

Renowacja studni wierconych szansą na obniżenie kosztów eksploatacji ujęć wody

Marzena Boroń¹, Józef Górski²



M. Boroń



J. Górski

Well rehabilitation as a chance to decrease groundwater capture exploitation costs. Prz. Geol., 71: 430–436.

A b s t r a c t. The article presents the results of research on the clogging and rehabilitation (declogging) of wells of the infiltration groundwater captures in Poznań and Bydgoszcz. Research on the capture in Poznań showed a rapid development of well clogging processes. It was noticeable after 300–400 days of well operation, and the wells in unfavorable hydro-geochemical conditions were shut down after 4–5 years of operation in Poznań. The tests of the well's clogging sediments showed that the main problem is clogging with iron compounds, and clogging with manganese and aluminum compounds, as well as carbonates, is of secondary importance. In reducing conditions resulting from the accumulation of organic matter, the development of clogging associated with the corrosion of steel is identified, which resulted in

the precipitation of divalent iron, including sulfides and trivalent iron. On the basis of research at the water capture in Bydgoszcz, it was shown that good declogging effects can be obtained using relatively simple mechanical methods (packer pumping, pressure washing).

Keywords: Infiltration groundwater captures, well clogging rate, well-clogging sediments, mechanical methods for declogging wells, effects of declogging of wells

Problematykę starzenia się i czyszczenia studni opisa-
no już w XV w. (Houben, Treskatis, 2004), a skuteczne
metody ich renowacji do dziś są przedmiotem zaintere-
sowania naukowców i praktyków. Współczesne badania
naukowe doprowadziły do zidentyfikowania głównych
procesów decydujących o starzeniu się studni i różnic w ich
przebiegu w zależności od warunków hydrogeochemicznych.
Opracowano również liczne metody renowacji i ochrony
studni, spośród których warto wymienić np. wyniki prac
Ratajczaka i Witczaka (1980). Kompendium wiedzy na ten
temat zawierają również podręcznik Houbena i Treska-
tisa (2004) pt. *Regeneracja studni oraz Wytyczne renowacji
studni wierconych* wydane przez Izbę Gospodarczą Wodo-
ciągi Polskie w Bydgoszczy (Macuda i in., 2021).

Na terenie Polski jest eksploatowanych ok. 25 000
studni wierconych, które zaopatrują w wodę m.in. ujęcia
komunalne, szpitale, jednostki wojskowe oraz rozlewnie
napojów (Strączyński, 2021), działa też wiele firm wyspecjali-
zowanych w renowacji studni różnymi metodami, a pomimo
tego nadal bardzo mało zabiegów tego typu jest wykony-
wanych. W 2015 r. ogłoszono np. tylko 15 postępowań
przetargowych na wykonanie renowacji studni (Boroń,
Doniecka, 2016). W Niemczech natomiast rocznie prze-
prowadza się ok. 2400 renowacji (Niehaus, 1999 za
Houben, Treskatis, 2004). Częściej są tam wykonywane
tańsze renowacje mechaniczne (ok. 1680/rok), a przeszło
dwa razy rzadziej mechaniczno-chemiczne (tylko 720/rok).
W RFN są również zgłaszane liczne opracowania paten-
towe w tej dziedzinie. Od 2001 r. obowiązuje w Niemczech
krajowa instrukcja renowacji studni (Arbeitsblatt
W130/2001), uwzględniająca przyczyny zmniejszania się
ich wydajności, metody renowacji i powiązane z tymi
zagadnieniami regulacje prawne. Niemieckie Stowarzysze-

nie Przemysłu Gazowego i Wodnego DVGW (*Deutscher
Verein des Gas- und Wasserfaches*) zebrało uwagi do tej
instrukcji i opublikowało poprawki, aby umożliwić
wszystkim niemieckim użytkownikom studni dostęp do naj-
nowszej wiedzy (Arbeitsblatt W130/2007). W doku-
mentach tych zaleca się podejmowanie renowacji studni,
gdy utracą one ok. 20% wydajności względem odnotowanej
w czasie ich budowy lub pierwszych 2–3 lat eksploatacji.

W Polsce główną metodą podtrzymywania wydajności
stacji wodociągowych jest budowa studni zastępczych.
Realizacja takiej inwestycji trwa ponad rok i nie jest tania,
natomiast koszty renowacji studni nie przekraczają 5–10%
kosztów ich wiercenia, a czas takich prac ogranicza się do
1–2 tygodni (Boroń, 2021).

Eksploatacja studni o znacznym stopniu zakolmatowa-
nia prowadzi do zwiększonego zużycia energii elektrycznej,
spadku wydajności studni lub ich okresowego wyłączenia,
zwłaszcza jeśli zwiększającej się wokół takiej studni
depresji towarzyszy susza hydrogeologiczna lub zwiększo-
ny pobór wód z tej samej warstwy wodonośnej przez
sąsiednie studnie.

Studnie na terenie Polski ujmują przeważnie wody pię-
tra czwartorzędowego z piaszczysto-żwirowych utworów
wodnolodowcowych, przez co są one narażone na szybki
rozwoj procesów kolmatacji i korozji. W innych krajach
europejskich, w tym również w Niemczech, więcej jest
studni ujmujących wody z poziomów szczelinowych, które
w mniejszym stopniu są narażone na kolmatację. W związ-
ku z tym należy zwiększyć liczbę i częstotliwość renowacji
studni w naszym kraju. Działania te pozwolą zaoszczędzić
energii elektryczną, co jest szczególnie ważne w sytuacji
rosnących kosztów jej pozyskiwania.

