

INIEKCYJNA TECHNOLOGIA TWORZENIA HORYZONTALNYCH BARIER IZOLACYJNYCH: Z LABORATORIUM DO WARSTWY WODONOŚNEJ

TRENCHLESS TECHNOLOGY OF FORMING HORIZONTAL INSULATION BARRIERS: FROM LABORATORY TO AQUIFER

Sławomir Falkowicz, Renata Cicha-Szot - Instytut Nafty i Gazu Kraków – Państwowy Instytut Badawczy

W artykule omówiono wyniki prac laboratoryjnych, których celem było określenie wpływu wybranych parametrów procesu tłoczenia ditlenku węgla do modelu porowatej warstwy wodonośnej na skalę i dynamikę jego wypływu z tejże warstwy. Określono objętość warstwy, przez którą wypływał ditlenek węgla oraz stopień nasycenia (saturacji) warstwy wodonośnej gazem. Punktowe zatłaczanie ditlenku węgla do warstwy wodonośnej jest jednym z pierwszych etapów wykonywania poziomych barier izolacyjnych, zgodnie z założeniami Technologii Horyzontalnych Barier Krzemianowych (THBK). Celem technologii THBK jest likwidacja pionowego przepływu płynów w ośrodku geologicznym, co daje szerokie pole zastosowań w ochronie wód podziemnych i górnictwie.

W pracy wykonano symulację procesu oraz zoptymalizowano parametry zatłaczania cieczy zabiegowej. Podjęto także próbę przeniesienia uzyskanych w laboratorium wyników do warunków płytkich warstw wodonośnych

Słowa kluczowe: warstwy wodonośne, bariery izolacyjne, krzemiany

The article discusses the results of laboratory work, the objective of which was to determine the relevant parameters of technological process of aquifer saturation by carbon dioxide during forming horizontal insulating barriers, in accordance with the Technology of forming Horizontal Silicate Barriers (THBK). The main objective of the THBK technology is vertical control of fluid flow in porous media, what gives a wide field of applications in groundwater protection and mining. In this work simulation of saturation process and optimization of injection parameters were performed. Moreover, an attempt to transfer obtained laboratory results to shallow aquifers conditions was conducted.

Keywords: aquifer, insulation barriers, silicates

Wprowadzenie

Migracja zanieczyszczeń z niezabezpieczonych prawidłowo składowisk odpadów, w tym stawów poflotacyjnych, jest częstą przyczyną zanieczyszczenia wód podziemnych. Skutkuje to poważnymi problemami środowiskowymi oraz konsekwencjami ekonomicznymi. W chwili obecnej brak jest bezwykopowej technologii pozwalającej, w miarę tanim sposobem, likwidować infiltrację zanieczyszczeń do wód podziemnych. Dlatego też, rozwijana przez INiG-PIB wspólnie z geoinżynierską firmą Soley Sp. z o.o. technologia THBK wydaje się być ważnym krokiem w kierunku ochrony, jakości wód podziemnych (rys. 1). Ponadto, bariery te, mogą być wykorzystane podczas procesów zgazowania węgla brunatnego lub kontroli pionowego przepływu wód w kopalniach i wielu innych.

Technologia Horyzontalnych Barier Krzemianowych

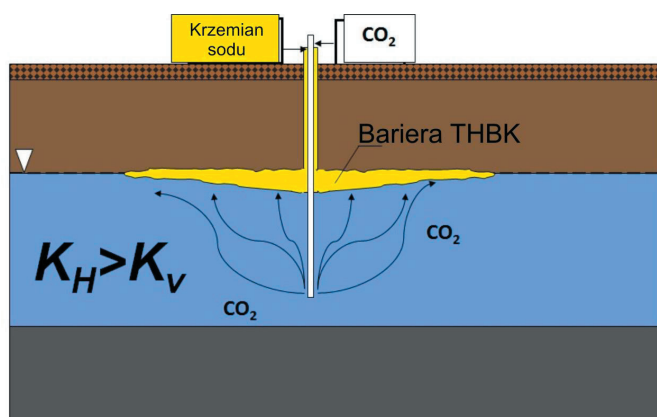
Technologia THBK jest technologią iniekcyjną, w której jednym narzędziem wiertniczym, rozdzielnie zatłacza się

do warstwy wodonośnej modyfikowany koloidalny roztwór krzemianu sodu a poniżej ditlenek węgla (CO_2), będący katalizatorem reakcji żelowania krzemianu. Wynoszony siłą wyporu ditlenek węgla, napotyka zatłaczany krzemian sodu, i obniżając jego wyjściowe pH inicjuje proces przejścia żol-żel. W tym miejscu warstwa wodonośna traci swoje właściwości filtracyjne i tym samym powstaje pozioma bariera izolacyjna.

Tak utworzona bariera izolacyjna musi być konkurencyjna ekonomicznie, trwała i przyjazna dla środowiska naturalnego. Aby spełnić pierwsze kryterium użyte materiały muszą być tanie, a zaangażowanie sprzętowe i ludzkie jak najmniejsze. Jednocześnie stosowane materiały w żaden sposób nie mogą negatywnie wpływać, na jakość wód warstwy wodonośnej, w której bariera jest wykonywana.

