

## HORYZONTALNE BARIERY IZOLACYJNE – INNOWACYJNA TECHNOLOGIA OCHRONY WÓD PODZIEMNYCH

### HORIZONTAL INSULATING BARRIERS – INNOVATIVE GROUNDWATER PROTECTION TECHNOLOGY

**Falkowicz Sławomir<sup>1</sup>,**  
**Cicha- Szot Renata<sup>1</sup>,**  
**Madetko Norbert<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Instytut Nafty i Gazu Kraków – Państwowy Instytut Badawczy, [office@inig.pl](mailto:office@inig.pl)

<sup>2</sup> Soley sp. z o.o. Balice, [biuro@soley.pl](mailto:biuro@soley.pl)

#### ABSTRAKT

W artykule zaprezentowano wyniki prac ukierunkowanych na potwierdzenie słuszności hipotezy o możliwości wykonywania, konkurencyjnych ekonomicznie, proekologicznych, poziomych barier izolacyjnych w warstwach wodonośnych, wykorzystując zjawisko żelowania krzemianu sodu ditlenkiem węgla (CO<sub>2</sub>), zgodnie z technologią nazywaną dalej Technologią Horyzontalnych Barier Krzemianowych lub technologią THBK.

W technologii THBK przewiduje się, jednym narzędziem wiertniczym, rozdzielne zatłaczanie do warstwy wodonośnej koloidalnego roztworu krzemianu sodu oraz poniżej ditlenku węgla, jako katalizatora reakcji żelowania. Wynoszony siłami wyporu, ditlenk węgla napotkawszy zatłoczony wodny roztwór krzemianu sodu, w wyniku dyfuzji obniża jego wyjściowe pH, inicjując żelowanie, a w konsekwencji powstanie izolacyjnej bariery o oczekiwanym kształcie i rozmiarach.

Utworzona w warstwie wodonośnej pozioma bariera izolacyjna powinna posiadać doskonałe właściwości izolacyjne, niewielką miąższość być trwała i przyjazna dla środowiska naturalnego oraz konkurencyjna ekonomicznie. Aby przystąpić do wykonywania w warunkach rzeczywistych ekologicznych poziomych barier izolacyjnych wg technologii THBK należało określić istotne parametry technologiczne i techniczne oraz wskazać optymalne obszary komercyjnej stosowalności technologii. Stwierdzenie to w sposób jednoznaczny ukierunkowało koncepcję prac badawczych. U podstaw koncepcji scenariusza badań leżała ekonomia. W skali laboratoryjnej a następnie półprzemysłowej wielowariantowo symulowano procesy, a w konsekwencji zjawiska, jakie zachodzą będą w warstwie wodonośnej w trakcie wykonywania bariery. W miarę postępu badań prace prowadzono na coraz większych gabarytowo modelach sztucznych warstwach wodonośnych tak w wersji 2D jak i 3D.

**słowa kluczowe:** warstwy wodonośne, bariery izolacyjne, krzemiany

#### ABSTRACT

In the paper are presented results of research work aimed at confirming the hypothesis of the feasibility of economically competitive, eco-friendly horizontal insulating barriers in aquifers using gelation of sodium silicate by carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), according to technology called Technology of Forming Horizontal Barriers (TFHB).

In TFHB technology, working fluid (sodium silicate solution) and a gelling agent (carbon dioxide) using one tool are separately injected into the aquifer. Working fluid with a viscosity similar to water viscosity is injected in the direction of stratification. Carbon dioxide is supplied below and raised by buoyancy forces and reaching silicate initiates the process of its gelation, resulting in the formation of an insulating barrier of expected shape and size. For technological purposes, the gelation time must be controlled and formed gel must have certain mechanical properties.

Horizontal barrier formed in the aquifer should have excellent insulating properties, small thickness, long term durability and must be environmentally friendly and economically

competitive. In order to apply TFHB technology was necessary to determine crucial technological and technical parameters and to indicate areas of commercial applicability. This statement clearly outlined the concept of researches. Since the basis of the planned works was economy in the laboratory and then semi-industrial scale processes which will occur in the aquifer during barrier forming process were simulated. As the research progresses, the work was carried out on increasingly large-scale models of artificial aquifers, both 2D and 3D versions.