¹ były pracownik Działu Głównego Geologa Miejskich Wodociągów i Kanalizacji w Bydgoszczy sp. z o.o., ul. Toruńska 103, 85-817 Bydgoszcz; boron.marzena@wp.pl

² Instytut Geologii, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu, ul. Krygowskiego 12, 61–680 Poznań; gorski@amu.edu.pl

Celem niniejszej pracy jest prezentacja danych o kolmatacji studni infiltracyjnych ujmujących wody dla Poznania (ujęcie Mosina–Krajkowo) i Bydgoszczy (Czyżkówko). Opisano tempo kolmatacji wybranych studni ujęcia poznańskiego w różnych warunkach hydrogeochemicznych oraz przewidywany maksymalny czas pracy tych studni w przypadku, gdy nie zostaną wykonane zabiegi renowacyjne. Istotnym elementem artykułu jest również charakterystyka metod dekolmatacji studni, w szczególności nowatorskich metod zastosowanych do poprawy funkcjonowania studni ujmujących wody dla Bydgoszczy (Boroń, 2021, 2022a, b). Zaprezentowano efekty renowacji studni bydgoskiego ujęcia wód Czyżkówko, przeprowadzonych w latach 2015–2022 w celu utrzymania ich sprawności. Opisano także wyniki chemicznych badań osadów kolmatujących studnie obu ujęć, w tym m.in. osadów powstających w warunkach redukcyjnych, w których kolmatacja studni jest wzmagana przez korozję stalowego szkieletu filtra, co dotychczas nie było w Polsce rozpoznane. Wyniki przeprowadzonych badań mogą pomóc wydłużyć czas eksploatacji studni w Polsce i obniżyć ich koszt.

MOSINA–KRAJKOWO – INFILTRACYJNE UJĘCIE ZAOPATRUJĄCE W WODĘ POZNAŃ

Ujęcie Mosina–Krajkowo (ryc. 1) od 1969 r. zaopatruje w wodę aglomerację poznańską. Eksploatuje ono:

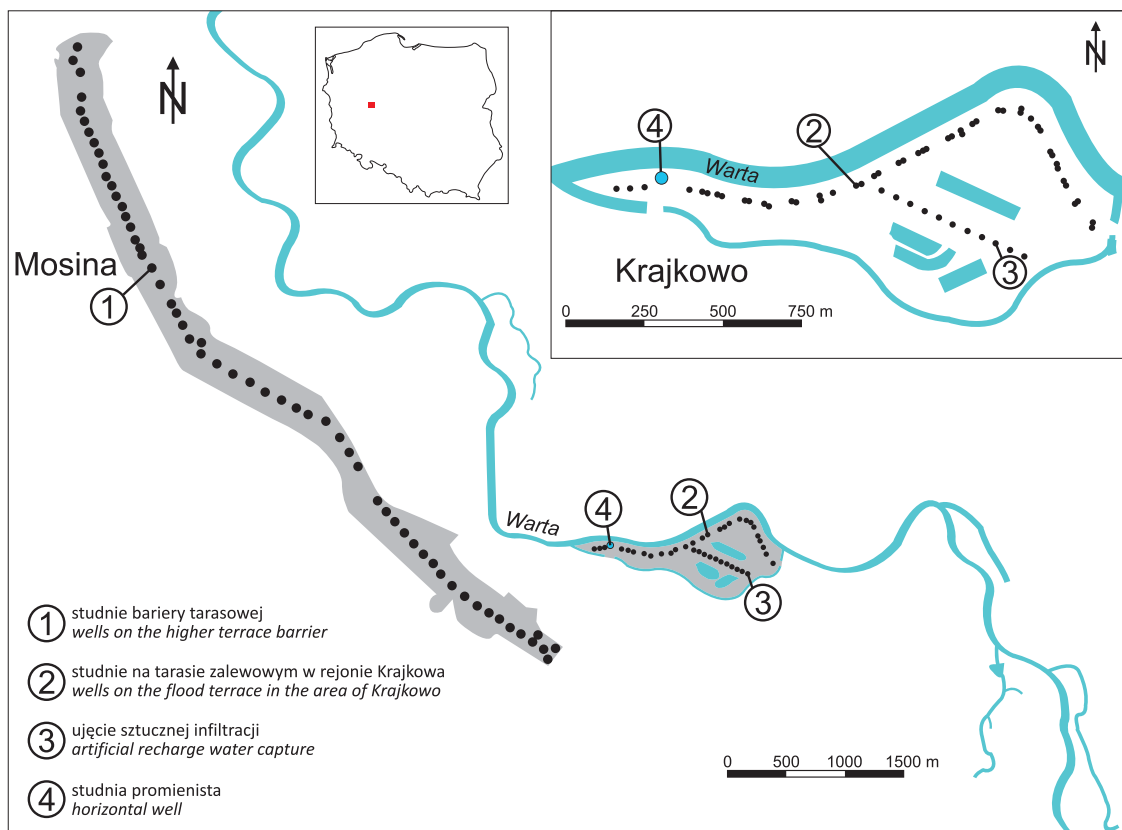
- barierę składającą się z 56 studni na tarasie nadzalewowym Warty, odwierconych w odległości kilkuset metrów od rzeki oraz
- barierę 29 studni na tarasie zalewowym Warty, usytuowanych w odległości 50–60 m od jej brzegu.