Ze względów ekonomicznych trzeba dążyć do tego, aby z jednego odwiertu uzyskiwać barierę o jak największej powierzchni. Należy więc maksymalnie głęboko zatłoczyć ciecz roboczą (krzemian sodu), co można zrealizować stosując ciśnienia zatłaczania wyższe od ciśnienia geostatycznego. Powoduje to powstawanie szczeliny poziomej, co w połącze-

niu z anizotropią właściwości filtracyjnych warstwy ($k_h > k_v$) zapobiega niekorzystnemu, sferycznemu, rozplywowi cieczy roboczej w warstwie wodonośnej.



Rys. 1. Idea technologii THBK
Fig. 1. The concept of THBK technology

Idea wytwarzania poziomej bariery izolacyjnej w warstwie wodonośnej powstała w INiG - PIB w Krakowie [3-6]. Była więc, ideą czysto koncepcyjną i aby bariera powstała w warunkach rzeczywistych należało określić istotne techniczne i technologiczne warunki jej wykonywania. Zrealizowano to prowadząc szereg eksperymentów laboratoryjnych symulując proces wykonywania i powstawania bariery. Prace prowadzono na coraz większych modelach sztucznych warstw wodonośnych tak w wersji 2D jak i 3D.

Wizualizacja procesu saturacji warstwy wodonośnej

Kluczowym elementem decydującym o skuteczności technologii THBK jest uzyskanie oczekiwanego sposobu wypływu ditlenku węgla zatłaczanego punktowo do warstwy wodonośnej. Ta część warstwy wodonośnej, przez którą przepływa ditlenek węgla powinna przyjmować kształt odwróconej paraboloïdy, ewentualnie stożka o maksymalnej powierzchni podstawy na poziomie swobodnego zwierciadła wody podziemnej. Konsekwentnie promień saturacji R (podstawy paraboloïdy) powinien być, co najmniej równy promieniowi iniekcji cieczy roboczej (modyfikowanego krzemianu sodu) do warstwy wodonośnej. Na wielkość promienia saturacji wpływają dwa czynniki: wspomniana już anizotropia właściwości filtracyjnych warstwy wodonośnej i sposób zatłaczania CO_2 . Ditlenek węgla można zatłaczać w sposób ciągły i cykliczny wpływając w ten sposób na skalę i dynamikę procesu saturacji warstwy wodonośnej [2]. W zdecydowanej większości przypadków przepuszczalność (współczynnik filtracji) warstw wodonośnych w kierunku horyzontalnym k_h jest wielokrotnie (nawet do 30 razy) większa jak przepuszczalność w kierunku wertykalnym k_v [11]. Fakt istnienia tej zależności jest bardzo korzystny dla wykonania poziomej bariery izolacyjnej według technologii THBK, ponieważ im większa anizotropia przepuszczalności w kierunku pionowym tym charakter wypływu gazu jest bardziej zbliżony do oczekiwanego. Inspiracją wykorzystania tego zjawiska w technologii THBK były opisy prac intensyfikacji, poprzez napowietrzanie, procesów usuwania zanieczyszczeń natury węglowodorowej z gleby i płytkich warstw wodonośnych.

W literaturze szereg prac poświęcono wizualizacji procesów przepływu powietrza w warstwach wodonośnych zbudowanych z piasków o różnym uziarnieniu [1,3, 8-11]. Jednak

wyniki prac nie wskazują jednoznacznie, który ze sposobów zatłaczania, ciągły czy cykliczny, jest optymalny dla konkretnego ośrodka porowatego.

Bazując na doświadczeniach innych zespołów badawczych zaprojektowano i wykonano modele warstw wodonośnych.

Budowa modelu 2D

Aby w praktyce kontrolować proces saturacji warstwy wodonośnej ditlenkiem węgla należało zidentyfikować i określić istotne zależności łączące parametry hydrodynamiczne warstwy wodonośnej i procesu zatłaczania CO_2 . Cel ten osiągnięto metodą wizualizacji zjawiska w mikro i makro skali, a następnie w oparciu o uzyskane wyniki dokonano próby opisu procesu w skali rzeczywistej warstwy wodonośnej.

W tym celu w oparciu o własny projekt wybudowano dwa stanowiska badawcze, które nazwano: mikromodel-2D i makromodel-2D.

Elementem głównym obu stanowisk są wykonane z Plexiglasu przezroczyste pojemniki w kształcie prostopadłościanu o wymiarach: 30x20x2,5 cm (mikromodel-2D) oraz 150x100x5 cm (makromodel-2D), w których przygotowywane były sztuczne warstwy wodonośne. Niewielkie głębokości modeli (2,5 cm i 5 cm) umożliwiają wizualizację procesu już w momencie rozpoczęcia zatłaczania ditlenku węgla. Obserwacje takie nie byłyby możliwe w przypadku modeli 3D. Podstawowe właściwości zastosowanych w badaniach materiałów, z których wykonywano sztuczne warstwy wodonośne pokazano w tabeli 1.

