

Metodyka określania zasobów eksploatacyjnych ujęć zwykłych wód podziemnych

Poradnik metodyczny

Stanisław Dąbrowski

Józef Górski

Jacek Kapuściński

Jan Przybyłek

Andrzej Szczepański – kierownik naukowy



Warszawa 2004

Recenzenci:

Bohdan Kozerski

Jan Prażak

Recenzja prawna

Małgorzata Tessarowicz-Krawczyk

Ilustracje

Zespół autorski

Korekta

Barbara Domosławska

Opracowanie DTP

Monika Głowacka

Opracowanie zamówione przez **Ministra Środowiska**
wykonane przez:

Przedsiębiorstwo Geologiczne POLGEOL S.A.
HYDROCONSULT Sp. z o.o.

Sfinansowano ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

© *Copyright by* Ministerstwo Środowiska

ISBN 83-86564-92-X

Skład i łamanie:

Borgis® Wydawnictwo Medyczne

01-445 Warszawa, ul. Ciołka 11A; tel./fax 836-96-69

e-mail: wydawnictwo@borgis.pl

www.borgis.pl

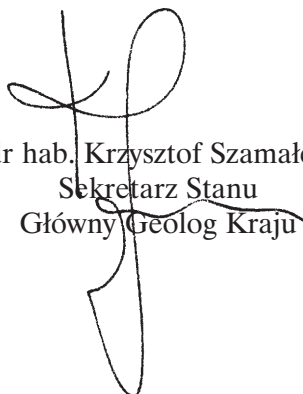
Druk: Gem-Text

Oddawany w Państwa ręce poradnik opracowany został na zamówienie Departamentu Geologii i Koncesji Geologicznych Ministerstwa Środowiska - jako odzew resortu na bardzo liczne postulaty środowiska hydrogeologicznego. Jest on próbą podsumowania wieloletnich doświadczeń w dziedzinie dokumentowania zasobów eksploatacyjnych ujęć wód podziemnych, a jednocześnie uzupełnieniem wiedzy zgromadzonej dotychczas w licznych poradnikach i publikacjach na ten temat.

Wyrażam nadzieję, że poradnik ten będzie szeroko wykorzystywany zarówno przez hydrogeologów, którzy projektują ujęcia wód podziemnych, wykonują je, a następnie ustalają ich zasoby, jak również przez pracowników administracji geologicznej wszystkich szczebli współodpowiedzialnych za jakość prowadzonych prac geologicznych.

Życzę szerokiemu gronu odbiorców tej publikacji twórczej refleksji w oparciu o informacje przedstawione w poradniku. Żywię głęboką nadzieję, że w konsekwencji powstaną wysokie i - co szczególnie istotne - także ujednolicone standardy prowadzenia tak ważnych prac, jak ujmowanie i przeznaczanie do spożycia dobrych jakościowo wód podziemnych. Taka działalność przyczyni się zaś do racjonalniejszego gospodarowania zasobami wodnymi naszego kraju.

Polska jest krajem o skromnych zasobach wód dyspozycyjnych przypadających na jednego mieszkańca. Co ważniejsze ilość dostępnej wody jest mocno zróżnicowana w poszczególnych okresach roku. Możliwość racjonalnego wykorzystania zasobów wód podziemnych stanowi zatem ważny element zwiększania bezpieczeństwa ekologicznego naszego kraju.



dr hab. Krzysztof Szamałek
Sekretarz Stanu
Główny Geolog Kraju

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	7
2. Ogólne informacje o zasobach wód podziemnych	10
3. Przepisy prawne i procedury obowiązujące przy dokumentowaniu zasobów eksploatacyjnych ujęć wód podziemnych	19
4. Hydrogeologiczne podstawy oceny zasobów eksploatacyjnych	26
4.1. Warunki hydrogeologiczne i ich schematyzacja	26
4.1.1. Wodopruszczalność skał i ich cechy zbiornikowe	28
4.1.2. Warstwy, poziomy i systemy wodonośne	28
4.1.3. Obszar filtracji i jego granice – warunki zasilania ujęć wód podziemnych	34
4.1.4. Strumienie wód podziemnych	38
4.1.5. Równania dopływu wód podziemnych do studni	41
4.1.6. Zbiorniki wód podziemnych	48
4.1.7. System wodonośny a model gospodarowania zasobami wód podziemnych	49
4.2. Hydrogeologiczno-techniczne parametry eksploatacji ujęć	51
4.3. Jakość wód podziemnych i ocena stanu ich antropogenicznego zanieczyszczenia	60
4.3.1. Podstawowe pojęcia i normatywy	61
4.3.2. Zmienność jakości wód uwarunkowana czynnikami naturalnymi	62
4.3.3. Antropogeniczne zmiany jakości wód	63
4.3.4. Metody oceny antropogenicznego zanieczyszczenia wód podziemnych	70
4.3.5. Zmiany jakości wód podziemnych w warunkach eksploatacji	72
5. Projektowanie i wykonywanie prac i badań hydrogeologicznych	78
5.1. Wymagana treść projektu prac geologicznych	79
5.1.1. Ustalanie zasobów dla nowego ujęcia	79
5.1.2. Aktualizacja zasobów istniejącego ujęcia	86
5.1.3. Likwidacja studni	88
5.2. Analiza materiałów archiwalnych	89
5.3. Badania geofizyczne	93
5.4. Prace wiertnicze	99
5.4.1. Projektowanie prac wiertniczych	99
5.4.2. Dozór hydrogeologiczny	103
5.4.3. Likwidacja otworów	107
5.5. Próbné pompowania	108
5.5.1. Cele, zakresy i rodzaje próbných pompowań	108
5.5.2. Krótkotrwałe pompowania jednostopniowe powtarzalne	111
5.5.3. Próbné pompowanie jednostopniowe w pojedynczym otworze	116
5.5.4. Próbné pompowanie w hydrowężle badawczym	118

5.6. Badania jakości wód podziemnych.....	129
5.7. Badania w zakresie ochrony ujęcia	137
6. Ustalanie zasobów eksploatacyjnych ujęć wód podziemnych	142
6.1. Obliczanie wydajności ujęcia za pomocą metod analitycznych	143
6.1.1. <i>Metody hydrodynamiczne</i>	143
6.1.2. <i>Metody bilansowe eksploatacji</i>	153
6.1.3. <i>Metody hydrauliczne</i>	154
6.2. Analityczne określanie obszaru zasobowego i obszaru wpływu ujęcia	155
6.3. Ustalanie zasobów eksploatacyjnych metodą modelowania matematycznego	166
6.3.1. <i>Prace i badania na potrzeby modelowania</i>	166
6.3.2. <i>Konstrukcja modelu matematycznego</i>	169
6.3.3. <i>Etapowanie badań modelowych</i>	171
6.3.4. <i>Dokumentowanie prac modelowych</i>	173
6.3.5. <i>Stosowane programy obliczeniowe</i>	174
6.3.6. <i>Przykład modelowych obliczeń bilansu zasilania ujęcia</i>	179
6.3.7. <i>Interpretacja wyników badań modelowych</i>	181
6.4. Prognozowanie zmian jakości wód i optymalizacja ich poboru	182
6.5. Ocena wiarygodności metod obliczeniowych	187
7. Dokumentacja zasobów eksploatacyjnych ujęcia wód podziemnych	189
7.1. Wymagana treść dokumentacji	189
7.2. Określanie wielkości zasobów eksploatacyjnych – wniosek zasobowy	194
7.3. Zasadność ustanowienia strefy ochronnej i monitoringu ujęcia.....	199
8. Przykłady dokumentowania zasobów i optymalizacji poboru wody	202
8.1. Małe ujęcie wody w prostych warunkach hydrogeologicznych	204
8.1.1. <i>Ujęcie ze zbiornika porowego</i>	204
8.1.2. <i>Ujęcie ze zbiornika szczelinowego</i>	210
8.2. Ujęcie w jednowarstwowym zbiorniku wód podziemnych w warunkach silnej antropopresji.....	217
8.3. Ujęcie w jednowarstwowym zbiorniku wód podziemnych w warunkach zagrożenia geogenicznego	228
8.4. Zagrożenie antropogeniczne jako kryterium weryfikacji zasobów w wielowarstwowym systemie wodonośnym	235
8.5. Optymalizacja poboru wody w warunkach współdziałania ujęć w szczelinowo-krasowym zbiorniku wód podziemnych (GZWP 417)	247
8.6. Wpływ czynników środowiskowych na zasoby eksploatacyjne ujęć wód podziemnych w dolinach dużych rzek nizinnych	256
8.7. Jakość wody jako podstawowe kryterium weryfikacji zasobów eksploatacyjnych ujęcia w pradolinnym zbiorniku wód podziemnych	273
8.8. Ujęcie wód źródła z utworów trzeciorzędowych w zlewni Popradu	288
Literatura cytowana	290
Literatura uzupełniająca	294
Indeks haseł	295

1. Wstęp

Gospodarowanie wodami prowadzone jest w oparciu o zasadę zrównoważonego rozwoju oznaczającą kształtowanie, ochronę oraz zarządzanie zasobami wodnymi. Zasoby wód podziemnych, aczkolwiek odnawialne, nie mogą być wykorzystywane w sposób niekontrolowany z uwagi na ograniczoną ich ilość, zmienną jakość oraz skutki dla środowiska, jakie może przynieść nadmierna eksploatacja. Niezbędne jest prowadzenie racjonalnej gospodarki wodnej realizowanej za pomocą ustalania zasobów dyspozycyjnych w skali hydrogeologicznych jednostek bilansowych i zasobów eksploatacyjnych określanych dla poszczególnych ujęć lub grup ujęć. Zasoby eksploatacyjne stanowią część naturalnych zasobów odnawialnych możliwą do wydobycia w określonych warunkach środowiska oraz warunkach hydrogeologicznych i technicznych.

Podstawowym aktem prawnym regulującym zasady prowadzenia prac geologicznych dla ustalania zasobów wód podziemnych jest ustawa z dnia 4 lutego 1994 r. – Prawo geologiczne i górnicze (Dz. U. Nr 27, poz. 96 z późn. zm.). Ustawa ta, a także wydane na jej podstawie rozporządzenia wykonawcze, zawierają jedynie ramowe zasady dokumentowania zasobów. Krajowe doświadczenia w tym względzie są dużo bogatsze i obfitują w rozwiązania metodyczne godne naśladowania. Zadaniem poradnika jest wykorzystanie tych wieloletnich doświadczeń dla uściślenia zasad ustalania zasobów eksploatacyjnych, z uwzględnieniem potrzeb dwóch podstawowych grup odbiorców, dla których jest on przeznaczony:

- hydrogeologów zajmujących się poszukiwaniem, rozpoznawaniem, oceną i ochroną zasobów wód podziemnych,
- pracowników administracji geologicznej zatwierdzających projekty prac geologicznych i przyjmujących dokumentację hydrogeologiczną.

Odbiorcą poradnika mogą być także pracownicy regionalnych zarządów gospodarki wodnej, którzy co prawda nie są stroną w postępowaniu zmierzającym do ustalania zasobów, ale odpowiadają za gospodarkę wodną w zlewniowym systemie zarządzania i bilansowania zasobów wodnych. Ustalenia zawarte w

dokumentacji zasobów eksploatacyjnych ujęcia stanowią podstawę do wydania przez dyrektora regionalnego zarządu gospodarki wodnej rozporządzenia w sprawie ustanowienia strefy ochronnej ujęcia.

Zdaniem zespołu autorskiego przygotowującego poradnik byłoby pożądane, aby dodatkową grupę odbiorców stanowili przyszli inwestorzy zamawiający wykonanie ujęć wód podziemnych i ustalanie ich zasobów eksploatacyjnych. Podstawowa wiedza inwestora o zasadach ustalania zasobów jest niezbędna na etapie ogłaszania przetargu, wyłaniania wykonawcy prac geologicznych, a potem przy nadzorowaniu i odbiorze prac.

Zgodnie z zamówieniem Departamentu Geologii i Koncesji Geologicznych Ministerstwa Środowiska autorzy dołożyli starań by przedłożona praca nosiła cechy poradnika metodycznego. Niezbędne było jednak przekazanie wielu informacji podręcznikowych, precyzujących, opisujących, bądź wyjaśniających pojęcia, procesy i zjawiska rozwijające się w środowisku wodno-gruntowym. Ten wstępny zakres informacji zgromadzono w rozdziałach 2 i 4. W rozdziale 3 przekazano informacje na temat obowiązującego stanu prawnego dokumentowania zasobów. Kolejne rozdziały – od 5 do 7 mają już cechy poradnika metodycznego, w których zawarto przegląd metod projektowania i wykonywania prac geologicznych zmierzających do ustalenia zasobów eksploatacyjnych wód podziemnych.

Zaprezentowany w poradniku przegląd dostępnych i rekomendowanych metod nie powinien być traktowany jako gotowy schemat postępowania, czy obowiązujące wytyczne. Szereg specyficznych, trudnych problemów może być rozwiązywanych jedynie metodą twórczej kompilacji wielu metod badawczych. Do takich trudnych zadań zaliczamy przede wszystkim dokumentowanie zasobów w rejonach o intensywnej, skupionej eksploatacji, gdzie poszczególne ujęcia współuczestniczą w czerpaniu zasobów tego samego zbiornika wód podziemnych. Zadanie to jest tym bardziej skomplikowane, że wymyka się obecnym regulacjom prawnym, tzn. brak jest prawnie sprecyzowanego sposobu postępowania dla bilansowania zasobów eksploatacyjnych w warunkach współdziałania ujęć, pomimo jasno określonych zasad metodycznych.

Bardzo trudnym zadaniem pozostaje także projektowanie ochrony jakości wód w niekorzystnych warunkach zagospodarowania terenu oraz w niesprzyjających warunkach środowiskowych. Również i w tym przypadku brak jest zadowalających rozwiązań prawnych. Szczególnie istotnie odczuwa się dowolność ustanawiania stref ochronnych dla ujęć o zagrożonej antropogenicznie jakości wód. Pomimo tego, problematyce jakości wód poświęcono w poradniku wiele miejsca. Jest to wyrazem dostosowania się do wymogów Ramowej Dyrektywy Wodnej Unii Europejskiej, która przewiduje, że w racjonalnie prowadzonej gospodarce wodnej na plan pierwszy wysuwa się jakość wód i konieczność jej ochrony przed degradacją. Przytoczone przykłady dokumentowania wskazują jak znaczącą rolę w kształtowaniu się zasobów eksploatacyjnych odgrywają obserwowane w Polsce zjawiska pogarszania się jakości wód podziemnych.

Podsumowaniem pracy jest rozdział 8 zawierający przykłady dokumentowania zasobów eksploatacyjnych w zróżnicowanych warunkach hydrogeologicznych i dla różnej wielkości ujęć. Zasoby tych ujęć były określane i weryfikowane różnymi metodami, a wnioski płynące z tych doświadczeń posłużyły autorom do dokonania oceny stosowanych metod ustalania zasobów eksploatacyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem wiarygodności dokonanych prognoz zasobowych.

Autorzy wyrażają serdeczne podziękowania wszystkim tym, którzy poprzez dyskusje, zgłaszane uwagi i postulaty oraz uwagi krytyczne przyczynili się do ostatecznego kształtu poradnika. Z pewnością dyskusje nad udoskonalaniem metod dokumentowania zasobów eksploatacyjnych będą trwały nadal, co powinno w przyszłości doprowadzić do wypracowania kolejnych, znacznie doskonalszych metod badawczych.

2. Ogólne informacje o zasobach wód podziemnych

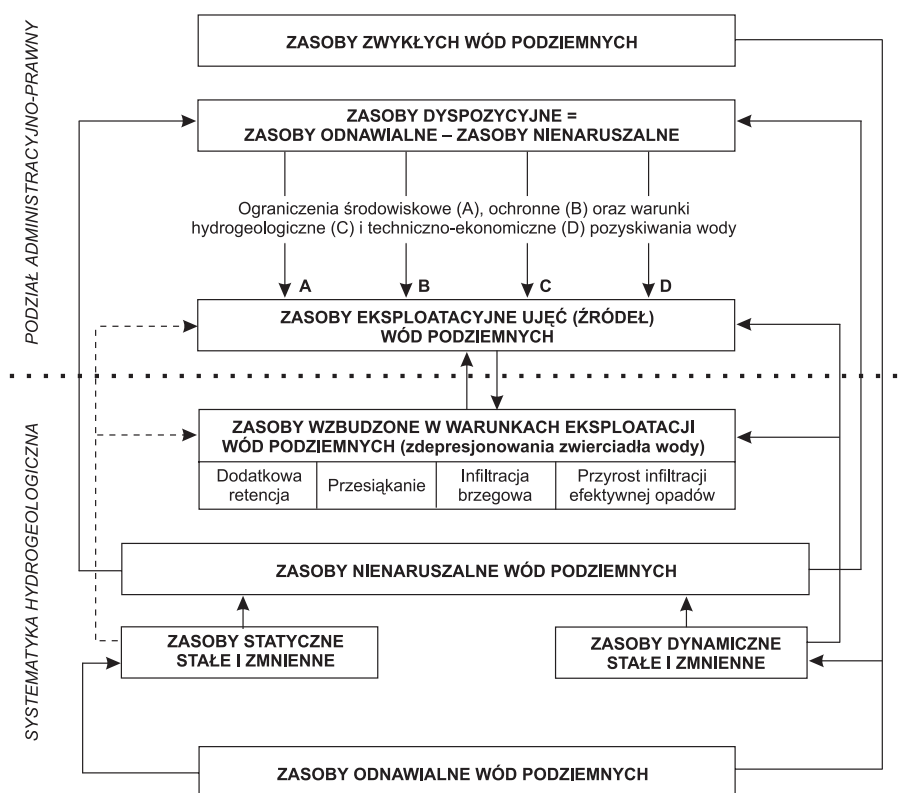
Zasoby wód podziemnych (Słownik..., 2002) to „ilość tych wód traktowana jako surowiec, wyrażana najczęściej w jednostkach objętościowych na jednostkę czasu, zawarta w zbiorniku wód podziemnych, zlewni wód podziemnych lub innej jednostce hydrogeologicznej”. Ogólne podziały zasobów wód podziemnych wynikają z:

- warunków ich powstawania i występowania: zasoby naturalne, zasoby sztuczne,
- stanu hydrodynamicznego: zasoby dynamiczne, zasoby statyczne, zasoby wzbudzone,
- rodzaju i zakresu ich rozpoznania: zasoby odnawialne, zasoby dyspozycyjne, zasoby eksploatacyjne.

Zasoby wodne są zdefiniowane w Międzynarodowym Słowniku Hydrologicznym (WMO – UNESCO, 1992) jako „całość aktualnie i potencjalnie dostępnych wód, o odpowiednich charakterystykach ilościowych i jakościowych, przeznaczona do zaspokojenia określonego zapotrzebowania”.

Na rysunku 2.1 przedstawiono systematykę zasobów wód podziemnych z uwzględnieniem definicji przyrodniczych (Pazdro 1977, 1983, Pazdro, Kozerski, 1990, Słownik..., 2002) w nawiązaniu do pojęć prawnych w brzmieniu podanym w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać dokumentacje hydrogeologiczne i geologiczno-inżynierskie (Dz. U. Nr 153, poz. 1779).

Ze względu na powszechną użytkowość **wód podziemnych**, a więc ich przydatność do celów konsumpcyjnych i gospodarczych w sferze zainteresowań są przede wszystkim **zwykle wody podziemne** (Atlas..., 1995; Słownik..., 2002), tj. wody „o zawartości substancji rozpuszczonych poniżej 1 g/l i temperaturze poniżej 20°C, których ilość możliwą do gospodarczego wykorzystania stanowią **zasoby dyspozycyjne** nagromadzone i odnawialne w zbiornikach wód podziemnych (użytkowych poziomach wodonośnych), i których część może być w określonych warun-



Rys. 2.1. Systematyka zasobów zwykłych wód podziemnych.

kach udokumentowana w postaci **zasobów eksploatacyjnych** ujęć wód podziemnych i źródeł naturalnych”.

Według definicji podanej w cytowanym już rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 roku, **zasoby dyspozycyjne** to ilość wody podziemnej obszaru bilansowego możliwa do zagospodarowania w określonych warunkach środowiska i hydrogeologicznych, bez wskazywania lokalizacji i warunków techniczno-ekonomicznych ujęć.

Z odniesienia do pojęcia **systemu wodonośnego**, zdefiniowanego jako zespół poziomów wodonośnych znajdujących się w kontakcie hydraulicznym (Szymanko, 1980) można przyjąć, że zasoby dyspozycyjne wód podziemnych to część wiarygodnie rozpoznanego zasilania podziemnego rzek i zasobów zmagazynowanych (statycznych i sprężystych) w warstwach wodonośnych w danym obszarze bilansowym. Wielkość tych zasobów określa się w oparciu o obliczenia bilansowe z zastosowaniem regionalnych modeli numerycznych do badania bilansu wód podziemnych. Przy planowaniu eksploatacji zasobów dyspozycyjnych wymagane jest zachowanie warunków niezbędnych do ilościowej i jakościowej ich

ochrony w oparciu o zasadę trwałego użytkowania oraz racjonalnego i całościowego traktowania zasobów wód powierzchniowych i podziemnych (ustawa Prawo wodne, 2001 r.).

Pojęcie **nienaruszalnych zasobów wód podziemnych** odniesione do powyższych zasad ma swoje umocowanie zarówno w powiązaniu z definicją przepływu nienaruszalnego rzeki Q_n (Ozga-Zielińska, Brzeziński, 1997)¹ jak i z ograniczeniem wykorzystania wód podziemnych, wynikającym z dopuszczalnego stopnia przekształcenia układu hydrodynamicznego (zdepresjonowania zwierciadła wód podziemnych i zmianami w obiegu wody).

Przestrzeganie powyższych kryteriów ma na celu:

- ochronę ekosystemów wodnych oraz związanych z nimi terenów podmokłych uzależnionych od stanów wód podziemnych na obszarach objętych ochroną prawną (parki narodowe, rezerваты, parki krajobrazowe, użytki ekologiczne – istniejące i projektowane),
- zachowanie parametrów pracy istniejących ujęć wód podziemnych, lub wprowadzenie jedynie takich zmian w warunkach ich funkcjonowania, które nie doprowadzą do pogorszenia parametrów techniczno-eksploatacyjnych poboru wody (depresja eksploatacyjna, jakość).

W sensie jakościowym z pojęciem zasobów nienaruszalnych wód podziemnych należy wiązać ograniczenia w eksploatacji ujęć na obszarach o geogenicznie uwarunkowanej złej jakości wody lub zagrożonych pogarszaniem jakości poprzez wzbudzenie przemian hydrogeochemicznych. Tym samym ogranicza to możliwość korzystania z odnawialnych zasobów zwykłych wód podziemnych.

Procedura określania zasobów dyspozycyjnych w zbiornikach wód podziemnych wiąże się więc z koniecznością sporządzania bilansu wodnego w obszarach bilansowych. W bilansie określone są zasoby odnawialne wód podziemnych w warunkach zbliżonych do przeciętnych naturalnych oraz uwzględniane ograniczenia hydrogeologiczne i przeciwwskazania w zakresie użytkowania tych wód w związku z potrzebą zachowania przepływu nienaruszalnego w ciekach oraz ochrony ilościowej i jakościowej istniejących ujęć oraz ekosystemów zależnych od wód podziemnych.

W tym rozumieniu jako **zasoby odnawialne** należy przyjmować przede wszystkim ilości wód, pochodzące z opadów atmosferycznych i zasilające systemy wód podziemnych (Paczyński i in., 1995).

¹Zgodnie z podstawową pracą Kostrzewy (1977) przepływem nienaruszalnym Q_n nazywa się graniczną wartość przepływu rzeczno, poniżej której przepływy wody w rzekach nie powinny być zmniejszane na skutek działalności gospodarczej. Przepływ nienaruszalny ustalony jest w poszczególnych przekrojach poprzecznych rzeki, ze względu na potrzeby ochrony środowiska przyrodniczego i życia biologicznego w wodzie oraz wymagania społeczne związane z rekreacją i wypoczynkiem.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 roku stanowi, że zasoby dyspozycyjne ustala się w przypadku:

- sporządzania dokumentacji regionalnej,
- rozpoznawania terenów perspektywicznych do budowy ujęć wód podziemnych,
- ustalania warunków korzystania z wód zlewni lub rejonu wodnego.

Tak więc procedura prawna silnie wiąże ze sobą oba pojęcia: zasoby dyspozycyjne obszaru bilansowego i zasoby eksploatacyjne ujęć wód podziemnych położonych w granicach danego obszaru bilansowego, co odzwierciedlono wzajemną pozycją obu tych pojęć w podanym schemacie klasyfikacyjnym (rys. 2.1). Według schematu wielkość zasobów eksploatacyjnych ujęć wód podziemnych należy ustalać z uwzględnieniem ograniczeń środowiskowych (A), wskazań ochronnych (B), warunków hydrogeologicznych (C) i wreszcie warunków techniczno-ekonomicznych pozyskiwania wody (D).

Te uwarunkowania znajdują odzwierciedlenie w definicji prawnej **zasobów eksploatacyjnych wód podziemnych** – jako „*zasobów możliwych do pobrania z ujęcia w określonych warunkach środowiska oraz warunkach hydrogeologicznych i technicznych, w przyjętej jednostce czasu*” – rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 19.12.2001 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać dokumentacje hydrogeologiczne i geologiczno-inżynierskie (Dz. U. Nr 153, poz. 1779).

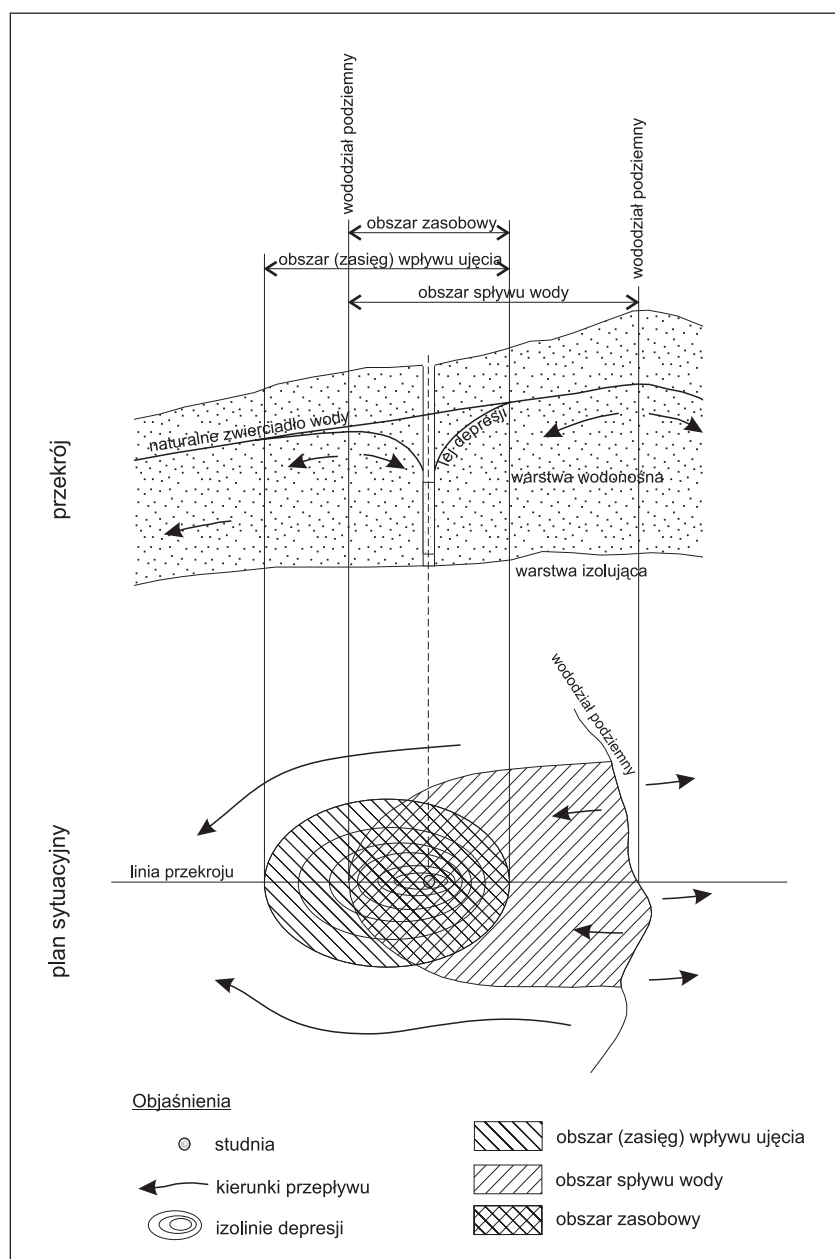
W cytowanym rozporządzeniu zdefiniowano również:

- **ujęcie wód podziemnych** – jako otwór wiertniczy, grupę otworów wiertniczych, obudowane źródło naturalne lub inne wyrobisko konstrukcyjnie przygotowane do korzystania z wód podziemnych,
- **źródło naturalne** – jako samoczynny, naturalny i skoncentrowany wypływ wody podziemnej na powierzchnię terenu.

Z definicją prawną zasobów eksploatacyjnych ściśle są związane dalsze pojęcia a mianowicie: **obszar wpływu ujęcia** (leja depresji), **obszar spływu wody do ujęcia**, **obszar zasilania ujęcia**, **obszar zasobowy ujęcia**, **depresja zwierciadła wody** podziemnej na ujęciu i w jego otoczeniu. Pojęcia te muszą znaleźć swój liczbowy wyraz w każdej ze sporządzanych dokumentacji hydrogeologicznych ustalających zasoby eksploatacyjne ujęcia wód podziemnych. Na rysunku 2.2 przedstawiono schemat graficzny ilustrujący relacje pomiędzy wyżej wymienionymi pojęciami w procesie formowania się zasobów eksploatacyjnych. Zasoby te, zgodnie z ustawą Prawo wodne, podlegają ochronie w sensie nie tylko ilościowym, ale także jakościowym. Wody ujęcia chroni się przez wyznaczenie i ustanowienie strefy ochronnej składającej się z **terenu ochrony bezpośredniej** oraz **terenu ochrony pośredniej**, który obejmuje obszar zasilania ujęcia. Jeżeli jednak czas przepływu wody od granicy zasilania do ujęcia jest dłuższy niż 25 lat, strefa ochronna powinna obejmować obszar wyznaczony 25-letnim czasem wymiany wody w eksploatowanym zbiorniku wód (warstwie wodonośnej). Przebieg izochrony 25-letniego przepływu wody mieści się w granicach obszaru spływu wody do ujęcia. Metodykę projektowania stref ochronnych ujęć wód podziem-

nych zaprezentowali T. Macioszczyk i inni w opracowanym w 1993 r. poradniku metodycznym.

Obszar wpływu ujęcia (w zasięgu depresji zwierciadła wody podziemnej) to obszar w otoczeniu ujęcia, w którym w wyniku pompowania (czerpania) wody nastę-



Rys. 2.2. Pojęcia związane z dopływem wody do ujęcia pracującego w pojedynczej warstwie wodonośnej.

puje zmiana parametrów strumienia takich jak: wysokość hydrauliczna oraz prędkość i/lub kierunek filtracji. W obliczeniach analitycznych wyznacza się zasięg tego obszaru, utożsamiany najczęściej z promieniem leja depresji, przy uwzględnieniu naturalnego spadku hydraulicznego strumienia wód podziemnych w ujmowanym poziomie (warstwie) wodonośnym. Wyznaczenie obszaru wpływu ujęcia jest w dokumentowaniu zasobów konieczne i wiąże się z uwzględnieniem interesów innych użytkowników zasobów wód podziemnych oraz w związku z ewentualnym oddziaływaniem ich eksploatacji na środowisko przyrodnicze człowieka.

Obszar spływu wody do ujęcia to część wyznaczonego pola hydrodynamicznego w granicach obszaru zasilania ujętego poziomu wodonośnego (warstwy wodonośnej) z liniami prądu zbiegającymi się na ujęciu, a więc obszar z którego strumienie wód podziemnych, w tym zasilane z infiltracji opadów, a także z infiltracji wód powierzchniowych, kierują się do ujęcia.

Obszar zasilania ujęcia wód podziemnych obejmuje część przestrzeni systemu wodonośnego (x, y, z), w której formuje się dopływ do ujęcia zarówno z ujętej warstwy (poziomu wodonośnego) jak i z warstw towarzyszących nad i podległych wraz z warstwami słabo przepuszczalnymi. W przypadku schematu jednowarstwowego (x, y) obszar zasilania jest równoważny obszarowi spływu wody do ujęcia, wyznaczonego na podstawie siatki hydrodynamicznej przepływu wód podziemnych.

Obszar zasobowy ujęcia wód podziemnych to obszar w obrębie zbiornika wód podziemnych określony zasięgiem spływu wód podziemnych do ujęcia, w obrębie którego formuje się zasadnicza część zasobów eksploatacyjnych ujęcia (Słownik..., 2002). Przyjęto, że w jego granicach powstaje 50-70 % wielkości zasobów. Zasięg obszaru zasobowego określa umownie granica obszaru wpływu ujęcia lub co najmniej izochrona 25-letniego przepływu wody podziemnej, gdy granica obszaru spływu wody sięga poza tę izochronę. Ustalenie granicy obszaru zasobowego, oprócz pokazania jej na mapie dokumentacyjnej, wymaga każdorazowo szczegółowego uzasadnienia w tekście dokumentacji. Sposoby określania obszaru zasobowego oraz obszaru wpływu ujęcia bliżej przedstawiono w rozdziale 6.2.

Depresja zwierciadła wody (s) to obniżenie powierzchni zwierciadła wody podziemnej wywołane pompowaniem studni i wyrażone przez różnicę stanów zwierciadła statycznego i zwierciadła dynamicznego. Depresja zwierciadła wody w warstwie wodonośnej mierzona w strefie przyfiltrowej pompowanej studni nazywana jest **depresją rzeczywistą** (s_w). Depresja zwierciadła wody mierzona wewnątrz studni jest powiększona w stosunku do depresji rzeczywistej o depresję dodatkową (Δs – zeskok hydrauliczny) i nosi nazwę **depresji całkowitej** (s_c):

$$s_c = s_w + \Delta s$$

W przypadku studni współdziałających zachodzi ponadto konieczność wyznaczenia depresji wypadkowej i depresji rejonowej:

- **depresja wypadkowa ujęcia** (s_u) to wielkość obniżenia statycznego zwierciadła wody podziemnej w „środku ciężkości” poboru wody wywołana interferencją lejów depresji studni współdziałających,
- **depresja rejonowa ujęcia** (s_{rej}) to wielkość obniżenia statycznego zwierciadła wody podziemnej wyrażona wartością izolinii depresji (w przypadku ujęć konturowych na promieniu wielkiej studni), obejmującej wszystkie współdziałające studnie ujęcia.

Niejednokrotnie istnieje konieczność określenia **depresji dopuszczalnej** w studni (s_{dop}), która ma chronić ujęcie przed geogenicznym lub antropogenicznym zagrożeniem jakości, oraz zapewnić ochronę terenu przed nadmierną zmianą stosunków wodnych. Dla warstw o zwierciadle napiętym niepożądane jest obniżanie dynamicznego zwierciadła wody poniżej spągu utworów napinających, a dla warstw o zwierciadle swobodnym o wartość przekraczającą 0,4 pierwotnej miąższości ujętej warstwy.

Średnia wielkość obniżenia pierwotnego statycznego zwierciadła wody podziemnej w obrębie jednostki hydrogeologicznej, wywołana współdziałaniem większej liczby eksploatowanych ujęć i/lub systemów odwadniających kopalń, stanowi **depresję regionalną** (s_{reg}). Depresja regionalna jest najczęściej wyznaczana na podstawie wieloletnich obserwacji stacjonarnych bez uwzględniania depresji w samych ujęciach (studniach). Przy dokumentowaniu zasobów eksploatacyjnych wód podziemnych znajdujących się w zasięgu depresji regionalnej należy liczbowo wskazać wielkość tej depresji w miejscu lokalizacji danego ujęcia.

Ujęcia wód podziemnych zlokalizowane w naporowych i swobodnych poziomach wodonośnych wykorzystują część ich **zasobów dynamicznych** (Z_d), a więc część z ilości wody, która w określonej jednostce czasu przepływa przez przekrój poprzeczny danego poziomu wodonośnego. Zasoby dynamiczne zmieniają się w czasie w zależności od reżimu hydrodynamicznego określonego warunkami zasilania i drenażu warstw wodonośnych i dlatego wyróżniamy dodatkowo:

- **zasoby dynamiczne stałe** (Z_{ds}) określone najmniejszym natężeniem przepływu wody podziemnej przez przekrój poziomu wodonośnego przy najniższym w okresie wieloletnim stanie zwierciadła wody podziemnej,
- **zasoby dynamiczne zmienne** (Z_{dz}) odpowiadające ilości wody, która stanowi różnicę przepływu przez przekrój poziomu wodonośnego przy najniższych i najwyższych stanach zwierciadła wody w okresie wieloletnim.

W początkowej fazie eksploatacji każdego ujęcia, w okresie formowania się leja depresji, część czerpanej wody pochodzi z **zasobów statycznych** (Z_{st}) a więc z objętości wody podziemnej zmagazynowanej w osuszanych skałach w przypadku warstwy wodonośnej o zwierciadle swobodnym lub też z uwolnienia się **zasobów sprężystych** (Z_{sp}) w granicach leja depresji (zmiana ciśnień piezometrycznych) w przypadku warstw wodonośnych o zwierciadle naporowym. W odniesieniu do zasobów statycznych, podobnie jak to miało miejsce przy zasobach dynamicznych, można mówić o **zasobach statycznych stałych** (Z_{sts}) i **zasobach statycz-**

nych zmiennych (Z_{stz}) w nawiązaniu do skrajnych stanów położenia zwierciadła wody podziemnej określających poziom retencji zasobów wodnych.

Ujęcie wód podziemnych korzystające trwale tylko z zasobów dynamicznych charakteryzuje się **prostymi warunkami zasilania**. Gdy formujący się lej depresji zaczyna wpływać na składniki bilansowe zasilania ujęcia, wówczas mamy do czynienia ze **złożonymi warunkami zasilania** z udziałem **wzbudzonych zasobów wód podziemnych**, zwanych też dodatkowymi (rys. 2.1). Wzbudzenie dodatkowych zasobów w warunkach obniżenia zwierciadła wody podziemnej w rejonie ujęcia jest możliwe na skutek:

- dodatkowej retencji związanej z magazynowaniem w leju depresji wód w okresie ich wysokich stanów (przyrost zasobów statycznych zmiennych),
- przesiąkania wody przez utwory słabo przepuszczalne do ujętej warstwy wodonośnej z niższej i wyżej położonych warstw wodonośnych,
- wzbudzenia infiltracji wód powierzchniowych głównie z koryt rzecznych, w mniejszym stopniu ze zbiorników wód stojących (naturalnych lub sztucznych) do ujętych warstw wodonośnych,
- zmniejszenia się ewapotranspiracji w obszarze leja depresji, gdzie uprzednio zwierciadło wody pozostawało blisko powierzchni terenu (tarasy zalewowe) i przyrostu infiltracji efektywnej opadów atmosferycznych na tym obszarze.

Tak więc, gdy eksploatacja ujęcia wód podziemnych będzie skutkować pojawieniem się zasobów wzbudzonych jako dodatkowego składnika jego zasilania, to wówczas w sporządzanej dokumentacji hydrogeologicznej musi być przedstawiony pełen bilans zasilania umożliwiający określenie, jaka część zasobów eksploata-

Tabela 2.1. Składniki zasilania zasobów eksploatacyjnych ujęć wód podziemnych.

	Symbol	Rodzaj składnika zasilania zasobów eksploatacyjnych ujęcia wody
Zasoby dynamiczne	a	Infiltracja efektywna opadów na obszar spływu wody do ujęcia w granicach obszaru zasobowego
	b	Dopływ boczny w warstwie wodonośnej spoza obszaru zasobowego
Zasoby wzbudzone	c	Dodatkowa retencja z magazynowania w leju depresji wód w okresie ich wysokich stanów
	d	Przesiákanie z warstw sąsiednich (nad- i podległych) w stosunku do ujętej warstwy wodonośnej
	e*	Infiltracja wód powierzchniowych
	f	Przyrost infiltracji efektywnej na skutek zmniejszenia się ewapotranspiracji w obszarze leja depresji

*W przypadku, gdy udział składnika „e” w bilansie zasilania ujęcia przekracza 50%, to ujęcie nazywane jest infiltracyjnym.

cyjnych pochodzi ze wskazanych składników zasobów wzbudzonych (rys. 2.1). Problematyka uaktywniania zasobów wzbudzonych jest bardzo złożona w szczególności, gdy dotyczy ujęć wód podziemnych zlokalizowanych w dolinach rzecznych. Składniki zasilania w różnym nasileniu uczestniczą w zasobach eksploatacyjnych tych ujęć, wprowadzając bardzo istotne i często niepożądane zmiany w jakości czerpanych wód. Określenie udziału tych składników w wydajności ujęcia oraz ocena ich wpływu na warunki eksploatacji i ochrony zasobów wymagają dobrego rozpoznania i interpretacji wyników badań hydrogeologicznych.

W nawiązaniu do planszy zasobowej, przedstawionej na rysunku 2.1, w tabeli 2.1 zestawiono podstawowe składniki zasilania ujęć wód podziemnych z uwzględnieniem zasobów dynamicznych i zasobów wzbudzonych.

3. Przepisy prawne i procedury obowiązujące przy dokumentowaniu zasobów eksploatacyjnych ujęć wód podziemnych

Zasady wykonywania prac geologicznych reguluje ustawa z dnia 4 lutego 1994 r. – Prawo geologiczne i górnicze (Dz. U. Nr 27, poz. 96 z późn. zm.). W rozumieniu ustawy pracą geologiczną jest „projektowanie i wykonywanie badań w celu ustalenia budowy geologicznej kraju, a zwłaszcza **poszukiwania i rozpoznawania** złóż kopalin, **wód podziemnych**, określania warunków geologiczno-inżynierskich oraz sporządzania map i dokumentacji geologicznych”. Robotą geologiczną jest „wykonywanie w ramach prac geologicznych wszelkich czynności poniżej powierzchni ziemi...”. Przez **poszukiwanie** rozumie się „wykonywanie prac geologicznych w celu odkrycia i wstępnego udokumentowania zasobów złóż kopalin lub wód podziemnych”, zaś **rozpoznawaniem** jest „wykonywanie prac geologicznych na obszarze wstępnie udokumentowanego złoża kopaliny lub wód podziemnych”.

W myśl powyższych definicji, dokumentując zasoby eksploatacyjne wód podziemnych zajmujemy się ich rozpoznawaniem. Wynika to z faktu, że prace poszukiwawcze, polegające na wstępnym udokumentowaniu występowania wód podziemnych, możemy uznać za wykonane na obszarze całego kraju, czego wyrazem jest pełne pokrycie kraju szczegółową mapą hydrogeologiczną w skali 1:50 000 oraz formalno-prawne uznanie najważniejszych zbiorników za główne (GZWP) i konieczność ochrony ich zasobów (rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10.12.2002 r. w sprawie przebiegu granic obszarów dorzeczy, przyporządkowania zbiorników wód podziemnych do właściwych obszarów dorzeczy, utworzenia regionalnych zarządów gospodarki wodnej oraz podziału obszarów dorzeczy na regiony wodne – Dz. U. Nr 232, poz. 1953). W szczególnych przypadkach, gdy stopień rozpoznania hydrogeologicznego jest niewystarczający dla właściwego

przewodzenia prac rozpoznawczych, poprzedza się je pracami poszukiwawczymi (otwory poszukiwawcze) umożliwiającymi wstępne rozpoznanie struktury hydrogeologicznej.

Najważniejsze uregulowania szczegółowe dotyczące rozpoznawania zasobów zawarte są w rozporządzeniach wydanych na podstawie ustawy Prawo geologiczne i górnicze:

- rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001r. w sprawie projektów prac geologicznych (Dz. U. Nr 153, poz. 1777),
- rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać dokumentacje hydrogeologiczne i geologiczno-inżynierskie (Dz. U. Nr 153, poz. 1779),
- rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie kategorii prac geologicznych, kwalifikacji do wykonywania, dozoru i kierowania tymi pracami oraz sposobu postępowania w sprawach stwierdzenia kwalifikacji (Dz. U. Nr 153, poz. 1776),
- rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie gromadzenia i udostępniania próbek i dokumentacji geologicznych (Dz. U. Nr 153, poz. 1780),
- rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 grudnia 2001 r. w sprawie określenia przypadków, w których jest konieczne sporządzenie innej dokumentacji geologicznej (Dz. U. Nr 152, poz. 1741),
- rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie sposobu i zakresu wykonywania obowiązku udostępniania i przekazywania informacji oraz próbek organom administracji geologicznej przez wykonawcę prac geologicznych (Dz. U. Nr 153, poz. 1781).

Z ustawy Prawo geologiczne i górnicze oraz przytoczonych aktów wykonawczych wynika konieczność:

- a. prowadzenia prac geologicznych tylko przez osoby posiadające odpowiednie kwalifikacje (w odniesieniu do poszukiwania i rozpoznawania wód podziemnych kat. IV i V),
- b. wykonywania prac geologicznych obejmujących roboty geologiczne tylko na podstawie **zatwierdzonego** projektu prac geologicznych,
- c. przedstawienia wyników prac w dokumentacji geologicznej, która jest **przyjmowana** przez odpowiedni organ administracji geologicznej.

Organami administracji geologicznej właściwymi w sprawach ustalania zasobów eksploatacyjnych są:

- wojewodowie, którzy zatwierdzają projekty oraz przyjmują dokumentacje jeśli przewidywana wydajność lub udokumentowane zasoby przekraczają 50 m³/h,
- starostowie (lub burmistrzowie i prezydenci miast na prawach powiatu), którzy zatwierdzają projekty oraz przyjmują dokumentacje dla ujęć o przewidywanej wydajności lub udokumentowanych zasobach nie przekraczających 50 m³/h.

Do zadań administracji geologicznej należy również sprawowanie nadzoru nad projektowaniem i wykonywaniem prac geologicznych. W przypadku stwierdzenia prowadzenia działalności bez zatwierdzonego projektu prac lub niezgodnie z zatwierdzonym projektem, organ administracji geologicznej nakazuje wstrzymanie działalności. W stosunku do osób fizycznych wykonujących prace z rażącym niedbalstwem bądź z rażącym naruszeniem prawa organ ten może zakazać na okres do 2 lat wykonywania prac geologicznych, do wykonywania których osoby te mają stwierdzone kwalifikacje.

Organem państwowego nadzoru górniczego, który wydaje decyzje o zezwoleniu na wykonywanie robót geologicznych (prace wiertnicze) oraz zatwierdza plan ruchu zakładu górniczego jest dyrektor okręgowego urzędu górniczego. Zezwolenie nie jest wymagane w przypadku wierceń wykonywanych poza granicami obszaru górniczego, albo gdy projektowana głębokość nie przekracza 100 m. Do wykonywania wszelkich robót geologicznych stosuje się odpowiednio przepisy o ruchu zakładu górniczego, niezależnie od tego, czy plan ruchu zakładu jest wymagany, czy też nie. Oznacza to np. obowiązek spełnienia wymagań określonych w art. 68 Prawa geologicznego i górniczego dotyczących kwalifikacji osób sprawujących kierownictwo i dozór ruchu. W trakcie trwania wszystkich robót zgłoszonych do okręgowego urzędu górniczego podlegają one nadzorowi i kontroli tego urzędu w szczególności w zakresie: bezpieczeństwa pracy i bezpieczeństwa pożarowego, ochrony środowiska, zapobiegania szkodom i rekultywacji terenu po zakończeniu robót.

Istotne wymogi dotyczące dokumentowania zasobów wód podziemnych wpływają także z ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska (Dz. U. Nr 62, poz. 627 z późn. zm.) Dzieli ono wszelkie planowane przedsięwzięcia na dwie grupy:

1. przedsięwzięcia mogące znacząco oddziaływać na środowisko, dla których wymagane jest sporządzenie raportu o oddziaływaniu na środowisko,
2. przedsięwzięcia, dla których sporządzenie raportu nie jest obligatoryjne.

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 24 września 2002 r. w sprawie *określenia rodzajów przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko, oraz szczegółowych kryteriów związanych z kwalifikowaniem przedsięwzięć do sporządzenia raportu o oddziaływaniu na środowisko* (Dz. U. Nr 179, poz. 1490) precyzuje, że – w odniesieniu do wód podziemnych – do pierwszej grupy zaliczamy przedsięwzięcia polegające na *poborze wód podziemnych, budowie systemów odwadniających lub sztucznych systemów zasilania wód podziemnych, o wydajności co najmniej 500 m³/h*, zaś do grupy drugiej przedsięwzięcia polegające na:

- *poborze wód podziemnych lub budowie sztucznych systemów zasilania wód podziemnych, o wydajności co najmniej 10 m³/h,*
- *wierceniach wykonywanych w celu zaopatrzenia ludności w wodę do spożycia, o głębokości przekraczającej 100 m.*

O tym, czy w przypadku zamierzonego poboru wód podziemnych należy wykonywać raport o oddziaływaniu na środowisko decyduje odpowiedni organ wydają-

cy decyzje w sprawie pozwolenia wodnoprawnego (art. 51 ust. 2 ustawy Prawo ochrony środowiska). Nie jest natomiast wprost powiedziane, kto i na jakim etapie postępowania zmierzającego do ustalenia zasobów wód podziemnych wydawać ma podobną decyzję w sprawie prac wiertniczych. W katalogu decyzji wymagających przeprowadzenia procedury oceny oddziaływania na środowisko nie została wymieniona decyzja zatwierdzająca projekt prac geologicznych. Tym samym wykazanie wierceń w katalogu przedsięwzięć, dla których może być wymagane sporządzenie raportu o oddziaływaniu na środowisko pozostaje przepisem martwym, bo nie znajduje zastosowania w postępowaniu administracyjnym.

Na wykonawców prac i robót geologicznych nałożonych jest także szereg obowiązków wynikających z ustawy z dnia 18 lipca 2001 r. – Prawo wodne (Dz. U. Nr 115, poz. 1229). W myśl ustawy, pobór wód podziemnych wymaga uzyskania **pozwolenia wodnoprawnego** za wyjątkiem przypadku zaspokajania potrzeb własnego gospodarstwa domowego oraz gospodarstwa rolnego (pod warunkiem jednak, że grunt, na którym zlokalizowane jest ujęcie wody należy do właściciela ujęcia i urządzenia do poboru wody nie umożliwiają poboru w ilości większej niż 5 m³/d). Nie stosuje się ustawy Prawo wodne do poszukiwania i rozpoznawania wód podziemnych (art. 8 ust. 1). Oznacza to, że nie jest wymagane pozwolenie wodnoprawne na odprowadzanie wód z próbnych pompowań badawczych. Prawo wodne ustanawia natomiast obowiązek ochrony jakości wód. W odniesieniu do wód podziemnych ujmowanych do zaopatrzenia ludności w wodę przeznaczoną do spożycia wprowadza możliwość ustanawiania **stref ochronnych** ujęć, które dzielą się na tereny ochrony bezpośredniej i pośredniej. Zgodnie z Prawem wodnym teren ochrony pośredniej ujęcia wyznacza się na podstawie danych zawartych w dokumentacji hydrogeologicznej ujęcia.

