zaczynu cementowego			
		05-0	05-5	05-7	05-10
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa*s]	0,1222	0,1092	0,0948	0,1009
	Współczynnik korelacji [-]	0,7097	0,9102	0,9102	0,9244
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa*s]	0,096	0,0915	0,0830	0,0900
Model Binghama	Lepkość plastyczna [Pa*s]	0,0912	0,0884	0,0792	0,0852
	Granica płynięcia [Pa]	20,0077	13,4327	10,1111	10,1218
	Współczynnik korelacji [-]	0,9115	0,9609	0,9778	0,9830
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa*s]	0,0960	0,0915	0,0830	0,0900
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa*s ⁿ]	4,2229	3,2167	2,3764	2,4920
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4788	0,4847	0,5067	0,5046
	Współczynnik korelacji [-]	0,9767	0,9994	0,9968	0,9928
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa*s]	0,0631	0,0620	0,0557	0,0596
	Granica płynięcia [Pa]	9,2331	5,9290	4,3769	4,4200
	Współczynnik korelacji [-]	0,9419	0,9802	0,9911	0,9942
Model Herschel-Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	-10,6573	0,6913	2,7336	3,7227
	Współczynnik konsystencji [Pa*s ⁿ]	11,9582	2,8454	1,2554	0,9681
	Wykładnik potęgowy [-]	0,3198	0,5035	0,6017	0,6488
	Współczynnik korelacji [-]	0,9967	0,9995	0,9991	0,9986

Tabela 1.1.7_4 Parametry reologiczne określone dla zaczynu cementowego o współczynniku wodno-mieszaniowego 0,7.

Parametry reologiczne		Oznaczenie zaczynu cementowego			
		07-0	07-5	07-7	07-10
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa*s]	0,0310	0,0264	0,0250	0,0231
	Współczynnik korelacji [-]	0,8988	0,9291	0,9271	0,9464
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa*s]	0,0270	0,0250	0,0235	0,0220
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa*s]	0,0254	0,0222	0,0207	0,0199
	Granica płynięcia [Pa]	3,6221	2,7511	2,7799	2,1228
	Współczynnik korelacji [-]	0,9842	0,9940	0,9938	0,9941
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa*s]	0,0270	0,0250	0,0235	0,0220
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa*s ⁿ]	1,3340	1,1257	1,1717	0,7848
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4007	0,3953	0,3802	0,4327
	Współczynnik korelacji [-]	0,9628	0,9286	0,9236	0,9388
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa*s]	0,0158	0,0129	0,0115	0,0123
	Granica płynięcia [Pa]	1,9149	1,5902	1,6640	1,1388
	Współczynnik korelacji [-]	0,9969	0,9932	0,9917	0,9943
Model Herschel-Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	1,8887	2,5087	2,6074	1,8777
	Współczynnik konsystencji [Pa*s ⁿ]	0,2483	0,0377	0,0312	0,0359
	Wykładnik potęgowy [-]	0,6707	0,9227	0,9398	0,9138
	Współczynnik korelacji [-]	0,9990	0,9945	0,9941	0,9948

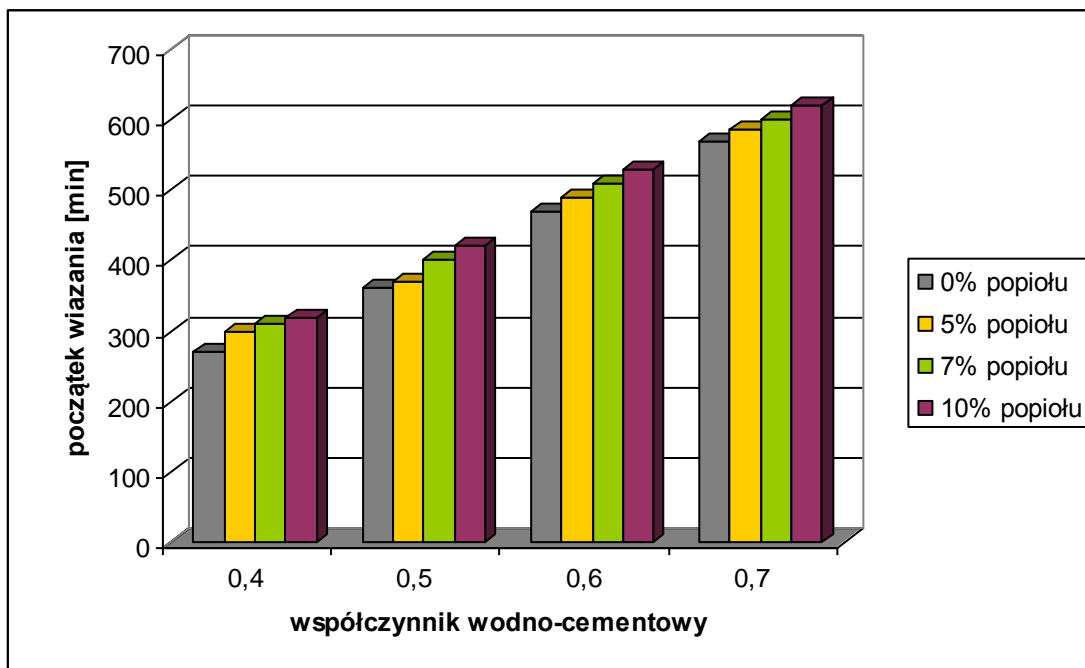


Fig.1.1.7_30 Zależność czasu wiązania od wartości współczynnika w/c i koncentracji popiołu

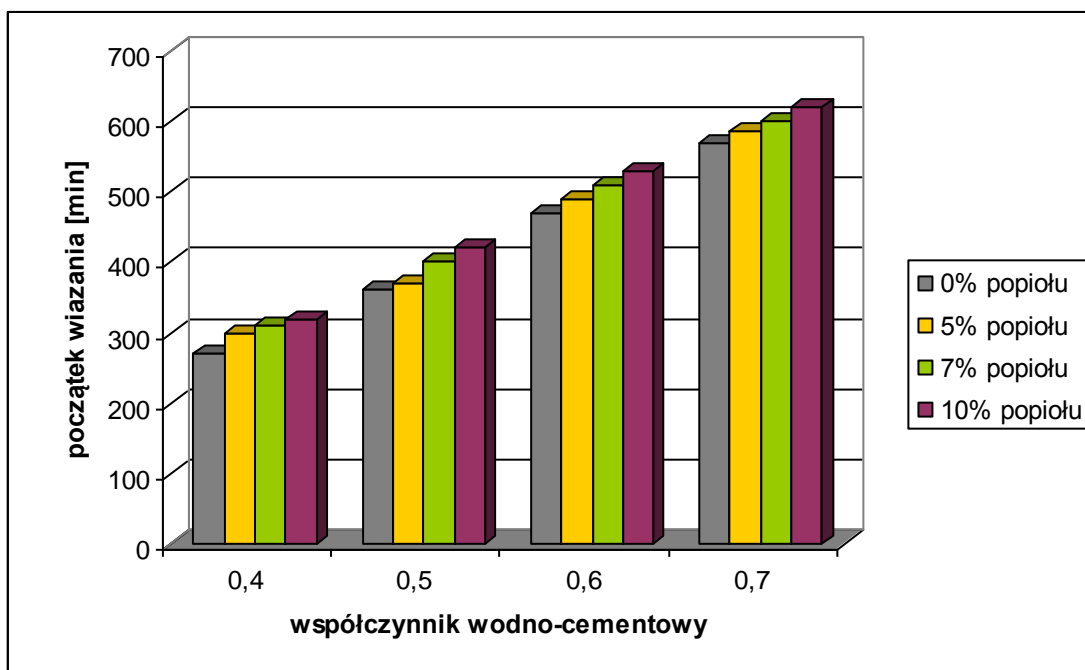


Fig.1.1.7_31 Zależność czasu wiązania zaczynu uszczelniającego w zależności od zawartości popiołu fluidalnego.

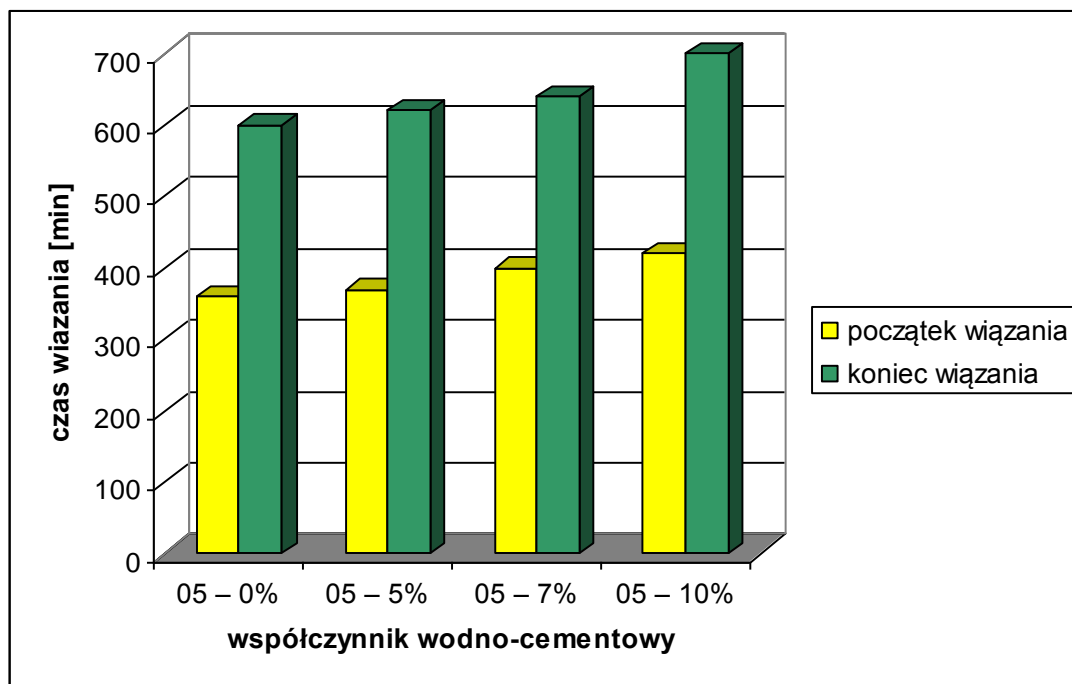


Fig.1.1.7_32 Zależność dodatków popiołu fluidalnego na czas wiązania zaczynu cementowego dla współczynnika wodno – cementowego 0,5.

Na dalszych figurach zamieszczono wyniki wytrzymałości stwardniałych zaczynów po 2 i 7 dniach ich utwardzania w środowisku wodnym w temperaturze 20 °C.

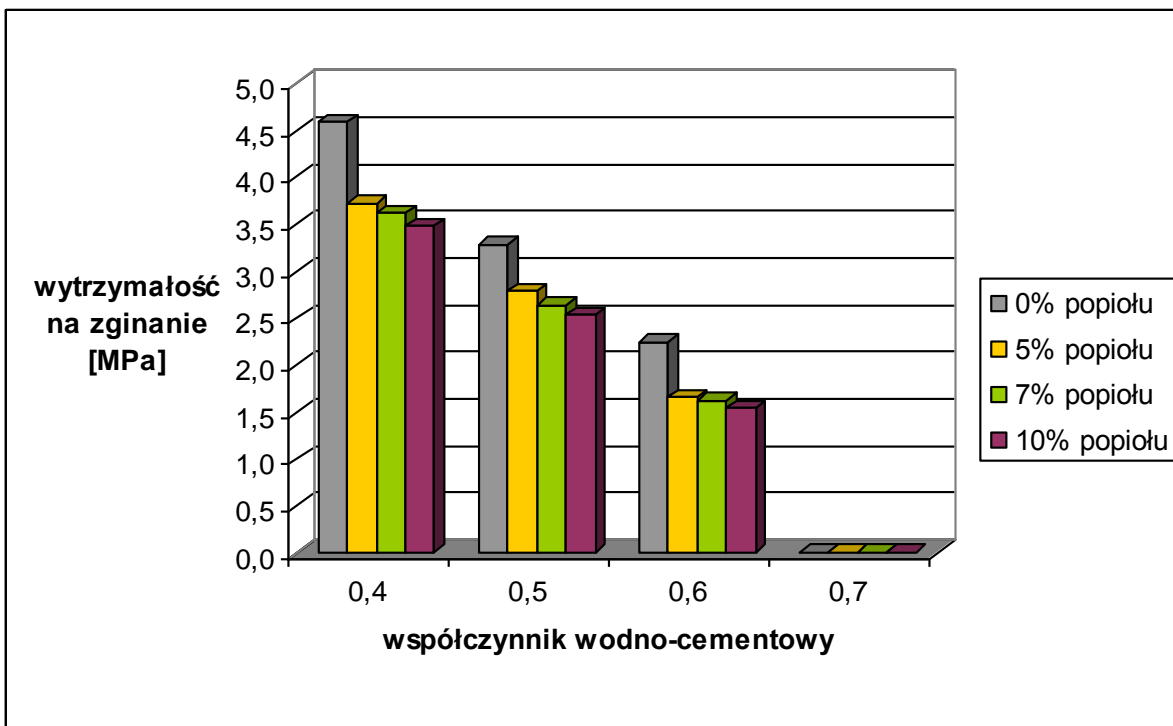


Fig.1.1.7_33 Wpływ popiołu fluidalnego na zginanie po 2 dniach dla poszczególnych współczynników wodno – cementowych.

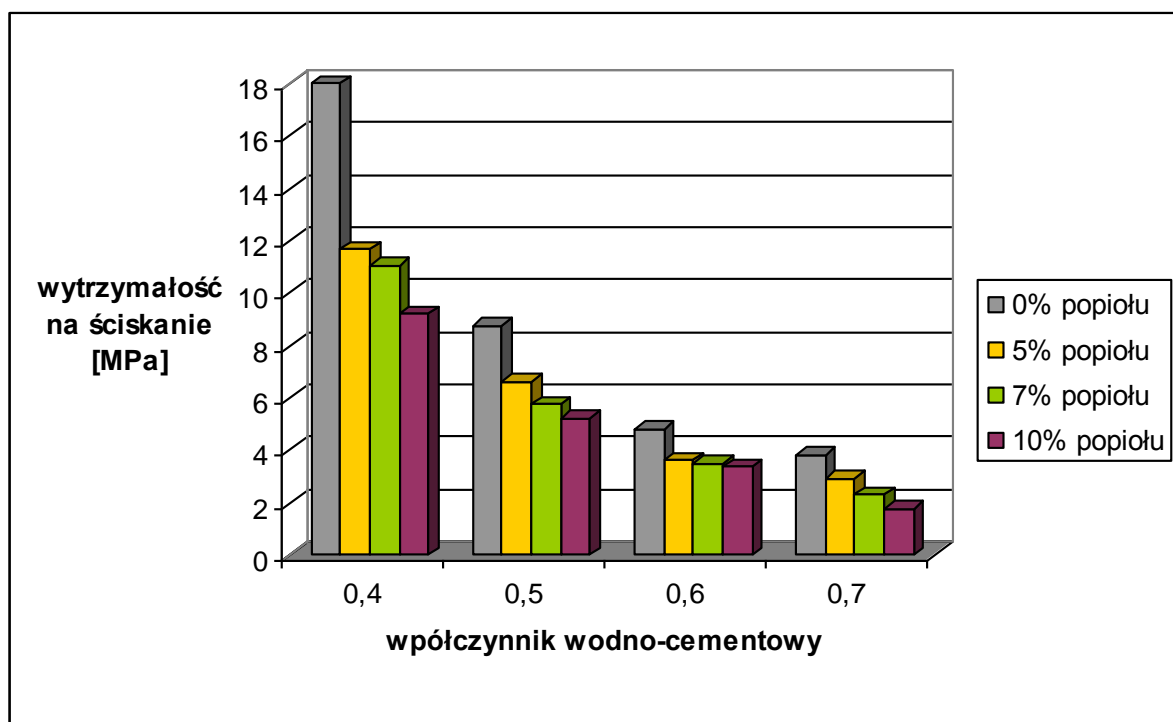


Fig.1.1.7_34 Wpływ popiołu fluidalnego na ściskanie po 2 dniach dla poszczególnych współczynników wodno – cementowych.

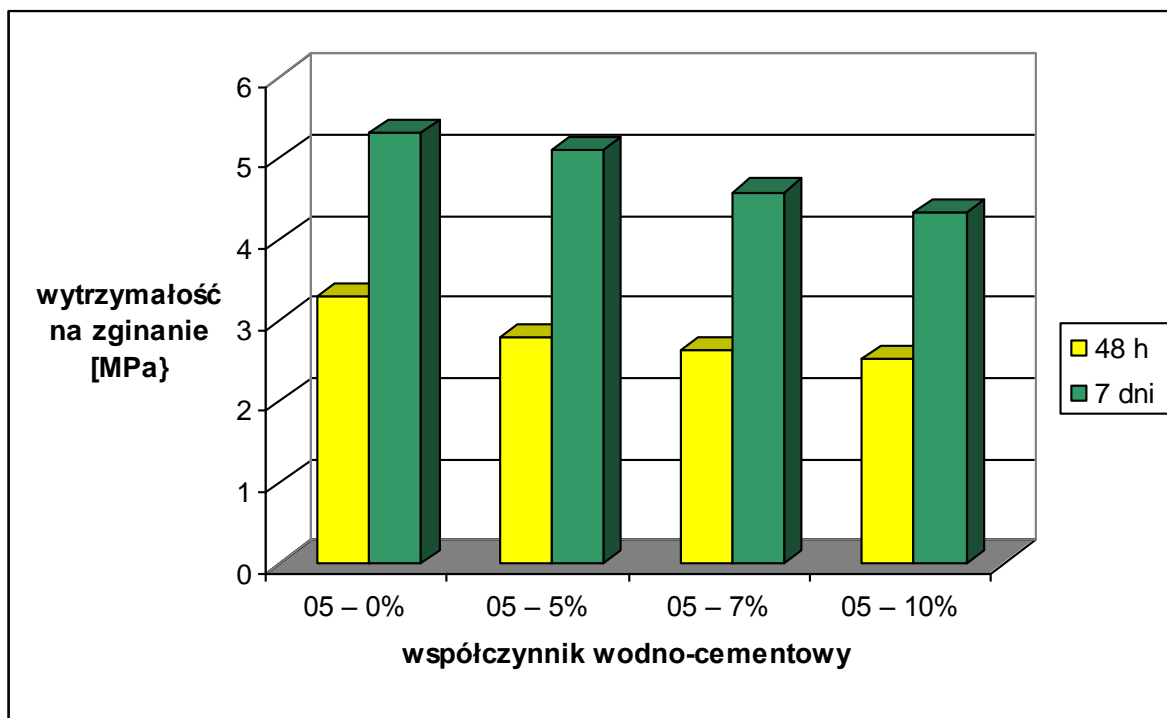


Fig.1.1.7_35 Wpływ popiołu fluidalnego na wytrzymałość belek na zginanie dla współczynnika wodno – cementowego 0,5.

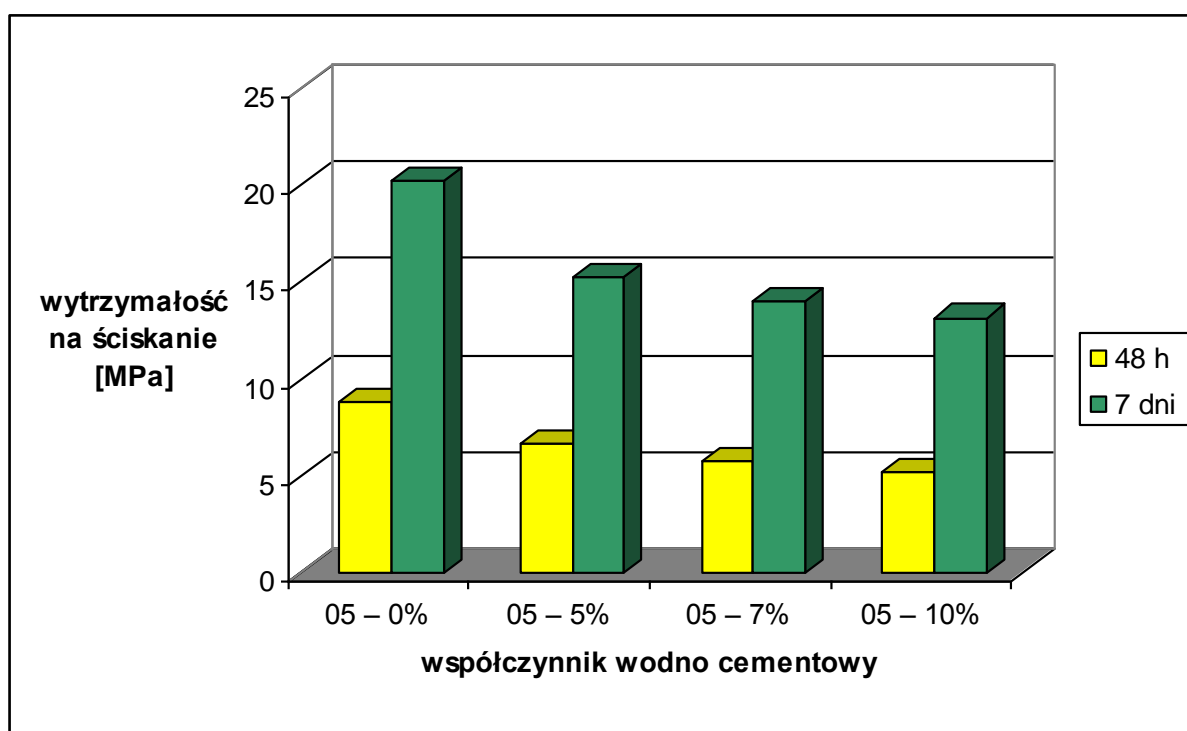


Fig.1.1.7_36 Wpływ popiołu fluidalnego na wytrzymałość belek na ściskanie dla współczynnika wodno – cementowego 0,5.

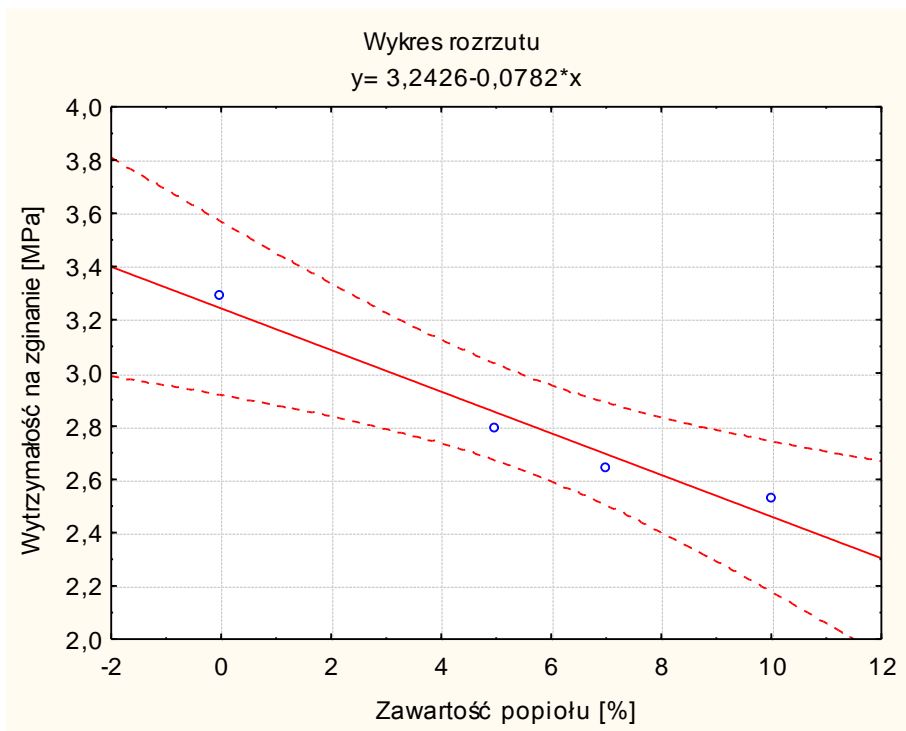


Fig.1.1.7_37 Zależność wytrzymałości na zginanie belek cementowych o współczynniku wodno – cementowym 0,5 po 48 godzinach.

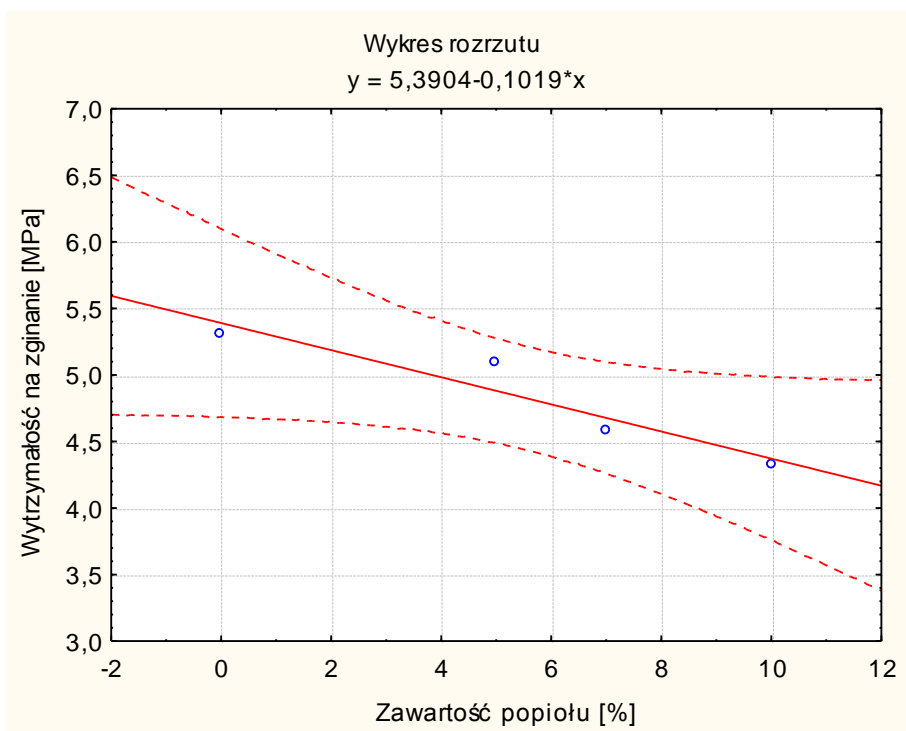


Fig.1.1.7_38 Zależność wytrzymałości na zginanie belek cementowych o współczynniku wodno – cementowym 0,5 po 7 dniach.

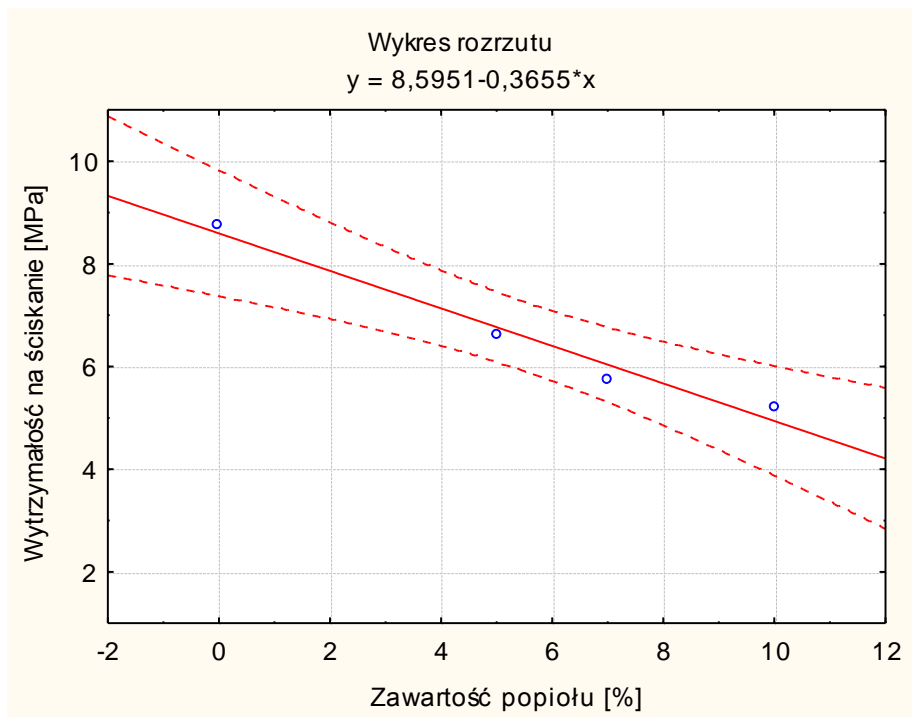


Fig.1.1.7_39 Zależność wytrzymałości na ściszenie belek cementowych o współczynniku wodno – cementowym 0,5 po 48 godzinach.

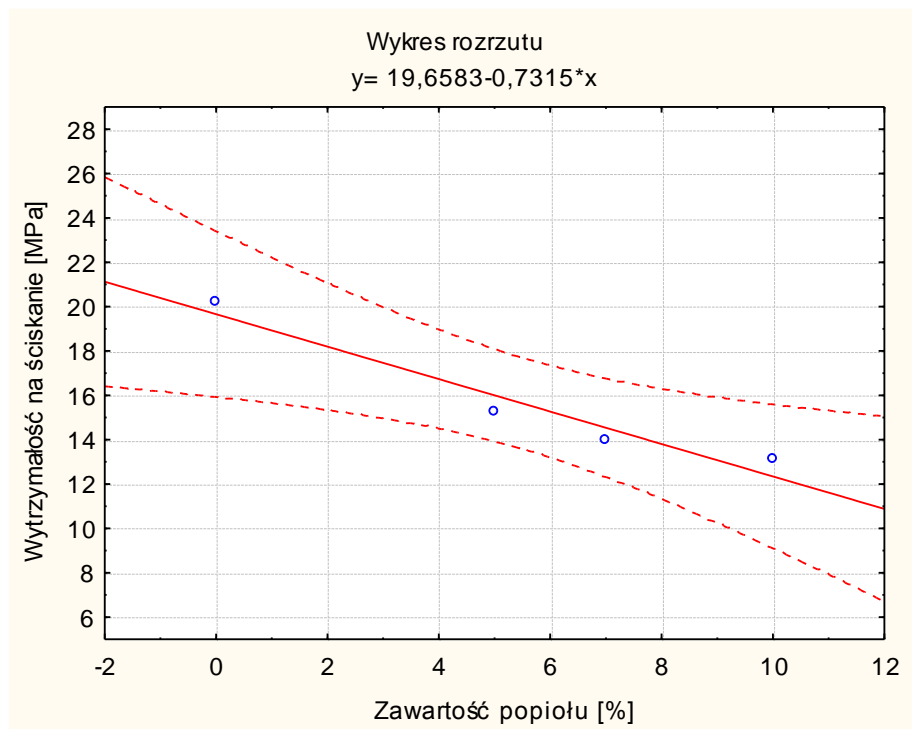


Fig.1.1.7_40 Zależność wytrzymałości na ściszenie belek cementowych o współczynniku wodno – cementowym 0,5 po 7 dniach.

Wnioski wynikające z badań laboratoryjnych

Po analizie otrzymanych wyników stwierdzić można jednoznacznie, że dodatek popiołu fluidalnego skutkuje zmniejszeniem gęstości zaczynu uszczelniającego. Największe gęstości notuje się dla czystego zaczynu a najmniejsze dla 10% koncentracji popiołu w zaczynie.

Otrzymane wyniki rozlewności dla zaczynów uszczelniających pozwalają stwierdzić, iż wzrost koncentracji popiołu fluidalnego w zaczynie wpływa na zwiększenie rozlewności. Najmniejsze wartości notuje się przy czystym zaczynie z kolei największe przy 10% koncentracji popiołu.

Na podstawie przeprowadzonych badań lepkości względnej przy użyciu Kubka Forda można jednoznacznie stwierdzić, że obecność w zaczynie dodatku w postaci popiołu fluidalnego wpływa na zmniejszenie lepkości względnej.

Dla wszystkich współczynników w/c z wyjątkiem 0,4, gdzie pomiar nie był możliwy zaobserwowano wyraźne zwiększenie odstoju wraz ze wzrostem koncentracji popiołu.

Przy badaniu filtracji właściwej obserwuje się spadek filtracji wraz ze wzrostem koncentracji popiołu fluidalnego w zaczynie. Największą filtrację notuje się przy czystym zaczynie a największą przy 10% koncentracji popiołu.

Przy badaniu czasu wiązania, którego dokonano przy użyciu aparatu Vicat'a stwierdzono, że wzrost zawartości popiołu fluidalnego wpływa na wydłużenie zarówno początku jak i końca wiązania.

Program Rheosolution posłużył do opracowania parametrów reologicznych jak również do zestawienia ze sobą wszystkich modeli reologicznych. Przy jego użyciu możliwe było dobranie najlepiej pasującego modelu, którym okazał się Herschel-Bulkley o najwyższym współczynniku korelacji. Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że wzrost koncentracji popiołu wpływa na zmniejszenie lepkości zaczynu. Można stwierdzić również, że granica płynięcia czystego zaczynu jest mniejsza w przeciwieństwie do zaczynu sporządzonego z różną koncentracją popiołu fluidalnego.

Wzrost koncentracji popiołu fluidalnego w stwardniałym zaczynie wpływa negatywnie na wytrzymałość zarówno po 2 jak i 7 dniach. Największe wartości notowano dla stwardniałych zaczynów bez dodatku zaś najmniejsze dla 10% koncentracji popiołu fluidalnego.

Przy wytrzymałości na ściskanie zauważa się podobną zależność koncentracji popiołu od spadku wytrzymałości.

Na podstawie analizy otrzymanych wyników z badań laboratoryjnych jak również doświadczeń przemysłowych autorów opracowania oraz współpracy naukowej z Serwisem Cementacyjnym PNiG Jasło Oddział Naftgaz w Wołominie proponuje się do cementowania ostatniej kolumny technicznej zaczyn o zwiększonej odporności na działanie CO₂ o następującej recepturze:

Cement portlandzko-popiołowy CEM II/B-V 32,5R	90%
Popiół fluidalny ze spalania węgla kamiennego	10%

Odczynnik obniżający filtrację zaczynu PSP 031	0,2%
Dyspergator PSP 042	0,17%
Opóźniacz czasu wiązania PSP 013	0,18%
Odpieniacz PSP 061	0,3%
Gęstość zaczynu	- 1735 kg/m ³ przy w/c – 0,5

Badania laboratoryjne świeżych i stwardniałych zaczynów cementowych stosowanych w otworach wiertniczych na Lubelszczyźnie i w północno-zachodniej Polsce

(Stanisław Stryczek, Andrzej Gonet, Rafał Wiśniowski)

Na podstawie danych przemysłowych oraz rozeznania literaturowego dotyczącego trudności występujących podczas wykonywania zabiegów cementowania w otworach wiertniczych na Lubelszczyźnie i w północno-zachodniej Polsce oraz przyczyn braku skuteczności cementowania kolumn rur okładzinowych można stwierdzić że spowodowane są one :

- skomplikowanymi warunkami geologiczno-techniczne w poszczególnych otworach wiertniczych,
- stanem fizyczno- mechanicznym zaczynu cementowego, który ulega zmianom w różnych stadiach wiązania, począwszy od stanu płynnego przez stan żelu do stanu nieprzepuszczalnej substancji po jej całkowitym związaniu (stwardniały zaczyn cementowy),
- wpływem rozkładu ciśnień (porowych, złożowych i szczelinowania) w górotworze na możliwość migracji gazu ziemnego w przestrzeni pozarurowej.

Nie można rozpatrywać przyczyn braku dobrego wiązania stwardniałego zaczynu cementowego ze skałą i/lub rurą okładzinową bez uwzględnienia profilu geologiczno-złożowego. Tylko ich dokładne powiązanie decyduje o doborze konstrukcji otworu, sposobie rurowania i cementowania.

Przeprowadzane dotychczas cementowania w otworach wiertniczych na Lubelszczyźnie oraz w północno-zachodniej Polsce wykazują, że najczęstsze przyczyny braku dobrego wiązania stwardniałego zaczynu cementowego z rurą okładzinową lub skałą, to:

- nie usunięty osad filtracyjny lub istnienie kanalików z płuczką wiertniczą w interwałach między-powierzchniowych,
- istnienie kanalików lub powierzchni z wolną wodą,
- nadmierne nagromadzenie naprężeń w układzie rura okładzinowa - kamień cementowy,
- nadmierne nagromadzenie naprężeń hydraulicznych w układzie skała zbiornikowa - kamień cementowy lub otwór wiertniczy - rura okładzinowa i kamień cementowy,
- nadmierne naprężenia termalne (np. nadmierne spadki temperatur podczas próbnej eksploatacji itp.)
- objętościowa kurczliwość cementu,
- brak szorstkości powierzchni rury okładzinowej.

Dodatkową trudnością podczas opracowywania receptur zaczynów uszczelniających dla cementowania otworów wiertniczych na Lubelszczyźnie oraz w północno-zachodniej Polsce jest odpowiedni dobór składników zaczynu pod kątem trwałości korozyjnej stwardniałych zaczynów w warunkach otworowych.

Trwałość stwardniałego zaczynu cementowego w agresywnym środowisku otworu wiertniczego zależy głównie od chemicznej aktywności produktów hydratacji materiału wiążącego w stosunku do otaczającego środowiska. Wiązanie i twardnienie zaczynu cementowego w kontakcie z wodami złożowymi, zawierającymi jony agresywne, prowadzić może do powstawania związków chemicznych o małej wytrzymałości mechanicznej lub nie wykazujących właściwości wiążących. W miarę upływu czasu może dochodzić do zwiększenia przepuszczalności stwardniałego zaczynu cementowego oraz obniżenia jego wytrzymałości mechanicznej i przyczepności do stali oraz skały.

Do podstawowych kryteriów odporności stwardniałych zaczynów cementowych na agresję, spowodowaną chemicznym oddziaływaniem środowiska, zaliczyć należy:

- możliwie najniższą zawartość Ca(OH)_2 (portlandytu),
- obecność w stwardniałym zaczynie jak największej ilości fazy CSH,
- niską zawartość fazy C_3A w cemencie,
- możliwie najniższą porowatość ogólną (z maksymalnym udziałem porów żelowych i możliwie najniższym porów kapilarnych),

Szczegółowy obraz mechanizmu korozji i zmian, zachodzących pod jej wpływem w mikrostrukturze stwardniałego zaczynu cementowego w konkretnych warunkach złożowych, można uzyskać poprzez przeprowadzenie wieloletnich obserwacji popartych badaniami próbek, poddanych działaniu roztworów o składach, odpowiadających wodom złożowym w określonych temperaturach. Długoletnie badania oddziaływania środowiska otworu wiertniczego na parametry stwardniałych zaczynów cementowych mogą przyczynić się do oceny przydatności różnych rodzajów zaczynów cementowych do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w danych warunkach geologiczno - złożowych.

Obserwowane w praktyce uszkodzenia stwardniałego zaczynu cementowego wskutek korozji chemicznej są różnorodne i trudne do usystematyzowania ze względu na nakładanie się na siebie różnych zjawisk. Przy zetknięciu z wodą i rozpuszczonymi w niej składnikami reakcje korozji pomiędzy zaczynem cementowym a czynnikami agresywnymi można przedstawić jako zakłócenie stanu równowagi w stwardniałym zaczynie przez ługowanie i odprowadzanie składników na zewnątrz oraz jako reakcje prowadzące do zniszczenia jego mikrostruktury przez powstawanie związków o niskiej wytrzymałości lub związków pęczniejących. Poznanie całości zagadnienia korozji stwardniałego zaczynu cementowego i właściwa ocena konkretnych przypadków jest bardzo trudna ze względu na dużą ilość występujących w tym procesie czynników.

Zagadnienie trwałości stwardniałych zaczynów jest szczególnie istotne przy cementowaniu otworów wiertniczych przeznaczonych do sekwestracji CO_2 .

Otwory wiertnicze przeznaczone do zatłaczania CO_2 stanowią potencjalną drogę dla wycieków magazynowanego dwutlenku węgla. Wycieki CO_2 mogą zachodzić poprzez lub wzdłuż otworu po zatłoczeniu CO_2 i problem ten dotyczy wszystkich rodzajów geologicznego magazynowania CO_2 . W przypadku składowania w złożach ropy naftowej i gazu, problem ten dotyczy nie tylko otworów do zatłaczania CO_2 , ale również otworów uprzednio zlikwidowanych korkami cementowymi. Z tego względu bardzo ważny z punktu widzenia bezpieczeństwa ekologicznego składowania CO_2 jest dobór odpowiedniego cementu przy projektowaniu i wykonywaniu otworu do zatłaczania CO_2 oraz następnie jego likwidowania.

Wycieki poprzez skorodowany zaczyn cementowy są określane jako znaczące ryzyko dla środowiska naturalnego .

Wycieki poprzez uszkodzenia stwardniałego zaczynu uszczelniającego górotwór spowodowane są zachodzącą korozją węglanową. Korozja węglanowa lub kwasowęglanowa spowodowana jest obecnością w wodzie lub powietrzu agresywnego CO₂ i polega ona na ługowaniu z cementu wapnia, najpierw wolnego Ca(OH)₂, a w miarę jego wymycia także z uwodnionych krzemianów i glinianów. Jest to spowodowane tworzeniem kwaśnego węglanu wapniowego i odprowadzenia go na zewnątrz.

Nagromadzenie tylu trudności, które mogą oddziaływać w połączeniu z przedstawioną charakterystyką geologiczno-złożową, wskazuje na złożoność procesów technologii cementowania, dlatego nie jest możliwe stosowanie standardowych technologii z wykorzystaniem "prostych" zaczynów cementowych, gdyż nie ma pewności przeprowadzenia skutecznego zabiegu cementowania otworu wiertniczego.

Zaczyny cementowe stosowane do cementowania kolumn rur okładzinowych na Lubelszczyźnie oraz w północno-zachodniej Polsce.

Cementowanie kolumn *rur technicznych* odbywa się przy wykorzystaniu niezbyt skomplikowanych receptur. Jako ciecz zarobową stosuje się z reguły wodę wodociągową lub 10% roztwór NaCl. Do zaczynu cementowego dodawane są w miarę potrzeb środki regulujące czas wiązania, filtrację oraz lepkość.

Receptury stosowane do cementowania kolumn *rur eksploatacyjnych* są dość skomplikowane. Zarabia się je bądź to na wodzie wodociągowej względnie na 20% lub 10% roztworem NaCl. Duża zawartość fazy stałej w zaczynie cementowym, wynika z obecności znacznych ilości dodatków i domieszek stosowanych do regulacji wybranych parametrów technologicznych świeżych i stwardniałych zaczynów uszczelniających.. W celu zwiększenia gęstości zaczynu dodaje się rudę żelaza - hematyt (o nazwie handlowej: ferrohem C). Wprowadzenie mączki krzemionkowej ma na celu zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości kamienia cementowego w wysokich temperaturach. Do receptur dodaje się również szereg środków w celu zapewnienia niskiej filtracji, odpowiednich parametrów reologicznych oraz wymaganych czasów gęstnienia i wiązania. Stosowane zaczyny cementowe są na ogół wieloskładnikowe, o parametrach dostosowanych do konkretnych warunków geologiczno - złożowych, panujących na dnie otworu. Powinny one cechować się małą filtracją a po zatłoczeniu do otworu szybko wiązać, aby ochronić poziomy skał zbiornikowych przed zanieczyszczeniem filtratem z zaczynu cementowego. Ważną rzeczą jest również dostateczna wytrzymałość stwardniałego zaczynu po związaniu oraz odporno

Przykłady receptur zaczynów cementowych stosowanych do uszczelniania **technicznych kolumn rur okładzinowych** w wybranych otworach na Lubelszczyźnie oraz na terenie północno-zachodniej Polski.

Otwór 1

Głębokość cementowania - 2760 metrów Cementowanie kolumn rur o średnicy 9 5/8", Skład zaczynu cementowego:

cement CEM I 32,5- 100%

NaCl-10% (bwow)

cukier-0,15%

PSP062 - 0,05% (środek odpieniający) PSP042 - 0,1% (środek upłynniający)

w/c - 0,5

Gęstość zaczynu cementowego : 1880kg/m³

Otwór 2

Głębokość cementowania - 2990 metrów Cementowanie kolumn rur o średnicy 9 5/8", Skład zaczynu cementowego:

cement CEM I 32,5- 100%

NaCl -10% (bwow)

cukier - 0,03%

PSP062 - 0,05% (środek odpieniający) PSP042 - 0,1% (środek upłynniający)

w/c - 0,5

Gęstość zaczynu cementowego : 1880 kg/m³

Otwór 3

Głębokość cementowania - 3250 metrów Cementowanie kolumn rur o średnicy 7",

Skład zaczynu cementowego:

cementWG-100%

mączka krzemionkowa - 30%

hematyt - 28%

NaCl-10% (bwow)

D600- 18% (lateks)

D135 -1,8% (stabilizator lateksu)

D800 - 0,32% (opóźniacz wiązania)

D144 - 0,2% (środek odpieniający)

D065a - 0,1% (środek upłynniający)

w/c = 0,38

Gęstość zaczynu cementowego : 2040 kg/m³

Otwór 4

Głębokość cementowania - 3047 metrów Cementowanie kolumn rur o średnicy 7",

Skład zaczynu cementowego:

cementWG-100%

mączka krzemionkowa - 25%

hematyt - 29%

NaCl-10% (bwow)

D600- 18% (lateks)

D135 -1,8% (stabilizator lateksu)

D800 - 0,27% (opóźniacz wiązania)

PSP061 - 0,2% (środek odpieniający)

D065a - 0,05% (środek upłynniający)

w/c = 0,41

Gęstość zaczynu cementowego : 2040 kg/m³

Badania laboratoryjne zaczynów uszczelniających do cementowania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych przeznaczonych do zatłaczania CO₂ na terenie Lubelszczyzny oraz północno-zachodniej Polski.

Badania laboratoryjne parametrów technologicznych zarówno świeżych jak i stwardniałych zaczynów uszczelniających o zwiększonej trwałości ze względu na korozję węglanową przeprowadza się w oparciu o następujące normy:

1. Norma Amerykańskiego Instytutu Naftowego (API). Specification for Materials and Testing for Well Cements. API Specification 10 (SPEC 10) Fifth Edition, July 1, 1990.
2. American Petroleum Institute: Specification for Well Cements, API Specification 10A, 22nd Edition, January 1995. API, Washington DC. 1995.

4. PN – EN 197 – 1: 2002, Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
5. PN – EN 197 – 2 : 2002, Cement. Część 2. Ocena zgodności.
6. PN – EN 480 – 1 : 1999, Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Beton wzorców i zaprawa wzorcowa do badań.
7. PN – EN ISO 10426 – 1. Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 1. Specyfikacja
8. PN – EN ISO 10426 – 2. Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2: Badania cementów wiertniczych. 2003.

Badania laboratoryjne związane z określeniem parametrów technologicznych zaczynów uszczelniających obejmują pomiary:

a) dla świeżych zaczynów uszczelniających:

-gęstości – za pomocą wagi Baroid,

-odstoju – za pomocą cylindra pomiarowego,

-rozlewności – za pomocą stożka AzNII,

-filtracji – za pomocą prasy filtracyjnej Baroid, stosowanej do badania filtracji płuczek wiertniczych; pomiar przeprowadzano do tzw. „momentu przebicia” zaczynu tzn. do momentu, kiedy wypływający filtrat z fazy ciągłej przechodził w postać aerozolu.

-czasu wiązania – za pomocą aparatu Vicata,

-właściwości reologicznych (lepkości plastycznej, lepkości pozornej, granicy płynięcia) – za pomocą lepkościomierza obrotowego o współosiowych cylindrach typu Chan – 35 API Viscometer – Tulusa, Oklahoma USA EG.G Chandler Engineering o dwunastu prędkościach obrotowych (600, 300, 200, 100, 60, 30, 20, 10, 6, 3, 2, 1obr./min, co odpowiada następującym szybkościom ścinania: 1022,04; 511,02; 340,7; 170,4; 102,2; 51,1; 34,08; 17,04; 10,22; 5,11; 3,41; 1,70 s⁻¹).

- określenie modelu reologicznego – dobór optymalnego modelu reologicznego zaczynów uszczelniających polegał na określeniu krzywej reologicznej umożliwiającej najlepsze opisanie wyników pomiarów w układzie współrzędnych: naprężenia styczne (τ) – szybkość ścinania ($\dot{\gamma}$).

Wykorzystując metodę analizy regresji wyznaczano parametry reologiczne dla poszczególnych modeli. Następnie za pomocą przeprowadzonych testów statystycznych, określono optymalny model reologiczny dla danej receptury zaczynu uszczelniającego. Analizie poddano następujące modele reologiczne:

- modelem Newtona $\tau = \eta \cdot \left(-\frac{dv}{dr}\right)$
- modelem Binghamma $\tau = \tau_y + \eta \cdot \left(-\frac{dv}{dr}\right)$
- modelem Ostwalda de Waele $\tau = k \cdot \left(-\frac{dv}{dr}\right)^n$
- modelem Cassona $\tau = \sqrt{\tau_y} + \sqrt{\eta} \cdot \sqrt{\left(-\frac{dv}{dr}\right)}$
- modelem Herschela – Bulkleya $\tau = \tau_y + k \cdot \left(-\frac{dv}{dr}\right)^n$

gdzie:

- n-wykładnik potęgowy [-];
- k-współczynnik konsystencji [$\text{Pa} \cdot \text{s}^n$];
- τ_y -granica płynięcia, [Pa];
- η -dynamiczny współczynnik lepkości dla modelu Newtona, lepkość plastyczna dla modelu Binghamma, lepkość plastyczna Cassona dla modelu Cassona [$\text{Pa} \cdot \text{s}$];
- dv/dr - gradient prędkości ścinania - γ [s^{-1}].

