

## OCENA EFEKTYWNOŚCI RENOWACJI STUDNI GŁĘBINOWEJ ZA POMOCĄ DITLENKU WĘGLA

### THE EFFICIENCY EVALUATION OF GROUNDWATER WELL REHABILITATION BY CARBON DIOXIDE

Krzysztof Polak - Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Katedra Górnictwa Odkrywkowego,  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

*Studnie głębinowe wykorzystywane są do gospodarczego pozyskiwania wód oraz dla celów odwodnieniowych. Studnie drenażowe wykorzystywane są powszechnie w górnictwie węgla brunatnego. Ich intensywna eksploatacja powoduje szybki spadek sprawności. Efektem tego jest wzrost oporów hydraulicznych oraz finalnie kosztów odwodnienia. Rozwiązaniem problemu może być bisowanie studni. Jednakże wiąże się to z znacznymi kosztami wiercenia. Alternatywą jest renowacja studni. Tradycyjne zabiegi renowacyjne nie zawsze jednak przynoszą oczekiwane skutki.*

*W pracy niniejszej przedstawiono metodę renowacji studni za pomocą ditlenku węgla. Dokonano także oceny skuteczności metody wykorzystując do tego wyniki pięciu próbnych pompowań badawczych. Badania przeprowadzono w kolejnych etapach procesu renowacji. Parametrami oceny stanu hydraulicznego studni są: wydajność jednostkowa, wydajność potencjalna, sprawność a także energochłonność pompowania. Wyniki próbnych pompowań analizowano uwzględniając charakterystyki zastosowanych głębinowych agregatów pompowych. Przedstawione wyniki wskazują, że metoda przynosi znaczącą poprawę warunków odwodnienia oraz pozwala na istotne zmniejszenie kosztów eksploatacji studni.*

**Słowa kluczowe:** odwodnianie, studnia odwadniająca, kolmatacja, renowacja, ditlenek węgla, efektywność, energochłonność, oszczędność energii

*Groundwater wells are used for public purposes and for industrial drainage. Drainage wells are common used in lignite mining. Their intensive exploitation cause a rapid deterioration and decrease of efficiency. That results in increasing of hydraulic resistance and, in consequence, the growth of drainage costs. The solution is well-mirroring. However, it involves significant costs of drilling and well development. The alternative is a well rehabilitation. Standard well-rehabilitation methods do not always bring the expected results.*

*The paper presents a method of wells rehabilitation by using of carbon dioxide. Moreover, it has been assessing the method effectiveness by using the results of five step drawdown tests. The research have been carried out in the subsequent stages of well rehabilitation. The assessment of well condition are based on the following hydraulic parameters: specific productivity, potential pumping rate, well efficiency and energy consumption. The step drawdown tests have been analyzed taking into account individual curves of submersible pump units. The results indicate that quoted above well rehabilitation method gives very significant improvement of drainage and allows for a fundamental costs reduction of the well operation.*

**Keywords:** dewatering, drainage well, clogging, rehabilitation, carbon dioxide, efficiency, energy consumption, energy savings

#### Wprowadzenie

Odwodnienie górotworu jest jednym z najważniejszych procesów pomocniczych w budownictwie i górnictwie, zapewniającym bezpieczne warunki pracy. Proces ten ma ogromny wpływ na koszty wydobywania kopaliny oraz prac budowlanych. Odwodnienie ma także negatywny wpływ na środowisko. W związku z tym wydaje się, że istnieje potrzeba poszukiwania oszczędności w celu zmniejszenia kosztów energetycznych i optymalizacji pracy systemów pompowych. Dotychczasowe badania wykazały, że systemy pompowe wykorzystują około 20 procent produkowanej na świecie energii (Yates i Weybourne

2001). Poprawa funkcjonowania systemów pompowych może przynieść znaczne korzyści ekonomiczne, ale także korzyści dla środowiska naturalnego (Hodgson i Walters 2002).

Biorąc pod uwagę odwodnienie wgłębne za pomocą studni, wykorzystanie energii związane jest z pokonywaniem geometrycznej różnicy wysokości oraz strat hydraulicznych na przepływie. Oszczędność energii można uzyskać poprzez zminimalizowanie strat hydraulicznych oraz racjonalne wykorzystanie energii wytwarzanej przez maszyny pompowe.

Straty hydrauliczne na filtrach studziennych, objawiające się tzw. zeskokiem hydraulicznym, są zjawiskiem naturalnym. Proces starzenia powoduje powstanie strat, która są zależne od

czasu. Straty zależą od parametrów hydraulicznych wodonośca, rodzaju zastosowanych materiałów konstrukcyjnych studni, jakości wykonania prac wiertniczych, skuteczności uaktywniania otworu oraz przebiegu eksploatacji (de La Loma González 2013, Houben i Treskatis 2007). Zwiększenie prędkości przepływu filtracyjnego wokół otworu studziennego powoduje przemieszczenie drobin skalnych, które następnie transportowane są przez matrycę skalną w kierunku studni. Ich osadzanie na filtrze prowadzi do zatykania szczelin, zmniejszenie porowatości i przepuszczalności konstrukcji flitujących (Blackwell i in. 1995). Inną przyczyną względnie krótkiej żywotności studni odwadniających jest kolmatacja chemiczna. Na skutek utleniania dochodzi do wytrącania się minerałów rozpuszczonych w wodzie, co także prowadzi do zatykania filtrów. Niepożądane są zwłaszcza częste postoje studni i zmiany położenia zwierciadła wody (de Zwart i in. 2006, de Zwart 2007, Hitchon 2000, van Beek 1989).

W studniach odwodnieniowych zazwyczaj dominuje kolmatacja mechaniczna oraz chemiczna. Rzadziej spotyka się kolmatację elektrochemiczną oraz biologiczną. Niezależnie z jakimi typami kolmatacji mamy do czynienia, prowadzi ona do zwiększenia kosztów związanych z pokonaniem oporów hydraulicznych, co w efekcie końcowym skutkuje nadmiernym zużyciem energii, dodatkowymi kosztami związanymi z renowacjami studni oraz remontami sprzętu pompowego. Wspomniane wyżej procesy i zjawiska występują na znacznie większą skalę w studniach odwadniających niż ujęciowych, co jest wynikiem ich intensywnej eksploatacji.