Wszystkie studnie mają głębokość ok. 40 m i ujmują czwartorzędowy poziom wodonośny wielkopolskiej doliny kopalnej o miąższości ok. 20 m. Poziom ten lokalnie jest przykryty przez serię glin zwałowych. Na obszarach pozbawionych glin kontaktuje on z górną warstwą wodonośną doliny Warty.

Analizując żywotność studni bariery tarasowej stwierdzono, że w latach 1969–1991 czas eksploatacji studni w strefie o szczególnie niekorzystnym środowisku hydrogeochemicznym (tzn. w strefach okien hydrogeologicznych, gdzie rozwijały się procesy utleniania siarczków, oraz w anaerobowym środowisku siarkowodorowym), wynosił tylko 4–5,25 lat, natomiast studnie usytuowane w korzystniejszych warunkach hydrogeochemicznych eksploatowano przez 5,5–8 lat.

Utratę wydajności i efekty renowacji studni ocenia się na podstawie wydatku jednostkowego studni (q_1), mierzonego jako iloraz jej wydajności (Q_1) i depresji (s_1), czyli $q_1 = Q_1/s_1$, i porównania go do początkowego wydatku z czasu budowy studni (q_0) według wzoru: $q_1/q_0 \times 100\%$.

W latach 80. i 90. XX w. oceniono tempo rozwoju kolmatacji wybranych studni ujęcia Mosina–Krajkowo, obserwując zmniejszenie ich wydatku jednostkowego (q). Wydatek jednostkowy wszystkich analizowanych studni wyraźnie zmniejszał się już po 300–400 dobach eksploatacji. Tempo utraty tej wydajności było zróżnicowane (tab. 1). Szybciej starzały się studnie bariery tarasowej, w tym w szczególności zlokalizowane w niekorzystnym środowisku hydrogeochemicznym (studnie 48/1, 43/1, 40/1 – tab. 1, ryc. 1). Znacznie wolniej kolmatacji ulegały studnie bariery brzegowej (nr 25L i 14L). Przyczyną różnic w żywotności tych studni jest zróżnicowanie zawartości żelaza w ujmowanych przez nie wodach. W wodach ze studni



Ryc. 1. Mapa sytuacyjna ujęcia Mosina–Krajkowo, zaopatrującego w wodę aglomerację poznańską
Fig. 1. Situational map of the Mosina–Krajkowo intake, supplying water to the Poznań agglomeration

Tab. 1. Zmniejszenie wydajności wybranych studni ujęcia Mosina–Krajkowo w trakcie eksploatacji
Table 1. Decrease in specific discharge during the operation of selected wells of the Mosina–Krajkowo water capture

Nr studni Well No.	Pierwotny wydatek jednostkowy studni Primary specific discharge q_0 [m ³ /h/m]	Wydatek jednostkowy studni po czasie t Specific discharge after time t q_t [m ³ /h/m]	Czas eksploatacji studni Period of well operation t [miesiące/months]	Różnica wydatku po czasie t Performance difference over time t $q_0 - q_t$ [m ³ /h/m]	Procentowa zmiana wydatku po czasie t Percentage change in expenditure after time t [%]	Procentowa zmiana wydatku w ciągu roku Percentage change in expense over the year [%]	Stężenie Fe w wodzie Fe concentration in water [mg/l]
√ 48/1	66,6	16,13	35	50,47	75,8	25,98	>5
√ 43/1	26,32	6,54	27	19,78	75,15	33,39	>5
√ 40/2	14,53	8,47	34	6,26	43,3	15,28	>5
√ 50/2	34,48	20,41	35	14,07	40,8	13,98	ok. 4,5
∧ 25 L	111,11	18,87	92	92,24	83,2	10,85	ok. 1,5
∧ 14 L	90,21	23,26	92	67,65	74,4	9,70	ok. 1,5

√ – studnie bariery tarasowej / wells of higher terrace

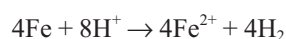
∧ – studnie bariery brzegowej / wells of flood terrace barrier

bariery brzegowej stężenie żelaza jest znacznie niższe (ok. 1–1,5 mg/l) niż w wodach studni bariery tarasowej (>5 mg/l). Zauważono też, że do kolmatacji studni ujęcia Mosina–Krajkowo przyczynia się korozja ich metalowych części.

Po nieudanych próbach dekolmatacji studni ujęcia Mosina–Krajkowo za pomocą słabych kwasów z dwóch studni (45 i 8/3) wyciągnięto filtry. Przestrzeń w tych filtrach, pomiędzy siatką filtracyjną a rurą perforowaną okrągłymi otworami, była wypełniona czarnym, maźnym rękawem osadem, całkowicie zasklepiającym niektóre otwory wlotowe rury. Na powierzchni rury filtracyjnej były wyraźnie widoczne ubytki metalu (wżery o głębokości 2–3 mm), a wokół niektórych otworów wlotowych – rdzawe osady żelaza trójwartościowego. Do badań pobrano osady zatykające środkową część filtrów, a także osady z dwóch pomp zainstalowanych w studniach 4G/3 i 3L. Analizy chemiczne osadów wykonano w Laboratorium Zakładu Analiz Wody i Gruntów Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu.

W osadzie pobranym z filtrów studni 45 i 8/3 wykryto dużą zawartość żelaza dwuwartościowego oraz siarczków (tab. 2), wskazujących na rozwój korozji stalowych rur w anaerobowym środowisku siarkowodorowym. Środowisko takie wytworzyło się w wyniku migracji cząstek materiału organicznego z wód Warty do warstwy wodonośnej, co potwierdziły wyniki badań hydrobiologicznych i hydrochemicznych (Górski, 2009).