Wymagania jakościowe dla wód do picia określa rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 19 listopada 2002 r. w sprawie wymagań dotyczących jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz. U. Nr 203, poz. 1718). W ramach dostosowywania aktów prawnych do wymogów Unii Europejskiej realizowane jest obecnie zalecenie zmiany klasyfikacji jakości wód.

Przy projektowaniu i wykonywaniu robót wiertniczych, oprócz Prawa geologicznego i górniczego, Prawa wodnego oraz Prawa ochrony środowiska (i wynikających z nich aktów wykonawczych), należy uwzględniać także wymogi wynikające z innych ustaw i rozporządzeń związanych z ochroną środowiska i bezpieczeństwem prowadzenia prac. Są one zawarte w następujących aktach prawnych:

- ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Dz. U. Nr 80, poz. 717),
- ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach (Dz. U. Nr 62, poz. 628 z późn. zm.),
- ustawa z dnia 16 października 1991 r. o ochronie przyrody (Dz. U. Nr 99, poz. 1079 z późn. zm.),
- rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego

zabezpieczenia przeciwpożarowego w zakładach górniczych wydobywających kopaliny otworami wiertniczymi (Dz. U. Nr 109, poz. 961),

- rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 14 czerwca 2002 r. w sprawie planów ruchu zakładów górniczych (Dz. U. Nr 94, poz. 840),
- rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (Dz. U. Nr 212, poz. 1799),
- rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz. U. Nr 112, poz. 1206),
- rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 30 października 2002 r. w sprawie rodzaju odpadów, które mogą być składowane w sposób nieselektywny (Dz. U. Nr 191, poz. 1595),
- rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 28 maja 2002 r. w sprawie listy rodzajów odpadów, które posiadacz odpadów może przekazywać osobom fizycznym lub jednostkom organizacyjnym nie będącym przedsiębiorcami, do wykorzystania na ich własne potrzeby (Dz. U. Nr 74, poz. 686),
- rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 czerwca 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich użytkowanie (Dz. U. Nr 75, poz. 690).

W oparciu o wymienione akty prawne wskazać można **procedury i najważniejsze etapy** obowiązujące przy dokumentowaniu zasobów wód podziemnych:

1. Opracowanie i zatwierdzenie projektu prac geologicznych

Projekt w ilości 4 egzemplarzy przekazuje do zatwierdzenia podmiot, który sfinansował jego wykonanie. Może to być również wykonawca prac posiadający pełnomocnictwo zamawiającego. Projekt zatwierdza w drodze decyzji właściwy organ administracji geologicznej: starosta dla ujęć o przewidywanej wydajności nie przekraczającej 50 m³/h lub wojewoda dla ujęć o przewidywanej wydajności ponad 50 m³/h. Organ zatwierdzający ocenia zgodność projektu z wymaganiami prawa, określonymi w szczególności w ustawie Prawo geologiczne i górnicze i rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać dokumentacje hydrogeologiczne i geologiczno-inżynierskie (Dz. U. Nr 153, poz. 1779). Wydanie decyzji zatwierdzającej projekt wymaga zasięgnięcia opinii wójta, burmistrza lub prezydenta miasta. Projekt jest zatwierdzany na czas oznaczony.

2. Sporządzenie i następnie zatwierdzenie planu ruchu zakładu górniczego

Plan ruchu jest niezbędny dla otworów, które mają być zlokalizowane w granicach obszaru górniczego lub gdy projektowana głębokość przekracza 100 m. W pozostałych przypadkach wiercenie odbywa się w oparciu o zatwierdzony projekt prac geologicznych. Plan ruchu przedstawia się dyrektorowi okręgowego urzędu górniczego, który wydaje w drodze decyzji zezwolenie na wykonywanie robót geologicznych. Szczegółowe wymagania dotyczące sporządzania pla-

nów ruchu zawiera rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 14 czerwca 2002 r. w sprawie planów ruchu zakładów górniczych (Dz. U. Nr 94, poz. 840).

3. Realizacja projektu prac geologicznych: prace wiertnicze, badania terenowe, próbné pompowania

Zamiar przystąpienia do wykonywania prac wiertniczych należy zgłosić urzędowi górnictwu oraz zarządowi gminy. Zgłoszenie zawierać powinno terminy rozpoczęcia i zakończenia prac, ich rodzaj oraz dane dotyczące osób sprawujących dozór i kierownictwo prac.

Przeprowadzenie próbnego pompowania wymaga poczynienia przez prowadzącego prace geologiczne odpowiednich uzgodnień dotyczących odprowadzenia wody z pompowania. W zależności od sposobu odprowadzenia mogą to być uzgodnienia z właścicielem kanalizacji, administratorem cieku, bądź właścicielem nieruchomości, przez którą przebiegają urządzenia odprowadzające.

4. Sporządzenie dokumentacji hydrogeologicznej

Dokumentacja zawiera omówienie i podsumowanie przeprowadzonych prac i badań. W szczególności w dokumentacji należy szczegółowo przedstawić obliczenia hydrogeologiczne wykonane dla ustalenia zasobów wód podziemnych. Dokumentacja powinna zawierać także wskazanie zasad ochrony jakości wód, w tym uzasadnienie potrzeby ustanowienia strefy ochronnej ujęcia.

W przypadku wykonania studni zastępczej lub awaryjnej (zgodnie z definicjami przedstawionymi w §8, pkt 3 rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać dokumentacje hydrogeologiczne i geologiczno-inżynierskie – Dz. U. Nr 153, poz. 1779) zamiast dokumentacji sporządza się dodatek do już istniejącej dokumentacji geologicznej.

5. Przekazanie dokumentacji do właściwego organu administracji geologicznej

Dokumentację przekazuje się w 4 egzemplarzach. Dla ujęć o udokumentowanych zasobach nie przekraczających 50 m³/h właściwym organem administracji jest starosta powiatowy, dla pozostałych – wojewoda. Dokumentację przekazuje finansujący prace geologiczne, niemniej jednak zadanie to może być również wykonane przez wykonawcę prac posiadającego pełnomocnictwo zamawiającego.

6. Przyjęcie dokumentacji

Organ administracji geologicznej w terminie 2 miesięcy od otrzymania dokumentacji zawiadamia pisemnie o przyjęciu dokumentacji bez zastrzeżeń, lub – jeśli dokumentacja nie odpowiada wymogom prawnym – żąda, w drodze decyzji, jej uzupełnienia lub poprawienia. Brak zawiadomienia w wymaganym terminie w praktyce oznacza przyjęcie dokumentacji bez zastrzeżeń. Organ administracji przyjmujący dokumentację powinien m.in. ocenić jej zgodność z wymogami prawa określonymi w szczególności w ustawie Prawo geologiczne i górnicze i rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać dokumentacje

hydrogeologiczne i geologiczno-inżynierskie (Dz. U. Nr 153, poz. 1779), a także zgodność wykonanych prac dokumentacyjnych z zakresem przewidzianym do wykonania w zatwierdzonym projekcie prac geologicznych.

Ten etap kończy procedurę ustalania zasobów. W przypadku zamierzonego szczególnego korzystania z wód, użytkownik ujęcia zobowiązany jest uzyskać pozwolenie wodnoprawne na pobór wód, które jest jednocześnie pozwoleniem na wykonanie urządzeń wodnych służących do poboru wody.

4. Hydrogeologiczne podstawy oceny zasobów eksploatacyjnych

4.1. Warunki hydrogeologiczne i ich schematyzacja

Wodoprzepuszczalność i pojemność wodna utworów wodonośnych wynika z charakteru, rodzaju i gęstości występowania połączonych pustek skalnych, którymi odbywa się przepływ wody wolnej. Ich geometria i wielkość decydują o tym, z jakimi rodzajami zbiorników wód podziemnych mamy do czynienia. Wśród tych zbiorników wyróżnia się zbiorniki: porowe, szczelinowe, porowo-szczelinowe, szczelinowo-krasowe i porowo-szczelinowo-krasowe.

Szacowanie zasobów eksploatacyjnych ujęć wód podziemnych wymaga rozważenia wielu zagadnień, które rzutują na ilościową ocenę przepływu strumienia filtracyjnego. Przepływ ten odbywa się często w skomplikowanych systemach wodonośnych, obejmujących różne utwory hydrogeologiczne: przepuszczalne, słabo przepuszczalne i nieprzepuszczalne.

Podstawową jednostką hydrogeologicznej schematyzacji strukturalnej jest warstwa wodonośna, która może mieć charakter warstwy pojedynczej o zwierciadle swobodnym, lub naporowym, względnie mogą występować warstwy związane hydraulicznie, o różnym stopniu tej więzi, tworzące poziomy wodonośne.

Przy schematyzacji hydrogeologicznej należy pamiętać również o wpływie bocznych granic warstw wodonośnych na kształtowanie się warunków hydrodynamicznych. Warstwy wodonośne mogą być ograniczone jedną lub więcej granicami typu szczelnego (sedymentacyjna, erozyjna, uskok, itp.) lub granicami o charakterze zasilającym (koryto rzeczne, brzeg jeziora i inne). Rozprzestrzenienie warstwy ma w stosunku do ujęcia wody podziemnej swoje ograniczenie obliczeniowe wówczas, gdy hydrodynamiczny wpływ zakładanej eksploatacji sięgnie do jej granic.

Schematyzacji wymagają również:

- warunki zasilania ujęcia (infiltracja efektywna opadów atmosferycznych, przesiekanie wody z warstw sąsiednich, infiltracja wód powierzchniowych),

- konstrukcja ujęcia (studnie zupełne, niezupełne itd.),
- strumienie wód podziemnych dopływających do ujęcia,
- rodzaje ruchu wód w trakcie badań i późniejszej eksploatacji ujęcia.

W tabeli 4.1-1 zestawiono podstawowe zagadnienia związane ze schematyzacją hydrogeologiczną na potrzeby obliczeń zasobów eksploatacyjnych wód podziemnych. W dalszej części tekstu podano charakterystyki wymienionych elementów wraz z odwołaniem się do pozycji literatury bliżej omawiającej podniesione zagadnienia.

Tabela 4.1-1. Podstawowe czynniki i procesy uwzględniane w schematyzacji hydrogeologicznej na potrzeby obliczeń zasobów eksploatacyjnych wód podziemnych.

Wodoprzepuszczalność skał ☐ utwory przepuszczalne ☐ utwory słabo przepuszczalne, w tym półprzepuszczalne ☐ utwory nieprzepuszczalne Rodzaje zbiorników wód podziemnych ze względu na typy pustek skalnych ☐ porowe ☐ szczelinowe ☐ porowo-szczelinowe ☐ szczelinowo-krasowe ☐ porowo-szczelinowo-krasowe Warstwy i poziomy wodonośne Warstwy pojedyncze: ☐ o zwierciadle swobodnym ☐ o zwierciadle naporowym Poziomy wodonośne – warstwy związane hydraulicznie: ☐ o pełnej więzi hydraulicznej ☐ o więzi ograniczonej poprzez osady słabo przepuszczalne ☐ o więzi strefowej poprzez okna hydrogeologiczne Warunki zasilania ujęcia i granice warstw wodonośnych Infiltracja efektywna opadów atmosferycznych: ☐ na całej powierzchni obszaru spływu wody do ujęcia ☐ strefowa (okna hydrogeologiczne, wychodnie itp.) Przesiśkanie wody z warstw sąsiednich do ujętej warstwy wodonośnej przez osady słabo przepuszczalne: ☐ z nadległej warstwy wodonośnej ☐ z podścielającej warstwy wodonośnej	Infiltracja wód powierzchniowych ☐ naturalna z koryt rzecznych i jezior ☐ sztuczna z urządzeń technicznych Granice boczne warstw wodonośnych ☐ warstwa nieograniczona ☐ granica zasilająca ($H = \text{const.}$ lub $H = f(t)$) ☐ granica szczelna ($Q = 0$) Schematyzacja strumienia przy dopływie wody do studni ☐ filtracja dwuosiowa, w tym płasko-radialna ☐ filtracja trójosiowa, w tym sferyczno-radialna Warunki dopływu wód podziemnych do ujęcia Filtracja ustalona ☐ schemat <i>Dupuita</i> dla strumienia naporowego (o stałej przewodności) ☐ schemat <i>Dupuita</i> dla strumienia swobodnego o jednorodnej przepuszczalności ☐ schemat ustalonych warunków przesiśkania Filtracja nieustalona ☐ schemat <i>Theisa</i> dla strumienia naporowego i swobodnego (w przybliżeniu), przy braku przesiśkania ☐ schemat <i>Hantusha</i> dla strumienia naporowego i stałych warunków przesiśkania ☐ schemat <i>Boultona</i> dla strumienia naporowego i mieszanego, przy zmiennych warunkach przesiśkania i odsączania
---	--

4.1.1. Wodoprzepuszczalność skał i ich cechy zbiornikowe

W podziale skał pod względem właściwości filtracyjnych bierze się pod uwagę ich **wodoprzepuszczalność** (Słownik..., 2002), wyrażaną **współczynnikiem filtracji poziomej (k)** i **współczynnikiem filtracji pionowej ($k_z = k'$)**. Utwory przepuszczalne, zachowują na ogół duży stopień izotropii swoich właściwości filtracyjnych w planie ($k_x \approx k_y$), natomiast mogą być ekranowane od góry i od dołu utworami słabo- i półprzepuszczalnymi izolującymi je w różnym stopniu (k').

W tabeli 4.1-2 przytoczono właściwości filtracyjne skał według klasyfikacji stosowanych w odniesieniu do filtracji poziomej (wodonośność) i filtracji pionowej (izolacyjność, przesiąkalność). Zestawienie to może być przydatne do wstępnego szacowania zasobności warstw wodonośnych i ich odporności na zanieczyszczenie w przypadku występowania nadkładu o różnym stopniu izolacyjności.

O przestrzeni wolnej w skale dla ruchu wód podziemnych w określonych zbiornikach decydują trzy główne typy pustek: pory, szczeliny i kawerny. Ogólne definicje poszczególnych typów pustek są formułowane przy zastosowaniu kryterium geometrycznego i podawane w podręcznikach hydrogeologii (Pazdro, Kozerski, 1990). Z obecnością określonych typów pustek w skałach wiążą się specyficzne ich parametry oraz reakcja zbiorników wód podziemnych na podjętą eksploatację ich zasobów. Na podstawie opisu J. Motyki (Kaźmierski, Sadurski – red., 1999) przedstawiono w tabeli 4.1-3 podział zbiorników wód podziemnych ze względu na typy pustek skalnych, rodzaje skał tworzące te zbiorniki, relacje między ich właściwościami hydrogeologicznymi (porowatość, pojemność wodna, wodoprzepuszczalność) oraz reakcje hydrodynamiczne na zmiany warunków krążenia wód podziemnych.

4.1.2. Warstwy, poziomy i systemy wodonośne

W przestrzennej schematyzacji warunków hydrogeologicznych brane są pod uwagę wzajemne powiązania, ale również odrębności pomiędzy zespołami skalnymi, które w środowisku hydrogeologicznym decydują o drogach uprzywilejowanego krążenia wód podziemnych. W tej schematyzacji znajdują miejsce trzy podstawowe pojęcia: **warstwa wodonośna**, **poziom wodonośny**, **system wodonośny**.

Warstwa wodonośna (Pazdro, Kozerski, 1990; Słownik ..., 2002) to zbiorowisko wód podziemnych związane z warstwowanymi utworami skalnymi o znacznym rozprzestrzenieniu i o określonej miąższości, ograniczone od góry zwierciadłem wód podziemnych (warstwy o zwierciadle swobodnym) lub nieprzepuszczalnym stropem (warstwy naporowe), a od dołu nieprzepuszczalnym spągłem (lub podstawą). W szerszym znaczeniu za warstwę wodonośną uznaje się też strefę utworów przepuszczalnych nasyconych wodą nie związaną z uwarstwieniem skał (np. strefa spękań w obrębie margli i wapieni kredowych, strefa skrasowienia utworów węglanowych) cechujących się pojemnością i przewodnością dostateczną do tworzenia ciągłego strumienia wód podziemnych i ujęcia wód do celów eksploatacyjnych.

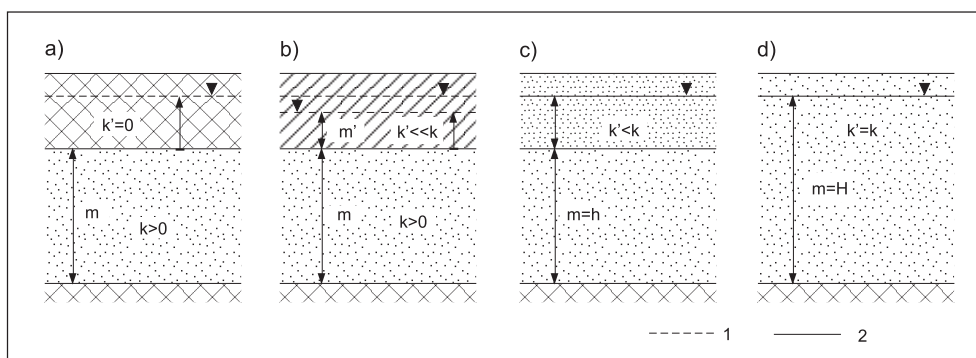
Tabela 4.1-2. Klasyfikacja właściwości filtracyjnych skał (według Witczak, Adamczyk, 1994 – zmodyfikowana).

Rodzaj skał	Filtracja pozioma		Filtracja pionowa		
	Współczynnik filtracji [m/s]	Klasa przepuszczalności	Współczynnik filtracji [m/s]	Klasa	
				izolacyjności	przeiękalności
Rumosze, żwiry, żwiry piaszczyste, piaski gruboziarniste, skały zwięzłe z bardzo gęstą siecią szczelin i spękań, skrasowiałe	$> 10^{-3}$	bardzo wysoka (bardzo dobrze przepuszczalne)	$> 10^{-6}$	nieizolujące	bardzo dobra
Piaski grubo-, różnoziarniste, słabo spojone piaszkowce, skały zwięzłe z gęstą siecią spękań i szczelin nadkapilarnych	$10^{-4} - 10^{-3}$	wysoka (dobrze przepuszczalne)			
Piaski drobnoziarniste jednorodne, różnoziarniste niejednorodne, lessy, skały zwięzłe z siecią szczelin nadkapilarnych	$10^{-5} - 10^{-4}$	średnia (średnio przepuszczalne)			
Piaski pylaste i gliniaste, pyły piaszczyste, mułki, skały zwięzłe z rzadką siecią szczelin i spękań	$10^{-6} - 10^{-5}$	słaba (słabo przepuszczalne)			
Gliny piaszczyste, iły piaszczyste, namuły, mułowce, skały słabo szczelinowe, mikroporowate	$10^{-8} - 10^{-6}$	niska (bardzo słabo przepuszczalne)	$10^{-8} - 10^{-6}$	bardzo słabo izolujące	dobra
Gliny pylaste, iły piaszczyste, iłowce, łupki ilaste, skały zwięzłe niespękanne, mikroporowate	$10^{-12} - 10^{-8}$	bardzo niska (półprzepuszczalne)	$10^{-10} - 10^{-8}$	słabo izolujące	średnia
Iły, skały zwięzłe niespękanne, bez szczelin			$10^{-12} - 10^{-10}$	dobrze izolujące	słaba
Iły zwięzłe, b. grube kompleksy skał zwięzłych niespękannych, bez szczelin	$< 10^{-12}$	nieprzepuszczalne	$< 10^{-12}$	bardzo dobrze izolujące	brak

Tabela 4.1-3. Podział zbiorników wód podziemnych ze względu na typy pustek skalnych.

Zbiorniki	Rodzaje skał	Porowatość (n), Odsączalność (μ)	Wodoprzepuszc- zalność (wsp. filtracji – k)	Inercja układu	Lej depresji
porowe	skały luźne: piaski, żwiry, rumosze	porowatość wysoka ($n=0,2-0,3$) odsączalność zróżnicowana ($\mu=0,12-0,26$)	wysoka: $k = 10^{-3} - 10^{-5}$ m/s	duża i średnia	regularny, prosty do wyznaczenia, rozwija się bardzo wolno w warstwach swobodnych i w miarę szybko w warstwach naporowych
szczelinowe	skały zwięzłe: magmowe, wulkaniczne i metamorficzne, a także niektóre skały osadowe: zdiagenezowane i scementowane piaskowce, kreda, łupki	porowatość bardzo niska, silnie zróżnicowana odsączalność bardzo niska ($\mu=0,01-0,1$)	średnia: $k = 10^{-5} - 10^{-7}$ m/s lokalnie wysoka (gęsta sieć spękań): $k = 10^{-3} - 10^{-4}$ m/s	średnia i mała	często nieprzewidywalny i o dużym zasięgu, silnie zróżnicowane gradienty hydrauliczne, często zawodzą tradycyjne metody obliczenia zasięgu oddziaływania
szczelinowo- porowe	skały zwięzłe spękanе o dużej porowatości matrycy; różne odmiany piaskowców i węglanowych skał ziarnistych np. dolomitów, wapieni oolitowych i detrytycznych	podwójna porowatość: szczeliny – duża przepuszczalność i mała pojemność wodna; pory – mniejsza przepuszczalność i duża pojemność wodna odsączalność silnie zróżnicowana	zróżnicowana: $10^{-3} - 10^{-5}$	większa od szczelinowych	w miarę regularny, gradienty hydrauliczne wewnętrzne pomiędzy ciśnieniem w szczelinach a ciśnieniem w porowej matrycy
szczelinowo- krasowe	skały węglanowe z niską porowatością matrycy	porowatość i pojemność wodna bardzo zmienne	bardzo zróżnicowana: $10^{-2} - 10^{-6}$	mała	jak przy szczelinowych, lej depresji najczęściej rozwinięty zgodnie z kierunkiem sieci kawern
porowo- szczelinowo- krasowe	skały węglanowe z dużą porowatością matrycy	podwójna porowatość, przestrzeń porowa spowalnia przepływ		większa od szczelinowo- krasowych	jak przy szczelinowo- porowych

Wydzielenie warstwy wodonośnej, określenie jej typu hydrodynamicznego oraz parametrów hydrogeologicznych (miąższość, przewodność hydrauliczna, współczynnik filtracji, współczynnik odsączalności sprężystej lub grawitacyjnej) to podstawowe czynności w zakresie schematyzacji hydrogeologicznej. Na podstawie zróżnicowania cech warstw wodonośnych i ich nadkładu, wydziela się zwykle cztery podstawowe ich typy (rys. 4.1-1).



Rys. 4.1-1. Typy hydrodynamiczne warstw wodonośnych wg G. P. Krusemana i K. A. de Riddera, 1973.

Warstwy naporowe: a) – o zwierciadle napiętym, b) – o zwierciadle niezupełnie napiętym; warstwy swobodne: c) – o zwierciadle niezupełnie swobodnym, d) – o zwierciadle swobodnym; 1 – linia ciśnienia piezometrycznego, 2 – swobodne zwierciadło wody.

Warstwa wodonośna o zwierciadle napiętym (naporowym rys. 4.1-1.a). W jej spągu i stropie występują warstwy nieprzepuszczalne ($k'=0$). Ponieważ ciśnienie wody na strop warstwy przewyższa ciśnienie atmosferyczne, poziom wody w studniach ujmujących warstwę o zwierciadle naporowym podnosi się ponad spąg górnej warstwy izolującej, odzwierciedlając wysokość naporu w danym punkcie strumienia wody podziemnej.

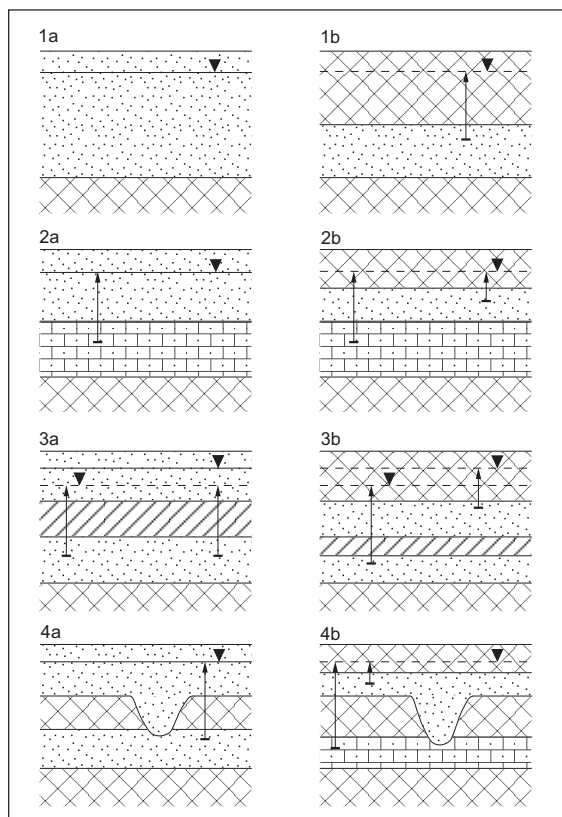
Warstwa wodonośna o zwierciadle niezupełnie napiętym (rys. 4.1-1.b) ma w spągu warstwę nieprzepuszczalną, a w stropie warstwę półprzepuszczalną ($k' \ll k$). Ciśnienie panujące w warstwie wodonośnej powoduje wnikanie jej wody w nadkład półprzepuszczalny na pewną wysokość, znacznie jednak mniejszą, aniżeli wynosi wysokość naporu zmierzona w studni. Warstwa półprzepuszczalna charakteryzuje się ograniczoną przepuszczalnością, ale możliwą do zmierzenia i odgrywającą niepoślednią rolę w warunkach regionalnego zasilania i drenażu warstw wodonośnych. Z uwagi na niską przepuszczalność pomija się w obliczeniach całkowicie przepływ poziomy w tej warstwie.

Warstwa wodonośna o zwierciadle niezupełnie swobodnym (rys. 4.1-1.c) występuje wówczas, gdy przepuszczalność osadów w jej nadkładzie różni się znacząco ($k' < k$) o jeden lub dwa rzędy wielkości, lecz nie wielokrotnie ($k' \ll k$) od przepuszczalności warstwy podstawowej. Pojemność wody wolnej słabiej prze-

puszczalnego nadkładu tej warstwy jest wtedy na tyle duża, że ujawnia się w trakcie pompowania w postaci uzupełniającego dopływu, a następnie zjawiska opóźnionej odsączalności grawitacyjnej.

Warstwa wodonośna o zwierciadle swobodnym (rys. 4.1-1.d) jest częściowo wypełniona wodą. Spąg jej stanowi nieprzepuszczalne podłoże, a zwierciadło wody jest powierzchnią graniczną strefy pełnego nasycenia. Jest ono swobodne, ponieważ jego ułożenie jest uwarunkowane stanem równowagi wobec sił działających na wodę podziemną – przede wszystkim siły ciężkości i oporu środowiska (Pazdro, Kozerski, 1990). Zwierciadło wody w stanie spoczynku w studni występuje na tej samej wysokości co w warstwie wodonośnej.

Poziom wodonośny to z hydrodynamicznego punktu widzenia zespół dwóch lub kilku warstw wodonośnych, które pozostają ze sobą we wzajemnej więzi hydraulicznej. W tym rozumieniu warstwy pojedyncze to te warstwy, które na danym obszarze nie wykazują wzajemnej więzi hydraulicznej z innymi warstwami (rys.4.1-2, figury 1a i 1b). Ich zasilanie odbywa się przez efektywną infiltrację opadów: w przypadku warstw swobodnych – na całej powierzchni, w przypadku warstw naporowych – na ich wychodniach. Na rysunku 4.1.-2 przedstawiono spotykane przy dokumentowaniu zasobów wód podziemnych poziomy dwuwarstwowe o różnym stopniu więzi hydraulicznej (Dąbrowski, Przybyłek 1980).



Rys. 4.1-2. Warstwy wodonośne pojedyncze (1a, 1b) oraz poziomy wodonośny dwuwarstwowy o pełnej (2a, 2b) lub ograniczonej (3a, 3b) więzi hydraulicznej oraz o więzi strefowej przez okna hydrogeologiczne (4a, 4b).

Rysunek 4.1-2, figury 2a i 2b pokazuje poziomy wodonośne tworzące układ złożony z warstw o pełnej więzi hydraulicznej, co ma najczęściej miejsce przy nałożeniu się osadów wodonośnych różnych cykli sedymentacyjnych i pięter strukturalnych, różniących się parametrami filtracyjnymi lub charakterem występowania wód, np. wody porowe na kontakcie z wodami szczelinowymi. Liczne przykłady tego typu poziomów związane są z dolinami rzecznyymi, w których podłożu występują skały szczelinowe kredy lub jury.

Rysunek 4.1-2, figury 3a i 3b pokazuje poziomy wodonośne tworzące układ złożony z warstw o ograniczonej więzi hydraulicznej poprzez osady rozdzielające słabo przepuszczalne (półprzepuszczalne – proces przesiąkania).

Rysunek 4.1-2, figury 4a i 4b ilustruje poziomy wodonośne o strefowej więzi hydraulicznej warstw wodonośnych poprzez okna hydrogeologiczne (4a) czy też strefowe nieciągłości erozyjne w warstwie rozdzielającej (4b). Z. Pazdro i B. Kozerski (1990) definiują okna hydrogeologiczne jako obszary przerw w ciągłości występowania utworów nieprzepuszczalnych, pokrywających warstwę z wodą wgłębną. Ich powstanie jest najczęściej wywołane procesami erozyjnymi lub sedymentacyjnymi.

System wodonośny (Szymanko, 1980; Słownik ..., 2002) – definiowany jest jako ciągły w przestrzeni układ warstw wodonośnych, półprzepuszczalnych i nieprzepuszczalnych z granicami naturalnymi (geologicznymi lub hydrologicznymi), które to granice uniemożliwiają lub znacznie ograniczają przenoszenie się jakichkolwiek wpływów na zewnątrz. Natomiast wewnątrz przestrzeni tego układu zmiany ciśnienia hydrodynamicznego mogą się swobodnie przemieszczać w zróżnicowanym czasie związanym z inercją tego systemu. Szczegółowe opisy teorii rozwoju pojęcia systemu wodonośnego i zasad wydzielania systemów wodonośnych zawiera praca J. Szymanko (1980).

Wydzielenie systemu wodonośnego czyni zadość potrzebie stworzenia w miarę zamkniętej jednostki bilansowania zasobów wód podziemnych, szczególnie na tych obszarach, gdzie ma miejsce duża koncentracja ujęć wzajemnie ze sobą współdziałających i na obszarach o silnej antropopresji wywołanej działalnością przemysłową i górnictwem. Jednocześnie wydzielenie systemu wodonośnego jest warunkiem wykonania poprawnych badań modelowych w zakresie bilansowania i rozrządu wód podziemnych.

W tym kontekście należy również mieć na uwadze, że system wodonośny stanowi w obiegu wody w zlewni tylko ogniwo podziemne, co zilustrowano poniżej zapisem podstawowych procesów hydrologicznych w modelu tego obiegu (Soczyńska, 1997):

Intercepcja	Ewapotranspiracja	Spływ powierzchniowy
Topnienie pokrywy śnieżnej	Strefa aeracji Przepływ wilgoci – pionowy (składowa z)	Strefa saturacji Przepływ poziomy (dwuwymiarowy: skład. x, y)

Przepływ w strefie aeracji jest rozpatrywany jako jednowymiarowy (składowa z), zasilający przepływ dwuwymiarowy (składowe x,y) podsystemu odpływu gruntowego (podziemnego). Ruch wody w podsystemie strefy nasyconej (saturacji) jest rozpatrywany jako dwuwymiarowy. Dla swobodnego zwierciadła wody jest on opisany równaniem Boussinesq'a:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + W = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \quad [4.1a]$$

a dla zwierciadła napiętego równaniem Fouriera:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial h}{\partial t} \quad [4.1b]$$

gdzie:

k_x, k_y – współczynnik filtracji [LT^{-1}],

x, y – współrzędne w płaszczyźnie poziomej [L],

$h = h(x, y, t)$ – położenie swobodnego zwierciadła wód podziemnych ponad spąg warstwy (wysokość hydrauliczna, miąższość warstwy) [L],

W – pionowy dopływ wód w wyniku infiltracji bądź ubytek wody w wyniku ewapotranspiracji (wymiana wody pomiędzy strefą aeracji i saturacji) [LT^{-1}],

μ – współczynnik odsączalności (porowatość efektywna) [1],

t – zmienna czasu [T],

a – współczynnik piezoprzewodności [L^2T^{-1}].

4.1.3. Obszar filtracji i jego granice – warunki zasilania ujęć wód podziemnych.

Obszar filtracji związany z zasilaniem ujęcia wód podziemnych może mieć granice naturalne lub określone umownie po uwzględnieniu spodziewanego obszaru spływu wody do ujęcia przy określonej jego wydajności.

Granice naturalne stanowią rzeki lub inne zbiorniki hydraulicznie związane z wodami podziemnymi, działy wodne podziemne lub powierzchniowe, krawędzie dolin kopalnych i pradolin wcięte w osady nieprzepuszczalne, strefy uskoków, granice sedymentacyjne lub hydrogeochemiczne. Gdy lej depresyjny jest w stanie osiągnąć te granice, to wyznaczają one zasięg oddziaływania ujęcia (np. ujęcie w wąskiej dolinie rzecznej).

Gdy ujęcie znajduje się w strukturze hydrogeologicznej, która w stosunku do zasięgu oddziaływania ujęcia jest jednostką nieograniczoną, wstępnie wydziela się orientacyjny obszar spływu wody do ujęcia o zasięgu odpowiadającym przeliczeniu powierzchni obszaru zasilania za pomocą modułu odnawialności wód podziemnych oszacowanego na podstawie opracowań regionalnych (hydrogeo-

logicznych i hydrologicznych) dotyczących badanego obszaru. Najczęściej moduł odnawialności wyrażany jest w $l/s/km^2$, $m^3/h/km^2$, $m^3/d/km^2$.

Przy ocenie zasobów eksploatacyjnych wyróżnia się granice warstwy wodonośnej w przekroju i w planie (kontury warstwy). Granice w przekroju dzielą się na górne (stropowe) i dolne (spągowe).

W **górnej granicy** warstwy wodonośnej o swobodnym zwierciadle wody mogą istnieć następujące warunki:

- 1) zasilanie infiltracyjne opadami atmosferycznymi lub wodami powierzchniowymi,
- 2) parowanie z powierzchni wód gruntowych.

W warunkach eksploatacji ujęcia oba warunki mogą ulegać modyfikacji na skutek zdepresjonowania zwierciadła wody podziemnej i powstania warunków do zmniejszenia, bądź zaniku parowania i wzrostu tym samym infiltracji efektywnej.

W **górnej granicy** warstw o napiętym zwierciadle wody może następować:

- 1) zasilanie na wychodniach,
- 2) zasilanie lub drenaż w miejscach rozcięcia stropu warstwy wodonośnej,
- 3) przesiąkanie z warstw sąsiednich (nadległych lub niżej leżących).

Przy eksploatacji ujęcia mogą pozostać jako stałe warunki podane w punktach 1) i 2), natomiast zmiennymi są podane w punkcie 3), ponieważ z reguły spadek ciśnienia piezometrycznego doprowadza do zmian natężenia przesiąkania przez utwory słabo przepuszczalne.

Dolną granicę warstwy zarówno o zwierciadle swobodnym, jak i napiętym mogą stanowić:

- 1) podłoże praktycznie nieprzepuszczalne (przesiákanie $Q \approx 0$);
- 2) warstwa słabo przepuszczalna stwarzająca warunki do istnienia ograniczonej więzi hydraulicznej z niżej zalegającą warstwą wodonośną ($Q > 0$).

W zależności od różnicy wysokości hydraulicznych (gradienty początkowe) między tymi warstwami następuje przesiákanie wprost proporcjonalne do przyrostu gradientu hydraulicznego.

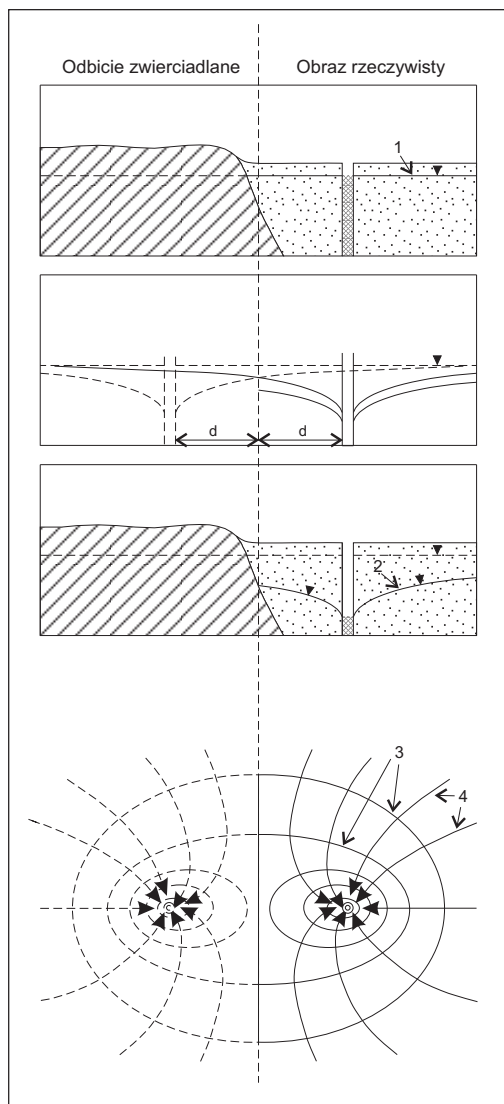
Schematyzacja warunków granicznych w planie sprowadza się do ustalenia, czy wysokości hydrauliczne i zasilanie wód podziemnych pozostaną stałe, czy będą zmienne na tych granicach w danych warunkach eksploatacji. Jeżeli granice warstwy w planie znajdują się w stosunku do ujęcia w znacznych odległościach, to ciśnienie i zasilanie na tych granicach przyjmuje się przy eksploatacji ujęcia jako stałe ($H, Q = \text{const}$).

Jeżeli warstwa wodonośna ma bezpośredni kontakt hydrauliczny z rzeką lub jeziorem, to wysokość hydrauliczną na jej zewnętrznej granicy określa się położeniem zwierciadła wody powierzchniowej. Gdy poziom ten nie zmienia się pod wpływem eksploatacji ujęcia, to rzeka lub zbiornik stanowią granicę o stałym ciśnieniu ($H = \text{const}$).

Wpływ granic można określić stosując „teorię odbić zwierciadlanych” opisaną przez Ferrisa (Bear, Zaslavsky, Irmay, 1971; Forkasiewicz, 1973). W skrócie

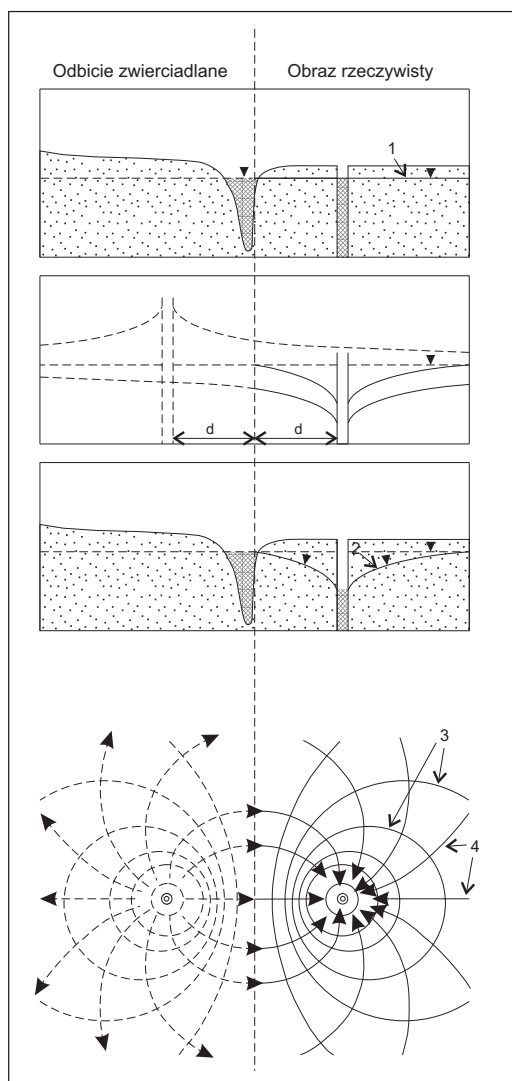
teoria ta przedstawia się następująco: wpływ bocznej szczelnej granicy warstwy wodonośnej na kształtowanie się depresji w otworze pompowanym jest taki sam, jaki wywołałby drugi otwór (w tym przypadku fikcyjny) znajdujący się po przeciwległej stronie nieprzepuszczalnej granicy, symetrycznie w stosunku do otworu rzeczywistego, pompowany z taką samą wydajnością jak otwór rzeczywisty (rys. 4.1-3). Gdy mamy do czynienia z granicą zasilania o stałym poziomie wody, zasada jest ta sama z tą różnicą, że do otworu fikcyjnego, znajdującego się po drugiej stronie granicy, wtłacza się wodę z taką samą wydajnością (rys. 4.1-4).

W schematach obliczeniowych pojęcie warstwy nieograniczonej jest wówczas zastąpione pojęciem warstwy z jednostronną granicą o nieokreślonej długości, prostoliniową, przecinającą całkowicie warstwę wodonośną (rys. 4.1-3 i 4.1-4).



Rys. 4.1-3. Dopływ wody do ujęcia w pobliżu granicy nieprzepuszczalnej, wg J. Baera i in., 1971.

1 – zwierciadło statyczne wody podziemnej,
2 – krzywa leja depresji, 3 – linie ekwipotencjalne, 4 – linie prądu, d – odległość ujęcia (studni) od granicy nieprzepuszczalnej.



Rys. 4.1-4. Dopływ wody do ujęcia w pobliżu granicy zasilającej, wg J. Baera i in., 1971.

1 – zwierciadło statyczne wody podziemnej, 2 – krzywa leja depresji, 3 – linie ekwi-potencjalne, 4 – linie prądu, d – odległość ujęcia (studni) od granicy zasilającej.

Wybór metody obliczeń zasobów eksploatacyjnych należy więc poprzedzić analizą warunków granicznych, które są niezbędne aby równania opisujące ruch wód podziemnych posiadały jednoznaczne rozwiązania. Dla równań odnoszących się do filtracji nieustalonej warunkami granicznymi są **warunki początkowe i brzegowe**. Dla równań opisujących przepływ ustalony konieczna jest tylko znajomość warunków brzegowych.

Warunki początkowe są określone na całym obszarze filtracji położeniem zwierciadła swobodnego lub naporowego (piezometrycznego) wody w momencie czasu t_0 , przyjmowanym jako początek obliczeń procesu niestacjonarnego: $H|_{t=t_0} = f(x, y, z)$. Warunki brzegowe określa się dla wszystkich punktów na brzegu obszaru filtracji przy ich zróżnicowaniu na trzy poniżej opisane rodzaje (Śmietański – red., 1972; Szczepański, 1977; Szymanko, 1980; Kulma, 1995):

Warunki brzegowe I rodzaju (Dirichleta): $H(x, y, z)_{\Gamma} = H/S$,

które określają wartości wysokości hydraulicznej (H) w punktach (S) leżących na brzegu obszaru (Γ) lub w jego wnętrzu przy czym mogą być one stałe lub zmienne w czasie. Najczęściej tymi warunkami są: poziom wody w rzekach i zbiornikach wód powierzchniowych przy dobrej ich więzi hydraulicznej z warstwą wodonośną, rzędne dynamicznego (zdepresjonowanego) zwierciadła wody w studniach eksploatacyjnych, wysokość hydrauliczna na umownej granicy strumienia, jaką może być np. wybrana hydroizohipsa, leżąca poza zasięgiem oddziaływania ujęcia wody.

Warunki brzegowe II rodzaju (Neumanna): $Q(x, y, z)_{\Gamma} = Q/S$,

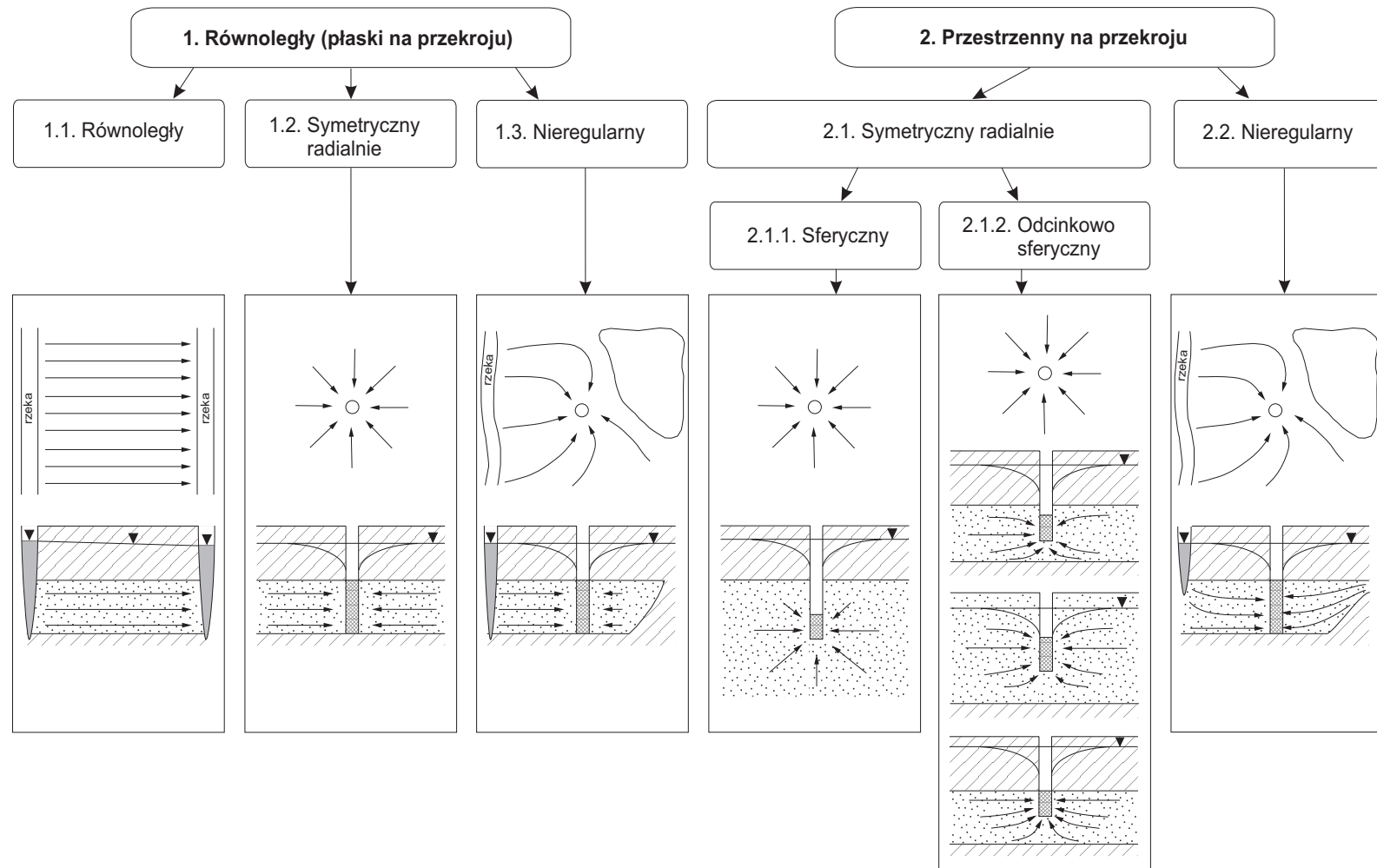
które w modelach filtracji określają natężenie przepływu strumienia wód podziemnych (Q) w warstwie wodonośnej w kierunku prostopadłym w punktach (S) leżących na brzegu obszaru (Γ) lub jego wnętrzu. W obliczeniach hydrogeologicznych jako warunki II rodzaju występują zwykle: infiltracja efektywna ($Q > 0$), wydajność eksploatowanych studni ($Q \gg 0$), granica zasięgu warstwy wodonośnej (utwory nieprzepuszczalne), umowny kontur ograniczający obszar filtracji, a spełniający warunek $Q=0$) np. przebieg wybranej linii prądu poza spodziewanym zasięgiem oddziaływania ujęcia.

Warunki brzegowe III rodzaju, zwane warunkami Cauchy'ego, stanowią liniową kombinację warunków I oraz II rodzaju i oznaczają zmienny przepływ – wymianę wody, zwykle o kierunku pionowym w wyniku występowania różnicy wysokości hydraulicznych. Ma to miejsce najczęściej pod korytami cieków, w dnach oraz brzegach zbiorników wód powierzchniowych o zróżnicowanym stopniu kolmatacji osadów dennych oraz przy przesiąkaniu wody podziemnej przez utwory półprzepuszczalne, rozdzielające warstwy wodonośne o zróżnicowanych wysokościach hydraulicznych.

4.1.4. Strumienie wód podziemnych

Obliczenia hydrogeologiczne wiążą się z koniecznością znajomości pojęć określających i opisujących strumienie wód podziemnych przemieszczających się w warstwach wodonośnych. Pole prędkości filtracji w obrębie danej warstwy wodonośnej można przedstawić za pomocą siatki hydrodynamicznej, złożonej z hydroizohips i prostopadłych do nich linii prądu wody. Linie prądu wyznaczają geometryczny charakter strumieni wód podziemnych. W oparciu o prace T. Macioszczyka (Turek – red., 1971) oraz L. Jarodzkiego (1972) przejrzyście jest przedstawić rodzaje strumieni na podstawie ich cech obserwowanych na przekroju (strumienie płaskie, sferyczne lub nieregularne) oraz w planie (strumienie równoległe, radialne i nieregularne). Kombinacja tych pojęć umożliwia czytelny podział strumieni wód podziemnych, jak to pokazano na rysunku 4.1-5.