Celem ułatwienia obliczeń związanych z ustaleniem optymalnych modeli reologicznych dla badanych zaczynów, skorzystano z programu komputerowego „Rheo Solution”. Program ten jest własnością Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH i jest wykorzystywany w pracach naukowo – badawczych.

- **czasu przetłaczalności (początek i koniec gęstnienia)** - za pomocą konsystometru

b) dla stwardniałych zaczynów uszczelniających :

- **wytrzymałość na ściskanie** – za pomocą prasy hydraulicznej pozwalającej na wywieranie obciążenia do 200 kN,

- **wytrzymałość na zginanie** – za pomocą aparatu Michaelisa.

- **przepuszczalność** stwardniałych zaczynów dla wody

- **zmiany objętościowe** określono na podstawie skurczu (zmian liniowych) stwardniałych zaczynów aparatem Graf-Kaufmana. Pomiar polegał na określeniu różnicy pomiędzy długością próbki zmierzonej bezpośrednio po rozformowaniu, a jej długością w czasie dojrzenia dla założonych warunków.

- **badania składu fazowego**

- metodą rentgenograficzną
- metodą termiczną

Badania rentgenograficzne wykonane zostały przy użyciu aparatu Philips, metodą Debey'a-Scherera-Hulla przy zastosowaniu promieniowania $Cu_k\alpha$. Pomiar prowadzono w zakresie kątów $5 \div 60 \cdot 2\theta$, rejestrując refleksy metodą analogową. Do interpretacji dyfraktogramów wykorzystano karty I CDD oraz program komputerowy X-Rayan.

Badania składu fazowego stwardniałych zaczynów metodą termiczną wykonano na derywatografie typu OD-102 systemu Paulik – Erdey (Węgry)

- **badania mikrostruktury** za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego,

- **oznaczenie porowatości i struktury porów** dokonano metodą porozymetrii rtęciowej, stosując porozymetr rtęciowy Poremaster 60 firmy Quantacrome. Zakres mierzonych średnic porów wynosił od 300 μm do 3 nm, zaś czas odgazowania próbek wynosił 10 minut.

Surowce zastosowane do przygotowania zaczynów uszczelniających

- Granulowany mielony żużel wielkopiecowy,
- Aktywator – cement portlandzki CEM I 32,5 R,
- Aktywator – Na_2CO_3 ,
- Dodatek zarodnikujący – Zeolity klinoptilolitowe,
- Woda wodociągowa.

Granulowany mielony żużel wielkopiecowy.

Do przygotowania zaczynu geopolimerowego został zastosowany granulowany żużel wielkopiecowy pochodzący z huty im. T. Sendzimira w Nowej Hucie. Granulowany żużel wielkopiecowy stosowany do produkcji spoiw żużlowo-alkalicznych powinien spełniać wymagania zawarte w normie PN-EN 197-1 „Cement – Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dla cementów powszechnego użytku”, które

przedstawiono w poniższej Tabeli 1.1.7_5. Analizę składu chemicznego żużla wielkopieczowego przedstawia Tabela 1.1.7_6.

Tabela 1.1.7_5 Wymagania dotyczące żużla wielkopieczowego wg PN-EN 197-1 .

Wymagania wg PN-EN 197-1	Żużel z huty „Katowice”	Żużel z huty im. T. Sendzimira
Faza szklista $\geq 67,0$ %	> 95 %	85,0 %
$CaO + MgO + SiO_2 \geq 67$ %	89,7 %	88,5 %
$\frac{CaO + MgO}{SiO_2} \geq 1,0$	1,31	1,23

Tabela 1.1.7_6 Właściwości przemysłowego granulowanego żużla wielkopieczowego z huty T. Sendzimira.

Składniki	Zawartość
CaO	43,1 [% mas.]
SiO ₂	38,8 [% mas.]
Al ₂ O ₃	7,1 [% mas.]
Fe ₂ O ₃	0,9 [% mas.]
MgO	7,0 [% mas.]
MnO	0,7 [% mas.]
SO ₃	0,1 [% mas.]
M _a	1,47
Zawartość fazy szklistej	92 [%]
Powierzchnia właściwa wg Blaine’a	400 [m ² /kg]

Aktywator - Na₂CO₃.

Do aktywacji rozdrobnionego granulowanego żużla wielkopieczowego wykorzystano węgiel sodowy, Na₂CO₃ czysty spełniający wymagania normy PN – 87/C 84001. Aktywacja żużla przeprowadzana była za pomocą węgla sodowego w ilości 5 % w stosunku do masy granulowanego żużla wielkopieczowego.

Aktywator cement portlandzki

Do badań użyto cementu portlandzkiego CEM I 32,R z cementowni Górażdże Cement S.A.

Naturalny zeolit klinoptilolitowy

Do badań użyto słowackiego (Bystra) zeolitu klinoptilolitowego pochodzącego z firmy ZeoCem Micro 20 o wzorze chemicznym $(Ca,K_2,Na_2,Mg)_4Al_8Si_{40}O_{96},24H_2O$. Głównymi składnikami są SiO_2 (65,0 – 71,3%), oraz Al_2O_3 (11,5 – 13.1%). Klinoptilolit charakteryzuje się następującymi właściwościami:

- Gęstość 2200 – 2440 kg/m³,
- Twardość wg Mosha 1,5 – 2,5,
- Temperatura topnienia 1340°C,
- Porowatość 24 – 32%,
- Stabilny chemicznie do temp. 450°C,
- nierozpuszczalny w wodzie,
- Nietoksyczny,
- Szarzielony bezwonny proszek.

Receptury zaczynów uszczelniających.

Do badań wytypowano receptury zaczynów przedstawione w **Tabeli 1.1.7_7**.

Zastosowano cztero- lub pięcioletni sposób oznaczania próbek.

przykładowo:

Z – rodzaj dodatku zarodkującego (Z – zeolity)

5 – ilość dodatku zarodkującego w % masy spoiwa

SC – rodzaj aktywatora (S – węgiel sodu w ilości 5% masowych spoiwa, C – cement portlandzki w ilości 10% masowych spoiwa, lub SC – mieszanina węgla sodu 5% masowych względem masy spoiwa oraz cementu portlandzkiego w ilości 10% masowych względem masy spoiwa)

6 - stosunek wodno -spoiwowy (5 – W/S = 0,5; 6 – W/S = 0,6; 7 – W/S = 0,7)

Tabela 1.1.7_7 Składy zaczynów z dodatkiem zeolitów

L.P.	próbka	żużel [%]	cement [%]	Na ₂ CO ₃ [%]	zeolity [%]	W/S
1	Z1S5	94	0	5	1	0,5
2	Z1S6	94	0	5	1	0,6
3	Z1S7	94	0	5	1	0,7
4	Z3S5	92	0	5	3	0,5
5	Z3S6	92	0	5	3	0,6
6	Z3S7	92	0	5	3	0,7
7	Z5S5	90	0	5	5	0,5
8	Z5S6	90	0	5	5	0,6
9	Z5S7	90	0	5	5	0,7
10	Z5SC5	80	10	5	5	0,5
11	Z5SC6	80	10	5	5	0,6
12	Z5SC7	80	10	5	5	0,7
13	Z1C5	89	10	0	1	0,5
14	Z1C6	89	10	0	1	0,6
15	Z1C7	89	10	0	1	0,7
16	Z3C5	87	10	0	3	0,5
17	Z3C6	87	10	0	3	0,6
18	Z3C7	87	10	0	3	0,7
19	Z5C5	85	10	0	5	0,5
20	Z5C6	85	10	0	5	0,6
21	Z5C7	85	10	0	5	0,7

Realizacja planu przedstawionego w **Tabeli 1.1.7_7** miała na celu ocenę wpływu zmiennej zawartości zeolitów (1%, 3% i 5% względem masy spoiwa) w zaczynie przy różnych aktywatorach (próbki 1-9 węglan sodu, próbki 13-21 cement, próbki 10-12 mieszanina węglanu sodu i cementu) i zmiennym W/S (0,5; 0,6 oraz 0,7).

Wytrzymałości zaczynów dojrzewających w warunkach naturalnych

Zaczyny z zeolitami aktywowane sodą (Tabela 1.1.7_8; 1.1.7_9)

Tabela 1.1.7_8 Wytrzymałość na zginanie zaczynów z zeolitami aktywowanych sodą (dojrzewanie naturalne)

Zaczyn	Ilość próbek	Zginanie				
		7 dni	28 dni	120 dni	180 dni	360 dni
		R _{zg} śr, [MPa]	R _{zg} śr, [MPa]	R _{zg} śr, [MPa]	R _{zg} śr, [MPa]	R _{zg} śr, [MPa]
Z1S5	3	3,09	6,30	6,36	6,38	7,12
Z1S6	3	0,00	4,98	6,60	3,60	4,10
Z1S7	3	1,74	4,80	4,84	5,28	5,90
Z3S5	3	4,62	4,58	8,68	6,66	7,10
Z3S6	3	2,64	5,70	5,64	5,18	5,30
Z3S7	3	2,67	4,98	2,56	4,18	4,60
Z5S5	3	3,52	5,72	7,38	6,66	7,00
Z5S6	3	6,88	5,26	3,98	3,78	4,10
Z5S7	3	1,92	4,42	4,02	3,27	3,90

Tabela 1.1.7_9 Wytrzymałość na ściskanie zaczynów z zeolitami aktywowanych sodą (dojrzewanie naturalne)

Zaczyn	Ilość próbek	Ściskanie				
		7 dni	28 dni	120 dni	180 dni	360 dni
		R _s śr, [MPa]	R _s śr, [MPa]	R _s śr, [MPa]	R _s śr, [MPa]	R _s śr, [MPa]
Z1S5	3	13,3	16,6	26,2	23,6	24,2
Z1S6	3	0,0	16,6	13,4	14,3	15,1
Z1S7	3	7,3	10,5	11,6	12,5	13,1
Z3S5	3	9,4	14,4	17,1	20,4	21,1

Z3S6	3	10,5	16,4	19,1	17,9	18,3
Z3S7	3	7,7	11,0	13,2	12,4	13,0
Z5S5	3	6,9	17,1	20,5	18,7	19,2
Z5S6	3	11,4	11,2	10,7	12,9	13,4
Z5S7	3	7,1	11,6	13,2	11,7	12,5

Wyniki uzyskane w tej części badań laboratoryjnych wskazują na brak poprawy wytrzymałości wraz ze wzrostem ilości dodatku zeolitu. W przypadku wytrzymałości na ściskanie obserwuje się nawet spadek wraz ze wzrostem dodatku zeolitów. Na wyniki wpływ ma niewątpliwie występowanie wspomnianych powyżej defektów, co zniekształca nieco obraz. Ciekawe wydaje się to, iż we wczesnych okresach najwyższe wytrzymałości wydają się wykazywać próbki o W/S = 0,6.

Zaczyny z zeolitami aktywowane cementem (Tabela 1.1.7_10; 11)

Tabela 1.1.7_10 Wytrzymałość na zginanie zaczynów z zeolitami aktywowanych cementem (dojrzewanie naturalne)

Zaczyn	Ilość próbek	Zginanie				
		7 dni	28 dni	120 dni	180 dni	360 dni
		R _{zg} śr, [MPa]	R _{zg} śr, [MPa]	R _{zg} śr, [MPa]	R _{zg} śr, [MPa]	R _{zg} śr, [MPa]
Z1C5	3	3,41	5,9	7,50	7,22	7,90
Z1C6	3	1,86	5,0	6,38	6,30	6,80
Z1C7	3	1,32	3,5	4,84	5,76	6,10
Z3C5	3	2,50	5,6	7,20	6,96	7,20
Z3C6	3	1,45	4,5	5,30	5,58	6,00
Z3C7	3	1,63	4,2	5,18	5,02	5,80
Z5C5	3	2,06	6,0	6,88	6,04	6,40
Z5C6	3	1,72	4,4	5,72	4,94	5,30
Z5C7	3	1,64	3,7	4,22	4,78	5,00

Tabela 1.1.7_11 Wytrzymałość na ściskanie zaczynów z zeolitami aktywowanych cementem (dojrzwianie naturalne)

Zaczyn	Ilość próbek	Ściskanie				
		7 dni	28 dni	120 dni	180 dni	360 dni
		R _s śr, [MPa]	R _s śr, [MPa]	R _s śr, [MPa]	R _s śr, [MPa]	R _s śr, [MPa]
Z1C5	3	6,9	12,0	18,1	18,3	19,90
Z1C6	3	4,1	9,7	14,5	13,4	13,85
Z1C7	3	2,9	8,0	10,9	10,9	11,40
Z3C5	3	6,2	13,0	16,9	17,0	17,60
Z3C6	3	3,3	7,6	9,8	11,3	11,90
Z3C7	3	3,4	9,2	12,4	11,4	12,00
Z5C5	3	5,7	11,8	15,7	15,6	16,00
Z5C6	3	4,2	8,2	11,0	11,4	11,90
Z5C7	3	3,6	7,7	9,6	10,4	10,85

Zaczyny tej serii badań charakteryzują się nieznacznym spadkiem wytrzymałości wraz ze wzrostem dodatku zeolitów. Jednocześnie widać wyraźny i zgodny z literaturą wpływ stosunku W/S na wytrzymałość – zarówno wytrzymałość na zginanie jak i na ściskanie maleje wraz ze wzrostem stosunku W/S. W porównaniu z seria próbek aktywowanych węglanem sodu wytrzymałości na ściskanie próbek aktywowanych cementem są nieco wyższe. Powodem mogą być wspomniane powyżej defekty mikrostruktury i tekstury wywołane długim okresem wiązania i co z tym związane narażeniem na wysychanie. Wytrzymałość na ściskanie jest z kolei w przypadku zaczynów aktywowanych cementem wyższa od analogicznych aktywowanych węglanem sodu. Związane jest to prawdopodobnie z różnicami w mikrostrukturze zaczynów – w zaczynach aktywowanych sodą występuje przede wszystkim faza CSH typu IV – bardziej zbita niż w przypadku włóknistej fazy CSH obecnej w pewnych ilościach w zaczynach aktywowanych cementem.

Zaczyny z zeolitami aktywowane mieszaniną sody i cementu (Tabela 1.1.7_12; 13)

Tabela 1.1.7_12 Wytrzymałość na zginanie zaczynów z zeolitami aktywowanych mieszaniną sody i cementu (dojrzwianie naturalne)

Zaczyn	Ilość próbek	Zginanie				
		7 dni	28 dni	120 dni	180 dni	360 dni

		R _{zg} śr, [MPa]	R _{zg} śr, [MPa]	R _{zg} śr, [MPa]	R _{zg} śr, [MPa]	R _{zg} śr, [MPa]
Z5SC5	3	4,9	5,5	5,9	5,7	6,3
Z5SC6	3	3,5	3,9	4,5	4,1	4,8
Z5SC7	3	3,1	3,4	3,3	3,1	3,7

Tabela 1.1.7_13 Wytrzymałość na ściskanie zaczynów z zeolitami aktywowanych mieszaniną sody i cementu (dojrzewanie naturalne)

Zaczyn	Ilość próbek	Ściskanie				
		7 dni	28 dni	120 dni	180 dni	360 dni
		R _s śr, [MPa]	R _s śr, [MPa]	R _s śr, [MPa]	R _s śr, [MPa]	R _s śr, [MPa]
Z5SC5	3	5,9	8,7	11,3	11,1	11,8
Z5SC6	3	5,3	7,3	8,6	8,6	9,0
Z5SC7	3	4,3	5,9	7,3	7,9	8,3

Zaczyny aktywowane mieszaniną węgla sodu oraz cementu charakteryzują się szybkim twardnieniem w porównaniu z poprzednimi seriami. Próbkę mogły być rozformowane już następnego dnia (zaczyny aktywowane cementem 1-3 dni, aktywowane sodą 4-8 dni). Wytrzymałości zarówno na ściskanie jak i na zginanie zaczynów aktywowanych mieszaniną cementu i sody są zdecydowanie niższe od pozostałych. To, na co warto zwrócić uwagę to wysoki stosunek wytrzymałości na zginanie do wytrzymałości na ściskanie uzyskiwany w spoiwach aktywowanych mieszanym aktywatorem.

Wpływ stosunku W/S jest również istotny. Uwagę zwraca mniejsza różnica między wytrzymałościami zaczynów o W/S = 0,6 i 0,7 w porównaniu z różnicą pomiędzy zaczynami o W/S 0,5 i 0,6. Zauważalna jest ona również w przypadku innych spoiw. Powodem, oprócz charakteru zależności wytrzymałości od stosunku W/S może być również występowanie sedymentacji w zaczynach o W/S = 0,6 i W/S = 0,7. W obu przypadkach sedymentacja zachodzi z różną intensywnością. Dla W/S = 0,7 jest ona większa, co powoduje, iż zaczyn w fazie plastycznej gdy jest jeszcze ma zdolność odkształcania traci więcej wody, skutkując zmniejszeniem efektywnego stosunku W/S. Powoduje to zmniejszenie różnicy stosunków W/S z 0,1 do wartości mniejszej.

Badania cech technologicznych zaczynów uszczelniających dojrzewających w warunkach otworopodobnych

Badania laboratoryjne przeprowadzono dla zaczynów uszczelniających na osnowie mielonych granulowanych żużli wielkopieczowych z dodatkiem 5% cementu portlandzkiego oraz różnych koncentracji zeolitów.

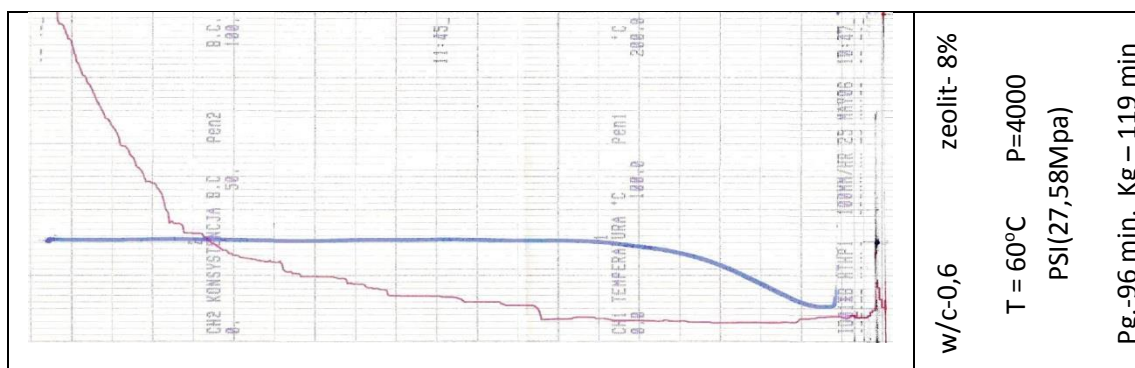
Receptury zaczynów przedstawia **Tabela 1.1.7_14**.

Tabela 1.1.7_14 Receptury zaczynów geopolimerowych

Rodzaj zaczynu	Geopolimerowe spoiwo [%]	Zeolit [%]
PZ0	100	0
PZ1	99	1
PZ3	97	3
PZ5	95	5
PZ8	92	8

Pomiary czasu gęstnienia (przetłaczalności) wykonano dla zaczynów PZ0, PZ1, PZ3, PZ5 i PZ8 o współczynniku w/m – 0,6. Badanie dla niższych w/m było niemożliwe do przeprowadzenia bez stosowania upłynniaczy, z powodu posiadania zbyt dużej lepkości. Z kolei badania zaczynów o wyższym w/m z punktu widzenia technologii cementowania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych były niecelowe.

Wyniki badania w sposób graficzny i liczbowy zostały przedstawione na **Fig. 1.1.7_41**. Raporty z konsystometru, uwzględniają opis warunków badania i czasy początku (Pg.) i końca (Kg.) gęstnienia. Linia niebieska przedstawia przebieg zmian temperatury, a czerwona zmiany konsystencji zaczynu w funkcji czasu.



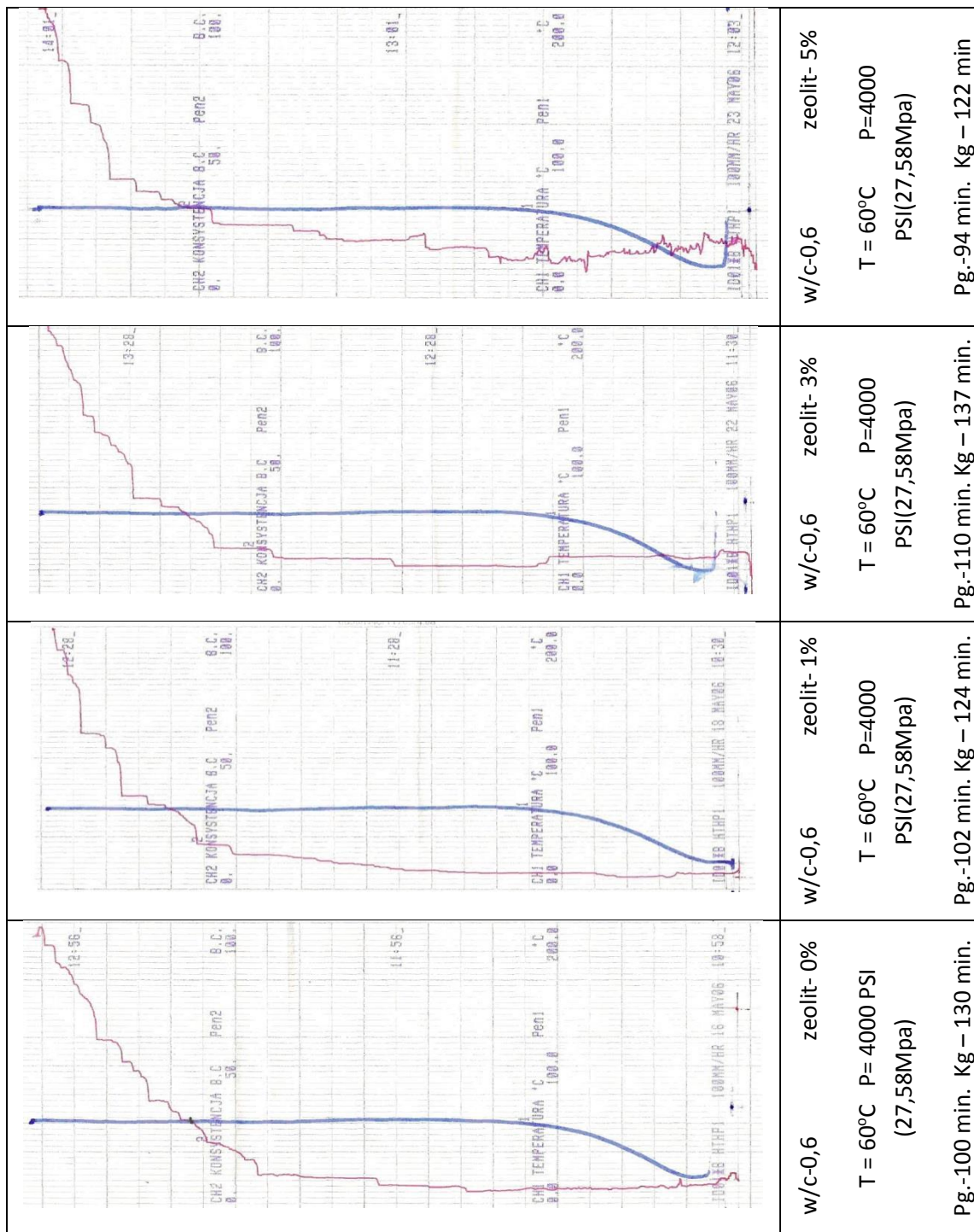


Fig. 1.1.7_41 Wyniki badania przedstawione w sposób graficzny i liczbowy

Parametry wytrzymałościowe omawianych zaczynów po 48 godzinnej autoklawizacji przedstawiono w Tabeli 1.1.7_15.

Tabela 1.1.7_15 Parametry wytrzymałościowe omawianych zaczynów po 48 godzinnej autoklawizacji

W/M	Rodzaj zaczynu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	
		48h	7 dni
0,6	PZ0	12,575	12,87
	PZ1	10,232	10,62
	PZ3	8,02	10,59
	PZ5	11,62	13,92

Rentgenogramy zaczynów żuźlowo-alkalicznych różnią się od siebie bardzo nieznacznie, wykazując podobną ilość faz krystalicznych określoną na podstawie intensywności pików. Analiza rentgenogramów zaczynów żuźlowo-alkalicznych pozwala stwierdzić, iż nie znaleziono żadnych produktów korozji. Prawdopodobnie ich ilości są na tyle małe, że znajdują się poniżej progu identyfikacji metodą rentgenowską. Badania rentgenograficzne potwierdzają, że podstawową fazą w zaczynach żuźlowo-alkalicznych jest faza C-S-H (I) o wyraźnie amorficznym charakterze ($d=0,307$).

Aktywacja żuźła dodatkiem, Na_2CO_3 sprawia, że wśród produktów hydratacji pojawiają się duże ilości CaCO_3 ($d=0,386$; $0,303$; $0,249$; $0,228$; $0,210$; $0,191$; $0,188$; $0,160$) a także jego odmiana polimorficzna w postaci waterytu μCaCO_3 ($d=0,386$; $0,228$). Jak wiadomo powszechnie, autoklawizacja wyraźnie przyspiesza przejście szkliwa w C-S-H – zanika rozmyty efekt pochodzący od wyjściowego materiału i wyostża się pik z maksimum odpowiadający $d=0,307$. Badania wykazują, że na dyfraktogramach pojawiają się refleksy pochodzące od fazy tobermorytu $11,3\text{\AA}$ / C-S-H (I) ($d=0,784$; $0,307$; $0,183$), możliwe prawdopodobne może być również występowanie hydrotalcytu $\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ($d=0,386$; $0,228$) których piki nakładają się z pikami wspomnianego wcześniej kalcytu. Wysokie stężenia aktywatora prowadzą do powstawania rentgenograficznie wykrywalnych ilości hydrotalcytu, tak i w tym przypadku przeprowadzone badania zaczynów doprowadzić mogły do powstania najpierw pewnych ilości hydrotalcytu a następnie do rozpadu jej części oraz utworzenia znacznych ilości fazy C-S-H (I) oraz tobermorytu. Nie stwierdzono, także bezpośrednio występowanie hydrogranatów z uwagi na niskie tło w zakresie ich występowania.

Obserwując za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego powierzchnię zaczynów żuźlowo-alkalicznych stwierdzono występowanie znacznej ilości zwartej żelu CSH oraz lokalnie mikrokrystalicznej fazy CSH II według klasyfikacji Diamonda jak również niewielkie ilości krystalicznego węglanu wapniowego i kryształów charakterystycznych dla hydrogranatów.

Dokumentację wyników SEM/EDS przedstawiają odpowiednio **Fig. 1.1.7_42 - 29**.

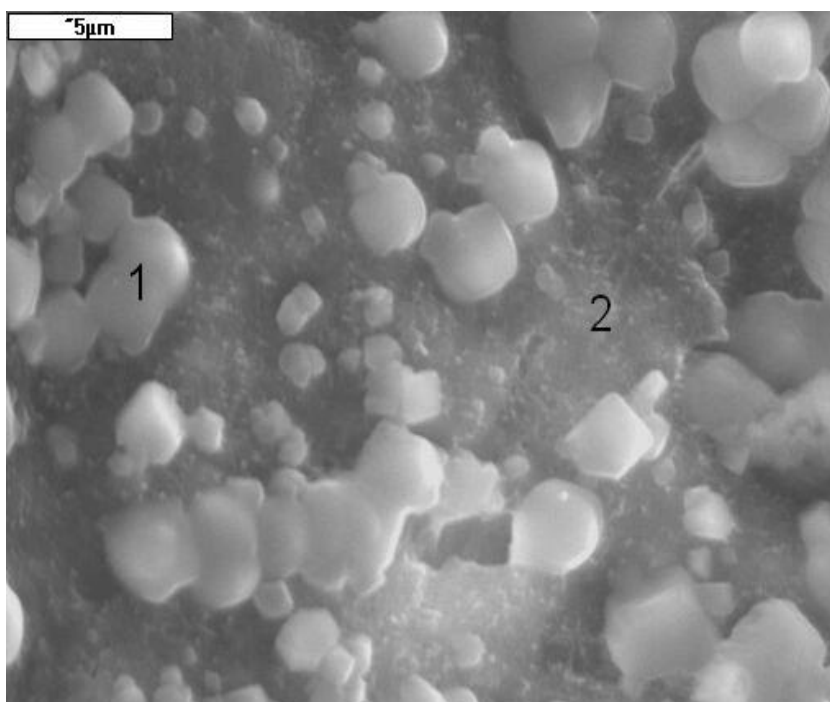


Fig. 1.1.7_42 Mikrostruktura przeciętna stwardniałego zaczynu żuźlowo-alkalicznego o recepturze I po autoklawizacji. Widoczne drobne skryształizowane zbliżone do regularnych hydrogranaty oraz drobno skryształizowana faza C-S-H tworząca przerosty z uwodnionymi sulfoglinianami wapniowymi i kalcytem. Powiększenie 5000x.

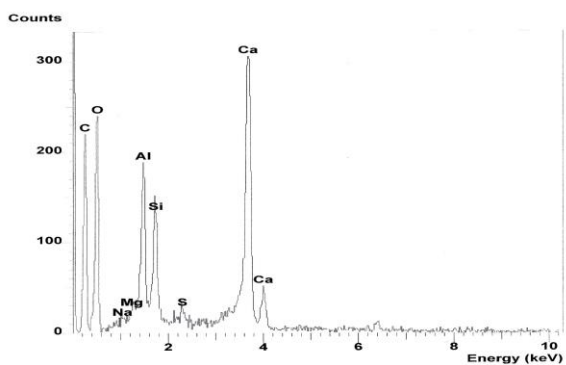
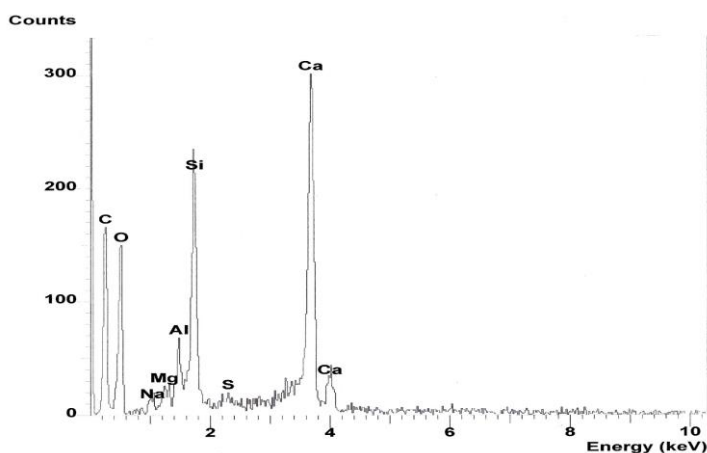


Fig. 1.1.7_43 Wyniki analizy pierwiastkowej EDS próbki widocznej na **Fig. 1.1.7_43** w punkcie 1 świadcząca o obecności hydrogranatów.

Fig. 1.1.7_44 Wyniki analizy pierwiastkowej EDS próbki widocznej na **Fig. 1.1.7_42** w punkcie 2



świadcząca

o

obecności

fazy

C-S-H o stosunku C/S>1 tworzącej przerosty z kalcytem, uwodnionym sulfoglinianem wapniowym.

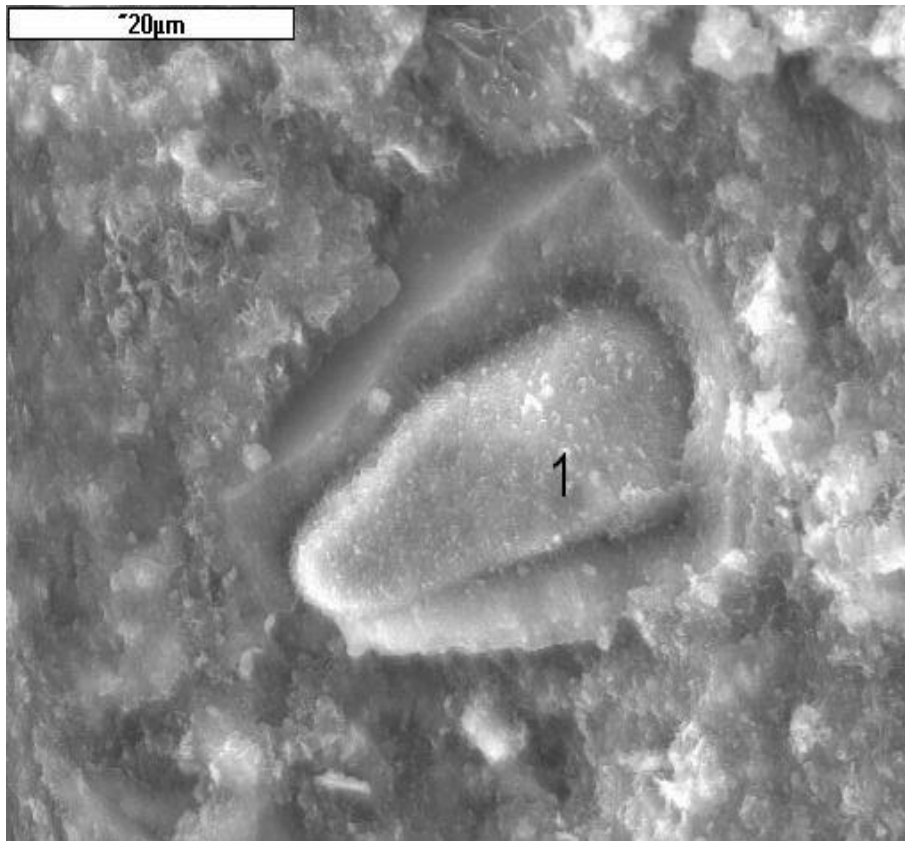


Fig. 1.1.7_45 Mikrostruktura przeciętna stwardniałego zaczynu żuźlowo-alkalicznego o recepturze II po autoklawizacji. Widoczne pseudomorfozy po ziarnach żuźła z wyraźnie oddzielnym „hydratem zewnętrznym” i dominującą fazą C-S-H słabo skryształizowaną. Powiększenie 2000x.

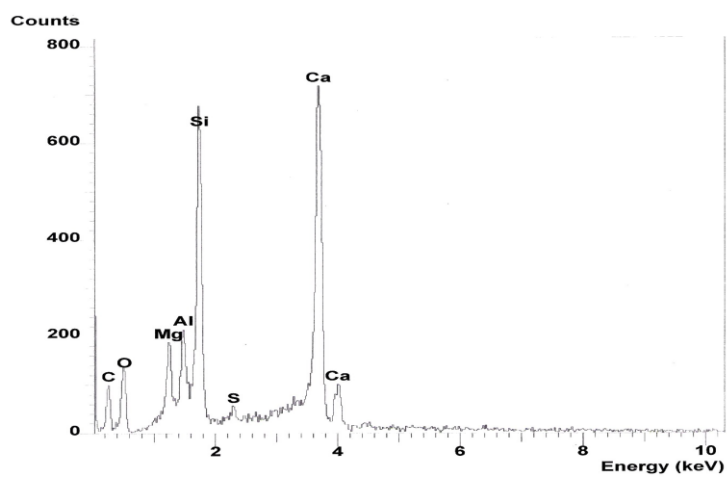


Fig. 1.1.7_46 Wyniki analizy pierwiastkowej EDS próbki widocznej na **Fig. 1.1.7_45** w punkcie 1 świadczące o obecności fazy szklistej o stosunku C/S>1 modyfikowanej jonami glinu, magnezu i siarki.

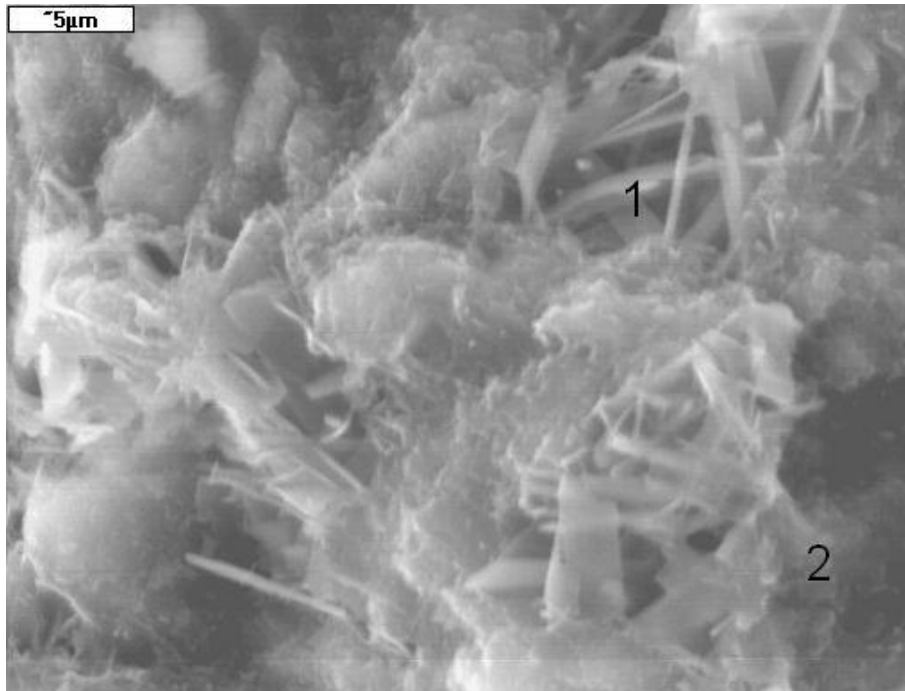


Fig. 1.1.7_47 Mikrostruktura przeciętna stwardniałego zaczynu żuźlowo-alkalicznego o recepturze II po autoklawizacji. Widoczne produkty o zróżnicowanym stopniu skryształizowania głównie płytkowy tobermorytu tworzący przerosty z kalcytem. Powiększenie 3500x.

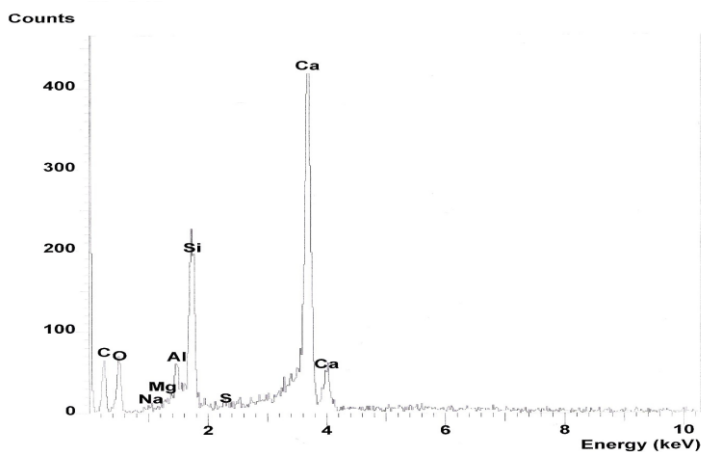


Fig. 1.1.7_48 Wyniki analizy pierwiastkowej EDS próbki widocznej na **Fig. 1.1.7_47** w punkcie 1 świadczące o obecności uwodnionego krzemianu wapniowego o

stosunku C/S>1 tworzącego przerosty z kalcytem.

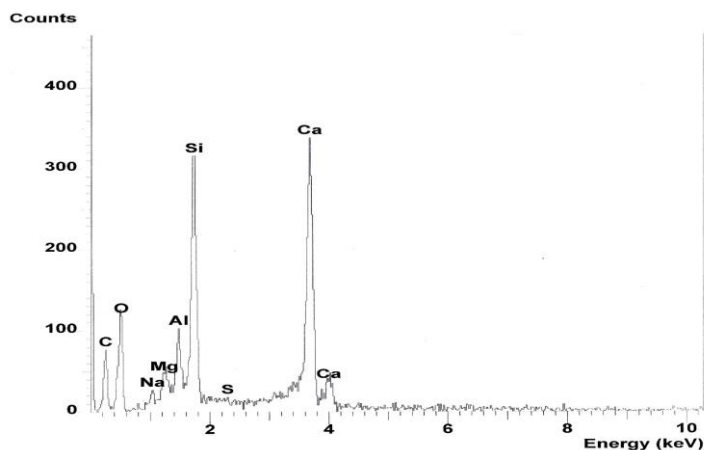


Fig. 1.1.7_49 Wyniki analizy pierwiastkowej EDS próbki widocznej na **Fig. 1.1.7_47** w punkcie 2 świadczące o obecności uwodnionych krzemianów wapniowych o stosunku C/S~1 stabilizowany glinem Al³⁺ i magnezem Mg²⁺, tworzący przerosty z kalcytem.

Analiza rentgenograficzna zaczynów żużlowo-alkalicznych potwierdza występowanie wśród produktów hydratacji dużej ilości kalcytu a także niewielkie ilości jego odmiany polimorficznej w postaci waterytu. Badane zaczyny uszczelniające wykazały występowanie fazy tobermorytu 11,3Å o wyraźnie amorficznym charakterze ($d=0,307$), oprócz tego występuje podobna ilość faz krystalicznych określona na podstawie intensywności pików. Analiza rentgenogramów pozwala stwierdzić, iż nie znaleziono żadnych produktów korozji. Prawdopodobnie ich ilości są na tyle małe, że znajdują się poniżej progu identyfikacji metodą rentgenowską.

Obserwację powierzchni zaczynów żużlowo-alkalicznych pozwalają stwierdzić występowanie dominującej fazy CSH o niskim stopniu uporządkowania struktury stanowiąca jednolitą gąbczastą masę występującą w znacznej ilości jako słabo skryształizowaną, jak również niewielkie ilości krystalicznego węgla wapniowego, i kryształów charakterystycznych dla hydrogranatów.

Rozkład wielkości porów wskazuje na duży udział porów od średnicy około 0,01 μm do 0,2 μm o objętościach dochodzących nawet do 0,0450 mm^3/g jednak nie stanowią one istotnego zagrożenia pod względem przepuszczalności otrzymanego zaczynu.

Badania składu fazowego stwardniałych zaczynów wykonano metodą rentgenograficzną i termiczną. Badaniom poddano zaczyny w wieku 3 miesięcy dojrzewające w atmosferze wilgoci przy wilgotności względnej powietrza RH = 100%. Próbki stwardniałych zaczynów przed badaniem były rozdrabniane a następnie suszone w temperaturze 45 °C przez 24 godziny. Po wysuszeniu materiał był mielony do całkowitego przejścia przez sito o boku oczka 60 μm .

Przeprowadzone badania rentgenograficzne stwardniałych zaczynów w wieku 90 dni wykazały, że próbki zawierają w ilościach dominujących także produkty krystaliczne jak:

- β kwarc SiO_2 ,
- portlandyt Ca(OH)_2 typowy składnik stwardniałych zaczynów będących produktem hydrolizy krzemianów wapniowych ; portlandyt z uwagi na zbyt krótki czas dojrzewania zaczynów, nie został zużyty w procesach pucolanowych z udziałem granulowanego żużla wielkopiecowego,
- kalcyt CaCO_3 który jest produktem karbonizacji portlandytu Ca(OH)_2 ; proces karbonizacji przebiega z dużą łatwością w opisanych wcześniej warunkach dojrzewania po 3 miesięcznej ekspozycji próbek,
- w stwardniałych zaczynach stwierdzono także obecność uwodnionego trójsiarczanoglinianu wapniowego ettringitu występującego przy obecności gipsu dwuwodnego spełniającego funkcję regulatora (opóźniacza) procesu wiązania, co świadczy o tym, że pomimo 3 miesięcznego dojrzewania nie nastąpiło jeszcze zupełne przejście ettringitu w uwodniony monosulfoglinian wapniowy bowiem choć składnik ten ma charakter krystaliczny nie zanotowano jego wyraźnej obecności przy ocenie składu fazowego zaczynów metodą rentgenograficzną,
- w stwardniałych zaczynach nie zawierającej dodatku zeolitu klinoptilolotowego stwierdzono obecność fazy taumazytowej uwodnionego siarczano – węglano krzemianu wapniowego w próbce zaczynu Szczególnie wysoką odporność spoiw geopolimerowych zawierających dodatek zeolitu klinoptilolotowego w warunkach oddziaływania kwasu chlorowodorowego i chlorków potwierdziły badania J. Janotki, co może sugerować o dużej trwałości takich zaczynów w obecności chlorków np. w zmineralizowanych wodach kopalnianych czy podczas sporządzania zaczynów solankowych.

Przeprowadzone badania składu fazowego stwardniałych zaczynów metodą termiczną potwierdziły wyniki badań składu fazowego stwardniałych zaczynów metodą rentgenograficzna. Uzyskane wyniki badań stanowią potwierdzenie wyraźnej aktywności pucolanowej zeolitów klinoptilolitowych, których obecność wpisuje się bardzo dobrze w ogólne zasady kształtowania trwałości zaczynów uszczelniających do prac związanych z uszczelnianiem górotworu oraz cementowania kolumn rur okładzinowych w otworach przeznaczonych do magazynowania CO_2 .

Wnioski

Uwagi dotyczące wpływu dodatków pucolanowych na kształtowanie się parametrów technologicznych świeżych i stwardniałych zaczynów uszczelniających o zwiększonej trwałości oraz odporności na CO_2 mogą być sformułowane w postaci następujących wniosków o charakterze ogólnym :

1. Badane zaczyny uszczelniające oparte są wyłącznie na składnikach pochodzenia nieorganicznego. Otrzymuje się je poprzez modyfikację składu odpowiednio zestawionych i przygotowanych zaczynów sporządzonych na osnowie bądź to wieloskładnikowych cementów powszechnego użytku, bądź mielonych granulowanych żużli wielkopiecowych z dodatkami o właściwościach pucolanowych.
2. Dodatek naturalnych zeolitów stwarza możliwość intensyfikacji reakcji pucolanowych w zaczynach żużlowo – alkalicznych, ale także ich uszczelnienia i ułatwienia tworzenia się zeolitów w matrycy żużlowo – alkalicznej.

3. Wpływ koncentracji zeolitów w zaczynach żużlowo-alkalicznych oddziałuje na parametry świeżych i stwardniałych zaczynów uszczelniających powodując:

- obniżenie odstoju,
- obniżenie filtracji,
- wzrost lepkości plastycznej,
- obniżenie rozlewności,
- wzrost lepkości pozornej,
- wydłużenie czasu wiązania,
- pogorszenie parametrów reologicznych,
- obniżenie gęstość zaczynu,
- wzrost lepkości względnej,
- obniżenie wytrzymałości na zginanie,
- obniżenie wytrzymałości na ściskanie.

4. Spośród znanych modeli reologicznych na szczególną uwagę zasługuje model Herschela-Bulkleya . Model ten należy uznać za jeden z modeli najdokładniej opisujących zachowanie się badanych zaczynów uszczelniających, stosowanych do cementowania. Wiąże on bowiem ze sobą zarówno właściwości plastyczne jak lepkie rzeczywistych cieczy.

5. Wybór zaczynów, które mają być zastosowane do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworów wiertniczych dla potrzeb magazynowania CO₂, powinien być podyktowany koniecznością zapewnienia możliwie jak najniższej zawartości portlandytu w produktach hydratacji zaczynów i możliwie jak największą zawartością fazy CSH, tobermorytu i hydrogranatów.

6. Zastosowanie dodatków mineralnych w postaci zeolitu pozwala na znaczną modyfikację mikrostruktury oraz cech wytrzymałościowych zaczynów żużlowo-alkalicznych.

7. Dodatek naturalnych zeolitów klinoptilolitowych może przyczynić się do istotnego przyśpieszenia tworzenia się zarówno zeolitów jak i hydrogranatów mających bardzo istotny wpływ na trwałość i potencjał immobilizacyjny matrycy żużlowo – alkalicznej.

8. Bezpośredni wpływ na kształtowanie się wytrzymałości na ściskanie zaczynów żużlowo-alkalicznych zawierających dodatki mineralne w postaci zeolitu wywierają warunki autoklawizacji.

9. Podwyższenie trwałości stwardniałych zaczynów żużlowo-alkalicznych z udziałem

zeolitów klinoptilolitowych jest spowodowane z następującymi przestankami:

- powiększeniem ubytku masy związanego z dehydratacją fazy CSH, co świadczy

o wzroście jej udziału w badanych próbkach,

- zmniejszeniem efektów endotermicznych związanych z dehydratacją portlandytu w próbkach zawierających zeolity naturalne, co może stanowić świadectwo jego przereagowania w wyniku rozwoju reakcji pucolanowej.

10. Przeprowadzone badania rentgenograficzne stwardniałych zaczynów w wieku 90 dni wykazały, że próbki zawierają w ilościach dominujących także produkty krystaliczne takie jak:

- β kwarc SiO_2 ,
- portlandyt Ca(OH)_2 typowy składnik stwardniałych zaczynów będących produktem hydrolizy krzemianów wapniowych stanowiących główny (ok.80%) składnik klinkieru cementowego; portlandyt z uwagi na zbyt krótki czas dojrzewania zaczynów, nie został zużyty w procesach pucolanowych z udziałem granulowanego żużla wielkopiecowego,
- kalcyt CaCO_3 który jest produktem karbonizacji portlandytu Ca(OH)_2 ; proces karbonizacji przebiega z dużą łatwością w opisanych wcześniej warunkach dojrzewania po 3 miesięcznej ekspozycji próbek,
- w stwardniałych zaczynach stwierdzono także obecność uwodnionego trójsiarczanoglinianu wapniowego ettringitu występującego przy obecności gipsu dwuwodnego spełniającego w cemencie funkcję regulatora (opóźniacza) procesu wiązania, co świadczy o tym, że pomimo 3 miesięcznego dojrzewania nie nastąpiło jeszcze zupełne przejście ettringitu w uwodniony monosulfoglinian wapniowy bowiem choć składnik ten ma charakter krystaliczny nie zanotowano jego wyraźnej obecności przy ocenie składu fazowego zaczynów metodą rentgenograficzną,
- w stwardniałych zaczynach nie zawierających dodatku zeolitu klinoptilolotowego stwierdzono obecność fazy taumazytowej uwodnionego siarczano – węglano krzemianu wapniowego.