Dodatkowo w skład stanowiska wchodzi system dozowania gazu jak i fotograficznej rejestracji procesu. Ze względów ekonomicznych w pierwszej kolejności podjęta została próba wizualizacji procesu wynoszenia gazu w mikromodelu-2D. W zgodnej opinii wielu autorów z różnych ośrodków badawczych, proces perkolacyjnego (nieciągłego) wynoszenia gazu w warstwie zaważonej jest procesem tak złożonym, że w pracach badawczych należy w pierwszej kolejności bazować na technikach wizualizacyjnych. W przypadku stosowania ditlenku węgla problem rejestracji procesu rozwiązano wykorzystując duże powinowactwo (rozpuszczalność) ditlenku węgla do wody, co powoduje obniżanie jej wyjściowego pH. Zastosowano metodę kolorymetryczną wybierając, jako wskaźnik purpurę bromokrezolową. Przy pH ok. 5,7- 5,9 następuje (w warunkach złoża piasku) zmiana zabarwienia wody z fioletowego na żółto-brązowy.

Zbudowany na potrzeby projektu dozownik CO_2 (rys. 2) jest gotowym urządzeniem wyposażonym w króćce wejścia i wyjścia gazu, przewód zasilania energią elektryczną oraz przewód do komunikacji z komputerem. W dozowniku wykorzystano masowy zadajnik przepływu gazu firmy Brooks model SLA 5850. Sterowanie pracą dozownika odbywa się przez komputer przy pomocy nakładki napisanej w programie do akwizycji danych i sterowania LabWindow. Do rejestracji procesu wytypowano zestaw bazowy oparty na aparacie Nikon D 5300, z obiektywem AF-S Nikkor 18-105 mm 1:3,5-5,6 GED. W czasie rejestracji wykorzystywano światło ciągłe i filtr polaryzacyjny.

W mikromodelu-2D przeprowadzono szereg eksperymentów zatłaczania CO_2 do sztucznej warstwy wodonośnej uzyskując istotne dane co do sposobu prowadzenia eksperymentu, zakresów pomiarowych, sposobu przygotowania złoża i innych co detalicznie opisano w publikacji [7].

Tab. 1. Materiał użyty do budowy warstwy wodonośnej
 Tab. 1. The material used for the forming artificial aquifer

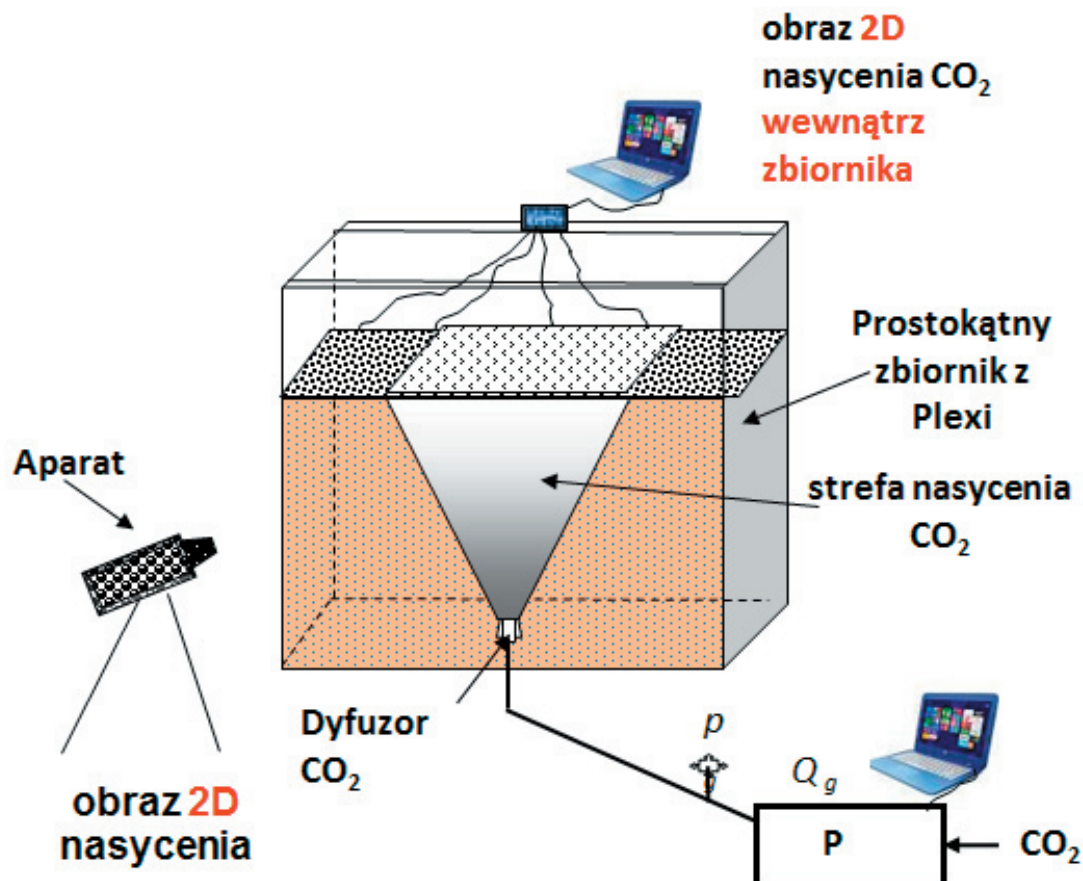
| Material | Uziarnienie [mm] | D_{50} [mm] | Porowatość [%] | Przepuszczalność [m ²] | Wsp. filtracji w 20°C [m/s] |
|---------------|------------------|---------------|----------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Piasek I | 1-3 | 1,47 | 34,4 | $16,50 \cdot 10^{-12}$ | $0,16 \cdot 10^{-3}$ |
| Piasek II | 1-2 | 1,72 | 33,5 | $27,53 \cdot 10^{-12}$ | $0,27 \cdot 10^{-3}$ |
| Kulki szklane | 0,7-0,8 | x | 41,1 | $1,39 \cdot 10^{-12}$ | $0,14 \cdot 10^{-4}$ |