Wydatek strumienia filtracyjnego został eksperymentalnie określony przez H. Darcy'ego (1856). Prawo Darcy'ego łączy w liniową zależność wydatek strumienia Q z powierzchnią przekroju poprzecznego warstwy wodonośnej F i wielkością spadku hydraulicznego J :



Rys. 4.1-5. Układ strug wód podziemnych przy dopływie do pojedynczej studni (Jarodzki, 1972).

$$Q = k J F \quad [4.2]$$

Wielkość k w równaniu (4.2) to współczynnik filtracji, charakteryzujący wodoprzepuszczalność utworów wodonośnych. Po wprowadzeniu pojęcia prędkości do równania (4.2) otrzymamy wzór, stanowiący liniowe prawo filtracji Darcy'ego, obowiązujące w ruchu laminarnym:

$$v = \frac{Q}{F} = kJ \quad [4.3]$$

Rzeczywistą prędkość filtracji (v_{rz}) można w przybliżeniu określić poprzez stosunek prędkości Darcy'ego (pozornej) do współczynnika porowatości efektywnej (n_e):

$$v_{rz} = \frac{v}{n_e} \quad [4.4]$$

Ze wzrostem prędkości wody podziemnej pojawia się ruch turbulentny, związany ze współczynnikiem fluacji (k_f), opisany równaniem Chezy-Krasnopolskiego:

$$v = k_f \sqrt{J} \quad [4.5]$$

Według badań przeprowadzonych przez T. Macioszczyka (1974) graniczna prędkość przejścia w wodach podziemnych z ruchu laminarnego w ruch turbulentny odpowiada wielkości:

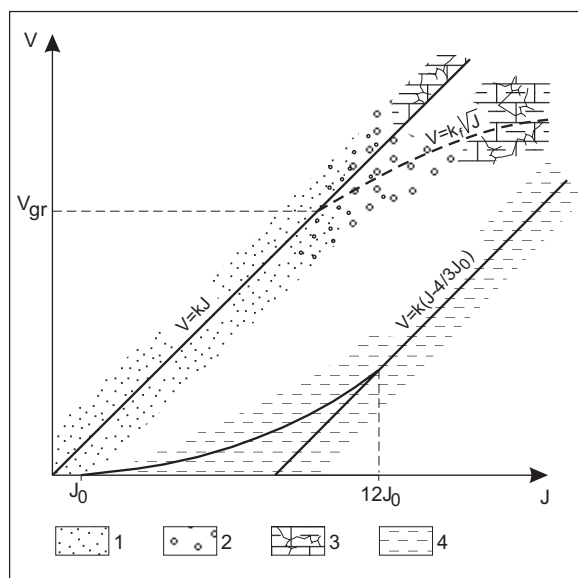
$$v_{gr} = 4,75k^{0,37} \quad [\text{cm/min}] \quad [4.6]$$

W utworach słabo przepuszczalnych istotną rolę w przepływie odgrywają siły przyciągania międzycząsteczkowego pomiędzy cząstkami skały i wody, w związku z czym możliwy jest w tych utworach ruch nazywany plastyczno-lepkim, powstający po przekroczeniu wartości początkowego gradientu hydraulicznego J_0 . Równanie ogólne określające warunki tego przepływu ma postać (Kulma, 1995):

$$v = k(J - \frac{4}{3} J_0) \quad [4.7]$$

Zależności $v=f(J)$ ilustrujące prędkość filtracji w różnych utworach geologicznych podano za R. Kulmą (1995) na rysunku 4.1-6.

Dopływy do studni zupełnych, a więc ujmujących filtrem (o długości l) całą miąższość warstwy wodonośnej (m) mają charakter płasko-radialny (rys. 4.1-5 – fig. 1.2). W przypadku studni niezupełnych ($l < m$) strumienie mają układ sferyczno-radialny (rys. 4.1-5 – fig. 2.1). Obliczanie wydatku studni wierconej musi uwzględniać stopień jej niezupełności poprzez wprowadzenie odpowiedniej poprawki do wzoru na wydajność studni zupełnej.



Rys. 4.1-6. Zależność $v=f(J)$ w skałach o różnej przepuszczalności (według Kulmy, 1995):
 1 – piaski, 2 – żwiry, 3 – wapienie szczelinowo-krasowe, 4 – gliny, ły, J_0 – początkowy gradient hydrauliczny, J – gradient hydrauliczny w czasie przepływu wymuszonego drenażem.

4.1.5. Równania dopływu wód podziemnych do studni

Ustalane warunki dopływu wód podziemnych do ujęcia

Równania krzywej depresji przy ustalonym dopływie wody do otworów studziennych wyprowadził J. Dupuit (1863). Wzory te są słuszne przy następujących założeniach:

- 1) przepływ jest ustalony,
- 2) woda i skała są nieściśliwe,
- 3) ośrodek filtracyjny jest jednorodny i izotropowy; $k_x = k_y = k_z = \text{const}$,
- 4) filtracja odbywa się w warstwie nieograniczonej,
- 5) spąg warstwy jest poziomy,
- 6) filtracja jest zgodna z prawem Darcy'ego,
- 7) dopływ do otworu jest płasko-radialny, tj. składowa pionowa prędkości filtracji może być pominięta,
- 8) studnia jest idealna, tzn. nie występują dodatkowe opory hydrauliczne pomiędzy studnią i warstwą wodonośną.

Naporowy strumień wód podziemnych. Na rysunku 4.1-7 przedstawiono studnię zupełną, ujmującą warstwę o miąższości m i współczynniku filtracji k , pracującą ze stałą wydajnością Q . Równanie krzywej depresji ma postać:

$$h(r) - h_0 = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{r}{r_0} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r}{r_0}; \quad T = km \quad [4.8]$$

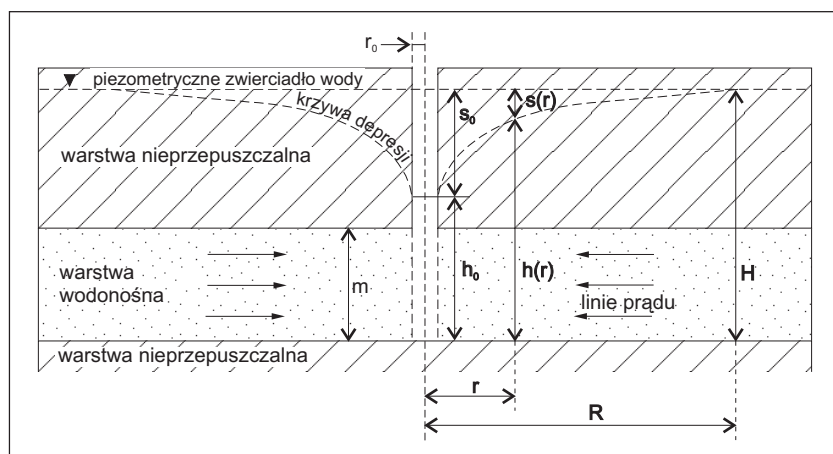
gdzie:

$h(r)$ – wysokość dynamicznego zwierciadła wody na krzywej depresji w dowolnym punkcie w odległości r od osi studni [m],

h_0 – wysokość dynamicznego zwierciadła wody w studni o promieniu r_0 [m],

Q – wydatek pompowania [m^3/h],

$km = T$ – przewodność hydrauliczna warstwy wodonośnej o miąższości m i współczynniku filtracji k [m^2/h].



Rys. 4.1-7. Dopływ do studni zupełnej w warstwie o zwierciadle naporowym.

Z równania [4.8] wynika, że ze wzrostem r wielkość h powinna się zwiększać do nieskończoności. Fizycznie ma ona jednak górny przedział H , którym jest ciśnienie początkowe w odległości wyznaczonej zasięgiem leja depresji R . Równanie [4.8] jest zatem słuszne tylko dla stacjonarnych warunków filtracji w warstwie wodonośnej ograniczonej granicą zasilania ($H = \text{const}$), bowiem w warstwie nieograniczonej przepływ ustalony jest teoretycznie niemożliwy (Bear, Zaslavsky, Irmay, 1971). Zgodnie z tym, w odległości $r = R$ spełnia się warunek $h = H$, a więc $s = 0$. Wychodząc z równania [4.8] można zatem zapisać inne postaci równań:

– na depresję s_0 zwierciadła wody w studni o promieniu r_0 :

$$s_0 = H - h_0 = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r_0} \quad [4.9]$$

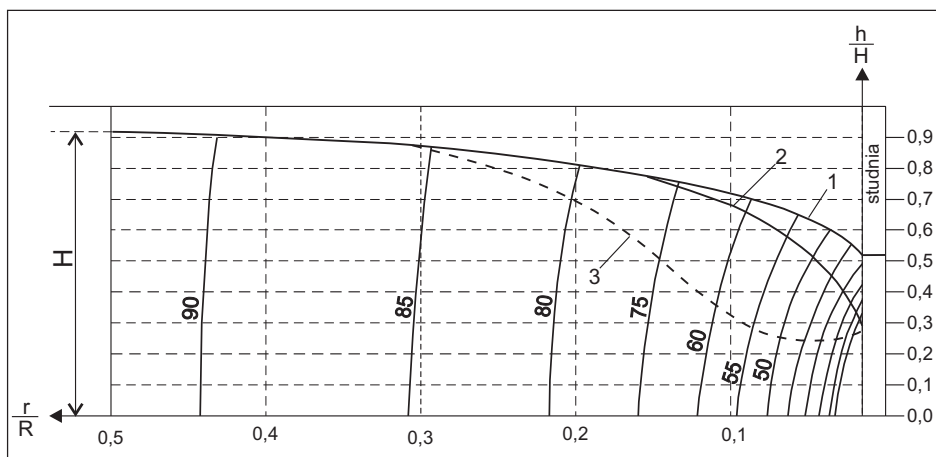
– dla dowolnego punktu na krzywej depresji (jeden otwór obserwacyjny):

$$H^2 - h(r)^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{R}{r} \quad [4.13]$$

– dla dwóch punktów na krzywej depresji (dwa otwory obserwacyjne):

$$h(r_2)^2 - h(r_1)^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad [4.14]$$

Dokładne wyniki obliczeń otrzymuje się przy zachowaniu odległości otworu obserwacyjnego spełniającej warunek $r > 1,5 H$ (rys. 4.1-8), ponieważ wówczas rola składowej pionowej prędkości filtracji się minimalizuje, albo gdy filtry otworów obserwacyjnych zlokalizowanych w odległości mniejszej od $1,5 H$ są posadowione na głębokości, na której mierzone wysokości hydrauliczne (ciśnienia) są zgodne z linią Dupuita (rys. 4.1-9).



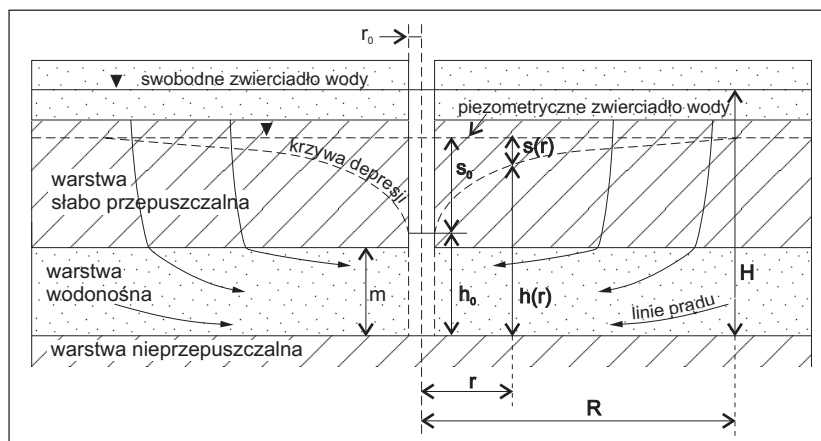
Rys. 4.1-9. Rozkład ciśnienia przy dopływie do studni w warstwie o swobodnym zwierciadle wody (wg Jarodzkiego, 1972).

1 – zwierciadło wody, 2 – krzywa Dupuita, 3 – głębokość, na której ciśnienia są zgodne z linią Dupuita.

Strumień w warunkach ustalonego przesiąkania. Dotychczas rozpatrzone schematy dopływu wody do studni związane były wyłącznie z zasilaniem od strony kolistej granicy zewnętrznej, położonej w odległości R , na której $H = \text{const}$. Natomiast w przypadkach, kiedy w stropie lub spągu eksploatowanej warstwy wodonośnej zalegają osady słabo przepuszczalne, może nastąpić dodatkowe jej zasilanie poprzez przesiąkanie wody z warstw sąsiednich.

Ustalony dopływ do studni z udziałem przesiąkania zachodzi wówczas, gdy jego natężenie jest proporcjonalne do wielkości depresji, co oznacza, że położenie zwierciadła wody w warstwie zasilającej (nadległej lub podległej) nie zmienia się, a gradient hydrauliczny w warstwach słabo przepuszczalnych ustala się zgodnie z nowym rozkładem ciśnień wywołanych pompowaniem. Jeśli te warunki nie są

spełnione, dla warstwy nieograniczonej filtracja ma charakter nieustalony. Równanie dopływu uwzględniające ustalone przesiąkanie wyprowadzone jest przy założeniu, że strumień w warstwie półprzepuszczalnej skierowany jest pionowo w dół (pomijana jest składowa pozioma ruchu), a w warstwie przepuszczalnej jest on płasko-radialny (pomijana jest składowa pionowa) – rysunek 4.1-10.



Rys. 4.1-10. Schemat dopływu do studni w warunkach przesączania.

Równanie ma postać:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left(\frac{r}{B} \right); \quad B = \sqrt{T \frac{m'}{k'}} \quad [4.15]$$

gdzie:

$K_0 \left(\frac{r}{B} \right)$ jest funkcją Bessela II rzędu (wartości stabelaryzowane podane są w literaturze, np. Dąbrowski, Przybyłek, 1980)

B – wskaźnik przesączania (o wymiarze długości), charakteryzujący jego efekt w postaci zasięgu strefy przesączania w poziomie, a pod znakiem pierwiastka: T – przewodność hydrauliczna ujętej warstwy wodonośnej, m' i k' – odpowiednio miąższość i współczynnik filtracji pionowej warstwy słabo przepuszczalnej (rys. 4.1-10).

Gdy $r \ll B$, równanie [4.15], dzięki przybliżeniu logarytmicznemu funkcji Bessela, znacznie się upraszcza:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln 1,12 \frac{B}{r} \quad [4.16]$$

przy dokładności obliczeń do 5% dla warunku $\frac{r}{B} < 0,35$ i 1% dla $\frac{r}{B} < 0,18$ (Bear, Zaslavski, Irmay, 1971).

Przyrównując stronami równanie [4.16] z równaniem Dupuita [4.10] otrzymuje się wzór na zasięg leja depresji w warunkach ustalonego zasilania poprzez przesączanie:

$$R = 1,12 B \quad [4.17]$$

Nieustalone warunki dopływu wód podziemnych do ujęcia

Równania opisujące nieustalone warunki dopływu wody do studni opracowane zostały dla trzech podstawowych schematów obliczeniowych: Theisa, Hantusha i Boultona. Krótką charakterystykę każdego z nich przedstawiono poniżej, ze wskazaniem podręczników zawierających ich bliższą charakterystykę.

Schemat Theisa (Theis, 1935) dotyczy układu spełniającego założenia:

- 1) warstwa wodonośna jest jednorodna, izotropowa o napiętym zwierciadle wody,
- 2) rozprzestrzenienie poziome warstwy jest nieograniczone,
- 3) strop i spąg warstwy są nieprzepuszczalne,
- 4) odpływ wody z warstwy w następstwie obniżania się ciśnienia jest natychmiastowy,
- 5) studnia jest zupełna,
- 6) promień studni jest tak mały, że wpływ jej pojemności można pominąć,
- 7) wydajność pompowania jest stała,
- 8) studnia jest idealna, tj. bez dodatkowych oporów przy dopływie z warstwy wodonośnej.

Ten prosty i idealny schemat filtracji nieustalonej (rys. 4.1-1a) charakteryzują dwa parametry warstwy wodonośnej:

- przewodność – T [m^2/h],
 - współczynnik odsączalności sprężystej – μ_s [1]
- a równanie dopływu przyjmuje postać:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad \text{gdzie:} \quad u = \frac{r^2 \mu_s}{4Tt} \quad [4.18]$$

przy czym funkcja $W(u)$ jest stabelaryzowana oraz podawana w postaci nomogramów do rozwiązań graficznych (Dąbrowski, Przybyłek, 1980). Schemat Theisa może być również stosowany do interpretacji wyników próbnych pompowań warstw o zwierciadle swobodnym (rys. 4.1-1d) wprost dla $s < 0,1 H$, lub po uwzględnieniu poprawki na korektę depresji, gdy $0,1 H < s < 0,3 H$. Szczegółowe opisy i zasady postępowania badawczego według zasad Theisa można znaleźć w podręcznikach (Macioszczyk 1969; Szczepański 1977; Macioszczyk, Szestakow 1983; Pazdro, Kozerski, 1990; Kulma, 1995).

Schemat Hantusha (Hantush, Jacob, 1955) stanowi rozwinięcie schematu Theisa przy uwzględnieniu przesiąkania wody z sąsiednich warstw wodonośnych poprzez osady słabo przepuszczalne (półprzepuszczalne) – rysunek 4.1-1; b. Ilość tej wody jest stała i proporcjonalna do depresji przy założeniu, że w warstwie zasilającej nie następuje obniżenie poziomu ($H = \text{const.}$). Przesiąkanie określa parametr k'/m' – współczynnik przesiąkania (przewodności pionowej) charakteryzujący zdolność warstwy słabo przepuszczalnej (półprze-

puszczalnej) o współczynniku filtracji pionowej k' i miąższości m' do pionowego przewodzenia wody.

Równanie dopływu ma postać:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u, \frac{r}{B}\right) \text{ gdzie: } u = \frac{r^2 \mu_s}{4Tt} \quad [4.19]$$

przy czym również funkcja $W\left(u, \frac{r}{B}\right)$ jest stabelaryzowana oraz przedstawiona graficznie w postaci nomogramów (Dąbrowski, Przybyłek, 1980). Zasady prowadzenia prac badawczych według schematu Hantusha przedstawione są w podręcznikach (Macioszczyk, 1969; Szczepański 1977; Macioszczyk, Szestakow, 1983; Pazdro, Kozerski, 1990; Kulma, 1995).

Schemat Boultona (Boulton, 1963) uwzględnia zróżnicowanie procesu odsączania wody z kompleksów wodonośnych (rys. 4.1-1c), przy czym wyróżnia się dwa zjawiska:

- odsączanie wody w następstwie dekompresji warstwy wodonośnej i wody (reżim sprężysty),
- progresywne odsączanie wody z kompleksu wodonośnego (reżim grawitacyjny).

Przebieg procesu pompowania w takich warunkach można podzielić na trzy fazy:

- 1) gdy reaguje warstwa w strefie bezpośredniego zafiltrowania, objawiając reżim sprężysty o małym współczynniku odsączalności (μ_s),
- 2) następuje przesiekanie wody ze strefy nadległej, dające w efekcie okresową stabilizację zwierciadła wody,
- 3) reaguje cały kompleks wodonośny w warunkach odsączania grawitacyjnego (μ).

Odsączanie charakteryzuje wskaźnik odsączania $-B_1 = \sqrt{\frac{1}{\alpha} \frac{T}{\mu}}$, gdzie wartości

pod znakiem pierwiastka oznaczają:

- $1/\alpha$ – stała empiryczna, zwana wskaźnikiem opóźnienia,
- T – przewodność ujętej warstwy wodonośnej [m^2/h],
- μ – współczynnik odsączalności grawitacyjnej [1].

Równanie Boultona podawane jest w postaci:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u, u_1, \frac{r}{B_1}\right) \text{ gdzie: } u = \frac{r^2 \mu_s}{4Tt}; \quad u_1 = \frac{r^2 \mu}{4Tt} \quad [4.20]$$

W pierwszej fazie pompowania równanie to redukuje się do postaci:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u, \frac{r}{B}\right),$$

a więc odpowiadającej równaniu Hantusha (patrz: wzór 4.19), a w fazie końcowej do postaci:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u_1, \frac{r}{B_1}\right).$$

Nomogramy funkcji wzorcowych do metody Boultona oraz przykłady obliczeń graficznych są podawane w literaturze (Pleczyński, Przybyłek, 1974; Dąbrowski, Przybyłek, 1980).

4.1.6. Zbiorniki wód podziemnych

Terminem **zbiorniki wód podziemnych** określa się zbiorowiska (poziomy wodonośne) magazynujące znaczną ilość zasobów wodnych, które pozostając w aktywnej strefie krążenia w zlewni podziemnej, podlegają ciągłej (powolnej lub w miarę szybkiej) wymianie z otoczeniem poprzez zasilanie z opadów atmosferycznych i drenaż przez systemy rzeczne. Rodzaj, rozmieszczenie i wielkość zbiorników wód podziemnych są uzależnione od wzajemnego układu warstw utworów przepuszczalnych, słabo przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych. Budowa geologiczna decyduje o występowaniu zbiorników wód podziemnych w skałach określonego wieku (czwartorzęd, trzeciorzęd, kreda, jura, trias itd.), na różnych głębokościach od współczesnej powierzchni terenu i pozostawianiu w różnym stopniu izolacji od tej powierzchni (wody gruntowe – swobodne, wody wgłębne – naporowe). Na możliwości wykorzystania występujących w nich zasobów wskazuje kryterium użytkowości w odniesieniu do zbiorników wód podziemnych jako ośrodków hydrogeologicznych o szczególnie uprzywilejowanych cechach (Słownik..., 2002) – tabela 4.1-4. W podziale przedstawionym w tabeli zastosowano kryterium potencjalnej wydajności pojedynczej studni wierconej oraz wydajności ujęcia (zespołu współdziałających studni wierconych) wskazującej na rolę danego zbiornika w zaopatrzeniu w wodę mieszkańców.

Tabela 4.1-4. Podział zbiorników wód podziemnych według kryterium ich użytkowości.

Nazwa zbiornika (poziomu) wód podziemnych	Wydajność pojedynczej studni [m ³ /h]	Wydajność ujęcia [m ³ /d]	Liczba mieszkańców, którą można zaopatrzyć*
Miejscowy MZWP	poniżej 5-10	poniżej 300	poniżej 2000
Lokalny LZWP	10-70	300-10 000	6 600-66 000
Główny GZWP	powyżej 70	powyżej 10 000	powyżej 66 000

*Możliwość zaopatrzenia w wodę podano przy zakładanym zużyciu 150 l/d/mieszkańca

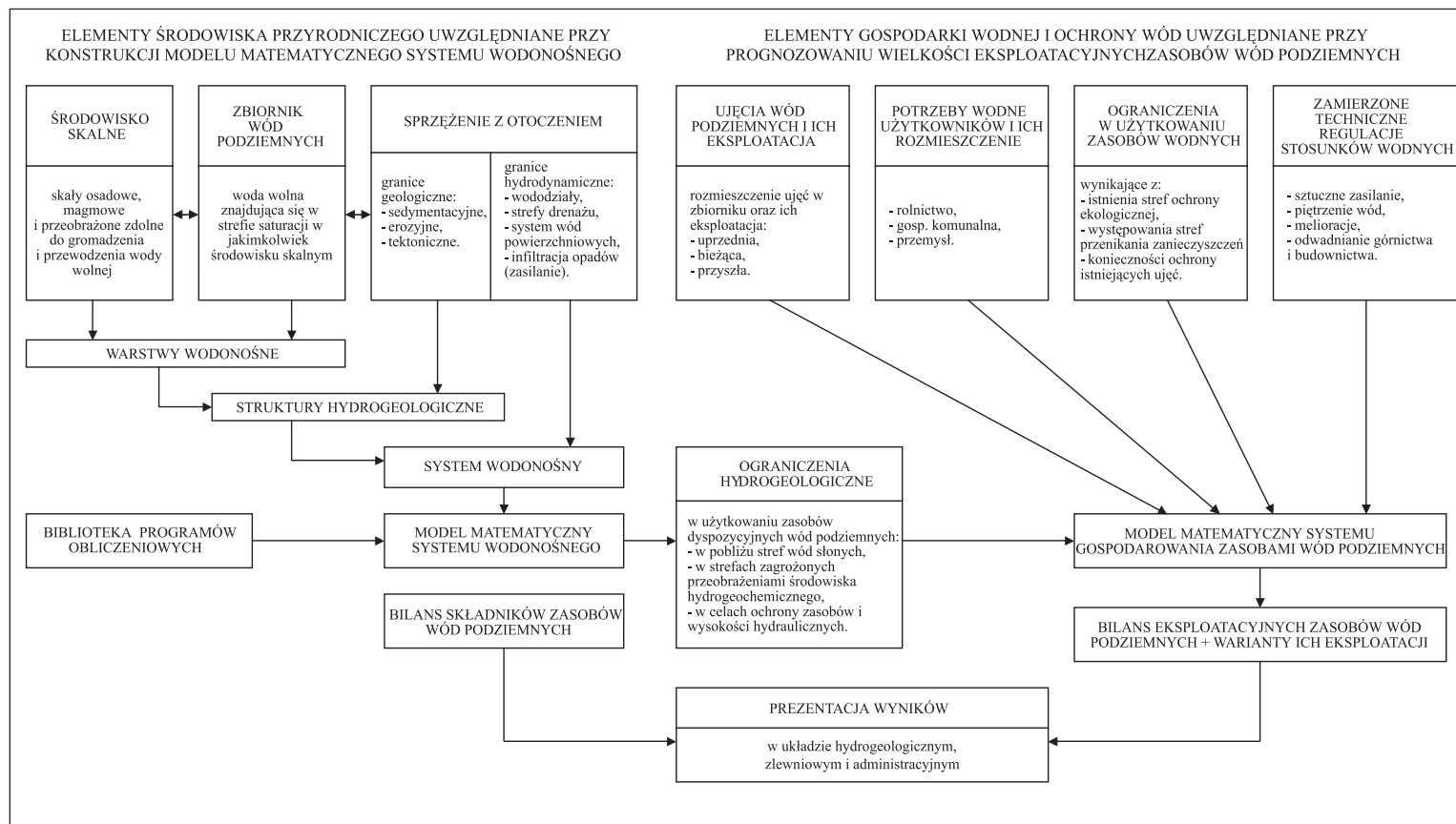
Pojęciem „Główne Zbiorniki Wód Podziemnych (GZWP)” określa się te zbiorniki, które odpowiadają umownie przyjętym ilościowym i jakościowym kryteriom podstawowym; tj.:

- wydajność potencjalnego otworu studziennego powyżej 70 m³/h,
- wydajność ujęcia powyżej 10 000 m³/d,
- przewodność warstwy wodonośnej wyższa od 10 m²/h (od 240 m²/d),
- woda w zbiorniku odpowiada I klasie jakości.

Prace badawcze zmierzające do wydzielenia GZWP w Polsce przebiegały z inspiracji i pod kierunkiem prof. A.S. Kleczkowskiego i zakończyły się publikacją „Mapy obszarów GZWP w Polsce wymagających szczególnej ochrony” (Kleczkowski – red. 1990).

4.1.7. System wodonośny a model gospodarowania zasobami wód podziemnych

Ocena zasobów eksploatacyjnych wód podziemnych związana jest również ze stopniem rozpoznania komponentów środowiska przyrodniczego oraz czynników antropogenicznych oddziałujących na stan zasobów wodnych. Ustalanie i racjonalne wykorzystywanie zasobów wchodzi zatem w szeroko rozumiany model gospodarowania wodami podziemnymi. W tym rozumieniu na rysunku 4.1-11 przedstawiono próbę w miarę kompleksowego zobrazowania tej problematyki w postaci schematu powiązań strukturalnych i czynnościowych. Lewa strona schematu obrazuje postępowanie badawcze zmierzające do określenia systemu wodonośnego, na którego modelu matematycznym mogą być przeprowadzone obliczenia hydrogeologiczne związane z bilansowaniem zasobów wód podziemnych. Prawa strona schematu ilustruje elementy gospodarki wodnej, które muszą być uwzględnione w gospodarowaniu zasobami wód podziemnych na danym obszarze. Tym samym wynikające z nich ograniczenia warunkują możliwości racjonalnego gospodarowania zasobami z zachowaniem ich ochrony ilościowej i jakościowej.



Rys. 4.1-11. Struktura elementów schematu systemu wodonośnego i modelu gospodarowania zasobami wód podziemnych.

4.2. Hydrogeologiczno-techniczne parametry eksploatacji ujęć

Parametry hydrogeologiczne niezbędne do oceny zasobów eksploatacyjnych ujęć wód podziemnych przedstawiono w tabeli 4.2-1. Dla przeprowadzenia obliczeń konieczne jest sporządzenie schematyzacji hydrogeologicznej obszaru filtracji (w planie i w przekrojach). Mając gotowy schemat hydrogeologiczny należy dobrać schemat obliczeniowy (wzory), który w największym przybliżeniu odpowiada warunkom naturalnym i warunkom technicznym eksploatowanego ujęcia (pojedyncze studnie, ujęcia wielootworowe, studnie zupełne, niezupełne, itp.) wpływającym na ruch wody w obrębie obszaru filtracji i na warunki graniczne. Dla prognozy hydrogeologicznej eksploatacji ujęcia jest więc konieczne (tab. 4.2.1):

- 1) określenie parametrów filtracyjnych warstw wodonośnych i ich otoczenia,
- 2) wprowadzenie uproszczeń w postaci schematu hydrogeologicznego,
- 3) określenie parametrów eksploatacji ujęcia wody.

Tabela 4.2-1. Podstawowe parametry hydrogeologiczne do obliczeń zasobów eksploatacyjnych ujęć.

Parametr obliczeniowy	Filtracja	
	ustalona	nieustalona
1. Wysokość hydrauliczna [L]	H	H
2. Zapotrzebowanie wody [L^3/T]	$Q=const$,	$Q=const$; $Q=f(t)$
3. Depresja [L]	$s=const$	$s=f(t)$; $s=const$
4. Zasięg leja depresji [L]	$R=const$	$R=f(t)$
5. Parametry warstw wodonośnych: a) przewodność hydrauliczna [L^2/T] b) współczynnik filtracji [L/T] c) miąższość warstwy [L] – napiętej – swobodnej d) współczynnik odsączalności [-] e) współczynnik przewodności [L^2/T] f) współczynnik piezoprzewodności [L^2/T]	$T=km$; $T=kh_{sr}$ k m h_{sr} – – –	$T=km$; $T=kh_{sr}$ k m h_{sr} μ , μ_s $a = \frac{kh_{sr}}{\mu}$ $a = \frac{km}{\mu_s}$
6. Parametry warstw półprzepuszczalnych: a) współczynnik filtracji pionowej [L/T] b) miąższość warstwy [L]	k' m'	k' m'
7. Czas trwania procesu filtracji – ustalania się dopływu wody do ujęcia [T]	nie uwzględniany	uwzględniany
8. Opory hydrauliczne i sprawność studni: a) współczynnik oporów przepływu turbulentnego [T^2/L^5] b) zeskok hydrauliczny [L]	C Δs	C Δs

Określenie parametrów filtracyjnych rzutuje na dokładność prognozy hydrogeologicznej i w tym zakresie popełnia się najczęściej błędów przy ocenie zasobów eksploatacyjnych. Dlatego należy sporządzić i przeanalizować mapy rozkładu zmienności parametrów filtracyjnych (współczynnika filtracji, przewodności, współczynnika odsączalności) w obszarze zasilania ujęcia aby ocenić charakter obszaru filtracji (jednorodny lub niejednorodny).

Prawidłowa ocena przewodności i współczynnika filtracji pod kątem obliczeń zasobów wymaga także uwzględnienia:

1. rodzaju warunków granicznych,
2. odległości ujęcia od granic,
3. oporu filtracyjnego studni.

Natomiast kompleksowy parametr filtracyjny, jakim jest niewątpliwie współczynnik piezoprzewodności a , należy określać na podstawie interpretacji pomiarów zwierciadła wody w piezometrach podczas próbnych pompowań z wykresów funkcji $\lg s = f(\lg t)$, albo wykresów funkcji $s = f(\lg t)$ po spełnieniu warunku:

$$\frac{r^2}{4at} \leq 0,05 - 0,1$$

Wprowadzenie uproszczeń związane jest przede wszystkim z koniecznością sprowadzenia filtracji trójwymiarowej do dwuwymiarowej (płasko-radialnej) oraz ujęć wielootworowych do prostych schematów geometrycznych (np. wielka studnia).

Przestrzeń obszaru filtracji, z wystarczającą dla celów praktycznych dokładnością, sprowadza się do układu płaskiego, zachowując tylko te składowe, które charakteryzują strumień filtracyjny w stosunku do ujęcia. Przy zestawianiu płaskiego schematu w płaszczyźnie poziomej (studnie pionowe, zupełne) w przypadku niewielkiej niejednorodności można system wodonośny zastąpić warstwą o stałej, uśrednionej przewodności.

W przypadkach ujęć wielootworowych w obliczeniach prognostycznych metodami hydrodynamicznymi ich obszar należy sprowadzać do systemów konturowych o obliczonym promieniu wielkiej studni lub wyznaczonym środku ciężkości poboru wody z ujęcia.

Parametrami eksploatacji ujęcia (studni) są przede wszystkim wydajność, depresja i czas eksploatacji. W ocenie zasobów bezwarunkowo musi być uwzględnione kryterium czasu eksploatacji; ujęcie eksploatowane może być w sposób ciągły lub eksploatacja może mieć charakter okresowy (sezonowy).

Pierwszoplanową czynnością jest zbadanie wydajności pojedynczej studni poprzez przeprowadzenie próbnego pompowania z uwzględnieniem konieczności ustalenia parametrów filtracyjnych (T , k , μ lub μ_s) i hydrogeologiczno-technicznych możliwości eksploatacji (depresja zwierciadła wody w studni – całkowita s_c , depresja dodatkowa – zeskok hydrauliczny na filtrze studni Δs , depresja rzeczywista w warstwie wodonośnej s_w , obliczona lub zmierzona w przyfiltrowej strefie studni).

Depresja całkowita w studni (s_c) nie może przekroczyć wielkości depresji maksymalnej, która mogłaby wywołać obniżenie wysokości hydraulicznej (H, h) w warstwie wodonośnej:

- 1) o więcej niż 0,4 miąższości warstwy wodonośnej o zwierciadle swobodnym (Podniewski, 1963),
- 2) poniżej spągu warstwy napinającej w płytkich warstwach o zwierciadle napiętym,
- 3) w stopniu wykluczającym technicznie racjonalne możliwości poboru wody z głęboko leżących poziomów wodonośnych.

W przypadku ujęcia wielootworowego należy określić ilość studni i sposób ich rozmieszczenia rozpatrując różne warianty lokalizacji ujęcia pod kątem jego odległości od granic naturalnych (L) i w zakresie analizy rozstawu odległości między poszczególnymi studniami (d). Przy ustalaniu odległości ujęcia od rzeki lub zbiornika wody powierzchniowej nie można pomijać kryteriów hydrochemicznych, zwłaszcza, gdy istnieje zagrożenie jakości ze strony wód powierzchniowych.

Przy ostatecznej lokalizacji ujęcia wody bardzo istotny jest wybór najkorzystniejszego wariantu rozmieszczenia zespołu studzien w stosunku do granic bocznych warstwy wodonośnej. Zadanie to wykonuje się z uwzględnieniem współdziałania poprzez badanie depresji eksploatacyjnej w studni przy zastosowaniu wzorów Forchheimera:

- 1) w jednostce nieograniczonej (w stosunku do zasięgu działania danego ujęcia, $R < L$):
 - dla zwierciadła napiętego:

$$s = \frac{Q_s}{2\pi km} [n \ln R - (\ln r_0 + \ln x_{1-2} \cdots + \ln x_{1-n})] \quad [4.21]$$

- dla zwierciadła swobodnego:

$$s = H - \sqrt{H^2 - \frac{1}{\pi k} [Q_s \ln R - (Q \ln r_0 + Q_1 \ln x_{1-2} \cdots + Q_n \ln x_{1-n})]} \quad [4.22]$$

- 2) w dolinie rzecznej z uwzględnieniem wpływu rzeki ($H = \text{const}$)
 - dla zwierciadła napiętego:

$$s = \frac{1}{2\pi km} \left(Q \ln \frac{2L_0}{r_0} + Q_1 \ln \frac{\rho_1}{x_1} \cdots + Q_n \ln \frac{\rho_n}{x_n} \right) \quad [4.23]$$

- dla zwierciadła swobodnego:

$$s = H - \sqrt{H^2 - \frac{1}{\pi k} \left(Q \ln \frac{2L_0}{r_0} + Q_1 \ln \frac{\rho_1}{x_1} \cdots + Q_n \ln \frac{\rho_n}{x_n} \right)} \quad [4.24]$$

- 3) w dolinie z wpływem granicy nieprzepuszczalnej ($Q = 0$):

$$s = \frac{1}{2\pi km} [2Q_s \ln R - (Q \ln 2r_0 L + Q_1 \ln x_1 \rho_1 \cdots + Q_n \ln x_n \rho_n)] \quad [4.25]$$

gdzie:

- Q_s – wydajność sumaryczna zespołu studni [m^3/h],
- Q, Q_n – wydajność poszczególnych studni [m^3/h],
- R – zasięg leja depresyjnego ujęcia [m],
- k, km – współczynnik filtracji [m/h] i przewodność [m^2/h] (uśredniona lub zredukowana),
- H – wysokość hydrauliczna [m],
- L – odległość ujęcia od granicy nieprzepuszczalnej [m],
- $L_0 = (L + \Delta L)$ – odległość ujęcia od rzeki skorygowana parametrem ΔL wyrażającym opór hydrauliczny osadów w korycie rzeki zasilającej ujęcie wody [m],
- $x_i \dots x_{i-n}$ – odległość do kolejnych studni współdziałających [m],
- ρ – odległość od studni do odbić zwierciadlanych studni współdziałających [m],
- n, r_0 – liczba studni w zespole i promień studni [m].

Po wyborze najkorzystniejszego wariantu rozmieszczenia i rozstawu studzien określa się depresję w studni na koniec przyjętego okresu eksploatacji w zależności od rodzaju warunków brzegowych i rozkładu ciśnienia w obrębie wydzielonego obszaru filtracji.

W zależności od warunków hydrogeologicznych i technicznych możliwości eksploatacji Boczewier (1969) zaleca stosować wzór na obliczanie depresji maksymalnej w studni przy eksploatacji ujęć wielootworowych:

$$s_{maks} = s_{rej} + \Delta s \quad [4.26]$$

gdzie:

- s_{rej} – depresja rejonowa w obrębie konturu ujęcia [m],
- Δs – sumaryczny opór filtracyjny studni pracującej w zespole obliczany wzorem:

$$\Delta s = \frac{Q}{2\pi km} \left(\ln \frac{r_s}{r_0} + 0,5\zeta \right) \quad [4.27]$$

gdzie:

- Q – wydajność studni w barierze [m^3/h],
- $km = T$ – przewodność [m^2/h],
- r_s – zasięg działania studni, wynoszący $r_s = \frac{d}{2\pi}$ [m],
- d – rozstaw między studniami [m],
- r_0 – promień studni [m],
- ζ – opór hydrauliczny uwarunkowany niezupełnością studni – obliczany ze specjalnych nomogramów lub tabel podawanych w literaturze hydrogeologicznej (np. Macioszczyk, Szestakow, 1983).

Oprócz obliczenia wielkości eksploatacyjnych zasobów wód podziemnych wynikających z bilansu zasilania ujęcia (parametry warstwy) ważną sprawą jest obliczenie wydajności dopuszczalnych poszczególnych studni wynikających z dopuszczalnej prędkości wody na filtrze i wymiarów filtra:

$$Q_{dop} = 2\pi r_0 l v_{dop} \quad [4.28]$$

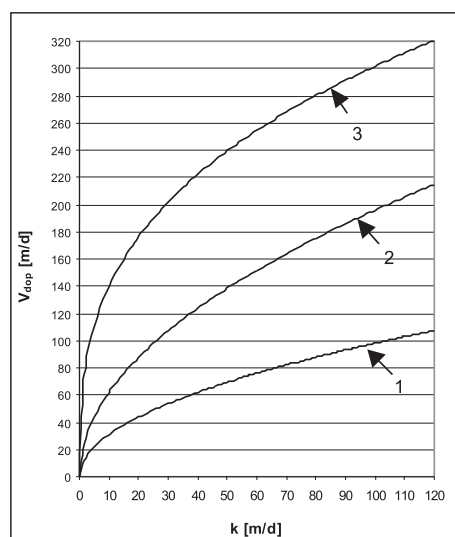
gdzie:

r_0 – promień studni (filtra z obsypką) [m],

l – czynna długość filtra studni [m],

v_{dop} – dopuszczalna prędkość wlotowa (filtracji) zależna od współczynnika filtracji ujętych osadów wodonośnych w otoczeniu filtra studziennego [m/h].

Na rysunku 4.2-1 zestawiono wykresy dopuszczalnych prędkości obliczone według różnych empirycznych zależności, których wybór zależy od warunków pracy studni i jej przeznaczenia (Dąbrowski, Mysiak 1971; Dąbrowski, Mysiak, Siwoń, 1973).



Rys. 4.2-1. Dopuszczalne prędkości wlotowe v_{dop} (za Gabryszewskim, 1983).

1 – wg Truelsena, 2 – wg Sichardta, 3 – wg Abramowa

Wzór Truelsena* (4.29) należy stosować dla studni, które mają pracować w sposób ciągły w dłuższym okresie (do kilkudziesięciu lat) i które powinny w tym okresie gwarantować dużą pewność i wydajność eksploatacji. Będą to więc studnie m.in. do celów wodociągowych, a więc do zaopatrywania w wodę miast i osiedli oraz przemysłu:

$$V_{dop} = 9,8\sqrt{k_d} \text{ [m/d]} \quad [4.29]$$

*W niektórych podręcznikach (np. Pazdro, Kozerski 1990) wzór ten zapisany jako wzór Sichardta.

Wzór Sichardta (4.30) można stosować dla studni mających pracować w sposób nieciągły (przerwany) i (lub) w okresie kilku lat. Takie studnie pracują w cyklu od kilku do kilkunastu godzin na dobę i są przeznaczone do zaopatrzenia w wodę małych osiedli wiejskich, do celów przeciwpożarowych, jako studnie awaryjne:

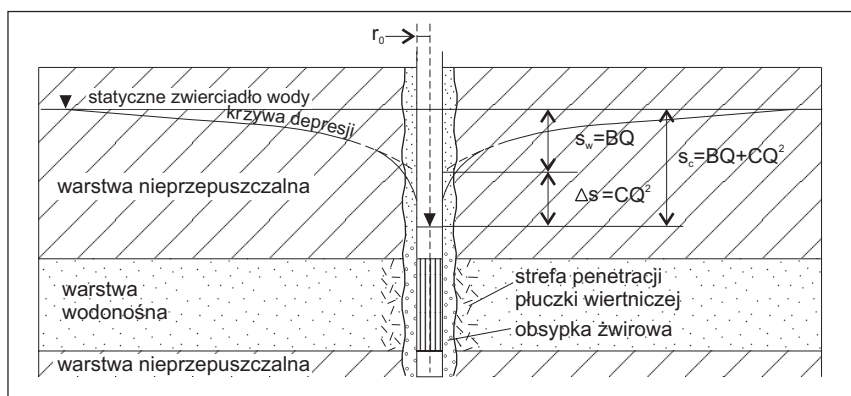
$$V_{dop} = 19,6\sqrt{k_d} \text{ [m/d]} \quad [4.30]$$

Wzór Abramowa (4.31) należy stosować do studni mających pracować w sposób ciągły przez stosunkowo krótki okres (od kilkunastu dni do kilku lat), np. studnie odwodnieniowe:

$$V_{dop} = 65\sqrt[3]{k_d} \text{ [m/d]} \quad [4.31]$$

Opory hydrauliczne i sprawność studni. Na wielkość depresji w studni wpływ mają opory hydrauliczne wywołane przepływem laminarnym występującym w warstwie wodonośnej w obszarze leja depresyjnego oraz dodatkowe opory przepływu turbulentnego, który może zachodzić w otoczeniu studni – w jej strefie przyfiltrkowej. Dodatkowe opory spowodowane są zaburzeniem struktury osadów wodonośnych w trakcie wiercenia studni, ich kolmatacją w trakcie wierceń obrotowych z użyciem płuczki wiertniczej, niezupełnością studni, nieodpowiednim doborem filtra i obsypki filtracyjnej, a także samym procesem przepływu wody wewnątrz studni – do sita wlotowego pompy. Opory przepływu laminarnego wywołują depresję w warstwie wodonośnej, zwaną depresją rzeczywistą – s_w , natomiast opory przepływu turbulentnego uwidaczniają się w postaci depresji dodatkowej, zwanej zeskokiem hydraulicznym – Δs (rys. 4.2-2).

Depresja rzeczywista – s_w , opisana wzorami na dopływ do studni (rozdz. 4.1.5), wyrażana jest jako BQ , gdzie B jest współczynnikiem oporu warstwy wodonośnej (współczynnik oporów przepływu laminarnego), a Q wydatkiem pompowa-



Rys. 4.2-2. Rozkład oporów przy pompowaniu otworu studziennego (za Siwek, Mańkowski, 1981).

nia. Depresja dodatkowa (zeskok) – Δs może być opisana przy użyciu parametru C oznaczającego współczynnik oporu studni (współczynnik oporów przepływu turbulentnego). Zgodnie z założeniami przedstawionymi przez Jacoba (1950) i Rorabaugha (1953) może być ona wyrażona jako:

- $\Delta s = CQ^2$ – przy przyjęciu założenia Jacoba, że strefa ruchu turbulentnego, tzn. odległość od osi studni do punktu, w którym ruch zmienia charakter z laminarnego na turbulentny jest stała i niezależna od wydatku studni,

lub

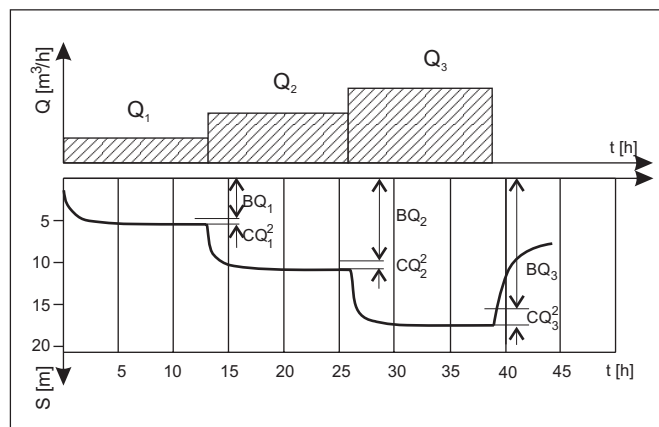
- $\Delta s = CQ^n$ – przy przyjęciu założenia Rorabaugha, że strefa ruchu turbulentnego rozszerza się ze wzrostem wydatku. Wykładnik potęgowy przyjmuje wartość $n > 2$.

Całkowita depresja w studni jest zatem funkcją wydatku pompowania $s_c = f(Q)$ i można ją wyrazić jako sumę oporów przepływu laminarnego i turbulentnego:

$$s_c = s_w + \Delta s = BQ + CQ^2 \quad \text{według Jacoba} \quad [4.32]$$

$$s_c = s_w + \Delta s = BQ + CQ^n \quad \text{według Rorabaugha} \quad [4.33]$$

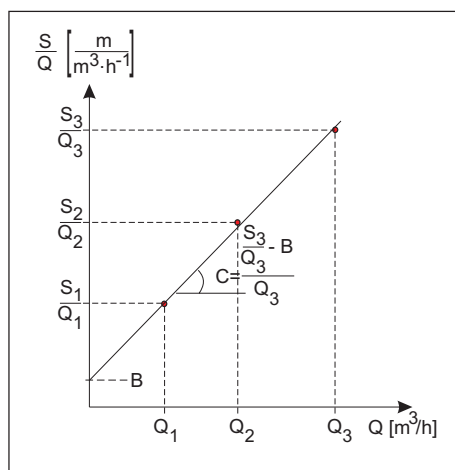
Teoria Jacoba-Rorabaugha wykorzystywana jest do oceny parametrów hydraulicznych studni na podstawie wyników przeprowadzonych w nich pompowań badawczych. Do niedawna najpowszechniej stosowa była metoda pompowania na kilku stopniach dynamicznych z depresją ustaloną na każdym stopniu (rys. 4.2-3). Uzyskany z takich pompowań materiał badawczy umożliwia graficzną



Rys. 4.2-3. Wykresy czasowe funkcji $Q=f(t)$ oraz $s=f(t)$ dla oceny stanu technicznego studni na podstawie 3-stopniowego pompowania badawczego.

interpretację parametrów hydraulicznych studni. W praktycznym zastosowaniu przeważa sposób obliczeń dostosowany do założeń Jacoba, gdzie wartość parametru C wyznacza się na wykresie funkcji $s/Q=f(Q)$ w oparciu o metodykę, zaproponowaną przez Bruina i Hudsona (rys. 4.2-4). Mając odczytaną wartość parametru B można również wykorzystać rozwiązanie analityczne:

$$C = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \frac{\frac{s_j}{Q_j} - B}{\frac{Q_j}{Q_j}} \quad [\text{h}^2/\text{m}^5] \quad [4.34]$$



Rys. 4.2-4. Graficzna metoda oceny stanu technicznego studni na wykresie funkcji $s/Q=f(Q)$.

Sposób wyznaczania współczynnika C w oparciu o teorię Rorabaugha jest bardziej skomplikowany z uwagi na fakt, że dla wartości $n > 2$ wzorcowy przebieg wykresu $s/Q=f(Q)$ nie jest linią prostą. W praktyce rozwiązanie to ograniczone jest do przypadków, gdy pompowanie prowadzono na 4 i więcej stopniach dynamicznych. Zasady interpretacji przedstawione są w pracy Z. Siwka i M. Mańkowskiego (1981).

Parametr C obliczony zarówno według formuły Jacoba (C_J ze wzoru 4.32), jak i według formuły Rorabaugha (C_R ze wzoru 4.33) może być odpowiednio przeliczany za pomocą wzorów:

$$C_J = C_R \frac{Q^n}{Q^2} \quad \text{lub} \quad C_R = C_J \frac{Q^2}{Q^n} \quad [4.35]$$

Współczynnik oporu studni C odnosi się do strat wysokości hydraulicznej (przyrostu depresji) w samej studni i w strefie przyfiltrkowej, jest więc miernikiem stanu technicznego studni pod względem hydraulicznym. Według Waltona (1962) ocena stanu technicznego studni może być dokonana poprzez porównanie wyznaczonej wartości parametru C (wg formuły Jacoba) z wartościami kryterialnymi podanymi w tabeli 4.4-2. Polska norma pt. „Studnie wiercone, zasady projektowania, wykonania i odbioru” wprowadza jeden tylko wymóg jakościowy studni, aby współczynnik C nie był większy niż $0,0003 \text{ h}^2/\text{m}^5$.

Ocena prawidłowości zaprojektowania i wykonania studni w oparciu o parametr C ma zastosowanie głównie dla studni ujmujących wodę ze zbiorników

Tabela 4.2-2. Stan usprawnienia studni w zależności od współczynnika C (wg Walona, 1962).