11. Dodatek zeolitów klinoptilolitowych, w zależności od warunków dojrzewania spełnia szereg pożytecznych funkcji, z których najważniejsze to:

- spełnienie funkcji dodatku schudzającego, co powoduje istotne ograniczenie czy też wyeliminowanie zmian skurczowych, których nie obserwuje się w badaniach mikrostruktury stwardniałych zaczynów,
- dobre własności pucolanowe zeolitów powodują wysokie zaawansowanie reakcji pucolanowej w badanych zaczynach, co skutkuje wysokimi wytrzymałościami na ściskanie oraz niską porowatością ogólną stwardniałych zaczynów szczególnie eksponowanych w warunkach autoklawizacji (charakterystycznych dla cementacji głębokich otworów wiertniczych);
- w stwardniałych zaczynach dominują pory żelowe i kapilarne o średnicy 2,5 – 10 nm co gwarantuje ich niską przepuszczalność i niskie zdolności filtracyjne;
- dodatek zeolitów stanowi źródło powstawania dużych ilości hydrogranatów – uwodnionych glinokrzemianów wapniowych bardzo korzystnie poprawiających odporność stwardniałych zaczynów na korozję chemiczną;

- dodatek zeolitów, szczególnie do zaczynów dojrzewających w warunkach naturalnych powoduje, że ziarna zeolitów wypełniają funkcję zarodków krystalizacji produktów o składzie zeolitów, które zwykle w matrycy spoiwowej powstają z dużym trudem.

12. Podwyższenie trwałości stwardniałych zaczynów żużlowo alkalicznych z udziałem

zeolitów klinoptilolitowych jest spowodowane z następującymi przesłankami:

- powiększeniem ubytku masy związanego z dehydratacją fazy CSH co świadczy o wzroście jej udziału w badanych próbkach,
- zmniejszeniem efektów endotermicznych związanych z dehydratacją portlandytu w próbkach zawierających zeolity naturalne, co może stanowić świadectwo jego przereagowania w wyniku rozwoju reakcji pucolanowej.

13. Za celowe wydaje się dalsze prowadzenie badań z zakresu optymalizacji techniki i technologii stosowania opracowanych receptur zaczynów uszczelniających o zwiększonej trwałości i odporności na korozję węglanową w pracach związanych z uszczelnianiem górotworu zarówno w otworach badawczych jak i iniekcyjnych do zatłaczania CO₂ w otworach wiertniczych a zwłaszcza zlokalizowanych na Lubelszczyźnie oraz w północno-zachodniej Polsce.

Badania laboratoryjne zaczynów cementowych i kamieni cementowych stosowanych w otworach wiertniczych rejon Wielkopolska

(Stanisław Stryczek, Andrzej Gonet, Rafał Wiśniowski, Rafał Smulski)

Proces zatłaczania gazów kwaśnych dla geologicznego ich składowania przebiega w warunkach bardzo wysokiej korozyjności potencjalnej, wynikającej z wartości ciśnienia cząstkowego CO₂ oraz sprzyjającej dla procesu korozji wielkości temperatury.

Główne ryzyko związane z zatłaczaniem i przechowywaniem CO₂ wiąże się z awarią odwiertu, która może spowodować ucieczkę dwutlenku węgla i jego szybką migrację w kierunku powierzchni.

Konwencjonalne systemy izolacji odwiertów ropnych i gazowych bazują na cemencie portlandzkim. Zaletą tego systemu jest niski koszt oraz dobra wydajność przy rozpatrywaniu żywotności odwiertu na przestrzeni 20 lat. Ale cement znany jest jako termodynamicznie niestabilny i nietrwały w środowisku bogatym w CO₂. Korozja pod wpływem agresywnego dwutlenku węgla powoduje wymywanie kwaśnego węglanu wapniowego co w konsekwencji prowadzi do degradacji stwardniałego zaczynu cementowego. Dodatkowo ułatwia to dostęp innych czynników korozyjnych do stwardniałego zaczynu jak również przyczynia się do obniżenia wytrzymałości na czynniki mechaniczne.

Dla tego na całym świecie prowadzone są badania nad zwiększaniem odporności korozyjnej zaczynów cementowych przeznaczonych dla geologicznego składowania CO₂ poprzez stosowanie różnego typu dodatków.

Biorąc pod uwagę mechanizm niszczenia oraz zjawiska korozji chemicznej stwardniałych kompozycji cementowych przy kontakcie z wodą i rozpuszczonymi w niej składnikami dokonuje się zazwyczaj podziału na korozję I, II lub III typu. Jest to klasyczny stosowany podział w literaturze i w normach.

Korozja I typu polega na wymywaniu rozpuszczalnych składników z stwardniałych kompozycji cementowych, głównie wodorotlenku wapniowego. Zjawisko typowe dla działania wód miękkich. Ługujące działanie wody zostaje zwiększone, jeśli równocześnie występują takie czynniki, jak np. roztwory cukru, niektóre sole amonowe, słabe agresywny CO₂, które tworzą łatwo rozpuszczalne i wymywalne produkty reakcji.

Korozja II typu obejmuje reakcje jonowej wymiany między związkami wapnia a elementami środowiska. W wyniku tych reakcji powstają nowe związki o małej wytrzymałości, które nie posiadają cech wiążących. Owe reakcje są wynikiem oddziaływania związków magnezu, kwasów (np. chlorki magnezowy lub amonowy, węglany i wodorotlenki alkaliczne, siarkowodór) oraz niektórych soli nieorganicznych, jak również niektórych związków organicznych, np. oleje i tłuszcze. Produkty reakcji są słabo rozpuszczalne oraz zazwyczaj bezpostaciowe, dla tego też nie następuje ich wypłukiwanie. Pozostają one w stwardniałych kompozycji cementowych, co prowadzi do uszkodzenia jego struktury.

Korozja III typu odnosi się do procesów, w których wyniku powstają i gromadzą w stwardniałych zaczynach słabo rozpuszczalne sole, które krystalizują i powiększają objętość fazy stałej. Powodowane to jest reakcji pomiędzy środowiskiem zawierającym jony siarczanowe a składnikami stwardniałego zaczynu cementowego, wrażliwymi na reagowanie z siarczanami. Korozja tego typu powoduje pęcznienie, pojawienie się pęknięć oraz rys, a finalnie prowadzi do całkowitego zniszczenia stwardniałych kompozycji

cementowych.

Rzadko kiedy w praktyce występują „czysta” korozja I, II lub III typu, zazwyczaj ma miejsce synergiczne działanie różnych czynników agresywnych. Ługowanie, rozmiękczenie i rozsadzanie stwardniałych kompozycji cementowych może występować równocześnie, choć z różną intensywnością.

Agresywność środowisk wodnych na podstawie pojedynczych składników agresywnych, klasyfikuje się jako agresywność ługującą, ogólnokwasową, kwasowęglową (węglanową), magnezową i siarczanową. Są to najbardziej powszechne przyczyny natury chemicznej, uwzględniane w normach światowych dotyczących agresywności środowisk. Są one przyczyną większości uszkodzeń korozyjnych. Przyczyny te najczęściej nie występują jako indywidualne, lecz zawsze powiązane są z czynnikami fizycznymi i mechanicznymi. Najczęściej występują agresywność łącznie to: magnezowa i siarczanowa, ługująca i węglanowa, kwasowa i siarczanowa.

Parametry wpływające na trwałość kompozycji cementowych narażonych na działanie czynników agresywnych

Zmiany korozyjne w kompozycjach cementowych (stwardniałych zaczynach cementowych, zaprawach oraz betonach) związane są z predyspozycjami jego składników do niepożądanego chemicznego reagowania ze składnikami środowiska agresywnego. O wytrzymałości korozyjnej stwardniałych kompozycji cementowych decyduje przede wszystkim podatność jego części spoiwowej. Tę skłonność można w pewnym stopniu modyfikować przez zastosowanie dodatków lub domieszek. Z reguły nieorganiczne dodatki mineralne (kruszywo) są znacznie mniej podatne na działanie środowiska agresywnego.

Zakres reakcji podatnych składników stwardniałych kompozycji cementowych zależy od możliwości kontaktu betonu ze środowiskiem, jakości stwardniałych kompozycji cementowych (szczelności, wytrzymałości, cech strukturalnych) oraz metody działania środowiska na stwardniałe zaczyny cementowe.

Ochrona stwardniałych kompozycji cementowych przed szkodliwymi wpływami i zapewnienie jej trwałości przez długi okres eksploatacji powinno być rozwiązane kompleksowo. Dobór środków ochronnych warunkuje rodzaj i nasilenie czynników agresywnych.

Do ochrony stwardniałych kompozycji cementowych stosowane są materiały z pewnych grup podstawowych (tworzywa sztuczne, związki chemiczne, materiały krzemianowe, ceramiczne). Wielokrotnie zdarza się, iż ten sam materiał może być używany w różny sposób. Cechy techniczne materiału decydują o jego przydatności, przede wszystkim jego odporność chemiczna i jego współdziałaniu w stwardniałym zaczynie, a głównie sprowadza się to do przyczepność.

Gdy stwardniałe kompozycje cementowe mogą być narażone na wpływy agresywne, powinny być zabezpieczone zarówno strukturalnie jak i materiałowo. Uzyskuje się to wskutek doboru składników o właściwej jakości, dodatków i domieszek, co w efekcie pozwala na uzyskanie specjalnych kompozycji cementowych o podwyższonej trwałości.

Dodatek np. włókien może powodować organicznie korozji poprzez zmniejszenie ilości podatnego składnika kompozycji cementowych na korozję oraz będzie dodatkowo pełnił rolę materiału uszczelniającego.

Około dwudziestu pięciu lat temu zaczęto coraz częściej korzystać z kompozytowych układów cementowych z dodatkiem włókien stalowych i polipropylenowych. Fibrobetony należą do obszernego zbioru materiałów kompozytowych powstających w wyniku dodania krótkich włókien do matryc z zapraw cementowych lub betonów. Jako zbrojenie rozproszone dodawane są włókna stalowe, włókna węglowe, włókna z tworzyw sztucznych (np. polipropylenu, nylonu lub innych związków), oraz pochodzenia organicznego np. z bawełny, sizału oraz zwłaszcza w krajach azjatyckich – bambusa. Zaobserwowano, że dodatek włókna stosowany w granicach 1% objętości, znacząco zmienia charakter konwencjonalnego zaczynu cementowego. Cement kompozytowy staje się ciałem quasi-podatnym i po przekroczeniu naprężeń pierwszej rysy, wciąż wykazuje swoją nośność. Beton zbrojony włóknem staje się betonem o zbrojeniu równomiernie rozproszonym, co czyni z niego materiał homogeniczny. Włókna rozproszone w masie zaczynu cementowego (betonu), w ilości, która zależy od potrzeb wynikających z jego zastosowania oraz wymagań stawianych przez użytkownika. W fibrobetonie zawartość włókien stalowych nie przekracza na ogół 2%, licząc objętościowo. Stwardniałe zaczyny cementowe są materiałem nieelastycznym i niejednorodnym z powodu występujących w nim mikrospeknięć. Istotą włókien stalowych jest otrzymanie nowej struktury połączenia składników zaczynu cementowego (betonu). W efekcie formowanie speknień skurczowych w fazie wiązania zaczynu (betonu) zostaje rozproszone, a ich wielkość gwałtownie zredukowana. Po związaniu betonu, włókna stalowe przeciwstawiają się naprężeniom rozciągającym i powstawaniu speknień w procesie deformacji betonu pod obciążeniem, aż do pełnego zniszczenia struktury stwardniałych kompozycji cementowych. Dzięki temu kompozycje cementowe zbrojone zarówno włóknem stalowym, jak również i syntetycznym są odporne na tworzenie się rys skurczowych. Ponadto włókna są idealnym materiałem na elementy pracujące na ściskanie, obciążenia dynamiczne, gwałtowne zmiany temperatury oraz działanie wód agresywnych.

Ogólna charakterystyka kompozytów cementowych z dodatkiem włókien

Pod terminem kompozytów cementowych zbrojonych włóknami mieści się obszerna grupa kompozytów betonowych i betonopodobnych, w których umieszczono zbrojenie rozproszone w formie włókien. W zależności od rodzaju matrycy cementowej wyróżniamy kompozyt włóknisto-cementowe, gdy matrycę stanowi zaprawa cementowa oraz kompozyty fibrobetonowe, gdy matrycę stanowi beton. Modyfikacja właściwości betonów przez dodawanie do mieszanki betonowej niedużej ilości włókien ma ponad 2 dekadową tradycję. Dodatek krótkich włókien, przestrzennie zorientowanych do betonów, zaczynów cementowych polepsza ich własności użytkowe, czasami również właściwości mechaniczne. Zasadniczą cechą jaką muszą odznaczać się włókna, jest odporność na alkalia. Z przyczyny silnie alkalicznego charakteru zaprawy, zaczynów i betonu, w początkowym etapie ich dojrzewania. Co więcej, aby mogły pełnić rolę składnika zbrojącego muszą wykazywać dobre właściwości mechaniczne. Dodatkowym atutem włókien jest ich smukłość. Im większa smukłość włókna tym skuteczniej może ono spełnić rolę składnika zbrojącego. Beton lub kompozycje cementowe zawierające losowo rozproszone i zdyspergowane włókna określane są mianem „beton wzmocniony włóknem” FRC (Fiber-Reinforced Concrete). Określenie to zostało zdefiniowane przez ACI 116 R, Cement and Concrete Terminology. Wedle terminologii przyjętej przez ACI, występują cztery kategorie FRC w zależności od zastosowanych do zbrojenia włókien:

- SFRC – z włóknami stalowymi,
- GFEC – z włóknami szklanymi,

- SNFRC – z włóknami syntetycznymi, w tym węglowymi,
- NFRC – z włóknami naturalnymi.

Właściwości i charakter kompozytów na bazie cementu, wzmocnianych włóknami, modyfikują się w zależności od:

- receptury spoiwa,
- rodzaj materiału włókna,
- geometrii włókien,
- orientacji włókien,
- koncentracji ich w kompozycie.

Poprzez dążenie do uzyskiwania lepszych materiałów budowlanych powstały fibrobetony, w których stosowany jest hybrydowy układ zbrojenia, gdzie połączono ze sobą różne rodzaje włókien, różniących się rozmiarami i właściwościami mechanicznymi. Przykładem takiej sytuacji może być połączenie włókien szklanych i polipropylenowych lub połączenie włókien stalowych i węglowych. Istnieje wiele zastosowań włókien w fibrobetonach, w których jest wymagane, żeby włókna działały jako podstawowy składnik przenoszący obciążenia oraz zapewniały jednorodność strukturalną. Istnieje wiele aplikacji, gdzie włókna są stosowane w praktyce głównie w celu podniesienia integralności materiału matrycy, tym samym podwyższenia spójności całej struktury układu. W przypadku stosowania małej zawartości włókien (poniżej 0,5% objętości) działanie w większym stopniu polega na pochłanianiu energii oraz kontroli pęknięcia aniżeli na predyspozycji do przenoszenia zwiększonych obciążeń. Mimo że objętość włókien jest w tym przypadku względnie mała, to jednak na skutek dobrego rozproszenia ich w matrycy cementowej, mają one wyraźny wpływ na propagację rys.

Projektowanie kompozytów cementowych wzmocnianych włóknami polega na określeniu składu matrycy cementowej zaprawy lub betonu, rodzaju, ilości i sposobu rozlokowania włókien a także jakości warstwy przejściowej determinującej przekazywanie oddziaływań odkształceń z matrycy na włókna. Formowanie się warstwy przejściowej matryca cementowa-włókno zależy w znacznym stopniu od rozmiaru włókien i rodzaju matrycy cementowej. Ustalono, że w przypadku włókien, których średnice są zbliżone bądź mniejsze od wymiarów ziaren cementu, nie pojawia się zjawisko lokalnie podwyższonego współczynnika w/c przy włóknach. Tym samym nie jest zakłócona ciągłość struktury ośrodka przez formowanie się dużych hydratów kryształów. Strukturę warstwy przejściowej i przyczepność włókien do matrycy cementowej da się poprawić poprzez dodanie mikrowypełniaczy o dużym rozdrobnieniu, takich jak popioły lotne, rozdrobniony węgiel wapnia, mikrokrzemionka. Ponieważ ze wzrostem ilości włókien urabialność mieszanki pogarsza się, konieczne jest zastosowanie domieszek zwiększających płynność oraz u umożliwiających rozproszenie włókien w zaczynie cementowym.

W większości wypadków autorzy przenoszą wyniki badań obszaru rozdziału z układu kruszywo-zaczyn na układ włókno-zaczyn, nie biorąc pod uwagę wielkości skali wtrącenia. W niektórych pracach odnoszących się do układów rzeczywistych z włóknami syntetycznymi występowanie warstwy portlandytu kwestionuje się. W literaturze spotyka się tylko jeden model strefy przejściowej włókno-zaczyn zaprojektowany przez

Bentura. Owy model powstał na podstawie badań włókien stalowych w zaczynie, poczym później został przeniesiony na włókna szklane. Występuje w nim warstwa podwójna (portlandyt, C-S-H), warstwa prawidłowo uformowanych kryształów wodorotlenku wapnia i strefa o zwiększonej porowatości. Więc mamy tu do czynienia z całkowitą analogią w odniesieniu do kruszywa. Generalizowanie jednak tego modelu dla innych włókien, tym bardziej dla cienkich polimerowych nie jest słuszne.

W wypadku włókien stalowych pojawia się efekt zwilżania powierzchni włókna, albowiem energia powierzchniowa stali jest kilkukrotnie większa od energii powierzchniowej wody. Tworzy się, więc błonka wody porównywalnie jak na granicy zaczyn-kruszywo. W przypadku prętów zbrojeniowych chropowatość powierzchni jest na tyle duża, że również występuje zatrzymywanie wody kapilarnej. Pomocniczy efekt wpływający na powstawanie strefy przejściowej wiąże się ze zjawiskiem pasywacji stali w środowisku alkalicznym. Warunek lokalnego zwiększenia parametru w/c jest spełniony dla układu stal-zaczyn cementowy (Fig. 1.1.7_50).

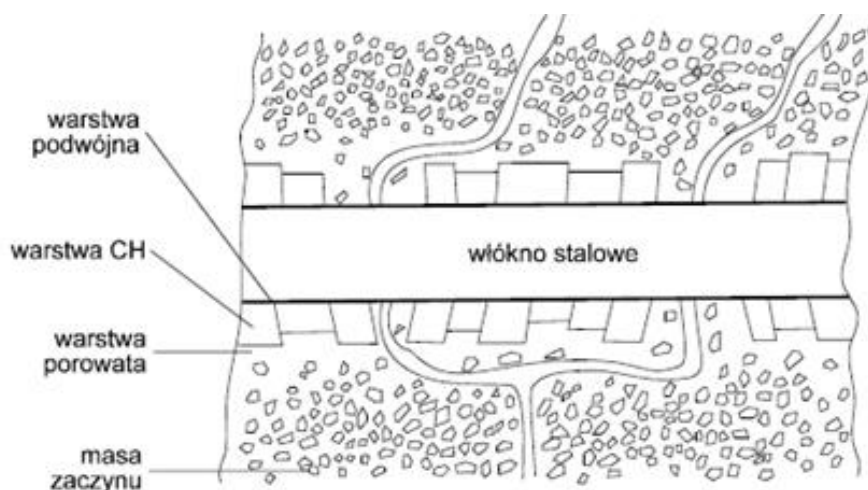


Fig. 1.1.7_50 Model Bentura strefy włókno-zaczyn (Florjańczyk, Z. & Penczek, S., 1997).

Powinno się również pamiętać, iż stosowane w praktyce włókna stalowe mają średnicę przynajmniej kilkukrotnie razy większą od średnicy ziaren cementu, dla tego też efekt ściany będzie miał tu miejsce. Dostosowanie modelu opracowanego dla włókien stalowych, do układu z włóknami szklanymi budzi także pewne wątpliwości. Bentur korzystał w swoich badaniach z wiązki włókien szklanych. Ze względu na efekt kapilarnego podciągania wody między elementarne włókna w wiązce, a równocześnie na rozmiary przestrzeni między włóknami uniemożliwiające wypełnienie ich ziarnami cementu, parametr w/c w obszarze wiązki włókien uległ znacznemu powiększeniu. Wykryształowana warstwa portlandytu jest, więc przede wszystkim związana z istnieniem mechanizmu podciągania kapilarnego wody. Obecność tego typu wolnych przestrzeni daje zbliżony efekt jak w przypadku powierzchni kruszyw. Powinno się jednak zaznaczyć, że w przypadku takich samych indywidualnych włókien, lecz równomiernie rozproszonych w zaczynie, efekt podciągania kapilarnego nie występowałby. Również nie będzie mechanizmu odpowiedzialnego za lokalne zwiększenie parametru w/cw pobliżu powierzchni pojedynczych włókien polimerowych. Ponieważ ich średnica zwykle jest zbliżona lub niższa od średnicy ziaren cementu. Wtedy

efekt ściany nie występuje, a ziarna cementu będą mogły bez ograniczeń upakowywać się w pobliżu włókna. Odpowiedzialnym za wzrost porowatości w warstwie kontaktowej jest efekt jednostronnego zwiększenia produktów hydratacji. Na dodatek, energia powierzchniowa tworzyw polimerowych jest z reguły mniejsza od energii powierzchniowej wody.

W takim razie w przypadku włókien polimerowych brak jest podstaw do występowania efektu lokalnego zwiększenia parametru w/cw w pobliżu powierzchni włókna. Wpływ „efektu ściany” oraz uszlachetnianie włókien w podczas produkcji pociąga za sobą wybór do badań układów rzeczywistych w miejsce modeli typu „duża kształtka z tworzywa w zaczynie”. Wpływa to w sposób bezpośredni na wybór technik badawczych używanych do określenia budowy strefy kontaktowej włókno-zaczyn.

W celu scharakteryzowania budowy strefy kontaktowej włókno-zaczyn niezbędne jest określenie parametrów, które opisują własności i budowę tej strefy. Owe parametry to, skład chemiczny warstwy granicznej, porowatość, wytrzymałość na ścinanie strefy kontaktowej oraz struktura strefy kontaktowej.

Badania laboratoryjne zaczynów uszczelniających do cementowania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych przeznaczonych do zatłaczania CO₂ dla rejonu Wielkopolski.

Podstawowe problemy, jakie występują przy cementowaniu odwiertów przeznaczonych do zatłaczania CO₂ należy rozwiązywać poprzez racjonalny dobór rodzaju i parametrów technologicznych stosowanych zaczynów uszczelniających. W tym aspekcie należy uwzględnić następujące kierunki działania:

- zmniejszanie przepuszczalności stwardniałych cementów przez stosowanie cementów z dodatkami, takimi jak mielony granulowany żużel wielkopiecowy i popiół lotny, będącymi środkiem do poprawy trwałości w dłuższym okresie czasu, lub przez stosowanie cementów "plastycznych",
- zmiana gatunku cementu na taki, który ma znacznie większą odporność na działanie CO₂. Cementy takie mogą obejmować mieszanki cementu glinowy-fosforan, które osiągnęły pewne interesujące sukcesy na tym polu, lub inne warianty, jak mielony granulowany żużel wielkopiecowy aktywowany krzemianem sodu lub mieszaniny mielonego granulowanego żużla wielkopiecowego i popiołu lotnego aktywowanego krzemianem sodu, które również okazały się obiecujące,
- w szczególnych warunkach, w których spoiwo zawierające uwodnione krzemiany wapniowe może w obecności nadmiaru wody zawierającej CO₂ stracić swą zdolność wiązania w wyniku przemiany w niewiążący taumazyt (złożony uwodniony węglano-krzemiano-siarczan wapniowy o niezwyklej wzorze w stanie czystym: $Ca_6[Si(OH)_6]_2(CO_3)_2(SO_4)_2 \cdot 24H_2O$ lub prostszym: $CaCO_3 \cdot CaSO_4 \cdot CaSiO_3 \cdot 15H_2O$), konieczne jest odpowiednie zmniejszenie przepuszczalności.
- zapewnienie, by dla przeprowadzenia udanego cementowania użyty zaczyn uszczelniający był dostatecznie plastyczny dla zapobieżenia działaniu CO₂. Zapewnienie plastyczności może być zrealizowane w różny sposób, między innymi drogą zmniejszenia porowatości i przepuszczalności przez wypełnienie porów cząstkami stałymi, a także przez cementowanie z użyciem czynnika wywołującego pęcznienie.

Zaczyny uszczelniające sporządzone na osnowie cementu portlandzkiego wykazują wiele wad: długi czas wiązania, nieodpowiednie właściwości reologiczne, mała odporność na czynniki korozyjne.

W związku z powyższym w ostatnich latach prowadzone są intensywne badania nad dalszym rozwojem spoiw i nieorganicznych dodatków o właściwościach hydraulicznych bądź pucolanowych w celu uzyskania nowej generacji spoiw specjalnych o zwiększonej trwałości.

Otrzymuje się je poprzez modyfikację składu odpowiednio zestawionych i przygotowanych zaczynów sporządzonych na osnowie bądź to cementów portlandzkich bądź wieloskładnikowych cementów powszechnego użytku.

Zgodnie z normami PN-EN-197-1 „Cement-Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku” oraz PN-EN-197 – 2 „Cement – Część 2 : Ocena zgodności” w bardzo dużej grupie cementów z udziałem składników pucolanowych wyodrębnia się cementy popiołowe zawierające popiół lotny krzemionkowy

(V) ze spalania węgla kamiennego.

Popiół lotny (V) stosowany jest jako składnik:

- **drugorzędny** w przypadku cementu portlandzkiego CEM I (do 5 % wagowo),
- **główny** w przypadku cementu:
 - portlandzkiego popiołowego CEM II ,
 - cementu pucolanowego CEM IV,
 - cementu wieloskładnikowego CEM V.

Powyższe normy wyróżniają :

- cementy portlandzkie popiołowe w dwóch odmianach CEM II/A-V i CEM II/B-V zawierające odpowiednio do 20 i 35 % (wagowo) popiołu lotnego krzemionkowego,
- cementy pucolanowe w dwóch odmianach CEM IV /A i CEM IV/B mogące w swym składzie zawierać odpowiednio do 35 i 55 % (wagowo) popiołu lotnego krzemionkowego,
- cementy wieloskładnikowe w dwóch odmianach CEM V/A i CEM V/B zawierające odpowiednio do 30 i 50 % dodatków o właściwościach pucolanowych.

Celem przeprowadzonych badań laboratoryjnych było udowodnienie następującej tezy:

dodatek włókien w odpowiednich koncentracjach w stosunku do masy suchego cementu portlandzko popiołowego rodzaju CEM II/B-V 32,5 R powinien wpłynąć dodatnio na parametry technologiczne świeżego i stwardniałego zaczynu cementowego przeznaczonego do cementowania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych przeznaczonych do podziemnej sekwestracji CO₂.

Badania laboratoryjne parametrów technologicznych zaczynów uszczelniających przeprowadzono w oparciu o następujące normy:

1. PN – EN 197 – 1: 2002, Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
2. PN - EN 196-1 : 1996. Metody badania cementu. Oznaczanie wytrzymałości. Grudzień 1996.
3. PN - EN 196-3 : 1996. Metody badania cementu. Oznaczanie czasów wiązania i stałość objętości. Grudzień 1996 r.
4. PN – EN ISO 10426 – 1. Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 1. Specyfikacja.
5. PN – EN ISO 10426 – 2. Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2: Badania cementów wiertniczych. 2003.

W przeprowadzanych badaniach zmiennymi były:

- a) rodzaj włókien,
- b) koncentracja włókien w zaczynie.

Współczynnik wodno-mieszaninowy (cement wraz z włóknami) dla badanych zaczynów uszczelniających wynosił: 0,5.

Do badań laboratoryjnych wykorzystano następujące rodzaje włókien:

- ✓ polietylenowe o długości 19 mm, wyprodukowanych przez Elzet,



- ✓ polipropylenowe (fibermesh) o długości 19 mm, wyprodukowane przez PropexConcrete Systems Ltd.



- ✓ octanu celulozy(acetat) o długości 19 mm, wyprodukowane przez Philip Morris Polska S.A.



Opracowanie wyników z badań laboratoryjnych

Receptury oraz parametry technologiczne świeżych zaczynów uszczelniających wytypowanych do badań laboratoryjnych przedstawiono w **Tabelach 1.1.7_16 - 20**.

Na podstawie analizy wyników uzyskanych z badań laboratoryjnych można wyciągnąć następujące szczegółowe wnioski odnośnie wpływu badanych dodatków w postaci włókien na kształtowanie się właściwości technologicznych świeżych i stwardniałych zaczynów uszczelniających:

- dodatek 1% włókien polipropylenowych s stosunku do masy suchego cementu powoduje wzrost wytrzymałości na zginanie wczesnej niemalże o 25%/ Wytrzymałość wczesna na ściskanie próbki z dodatkiem 1% włókien polipropylenu jest większa od próbki bez dodatku o około 25%. W fazie

końcowej wiązania (po 28 dniach) wytrzymałość na zginanie jest wyższa od czystej próbki o około 9% natomiast wytrzymałość na ściskanie jest zaledwie większa o 0,5% (**Tabela 1.1.7_18**).

- dodatek polietylenu nie wpływa znacznie na wzrost parametrów wytrzymałościowych stwardniałego zaczynu cementowego. Najlepsze parametry w fazie wstępnej dojrzewania uzyskano dla dodatku 0,5 % włókien polietylenowych w stosunku do masy suchego cementu. Był to wzrost o 11% dla wytrzymałości na zginanie oraz tylko 1% wytrzymałości na ściskanie. W okresie końca dojrzewania zaobserwowano spadek wytrzymałości w stosunku do próbki czystego zaczynu. W przypadku wytrzymałości na ściskanie i zginanie różnica między próbka wzorcowa a próbka z dodatkiem 0,5 % włókien polietylenowych wynosiła 16%. Zaobserwowano tendencje, iż ze wzrostem zawartości fazy włókien następowało obniżenie parametrów wytrzymałościowych dla zaczynu po 28 dniach.
- dodatek octanu celulozy powodował drastyczne obniżenie parametrów wytrzymałościowych. Przy dodatku 0,5% octanu celulozy wytrzymałość na zginanie w fazie początkowej obniżała się w stosunku do czystego zaczynu o około 35% natomiast w fazie kocowej o około 40%. Wytrzymałość na ściskanie w fazie początkowej jest niższa w stosunku do czystego zaczynu o 10%, natomiast w fazie kocowej dojrzewania jest już o 43% niższa. Wraz ze wzrostem zawartości procentowej octanu celulozy w zaczynie drastycznie obniżają się parametry wytrzymałościowe. Związane jest to z zatrzymywanie dużej ilości wody w włóknach.
- Wpływ koncentracji włókien polietylenowych, propylenowych oraz octanu celulozy w zaczynach oddziałuje na parametry świeżych i stwardniałych zaczynów uszczelniających powodując (**Tabela 1.1.7_17 i 18**):
 - ✓ obniżenie filtracji,
 - ✓ obniżenie rozlewności,
 - ✓ obniżenia lepkości plastycznej,
 - ✓ obniżenia lepkości pozornej,
 - ✓ pogorszenia parametrów reologicznych,
 - ✓ obniżenia gęstości zaczynu,
 - ✓ zwiększenie wytrzymałości mechanicznej na zginanie,
 - ✓ zwiększenie wytrzymałości mechanicznej na ściskanie.
- Spośród znanych modeli reologicznych na szczególną uwagę zasługuje model cieczy plastyczno lepkiej Herschela-Bulkleya. Model ten należy uznać za jeden z modeli najdokładniej opisujących zachowanie rzeczywistych płynów, stosowanych w pracach uszczelniających. Wiąże on bowiem ze sobą zarówno właściwości plastyczne jak lepkie rzeczywistych zaczynów uszczelniających stosowanych podczas cementowania kolumn rur okładzinowych (**Tabela 1.1.7_19 i 20** oraz **Fig. 1.1.7_51 i 52**).

- Zastosowanie dodatków w postaci włókien polietylenowych, polipropylenowych i octanu celulozy pozwala na znaczną modyfikację mikrostruktury oraz cech wytrzymałościowych zaczynów.
- Włókna polipropylenowe, polietylenowe są chemicznie obojętne i odporne na alkalia, dzięki czemu zmniejszają podatność stwardniałego zaczynu cementowego na korozyjne wpływy środowiska otworowego a zwłaszcza w przypadku geologicznego składowania CO₂.

Tabela 1.1.7_16 Receptury zaczynów uszczelniających sporządzonych na bazie cementu wieloskładnikowego CEM II/B-V 32,5R oraz innych składników oraz czasu wiązania

Lp.	Oznaczenie zaczynu uszczelniającego [-]	Ciecz zarobowa [dm ³]	Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/B-V 32,5R [kg]	Włókna polietylenowe [kg]	Włókna polipropylenowe [kg]	Włókna octanu celulozy [kg]	Współczynnik wodno-mieszaninowy w/m [-]	Czas wiązania [godz.]
1	CEM II/B-V 32,5 R	0,5	1	0	0	0	0,5	2
2	CEM II/B-V 32,5 R +0,5% polietylenu	0,5	1	0,0050	0	0	0,5	2
3	CEM II/B-V 32,5 R +0,75% polietylenu	0,5	1	0,0075	0	0	0,5	2
4	CEM II/B-V 32,5 R +1% polietylenu	0,5	1	0,0100	0	0	0,5	2,
5	CEM II/B-V 32,5 R +0,5% polipropylenu	0,5	1	0	0,0050	0	0,5	2
6	CEM II/B-V 32,5 R +0,75% popipropylenu	0,5	1	0	0,0075	0	0,5	2
7	CEM II/B-V 32,5 R +1% popipropylenu	0,5	1	0	0,0100	0	0,5	2
8	CEM II/B-V 32,5 R +0,5% octanu celulozy	0,5	1	0	0	0,0050	0,5	2,5
9	CEM II/B-V 32,5 R +0,75% octanu celulozy	0,5	1	0	0	0,0075	0,5	2,5

10	CEM II/B-V 32,5 R +1% octanu celulozy	0,5	1	0	0	0,0100	0,5	2,5
----	---------------------------------------	-----	---	---	---	--------	-----	-----

Tabela 1.1.7_17 Parametry technologiczne zaczynów uszczelniających określone laboratoryjnie w temperaturze 20 (±2°C) [293 K]

Lp.	Współczynnik wodno-mieszaninowy [-]	Gęstość [kg/m ³]	Rozlewność wg Stożka AzNII [mm]	Lepkość względna wg Kubka Forda nr. 4 [s]	Filtracja właściwa [cm ³]	Lepkość plastyczna η_p [Pa*s]	Lepkość pozorną η_a [Pa*s]	Granica płynięcia τ_y [Pa]
1	0,5	1,7	190	30	50	44	71	26
2	0,5	1,7	180	40	50	30	100	67
3	0,5	1,7	170	*	40	46	83	36
4	0,5	1,7	160	*	35	61	66	4
5	0,5	1,7	170	38	45	28	46	17
6	0,5	1,7	160	42	42	29	49	19
7	0,5	1,7	150	45	38	30	53	22
8	0,5	1,7	140	*	34	75	90	14
9	0,5	1,7	130	*	30	38	59	20
10	0,5	1,7	130	*	25	1	28	26

Tabela 1.1.7_18 Wytrzymałość mechaniczna na ściskanie i zginanie kamienia uszczelniającego
w temperaturze 20 (±2°C) [293 K]

Lp.	Oznaczenie zaczynu uszczelniającego [-]	Współczynnik wodno- mieszaninowy [-]	Wytrzymałość na zginanie, [MPa]				Wytrzymałość na ściskanie, [MPa]			
			Po czasie utwardzania [doba]				Po czasie utwardzania [doba]			
			2	7	14	28	2	7	14	28
1	CEM II/B-V 32,5 R	0,5	2,798	4,435-	6,508	7,296	9,750	16,245	25,752	37,831
2	CEM II/B-V 32,5 R +0,5% polietylenu	0,5	3,109	4,696	6,473	6,301	9,872	15,653	23,177	32,850
3	CEM II/B-V 32,5 R +0,75% polietylenu	0,5	2,896	4,610	6,217	6,297	9,263	15,108	22,355	31,299
4	CEM II/B-V 32,5 R +1% polietylenu	0,5	2,826	4,480	5,858	5,837	8,775	14,621	21,117	29,886
5	CEM II/B-V 32,5 R +0,5% polipropylenu	0,5	3,078	4,696	6,473	7,002	10,969	17,392	25,752	36,500
6	CEM II/B-V 32,5 R +0,75% popipropylenu	0,5	3,218	4,853	6,544	7,075	11,579	17,774	26,300	37,261
7	CEM II/B-V 32,5 R +1% popipropylenu	0,5	3,498	5,218	7,113	7,370	12,188	19,112	27,396	38,021
8	CEM II/B-V 32,5 R +0,5% octanu celulozy	0,5	1,845	2,893	3,687	4,411	8,775	15,305	18,284	21,875

9	CEM II/B-V 32,5 R +0,75% octanu celulozy	0,5	1,322	1,893	2,517	3,372	7,526	13,331	17,095	18,986
10	CEM II/B-V 32,5 R +1% octanu celulozy	0,5	1,090	1,512	1,982	2,221	6,825	12,996	15,451	17,521

Tabela 1.1.7_19 Parametry reologiczne zaczynów uszczelniających określone w temperaturze 20 (±2°C) [293 K] dla różnych modeli reologicznych

Receptura		1	2	3	4	5
Parametry reologiczne						
Model	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa*s]	0,0845	0,1310	0,1010	0,0706	0,0544
Newtona	Współczynnik korelacji [-]	0,8682	0,6925	0,7939	0,9184	0,7848
Model	Lepkość plastyczna [Pa*s]	0,0692	0,0978	0,0785	0,0591	0,0414
Binghama	Granica płynięcia [Pa]	9,9189	21,4055	14,5437	7,4328	8,3874
	Współczynnik korelacji [-]	0,9521	0,8882	0,9364	0,9843	0,9626
Model	Współczynnik konsystencji [Pa*s ⁿ]	1,6664	3,3225	2,8186	2,0842	2,5855
Ostwalda -de Waele'a	Wykładnik potęgowy [-]	0,5611	0,5403	0,5105	0,4733	0,4087
	Współczynnik korelacji [-]	0,9886	0,9275	0,9829	0,9765	0,9935
Model	Lepkość Cassona [Pa*s]	0,0530	0,0741	0,0561	0,0385	0,0248
Cassona	Granica płynięcia [Pa]	3,6892	8,6701	6,2879	3,6286	4,5701

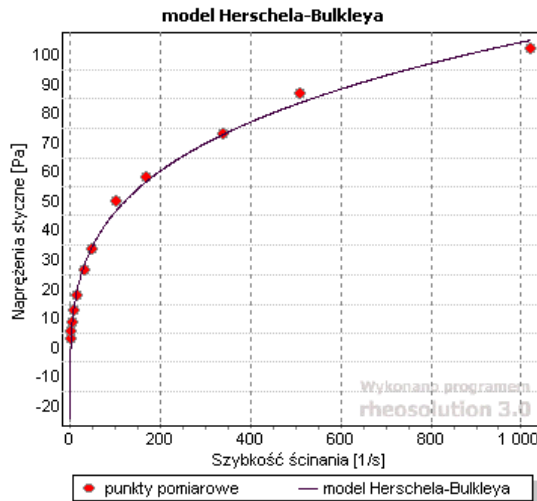
	Współczynnik korelacji [-]	0,9681	0,9149	0,9592	0,9920	0,9847
Model	Granica płynięcia [Pa]	-2,2375	-24,0803	-4,9043	4,6639	2,5207
Herschella - Bulkleya	Współczynnik konsystencji [Pa*s ⁿ]	3,1198	21,2370	6,3161	0,3497	1,3149
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4574	0,2605	0,3806	0,7420	0,5047
	Współczynnik korelacji [-]	0,9984	0,9977	0,9989	0,9908	0,9957

Tabela 1.1.7_20 Parametry reologiczne zaczynów uszczelniających określone w temperaturze 20 (±2°C) [293 K] dla różnych modeli reologicznych

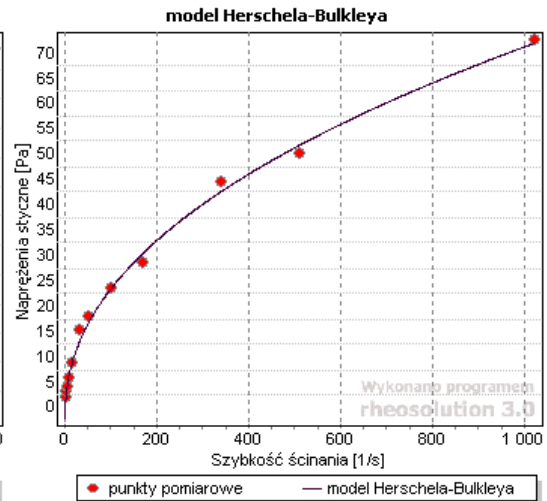
Receptura		6	7	8	9	10
Parametry reologiczne						
Model	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa*s]	0,0595	0,0638	0,0985	0,0705	0,0423
Newtona	Współczynnik korelacji [-]	0,7803	0,7797	0,8848	0,4998	0,0000
Model	Lepkość plastyczna [Pa*s]	0,0454	0,0490	0,0797	0,0483	0,0169
Binghama	Granica płynięcia [Pa]	9,0826	9,5571	12,0919	14,3366	16,4374
	Współczynnik korelacji [-]	0,9514	0,9396	0,9821	0,9485	0,6842
Model	Współczynnik konsystencji [Pa*s ⁿ]	2,4756	2,2287	4,1029	5,8958	8,5233
Ostwalda-de Waele'a	Wykładnik potęgowy [-]	0,4347	0,4678	0,4145	0,3171	0,2021
	Współczynnik korelacji [-]	0,9976	0,9937	0,9631	0,9811	0,9319

Model	Lepkość Cassona [Pa*s]	0,0289	0,0332	0,0473	0,0236	0,0058
Cassona	Granica płynięcia [Pa]	4,6229	4,4767	6,6600	9,3222	12,7485
	Współczynnik korelacji [-]	0,9763	0,9647	0,9898	0,9766	0,8026
Model	Granica płynięcia [Pa]	0,5627	-1,7802	8,5887	5,7041	18,8124
Herschella-Bulkleya	Współczynnik konsystencji [Pa*s ⁿ]	2,3041	3,5223	0,4353	2,3024	0,0000
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4412	0,3952	0,7536	0,4484	10,0000
	Współczynnik korelacji [-]	0,9980	0,9979	0,9878	0,9857	0,3738

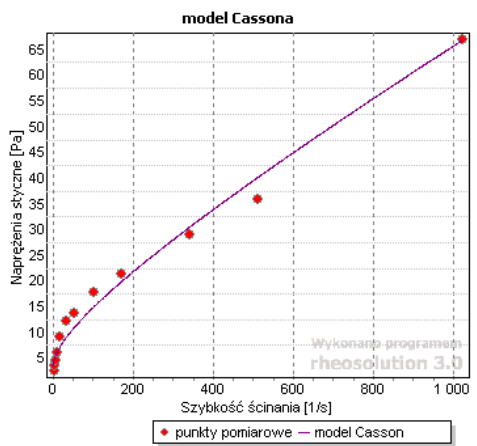
a)



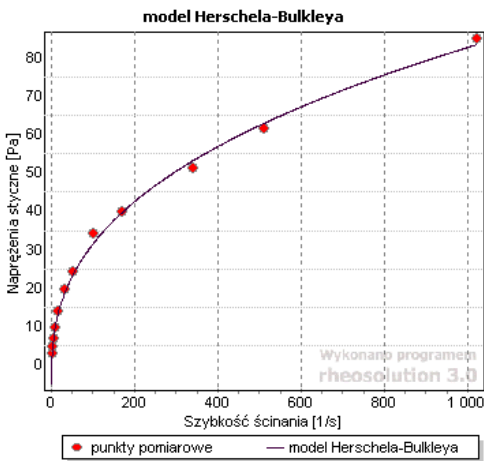
b)



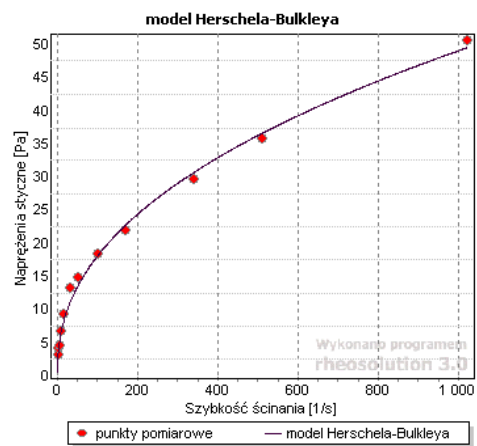
c)



d)



e)



f)

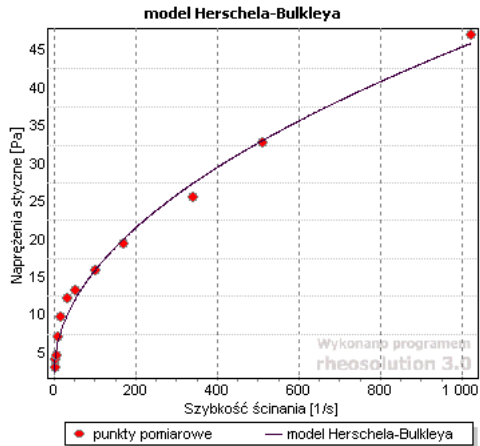
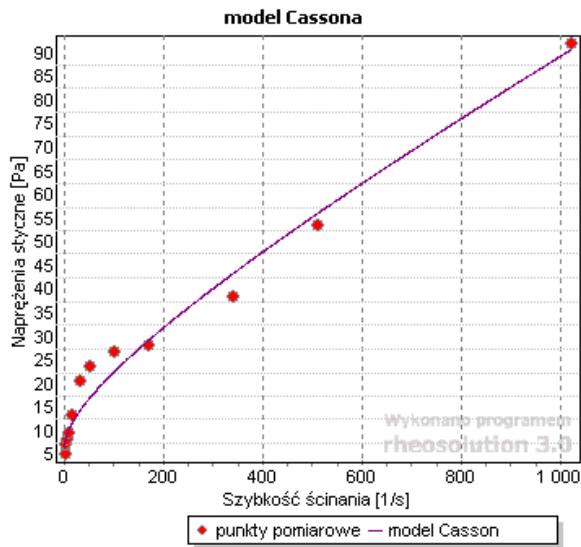
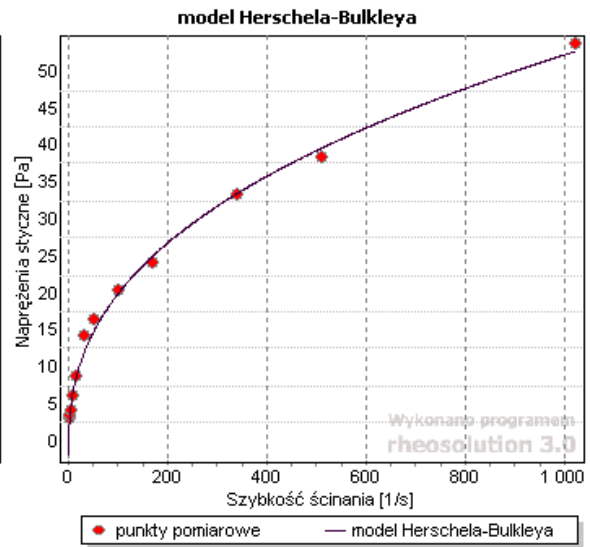


Fig. 1.1.7_51 Wykresy zależności naprężeń stycznych od prędkości ścinania przedstawione najlepiej dopasowanym modelem reologicznym: a) czysty zaczyn, b) CEM II/B-V 32,5 R +0,5% PE, c) CEM II/B-V 32,5 R +0,75% PE, d) CEM II/B-V 32,5 R +1% PE, e) CEM II/B-V 32,5 R +0,5% PP, f) CEM II/B-V 32,5 R +1% PP.

