

OCENA SPRAWNOŚCI HYDRAULICZNEJ STUDNI GŁĘBINOWYCH – STUDIUM PRZYPADKU

THE EVALUATION OF WELLS HYDRAULIC EFFICIENCY – CASE STUDY

Krzysztof Polak, Karolina Kaznowska-Opala - AGH kademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Centrum Energetyki AGH

Sprawność hydrauliczna studni głębinowej wyraża się stosunkiem depresji rzeczywistej w warstwie wodonośnej do depresji mierzonej w studni. Jej wartość zależy od przepuszczalności strefy przyotworowej. Na zmniejszenie sprawności studni wierczonej wpływają naturalne procesy starzeniowe. Ich rozwój może być intensyfikowany poprzez zjawiska fizyczne i fizykochemiczne pobudzane w trakcie intensywnej eksploatacji zasobów wód podziemnych.

W artykule zagadnienie omówiono na przykładzie dwóch studni, zasadniczej i rezerwowej, pracujących dla potrzeb ujęcia wód. W studni zasadniczej określono charakterystykę sprawności hydraulicznej po jej uruchomieniu, po 10 latach intensywnej eksploatacji, a także po przeprowadzeniu jej renowacji. Dla porównania przedstawiono także wyniki próbnego pompowania dla studni rezerwowej.

Wyniki przedstawionych w artykule analiz wskazują, że przyczyną radykalnego zmniejszenia sprawności hydraulicznej studni była eksploatacja zasobów ze zbyt dużą wydajnością. Ponadto dwa niezależne próbne pompowania prowadzone przy zastosowaniu odmiennej metodyki badawczej dostarczyły bardzo zbliżonych wyników. Może to oznaczać, że długotrwałe testy mogą być zastąpione znacznie krótszymi, dającymi bardzo zbliżone wyniki, które mogą być wykorzystane do doboru parametrów pracy głębinowego ujęcia wody.

Słowa kluczowe: *próbnego pompowanie, starzenie studni, renowacja studni, agregat pompowy, energochłonność*

The hydraulic efficiency of a water well is expressed by the ratio of apparent drawdown, measured in a well, to real drawdown in the aquifer. Its value depends on the permeability of the perimeter zone. The natural aging processes affect the drilled well's efficiency. Their development can be intensified by physical and physico-chemical phenomena stimulated during intensive exploitation of groundwater resources.

In this work, the issue is discussed on the example of two wells, the main and reserve wells, working for the needs of water intake. In the basic well, the characteristics of the hydraulic efficiency were determined after drilling, after 10 years of intensive exploitation, also after its renovation. For comparison, the results of a step drawdown pumping test for a secondary well were also presented.

The results of the analyzes presented in the paper indicate that the reason for the radical decrease in the hydraulic efficiency of the well was the exploitation of resources with too high efficiency. In addition, two independent trial pumping carried out using a different research methodology provided very similar results. This may mean that long-term tests can be replaced with much shorter, giving very similar results, which can be used to select the parameters of the work of the water intake.

Keywords: *pumping test, well aging, rehabilitation, pump unit, energy consumption*

Wprowadzenie

Studnie głębinowe są elementami systemu pozyskującego wodę zarówno dla celów przemysłowych, jak i gospodarczych. W wielu przypadkach stanowią zasadniczy system drenażu w zakładach górniczych. System składa się z infrastruktury podziemnej, sprzętu pompowego oraz instalacji przesyłowej posiadających określone parametry hydrauliczne. Współpracuje on z ośrodkiem wodonośnym posiadającym określone

parametry geohydrauliczne. Podstawowym dążeniem użytkownika ujęć wód podziemnych jest zapewnienie jak najwyższej sprawności hydraulicznej oraz jak najdłuższej żywotności obiektu należącego do ujęcia, przy jak najniższych kosztach eksploatacyjnych.