Oporo przepływu mogą być szacowane na podstawie próbnych pompowań badawczych. Opis fizyczny oraz podstawy metodyczne oceny stanu studni zostały opracowane po raz pierwszy przez Jacoba (1947), który przyrost depresji w studni opisał za pomocą równania składającego się z dwóch komponentów, tj. filtracji liniowej - zgodnej z prawem Darcy - zachodzącej w wodonoścu, a także filtracji nieliniowej - opisującej przepływ turbulentny - zachodzącej w strefie okołofiltrowej. Zjawisko zmiany depresji w studni oraz w warstwie wodonośnej, pod wpływem pompowania, a także liczne interpretacje wyników badań opisane zostały w wielu pracach (np. Helweg 1994, Kawecki 1995, Singh 2002, Singh 2008 Treskatis i in. 1998). Ponieważ w niektórych przypadkach zjawisko trudne jest do opisanego za pomocą równania Jacoba powstało wiele modyfikacji równania. Rorabaugh (1953) zaproponował wzór, gdzie wykładnik potęgowy jest różny od 2. Niektórzy (np. Atkinson przy al. 2010, Motyka i Wilk 1986) zauważają, że w wodonoścu o matrycy szczelinowej, a zwłaszcza szczeliono-wo-krasowej, zachodzą przepływy nieliniowe, co powoduje dodatkowo zwiększenie oporów przepływu.

W pracy niniejszej posłużono się wynikami próbnych pompowań do oceny skuteczności renowacji studni odwodnieniowej za pomocą CO<sub>2</sub>. Przy interpretacji wyników próbnych pompowań wykorzystano równanie Jacoba.

### Warunki hydrogeologiczne

Studnia ujmujące dwa główne poziomy wodonośne czwartorzędowy i jurajski. Poziom czwartorzędowy wykształcony jest głównie z utworów piaszczystych z przekładkami iłó i glin o miąższości. Jego całkowita miąższość wynosi 104 m. Poziom jurajski wykształcony jest z wapieni jury górnej. W trakcie wykonywania studni ustalone zwierciadło wody kształtowało się

na głębokości 36,5 m ppt – w poziomie czwartorzędowym, a w poziomie jurajskim - na głębokości 42 m ppt. Po około 9 latach eksploatacji studni statyczne zwierciadło wody stabilizowało się na głębokości ok. 102 m ppt, tj. w poziomie jurajskim. Poziom czwartorzędowy został w tym czasie całkowicie zdrenowany.

Całkowita głębokość studni wynosi 250 m. Poziom czwartorzędowy zafiltrowany został 5 odcinkami filtrowymi o długości całkowitej 23,4 m i średnicy 711 mm, natomiast poziom jurajski ujmowany jest dziewięcioma odcinkami filtrowymi o długości całkowitej 49 m i średnicy 406 mm. Odcinki filtrowe wykonane zostały z rur perforowanych z nasuwaną kolumną okładzinową, tj. filtrem zwirowym o różnej granulacji, od 1-2 mm do 3-5 mm.

W początkowym stadium eksploatacji wydajność studni wynosiła ok.  $15 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . W miarę obniżania zwierciadła wody wydajność studni zmniejszała się. W końcowej fazie uzyskiwano wydajność ok.  $3,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Ze względu na znaczną depresję oraz stosunkowo małą wydajność, w porównaniu z studniami sąsiadującymi, studnie przeznaczono do renowacji.

### Metoda renowacji

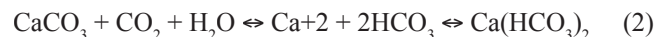
Renowację studni przeprowadzono przy wykorzystaniu metody mechanicznej, tj. szczotkowania oraz przy wykorzystaniu płynnego CO<sub>2</sub>. Ta druga metoda jest metodą chemiczno-mechaniczną (Houben i Treskatis 2004). Dla oceny skuteczności zastosowanych metod każdorazowo, w kolejnych etapach renowacji przeprowadzono próbne pompowania, mające na celu ocenę parametrów hydraulicznych studni. Wyniki próbnych pompowań przedstawione zostaną dalszej części pracy.

Szczególną uwagę zwraca metoda udrażniania studni za pomocą płynnego CO<sub>2</sub>. Jest to metoda rzadko stosowana, ze względu na dość wysokie koszty renowacji oraz opinie, że jest to metoda niebezpieczna dla człowieka oraz nieochojona dla środowiska.

Ditlenek węgla jest przy większych stężeniach gazem trującym. Stężenie dopuszczalne w specyficznych warunkach pracy nie powinno przekraczać 1,5%. Gaz ten wprowadzony do wody częściowo rozpuszcza się w wodzie, a część wstępuje z w reakcję z wodą, tworząc słaby kwas węglowy (Macioszczyk i Dobrzański, 2002):



Ditlenek węgla uczestniczy w równowadze węglanowej, warunkującej chemizm wód wodorowęglanowych:



Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> pozostaje w roztworze tylko w obecności nadmiaru wolnego CO<sub>2</sub>. Przy obniżonym odczynie pH dominuje H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Uwolnienie nadmiaru CO<sub>2</sub> powoduje wzrost odczynu pH oraz wzrost stężenia jonów HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>:



Przy dalszym wzroście odczynu pH dominują jony CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Zachodzi wtedy reakcja:



oraz:



Następuje wówczas wytrącanie węglanu wapnia.