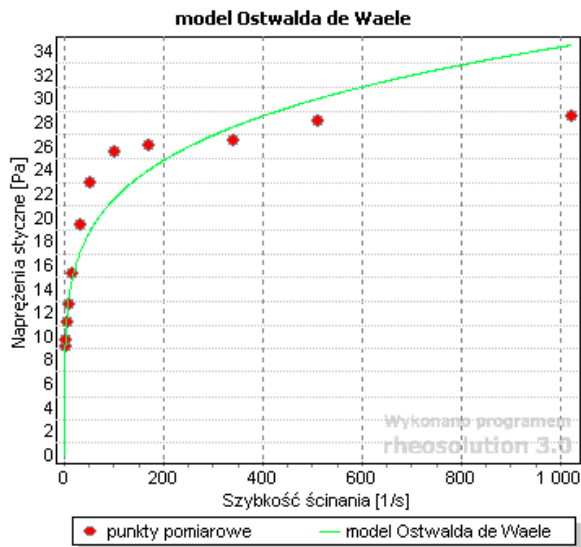
a)



b)



c)



d)

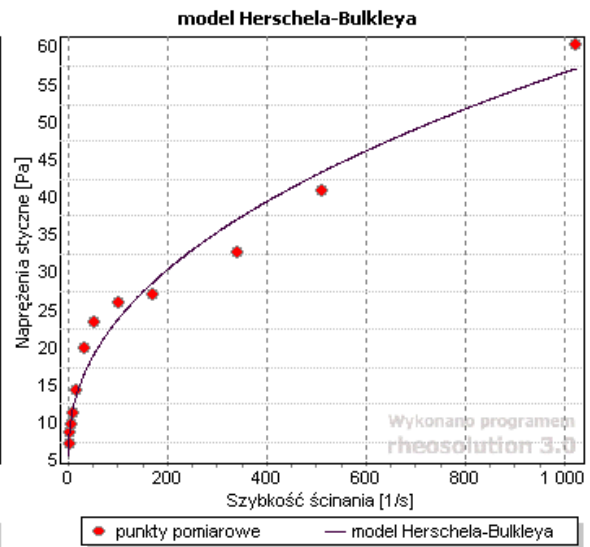


Fig. 1.1.7_52 Wykresy zależności naprężeń stycznych od prędkości ścinania przedstawione najlepiej dopasowanym modelem reologicznym: a) CEM II/B-V 32,5 R +1% PP, b) CEM II/B-V 32,5 R +0,5% OC, c) CEM II/B-V 32,5 R +0,75% OC, d) CEM II/B-V 32,5 R +1% OC.

Zagadnienia stanu technicznego i szczelności otworów - badania laboratoryjne skał o niskiej przepuszczalności

(Rafał Smulski, Stanisław Nagy, Rafał Wiśniowski, Łukasz Klimkowski, Tomasz Włodek, Krzysztof Polański)

W ramach tematu WWNiG AGH wykonano analizy przepuszczalności pionowej próbek skał uszczelniających w otworach położonych na obszarze badań. Oznaczenia wykonano na próbkach rdzeni dostarczonych przez PIG oraz przy wykorzystaniu danych o ich porowatości, otrzymanych w wyniku badań porozymetrem helowym. Ze względu na przydatność poszczególnych rdzeni do analizy wybrano próbki z następujących odwiertów: Abramów - 7 (1325,2 m), Chociwel - 2 (2095,4 m), Chociwel - 2 (2120,7 m), Garwolin - 1 (1970,8 m), Garwolin - 1 (1972,4 m), Gostynin IG-1A (1870,1 m), Gostynin IG-1A (1930,7 m), Gostynin IG-1A (2053,7 m), Janowiec - 3 (1147,1 m), Młyny - 1 (840,5 m), Pławno - 1 (1186,5 m), Przybyłów - 1 (1854,1 m), Przybyłów - 1 (1932,3), Polik IG-1 (2100,8 m), Radęcin - 1 (916,9 m), Świdnik IG-1 (1118,1 m), Wierzchowo - 12 (1937,1 m), Wojszyce IG-4 (2080,1 m) i Wojszyce IG-4 (2124,3 m).

Stanowisko badawcze oraz metodyka badań skał o niskiej przepuszczalności

Badania przepuszczalności próbek rdzeni skał uszczelniających przeprowadzono przy wykorzystaniu stanowiska badawczego, którego głównym elementem jest Pulse Decay Permeameter PDP-200 firmy Core Laboratories. System PDP-200 zaprojektowany został do oznaczania ultra niskich przepuszczalności (w zakresie od 0,1 mD do 10 nD) w oparciu o zjawisko zanikania impulsu ciśnienia (ang. pulse decay pressure).



Fig. 1.1.7_53 Widok stanowiska badawczego

Budowa i zasada działania systemu PDP-200

Schemat ideowy pokazany na **Fig. 1.1.7_54** ilustruje tradycyjny „pulse decay system”, który składa się z następujących głównych elementów: dopływowego referencyjnego zbiornika gazu o objętości V_1 , wysokociśnieniowej komory rdzenia (ang. coreholder typu Hassler) zawierającej próbkę skalną o objętości porowej V_p , odpływowego zbiornika referencyjnego gazu o objętości V_2 , przetwornika różnicy ciśnieniem mierzącego w sposób ciągły różnicę ciśnień pomiędzy zbiornikami V_1 i V_2 i drugiego przetwornika ciśnienia mierzącego ciśnienie p_2 w zbiorniku odpływowym.

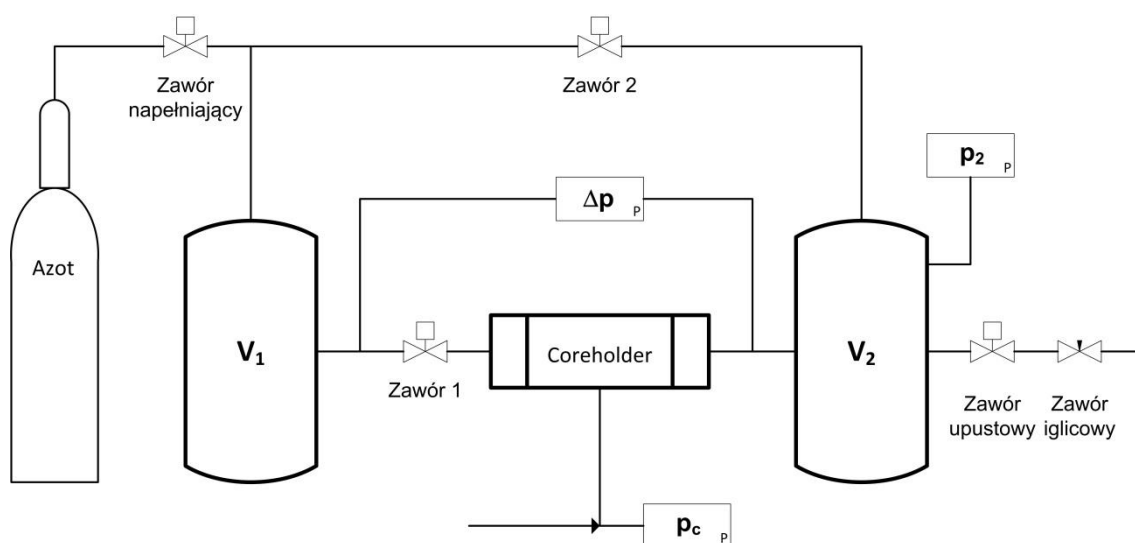


Fig. 1.1.7_54 Schemat systemu PDP-200

System nie wymaga przyrządu do pomiaru natężenia przepływu. Podczas przepływu gazu ze zbiornika dopływowego ciśnienie w nim zmniejsza się w czasie, natomiast w zbiorniku odpływowym wzrasta. Natężenie przepływu zatem będzie obliczone ze znanych wielkości, tj. objętości zbiorników referencyjnych, ściśliwości gazu oraz wielkości zmian ciśnienia. Stosunek chwilowego objętościowego natężenia przepływu do wielkości zmian ciśnienia w czasie jest równy iloczynowi objętości zbiornika referencyjnego i efektywnej ściśliwości gazu i tego zbiornika. Iloczyn ten określany jest jako „compressive storage” zbiornika. Do badań próbek skalnych o niskiej przepuszczalności (mniejszej niż 0,1 mD) stosuje się zbiorniki o odpowiednio małej objętości, typowo jeden do pięciu razy większej od objętości porowej próbki. Otwierając zawór napełniający oraz zawory 1 i 2 wypełnia się zbiorniki referencyjne i próbkę skalną czystym suchym azotem do ciśnienia o wartości pomiędzy 1000 a 2000 psi. Zastosowanie tak wysokiego ciśnienia gazu zmniejsza wpływ tzw. prześlizgu gazu i jego ściśliwości na wyniki pomiaru. Po zamknięciu zaworu napełniającego w całym systemie nastąpi wyrównanie ciśnienia do wartości $p_2(0)$. Proces ten może zabrać kilka minut lub godzin, w zależności od przepuszczalności próbki. Następnie zamykane są zawory 1 i 2, a ciśnienie w zbiorniku dopływowym jest zwiększane o 1-3% ciśnienia $p_1(0)$. Po osiągnięciu równowagi termicznej w systemie otwierany jest zawór 1, co wywołuje impuls ciśnienia przepływający przez próbkę. Zmiany różnicy ciśnień w

zbiornikach referencyjnych oraz ciśnienie w zbiorniku po stronie odpływowej są rejestrowane przez cały okres prowadzenia badania.

Metodyka obliczania przepuszczalności w technice pomiaru zanikania impulsu ciśnienia

Rejestrowane podczas eksperymentu dane są analizowane przy wykorzystaniu rozwiązania równania dyfuzji, otrzymanego z kombinacji różniczkowej postaci prawa Darcy z równaniem ciągłości. Zakłada się, że próbka jest początkowo pod stałym ciśnieniem porowym $p_2(0)$ w całej swojej objętości. Następnie, jak opisano powyżej, w czasie $t = 0$ ciśnienie w referencyjnym zbiorniku dopływowym zwiększane jest nieznacznie o wartość $\Delta p(0)$. Kiedy gaz przepływa ze zbiornika o objętości V_1 do próbki, ciśnienie w zbiorniku spada. Ciśnienie w zbiorniku o objętości V_2 pozostaje stałe przez krótki okres czasu, aż do przejścia impulsu ciśnienia przez całą długość próbki skalnej L . Potem ciśnienie w zbiorniku odpływowym wzrasta. Ponieważ ciśnienie w zbiorniku dopływowym $p_1(t)$ maleje, a w zbiorniku odpływowym $p_2(t)$ rośnie, różnica ciśnień $\Delta p(t)$ spada i stopniowo zbliża się do zera. Ogólne rozwiązanie dla różnicy ciśnienia w funkcji czasu (Dicker & Smits, 1988) przedstawia się następująco:

$$\Delta p_D = 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{a(b^2 + \theta_m^2) - (-1)^m b \sqrt{(a^2 + \theta_m^2)(b^2 + \theta_m^2)}}{\theta_m^2 (\theta_m^2 + a + a^2 + b + b^2) + ab(a + b + ab)} \times \exp(-\theta_m^2 t_D) \quad (1)$$

gdzie:

$$\Delta p_D \equiv \frac{p_1(t)^2 - p_2(t)^2}{p_1(0)^2 - p_2(0)^2} = \frac{\Delta p(t) \left[p_2(t) + \frac{1}{2} \Delta p(t) \right]}{\Delta p(0) \left[p_2(0) + \frac{1}{2} \Delta p(0) \right]} \quad (2)$$

$$\tan \theta = \frac{(a+b)\theta}{\theta^2 - ab} \quad (3)$$

$$t_D = \frac{k_g t}{\mu_g \varphi (c_g + c_{pv}) L^2} \quad (4)$$

$$a = \frac{V_p (c_g + c_{pv})}{V_1 (c_g + c_{V_1})} \quad (5)$$

$$b = \frac{V_p (c_g + c_{pv})}{V_2 (c_g + c_{V_2})} \quad (6)$$

gdzie: Δp_D - bezwymiarowa różnica ciśnienia,

θ - pierwiastek równania (3) (Haskett et al, 1988),

V_p - objętość porowa próbki,

V_1 - objętość referencyjnego zbiornika dopływowego,

V_2 - objętość referencyjnego zbiornika odpływowego,

c_g - ściśliwość gazu,

c_{v1}, c_{v2} - ściśliwości zbiorników referencyjnych,

c_{pv} - ściśliwość próbki skalnej,

m - indeks oznaczający numer pierwiastka,

k_g - przepuszczalność gazu,

μ_g - lepkość gazu,

φ - porowatość próbki skalnej.

Po dokonaniu uproszczeń przez podstawienia i pominięciu członów równań mających zaniedbywalny wpływ na wyniki obliczeń, równanie (1) redukuje się do pojedynczego członu wykładniczego, który możemy zapisać jako:

$$\ln[\Delta p_D] = \ln[f_0] - \left[\frac{k_g \theta_1^2}{(c_g - c_{pv}) \mu_g \varphi L^2} \right] t \quad (7)$$

gdzie:

$$f_0 = \frac{2 \left[a(b^2 + \theta_1^2) + b \sqrt{(a^2 + \theta_1^2)(b^2 + \theta_1^2)} \right]}{\theta_1^2 (\theta_1^2 + a + a^2 + b + b^2) + ab(a + b + ab)} \quad (8)$$

W ten sposób, jeżeli eksperymentalnie otrzymane wielkości $\ln[\Delta p_D]$ zostaną wykreślone w funkcji czasu, wynikiem będzie linia prosta (za wyjątkiem danych otrzymanych w pierwszej fazie eksperymentu, w okresie kiedy impuls ciśnienia nie "przeszedł" jeszcze przez próbkę). Linia ta ma punkt przecięcia z osią czasu $\ln[f_0]$ i nachylenie (ang. slope), którego wartość bezwzględna równa jest stosunkowi zmiennych w nawiasach kwadratowych równania (7). Zakładając, że zbiorniki referencyjne są sztywne (nieelastyczne), ściśliwości zbiorników c_{v1} i c_{v2} stają się nieistotne w porównaniu do ściśliwości gazu c_g . Zatem podstawiając za $V_p = A\varphi L$ i wykorzystując definicję zmiennych a i b zwarte w równaniach (5) i (6) wartość bezwzględną nachylenia można zapisać jako:

$$|slope| = \frac{f_1 A k_g}{\mu_g L c_g} \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right) \quad (9)$$

gdzie:

$$f_1 = \frac{\theta_1^2}{a+b} \quad (10)$$

Podczas pomiaru wartość bezwzględna nachylenia będzie początkowo wysoka i spadnie szybko do wartości, która będzie się utrzymywać na stałym poziomie przez pozostały czas pomiaru. Po ustabilizowaniu się wartości nachylenia (slope = const.) dla kilku kolejnych odczytów $\Delta p(t_n)$ i $p_m(t_n)$, przecięcie i nachylenie liniowej części krzywej zanikania ciśnienia może być otrzymane przy pomocy regresji liniowej:

$$\ln \left[\frac{\Delta p(t_n) p_m(t_n)}{\Delta p(0) p_m(0)} \right] = b_0 + m_1 t_n \quad (11)$$

gdzie: b_0 jest przecięciem, a m_1 nachyleniem. Porównując równania (7) i (11) można określić f_0 jako:

$$f_0 = \exp(b_0) \quad (12)$$

Przepuszczalność próbki skalnej dla gazu wynosi więc:

$$k_g = \frac{m_1 \mu_g L f_z}{f_1 A p_m \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right)} \quad (13)$$

gdzie:

$$f_z = \frac{c_g}{\rho} \quad (14)$$

W dalszej części opracowania zamieszczono tabelaryczne zestawienia wartości podstawowych parametrów zarejestrowanych podczas badań poszczególnych próbek skalnych oraz wyniki obliczeń przepuszczalności dla gazu, wykonanych według wyżej opisanej metodyki.

Tab. 1.1.7_21 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 9254

Nazwa odwiertu	Abramów - 7
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1325,2
Porowatość, [%]	1,4
Długość próbki, [cm]	3,8
Średnica próbki, [cm]	2,54
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	19,245
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,26943
Masa suchej próbki, [g]	47,4510
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,5006
Temperatura, [°C]	23,0
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	992
Przepuszczalność, [mD]	0,0000367

Tab. 1.1.7_22 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 966

Nazwa odwiertu	Chociwel - 2
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	2095,4
Porowatość, [%]	5,14
Długość próbki, [cm]	4,40
Średnica próbki, [cm]	2,60
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	23,349
Objętość porowa próbki, [cm ³]	1,20013
Masa suchej próbki, [g]	59,1076
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6686
Temperatura, [°C]	24,6
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	1001
Przepuszczalność, [mD]	0,0125139

Tab. 1.1.7_23 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 967

Nazwa odwiertu	Chociwel - 2
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	2120,7
Porowatość, [%]	7,06
Długość próbki, [cm]	4,65
Średnica próbki, [cm]	2,58
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	24,298
Objętość porowa próbki, [cm ³]	1,71543
Masa suchej próbki, [g]	59,3703
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6290
Temperatura, [°C]	23,2
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	996
Przepuszczalność, [mD]	0,0116922

Tab. 1.1.7_24 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 8604

Nazwa odwiertu	Garwolin - 1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1970,8
Porowatość, [%]	7,76
Długość próbki, [cm]	2,96
Średnica próbki, [cm]	2,48
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	14,291
Objętość porowa próbki, [cm ³]	1,10898
Masa suchej próbki, [g]	34,8166
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6412
Temperatura, [°C]	22,7
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	1007
Przepuszczalność, [mD]	0,0060853

Tab. 1.1.7_25 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 8605

Nazwa odwiertu	Garwolin - 1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1972,4
Porowatość, [%]	4,46
Długość próbki, [cm]	2,85
Średnica próbki, [cm]	2,48
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	13,760
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,61369
Masa suchej próbki, [g]	34,0211
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,5879
Temperatura, [°C]	23,3
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	1011
Przepuszczalność, [mD]	0,0002681

Tab. 1.1.7_26 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 8495

Nazwa odwiertu	Gostynin IG-1A
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1870,1
Porowatość, [%]	4,24
Długość próbki, [cm]	4,75
Średnica próbki, [cm]	2,48
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	22,933
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,97236
Masa suchej próbki, [g]	61,5204
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,8014
Temperatura, [°C]	23,6
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	997
Przepuszczalność, [mD]	0,0002076

Tab. 1.1.7_27 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 8497

Nazwa odwiertu	Gostynin IG-1A
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1930,7
Porowatość, [%]	1,52
Długość próbki, [cm]	3,12
Średnica próbki, [cm]	2,49
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	15,185
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,23081
Masa suchej próbki, [g]	39,6180
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6493
Temperatura, [°C]	23,2
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	1012
Przepuszczalność, [mD]	0,0015932

Tab. 1.1.7_28 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 8500

Nazwa odwiertu	Gostynin IG-1A
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	2053,7
Porowatość, [%]	8,22
Długość próbki, [cm]	2,90
Średnica próbki, [cm]	2,47
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	13,889
Objętość porowa próbki, [cm ³]	1,14167
Masa suchej próbki, [g]	35,0374
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,7486
Temperatura, [°C]	23,3
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	1012
Przepuszczalność, [mD]	0,2892413

Tab. 1.1.7_29 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 821

Nazwa odwiertu	Janowiec - 3
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1147,1
Porowatość, [%]	8,38
Długość próbki, [cm]	3,90
Średnica próbki, [cm]	2,60
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	20,696
Objętość porowa próbki, [cm ³]	1,73432
Masa suchej próbki, [g]	49,7737
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6250
Temperatura, [°C]	22,0
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	999
Przepuszczalność, [mD]	0,0002719

Tab. 1.1.7_30 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 912

Nazwa odwiertu	Młyny - 1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	840,5
Porowatość, [%]	11,2
Długość próbki, [cm]	3,80
Średnica próbki, [cm]	2,60
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	20,165
Objętość porowa próbki, [cm ³]	2,25848
Masa suchej próbki, [g]	46,3873
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,5905
Temperatura, [°C]	20,0
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	1001
Przepuszczalność, [mD]	0,0001963

Tab. 1.1.7_31 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 879

Nazwa odwiertu	Pławno - 1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1186,5
Porowatość, [%]	9,35
Długość próbki, [cm]	4,63
Średnica próbki, [cm]	2,58
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	24,193
Objętość porowa próbki, [cm ³]	2,26204
Masa suchej próbki, [g]	70,5121
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	3,2152
Temperatura, [°C]	23,3
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	996
Przepuszczalność, [mD]	0,0002946

Tab. 1.1.7_32 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 871

Nazwa odwiertu	Przybyłów - 1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1854,1
Porowatość, [%]	8,94
Długość próbki, [cm]	3,73
Średnica próbki, [cm]	2,58
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	19,490
Objętość porowa próbki, [cm ³]	1,74240
Masa suchej próbki, [g]	45,5407
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,5600
Temperatura, [°C]	21,5
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	1007
Przepuszczalność, [mD]	0,0878808

Tab. 1.1.7_33 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 873

Nazwa odwiertu	Przybyłów - 1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1932,3
Porowatość, [%]	0,57
Długość próbki, [cm]	3,82
Średnica próbki, [cm]	2,59
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	20,116
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,11466
Masa suchej próbki, [g]	52,8917
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6444
Temperatura, [°C]	22,2
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	1001
Przepuszczalność, [mD]	0.0001004

Tab. 1.1.7_34 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 8575

Nazwa odwiertu	Polik IG-1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	2100,8
Porowatość, [%]	4,78
Długość próbki, [cm]	5,55
Średnica próbki, [cm]	2,46
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	26,365
Objętość porowa próbki, [cm ³]	1,26024
Masa suchej próbki, [g]	67,3376
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6823
Temperatura, [°C]	22,8
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	995
Przepuszczalność, [mD]	0,1219995

Tab. 1.1.7_35 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 946

Nazwa odwiertu	Radęcin - 1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	916,9
Porowatość, [%]	19,36
Długość próbki, [cm]	4,58
Średnica próbki, [cm]	2,52
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	22,832
Objętość porowa próbki, [cm ³]	4,42027
Masa suchej próbki, [g]	53,6340
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,9130
Temperatura, [°C]	22,9
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	995
Przepuszczalność, [mD]	0,0656041

Tab. 1.1.7_36 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 9492

Nazwa odwiertu	Świdnik IG-1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1118,1
Porowatość, [%]	1,62
Długość próbki, [cm]	3,80
Średnica próbki, [cm]	2,54
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	19,245
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,31176
Masa suchej próbki, [g]	52,7232
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,7847
Temperatura, [°C]	22,3
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	991
Przepuszczalność, [mD]	0,0000360

Tab. 1.1.7_37 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 889

Nazwa odwiertu	Wierzchowo - 12
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1937,1
Porowatość, [%]	10,0
Długość próbki, [cm]	4,35
Średnica próbki, [cm]	2,58
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	22,730
Objętość porowa próbki, [cm ³]	2,27527
Masa suchej próbki, [g]	56,4227
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,7584
Temperatura, [°C]	23,3
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	1000
Przepuszczalność, [mD]	0,0015252

Tab. 1.1.7_38 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 8467

Nazwa odwiertu	Wojszyce IG-4
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	2080,1
Porowatość, [%]	5,58
Długość próbki, [cm]	3,35
Średnica próbki, [cm]	2,47
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	16,044
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,89525
Masa suchej próbki, [g]	39,9526
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6374
Temperatura, [°C]	22,4
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	1007
Przepuszczalność, [mD]	0,0031973

Tab. 1.1.7_39 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 8470

Nazwa odwiertu	Wojszyce IG-4
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	2124,3
Porowatość, [%]	3,05
Długość próbki, [cm]	1,89
Średnica próbki, [cm]	2,48
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	9,125
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,27831
Masa suchej próbki, [g]	23,5539
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6625
Temperatura, [°C]	22,6
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	1012
Przepuszczalność, [mD]	0,0029619

Zagadnienia stanu technicznego i szczelności otworów - badania laboratoryjne skał o niskiej przepuszczalności, c.d.

(Rafał Smulski, Stanisław Nagy, Rafał Wiśniowski, Łukasz Klimkowski, Tomasz Włodek, Krzysztof Polański)

W ramach tematu WWNiG AGH wykonał analizy przepuszczalności pionowej próbek skał uszczelniających w otworach położonych na obszarze badań. Oznaczenia wykonano na próbkach rdzeni dostarczonych przez PIG oraz przy wykorzystaniu danych o ich porowatości, otrzymanych w wyniku badań porozymetrem helowym. Ze względu na przydatność poszczególnych rdzeni do analizy wybrano próbki z następujących odwiertów: Brześć Kujawski IG-1 (1040,7 m), Charzykowy IG-1 (1401,6 m), Czaplinek IG-1 (1923,7 m), Czaplinek IG-1 (2221,9 m), Jamno IG-1 (1125,6 m), Kłanino - 3 (2455,2 m), Kłanino - 3 (2460,1 m), Kłanino - 3 (2465,1 m), Kurowo - 2 (2169,4 m), Szczecin IG-1 (1738,3 m), Wolin IG-1 (1427,3 m) i Wolin IG-1 (1899,7 m).

Tab. 1.1.7_40 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 2481

Nazwa odwiertu	Brześć Kujawski IG-1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1040,7
Porowatość, [%]	0,49
Długość próbki, [cm]	4,64
Średnica próbki, [cm]	2,62
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	25,003
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,122514
Masa suchej próbki, [g]	66,9229
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6898
Temperatura, [°C]	24,5
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	988
Przepuszczalność, [mD]	0,0001343

Tab. 1.1.7_41 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 2420

Nazwa odwiertu	Charzykowy IG-1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1401,6
Porowatość, [%]	1,67
Długość próbki, [cm]	3,07
Średnica próbki, [cm]	2,62
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	16,543

Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,276268
Masa suchej próbki, [g]	43,8761
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6973
Temperatura, [°C]	25
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	988
Przepuszczalność, [mD]	0,0003415

Tab. 1.1.7_42 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 2465

Nazwa odwiertu	Czaplinek IG-1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1923,7
Porowatość, [%]	4,80
Długość próbki, [cm]	4,09
Średnica próbki, [cm]	2,61
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	21,871
Objętość porowa próbki, [cm ³]	1,049808
Masa suchej próbki, [g]	54,8241
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6331
Temperatura, [°C]	25
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	988
Przepuszczalność, [mD]	0,0038636

Tab. 1.1.7_43 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 2467

Nazwa odwiertu	Czaplinek IG-1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	2221,9
Porowatość, [%]	0,96
Długość próbki, [cm]	3,74
Średnica próbki, [cm]	2,62
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	20,153
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,19346
Masa suchej próbki, [g]	53,0436

Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6576
Temperatura, [°C]	25
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	988
Przepuszczalność, [mD]	0,0002568

Tab. 1.1.7_44 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 2403

Nazwa odwiertu	Jamno IG-1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1125,6
Porowatość, [%]	4,62
Długość próbki, [cm]	5,09
Średnica próbki, [cm]	2,61
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	27,219
Objętość porowa próbki, [cm ³]	1,257517
Masa suchej próbki, [g]	69,4511
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6752
Temperatura, [°C]	25
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	988
Przepuszczalność, [mD]	0,0036859

Tab. 1.1.7_45 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 2617

Nazwa odwiertu	Kłanino - 3
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	2455,2
Porowatość, [%]	3,53
Długość próbki, [cm]	4,39
Średnica próbki, [cm]	2,62
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	23,656
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,832691
Masa suchej próbki, [g]	62,1148
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,7216
Temperatura, [°C]	24,5

Ciśnienie barometryczne, [hPa]	988
Przepuszczalność, [mD]	0,0005245

Tab. 1.1.7_46 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 2618

Nazwa odwiertu	Kłanino - 3
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	2460,1
Porowatość, [%]	1,75
Długość próbki, [cm]	4,33
Średnica próbki, [cm]	2,61
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	23,155
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,405212
Masa suchej próbki, [g]	63,8255
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,8055
Temperatura, [°C]	25
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	988
Przepuszczalność, [mD]	0,0002430

Tab. 1.1.7_47 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 2619

Nazwa odwiertu	Kłanino - 3
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	2465,1
Porowatość, [%]	1,07
Długość próbki, [cm]	4,35
Średnica próbki, [cm]	2,61
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	23,262
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,248903
Masa suchej próbki, [g]	60,9559
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6898
Temperatura, [°C]	25
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	988
Przepuszczalność, [mD]	0,0008051

Tab. 1.1.7_48 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 2539

Nazwa odwiertu	Kurowo - 2
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	2169,4
Porowatość, [%]	3,93
Długość próbki, [cm]	4,37
Średnica próbki, [cm]	2,62
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	23,548
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,925436
Masa suchej próbki, [g]	60,2484
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6632
Temperatura, [°C]	24,5
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	988
Przepuszczalność, [mD]	0,0006757

Tab. 1.1.7_49 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 2515

Nazwa odwiertu	Szczecin IG-1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1738,3
Porowatość, [%]	5,84
Długość próbki, [cm]	5,35
Średnica próbki, [cm]	2,62
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	28,829
Objętość porowa próbki, [cm ³]	1,683613
Masa suchej próbki, [g]	77,1020
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,8403
Temperatura, [°C]	25
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	988
Przepuszczalność, [mD]	0,0003431

Tab. 1.1.7_50 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 2510

Nazwa odwiertu	Wolin IG-1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1427,3
Porowatość, [%]	2,54
Długość próbki, [cm]	5,18
Średnica próbki, [cm]	2,62
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	27,913
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,708990
Masa suchej próbki, [g]	74,5149
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,7391
Temperatura, [°C]	25
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	988
Przepuszczalność, [mD]	0,0020354

Tab. 1.1.7_51 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru przepuszczalności – próbka nr 2511

Nazwa odwiertu	Wolin IG-1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1899,7
Porowatość, [%]	6,26
Długość próbki, [cm]	4,68
Średnica próbki, [cm]	2,62
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	25,218
Objętość porowa próbki, [cm ³]	1,578646
Masa suchej próbki, [g]	63,9350
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,7046
Temperatura, [°C]	25
Ciśnienie barometryczne, [hPa]	988
Przepuszczalność, [mD]	0,0026010

Tab. 1.1.7_52 Tabela zbiorcza wyników pomiaru przepuszczalności dla gazu próbek rdzeni skalnych

Odwiert	Numer próbki	Głębokość [m]	Porowatość z porozymetru [%]	Przepuszczalność dla gazu [mD]
Brześć Kujawski IG-1	2481	1040,7	0,49	0,0001343
Charzykowy IG-1	2420	1401,6	1,67	0,0003415
Czaplinek IG-1	2465	1923,7	4,80	0,0038636
Czaplinek IG-1	2467	2221,9	0,96	0,0002568
Jamno IG-1	2403	1125,6	4,62	0,0036859
Kłanino - 3	2617	2455,2	3,53	0,0005245
Kłanino - 3	2618	2460,1	1,75	0,0002430
Kłanino - 3	2619	2465,1	1,07	0,0008051
Kurowo - 2	2539	2169,4	3,93	0,0006757
Szczecin IG-1	2515	1738,3	5,84	0,0003431
Wolin IG-1	2510	1427,3	2,54	0,0020354
Wolin IG-1	2511	1899,7	6,26	0,0026010

Zagadnienia stanu technicznego i szczelności otworów - badania laboratoryjne skał o niskiej przepuszczalności, określenie ciśnienia progowego skał uszczelniających

(Rafał Smulski, Stanisław Nagy, Łukasz Klimkowski)

W ramach tematu WWNiG AGH wykonał analizy ciśnienia progowego dla dwutlenku węgla dla próbek skał uszczelniających w otworach położonych na obszarze badań. Oznaczenia wykonano na próbkach rdzeni dostarczonych przez PIG oraz przy wykorzystaniu danych o ich porowatości, otrzymanych w wyniku badań porozymetrem helowym. Ze względu na przydatność poszczególnych rdzeni do rzeczonyj analizy wybrano próbki z następujących odwiertów²: Czaplinek IG-1 (1923,7), Garwolin - 1 (1970,8 m), Gostynin IG-1A (1870,1 m), Jamno IG-1 (1125,6), Kłanino - 3 (2455,2), Pławno - 1 (1186,5 m), Radęcin - 1 (916,9 m), Wolin IG-1 (1899,7 m), Wierzchowo - 12 (1937,1 m) i Wojszyce IG-4 (2124,3 m).

Metodyka wykonywania pomiarów laboratoryjnych do określania własności uszczelniających skał nadległych

Struktura geologiczna przeznaczona na składowisko, oprócz wymaganej pojemności i iniekcyjności musi posiadać odpowiedniej jakości uszczelnienie. Zgodnie z zasadami implementacji dyrektywy UE dotyczącej geologicznej sekwestracji CO₂, jak również innych światowych norm i wytycznych, jakość uszczelnienia jest podstawowym kryterium wyboru struktury. Zdolność skały uszczelniającej do zatrzymywania zatłoczonego CO₂ powinna zostać potwierdzona w ramach procesu charakteryzacji potencjalnego składowiska na drodze badań laboratoryjnych na rdzeniach.

Właściwości uszczelniające skał słabo przepuszczalnych wynikają z sił kapilarnych oddziałujących na styku solanki (fazy zwilżającej) i gazu (fazy niezwilżającej). Początkowo pomiary kapilarnego ciśnienia przebiccia dla skał słabo przepuszczalnych (uszczelniających) wykonywane były w kontekście charakteryzacji złóż węglowodorów (również pod kątem możliwości podnoszenia ciśnienia magazynowania w PMG). Jednakże uzyskane wyniki nie mogą być bezpośrednio wykorzystane jako wartości ciśnienia przebiccia CO₂ w procesach jego geologicznej sekwestracji. W związku ze znacznymi różnicami w napięciu powierzchniowym między układami CH₄/solanka czy N₂/solanka a CO₂/solanka spodziewane są mniejsze wartości ciśnienie przebiccia dwutlenku węgla. Poza tym możliwa jest również zmiana zwilżalności skały w obecności CO₂. W związku z powyższym właściwości uszczelniające skał nadległych pod kątem CCS wymagają bezpośrednich pomiarów (Li *et al.* 2005).

Jakość uszczelnienia charakteryzują w zasadzie dwa parametry: ciśnienie przemieszczenia (*displacement pressure*), które rozpoczyna infiltrację fazy gazowej do początkowo nasyconego wodą (solanką) systemu porowego skały uszczelniającej, oraz przepuszczalność względna dla fazy gazowej po jej przebicciu (*gas*

² Niektóre otwory leżą w obrębie struktur, niektóre nie, ale dobierano dostępne, w miarę możliwości reprezentatywne próbki regionalnych kompleksów uszczelniających.

breakthrough) (Hildenbrand i inni 2002). Przepuszczalność względna jest funkcją stosunku nasycenia gaz/woda systemu porowego, który niełatwo określić w przypadku skał drobnoziarnistych. Skuteczność uszczelnienia kapilarnego określana jest na drodze badań laboratoryjnych.

Mechanizm uszczelnienia kapilarnego

Podstawowym i dominującym mechanizmem transportu w migracji węglowodorów, zarówno w systemie porowym matrycy skalnej, jak i sieci szczelin, jest przepływ Darcy. W przypadku przepływu jednej fazy w równaniu Darcy przepuszczalność absolutna k_{abs} wiąże natężenie przepływu płynu q o określonej lepkości μ z gradientem ciśnienia ∇p .

$$q = A \frac{k_{abs}}{\mu} \nabla p$$

W sytuacji, kiedy w ośrodku porowatym występują dwie (lub więcej) fazy niemieszające się, wystąpi przepływ dwufazowy, któremu towarzyszyć będą efekty kapilarne. To właśnie siły kapilarne na styku fazy zwilżającej (solanka), która nasycza skałę uszczelniającą, i fazy niezwilżającej (nadkrytyczny CO₂) zakumulowanej w złożu determinują zdolność danej skały do zatrzymywania przepływu fazy niezwilżającej. Infiltracja fazy niezwilżającej do wyidealizowanego cylindrycznego kanału porowego o promieniu r możliwa jest jedynie po przekroczeniu jego ciśnienia kapilarnego, wyrażonego równaniem:

$$P_c = P_{nw} - P_w = \frac{2\sigma}{r} \cos \theta$$

gdzie:

σ – napięcie powierzchniowe (IFT) rozpatrywanego systemu płynów niezwilżającego i zwilżającego [Nm^{-1}],

θ – kąt kontaktu [$^\circ$],

r – promień kanału porowego [m].

Działanie mechanizmu uszczelnienia kapilarnego w kanale porowym skały uszczelniającej przedstawiono schematycznie na **Fig. 1.1.7_55**.

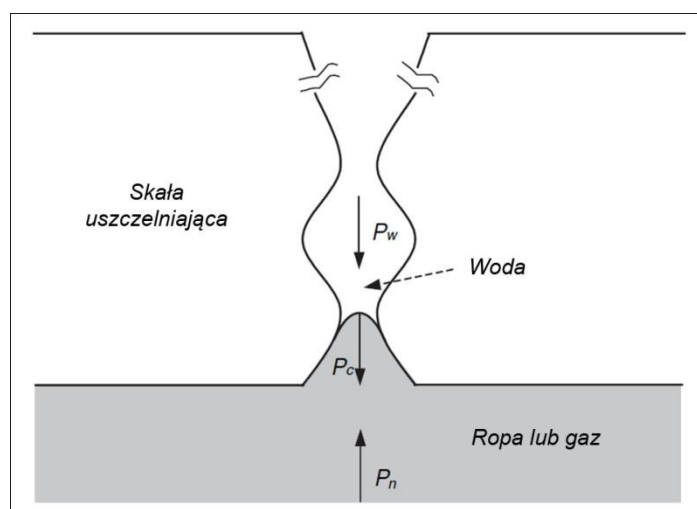


Fig. 1.1.7_55 Schemat działania mechanizmu uszczelnienia kapilarnego w kanale porowym skały uszczelniającej (Li et al, 2005)

Kiedy różnica ciśnień między fazą niezwilżającą i zwilżającą przekroczy wartość ciśnienia kapilarnego danego kanału porowego ($P_{nw} - P_w > P_c$), płyn niezwilżający będzie przemieszczał się wzdłuż tego kanału do momentu kiedy, napotka przekrój o mniejszej średnicy. Z kolei, gdy różnica ciśnień w przekroju skały uszczelniającej przekroczy ciśnienie kapilarne serii połączonych kanałów, utworzy się ciągła "strużka" fazy niezwilżającej, a w efekcie powolny przepływ Darcy. Ta wartość różnicy ciśnień definiowana jest jako ciśnienie przebicia (*breakthrough pressure*).

Etapy procesu przebicia

Proces przebicia płynu niezwilżającego przez ośrodek porowaty składa się z kilku etapów, a każdemu odpowiada charakterystyczna wartość ciśnienia tego płynu. Na początku procesu płyn niezwilżający wypełnia jedynie największe pory na powierzchni kontaktu. Jest to możliwe, kiedy ciśnienie zatłaczanego płynu przekroczy wartość ciśnienia kapilarnego wejściowego (*capillary entry pressure*) medium porowatego. Zatem przekroczenie tej pierwszej charakterystycznej wartości ciśnienia rozpoczyna migrację płynu niezwilżającego do systemu porowego skały uszczelniającej, ale przepływ w całym przekroju medium porowatego jeszcze nie występuje.

Dalszy wzrost ciśnienia płynu niezwilżającego powoduje otwieranie kolejnych, mniejszych, kanałów porowych, wypieranie fazy zwilżającej i wzrost nasycenia płynu niezwilżającego w systemie porowym. W trakcie tego etapu ciśnienie gazu jest wyższe od ciśnienia kapilarnego wejściowego, ale ciągle niższe od ciśnienia progowego (ciśnienia przebicia) ($p_c^e < p_c < p_c^{th}$). Można powiedzieć, że chociaż nastąpiła infiltracja płynu niezwilżającego do systemu porowego skały uszczelniającej, zachowuje ona jeszcze swoje właściwości uszczelniające. Następnym etapem jest powstanie ciągłej "ścieżki przepływu" wzdłuż całego przekroju ośrodka porowatego w postaci połączonych kanałów porowych o największych średnicach. Wartość ciśnienia, przy którym powstaje ta swoista wyrwa w systemie uszczelnienia kapilarnego nazywamy ciśnieniem przebicia (ciśnieniem progowym) (Schowalter 1979; Dullien 1992; Hildenbrand et al. 2002, Li et

al. 2005). Na tym etapie przepływ (wyciek) odbywa się niewielką częścią systemu porowego. W miarę podnoszenia ciśnienia przepływ rozszerza się na kolejne kanały porowe, rośnie nasycenie fazą niezwilżającą a tym samym przepuszczalność efektywna dla tej fazy.

Należy tutaj podkreślić różnicę między ciśnieniem kapilarnym wejścia a ciśnieniem przebicia. Pierwsze jest miarą średnicy największego pora na powierzchni próbki skalnej w danych warunkach zwilżalności skały i napięcia powierzchniowego płynów (Li *et al* 2005). Drugie określa warunki, przy których dojdzie do wycieku magazynowanego płynu ponad warstwę uszczelniającą.

Z kolei redukcja ciśnienia fazy niezwilżającej po przebiciu skutkować będzie ponownym "nasiąkaniem" fazą zwilżającą (*re-imbibition*) począwszy od porów o najmniejszej średnicy. Stopniowe zamykanie kolejnych "ścieżek przepływu" zmniejsza przepuszczalność dla gazu w rezultacie prowadząc do zatrzymania przepływu (wycieku). Dodatkowym efektem może być odcinanie części porów wypełnionych gazem od reszty systemu porowego i wynikające stąd rezydualne nasycenie fazą niezwilżającą (gazem).

Laboratoryjne metody pomiarowe

Porozymetria rtęciowa - najprostsza i najmniej czasochłonna metodą wyznaczania wartości progowego ciśnienia kapilarnego badanej skały (Egermann *et al* 2006). Jednak prostota okupiona jest tutaj szeregiem ograniczeń wynikających z założeń i możliwości samej porozymetrii rtęciowej. Podstawową niedoskonałością mogącą prowadzić do istotnych różnic między wynikami badania a rzeczywistością jest założenie cylindrycznej geometrii kanałów porowych. Jednocześnie zakres rozmiarów porów penetrowanych przez rtęć ograniczony jest przez maksymalne ciśnienie osiągnięte przez aparat pomiarowy, w związku z czym pory o najmniejszych rozmiarach (promień < 2.1 nm, Schlömer, Krooss 1997) mogą nie zostać ujawnione, co jest szczególnie istotne w przypadku drobnoziarnistych skał uszczelniających. Inną kwestią, która może mieć wpływ na uzyskiwane wyniki jest wybór sposobu przygotowania próbek, a w zasadzie jego ewentualny wpływ na zmianę oryginalnej struktury systemu porowego (Egermann *et al* 2006).

Kolejnym istotnym mankamentem metody opartej na porozymetrii rtęciowej jest brak ciśnienia uszczelniającego (*confining pressure*) w trakcie analizy, które w innych metodach, oprócz funkcji uszczelniającej, reprezentuje również naprężenia horyzontalne występujące *in situ*. Oczywistym jest, że w przypadku skał słabo przepuszczalnych jakimi są skały uszczelniające, właściwości petrofizyczne są silnie zależne od panujących naprężeń. Zatem brak ciśnienia zamykającego na powierzchni bocznej próbki może skutkować znacznym przekłamaniem uzyskanej wartości ciśnienia progowego (zwiększona przepuszczalność – zaniżona wartość ciśnienia przebicia).

Pomijając kwestie związane z samą porozymetrią rtęciową, problematyczne jest również finalne określenie ciśnienia progowego, a w zasadzie konwersja uzyskanej wartości na odpowiadającą docelowemu systemowi płynów. W pierwszej kolejności w oparciu o napięcie powierzchniowe między rtęcią i powietrzem oraz kąt kontaktu wyznaczamy ciśnienie progowe dla rtęci. Następnie, w związku z tym, że napięcia powierzchniowe między płynami stosowanymi w laboratorium (Hg - powietrze) oraz będącymi przedmiotem docelowej analizy (w omawianym przypadku CO₂ – solanka) różnią się, konieczna jest konwersja uzyskanych wyników zgodnie z zależnością (Busch *et al* 2010):

$$P_{c\text{ CO}_2/\text{brine}}^{\text{th}} = P_{c\text{ Hg}/\text{air}}^{\text{th}} \frac{\sigma_{\text{CO}_2/\text{brine}} \cos \theta_{\text{CO}_2/\text{brine}}}{\sigma_{\text{Hg}/\text{air}} \cos \theta_{\text{Hg}/\text{air}}}$$

W związku z tym, że wartość kąta kontaktu (zwilżalności) skały dwutlenkiem węgla często nie jest znana, przyjmuje się całkowitą wodo-zwilżalność ośrodka, czyli $\theta_{\text{CO}_2} = 0$. W świetle wyników ostatnich prac (Chiquet et al 2007), które pokazują, iż w obecności CO₂ skały uszczelniające mogą charakteryzować się zwilżalnością mieszaną, uproszczenie takie wpływa istotnie na obniżenie wiarygodności uzyskanych wyników.

W świetle przedstawionych ograniczeń i niedoskonałości zastosowanie prezentowanej metody należy ograniczyć jedynie do ewentualnego wstępnego oszacowania poszukiwanej wartości progowej ciśnienia kapilarnego.

Metoda zatłaczania ciągłego - polega na ciągłym zatłaczaniu fazy niezwilżającej ze stałą i bardzo małą wydajnością. Przy takim podejściu ciśnienie fazy niezwilżającej w początkowej fazie eksperymentu stopniowo narasta a przepływ w rdzeniu nie występuje. Kiedy wartość ciśnienia płynu zatłaczanego przekroczy wartość progową (dla części próbki najbliższej powierzchni czołowej), rozpoczyna się przepływ w rdzeniu. W przypadku próbek heterogenicznych, a takie występują najczęściej, ewolucja ciśnienia jako funkcji czasu poddana jest wahaniom (wzrostom i spadkom), co świadczy o zróżnicowaniu wartości kapilarnego ciśnienia progowego wzdłuż osi rdzenia.

Metoda zatłaczania ciągłego nie jest pozbawiona wad. Podstawowym jej ograniczeniem jest przyjęte założenie, że gradient lepkości fazy niezwilżającej (wody) może zostać pominięty przy zastosowaniu bardzo małych wartości przepływu. W rezultacie takiego uproszczenia może dochodzić do znacznego przeszacowania poszukiwanej wartości P_c^{th} (Egermann et al. 2006).

Metoda standardowa - bezpośredni pomiar progowej wartości ciśnienia kapilarnego skał uszczelniających realizowany jest najczęściej poprzez wypieranie nasycającej badany rdzeń fazy zwilżającej (solanki) fazą niezwilżającą (np. gazem). Najbardziej typową metodą pomiarową bazującą na takim podejściu jest metoda standardowa, nazywana również metodą krokową (*step-by-step*). Badanie w oparciu o tę metodę może być prowadzone w warunkach odpowiadających tym panującym *in situ* oraz jest bardzo łatwe w interpretacji, jako że bazuje bezpośrednio na definicji progowej ciśnienia kapilarnego.

W trakcie badania ciśnienie fazy niezwilżającej podnoszone jest krokowo, a po każdym przyroście ciśnienia na wejściu próbki (*upstream pressure*) obserwuje się zachowanie ciśnienia na wyjściu układu (*downstream pressure*). Ciśnienie podnoszone jest do momentu, kiedy nastąpi wzrost ciśnienia wylotowego, co oznacza, że płyn niezwilżający przekroczył barierę minimalnego ciśnienia wejścia kapilary (*capillary entry pressure*) i naruszył przestrzeń porową badanej skały. W wyniku dalszego wzrostu ciśnienia różnicowego między wejściem i wyjściem próbki dojdzie do przekroczenia ciśnień kapilarnych serii połączonych kanałów porowych o największych wymiarach i przepływu Darcy fazy niezwilżającej. Różnica między ciśnieniem wejściowym (ciśnienie fazy niezwilżającej) a ciśnieniem wyjściowym (ciśnienie fazy zwilżającej) w tym momencie przyjmowana jest ostatecznie jako ciśnienie przebiccia dla danego systemu skała uszczelniająca – płyn niezwilżający.

Dokładność wyników uzyskiwanych w badaniach metodą standardową wiąże się ściśle z przyjętymi wartościami przyrostu ciśnienia oraz długości trwania każdego kroku (czasu stabilizacji układu po każdorazowym podwyższeniu ciśnienia). Krok ciśnieniowy należy dobrać pod względem spodziewanej wartości ciśnienia progowego. W przypadku przyjęcia zbyt dużej wartości, nie zostanie uchwycona rzeczywista wartość poszukiwanej różnicy ciśnień, a określone w ten sposób ciśnienie progowe badanego układu będzie zawyżone. W przypadku badania próbki, dla której nie jesteśmy w stanie oszacować wstępnie wartości P_c^{th} , badanie należy rozpocząć "od zera". Przy kolejnym badaniu tej samej próbki zatłaczanie można rozpocząć od ciśnienia nieco tylko niższego od wartości uzyskanej w podejściu poprzednim i zastosować mniejszą wartość przyrostu ciśnienia, dzięki czemu uzyskana wartość ciśnienia progowego będzie dokładniejsza. Uzyskanie wysokiej jakości wyników wiąże się niestety ze znacznym nakładem czasu, co można uznać za podstawową wadę przedstawionej metody.

W celu uniknięcia przepływu płynów pomiędzy powierzchnią zewnętrzną próbki a ścianą komory rdzeniowej stosuje się dodatkowe uszczelnienie w postaci rękawa witonowego pod ciśnieniem. Ciśnienie przykładane na powierzchnię boczną próbki poprzez rękaw uszczelniający pełni jednocześnie rolę naprężeń jakie działają na skałę uszczelniającą *in situ*.

Stanowisko badawcze oraz metodyka badań ciśnienia progowego skał

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na **Fig. 1.1.7_56**. Głównym jego elementem jest komora ciśnieniowa do badania próbek rdzeni skalnych (ang. coreholder) typu Hassler.