Sprawność hydrauliczna studni jest określana jako iloraz depresji obliczeniowej s , wynikającej z założenia o laminarnym dopływie wody do studni, określanego według schematu Dupuita i rzeczywistego obniżenia zwierciadła wody w studni s_0 (1) [1]:

$$\eta = \frac{s}{s_0} = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \quad (1)$$

gdzie:

B - współczynnik oporu wodonośca przy przepływie laminarnym [TL^{-2}],

C - współczynnik oporu studni przy przepływie turbulentnym [T^2L^{-5}],

Q - wydajność przepływu [L^3T^{-1}]

Praca pompy wymusza określoną prędkość przepływu wody przez filtr studzienny, co prowadzi do generowania strat hydraulicznych. Przejawiają się one w postaci różnicy wysokości zwierciadła wody w studni i na zewnętrznej powierzchni filtru. Wielkość ta nazywana jest zeskokiem hydraulicznym. Wpływ na wielkość zeskoku hydraulicznego może mieć sama konstrukcja filtru, naturalne procesy starzenia się studni, czy zmiany przepuszczalności utworów wodonośnych w strefie przyotworowej. Nadmierny zeskok może zostać wywołany przez niedopasowanie parametrów pracy układu pompowego do wodoprzepuszczalności ośrodka wodonośnego czy parametrów hydraulicznych filtru. Wzrost zeskoku przekłada się na obniżenie sprawności hydraulicznej studni.

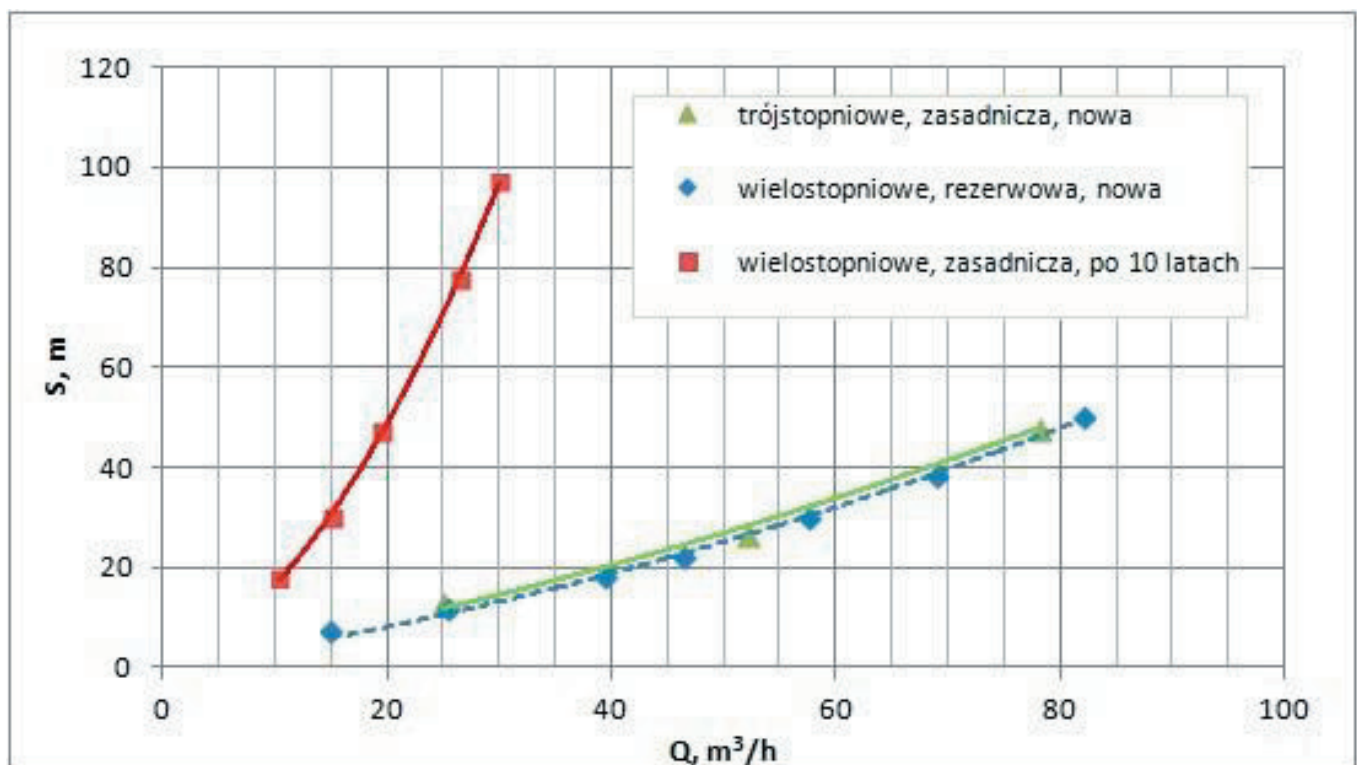
Istotnym parametrem dla eksploatatora jest także stan techniczny konstrukcji studni wierconej, który wpływa na osiągnięte parametry pracy ujęcia, a także na gospodarkę całego systemu wodociągowego [7].