Stan studni	C_f
Studnia prawidłowo zaprojektowana i wykonana	$<0,00015 \text{ h}^2/\text{m}^5$
Studnia umiarkowanie zanieczyszczona lub zakolmatowana	$0,00015-0,00030 \text{ h}^2/\text{m}^5$
Studnia z zaawansowanym zanieczyszczeniem lub kolmatacją	$0,00030-0,012 \text{ h}^2/\text{m}^5$
Studnia znacząco zanieczyszczona lub zakolmatowana	$>0,00$

porowych. W zbiornikach szczelinowych i szczelinowo-krasowych część systemów szczelin i kawern, niekiedy najlepiej przewodzących wodę, w trakcie rozwoju depresji ulega osuszeniu i stąd studnie te mogą posiadać współczynnik C większy od $0,0003 \text{ h}^2/\text{m}^5$, pomimo że są to studnie bezfiltrowe lub z filtrem z rury perforowanej.

Celem zminimalizowania wielkości zeskoku na filtrze i osiągnięcia depresji w studni zbliżonej do depresji rzeczywistej w warstwie wodonośnej prowadzi się zabiegi usprawniające studnię po jej wykonaniu lub w trakcie renowacji. Dla nowo odwierconych otworów z reguły wystarczające dla osiągnięcia zadowalającej sprawności jest prawidłowo wykonane pompowanie oczyszczające. Przywracanie sprawności studni starych wymaga stosowania bardziej skomplikowanych metod w postaci mechanicznego, hydraulicznego, chemicznego, a także pneumatycznego oddziaływania na ścianki filtra, obsypkę i warstwę wodonośną. Sprawność studni określa się w procentach jako stosunek depresji rzeczywistej do depresji całkowitej.

Przedstawiona powyżej metodyka wyznaczania stanu technicznego studni stosowana może być wtedy, gdy pompowanie prowadzono na kilku stopniach dynamicznych aż do uzyskania ustalonej depresji na każdym stopniu. Ten rodzaj pompowania nie jest obecnie zalecany (patrz rozdz. 5.5), niemniej jednak olbrzymia część materiałów z archiwalnych pompowań badawczych dotyczy takich właśnie przypadków. Niejednokrotnie, zwłaszcza do celów modelowania matematycznego, zachodzi konieczność powtórzenia interpretowania tych pompowań celem wydzielenia z depresji całkowitej tej jej części, która charakteryzuje parametry warstwy wodonośnej, a nie warstwy i studni łącznie. W takich przypadkach reinterpretacji pompowań dokonuje się według powyższych zasad i jest to niezbędne dla prawidłowego skonstruowania map przewodności modelowanych warstw wodonośnych. Nieuwzględnienie zeskoków hydraulicznych studni przy obliczeniach współczynnika fil-

tracji prowadzi do zaniżania przewodności i w konsekwencji do błędnych obliczeń zasobowych. Błędy prognoz modelowych opartych o niezreinterpretowane wyniki pompowań mogą dochodzić nawet do 20% (Kapuściński, 1989).

4.3. Jakość wód podziemnych i ocena stanu ich antropogenicznego zanieczyszczenia

Prawidłowo zaprojektowane ujęcie wód podziemnych powinno zapewniać uzyskanie wody o możliwie najkorzystniejszej i trwałej jakości. Spełnienie tych warunków jest możliwe tylko wtedy, kiedy kryterium jakości uwzględniane jest na wszystkich etapach projektowania ujęcia, a zakres rozpoznania warunków hydrogeologicznych, hydrogeochemicznych i sozologicznych umożliwia opracowanie prognozy zmian jakości wody w trakcie jego eksploatacji.

Uwzględnienie kryterium jakościowego jest niezbędne już na etapie wyboru lokalizacji ujęcia. Wybór taki powinien być dokonany w celu wyeliminowania lokalizacji ujęcia w skrajnie niekorzystnych warunkach hydrogeochemicznych wynikających z zagrożenia geogenicznego lub antropogenicznego. W związku z tym, już na etapie projektowania ujęcia niezbędna jest analiza archiwalnych danych hydrogeochemicznych, a w przypadku braku takich danych posłużenie się metodą analogii tj. przedstawienie przewidywanych warunków hydrogeochemicznych w oparciu o podobieństwo do rozpoznanych zbiorników wodonośnych tego samego typu. W przypadku przewidywanego ujmowania wód z płytkich słabo izolowanych zbiorników niezbędne jest również wykonanie rozpoznania antropogenicznych zagrożeń jakości wód podziemnych w celu wyeliminowania lokalizacji ujęcia w strefie oddziaływania ognisk zanieczyszczeń. Kryterium jakości wody powinno być również brane pod uwagę przy projektowaniu konstrukcji ujęcia, a w szczególności przy wyborze strefy zafiltrowania oraz materiałów do budowy filtra i kolumny filtracyjnej.

Istotnym problemem jest również zaprojektowanie odpowiedniego rozpoznania warunków hydrogeochemicznych. Rozpoznanie to powinno być dostosowane do stopnia zmienności tych warunków i uwzględniać ocenę jakości wód wszystkich składników bilansowych biorących istotny udział w zasilaniu ujęcia. W przypadku ujęć zlokalizowanych w dolinach i pradolinach polodowcowych, gdzie istnieje duże zagrożenie występowania przemian hydrogeochemicznych w warunkach eksploatacji, niezbędne jest również rozpoznanie środowiska geochemicznego w aspekcie jego wzbogacenia w siarczki i substancje organiczne, a także zdolności do buforowania kwaśnych produktów przemian hydrogeochemicznych.

Rozpoznanie warunków hydrogeochemicznych jest szczególnie istotne wtedy, kiedy kryterium jakości wód decyduje o warunkach pracy studni i w konsekwencji limituje wielkość zasobów eksploatacyjnych ujęcia.

4.3.1. Podstawowe pojęcia i normatywy

Jakość wód podziemnych definiuje się jako ich przydatność na określone potrzeby. Przydatność ta oceniana jest poprzez porównanie cech fizycznych, chemicznych i mikrobiologicznych wody z aktualnie obowiązującymi normami jakościowymi. Najczęściej porównanie to dotyczy przydatności wody do zaopatrzenia ludności (woda wykorzystywana do picia i w gospodarstwach domowych) i w tym znaczeniu używane jest pojęcie jakości wody w niniejszym opracowaniu. Odrębne normatywy istnieją dla wód wykorzystywanych na inne potrzeby np. różnych rodzajów przemysłu. Wymagania jakościowe dla wód do picia określa rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 19 listopada 2002 r. w sprawie wymagań dotyczących jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz. U. Nr 203, poz. 1718).

W Polsce opracowano ponadto kilka koncepcji klasyfikacji jakości wód podziemnych. Klasyfikacje te, oprócz normatywu Ministra Zdrowia dla wód do picia, uwzględniają takie kryteria jak: możliwość i warunki uzdatniania wód, toksyczność składników hydrochemicznych, warunki zachowania trwałości cech jakościowych, stan zanieczyszczenia antropogenicznego. Najczęściej stosowaną jest klasyfikacja opracowana na potrzeby monitoringu wód podziemnych, zalecana do stosowania przez Główną Inspekcję Ochrony Środowiska (Błaszyk, Macioszyk 1993). Jeszcze inną jest klasyfikacja opracowana przez Państwowy Instytut Geologiczny na potrzeby mapy hydrogeologicznej Polski w skali 1:50 000 (MhP).

Przez **zanieczyszczenie wód**, zgodnie z definicją podaną przez Chojnackiego (za Witczak, Adamczyk, 1994), rozumie się zmianę składu lub stanu wód, spowodowaną bezpośrednio lub pośrednio działalnością człowieka, która czyni wody mniej przydatnymi do jednego lub wszystkich celów, którym mogłyby służyć w swym stanie naturalnym. Według Słownika hydrogeologicznego (2002) są to wszelkie zmiany składu chemicznego wód wywołane czynnikami naturalnymi; wewnętrznymi (geogenicznymi) i zewnętrznymi (antropogenicznymi).

Oprócz pojęcia zanieczyszczenia wód podziemnych używane są pojęcia **skażenie i zatrucie wód** (Słownik ..., 2002). Przez **skażenie** rozumie się wprowadzanie do wód substancji obcych, będących wytworem człowieka i nie występujących w naturalnych wodach podziemnych (np. pestycydy, detergenty). **Zatrucie wody** to zanieczyszczenie jej substancją lub substancjami, które oddziałują toksycznie na organizmy żywe i człowieka.

Zanieczyszczenie wód podziemnych może być efektem:

- wprowadzania zanieczyszczeń do środowiska geologicznego i wód podziemnych,
- wywoływania przemian hydrogeochemicznych w środowisku geologicznym w warunkach eksploatacji (w wyniku obniżenia zwierciadła wody) i związanej z tym zmianą warunków redukcyjno-oksydacyjnych,
- zmian systemu krążenia wód w warunkach eksploatacji.

Najczęściej przyczyną zanieczyszczenia jest przenikanie substancji obcych pochodzących ze ścieków, odpadów, surowców, nawozów sztucznych, środków

ochrony roślin, emisji gazowych i pyłowych. Substancje te pochodzą spoza warstwy wodonośnej i można je łączyć z określonym **ogniskiem zanieczyszczeń**. Za ogniska zanieczyszczeń należy zatem uznać wszystkie formy działalności człowieka i jego bytowania w środowisku, które powodują wprowadzanie zanieczyszczeń do wód podziemnych i obniżają ich walory jakościowe.

4.3.2. Zmienność jakości wód uwarunkowana czynnikami naturalnymi

Czynnikiem rozróżniającym naturalne wody podziemne jest przede wszystkim ich mineralizacja. Wody słodkie (zwykle) o mineralizacji poniżej 1 g/l występują w górnych partiach środowiska geologicznego, w Polsce przeciętnie do głębokości 200-250 m, ekstremalnie do 1 500 m (Kleczkowski – red., 1984). Poniżej występują wody o mineralizacji powyżej 1 g/l (maksymalnie 300-400 g/l). W niektórych rejonach wody o podwyższonej mineralizacji występują na mniejszej głębokości, lokalnie aż do powierzchni terenu. Strefy takie tworzą się w obszarach, gdzie ze względu na ułatwioną przepuszczalność podłoża zbiorników wody słodkiej (usłoki tektoniczne, rozcięcia erozyjne, wychodnie utworów o lepszej przepuszczalności) następuje drenaż wód głębokiego krążenia obejmujący również wody zmineralizowane. Wody zasolone mogą występować w płytkich strefach również na wybrzeżu Bałtyku przy ingresji zasolonych wód morskich.

Wody o wysokiej mineralizacji mogą występować także w otoczeniu wysadów solnych w wyniku rozpuszczania soli z „lustra” solnego, a także gipsów przykrywających wysad solny. Wody migrujące przez czapę gipsową tworzą aureolę o podwyższonym zasoleniu (rzędu 1-3 g/l). Wody kontaktujące się bezpośrednio z „lustrem” solnym mogą być znacznie silniej zmineralizowane (powyżej 300 g/l).

W obrębie strefy wód słodkich naturalne zróżnicowanie jakości wód podziemnych uwarunkowane jest w głównej mierze występowaniem osadów wzbogaconych w materię organiczną. Może ona występować w wodzie nie tylko w formie roztworu rzeczywistego, ale również w formie koloidalnej. Cechami, które znacząco różnicują jakość wód w tej strefie są w szczególności: barwa, azot amonowy, żelazo i mangan. Skrajnie niekorzystne warunki występują najczęściej tylko w pewnych strefach poziomów wodonośnych, które charakteryzują się utrudnioną wymianą wód. Tam gdzie istniały warunki do intensywnego krążenia wód dochodziło do stopniowego rozpuszczania i usuwania materii organicznej rozproszonej w obrębie utworów wodonośnych. W strefach gdzie brak było warunków do wymiany wód, rozkładająca się w środowisku anaerobowym materia organiczna powoduje wzbogacenie wód w substancje humusowe (barwa) i azot amonowy. Mogą występować również warunki do rozpuszczania żelaza i manganu, szczególnie w obrębie młodych utworów czwartorzędowych. Jedynie w skrajnie redukcyjnych warunkach, przy obecności uwalnianych z materii organicznej lub powstających w wyniku redukcji siarczanów jonów S^{2-} , tworzą się siarczki i w wodzie podziemnej brak żelaza i manganu. Środowisko takie występuje lokalnie w obrębie zbiornika mioceńskiego w środkowej Wielkopolsce (Górski, 1989 a), gdzie rozpoznano strefy o wysokim zabarwieniu wód (>80 mg Pt/l) i utlenialno-

ści. Strefy te związane są z paleohydrogeologicznie ukształtowanymi obszarami utrudnionej wymiany w rejonach ascenzji wód głębokiego krążenia z podłoża mezozoicznego. W zbiornikach czwartorzędowych obszary stagnacji wód w środowisku wzbogaconym w materię organiczną rozpoznano w rejonie doliny dolnej Odry, gdzie na obszarze pomiędzy Odrą zachodnią a wschodnią w wodach podziemnych stwierdzono występowanie stężeń żelaza do 50 mg/l i azotu amonowego 3-15 mg/l (rys. 4.3-1).

Zmienność środowisk hydrogeochemicznych w obrębie utworów czwartorzędu związana jest nie tylko z obecnością materii organicznej, ale również z warunkami jej przemian w wyniku procesów utleniania. Niekorzystne warunki (wysokie stężenia żelaza i manganu) występują w szczególności tam, gdzie aktualnie zachodzą procesy utleniania materii organicznej i towarzyszących jej siarczków. Przykład tego typu warunków obrazuje przekrój na rysunku 4.3-2.

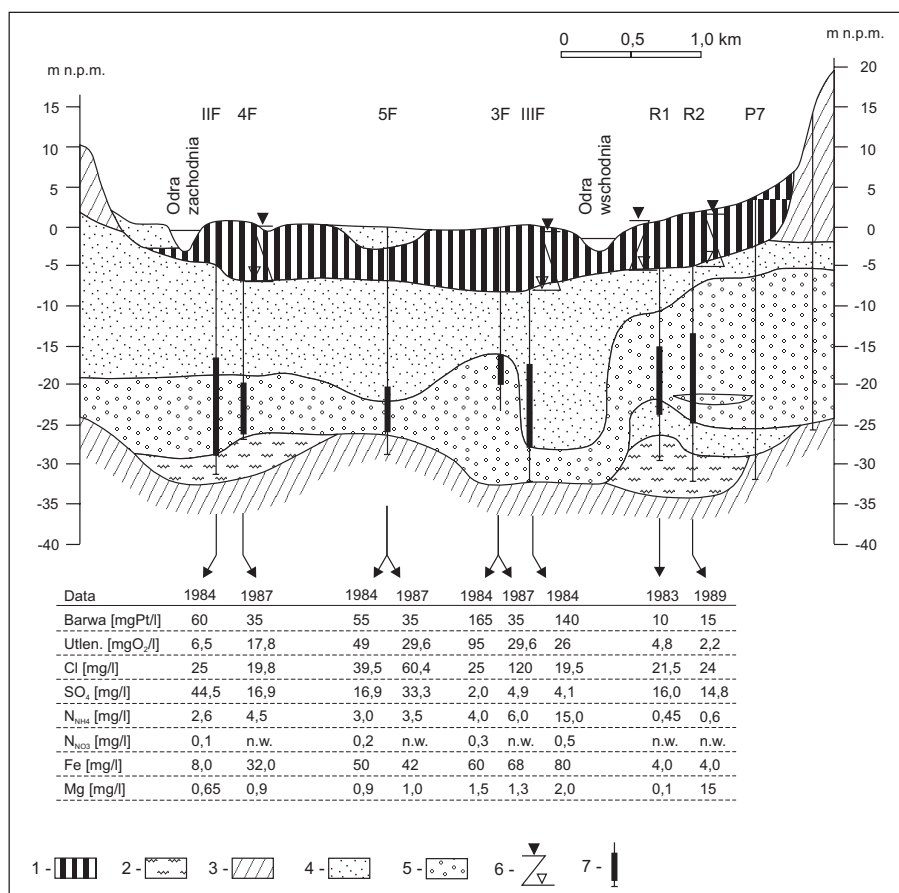
Przyczyną zmienności środowisk hydrogeochemicznych są również warunki redukcyjno-utleniające (redox) wynikające z aktualnego lub paleohydrogeologicznego oddziaływania tlenu atmosferycznego. W związku z tym wody pozbawione żelaza, a czasami również manganu, występują w płytkich wodach gruntowych w zasięgu strefy tlenowej, lokalnie również w wodach wgłębnych w zasięgu ukształtowanych paleohydrogeologicznie dawnych stref aeracji (Górski, 1981). Ogólny schemat warunków hydrogeochemicznych w utworach czwartorzędu (na podstawie danych z rejonu środkowej Wielkopolski) przedstawiono na rysunku 4.3-3 i w tabeli 4.3-1.

4.3.3. Antropogeniczne zmiany jakości wód

Zanieczyszczenia antropogeniczne związane są najczęściej z oddziaływaniem różnego typu ognisk zanieczyszczeń o charakterze punktowym (np. doły chłonne), liniowym lub pasmowym (np. rurociągi przesyłowe, drogi, kanały ściekowe, cieki), małopowierzchniowym (np. składowiska odpadów, pola filtracyjne) i wielkoprzestrzennym (np. chemizacja rolnictwa, tereny zabudowy, emisje pyłowo-gazowe).

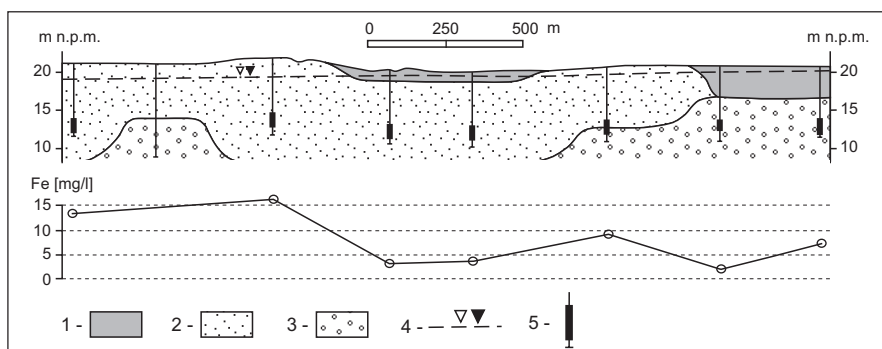
Badania wykazują, że najbardziej zanieczyszczone są wody w rejonach osadnictwa (rys. 4.3-4). W obszarach tych dochodzi od wielu lat do koncentracji zanieczyszczeń związanych z kumulowaniem się różnych oddziaływań (ścieki, środki zimowego utrzymania dróg, emisje pyłowo-gazowe, nawozy i środki ochrony roślin). Płytkie wody podziemne do głębokości 20-30 m są wyraźnie zanieczyszczone i w dużym stopniu nieprzydatne dla zaopatrzenia w wodę, najczęściej ze względu na zawartość azotanów, często również siarczanów, detergentów, WWA i azotu amonowego (Górski, 1989a).

W obszarach upraw rolnych obserwuje się stopniowe pogarszanie jakości wód, choć są one tu generalnie lepsze niż na terenach zabudowy. Wynika to przede wszystkim z faktu, że nawozy mineralne zaczęto stosować w Polsce na szerszą skalę (powyżej 50 kg NPK/ha) stosunkowo niedawno (od połowy lat sześćdziesiątych). Należy się jednak liczyć ze wzrostem zanieczyszczenia wód w tych rejonach, szczególnie w zakresie azotanów. Wzrost zawartości azotanów przy zało-



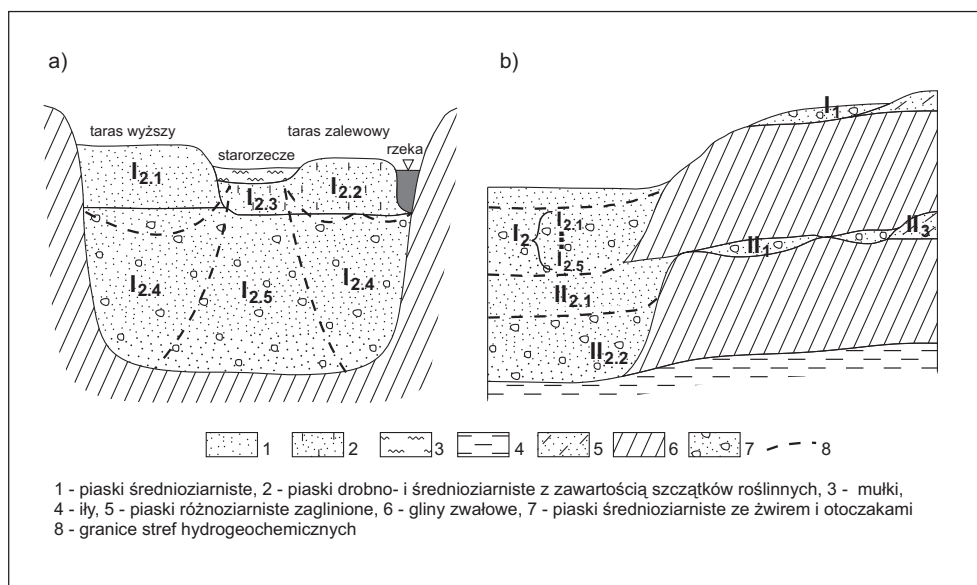
Rys. 4.3-1. Przykłady skrajnie niekorzystnego środowiska hydrogeochemicznego w Dolinie Dolnej Odry na południe od Szczecina.

Objaśnienia: 1 – torfy; 2 – mułki; 3 – gliny zwałowe; 4 – piaski drobno- i średnioziarniste; 5 – piaski różnoziarniste ze żwirem; 6 – zwierciadło wody nawiercone i ustalone; 7 – filtr studni.



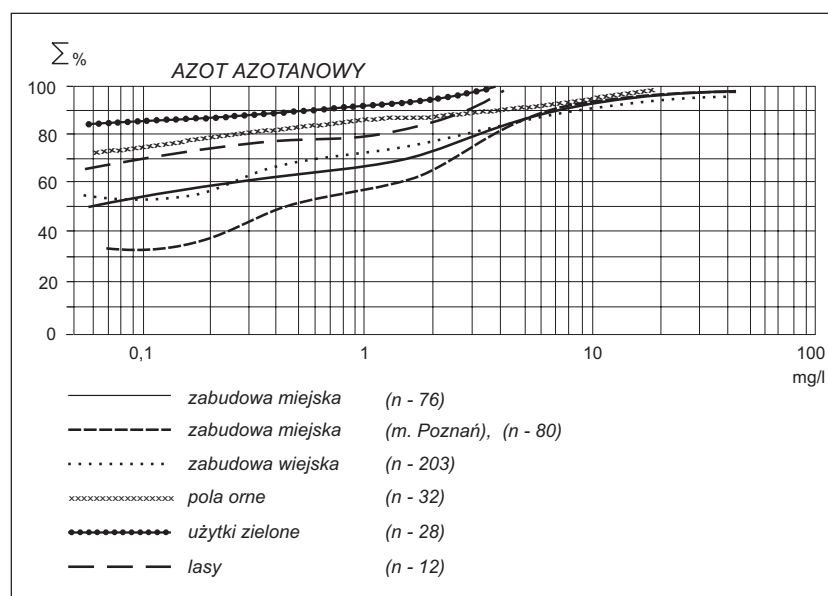
Rys. 4.3-2. Wpływ warunków infiltracji na zawartość żelaza w wodzie (taras zalewowy Warty w rejonie Gorzowa Wielkopolskiego).

Objaśnienia: 1 – mułki; 2 – piaski drobno i średnioziarniste; 3 – piaski różnoziarniste ze żwirem i otoczkami; 4 – swobodne zwierciadło wody; 5 – filtr studni.



Rys. 4.3-3. Strefy hydrogeochemiczne wodonośnych zbiorników czwartorzędowych:

- a) zbiornik dolinny
b) zbiorniki kopalne



Rys. 4.3-4. Zanieczyszczenie azotanami płytkich wód podziemnych w zależności od zagospodarowania terenu w pobliżu studni (środkowa Wielkopolska, studnie o głębokości do 30 m).

Tabela 4.3-1. Charakterystyka stref hydrogeochemicznych czwartorzędowych zbiorników wód podziemnych przedstawionych na rysunku 4.3-3.

Nr strefy wg rys. 4.3-3	Środowisko występowania wód podziemnych	Warunki kształtowania się środowiska hydrogeochemicznego	Główne cechy jakości wody
I ₁	Sandry	W obrębie utworów fluwioglacjalnych pod wpływem wód z infiltracji od powierzchni terenu.	Bardzo mała i mała zawartość związków żelaza (średnio 0,3 mg/l). Występują wody pozbawione związków żelaza i manganu.
I _{2.1}	Wyższe tarasy dolin i pradolin	W strefie utworów fluwialnych z małą zawartością substancji organicznych oraz utworów fluwioglacjalnych pod wpływem wód z infiltracji powierzchniowej oraz wód drenowanych z przyległych stref wysoczyznowych.	Mała zawartość związków żelaza (średnio około 1 mg/l). Twardość wód w granicach 4-6 mval/l. Występują wody pozbawione związków żelaza i manganu.
I _{2.2}	Wyższe partie tarasów zalewowych dolin rzecznych (łachy piaszczyste)	W obrębie młodych utworów fluwialnych z okresu holocenińskiego z zawartością szczątków organicznych pod wpływem wód z infiltracji powierzchniowej.	Bardzo duża zawartość związków żelaza (do 25 mg/l) i manganu (do 7 mg/l).
I _{2.3}	Niższe partie tarasów zalewowych dolin rzecznych	W strefie utworów fluwialnych z okresu holocenińskiego z zawartością organicznych szczątków pod wpływem wód drenowanych do doliny z wysoczyzn morenowych.	Duża zawartość związków żelaza (do 10 mg/l) i manganu (do 1 mg/l). Podwyższona zawartość amoniaku (do 1 mg/l).
I _{2.4}	Doliny rzeczne w strefie zasięgu wód drenowanych lateralnie z wysoczyzn	W strefie utworów fluwioglacjalnych lub fluwialnych przedholocenińskich pod wpływem wód drenowanych do doliny z przylegających stref wysoczyznowych.	Mała zawartość związków żelaza (średnio około 1 mg/l), niewielka twardość wód (3-6 mval/l).
I _{2.5}	Doliny rzeczne w strefie zasięgu wód drenowanych z podłoża	W strefie utworów fluwioglacjalnych i fluwialnych starszych cykli sedymentacyjnych pod wpływem wód dalekiego krążenia z odległych stref wysoczyznowych.	Średnia zawartość żelaza w wodzie (najczęściej w granicach 2-4 mg/l), manganu (0,3-0,4 mg/l). Stosunkowo wysoka mineralizacja wód oraz zawartość chlorków.
II ₁	Pokrywy fluwioglacjalne zakryte	W strefie utworów fluwioglacjalnych pod wpływem wód przesączających się przez gliny zwalowe.	Mała zawartość związków żelaza (średnio 1-1,5 mg/l). Występują wody pozbawione żelaza i manganu.

C.d. tabeli 4.3-1.

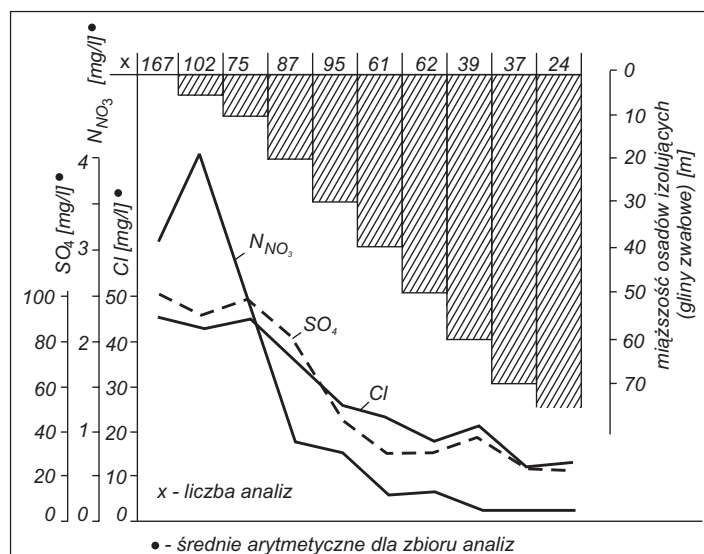
Nr strefy wg rys. 4.3-3	Środowisko występowania wód podziemnych	Warunki kształtowania się środowiska hydrogeochemicznego	Główne cechy jakości wody
II _{2.1}	Doliny kopalne – utwory fluwialne	W strefie utworów fluwialnych mogących zawierać lokalnie koncentrację szczątków organicznych, pod wpływem wód przesączających się przez gliny zwałowe.	Średnia zawartość związków żelaza (około 3,0 mg/l), maksymalnie do 10 mg/l. Podwyższona zawartość amoniaku (średnio 0,25 mg/l).
II _{2.2}	Doliny kopalne – utwory fluwioglacjalne	W strefie utworów fluwioglacjalnych pod wpływem wód przesączających się przez gliny zwałowe oraz ze strefy utworów fluwialnych.	Średnia zawartość związków żelaza (około 2,0 mg/l), podwyższona zawartość amoniaku (średnio 0,25 mg/l).
II ₃	Moreny czołowe – strefy spiaszczeń	W strefie utworów zwałowych część ciowo przemytych pod wpływem wód przesączających się przez gliny zwałowe lub wód infiltrujących od powierzchni terenu.	Bardzo mała zawartość związków żelaza (<0,5 mg/l). Występują wody pozbawione związków żelaza i manganu.

zeniu zwiększenia zużycia nawozów azotowych (do 100-120 kg/ha) może osiągnąć trend obserwowany w krajach rozwiniętych tj. 0,4 mg/l N-NO₃/rok.

W wyniku oddziaływania różnych ognisk w wodach podziemnych pojawiają się przede wszystkim podwyższone stężenia azotanów, siarczanów i chlorków, które związane są z oddziaływaniem obszarowych ognisk zanieczyszczeń. Bardziej lokalny charakter mają natomiast zanieczyszczenia azotem amonowym i substancjami organicznymi (w tym WWA, substancjami ropopochodnymi, detergentami, fenolami), a także metalami ciężkimi. Największy problem ze względu na powszechność występowania, łatwość migracji w środowisku gruntowym, a także brak skutecznej i ekonomicznej metody oczyszczania stanowią azotany.

Z badań wykonanych w rejonie środkowej Wielkopolski (rys. 4.3-5) wynika, że intensywne zanieczyszczenia chlorkami i siarczanami są widoczne w strukturach odkrytych oraz izolowanych glinami zwałowymi o miąższości poniżej 20 metrów. Brak wpływu zanieczyszczeń tymi jonami widoczny jest zaś dopiero przy miąższości glin powyżej 60 metrów. W przypadku azotanów zanik wpływu antropopresji zaznacza się przy miąższości glin izolujących powyżej 50 m.

Rozpatrując warunki migracji zanieczyszczeń należy zwrócić uwagę na wpływ strefy aeracji oraz charakteru ogniska zanieczyszczeń na rodzaj zanieczyszczeń obserwowanych w strefach oddziaływania ścieków, nawozów organicznych i odcieków ze składowisk odpadów. Możemy wydzielić tu dwa schematy migracji (Górski, 1989 b) – rysunek 4.3-6. Pierwszy z nich obejmuje ogniska, z których dopływ zanieczyszczeń następuje wolno poprzez strefę glebową i strefę aeracji, drugi zaś te, z których zanieczyszczenia przedostają się w dużych ilościach i szybko migrują do warstwy wo-

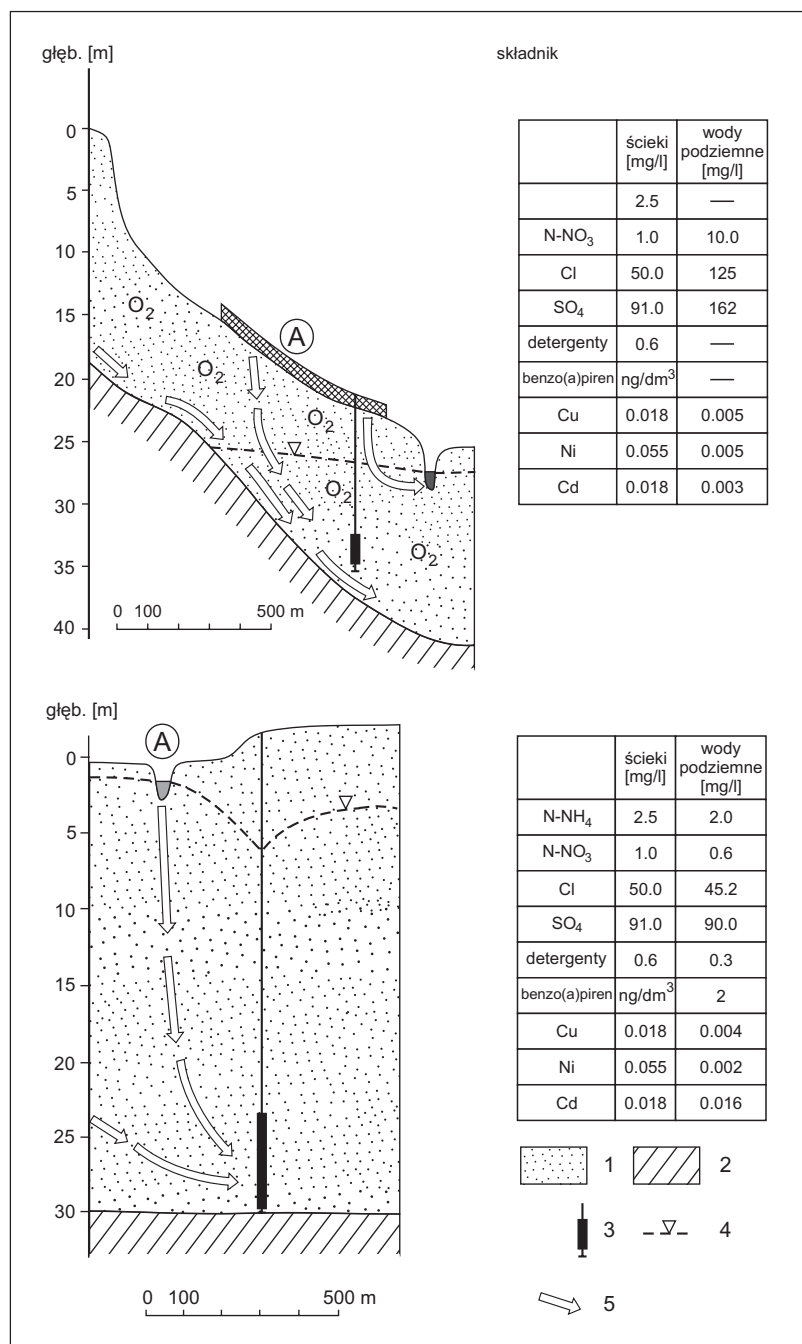


Rys. 4.3-5. Zmienność głównych wskaźników zanieczyszczeń wód podziemnych piętra czwartorzędowego w środkowej Wielkopolsce w zależności od warunków izolacji poziomu wodonośnego.

donośnej, bądź też przenikają z pominięciem strefy aeracji. W pierwszym schemacie zanieczyszczenia są całkowicie utlenione w strefie aeracji, a do warstwy wodonośnej przedostają się już produkty tego utlenienia. Przykładem takich warunków jest migracja zanieczyszczeń na terenach zabudowy z wielu drobnych ognisk (szamba, gnojowniki). Objawami zanieczyszczenia w tych warunkach są składniki mineralne migrujące niezależnie od warunków redox (np. chlorki) oraz produkty utleniania substancji organicznych i mineralnych (przede wszystkim azot azotanowy i siarczany). Istotne jest w szczególności to, że w warunkach tych utlenieniu ulegają również zanieczyszczenia organiczne (np. detergenty i WWA).

Drugi schemat dotyczy warunków, kiedy migracja zanieczyszczeń jest na tyle szybka lub strefa aeracji o tak małej miąższości, że procesy utleniania nie odgrywają istotnej roli. W tych warunkach do warstwy wodonośnej przedostają się nie tylko składniki mineralne, ale również organiczne. Tego typu warunki migracji występują przede wszystkim w rejonach pól filtracyjnych, wylewisk ścieków, wysypisk odpadów oraz infiltracji zanieczyszczonych wód powierzchniowych. W strefach tych wody podziemne mają skład zbliżony do ścieków i charakteryzują się w szczególności podwyższonymi stężeniami azotu amonowego i organicznego oraz substancji organicznych.

Istotnym czynnikiem ograniczającym zanieczyszczenie wód podziemnych azotanami jest proces denitryfikacji, w wyniku którego azotany redukują się do nieaktywnego chemicznie azotu gazowego. Procesy denitryfikacji mogą rozwijać się jednak tylko w środowisku redukcyjnym wzbogaconym w materię organiczną pochodzenia naturalnego lub antropogenicznego, a efektywny przebieg procesu możliwy jest tylko przy udziale czynnika mikrobiologicznego. Badania wykazują, że procesy denitryfikacji zachodzą w szczególności w warunkach, kiedy do war-

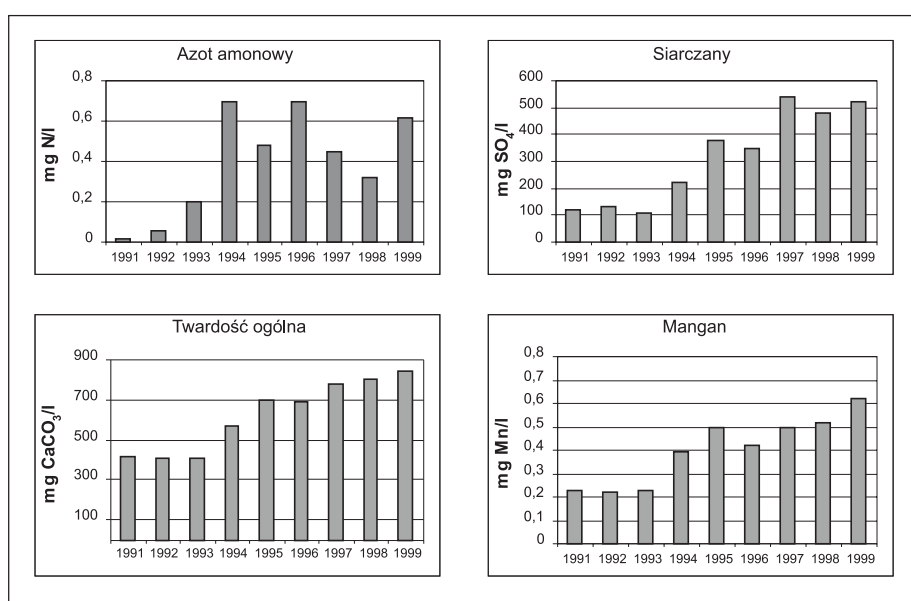


Rys. 4.3-6. Charakterystyka zanieczyszczeń wód podziemnych w zależności od warunków migracji ścieków w środowisku gruntowym.

Objaśnienia: A – ognisko zanieczyszczeń; 1 – piaski i żwiry; 2 – gliny zwałowe; 3 – filtr studni; 4 – zwierciadło wody podziemnej; 5 – kierunek przepływu wód; znak „-” oznacza nie wykazano.

stwy wodonośnej wzbogaconej w substancje organiczne (np. w wyniku infiltracji ścieków lub nawozów organicznych) przedostają się wody zanieczyszczone azotanami. Zachodzący wtedy proces denitryfikacji autotroficznej (przy udziale siarkowodoru i siarczków), powodując eliminację azotanów, prowadzi równocześnie do powstawania dużych ilości siarczanów. Wzrasta również silnie twardość wody.

Proces taki zaobserwowano na kilku ujęciach – np. na ujęciu Trzaski dla Inowrocławia oraz na ujęciu dla Gostynia i Gorzowa Wielkopolskiego. Przykład obrazujący zmiany jakości wody w wyniku denitryfikacji na ujęciu dla Gorzowa przedstawiono na rysunku 4.3-7.



Rys. 4.3-7. Zmiany chemizmu wód podziemnych w wyniku redukcji azotanów na ujęciu w Gorzowie Wielkopolskim.

4.3.4. Metody oceny antropogenicznego zanieczyszczenia wód podziemnych

Jednym z istotnych problemów przy interpretacji danych hydrochemicznych jest rozstrzygnięcie, czy badana woda cechuje się naturalnym składem chemicznym, czy też jej chemizm jest również efektem zanieczyszczeń antropogenicznych. Problem ten można stosunkowo łatwo rozstrzygnąć jedynie wtedy, kiedy w wodzie stwierdzimy obecność substancji wyprodukowanych przez człowieka, które w naturalnym środowisku nie występują. Praktyka wykazuje jednak, że i w tym przypadku mogą występować trudności wynikające z tego, że substancje te występują zwykle w bardzo niskich stężeniach i istnieje możliwość zanieczyszczenia próbki w trakcie jej pobierania i analityki. Ponadto niektóre zanieczyszczenia produkowane przez człowieka (np. fenole) mogą występować również w niewielkich stężeniach w naturalnym środowisku.

Przejawem zanieczyszczenia jest często jednak tylko wzrost stężenia substancji występujących również w naturalnych wodach podziemnych. Rozstrzygnięcie czy woda jest zanieczyszczona antropogenicznie jest w takim przypadku trudne, szczególnie na etapie pierwszej fazy dopływu zanieczyszczeń. Rozpoznanie zaś problemu właśnie w tym okresie jest szczególnie istotne. Umożliwia bowiem wczesne podejmowanie działań dla zapewnienia ochrony wód podziemnych. Określenie czy dana woda jest zanieczyszczona na niskim etapie antropopresji musi być oparte na dobrym rozpoznaniu warunków hydrogeologicznych, hydrogeochemicznych oraz sozologicznych i wymaga dużej wiedzy i doświadczenia.

Według A. Macioszczyk (1987b) ocenę czy dana woda jest antropogenicznie zanieczyszczona można m.in. przeprowadzić wg analizy następujących kryteriów:

- Przekroczenie w badanej wodzie zakresu tła hydrogeochemicznego ustalonego dla danej jednostki hydrogeologicznej (warstwy wodonośnej), co wskazuje zwykle na zanieczyszczenie wód lub też występowanie naturalnej anomalii hydrogeochemicznej;
- Występowanie w wodzie wysokich stężeń związków azotu. Pominąwszy sytuacje anomalne w wodach podziemnych Polski, wykorzystywanych jako wody do picia, mineralne formy azotu nie przekraczają następujących zakresów: N-NO_3 – 0,5 mg N/l, N-NO_2 – 0,005 mg N/l, a formy organiczne wartości 0,5 mg N/l;
- Wysoka zawartość substancji organicznych w wodach podziemnych. Przybliżoną miarą jej występowania jest wysoka utlenialność (ChZT) wyznaczona metodą nadmanganianową. W czystych wodach podziemnych z wyjątkiem sytuacji anomalnych, utlenialność rzadko przekracza 3 mg O_2 /l;
- Wielowierzchołkowe, niewyrównane rozkłady statystyczne (histogramy) elementów hydrogeochemicznych dobrze migrujących w wodach podziemnych, sporządzane dla jednorodnych pod względem warunków hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych populacji. Interpretacja powinna obejmować zbiór danych nie mniejszy niż 50 oznaczeń;
- Mozaikowa zmienność stężeń przedstawiona na mapach, a dotycząca elementów hydrogeochemicznych dobrze migrujących w wodach podziemnych (lub stosunków jonowych między nimi), która jest wskaźnikiem występowania wielu niezależnych ognisk zanieczyszczenia poszczególnych studni. Zjawisko to obserwujemy zwłaszcza przy badaniu zanieczyszczeń studni kopanych;
- Inwersja mineralizacji (lub suchej pozostałości) wód gruntowych w stosunku do wód wgłębnych wskazująca na zanieczyszczenie wód gruntowych. Interpretację przeprowadzić można w oparciu o statystyczną ocenę mineralizacji wód występujących w określonych interwałach głębokości.

Według J. Prażaka (2002a, 2002b) o antropogenicznym zanieczyszczeniu wód mogą świadczyć ich typy chemiczne, odmienne od właściwych dla naszej strefy klimatycznej, np. $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{Cl-HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ czy też $\text{SO}_4\text{-NO}_3\text{-Ca-Mg}$.

Propozycję stosunkowo prostych zasad oceny, czy woda jest zanieczyszczona antropogenicznie i klasyfikacji stopnia zanieczyszczenia przedstawił J.Górski

(2001). Propozycja ta oparta jest na analizie stężeń kilku podstawowych wskaźników hydrochemicznych, dla których ustalono poziom tła na podstawie regionalnych badań hydrogeochemicznych w rejonie Wielkopolski. Ze względu na to, że jednym z głównych parametrów oceny są chlorki, propozycja ta dotyczy w zasadzie strefy intensywnej wymiany wód poza zasięgiem zasolenia ascenzyjnego. Zasady oceny przedstawione są w tabeli 4.3-2.

Opracowanie oceny wg przedstawionej propozycji jest w zasadzie zadaniem dla doświadczonego hydrogeologa. Jej dokonanie jest szczególnie niezbędne przy wydzielaniu stref geogenicznego zasolenia wód oraz ustaleniu kryteriów wydzielania wód klasy Vb (patrz tab. 4.3-2).

Tabela 4.3-2. Propozycja klasyfikacji antropogenicznego zanieczyszczenia wód podziemnych.

Symbol klasy	Kryteria wydzielenia	Stan zanieczyszczenia
I	Cl < 30 mg/l, NO ₃ < 0,1 mg/l, również wody o zawartości NO ₃ od 0,1 do 1 mg/l jeśli Cl < 30 mg/l	Wody naturalne lub bardzo słabo zanieczyszczone
II	Cl od 30 do 50 mg/l, NO ₃ < 0,1 mg/l	Wody słabo zanieczyszczone
III	Cl > 50 mg/l, i/lub SO ₄ > 100 mg/l, NO ₃ < 0,1 mg/l	Wody wyraźnie zanieczyszczone
IV	NO ₃ od 1 do 10 mg/l, również wody o zawartości od 0,1 do 1 mg/l jeśli Cl > 30 mg/l	
Va	NO ₃ > 10 mg/l	Wody silnie zanieczyszczone
Vb	Występowanie w wodzie powyżej tła hydrogeochemicznego NH ₄ , metali ciężkich, potasu oraz substancji organicznych	
VI	Występowanie w wodzie substancji będących wytworem sztucznej syntezy chemicznej, nie występujących w środowisku naturalnym	Wody skażone

4.3.5. Zmiany jakości wód podziemnych w warunkach eksploatacji

Zmiany jakości wód podziemnych w warunkach eksploatacji mogą być efektem:

- zmiany naturalnego systemu krążenia wód,
- wywołania przemian hydrogeochemicznych w środowisku geologicznym w obszarze spływu wód do ujęcia.

Zmiany jakości wód podziemnych wynikające ze zmiany systemu krążenia wód mogą być zarówno pozytywne jak i negatywne. Pozytywne mogą wystąpić, jeśli warunki hydrogeochemiczne w obszarze zasilania ujęcia są korzystniejsze niż w miejscu ujęcia. Poprawa jakości wody w warunkach eksploatacji w zakre-

się niektórych parametrów (np. barwa i utlenialność) może być również związana z intensyfikacją krążenia wód (Górski, 1989a).

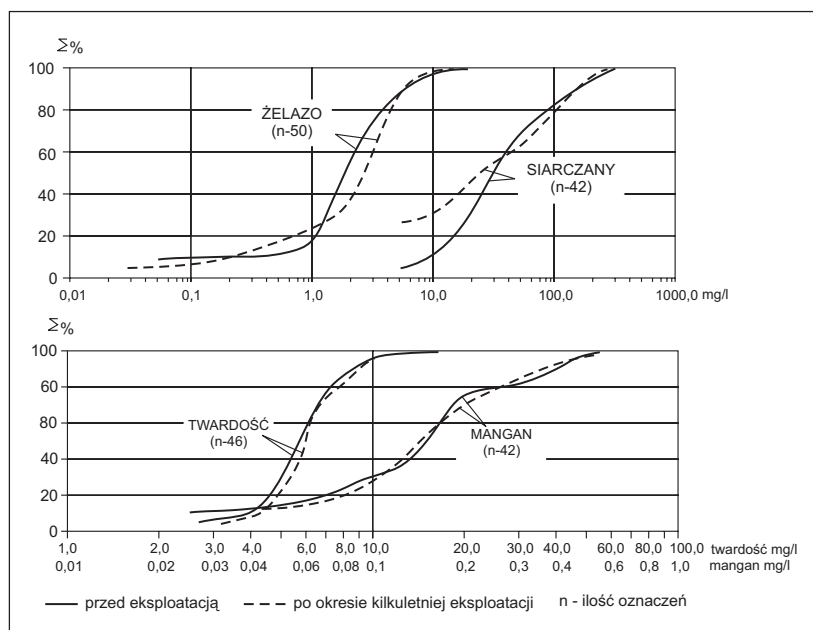
Często jednak w trakcie eksploatacji następuje pogorszenie jakości wód. Zmiany nie występują, lub są niewielkie, jeśli pobór jest na tyle mały, że nie wpływa na zmianę zasadniczych kierunków krążenia wód np., gdy studnia została zafiltrowana w dolnej części zbiornika dolinnego, stanowiącego element drenażu regionalnego systemu krążenia wód. Jakość wód z tej studni nie zmienia się dopóki pobór pokrywany jest ze strumienia wód drenowanego do doliny i nie powoduje dopływu wód z górnych partii zbiornika.

Zmiany jakości wód nie występują lub są niewielkie również wtedy, kiedy warunki hydrogeochemiczne w obszarze zasilania ujęcia są względnie jednorodne. Doświadczenia z eksploatacji wykazują, że sytuacja taka występuje w rozległych dobrze izolowanych basenach artezyjskich (np. oligoceński zbiornik niecki mazowieckiej). Dane z rejonu środkowej Wielkopolski wykazują, że nie obserwuje się większych zmian jakości w zbiornikach międzymorenowych (rys. 4.3-8). Już jednak w zbiorniku wielkopolskiej doliny kopalnej pewne zmiany są widoczne (rys. 4.3-9). Zmiany są w tym przypadku niewielkie i zaznaczają się głównie w zawartości żelaza i manganu. Są one związane ze strefowością środowiska hydrogeochemicznego górnej i dolnej części doliny kopalnej, jak i z przestrzenną zmiennością osadów wodonośnych o różnej genezie. Większość studni w dolinie kopalnej zafiltrowana jest w dolnej części zbudowanej z utworów gruboziarnistych z zawartością węglanów. W warunkach eksploatacji obserwuje się w tych studniach pogorszenie jakości wód związane z przenikaniem wód z górnej partii zbudowanej z utworów drobnoziarnistych z większą zawartością szczątków organicznych.