W oparciu o uzyskane w czasie testów na mikromodelu-2D doświadczenie tak konstrukcyjne jak i technologiczne zbudowano również z Plexiglasu makromodel-2D warstwy wodonośnej, o wymiarach powierzchni roboczej 100x90x5 cm. Proces saturacji jest wizualizowany i rejestrowany według procedur opracowanych w trakcie eksperymentów prowadzonych na mikromodelu-2D. Istotną nowością jest procedura tzw. mapingu impedancyjnego. Idea pracy tego systemu polega na rejestrowaniu zmian potencjału elektrycznego w wytypowanych 64. punktach wewnątrz sztucznej warstwy wodonośnej. Na bazie tych rejestracji tworzona jest powierzchnia z naniesionymi na niej liniami ekwipotencjalnymi. Zmiana w czasie lokalizacji tych linii odzwierciedla stopień i rozkład przestrzenny nasycenia gazem modelu warstwy wodonośnej. Stosując pewne uproszczenie stwierdzono, że obszary tych zmian zasadniczo pokrywały się z obszarami saturacji obserwowanymi na ścianie makromodelu-2D. W ten sposób potwierdzono fundamentalne założenie mówiące, że saturacja złoża piasku obserwowana na ścianie modelu jest tożsama z saturacją w całej jego głębokości.

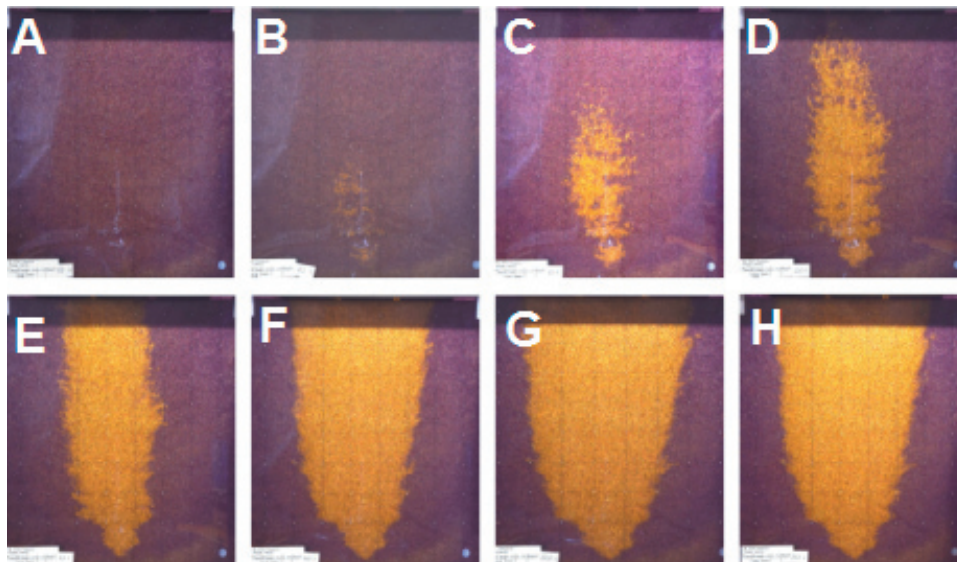
Po rozpoczęciu zatłaczania ditlenku węgla na przedniej ścianie makromodelu-2D pojawiają się obszary o barwie żółto-brązowej, które interpretowane są jako miejsca nasycone

ditlenkiem węgla i wodą o pH ok. 5,7. Obszary te przyjmują różne kształty w zależności od morfologii złoża, sposobu zatłaczania CO₂ i ilości zatłoczonego gazu (rys. 3-6). Na rysunkach zamieszczono osiem zdjęć pokazujących zmiany kształtu strefy nasyconej oraz stopnia nasycenia złoża gazem nierozpuszczonym. Zdjęcia robione są po zatłoczeniu do złoża określonej ilości CO₂, odpowiednio: A-0 dm³, B-0,2 dm³, C-1 dm³, D-2 dm³, E-8 dm³, F-14 dm³, G-20 dm³, H-25 dm³.