**key words:** water bearing zones, insulating barriers, silicates

## **WROWADZENIE**

Ochrona wód podziemnych, stanowiących ponad 95% zasobów wody słodkiej, jest szczególnie istotna ze względu na coraz powszechniejszy deficyt wody na świecie. Obecnie brak jest rozwiązań technologicznych pozwalających w prosty sposób odizolować horyzontalnie narażone na zanieczyszczenie wody podziemne. Dlatego też, tworzenie metodą iniekcji krzemianu, poziomych ekologicznych barier wg technologii (THBK) jest ważnym krokiem w kierunku ochrony zasobów wód podziemnych.

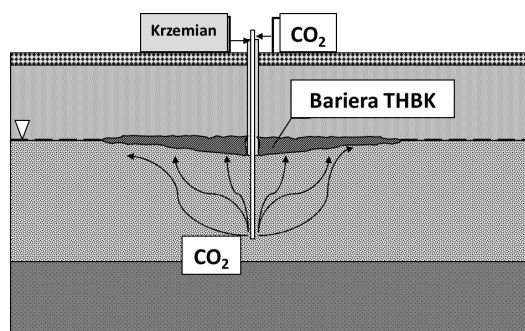
Idea zatłaczania krzemianu sodu wraz z ditlenkiem węgla do formacji geologicznych jest znana od roku 1946, kiedy to został opublikowany patent zatytułowany „Method of Oil Recovery” (Andresen 1946). Do pomysłu tego powrócono również później (Islam, Farouq 1993), wykonując szereg testów laboratoryjnych, którymi wykazano, że technologia ta może być zastosowana w złożach o szerokim zakresie przepuszczalności i miąższości strefy produktywnej oraz wodonośnej. Shimada (Shimada 1992) technologię likwidacji właściwości filtracyjnych skał i gruntów przy pomocy krzemianu i CO<sub>2</sub> nazwał technologią „Carbo Rock” uzyskując spadki filtracji do ok. 10<sup>-7</sup> m/s.

## **TECHNOLOGIA THBK**

Wspomniane technologie umożliwiają likwidację filtracji warstw zgodnie z ich uwarstwieniem. Inaczej jest w przypadku proponowanej technologii THBK. Rozwijana przez INiG PIB wspólnie z geoinżynierską firmą Soley sp.z o.o. technologia THBK, bazuje na zjawisku żelowania zolu krzemianu sodu w wyniku jego kontaktu/mieszania z ditlenkiem węgla, (CO<sub>2</sub>). Przyjmując wyidealizowane warunki hydrogeologiczne idea technologii THBK została pokazana na rysunku 1. Technologia przewiduje (Falkowicz 2013) horyzontalne zatłaczanie na poziomie swobodnego zwierciadła wody podziemnej, rozdzielnie, wodnego koloidalnego roztworu krzemianu sodu a poniżej systemem dysz gazowego ditlenku węgla, który wynoszony siłą wyporu łączy się z krzemianem tworząc nieprzepuszczalną barierę o oczekiwanym kształcie i rozmiarach. Zakłada się, że tak wytworzona w ośrodku geologicznym bariera, zlikwiduje lub znacząco ograniczy filtrację płynów w kierunku pionowym, likwidując np. drogi grawitacyjnej migracji zanieczyszczeń do warstw wodonośnych.

Istotnym elementem proponowanej technologii jest ciecz zabiegowa tworzona na bazie krzemianu sodu. Ciecz ta charakteryzuje się niską lepkością (ok. 1,1 mPa·s) co ułatwia jej głębokie iniekcje do ośrodka geologicznego. Zastosowanie specjalnych dodatków/ulepszczy pozwala na zwiększenie odporności powstałego żelu na czynniki środowiskowe, termiczne oraz baryczne jak również zapewnienia hybrydowe działanie cieczy zabiegowej. Obecność dodatku w postaci nanomateriału sprawia, że zatłoczona ciecz po ok. 48 godzinach przejdzie w formę żelu nawet w przypadku ograniczonego kontaktu z ditlenkiem węgla. Początkowa iniekcja ditlenku węgla jest jednak niezbędna,

bowiem powoduje, że zatłaczany krzemian nie opada grawitacyjnie w warstwie wodonośnej. Odporność powstałego żelu na czynniki środowiskowe, pokazuje wytrzymałość na tzw. przebiecie w piaskowcach dochodzące do 56,6 MPa/m (Nasr-El-Din 2005).