Rozkład materii organicznej w warunkach anaerobowych prowadzi do powstania siarkowodoru (H₂S). Według Houbena i Treskatisa (2004, 2007) w takim środowisku dochodzi do korozji metali wg reakcji:



Powstający w tej reakcji wodór może z kolei powodować redukcję siarczanów:



Na skutek reakcji siarkowodoru z żelazem rozpuszczonym w wodzie wytrącają się siarczki i związki żelaza trójwartościowego:



Reakcje te wyjaśniają obecność w osadzie zatykającym filtry studni zarówno siarczków, jak i związków żelaza trójwartościowego. Wskazują również jednoznacznie, że w studniach pracujących w anaerobowym środowisku siarkowodorowym nie należy stosować filtrów wykonanych z metali. Postulat ten spełniono, wymieniając filtry studni ujęcia Mosina–Krajkowo na wytworzone z PCV.

Nie stwierdzono, by na filtrach studni 45 i 8/3 ujęcia Mosina–Krajkowo zachodziła kolmatacja węglanowa (tab. 2).

Tab. 2. Parametry chemiczne osadów pobranych z filtrów studni 45 i 8/3 bariery tarasowej ujęcia Mosina–Krajkowo

Table 2. Results of analyses of sediments taken from the screens of wells 45 and 8/3 on the terrace barrier of the Mosina–Krajkowo water capture

Parametr Parameter	Studnia 45 Well 45	Studnia 8/3 Well 8/3
Fe ²⁺ [%]	8,50	18,00
Fe ³⁺ [%]	16,30	12,00
Siarczki jako S ²⁻ [%] / Sulphides as S ²⁻ [%]	8,70	4,25
Ca ²⁺ [%]	<0,10	<0,10
Mg ²⁺ [%]	nie występuje / absent	nie występuje / absent
Chemiczne zapotrzebowanie tlenu [mg O ₂ /l] Chemical oxygen demand [mg O ₂ /l]	8,70	13,50
Części nierozpuszczalne w kwasie [%] Acid insoluble matter [%]	58,00	9,50

Zwrócono natomiast uwagę na duży udział w osadach z filtra studni 45 części mineralnych nierozpuszczalnych w kwasach, prawdopodobnie pochodzących z mułków występujących w warstwie wodonośnej w pobliżu tej studni. Skład osadów pobranych z filtra studni 45 wskazuje na istotne współdziałanie kolmatacji mechanicznej i chemicznej. Podobny proces opisali Timmer i in. (2003).

Osady pobrane z pompy studni 4G/3 w tarasowej barierze ujęcia Mosina–Krajkowo mają podobny skład chemiczny (tab. 3) i osadzały się w zbliżonych warunkach hydrochemicznych do rozpoznanych wokół studni 45 i 8/3 tego ujęcia. Odmienny skład chemiczny ma osad pobrany z pompy studni 3L, należącej do brzegowej bariery ujęcia Mosina–Krajkowo. Na skutek dopływu do tej studni dobrze natlenionych wód rzecznych o stosunkowo małej zawartości żelaza (ok. 1–1,5 mg/l) w osadzie tym nie występują siarczki i nie było warunków do osadzania się materii organicznej. Dominują w nim natomiast związki zawierające żelazo trójwartościowe. Należy przyjąć, że wokół większości studni ujmujących na terenie Polski wody poziomów wodonośnych piętra czwartorzędowego panują zbliżone warunki geochemiczne, jak w otoczeniu studni 3L, co opisali Ratajczak i Witzczak (1980).

CZYŻKÓWKO – INFILTRACYJNE UJĘCIE ZAOPATRUJĄCE W WODĘ BYDGOSZCZ

Ujęcie wód Czyżkówko usytuowano na wysokim tarasie Brdy, wyrzeźbionym w piaszczysto-żwirowych osadach sandru o miąższości od kilkunastu do 25 m, podścielonych pstryimi łałkami neogenu. Studnie i drenaże w plejstoceniowej warstwie wodonośnej uszeregowano w barierach o kierunku północ–południe (ryc. 2), czyli równoległe do naturalnych hydroizohips przed budowy ujęcia infiltracyjnego. Poziom wody podziemnej o spadku w kierunku wschodnim, do Brdy, udokumentowano na głębokości ok. 6 m.

Zasadniczą częścią systemu odbioru wody przez ujęcie Czyżkówko, liczące łącznie 173 studnie, jest 106 studni (typu G) z pompami głębinowymi. Północna część ujęcia jest eksploatowana lewarowo, a południowa drenażami zbiorczymi. Część studni typu G ma średnicę 914 mm (odwiercono je co 25,0 m), a część średnicę 650 mm (rozlokowano je w rozstawie co 12,5 m). Studni lewarowych (L) o średnicy 650 mm jest 67. Odwiercono je co 12,5 m. Wszystkie studnie mają podwójną obsypkę żwirową, w której zainstalowano piezometry o średnicy 40 mm, wyko-

rzystywane do kontroli zeskoku hydraulicznego i dekolmatacji. Studnie te wyposażono w filtry mostkowe lub ze szczełną ciągłą typu *Johnson*. Konstrukcja bydgoskich studni jest unikalna ze względu na duże średnice studni, podwójne, obsypki ze skał bez zawartości węglanów i piezometry w obsypkach. W projekcie bydgoskich studni infiltracyjnych uwzględniono doświadczenia zdobyte w trakcie eksploatacji lewarowego ujęcia wody podziemnej w Lesie Gdańskim w Bydgoszczy, zbudowanego w 1900 r. (Boroń, 2021, 2022b).