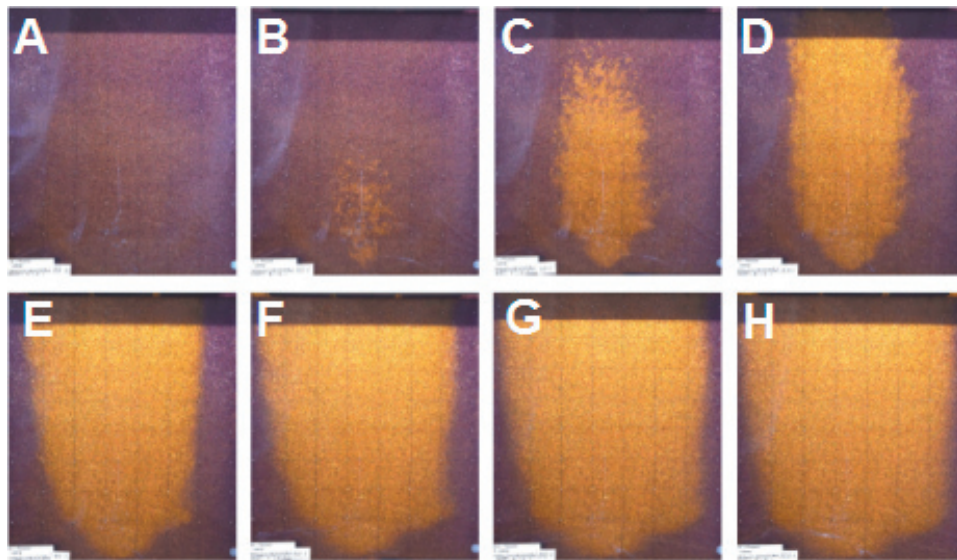
Na rysunkach 3-6 przedstawiono wyniki, prowadzonych na makromodelu-2D eksperymentów saturacji sztucznej warstwy wodonośnej wykonanej z piasku I, piasku II oraz kulek szklanych. Analizując rysunki pokazujące przebieg procesu saturacji widać, że w tej skali eksperymentu da się zauważyć wyraźny wpływ sposobu zatłaczania gazu na kształt przekroju warstwy nasyconej, a w szczególności na wielkość promienia saturacji. Szczególnie w przypadku piasku I zatłaczanie cykliczne gazu skutkuje zwiększeniem promienia saturacji R co pokazują rysunki 3 i 4, gdzie promienie saturacji wynosiły odpowiednio 0,42 i 0,33 metra na głębokości zatłaczania równej 1 metr. Według tego samego scenariusza przeprowadzono eksperymenty saturacji sztucznych warstw wodonośnych zbudowanych z piasku II oraz kulek szklanych. Wyniki zamieszczono w tabeli 2.



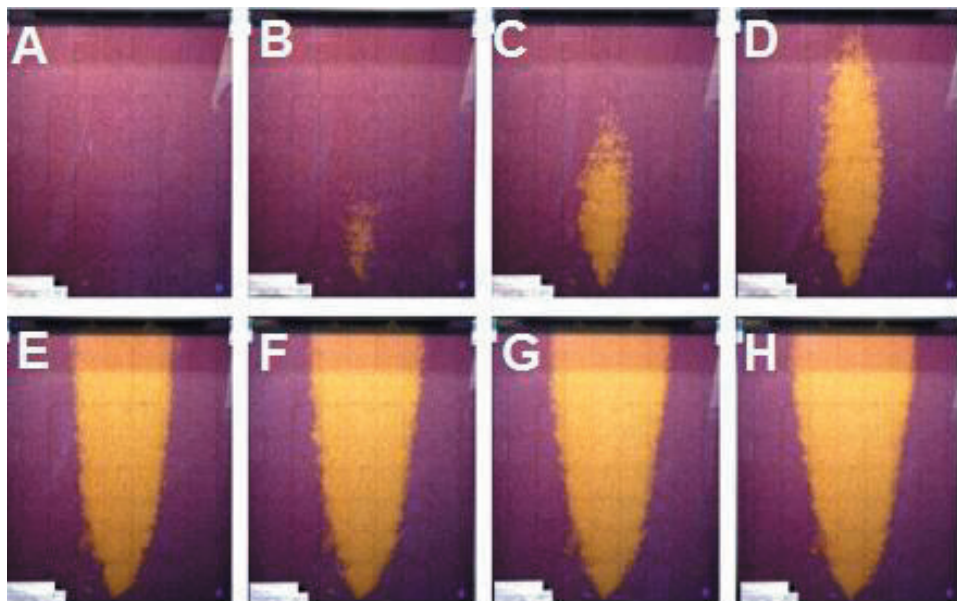
Rys. 2 Mikromodel 2D
 Fig. 2. Micromodel 2D