Tak więc, stan równowagi jest utrzymywany przez wartość odczynu pH wody. Jednak nadmiar ditlenku węgla nie wpływa na głębsze zmiany odczynu, który utrzymuje się w granicach 4,5 - 5. Zatlaczane do studni  $\text{CO}_2$  prowadzi zatem do umiarkowanego zakwaszenia środowiska wodnego. Powstający słaby kwas oddziałuje na inkrustacje węglanowe oraz skały węglanowe, znajdujące się na drodze przepływu wody przez matrycę skalną. Migracja  $\text{CO}_2$  w głąb ośrodka powoduje, że stężenie  $\text{CO}_2$  w miarę oddalania się od studni maleje, a odczyn rośnie.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3$  oraz  $\text{CO}_3$  działają jako układ buforujący przed głębszymi zmianami odczynu pH w wodzie.

$\text{CO}_2$  jest gazem, który w temperaturze poniżej  $56,5^\circ\text{C}$  oraz ciśnieniem większym niż 5,18 bar występuje w stanie płynnym. Jego działanie w środowisku wód podziemnych polega na zamrażaniu wody, która przy przechodzeniu w lód zwiększa swoją objętość o ponad 9%. W wyniku tego zachodzi proces mechanicznego rozkruszania inkrustacji (Houben i Treskatis 2004).

Ditlenek węgla w stanie płynnym i gazowym oddziałuje niejako równolegle, zarówno chemicznie i mechanicznie na inkrustacje w filtrze studziennym oraz na chemicznie matrycę skalną ośrodka wodonośnego. W konsekwencji dochodzi do kruszenia inkrustacji oraz hydraulicznego szczelinowania skał węglanowych w strefie przyotworowej. Powoduje to udrożnienie studni oraz ośrodka skalnego, a w konsekwencji prowadzi do poprawy parametrów hydraulicznych (przewodności hydraulicznej). Największa skuteczność metody obserwowana jest w studniach zafiltrowanych w skałach węglanowych. Natomiast w utworach czwartorzędowych oraz neogeńskich, gdzie występują zazwyczaj inkrustacje geotytowe, powstające na skutek wietrzenia związków żelaza, ta metoda renowacji może mieć mniejszą skuteczność. Badania wskazują, że inkrustacje tlenkami żelaza są odporne na zamrażanie (Houben i Treskatis 2004).

Technologia renowacji za pomocą  $\text{CO}_2$  składa się z trzech głównych etapów (Lupiani i Cantudo 2015, Wędzonka i Losada 2016):

1. czyszczenia mechanicznego, mającego na celu usunięcie powierzchniowych złożeń z powierzchni wewnętrznej rury filtrowej i udrożnienia filtrów,

2. zatlaczania płynnego i gazowego  $\text{CO}_2$ , mającego na celu zamrożenie strefy przystudzonej oraz przepływu gazu w głąb ośrodka skalnego.
3. pompowania strefowego, mającego na celu usunięcie złożeń.

W celu oceny skuteczności metody renowacji przeprowadzono badania stanu hydraulicznego studni przed i po zabiegach renowacyjnych.

## Wyniki badań

W ramach prowadzonych prac renowacyjnych przeprowadzono 3 próbne pompowania w kolejnych fazach prac renowacyjnych. Pompowania próbne miały na celu określenie stanu hydraulicznego studni:

1. przed zabiegami renowacyjnymi,
2. po wstępnym szczotkowaniu przestrzeni wewnętrznej studni,
3. po zakończeniu renowacji za pomocą  $\text{CO}_2$

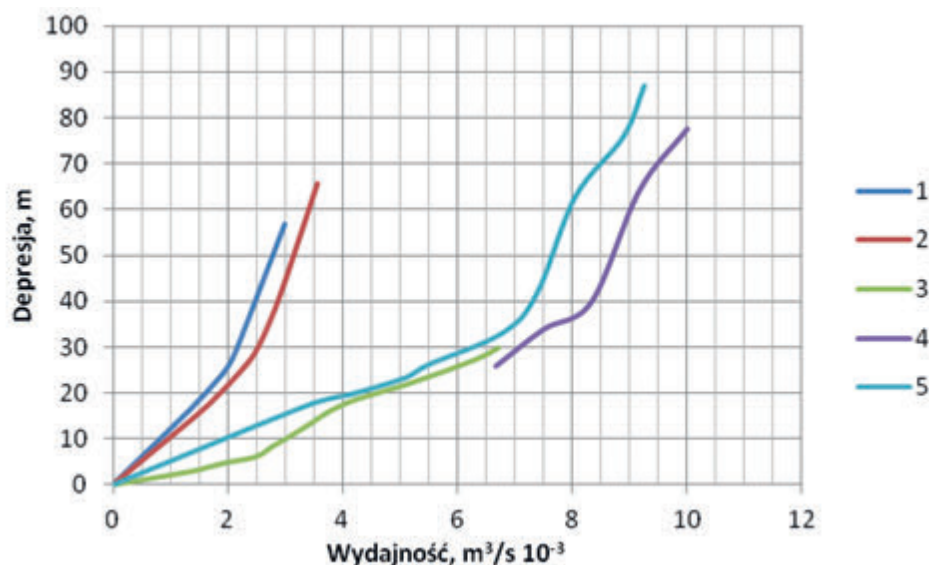
Wymienione powyżej próbne pompowania przeprowadzono za pomocą agregatu pompowego o mocy 18 kW i wysokości podnoszenia 163 m oraz wydajności  $5,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  w nominalnym punkcie pracy. W trakcie ostatniego z wyżej wymienionych pompowań stwierdzono, że uzyskano znaczną poprawę drożności studni. W związku z tym podjęto decyzję o przebudowie układu pompowo-tłocznego, tak aby możliwe było uzyskanie maksymalnych depresji.

W dalszej kolejności przeprowadzono kolejne 2 pompowania badawcze, w różnych przedziałach czasowych. Ich celem była ocena stanu hydraulicznego studni w całym polu jej pracy (Q, H) oraz ocena zmian parametrów hydraulicznych z upływem czasu. Ostatnie dwa próbne pompowania przeprowadzono za pomocą agregatu pompowego o mocy 37 kW, o wysokości podnoszenia 196 m oraz wydajności  $10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  w nominalnym punkcie pracy. Pompowania te wykonane zostały:

4. bezpośrednio po przeprowadzeniu próbnego pompowania nr 3,
5. po okresie około jednego miesiąca ciągłej pracy studni.