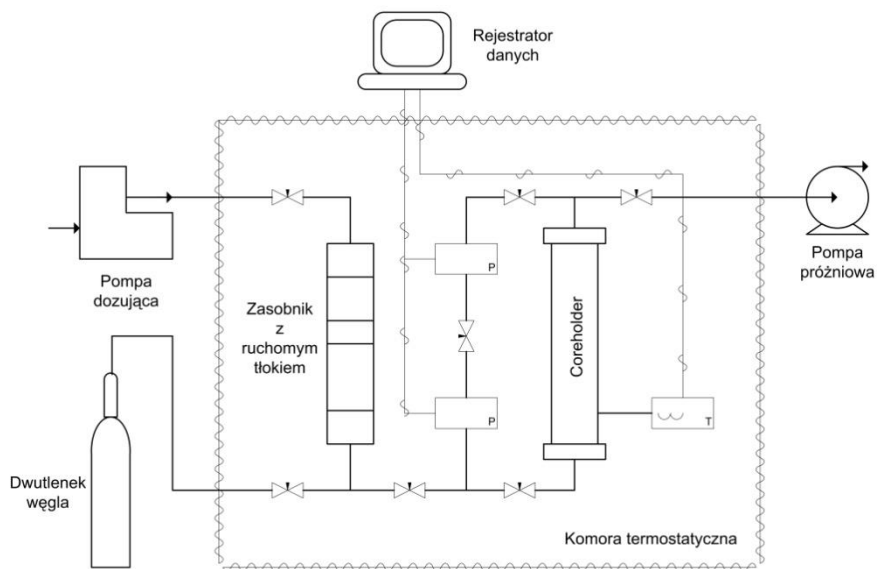


Fig. 1.1.7_56 Schemat stanowiska do badania ciśnienia progowego skał

Próbka rdzenia skalnego umieszczona w tego typu komorze poddawana jest naprężeniom ściskającym, wywołanym przez tzw. ciśnienie uszczelniające (ang. confining pressure). Ciśnienie to uzyskuje się poprzez zatłaczanie cieczy hydraulicznej pomiędzy uszczelniający kołnierz z witonu, w którym znajduje się próbka ograniczona z obydwu stron korkami dystrybucyjnymi, a stalowy korpus komory ciśnieniowej. Kontrola tego ciśnienia podczas eksperymentu realizowana jest przy pomocy manometru. Oprócz tego komora ciśnieniowa wyposażona jest w króćce: wlotowy i wylotowy, doprowadzające płyn do próbki skalnej, poprzez korki dystrybucyjne. Do obydwu króćców zamontowane są przetworniki ciśnienia, umożliwiające ciągły pomiar ciśnienia przepływającego płynu i jego rejestrację w trakcie badania. Płyn, w tym wypadku gazowy dwutlenek węgla, doprowadzany jest do króćca wlotowego pośrednio za pomocą bezpulsacyjnej pompy dozującej, przez zasobnik z ruchomym tłokiem. Pompa zapewnia regulację ciśnienia tłoczonego płynu przez cały czas trwania eksperymentu. W celu zapewnienia stałej temperatury podczas prowadzenia badania, zarówno komora ciśnieniowa, jak i zasobnik z ruchomym tłokiem, umieszczone zostały w komorze termostatycznej.



Fig. 1.1.7_57 Widok stanowiska do badania ciśnienia progowego skał

Przed przystąpieniem do zasadniczej części eksperymentu próbki skalne nasączono solanką o ogólnej mineralizacji 15 g/dm^3 . Proces ten przeprowadzono w automatycznym saturatorze rdzeni Vinci Technologies (**Fig. 1.1.7_58**), pod ciśnieniem $15,0 \text{ MPa}$. Tak przygotowane próbki umieszczono kolejno w kołnierzu vitonowym, a następnie zainstalowano w komorze ciśnieniowej. Wartość ciśnienia uszczelniającego dla badań ciśnienia progowego ustalono na poziomie $30,0 \text{ MPa}$. Po podłączeniu króćca wlotowego komory z zasobnikiem z ruchomym tłokiem, wypełniono go czystym gazowym dwutlenkiem węgla zmagazynowanym w butli ciśnieniowej. Podczas testu stopniowo (krokowo) co około dziesięć godzin zwiększano ciśnienie od strony wlotowej do komory z próbką skalną. Równocześnie rejestrowano zmiany ciśnienia, zarówno po stronie wlotowej, jak i wylotowej komory.



Fig. 1.1.7_58 Automatyczny saturator rdzeni skalnych

Tab. 1.1.7_53 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru ciśnienia progowego – próbka nr 2465

Nazwa odwiertu	Czaplinek IG-1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1923,7
Porowatość, [%]	4,80
Długość próbki, [cm]	4,09
Średnica próbki, [cm]	2,61
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	21,871
Objętość porowa próbki, [cm ³]	1,049808
Masa suchej próbki, [g]	54,8241
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6331
Temperatura, [°C]	40,5
Przepuszczalność, [mD]	0,0038636
Ciśnienie progowe dla CO₂, [MPa]	3,80±0,27



Fig. 1.1.7_59 Przykładowe wykresy ciśnień przed i za coreholderem podczas pomiaru w funkcji czasu

Tab. 1.1.7_54 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru ciśnienia progowego – próbka nr 8604

Nazwa odwiertu	Garwolin - 1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1970,8
Porowatość, [%]	7,76
Długość próbki, [cm]	2,96
Średnica próbki, [cm]	2,48
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	14,291
Objętość porowa próbki, [cm ³]	1,10898
Masa suchej próbki, [g]	34,8166
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6412
Temperatura, [°C]	40,5
Przepuszczalność, [mD]	0,0060853
Ciśnienie progowe dla CO₂, [MPa]	3,74±0,25

Tab. 1.1.7_55 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru ciśnienia progowego – próbka nr 8495

Nazwa odwiertu	Gostynin IG-1A
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1870,1
Porowatość, [%]	4,24
Długość próbki, [cm]	4,75
Średnica próbki, [cm]	2,48
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	22,933
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,97236
Masa suchej próbki, [g]	61,5204
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,8014
Temperatura, [°C]	40,5
Przepuszczalność, [mD]	0,0002076
Ciśnienie progowe dla CO₂, [MPa]	7,235±0,235

Tab. 1.1.7_56 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru ciśnienia progowego – próbka nr 2403

Nazwa odwiertu	Jamno IG-1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1125,6
Porowatość, [%]	4,62
Długość próbki, [cm]	5,09
Średnica próbki, [cm]	2,61
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	27,219
Objętość porowa próbki, [cm ³]	1,257517
Masa suchej próbki, [g]	69,4511
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6752
Temperatura, [°C]	40,5
Przepuszczalność, [mD]	0,0036859
Ciśnienie progowe dla CO₂, [MPa]	2,695±0,345

Tab. 1.1.7_57 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru ciśnienia progowego – próbka nr 2617

Nazwa odwiertu	Kłanino - 3
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	2455,2
Porowatość, [%]	3,53
Długość próbki, [cm]	4,39
Średnica próbki, [cm]	2,62
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	23,656
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,832691
Masa suchej próbki, [g]	62,1148
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,7216
Temperatura, [°C]	40,5
Przepuszczalność, [mD]	0,0005245
Ciśnienie progowe dla CO₂, [MPa]	4,325±0,255

Tab. 1.1.7_58 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru ciśnienia progowego – próbka nr 879

Nazwa odwiertu	Pławno - 1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1186,5
Porowatość, [%]	9,35
Długość próbki, [cm]	4,63
Średnica próbki, [cm]	2,58
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	24,193
Objętość porowa próbki, [cm ³]	2,26204
Masa suchej próbki, [g]	70,5121
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	3,2152
Temperatura, [°C]	40,5
Przepuszczalność, [mD]	0,0002946
Ciśnienie progowe dla CO₂, [MPa]	5,85±0,27

Tab. 1.1.7_59 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru ciśnienia progowego – próbka nr 946

Nazwa odwiertu	Radecin - 1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	916,9
Porowatość, [%]	19,36
Długość próbki, [cm]	4,58
Średnica próbki, [cm]	2,52
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	22,832
Objętość porowa próbki, [cm ³]	4,42027
Masa suchej próbki, [g]	53,6340
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,9130
Temperatura, [°C]	40,5
Przepuszczalność, [mD]	0,0656041
Ciśnienie progowe dla CO₂, [MPa]	2,625±0,355

Tab. 1.1.7_60 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru ciśnienia progowego – próbka nr 889

Nazwa odwiertu	Wierzchowo - 12
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1937,1
Porowatość, [%]	10,0
Długość próbki, [cm]	4,35
Średnica próbki, [cm]	2,58
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	22,730
Objętość porowa próbki, [cm ³]	2,27527
Masa suchej próbki, [g]	56,4227
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,7584
Temperatura, [°C]	40,5
Przepuszczalność, [mD]	0,0015252
Ciśnienie progowe dla CO₂, [MPa]	4,67±0,36

Tab. 1.1.7_61 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru ciśnienia progowego – próbka nr 8470

Nazwa odwiertu	Wojszyce IG-4
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	2124,3
Porowatość, [%]	3,05
Długość próbki, [cm]	1,89
Średnica próbki, [cm]	2,48
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	9,125
Objętość porowa próbki, [cm ³]	0,27831
Masa suchej próbki, [g]	23,5539
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,6625
Temperatura, [°C]	40,5
Przepuszczalność, [mD]	0,0029619
Ciśnienie progowe dla CO₂, [MPa]	4,775±0,225

Tab. 1.1.7_62 Parametry próbki rdzenia i warunki pomiaru ciśnienia progowego – próbka nr 2511

Nazwa odwiertu	Wolin IG-1
Głębokość pobrania rdzenia, [m]	1899,7
Porowatość, [%]	6,26
Długość próbki, [cm]	4,68
Średnica próbki, [cm]	2,62
Objętość całkowita próbki, [cm ³]	25,218
Objętość porowa próbki, [cm ³]	1,578646
Masa suchej próbki, [g]	63,9350
Gęstość materiału skalnego próbki, [g/cm ³]	2,7046
Temperatura, [°C]	40,5
Przepuszczalność, [mD]	0,0026010
Ciśnienie progowe dla CO₂, [MPa]	4,79±0,29

Tab. 1.1.7_63 Tabela zbiorcza wyników pomiaru ciśnienia progowego dla CO₂ dla wybranych próbek rdzeni skalnych

Odwiert	Numer próbki	Głębokość [m]	Porowatość z porozymetru [%]	Przepuszczalność dla gazu [mD]	Ciśnienie progowe dla CO ₂ [MPa]
Czaplinek IG-1	2465	1923,7	4,80	0,0038636	3,800±0,270
Garwolin-1	8604	1970,8	7,76	0,0060853	3,740±0,250
Gostynin IG-1A	8495	1870,1	4,24	0,0002076	7,235±0,235
Jamno IG-1	2403	1125,6	4,62	0,0036859	2,695±0,345
Kłanino - 3	2617	2455,2	3,53	0,0005245	4,325±0,255
Pławno-1	879	1186,5	9,35	0,0002946	5,850±0,270
Radecin – 1	946	916,9	19,36	0,0656041	2,625±0,355
Wolin IG-1	2511	1899,7	6,26	0,0026010	4,790±0,290
Wierzchowo – 12	889	1937,1	10,01	0,0015252	4,670±0,360
Wojszyce IG-4	8470	2124,3	3,05	0,0029619	4,775±0,225

Przedstawienie modeli układów sekwestracyjnych w Polsce; modele parametryczne – dynamiczne (1.1.32 - AGH)

Rejon I - Bełchatów

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

Do realizacji zadania wykorzystano regionalny model statyczny dolnej jury dla NE części obszaru badań oraz symulator GEM (Computer Modelling Group) z uwagi na jego wszechstronność (w tym moduł PVT) i kompatybilność z danymi z Petrela.

Zbudowany model dynamiczny został zaimportowany do programu GEM i zmodyfikowany celem przeprowadzenia symulacji procesu zatłaczania:

- wprowadzono informacje o zaileniu oraz porowatości wygenerowane metodą krigingu w Petrele,
- zbudowano nowy rozkład przepuszczalności 3D opierający się na geofizycznym modelu Zawiszy (Zawisza, 1993) o równaniu:

$$K_{xy} = 195000 \cdot \phi^{3,15} \cdot \left[1 - V_{sh}^{0,61} (1 - \phi)^{3,18} \right]^2$$

gdzie K_{xy} – przepuszczalność pozioma, ϕ - porowatość efektywna, V_{sh} – zailenie.

- przyjęto, że przepuszczalność pionowa stanowi 10% przepuszczalności poziomej.

Model ten opiera się na danych laboratoryjnych, geofizycznych i hydrodynamicznych utworów dolnej jury. Z uwagi na możliwość zaniżenia zailenia podczas budowy modelu statycznego wprowadzono dodatkowy wariant obniżający przepuszczalność XY (poziomą) i przepuszczalność pionową do 60%. Zmodyfikowano siatkę (grid) modelu wprowadzając lokalne zagęszczenie strefy zatłaczania blokami o wymiarach w kierunkach X Y 200x200 m.

Na podstawie analizy głębokościowej regionalnego modelu statycznego 3D przyjęto, że głównymi poziomami zbiornikowymi dolnojurajskiej struktury Zaosie będą:

- warstwy piaskowcowe pliensbachu,
- warstwy piaskowcowe synemuru i hettangu.

Ograniczenie zatłoczenia CO₂ do tych warstw wynika z następujących przesłanek:

- prawdopodobnego uszczelnienia występującego w warstwach toarku oraz batonu,
- ciśnienia hydrostatycznego wyższego niż 7,3 MPa (ciśnienie krytyczne CO₂),
- temperatury złożowej zbliżonej i wyższej od temperatury krytycznej CO₂.

CO₂ może występować w trzech stanach skupienia – stałym, ciekłym i gazowym. W stanie stałym ma budowę krystaliczną. Pozostawanie CO₂ w określonym stanie fazowym jest uzależnione od temperatury i ciśnienia – współrzędne punktu krytycznego wynoszą około 31°C i 7,4 MPa. Najbardziej korzystne jest składowanie CO₂ w temperaturach superkrytycznych (ok. 40°C) przy ciśnieniu wyższym niż 7,4 MPa. W tych warunkach jednak, z uwagi na własności kinematyczne faza gazowa CO₂ posiada relatywnie największą ruchliwość (skłonność do migracji lateralnej) – co nakłada na operatora magazynu geologicznego dodatkowe wymagania monitoringu.

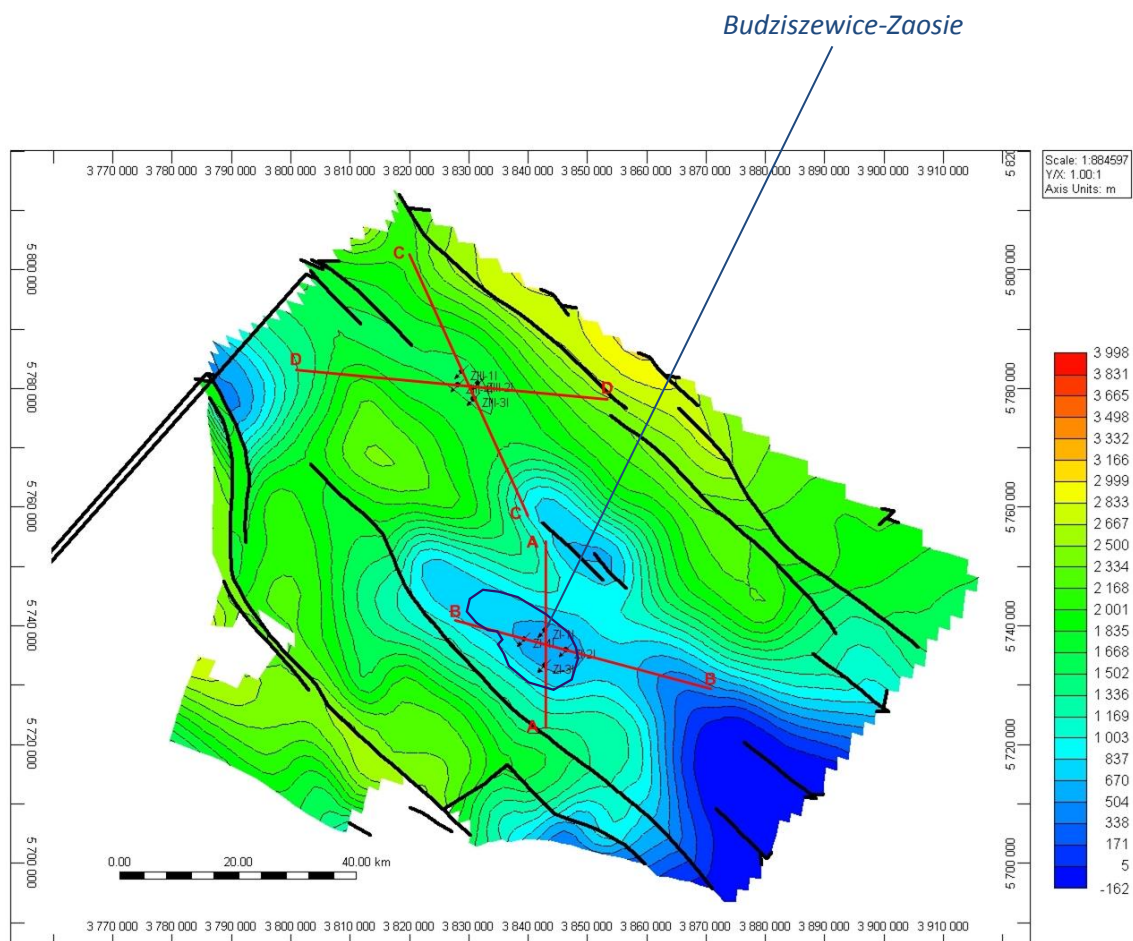


Fig. 1.1.32_1 Regionalna mapa strukturalna stropu utworów pliensbachu (z zarysem struktury)

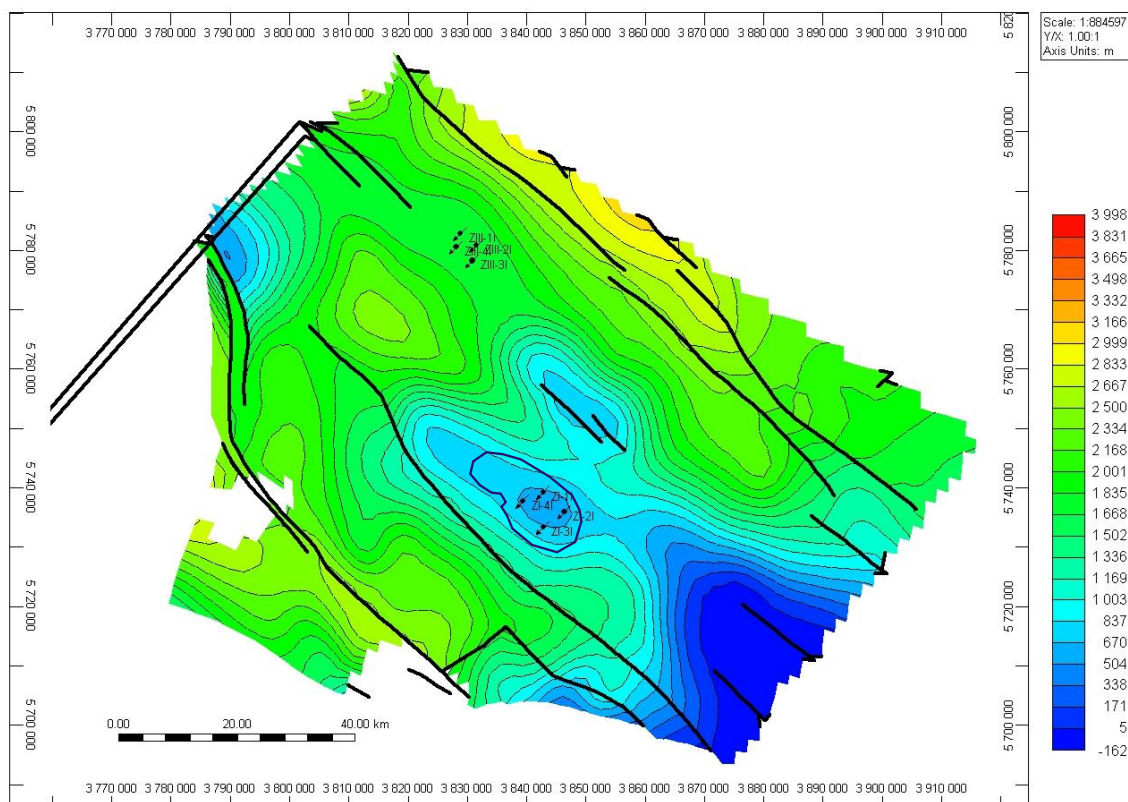


Fig. 1.1.32_2 Regionalna mapa strukturalna stropu utworów synemuru/hettangu (z zarysem struktury)

Jako najlepsze warunki magazynowania CO₂ trzeba uznać strukturę o odpowiedniej pojemności magazynowej CO₂ – najlepiej większej od 40-60 MtCO₂ o ciśnieniu zatłaczania (w stropie struktury) 8,0-12,0 MPa, o średniej głębokości 800-1200m, średniej temperaturze złożowej niższej 35-50°C, porowatości 25-35% i przepuszczalności rzędu 1-2 D, przy średniej miąższości efektywnej większej niż 50-80m położone w odległości 30-100 km od emitenta. Lokalizacje składowiska geologicznego powinna mieć potwierdzoną szczelność nadkładu przy zminimalizowanym prawdopodobieństwie migracji CO₂ do wód w wyższych horyzontach. Ta szczelność powinna z dużym prawdopodobieństwem zostać potwierdzona także testami hydrodynamicznymi oraz wynikami modelowania migracji płynu zatłaczanego.

Lokalizacja taka jest mniej bezpieczna od struktur położonych głębiej – z uwagi na zbliżoną do wody gęstość (rzędu 800 kg/m³) i mniejszą lepkość w porównaniu do głębiej położonych magazynów CO₂. Wariant magazynowania w głębokości 800m-2800 m jest bardziej narażony na możliwość migracji lateralnej, zaś w przypadku magazynowania w strukturze głębszej (np. 2800m-4000m) bardziej prawdopodobna może być migracja pionowa – o ile nadkład nad zbiornikiem taką migrację umożliwi.

Optymalne lokalizacje magazynów CO₂ (dla głębokości do 1200 m) gwarantują niski koszt wiercenia, niski koszt zatłaczania oraz maksymalne upakowanie zatłaczanego płynu w złożu.

Na **Fig. 1.1.32_1** pokazano regionalną mapę strukturalną stropu pliensbachu a na **Fig. 1.1.32_2** regionalną mapę strukturalną stropu synemuru/hettangu (opracowane w oparciu o mapy B. Papiernika z zadania **1.1.15** dla rejonu Bełchatowa).

Własności PVT

Własności PVT dla CO₂ wyznaczone według równania stanu Penga – Robinsona oraz modelu Jossi – Stiel - Thodosa (Fig. 1.1.32_3 – przykład dla zakresu ciśnienia 7 - 12 MPa/ temperatury 32 - 40 °C).

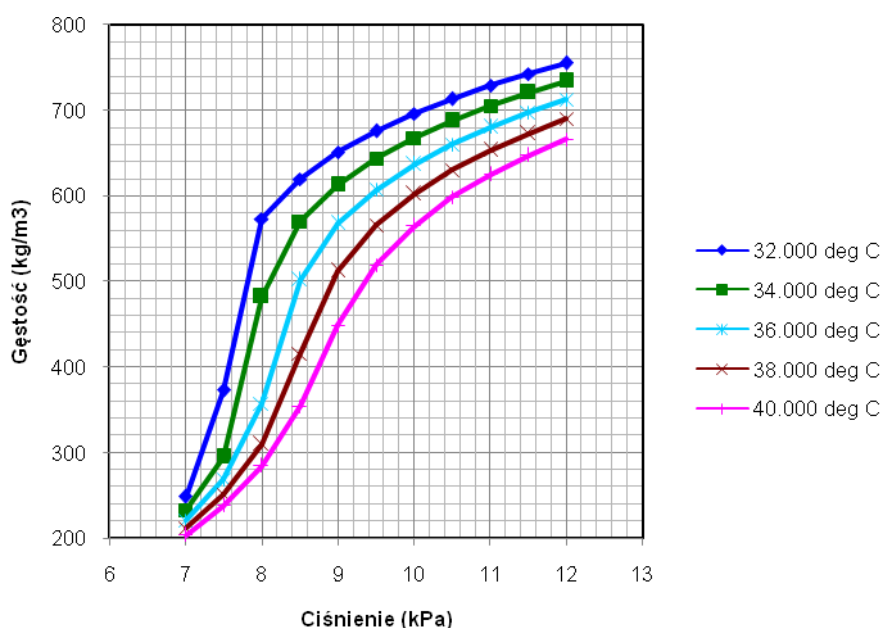


Fig. 1.1.32_3 Zmiana gęstości CO₂ w zakresie ciśnień 7 – 12 [MPa] i temperatur 32 – 40 [°C]

Niebezpieczeństwem zatłaczania CO₂ w pobliżu punktu krytycznego jest możliwość znacznego schłodzenia strefy przyodwiertowej w przypadku zatłoczenia „zimnego” CO₂ w temperaturze rzędu 35 °C.

Przyjęto ciśnienie złożowe na poziomie - 1000 m ppm równe ciśnieniu hydrostatycznemu. Z uwagi na ograniczenia numeryczne przyjęto temperaturę 31,5 °C, jako temperaturę minimalną w stropie modelu Zaosie I. Temperatura modelu zmienia się od 32 °C do 40 °C.

Założono minimalny wpływ regionalnego przepływu wód dolnojurajskich na proces zatłaczania (rzędu 0,3 m/rok). Dla omawianego wariantu bazowego nie wprowadzono istotnego ruchu wód przyjmując $v_{reg} = 0$ m/rok.

Warunki zatłaczania

Przyjęto zatłaczanie do dwóch antyklin dolno jurajskich Z-I (struktura pomiędzy Łowiczem a Zgierzem) i Z-III (Budziszewice-Zaosie, zaznaczone konturem na Fig. 1.1.32_1). Do obu struktur zatłoczono 2 mln t/rok łącznie ośmioma otworami. Przyjęto, że z uwagi na możliwą małą zwięzłość piaskowców represja ciśnienia dynamicznego nie przekroczy 2 MPa (tzn. $\Delta p = 2$ MPa w odniesieniu do ciśnienia hydrostatycznego). Przyjęto uszczelnienie na poziomie $K = 10^{-5}$ mD - co przekłada się na wartość ciśnienia progowego (δ) jako 2 - 3 MPa.

Wyniki symulacji

Tabela 1.1.32_1 Zestawienie podstawowych parametrów zatłaczania dla poszczególnych odwiertów struktury Z-I

Czas (od rozpoczęcia zatłaczania) [rok]	Ciśnienie denne [MPa]	Wydajność zatłaczania [t/d]	Zatłaczanie sumaryczne [kt]
ZI-1I			
1	7,281	1487	543
5	7,233	1487	2714
10	7,286	1487	5429
20	7,376	1487	10857
50	7,543	1487	27144
100	7,063	0	27163
150	6,973	0	27163
200	6,935	0	27163
ZI-2I			
1	7,156	1487	543
5	7,099	1487	2714
10	7,144	1487	5429
20	7,226	1487	10857
50	7,454	1487	27144
100	7,016	0	27163
150	6,928	0	27163
200	6,891	0	27163
ZI-3I			
1	7,914	1487	543
5	7,801	1487	2714
10	7,789	1487	5429
20	7,812	1487	10857
50	7,917	1487	27144
100	7,170	0	27163
150	7,076	0	27163
200	7,036	0	27163
ZI-4I			
1	7,410	1487	543
5	7,332	1487	2714
10	7,362	1487	5429
20	7,422	1487	10857
50	7,600	1487	27144
100	7,077	0	27163
150	6,987	0	27163
200	6,949	0	27163
Całkowita masa zatłoczonego CO ₂			108652 kt

Tabela 1.1.32_2 Zestawienie podstawowych parametrów zatłaczania dla poszczególnych odwiertów struktury Zaosie III (Budziszewice-Zaosie)

Czas (od rozpoczęcia zatłaczania) [rok]	Ciśnienie denne [MPa]	Wydajność zatłaczania [t/d]	Zatłaczanie sumaryczne [kt]
ZIII-1I			
1	17,014	1487	543
5	16,985	1487	2714
10	17,057	1487	5429
20	17,195	1487	10857
50	17,433	1487	27144
100	16,928	0	27163
150	16,828	0	27163
200	16,785	0	27163
ZIII-2I			
1	17,139	1487	543
5	17,115	1487	2714
10	17,186	1487	5429
20	17,323	1487	10858
50	17,557	1487	27144
100	17,056	0	27163
150	16,955	0	27163
200	16,911	0	27163
ZIII-3I			
1	17,150	1487	543
5	17,134	1487	2714
10	17,209	1487	5429
20	17,346	1487	10857
50	17,579	1487	27144
100	17,087	0	27163
150	16,986	0	27163
200	16,943	0	27163
ZIII-4I			
1	17,098	1487	543
5	17,080	1487	2714
10	17,156	1487	5429
20	17,295	1487	10858
50	17,531	1487	27144
100	17,031	0	27163
150	16,929	0	27163
200	16,886	0	27163
Całkowita masa zatłoczonego CO ₂			108652 kt

Pozostałe rejony (Polska NW, Pomorze, wyniesienie Łeby, Wielkopolska, Mazowsze/Lubelszczyzna)

(Wojciech Górecki, Bartosz Papiernik, Anna Sowizdzał, Marek Hajto, Pietraszewski, Michał Maruta, Andrzej Pasternacki, Grzegorz Pełka, Wojciech Luboń)

Przedmiotem opracowania pt. "Przedstawienie modeli układów sekwestracyjnych w Polsce; modele parametryczne – dynamiczne Przedstawienie modeli układów sekwestracyjnych w Polsce. Polska NW, Pomorze, wyniesienie Łeby, Wielkopolska, Mazowsze/Lubelszczyzna" jest opracowanie w formie tabel, map i opisów zestawów podstawowych danych geologicznych charakteryzujących ilościowo ukształtowanie strukturalno-miąszościowe, parametry zbiornikowe potencjalnych poziomów wodonośnych, a także skład wód i warunki hydrodynamiczne wyróżnionym poziomów wodonośnych. Modele te zostały wykonane w formie gridów 2D kompatybilnych z programami ZMAP+ i Petrel, stanowiąc bezpośrednie dane wejściowe do modelowań 3D, statycznych i dynamicznych.

Charakterystyka potencjalnych układów sekwestracyjnych Mazowsza/Lubelszczyzny obejmuje NW strefę Lubelszczyzny, gdzie istnieje niewielka możliwość wystąpienia efektywnych układów sekwestracyjnych w utworach mezozoiku. Dodatkowo podobny zakres tematyczny został przedstawiony dla potencjalnych poziomów zatłaczania CO₂ w profilu paleozoiku został omówiony przez autorów w podobnym zakresie w sprawozdaniu do zadania **1.21**: Charakterystyka parametrów złożowych: Parametry złożowe istotne dla symulacji złożowych rozptywu i reaktywności CO₂ dla rejonu Lubelszczyzny.

Prezentowane zadania zostały zrealizowane przez pracowników Katedry Surowców Energetycznych Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska.

Charakterystyka warstw zbiornikowych w analizowanych obszarach badawczych

Celem projektu było rozpoznanie podstawowych parametrów geologicznych, hydrogeologicznych oraz petrofizycznych w rejonie występowania perspektywicznych struktur dla składowania CO₂ na Niżu Polskim.

Obszar projektu obejmował rejony położone na pograniczu kilku głównych jednostek geologicznych Niżu Polskiego, a mianowicie: synklinorium szczecińsko-łódzkiego, antyklinorium kujawsko-pomorskiego, synklinorium pomorskiego, wyniesienia Łeby, monokliny przedsudeckiej oraz synklinorium warszawskiego. W celach prezentacji wyników analiz badany obszar podzielono na 5 obszarów prospekcyjnych (**Fig. 1.1.32_4**) zlokalizowanych w centralnej oraz północno-zachodniej części Polski. Jak wskazują wcześniejsze analizy (Tarkowski 2006, Tarkowski et al. 2005a,b,c 2006, 2007, 2009, Uliasz-Misiak 2008a,b) w rejonach tych wyróżniono szereg struktur geologicznych, które mogą stanowić potencjalne miejsca składowania CO₂.

Analiza podstawowych parametrów geologicznych, w tym głębokość zalegania stropów potencjalnych pułapek, uzupełniona wynikami analizy rozkładu parametrów zbiornikowych w skali regionalnej, wskazują, że najlepsze warunki dla składowania CO₂ wykazują utwory: dolnej kredy, dolnej jury oraz dolnego triasu. Korzystne własności hydrogeologiczne oraz zbiornikowe skał związanych z ww. utworami zostały potwierdzone w szeregu opracowań, w tym: (Górecki [red.], 2006), a także licznymi otworami udostępniającymi horyzonty wodonośne kredy dolnej oraz jury dolnej.

Utwory dolnej kredy

Dolnokredowy zbiornik hydrotermalny można traktować jako jeden poziom wodonośny (Górecki [red.], 1990), Zbudowany jest on z kompleksu nieciągłych, naprzemianległych warstw piaszczystych, piaszczysto-marglistych i piaszczysto-mułowcowych, wykazujących zróżnicowaną przepuszczalność. Zbiornik posiada łączność hydrauliczną, zarówno z niżej leżącymi poziomami wodonośnymi jury, jak i z nadległymi utworami węglanowymi kredy górnej. Wał pomorsko-kujawski, wzdłuż obydwu swoich krawędzi po stronie południowo-zachodniej i północno-wschodniej, stanowi istotną strefę zasilania, a także rozładowania hydrodynamicznego (Górecki [red.], 1995), Strefę alimentacji wód tworzy także obrzeżenie Gór Świętokrzyskich oraz skłon platformy wschodnio-europejskiej.

Zasadniczymi poziomami wodonośnymi kredy dolnej są piaskowce zbiornikowe fm. bodzanowskiej dolnego walanżynu, uszczelnione ilasto-mułowcowymi utworami fm. włocławskiej (grn. walanżyn - hoteryw), piaskowce ogniwa pagórczańskie (apt) oraz piaskowce ogniwa kruszwickiego (alb dolny i środkowy) najwyższej części fm. mogileńskiej. Uszczelnione są one marglisto-węglanowymi utworami albu górnego.

Przewodność hydrauliczna warstw wodonośnych utworów dolnej kredy jest zmienna. Zdecydowanie najniższymi przewodnościami cechują się warstwy wodonośne wypełniające nieckę lubelską, wyniesienie łukowsko-hrubieszowskie, obniżenie podlaskie, wyniesienie mazursko-suwańskie, północno-zachodnią część niecki pomorskiej oraz nieckę szczecińską i miechowską (poniżej $0,50 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$). Najwyższe wartości przewodności warstw wodonośnych występują w granicach wału kujawskiego i wału pomorskiego (ponad $1,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, lokalnie nawet ponad $3,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) oraz niecki łódzkiej i mogileńskiej, w granicach $1,0$ – $5,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$). Średni współczynnik filtracji utworów wodonośnych dolnej kredy, obliczony na podstawie próbnich pompowań wykonanych w studniach głębinowych i otworach wiertniczych (91 oznaczeń) wynosi $2,13 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (średni harmoniczna).

W rejonie Łodzi, na obszarze najbardziej intensywnego poboru wód z utworów dolnej kredy, średni współczynnik filtracji wynosi $2,4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. W niecce mogileńsko-łódzkiej współczynnik filtracji, określony na podstawie wyników próbnich pompowań wykonanych w głębokich otworach, mieści się w przedziale $1,3 \times 10^{-7}$ – $2,9 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, w niecce warszawskiej od $2,26 \times 10^{-6}$ do $6,05 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, a łącznie w niecce lubelskiej i na wyniesieniu zrębowym podlasko-lubelskim zawiera się w przedziale od $2,94 \times 10^{-8}$ do $1,38 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (średnio $3,94 \times 10^{-6} \text{ m/s}$).

Utwory dolnej jury

Warstwy wodonośne w utworach dolnej jury i dolnej kredy stanowią kompleksy piaskowcowe o wysokich parametrach zbiornikowych.

Warstwy wodonośne w utworach jury dolnej tworzą drobno lub różnoziarniste piaski i piaskowce o zmiennej miąższości, przewarstwione słabo lub nieprzepuszczalnymi iłowcami, iłowcami piaszczystymi, mułowcami i mułowcami piaszczystymi. Mimo znacznego zróżnicowania w profilu pionowym oraz zmiennej ciągłości rozprzestrzenienia poziomego i licznych zmian litofacjalnych można uznać, że wody podziemne występujące w przepuszczalnych utworach dolnojurajskich tworzą jeden zbiornik (Górecki [red.], 2006).

Warstwy wodonośne w utworach jury dolnej stanowią kompleksy piaskowcowe hetangu, synemuru, domeru i toarsu górnego. Kompleksem izolującym o zasięgu regionalnym są iłowcowo-mułowcowe utwory toarsu dolnego (Górecki [red.], 2006).

Przewodność warstw wodonośnych w dolnojurajskim zbiorniku wód termalnych, na większości obszaru przekracza wartości rzędu $200 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Najwyższymi przewodnościami cechują się skały budujące poziomy wodonośny wału kujawskiego – do $1650 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ oraz w zachodniej i centralnej części niecki warszawskiej, niecki pomorskiej i szczecińskiej – do $1300 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Przewodność warstw wodonośnych obniża się ku peryferiom zbiornika dolnojurajskiego.

Utwory dolnego triasu

Trias dolny występuje prawie na całym obszarze Niżu Polskiego. Zbudowany jest w przeważającej mierze z ilasto-mułowcowych osadów, z przewarstwieniami piaskowców, wapieni, dolomitów i anhydrytów. W wielu otworach, w stropie, obserwuje się łączność hydrauliczną wapieni triasu środkowego i dolnego (Górecki [red.], 2000). W części stropowej występują miększe pakiety piaskowcowe (na południu Niżu - facja wapienna), poniżej piaskowce o mniejszych miąższościach. Osady spągowe są zailone. W części północnej Niżu można zaobserwować miększe kompleksy zawodnionych utworów piaszczystych. Wraz z pogłębieniem zalegania ku południowi rośnie udział facji ilastej i węglanowej. Ku wschodowi wraz z wynurzeniem następuje redukcja miąższości osadów przy równoczesnym wzroście ich zapiaszczenia.

Profil utworów triasu dolnego zdominowany jest przez utwory nieprzepuszczalne i słabo przepuszczalne, którymi są: iłowce, mułowce i skały węglanowe. Warstwy wodonośne budują różnej miąższości pakiety piaskowcowe i zlepieńcowe. Ich występowanie w profilu ma charakter nieregularny.

Na obszarze południowej części niecki szczecińskiej występują utwory formacji węglanowo-klastycznej, która ku północy przechodzi w formację pomorską (Szyperko-Teller, Kuberska 1997). Formację pomorską tworzą dwa cyklotemy rozpoczynające się utworami piaskowcowo-oolitowymi, a kończące iłowcami o barwie czerwonej. Dolny piaskowiec wydzielany jest jako ogniwo piaskowca drawskiego, natomiast cyklotem górny jako ogniwo trzebiatowskie. Miąższość piaskowca drawskiego dochodzi do 50 m na obszarze wału pomorskiego i przykryty jest 100 - 150 m kompleksem utworów iłowcowo-mułowcowych (Szyperko-Teller, 1982).

Wśród utworów triasu dolnego najbardziej perspektywiczny pod względem dobrych właściwości zbiornikowych dla wód hydrotermalnych wydaje się być piaskowiec drawski (Feldman-Olszewska 2006), rozpoczynający formację pomorską środkowego pstręgo piaskowca.

W profilu skał dolnotriasowych występuje stosunkowo niewiele utworów przepuszczalnych, a sumaryczne miąższości warstw wodonośnych w tym poziomie są zmienne w granicach od kilkunastu do ponad 400 m (lokalnie na wale kujawskim oraz w granicach niecek mogileńsko-łódzkiej i pomorskiej).

Przepuszczalność skał wodonośnych tworzących zbiornik wód termalnych, wyrażona wielkością współczynnika filtracji nie jest wysoka. Praktycznie na całym obszarze rozprzestrzenienia warstw wodonośnych zawiera się w granicach od $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, do $3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. Skały te należy uznać za słabo przepuszczalne. Jedynie w rejonie Płock - Toruń oraz na linii Konin - Poznań stwierdzono występowanie skał o nieco wyższych wartościach współczynnika filtracji, tj. ponad $3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$.

Rozkład podstawowych parametrów zbiornikowych w rejonie Polski północno-zachodniej

Analizowany obszar Polski północno-zachodniej (Rejon VII, albo obszar nr 1 na Fig. 1.1.32_4) mieści się pomiędzy współrzędnymi prostokątnymi x: 3429847.6 y: 5826847.6 a x: 3575000, y: 6019079.4 i obejmuje swoim zasięgiem około 26 000 km².

Utwory dolnej kredy

Tabela 1.1.32_3 Zestawienie wybranych parametrów dla utworów kredy dolnej w rejonie Polski północno-zachodniej

nazwa otworu	x	y	miąższość całkowita [m]	miąższość utworów wodonośnych [m]	porowatość [%] ³
Chociwel IG-1	3527830	5922209	39.0	9.6	17.1
Oświno IG-1	3525270	5932850	255.9	77.3	25.1
Rokita IG-1	3490150	5959948	91.7	68.9	24.1
Stargard Szczeciński IG-1	3499440	5915178	9.4	9.4	20.9
Strzelce Kraj. IG-1	3536800	5863500	10.0	2.9	8.0

Utwory dolnej jury

Tabela 1.1.32_4 Zestawienie wybranych parametrów dla utworów jury dolnej w rejonie Polski północno-zachodniej

nazwa otworu	x	y	miąższość całkowita [m]	miąższość utworów wodonośnych [m]	porowatość [%] ⁴
Chociwel IG-1	3527830	5922209	89.2	48.9	14.9
Dygowo -1	3545275	6002574	714.2	523.2	18.6
Moracz IG-1	3490850	5961058	751.6	540.8	23.8
Oświno IG-1	3525270	5932850	39.4	35.5	10.4
Piaski PIG-2	3527150	5956358	551.0	315.4	22.5
Rokita IG-1	3490150	5959948	621.3	413.6	23.7
Stargard Szczeciński IG-1	3499440	5915178	524.2	182.4	18.2

³ Średnia porowatość efektywna 19%.

⁴ Średnia porowatość efektywna 18,9%; wg nowych analiz laboratoryjnych INiG (zad. 1.3.2) średnia porowatość efektywna z 17 otworów dla kolektorów (piaskowców) jury dolnej w tym rejonie wynosi 20,8%.

Utwory dolnego triasu

Tabela 1.1.32_5 Zestawienie wybranych parametrów dla utworów triasu dolnego w rejonie Polski północno-zachodniej

nazwa otworu	x	y	miąższość całkowita [m]	miąższość utworów wodonośnych [m]	porowatość [%] ⁵
Brojce IG-1	3523425	5977824	952.9	296.0	15.1
Czaplinek IG-2	3570050	5949399	1430.7	177.6	10.6
Dygowo -1	3545275	6002574	1052.9	437.5	11.6
Moracz IG-1	3490850	5961058	886.6	203.7	11.4
Piaski PIG-2	3527150	5956358	1083.8	256.5	11.6
Rokita IG-1	3490150	5959948	848.4	182.2	19.3
Stargard Szczeciński IG-1	3499440	5915178	691.4	38.2	8.2
Strzelce Kraj. IG-1	3536800	5863500	589.9	51.8	9.2

⁵ Średnia porowatość efektywna 12,1%; wg nowych analiz laboratoryjnych INiG (zad. 1.3.2) średnia porowatość efektywna z 7 otworów dla kolektorów triasu dolnego w tym rejonie wynosi 17,1%.

Rozkład podstawowych parametrów zbiornikowych w rejonie Pomorza

Analizowany obszar Pomorza (W i SW część Rejonu VIII, albo obszar nr 2 na Fig. 1.1.32_4) mieści się pomiędzy współrzędnymi prostokątnymi x: 3573000 y: 5854800 a x: 3727200, y: 6030000 i obejmuje swoim zasięgiem około 27 000 km².

Utwory dolnej kredy

Tabela 1.1.32_6 Zestawienie wybranych parametrów dla utworów kredy dolnej w rejonie Pomorza

nazwa otworu	x	y	miąższość całkowita [m]	miąższość utworów wodonośnych [m]	porowatość [%] ⁶
Charzykowy IG-1	3667200	5957000	132.4	95.5	22.7
Człuchów IG-1	3654700	5959400	84.0	59.8	25.1
Człuchów IG-2	3647690	5954124	94.0	61.0	25.3
Człuchów IG-2bis	3648710	5954214	89.7	64.6	28.9
Debrzno IG-1	3640290	5944939	170.7	127.9	26.9
Kłosnowo IG-1	3673350	5961550	53.1	37.7	28.5
Kościerzyna IG-1	3710158	5996060	24.4	16.3	15.6
Polskie Łąki PIG-1	3713868	5924358	191.8	93.4	25.4
Tuchola IG-1	3676000	5943600	180.4	107.8	19.9
Tychowo IG-1	3581010	5979048	26.6	11.9	18.7
Unisław IG-1	3727146	5899468	262.3	144.8	24.9
Wilcze IG-1	3686475	5921250	45.4	39.0	35.7

Utwory dolnej jury

Tabela 1.1.32_7 Zestawienie wybranych parametrów dla utworów jury dolnej w rejonie Pomorza

nazwa otworu	x	y	miąższość całkowita [m]	miąższość utworów wodonośnych [m]	porowatość [%] ⁷
Charzykowy IG-1	3667200	5957000	132.4	95.5	22.7
Człuchów IG-1	3654700	5959400	84.0	59.8	25.1
Człuchów IG-2	3647690	5954124	94.0	61.0	25.3
Człuchów IG-2bis	3648710	5954214	89.7	64.6	28.9
Debrzno IG-1	3640290	5944939	170.7	127.9	26.9
Kłosnowo IG-1	3673350	5961550	53.1	37.7	28.5
Kościerzyna IG-1	3710158	5996060	24.4	16.3	15.6
Polskie Łąki PIG-1	3713868	5924358	191.8	93.4	25.4
Tuchola IG-1	3676000	5943600	180.4	107.8	19.9
Tychowo IG-1	3581010	5979048	26.6	11.9	18.7
Unisław IG-1	3727146	5899468	262.3	144.8	24.9
Wilcze IG-1	3686475	5921250	45.4	39.0	35.7

⁶ Średnia porowatość efektywna 24,8%.

⁷ Średnia porowatość efektywna 24,8%; wg nowych analiz laboratoryjnych INiG (zad. 1.3.2) średnia porowatość efektywna z 16 otworów dla kolektorów jury dolnej w tym rejonie wynosi 21,1%.

Utwory dolnego triasu

Tabela 1.1.32_8 Zestawienie wybranych parametrów dla utworów triasu dolnego w rejonie Pomorza

nazwa otworu	x	y	miąższość całkowita [m]	miąższość utworów wodonośnych [m]	porowatość [%] ⁸
Bydgoszcz IG-1	3684950	5896700	1397.5	119.9	7.4
Czaplinek IG-1	3600700	5927298	1381.5	193.0	12.2
Człuchów IG-1	3654700	5959400	996.9	316.9	22.0
Człuchów IG-2	3647690	5954124	514.9	185.6	14.2
Człuchów IG-2bis	3648710	5954214	760.9	173.9	17.2
Debrzno IG-1	3640290	5944939	883.1	207.9	10.4
Grzybnica IG-1	3594300	5991669	714.4	238.7	18.0
Jamno IG-1	3576070	6013068	460.3	190.6	9.9
Kłosnowo IG-1	3673350	5961550	530.7	84.3	8.0
Kościerzyna IG-1	3710158	5996060	533.6	222.8	15.4
Piła IG-1	3608650	5891750	1039.4	54.4	5.9
Polskie Łąki PIG-1	3713868	5924358	16.2	0.0	0.0
Słupsk IG-1	3620650	6028498	414.6	161.6	21.3
Szczecinek IG-1	3616000	5940449	1126.7	225.7	12.8
Szubin IG-1	3680651	5877307	1386.4	143.6	11.8
Tuchola IG-1	3676000	5943600	781.3	195.1	16.7
Tychowo IG-1	3581010	5979048	1043.0	306.8	12.1
Unisław IG-1	3727146	5899468	930.3	145.1	11.5
Wilcze IG-1	3686475	5921250	1082.6	159.5	8.5
Wyrzysk IG-1	3666950	5904400	1508.3	185.6	12.6

⁸ Średnia porowatość efektywna 12,4%; wg nowych analiz laboratoryjnych INiG (zad. 1.3.2) średnia porowatość efektywna z 18 otworów dla kolektorów triasu dolnego w tym rejonie wynosi 18,4%.

Rozkład podstawowych parametrów zbiornikowych w rejonie wyniesienia Łeby

Analizowany obszar wyniesienia Łeby (pozostała część Rejonu VIII, albo obszar nr 3 na **Fig. 1.1.32_4**) mieści się pomiędzy współrzędnymi prostokątnymi x: 3575000 y: 5941000 a x: 3811000, y: 6095000 i obejmuje swoim zasięgiem około 35 000 km².