Rysunek 1. Idea tworzenia poziomej bariery izolacyjnej

*Figure 1. Conceptual model of forming horizontal insulating barrier*

### **Czynniki wpływające na skuteczność technologii THBK**

Drugim istotnym elementem decydującym o skuteczności technologii THBK jest uzyskanie oczekiwanego sposobu wypływu zatłaczanego punktowno do warstwy wodonośnej ditlenku węgla. Zajęta przez wypływający ditlenek węgla część warstwy wodonośnej powinna przyjmować kształt odwróconej paraboloidy ew. stożka o maksymalnej powierzchni podstawy na poziomie swobodnego zwierciadła wody podziemnej.

Jeżeli chodzi o przepuszczalność warstw wodonośnych to w większości przypadków przepuszczalność w kierunku horyzontalnym  $k_h$  jest wielokrotnie (Todd 1980) nawet do 30 razy większa jak przepuszczalność w kierunku wertykalnym  $k_v$  co jest wynikiem mechanizmów rządzących procesami sedymentacji. Fakt istnienia tej zależności jest bardzo korzystny dla wykonania poziomej bariery izolacyjnej wg technologii THBK, ponieważ:

- im większy jest iloraz  $k_h/k_v$  tym łatwiej zatłoczyć żol krzemianowy głęboko do warstwy wodonośnej minimalizując niekorzystne zjawisko wypływów sferycznych jakie mają miejsce w przypadku warstw o właściwościach izotropowych.
- im większa anizotropia przepuszczalności w kierunku pionowym tym charakter wypływu gazu jest bardziej zbliżony do oczekiwanego.

Przewiduje się, że technologia THBK będzie konkurencyjna w stosunku do obecnie stosowanych z dwu powodów tzn. niskich kosztów i praktycznie całkowitej nieszkodliwości dla środowiska naturalnego.

### **Zastosowanie horyzontalnych barier izolacyjnych**

Można wskazać wiele możliwości zastosowania technologii THBK, między innymi do wykonywania warstw izolacyjnych pod obiektami infrastruktury, doszczelniania składowisk odpadów stałych i półpłynnych, ochrony wód podziemnych na obszarach przemysłowych, bezpośredniej ochrony złóż wód mineralnych i leczniczych

zagrożonych inwestycjami, intensyfikacji procesów napowietrzania zanieczyszczonych gleb czy warstw wodonośnych, uszczelniania podłoża dla wytwarzania sztucznych mokradeł (constructed wetlands), zapobiegania emisjom promieniotwórczego radonu do obiektów użyteczności publicznej, rekultywacji terenów zdegradowanych oraz wielu innych.

Jedno z ciekawszych zastosowań technologii THBK może się wiązać z koniecznością uszczelnienia warstw nadkładu w procesach podziemnej biogazyfikacji węgla brunatnego.

Z praktycznego punktu widzenia stosunkowo łatwo jest lokalizować, a następnie likwidować duże ewidentne drogi grawitacyjnej migracji zanieczyszczeń nieszczelnościami w formacji geologicznej. Sprawa komplikuje się w przypadku dużej liczby mikronieszczelności i w tym obszarze twórcy technologii THBK widzą największe potencjalne jej zastosowanie w praktyce.

### **WYPŁYW GAZU W POROWATEJ WARSTWIE WODONOŚNEJ**

Kształt części warstwy wodonośnej, przez którą wypływa gaz, zależy od jej budowy petrofizycznej sposobu zatłaczania gazu. Wykazano, że istnieją takie warunki, w których wynoszony siłami wyporu gaz nasyca część warstwy o kształcie odwróconego stożka lub paraboloidy, a efektywność dyfuzji gazu do wody jest wtedy najwyższa z zaobserwowanych. (Brooks 1999, Glass 2003). Oczekiwany jest, aby promień podstawy paraboloidy, przez którą przepływa gaz na poziomie zwierciadła swobodnego był jak największy. Promień ten nazywany jest promieniem oddziaływania lub saturacji  $R$  i w praktyce jest to największa odległość od odwiertu iniekcyjnego do zewnętrznej krawędzi saturowanej strefy.