Większość ujęć wód podziemnych cechuje spadek wydajności jednostkowej w czasie trwania eksploatacji studni. Jest to związane z postępującymi procesami starzeniowymi. Są one zjawiskami naturalnymi występującymi w otworach hydrogeologicznych niezależnie od ich przeznaczenia. Starzenie studni jest następstwem procesów fizycznych, chemicznych oraz biochemicznych zachodzących w otworze hydrogeologicznym. Procesy te prowadzą do kolmatacji części czynnych filtru i skutkują

ograniczeniem przepustowości filtru, a także strefy przyotworowej. Z dotychczasowego stanu wiedzy wynika, że w strefie filtru studziennego może występować kolmatacja [3, 4, 5, 6, 8]: chemiczna (wywołana powstawaniem związków chemicznych np. węglanów wapnia, tlenków żelaza), biochemiczna (zachodzi przy współdziałaniu bakterii powodujących przemianę produktów reakcji chemicznych), elektrochemiczna (zachodzi w związku z powstawaniem różnicy potencjału elektrostatycznego w trakcie przepływu wody na powierzchni filtru), mechaniczna (zachodzi na skutek działania siły unoszenia związanej z przepływem filtracyjnym cieczy przez ośrodki porowe i szczelinowe).

W zależności od rodzaju kolmatacji wpływa ona na różne elementy konstrukcyjne studni, np. kolmatacja chemiczna najczęściej dotyczy filtru studziennego, a dokładnie jego części czynnych. Natomiast kolmatacja mechaniczna wpływa na strefę przyotworową powodując niedrożność otworu studziennego [2]. W przypadku intensywnie eksploatowanych studni górniczych najczęściej zachodzi kolmatacja chemiczna, wywołana procesami wietrzeniowymi, a także kolmatacja mechaniczna.

Wśród procesów sprzyjających starzeniu się studni wymienić należy również korozję i tzw. piaszczenie. Proces korozji prowadzi do wzrostu oporów hydraulicznych na drodze przepływu wody, a w konsekwencji do obniżenia wydajności jednostkowej [5]. Niedoskonałości konstrukcyjne lub zbyt intensywna eksploatacja studni mogą natomiast skutkować uszkodzeniem filtru i prowadzić do tzw. piaszczenia. Dostawanie się części stałych do studni skutkuje przyspieszonym zużyciem elementów pompy oraz osiadaniem warstw skalnych i nierównomiernym obciążeniem kolumny technicznej. Praca studni przy obniżonej sprawności skutkuje przyspieszoną kolmatacją filtru studziennego. Na skutek tego następuje wzrost zeskoku hydraulicznego, a co za tym idzie strat hydraulicznych i w konsekwencji obniżenia sprawności hydraulicznej studni.



Rys. 1. Wyniki pompowań próbnych
Fig. 1. Step drawdown tests results

Studium przypadku

Celem przedstawionych niżej wyników badań było przeprowadzenie oceny sprawności dwóch studni pracujących na potrzeby ujęcia wody. Użytkownikiem studni jest producent butelkowanych wód mineralnych oraz napojów owocowych.

Ujęcie złożone jest ze studni zasadniczej oraz rezerwowej. Obiekty położone są w bliskiej odległości obok siebie i posiadają niemal jednakowy profil litologiczny. Obie studnie wykonano z zastosowaniem rur okładzinowych stalowych, natomiast filtr szczelinowy wykonany został z rury PVC. Średnica filtra w studni zasadniczej wynosi DN250 mm, natomiast w studni rezerwowej DN225 mm. Odcinek filtrowy o całkowitej długości 60 m ujmuje kredowy poziom wodonośny, wykształcony z wapieni marglistych oraz piaskowca.