Utwory dolnej kredy

Tabela 1.1.32_9 Zestawienie wybranych parametrów dla utworów kredy dolnej w rejonie wyniesienia Łeby⁹

nazwa otworu	x	y	miąższość całkowita [m]	miąższość utworów wodonośnych [m]	porowatość [%]
Charzykowy IG-1	3667200	5957000	132.4	95.5	22.7
Człuchów IG-1	3654700	5959400	84.0	59.8	25.1
Człuchów IG-2	3647690	5954124	94.0	61.0	25.3
Człuchów IG-2bis	3648710	5954214	89.7	64.6	28.9
Debrzno IG-1	3640290	5944939	170.7	127.9	26.9
Kłosnowo IG-1	3673350	5961550	53.1	37.7	28.5
Kościerzyna IG-1	3710158	5996060	24.4	16.3	15.6
Prabuty IG-1	3778080	5968558	31.9	19.3	23.2
Tuchola IG-1	3676000	5943600	180.4	107.8	19.9
Tychowo IG-1	3581010	5979048	26.6	11.9	18.7

Utwory dolnej jury

Tabela 1.1.32_10 Zestawienie wybranych parametrów dla utworów jury dolnej w rejonie wyniesienia Łeby¹⁰

nazwa otworu	x	y	miąższość całkowita [m]	miąższość utworów wodonośnych [m]	porowatość [%]
Charzykowy IG-1	3667200	5957000	114.4	75.9	20.0
Człuchów IG-1	3654700	5959400	210.5	191.6	28.7
Człuchów IG-2	3647690	5954124	91.0	83.9	25.5
Człuchów IG-2bis	3648710	5954214	99.9	91.0	30.0
Debrzno IG-1	3640290	5944939	170.7	143.0	27.8
Grzybnica IG-1	3594300	5991669	870.6	570.6	23.3
Jamno IG-1	3576070	6013068	157.9	115.0	10.6
Kłosnowo IG-1	3673350	5961550	33.0	33.0	23.9
Kościerzyna IG-1	3710158	5996060	39.3	36.5	21.1
Malbork IG-1	3765053	6000776	98.0	82.5	36.8
Prabuty IG-1	3778080	5968558	143.2	95.3	14.9
Tuchola IG-1	3676000	5943600	349.0	205.9	18.4
Tychowo IG-1	3581010	5979048	594.5	439.1	20.6
Żarnowiec IG-1	3702762	6080532	130.3	46.0	28.0

⁹ Średnia porowatość efektywna 23,5%.

¹⁰ Średnia porowatość efektywna 23,5%; wg nowych analiz laboratoryjnych INiG (zad. 1.3.2) średnia porowatość efektywna z 16 otworów dla kolektorów jury dolnej w tym rejonie wynosi 21,5%.

Utwory dolnego triasu

Tabela 1.1.32_11 Zestawienie wybranych parametrów dla utworów triasu dolnego w rejonie wyniesienia Łeby¹¹

nazwa otworu	x	y	miąższość całkowita [m]	miąższość utworów wodonośnych [m]	porowatość [%]
Człuchów IG-1	3654700	5959400	996.9	316.9	22.0
Człuchów IG-2	3647690	5954124	514.9	185.6	14.2
Człuchów IG-2bis	3648710	5954214	760.9	173.9	17.2
Darżlubie IG-1	3715135	6068998	299.9	101.6	17.0
Debrzno IG-1	3640290	5944939	883.1	207.9	10.4
Gdańsk IG-1	3762470	6030796	512.2	187.6	19.2
Grzybnica IG-1	3594300	5991669	714.4	238.7	18.0
Hel IG-1	3735088	6071050	309.9	75.2	14.5
Jamno IG-1	3576070	6013068	460.3	190.6	9.9
Kłosnowo IG-1	3673350	5961550	530.7	84.3	8.0
Kościerzyna IG-1	3710158	5996060	533.6	222.8	15.4
Malbork IG-1	3765053	6000776	524.8	136.6	16.2
Prabuty IG-1	3778080	5968558	490.3	111.1	15.3
Słupsk IG-1	3620650	6028498	414.6	161.6	21.3
Tuchola IG-1	3676000	5943600	781.3	195.1	16.7
Tychowo IG-1	3581010	5979048	1043.0	306.8	12.1
Ustka IG-1	3620992	6047769	249.9	36.1	19.4
Żarnowiec IG-1	3702762	6080532	244.9	84.5	22.6

¹¹ Średnia porowatość efektywna 16,1%; wg nowych analiz laboratoryjnych INiG (zad. 1.3.2) średnia porowatość efektywna z 18 otworów dla kolektorów triasu dolnego w tym rejonie wynosi 18,4%.

Rozkład podstawowych parametrów zbiornikowych w rejonie Wielkopolski

Analizowany obszar Wielkopolski (większość Rejonu VI, albo obszar nr 4 na **Fig. 1.1.32_4**) mieści się pomiędzy współrzędnymi prostokątnymi x: 3583000 y: 5708000 a x: 3812000, y: 5852000 i obejmuje swoim zasięgiem prawie 33 000 km².

Utwory dolnej kredy

Tabela 1.1.32_12 Zestawienie wybranych parametrów dla utworów kredy dolnej w rejonie Wielkopolski¹²

nazwa otworu	x	y	miąższość całkowita [m]	miąższość utworów wodonośnych [m]	porowatość [%]
Banachów IG-1	3759238	5789911	282.1	208.7	15.1
Byczyna 1	3745216	5843848	165.4	96	18.0
Cykowo IG-1	3725483	5838728	47.4	21.3	20.8
Dobrowó IGH-1	3751022	5790106	247.6	187.6	16.3
Florentyna IG-2	3719794	5751097	37.9	29.8	20.2
Koło IG-4	3770228	5775194	181.4	133.9	20.8
Konary IG-1	3734523	5849746	47.1	0	0.0
Objezierze IG-1	3621100	5831360	75	52.2	19.8
Pobiedziska IGH-1	3654502	5821052	90.9	60.6	25.1
Poddebice IG-1	3774119	5778443	262.1	164.8	17.7
Poddebice PIG-2	3776376	5780652	286.8	189.6	17.0
Ślesin IGH-1	3727502	5811820	186.5	128.1	27.1
Uniejów 1	3763066	5761930	104.4	90.8	25.3
Uniejów IGH-1	3759177	5769866	137.3	110.1	18.2
Uniejów PIG/AGH-2	3759557	5768832	118.3	99.8	17.2
Wilczyn IGH-1	3712638	5822177	147	114.8	23.9
Wrząca IGh-1	3754488	5798956	179.8	155	18.5
Września IG-1	3671379	5804596	77.7	68.7	22.4
Zakrzyń IG-1	3722799	5755234	41.2	37.9	12.6

¹² Średnia porowatość efektywna 18,7; wg nowych analiz laboratoryjnych INiG (zad. 1.3.2) średnia porowatość efektywna z 5 otworów dla kolektorów kredy dolnej w tym rejonie wynosi 19,5%.

Utwory dolnej jury

Tabela 1.1.32_13 Zestawienie wybranych parametrów dla utworów jury dolnej w rejonie Wielkopolski¹³

nazwa otworu	x	y	miąższość całkowita [m]	miąższość utworów wodonośnych [m]	porowatość [%]
Banachów IG-1	3759238	5789911	50.0	6.5	6.2
Brudzewek-1	3697105	5761610	207.6	159.9	20.2
Brześć Kuj. IG-1	3770441	5833328	907.8	607.5	16.5
Brześć Kuj. IG-2	3766449	5830033	644.9	351.3	16.0
Brześć Kuj. IG-3	3763233	5827054	924.7	537.9	17.0
Buk IG-1	3600720	5797440	341.0	271.9	21.6
Byczyna 1	3745216	5843848	841.3	611.2	18.0
Cykowo IG-1	3725483	5838728	575.2	358.1	13.1
Czeszewo IG-1	3671050	5783274	325.9	212.2	26.2
Florentyna IG-2	3719794	5751097	307.6	152.9	20.8
Grundy IG-1	3685583	5782892	318.0	136.3	17.8
Kalisz IG-1	3724916	5741212	446.7	194.9	22.5
Koło IG-4	3770228	5775194	54.6	35.3	15.0
Konary IG-1	3734523	5849746	861.4	600.1	16.3
Krośniewice IG-1	3786010	5792160	1176.9	743.3	15.5
Kutno 1	3799416	5796052	1322.8	558.8	14.8
Objezierze IG-1	3621100	5831360	662.7	408.0	16.6
Pobiedziska IGH-1	3654502	5821052	222.2	198.0	24.8
Poddebice PIG-2	3776376	5780652	306.7	147.4	7.8
Swarzędz IGH-1	3634676	5810198	434.5	303.1	20.1
Środa IG-3	3649650	5791150	492.5	320.8	18.6
Uniejów 1	3763066	5761930	35.5	24.6	16.8
Wojszyce IG-1A	3797434	5804643	139.2	101.0	17.2
Wojszyce IG-3	3792524	5800569	350.3	208.8	11.6
Wojszyce IG-4	3801095	5807108	238.9	142.1	15.8
Września IG-1	3671379	5804596	360.1	216.6	17.8
Wycisłowo IG-1	3650348	5757884	27.3	7.9	9.3
Zakrzyń IG-1	3722799	5755234	201.7	93.0	13.8

¹³ Średnia porowatość efektywna 16,7%; wg nowych analiz laboratoryjnych INiG (zad. 1.3.2) średnia porowatość efektywna z 10 otworów dla kolektorów jury dolnej w tym rejonie wynosi 18,4%.

Utwory dolnego triasu

Tabela 1.1.32_14 Zestawienie wybranych parametrów dla utworów triasu dolnego w rejonie Wielkopolski¹⁴

nazwa otworu	x	y	miąższość całkowita [m]	miąższość utworów wodonośnych [m]	porowatość [%]
Brudzewek-1	3697105	5761610	373.0	11.9	4.8
Brześć Kuj. IG-1	3770441	5833328	1644.2	94.2	7.2
Buk IG-1	3600720	5797440	695.6	71.1	9.3
Byczyna 1	3745216	5843848	1489.5	39.7	4.8
Czeszewo IG-1	3671050	5783274	669.7	51.9	7.5
Florentyna IG-2	3719794	5751097	654.8	130.3	9.7
Grundy IG-1	3685583	5782892	703.0	149.8	8.0
Kalisz IG-1	3724916	5741212	658.6	267.5	9.1
Konary IG-1	3734523	5849746	1255.6	79.2	5.5
Kutno 1	3799416	5796052	1819.3	42.4	6.2
Objezierze IG-1	3621100	5831360	866.6	43.9	5.3
Siciny IG-1	3602050	5733430	674.6	241.7	15.1
Środa IG-3	3649650	5791150	683.1	92.6	6.5
Uniejów 1	3763066	5761930	959.9	244.9	5.8
Września IG-1	3671379	5804596	745.1	77.6	12.0
Wycisłowo IG-1	3650348	5757884	577.6	170.9	11.9
Zakrzyń IG-1	3722799	5755234	686.8	85.0	6.0

¹⁴ Średnia porowatość efektywna 7,9%; wg nowych analiz laboratoryjnych INiG (zad. 1.3.2) średnia porowatość efektywna z 2 otworów dla kolektorów triasu dolnego w tym rejonie wynosi 5,9%.

Rozkład podstawowych parametrów zbiornikowych w rejonie Mazowsza/Lubelszczyzny

Analizowany obszar Mazowsza/Lubelszczyzny (większość Rejonu III, część Rejonu V oraz fragment Rejonu I, albo obszar nr 5 na **Fig. 1.1.32_4**) mieści się pomiędzy współrzędnymi prostokątnymi x: 3805000 y: 5715000 a x: 3944000, y: 5885000 i obejmuje swoim zasięgiem ponad 23 000km².

Utwory dolnej kredy

Tabela 1.1.32_12 Zestawienie wybranych parametrów dla utworów kredy dolnej w rejonie Mazowsza/Lubelszczyzny¹⁵

nazwa otworu	x	y	miąższość całkowita [m]	miąższość utworów wodonośnych [m]	porowatość [%]
Białobrzegi IG-1	3906690	5738526	92.3	66.2	24.0
Bodzanów IG-1	3838394	5832363	219.9	152	25.1
Czachówek-1	3917078	5776979	74.2	55.2	24.3
Dębe - 2	3907007	5828079	46.2	35.4	34.7
Gostynin 8	3821859	5825228	286.7	175.5	17.8
Gostynin IG-1	3814875	5822236	271.6	118.4	22.8
Gostynin IG-4	3820742	5825426	278.3	116.6	14.0
Kamionki IG-3	3812941	5848193	268.7	188.8	17.8
Kamionki-1	3812401	5848042	266.5	194.4	19.2
Kołbiel-1	3942871	5790733	53.3	8.6	17.3
Korabiewice IG-1	3872243	5773370	164.7	95.1	28.3
Łowicz IG-1	3841758	5782834	319.2	181.2	31.4
Mszczonów IG-1	3879666	5774948	148.5	92.6	26.2
Mszczonów IG-2	3875248	5771476	139	93.4	24.0
Nadarzyn IG-1	3901782	5789272	74	52.5	19.9
Okuniew IG-1	3929584	5812359	29.9	16.5	22.2
Płoński IG-2A	3869176	5842920	198.9	93.5	21.4
Polik IG-1	3820138	5875047	176.9	123.8	21.6
Potycz-1	3926970	5772036	43.3	34.5	32.6
Raducz IG-1	3868067	5766068	175.1	108.6	25.1
Różyce IG-2	3840200	5800509	234.6	156.1	25.9
Sierpc - 2	3815987	5862230	206.1	87.6	16.6
Skierniewice GT-1	3856033	5773052	194.7	130.7	32.8
Sochaczew -1	3861849	5804770	167.6	78.4	26.0
Szwejki 1	3886397	5750536	147	87.2	26.2
Szwejki IG-3	3883033	5745865	196	106.9	27.3
Warka IG-1	3918866	5749998	62	38.5	24.1
Wilga IG-1	3935568	5772165	28.8	24.2	27.7
Wyszków IG-1	3934984	5848338	5.7	0	0.0
Sochaczew -2	3865294	5795056	191	117.1	23.2

¹⁵ Średnia porowatość efektywna 22,6%; wg nowych analiz laboratoryjnych INiG (zad. 1.3.2) średnia porowatość efektywna z 3 otworów dla kolektorów kredy dolnej w tym rejonie wynosi 22%.

Utwory dolnej jury

Tabela 1.1.32_13 Zestawienie wybranych parametrów dla utworów jury dolnej w rejonie Mazowsza/Lubelszczyzny¹⁶

nazwa otworu	x	y	miąższość całkowita [m]	miąższość utworów wodonośnych [m]	porowatość [%]
Białobrzegi IG-1	3906690	5738526	216.8	124.8	26.9
Bodzanów IG-1	3838394	5832363	432	244.1	18.1
Budziszewice IG-1	3837221	5741616	621.3	392.5	20.8
Buków-1	3835006	5732838	258.4	138.6	19.1
Czachówek-1	3917078	5776979	160.8	64.3	7.1
Dębe - 2	3907007	5828079	254.9	173.6	23.1
Gostynin IG-1	3814875	5822236	660.7	381.8	13.4
Gostynin IG-4	3820742	5825426	182.3	113.1	18.5
Jeżów IG-1	3846712	5750366	1095	615.6	19.1
Kamionki IG-3	3812941	5848193	569	375.9	15.3
Kamionki-1	3812401	5848042	122.5	51.1	16.0
Kołbiel-1	3942871	5790733	84.7	41.5	14.3
Korabiewice IG-1	3872243	5773370	868.9	556.7	15.8
Łowicz IG-1	3841758	5782834	255	200.4	19.0
Mszczonów IG-1	3879666	5774948	341.4	186.5	17.5
Mszczonów IG-2	3875248	5771476	472.3	277.5	16.3
Nadarzyn IG-1	3901782	5789272	230.3	117.3	12.0
Okuniew IG-1	3929584	5812359	156.7	97.8	18.1
Płoński IG-2A	3869176	5842920	332.8	265.9	15.4
Polik IG-1	3820138	5875047	394.7	280.5	19.0
Raducz IG-1	3868067	5766068	1149.5	501	17.5
Różyce IG-2	3840200	5800509	445.6	297	17.3
Sierpc - 2	3815987	5862230	463.2	320.4	17.3
Skierniewice GT-1	3856033	5773052	752	380.5	18.3
Sochaczew -1	3861849	5804770	476.9	356.3	13.1
Stuzianna IG-2	3870261	5724108	956.4	411.7	16.4
Szwejki 1	3886397	5750536	528.8	276.7	9.9
Szwejki IG-3	3883033	5745865	591.9	356.8	19.0
Warka IG-1	3918866	5749998	104.9	0	0.0
Wilga IG-1	3935568	5772165	70.6	22.2	13.9
Wyszków IG-1	3934984	5848338	147.6	79.9	15.5
Zgierz IG-1	3813052	5768712	1123.5	518.2	13.9
Sochaczew -2	3865294	5795056	354.3	218	16.8

¹⁶ Średnia porowatość efektywna 16,1%; wg nowych analiz laboratoryjnych INiG (zad. 1.3.2) średnia porowatość efektywna z 23 otworów dla kolektorów jury dolnej w tym rejonie wynosi 14,6%.

Utwory dolnego triasu

Tabela 1.1.32_14 Zestawienie wybranych parametrów dla utworów triasu dolnego w rejonie Mazowsza/Lubelszczyzny¹⁷

nazwa otworu	x	y	miąższość całkowita [m]	miąższość utworów wodonośnych [m]	porowatość [%]
Białobrzegi IG-1	3906690	5738526	246.2	33.3	14.2
Bodzanów IG-1	3838394	5832363	478.1	63	6.0
Budziszewice IG-1	3837221	5741616	1239.2	106.9	5.7
Buków-1	3835006	5732838	918.2	365.6	7.6
Czachówek-1	3917078	5776979	239.8	29.9	8.5
Dębe - 2	3907007	5828079	180.4	17.1	7.7
Jeżów IG-1	3846712	5750366	828.1	176.4	9.2
Kołbiel-1	3942871	5790733	224.4	28.5	16.7
Mszczonów IG-1	3879666	5774948	349.4	223.5	10.3
Mszczonów IG-2	3875248	5771476	402	140.4	8.9
Nadarzyn IG-1	3901782	5789272	287.5	79.4	10.1
Okuniew IG-1	3929584	5812359	263	54.7	9.6
Płoński IG-2A	3869176	5842920	479.8	35.7	8.3
Polik IG-1	3820138	5875047	501.3	74.4	9.4
Różyce IG-2	3840200	5800509	568.2	164.5	8.8
Sierpc - 2	3815987	5862230	559.5	60.9	6.0
Studzianna IG-2	3870261	5724108	1297.1	363.2	5.9
Szwejki IG-3	3883033	5745865	374	29.7	6.2
Warka IG-1	3918866	5749998	205.1	178	14.4
Wilga IG-1	3935568	5772165	181.9	90.5	13.3
Wyszków IG-1	3934984	5848338	226.5	31.6	9.6
Zgierz IG-1	3813052	5768712	573.8	9.5	7.2
Sochaczew -2	3865294	5795056	382	7.9	4.8

¹⁷ Średnia porowatość efektywna 9,1%; wg nowych analiz laboratoryjnych INiG (zad. 1.3.2) średnia porowatość efektywna z 4 otworów dla kolektorów triasu dolnego w tym rejonie wynosi 12,3%.

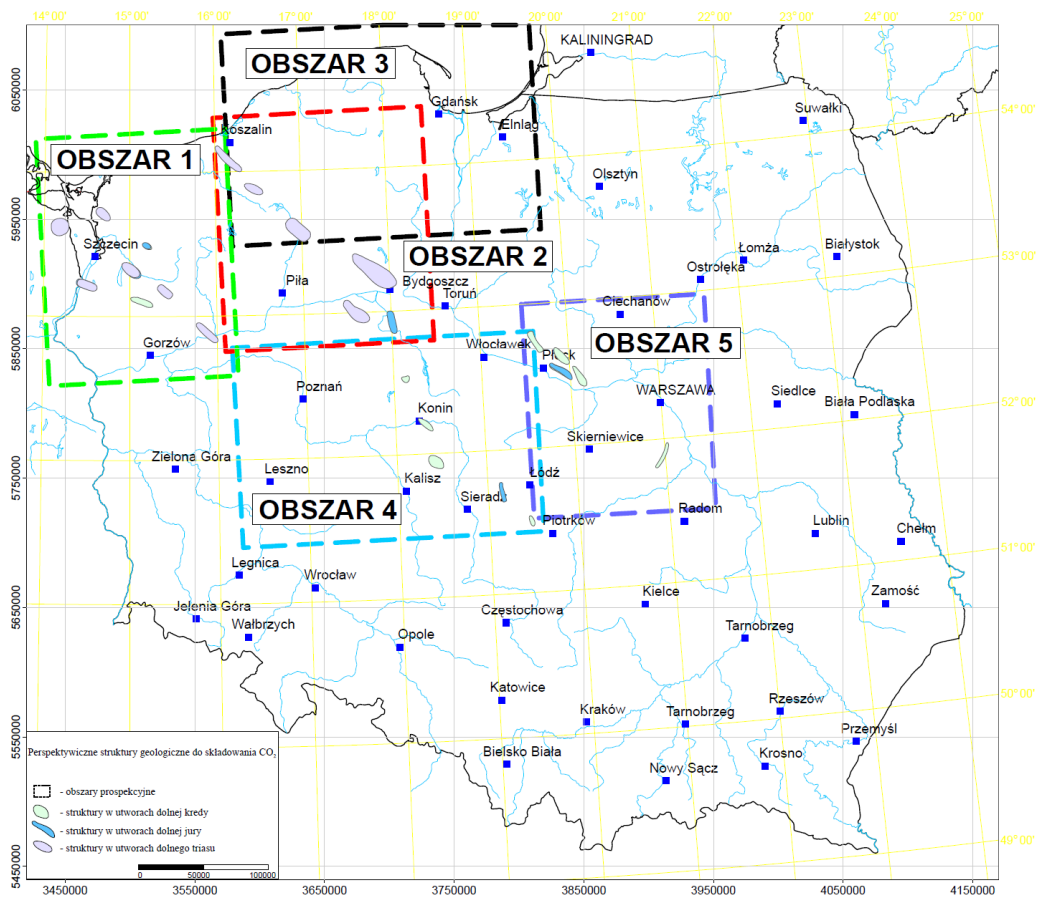


Fig. 1.1.32_4 Mapa lokalizacji obszarów prospekcyjnych oraz perspektywicznych struktur geologicznych do składowania CO₂

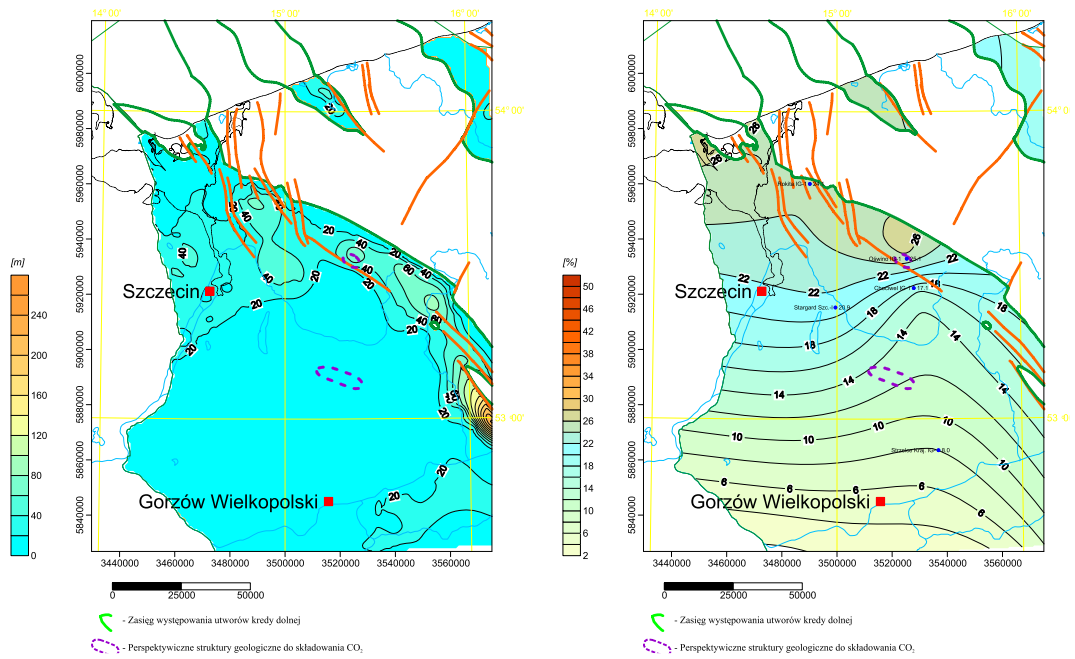


Fig. 1.1.32_5 Mapa miąższości utworów wodonośnych kredy dolnej (po lewej) i porowatości (po prawej), obszar 1

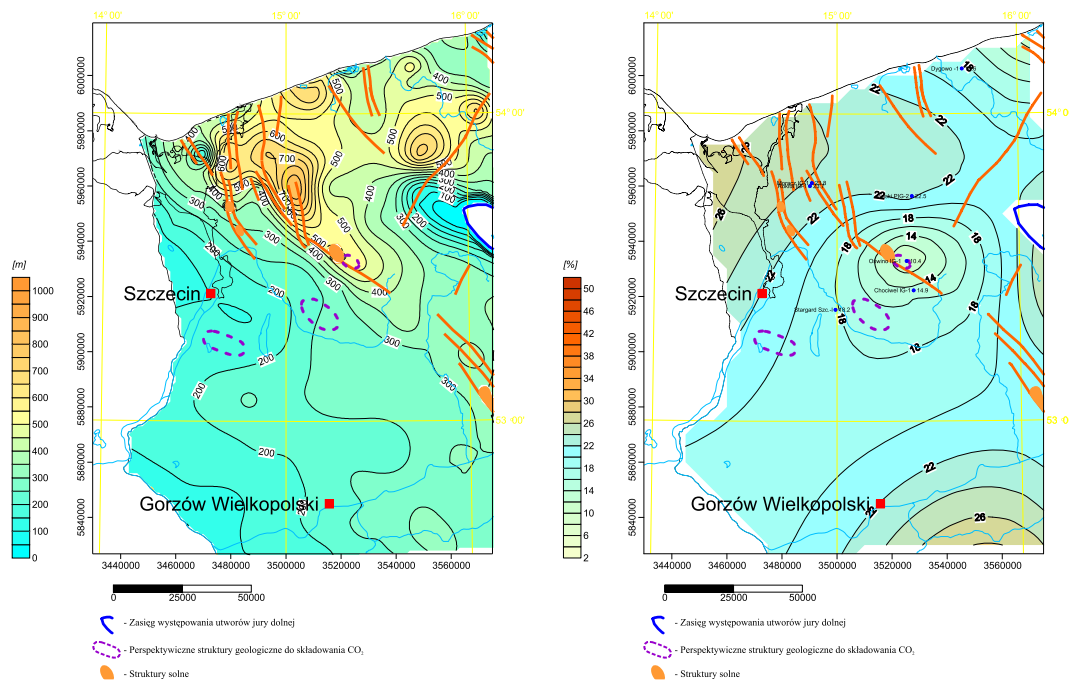


Fig. 1.1.32_6 Mapa miąższości utworów wodonośnych jury dolnej (po lewej) i porowatości (po prawej), obszar 1

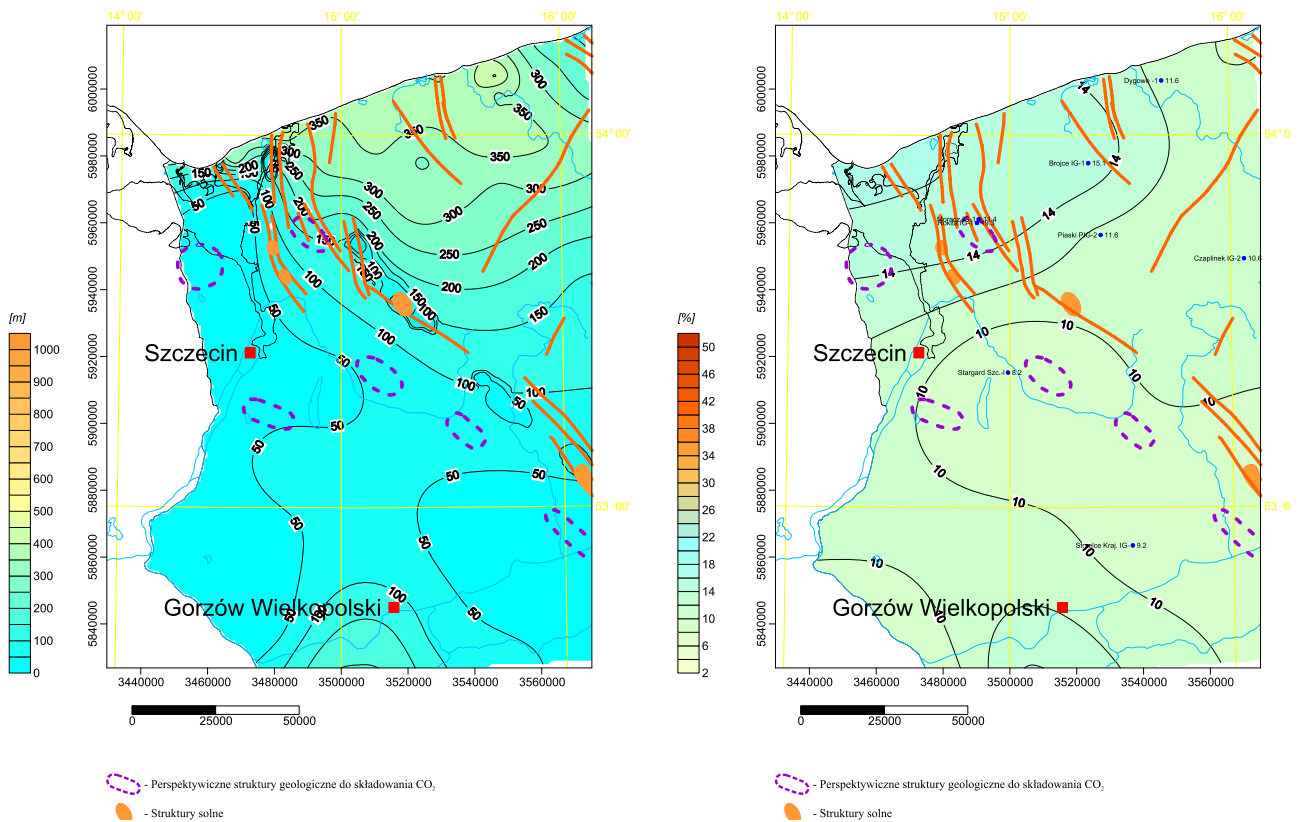


Fig. 1.1.32_7 Mapa miąższości utworów wodonośnych triasu dolnego (po lewej) i porowatości (po prawej), obszar 1

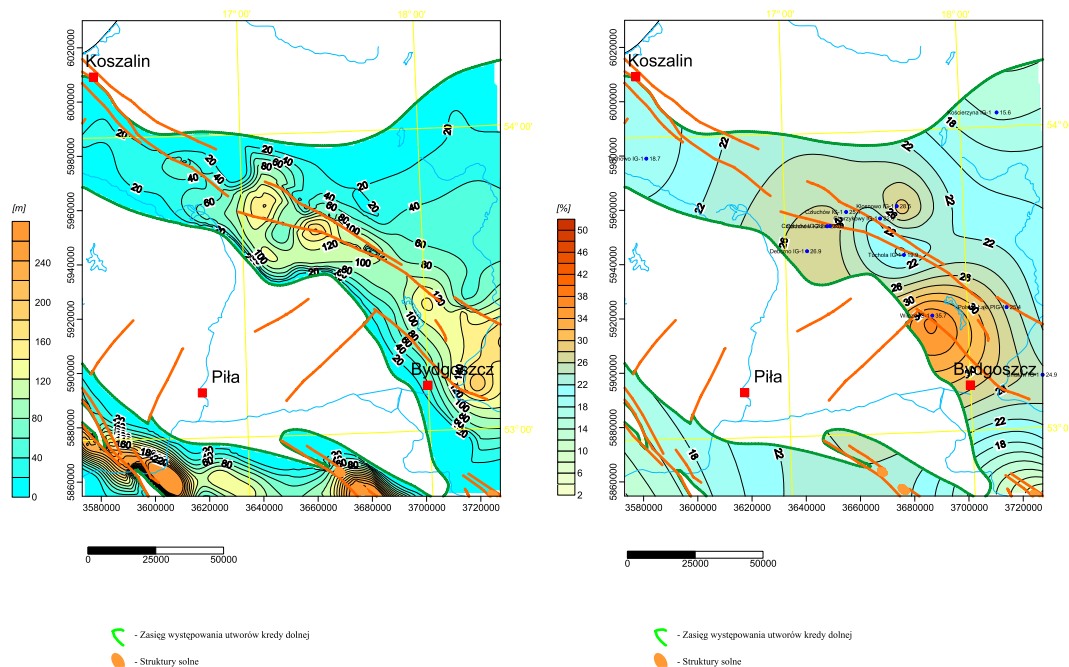


Fig. 1.1.32_8 Mapa miąższości utworów wodonośnych kredy dolnej (po lewej) i porowatości (po prawej), obszar 2

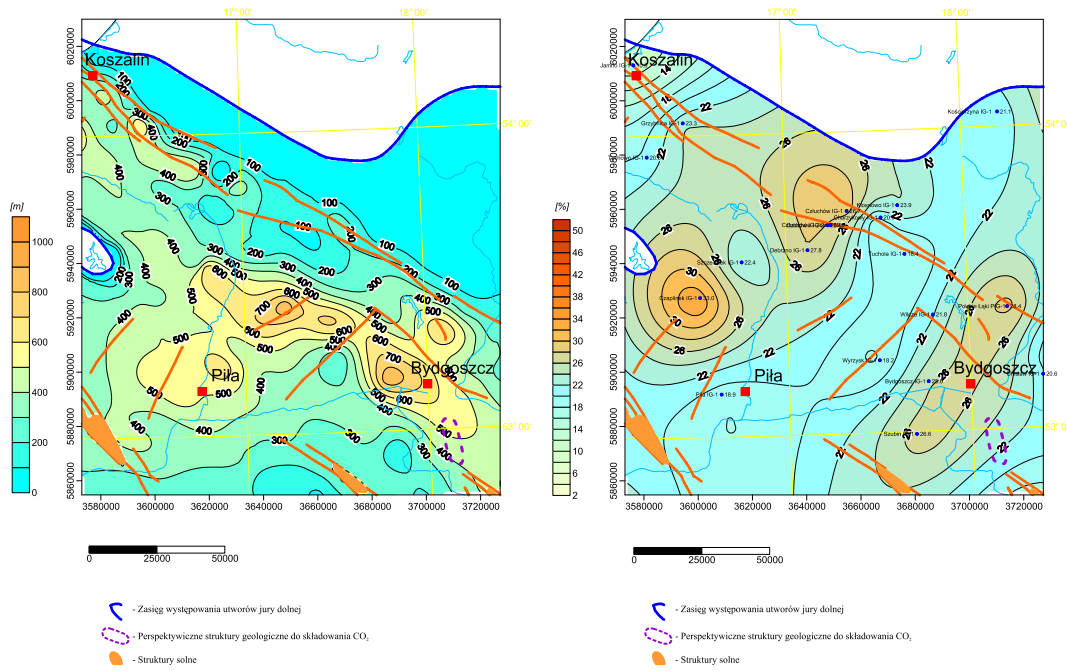


Fig. 1.1.32_9 Mapa miąższości utworów wodonośnych jury dolnej (po lewej) i porowatości (po prawej), obszar 2

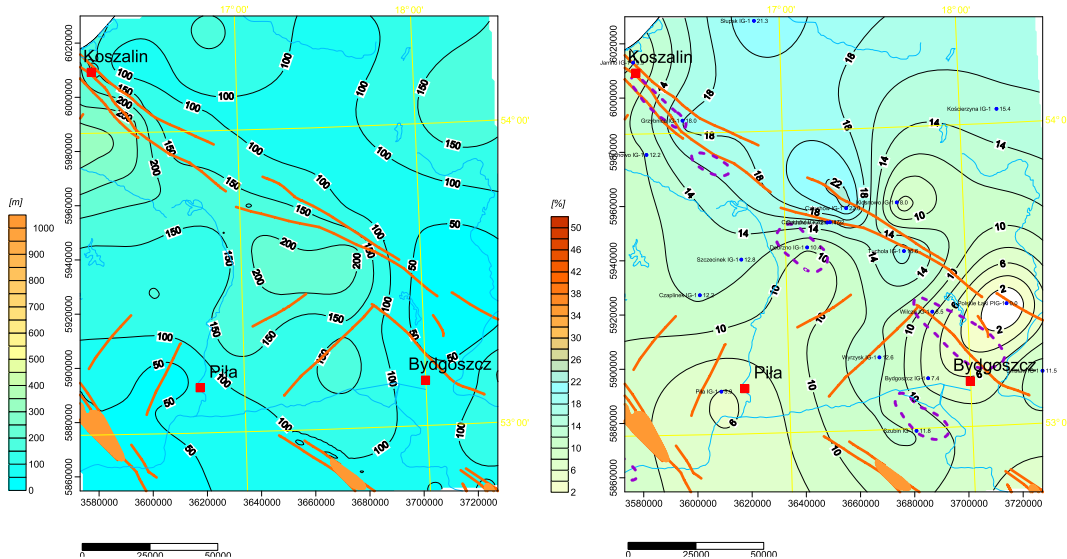


Fig. 1.1.32_10 Mapa miąższości utworów wodonośnych triasu dolnego (po lewej) i porowatości (po prawej), obszar 2

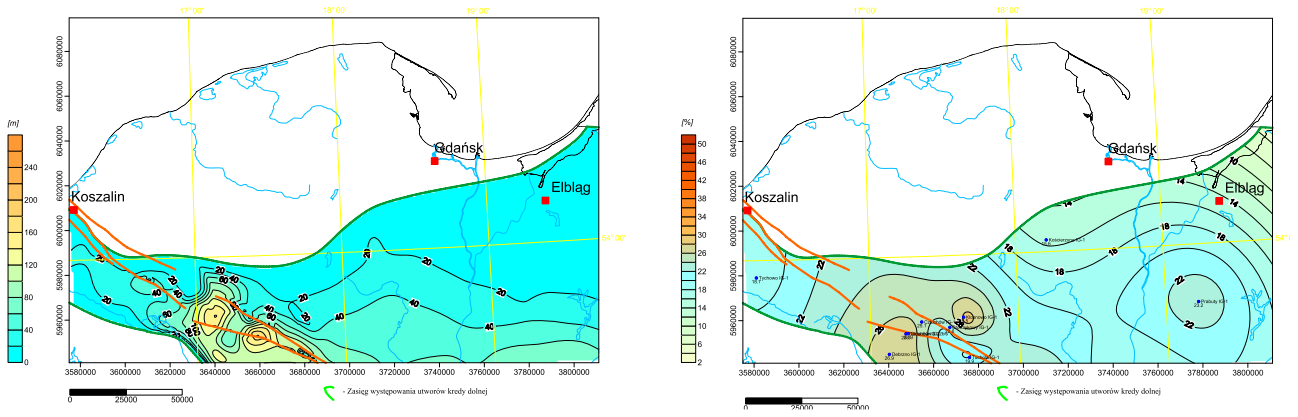


Fig. 1.1.32_11 Mapa miąższości utworów wodonośnych kredy dolnej (po lewej) i porowatości (po prawej), obszar 3

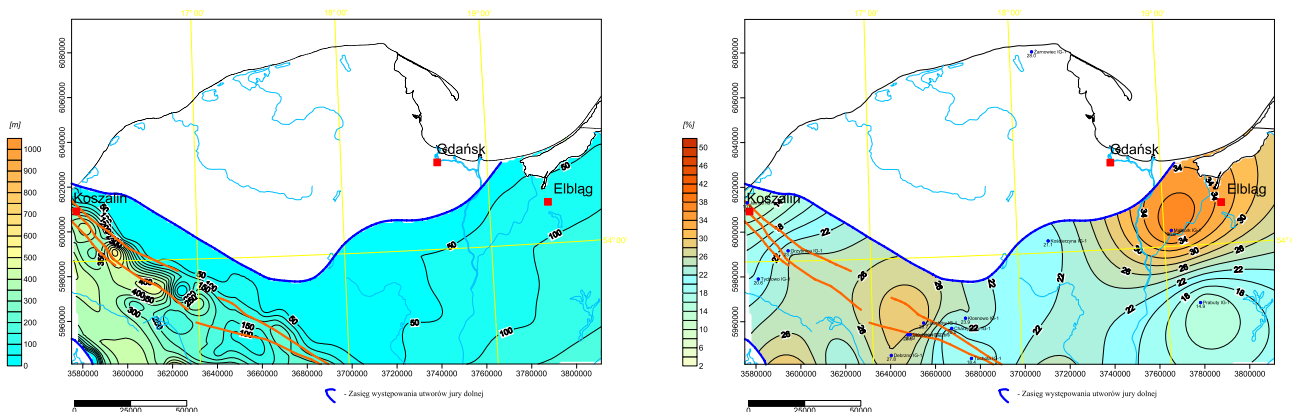


Fig. 1.1.32_12 Mapa miąższości utworów wodonośnych jury dolnej (po lewej) i porowatości (po prawej), obszar 3

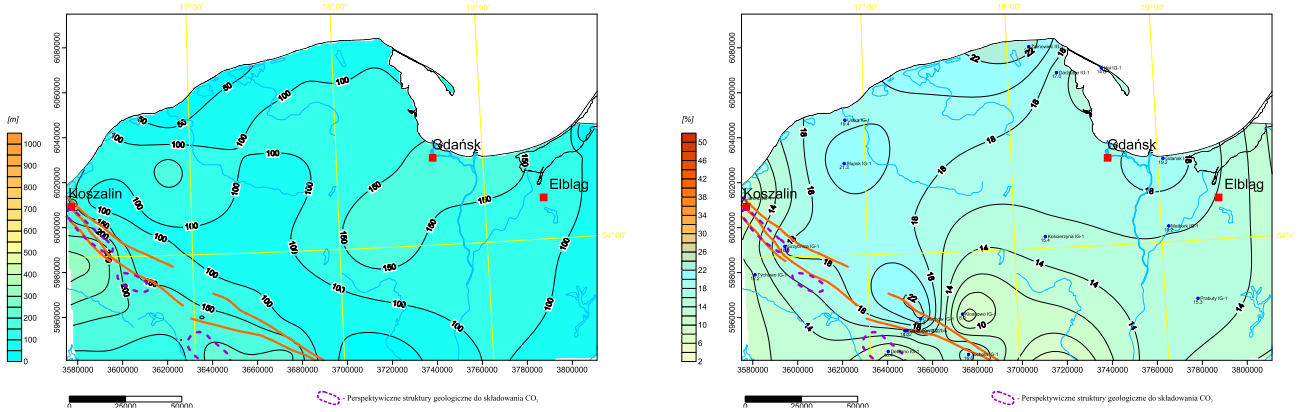


Fig. 1.1.32_13 Mapa miąższości utworów wodonośnych triasu dolnego (po lewej) i porowatości (po prawej), obszar 3

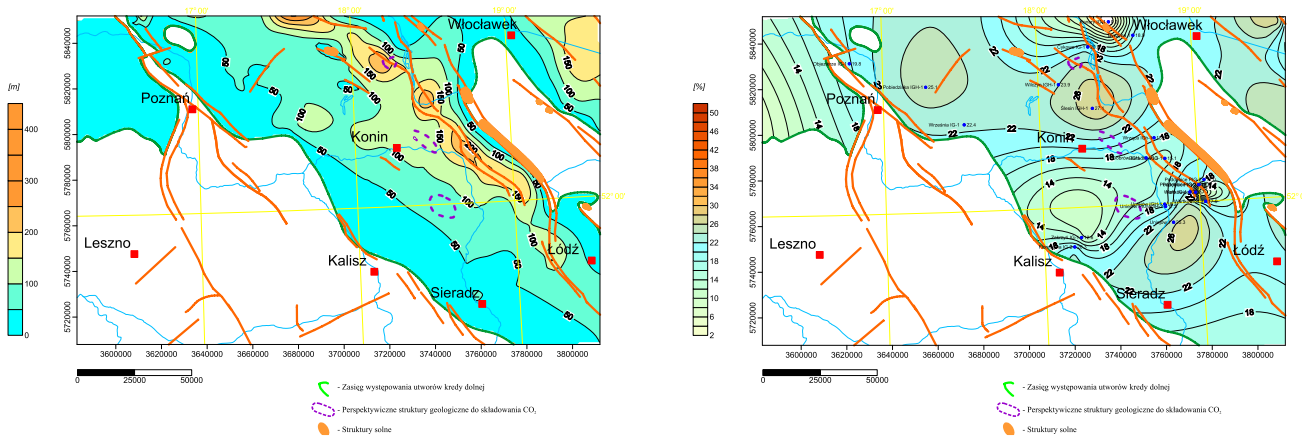


Fig. 1.1.32_14 Mapa miąższości utworów wodonośnych kredy dolnej (po lewej) i porowatości (po prawej), obszar 4

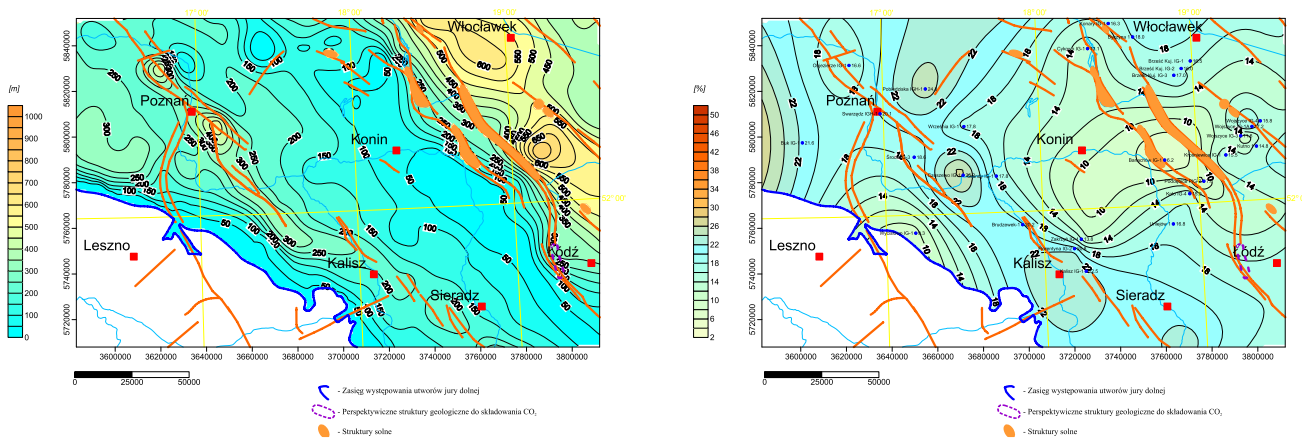


Fig. 1.1.32_15 Mapa miąższości utworów wodonośnych jury dolnej (po lewej) i porowatości (po prawej), obszar 4

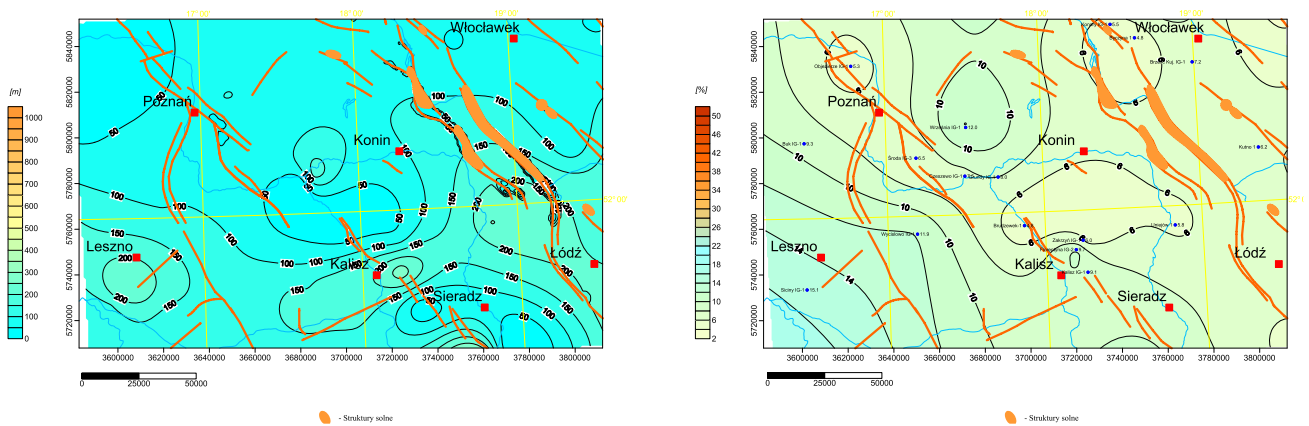


Fig. 1.1.32_16 Mapa miąższości utworów wodonośnych triasu dolnego (po lewej) i porowatości (po prawej), obszar 4

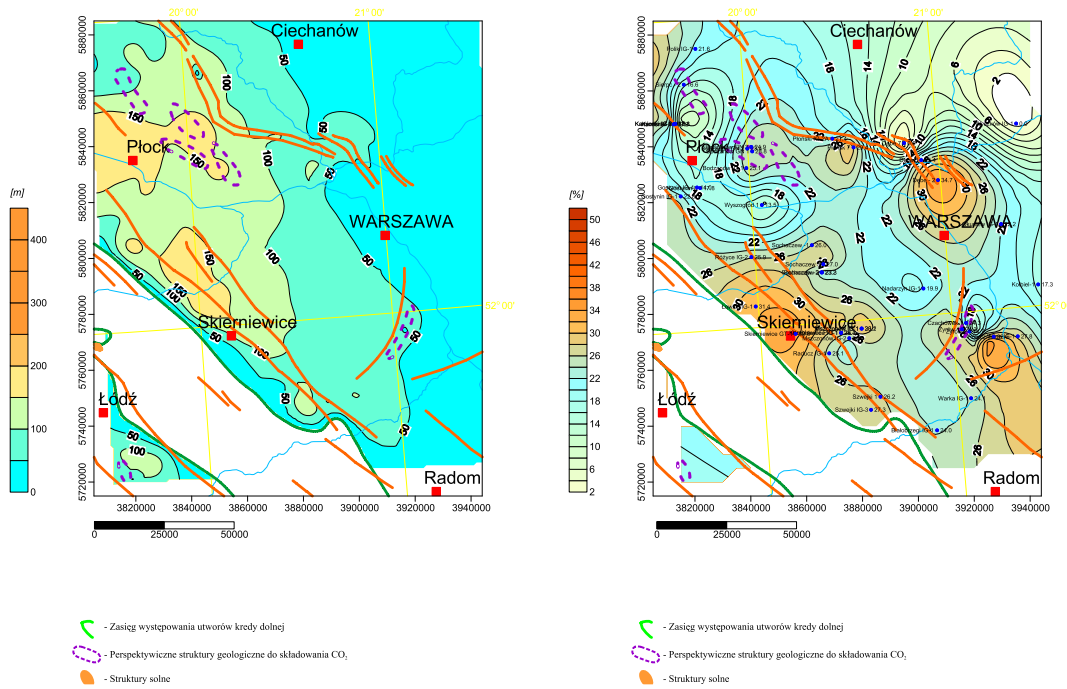


Fig. 1.1.32_17 Mapa miąższości utworów wodonośnych kredy dolnej (po lewej) i porowatości (po prawej), obszar 5

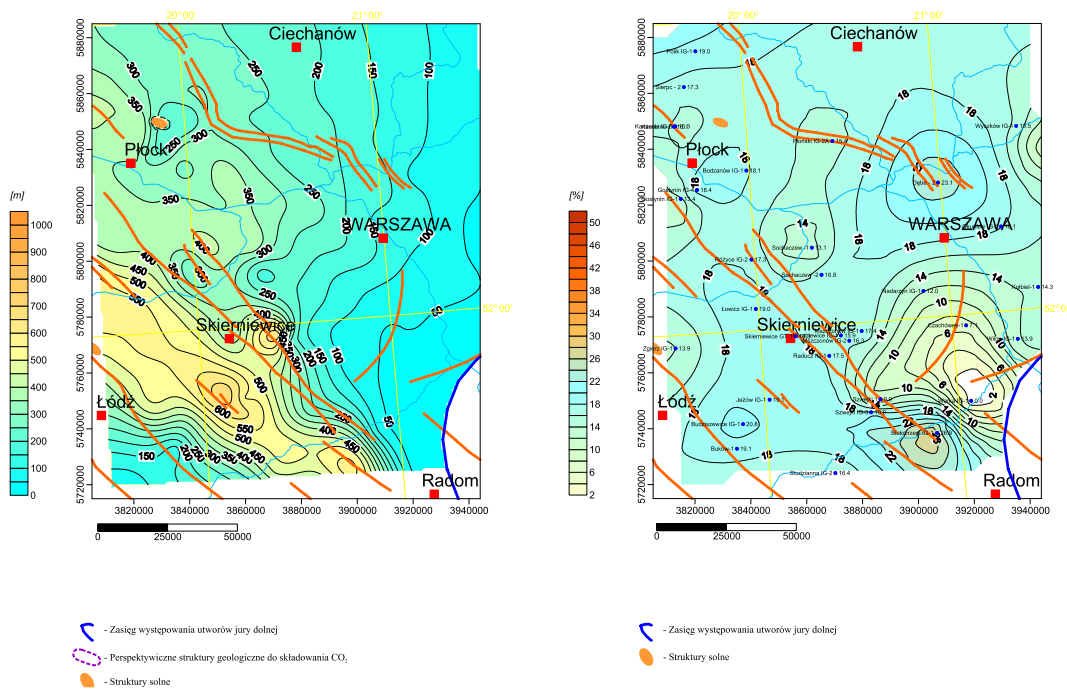


Fig. 1.1.32_18 Mapa miąższości utworów wodonośnych jury dolnej (po lewej) i porowatości (po prawej), obszar 5

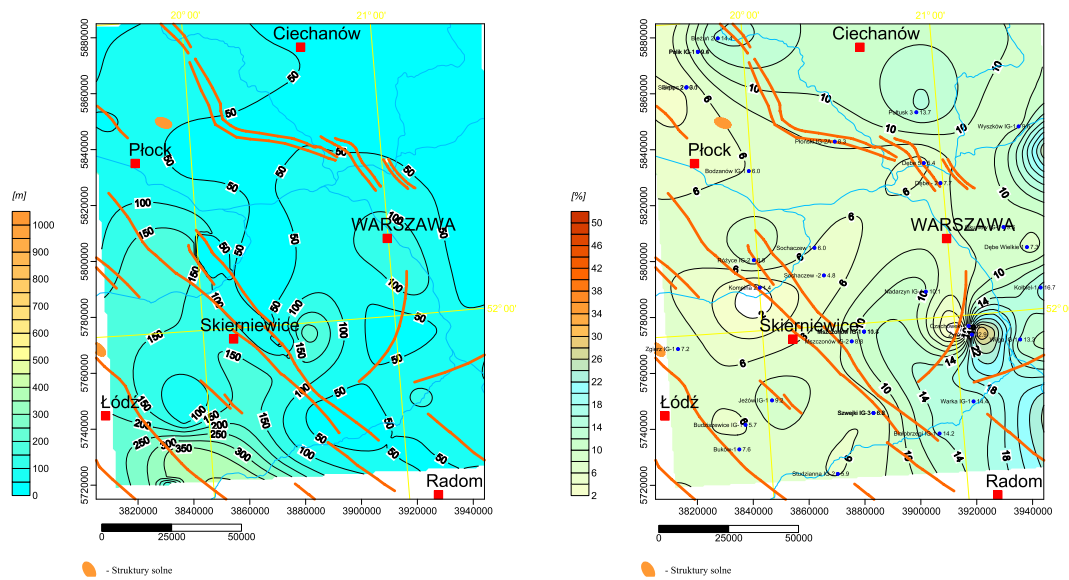


Fig. 1.1.32_19 Mapa miąższości utworów wodonośnych triasu dolnego (po lewej) i porowatości (po prawej), obszar 5

Przedstawienie modeli układów sekwestracyjnych w Polsce; modele dla rejonu GZW i pokładów węgla (1.1.33 - GIG)

(J. Chećko, M. Głogowska, J. Skiba, B. Jura, T. Urych, B. Warzecha)

W szeregu rozwiniętych krajach świata, prowadzi się obecnie intensywne prace badawcze zmierzające do opracowania skutecznych technologii i technik zatłaczania CO₂ do struktur geologicznych, jako antidotum na nadmierną emisję tego gazu do atmosfery i pogłębiający się stale efekt cieplarniany na Ziemi. Nie ma już wątpliwości, że głęboko zalegające struktury geologiczne, mogą spełnić oczekiwania ekologów poprzez trwałe unieszkodliwienie CO₂ w wyniku jego zatłaczania do niektórych formacji geologicznych. Wyselekcjonowane struktury geologiczne wraz z odpowiednio dobranymi technologiami i technikami zatłaczania, to na obecną chwilę praktycznie jedyny kierunek skutecznego unieszkodliwienia dwutlenku węgla, który powstaje w procesach przemysłowych.