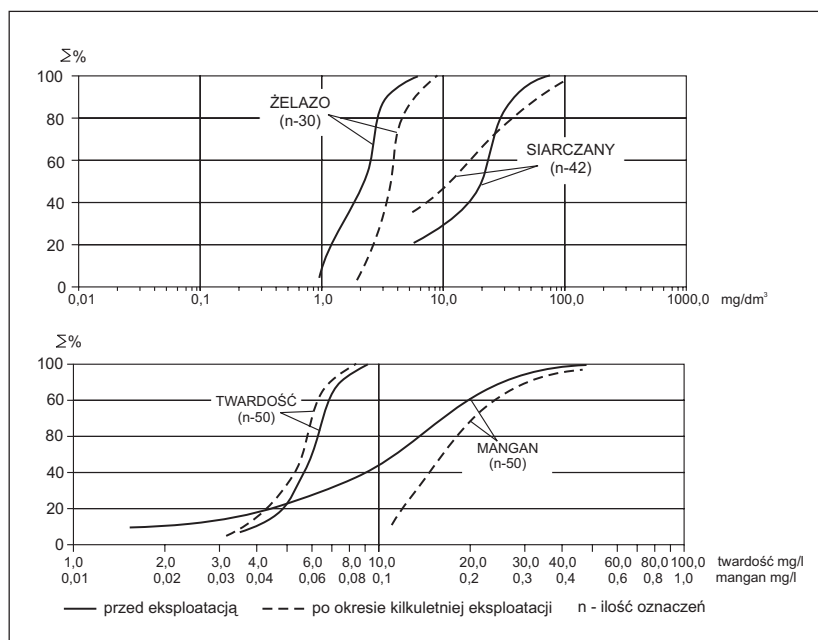
Duże zmiany jakości wód podziemnych obserwuje się natomiast w przypadku znacznej niejednorodności warunków hydrogeochemicznych w obszarze zasilania ujęcia. Sytuacja taka znana jest np. z rejonu Wielkopolski, gdzie w kilku ujęciach w trakcie eksploatacji pojawiło się wysokie zabarwienie wody związane z lokalizacją studni w pobliżu naturalnie ukształtowanych stref wysokiego zabarwienia wody w poziomie mioceńskim (Górski, 1989a).

Bardzo duże zmiany jakości wody w trakcie eksploatacji mogą występować również w ujęciach pobierających wody z odkrytych zbiorników wodonośnych. Zmiany te wynikają z mieszania się wód z różnych stref hydrogeochemicznych (patrz rys. 4.3-3), dopływu zanieczyszczonych wód powierzchniowych oraz wód zanieczyszczonych ze stref oddziaływania ognisk zanieczyszczeń. Dotyczy to zarówno odkrytych zbiorników porowych jak i szczelinowych. W przypadku tych ostatnich obserwuje się często nie tylko zanieczyszczenia chemiczne, ale również mikrobiologiczne, jak to ma miejsce np. w ujęciu wód z utworów kredowych dla miasta Konina.

W przypadku odkrytych zbiorników wodonośnych, a w szczególności dolin i pradolin omówione wyżej zmiany wynikające ze zmiany systemu krążenia wód współwystępują z przemianami środowisk hydrogeochemicznych.



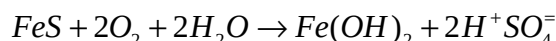
Rys. 4.3-8. Zmiany jakości wód podziemnych międzymorenowych zbiorników wodonośnych w trakcie eksploatacji (środkowa Wielkopolska).



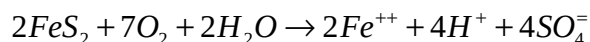
Rys. 4.3-9. Zmiany jakości wód podziemnych wielkopolskiej doliny kopalnej w warunkach eksploatacji (środkowa Wielkopolska).

Zmiany jakości wód podziemnych wynikające z przemian hydrogeochemicznych w środowisku geologicznym zachodzą w wyniku podjęcia eksploatacji w zbiornikach dolinnych. Trwałe obniżenie zwierciadła wody oraz rozszerzenie, a często dopiero powstanie strefy aeracji, powoduje, że mogą w niej zachodzić procesy hydrogeochemiczne związane z wpływem czynników atmosferycznych. W strefie tej może dojść do intensywnego utleniania się substancji organicznych, żelaza i manganu dwuwartościowego, amoniaku, siarkowodoru i siarczków. Z procesów tych najbardziej istotne z punktu widzenia jakości wód podziemnych jest utlenianie się siarczków. Proces ten został zaobserwowany po raz pierwszy w ujęciu Zawada dla Zielonej Góry zlokalizowanym w pradolinie Odry, gdzie był przyczyną katastrofalnych zmian jakości wody (Kubisz, Ratajczak, 1972; Błaszyk, Górski, 1979 i 1981). W toku dalszych badań stwierdzono, że występuje on z różnym natężeniem w wielu ujęciach dolinnych i pradolinnych i jest przyczyną dużych zmian jakości wody.

Proces polega na utlenianiu się zredukowanych związków siarki, których występowanie w środowisku utworów dolinnych jest związane z obecnością szczątków organicznych. W sytuacji, kiedy siarczki te znajdują się w środowisku tlenowym nowo utworzonej strefy aeracji stają się niestabilne i ulegają utlenieniu wg znanych reakcji:



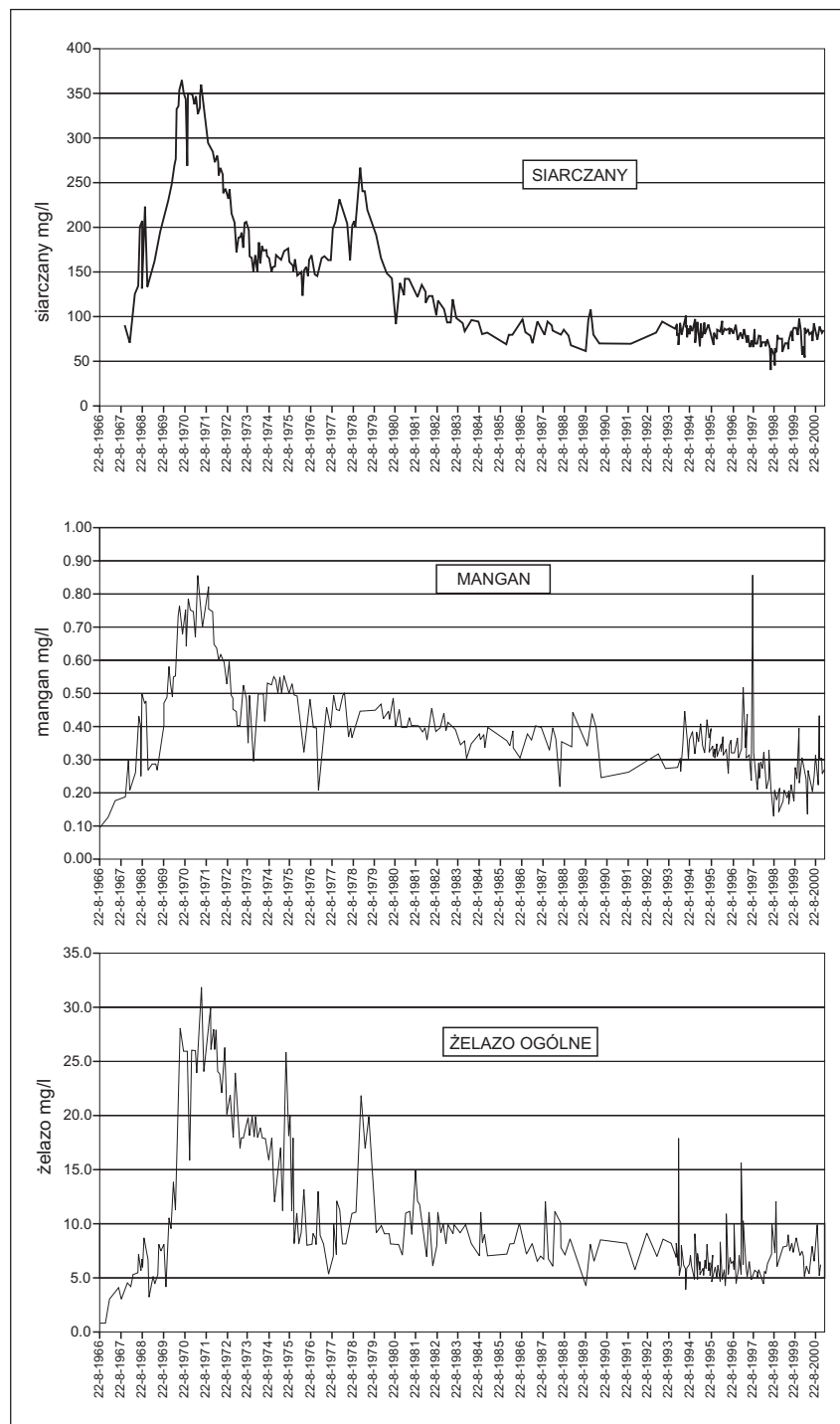
lub



Reakcje te przebiegają przy udziale czynnika mikrobiologicznego, który jest tu katalizatorem. Główną rolę odgrywa w szczególności gatunek *Thiobacillus thiooxidans*, który wykazuje działalność życiową przy bardzo kwaśnym środowisku (pH poniżej 1). Powstający w wyniku powyższych reakcji kwas siarkowy oraz łatwo hydrolizujące siarczany powodują bardzo silne zakwaszenie środowiska tak, że wartość pH w strefie utleniania związków siarki może obniżyć się do wartości poniżej 3. Kwas siarkowy jest neutralizowany w wyniku reakcji rozpuszczania składników środowiska skalnego, a w szczególności węglanów. W warunkach bardzo silnego zakwaszenia w strefie aeracji rozpuszczeniu ulega nawet żelazo trójwartościowe i mangan czterwartościowy (Górski, 1981).

Procesy rozpuszczania składników środowiska skalnego nie są w stanie w pełni zneutralizować działania powstającego kwasu siarkowego. Wody silnie zakwaszone ze strefy aeracji i górnej warstwy wodonośnej przedostają się do głębszych partii zbiornika i w panujących tam bardziej redukcyjnych warunkach powodują w szczególności intensywne rozpuszczanie żelaza i manganu.

W konsekwencji tego, w wodzie pompowanej ze studni zafiltrowanych najczęściej w dolnej części zbiornika wzrasta stężenie siarczanów, wapnia, magnezu, żelaza i manganu. Wzrasta również zawartość CO_2 oraz obniża się pH wody. W strefie przypowierzchniowej można stwierdzić w wodzie obecność kwasu siar-



Rys. 4.3-10. Zmiany jakości wody podczas eksploatacji ujęcia wody „Zawada” dla Zielonej Góry.

kowego. Największe zmiany jakości wody obserwuje się w studniach, których filtry umieszczone są najwyżej, bowiem te studnie przejmują w pierwszej kolejności agresywne wody płynące ze strefy przypowierzchniowej. Oddziaływanie agresywnych wód ze strefy aeracji zaznacza się najsilniej w warunkach podnoszenia się zwierciadła wody w wyniku zwiększonych opadów lub obniżenia bądź czasowego zaprzestania eksploatacji. Jest to widoczne szczególnie wyraźnie, jeśli podnoszenie się zwierciadła wody następuje po dłuższym okresie suchym (patrz również rozdz. 8.6 – ujęcie Mosina).

Omówiony proces jest zjawiskiem przejściowym, związanym z przebiegiem procesów hydrogeochemicznych w odsłoniętej części struktury wodonośnej. Po wyczerpaniu produktów wyjściowych procesów hydrogeochemicznych środowisko wraca powoli do stanu stabilizacji. Proces ten jest jednak długotrwały i przebiega przez szereg lat. Przykład obrazujący przebieg procesu w czasie przedstawiono na rysunku 4.3.10 (patrz – str. 76) na podstawie danych z ujęcia Zawada dla Zielonej Góry w pradolinie Odry. Szczegółowsze omówienie procesów przemian hydrogeochemicznych można znaleźć w pracach: Błaszyk, Górski, 1978, 1979, 1981; Górski, 1981; Kleczkowski, 1984 (red.).

Należy dodać, że powyższy proces może rozwijać się jednak nie tylko w wyniku utleniania naturalnej substancji organicznej, ale również substancji wprowadzonej do środowiska geologicznego w wyniku oddziaływania ognisk zanieczyszczeń, a więc np. w rejonach oddziaływania ścieków, odcieków ze składowisk odpadów oraz wód powierzchniowych zanieczyszczonych ściekami.

5. Projektowanie i wykonywanie prac i badań hydrogeologicznych

Prace i badania hydrogeologiczne projektowane na potrzeby budowy ujęć wód podziemnych nie powinny ograniczać się jedynie do terenu samej działki, na której wybudowane ma być ujęcie. Zasięg przestrzenny rozpoznania uzależniony jest od warunków występowania i krążenia wód w zbiorniku (poziomy wód gruntowych/wgłębnych, związki jednostki z otoczeniem i z wodami powierzchniowymi), sposobu zagospodarowania terenu (zagrożenia jakości wód), lokalizacji istniejących ujęć (współdziałanie, zmiany hydrodynamiczne i hydrogeochemiczne na skutek dotychczas prowadzonej eksploatacji), a także od przewidywanej wydajności projektowanego ujęcia i wynikających stąd szacunków co do rozległości i kierunku rozwoju jego obszaru zasobowego oraz obszaru wpływu. Generalnie należy przyjąć, że rozpoznanie powinno dotyczyć obszaru większego niż przewidywany obszar spływu wody do ujęcia. Wyjątkiem mogą być takie ujęcia, które projektuje się wybudować w głębokich, dobrze izolowanych poziomach wodonośnych, dla których obszar spływu wody i obszar zasobowy mogą być bardzo rozległe.

Zakres projektowanych prac geologicznych powinien być zróżnicowany w zależności od przewidywanej wydajności ujęcia oraz od stopnia skomplikowania warunków hydrogeologicznych i intensywności zagrożeń dla jakości wód przewidywanych do eksploatacji. Dla czytelnego przedstawienia tego zróżnicowania zasadne jest wprowadzenie podziału na ujęcia małe i duże oraz na takie, które pracują w specyficznych (nietypowych) warunkach hydrogeologicznych. Zaleca się, w nawiązaniu do wydzielen podanych w aktach prawnych, następujący podział:

1. Małe ujęcia, o zasobach (zapotrzebowaniu) do 50 m³/h.
2. Duże ujęcia, o zasobach (zapotrzebowaniu) przekraczających 50 m³/h.
3. Ujęcia pracujące w specyficznych warunkach hydrogeologicznych i użytkowania terenu (niezależnie od wielkości zasobów/zapotrzebowania) określonych przez jeden z poniższych czynników:

- ujęcia infiltracyjne,
- warunki hydrogeologiczne zaburzone prowadzonym odwodnieniem górniczym, a także budowlanym (o trwałym charakterze) i melioracyjnym,
- współdziałanie z innymi ujęciami ujęć wód podziemnych, lub też praca we wspólnym obszarze zasobowym (zwłaszcza w rejonach skoncentrowanej eksploatacji),
- znaczne zagrożenie jakości wód (antropogeniczne lub geogeniczne – w tym ujęcia w zbiornikach o niekorzystnym środowisku geochemicznym, wzbogaconym w siarczki i substancje organiczne),
- ujęcia w terenach ograniczonego użytkowania (zgodnie z art. 135 ust. 1 ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska – Dz. U. Nr 62, poz. 627 z późn. zm.) oraz w obrębie obszarów objętych krajowym systemem obszarów chronionych – formy ochrony określone w ustawie z dnia 16 października 1991 r. o ochronie przyrody (Dz. U. Nr 99, poz. 1079 z późn. zm.).

Wydzielenie ujęć małych i dużych nawiązuje do kompetencji organów administracji geologicznej szczebla powiatowego i wojewódzkiego. Natomiast wydzielenie ujęć pracujących w specyficznych warunkach hydrogeologicznych jest niezbędne ze względu na konieczność zróżnicowania zakresu projektowanych prac i badań oraz metodyki prac dokumentacyjnych w zależności od nietypowych, zmiennych warunków hydrogeologicznych oraz form użytkowania terenu.

Zakwalifikowanie projektowanego ujęcia do jednej z wymienionych wyżej grup powinno mieć miejsce już na etapie przygotowywania przez inwestora specyfikacji istotnych warunków zamówienia do przetargu na wykonanie ujęcia. Jest to zasadne ze względu na zapewnienie pełnej porównywalności ofert. Należy przy tym podkreślić, że ocena stopnia zmienności i skomplikowania warunków hydrogeologicznych jest zadaniem trudnym i ma charakter subiektywny wynikający z wielorakości problemów składających się na proces dokumentowania zasobów. Z tego względu na etapie poprzedzającym ogłoszenie przetargu wskazana jest współpraca inwestora z doświadczonym hydrogeologiem celem ścisłego i zgodnego z rozpoznaniem hydrogeologicznym sformułowania wymogów dotyczących niezbędnego zakresu prac dla zaprojektowania i wykonania ujęcia. Samodzielne określanie zakresu przez inwestora, połączone z zasadą konkurencji rynkowej skutkowało na przestrzeni ostatnich lat obniżeniem jakości prac geologicznych (Kapuściński i inni, 1999).

5.1. Wymagana treść projektu prac geologicznych

5.1.1. Ustalanie zasobów dla nowego ujęcia

Ogólne wymagania, jakie powinien spełniać projekt prac geologicznych określa dział II – rozdział 1 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. – Prawo geologiczne i górnicze (Dz. U. Nr 27 poz. 96 z późn. zm.), oraz rozporządzenie Ministra Śro-

dowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie projektów prac geologicznych (Dz. U. Nr 153, poz. 1777).

Wymogi zawarte w w/w aktach prawnych, poparte doświadczeniami w prowadzeniu prac dokumentacyjnych, pozwalają sformułować ramowe zalecenia dotyczące zawartości projektu prac geologicznych, sporządzanego w celu ustalenia zasobów eksploatacyjnych ujęć wód podziemnych.

Projekt prac winien składać się z części tekstowej i graficznej.

Część tekstowa projektu dla ustalenia zasobów małego ujęcia powinna zawierać następujące elementy:

1. Ogólne wprowadzenie, w tym określenie:
 - zlecniodawcy i przyszłego użytkownika ujęcia,
 - lokalizacji projektowanych prac, w tym położenia administracyjnego,
 - przeznaczenia wody, wielkości zapotrzebowania, wymogów co do jakości.
2. Charakterystyka terenu projektowanych prac:
 - położenie geograficzne (współrzędne, arkusz mapy topograficznej w skali 1:50 000),
 - morfologia i hydrografia rejonu projektowanych prac na tle podziału administracyjnego i geograficznego.
3. Budowa geologiczna i warunki hydrogeologiczne:
 - omówienie budowy geologicznej rejonu projektowanych prac oraz warunków hydrogeologicznych,
 - ocena stopnia rozpoznania geologicznego i hydrogeologicznego terenu: omówienie wyników przeprowadzonych wcześniej prac geologicznych i badań geofizycznych, w tym charakterystyka najbliższych ujęć wód podziemnych i stan prawny udokumentowania ich zasobów eksploatacyjnych, stan udokumentowania regionalnego zasobów wód podziemnych (zasoby dyspozycyjne),
 - charakterystyka jakości wód podziemnych w oparciu o zebrane materiały archiwalne,
 - wskazanie kierunku spływu wód podziemnych oraz wynikająca stąd wstępna ocena przewidywanego (potencjalnego) obszaru zasilania i obszaru zasobowego projektowanego ujęcia,
 - omówienie występowania ognisk zanieczyszczeń w obrębie przewidywanego obszaru zasilania ujęcia (bądź stref ochronnych),
 - wykaz materiałów archiwalnych wykorzystanych do opracowania schematu budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych.
4. Zakres niezbędnych prac geologicznych (projekt prac):
 - omówienie i uzasadnienie zakresu prac (ilość otworów, lokalizacja, głębokość wierceń),
 - opis konstrukcji projektowanych otworów wraz z opisem zafiltrowania (wstępne określenie budowy filtru, przewidywana głębokość posadowienia, dobór obsypki),

- opis technologii wiercenia, zakresu badań i obserwacji prowadzonych w czasie wiercenia (pobieranie próbek gruntu, obserwacja dopływów),
 - charakterystyka sposobu magazynowania i odprowadzania odpadów płuczковых, miejsc poboru wody do celów technologicznych, poboru energii elektrycznej, sposobu odprowadzenia wody z pompowań, sposobu magazynowania próbek geologicznych,
 - opis badań i pomiarów hydrogeologicznych (sposób usprawnienia otworu, szczegółowy sposób prowadzenia pompowania oczyszczającego i pomiarowego, rejestracja wydajności i depresji podczas pompowań, obserwacja zwierciadła wody w otworach sąsiednich, pobór próbek wody do analiz fizyczno-chemicznych i bakteriologicznych),
 - opis ewentualnych badań specjalnych: geofizycznych, litologiczno-petrograficznych, geochemicznych i innych,
 - omówienie ewentualnych zagrożeń dla środowiska i sposobu przeciwdziałania zagrożeniom podczas prowadzenia prac wiertniczych,
 - sposób prowadzenia prac geodezyjnych (terenowe określenie współrzędnych otworu oraz rzędnej wysokościowej w dowiązaniu do państwowej sieci geodezyjnej),
 - badania dla oceny stanu środowiska w obrębie przewidywanego obszaru zasilania, w tym szczególnie inwentaryzacja ognisk zanieczyszczeń antropogenicznych i geogenicznych,
 - ocena jakości wody (ilość próbek, zakres analiz),
 - wskazanie metody określenia zasobów eksploatacyjnych,
 - wstępne określenie konieczności ustanowienia strefy ochronnej ujęcia.
5. Harmonogram wykonywanych prac (w tym termin rozpoczęcia i zakończenia prac).
6. Wnioski i zalecenia:
- syntetyczne przedstawienie najważniejszych ustaleń zawartych w projekcie,
 - określenie próbek geologicznych podlegających przekazaniu organowi państwowej administracji geologicznej wraz ze wskazaniem sposobu i terminu ich przekazania,
 - wniosek o upoważnienie dozoru geologicznego do wprowadzania na bieżąco niezbędnych zmian w zakresie projektowanych prac (dot. głębokości otworów, konstrukcji filtrów, czasu prowadzenia pompowań, itp.).
7. Spis literatury i wykorzystanych materiałów archiwalnych.

Część graficzna projektu powinna zawierać:

1. Lokalizację terenu projektowanych prac na mapie topograficznej (dokumentacyjnej) w skali co najmniej 1:50 000 z zaznaczeniem miejscowości będących siedzibami gmin, lokalizacji istniejących ujęć wód podziemnych i innych punktów dokumentacyjnych.
2. Plan sytuacyjno-wysokościowy obrazujący lokalizację projektowanych otworów na tle zagospodarowania terenu (na planie powinny być uwidocznione obiek-

ty mogące ograniczać wykonywanie prac geologicznych, jak np.: linie telekomunikacyjne, gazociągi, linie energetyczne i inne, a także istniejące otwory studzienne znajdujące się w bliskiej odległości od projektowanego ujęcia).

3. Projekt geologiczno-techniczny otworów zawierający przewidywaną konstrukcję na tle spodziewanego profilu geologicznego.
4. Materiały z archiwalnych wierceń hydrogeologicznych w postaci kart otworów i profili geologicznych co najmniej z przewidywanego obszaru wpływu ujęcia.
5. Przekrój/przekroje ilustrujące warunki hydrogeologiczne panujące w rejonie projektowanego ujęcia. W przypadku braku danych lub prostych warunków hydrogeologicznych wystarczający jest schemat ideowy ilustrujący warunki hydrostrukturalne występowania wód podziemnych.

Projekt prac geologicznych dla dużego ujęcia powinien uwzględnić dodatkowo:

1. Opis pomiarów i badań niezbędnych dla określenia parametrów hydrogeologicznych i charakterystyki hydrodynamicznej projektowanego do ujęcia poziomu wodonośnego (pomiaru zwierciadła wody w sąsiednich studniach, zebranie informacji o poborach, lejach depresji).
2. Określenie zakresu i metodyki badań wpływu eksploatacji na inne poziomy wodonośne pozostające w więzi hydraulicznej z poziomem eksploatowanym, ze szczególnym uwzględnieniem poziomu płytkich wód gruntowych.
3. Opis ewentualnych prac dodatkowych dla określenia zasobów, np. badań geofizycznych, pomiarów hydrologicznych, badań modelowych, itp.
4. Do projektu należy dołączyć przekroje hydrogeologiczne oraz wycinki map geologicznych i hydrogeologicznych ilustrujących badaną jednostkę hydrogeologiczną.
5. Jeśli przed wykonaniem projektu przeprowadzono badania i pomiary terenowe (np. wizje z pomiarami zwierciadła wody) do projektu należy dołączyć charakterystykę tych prac w postaci tabelarycznych zestawień wykonanych pomiarów oraz mapę hydrogeologiczną zawierającą charakterystykę poziomu badanego i ewentualnie poziomów związanych (parametry filtracyjne, hydroizohipsy).

Projekt prac dla ujęcia pracującego w specyficznych warunkach hydrogeologicznych powinien zawierać ponad zakres dla ujęcia dużego:

1. Opis prac dla wyczerpującego scharakteryzowania uwarunkowań pracy ujęcia:
 - dla ujęć infiltracyjnych – prace dla dokonania charakterystyki hydrologicznej rzeki, w tym sposób zebrania informacji o wieloletnich wahaniami stanów i przepływów wód powierzchniowych, lub zaprojektowanie własnych pomiarów stanów i przepływów,
 - dla ujęć pracujących w obszarach prowadzonego odwodnienia – opis prac dla udokumentowania aktualnego stopnia zdepresjonowania (głębokość, zasięg), dynamiki rozwoju leja depresji, wydajności pompowania odwadniającego, prognozy rozwoju leja,

- dla ujęć współdziałających – konieczność wykonania szczegółowego kartowania hydrogeologicznego na odpowiednio rozległym obszarze, określenia stopnia współdziałania, określenia aktualnych poborów i poborów dopuszczonych pozwoleniami wodnoprawnymi, wykreślenia hydroizohips oraz rozpoznania kierunków i czasów przepływu wód,
 - dla ujęć pracujących w obszarach o zagrożonej jakości wód – sposób zebrania informacji dla pełnej charakterystyki rodzaju zagrożenia, czasu i obszaru oddziaływania ogniska zanieczyszczenia, sposobu monitorowania jakości wód wokół obiektu zagrażającego i ujęcia, a dla ujęć pracujących w niekorzystnym środowisku geochemicznym także prace niezbędne dla szczegółowego rozpoznania hydrogeochemicznego (patrz rozdz. 5.6),
 - dla ujęć w terenach ograniczonego użytkowania – zakres prac dla ustalenia ograniczeń w zakresie przeznaczenia terenu oraz sposób korzystania z terenu wynikający z postępowania w sprawie oceny oddziaływania na środowisko lub analizy porealizacyjnej albo przeglądu ekologicznego – zgodnie z art. 135 ust. 2 Prawa ochrony środowiska,
 - dla ujęć w obrębie obszarów objętych krajowym system obszarów chronionych – zakres prac dla ustalenia wymogów ochronnych wynikających z planów ochrony (sporządzanych przez organ zarządzający albo sprawujący bezpośredni nadzór nad obszarem ochronnym – zgodnie z art. 13.a. ust. 1 ustawy o ochronie przyrody).
2. Omówienie prac dla sporządzenia prognozy trwałości składu fizyczno-chemicznego wód.
 3. Wskazanie konieczności wykonania i załączenia do dokumentacji wynikowej map problemowych ilustrujących specyfikę ujęcia (granice obiektów zagrażających jakości, lokalizacja innych ujęć, kopalnie, granice obszarów ograniczonego użytkowania lub obszarów ochronnych), a także map obrazujących warunki hydrogeologiczne w rejonie projektowanego ujęcia (zasilanie, przewodność warstw, miąższość nadkładu izolującego, hydroizohipsy, itp.).
 4. W części graficznej projekt powinien zawierać przekroje ilustrujące złożoność warunków hydrogeologicznych w rejonie projektowanego ujęcia oraz mapy z lokalizacją ognisk zanieczyszczeń, systemów odwadniających zbiornik, itp.

Całość projektowanych prac – niezależnie od rodzaju ujęcia – powinna być zestawiona w syntetycznej karcie ujęcia, której treść i układ przedstawia rysunek 5.1-1. Wzór karty zaleca się do stosowania w przypadku projektowania nowych ujęć. Dla rozbudowy, aktualizacji, bądź weryfikacji zasobów karta projektowanego ujęcia może być przedstawiana bez części tabelarycznej. W sposób zgeneralizowany zakres projektowanych i wykonywanych prac oraz badań dla poszczególnych rodzajów ujęć przedstawiono w tabeli 5.1-1.

KARTA PROJEKTU PRAC GEOLOGICZNYCH
 Ujęcie wód podziemnych
 z utworów.....

Miejscowość:
 Gmina:
 Powiat:
 Województwo:
 Zlewnia rzeki: (do IV rzędu)
 Region wodny: RZGW (siedziba)
 Zbiornik wód podziemnych (GZWP, UPWP)
 Użytkownik:
 Arkusz mapy 1:50 000 (układ 42)
 Współrzędne położenia geograficznego ujęcia:.....E,.....N.
 Rzędne terenu ujęcia:.....-m n.p.m.

Zapotrzebowanie na wodę.....

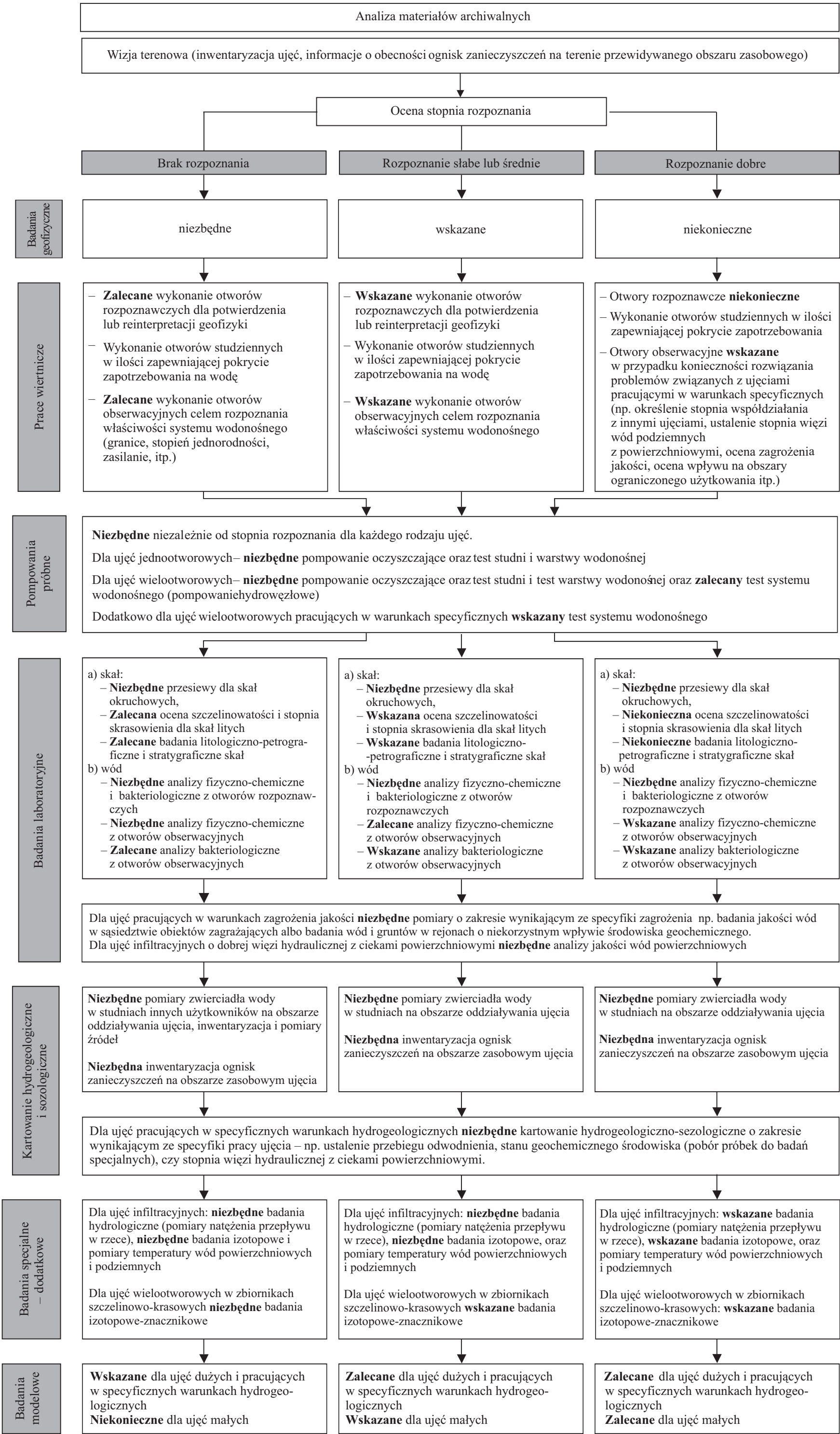
Projektowana ilość otworów rozpoznawczych 	Spodziewana depresja zwierciadła wody na ujęciu przy wydajności $Q = \dots\dots\dots \text{ m}^3/\text{h}$	
	rejonowa	otworowa
	$s_{rej} = \dots\dots\dots m$	$s_c = \dots\dots\dots m$ w tym: rzeczywista - $s_w = \dots\dots\dots m$ zeskok hydrauliczny - $\Delta s = \dots\dots\dots m$
Spodziewana klasa jakości wody.....		
Spodziewana wielkość obszaru zasobowego $F = \dots\dots\dots \text{ km}^2$		

Geolog projektant:.....
 uprawnienia geologiczne nr.....

.....
Miejscowość, data

Rys. 5.1-1. Karta projektowanego ujęcia.

Tabela 5.1-1. Minimalny zakres projektowanych prac dla udokumentowania zasobów eksploatacyjnych.



5.1.2. Aktualizacja zasobów istniejącego ujęcia

Ujęcia istniejące, które wymagają aktualizacji zasobów stanowią osobną kategorię prac projektowych i dokumentacyjnych. Mogą wśród nich być wyróżnione ujęcia małe lub duże i pracujące w prostych lub specyficznych (skomplikowanych) warunkach hydrogeologicznych. Brak jest prawnie określonych kryteriów, wedle których powinno się wykonywać aktualizację zasobów, poza oczywistymi przypadkami, gdy zamierzone jest ich zwiększenie i wymaga to odwiercenia dodatkowych studni. W takim przypadku prace należy prowadzić zgodnie z zasadami określonymi w rozdziale 5.1.1, z dodatkowym uwzględnieniem konieczności scharakteryzowania dotychczasowej pracy ujęcia (zmienność poboru, rozwój depresji, zmiany jakości).

O specyfice prac dla aktualizacji zasobów decydują te przypadki, w których chodzi o zmianę zasobów (ale bez rozbudowy ujęcia o nowe studnie) lub też o łączenie zasobów kilku ujęć we wspólnym obszarze zasobowym. Tak rozumiana aktualizacja powinna być wykonana w następujących okolicznościach:

- Zmiana warunków hydrogeologicznych w rejonie ujęcia lub jego parametrów eksploatacyjnych (ilość studni, wielkość poboru/zapotrzebowania, zasięg oddziaływania, jakość wód i inne).
- Powstanie lub weryfikacja dokumentacji zasobów dyspozycyjnych określającej priorytety dostępności zasobów dla wszystkich użytkowników wód podziemnych lub też dokumentacji weryfikującej zasoby eksploatacyjne w obszarach o intensywnej, skupionej eksploatacji (np. rejony aglomeracji miejskich, obszary górnicze, itp.).

Projekt prac geologicznych dla aktualizacji zasobów powinien w pierwszym rzędzie przewidywać zebranie danych dotyczących dotychczasowego przebiegu eksploatacji ujęcia. Należy założyć, że rozpoznanie hydrogeologiczne dokonane zostało w pierwotnej dokumentacji zasobowej i powinno być ono co najwyżej uzupełnione o ocenę zmian warunków hydrodynamicznych oraz jakości wody. Celem projektu nie jest więc zaprojektowanie prac dla rozpoznania warunków hydrogeologicznych, lecz takich prac, które umożliwią ocenę wiarygodności prognozy zasobowej przedstawionej w pierwotnej dokumentacji hydrogeologicznej i pozwolą na zweryfikowanie zasobów eksploatacyjnych ujęcia w ścisłej zależności od obserwacji i pomiarów dokonywanych w czasie dotychczasowej eksploatacji.

Należy zaznaczyć, że jeśli w ramach aktualizacji zasobów nie będzie przewidywać się wykonywania dodatkowych robót geologicznych (np. wierceń piezometrów) to z formalnego punktu widzenia projekt nie jest wymagany dla sporządzenia dokumentacji weryfikującej zasoby. Niemniej jednak w każdym przypadku zaleca się sporządzenie projektu i przedstawienie go do akceptacji odpowiedniemu ze względu na kompetencje organowi administracji geologicznej. Ma to na celu zaakceptowanie przedstawionej w projekcie metodyki zwiększenia zasobów.

szenia/zmniejszenia zasobów i uzgodnienie formy dokumentacji zasobowej (dodatku do dokumentacji) stanowiącej podstawę do ubiegania się o pozwolenie wodnoprawne na pobór wody.

Część tekstowa projektu sporządzanego dla aktualizacji zasobów małego ujęcia i powinna zawierać:

1. Wprowadzenie:
 - zleceniodawca i przyszły użytkownik ujęcia,
 - informacje dotyczące lokalizacji projektowanych prac, w tym położenia administracyjnego,
 - przeznaczenie wody, uzasadnienie wzrostu/spadku zapotrzebowania, wymogi co do jakości wody,
 - informacje o istniejącej dokumentacji zasobowej ujęcia ze wskazaniem zastosowanej metodyki określania zasobów eksploatacyjnych.
2. Omówienie dotychczasowej pracy ujęcia:
 - wielkość poboru z uwzględnieniem zmienności rocznej sezonowej i miesięcznej,
 - jakość wód, częstotliwość opróbowania, trendy zmian,
 - ocena trafności prognozy zasobowej wykonanej w dokumentacji hydrogeologicznej,
 - uzupełniające (w stosunku do zawartych w dokumentacji) informacje o warunkach hydrogeologicznych z uwzględnieniem zmian w stanie udokumentowania zasobów eksploatacyjnych i innych użytkownikach wód podziemnych, a także aktualne dane o stanie udokumentowania regionalnego zasobów wód podziemnych (zasoby dyspozycyjne),
 - uzupełnienie danych dotyczących występowania ognisk zanieczyszczeń w obrębie obszaru zasilania ujęcia (bądź stref ochronnych),
 - wskazanie kierunków spływu wód podziemnych, ocena zasięgu obszaru zasilania i obszaru zasobowego ujęcia.
3. Projekt prac geologicznych:
 - omówienie koncepcji rozwiązania zadania geologicznego ze wskazaniem metody weryfikacji zasobów,
 - opis badań i pomiarów hydrogeologicznych w studni: pomiary wydajności, ocena stopnia kolmatacji filtra (sprawności studni), pobór próbek do badań laboratoryjnych,
 - opis badań dla określenia rzeczywistego obszaru zasobowego ujęcia i obszaru oddziaływania (dla aktualnego poboru), a także obszaru zasobowego i obszaru oddziaływania dla zaktualizowanych zasobów,
 - wskazanie zasadniczej metody weryfikacji zasobów eksploatacyjnych,
 - określenie konieczności ustanowienia stref ochronnych ujęcia dla zaktualizowanych zasobów.
4. Wnioski – syntetyczne przedstawienie najważniejszych ustaleń zawartych w projekcie.

W części graficznej projektu należy przedstawić:

1. Lokalizację terenu prac na mapie topograficznej (dokumentacyjnej) w skali co najmniej 1:50 000 z zaznaczeniem miejscowości będących siedzibami gmin, lokalizację istniejących ujęć wód podziemnych i innych punktów dokumentacyjnych.
2. Wykresy ilustrujące zmienność poboru wód przez analizowane ujęcie oraz zmienność wybranych, charakterystycznych składników fizyczno-chemicznych.
3. Mapę hydrogeologiczną zawierającą granice obszaru zasobowego dla wydajności dotychczas ustalonych zasobów i granice stref ochronnych ujęcia (opcjonalnie – jeśli dane te są dostępne w istniejącej dokumentacji zasobowej).
4. Przekrój/przekroje hydrogeologiczne lub schemat ideowy ilustrujący warunki hydrogeologiczne panujące w rejonie ujęcia. Dopuszczalne jest zamieszczenie przekroju/schematu zaczerpniętego z pierwotnej dokumentacji zasobowej.

Projekt prac dla aktualizacji zasobów dużego ujęcia powinien zawierać dodatkowo:

1. Opis prac dla przeprowadzenia analizy zmienności poborów i jakości wód w ujęciach zlokalizowanych w obszarze zasobowym lub obszarze oddziaływania ujęcia dokumentowanego.
2. Do projektu należy dołączyć mapę zawierającą wyciąg z dokumentacji zasobowej ujęcia: granice obszaru zasobowego, obszaru oddziaływania, stref ochronnych i innych elementów dostępnych w dokumentacji.

Dla ujęcia pracującego w ***specyficznych warunkach hydrogeologicznych*** projekt aktualizacji zasobów powinien być sporządzony jak dla ujęcia dużego z dodatkową koniecznością aktualizacji danych dotyczących szczególnych (specyficznych) uwarunkowań pracy ujęcia.

5.1.3. Likwidacja studni

Projekt prac geologicznych dla likwidacji studni sporządzany jest dla:

1. otworów poszukiwawczych i rozpoznawczych wykonywanych dla udokumentowania zasobów wód podziemnych,
2. zużytych w trakcie eksploatacji ujęcia otworów studziennych i monitoringu przewidzianych do likwidacji przez użytkownika.

W przypadku pierwszym projekt likwidacji stanowi integralną część projektu prac geologicznych dla udokumentowania zasobów eksploatacyjnych ujęcia. Sposób i termin likwidacji określa projekt, a roboty likwidacyjne mogą być podejmowane bez konieczności dodatkowych zatwierdzeń. Natomiast w przypadku drugim należy opracować odrębny projekt prac geologicznych, składający się z części tekstowej i graficznej.

Część tekstowa projektu powinna zawierać:

1. informacje dotyczące lokalizacji projektowanych prac,
2. opis ujęcia (stan techniczny i sanitarny, historia eksploatacji, przyczyna zakończenia poboru wody),

3. stan prawny ujęcia (ustalone zasoby, pozwolenie wodnoprawne),
4. dane techniczno-geologiczne otworów przeznaczonych do likwidacji,
5. zakres i sposób przeprowadzenia robót likwidacyjnych.
6. sposób udokumentowania prac.

Część graficzna projektu powinna zawierać:

1. Lokalizację ujęcia na mapie topograficznej w skali co najmniej 1:50 000,
2. Karty otworów hydrogeologicznych przewidzianych do likwidacji,
3. Projekt geologiczno-techniczny likwidacji otworów.

Po zrealizowaniu zadań przewidzianych w projekcie (tj. po likwidacji studni) należy sporządzić dokumentację geologiczną zgodną z rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 13 grudnia 2001 r. w sprawie określenia przypadków, w których konieczne jest sporządzenie innej dokumentacji geologicznej (Dz. U. Nr 152, poz. 1741).

5.2. Analiza materiałów archiwalnych

Wyszukanie właściwych materiałów archiwalnych wymaga podstawowej wiedzy o sposobie gromadzenia informacji geologicznych oraz o zasadach ich udostępniania. Problemy te reguluje rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie gromadzenia i udostępniania próbek i dokumentacji geologicznych (Dz. U. Nr 153, poz. 1780). Podstawową zasadą jest, że organ administracji geologicznej właściwy do przyjęcia dokumentacji jest zobowiązany do jej archiwizowania. Ponadto przesyła on pozostałym właściwym miejscowo organom administracji po jednym egzemplarzu dokumentacji. Oznacza to w praktyce, że starosta przekazuje przyjętą przez siebie dokumentację wojewodzie i Ministrowi Środowiska, wojewoda zaś staroście i ministrowi, a minister wojewodzie i staroście. W tym ostatnim przypadku przyjęło się, że dokumentacje regionalne przyjmowane przez Ministra Środowiska przekazywane są jedynie wojewodzie, natomiast starostwa powiatowe otrzymują zawiadomienia o przyjęciu dokumentacji. W identyczny sposób jak dokumentacje archiwizowane są również projekty prac geologicznych.

Po przyjęciu dokumentacji podstawowe informacje o wykonanych wierceniach przekazywane są do banku danych hydrogeologicznych HYDRO. Bank zawiera dane dokumentacyjne o otworach i źródłach ujmujących wody zwykłe (do picia), mineralne i termalne na terenie całej Polski. Zakres zgromadzonych informacji obejmuje podstawowe dane o lokalizacji otworu (źródła), wyniki pomiarów hydrogeologicznych, wyniki obliczeń, podstawowe dane wiertnicze i litostratygraficzne, charakterystykę fizyczno-chemiczną i bakteriologiczną wody. Zasoby banku HYDRO udostępniane są w bankach regionalnych oraz w banku centralnym prowadzonym przez Państwowy Instytut Geologiczny. Przy założeniu, że bank uaktualniany jest na bieżąco, należy go uznać za podstawowe i wiarygodne źródło pozyskiwania danych o otworach hydrogeologicznych. Trzeba jednak wiedzieć, że w bazie gromadzone są jedynie najistotniejsze informacje będące wyciągiem z dokumentacji hydrogeologicznych. Niejednokrotnie zachodzi więc konieczność za-

poznania się z dokumentacją źródłową celem uzyskania bardziej szczegółowych danych (np. przebieg pompowania, metodyka obliczeń, opis współdziałania z innymi ujęciami, itp.). Istotne jest także ustalenie precyzyjnej lokalizacji otworów zgromadzonych w banku HYDRO, ponieważ współrzędne geograficzne otworów kodowane są do bazy w oparciu o mapy topograficzne w skali 1:50 000. Niezwykle istotnym elementem jest więc terenowe zweryfikowanie lokalizacji otworów archiwalnych zgromadzonych w banku HYDRO.

W Państwowym Instytucie Geologicznym dostępne są także inne bazy danych przydatne przy projektowaniu prac geologicznych: SOH – sieć stacjonarnych obserwacji wód podziemnych, MIDAS – system informacji o złożach kopalin, MONBADA – monitoringowa baza danych jakości wód podziemnych prowadzona w ramach programu Państwowego Monitoringu Środowiska. Wyniki oznaczeń jakości wód umieszczane w bazie MONBADA przesyłane są corocznie przez PIG do Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska skąd następnie rozsyłane są do Wojewódzkich Inspektoratów Ochrony Środowiska. Wyniki badań elektrooporowych zgromadzone są w Centralnym Banku Danych Elektrooporowych (CBDG).

Istotnym źródłem informacji archiwalnych są też mapy wykonane w skali 1:50 000: geologiczna oraz hydrogeologiczna. Mapa geologiczna zawiera cenną interpretację litologiczno-stratygraficzną, połączoną z genetyczną charakterystyką utworów powierzchniowych. Mapa hydrogeologiczna natomiast zawiera szereg wydzieleni przydatnych bezpośrednio do projektowania, jak np. głębokość do głównego użytkowego poziomu wodonośnego, jego miąższość i przewodność, kierunki przepływu, jakość wód i stopień jej zagrożenia. Z reguły mapa ta nie zawiera jednak pełnej terenowej weryfikacji otworów, co oznacza, że ich lokalizacja nie jest precyzyjna. Wymagane jest potwierdzenie lokalizacji przed wykorzystaniem otworów do celów projektowych.

Ważnym źródłem informacji są Regionalne Zarządy Gospodarki Wodnej, które dysponują inwentaryzacją dokumentacji określających zasoby dyspozycyjne oraz opracowaniami bilansowymi – „Warunki korzystania z wód regionu wodnego ...”. Ustawa Prawo wodne zobowiązuje poszczególne zarządy do prowadzenia katastru wodnego, który ewidencjonuje m.in. stan zasobów wód podziemnych, wielkości poborów wód, wysokości wydanych pozwoleń wodnoprawnych, ustanowione strefy ochronne. Rozporządzenia dyrektora regionalnego zarządu gospodarki wodnej ustanawiające strefy ochronne są publikowane w Dziennikach Urzędowych Wojewody, a poszczególne gminy wprowadzają granice stref do planów zagospodarowania przestrzennego.

Analiza materiałów archiwalnych niezbędna do sporządzenia projektu prac geologicznych powinna służyć czterem zasadniczym celom:

1. Ustaleniu profili geologicznych projektowanych otworów, ich konstrukcji, przewidywanych wydajności, jakości wody.
2. Określeniu orientacyjnego położenia obszaru zasobowego i granic strefy ochronnej projektowanego ujęcia z uwzględnieniem istniejących ujęć wraz z ich obszarami zasobowymi i strefami ochronnymi.

3. Ustaleniu stopnia zagrożenia dla jakości wód projektowanego ujęcia.
4. Sprawdzeniu dostępności zasobów eksploatacyjnych w ramach ustalonych zasobów dyspozycyjnych określonych w warunkach korzystania z wód regionu wodnego, bądź w warunkach korzystania z wód zlewni.

Spełnienie wymogów określonych w pkt. 1 wymaga zapoznania się z dokumentacjami ujęć znajdujących się w sąsiedztwie ujęcia projektowanego lub też sięgnięcia do banku HYDRO (w tym przypadku należy pamiętać o konieczności zweryfikowania lokalizacji ujęć archiwalnych). Na tym etapie prac warto wykorzystać także mapę hydrogeologiczną Polski w skali 1:50 000, która – oprócz otworów hydrogeologicznych – zawiera także lokalizację otworów badawczych i kartograficznych wykonanych dla geologicznej mapy podstawowej w skali 1:50 000. Pewnym utrudnieniem może być jednak brak powszechnego dostępu do mapy hydrogeologicznej w archiwach wojewódzkich i powiatowych. Istotnym źródłem informacji o budowie geologicznej będą także wyniki archiwalnych badań geofizycznych. Mogą być one wykorzystane bezpośrednio lub na nowo zinterpretowane, np. po uzyskaniu nowych danych wiertniczych. Właściwe ustalenie profilu geologicznego w miejscu projektowanego otworu będzie z pewnością znacznie ułatwione po sporządzeniu przekroju hydrogeologicznego opartego o archiwalne otwory wiertnicze i ewentualnie dostępne dane geofizyczne.