Każdorazowo, przed przeprowadzeniem testu, wyłączono studnię w celu ustabilizowania zwierciadła wody. Wyniki próbnego pompowania przedstawiono na rysunku 1.

Z analizy przebiegu testów wynika, że czyszczenie



Rys 1. Wyniki próbnego pompowania w kolejnych fazach renowacji studni (źródło: opracowanie własne)

Fig 1. The results of step drawdown tests in the subsequent stage of well rehabilitation (source: own study)

mechaniczne (szczotkowanie) studni przyniosło nieznaczną poprawę w zakresie osiągniętych depresji oraz wydajności. Po przeprowadzeniu renowacji za pomocą CO<sub>2</sub> uzyskano znaczną poprawę warunków pracy studni. W trzecim pompowaniu badaniu uzyskano ponad dwukrotne zwiększenie wydajności przypadającej na 1 m depresji.

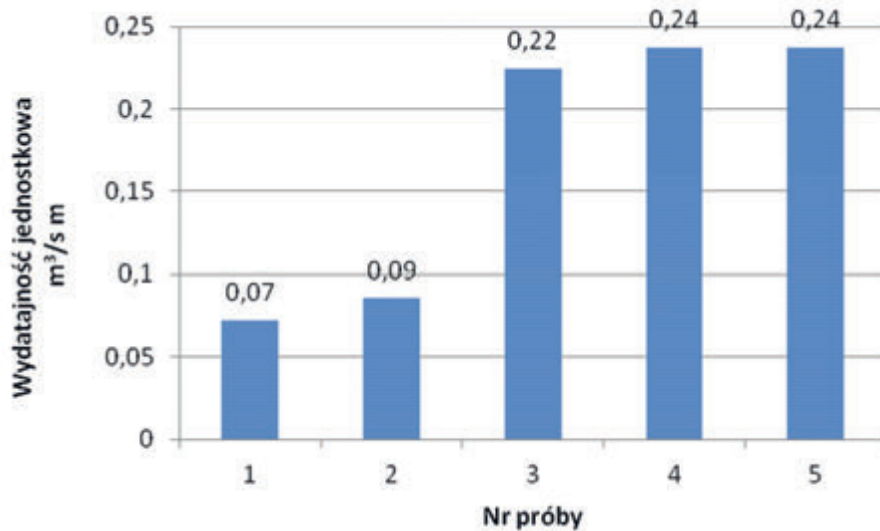
Porównanie wydatków jednostkowych dla prób przeprowadzonych dla obu zastosowanych agregatów pompowych przedstawiono na rysunku 2. W celu porównywalności wyników wartość wydajności jednostkowej obliczono dla depresji w studni równej 30 m.

Z wykresu wynika, że na skutek renowacji studni za po-

ze studni. Zmniejszona wydajność potencjalna studni w ostatnim próbnym pompowaniu może wynikać z pogorszenia stanu hydraulicznego studni, jak też z nieznacznego zużycia agregatu pompowego, po około 800 h ciągłej pracy.

### Sprawność studni

Mierzalnymi parametrami pozwalającymi na obiektywną ocenę stanu studni pod względem hydraulicznym jest wartość współczynników oporu hydraulicznego. Przebieg charakterystyki  $S=f(Q)$  opisuje równanie sformułowane przez Jacoba (1947), tj.:



Rys. 2. Wydajność jednostkowa studni w kolejnych próbnym pompowaniach badawczych studni (źródło: opracowanie własne)  
Fig. 2. The specific discharge of the well in the subsequent step drawdown tests (source: own study)

mocą CO<sub>2</sub> uzyskano znaczącą poprawę w zakresie wydajności jednostkowej studni.

Biorąc pod uwagę maksymalne wydajności uzyskane w poszczególnych próbach obliczono potencjalną wydajność dobową. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 3. Kolorami odróżniono wyniki dla różnych agregatów pompowych.

Z wykresu wynika, że renowacja studni za pomocą CO<sub>2</sub> pozwoliła na znaczące zwiększenie ilości pompowanej wody

$$S = BQ + CQ_2 \quad (6)$$

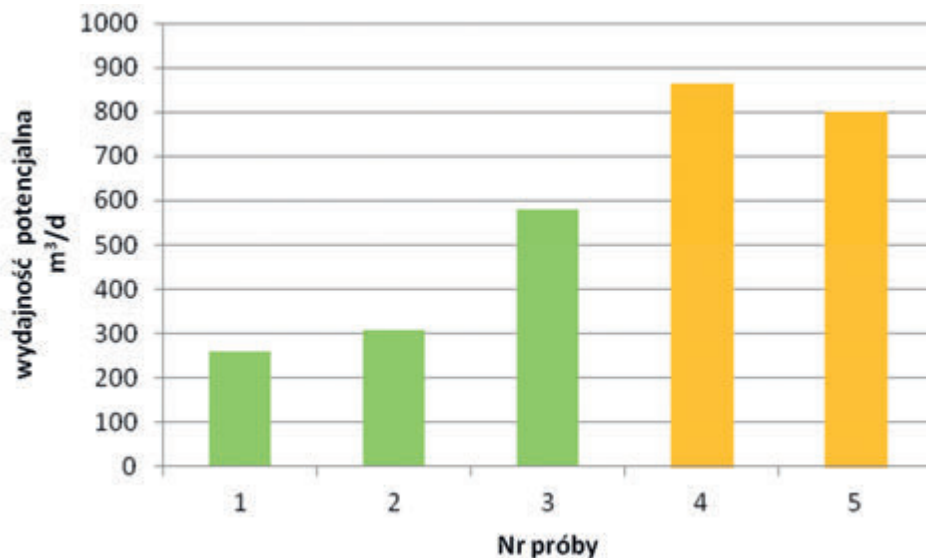
gdzie:

$S$  - depresja mierzona studni [L],

$Q$  - wydajność [L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>],

$B$  - współczynnik oporu hydraulicznego przy przepływie laminarnym przez ośrodek wodonośny [TL<sup>-2</sup>],

$C$  - współczynnik oporu hydraulicznego przy przepływie turbulentnym przez strefę otworową [T<sup>2</sup>L<sup>-5</sup>]



Rys. 3. Wydajność potencjalna w kolejnych pompowaniach próbnym (źródło: opracowanie własne)  
Fig. 3. The potential pumping rate in the subsequent step drawdown tests (source: own study)

W tabeli 1 przedstawiono wyniki obliczeń współczynników oporności hydraulicznej studni, a także ośrodka wodonośnego.