W technologii THBK do warstwy wodonośnej zatłaczany jest ditlenek węgla. Poza ogólnie rozumianą morfologią warstwy wielkość promienia saturacji  $R$  zależy będzie od sposobu zatłaczania gazu, co można realizować w sposób ciągły lub pulsacyjny. W trakcie zatłaczania ditlenku węgla należy rejestrować objętościowy wydatek zatłaczania w celu kontroli całkowitej ilości zatłoczonego gazu. Ciśnienie tłoczenia będzie wielkością wynikową. Zgodnie z pierwszymi obserwacjami, w warstwach wodonośnych zbudowanych z piasku o średnim uziarnieniu ok. 2-3 mm powinno być to ciśnienie niewiele wyższe od ciśnienia hydrostatycznego. Zgodnie z przyjętym scenariuszem badań poznanie mechanizmów wypływu ditlenku węgla w porowatej warstwie wodonośnej postanowiono zrealizować metodą wizualizacji zjawiska za pomocą specjalnie przygotowanego stanowiska badawczego.

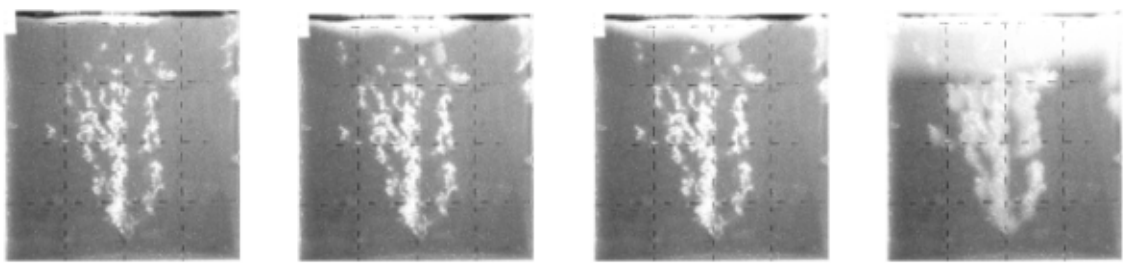
W prostopadłościennym, wykonanym z pleksiglasu pojemniku budowano sztuczne warstwy wodonośne używając dwu rodzajów piasku oraz kulek szklanych. Podstawowe parametry petrofizyczne sztucznych warstw wodonośnych pokazano w tabeli 1.

Po rozpoczęciu zatłaczania ditlenku węgla, na ścianie modelu pojawiają się obszary o barwie żółto-brązowej, które interpretowane są jako miejsca nasycone ditlenkiem węgla oraz wodą o pH ok. 6,2. Obszary te przyjmują różne kształty w zależności od morfologii warstwy, sposobu zatłaczania i ilości zatłoczonego gazu co pokazano na rysunkach od 2 do 6. Na każdym z rysunków zamieszczone są cztery zdjęcia pokazujące zmiany kształtu strefy nasyconej.

Tabela 1. Materiał użyty do budowy warstwy wodonośnej  
 Table 1. Material used to form simulated water bearing zone

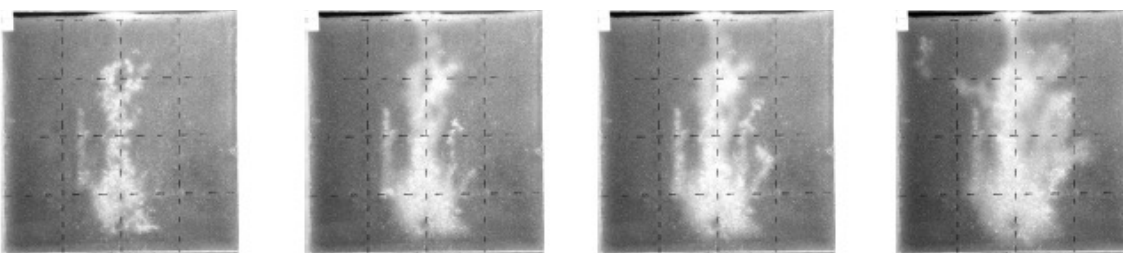
Material	Uziarnienie [mm]	Porowatość [%]	Przepuszczalność [m <sup>2</sup> ]	Wsp. filtracji w 20 <sup>0</sup> C [m/s]
Piasek ciemny	1-3	34,4	16,50.10 <sup>-12</sup>	0,16.10 <sup>-3</sup>
Piasek jasny	1-2	33,5	27,53.10 <sup>-12</sup>	0,27.10 <sup>-3</sup>
Kulki szklane	0,7-0,8	41,1	1,39.10 <sup>-12</sup>	0,14.10 <sup>-4</sup>