Drugi z wyszczególnionych celów, tj. wstępne określenie obszaru zasobowego oraz strefy ochronnej projektowanego ujęcia może być zrealizowany na podstawie znajomości generalnych kierunków przepływu wód podziemnych, np. w oparciu o mapę hydrogeologiczną w skali 1:50 000 lub dokumentację zasobów dyspozycyjnych, bądź dokumentację obszarów ochronnych GZWP. Wiedza o rozległości obszaru zasobowego oraz strefy ochronnej jest niezbędna na etapie projektowania celem odniesienia się do możliwości współdziałania z ujęciami już istniejącymi. Może się bowiem zdarzyć, że przewidywany dla projektowanego ujęcia obszar zasobowy obejmie obszary zasobowe ujęć już istniejących, bądź też, że nastąpi współdziałanie ujęcia projektowanego z ujęciami istniejącymi. W takich przypadkach projekt powinien przewidywać sporządzenie dokumentacji obejmującej wszystkich użytkowników z określeniem wspólnego obszaru zasobowego oraz wspólnych granic strefy ochronnej. Należy zaprojektować wówczas terenową identyfikację istniejących ujęć wraz z ustaleniem ich stanu formalno-prawnego, ograniczeń wynikających z pozwoleń wodnoprawnych oraz przebiegu eksploatacji (rzeczywisty pobór średni w roku, czas pracy, wielkość depresji). Projekt powinien uwzględniać konieczność zbudowania modelu matematycznego jako narzędzia umożliwiającego prowadzenie obliczeń prognostycznych dla określenia wzajemnego współdziałania ujęć, ustalenia (korekty) zasobów dla poszczególnych użytkowników z uwzględnieniem ich rzeczywistego zapotrzebowania, wskazania wspólnego obszaru zasobowego oraz granic strefy ochronnej.

Na etapie przeglądu materiałów archiwalnych należy także ocenić zagrożenie dla jakości wód wynikające z obecności na powierzchni terenu potencjalnych ognisk zanieczyszczeń. Duże obiekty zagrażające, jak wysypiska i wylewiska komunalne, bądź przemysłowe, mogą być zlokalizowane na podstawie danych zgromadzonych w planach ogólnych zagospodarowania przestrzennego gminy. Wiele gmin dysponuje także opracowanymi na własne potrzeby planami gospodarki odpadami oraz programami ochrony środowiska. Dane o istniejących obiektach zagrożeń należy zweryfikować wizją terenową. Potwierdzenia w terenie wymagają także informacje o występowaniu złóż kopalin i towarzyszących im obszarów górniczych uzyskane z bazy MIDAS.

Czwarty z wymienionych głównych celów analizy materiałów archiwalnych zakłada konieczność odniesienia się projektanta do zasobów dyspozycyjnych. Wymóg ten nie jest wprost określony przepisami prawa. Jednak Prawo wodne precyzuje, że pozwolenie wodnoprawne na pobór wód nie może naruszać ustaleń warunków korzystania z wód regionu wodnego lub warunków korzystania z wód zlewni. Zatem projekt i dokumentacja hydrogeologiczna zasobów eksploatacyjnych (która jest podstawą wydania pozwolenia wodnoprawnego) muszą również uwzględniać wyniki bilansu regionalnego. Odpowiednim momentem na zweryfikowanie zapotrzebowania inwestora na wodę w kontekście zasobów dostępnych w danej jednostce bilansowej (zlewnia, zbiornik) jest właśnie etap analizy materiałów archiwalnych. Weryfikacja ta powinna nastąpić w odpowiednim Regionalnym Zarządzie Gospodarki Wodnej. Zgodnie z przepisami Prawa wodnego dyrektor regionalnego zarządu opracowuje warunki korzystania z wód regionu wodnego (w odniesieniu do wód podziemnych oparte o dokumentacje hydrogeologiczne zasobów dyspozycyjnych), a także sporządza wykazy wód powierzchniowych i podziemnych możliwych do wykorzystania celem zaopatrzenia ludności w wodę przeznaczoną do spożycia. Dyrektor RZGW zobowiązany jest również do prowadzenia katastru wodnego.

Wymienione wyżej możliwości wykorzystania zasobów archiwalnych na potrzeby sporządzania projektów prac geologicznych dotyczą w większości przypadków, w których prawa do informacji geologicznej przysługują Skarbowi Państwa. Informacją tą dysponuje Minister Środowiska, który upoważnił też pozostałe organy administracji geologicznej do rozporządzania w jego imieniu informacją geologiczną zgromadzoną w archiwach urzędów tych organów. W praktyce oznacza to konieczność spełnienia formalnych wymogów związanych z możliwością pozyskania niezbędnych informacji. Określają je trzy odrębne regulaminy Ministra Środowiska, których pełne teksty znaleźć można na stronie internetowej: <http://www.pgi.gov.pl.cag> (Doktór i inni, 2004).

Wszelkie pozyskane w ramach prowadzenia prac projektowych materiały archiwalne, wraz ze wskazaniem źródła uzyskania informacji, powinny być wyszczególnione w sporządzonym na ich podstawie projekcie prac geologicznych.

5.3. Badania geofizyczne

Metody geofizyczne należą do ważniejszych zespołów metod badawczych stosowanych w badaniach hydrogeologicznych. Są one wykorzystywane do (Białostocki, 1974):

- rozpoznawania budowy geologicznej w celu lokalizacji stref występowania wód podziemnych,
- ustalania rejonów perspektywicznych do lokalizacji ujęć i lokalizacji otworów studziennych w określonych warstwach/poziomach wodonośnych,
- badania kierunku, prędkości i wielkości przepływu wód,
- oznaczeń wieku skał i wód,
- określania granic między wodami słodkimi i słonymi,
- wyznaczania obszarów zanieczyszczeń wód podziemnych.

Atrakcyjność metod geofizycznych wynika ze względów ekonomicznych oraz z faktu, że osiąganе wyniki są trudne do uzyskania innymi metodami (np. badanie wieku skał i wód). Z reguły są one nieszkodliwe dla środowiska i umożliwiają stosunkowo szybkie uzyskanie wyników.

W badaniach hydrogeologicznych podstawową rolę odgrywają metody geoelektryczne, do których należą:

- metoda naturalnego potencjału elektrycznego,
- metoda elektrooporowa.

W mniejszym stopniu wykorzystywane są metody geofizyki jądrowej (radiometryczne), metoda sejsmiczna i geotermiczna.

Opis metod badań geofizycznych zawarty jest w wielu poradnikach i podręcznikach (Stenzel, Szymanko, 1973; Białostocki, 1974; Zuber, 1986). Mimo upływu czasu i rozwoju nowych technik pomiarowych i interpretacyjnych nie straciły one aktualności w odniesieniu do zastosowań dla zagadnień hydrogeologicznych. Poniżej w ujęciu syntetycznym przedstawia się metody najczęściej stosowane w dokumentowaniu zasobów wód podziemnych.

A. Metoda naturalnego potencjału elektrycznego (PS)

wykorzystująca własności naturalnych pól elektrycznych lokalnych i regionalnych Ziemi wywołanych przez różne procesy fizyczne i elektrochemiczne zachodzące w skorupie ziemskiej. W badaniach hydrogeologicznych wykorzystywane są elektryczne pola lokalne płytkiego podłoża, których powstanie wiąże się z następującymi procesami elektrochemicznymi powodującymi polaryzację ośrodka skalnego:

- utlenianie i redukcja,
- procesy dyfuzyjno-absorbcyjne,
- polaryzacja, towarzysząca zjawisku filtracji cieczy przez utwory porowate i szczelinowe.

Metodę PS stosuje się w otworach wiertniczych dla rozróżnienia wodopruszczalności skał, zaś w przestrzeni – do lokalizacji uprzywilejowanych dróg krążenia wód podziemnych, najczęściej w utworach szczelinowych.

Geologiczna interpretacja wyników badań tej metody jest często utrudniona, z uwagi na różne przyczyny powstawania pola PS i wpływ pól elektrycznych indukowanych przez istniejące na obszarze prospekcji urządzenia elektryczne.

B. Metoda elektrooporowa

jest najczęściej stosowaną odmianą metod geoelektrycznych znaną od początków XX wieku. W metodzie tej przedmiotem obserwacji są właściwości pola elektrycznego wytworzonego sztucznie w podłożu skalnym przez system elektrod, na których utrzymywana jest stała różnica potencjałów. Metodą elektrooporową wykonuje się pomiary oporu właściwego skał znajdujących się w obrębie wytworzonego pola i na podstawie tych pomiarów bada się ułożenie skał różniących się zdolnością przewodzenia prądu elektrycznego. Oporność właściwa skał zależy od wielu czynników i procesów, a przede wszystkim od: litologii skał, ich porowatości i przepuszczalności, zawartości wody i jej mineralizacji oraz od temperatury. Stąd jest to parametr bardzo zróżnicowany, jego wartość może zmieniać się od 1 Ωm w utworach zasolonych do 10 000 Ωm w granitach. Osady czwartorzędowe w Polsce charakteryzują się następującą opornością właściwą (Okrasa, Jagodziński, 1978):

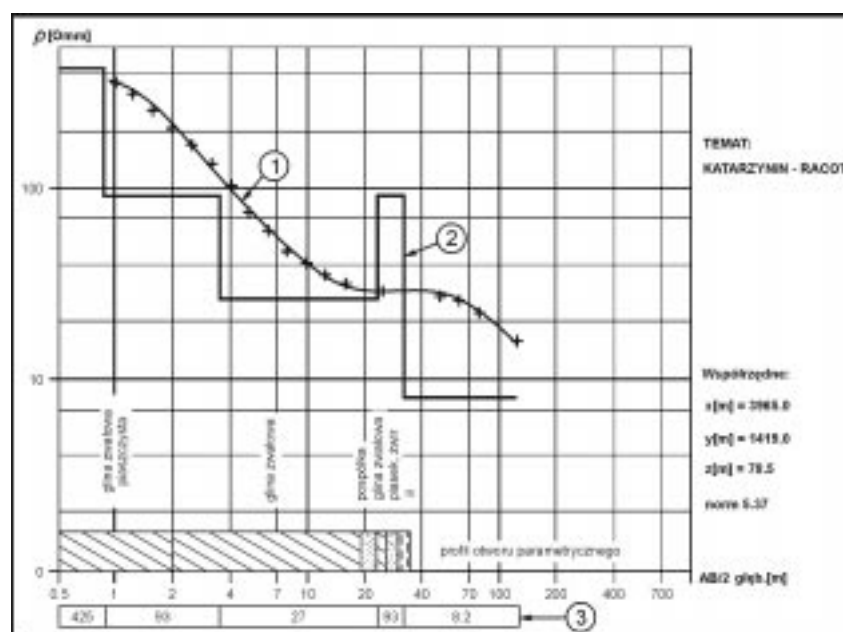
- piaski suche $100 \div 10\,000\ \Omega\text{m}$
- piaski zawodnione $40 \div 200\ \Omega\text{m}$
- muły $25 \div 40\ \Omega\text{m}$
- gliny zwałowe $30 \div 70\ \Omega\text{m}$
- iły piaszczyste $15 \div 30\ \Omega\text{m}$
- iły $7 \div 15\ \Omega\text{m}$
- warstwy piaszczyste zawierające wody zmineralizowane $2 \div 10\ \Omega\text{m}$
- margle $20 \div 300\ \Omega\text{m}$
- wapienie i piaskowce suche – powyżej 300 Ωm
- wapienie i piaskowce zawodnione – poniżej 300 Ωm
- skały krystaliczne – powyżej 1000 Ωm

W badaniach hydrogeologicznych najczęstsze zastosowanie metoda elektrooporowa znajduje w **sondowaniach geoelektrycznych SE** umożliwiających ustalanie profilu geologicznego w oparciu o zmienne odległości pomiędzy elektrodami zasilającymi. Zasięg głębokościowy zależny jest od lokalnej budowy geologicznej. W warunkach niżu polskiego wiarygodna prospekcja tą metodą sięga praktycznie głębokości 110-130 m. Głębokość prospekcji i zdolność rozdzielczą na krzywych sondowań ogranicza przede wszystkim występowanie przypowierzchniowych warstw o bardzo wysokiej oporności, np. miększych warstw piaszczysto – żwirowych, w których swobodne zwierciadło wody zalega na głębokości powyżej 10-20 m. Prospekcja tą metodą jest mało wiarygodna również w okresie istnienia zmarzliny w półroczu zimowym.

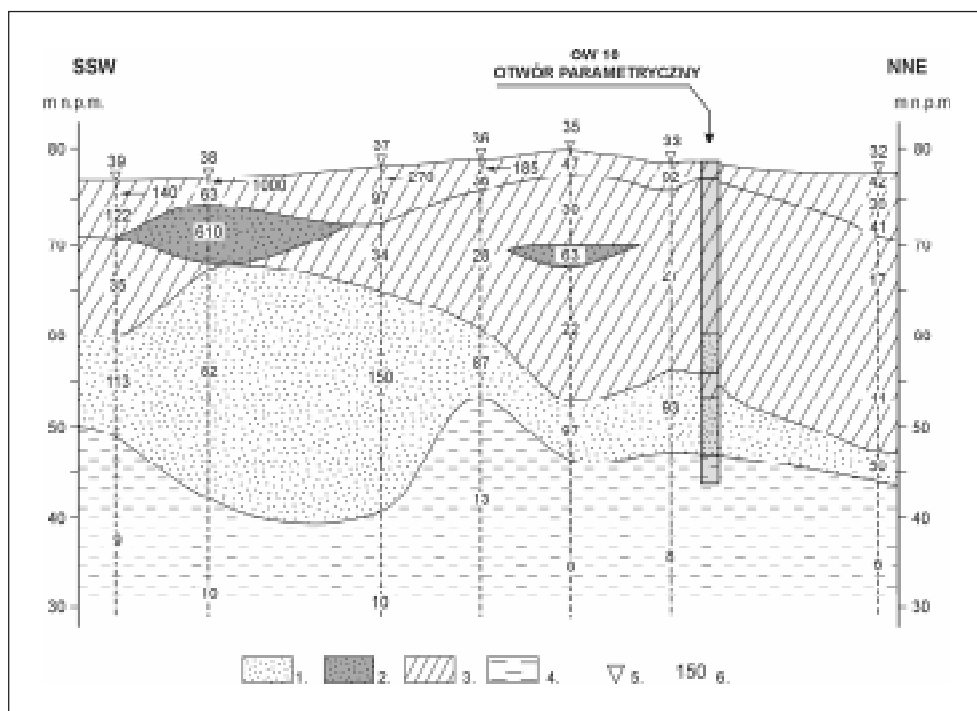
Metoda elektrooporowa wymaga rozwinięcia układu pomiarowego w linii prostej na długości 3 do 10 razy większej niż wynosi głębokość prospekcji. Występują w związku z tym techniczne ograniczenia jej stosowania w obszarach

Mimo tych ograniczeń, metoda elektrooporowa jest stosowana powszechnie do wydzielania kompleksów wodonośnych w strukturach czwartorzędowych, trzeciorzędowych, masywach skał węglanowych (strefy skrasowiałe, krawędziowe, uskokuwe, doliny kopalne), lokalizacji ujęć i otworów studziennych, określania zasięgu występowania warstw wodonośnych zasolonych, wydzielania stref zanieczyszczonych warstw wodonośnych. Wiarygodność i dokładność wyników badań elektrooporowych (do 10-20% w zakresie głębokości warstw) warunkuje odpowiednia aparatura badawcza rejestrująca pomiary polowe oraz odpowiednie programy komputerowe do interpretacji wyników i ich graficznego przedstawiania.

Warunkiem podstawowym do uzyskania pożądaných wyników badań geoelektrycznych jest dobrze sporządzony projekt przez geologa i geofizyka, bazujący na wynikach istniejącego rozpoznania geologicznego i geofizycznego w nawią-



1 – krzywa pk pionowego sondowania elektrycznego PSE, 2 – wykres średniego oporu właściwego, otrzymanego z krzywej pk (PSE), 3 – wartość oporu właściwego krzywej 2.



Rys. 5.3-2. Fragment przekroju geoelektrycznego (rejon Racotu – województwo Wielkopolskie).

1 – osady piaszczysto-żwirowe, 2 – osady piaszczysto-żwirowe w strefie przypowierzchniowej (suche), 3 – gliny zwałowe, 4 – iły, 5 – wykonane sondy geoelektryczne, 6 – opory rzeczywiste w Ωm .

zaniu do celu badań geologicznych. Bardzo ważne w tym względzie jest określenie badawczych przekrojów geoelektrycznych i odległości między sondami uwarunkowanymi głębokością prospekcji i charakterem zbiornika. W przypadku prowadzenia badań na terenach nierozpoznanych dobrze jest zetać rozpoznanie geofizyczne: w pierwszym etapie wykonać i zinterpretować wstępnie projektowany zakres podstawowych sondowań (ok. 2/3 sondowań), zaś w drugim uzupełnić rozpoznanie w świetle potrzeb i uzyskanych wyników badań.

Podstawą do przeprowadzenia interpretacji geologicznej materiału geofizycznego jest analiza **sondowań parametrycznych** tj. sondowań elektrycznych wykonanych w sąsiedztwie wierceń o znanym profilu geoelektrycznym.

Drugim sposobem wykorzystywania metody elektrooporowej w hydrogeologii jest **profilowanie elektrooporowe PE** polegające na wykonywaniu pomiarów przy jednakowej odległości między elektrodami zasilającymi. Sposób interpretacji wykresów profilowania jest zbliżony do stosowanego przy interpretacji krzywych SE. Stosuje się ją do szczegółowego rozpoznania przestrzennego budowy geologicznej, w tym przebiegu uskoku, kawern krasowych itp.

Zastosowanie rejestracji cyfrowej, automatycznego pozyskiwania danych polowych oraz nowych technik interpretacyjnych – modelowania i wizualizacji, spowodowało istotny skok technologiczny w badaniach geoelektrycznych i powstanie właściwie nowej metody nazwanej **tomografią elektrooporową** (Rudzki, 2002). W zależności od metodyki prowadzenia prac posiada ona szeroki zasięg głębokościowy od kilku do kilkuset metrów, przy dużej dokładności odwzorowania ośrodka geologicznego. Prace prowadzi się wzdłuż linii profili przy użyciu odpowiedniej ilości elektrod rozmieszczonych w równych odległościach. Dla wybranej kombinacji elektrod wykonywany jest pomiar wartości oporności pozornej (przy wykorzystaniu komputera), z uwzględnieniem typu i bieżącej geometrii rozstawu. Zbiór uzyskanych kolejnych serii pomiarowych może być wizualizowany, przetwarzany oraz interpretowany jakościowo i ilościowo za pomocą odpowiednich programów. Zaletą tej metody jest możliwość wykonywania pomiarów za pomocą różnych typów układów pomiarowych: Wennera, Schlumbergera, dipolowy osiowy, trój- i dwuelektrodowy. Wyniki pomiarów tą metodą mogą być przedstawione w formie przekrojów oporności właściwej, profilowań wzdłuż tej samej linii układami pomiarowymi o różnym rozstawie oraz w postaci map przedstawiających rozkład izolinii wartości izoom na płaszczyźnie lub przekroju.

C. Metody radiometryczne

Pomiary naturalnej promieniotwórczości skał i wód podziemnych

Źródłem naturalnej promieniotwórczości skał i wód podziemnych są znajdujące się w nich niewielkie, śladowe domieszki izotopów promieniotwórczych jak ^{40}K , ^{231}Th i ^{235}U . Największe nagromadzenie izotopów promieniotwórczych mają skały magmowe i niektóre wody juvenile. W skałach osadowych i wodach pochodzenia infiltracyjnego, z wyjątkiem wód krążących w skałach magmowych, naturalna promieniotwórczość jest niewielka. Z tego względu pomiary aktywności promieniotwórczej wymagają przeważnie dużych objętości próbek oraz specjalnych metod. Rejestruje się zwykle promieniowanie γ , gdyż α i β wymagają specjalnej techniki pomiarowej.

Dla celów hydrogeologicznych badania te wykorzystuje się do:

- identyfikacji skał w profilu wiertniczym (profilowanie PG),
- pomiaru wieku, określania genezy wód podziemnych,
- określania wybranych elementów schematu hydrogeologicznego: kierunku i prędkości przepływu, położenia obszarów zasilania, związków wód podziemnych z wodami powierzchniowymi,
- poszukiwań wód radoczynnych.

Najczęściej metody geofizyki jądrowej są wykorzystywane do określenia wieku bezwzględnego wód tj. czasu, jaki upłynął od ich infiltracji w podłoże do chwili pobrania próbki. Do określania wieku wód infiltracyjnych stosowane są metody: trytowa (^3H), radiowęglowa (^{14}C) i izotopów trwałych: ^2H (deuter) i tle-

nu ^{16}O i ^{18}O , zaś dla wód reliktowych metoda argonowo-potasowa i rubidowo-strontowa.

Radiometryczne metody znacznikowe

Metody te umożliwiają prowadzenie badań znacznikowych ruchu wód podziemnych z wykorzystaniem znacznika izotopowego. Stosuje się je do:

- określania kierunku i prędkości filtracji,
- oceny prędkości infiltracji pionowej w strefie aeracji,
- badania dróg krążenia wód podziemnych i ustalania łączności między poziomami wodonośnymi i wodami powierzchniowymi.

W metodach tych efekt prospekcji uzyskiwany jest przez wprowadzenie w danym punkcie strumienia wód podziemnych określonego znacznika (indykatora) oraz stwierdzenie czasu i miejsca jego pojawiania się w różnych punktach warstwy wodonośnej. Miejscem wprowadzenia znacznika może być otwór studzienny, ponor, zbiornik wód powierzchniowych. Jako izotopy stosowane są najczęściej ^{82}Br , ^{131}I , ^{24}Na .

Zakres stosowania metod radiometrycznych i ich uwarunkowania podają szczegółowo prace P. Stenzela i J. Szymanki (1973) oraz A. Zuber (1986). Pogłębione informacje na ten temat zawiera poradnik metodyczny „Metody izotopowe w dokumentowaniu zasobów wód podziemnych” (w przygotowaniu).

D. Metody sejsmiczne

Wykorzystują one do celów poznawczych pomiary własności fal sprężystych sztucznie wzbudzonych w środowisku skalnym. Stosowane są do badań głębszych struktur geologicznych; głównie na potrzeby poszukiwań ropy i gazu.

Na potrzeby hydrogeologii wykorzystywana jest odmiana metod sejsmicznych – sejsmika refrakcyjna (refleksyjna) umożliwiająca lokalizację struktur i granic nieciągłości w strefach aktywnej wymiany wód. Przydatne jest to do identyfikacji stref nieciągłości w utworach szczelinowych starszego podłoża i głębokich struktur typu rynien, dolin kopalnych w utworach kenozoicznych.

E. Metody geotermiczne

Metody te wykorzystują szczegółowe pomiary temperatury skał i wody, które mogą być wykonywane z powierzchni terenu lub w otworach hydrogeologicznych.

Temperaturę powierzchni ziemi mierzy się poniżej granicy zmian dobowych oraz na podstawie analizy zdjęć lotniczych i naziemnych. Zestawienie profili i map izoterm, z uwzględnieniem poprawek na zmiany temperatury i pokrycia terenu, pozwala na określenie inwersji temperatur będących objawem występowania wód podziemnych, zwłaszcza termalnych i szczelinowych.

Długotrwałe i ciągłe pomiary w otworach studziennych ujęć infiltracyjnych umożliwiają określenie wielkości i czasu dopływu wód do tych ujęć ze zbiorników powierzchniowych. Pomiary prowadzone w aluviach cieków górskich i w

obszarach skrasowiałych pozwalają określić odcinki cieków drenujące i infiltrujące. Metodyka badań zakłada zwykle konieczność wykonania kilku serii pomiarów, w tym letnią i zimową.

F. Inne metody

Do poszukiwań wód podziemnych można stosować również metodę polaryzacji wzbudzonej (PW) i metodę radiofalową.

Przedmiotem badań metody polaryzacji wzbudzonej jest pole elektryczne powstające po wyłączeniu prądu przepływającego przez skały. Pomiar polaryzacji wzbudzonej wykonuje się metodą sondowań lub profilowania, podobnie jak pomiary elektrooporowe. Metoda PW może być stosowana szczególnie w poszukiwaniach wód szczelinowych oraz krasowych.

W metodzie radiofalowej dokonuje się pomiarów składowych magnetycznych i elektrycznych pola utworzonego przez radiostacje pracujące na falach długich w różnych częściach świata, co pozwala na określenie oporu elektrycznego i stałej dielektrycznej warstw przypowierzchniowych, a w pewnych wypadkach do głębokości kilkudziesięciu metrów. Metodę tę można wykorzystywać w poszukiwaniu wód szczelinowych, gdyż zmiany oporu sygnalizują granice litologiczne i dyslokacje, a wielkość stałej dielektrycznej jest proporcjonalna do zawodnienia skał.

5.4. Prace wiertnicze

5.4.1. Projektowanie prac wiertniczych

Opis projektowanych robót wiertniczych stanowi podstawową część projektu prac geologicznych. Projekt robót wiertniczych powinien zawierać m.in. następujące elementy:

- rodzaj wierceń, ich ilość, głębokość i konstrukcje otworów wiertniczych,
- lokalizację otworu (otworów) i informacje o placu robót,
- sposób zafiltrowania otworu,
- zabezpieczenie w energię,
- ochronę środowiska podczas prowadzenia robót wiertniczych i po ich zakończeniu,
- sposób postępowania z odpadami wiertniczymi,
- sposób odprowadzania wód z próbnych pompowań,
- harmonogram robót.

Szczegóły konstrukcyjne otworu (otworów) powinny być pokazane w projekcie **geologiczno-technicznym otworu** stanowiącym odrębny załącznik graficzny. Powinien on zawierać:

- część informacyjną o obiekcie, zamawiającym i wykonawcy,
- przewidywany profil geologiczny wraz ze wskazaniem warstw wodonośnych i ich ciśnień hydrostatycznych,

- technikę wiercenia, rodzaje narzędzi wiertniczych,
- sposób zarurowania i zafiltrowania,
- sposób zamykania poziomów wodonośnych,
- przewidywane badania geologiczne i hydrogeologiczne oraz pobór prób do badań.

Rodzaje wierceń

Projektowane otwory wiertnicze dzielimy umownie na poszukiwawcze, rozpoznawcze (badawcze) i obserwacyjne. **Wiercenia poszukiwawcze** wykonywane są najczęściej na potrzeby wstępnego rozpoznania struktury hydrogeologicznej pod lokalizację ujęcia, po analizie badań geofizycznych. Służą one do rozpoznania litologii i stratygrafii utworów skalnych, stwierdzenia obecności warstw wodonośnych, określenia ich parametrów hydrogeologicznych oraz poznania jakości wody. Przy pracach poszukiwawczych prowadzonych w masywach szczelinowych pożądane jest dodatkowo badanie strefowości zawodnienia. **Otwory rozpoznawcze** wykonywane są w celu szczegółowego rozpoznania warunków hydrogeologicznych i jakości wody oraz zasobności jednostki hydrogeologicznej. Przy budowie dużych ujęć stanowią one zwykle otwory hydrowęzłowe pompowań badawczych. Wyniki przeprowadzonych w nich badań dają podstawę do zaprojektowania otworów studziennych ujęcia. Przy małych ujęciach otwory rozpoznawcze pozostają jako studnie. **Otwory obserwacyjne** (piezometry) wykonywane są jako specjalne otwory dla prowadzenia obserwacji podczas pompowań hydrowęzłowych lub dla rozpoznania schematu krążenia i dynamiki wód podziemnych, opróbowania hydrogeochemicznego, pomiarów temperatury, badań izotopowych, itp.

Technika wiercenia i dobór urządzeń wiertniczych zależne są od głębokości wiercenia, jego średnicy, litologii przewiercanych skał, sposobu zafiltrowania otworu, oraz od projektowanych badań. W wierceniach hydrogeologicznych stosowana jest technika udarowa, udarowo-obrotowa lub obrotowa z płuczką. Wybór metody wynika z wymogów spełnienia celów badawczych oraz z przesłanek ekonomicznych. Średnica wiercenia rozpoznawczego przewidzianego do zabudowy filtra dostosowana jest do pożądanego wydatku otworu lub wymogów zamawiającego w zakresie technicznej obsługi urządzeń wodociągowych (np. rodzaje i średnice pomp głębinowych).

Lokalizacja otworów

Oprócz czynników geologicznych i hydrogeologicznych przy wyborze lokalizacji otworu należy uwzględniać wymogi wynikające z konieczności zachowania odpowiednich odległości od istniejących obiektów terenowych:

- odległość studni od granicy działki – co najmniej 5 m, od rowu przydrożnego – co najmniej 7,5 m, od obiektów zanieczyszczających na posesji – od 15,0 do 70,0 m – w zależności od rodzaju i groźby zanieczyszczenia (§ 31 rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w spra-

wie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 75 poz. 690) wydanego do ustawy z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane),

- odległość wieży wiertniczej od dróg i budynków oraz linii energetycznych – co najmniej 1,5 wysokości wieży wiertniczej – minimum 30 m (§ 42 rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w zakładach górniczych wydobywających kopaliny otworami wiertniczymi (Dz. U. Nr 109, poz. 961) wydanego do ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. – Prawo geologiczne i górnicze).

Lokalizacja otworu powinna zapewniać również możliwość zajęcia placu budowy o odpowiedniej powierzchni (w zależności od typu urządzenia wiertniczego) i nie kolidować z przebiegiem urządzeń podziemnych (rurociągi, kable). Niezbędne jest zapewnienie miejsca na przyszłą strefę ochrony bezpośredniej, która – pomimo braku jednoznacznych unormowań prawnych – powinna obejmować pas gruntu o szerokości nie mniejszej niż 8 m.

Filtrowanie otworów

Sposób zafiltrowania otworu zależy od jego przeznaczenia, wykształcenia warstwy wodonośnej (jej uziarnienia, poszczelinienia, charakteru zwierciadła wody), pożądanej wydajności otworu, typu urządzeń pompowych i jakości wód, jak również od wymagań zamawiającego.

W warstwach szczelinowych i szczelinowo-porowych wykonuje się z reguły studnie bezfiltrowe. Niemniej przy spodziewanym zaistnieniu obwałów lub wypełnień dużych szczelin i struktur krasowych utworami luźnymi, należy zabudować w tych otworach odpowiednio dobrane kolumny filtracyjne. W utworach luźnych długość i średnicę filtra dostosowuje się do pożądanej wydajności otworu z uwzględnieniem dopuszczalnej przepustowości filtra. Do obliczeń służą proste wzory analityczne – patrz rozdz. 4.2.

W warstwach wodonośnych o znacznej miąższości, długość czynnej części filtra nie powinna być mniejsza niż 3-5 m. W warstwach o zwierciadle swobodnym długość filtra i głębokość posadowienia ograniczona jest miąższością warstwy i możliwą do wytworzenia depresją.

Z praktyki hydrogeologicznej wynika, że należy filtrować warstwę wodonośną o najkorzystniejszym wykształceniu granulometrycznym (również w otworach obserwacyjnych). Taki sposób filtrowania wcale nie powoduje dopływu do otworu tylko ze strefy zafiltrowanej – dopływ następuje z całej miąższości warstwy, również z części o drobniejszym wykształceniu granulometrycznym. Ze względu na jakość wód należy unikać:

- ujmowania jednym odcinkiem filtra utworów o bardzo zróżnicowanym wykształceniu, np. żwirów i piasków pylastych,
- filtrowania górnych stref warstwy wodonośnej w obszarach zasilania, gdzie istnieje możliwość zagrożenia antropogenicznego z powierzchni terenu,

- a także w obszarach dolinnych z uwagi na niebezpieczeństwo uruchomienia procesów hydrochemicznych przy depresjonowaniu zwierciadła wody (osady organiczne i mułkowo-ilaste),
- filtrowania dolnych stref warstwy wodonośnej w obszarach możliwych ascen-
zji wód zasolonych.

Z uwagi na niekorzystny wpływ środowiska fizyczno-chemicznego wód podziemnych, zwłaszcza o właściwościach agresywnych, powszechnie stosuje się obecnie filtry z tworzyw sztucznych. Należy pamiętać, że mają one określone przez producenta graniczne głębokości zastosowania. Tradycyjne filtry stalowe mogą być instalowane praktycznie niezależnie od głębokości posadowienia.

Zasady doboru siatek filtracyjnych i obsypek

Dobór siatki filtracyjnej i obsypki lub wielkości szczelin i obsypki zależy od granulacji warstwy wodonośnej, którą charakteryzują krzywe przesiewów.

Przy doborze siatki filtracyjnej należy mieć na uwadze następujące ilości ziaren ogólnej masy próbki, jakie mogą przejść przez filtr:

- dla piasków gruboziarnistych: od 20 do 30%,
- dla piasków średnioziarnistych: od 40 do 60%,
- dla piasków drobnoziarnistych: od 60 do 80%.

Średnicę ziaren obsypki określa się ze stosunku (Gawryłko, 1964):

$$\frac{D_{50}}{d_{50}} = 5 \div 10$$

gdzie:

D_{50} , d_{50} – odpowiednio średnice miarodajne ziarn obsypki i ziarn warstwy wodonośnej, których zawartość razem ze wszystkimi drobniejszymi frakcjami wynosi 50%.

Obsypkę należy stosować obligatoryjnie przy niejednorodnych warstwach wodonośnych, zwłaszcza piaskach drobnoziarnistych i pylastych. Grubość obsypki żwirowej wypełniającej przestrzeń między kolumną filtrową, a rurami osłonowymi powinna wynosić co najmniej 50 mm.

Zasilanie wiertni energią elektryczną

Zagadnienie to powinno być przedstawione w projekcie w odniesieniu do wymogów urządzeń wiertniczych oraz do istniejącej sieci energetycznej warunkującej pobór energii do przeprowadzenia prac wiertniczych, pompowania próbnego i do zaopatrzenia w energię urządzeń socjalnych. Stosowane niejednokrotnie własne agregaty prądotwórcze potrafią zapewnić energię niezależną od sieci krajowej do wszystkich tych celów.

Ochrona środowiska

Roboty wiertnicze należy wykonywać w sposób umożliwiający ochronę gruntów rolnych oraz wód podziemnych i powierzchniowych. Stąd tereny projekto-

wanych robót należy ograniczać do niezbędnej powierzchni wymaganej dla bezpiecznego ich prowadzenia. Gleba z terenu wykopów ulegających zniszczeniu powinna być składowana na potrzeby późniejszej rekultywacji.

Odpady wiertnicze

W świetle ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach (Dz. U. Nr 62 poz. 628 z późn. zm.) i rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz. U. Nr 112 poz. 1206) płuczki wiertnicze i urobek nie stanowią odpadów niebezpiecznych, a z odwiertów wody słodkiej mogą być składowane w sposób nieselektywny (rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 30 października 2002 r. w sprawie rodzajów odpadów, które mogą być składowane w sposób nieselektywny – Dz. U. Nr 191 poz. 1595). Urobek w postaci piasków, żwirów, ilów i glin może być również przekazywany do wykorzystania przez osoby prywatne do wyrównywania terenu itp. (rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 maja 2002 r. w sprawie listy rodzajów odpadów, które posiadacz odpadów może przekazywać osobom fizycznym lub jednostkom organizacyjnym, niebędącym przedsiębiorcami, do wykorzystania na ich własne potrzeby – Dz. U. Nr 74 poz. 686).

Odprowadzanie wód z próbnych pompowań

W rozumieniu rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 29.11.2002 r. w sprawie warunków jakie należy spełniać przy wprowadzaniu ścieków do wód lub ziemi oraz substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (Dz. U. Nr 212 poz. 1799) wody podziemne nie są ściekami. Mogą one być odprowadzane do cieków i kanalizacji deszczowej, a w szczególnych przypadkach do ziemi. Na odprowadzanie wód z pompowania do cieków i do kanalizacji należy uzyskać zgodę zarządzających urządzeniem lub wodami lub ich użytkowników. Woda odprowadzana do odbiorników nie może powodować zniszczenia gruntów, podtopień urządzeń i budowli itp.

Harmonogram prac wiertniczych

Harmonogram jest częścią projektu prac geologicznych i określa przewidywany czas realizacji robót wiertniczych i próbnego pompowania. Dla prac prowadzonych na terenach zalewanych lub podtapianych dolin rzecznych należy określić okres bezpiecznej ich realizacji.

5.4.2. Dozór hydrogeologiczny

Ustawa Prawo geologiczne i górnicze stanowi, że prace geologiczne mogą być wykonywane, dozоровane i kierowane tylko przez osoby posiadające odpowiednie kwalifikacje (art. 31.1). Obowiązki i sposób sprawowania dozoru i kierowania pracami w trakcie wiercenia nie są obecnie prawnie ustalone. Były natomiast sformułowane w opracowaniu pt.: „*Instrukcja obsługi wierceń hydrogeologicznych*” Centralnego Urzędu Geologii (1981). Większość zawartych tam zaleceń pozo-

staje do dziś aktualna, w związku z tym można je wykorzystywać do bieżącej pracy przy dozorcze wiertniczym.

Osoby dozoru geologicznego powinny być zgłoszone przed rozpoczęciem wiercenia we właściwych terytorialnie organach ds. geologii starostwa lub województwa oraz w okręgowym urzędzie górnictwa, łącznie z informacją o zamiarze rozpoczęcia prac geologicznych.

Do ogólnych obowiązków dozoru geologicznego podczas wiercenia należy:

1. Przestrzeganie wykonywania robót wiertniczych zgodnie z zatwierdzonym projektem, prowadzenie zaprojektowanych badań geologicznych.
2. Korygowanie zatwierdzonego projektu badań w dostosowaniu do bieżących wyników robót w granicach uzyskanych zezwoleń oraz występowanie z wnioskiem do organu zatwierdzającego o zmianę projektu, jeśli stwierdzone warunki hydrogeologiczne w czasie robót taką zmianę uzasadniają.
3. Sporządzanie profilu geologicznego otworu w czasie wiercenia – zestawienie zbiorcze wyników wiercenia.
4. Nadzorowanie przewiercania warstw wodonośnych przewidzianych do ujęcia oraz pobieranie rdzenia i innych próbek z otworów i ich odpowiednie zabezpieczanie.
5. Prowadzenie kontrolnych pomiarów i obserwacji, w tym skuteczności zamknięcia poziomów wodonośnych.
6. Współpraca przy wykonywaniu i poborze próbek do badań specjalnych.
7. Ustalanie sposobu zafiltrowania, zamykania poziomów wodonośnych w dostosowaniu do warunków geologicznych stwierdzonych podczas wiercenia.
8. Opracowywanie szczegółowych wytycznych prowadzenia próbnych pompowań w zależności od stwierdzonych warunków hydrogeologicznych.
9. Prowadzenie wpisów wydanych poleceń i zaleceń w dziennych raportach wiertniczych.

Sprawowane dozoru hydrogeologicznego prac wiertniczych powinno być odpowiednio dokumentowane. Ważniejsze dokumenty związane z dozorem to:

- zgłoszenie pracowników dozoru geologicznego do organów ds. geologii i starostwa lub województwa i okręgowego urzędu górnictwa,
- protokół lokalizacji otworu wiertniczego (wg wymagań zamawiającego),
- zbiorcze zestawienie wyników wiercenia,
- zapisy poleceń i zaleceń w raporcie wiertniczym,
- protokoły badania skuteczności zamknięcia wód,
- protokół zdawczo-odbiorczy filtra studziennego,
- dziennik próbnego pompowania,
- protokół zdawczo-odbiorczy robót studziennych,
- protokół likwidacji otworu wiertniczego.

Zakres działań hydrogeologa sprawującego dozór prac wiertniczych rozpoczyna się wraz z wytyczeniem miejsca wiercenia w terenie, kończy zaś wraz z zakończeniem ostatnich prac badawczych w wykonanym otworze. Zwykle ten ostatni etap stanowią próbne pompowania, a ostateczny koniec badań wyzna-

cza zakończenie obserwacji wzniosu zwierciadła wody. Poniżej w schematyczny sposób przedstawiono zasadnicze wymogi poszczególnych etapów prac wiertniczych i badawczych, za których właściwe przeprowadzenie odpowiedzialność ponosi hydrogeolog sprawujący dozór prac wiertniczych.

Wyznaczenie otworów w terenie

Otworki wytycza się w terenie zgodnie z zatwierdzonym projektem na podstawie załączonego szczegółowego planu sytuacyjno-wysokościowego, który posiada uzgodnioną lokalizację. W przypadku wątpliwości dotyczących podziemnego uzbrojenia terenu należy w miejscu wiercenia wykonać szybik o głębokości 1,5-2,5 m. Dotyczy to szczególnie terenów zakładów przemysłowych i starych dzielnic miast. W terenach, gdzie brak stałej zabudowy, lokalizację otworów należy wytyczyć geodezyjnie. W przypadku braku szczegółowych planów należy lokalizację otworów domierzyć do stałych punktów, sporządzając przy tym odpowiednie szkice. W obszarach zabudowanych wytyczanie lokalizacji otworów może być wykonane metodą domiarów do poszczególnych elementów zagospodarowania (drogi, budynki, itp.).

Prace i badania w trakcie wiercenia

Prace i badania wykonywane podczas prowadzenia robót wiertniczych polegają głównie na:

1. Opisie makroskopowym przewiercanych skał.
2. Pomiarach zwierciadła wód przewiercanych warstw wodonośnych.
3. Poborze prób do badań laboratoryjnych:
 - a. granulometrycznych z piasków i żwirów,
 - b. litologiczno-petrograficznych (frakcja żwirowa i kamienista) i mineralno-petrograficznych (frakcja piaskowa),
 - c. specjalnych, uzupełniających do:
 - badań geochemicznych środowiska hydrogeologicznego,
 - określenia współczynnika filtracji warstw słabo przepuszczalnych,
 - mikroskopowej analizy szlifów skał zwięzłych,
 - analiz palinologicznych (osady organiczne czwartorzędowe i trzeciorzędowe),
 - paleontologicznego oznaczenia wieku skał.

Zakres tych prac i badań powinien wynikać z projektu prac geologicznych. Za obligatoryjne uznaje się prace i badania podane w pkt. 1, 2 i 3a.

Niezwykle ważnym elementem prac geologicznych jest prawidłowy opis makroskopowy skał obejmujący ich rodzaj, strukturę, teksturę, barwę, zawartość węglanu wapnia i substancji organicznych oraz ustalenie schematu stratygraficznego profilu skał na podstawie:

- litostratygrafii (rodzaju struktury i tekstury osadów),
- skamieniałości,
- korelacji z sąsiednimi otworami i na przekrojach geologicznych.

Pobieranie, przechowywanie i likwidacja próbek przewiercanych skał

Próbki skał podczas wiercenia należy pobierać przy każdej zmianie litologicznej, nie rzadziej jednak niż co 2 m postępu wiercenia. Przy przewiercaniu warstwy wodonośnej próbki należy pobierać co 1 m. Próbki umieszcza się w znormalizowanych skrzynkach wiertniczych, które odpowiednio zabezpieczone na terenie wiertni tworzą magazyn próbek wiertniczych.

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie gromadzenia i udostępniania próbek i dokumentacji geologicznych (Dz. U. Nr 153, poz. 1780) próbki geologiczne uzyskane przy prowadzeniu prac dokumentacyjnych w hydrogeologii są próbkami czasowego przechowywania i wykonawca prac geologicznych zobowiązany jest do ich przechowywania w magazynie. Likwidacja próbek może nastąpić po przyjęciu dokumentacji hydrogeologicznej przez właściwy organ administracji geologicznej.

Zamykanie poziomów wodonośnych

Poziomy wodonośne nieprzewidziane do eksploatacji są izolowane kolumnami rur posadowionych wodoszczelnie poprzez cementowanie lub ilowanie określonych odcinków profili w przestrzeni poza rurami okładzinowymi lub rurami nadfiltrowymi po usunięciu kolumn rur roboczych. Zamykanie poziomów wodonośnych wykonuje się w warstwach słabo- i półprzepuszczalnych o miąższości ponad 3,0 m. Przy metodzie obrotowej dopuszczalne jest zamykanie kilku poziomów wodonośnych przy zastosowaniu jednej kolumny rur zacementowanych w otworze. Sposoby zamykania poziomów wodonośnych omówione są we wszystkich podręcznikach i opracowaniach z dziedziny wiertnictwa (np. Gonet, Macuda, 1997).

Skuteczność wykonanego zamknięcia wody należy określić poprzez badanie szczelności i sporządzenie protokołu z udziałem kierownika robót wiertniczych. Obowiązkiem pracownika dozoru geologicznego jest sporządzenie protokołu zamknięcia wód oraz dokonanie wpisu w raporcie wiertniczym o głębokości wodoszczelnego posadowienia rur.

Filtrowanie otworu

Ramowy sposób zafiltrowania otworu opisuje projekt prac geologicznych. Ustalenie ostatecznej głębokości posadowienia filtra, jego długości i dobru obsypki musi być wykonane w uzależnieniu od rzeczywistego profilu geologicznego i zadanie to należy do geologa prowadzącego dozór prac wiertniczych. Należy sporządzić szczegółowy projekt zafiltrowania otworu zawierający przedział głębokości zafiltrowania, średnicę i długość kolumny filtracyjnej, rodzaj szkieletu filtra właściwego, rodzaj i rozmiar siatki filtracyjnej, granulację obsypki (w przypadku ujmowania warstw piaszczysto-żwirowych) lub sposób utrzymania i zabezpieczenia otworu bezfiltrowego w utworach szczelinowych lub szczelinowo-porowych.

Próbné pompowanie

To podstawowe badanie hydrodynamiczne wymaga przedstawienia szczegółowego programu w nawiązaniu do stwierdzonych w trakcie wiercenia warunków hydrogeologicznych i rodzaju zafiltrowania otworu.

Program pompowania powinien ustalać dokładnie warunki jego prowadzenia, a w szczególności:

- typ pompy i głębokość jej opuszczenia (do pompowania oczyszczającego i pomiarowego),
- sprzęt przewidziany do pomiaru wydatku i położenia zwierciadła wody,
- sposób odprowadzenia wody,
- przewidywany czas trwania jego poszczególnych faz: pompowania oczyszczającego, postoiu technologicznego związanego z dezynfekcją otworu, pompowania pomiarowego, a także czas obserwacji wzniosu zwierciadła wody po zakończeniu pompowania pomiarowego,
- punkty obserwacji położenia zwierciadła wody, częstotliwość pomiarów,
- liczbę i rodzaj próbek wody, którą należy pobrać do badań.

Wyniki pomiarów prowadzonych podczas pompowania (położenie zwierciadła wody, zmienność wydatku, czas trwania) należy wpisywać do dziennika próbnego pompowania wraz z innymi istotnymi obserwacjami (zjawiska meteorologiczne, temperatura wody i powietrza, stany wód powierzchniowych, pobór próbek, itp.).

Szczegółowe informacje dotyczące prowadzenia próbnego pompowania i interpretacji ich wyników zawiera rozdział 5.5.

5.4.3. Likwidacja otworów

Likwidacja otworów jest wykonywana zgodnie z zatwierdzonym projektem prac geologicznych. Może być ona przeprowadzona metodą zasypania urobkiem, łożenia lub cementacji. Zasadą nadrzędną jest odtworzenie sekwencji poszczególnych warstw w profilu (utwory przepuszczalne, słabo przepuszczalne), aby po zlikwidowaniu otworu, gdy pozostawione rury osłonowe skorodują, nie było możliwości przepływów wód pomiędzy poszczególnymi poziomami wodonośnymi. Nie ma takiego niebezpieczeństwa w przypadku cementacji całego profilu geologicznego, jednak z uwagi na wysoki koszt przedsięwzięcia ten system stosowany jest rzadko. Przeważnie zasadniczą część profilu likwidowana jest urobkiem – z zachowaniem sekwencji warstw – a ostatnie 5-10 m profilu jest cementowane. W zależności od głębokości otworu i jego konstrukcji (a także od wieku otworu i stopnia skorodowania materiałów) przed wykonaniem likwidacji może być z otworu wyjęta kolumna filtracyjna.

Po likwidacji otworu należy sporządzić protokół z likwidacji, podpisany przez zleceniodawcę, wykonawcę robót i dozór hydrogeologiczny. Formą sprawozdania z wykonanych prac jest dokumentacja hydrogeologiczna likwidowanego otworu wiertniczego zgodna z rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 13 grudnia 2001 r. w sprawie określenia przypadków, w których konieczne jest

sporządzenie innej dokumentacji geologicznej (Dz. U Nr 152, poz.1741). Jeśli likwidacja otworu oznacza faktyczną likwidację ujęcia, dokumentacja ta powinna zawierać wniosek o anulowanie jego zasobów.

5.5. Próbne pompowania

5.5.1. Cele, zakresy i rodzaje próbnych pompowań

Podstawowym celem próbnego pompowania jest uzyskanie, poprzez czerpanie wody ze studni, hydrodynamicznej reakcji warstwy wodonośnej, która to reakcja umożliwia identyfikację parametrów filtracyjnych warstwy, parametrów technicznych studni i warunków jej zasilania. Konieczność i waga tego typu badań nie podlega dyskusji. Autorzy podręczników z dziedziny hydrogeologii stosowanej podkreślają potrzebę wysokiej staranności przy wykonaniu próbnych pompowań (np. Castany 1968, 1982).

Poprzez próbne pompowania mogą być zrealizowane następujące cele badawcze ze wzrastającym stopniem ich złożoności:

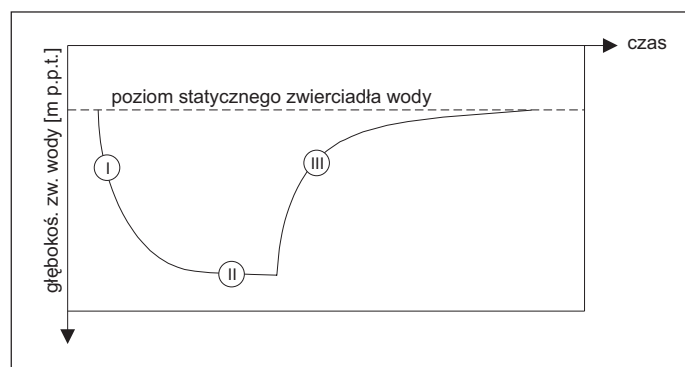
- określenie charakterystyk w zakresie interakcji: studnia – warstwa wodonośna,
- zbadanie studni w aspekcie jej przyszłego wyposażenia eksploatacyjnego i racjonalnej eksploatacji,
- terenowe pomiary parametrów hydrodynamicznych warstwy wodonośnej: przewodności hydraulicznej (T), współczynnika filtracji (k), współczynnika odsączalności grawitacyjnej (μ) lub odsączalności sprężystej (μ_s),
- ilościowa ocena szczególnych charakterystyk warstwy wodonośnej jak: proces przesiąkania wody z warstw sąsiednich, test jej warunków granicznych, heterogeniczności osadów wodonośnych itd.,
- przeprowadzenie terenowych, a więc bezpośrednich testowych obserwacji skutków poboru wody z warstwy wodonośnej, w tym identyfikacja rozwoju depresji w zależności od wydatku studni oraz określenie wydajności eksploatacyjnej ujęcia wód podziemnych.