Tab. 1. Parametry hydrauliczne studni oraz ośrodka wodonośnego w kolejnych próbnym pompowaniach badawczych (źródło: opracowanie własne)  
Tab. 1. The well and aquifer hydraulic parameters in the subsequent step drawdown tests (source: own study)

Nr próby	B s/m <sup>2</sup>	C s <sup>2</sup> /m <sup>5</sup>	Współczynnik determinacji R <sup>2</sup>
1.	12 559	108 493	99,9
2.	10 765	118 005	99,8
3.	4 150	9 236	97,7
4.	4 150	9 236	97,7
5.	4 797	13 400	98,3

Obliczone parametry równania funkcji regresji w zadowalający sposób opisują dane pomiarowe uzyskane w trakcie kolejnych próbnym pompowań. Współczynnik determinacji funkcji (kwadrat współczynnika korelacji) jest we wszystkich przypadkach większy od 0,95. Wyniki wskazują, że renowacja studni z zastosowaniem CO<sub>2</sub> przyczyniła się do udroźnienia nie tylko studni, ale także ośrodka wodonośnego w obrębie oddziaływania medium. Wartość parametru B, na skutek przeprowadzonej renowacji, zmniejszyła się o ponad połowę, natomiast wartość parametru C zmniejszona została o jeden rząd wielkości. Warto też zauważyć, że wartości parametrów uległy nieznacznemu pogorszeniu w ostatnim pompowaniu badawczym, co wskazuje na proces ponownego, powolnego pogarszania się stanu hydraulicznego studni. Wartości parametru B świadczą o dość trudnych warunkach odwodnienia (Polak i in. 2015).

Obiektywną miarą oceny stanu studni jest sprawność, wyrażona w procentach. Sprawność studni jest ilorazem depresji wywołanej w ośrodku wodonośnym i depresji zmierzonej w studni. Można opisać to równaniem (Bierschenk, 1983):

$$\eta = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \quad (7)$$

Wyniki obliczeń sprawności studni w kolejnych seriach pomiarowych przedstawiono na rysunku 4.

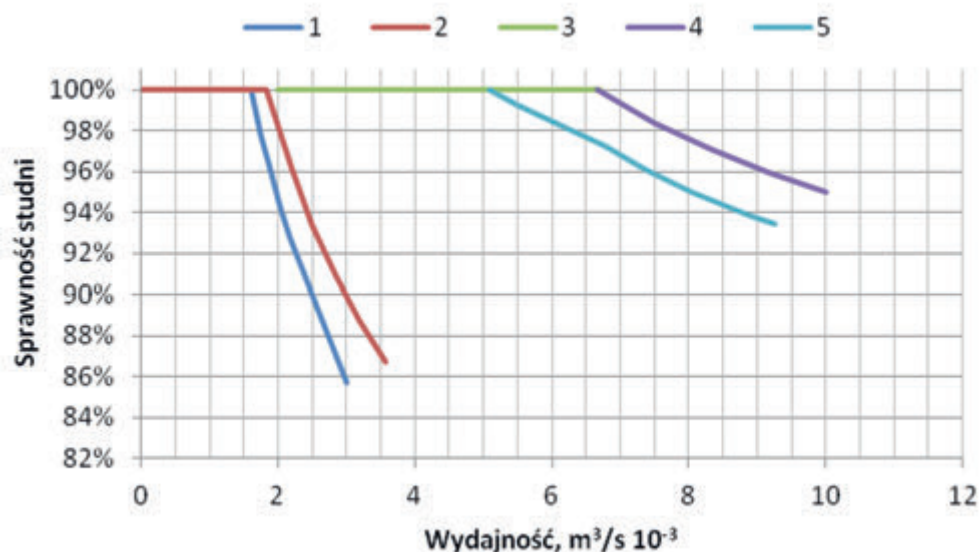
Z rysunku 4 wynika, że studnia odwadniająca po przeprowadzeniu renowacji posiada bardzo wysoką sprawność przy trzykrotnie większej wydajności. W pompowaniu 3. uzyskano

płaską charakterystykę sprawności studni, co oznacza, że przepływ wody przez filtry odbywał się w ruchu laminarnym. Studnia pracowała zatem tak jak studnia ujęciowa, a prędkości przepływu były dalekie od prędkości zbliżonych do krytycznych. Dlatego podjęto decyzję o wymianie agregatu pompowego na większy, pozwoliła na intensyfikację odwodnienia. W kolejnym próbnym pompowaniu uzupełniono charakterystykę studni prowadząc test od wydajności  $6,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Natomiast ostatnie próbne pompowanie, przeprowadzone przy wykorzystaniu tego samego agregatu pompowego, przeprowadzono w całym zakresie wydajności. Załamanie krzywej sprawności studni jest typowe i charakteryzuje przepływ turbulentny w strefie przyotworowej. W próbnym pompowaniu przeprowadzonych po renowacji studni, nachylenie krzywej jest łagodniejsze. Wskazuje to na mniejsze opory ruchu w strefie filtrowej.