Na rysunku 2 i 2a pokazano przebieg procesu saturacji dla warstw zbudowanych z kulek szklanych. W eksperymencie pokazanym na rysunku nr 2 zatłaczany gaz wypływa kilkoma kanałami, które utworzyły się natychmiast po rozpoczęciu zatłaczania. W przypadku rysunku 2a zastosowano cykliczny przepływ gazu, co skutkowało bardziej homogenicznym nasyceniem strefy saturacji. Na rysunku 3 pokazano proces saturacji warstwy zbudowanej z piasku jasnego. Strefa saturacji (przekrój) ma kształt zbliżony do trójkąta/paraboli a poziom saturacji jest o wiele wyższy jak w przypadku warstwy zbudowanej z kulek szklanych. Na rysunku 4 pokazano proces saturacji warstwy zbudowanej z piasku ciemnego. Końcowe kształty jak i stopień nasycenia strefy saturacji w obu przypadkach (piasek) są podobne, natomiast da się zauważyć różnice w dynamice tego procesu. Strefa saturacji pokazana na rysunku 5 jest zasadniczo odmienna w kształcie od stref, jakie widać na zdjęciach poprzednich. W tym eksperymencie do warstwy podano roztwór środka spieniającego APF-27. Obecność powstałej piany powoduje powiększenie promienia saturacji, co jest bardzo korzystne z punktu widzenia oczekiwanej skuteczności technologii THBK. Na zdjęciu nr 6 pokazano wyniki eksperymentu gdzie warstwę wodonośną zbudowano z czterech warstw (piasek jasny i kulki szklane), co skutkowało całkowicie odmiennym do poprzednich przebiegiem procesu saturacji.



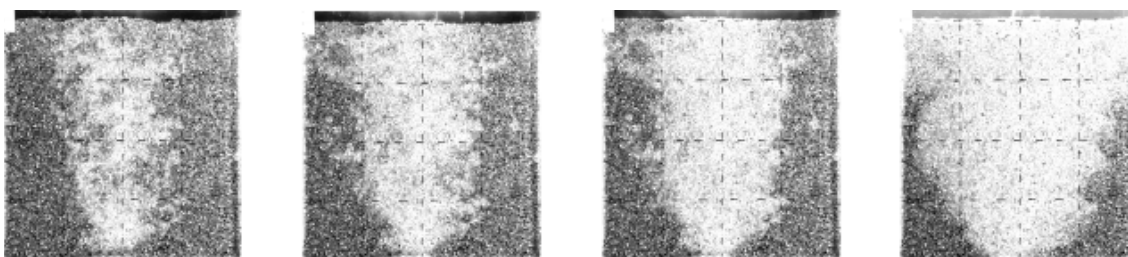
Rysunek 2. Kulki szklane przepływ gazu ciągły, nasycenie 5,1%