W trakcie 10-letniej eksploatacji studni zasadniczej stwierdzono zmniejszanie się wydajności jednostkowej studni, skutkujące wzrostem energochłonności, a co za tym idzie wzrostem kosztów eksploatacji ujęcia. W studni zasadniczej przeprowadzono inspekcję TV studni, która wykazała zaawansowaną kolmatację części czynnej prawdopodobnie węglanami wapnia w części górnej filtra oraz frakcjami ilastymi w części dolnej filtra. Studnia poddana została zabiegowi renowacji, polegającej na szczotkowaniu wewnętrznej części kolumny filtracyjnej oraz usuwaniu złożeń za pomocą airliftu. Po zakończeniu tych zabiegów przeprowadzono próbne pompowania badawcze, mające na celu określenie bieżącej sprawności hydraulicznej studni zasadniczej oraz rezerwowej, a także porównanie wyników badań z pierwotnymi wynikami pompowania próbnego wykonanego po wywierceniu studni zasadniczej.

Wspomniane wyżej próbne pompowania badawcze wykonano jako wielostopniowe ze stabilizacją zwierciadła wody na każdym stopniu pompowania. Pomiar zwierciadła wody odbywał się za pomocą elektrycznej świstawki hydrogeologicznej,

natomiast wydajność przepływu mierzono przy wykorzystaniu przenośnego przepływomierza elektromagnetycznego. Przyjęta metodyka badawcza pozwoliła na skrócenie cyklu pomiarowego do 5-ciu godzin.

W przypadku pierwszego pompowania badawczego wykonanego po wywierceniu studni zasadniczej, próbne pompowanie realizowano klasycznie, jako 3-stopniowe z czasem realizacji wynoszącym 72 godziny.

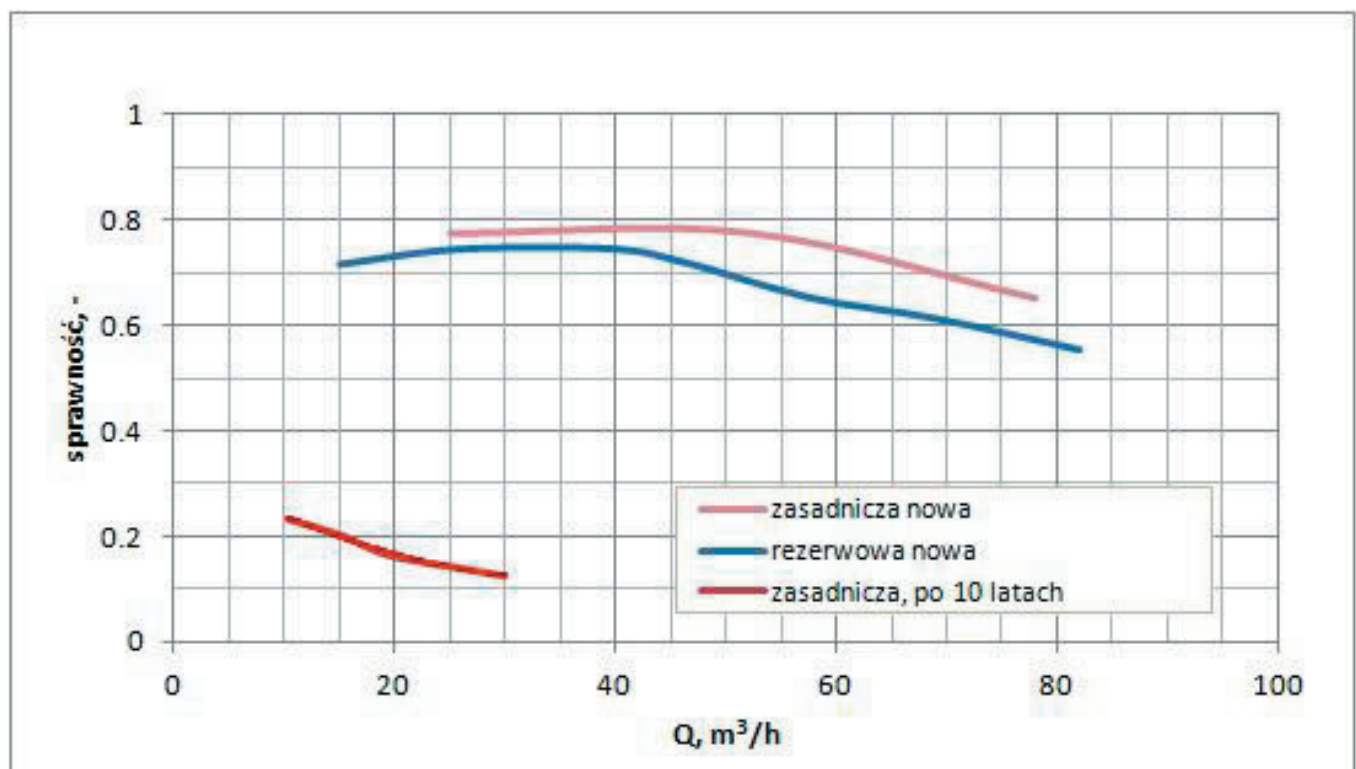
Wyniki próbnych pompowań przedstawiono dla porównania na rysunku 1.