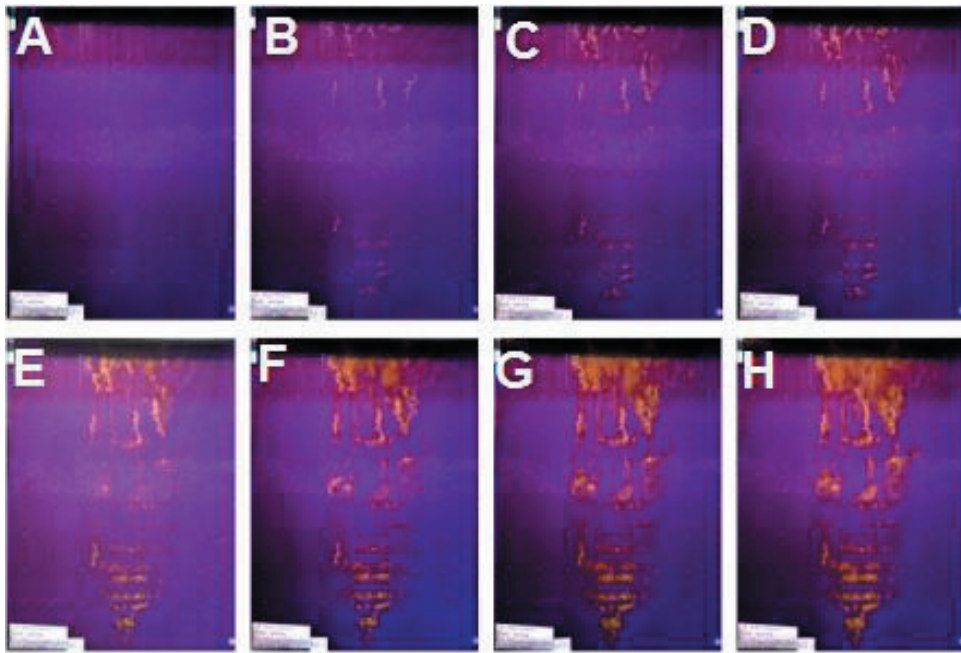
Rys. 3. Eksperyment Saturacja-1, piasek I zatłaczanie ciągłe $q = 0,32$ l/min
Fig. 3. Experiment of the Saturation-1, sand I, continuous injection $q = 0,32$ l/min



Rys. 4. Eksperyment Saturacja-2, piasek I zatłaczanie cykliczne 8/5 sek. $q = 0,32$ l/min
Fig. 4. Experiment of the Saturation-2, sand I, cyclic injection 8/5 sec. $q = 0,32$ l/min



Rys. 5. Eksperyment Saturacja-3, piasek II zatłaczanie ciągłe $q = 0,32$ l/min
Fig. 5. Experiment of the Saturation-3, sand II, continuous injection $q = 0,32$ l/min

Rys. 6. Eksperyment Saturacja-4, kulki szklane zatłaczanie ciągle $q = 0,32$ l/minFig. 6. Experiment of the Saturation-4, glass beads, continuous injection $q = 0.32$ l/min

Proces saturacji warstwy wodonośnej zbudowanej z piasku II pokazany został na rysunku 5. Użyty w tym doświadczeniu piasek ma większe ziarno podziałowe ($D_{50}=1,72$ mm) w porównaniu do piasku I ($D_{50}=1,47$ mm), a w konsekwencji większe średnice porów. Obszar saturacji jest bardziej smukły, co ilościowo ujmuje uzyskany promień saturacji $R=0,2$ metra.

Na rysunku 6 pokazano wyniki eksperymentu Saturacja-4, gdzie złożo stanowiły kulki szklane (0,7-0,8 mm) i zastosowano ciągle zatłaczanie CO_2 z wydatkiem $q = 0,32$ l/min. Widać typowo kanałowy wypływ gazu i niewielki ok. 25 cm promień saturacji. Powodem takiego charakteru wypływu są: homogeniczność złoża oraz zatłaczanie gazu w sposób ciągły.

W oparciu o uzyskane zdjęcia prostą metodą graficzną określano wzór paraboli ograniczającej obszar saturacji, a w konsekwencji promień saturacji R w funkcji głębokości zatłaczania. Znajomość tej ostatniej zależności jest bardzo istotna w trakcie wykonywania bariery THBK, pozwala bowiem oszacować prawdopodobny promień saturacji warstwy wodonośnej zatłoczonym przez narzędzie wiertnicze ditlenkiem węgla. Zależności te uzyskane dla piasku II pokazano na rysunku 7.

Znając wzór paraboli wyliczano również wielkość saturacji, czyli w wypadku makromodelu-2D wycinka paraboloidy, a wyniki pokazano w tabeli 2. Aby to uzyskać należało określić

całkowitz ilość gazowego CO_2 zaadsorbowanego (nierozpuszczonego) w złożu piasku. Zaniedbując średnie ciśnienie hydrostatyczne (ok. 5 kPa) panujące w makromodelu-2D, ilość zaadsorbowanego gazu równa jest ilości wypartej wody, co odczytywano na podziałce wskaźnika poziomu wody umieszczonego w górnej części modelu. Objętość (czynną) wycinka paraboloidy wyliczano ze wzoru (1), który ma postać:

$$V_{wp} = 2Rh(H-0,33aR^2)\phi \quad (1)$$

gdzie:

V_{wp} – objętość wycinka paraboloidy [cm^3],

R – promień saturacji [cm],

h – grubość wycinka paraboloidy [cm],

a – współczynnik kierunkowy paraboli [$1/cm$],

ϕ – porowatość czynna złoża [-],

H – wysokość paraboloidy/paraboli, głębokość iniekcji [cm].