Figure 2. Glass beads continuous gas flow, saturation 5.1%

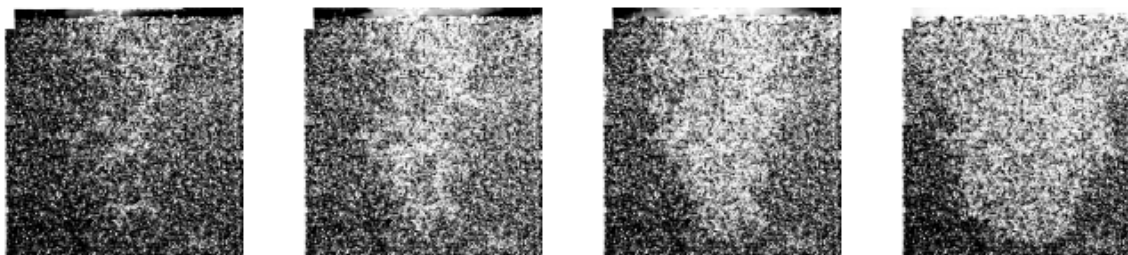


Rysunek 2a. Kulki szklane przepływ gazu pulsacyjny, nasycenie 8,6%

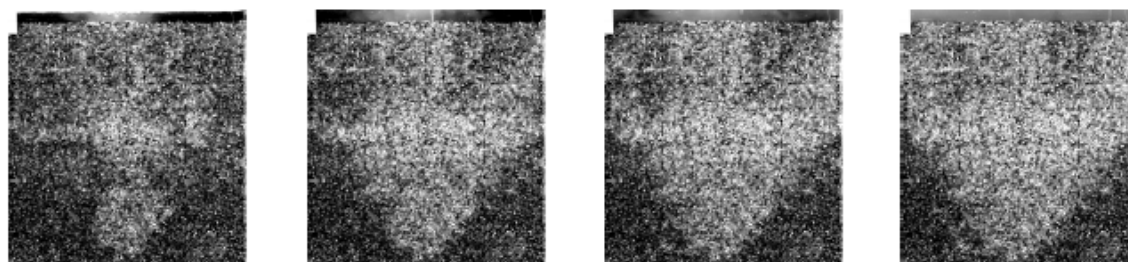
Figure 2a. Glass beads pulsating gas flow, saturation 8.6%



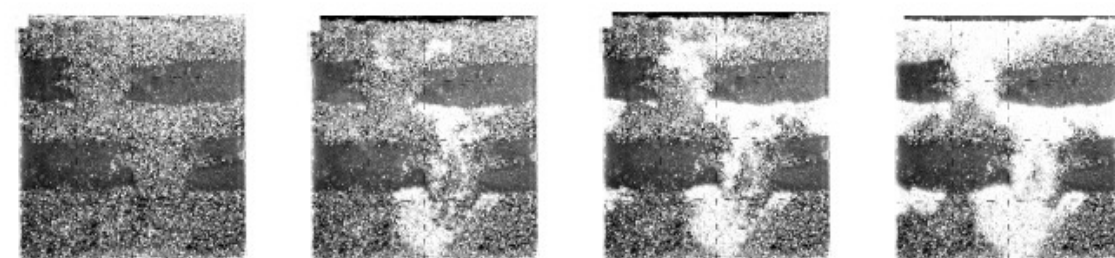
Rysunek 3. Piasek jasny przepływ gazu ciągły, nasycenie 18,3%  
*Figure 3. Bright sand continuous gas flow, saturation 18.3%*



Rysunek 4. Piasek ciemny przepływ gazu ciągły, nasycenie 20,1%  
*Figure 4. Dark sand continuous gas flow, saturation 20.1%*



Rysunek 5. Piasek jasny, środek spieniający, przepływ gazu ciągły, nasycenie 51,1%  
*Figure 5. Bright sand, foamer, continuous gas flow, saturation 51.1%*



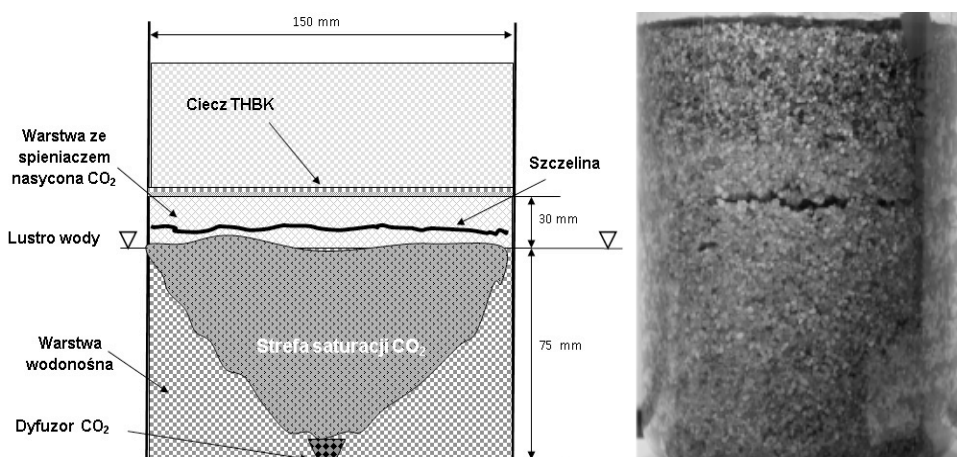
Rysunek 6. Warstwa z przekładkami piasek przepływ gazu ciągły  
*Figure 6. Layered simulated water bearing zone, continuous gas flow*