### Energochłonność pompowania

Energochłonność pompowania zależy od wysokości geometrycznej wysokości podnoszenia, wydajności oraz ciężaru objętościowego cieczy. Zapotrzebowanie na moc dostarczoną do agregatu pompowego uzależnione jest zatem od mocy użytecznej oraz sprawności agregatu pompowego. Ogólnie zapisać można:

$$P = \frac{Q (H + S + \Delta h) \gamma}{\eta} \quad (8)$$



Rys. 4. Sprawność studni w kolejnych próbnym pompowaniach badawczych (źródło: opracowanie własne)  
Fig. 4. The well efficiency in the subsequent step drawdown tests (source: own study)

gdzie:

$Q$  – wydajność,  $m^3/s$

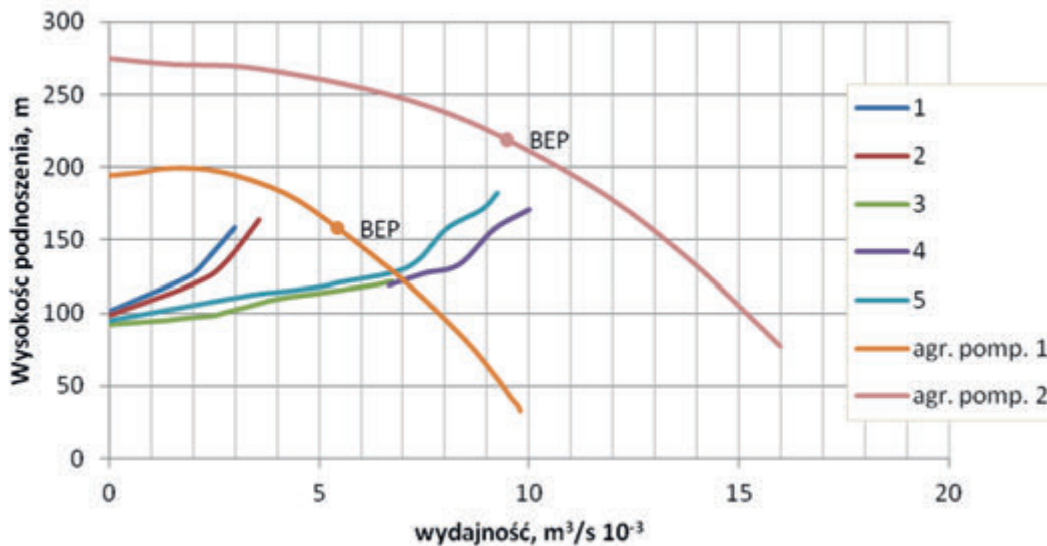
$H$  – początkowa wysokość podnoszenia (przy statycznym zwierciadle wody), m

$S$  - depresja w studni podczas pompowania (przy dynamicznym zwierciadle wody), m

$\Delta h$  – wysokość strat hydraulicznych w instalacji tłocznej, m

$\gamma$  - ciężar właściwy cieczy,  $N/m^3$

Rzeczywiste wykorzystanie mocy agregatu pompowego uzależnione jest od poboru mocy przez silnik pompy przy zadanej wydajności pompowania oraz wysokości ciśnienia. Na rysunku 5 przedstawiono geometryczną wysokość podnoszenia, będącą sumą początkowej wysokości podnoszenia oraz depresji na kolejnym stopniu próbnego pompowania ( $H+S$ ). W przypadku pomp krzywe odwzorowują charakterystyki zastosowanych agregatów pompowych. Różnica wysokości pomiędzy charakterystyką studni oraz agregatu pompowego równa jest stratom hydraulicznym w instalacji tłocznej. Na różnicę tę może mieć wpływ odchylenie aktualnej charakterystyki agregatu pompowego względem charakterystyki nominalnej, a także dodatkowy zeskok hydrauliczny w studni wywołany ewentualnym przewymiarowaniem agregatu pompowego (Polak i in. 2015).



Rys. 5. Geometryczne wysokości podnoszenia oraz charakterystyki głębinowych agregatów pompowych (źródło: opracowanie własne)  
Fig 5. The geometric pumping head and submersible pump unit curves (source: own study)

Z wykresu powyższego wynika, że charakterystyki pracy studni przed zabiegiem renowacyjnym położone są na lewo od optymalnego punktu pracy *BEP* (ang. Best Efficiency Point) agregatu pompowego 1. Po przeprowadzeniu renowacji studni za pomocą  $CO_2$ , warunki współpracy ulegają znaczącej poprawie. Praca pompy w pompowaniu 3. odbywa się już po prawej stronie charakterystyki i jest ograniczona charakterystyką agregatu pompowego. Wymiana agregatu na większy pozwala na pracę agregatu w polu pracy zbliżonym do *BEP*.

Rzeczywisty pobór mocy uzależniony jest wydajności pompy oraz jej wysokości podnoszenia. Na rysunku 6 zamieszczono rzeczywisty pobór mocy przypadający na wydajność pompy, w zależności od geometrycznej wysokości podnoszenia.

Z wykresu (rys. 5) wynika, że przeprowadzony zabieg renowacji studni pozwolił na znaczące zmniejszenie energochłonności pompowania. Dla całkowitej wysokości podnoszenia