Część z tych celów może być osiągnięta wyłącznie poprzez przeprowadzenie pompowania w hydrowęzłach badawczych, zawierających – oprócz pompowanej studni – co najmniej jeden piezometr.

Dla pełnego zrozumienia możliwości, które prezentuje sobą ten rodzaj badań terenowych, istotne jest naświetlenie mechanizmu powstawania leja depresji w wyniku pompowania studni. Założenia wynikające ze stosowanych metod interpretacji próbnych pompowań wymagają, aby początkowa powierzchnia piezometryczna była pozioma; w praktyce o minimalnym spadku hydraulicznym. Wówczas oś tworzącego się leja depresji zbiega się z osią studni wierconej i powstaje obraz o koncentrycznym układzie okręgów względem osi studni, wyrażających wielkości depresji, malejącej przy oddalaniu się od studni. W warstwie wodonośnej o swobodnym, poborowi wody towarzyszy osuszanie warstwy w strefie obję-

tej wpływem leja depresji (rys.4.1-8 w rozdz. 4.1.5). W przypadku warstwy naporowej układ linii ekwipotencjalnych ma charakter fizycznie fikcyjny, bowiem warstwa ta nadal pozostaje naporową, a więc jest całkowicie zawodniona, ma jedynie miejsce zmiana potencjału hydrodynamicznego, wyrażona obniżeniem ciśnienia piezometrycznego panującego w danej warstwie wodonośnej o napiętym zwierciadle wody (rys. 4.1-7 w rozdz. 4.1.5). Lej depresji jest przedstawiony na przekroju przez krzywą depresji (rys.4.1-7 i 4.1-8).

Doświadczenie w postaci próbnego pompowania ze stałym wydatkiem polega w pierwszym etapie na pomiarach **opadania** zwierciadła wody podziemnej w czasie jego trwania i śledzeniu tendencji do powstania ruchu quasi-ustalonego. Po zatrzymaniu pompowania ma miejsce drugi etap badawczy, polegający na przeprowadzeniu pomiarów **wzniosu** zwierciadła podczas okresu, w którym warstwa wodonośna wraca do stanu swojej pierwotnej równowagi hydrodynamicznej (rys. 5.5-1).



Rys. 5.5-1. Wykres próbnego pompowania $s=f(t)$: I – krzywa opadania, II – odcinek stabilizacji dynamicznej, najczęściej nie osiągany w czasie krótszych pompowań, III – krzywa wzniosu.

Lej depresji stanowi obszar, w którego zasięgu pompowanie wpływa na kształt wyjściowej powierzchni piezometrycznej, co praktycznie oznacza obszar, gdzie depresja jest możliwa do zmierzenia i przekracza naturalne dobowe wahania zwierciadła wody. Wymiary geometryczne leja depresji w trakcie jego rozwoju mogą być kontrolowane w kolejnych momentach czasu (t) przez pomiary depresji (s) w pompowanej studni oraz w jednym lub kilku piezometrach, usytuowanych w odległościach (r) od osi tej studni. Depresja mierzona od chwili zatrzymania pracy pompy, w kolejnych momentach wzniosu zwierciadła wody od stanu maksymalnego zdepresjonowania do stanu wyjściowego przed pompowaniem, jest nazywana depresją resztkową (s'). Zmieniający się w trakcie pompowania poziom zwierciadła wody podziemnej jest nazywany „poziomem dynamicznym”.

Czynnikami decydującymi o wymiarach leja depresji przy stałym wydatku pompowania są:

- parametry hydrodynamiczne: przewodność hydrauliczna (T) i współczynnik odsączalności grawitacyjnej (μ) lub odsączalności sprężystej (μ_s),
- czas pompowania (t),
- charakter przepływu (laminarny, turbulentny, nieustalony, quasi-ustalony).

Przy stałym wydatku, mogą być rozpatrywane dwie koncepcje analizy dopływu wody podziemnej do ujęcia:

- dopływu nieustalonego, biorącego pod uwagę zjawisko rozwoju leja depresji w czasie pompowania. Podstawą teoretyczną dla tej koncepcji stały się prace C.V. Theisa (1935) oraz C.E. Jacoba (1946),
- dopływu ustalonego, według którego do obliczeń parametrycznych potrzebna jest stabilizacja leja depresji, względnie można przyjąć że po dłuższym czasie pompowania krzywa depresji odzwierciedla układ quasi-ustalonego przepływu. Jest to hipoteza H. Dupuit (1863) rozwinięta w praktycznych zastosowaniach przez G. Thiema (1906).

Równania opisujące dopływ wody do studni w obu typach warunków zostały przedstawione w rozdziale 4.1.5.

Poza nielicznymi przypadkami bardzo wysokiej przewodności warstwy wodonośnej lub występowania w sąsiedztwie ujęcia granicy zasilającej, ustalanie się warunków przepływu wód podziemnych jest procesem długotrwałym. Dlatego uznaje się za nieekonomiczne prowadzenie dłuższych pompowań na kolejnych stopniach wydajności aż do uzyskania pełnej stabilizacji dynamicznego zwierciadła wody. Wykorzystując możliwości metodologiczne interpretacji wyników uzyskanych na podstawie obserwacji dopływu nieustalonego i przejściowego (quasi-ustalonego) zaleca się projektowanie próbnego pompowania przy przyjęciu trzech sposobów przeprowadzenia doświadczeń badawczo-eksploatacyjnych (testów) w zależności od obranego celu badania, wielkości ujęcia oraz stopnia rozpoznania i złożoności warunków hydrogeologicznych:

- **test studni – krótkotrwałe pompowanie jednostopniowe studni powtarzalne w kilku równoczesowych cyklach o czasie trwania 1,5-3 godz. ze wzrastającą na każdym cyklu wydajnością** dla określenia charakterystyki interakcji studnia/warstwa wodonośna w celu ustalenia wielkości strat hydraulicznych w studni i parametrów filtracyjnych w miejscu wykonania studni,
- **test warstwy wodonośnej – próbne pompowanie pojedynczego otworu na jednym maksymalnym stopniu wydatku** przez okres $t = 24-72$ godz. (warstwy o zwierciadle naporowym) lub $t = 48-96$ h (warstwy o zwierciadle swobodnym) w celu rozpoznania parametrów ujętej warstwy wodonośnej i zakresu ich zmienności w granicach obszaru wpływu ujęcia (leja depresji),
- **test systemu wodonośnego – próbne pompowanie w hydrowęźle badawczym** – na jednym stopniu dynamicznym z możliwie maksymalną wydajnością – długookresowe: od 3 dni do 1 tygodnia w warstwie naporowej oraz od 1 do

3 tygodni w warstwie swobodnej z pomiarami opadania i wzniosu zwierciadła wody w studni i w jednym lub kilku piezometrach w celu zbadania parametrów hydrodynamicznych warstwy wodonośnej: przewodności (T), współczynnika odsączalności grawitacyjnej (μ) lub odsączalności sprężystej (μ_s), rozwoju lejów depresji w czasie (R_t), ilościowej oceny szczególnych charakterystyk warstwy wodonośnej jak: procesu przesiąkania wody z warstw sąsiednich, ustalenia jej warunków granicznych, heterogeniczności budujących ją osadów itp.

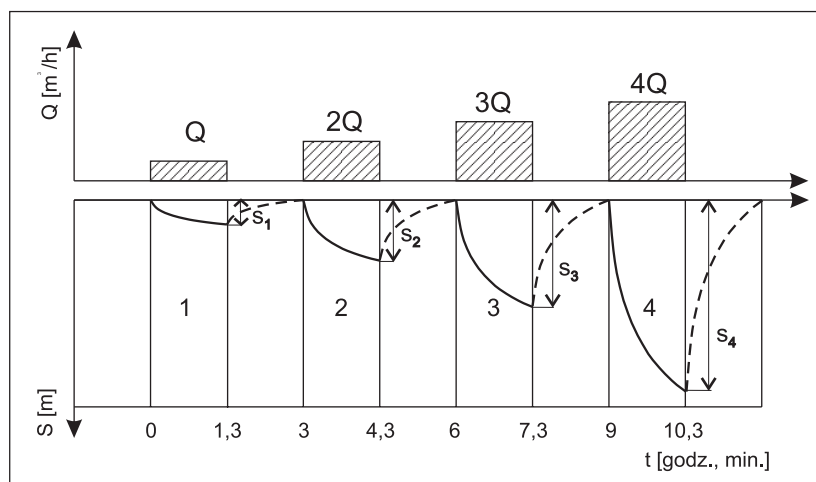
Przed każdym z wymienionych testów badawczych niezbędne jest przeprowadzenie pompowania oczyszczającego według zasad opisanych w literaturze (Mańkowski, Siwek, 1978; Siwek, 1978, 1979, 1980; Pilch, 1979). Właściwy sposób interpretacji wyników próbnego pompowania wymaga określenia typu hydrodynamicznego ujętej warstwy wodonośnej (patrz: rozdz. 4.1.2.).

5.5.2. Krótkotrwałe pompowania jednostopniowe powtarzalne

Metoda polega na wykonaniu 3 do 5 pompowań jednostopniowych przedzielonych przerwami na stabilizację zwierciadła wody (Mogg, 1969; Forkasiewicz, 1973; Siwek, Mańkowski, 1981; Castany, 1982; Grenier 1985). Optymalną jest liczba czterech kolejnych krótkotrwałych pompowań, dla warstw wodonośnych o zwierciadle naporowym mogą w zupełności wystarczyć trzy takie pompowania. Czasy trwania kolejnych pompowań muszą być jednakowe, a wydajności w kolejnych pompowaniach powinny wzrastać według przybliżonego schematu: Q_1 , $Q_2=2Q_1$, $Q_3=3Q_1$ itd. (rys. 5.5-2). Pierwszy wydatek powinien być równy minimalnej mocy pompy, ostatni zaś powinien być tak dobrany, aby był nieco wyższy od spodziewanego wydatku dopuszczalnego.

Na początku każdego stopnia pompowania pierwsze objętości wypompowanej wody odpowiadają opróżnianiu rury osłonowej (rury nadfiltrowej) danej studni, a więc przepływowi nieliniowemu. Warstwa wodonośna zaczyna być eksploatowana dopiero po pewnym czasie. Jest to efekt pojemności studni (Bonnet et al., 1967). Przy większych średnicach studni o zjawisku tym trzeba pamiętać, planując czas trwania każdego stopnia dynamicznego.

Czas trwania pompowań ustalany jest w trakcie prowadzonych prac w zależności od otrzymywanych wyników. Za wystarczający można uznać taki czas trwania poszczególnych cykli pompowania, w którym zależność $s=f(\lg t)$, wyznaczona graficznie na papierze logarytmicznym, zaczyna przyjmować charakter liniowy. Siwek i Mańkowski (1981) podają, że warunek ten jest praktycznie spełniony po 1-1,5h pompowania. Forkasiewicz (1978 – za Castany, 1972) określiła przedział czasu minimalnego na 1 do 3h w zależności od pojemności studni i rodzaju warstwy wodonośnej poddanej badaniom. Czas stabilizacji zwierciadła wody powinien być w przybliżeniu równy czasowi trwania pompowania. Z praktyki hydrogeologicznej wynika jednak, że stabilizacja trwa z reguły dłużej niż opadanie zwierciadła wody. Z tego względu nie należy oczekiwać całkowitego powrotu zwierciadła wody do stanu wyjściowego po każdym cyklu pompowania (jak to



Rys. 5.5-2. Krótkotrwałe pompowania jednostopniowe powtarzalne w kilku równoczesowych cyklach ze wzrastającą wydajnością.

przedstawiono ideowo na rysunku 5.5-2). Różnica pomiędzy wyjściowym poziomem zwierciadła wody, a poziomem ukształtowanym w wyniku stabilizacji po czasie zbliżonym do czasu pompowania, powinna być odnotowana, ponieważ stanowi ona dodatkową informację o badanej warstwie wodonośnej, świadcząc o stopniu jej niejednorodności, albo nierównomiernym odsączaniu.

Ostatni cykl pompowania, na maksymalnym wydatku, powinien być wydłużony aż do momentu uzyskania prostoliniowego wykresu przyrostu depresji w pełnym cyklu logarytmicznym (rys. 5.5-3 – cykl 3). Dzięki temu pompowanie testujące studnię można wykorzystać do obliczenia przewodności hydraulicznej (T) i współczynnika filtracji (k) ujętej warstwy wodonośnej.

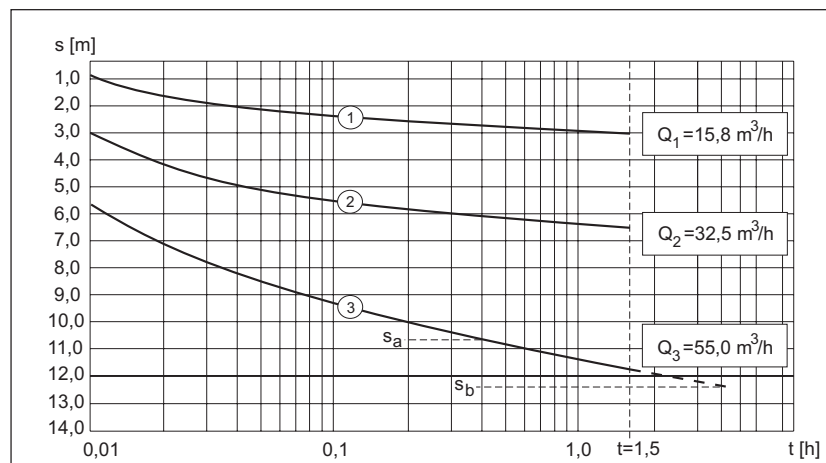
Pomiary dynamicznego zwierciadła wody w czasie pompowań powinny być wykonywane z dokładnością nie mniejszą niż 5 cm. Minimalna częstotliwość pomiarów powinna odpowiadać schematowi:

Czas od rozpoczęcia pompowania w minutach	Częstotliwość pomiarów w minutach
do 5 minut	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0;
5-25 minut	6; 8; 10; 12; 15; 20; 25;
>25 minut	30; 35; 40; 45; 50; 60 i dalej co 15 min

Podaną częstotliwość należy powtarzać w każdym kolejnym pompowaniu jednostopniowym. Wyniki pomiarów wydatku, głębokości do zwierciadła wody i depresji w czasie próbnich pompowań i w okresach stabilizacji należy zapisy-

wać w dzienniku (tab. 5.5-2, 5.5-3), który należy załączyć do każdego egzemplarza dokumentacji hydrogeologicznej.

Wykresy depresji ilustrujące przebieg pompowań należy sporządzać przy przyjęciu początku skali czasowej wspólnej dla wszystkich kolejnych stopni pompowania (rys. 5.5-3).



Rys. 5.5-3. Odzworowanie zależności $s=f(\lg t)$ z wielokrotnych pompowań wielostopniowych (podane wartości dotyczą przykładu omówionego w tekście).

Obliczenia przewodności hydraulicznej (T) wykonuje się z wykorzystaniem wzoru przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba w postaci podanej przez Jacoba (1946) z uwzględnieniem oporów hydraulicznych studni:

$$s = \frac{0,183Q}{T} \lg \frac{2,25Tt}{r_0^2 \mu} + CQ^2$$

gdzie pozostałe wielkości to:

s – depresja w badanej studni dla przyjętego czasu t [m],

t – wybrany czas pompowania [h],

Q – wydajność pompowania w danym cyklu [m^3/h],

r_0 – promień studni [m],

μ – współczynnik odsączalności grawitacyjnej dla warstw swobodnych lub odpowiednio współczynnik odsączalności sprężystej (μ_s) dla warstw naporowych [1],

C – współczynnik oporu studni [h^2/m^5].

Przewodność hydrauliczną T wyznacza się, wykorzystując możliwość graficznego rozwiązania powyższego równania przez obliczenie wartości współczynnika kierunkowego prostoliniowego odcinka wykresu $s=f(\lg t)$, odczytując jego wartość $\Delta s=CQ^2$ dla jednego pełnego cyklu logarytmicznego.

Dla wybranego do interpretacji odcinka wykresu istnieje zależność:

$$T = \frac{0,183Q}{\Delta s} = \frac{0,183Q}{s_b - s_a}$$

gdzie Δs jest różnicą depresji w jednym pełnym cyklu logarytmicznym, wyznaczoną z odczytania wartości s_b (końcowej w danym cyklu) i s_a (początkowej w danym cyklu) co zilustrowano na rysunku 5.5-3.

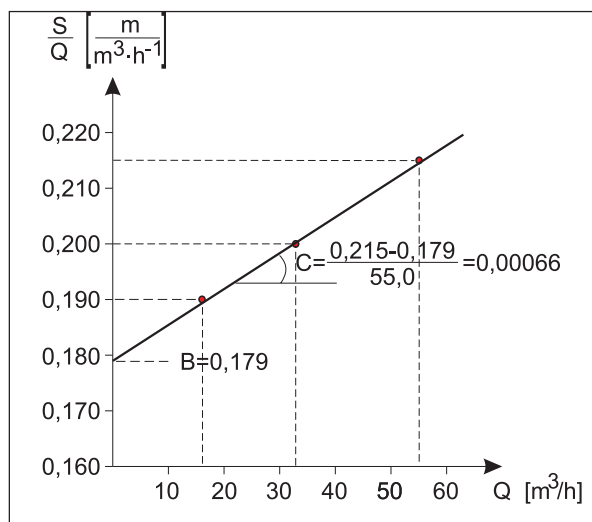
Obliczenia strat hydraulicznych na podstawie wielokrotnych pompowań jednostopniowych przeprowadza się według założeń Jacoba lub Rorabaugha, które opisano w rozdziale 4.2. Wartości depresji niezbędne do wyznaczenia parametrów s/Q lub $s/Q-B$ należy odczytać z końcowego momentu każdego z pompowań jednostopniowych (w zależności od czasu ich trwania; np. 1h, 1,5h, itd.). W przypadku przedłużenia ostatniego cyklu pompowania z wydajnością maksymalną, w związku z zamiarem obliczenia przewodności T , depresja dla tego cyklu musi być odczytana dla czasu przyjętego w cyklach poprzednich (1,5 h na rys. 5.5-3).

Wyznaczanie współczynnika oporu studni metodą Bruina i Hudsona (Siwek, Mańkowski, 1981) pokazano na przykładzie studni o głębokości 68 m odwierconej techniką obrotową na płuczkę. Zwierciadło wody ma charakter napięty, czwartorzędowa warstwa wodonośna o miąższości 14 m zbudowana jest z piasków drobno- i różnoziarnistych. Filtr siatkowy o średnicy 330 mm i długość części roboczej 14 m posadowiony jest na głębokości 68 m. Pompowanie wykonano na 3 stopniach dynamicznych o czasie trwania 1,5 h każdy. Osiągnięto następujące wyniki:

stopień pompowania	Q – wydajność [m ³ /h]	s – depresja po czasie 1,5 h [m]	$s/Q \left[\frac{m}{m^3 h^{-1}} \right]$
1	15,8	3,0	0,190
2	32,5	6,5	0,200
3	55,0	11,8	0,215

W wyniku obliczeń przedstawionych na rysunku 5.5-4 i w tabeli 5.5-1 otrzymano wartość współczynnika oporu studni $C=0,00066 \text{ h}^2/\text{m}^5$. Wskazuje to zaawansowane zanieczyszczenie warstwy wodonośnej związane przypuszczalnie z niedostatecznym oczyszczeniem otworu po procesie wiercenia (III klasa wg Waltona).

W literaturze hydrogeologicznej opisywana jest również inna metoda stosowana dla zbadania parametrów hydraulicznych studni. Polega ona na prowadzeniu krótkotrwałych pompowań wielostopniowych, ale bez przerw stabilizacyjnych zwierciadła wody pomiędzy wzrastającymi wydatkami. Ponieważ w kolejnych stopniach dynamicznych nie są osiągnięte warunki filtracji usta-



Rys. 5.5-4. Wyznaczenie współczynnika oporu studni metodą Bruina i Hadsona dla przykładu omówionego w tekście.

Tabela 5.5-1. Rozkład depresji w poszczególnych krótkotrwałych pompowaniach ($t=1,5h$).

Wydajność pompowania Q [m³/h]	Depresja rzeczywista w warstwie wodonośnej $s_w=BQ$ [m], gdzie $B = 0,179$ h/m²	Zeskok hydrauliczny $\Delta s=CQ^2$ [m], gdzie $C=0,00066$ h²/m⁵	Depresja całkowita w studni (wg wzoru Jacoba) $s_c = BQ + CQ^2$ [m]
$Q_1 = 15,8$	$0,179 \cdot 15,8 = 2,83$	$0,00066 \cdot 15,8^2 = 0,16$	$s_1 = 2,83 + 0,16$
$Q_2 = 32,5$	$0,179 \cdot 32,5 = 5,82$	$0,00066 \cdot 32,5^2 = 0,69$	$s_2 = 5,82 + 0,69$
$Q_3 = 55,0$	$0,179 \cdot 55,0 = 9,85$	$0,00066 \cdot 55,0^2 = 2,00$	$s_3 = 9,85 + 2,00$

lonej, następuje nakładanie się kolejnych przyrostów depresji na danym stopniu na trwające nadal przyrosty depresji wywołane pompowaniem na poprzednim stopniu. W związku z tym konieczne jest stosowanie korekty depresji, uzyskiwanej na kolejnych stopniach dynamicznych (za wyjątkiem pierwszego stopnia). Korektę przeprowadza się graficznie na wykresach depresji wyznaczonych bezpośrednimi pomiarami. Przykłady korygowania depresji w krótkotrwałych pompowaniach wielostopniowych podają Siwek i Mańkowski (1981).

Z uwagi na uciążliwość interpretacyjną metody krótkotrwałych pompowań wielostopniowych nie zaleca się do wyznaczania parametrów hydraulicznych

studni. Za właściwszą, aczkolwiek nieco dłużej trwającą (ze względu na przerwy stabilizacyjne), uznaje się, uprzednio opisaną metodę krótkotrwałych pompowań jednostopniowych powtarzalnych, która nie wymaga wprowadzania korekt ekstrapolacyjnych wielkości depresji w stosunku do wyników uzyskiwanych w bezpośrednich pomiarach.

5.5.3. Próbné pompowanie jednostopniowe w pojedynczym otworze

Opisane powyżej pompowanie powtarzalne wykonane jako badanie interakcji studnia wierconca-warstwa wodonośna w bliskim otoczeniu studni, polegające na badaniu proporcji strat ciśnienia hydrodynamicznego na zewnątrz i wewnątrz filtra za pomocą krótkotrwałych stopni dynamicznych (1-3h), nie zapewnia dostatecznego rozpoznania warstwy wodonośnej w granicach zasięgu leja depresji, który formuje się dopiero po pompowaniu trwającym dłuższy czas. W celu określenia parametrów filtracyjnych warstwy wodonośnej w obszarze wpływu ujęcia, a więc w obszarze angażowanym w trakcie jego późniejszej użytkowej eksploatacji, istnieje celowość (określona w projekcie prac geologicznych), nawet w przypadku pojedynczego otworu rozpoznawczego, przeprowadzenia testowej próby badawczej, polegającej na obciążeniu eksploatacyjnym ujętej warstwy wodonośnej wydatkiem $Q = \text{const}$:

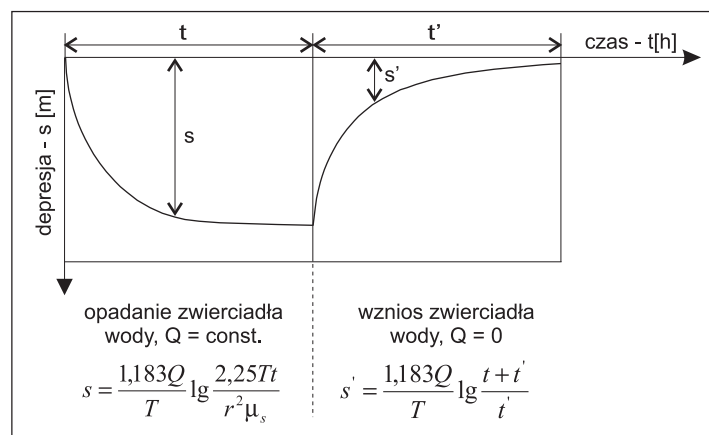
- przez okres minimum $t = 24-72$ h – w przypadku warstw o zwierciadle naporowym,
- przez okres minimum $t = 48-96$ h – w przypadku warstw o zwierciadle swobodnym, ze zróżnicowaniem tego czasu w zależności od stopnia różnorodności budujących te warstwy osadów wodonośnych i wydajności pompowania.

Pompowanie jednostopniowe, przeprowadzone w celu zbadania procesu rozwoju i zaniku leja depresji (filtracja nieustalona – rys. 5.5-5) wymaga utrzymania stałości wydatku przez cały okres próby oraz bardzo starannych pomiarów zwierciadła wody w pompowanym otworze szczególnie w sytuacji, gdy w jego otoczeniu nie ma innego otworu hydrogeologicznego, który mógłby pełnić rolę otworu obserwacyjnego.

Wynikiem przeprowadzonych obserwacji jest możliwość:

- sporządzenia wykresu funkcji $s = f(\lg t)$ na podstawie pomiarów opadania zwierciadła wody w badanej studni,
- sporządzenia wykresu funkcji $s' = f \lg(t/t' + 1)$ lub $s' = f \lg(t')$ na podstawie pomiarów wzniosu (powrotu) tegoż zwierciadła do stanu pierwotnego po wyłączeniu pompy (pomiaru depresji resztkowej – s' naliczane są od stanu zwierciadła dynamicznego osiągniętego przy zakończeniu pompowania).

Interpretacja obu wykresów za pomocą metody przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba pozwala na obliczenie przewodności hydraulicznej (T) ujętej warstwy i zakresu jej zmienności w zasięgu leja depresji, określenie współczynnika filtracji (k) oraz depresji rzeczywistej w warstwie wodonośnej (s_w) i strat hydraulicznych w konstrukcji studziennej (Δs).



Rys. 5.5-5. Przebieg próbnego pompowania jednostopniowego z wzorami przybliżenia logarytmicznego Theisa-Jacoba do parametrycznej interpretacji wykresów opadania i wzniosu zwierciadła wody.

t – czas opadania, t' – czas wzniosu, s – depresja w fazie opadania, s' – depresja resztkowa w fazie wzniosu zwierciadła wody, r – odległość punktu obserwacji, T, μ_s – parametry warstwy wodonośnej

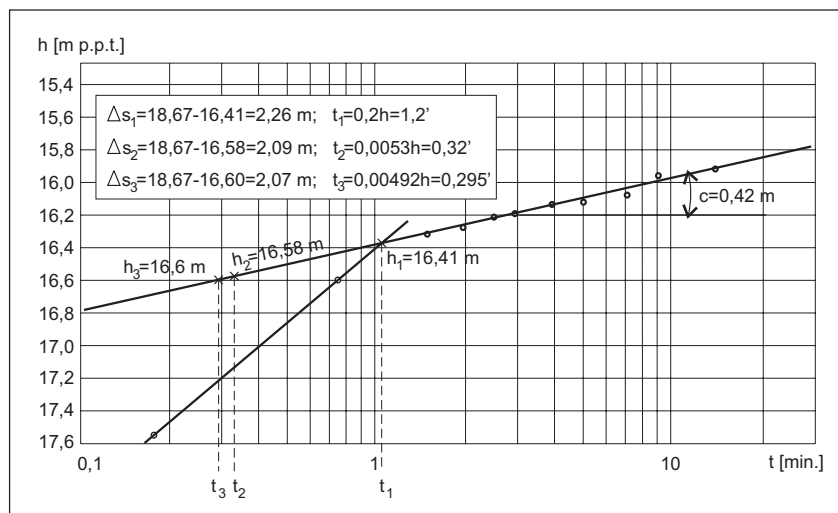
Wykres wzniosu zwierciadła wody jest wykresem złożonym i składa się co najmniej z dwóch odcinków (rys. 5.5-6). Pierwszy odcinek odzwierciedla czas wypełnienia objętości otworu o określonej średnicy i pozwala wnioskować o orientacyjnej wielkości strat (Δs – zeskoku hydraulicznego) wynikających z przepływu wody w otworze studziennym. Nachylenie drugiego odcinka wykresu (wartość c) odzwierciedla parametry filtracyjne w otoczeniu studni. Przybliżoną wielkość zeskoku odczytuje się poprzez rzutowanie punktu przecięcia się dwóch prostych (odcinków wykresu) na oś położenia zwierciadła wody (depresji) h, s' i odczytaniu różnicy pomiędzy poziomem zwierciadła dynamicznego w otworze ($h_{\min}$) a wielkością (h_1) w punkcie przecięcia prostych:

$$\Delta s_1 = h_{\min} - h_1 = 18,67 - 16,41 = 2,26 \text{ m}$$

Wielkość ta jest jednak przybliżona, gdyż w odcinku pierwszym zawiera wypadkową wypełniania się zarówno objętości otworu jak i części leżącej depresyjnego przy studni. Można więc wprowadzić poprawkę do odczytywanej z wykresu wielkości zeskoku hydraulicznego. Poprawkę tę można obliczyć metodą kolejnych przybliżeń obliczając czas wypełniania objętości otworu przy danej jego średnicy, wychodząc z pierwotnie określonej wielkości zeskoku na krzywej wzniosu (rys. 5.5-6). Do odczytania z wykresu kolejnej wielkości h_2 potrzebne jest obliczenie czasu t_2 z relacji:

$$t_2 = \frac{\pi r_0^2 \Delta s_1}{Q}$$

gdzie iloczyn w liczniku stanowi objętość wody w otworze o promieniu r_0 na odcinku wzniosu Δs_1 , Q jest wydatkiem pompowania przed wyłączeniem studni.



Rys. 5.5-6. Wykres $h=f(lgt)$ wzniosu zwierciadła wody po pompowaniu studni o promieniu $r_0=0,15$ m na ujęciu Trzaski w Inowrocławiu z wydajnością $30 \text{ m}^3/\text{h} = \text{const}$ (Dąbrowski, 1993).

Obliczenia Δs prowadzi się zwykle dwukrotnie dla osiągnięcia dokładności z błędem oszacowania zeskoku nie przekraczającym 5%.

Z tangensa kąta nachylenia drugiego odcinka (rys. 5.5-6) można obliczyć przewodność hydrauliczną ujętej warstwy wodonośnej, wykorzystując odczytaną dla pełnego cyklu logarytmicznego wartość $c=0,42$ m przy stałym wydatku pompowania $Q=30 \text{ m}^3/\text{h}$:

$$T = \frac{0,183Q}{c} = \frac{0,183Q}{s_2 - s_1} = \frac{0,183 \cdot 30 \text{ m}^3/\text{h}}{0,42 \text{ m}} = 13,07 \text{ m}^2/\text{h}$$

Postać wykresu wzniosu po kilkudziesięciogodzinnym pompowaniu może dostarczyć również przesłanek do wnioskowania o warunkach zasilania przyszłego ujęcia.

5.5.4. Próbne pompowanie w hydrowężle badawczym

Próbne pompowanie w hydrowężle badawczym jest testem nie tylko ujętej warstwy wodonośnej, ale także części systemu wodonośnego, w obrębie którego ujęcie wody będzie funkcjonować. Wymaga więc opracowania specjalnego programu w projekcie prac geologicznych, w którym określone będą cele badawcze oraz:

- miejsce lokalizacji hydrowęzła,
- charakterystyka techniczna otworu pompowanego i jego wyposażenia technicznego do przeprowadzenia badań,
- typ hydrodynamiczny badanego systemu wodonośnego i spodziewanych granic,
- ilość i rozmieszczenie otworów obserwacyjnych (piezometrów),
- wydajność i orientacyjny czas trwania pompowania,
- częstotliwość prowadzenia pomiarów depresji zwierciadła wody,
- przybliżony czas przeprowadzenia badań,
- sposób prowadzenia obserwacji i ich bieżącej interpretacji w terenie w czasie trwania pompowania.

Pompowanie hydrowęzłowe musi być przeprowadzone na jednym stopniu dynamicznym z możliwie maksymalną wydajnością – długookresowe: od 3 dni do tygodnia w warstwie naporowej oraz od 1 do 3 tygodni w warstwie swobodnej z pomiarami opadania i wzniosu zwierciadła wody w studni i w jednym lub kilku piezometrach.

Schematyzacja hydrogeologiczna

Przygotowanie do próbnego pompowania hydrowęzłowego wymaga wnikliwej analizy wyników prac wiertniczych w pierwszym wykonanym otworze (z reguły jest to otwór rozpoznawczy – pompowy) w powiązaniu z dostępnymi materiałami geologicznymi dotyczącymi rejonu badań dla określenia ciągłości poziomów wodonośnych, względnie ustalenia ich granic geologicznych (uskoki, wyklinowania, erozyjne i sedymentacyjne granice zasięgu). Efektem tych prac powinno być wydzielenie warstw wodonośnych i wszelkich ich przewarstwień w postaci skał słabo przepuszczalnych. Na podstawie tej analizy, a także w oparciu o dostępne informacje o pionowych i poziomych gradientach hydraulicznych, powinno nastąpić uściślenie projektu hydrowęzła oraz wstępny wybór schematu obliczeniowego, decydującego o ostatecznym rozmieszczeniu otworów obserwacyjnych. W tym świetle podstawowymi schematami obliczeniowymi do interpretacji wyników próbnych pompowań są schematy opisujące dopływ do studni w warunkach filtracji nieustalonej, a więc: schematy Theisa, Hantusha i Boultona, przedstawione w rozdziale 4.1.5.

Zaprojektowanie hydrowęzła

Zaprojektowanie hydrowęzła polega na określeniu ilości i rozmieszczenia piezometrów oraz sposobu ich wykonania. Zadanie to musi uwzględniać: obrany na podstawie warunków hydrogeologicznych wstępny schemat obliczeniowy, charakter granic warstwy wodonośnej (nieprzepuszczalne o charakterze strukturalnym, zasilające, np. brzeg rzeki lub innego zbiornika wód powierzchniowych), zmiana facji osadów, anizotropię osadów wodonośnych, możliwości odpompowania piezometrów i zainstalowania w nich przyrządów pomiarowych.

Ilość otworów obserwacyjnych i ich rozmieszczenie w hydrowęzle zależy od typu i złożoności badanej jednostki hydrogeologicznej, jej ograniczeń, głę-

bokości występowania badanego poziomu wodonośnego, rodzaju i wielkości zadania geologicznego (zapotrzebowania na wodę) oraz wyboru wstępnej lokalizacji hydrowęzła. W warstwach jednorodnych, o nieograniczonym rozprzestrzenieniu wystarczy jeden promień rozmieszczenia piezometrów. W takich warunkach wystarczy dwa, trzy otwory obserwacyjne. W miarę potrzeby, przy komplikowaniu się warunków hydrogeologicznych, liczbę promieni i otworów obserwacyjnych należy zwiększać. Typowe przykłady hydrowęzłów podawane w literaturze to: krzyżowe i prostokątne, wykonywane zazwyczaj przy znanym kierunku przepływu wody i trójkątne, gdy kierunek ten nie jest znany. Przy badaniu warstw wodonośnych związanych hydraulicznie z rzekami, układ otworów obserwacyjnych powinien być taki, by pierwszy promień był prostopadły do rzeki, drugi natomiast biegł do niej równolegle. W wąskich dolinach kopalnych, gdy lej depresyjny osiąga granice boczne, hydrowęzeł należy wykonać w następujący sposób: otwór rozpoznawczy (studnia) w środku wyznaczonej doliny, a otwory obserwacyjne wzdłuż jej rozciągłości; pierwszy w odległości 1,5 miąższości warstwy (nie dalej jednak niż 0,5 szerokości tej jednostki), drugi w odległości nie mniejszej niż jej szerokość. Przy takim rozmieszczeniu otworów wyniki obserwacji w pierwszym otworze pozwalają określić parametry filtracyjne warstwy wodonośnej i wpływ granic bocznych, w drugim zaś uśrednione parametry filtracyjne związane z wodonośnością badanej jednostki i jej otoczenia o gorszej przepuszczalności osadów.

Odległości otworów obserwacyjnych od otworu pompowanego

Ogólną zasadą przy określaniu odległości otworów obserwacyjnych od otworu pompowanego jest, aby w czasie pompowania leżały one w strefie ruchu quasi-ustalonego, a depresja w nich była dostatecznie duża (mierzalna). Spełnienie tych warunków umożliwia poprawną interpretację pompowania. Depresja w najbliższym otworze powinna wynosić około 20% wartości depresji w otworze pompowanym, a w następnym nie mniej niż 10% tej wartości.

Przy doborze odległości otworów obserwacyjnych należy mieć na uwadze następujące czynniki:

- typ warstwy wodonośnej: naporowa, swobodna,
- przepuszczalność osadów wodonośnych,
- wydajność pompowania,
- zafiltrowanie otworu pompowanego,
- planowany czas pompowania.

Typ warstwy wodonośnej w zasadniczy sposób wpływa na wybranie odległości piezometrów. W warstwie naporowej podczas pompowania straty ciśnienia przemieszczają się szybko, natomiast w warunkach swobodnych lej depresyjny rozwija się powoli, a tempo tego rozwoju zależy przede wszystkim od współczynnika odsączalności. Zasięg leja depresji (R_t) w czasie trwania przepływów nieustalonych rozwija się z różną prędkością:

$$R_t = 1,5\sqrt{at} = 1,5\sqrt{\frac{Tt}{\mu}} \quad \text{w warstwach swobodnych,}$$

$$R_t = 1,5\sqrt{\frac{Tt}{\mu_s}} \quad \text{w warstwach naporowych}$$

Przy dobrej przepuszczalności osadów, np. w żwirach, lej depresyjny jest rozległy i płaski, natomiast w osadach o gorszej przepuszczalności, np. w piaskach drobnych i mułkowatych, jest on odpowiednio mniejszy i głębszy.

Zasadniczy wpływ na wielkość depresji ma wydajność pompowania. Przy spodziewanej małej wydajności otwory obserwacyjne powinny być lokalizowane bliżej otworu pompowanego tak, aby można było uzyskać obniżenie zwierciadła wody możliwe do zinterpretowania. Maksymalna wydajność ograniczona jest przez prędkość dopuszczalną (V_{dop}) – patrz rozdz. 4.2.

W hydrowęźle, którego otwór pompowany jest niezupełny, w pierwszym piezometrze filtr należy zbudować na głębokości położenia filtra otworu pompowanego. Wówczas można lokalizować ten otwór w odległości mniejszej niż 1,5 miąższości warstwy, lecz nie bliżej niż 3-5 m od otworu pompowanego. Gdy nie można spełnić warunku zabudowy filtra w przedziale położenia filtra otworu pompowanego, należy pierwszy otwór obserwacyjny wykonać w odległości $r > 1,5 m$ (m – miąższości warstwy wodonośnej).

Wielkość depresji mierzonej w fazie filtracji nieustalonej i quasi-ustalonej jest funkcją czasu pompowania. Przy krótszych pompowaniach parametrycznych jest to istotne dla ustalenia odległości otworów dalszych. Odległości drugiego i dalszych otworów obserwacyjnych w hydrowęźle można ustalać według wzoru (Borewskij i inni, 1973; Szczepański, 1977):

$$r_n = r_1 \alpha^{n-1}$$

gdzie:

- r_1 – odległość pierwszego otworu obserwacyjnego,
- α – współczynnik empiryczny, przyjmowany w wielkości 1,5 dla warstw swobodnych i 2,5 dla warstw naporowych,
- n – kolejny numer otworu obserwacyjnego.

Orientacyjnie odległości piezometrów od otworu pompowanego lub grupy otworów w zależności od charakteru warstwy wodonośnej i skomplikowania warunków hydrogeologicznych podawane są w dostępnej literaturze (Szczepański, 1977; Dąbrowski, Przybyłek, 1980; Pazdro, Kozerski, 1990).

Do śledzenia naturalnych wahań zwierciadła wody w trakcie pompowania (co ma duże znaczenie szczególnie w dolinach rzecznych i poziomach szczelinowokrasyowych) dobrze jest wykonać specjalny piezometr zlokalizowany poza spodziewanym zasięgiem leja depresyjnego. Ponadto jako otwory obserwacyjne należy wykorzystywać studnie kopane położone w zasięgu wpływu pompowania.

Przy projektowaniu hydrowęzłów można się kierować następującymi uproszczonymi zasadami minimalizacji ilości piezometrów:

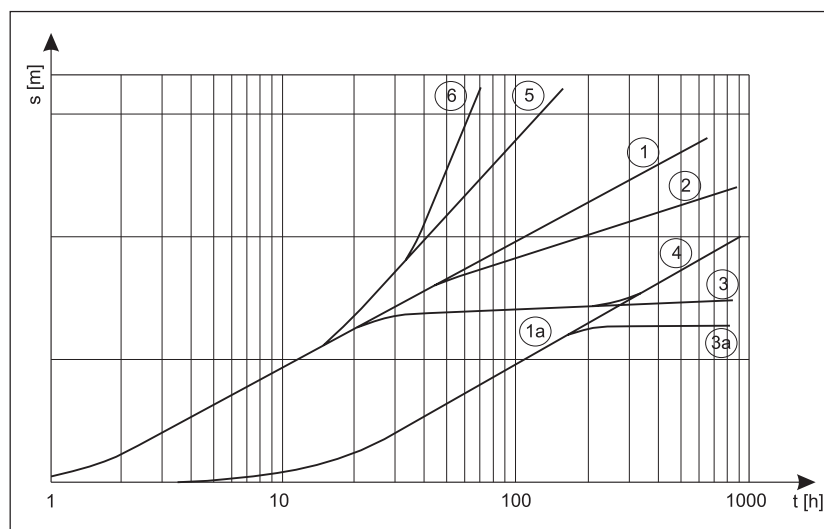
- warstwa nieograniczona w poziomie (w przewidywanym zasięgu leja depresji):
 - a. *schemat Theisa* – wystarczy jeden piezometr, wykonany w warstwie zafiltrowanej,
 - b. *schemat Hantusha* – dwa piezometry (w warstwie ujmowanej, i w warstwie zasilającej), które mogą być założone w jednym otworze wiertniczym, jeżeli będą od siebie odpowiednio odizolowane,
 - c. *schemat Boultona* – trzy piezometry, w tym dwa założone na głębokości posadowienia filtra studziennego na jednym promieniu, a trzeci w rejonie pierwszego piezometru, tuż pod powierzchnią dynamicznego zwierciadła wody.
- warstwa ograniczona w poziomie konturami nieprzepuszczalnymi – schemat Theisa – trzy piezometry rozmieszczone na wierzchołkach trójkąta, w środku którego jest otwór pompowany,
- warstwa ograniczona w poziomie konturami zasilania (np. rzeka) – schemat Theisa lub Hantusha, minimum dwa piezometry na linii prostopadłej do rzeki i dodatkowo trzeci na przeciwległym brzegu w przypadku wąskich koryt rzecznych.

Analiza wyników obserwacji hydrowęzłowych

Przeprowadzenie próbnego pompowania według opracowanego programu powinno odbywać się pod nadzorem hydrogeologa, który w czasie jego trwania sporządza na bieżąco wykres wskaźnikowy $s=f(lgt)$ – rysunek 5.5-7. Wykres taki nazywany jest „wykresem diagnostycznym”, ponieważ odzwierciedla on przebieg badań w stopniu umożliwiającym wybór właściwego schematu obliczeniowego. Pomaga także w podjęciu decyzji o zakończeniu pompowania, która musi wynikać z przeświadczenia, że obrany schemat interpretacyjny jest właściwy, a czas i zakres przeprowadzonych obserwacji umożliwia obliczenie uogólnionych parametrów filtracyjnych, określenie warunków zasilania ujęcia i wpływu granic.

Sposób interpretacji przedstawionych na rysunku 5.5-7 wykresów wskaźnikowych z odwołaniem się do numeracji poszczególnych krzywych (od 1 do 6) przedstawiono poniżej:

- **1** – warstwa wodonośna o zwierciadle napiętym, nieograniczona w poziomie; strop i spąg warstwy stanowią osady nieprzepuszczalne, schemat Theisa,
- **1a** – warstwa wodonośna o zwierciadle swobodnym, nieograniczona w poziomie, reżim grawitacyjny, schemat Theisa jak dla krzywej 1 przy spełnieniu warunku, że $s_{\max} < 0,1 H$ w punkcie obserwowanym,
- **2** – warstwa wodonośna o zwierciadle napiętym granicząca ze strefą o wyższej przewodności ($T_1 < T_2$) lub dodatkowo zasilana z zasobów sprężystych, pochodzących z warstw słabo przepuszczalnych o znacznej zasobności (jeden z przypadków w schemacie Hantusha, którego nie omawia

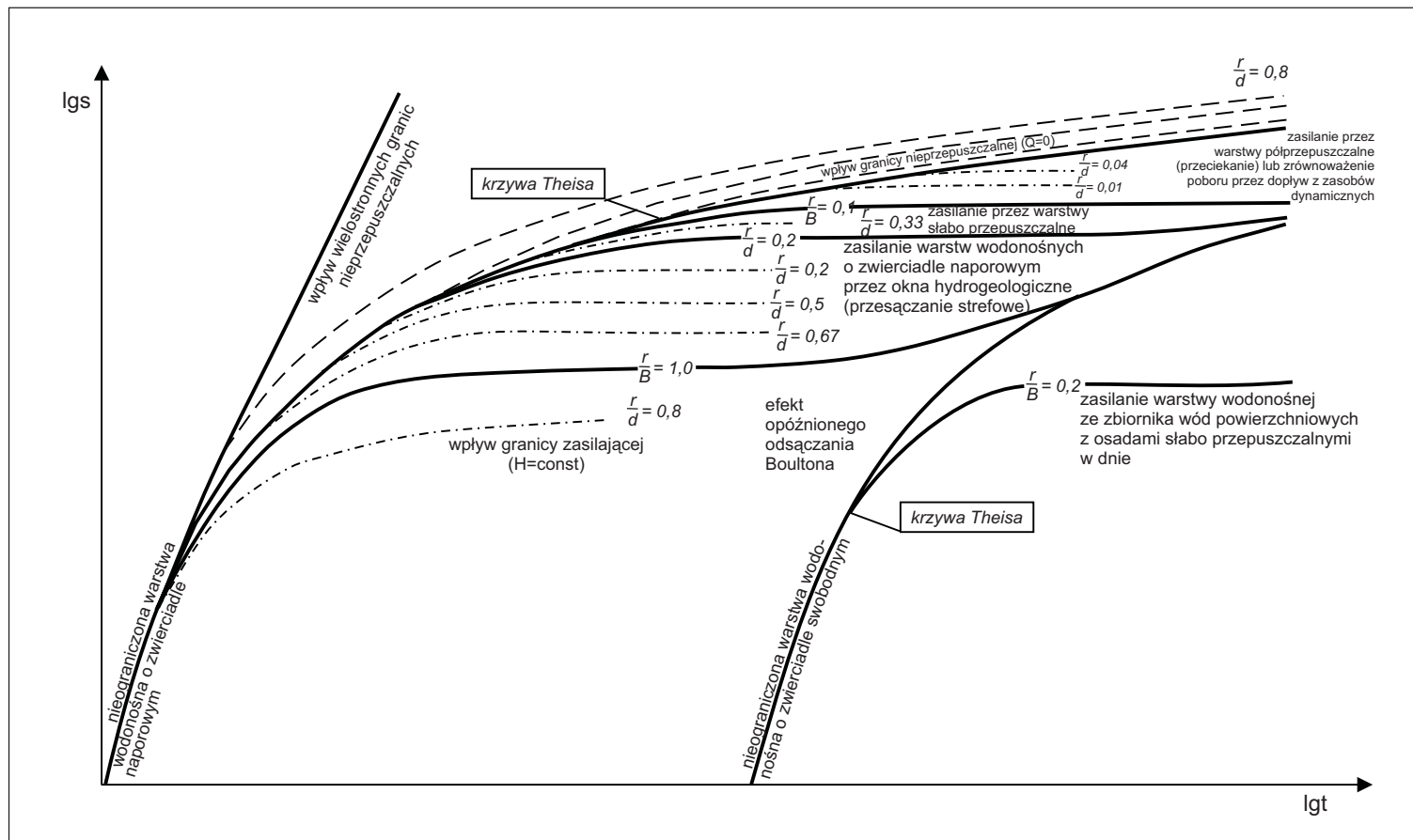


Rys. 5.5-7. Wykresy wskaźnikowe próbnego pompowania hydrowęzłowego $s=f(lgt)$, odzwierciedlające cechy hydrodynamiczne warstw wodonośnych, ich granice oraz warunki zasilania.

się, bo dotyczy rozległych kompleksów wodonośnych w basenach artezyjskich),

- **3** – warstwa wodonośna o zwierciadle napiętym nieograniczona z przesączaniem ustalonym (schemat Hantusha), lub warstwa wodonośna ograniczona w poziomie konturem zasilania o stałym ciśnieniu (schemat Theisa z uwzględnieniem wpływu granicy, schemat Dupuita dla fazy ustalonej),
- **3a** – warstwa wodonośna o zwierciadle swobodnym, ograniczona w poziomie konturem zasilania o stałej wysokości hydraulicznej (obliczenia jak w przypadku 1a do momentu przegięcia, faza ustalona według schematu Dupuita),
- **4** – warstwa wodonośna o swobodnym zwierciadle wody i zróżnicowanej odsączalności (schemat Boultona),
- **5** – warstwa wodonośna ograniczona jednostronnie w poziomie konturem nieprzepuszczalnym (nachylenie drugiego odcinka wykresu dwukrotnie większe od nachylenia pierwszego odcinka), interpretacja według schematu Theisa dla warstwy nieograniczonej do momentu załamania wykresu przy obliczeniach parametrycznych, a przy obliczeniach zasobowych konieczność uwzględnienia wpływu granicy,
- **6** – warstwa wodonośna ograniczona wielostronnie w poziomie granicami nieprzepuszczalnymi (schemat Theisa do obliczeń parametrycznych z pierwszego nachylenia wykresu, pompowanie wykazuje przekroczenie wielkości zasilania danej warstwy).

Podobne zróżnicowanie warunków hydrodynamicznych pompowanej warstwy wodonośnej pokazano na wykresach sporządzonych w układzie $lgs=f(lgt)$ – rys. 5.5-8. Interpretacja krzywych doświadczalnych możliwa jest przy pomo-



Rys. 5.5-8. Wykresy $lgs=f(lgt)$ próbnych pompowań hydrowęzłowych wskazujące na różnorodność reakcji hydrodynamicznej warstw wodonośnych.

cy krzywych wzorcowych Theisa, Hantusha i Boultona. Nomogramy, wartości funkcji wzorcowych oraz zasady interpretacji wykresów filtracji nieustalanej z próbnych pompowań hydrowęzłowych na podstawie obserwacji prowadzonych w piezometrach przedstawiane są w licznych publikacjach z dziedziny hydrogeologii (np., Dąbrowski, Przybyłek, 1980, Forkasiewicz, 1973). Obecnie interpretacje prowadzone są za pomocą komputerowego doboru krzywych wzorcowych, co umożliwiają programy podane przez T. Rohricha (AquiferTest – User's Manual, 2002).