### **THBK - POZIOMA BARIERA IZOLACYJNA**

Bazując na wynikach badań nad symulacją procesów saturacji ditlenkiem węgla porowatej warstwy wodonośnej przystąpiono do laboratoryjnych prób tworzenia poziomej bariery izolacyjnej zgodnie z założeniami technologii THBK. Warstwę wodonośną przygotowano z piasku w cylindrycznym przezroczystym naczyniu (mikromodel 3D) o średnicy 15 cm i wysokości 16.5 cm. Przekrój warstwy

schematycznie pokazano na rysunku 7. Wykonano łącznie ok. 35 testów czynnikowych w różnych konfiguracjach wysokości warstw, sposobu i wydatku zatłaczania gazu, dawek środka spieniającego, cieczy THBK itp. Przyjęto dwa kryteria potwierdzające powstanie bariery THBK:

- przy wydatku tłoczenia gazu  $q=0,12$  l/min, wypływ gazu widoczny tylko po ściankach naczynia,
- przy wydatku tłoczenia gazu  $q=6$  l/min wypływ gazu widoczny tylko po ściankach naczynia i powstanie szczeliny poziomej. Przyjęto, bowiem, iż warunkiem koniecznym powstania szczeliny jest istnienie nieprzepuszczalnej warstwy ponad szczeliną, czyli bariery THBK.



Rysunek 7. Bariera THBK w mikromodelu 3-D

*Figure 7. TFHB barrier in 3-D micromodel*

W oparciu o analizę uzyskanych wyników, krok po kroku modyfikowano procedurę wytwarzania warstwy THBK. Stwierdzono, że skuteczny sposób postępowania przy wytwarzaniu bariery THBK w modelu pokazanym na rysunku 7 przedstawia się następująco:

1. utworzenie warstwy wodonośnej o wysokości ok 7,5 cm z umieszczonym centralnie dyfuzorem gazu,
2. saturacja warstwy wodonośnej z wydatkiem  $q=0,12$  l/min,
3. dodanie środka pianotwórczego APF 27 w ilości 2 ml (stężenie 5%),
4. saturacja warstwy z wydatkiem  $q=0,12$  l/min,
5. podanie cieczy THBK w ilości 100 ml,
6. saturacja warstwy z wydatkiem  $q=0,12$  l/min,
7. po 48 godzinach test wykonania bariery THBK.

We wszystkich testach uzyskiwano barierę THBK potwierdzoną powstaniem szczeliny, co obrazowo pokazano na rysunku 7.

W kolejnym etapie badań przystąpiono to wytwarzania bariery THBK w coraz większych modelach warstwy wodonośnej. Wykonano skutecznie kilka barier w cylindrycznych pojemnikach o średnicy 35 cm i wysokości 30 cm. W dalszej kolejności złoża budowane są w pojemnikach (paletopojemnikach) w kształcie sześciangu, którego krawędź ma długość 1 metra. Stosowane są specjalne procedury przygotowania złoża i



zatłaczania płynów tak, aby możliwie wiernie symulować warunki, jakie zaistnieją przy wykonywaniu bariery THBK w rzeczywistej warstwie wodonośnej