Podkreślić należy, że technologia zatłaczania i trwałego magazynowania, zależy w głównej mierze od parametrów geologicznych wyselekcjonowanego zbiornika oraz właściwego doboru parametrów iniekcyjnych, uwzględniających:

- **chłonność i przepuszczalność** środowiska w wytypowanej do magazynowania CO₂ strukturze geologicznej,
- **temperaturę** skał oraz **ciśnienia** panujące na danej głębokości zalegania formacji geologicznej,
- **występowanie nieciągłości** (stref uskokowych, przerw sedymentacyjnych) w obrębie struktury wytypowanej do zatłaczania i magazynowania CO₂, ograniczających zasięg penetracji gazu i zwiększających ryzyko migracji gazu do miejsc niepożądanych,
- **obecność warstw izolujących**, wykluczających ryzyko powrotnego wycieku CO₂ na powierzchnię i/lub do czynnych wyrobisk sąsiadującej kopalni z miejscem eksperymentu.

Dwutlenek węgla zatłoczony do głębokich nieeksploatowanych pokładów węgla ulega procesowi adsorpcji. Węgiel kamienny ze względu na swoją dużą powierzchnię właściwą i zdolności adsorpcyjne może być naturalnym magazynem dwutlenku węgla.

W przypadku zatłaczania CO₂ do metanowych pokładów węgla będzie zastępował metan, umożliwiając jednoczesny odzysk tego gazu. Metoda pozyskiwania metanu w ten sposób nosi nazwę - ECBM (**E**nhanced **C**oal **B**ed **M**ethane **R**ecovery – zwiększone odzyskiwanie metanu z pokładów węgla).

Już podczas modelowania i prognozowania procesów przepływu – migracji gazów w pokładach węgla wykorzystane zostały naturalne własności węgla do adsorpcji gazów, polegające na wymianie dwóch molekuł dwutlenku węgla na jedną molekułę CH₄. Badania laboratoryjne wykazują, że CO₂ jako sorbat dobrze penetruje w strukturę porowatą węgla jako sorbentu, ze względu na niewielkie rozmiary cząsteczki oraz niską energię aktywacji. Uważa się ponadto, że wolny dwutlenek węgla jak wszystkie płyny skupia się głównie w makroporach matrycy węglowej, a jego zdeponowana ilość zależy od objętości,

ciśnienia i temperatury. Proces sorpcji właściwej jest bardzo szybki, natomiast proces dyfuzji gazu zdeponowanego w węglu przebiega wolno. Szybkość dyfuzji zależy między innymi od wielkości ziaren i dlatego następuje znacznie szybciej w pokładach węgla podebranych lub nadebranych, odprężonych w wyniku prowadzonej wcześniej eksploatacji. Iniekcja CO₂ ma na celu jego adsorpcję w strukturze porowatej węgla i wyparcie CH₄ do otworów eksploatacyjnych.

UKŁAD SEKWESTRACYJNY KANIÓW (RECPOL)

W ramach projektów Recopol i Movecbm realizowanych w latach 2003-2008, finansowanych ze środków Unii Europejskiej, Główny Instytut Górnictwa był głównym partnerem oraz wykonawcą prac badawczych związanych z iniekcją dwutlenku węgla do złoża karbońskiego w północno – wschodniej części obszaru górniczego KWK „Silesia”, obecnie KWK „Brzeszcze - Silesia” w obszarze koncesyjnym w Kaniowie na wydobywanie metanu przez Metanel S.A.. W teście badawczym wykorzystane zostały dwa głębokie odwierty geologiczne wykonane z powierzchni, jeden istniejący MS-4 o głębokości 1200m wykorzystywany do eksploatacji CH₄ i drugi nowo odwiercony MS-3 o głębokości 1125m do iniekcji CO₂. Lokalizację otworów MS-1, MS-3 i MS-4 naniesiono na wycinek mapy pokładu 315 w obszarze górniczym KWK „Silesia” i przedstawiono **Fig. 1.1.33_1**.

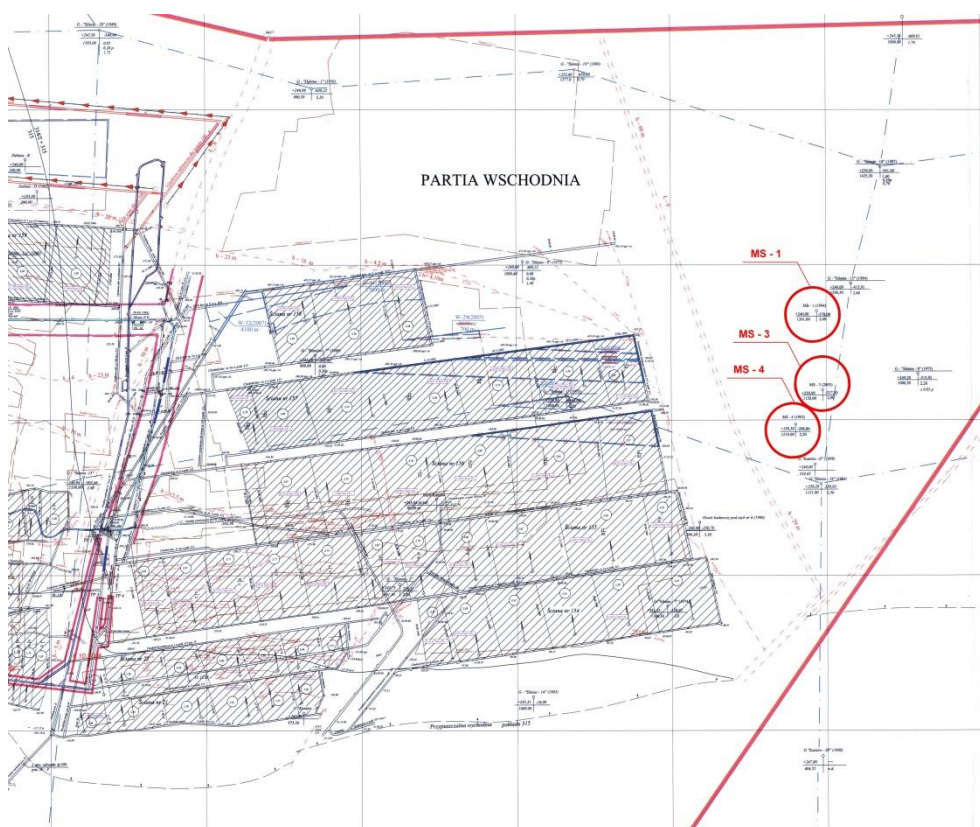


Fig. 1.1.33_1 Wycinek mapy pokładu 315 w obszarze górniczym KWK „Silesia” z naniesioną lokalizacją otworów MS-1, MS-3, MS-4 wykonanych z powierzchni

Głównym celem projektów było zbadanie i ocena możliwości ograniczenia emisji CO₂ w wyniku stosowania technologii opartej o zatłaczanie CO₂ do struktur węglowych nieodprężonych prowadzoną wcześniej eksploatacją.

Zrealizowanie projektów RECOPOL i MOVECBM dało odpowiedź na następujące pytania:

- Czy proces CO₂-ECBMR jest technicznie możliwy do zrealizowania w warunkach europejskich (GZW)?
- Czy składowanie CO₂ jest bezpieczne i trwałe ?
- Czy jest ekonomicznie opłacalne?
- Czy można zastosować go na szerszą skalę?

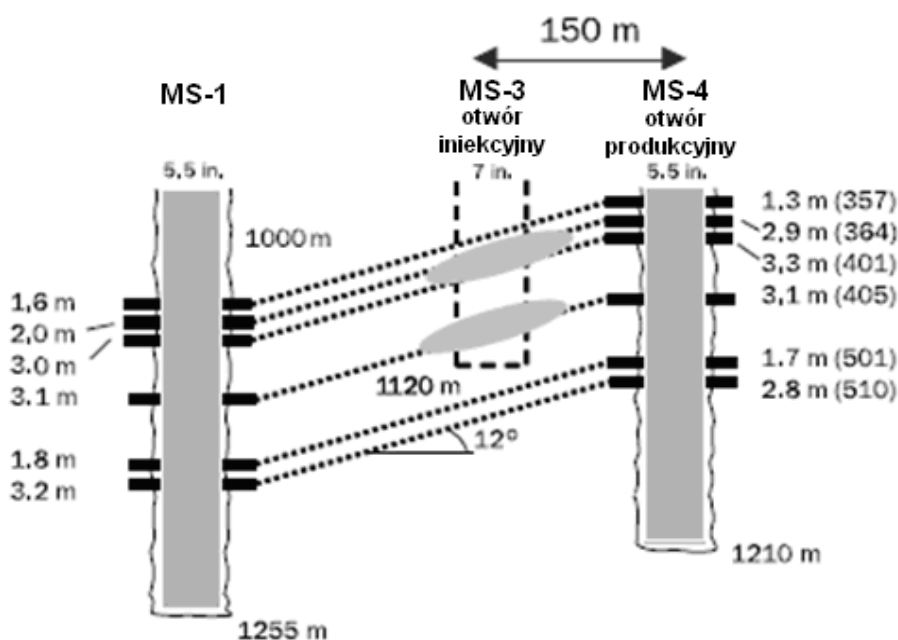


Fig. 1.1.33_2 Poglądowy profil pionowy dolnych partii otworów: MS-1, MS-3 i MS-4 wraz z interwałami ich głębokości oraz miąższości pokładów przeznaczonych do zatłaczania CO₂

Iniekcja CO₂ z otworu MS-3 prowadzona była w pokładach: 364, 401 i 405 na głębokości poniżej 1000 m i miała na celu trwałą sekwestrację CO₂ w pokładach węgla, zapewniając jednocześnie stworzenie bezpiecznych warunków dla ruchu górniczego kopalni jak i na powierzchni obszaru górniczego w otoczeniu otworów badawczych MS-1, MS-3i MS-4. Nowo wykonany otwór MS-3 zaprojektowano i wykonano do głębokości 1200mi zlokalizowano go w odległości 150m od otworu MS-4 (**Fig. 1.1.33_2**).

Otwór badawczy MS-3 na końcowym odcinku jego zgłębiania udostępnił pokłady 364, 401 i 405 o miąższości odpowiednio 2,9m, 3,3m, 3,1m, do których prowadzona była iniekcja dwutlenku węgla.

Do wykonanego otworu MS-3 zatłaczano ciekły dwutlenek węgla pod ciśnieniem 8-15 MPa. Przy maksymalnym ciśnieniu tłoczenia 15,0 MPa, wydajność iniekcji CO₂ wynosiła ok. 8-10 l/min (12-15 ton/dobę).

Iniekcja CO₂ prowadzona była do wyselekcjonowanych pokładów: 364, 401 i 405 w interwałach głębokości od 1012 do 1076 m, po uprzednio dokonanej perforacji ładunkami materiału wybuchowego kolumny rur okładzinowych (casing) w otworze MS-3. Iniekcja dwutlenku węgla na odcinkach perforacji do pokładów powodowała magazynowanie CO₂ przy jednoczesnym wypieraniu metanu z silnie metanowych pokładów do otworu produkcyjnego MS-4, usytuowanego w odległości 150 m na południowy zachód od otworu MS-3. Ogólny schemat przedstawiający ideę projektu został przedstawiony na **Fig. 1.1.33_3**.

Przed podjęciem iniekcji CO₂ przez otwór MS-3 do utworów karbonu, Główny Instytut Górnictwa (Kopalnia Doświadczalna „Barbara”) przeprowadził szczegółową analizę potencjalnego zagrożenia gazowego w wyrobiskach czynnych w pokładach oraz zrobach z tytułu zatłaczania CO₂. Nadmienić należy, że zagrożenie gazowe w wyrobiskach oraz zrobach mogło dotyczyć zarówno dwutlenku węgla jak i metanu.

Przed przystąpieniem do analizy zagrożenia gazowego w czynnych i nieczynnych wyrobiskach KWK „Silesia” przyjęto „a priori” założenie o możliwej migracji gazów (CO₂ lub CH₄) do wyrobisk poprzez uskoki oraz zrobry charakteryzujące się zwiększoną przepuszczalnością gazową. Nadmienić należy, że zakładane ciśnienie podczas iniekcji CO₂ do otworu MS-3 jest większe od ciśnienia złożowego, tym samym w przypadku kontaktu gazu o w.w. ciśnieniu ze strefą o zmniejszonej przepuszczalności może nastąpić ukierunkowana migracja gazów w kierunku czynnych wyrobisk kopalni.

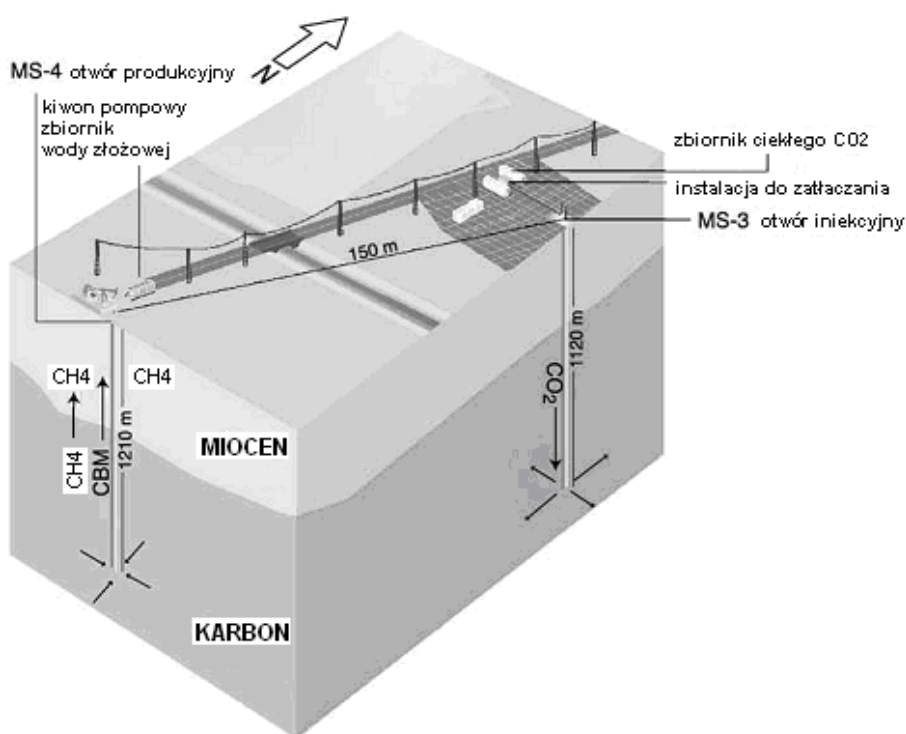


Fig. 1.1.33_3 Schemat przedstawiający ideę projektu Recopol

Ciśnienie w czasie iniekcji CO₂ do otworu MS-3 będzie malało wraz ze zwiększaniem się promienia odległości od tego otworu. Otwory MS-3, MS-1 i MS-4 zlokalizowane są w nieodprężonej eksploatacją partii obszaru górniczego, tym samym mechanizm desorpcji metanu z pokładów węgla oraz adsorpcji CO₂ nie stwarza możliwości nagłego przemieszczania się gazów w ich sąsiedztwie.

W opracowaniu tym omówiono wszystkie czynniki kształtujące możliwość powstania potencjalnego zagrożenia gazowego w czynnych i nieczynnych wyrobiskach KWK „Silesia” w wyniku iniekcji CO₂ do otworu MS-3, ponadto sformułowano zakres kontroli i monitoringu zagrożenia gazowego zabezpieczającego zatrudnioną załogę w wyrobiskach dołowych kopalni.

Czynniki kształtujące możliwość powstania zagrożenia gazowego w czynnych wyrobiskach kopalni

Nienaruszone eksploatacją złoża w sąsiedztwie otworów MS-3, MS-1 i MS-4 wyklucza możliwość niekontrolowanego nagłego przepływu gazów, jednakże nie można wykluczyć ukierunkowanej migracji gazów przez nierozpoznane strefy uskokowe, występujące w sąsiedztwie otworów, charakteryzujące się zwiększoną przepuszczalnością gazową. Doświadczenia ruchowe potwierdzają, że w warunkach zwiększonej przepuszczalności gazowej w pokładach metanowych w sąsiedztwie zaburzeń geologicznych istnieje możliwość wzmożonego wypływu metanu do wyrobisk na kontakcie z zaburzeniami.

W oparciu o dostępne informacje związane ze: zidentyfikowaną tektoniką złoża, zaszcłociami z tytułu prowadzenia robót górniczych w najbliższym sąsiedztwie otworów MS-3, MS-1 i MS-4, sposobem otamowania zrobów, KD „Barbara” przeprowadziła analizę potencjalnego zagrożenia gazowego, jakie może powstać w czynnych wyrobiskach KWK „Silesia” z tytułu prowadzonej iniekcji CO₂ do otworu MS-3.

Wpływ zaburzeń geologicznych (uskoków) oraz usytuowania nieczynnych wentylacyjnie wyrobisk na możliwość migracji gazów w obszarze górniczym kopalni „Silesia”

W otworze MS-4, który wykonany był w 1995 roku przeprowadzono szczelinowanie pokładów węgla: 357, **364, 401, 405**, 501 i 510, po którym prowadzono wówczas krótkotrwałe ujęcie metanu. Nowy otwór MS-3 zlokalizowany został w odległości 150 metrów na północny – wschód od otworu MS-4.

Hydroszczelinowanie pokładów **364, 401 i 405** w otworze iniekcyjnym **MS-3** zwiększyło płaszczyznę kontaktu zatłaczanego dwutlenku węgla z pokładami oraz górotworem.

W rejonie otworów MS-3 i MS-4 grubość nadkładu wynosi 195-200 m, a utwory czwartorzędowe buduje warstwa piaszczysto – żwirowa o miąższości około 12 metrów, natomiast miąższość trzeciorzędu wynosi 180 – 185 m.

Na zachód od otworów MS-3 i MS-4 przebiega uskok Ł-8 o amplitudzie H = 5-95 m oddzielający partię centralną od wschodniej. Uskok ten ma charakter nożycowy, a jego zrzut rośnie z głębokością zalegania w kierunku północnym. Przebieg uskoku Ł-8 zidentyfikowany został robotami górniczymi w pokładzie 214/1-2. Na wschód od uskoku Ł-8 wykonany został w latach 1988 – 1989 odcinek 180 m przekopu wschodniego nr 3, w którym stwierdzono 4 uskoki o zrzutach 2 – 7 m. Zidentyfikowane małe uskoki mają połączenie z uskokiem Ł-8 i nie można wykluczyć ich przebiegu w bezpośrednim sąsiedztwie otworów MS-3 i MS-4.

W głębiej zalegającym pokładzie 304 wydrążony został przekop wschodni Nr 3 poziom I, który przechodzi przez uskok Ł-8 w kierunku otworu MS-4 (Fig. 1.1.33_4). W pokładzie 315 zidentyfikowane zaburzenia uskokowe stwierdzone na zachód do uskoku Ł-8 wymusiły lokalizacje dowierzchni ścianowych i krótsze wybiegi dla kolejno eksploatowanych ścian.

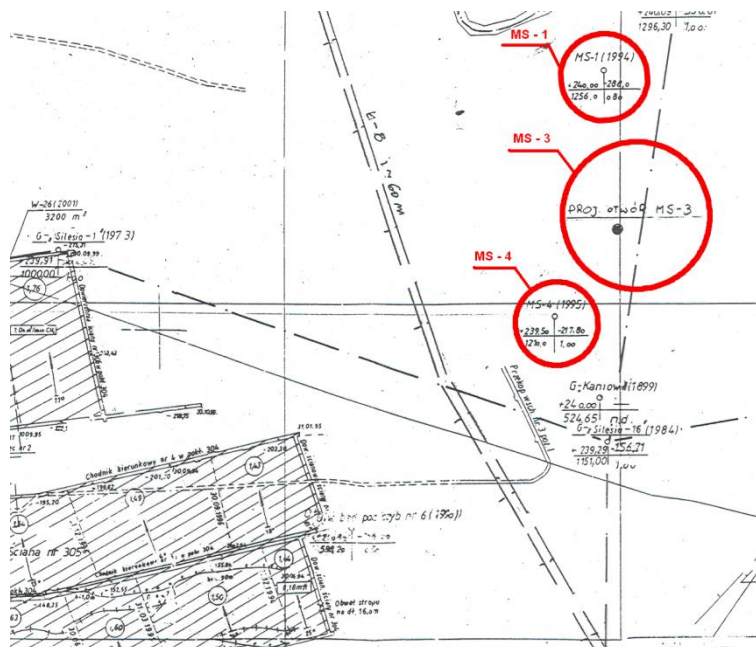


Fig. 1.1.33_4 Wycinek mapy pokładu 304 KWK „Silesia”

Na zachód od otworów MS-3 i MS-4 przebiega uskok Ł-8 o amplitudzie $H = 5-95$ m oddzielający partię centralną od wschodniej. Uskok ten ma charakter nożycowy, a jego zrzut rośnie z głębokością zalegania w kierunku północnym. Przebieg uskoku Ł-8 zidentyfikowany został robotami górniczymi w pokładzie 214/1-2. Na wschód od uskoku Ł-8 wykonany został w latach 1988 – 1989 odcinek 180 m przekopu wschodniego nr 3, w którym stwierdzono 4 uskoki o zrzutach 2 – 7 m. Zidentyfikowane małe uskoki mają połączenie z uskokiem Ł-8 i nie można wykluczyć ich przebiegu w bezpośrednim sąsiedztwie otworów MS-3 i MS-4.

W głębiej zalegającym pokładzie 304 wydrążony został przekop wschodni Nr 3 poziom I, który przechodzi przez uskok Ł-8 w kierunku otworu MS-4 (Fig. 1.1.33_4). W pokładzie 315 zidentyfikowane zaburzenia uskokowe stwierdzone na zachód do uskoku Ł-8 wymusiły lokalizacje dowierzchni ścianowych i krótsze wybiegi dla kolejno eksploatowanych ścian.

Analiza usytuowania dyslokacji tektonicznych oraz zrobów eksploatowanych ścian w pokładach 304 i 315 (Fig. 1.1.33_4 i 1) pozwoliła na zajęcie następującego stanowiska, co do możliwej migracji gazów do czynnych wyrobisk kopalni z tytułu iniekcji CO_2 , a mianowicie:

- brak bezpośredniego kontaktu otworów MS-3 i MS-4 ze zrobami poeksploatacyjnymi w pokładach 214/1-2, 304 i 315, wyklucza możliwość bezpośredniego wzmożonego przepływu CH₄ i CO₂ do czynnych wentylacyjnie wyrobisk w tych pokładach,
- zeszczelinowanie pokładów z otworu MS-4 mogło przyczynić się do zwiększenia przepuszczalności gazowej pokładów z promieniu MS-4, zarówno w kierunku MS-3, jak i w kierunku uskoku Ł-8,
- w przypadku migracji CH₄ lub CO₂ poprzez małe uskoki do strefy uskoku Ł-8 należy liczyć się z możliwością przepływu gazów do odizolowanych zrobów i nieczynnych wyrobisk w pokładzie 214/1-2,
- przy ciśnieniu zatłaczania CO₂ około 10,0 MPa do otworu MS-3 i przeniesieniu części wydatku zatłaczanego CO₂ do uskoku Ł-8 należy liczyć się z powolną migracją gazu do odizolowanych wyrobisk w pokładzie 214/1-2,
- nakładająca się eksploatacja pokładów 214/1-2, 304 i 315 w odległościach pomiędzy w/w pokładami odpowiednio 147 m i 83 m stwarza możliwość grawitacyjnego przemieszczania się objętości CO₂ ze zrobów pokładu 214/1-2 do zrobów głębiej zalegających pokładów.

Reasumując, stwierdzić należy, że istniała ewentualna możliwość pośredniej migracji zatłaczanego CO₂ do czynnych wyrobisk w pokładach 304 i 315 poprzez uskoki, a następnie grawitacyjny przepływ tego gazu w zeszczelinowanym górotworze objętym zasięgiem odprężenia eksploatacyjnego w pokładach 214/1-2, 304 i 315. Uwzględniając powyższe, wyznaczono lokalizacje możliwych dopływów gazów do nieczynnych i czynnych wyrobisk KWK „Silesia” oraz określono zasady kontroli oraz monitoringu zagrożenia gazowego zapewniając warunki bezpieczeństwa dla zatrudnionej załogi w pokładach 304 i 315.

Kontrola oraz monitoring zagrożenia gazowego w czynnych oraz odizolowanych wyrobiskach KWK „Silesia”

W poprzednim rozdziale przeprowadzono analizę możliwości migracji gazów CH₄ lub CO₂ w wyniku iniekcji CO₂ do otworu MS-3 wskazując możliwość pośredniej migracji poprzez zaburzenia uskokowe oraz zrobów w pokładzie 214/1-2 do zrobów oraz czynnych wentylacyjnie wyrobisk w pokładach 304 i 315. W trakcie iniekcji CO₂ do otworu MS-3 w okresie od 01.08.2004 r. do II połowy kwietnia 2005 r. zatłoczono 140 ton CO₂ natomiast w okresie 6 tygodni od II połowy kwietnia 2006r. zatłoczono 580 ton CO₂.

Wielkości powyższe przedstawiono na wykresie, **Fig. 1.1.33_5**.

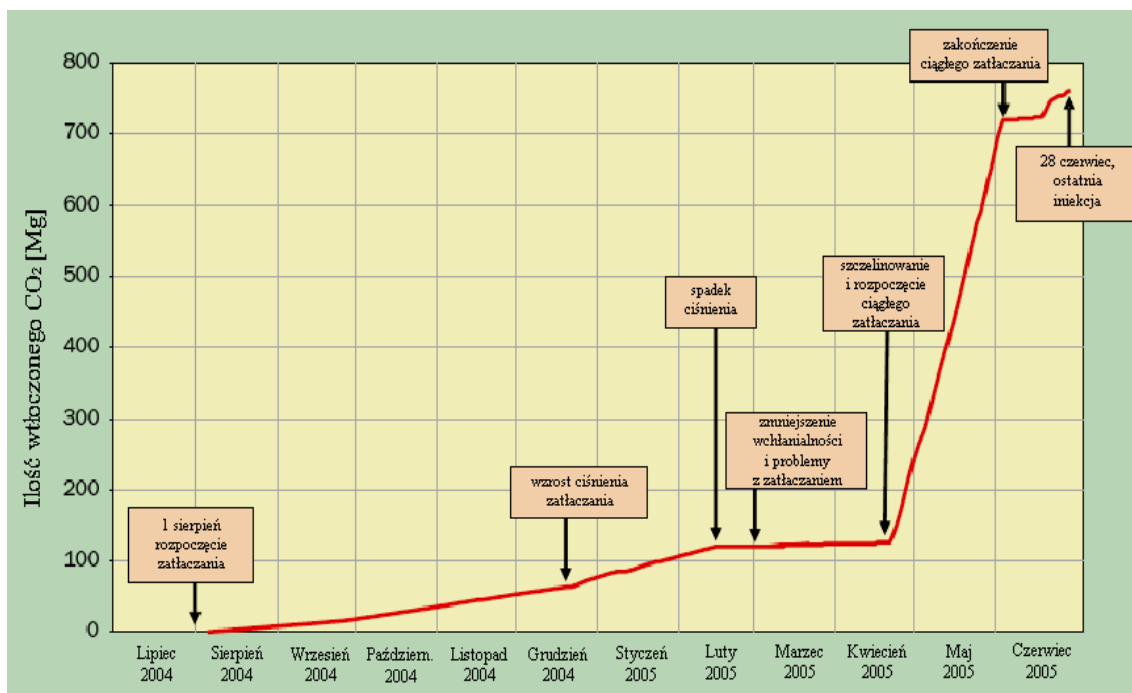


Fig. 1.1.33_5 Wykres ilości wtłoczonego CO₂ w czasie trwania projektu RECOPOL

W pokładzie 315 (Fig. 1.1.33_1) w trakcie zatłaczania CO₂ do otworu MS-3 eksploatowana była ściana 157, której dowerchnia ścianowa usytuowana była w odległości 580 m od otworu MS-3 oraz 200 m od uskoku Ł-8. Lokalizację dowerchni ścianowych kolejno eksploatowanych ścian 154, 155, 156, 157 i 158 w pokładzie 315 narzucał przebieg małych uskoków, które łączyły się z uskokiem Ł-8 o zrzucie h~60 m. Przy założeniu migracji CO₂ od otworu MS-3 poprzez uskoku Ł-8 do zrobów pokładu 214/1-2, a następnie poprzez zrob w pokładzie 304 do zrobów ściany 157 monitoringiem i kontrolą zagrożenia należy objąć zrob pokładów 214/1-2, 304 i 315 oraz czynne wentylacyjne wyrobiska w rejonie ściany 157.

W wyniku analizy wentylacyjnej wytypowano trzy tamy izolacyjne zabudowane w pokładach 214/1-2, 304 i 315, które zostały objęte szczególną kontrolą składu izotopowego i koncentracji gazów w przestrzeni otamowanej, a mianowicie:

- zza tamy izolacyjnej TI-417 w chodniku kierunkowym nr 5 w pokładzie 304,
- zza tamy izolacyjnej TI-430 w chodniku kierunkowym nr 1 w pokładzie 315,
- zza tamy izolacyjnej TI-435 w chodniku kierunkowym nr 2 w pokładzie 315.

Ponadto w wyrobiskach kopalni ustalono lokalizację 3 czujników CO₂ z ciągłą rejestracją i sygnalizacją u dyspozytora metanometrii, mianowicie:

- w zużytym prądzie powietrza w chodniku kierunkowym nr 6 w pokładzie 304 przed tamami bezpieczeństwa TB-284 i TB-285,
- w zużytym prądzie powietrza w chodniku kierunkowym nr 3a w pokładzie 315 na wylocie ze ściany 157,

➤ w chodniku z wentylacją odrębną ssącą w przodku chodnika kierunkowego nr 5 w pokładzie 315.

Czujniki zawartości dwutlenku węgla z progiem ostrzegawczym 0,5% miały za zadanie rejestrowanie i sygnalizowanie, u dyspozytora metanometrii kopalni, przekroczenia zawartości 0,5% CO₂ pomimo, że przepisy górnicze dopuszczają zawartość dwutlenku węgla w powietrzu kopalnianym 1%. Ustalenie progu ostrzegawczego na poziomie 0,5% zapewniało margines bezpieczeństwa umożliwiające wyprzedzające podjęcie decyzji przez dyspozytora metanometrii o zatrzymaniu zatłaczania CO₂ na otworze MS-3. W zużytym rejonowym prądzie powietrza kopalnianego zawartość CO₂ w normalnych warunkach przewietrzania nie przekraczała 0,3%.

Zarejestrowanie zawartości progowej 0,5% w rejonowym prądzie zużytego powietrza w pokładach 304 lub 315 mogłoby stanowić potwierdzenie występującej migracji CO₂ pomiędzy otworem MS-3 a rejonami eksploatowanych ścian. Zawartości dwutlenku węgla za tamami izolacyjnymi były zależne od: ilości węgla pozostawionego w zrobach, usytuowania zrobów w podsieci wentylacyjnej, sposobu odizolowania zrobów od sieci wentylacyjnej kopalni, różnicy potencjałów aerodynamicznych w czynnych wentylacyjnie wyrobiskach okonturowujących zroby. Obecność dwutlenku węgla w gazach w otamowanych przestrzeniach zrobowych jest rzeczą normalną.

W okresie od 1.08.2004 r. do II połowy kwietnia 2005 r. przeprowadzono pierwsze próby zatłaczania CO₂. W okresie tym zatłoczono około 140 ton CO₂, a w wyrobiskach dołowych nie stwierdzono symptomów wzrostu stężeń CO₂ za tamami izolacyjnymi oraz w czynnych wentylacyjnie wyrobiskach w pokładach 304 i 315.

W okresie 6 tygodni, rozpoczynając od II połowy kwietnia 2005 r. zatłoczono 580 ton CO₂ do otworu MS-3. W warunkach dużej intensywności zatłaczania dwutlenku węgla czujniki gazometrii automatycznej w rejonowych prądach zużytego powietrza w pokładach 304 i 315 nie wskazały podwyższonych stężeń CO₂, ponadto nie odnotowano sygnałów wzrostu zawartości CO₂ w zrobach za wytypowanymi tamami izolacyjnymi.

Przeprowadzony eksperyment w ramach realizacji projektu „Recopol” nie spowodował powstania zagrożenia gazowego w wyrobiskach sąsiadujących z lokalizacją miejsc zatłaczania dwutlenku węgla. Opracowane zasady kontroli zagrożenia gazowego pozwoliły na bieżące monitorowanie kształtowania się zagrożenia w rejonach ścian KWK „Silesia” w oparciu o system gazometrii automatycznej z rejestracją u dyspozytora metanometrii. Ponadto kontrola składu gazów zrobowych za wytypowanymi tamami izolacyjnymi wraz z analizą zmian stężeń gazów w warunkach zmian ciśnienia atmosferycznego pozwoliła oszacować ewentualny wpływ zatłaczania CO₂ do otworu MS-3 na zagrożenie gazowe w zrobach poeksploatacyjnych.

Podstawowe założenia technologii iniekcji CO₂ na przykładzie projektu RECOPOL.

Przy opracowywaniu podstawowych założeń technologii iniekcji CO₂ do wyselekcjonowanych pokładów węgla (pokłady 364, 401, 405) kierowano się uwarunkowaniami geologicznymi i technicznymi.

Techniczne warunki iniekcji CO₂ w otworze MS-3.

Ciśnienia:

- w zbiorniku: 1,6 – 2,0 MPa,
- min.: za pompą 4,0 MPa,
- max.: za pompą 20,0 MPa,

Przepływy masowe (kontrolowane na pompie):

- min.: 300 kg/h,
- max.: 842 kg/h.

Temperatury:

- w zbiorniku: -20°C
- za pompą: -8°C / -12°C (przewidywana),
- na głowicy: -10°C / 5°C.

Stany skupienia CO₂:

- w zbiorniku – ciekły,
- po kompresji (za pompą) – ciekły,
- na głowicy – ciekły,
- w otworze – nadkrytyczny.

Na skutek zmian ciśnienia i temperatury w otworze następowała zmiana stanu skupienia, z fazy ciekłej do nadkrytycznej. Dwutlenek węgla był dostarczany do zbiorników cysternami i magazynowany w nich formie ciekłej. Podczas pompowania temperatura podnosiła się wraz ze wzrostem ciśnienia. Przez krótki okres wykorzystywano podgrzewacze gazu, które podnosząc jego temperaturę rozprężały dodatkowo dwutlenek węgla. Z uwagi na brak przeciwwskazań technicznych i technologicznych oraz wysokie koszty energii elektrycznej zrezygnowano z procesu podgrzewania gazu. Dzięki stosunkowo wysokiemu gradientowi temperatury otaczającego górotworu dwutlenek węgla w interwałach perforacji (kontakt otworu z pokładem węgla) miał stałą temperaturę, która wynosiła ok. 41°C (poniżej 1000 m).

Warunki produkcji CH₄ w otworze MS-4.

Temperatura:

- min.: 30°C,
- max.: 45°C,

Skład gazu: CH₄ ze śladowymi zawartościami CO₂ i innych gazów.

Ciśnienia:

- min.- ciśnienie atmosferyczne,
- max.- nie przewidywano naturalnego (większego) nadciśnienia, metan poprzez przerywacz płomienia kierowany był na świeczkę, gdzie ulegał spalaniu (poza otworem MS-4).

Wypompowywana z otworu słona woda była odprowadzana rurociągiem do separatora, gdzie komponenty gazowe zostały odseparowane z wody i poprzez przerywacz płomienia odprowadzone do atmosfery. Woda słona po separacji gazów kierowana była z separatora do cysterny a stamtąd transportowana do osadnika wód słonych (rejon KWK „Silesia”).

Plan zagospodarowania i konstrukcji instalacji CO₂ w terenie

Plan zagospodarowania terenu i uzbrojenia w instalację do iniekcji CO₂ w otworze MS-3 w projektowanym miejscu przeprowadzenia doświadczalnej iniekcji został opracowany przez niemiecki instytut DBI w uzgodnieniu z Głównym Instytutem Górnictwa, Metanel S.A. (Polska) i Air Liquide (Francja).

Bazowe dane do kalkulacji podstawowych założeń oparte były na następujących parametrach wyjściowych:

- masa/objętość przepływu: 0 – 842 kg/h,
- ciśnienia: w zbiornikach 1,6-1,7 MPa, na pompie i za nią 1,6-20,0 MPa.

Dostawcą kompletnej instalacji do iniekcji CO₂ była firma Air Liquide (Francja).

Serwis i kontrolę nad instalacją i zbiornikami powierzono firmie ALKAT (Air Liquide Polska).

Nadzór oraz 24 godzinną obsługę zapewnił Główny Instytut Górnictwa.

W skład instalacji iniekcyjnej wchodziły:

- Dwa zbiorniki horyzontalne izolowane i chłodzone o objętości 2 x 30 m³ i ciężarze własnym (pustego) 12.000 kg natomiast napełnionego 42.000 kg z temp. -20°C w zbiorniku i ciśnieniem 1,6-1,7 MPa (**Fig. 1.1.33_6**),
- Pompa – rekomendowana trzy stopniowa pompa tłokowa typu „CRIO”, o następujących parametrach;

- o ciśnienie na wlocie 1,5 MPa,
- o ciśnienie na wylocie 20,0 MPa (max).

Pompa połączona była ze zbiornikiem i podgrzewaczem o maksymalnej długości połączeń 5 m, (**Fig. 1.1.33_6**),

Podgrzewacze, instalowane między pompą a głowicą otworu MS-3, ustawione były na tej samej podporze co pompa – stanowiąc układ kontrolno-pomiarowy (UKP). Maksymalny przepływ 842 kg/h można byłoby osiągnąć tylko przy ciśnieniu 20 MPa, w przypadku ciśnienia 10 MPa przepływ teoretycznie zmniejszał się do 650 kg/h.



Fig. 1.1.33_6 Widok instalacji i zbiorników do zatłaczania CO₂ (po lewej) oraz (po prawej) pompa, silnik, podgrzewacze, rurociągi doprowadzające i odprowadzające CO₂

Rozbicie dostępnych mocy całego układu do iniekcji dwutlenku węgla w Kaniowie:

- Pompa – 18,5 kW,
- Podgrzewacze – 3 x 30 kW,
- Jednostka chłodząca zbiorniki – 2 x 10 kW,
- Systemy komunikacyjne, kontrolno-pomiarowe oraz zabezpieczające i alarmowe – 5 kW

Łączna moc instalacji – 133,5 kW

Profil otworu iniekcyjnego MS-3 wraz ze schematem orurowania i uzbrojenia został przedstawiony poniżej.

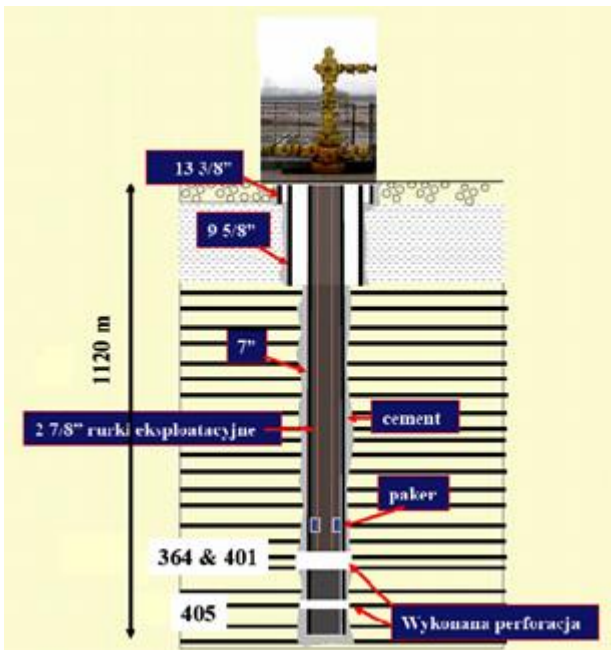


Fig. 1.1.33_7a Profil otworu iniekcyjnego MS-3



Fig. 1.1.33_8b Głowica otworu MS-3

Do produkcji metanu wykorzystano zrekonstruowany i uzbrojony otwór MS-4 o głębokości 1200m, oraz kiwon pompowy (Thomassen) – Fig. 1.1.33_9.



Fig. 1.1.33_9a Otwór produkcyjny MS-4 z kiwonem pompowym



Fig. 1.1.33_9b Miejsce pobierania prób gazu



Fig. 1.1.33_9c Świeczka do spalania metanu

Etapy i cykle zatłaczania LCO₂:

➤ **etap I od 07.08.2004 do 27.09.2004** - przyjęto następujący reżim iniekcji LCO₂: zatłaczanie cykliczne 2 razy na dobę od ciśnienia 5 MPa do 9 MPa i procedura spadku ciśnienia w procesie przenikania dwutlenku węgla do węgla od 9 MPa do 5 MPa (fall-off test).

- **etap II od 27.09.2004 do 22.12.2004** - parametry iniekcji: 8-10 cykli w ciągu doby: początek zatłaczania od ciśnienia $P_o = 7$ MPa do ciśnienia $P_k = 9$ MPa,
- **etap III od 23.12.2004 do 07.01.2005** - parametry iniekcji: 8-10 cykli w ciągu doby: początek zatłaczania od ciśnienia $p_o = 11$ MPa do ciśnienia $P_k = 14$ MPa,
- **etap V od 07.01.2005 do 11.01.2005** - Obserwacja krzywej spadku ciśnienia na otworze MS-3 (fall-offtest),
- **etap VI od 11.01.2005 do 14.02.2005** - parametry iniekcji: 8-10 cykli w ciągu doby: początek zatłaczania od ciśnienia $p_o = 11$ MPa do ciśnienia $P_k = 14$ MPa,
- **etap VII od 14.02.2005 do 01.03.2005** - Obserwacja krzywej spadku ciśnienia na otworze MS-3 (fall-offtest),
- **etap VIII od 03.03.2005 do 18.04.2005** - parametry iniekcji: ilość cykli zatłaczania CO_2 ulegała powolnemu zmniejszeniu - z 5 cykli w okresie początkowym (po mikroszczelinowaniu) do 2 (a nawet jednego) ciągu doby w okresie końcowym (18.04.2005): w okresie tym utrzymywano zatłaczanie w reżimie od ciśnienia $p_o = 11$ MPa do ciśnienia $P_k = 14$ MPa,
- **w okresie 18 - 21.04.2005** – wykonano szczelinowanie pokładów węgla (364, 401 i 405) w otworze MS-3.
- **etap IX od 21.04.2005 do 03.06.2005** - uzyskano i prowadzono zatłaczanie w trybie ciągłym ! (ciśnienie ok. 14 MPa, przepływ 8-12 l/min),
- **etap X od 03.06.2005 do 27.06.2005** - prowadzono zatłaczanie sporadyczne (jedynie dla potrzeb monitoringu - powód: koniec umowy na dostawy z ALP, dodatkowe 2 dostawy w ilości 42 ton zapewnił koordynator - TNO Holandia).