Wydajność studni jest odczytywana z przepływomierzy systemu SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) i komisyjnie z wodomierzy wykonawcy renowacji. Stan zwierciadła wody gruntowej w studniach jest odczytywany również z systemu SCADA lub mierzony za pomocą świstawki w piezometrach obsypkowych. Renowacje bydgoskich studni są poprzedzane inspekcjami filtra kamerami TV i badaniami jakości osadów pobranych z filtrów studziennych skrobakiem zaprojektowanym przez Miejskie Wodociągi i Kanalizację (MWiK) w Bydgoszczy (Boroń, Doniecka, 2016). Efektywność renowacji wybranych studni jest kontrolowana takimi metodami geofizycznymi, jak: profilowania otworowe średnicy, segmentacyjne gamma (SGL), neutron–neutron, gamma–gamma, gęstościowe (PGG) i *flow meter log*. Analizy jakościowe osadu (tab. 4) wykonuje Centralne Laboratorium Badania Wody i Ścieków MWiK Bydgoszcz wg PN/ISO.

Do renowacji studni ujmujących wody dla Bydgoszczy wykorzystuje się następujące metody:

- tłokowanie – metoda ta polega na wywoływaniu zmian ciśnień wewnątrz studni za pomocą tłoka. Tłok jest zapuszczany do kolumny filtrowej na linie, przewodzie wiertniczym lub pompowym i wprawiany w ruch posuwisto-zwrotny (Macuda, Boroń, 2016). Podczas ruchu tłoka w dół woda jest włączana przez perforację filtra do obsypki i warstwy wodonośnej, w wyniku czego następuje rozkruszanie słabo stwardniałych osadów. Podczas ruchu tłoka w górę woda z osadem jest zasysana do wnętrza filtra, skąd można ją odpompować poza studnię;
- płukanie wysokociśnieniowe *jetting* (Macuda i in., 2021) – wykonywane za pomocą agregatu pompowego generującego wysokie ciśnienie wody i głowicy wyposażonej w różnego rodzaju dysze płuczące. Do płukania zaleca się stosować ciśnienie 120–150 bar przy wewnętrznej ścianie filtra. Dysze muszą być ustawione po środku studni za pomocą prowadników. Użycie wyższego ciśnienia może spowodować nie-

Tab. 3. Parametry chemiczne osadów pobranych z pomp studni 4G/3 bariery tarasowej i 3L bariery brzegowej ujęcia wód Mosina–Krajkowo

Table 3. Composition of deposits collected from the pumps in well 4G/3 in the terrace barrier and well 3L in the flood barrier at the Mosina–Krajkowo water capture

Parametry Parameters	Studnia 4G/3 w barierze tarasowej Well 4G/3 in terrace barrier	Studnia 3L w barierze brzegowej Well 3L in flood barrier
Fe ²⁺ [%]	20,60	2,15
Fe ³⁺ [%]	4,41	10,80
Mn [%]	0,18	1,30
H ₂ S [%]	5,70	0,05
Mg [%]	nie występuje / absent	nie występuje / absent
Ca [%]	1,88	0,77
Chemiczne zapotrzebowanie tlenu [mg O ₂ /l] Chemical oxygen demand [mg O ₂ /L]	22,60	9,90



Ryc. 2. Mapa sytuacyjna infiltracyjnego ujęcia wód Czyżkówko, które zaopatruje Bydgoszcz
Fig. 2. Situational map of the Czyżkówko artificial water recharge capture for Bydgoszcz city

Tab. 4. Parametry chemiczne osadów kolmatujących studnie ujęcia Czyżkówko k. Bydgoszczy w latach 2020–2021 (11 próbek)
Table 4. Composition of deposits collected from the well screens for artificially recharged water of the Czyżkówko capture near Bydgoszcz in 2020–2021 (11 samples)

Parametr / Parameter	Jednostka / Unit	Minimum	Maximum	Norma / Standard
Fosforany w wyciągu wodnym <i>Phosphates in water extract</i>	mg P/l	0,0165	0,12	PN-EN ISO 6878:2006
Glin / Aluminium	mg Al/kg suchej masy / dry matter	2 347	7 039,00	I-51(F)/PQ-04
Żelazo / Iron total	mg Fe/kg suchej masy / dry matter	12 293	164 554,00	I-51(F)/PQ-04
Mangan / Manganese	mg Mn/kg suchej masy / dry matter	2 921,70	68 015,39	I-51(F)/PQ-04
Siarczki w wyciągu wodnym <i>Sulphides in water extract</i>	mg S ²⁻ /l	<0,02	<0,02	I-34(C)/PQ-04
Siarczany w wyciągu wodnym <i>Sulphates in water extract</i>	mg SO ₄ /l	3,64	96,28	PN-EN ISO 10304-1:20
Węglany / Carbonates	% CaCO ₃ *	4,2	29,6	I-56(C)/PQ-04

*procentowy udział węglanów w wyciągu wodnym [%] / percentage of carbonates in the water extract [%]

pożądane zagęszczenie obsypki, co udowodniono, wykonując badania geofizyczne przed i po renowacji studni. Zatem nieodpowiednio wykonana renowacja może pogorszyć warunki dopływu wody do studni. W skład agregatu pompowego, oprócz wysokociśnieniowej pompy, wchodzi także silnik napędowy, wstępny filtr wodny, kompensator ciśnienia, zbiornik wody i panel sterujący;