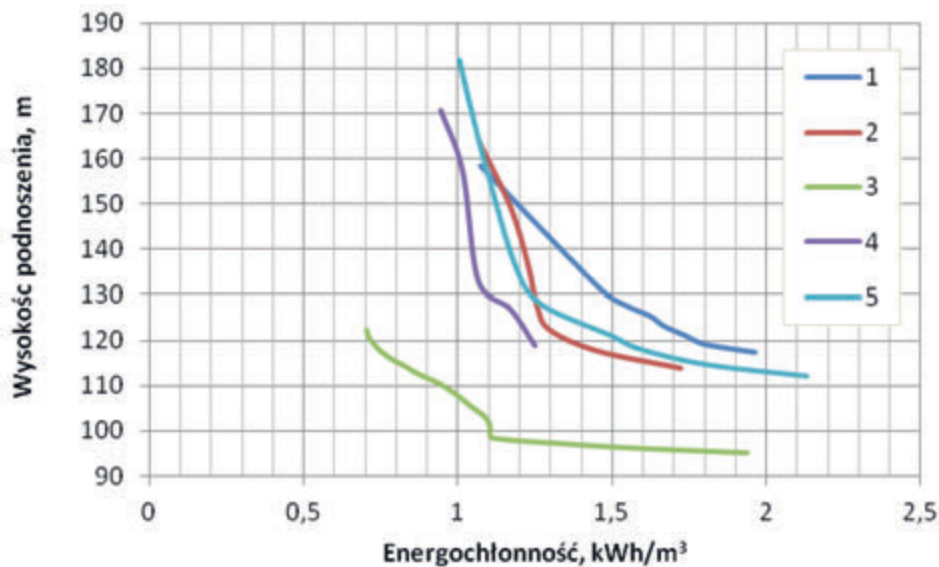
równej 120 m (depresji  $S=30$  m) początkowa energochłonność wynosiła ok.  $1,75 \text{ kWh/m}^3$ . Po wykonaniu renowacji energochłonność pompowania zmniejszyła się do  $0,7 \text{ kWh/m}^3$ . Pomimo wymiany agregatu pompowego, na dysponujący dwukrotnie większą mocą, możliwe było zmniejszenie energochłonności pompowania z  $1,1 \text{ kWh/m}^3$  do  $1 \text{ kWh/m}^3$  (tj. ok. 10%) przy jednoczesnym zwiększeniu geometrycznej wysokości podnoszenia: z 160 m do 180 m (przyrost depresji maksymalnej o 20 m). Można zatem stwierdzić, że ostatecznym efektem przeprowadzonej renowacji było zmniejszenie energochłonności pompowania o połowę, przy jednoczesnej poprawie warunków odwodnienia górotworu.

## Podsumowanie i wnioski końcowe

Przedmiotem badań przedstawionych w niniejszej pracy była ocena skuteczności renowacji studni odwadniającej za pomocą  $CO_2$ . Analiza procesu oddziaływania ditlenku węgla zatłoczonego do otworu studziennego wskazuje, że metoda renowacji może mieć dużą skuteczność w przypadku kolmatacji studni drenujących węglanowy ośrodek wodonośny. Ponieważ płynny  $CO_2$  oddziałuje nie tylko chemicznie, ale także mechanicznie na studnię, nie jest wykluczone, że metoda może wykazywać pewną skutecznością w ośrodku o strukturze porowej.

Do oceny parametrów hydraulicznych studni oraz ośrodka wodonośnego wykonano 5 serii pomiarowych. Pompowania próbne prowadzone przed i po renowacji studni zrealizowane były za pomocą dwóch różnych typoszeregów agregatów pompowych.

Uzyskane wyniki upoważniają do stwierdzenia, że zastosowana metoda renowacji przyczyniła się do znaczącej poprawy parametrów hydraulicznych studni, a także warunków drenażu ośrodka wodonośnego. Renowacja za pomocą zatłaczanego do studni  $CO_2$  spowodowała zmniejszenie współczynnika oporów hydraulicznych studni o ponad 90%, a także zmniejszenie oporów hydraulicznych ośrodka wodonośnego w otoczeniu studni o około 65%. Przełożyło się to na istotne zwiększenie sprawności studni, jej wydajności oraz osiąganych depresji. Pozwoliło to jednocześnie na zredukowanie energochłonności procesu pompowania wody o ponad połowę.



Rys. 6. Energochłonność pompowania w kolejnych próbach pompowych (źródło: opracowanie własne)  
Rys. 6. The energy consumption in subsequent pumping tests (source: own study)

Metoda posiada pewne wady, do których należy m. in. stosowanie specjalnych środków bezpieczeństwa, konieczności stosowania wyspecjalizowanego sprzętu, a także wykonania dodatkowych prac zabezpieczających, mających na celu przystosowanie studni do zabiegu renowacji. Ma to wpływ na znaczne koszty ogólne zabiegu renowacji studni.

Wyniki badań wskazują, że metoda jest znacznie bardziej skuteczna od tradycyjnych metod udrażniania (np. szczotkowania) studni. Zależnie od sumy kosztów, może ona stanowić alternatywę dla kosztownego bisowania otworów studziennych. Można przypuszczać, że wraz ze wzrostem ilości otworów przeznaczonych do renowacji, jednostkowe koszty procesu technologicznego maleją. Może to stanowić argument dla wykorzystania metody dla wytypowanej grupy studzien.

Przeprowadzone serie badawcze wskazują, że pomimo znacznej poprawy sprawności studni, metoda nie zapobiega

przed powolną kolmatacją otworu studziennego. Proces kolmatacji jest normalnym zjawiskiem zachodzącym w studniach w sposób naturalny. Jego postęp jest uzależniony od intensywności eksploatacji otworu, warunków hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych.

Praca niniejsza wykonana została w ramach działalności Laboratorium Geohydrauliki, Centrum Energetyki, Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