Krótkie omówienie etapów zatłaczania.

Na początku sierpnia 2004 roku rozpoczęto zatłaczanie dwutlenku węgla do otworu MS-3.

Początki zatłaczania wykazały szereg niedoskonałości instalacji oraz rozwiązań technicznych w układach kontrolno pomiarowych. Zatłaczanie prowadzone było kilka razy na dobę w przedziale ciśnień 6-9 MPa. Po uzyskaniu 9 MPa dochodziło do niekontrolowanego otwierania się zaworu bezpieczeństwa, co skutkowało wyłączeniem układu pompowego.

Podczas jednego cyklu wtłaczano około kilkudziesięciu litrów ciekłego dwutlenku węgla (LCO_2). Osiągnięcie ciągłego reżimu zatłaczania nie było zatem możliwe.

Sukcesywne modernizacje instalacji umożliwiały osiągnięcie coraz to większych ciśnień na głowicy otworu iniekcyjnego. Przykładowe wykresy zarejestrowanych cykli zatłaczania w przedziałach 6-10 MPa oraz 10-14 MPa przedstawione zostały na poniższych wykresach (**Fig. 1.1.33_10 i 11**).

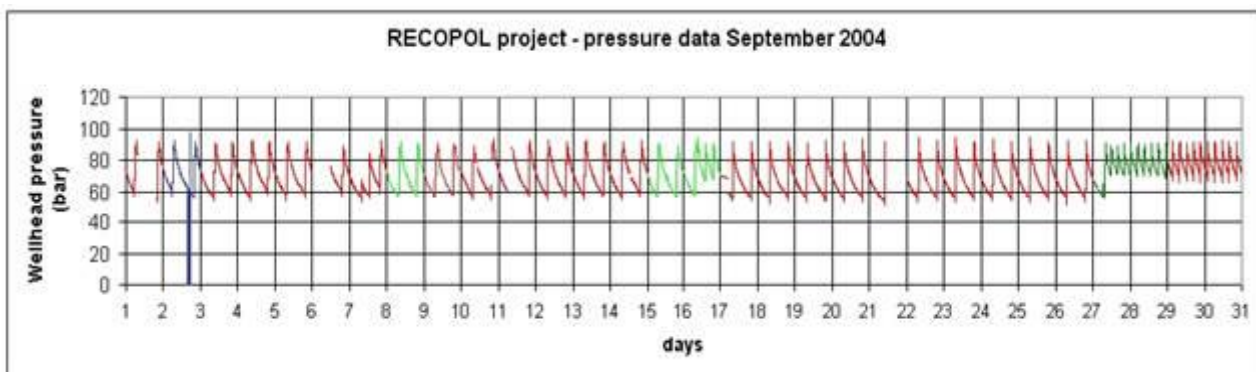


Fig. 1.1.33_10 Przykładowy wykres ciśnień na głowicy otw. MS-3, wrzesień 2004 roku

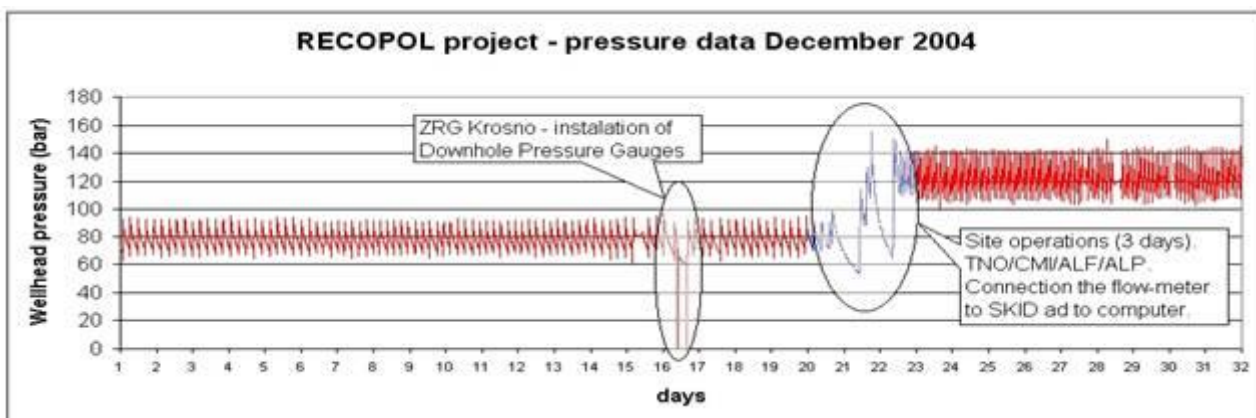


Fig. 1.1.33_11 Przykładowy wykres ciśnień na głowicy otw. MS-3, grudzień 2004 roku

Udane próby modernizacji instalacji i uzyskanie założonego maksymalnego ciśnienia (15 MPa na głowicy otworu) oraz zintensyfikowanie cykli zwiększyło ilość zatłaczanego LCO₂ nadal nie pozwalając na osiągnięcie ciągłego reżimu zatłaczania.

Przeprowadzono zabieg hydroszczelinowania pokładów, wyczyszczono otwór a następnie rozpoczęto zatłaczanie azotu. Przeprowadzenie testu spadku ciśnienia (fall-off test) wykazało zwiększoną chłonność zeszczelinowanych pokładów. Do wypełnionego azotem otworu MS-3 przyłączono rurociąg iniekcyjny i rozpoczęto pierwsze ciągłe zatłaczanie ciekłego dwutlenku węgla z wydajnością rzędu 12-15 ton/dobę przy ciśnieniu ok. 14,5 MPa. Zdjęcia i wykresy z hydroszczelinowania oraz ciągłość zatłaczania CO₂ zostały przedstawione poniżej (Fig. 1.1.33_12, 13, 14, 15).



Fig. 1.1.33_12 Zabieg hydroszczelinowania trzech pokładów węgla w otworze MS-3 (ZRG Krosno)

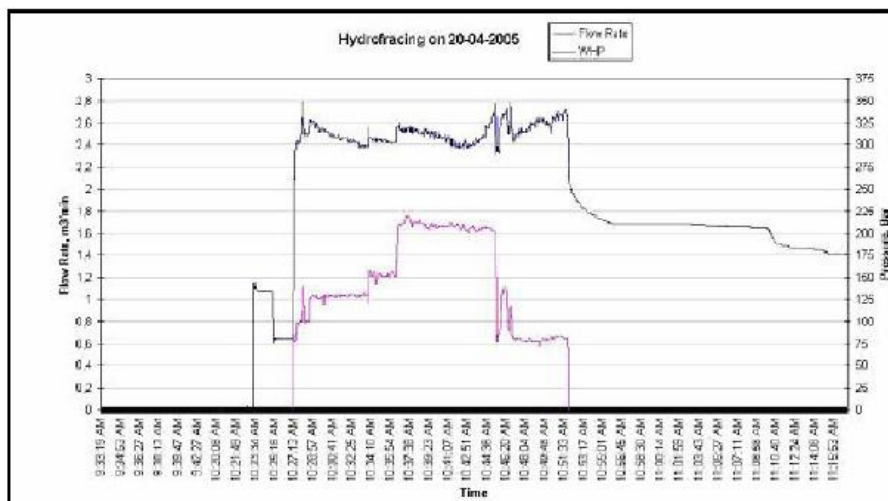


Fig. 1.1.33_13 Wykres ciśnienia i przepływu podczas hydro-szczelinowania (zabieg wykonano 20.04.2005)

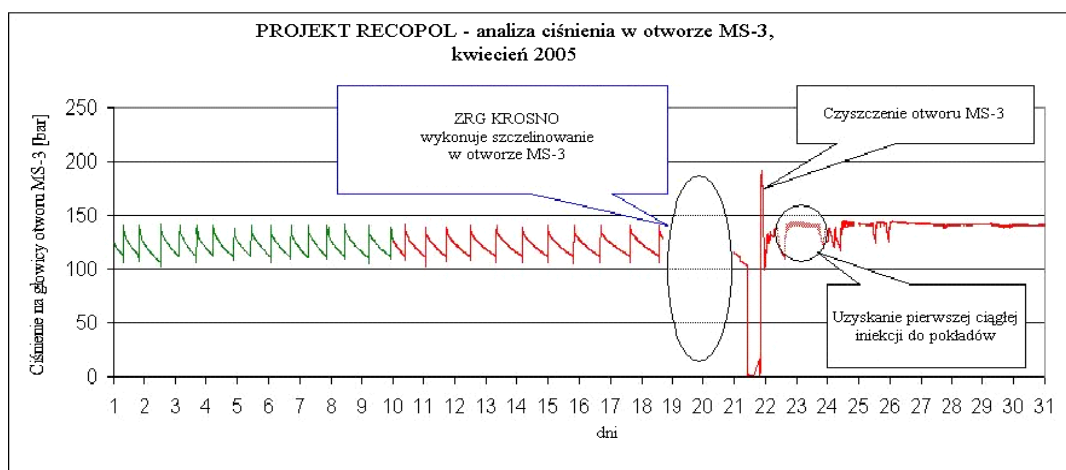


Fig. 1.1.33_14 Przykład kształtowania się ciśnienia zatłaczania CO₂ w kwietniu 2005 – przed zabiegiem hydroszczelinowania oraz po zabiegu uzyskanie ciągłego zatłaczania

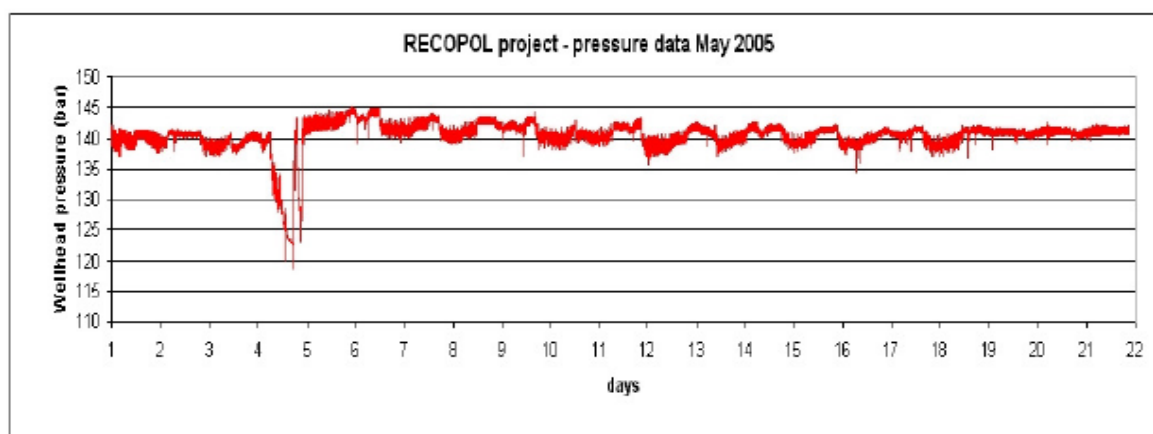


Fig. 1.1.33_15 Przykład kształtowania się ciśnienia zatłaczania CO₂ w maju 2005 – iniekcja ciągła

Krótkie podsumowanie i omówienie rezultatów zatłaczania CO₂ w projekcie RECOPOL.

Mimo licznych przeszkód technicznych i organizacyjnych w trakcie realizacji projektu RECOPOL uzyskano kilka innowacyjnych rozwiązań technologicznych, które umożliwiły prowadzenie zatłaczania LCO₂ w ruchu ciągłym ze znaczną wydajnością, rzędu 12-16 ton/dobę, w pokładach węgla o bardzo niskiej przepuszczalności.

łącznie do otworu MS-3 zatłoczono ponad 700 ton LCO₂, z czego ok. 600 zatłoczone zostało w okresie 6-7 tygodni w trybie ciągłym. Poniżej przedstawiony został wykres ilości zatłoczonego CO₂, na którym uwidoczniono poszczególne etapy iniekcji.

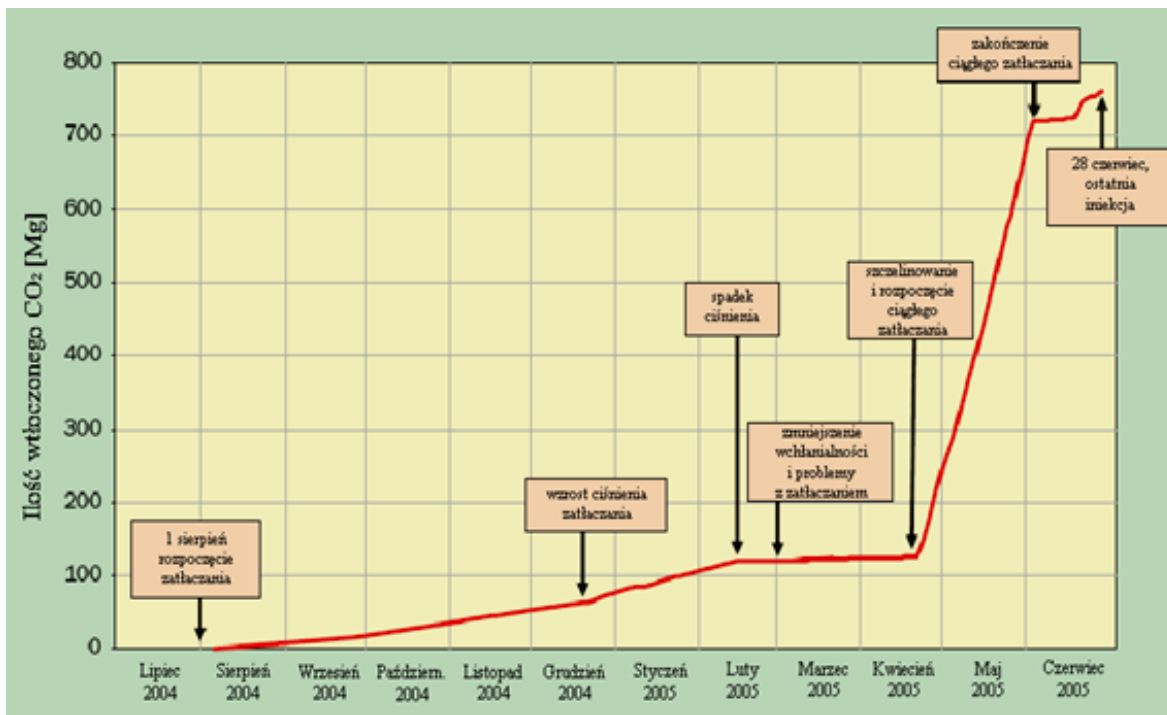


Fig. 1.1.33_16 Wykres ilości zatlaczonego CO₂ do otworu MS-3 w ramach projektu RECOPOL

Przeprowadzenie iniekcji dwutlenku węgla na otworze MS-3 umożliwiło zwiększenie produkcji metanu na otworze MS-4, potwierdzając tym samym zakładany efekt technologii ECBM (Enhanced Coal Bed Methane) – wykres poniżej.

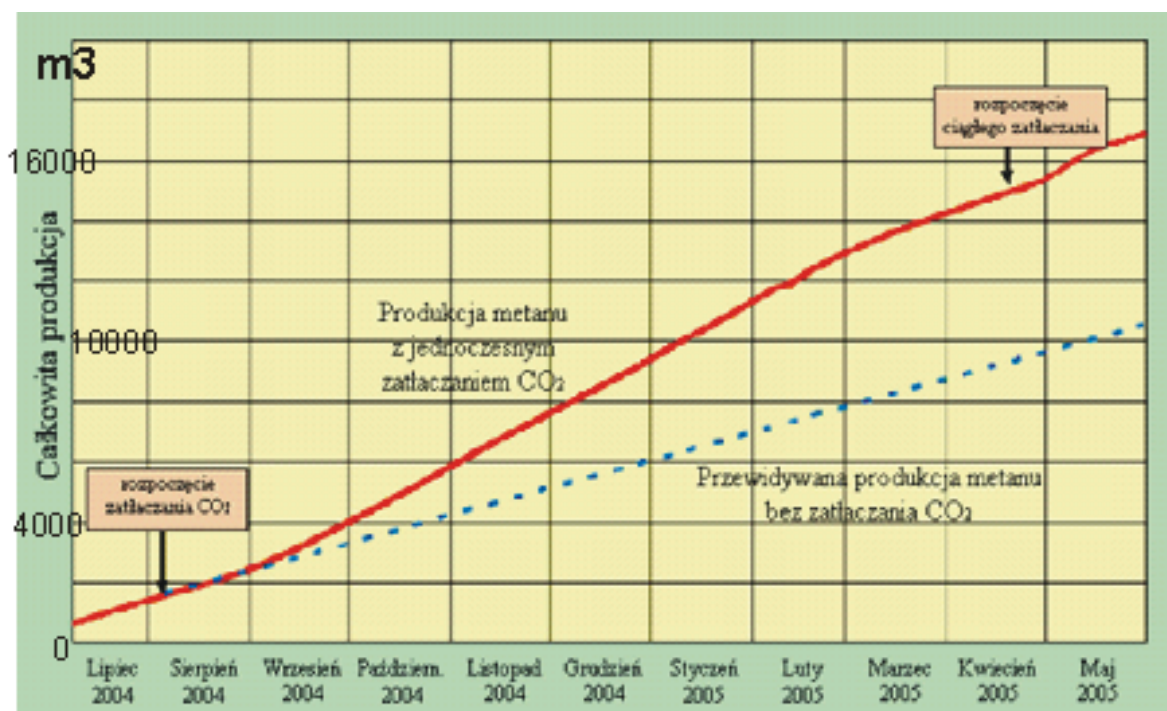


Fig. 1.1.33_17 Wykres produkcji metanu (ECBM) w ramach realizowanego projektu RECOPOL

Wnioski z projektu RECOPOL

Prace badawcze i testy poligonowe przeprowadzone w latach 2003-2005 w ramach projektu RECOPOL wykazały realną możliwość magazynowania CO₂ jako gazu cieplarnianego w głęboko zalegających, pozabilansowych pokładach węgla, izolowanych od złóż bilansowych nieprzepuszczalnymi skałami stropowymi. Magazynowanie CO₂ w obrębie struktur geologicznych, w tym również w pokładach węgla, może polegać na trwałym związaniu ze strukturą porową węgla w wyniku adsorpcji, lub też w formie zmagazynowania wolnego gazu w zamkniętych strukturach naturalnych lub mechanicznie wytworzonych szczelin. W rezultacie zatłaczania CO₂ do pokładów węgla metan jako gaz pierwotny w złożu, może być wypierany przez CO₂, zwłaszcza w przypadku zachodzącej w węglu adsorpcji. Magazynowany w węglu CO₂ może być więc stymulatorem zwiększenia wydobycia metanu pokładów węgla (ECBM).

UKŁADY SEKWESTRACYJNE DLA ZREALIZOWANYCH PROJEKTÓW ZAGRANICZNYCH

- **Projekty Allison i Tiffany** – zatłaczanie CO₂ do pozabilansowych pokładów węgla; San Juan Basin, USA
- **Projekt Sleipner** – przykład zatłaczania CO₂ do głębokiej formacji solankowej Utsira pod morzem Północnym
- **Projekt Weyburn** – przykład CO₂ EOR

Projekt „Allison Unit”

Projekt Allison Unit zlokalizowany był w północnej części Nowego Meksyku Basenu San Juan. Poligon doświadczalny, w skład którego wchodziło szesnaście (16) otworów produkcyjnych, cztery (4) otwory iniekcyjne i jeden (1) służący do obserwacji ciśnienia rozpoczął produkcję w lipcu 1989r. Zatłaczanie rozpoczęło się w kwietniu 1995r. i było kontynuowane prawie bez przerwy aż do sierpnia 2001r. kiedy je przerwano, aby przeanalizować wyniki projektu pilotowego (Fig. 1.1.33_18 - 20).

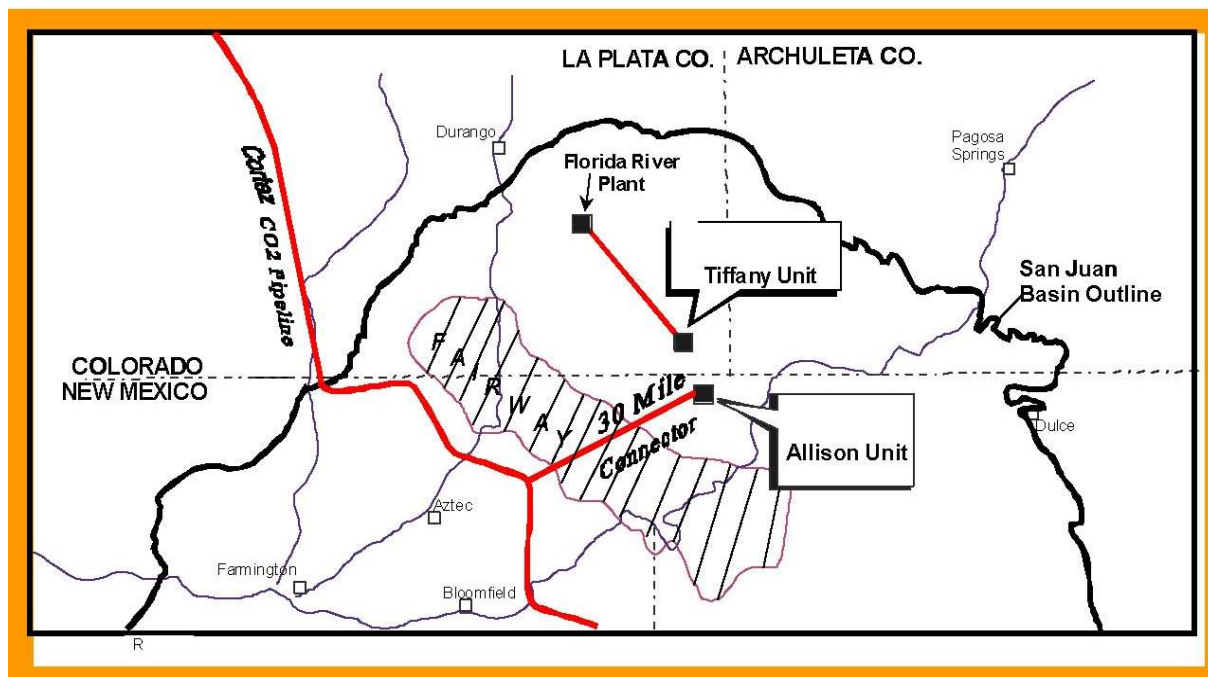


Fig. 1.1.33_18 Rysunek Lokalizacja poligonu doświadczalnego „Allison Unit”

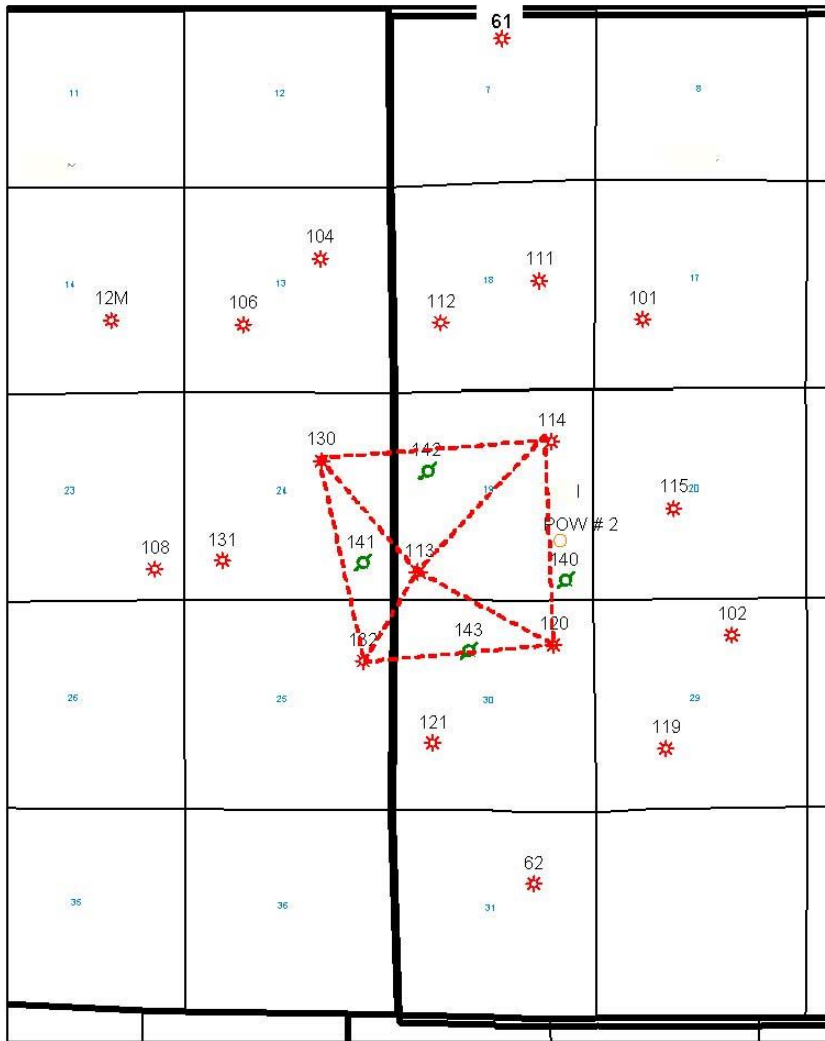


Fig. 1.1.33_19 Siatka otworów dla „Allison Unit”

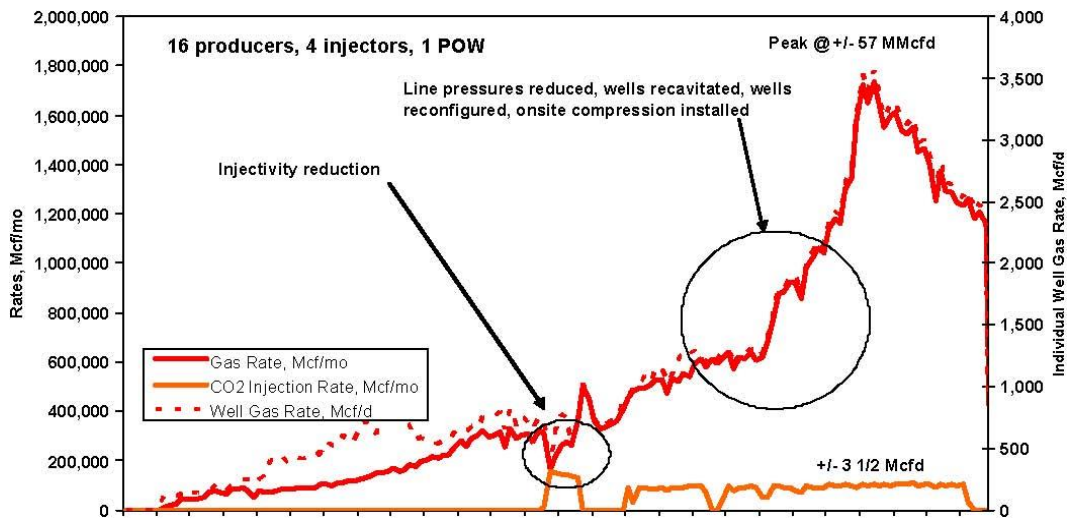


Fig. 1.1.33_20 Historia Produkcji dla „Allison Unit”

Źródło CO₂ i konfiguracja poligonu

Źródłem zatłaczanego CO₂ są naturalne jego złoża w McElmo Dome w południowym Kolorado. Złoża te zostały rozwiercone 44 otworami produkcyjnymi, które dały łączną wydajność ok. 61 000 ton prawie czystego CO₂ dziennie. Kinder Morgan obsługuje 800 km 30 calowego rurociągu „Cortez” z McElmo Dome do złóż ropy naftowej w Zachodnim Teksasie przecinając Denver gdzie jest on używany do zwiększonego odzysku ropy naftowej (EOR). Wspomniany rurociąg przebiega w odległości ok. 48km od Allison Unit.

Burlington Resources zbudowało odnogę o średnicy 4 cali od głównego rurociągu o długości prawie 58 km łączącą go z Allison Unit. W miejscu wpięcia się do rurociągu głównego panowało ciśnienie ok. 15 MPa. W odgałęzieniu nie były potrzebne sprężarki ani żadne inne urządzenia kontrolujące przepływ CO₂, które było zatłaczane w ilościach od ok.160 – 290 ton dziennie. Ciśnienie ok. 10 MPa jakie panowało na końcu rurociągu było i tak za wysokie w stosunku do potrzebnego ciśnienia zatłaczania (konieczna była jego redukcja – bez dodatkowego sprężania).

Na poligonie gaz dostarczany był do poszczególnych otworów za pomocą systemu stalowych rurek o średnicy 4 cali. Początkowo został on posadowiony bezpośrednio na powierzchni ziemi jednakże wskutek dużych wahań temperatury, a co za tym idzie fluktuacji w przepływie zatłaczanego CO₂ na przełomie października i listopada 1997r. został zakopany w ziemi aby wyeliminować ten problem.

Projekt „Tiffany Unit”

Projekt Tiffany Unit zlokalizowany jest w południowej części Kolorado Basenu San Juan (rysunek 5). Poligon doświadczalny, w skład którego wchodziły 34 otwory produkcyjne, 12 otworów iniekcyjnych dla azotu (rysunek 5) rozpoczął produkcję we wrześniu 1983r (rysunek 6). Zatłaczanie rozpoczęło się w lutym 1998r. i było kontynuowane z przerwami, aż do stycznia 2002r. kiedy je zatrzymano aby przeanalizować wyniki projektu pilotowego.

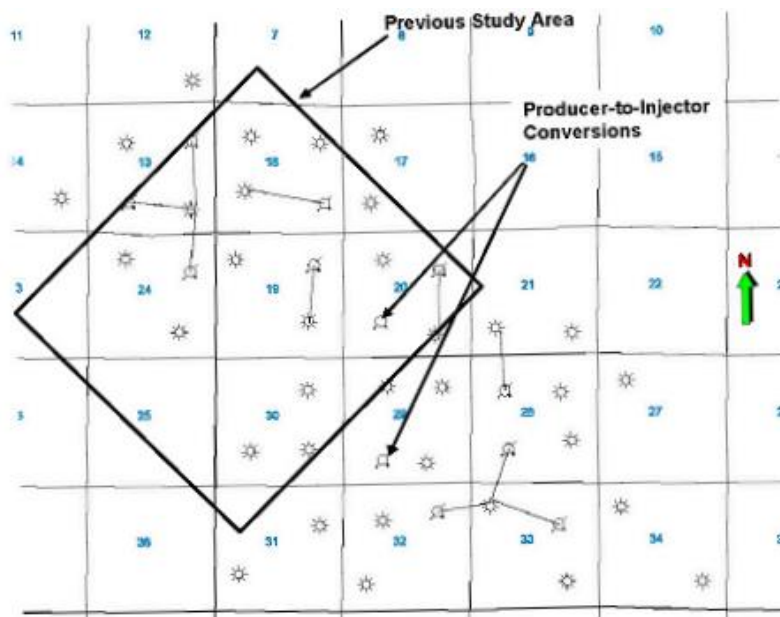


Fig. 1.1.33_21 Siatka otworów dla „Tiffany Unit”

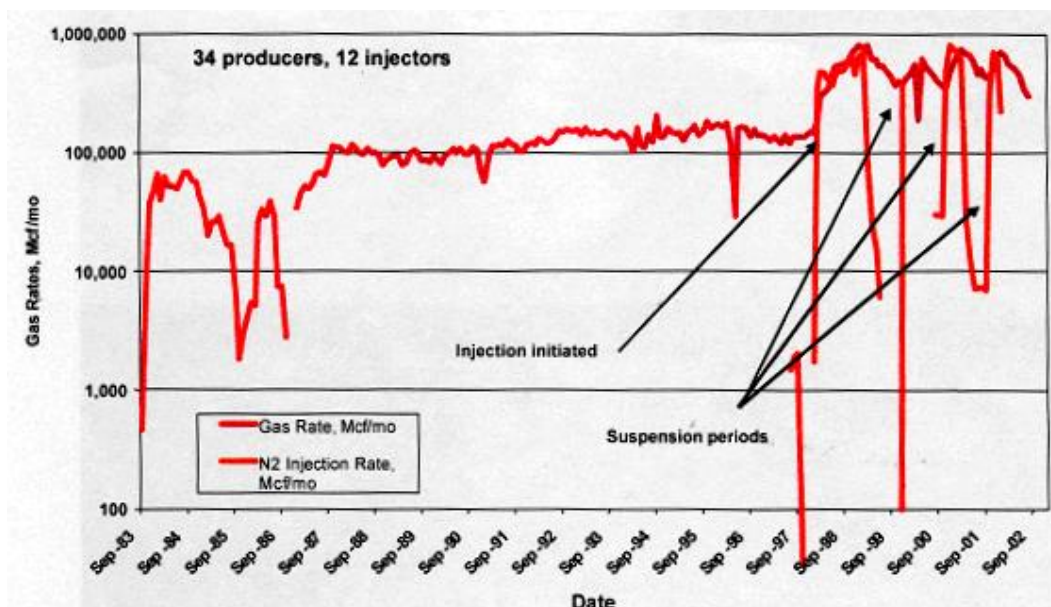


Fig. 1.1.33_22 Historia Produkcji dla „Tiffany Unit”; zatłaczanie N2

Projekt Sleipner

Projekt Sleipner jest przykładem zatłaczania CO₂ do głębokiej formacji solankowej Utsira pod morzem Północnym.

Przy okazji eksploatacji gazu ziemnego z pola gazowego Sleipner West prawie milion ton CO₂ rocznie jest zatłaczane do głębokich warstw wodonośnych znajdujących się pod norweską częścią morza Północnego. Zatłaczanie rozpoczęło w roku 1996 i trwa ono do dzisiaj.



Fig. 1.1.33_23 Lokalizacja formacji Utsira na Morzu Północnym

Odzyskane w trakcie eksploatacji gazu ziemnego CO₂, które zazwyczaj było wypuszczane do atmosfery jest składowane pod ziemią. Zbiornikiem do składowania jest formacja Utsira, która jest formacją piaskowcową rozciągającą się na olbrzymim obszarze Morza Północnego na głębokości około 800m. Proces zatłaczania CO₂ w projekcie Sleipner jest cały czas monitorowany i porównywany z początkowym modelem złoża w ramach międzynarodowego projektu utworzonego przez Statoil we współpracy z IEA Greenhouse Gas R&D Programme.

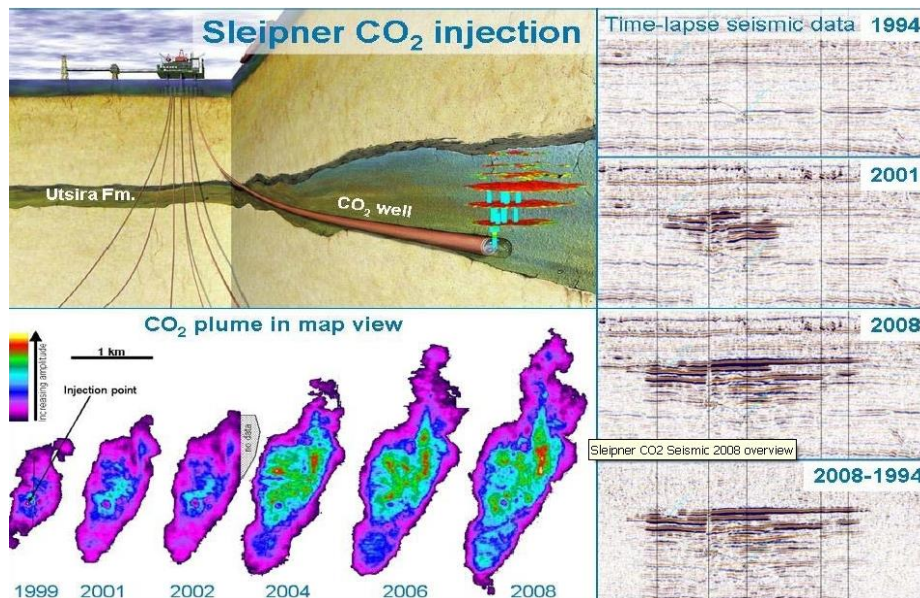


Fig. 1.1.33_24 Zatłaczanie CO₂ do formacji Utsira na głębokość ok. 1000m poniżej dna morza

Time-lapse seismic datasets of CO₂ stored in Utsira formation

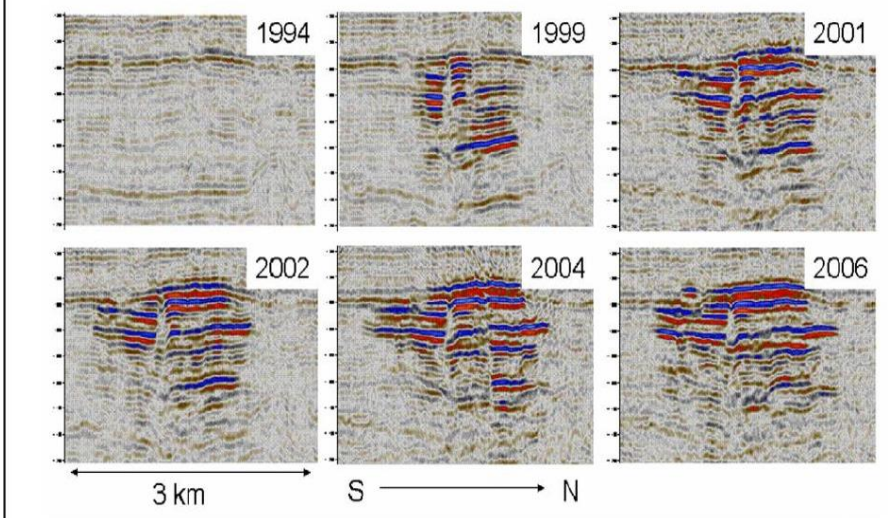


Fig. 1.1.33_25 Migracja CO₂ w formacji Utsira. Badania sejsmiczne 3D

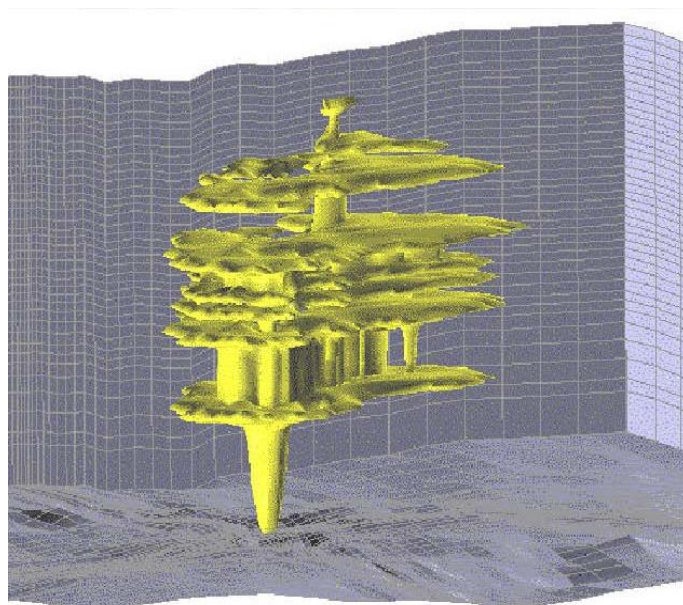


Fig. 1.1.33_26 Model zbiornika CO₂ po trzech latach zatłaczania

Czynniki, które zdecydowały o rozpoczęciu zatłaczania CO₂ do formacji solankowej Utsira to przede wszystkim:

- stosunkowo duża zawartość CO₂ w eksploatowanym gazie (od 4% do 9%),

- wysokie opłaty za uprawnienia do emisji CO₂ do atmosfery,
- oraz dostępność głębokich warstw solankowych,

Biorąc pod uwagę ilość zatłoczonego do tej pory CO₂ (ok. 9 mln. ton) projekt Sleipner jest niewątpliwie jednym z najbardziej skutecznych tego typu przedsięwzięć na świecie. Analizując samą technologię zatłaczania i zastosowane ciśnienia (ok. 6,5 MPa na głowicy) jest ona znacznie mniej skomplikowana niż przy zatłaczaniu do pozabilansowych pokładów węgla.

Niewątpliwie projekt Sleipner pozwolił zdobyć bezcenne „know-how” w dziedzinach nie tylko dotyczących samych operacji zatłaczania, ale również badań geologicznych, geochemicznych oraz sejsmicznych, które mogą być wykorzystane przy kolejnych projektach na skalę przemysłową. Można pokusić się o stwierdzenie, że głęboko zalegające warstwy solankowe są ośrodkiem optymalnym do składowania CO₂. Projekt Weyburn

Zubożone złoża ropy i gazu mogą posłużyć do wydajnego składowania CO₂.

Zatłaczanie do nich dwutlenku węgla może spowodować zwiększenie wydobywania ropy (EOR) o 10-15% w stosunku do poprzedniego wydobywania ropy z tych złóż. Stymulowanie procesu zwiększania wydobywania ropy przy użyciu CO₂ jest sprawdzoną technologią stosowaną w USA od wielu lat.

W ramach projektu Weyburn International Research w Kanadzie, CO₂ wychwytywany z elektrowni gazowej (North Dakota Gasification Plant, USA), jest transportowany w stanie nadkrytycznym wysokociśnieniowym gazociągiem (p=15 MPa) na odległość 320 km, a następnie zatłaczany do złoża Weyburn w Kanadzie w celu oceny długookresowej skuteczności zwiększenia wydobywania ropy i składowania CO₂.

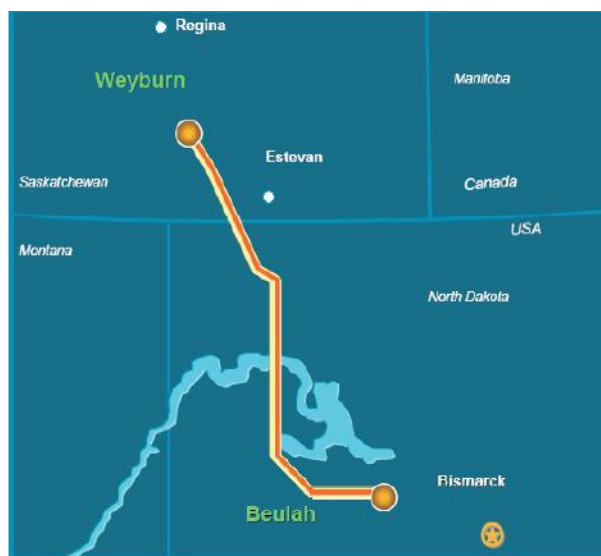


Fig. 1.1.33_27 Lokalizacja złoża Weyburn i miejsca pozyskiwania CO₂ oraz trasa gazociągu (USA-Kanada)

Złoże Weyburn jest jednym z największych złóż ropy naftowej w południowo-wschodniej części stanu Saskatchewan w Kanadzie. O wielkości i potencjale złoża może świadczyć fakt, iż łącznie w złożu odwiercono 650 otworów produkcyjnych (dla ropy naftowej) i zatłaczających (dla wody). Dzienna produkcja ropy wynosi 2.900 t/dobę. Złoże to posiada zasoby wstępnie szacowane na około 220 Mm³ i zostało odkryte w 1954 roku.

Celem intensyfikacji produkcji ropy w 1962 rozpoczęto częściowe stymulowanie złoża przy pomocy wtłaczania wody.

22 września 2000 roku firma EnCana rozpoczęła zatłaczanie CO₂ do szcerpanego złoża węglowodorów w celu zwiększenia wydobywania ropy naftowej z jednoczesnym składowaniem dwutlenku węgla. Z uwagi na początkowe problemy techniczne związane z odbiorami instalacji zatłaczanie odbywało się z mniejszym niż planowano wydatkiem 2500 t/dobę. Docelowy wydatek będzie wynosił 5000 t/dobę.

Do zatłaczania CO₂ i monitoringu podziemnych procesów wykorzystano łącznie 29 otworów, które tworzą swoistą linię frontu zatłaczanego CO₂, z czego 16 otworów jest pionowych i 13 otworów jest kierunkowych (poziomych), wśród nich są 4 otwory obserwacyjne z czego 2 są kierunkowe (poziome).

Realizatorzy projektu Weyburn zakładali docelowo zatłoczyć ok. 18 milionów ton CO₂ pozyskanego z elektrowni gazowej. Całe przedsięwzięcie odbywać się będzie w kilku etapach uzależnionych pozyskanymi wynikami.

Podczas realizacji projektu Weyburn zastosowano następujące techniki monitoringu:

- sejsmiczne badania powierzchniowe (3 i 4 wymiarowe): 4D , 3C
- pionowe profilowanie sejsmiczne
- międzyotworowe badania sejsmiczne
- geochemiczne badania i analizy
- badania gazami znacznikowymi
- badania i analizy danych produkcyjnych
- badania sejsmiki „pasywnej”
- badania składu gazu glebowego.

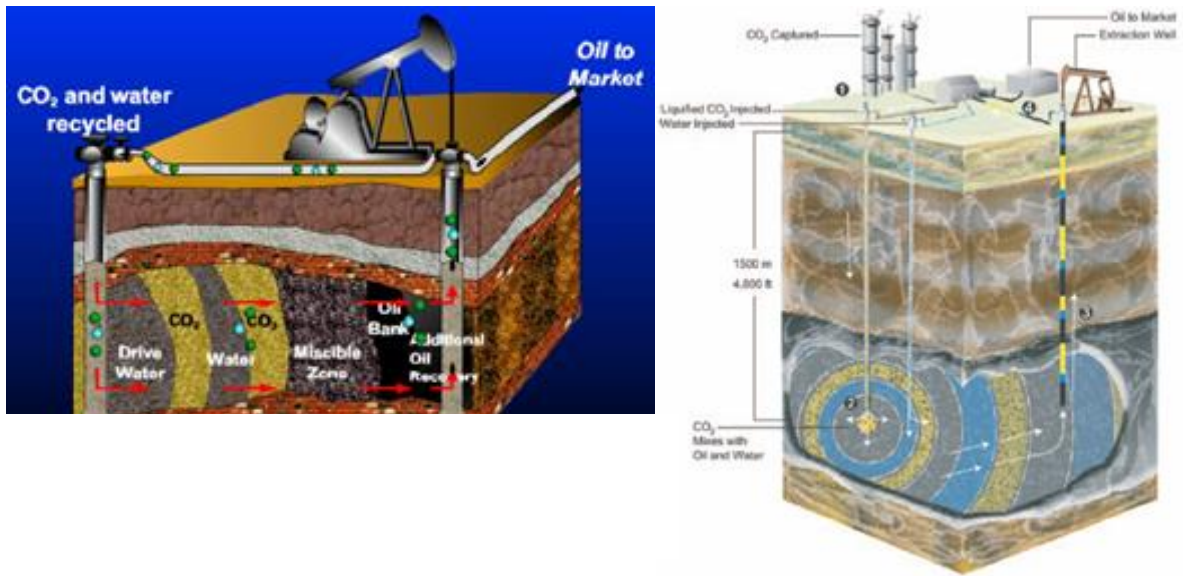


Fig. 1.1.33_28 Schemat ideowy techniki zatlaczania dwutlenku węgla (i wody) do złóż ropy naftowej w ramach realizowanego projektu Weyburn

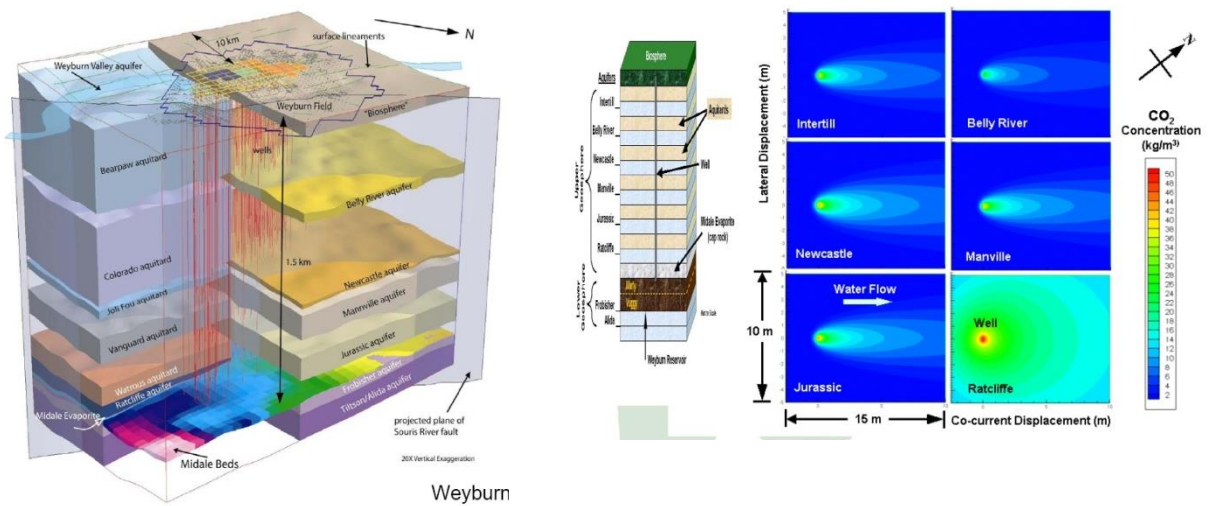


Fig. 1.1.33_29 Modelowanie i weryfikacja zatlaczanego CO₂