- metodę elektrohydrodynamiczną EHD (Macuda i in., 2021) – zaletą tej metody jest krótki czas wyłączenia studni z eksploatacji (około 2 dni). Wykonanie samego zabiegu trwa do kilku godzin. Czas ten zależy od głębokości studni i stopnia zakolmatowania filtra. Aparatura jest sterowana przewodowo za pomocą układu niskonapięciowych przekaźników. Wykorzy-

stuje się napięcie 20 000–50 000 V oraz pojemność od 1 do 12 μF. Iskrownik roboczy przemieszcza się wzdłuż filtra, a dźwięk fali rozchodzącej się w rurze nadfiltrkowej lub zakolmatowanym odcinku filtra różni się od pochodzącego z czystych odcinków tych urządzeń. Rozładowania (mikrowybuchy), w zależności od wielkości zastosowanego napięcia, następują z częstotliwością 30–70/minutę. Wibracje mogą być odczuwalne w promieniu 10–12 m od studni. Aparatura jest lekka i łatwa w transporcie, co korzystanie wpływa na czas i koszt renowacji. Należy jednak kontrolować bezpieczeństwo aparatury kontrolno-pomiarowej i automatyki w rejonie czyszczonych studni;

- ❑ urządzenie *turbocleaner* – jest to pompa dwukomrowa. Dolna pompa zatłacza wodę w głąb obsypki, a górna odpompowuje równocześnie wodę z osadem poza studnię, komory pomp są izolowane. Do wody zatłaczanej do filtra można dodać rozpuszczalnik, adaptując to urządzenie do metody chemicznej;
- ❑ płukanie piezometrów obsypkowych (Boroń, 2022b) – polega na zatłaczaniu wody do 3 piezometrów założonych w obsypce studni. W tym samym czasie w studni pracuje pompa usuwająca wody popłuczne ze studni. Badania geofizyczne wykonane przed i po renowacji tą metodą pokazują prawie całkowite usunięcie osadu ze strefy obsypki.
- ❑ renowacje chemiczne – zabiegi te prowadzi się z zastosowaniem kwasu cytrynowego. Jest to odczynnik z atestem PZH, skuteczny w rozpuszczaniu osadów studziennych (Boroń, Doniecka, 2016). Stwierdzono jednak, że siatki filtracyjne wykonane z poliamidu tracą elastyczność w trakcie eksploatacji studni (Boroń, Górka, 2018a, b) i wówczas niektóre odczynniki chemiczne stosowane do rozpuszczania osadu studziennego mogą taką siatkę uszkodzić, dla-

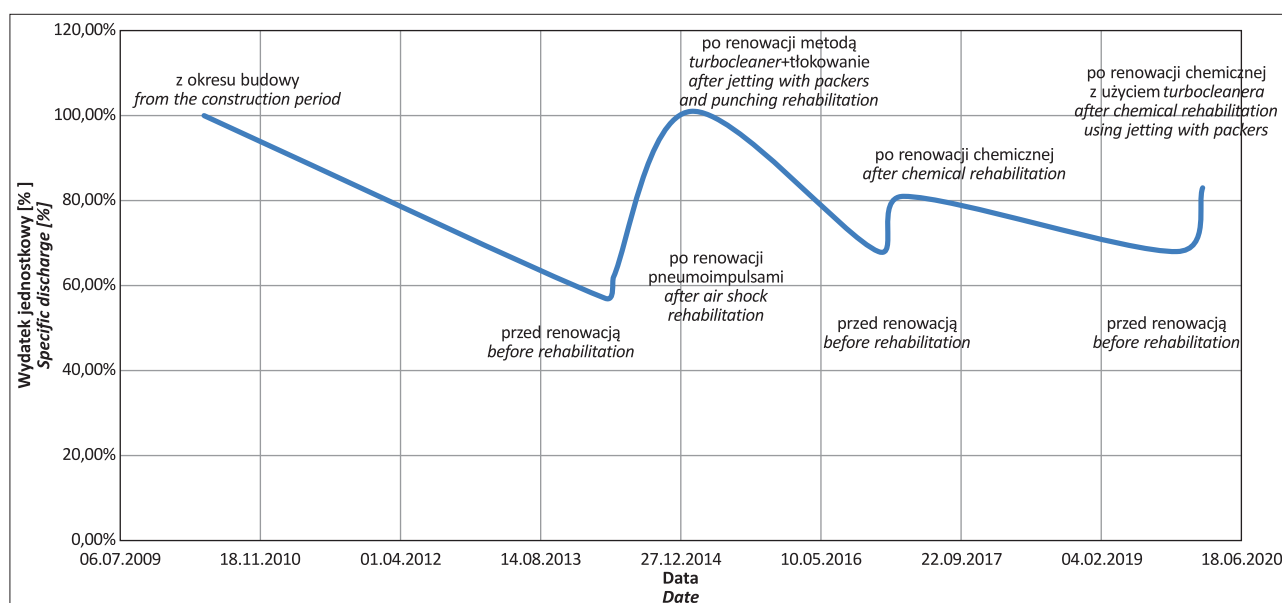
tego wszystkie studnie infiltracyjnego ujęcia wód w Bydgoszczy wyposażono w filtry stalowe.

Woda infiltracyjna, na skutek większej ilości tlenu i substancji organicznych oraz niestabilnej temperatury, sprzyja wytrącaniu osadów na powierzchni filtrów studni (Boroń, 2016). W pierwszej fazie eksploatacji studni, kiedy osad ten jest miękki i mazisty, do renowacji studni można stosować metody mechaniczne (Macuda, Boroń, 2016), później, gdy osad stwardnieje, konieczne są kosztowniejsze metody mechaniczno-chemiczne, które mogą uszkodzić siatki filtracyjne (Boroń, Górka, 2018a, b).