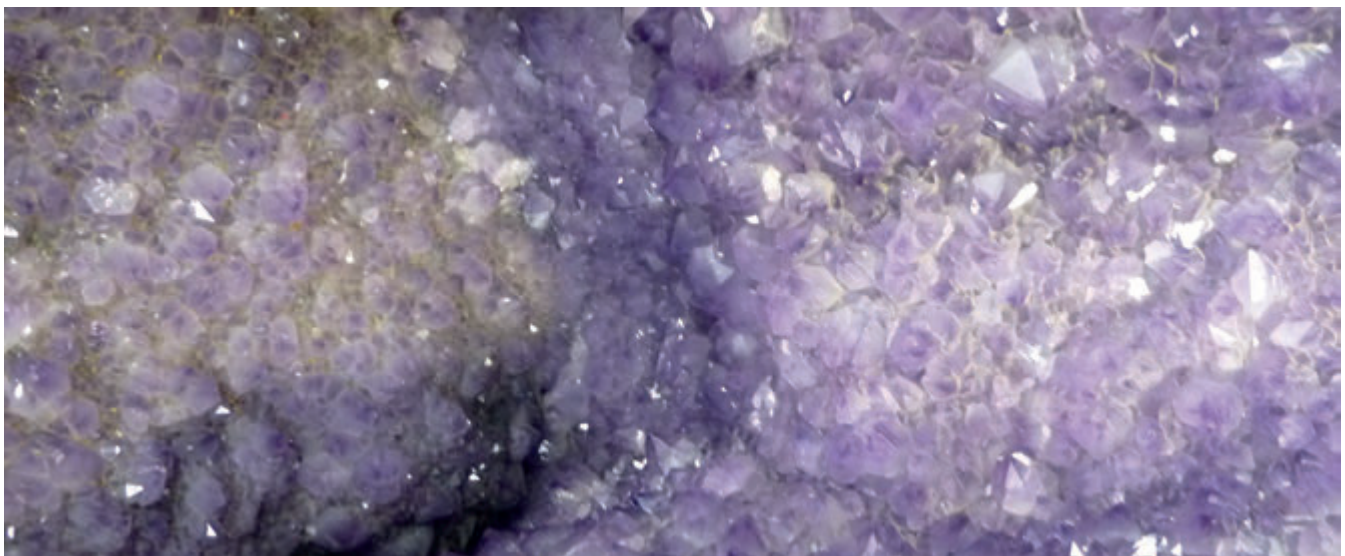
#### Podziękowania

Autor pracy składa podziękowania PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna, Oddział KWB Bełchatów S.A. za udostępnienie wyników próbnych pompowań.

#### Literatura

- [1] Atkinson, L.C., Camping, P.G., Wright, J.C., Liu, H., (2010): *The Challenges of Dewatering at the Victor Diamond Mine in Northern Ontario, Canada*. Mine Water Environ, 29(2): 99-101
- [2] Bierschenk, W.H., (1963): *Determining well efficiency by multiple step-drawdown tests*. International Association of Scientific Hydrology, 493-507
- [3] Blackwell, I.M., Howsam, P., Walker, M. J., (1995): *Borehole performance in alluvial aquifers: particulate damage*, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 28, S151-S162
- [4] Cantudo Muñoz A., Lupiani Moreno E. (2014): *Cleaning and Development of Mining Drainage Wells with Liquid CO<sub>2</sub>*, VIII Międzynarodowy Kongres Górnictwa Węgla Brunatnego, Bełchatów, p. 243–251
- [5] De La Loma Gonzalez, B., (2013): *Clogging of Deep Well Infiltration Recharge Systems in the Netherlands*. In: Martin R (ed.) *Clogging issues associated with managed aquifer recharge methods*. IAH Commission on Managing Aquifer Recharge, Australia, 163-173
- [6] De Zwart, A.H.(BR), (2007): *Investigation of clogging processes in unconsolidated aquifers near water supply wells, dissertation at the Hydrology and Ecology Section and the Petroleum Engineering Section in the Department of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology*
- [7] De Zwart, A.H.,(BR), van Beek K., Houben G., Treskatis, C., (2006): *Mechanische Partikelfiltration als Ursache der Brunnenalterung*, bbr 9/2006 32-37
- [8] Hitchon, B., (2000): *"Rust" contamination of formation waters producing wells*. Applied Geochemistry 15(10), 1527-1533

- [9] Hodgson, J., Walters T (2002): *Optimizing Pump Systems to Minimize First or Life-Cycle Cost*, Proceedings of the 19th International Pump Users Symposium, 1-8
- [10] Houben, G., Treskatis, C., (2004): *Regeneracja Studni*, Wyd. Projprzem-EKO, Bydgoszcz, p. 270. ISBN 83-906015-6-7
- [11] Houben, G., Treskatis, C., (2007): *Water Well Rehabilitation and Reconstruction*, McGraw Hill, New York, p. 391
- [12] Kawecki, W., (1995): *Meaningful Interpretation of Step-Drawdown Test*, Groundwater, 33(1), 23–32
- [13] Macioszczyk A., Dobrzański D.: (2002) *Hydrogeochemia Strefy Aktywnej Wymiany Wód Podziemnych*, Wyd. Nauk. PWN, ISBN 83-01-13879-3
- [14] Motyka, J., Wilk, Z., (1986): *Calculated Radius of Nonlinear Zone Around Fissured-Karstified Rocks Tapping Well*, Archives of Mining Sciences, 31(2): 90-94 (in Polish)
- [15] Polak K., Kaznowska-Opala K., Pawlecka K., Rózkowski K., Klich J. (2015) *The assessment of susceptibility on drainage in an aquifer on the basis of pumping tests in a lignite mine*, Archives of Mining Sciences, ISSN 0860-7001. — 2015, vol. 60, no. 1, p. 107–121
- [16] Rorabaugh, M.I., (1953): *Graphical and theoretical analysis of step drawdown test of artesian well*. ASCE Proc., Hydraulic Division, ASCE, Washington DC, 9, 1–14
- [17] Singh, S., (2002): *Well Loss Estimation: Variable Pumping Replacing Step Drawdown Test*, Journal of Hydraulic Engineering, 128(3), 343–348
- [18] Singh, S., (2008): *Identifying Head Loss from Early Drawdowns*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 134(1), 107–110
- [19] Treskatis, C., Volgnandt P, Wessollek H, Puronpää-Schäfer P, Gerbl-Rieger S & Blank K-H (1998): *Anforderungsprofile an den wirtschaftlichen Bau und Betrieb von Bohrbrunnen*. Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 3/98, 117-128
- [20] Van Beek, C.G.E.M., (1989): *Rehabilitation of clogged discharge wells in the Netherlands*, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, London, 22, 75-80
- [21] Wędzonka A., Losada Sanz V. (2016) *Wykorzystanie ciekłego CO<sub>2</sub> do zwiększenia skuteczności rekonstrukcji studni odwodnienia węgelnego*, IX Międzynarodowy Kongres Górnictwa Węgla Brunatnego, Bełchatów, p. 567-576
- [22] Yates, A.M., Weybourne, I., (2001): *Improving the energy efficiency of pumping systems*, Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA 50, 101-111



Fot. Renata S-K

Z cyklu: „Pustka na granicy nicości”