Z analizy przedstawionej na rysunku 1 wynika, że pompowanie 3-stopniowe przeprowadzone dla studni zasadniczej oraz wielostopniowe dla studni rezerwowej dały zbliżone wyniki. Potwierdzają one podobieństwo obu studni na etapie ich wykonawstwa. Natomiast pompowanie próbne przeprowadzone po renowacji studni zasadniczej wskazuje na 30-krotny przyrost współczynnika oporu hydraulicznego „C”.

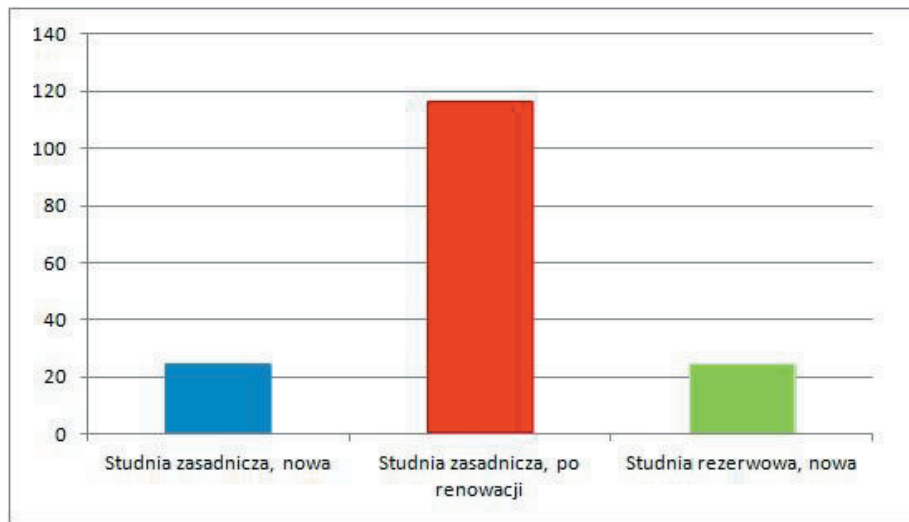
Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki wyznaczono charakterystyki sprawności hydraulicznej obu studzien. Wyniki obliczeń przedstawiono graficznie na rysunku 2.

Z analizy uzyskanych charakterystyk wynika, że studnia zasadnicza posiadała maksymalną sprawność dla wydajności nie przekraczającej 50 m³/h, natomiast studnia rezerwowa dla wydajności 40 m³/h. Znaczące obniżenie charakterystyki sprawności hydraulicznej studni zasadniczej świadczyć może o przekroczeniu optymalnych warunków pracy. Potwierdza to charakterystyka przepływu zainstalowanego agregatu pompowego typu 86BHEL77-9. Przy braku regulacji dławieniowej wydajność eksploatacyjna studni wynosić mogła nawet ok. 78 m³/h, przy sprawności studni równej 0,66, tj. o 12% mniej od wartości maksymalnej odpowiadającej wydajności 45 m³/h.

Dla oceny energochłonności pompowania obliczono wartości zapotrzebowania na energię. Posłużono się w tym celu



Rys. 2. Charakterystyki sprawności hydraulicznej studzien zasadniczej i rezerwowej
Fig. 2. Efficiency curves for primary and reserve wells



Rys. 3. Wskaźnik zapotrzebowania na energię [kWh/m³/m]
 Fig. 3. Energy demand indicator [kWh/m³/m]

wskaźnikiem energochłonności jednostkowej, którego wartość obliczono dla maksymalnych wydajności uzyskiwanych w poszczególnych pompowniach próbnych. Wskaźnik ten jest stosunkiem poboru mocy czynnej agregatu pompowego do wydajności jednostkowej. Wyniki obliczeń przedstawiono graficznie na rysunku 3.