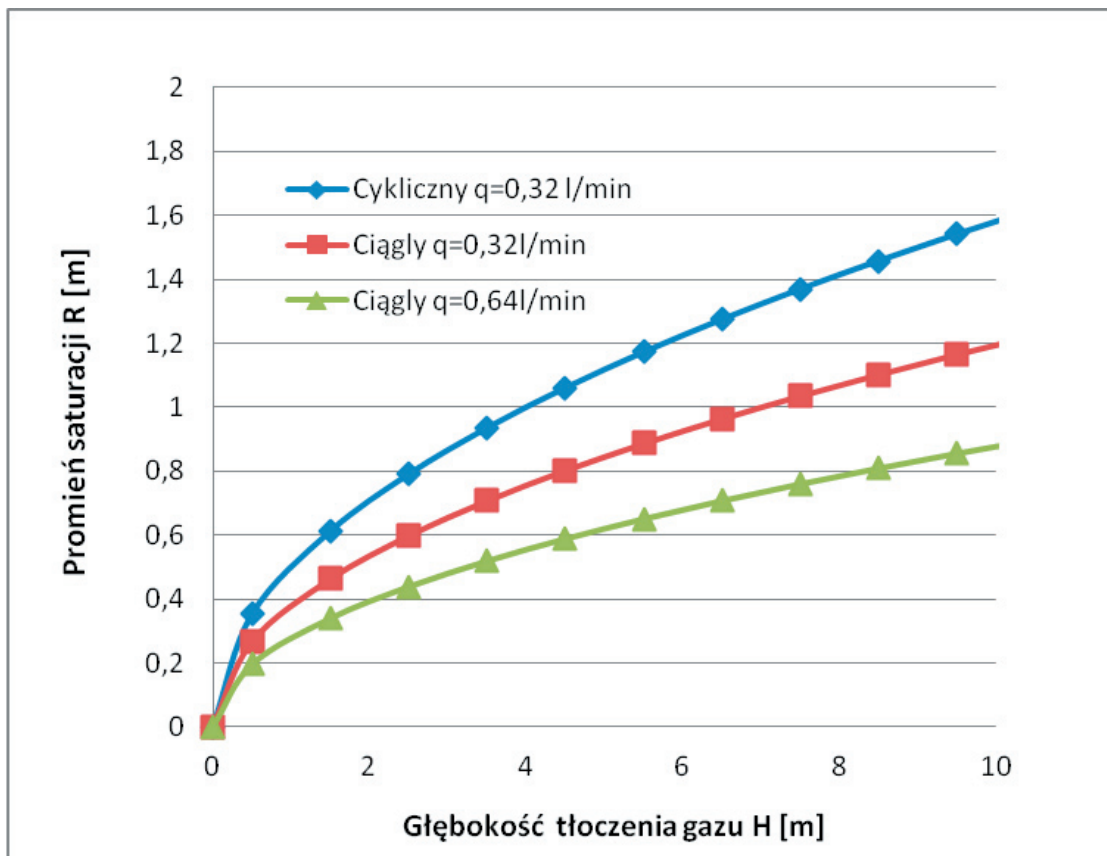
Dyskusja wyników

W oparciu o doświadczenie uzyskane w trakcie poprzednich prac wykonano badania laboratoryjne, które miały na celu określenie istotnych warunków/czynników uzyskania oczekiwanego (wielokanałowy) charakteru wypływu CO_2 w warstwie

Tab. 2. Wyniki eksperymentów saturacji sztucznej warstwy wodonośnej

Tab. 2. The results of the artificial aquifer saturation experiments

| Eksperyment | Złożo | Sposób zatłaczania CO_2 | Wzór paraboli | Promień saturacji dla $H=1,5$ m [m] | Promień saturacji dla $H=3,5$ m [m] | Saturacja [%] |
|-------------|-----------|---|---------------|---|---|---------------|
| Saturacja 1 | Piasek I | ciągły $q = 0,32$ l/min | $y = 0,07x^2$ | 0,46 | 0,71 | 38,1 |
| Saturacja 2 | Piasek I | cykliczny 8/5 sek. $q = 0,32$ l/min. | $y = 0,04x^2$ | 0,61 | 0,94 | 38,3 |
| Saturacja 3 | Piasek II | ciągły $q = 0,32$ l/min | $y = 0,12x^2$ | 0,35 | 0,54 | 46,5 |
| Saturacja 4 | Kulki | ciągły $q = 0,32$ l/min | x | x | x | x |



Rys. 7. Przewidywany promień saturacji dla piasku I
Fig. 7. The expected saturation radius for sand I

wodonośnej w celu uzyskania maksymalnych promieni saturacji R i określenia wartości nasycenia strefy objętej wypływem gazu. Obliczenia oparto na danych (promień saturacji, kształt strefy nasyconej) uzyskanych poprzez analizę zdjęć przedniej ściany modelu wykonywanych w trakcie eksperymentu.