Studnie ujęcia Czyżkówko, eksploatowane przez 12 lat z wydajnością ok. 10 mln m³/r., wielokrotnie poddawano renowacji. W latach 2015–2022 wykonano łącznie różnymi metodami 388 renowacji (tab. 5), starając się, aby każda ze studni ujęcia była czyszczona co 2–3 lata lub, w razie konieczności, częściej. Na przykład studnia 44G była czyszczona 3-krotnie. Efekty zabiegu (ryc. 3) mierzono według wzoru: $(q_2/q_0) \times 100\%$, porównując wydatek jednostkowy studni po renowacji (q_2) z jej wydajnością z czasu budowy (q_0). Warunkiem odbioru prac było uzyskanie co najmniej 90% początkowej wydajności studni (q_0).

Tab. 5. Efekty renowacji studni ujęcia wód Czyżkówko w Bydgoszczy
Table 5. Results of rehabilitation of the Czyżkówko intake wells in Bydgoszcz

Metoda renowacji studni / Wells rehabilitation method	Liczba studni poddanych renowacji Number of wells undergoing renovation	Procentowa zmiana wydatku jednostkowego studni Percentage change in unit well flow ($q_2/q_0 \times 100\%$) [%]
Chemiczna / Chemical	27	100,72
Chemiczna + <i>turbocleaner</i> / Chmical + jetting with packers	6	128,54
Elektroimpulsy / Electroimpulse	30	92,74
Płukanie piezometrów obsypkowych / Gravel pack piezometers washing	13	120,71
Pneumoimpulsy / Air shock rehabilitation	38	117,70
<i>Turbocleaner</i> / Jetting with packers	81	113,27
<i>Turbocleaner</i> + tłokowanie / Jetting with packers + punching	98	105,48
Płukanie wysokociśnieniowe / Jetting	95	116,68



Ryc. 3. Efekty renowacji studni 44G ujęcia Czyżkówko, wyrażone w postaci procentowej zmiany wydatku jednostkowego studni
Fig. 3. Effects of renovation of well 44G of the Czyżkówko intake, expressed as a percentage change in the unit flow of the well

W szczególnych sytuacjach (np. testowania nowej technologii) badania geofizyczne stosuje się przed i po zabiegu renowacji (Górka, Boroń, 2017; Boroń, Górka, 2019). Pomiarы zeskoku hydraulicznego, mierzonego w filtrze i piezometrach obsypkowych, nie wykazują jeszcze różnic, stąd wniosek, że obserwowana depresja jest efektem kolmatacji, jaka niestety rozwija się na kontakcie obsypki i warstwy wodonośnej.

Na podstawie obserwacji studni wyciągnięto wniosek, że kolmatacja filtrów jest przeważnie wprost proporcjonalna do ilości wody wypompowanej ze studni i jej składu chemicznego. Renowacje należy zatem projektować cyklicznie. Wyniki pompowania i badań geofizycznych wskazują, że najbardziej zakolmatowane są górne części filtrów, niezależnie od litologii wodonośca (Górka, Boroń, 2017). Rozwój kolmatacji studni zależy również od sposobu jej eksploatacji – wolniej starzeją się studnie lewarowe, o mniejszej wydajności i niewielkim zakresie wahań poziomu wody, w których powietrze sprzyjające wytrącaniu się żelaza ingeruje najpłycej.

Najskuteczniejszą metodą renowacji studni i poprawy funkcjonalności jej obsypki jest płukanie wysokociśnieniowe filtra oraz piezometrów obsypkowych. Metoda ta bardzo dobrze sprawdza się do czyszczenia filtrów ze szczeliną ciągłą typu *Johnson*. Skuteczność zabiegów jest bezpośrednio powiązana z odpowiednim doбором ciśnień. W czyszczeniu filtrów mostkowych również dobre rezultaty, lub nawet nieznacznie lepsze, można uzyskać, stosując metody impulsowe lub *turbocleaner*, wspomagane np. chemicznie. Mechaniczne metody renowacji studni ujęcia wód dla Bydgoszczy, o dużych średnicach i z podwójną obsypką zwirową, regularnie prowadzone przez ponad 12 lat eksploatacji, są wystarczające do dekolmatacji filtrów.

WNIOSKI

1. W obszarach ujęć wód podziemnych, w szczególności zasilanych z poziomów wodonośnych piętra czwartorzędowego, które dominują w Polsce, szybko postępuje rozwój procesów starzenia się studni w wyniku kolmatacji filtrów i stref przyfiltrów. Badania studni ujęcia infiltracyjnego Mosina–Krajkowo wykazały, że wpływ kolmatacji wyraźnie zaznacza się zaledwie po 300–400 dobach ich eksploatacji. Konieczność wyłączenia studni usytuowanych w niekorzystnym środowisku hydrogeochemicznym i budowy zastępczych zachodziła już po 4–5 latach ich eksploatacji.

2. Wyniki badań osadów kolmatujących wskazują, że główną przyczyną zmniejszenia przepustowości filtrów studni jest osadzanie się związków żelaza pod wpływem katalitycznego oddziaływania bakterii żelazistych. Osadzanie się związków manganu, glinu oraz węglanów ma podrzędne znaczenie. Na funkcjonowanie niektórych studni oddziałuje również kolmatacja mechaniczna drobną frakcją mineralną występującą w wodonoścu.