Wyniki obliczeń przedstawione na rysunku 3 wskazują, że eksploatacja studni zasadniczej przynosi straty energetyczne oraz finansowe. Warto zauważyć przy tym, że wydajność maksymalna studni zasadniczej spadła z 78 do 30 m³/h. W związku z negatywnymi wynikami renowacji studni zalecono zaprzestanie eksploatacji studni zasadniczej, uruchomienie studni rezerwowej, a także odwiercenie studni zastępczej.

Wnioski i uwagi końcowe

Wyniki przedstawionej w niniejszej pracy analizy skłaniają do wniosku, że przyczyną przedwczesnego spadku sprawności hydraulicznej studni zasadniczej była eksploatacja zasobów wód podziemnych z wydajnością większą niż optymalna. Wydajność tę określono empirycznie zakładając, że odpowiada ona

maksymalnej sprawności hydraulicznej studni. W początkowej fazie eksploatacji sprawność maksymalna wynosiła 0,78 przy wydajności 50 m³/h. Studnia zasadnicza eksploatowana była jednakże przy sprawności równej 0,57 odpowiadającej wydajności 78 m³/h. Efektem tego było przyspieszone starzenie obiektu, a przeprowadzone zabiegi renowacyjne po 10-ciu latach użytkowania studni nie przyniosły spodziewanych rezultatów.

W związku z wzrostem energochłonności oraz obniżeniem wydajności zaleca się eksploatację, dotychczas rezerwowej studni, z maksymalną sprawnością hydrauliczną i wydajnością nie większą niż 40 m³/h, a także zastosowanie agregatu pompowego o mniejszej mocy. Dalsza eksploatacja ujęcia przy obniżonej sprawności studni zasadniczej oznaczałaby starty finansowe na poziomie ok. 50 tys. zł rocznie, z samego tylko tytułu zwiększonego poboru mocy.

Dodatkowo należy wziąć pod uwagę, że eksploatacja jednej studni, dotychczas rezerwowej, oznacza obniżenie poziomu niezawodności ujęcia. Dla pokrycia zapotrzebowania na wodę oraz zachowania ciągłości procesu produkcyjnego konieczne są nowe inwestycyjne nakłady finansowe na rozbudowę ujęcia o nowe studnie głębinowe.

Literatura

- [1] Bierschenk, W.H., *Determining well efficiency by multiple step-drawdown tests*. International Associates of Scientific Hydrology 1963, 493-507
- [2] De Zwart, A.H., (BR), van Beek, K., Houben, G., Treskatis, C. *Mechanische Partikelfiltration als Ursache der Brunnenalterung*. Abb wgw Bonn, 2006, Teil 2., 9/2006: 32-37
- [3] De Zwart, A.H. *Investigation of clogging processes in unconsolidated aquifers near water supply wells*. Ponaen & Looyen BV, Delft, 2007
- [4] Driscoll, F.G. *Groundwater and Wells. Johnson Screens.*, St. Paul, Minesota, 1995, 1089
- [5] Houben, G., Treskatis, C. *Water Well Rehabilitation and Reconstruction*. McGraw Hill, New York, 2007, 391
- [6] Kasenow, M., *Applied Ground-Water Hydrology and Well Hydraulics*. LLC Water Resource Publ. 2nd edn., 2001, 579-586
- [7] Macuda J., Strykowiec, E., *Techniczno-ekonomiczne aspekty odbioru studni nowoodwierconych*. Aktualne rozwiązania ujmowania i eksploatacji wód podziemnych: monografia/red. nauk. Grzegorz Malina; Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych w Częstochowie; Koło Zakładowe PZiTS przy Przedsiębiorstwie Wodociągów i Kanalizacji Okręgu Częstochowskiego SA w Częstochowie. — Częstochowa: [PZiTS], 2016, 11-14
- [8] Treskatis, Ch., Volgnandt, P., Wessollek, H., Puronpää-Schäfer, P., Gerbl-Rieger, S., Blank, K.H. *Anforderungsprofile an den wirtschaftlichen Bau und Betrieb von Bohrbrunnen*. Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 3/98, 1998, 117-128