## PODSUMOWANIE

Zastosowane procedury badawcze umożliwiły jakościowo/ilościową ocenę procesu wypływu ditlenku węgla w porowatej warstwie wodonośnej. W warstwie zbudowanej z kulek szklanych o granulacji 0,4-0,8 mm, a więc izotropowej pod względem właściwości filtracyjnych, zaobserwowano że zatłaczany gaz wypływa maksymalnie kilkoma kanałami, które tworzyły się praktycznie natychmiast po rozpoczęciu zatłaczania gazu. W przypadku warstw wodonośnych zbudowanych z piasku o granulacji (2-3 mm) zatłaczany gaz wypływając nasycona część warstwy o kształcie odwróconej paraboloïdy lub stożka. Jest to związane anizotropią przepuszczalności takiej warstwy, co wynika z nie sferycznej (najczęściej) budowy ziaren piasku. Jest to bardzo korzystne z punktu widzenia efektywności technologii THBK. Dla obu testowanych piasków nie znaleziono jednoznacznych zależności pomiędzy wielkością promienia saturacji  $R$ , a sposobem zatłaczania gazu.

Bezdyskusyjnym natomiast jest stwierdzenie, że zatłoczenie do warstwy wodonośnej środka spieniającego wpływa korzystnie na wielkość uzyskanego promienia saturacji, co pokazano na rysunku 5. W dalszych pracach planuje się wykonanie serii testów saturacji na 5-cio krotnie większym modelu 2D (makromodel 2D) warstwy wodonośnej. W makromodelu 2D podjęta zostanie próba opornościowego (impedancyjnego) skanowania dystrybucji saturacji uzyskując tym samym dodatkowe źródło informacji o przebiegu procesu wewnątrz warstwy a nie tylko na ścianie modelu. Jeżeli wyniki będą komplementarne podjęta zostanie próba określenia ogólnej zależności wiążącej wielkość promienia saturacji  $R$  z głębokością iniekcji dla danej warstwy wodonośnej.

Unikatowe właściwości cieczy THBK umożliwiają uzyskiwanie poziomej bariery izolacyjnej w porowatej warstwie wodonośnej, a hybrydowa natura procesu żelowania gwarantuje powstanie warstwy o wystarczających parametrach izolacyjnych w warunkach (ciśnienia, temperatury, itp.), jakie istnieją w płytkich porowatych warstwach wodonośnych. Ciecz THBK jest praktycznie obojętna dla środowiska naturalnego, a z technicznego punktu widzenia łatwa do przygotowania, zatłaczania magazynowania czy ewentualnej utylizacji.

Artykuł powstał w oparciu o wyniki prac projektu pt *Innowacyjna technologia THBK wykonywania proekologicznych poziomych barier izolacyjnych w warstwach wodonośnych* realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój, Działanie 1.1Nr umowy POIR.01.01.01-001038/15

## SPIS LITERATURY

1. Anderson, K. H. 1946: *Method of Oil Recovery*, U.S. Patent 2,402,588
2. Brooks, M.C, Wise, W. R., Annable, M.D. 1990: *Fundamental Changes in In Situ Air Sparging Flow Patterns* „Groundwater Monitoring and Remediation”, 19(2), str. 105-113
3. Glass, R.J., Conrad, S.H., and Peplinski, W. 2000: *Gravity-destabilized nonwetting phase invasion in macroheterogeneous porous media: experimental observations of invasion dynamics and scale analysis*, Water Resources Research, 36(11), str. 3121–3137



4. Falkowicz S., Cicha-Szot Renata, Leginowicz A., Labus K., Mroczkowska Szerszeń M.: „Sposób wytwarzania poziomej bariery izolacyjnej w warstwie zawodnionej”. Zgłoszenie P. 405711 październik 2013.
5. Islam M.R., Farouq Ali S.M. 1993: *Use of Silica Gel for Improving Waterflooding Performanve of Bottom-water Reservoirs*, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol.8, s. 303-313
6. Nasr-El-Din H.A., Taylor K.C. 2005: *Evaluation of sodium silicate/urea gels used for water shut-off treatments*, *Journal of Petroleum Science and Engineering* Vol. 48(3-4), str.141-160
7. Shimada S., Ide M., Iwaasa H. 1992: *Development of Gas-Liquid Reaction Injection System* Proc. ASCE Conf. Grounting Soil Improvement and Geosynthetic, New Orleans, L.A. Feb. 25-26, str. 325-336
8. Todd, D.K. 1980: *Groundwater Hydrology*, John Wiley & Sons, New York.