Bazując na wynikach przeprowadzonych testów można stwierdzić, że w przypadku warstw wodonośnych w piaskach o średniej granulacji (piaski średnioziarniste ok. 2 mm średni rozmiar ziarna) część warstwy wodonośnej nasyconej gazem wypływającym ze źródła punkowego będzie przyjmowała kształt odwróconej paraboloidy. Jest to związane z anizotropią przepuszczalności takiej warstwy, co wynika z niesferycznej (najczęściej) budowy ziaren piasku. W tej serii eksperymentów dla testowanych piasków jasnego i ciemnego stwierdzono zależność wielkości promienia saturacji R od sposobu i ilości zatłaczania gazu. Generalnie można stwierdzić, iż cykliczny sposób zatłaczania zwiększa uzyskany promień saturacji, co ilościowo przedstawiono w tabeli 2 i na rysunku 6.

Badania procesu saturacji prowadzono w makromodelu 2-D który jest prostokątnym pojemnikiem, gdzie sztuczna warstwa wodonośna miała wymiary 100x90x5 cm. W oparciu o uzyskane wzory parabol ograniczającej obszar saturacji określano wartości promienia saturacji dla większych głębokości zatłaczania ditlenku węgla metodą prognozy wartości funkcji parabol. Taki prosty sposób przenoszenia wyników uzyskanych w modelu 2D na warunki 3D, jakie istnieją w warstwie wodonośnej może wydawać się obciążony dużym błędem.

Z drugiej strony w firmie Soley Sp. z o.o. prowadzono testy na modelu 3D warstwy wodonośnej. Był to pojemnik z tworzywa sztucznego w kształcie prostopadłościanu o wymiarach krawędzi równej 1 metr. Przebieg i skala procesu saturacji w tym modelu są zgodne co do rzędów wielkości z wynikami uzyskanymi w makromodelu-2D. Ostateczna weryfikacja słuszności wyników i procedur przewidywania skali procesu saturacji nastąpi w momencie wykonania pierwszych eksperymentów w rzeczywistej warstwie wodonośnej.

Wnioski końcowe

W oparciu o wynik prac laboratoryjnych można stwierdzić:

1. Fotograficzna rejestracja na ścianie frontowej makromodelu-2D, procesu wypływu gazu w warstwie wodonośnej w zadowalającym stopniu odzwierciedla procesy zachodzące w całej objętości warstwy.
2. W przypadku warstw wodonośnych zbudowanych z piasków: I i II cykliczne zatłaczanie ditlenku węgla powoduje wzrost promienia saturacji o około 30%.
3. W przeprowadzonych eksperymentach ciśnienia tłoczenia gazu do warstwy wodonośnej były wyższe o ok. 10-15% od ciśnienia hydrostatycznego.
4. W warunkach eksperymentu trzykrotne zwiększenie wydatku gazu z 0,32 l/min do 0,96 l/min nie powodowało istotnego technologicznie wzrostu promienia saturacji a inicjowało wpływ wyraźnie kanałowy.

Literatura

- [1] Bohler U., Brauns J., Hotzl H. i Nahold M. (1990): *Air injection and soil air extraction as a combined method for cleaning contaminated sites: Observations from test sites in sediments and solid rocks*. „Contaminated soils '90”, ed. Arend F., Hinsenveld M., i Van Den Brink W.J. s. 1039-44
- [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] Falkowicz S., Cicha-Szot R., Leginowicz A., Labus K., Mroczkowska-Szerszeń M.: *Sposób wytwarzania poziomej bariery izolacyjnej w warstwie zawodnionej*, Patent RP, decyzja nr 227191 z dn. 06.11.2017
- [4] Falkowicz S., Cicha-Szot R., Majkrzak M., Leginowicz A.: *Stanowisko do pomiaru rozpuszczalności gazu, zwłaszcza ditlenku węgla w agresywnych chemicznie roztworach krzemianu sodu*, Patent RP, decyzja nr 69653z dn. 09.01.2018
- [5] Falkowicz S., Cicha-Szot R., Majkrzak M., Leginowicz A.: *Sposób pomiaru rozpuszczalności gazu, zwłaszcza ditlenku węgla w agresywnych chemicznie roztworach krzemianu sodu*, Zgłoszenie nr 415087 z dn. 03.12.2015
- [6] Falkowicz S., Cicha-Szot R.: *Modyfikator żelu krzemianowego*, Patent RP, decyzja nr 221110 z dn. 29.02.2016
- [7] Falkowicz S., Cicha-Szot R., Madetko N. (2017): *Horyzontalne bariery izolacyjne – innowacyjna technologia ochrony wód podziemnych*, Główny Instytut Górnictwa, ISBN 978-83-65503-11-4
- [8] Felten D. W., Leahy, M. C., Bealer I., Kline B.A. (1992): *Case study: site remediation using air sparging and soil vapor extraction*, „Proceedings of Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater: Prevention, Detection and Restoration”, s. 395 - 411
- [9] Ji W., Dahamani A., Ahlfeld D., Lin J.D i Hill E. (1993): *Laboratory study of air sparging : air flow visualization*, „Ground Water Monitoring Review”, s. 115-126
- [10] Semer R., Adams J. A. i Reddy K. R. (1998): *An experimental investigation of air flow patterns in saturated soils during air sparging*, „Geotechnical and Geological Engineering”, s. 59-75
- [11] Todd D. K. (1980): *Groundwater Hydrology*, John Wiley & Sons, New York



Uzdrowisko Szczawno Zdrój

z arch. Uzdrowiska