3. Kolmatację studni znacznie przyspieszają procesy korozji metalowych materiałów użytych do jej budowy i wytrącania się związków żelaza. Problem ten zidentyfikowano w studniach ujęcia Mosina–Krajkowo, gdzie stwierdzono rozwój korozji rur stalowych i wytrącanie się osadów żelazistych, w tym siarczków, w redukcyjnym środowisku geochemicznym, wytworzonym przez dopływ materii organicznej wraz z infiltrującymi wodami rzeczными. Wyniki badań potwierdziły celowość rezygnacji z rur stalowych w takim środowisku.

4. W celu zmniejszenia zużycia energii do pompowania wody z zakolmatowanych studni oraz wydłużenia czasu ich eksploatacji niezbędne jest wdrożenie metod dekolmatacji, które powinny być w Polsce stosowane znacznie częściej niż dotychczas.

5. Doświadczenia MWiK w Bydgoszczy dowodzą, że dobre efekty uzdatniania studni można uzyskać, stosując metody mechaniczne. Zabiegi te należy wykonywać, gdy tylko zaobserwuje się zmniejszenie wydatku jednostkowego q_0 o 20%. Gdy wydatek ten zmniejszy się jeszcze bardziej, konieczne będzie zastosowanie również dekolmatacji chemicznej.

6. Już na etapie projektu budowy studni, szczególnie w niekorzystnych warunkach hydrogeochemicznych, powinna być uwzględniona jej odpowiednia konstrukcja, ograniczająca szybki rozwój kolmatacji i możliwość stosowania wielu metod renowacyjnych. Niezbędny jest również systematyczny pomiar wydajności studni i depresji zwierciadła wody wytwarzanej w trakcie jej eksploatacji.

Autorzy serdecznie dziękują Profesorowi Janowi Prażakowi, drugiemu anonimowemu Recenzentowi i Magdalenie Mizerskiej za cenne uwagi wykorzystane do ostatecznej redakcji artykułu.

LITERATURA

- ARBEITSBLATT W 130, Oktober 2007 – Technische Regel, Brunnenregenerierung. DVGW Regelwerk.
- BOROŃ M. 2021 – Ekonomiczne aspekty renowacji i remontów studni wodociągowych. Technol. Wody, 77 (3): 46–52.
- BOROŃ M. 2022a – Renowacja studni wodociągowych. Wodociągi i Kanalizacja, 10: 224.
- BOROŃ M. 2022b – Bydgoska metoda renowacji studni wodociągowych. Wodociągi i Kanalizacja, 11: 225.
- BOROŃ M., DONIECKA D. 2016 – Badania nad doбором odczynnika do renowacji chemicznych studni na przykładzie ujęcia infiltracyjnego w Bydgoszczy. [W:] G. Malina (red.), Aktualne rozwiązania ujmowania i eksploatacji wód podziemnych. PZITS, Częstochowa: 107–112.
- BOROŃ M., GÓRKA T. 2018a – Wpływ odczynników chemicznych stosowanych do renowacji chemicznych studni na niektóre parametry siatek filtracyjnych. [W:] G. Malina (red.), Bezpieczeństwo zbiorowego zaopatrzenia w wodę na terenach objętych antropopresją. PZITS, Częstochowa: 93–101.
- BOROŃ M., GÓRKA T. 2018b – Zmiany własności mechanicznych siatek studniarskiej wykonanej z poliamidu (PA) w czasie eksploatacji studni wodociągowych i renowacji chemicznych. Technol. Wody, 61 (5): 34–41.
- BOROŃ M., GÓRKA T. 2019 – Porównanie efektywności trzech systemów odbioru wody podziemnej ujęcia infiltracyjnego dla Bydgoszczy pod względem wydajności i energooszczędności oraz analiza ich starzenia i dobór środków zapobiegawczych. Biul. Państw. Inst. Geol., 476: 17–24.
- GÓRKA T., BOROŃ M. 2017 – Renowacja studni wodociągowych w świetle badań geofizycznych. Wodociągi i Kanalizacja, 11 (165): 35–38.
- GÓRSKI J. 2009 – Quality of river bank filtered water on the base of Poznań city (Poland): Waterworks experiences. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Water Security in Desert Countries, Springer: 269–279.
- Houben G., Treskatis C. 2004 – Regeneracja studni. Proj-przem-EKO, Bydgoszcz.
- Houben G., Treskatis C. 2007 – Water well Rehabilitation and Reconstruction. McGraw Hill, New York.
- MACUDA J., BOROŃ M. 2016 – Przegląd wybranych metod mechanicznych renowacji studni. [W:] G. Malina (red.), Aktualne rozwiązania ujmowania i eksploatacji wód podziemnych. PZITS, Częstochowa: 113–121.
- MACUDA J., BOROŃ M., GÓRKA T. 2021 – Wytyczne renowacji studni wierconych. Izba Gospodarcza Wodociągi Polskie, Bydgoszcz.
- STRĄCZYŃSKI M. 2021 – Energooszczędna eksploatacja pomp głębinowych. Wyd. Seidel-Przywecki, Warszawa.
- Timmer H., Verdel J., Jongmans A. 2003 – Well clogging by particles in Dutch well fields. American Water Works Association Denver CO., USA.
- RATAJCZAK T., Witczak S. 1983 – Mineralogia i hydrogeochemia żelaza w kolmatacji filtrów studziennych ujmujących wody czwartorzędowe. Zesz. Nauk. AGH, 29: 223.

Praca wpłynęła do redakcji 15.06.2023 r.
Akceptowano do druku 12.09.2023 r.