Badania wzniosu zwierciadła wody

Zakończenie pompowania stanowi sygnał do podjęcia dalszych pomiarów w punktach obserwacyjnych, tym razem powrotu dynamicznego zwierciadła wody do stanu pierwotnego. Trzeba stwierdzić, że obserwacja wzniosu zwierciadła wody jest najczęściej traktowana marginesowo (szczególnie z powodu długotrwałości badania zjawiska) i jego wykorzystanie do obliczeń parametrycznych wzorami filtracji nieustalanej nie jest pełne. Tymczasem interpretacja wzniosu dostarcza dalszych bardzo cennych informacji o studni i strefie przyfiltrowej, przewodności warstwy wodonośnej i odnawialności jej zasobów oraz o wpływie granic warstwy wodonośnej.

Obserwacje wzniosu zestawia się również na wykresie półlogarytmicznym w postaci zależności:

$$\text{lub} \quad s = f \lg \left(\frac{t}{t'} + 1 \right)$$

$s' = f \lg(t')$ gdy $t > t'$ i uzyskano quasi-ustalony lub ustalony dopływ do studni

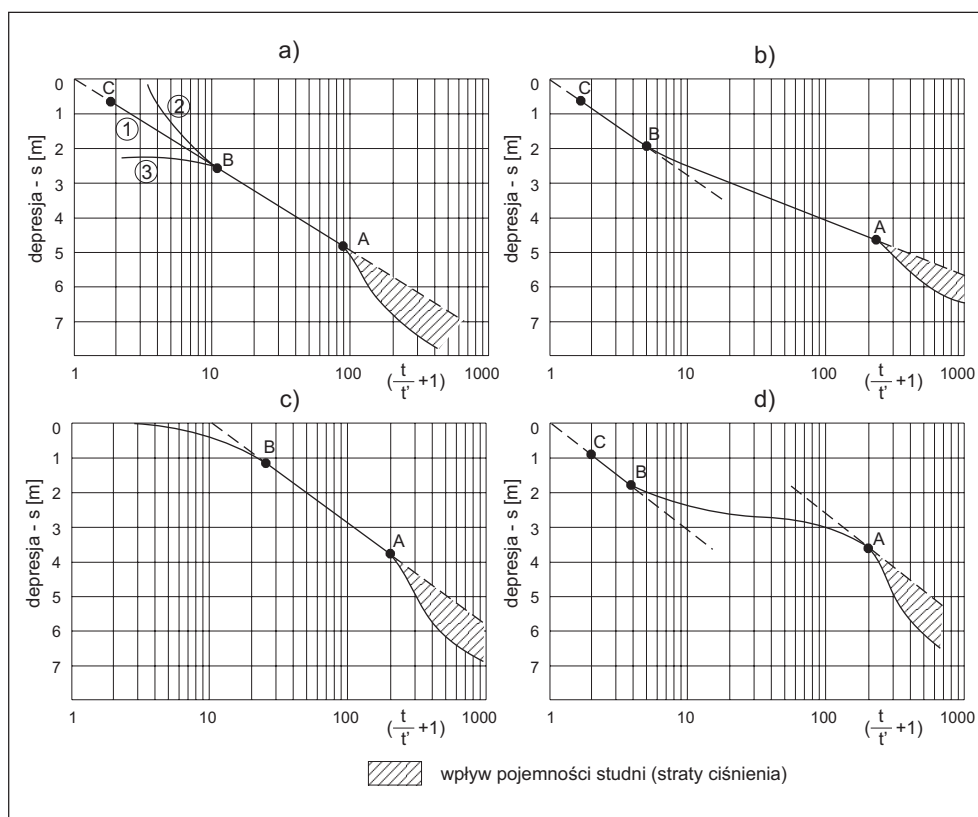
gdzie:

t – czas trwania pompowania,

t' – kolejne momenty pomiaru depresji od zakończenia pompowania.

Obserwacje wzniosu muszą trwać co najmniej tak długo, jak czas pompowania. Na rysunku 5.5-9 przedstawiono przykłady krzywych wzniosu zwierciadła wody w różnych warunkach hydrogeologicznych, uzyskane w badaniach doświadczalnych.

Cały cykl pompowania hydrowęzłowego powinien być poprzedzony i zakończony dłuższymi obserwacjami naturalnych stanów wód podziemnych. Wyniki obserwacji zestawione w dziennikach próbnego pompowania (wzory w postaci podanej w tabelach 5.5-2 i 5.5-3) należy zamieścić jako załączniki w każdym egzemplarzu dokumentacji hydrogeologicznej. Dane te mogą być do dokumentacji dołączane również w wersji elektronicznej.



Rys. 5.5-9. Wykresy wzniosu zwierciadła wody (Pleczyński, Przybyłek, 1974 za J. Forkasiewicz – 1973).

a) warstwa wodonośna o zwierciadle napiętym bez zjawiska odsączania: 1- postać wykresu przy warstwie nieograniczonej, 2 – gdy występuje jednostronna granica nieprzepuszczalna, 3 – gdy występuje jednostronna granica zasilająca (przewodność oblicza się na podstawie odcinka prostoliniowego wykresu AB), **b)** warstwa wodonośna ze strefą uprzywilejowanego przepływu (przewodność oblicza się na podstawie prostoliniowego odcinka BC krzywej doświadczalnej), **c)** warstwa wodonośna o zwierciadle napiętym ze stałym przesiąkaniem (schemat Hantusha), przewodność oblicza się z odcinka AB krzywej doświadczalnej **d)** warstwa wodonośna o zwierciadle napiętym z przesiąkaniem zmieniającym się w czasie, lub warstwa o zwierciadle swobodnym z powolnym odsączaniem (schemat Boultona), przewodność hydrauliczną oblicza się na podstawie odcinka prostoliniowego BC krzywej doświadczalnej.

Tabela 5.5-2. Wzór dziennika pomiarów w otworze pompowanym.

[illegible]

5.6. Badania jakości wód podziemnych

Jakość wody pozyskiwanej na ujęciu jest obok ilości podstawowym kryterium jej użyteczności. Właściwe określenie jakości jest niezbędne w celu potwierdzenia przydatności wody na potrzeby użytkownika oraz zaprojektowania systemu jej uzdatniania.

Rozpoznanie jakości opiera się najczęściej na analizach fizyczno-chemicznych i bakteriologicznych wody pobranej z otworów rozpoznawczych w trakcie próbnego pompowania. Jakość wody może się jednak znacznie zmieniać w trakcie eksploatacji ujęcia pod wpływem czynników i procesów omówionych w rozdziale 4.3. Dla sporządzenia wiarygodnej prognozy niezbędne jest rozpoznanie jakości wody nie tylko w miejscu ujęcia, ale również w obszarze jego zasilania, uzupełnionej, w przypadku ujęć zagrożonych przeobrażeniami hydrogeochemicznymi, również badaniami geochemicznymi, zaś w przypadku zagrożeń antropogenicznych także odpowiednim rozpoznanie szkodliwych. Dla ujęć infiltracyjnych rozpoznanie jakości musi dotyczyć również wód powierzchniowych. Powinno ono uwzględniać zmienność jakości wód w różnych porach roku oraz przy różnych stanach i natężeniu przepływu w cieku.

Metody prognozowania jakości przedstawiono w rozdziale 6.4. W niniejszym rozdziale przedstawiono zaś zakres rozpoznania, jaki jest niezbędny dla sporządzenia takich prognoz oraz metodykę realizacji badań jakości wód.

Projektowanie badań jakości wód

Zasady prowadzenia prac dla określenia jakości wody dokumentowanego ujęcia powinny być opisane w projekcie prac geologicznych, Projekt powinien określać w szczególności kiedy należy pobrać próbę (lub próby) do badań i zakres oznaczeń wskaźników fizyczno-chemicznych i bakteriologicznych.

W większości przypadków próba do analizy powinna być pobrana pod koniec próbnego pompowania przy maksymalnej wydajności eksploatacyjnej ujęcia. Należy jednak podkreślić, że w przypadku niektórych ujęć jakość pozyskiwanej wody jest w znacznym stopniu zależna od wydajności ujęcia. Dotyczy to w szczególności otworów „bosych” ujmujących duże miąższościowo przeloty szczelinowych poziomów wodonośnych, w których w zależności od wydajności pompowania następuje uruchamianie różnych stref miąższościowych warstwy wodonośnej. W takim przypadku niezbędne jest pobranie prób przy różnej wielkości eksploatacji tzn. przy 1/3, 2/3 i pełnej wydajności maksymalnej, co jest w szczególności istotne dla zaprojektowania właściwej technologii uzdatniania.

W przypadku, jeśli spodziewamy się znacznego zróżnicowania jakości wód w obszarze zasilania ujęcia oraz znaczącej zmiany naturalnych warunków ich krążenia należy, oprócz badań jakości wód z otworów rozpoznawczych, zaprojektować badania w oparciu o sieć otworów obserwacyjnych. Do tego celu można wykorzystać istniejące studnie lub otwory hydrogeologiczne, a w przypadku ich braku należy wykonać sieć takich otworów. Sieć ta powinna uwzględniać rozpoznanie jakości wód na wyodrębnionych strumieniach dopływu, które mogą cha-

rakteryzować się różną jakością. W sytuacji, kiedy w zasilaniu ujęcia istotną rolę odgrywać będą wody przesączające się z wyżej lub niżej ległego poziomu wodonośnego rozpoznaniem należy również objąć te poziomy.

Otwory przeznaczone do badań jakości wód powinny w miarę możliwości być zafiltrowane podobnie jak studnie, tzn. ujmować przelot warstwy decydujący o dopływie wody do ujęcia. Niewystarczające do właściwej analizy jakości wód będą piezometry ujmujące tylko górne fragmenty warstwy wodonośnej, często powyżej poziomu zafiltrowania studni.

Badania wód z otworów rozpoznawczych powinny obejmować określenie cech fizyczno-chemicznych i bakteriologicznych. Nie ma natomiast na ogół potrzeby wykonywania badań bakteriologicznych w otworach obserwacyjnych. Zakres oznaczeń wskaźników fizyczno-chemicznych i bakteriologicznych powinien być dostosowany do spodziewanych cech naturalnego środowiska hydrogeochemicznego i możliwych zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego. W przeciwieństwie do tradycyjnych zaleceń dotyczących zakresu analiz wody (Pazdro, Kozerski, 1990) należy dążyć, aby każda analiza wody z otworu rozpoznawczego, który ma być przeznaczony na studnię, obejmowała wszystkie główne jony, co jest niezbędne dla sporządzenia bilansu jonowego i sprawdzenia poprawności wykonanej analizy.

Analiza wody z otworu rozpoznawczego dla typowych, niezanieczyszczonych lub słabo zanieczyszczonych poziomów wodonośnych powinna obejmować następujące parametry: temperatura, przewodność elektrolityczna właściwa, barwa, zapach, pH, twardość ogólna, zasadowość, utlenialność, H_2S , NH_4 , NO_2 , NO_3 , Cl , SO_4 , Na , K , Ca , Mg , PO_4 , F , Fe og., Mn , sucha pozostałość, pozostałość po prażeniu oraz oznaczenia bakteriologiczne (ogólna liczba bakterii w $37^\circ C$ po 24 h oraz $22^\circ C$ po 72 h, bakterie grupy coli, paciorkowce kałowe oraz clostridia redukujące siarczany). W przypadku niekorzystnych środowisk hydrogeochemicznych wzbogaconych w materię organiczną badania mogą obejmować ponadto takie parametry jak: tlen rozpuszczony, ChZT metodą dwuchromianową, azot organiczny, rozpuszczony węgiel organiczny, Fe^{2+} , Fe^{3+} , CO_2 agresywny, kwasowość, kwasy humusowe.

Jeśli spodziewamy się zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego, badania w zależności od istniejących zagrożeń mogą obejmować: metale ciężkie, pestycydy, detergenty, fenole, rozpuszczalniki organiczne, WWA, bor, glin, węglowodory alifatyczne i aromatyczne, radoczynność. Badania zawartości metali ciężkich, a także innych parametrów związanych z cechami naturalnego środowiska mogą być również wykonywane w przypadku, jeśli spodziewamy się nietypowych warunków hydrogeochemicznych.

Dla ujęć z głębszych poziomów wodonośnych, szczególnie o podwyższonych temperaturach ($>10^\circ C$) zaleca się również wykonanie oznaczeń krzemianów.

Realizacja badań jakości wody

Badania jakości wód podziemnych powinny być realizowane w sposób umożliwiający ograniczenie do minimum zmian cech fizycznych, chemicznych i bak-

teriologicznych, jakie mogą następować w procesie wydobywania wody i pobierania próbek oraz ich konserwacji, transportu, przechowywania i analityki. Pobrana próbka powinna odzwierciedlać skład wody dopływającej z warstwy wodonośnej i należy ją pobierać po właściwym oczyszczeniu z zawieszin strefy przyfiltrowej studni. Generalną zasadą jest również unikanie kontaktu pobieranej próbki z atmosferą.

Zasady opróbowania określone są w Polskiej Normie PN-76/C-04620/03 i w zależności od rodzaju opróbowywanego otworu powinno ono przebiegać następująco:

Studnie i otwory nowo wykonane opróbowyuje się w trakcie pompowania badawczego, pobierając wodę do analiz przy maksymalnej wydajności otworu.

Studnie eksploatowane okresowo i otwory obserwacyjne opróbowyuje się w zależności od czasu, jaki upłynął od przzerwania eksploatacji lub ostatniego opróbowania otworu obserwacyjnego. Jeśli czas ten jest krótszy niż 7 dni należy przed poborem próbek wody przeprowadzić pompowanie lub szcerpywanie zapewniające co najmniej dwukrotną wymianę słupa wody w studni lub otworze. Jeśli okres, jaki upłynął od przzerwania poboru wody ze studni lub ostatniego pompowania otworu jest dłuższy niż 7 dni to należy wykonać pompowanie lub szcerpywanie oczyszczające przed poborem. Pompowanie powinno trwać do momentu aż trzykrotna analiza wykonana w odstępach 0,25-0,5 h wykaże stałą zawartość takich wskaźników jak: temperatura, pH i przewodność elektrolityczna właściwa. Minimalny czas pompowania nie powinien być krótszy niż potrzebny do dwukrotnej wymiany słupa wody stagnującej w studni.

Studnie eksploatowane ciągle opróbowyuje się z kurka probierczego umieszczonego na rurze eksploatacyjnej przy głowicy studni. Przed poborem należy umożliwić odpływ wody przez około 10 minut w celu usunięcia ewentualnych osadów i ustabilizowania przepływu. W przypadku wykonywania oznaczeń mikroskładników i mikrozanieczyszczeń, a w szczególności metali ciężkich zaleca się filtrowanie próbki przez sączek 0,45 μm . Zabieg ten powinien być wykonany przy pobieraniu próbki ze starych, w znacznym stopniu skolmatowanych, studni i otworów. Filtracja powinna być wykonana w sposób uniemożliwiający kontakt z powietrzem atmosferycznym.

Do poboru próbek mogą być wykorzystywane naczynia szklane lub z tworzyw sztucznych. Naczynia powinny być odpowiednio dobrane do zakresu badań analitycznych oraz spodziewanych zanieczyszczeń, co jest szczególnie ważne przy badaniach mikroskładników i mikrozanieczyszczeń (Witczak, Adamczyk, 1994 i 1995).

W pobranych próbkach lub bezpośrednio z wypływającej wody należy natychmiast w terenie oznaczyć takie wskaźniki jak: barwa, kwasowość, mętność, odczyn pH, potencjał redukcyjno-oksydacyjny, przewodność elektrolityczna właściwa, temperatura, zapach, zasadowość. W zależności od zakresu zaplanowanych oznaczeń pobieramy próbki wody do jednej lub kilku butelek i do oznaczenia

niektórych parametrów odpowiednio utrwalamy. Wykaz tych parametrów i stosowane najczęściej metody utrwalania przedstawiono poniżej:

- agresywny dwutlenku węgla – stosuje się najczęściej dodatek 2-3 g sproszkowanego marmuru na 0,25 dm³ wody,
- ChZT – utrwała się przez dodanie 1 cm³ stężonego kwasu siarkowego na 1 dm³ wody,
- metale ciężkie – utrwała się 1 cm³ stężonego kwasu azotowego na 1 dm³ wody,
- siarczki i siarkowodór – stosuje się 2 cm³ 20% roztworu octanu cynku,
- tlen – przy metodzie Winklera dodaje się 1 cm³ siarczanu manganawego oraz 2 cm³ roztworu jodku potasu (KJ) w wodorotlenku potasu (KOH),
- wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) i związki azotu – utrwała się chloroformem w ilości 1 cm³ na 1 dm³,
- żelazo dwuwartościowe – dodaje się 1 cm³ 20% kwasu solnego na 0,5 dm³ wody.

Pobrane próbki powinny być odpowiednio opisane i dostarczone w jak naj szybszym czasie do laboratorium. Zaleca się transport i przechowywanie próbek w temperaturze 4 °C. Czas przechowywania próbek nie powinien być dłuższy niż 2 dni. Dopuszczalny czas i warunki przechowywania próbek dla poszczególnych składników określone są w Polskiej Normie PN-88/C-04632/04.

Pobieranie próbek wody do badań bakteriologicznych możliwe jest jedynie do odpowiednich, wysterylizowanych naczyń, z zachowaniem niezbędnych procedur ograniczających możliwość zakażenia próbki mikroflorą z otoczenia. W szczególności ważne jest odpowiednie oczyszczenie miejsca poboru z pajęczyn i innych pylących zanieczyszczeń. Kran służący do poboru musi być oczyszczony i obmyty wodą. Bezpośrednio przed poborem próbki wylot kranu należy opalić płomieniem uzyskanym np. przez zapalenie tamponu nasyczonego alkoholem. Pobrane próbki wody powinny być odpowiednio zabezpieczone i jak najszybciej przekazane do laboratorium.

Zaleca się, aby przy poborze próbek do badań hydrochemicznych i bakteriologicznych sporządzać protokół. Protokół taki powinien zawierać możliwie dużo informacji o punkcie poboru, a także wyniki oznaczeń wykonanych w terenie. W szczególności w protokole należy zamieścić takie informacje jak:

- wydajność studni w trakcie poboru,
- objętość wypompowanej wody z otworu obserwacyjnego przed pobraniem próbki,
- rodzaj pompy,
- sposób filtracji próbki.

Poprawność wykonania analizy powinna być sprawdzona poprzez porównanie zawartości anionów i kationów wg zasad przedstawionych w Polskiej Normie (PN-89/C – 046 38/02).

Szczegółowe zasady pobierania próbek, a także metody badań analitycznych znaleźć może czytelnik w publikacjach PIOŚ (Witczak, Adamczyk, 1994 T.I, 1995 T.II).

Projektowanie i realizacja badań w zakresie rozpoznania jakości wód w warunkach występowania niekorzystnych środowisk hydrogeochemicznych w zbiornikach dolinnych

Na ujęciach zlokalizowanych w dolinach i pradolinach polodowcowych mogą następować duże zmiany jakości wód podziemnych w trakcie eksploatacji związane z utlenianiem się siarczków i substancji organicznych (patrz rozdz. 4.3). Prace i badania hydrogeologiczne przy dokumentowaniu ujęcia muszą w tym przypadku koncentrować się nie tylko na rozpoznaniu istniejącej jakości wód, ale również umożliwić rozpoznanie środowiska geochemicznego w celu określenia możliwości i zakresu spodziewanych zmian jakości w trakcie eksploatacji.

Szczegółowe cele tych prac i badań można sformułować następująco:

- wybór właściwej lokalizacji ujęcia wód podziemnych przy uwzględnieniu naturalnej strefowości środowiska hydrogeochemicznego oraz możliwości jego zmian w trakcie eksploatacji,
- wybór optymalnych stref przy filtrowaniu otworów eksploatacyjnych, umożliwiający uzyskanie wody o najlepszej jakości,
- dobór odpowiedniego filtra do naturalnych oraz zmieniających się w trakcie eksploatacji warunków hydrogeochemicznych,
- opracowanie prognozy zmian jakości wody w celu odpowiedniego zabezpieczenia możliwości jej uzdatniania,
- ustalenie optymalnych warunków eksploatacji ujęcia wobec spodziewanych zmian jakości wody,
- zaproponowanie działań ograniczających wpływ procesu przemian hydrogeochemicznych na jakość wód.

Badania wstępne przy wyborze lokalizacji ujęcia

Wybór lokalizacji ujęcia w strukturach dolinnych i pradolinnych jest jednym z najistotniejszych problemów w procesie jego projektowania. Sprawie tej musi być poświęcona szczególna uwaga, tym bardziej, że z punktu widzenia zasobności oraz własności hydrogeologicznych utworów dolinnych istnieją na ogół korzystne warunki w wielu odcinkach dolin. Równorzędne, a czasami decydujące znaczenie przy wyborze lokalizacji ujęcia muszą mieć problemy jakości wody. W celu właściwego wyboru fragmentu doliny do zaprojektowania ujęcia należy przeprowadzić rozpoznanie warunków hydrogeochemicznych dla możliwie dużego jej odcinka. Rozpoznanie to powinno być przeprowadzone na podstawie:

- analizy morfologicznej i sedymentacyjno-facjalnej,
- warunków zasilania i przepływu wód,
- archiwalnych badań jakości wód,
- inwentaryzacji istniejących na tym odcinku ujęć wód podziemnych wraz z analizą zmian jakości wody w trakcie eksploatacji tych ujęć,
- wykonanych specjalnych wierceń badawczych w przypadku braku odpowiednich materiałów archiwalnych oraz przy dużej zmienności budowy geologicznej.

Podstawowe znaczenie dla wytypowania najkorzystniejszego rejonu do lokalizacji ujęcia ma analiza morfologiczna i sedymentacyjno-facjalna, która powinna być wykonana na podstawie zdjęć lotniczych oraz map geologicznych i geomorfologicznych. Analiza ta powinna umożliwić wytypowanie podstawowych elementów morfogenetycznych doliny (wyższe i niższe tarasy dolinne, starorzecza i łachy piaszczyste, strefy występowania utworów holocenijskich oraz starszych), w których występują różne warunki hydrogeochemiczne. Dokonane wydzielenia morfogenetyczne doliny (i zarazem hydrogeochemiczne) winny mieć potwierdzenie w archiwalnym materiale wiertniczym i analizach jakości wody.

W przypadku braku dostatecznej ilości wierceń archiwalnych oraz dużej zmienności hydrostrukturalnej doliny i przy nietypowych warunkach hydrogeochemicznych konieczne jest wykonanie wierceń pozwalających na rozpoznanie strefy przypowierzchniowej zbiornika dolinnego. Wiercenia te należy lokalizować na podstawie analizy morfogenetycznej doliny, dążąc do rozpoznania charakteru utworów przypowierzchniowych. Wiercenia powinny być wykonane metodą udarową lub obrotową z rdzeniowaniem, co pozwala na szczegółowe rozpoznanie litologii oraz środowiska geochemicznego strefy aeracji i warstwy wodonośnej. Powinny one przewiercać całą warstwę utworów madowych i fluwialnych strefy przypowierzchniowej z okresu holocenijskiego i zagłębiać się kilka metrów w warstwę gruboziarnistych utworów plejstocenijskich pochodzenia fluwioglacjalnego lub fluwialno-peryglacjalnego. Jednocześnie głębokość wierceń powinna odpowiadać projektowanemu obniżeniu zwierciadła wody z naddatkiem ok. 5 m.

Wykonane wiercenia powinny być szczegółowo udokumentowane pod względem litologiczno-facjalnym i geochemicznym. Bezpośrednio w terenie należy wykonać opis makroskopowy przewiercanych osadów z uwzględnieniem barwy oraz zawartości substancji organicznych, a także wykonać proste badania geochemiczne obejmujące:

1. Badania zawartości siarczków i siarkowodoru – ustala się czy w badanej próbce osadu można wyczuć charakterystyczny zapach siarkowodoru, a następnie określa jego intensywność podając czy jest on ledwie wyczuwalny, wyraźny czy bardzo mocny. To samo badanie należy wykonać po zalaniu próbki kwasem siarkowym.
2. Badanie zawartości węglanów – wykonuje się stosując 10% kwas solny; po zalaniu próbki osadów tym kwasem należy obserwować „burzenie” kwasu w reakcji z węglanami, podając jego intensywność.
3. Badanie pH – przeprowadza się za pomocą kwasomierza glebowego (np. kwasomierz Helliga) wg instrukcji podanej do tego urządzenia.

Wszystkie próbki do powyższych testów geochemicznych powinny być pobierane w trakcie wiercenia w taki sposób, aby opróbowanie objęło wszystkie partie profilu o zmiennej litologii i barwie. W przypadku braku widocznej zmienności w profilu opróbowanie powinno być nie rzadsze, niż co 1 m profilu w strefie aeracji i 2 m w strefie saturacji.

Badania przy dokumentowaniu rejonu przewidzianego na lokalizację ujęcia

Wyniki wstępnych badań powinny umożliwić wytypowanie najkorzystniejszego rejonu doliny z punktu widzenia warunków hydrogeochemicznych oraz zasobów wód podziemnych. Na obszarze tym powinny być przeprowadzone, w ramach następnego etapu, dalsze badania umożliwiające właściwe zaprojektowanie lokalizacji ujęcia i konstrukcji utworów eksploatacyjnych. Badania te powinny być wykonane w dwóch etapach:

E t a p I – ocena środowiska hydrogeochemicznego i wybór środowiska najkorzystniejszego do lokalizacji ujęcia i poszczególnych studni oraz określenie ich konstrukcji.

Na wytypowanym obszarze należy wykonać badania hydrogeochemiczne umożliwiające ustalenie lokalizacji i konstrukcji otworów eksploatacyjnych. Powinny one obejmować:

- rozpoznanie geologiczne i geochemiczne struktury wodonośnej ze szczególnym uwzględnieniem strefy przypowierzchniowej,
- rozpoznanie strefowości hydrogeochemicznej w obrębie struktury wodonośnej,
- rozpoznanie warunków krążenia wód.

Rozpoznanie geologiczne i geochemiczne struktury wodonośnej należy wykonać za pomocą płytkich wierceń w sposób opisany wyżej dla etapu badań wstępnych. Badania geochemiczne profili tych wierceń powinny obejmować oprócz ww. testów również ilościowe analizy laboratoryjne obejmujące oznaczenia siarczków, substancji organicznych, węglanów, pH oraz potencjału redox bądź też zawartości żelaza dwu- i trójwartościowego. Analizy te powinny być wykonane dla tych fragmentów środowiska hydrogeochemicznego, które na podstawie badań testowych wykazują zawartość siarczków.

Badania laboratoryjne należy przeprowadzić na próbkach pobieranych podczas wiercenia otworów wg wyżej podanych zasad. Próbkę powinny być pobierane do szczelnie zamykanych słoików lub woreczków z tworzyw sztucznych. Zamknięcie powinno być takie, aby uniemożliwiało dostęp powietrza atmosferycznego. Objętość próbki powinna wynosić 0,5-1 dm³. Pobrane próbki powinny być w jak najkrótszym czasie przewożone do laboratorium i poddane analizie. Szczegółowa metodyka wykonywania analiz przedstawiona jest w pracy Elbanowskiej i in. (2001).

Oprócz powyższych badań strefy przypowierzchniowej należy przeprowadzić również na tym etapie rozpoznanie środowiska geochemicznego całej struktury wodonośnej, obejmujące wykonanie opisanych wyżej makroskopowych badań siarczków, substancji organicznych oraz pH. Badania te powinny być wykonane przynajmniej dla kilku reprezentatywnych wierceń przechodzących przez całą strukturę wodonośną.

Rozpoznanie strefowości hydrogeochemicznej w różnych fragmentach struktury wodonośnej i jej zróżnicowania pionowego wymaga odpowiedniego rozmieszczenia otworów badawczych i ich zafiltrowania. Przy lokalizacji i filtrowaniu otworów

należy stosować zasadę, aby badanie jakości wody można było odnosić do konkretnych warunków środowiska hydrogeochemicznego. Filtrując otwór należy więc zwrócić uwagę, aby filtr nie obejmował dwóch różnych stref hydrochemicznych. Z tych też względów należy w miarę możliwości stosować zasadę krótkich pompowań przed pobraniem próbki wody do badań, co powinno pozwolić na rozpoznanie jakości wody reprezentującej środowisko rozpoznane w rejonie otworu wiertniczego. Z wykonanych otworów należy pobrać próbki wody do jednorazowej analizy fizyczno-chemicznej obejmującej następujące oznaczenia: żelazo dwu- i trójwartościowe, mangan, siarczany, agresywny dwutlenek węgla, wapń, magnez, amoniak, azotany, azotyny, siarczki, zasadowość, kwasowość, utlenialność, suchą pozostałość, pH. Wskazane jest również wykonanie pomiarów potencjału redukcyjno-oksydacyjnego i tlenu.

Rozpoznanie warunków krążenia wód realizowane jest poprzez pomiary ciśnień piezometrycznych w otworach zafiltrowanych na różnych głębokościach. Umożliwia to bowiem analizę zróżnicowania ciśnień w profilu pionowym struktury dolinnej i wyznaczenie stref hydrodynamicznych związanych z zasilaniem infiltracyjnym oraz drenażem wód do struktury dolinnej. Ze względu na ograniczoną liczbę otworów filtrowanych na różnych głębokościach należałoby również wykorzystywać możliwość pomiarów ciśnień piezometrycznych w trakcie prowadzenia wierceń. W tym celu stosuje się podczas wiercenia okresową stabilizację i pomiary zwierciadła wody, co kilka metrów przewiercanego profilu. Pomiary ciśnień piezometrycznych w strukturze dolinnej powinny być prowadzone w nawiązaniu do wysokich i niskich stanów hydrologicznych.

E t a p II – etap badań hydrogeochemicznych w celu ustalenia warunków eksploatacji ujęcia oraz opracowania prognozy zmian jakości wody.

Dane uzyskane w wyniku omówionych badań I etapu należy wstępnie opracować i wykorzystać przy ustalaniu lokalizacji oraz konstrukcji otworów eksploatacyjnych przyszłego ujęcia. W trakcie wiercenia otworów eksploatacyjnych oraz związanych z nimi otworów obserwacyjnych należy wykonać dalsze badania hydrogeochemiczne obejmujące:

- dokumentowanie geologiczne i geochemiczne górnych odcinków profili w trakcie wiercenia otworów rozpoznawczych,
- dokumentowanie geologiczne górnych odcinków profili otworów obserwacyjnych zlokalizowanych w strefie przewidywanego leja depresyjnego ujęcia o ile jest to konieczne dla uzupełniającego wyjaśnienia budowy geologicznej i charakteru środowiska geochemicznego w tej strefie,
- rozpoznanie jakości wody w otworach rozpoznawczych oraz wybranych otworach obserwacyjnych (zakres analizy taki jak w etapie I),
- pomiary ciśnień piezometrycznych we wszystkich otworach w nawiązaniu do wysokich i niskich stanów hydrologicznych.

Metodyki wykonywania powyższych badań powinny być takie, jak opisane dla etapu I. Wyniki badań tego etapu powinny być opracowane łącznie z wszystkimi badaniami wcześniejszymi. Szczegółowsze omówienie przedstawionych wyżej zagadnień można znaleźć w pracy J. Górskiego (1981).

5.7. Badania w zakresie ochrony ujęcia

W ramach dokumentowania zasobów eksploatacyjnych ujęcia niezbędne jest rozpoznanie nie tylko aktualnego stanu jakości wód i jej zmienności uwarunkowanej czynnikami geogenicznymi i antropogenicznymi ale również problemów decydujących o ochronie jakości wód i zasobów ujęcia w trakcie eksploatacji. Niezbędne jest więc rozpoznanie czynników i procesów decydujących o warunkach biernej (profilaktycznej) i czynnej ochrony ujęcia. Problemy te powinny być rozpoznane w stopniu pozwalającym na właściwe wyznaczenie granic strefy ochronnej ujęcia oraz opracowanie zasad zagospodarowania powierzchni terenu. Konieczność rozpoznania powyższej problematyki wynika z obowiązujących przepisów:

- prawa geologicznego i górniczego, które mówi, że elementem dokumentacji zasobów eksploatacyjnych powinno być uzasadnienie wyznaczenia strefy ochronnej ujęcia,
- prawa wodnego, którego art. 55, ust. 2 stanowi, że „teren ochrony pośredniej ujęcia wód podziemnych wyznacza się na podstawie ustaleń zawartych w dokumentacji hydrogeologicznej tego ujęcia”.

Problemy powyższe omówione są szczegółowo w poradniku metodycznym (Macioszczyk i in. 1993). W niniejszym opracowaniu uwzględnia się więc tylko najważniejsze zagadnienia, a w szczególności zakres niezbędnych badań dla właściwego rozpoznania problematyki ochrony w ramach dokumentowania zasobów eksploatacyjnych ujęcia. Rozpoznanie to jest konieczne do:

- określenia czy dla ujęcia niezbędne jest ustanowienie strefy ochronnej,
- wyznaczenia zasięgu strefy ochronnej i terenów ochronnych,
- określenia zasad perspektywicznego zagospodarowania strefy ochronnej (zakazy i ograniczenia),
- określenia czynnych działań ochronnych (likwidacje lub ograniczenia oddziaływania istniejących ognisk zanieczyszczeń, ewentualnie prace remediacyjne),
- opracowania projektu monitoringu osłonowego ujęcia,
- opracowania prognozy jakości wody.

Badania w zakresie ochrony ujęcia powinny obejmować:

- a) rozpoznanie warunków hydrogeologicznych, a w szczególności warunków krążenia wód i migracji zanieczyszczeń w obszarze zasilania ujęcia lub jego części objętej ochroną,
- b) rozpoznanie ognisk zanieczyszczeń wód podziemnych,
- c) rozpoznanie warunków hydrogeochemicznych, a w szczególności stanu zanieczyszczenia antropogenicznego wód podziemnych oraz oddziaływania ognisk zanieczyszczeń na jakość wód.

Rozpoznanie warunków hydrogeologicznych na potrzeby ochrony ujęcia powinno uwzględniać nie tylko poziom wodonośny, z którego alimentowane jest ujęcie. Dla właściwej ochrony ujęcia niezbędne jest również rozpoznanie możli-

wości dopływu zanieczyszczeń poprzez podrzędne, nieużytkowe poziomy wodonośne powiązane z poziomem głównym. W przypadku ujęcia wody z dolinnego zbiornika wodonośnego położonego w pobliżu krawędzi wysoczyzny do jego obszaru zasilania należy włączyć w szczególności strefę krawędziową doliny nawet, jeśli brak jest przy powierzchni utworów przepuszczalnych, bowiem zanieczyszczenia mogą być łatwo przenoszone przez spływy powierzchniowe. Istotnym problemem związanym ze strefą krawędziową jest niejednokrotnie infiltracyjny charakter cieków spływających z wysoczyzny na teren doliny i zawierających znaczące ładunki zanieczyszczeń.

W przypadku małego ujęcia zlokalizowanego w warstwie wodonośnej o nieograniczonym rozprzestrzenieniu obszar zasilania określać będą granice hydrodynamiczne wyznaczone w oparciu o mapę hydroizohips odzwierciedlającą eksploatację ujęcia z wydajnością, dla której określamy strefę ochronną. Sposób kreślenia prognostycznej mapy hydroizohips przedstawiono w rozdziale 6.2. Można również wykorzystać inne uproszczone metody przedstawione w pracy T. Macioszczyka i innych (1993). W przypadku bardziej skomplikowanych warunków hydrogeologicznych podstawę do wyznaczenia obszaru zasilania ujęcia powinien stanowić model matematyczny i uzyskane z modelu prognostyczne mapy hydroizohips. Będzie to najczęściej model sporządzony jednocześnie w celu wyznaczenia zasobów eksploatacyjnych ujęcia.

Przykład realizacji modelu dla wyznaczania granic strefy ochronnej ujęcia Wroniawy przedstawiono w rozdziale 8.7. Należy podkreślić, że wykorzystanie modelu na potrzeby wyznaczania strefy ochronnej i zasobów eksploatacyjnych wymaga, aby obejmował on odpowiednio duży obszar tak, aby można było właściwie wyznaczyć granice obszaru zasilania. W przypadku jednak bardzo rozległego obszaru zasilania zasięg modelu na strumieniach dopływu wód do ujęcia można ograniczyć izochroną dopływu $t=25$ lat z odpowiednim naddatkiem. Zasięg strefy ochronnej wyznacza się ostatecznie na podstawie obliczeń czasu przepływu w oparciu o prognostyczną mapę hydroizohips pamiętając jednak o tym, aby włączyć do obszaru zasilania również podrzędne poziomy wodonośne, które często nie są w ogóle uwzględniane na modelu. Wyznaczając zasięg strefy uwzględniający dopływ zanieczyszczeń poprzez te poziomy, należy wziąć pod uwagę przede wszystkim zlewnie spływu powierzchniowego oraz zasilanie ujęcia z płytkich wód gruntowych. W przypadku poziomów wodonośnych izolowanych utworami słabo przepuszczalnymi zasięg strefy ochronnej może być zmniejszony z uwzględnieniem czasu przesączania wód przez utwory izolujące, a jeśli czas ten przekracza 25 lat, strefy można nie wyznaczać. Problem ten musi być jednak odpowiednio udokumentowany, tzn. musi być rozpoznana ciągłość izolacji na całym obszarze zasilania objętym izochroną 25-letniego dopływu lateralnego. W przypadku mało miąższej (rzędu kilku, kilkunastu metrów) i nieciągłej warstwy izolacyjnej, jej zdolności ochronne na ogół się pomija, biorąc pod uwagę również fakt, że niektóre zagrożenia zlokalizowane są nie na powierzchni terenu, ale w środowisku gruntowym (szamba, nieczynne studnie kopane,

otwory wiertnicze, eksploatacja surowców i instalacje podziemne). Problem uwzględnienia lub nie zdolności ochronnych takiej warstwy zależy jednak przede wszystkim od stopnia rozpoznania. W przypadku dobrego rozpoznania można w ten sposób ograniczyć zasięg strefy. Jeśli rozpoznanie jest słabe, zasięg strefy musi być większy.

Zdolności ochronne strefy aeracji oraz utworów izolujących określa się na ogół w uproszczeniu wyznaczając czas migracji zanieczyszczeń konserwatywnych za pomocą znanych wzorów:

- migracja przez strefę aeracji, wzór Bindemana (za Macioszczyk, 1993):

$$t_a = \frac{m_a w_o}{\sqrt[3]{\omega^2 k}} \quad [5.1]$$

gdzie:

- t_a – czas przesączania pionowego przez strefę aeracji [d],
- m_a – miąższość strefy aeracji [m],
- w_o – wilgotność objętościowa [1],
- ω – roczna infiltracja efektywna [m/d],
- k – współczynnik pionowej filtracji strefy aeracji [m/d].

- migracja w strefie saturacji:

$$v = \frac{kJ}{n_o} \quad [5.2]$$

gdzie:

- v – prędkość przepływu wody w przestrzeni porowej [m/d],
- J – spadek hydrauliczny [1],
- n_o – porowatość aktywna [1].

Ten ostatni wzór wykorzystuje się również do obliczeń przepływu wód w obrębie poziomu wodonośnego. Należy podkreślić, że czas migracji zanieczyszczeń poprzez strefę aeracji obliczony wzorem 5.1 odzwierciedla migrację zanieczyszczeń przenikających wraz z wodami opadowymi. W przypadku, kiedy migracja zachodzi np. z nieszczelnego zbiornika lub rowu ściekowego przenikanie zanieczyszczeń następuje znacznie szybciej i do obliczenia należy wówczas stosować wzór 5.2.

Rozpoznanie ognisk zanieczyszczeń wód podziemnych wymaga wykonania kartowania sozologicznego na terenie wyznaczonej strefy ochronnej. Materiałami wyjściowymi do takiego kartowania powinny być mapy inwentaryzacji terenu z planów zagospodarowania przestrzennego, zdjęcia lotnicze oraz różnego typu opracowania kartograficzne (w tym np. mapy sozologiczne).

Rozpoznanie powinno umożliwić zarejestrowanie:

- aktualnego stanu zagospodarowania i użytkowania terenu (pola orne, sady, trwałe użytki zielone, tereny osadnictwa z podziałem na skanalizowane i nieskanalizowane),

– obiekty stanowiące punktowe, małopowierzchniowe oraz liniowe i pasmowe ogniska zanieczyszczeń.

Kartowanie należy uzupełnić wywiadem dotyczącym obiektów funkcjonujących w przeszłości, aktualnie niewidocznych w terenie (wylewiska ścieków, wysypiska śmieci, zakłady przemysłowe uciążliwe dla środowiska gruntowo-wodnego) oraz nieczynnych studni kopanych. Należy również zarejestrować obiekty przewidziane do realizacji w planach zagospodarowania przestrzennego.

Rozpoznanie hydrochemiczne umożliwia określenie aktualnego stanu jakości wód podziemnych na terenie wyznaczonej strefy ochronnej oraz ocenę stopnia ich antropogenicznego zanieczyszczenia co, w powiązaniu z rozpoznaniem ognisk zanieczyszczeń oraz warunków migracji, powinno umożliwić wyznaczenie ich wpływu na jakość wód. Do badań hydrochemicznych powinny być wykorzystane istniejące na terenie strefy otwory monitoringowe, studnie i źródła, a także wykonane na potrzeby dokumentowania zasobów otwory obserwacyjne. Zakres badań powinien być dostosowany do charakteru istniejących na terenie strefy ognisk zanieczyszczeń.

Formułowanie zaleceń w zakresie biernej i czynnej ochrony wód podziemnych stanowi trudne i odpowiedzialne zadanie wymagające odpowiedniego wyważenia interesu użytkownika ujęcia i właścicieli terenów położonych w strefie ochronnej. Generalną zasadą, jaką należy przyjmować, jest takie sformułowanie zakazów, nakazów i ograniczeń, aby nie rodziło to roszczeń ze strony właścicieli gruntów, i miało w maksymalnym stopniu swoje umocowanie w obowiązujących przepisach w zakresie ochrony środowiska. Należy również w miarę możliwości limitować całkowity zakaz określonych form działalności w strefie ochronnej na rzecz ograniczeń tj. dopuszczać niektóre działania stanowiące potencjalne zagrożenie, ale pod warunkiem zastosowania odpowiednich zabezpieczeń środowiska oraz realizacji monitoringu. Powyższe nie powinno dotyczyć jednak ognisk stanowiących największe zagrożenie dla środowiska takich jak: składowiska odpadów, bazy paliw, ropociągi, mogilniki.

Merytoryczną podstawę formułowania zakazów i ograniczeń stanowić powinno rozpoznanie podatności chronionego poziomu wodonośnego na oddziaływanie zanieczyszczeń. W przypadku znacznego zróżnicowania tej podatności możliwe jest wydzielenie w obrębie strefy podobszarów, dla których może być sformułowany różny zakres zakazów i ograniczeń.

W ramach ochrony czynnej powinny być sformułowane nakazy dotyczące likwidacji lub ograniczenia oddziaływania istniejących ognisk takich jak: wylewiska, wysypiska śmieci, studnie i otwory wiertnicze, a w przypadku stwierdzenia poważnego zanieczyszczenia środowiska gruntowo-wodnego zagrażającego ujęciu, również prac rekultywacyjnych. W celu wyeliminowania lub ograniczenia wpływu obiektu lub niektórych jego elementów formułowane mogą być nakazy dotyczące zastosowania różnego typu rozwiązań technicznych (np. uszczelnienie podłoża, przykrycie w celu odcięcia infiltracji). W przypadku dużych obiektów stanowiących poważne zagrożenie mogą być wskazane zalecenia dotyczące

wykonania przeglądu ekologicznego, a w przypadku stwierdzenia znacznego oddziaływania na środowisko gruntowo-wodne również urządzenia monitoringu lokalnego. W odniesieniu do obszarowych ognisk, a w szczególności terenów osadnictwa powinny być sformułowane również zalecenia w zakresie budowy urządzeń ochrony środowiska, np. kanalizacji, czy urządzeń ograniczających wpływ hodowli (szczelne zbiorniki na gnojówkę i gnojownicę o czasie przetrzymywania minimum 6 miesięcy, budowa uszczelnionych tac na obornik i kisionki zdrenowanych do zbiornika na gnojówkę). Dla powyższych zaleceń biorąc pod uwagę, że nie da się ich zrealizować w krótkim okresie, powinny być określone również priorytety tzn. obszary, gdzie te prace powinny być wykonywane w pierwszej kolejności.

Należy podkreślić, że skuteczność proponowanych zakazów, nakazów i ograniczeń oraz ich pełne wdrożenie zależy będzie od tego, czy zostaną one wpisane do miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego oraz planów realizacji przedsięwzięć w zakresie ochrony środowiska.

6. Ustalanie zasobów eksploatacyjnych ujęć wód podziemnych

Zasoby eksploatacyjne wód podziemnych to ilość wód możliwa do pobrania w przyjętej jednostce czasu w określonych warunkach hydrogeologicznych i technicznych za pomocą ujęcia w postaci pojedynczego otworu wiertniczego, grupy tych otworów, obudowanego źródła naturalnego lub innego wyrobiska konstrukcyjnie przygotowanego do korzystania z wód podziemnych.

Ustalenie zasobów eksploatacyjnych wiąże się z koniecznością:

- stwierdzenia występowania wód podziemnych określonego poziomu wodonośnego w danym otworze wiertniczym lub ich zespole,
- wykonania pompowań badawczych (otwór rozpoznawczy pojedynczy lub hydrowęzeł),
- przeprowadzenia obserwacji stacjonarnych naturalnego źródła przewidzianego do ujęcia,
- uzyskania wyników badania jakości wód w postaci analizy fizyczno-chemicznej i bakteriologicznej w zakresie unormowanym przepisami sanitarnymi,
- oceny odnawialności zasobów wód podziemnych w ujętym poziomie wodonośnym w nawiązaniu do wyników regionalnych badań hydrogeologicznych i analiz zasobów wód podziemnych w jednostce bilansowej (zlewni), w obrębie której projektowane ujęcie jest zlokalizowane,
- wykonania obliczeń hydrogeologicznych niezbędnych do określenia wydajności studni lub źródła przy zachowaniu jakości wody, którą można pobierać z ujęcia.

W obliczeniach hydrogeologicznych muszą być uwzględnione zarówno czynniki przyrodnicze, związane z dopływem do ujęcia wody z warstwy wodonośnej i jej otoczenia, jak i czynniki techniczno-hydrogeologiczne wynikające z: konstrukcji otworu studziennego (studnia zupełna, studnia niezupełna), oporów hy-

draulicznych i sprawności studni, wydajności eksploatacyjnych związanych z wymiarami filtra i prędkościami dopuszczalnymi przepływu wody podziemnej.

Z definicją prawną zasobów eksploatacyjnych ściśle są związane takie pojęcia jak: depresja zwierciadła wody podziemnej na ujęciu i w jego otoczeniu, obszar wpływu ujęcia (leja depresji), obszar spływu wody, obszar zasilania ujęcia, i wreszcie jego obszar zasobowy. Pojęcia te muszą znaleźć swój graficzny i liczbowy wyraz w każdej ze sporządzanych dokumentacji hydrogeologicznych, ustalających zasoby eksploatacyjne ujęcia wód podziemnych.

Proces ustalania zasobów eksploatacyjnych wymaga więc znajomości wielu metod obliczeń hydrogeologicznych, dobieranych przez hydrogeologa stosownie do stwierdzonych warunków hydrogeologicznych, stopnia ich złożoności, wielkości zapotrzebowania na wodę analizowanego w stosunku do potencjalnej zasobności i stanu eksploatacji wód w badanym poziomie wodonośnym.

6.1. Obliczanie wydajności ujęcia za pomocą metod analitycznych

6.1.1. Metody hydrodynamiczne

Jest to grupa najdokładniejszych i najpewniejszych metod obliczeń analitycznych do prognozowania wydajności studni i ujęć wód podziemnych, utożsamianych w praktyce z oceną ich zasobów eksploatacyjnych. Metody hydrodynamiczne rolę tę mogą spełniać pod warunkiem, że sporządzony schemat hydrogeologiczny jest wiarygodny i dokonano wyboru poprawnego schematu obliczeniowego, uwzględniającego warunki graniczne, w tym właściwie określono zasięg leja depresji. Warto podkreślić, że równania z zakresu hydrodynamiki są równocześnie równaniami bilansowymi, ponieważ pierwotne położenie powierzchni piezometrycznej wód podziemnych stanowi odwzorowanie wielkości ich naturalnego zasilania. Wskazano jest, aby przy posługiwaniu się metodami hydrodynamicznymi korzystać równolegle z metod ustalania zasobów odnawialnych, które to metody pozwalają na obliczenie zasobów dynamicznych w oparciu o długoterminowe obserwacje stanów wód podziemnych (sieć SOH w obserwacji PIG, sieć IMGW w zakresie wód gruntowych) lub analizę odpływu podziemnego rzek (stała sieć IMGW, sieci okresowe związane z hydrogeologicznymi dokumentacjami regionalnymi). Oszacowane moduły odpływu podziemnego mogą być bardzo pomocne przy wymiarowaniu obszaru zasilania ujęcia wód podziemnych. Zestawienia tabelaryczne oraz kartograficzne zobrazowanie wielkości tego modułu można znaleźć w publikowanych opracowaniach hydrologicznych, sporządzanych dla poszczególnych zlewni rzecznych oraz dokumentacjach hydrogeologicznych zbiorników wód podziemnych.

Metody hydrodynamiczne obejmują:

- ❑ obliczenia wydajności według wzorów filtracji ustalonej Dupuita na dopływ wody do pojedynczej studni,
- ❑ wzory na wielką studnię w przypadku obliczeń wydajności dla zespołu studni,
- ❑ obliczenia według wzorów Theisa i Hantusha w przypadku konieczności prognozowania wydajności w warunkach długotrwałej filtracji nieustalonej,
- ❑ całkowanie graficzne siatki hydrodynamicznej w przypadku dysponowania mapą hydroizohips.

A. Obliczenia ustalonego dopływu do pojedynczej studni w warstwie nieograniczonej

Do obliczeń wydajności przy ustalonej filtracji stosuje się wzory Dupuita.

Dla wód o zwierciadle swobodnym:

$$Q = \pi k \frac{H^2 - h_o^2}{\ln \frac{R}{r_o}} = 1,36k \frac{H^2 - h_o^2}{\lg \frac{R}{r_o}} \quad [6.1]$$

lub podstawiając $h_o = H - s$

$$Q = \pi k \frac{(2H - s)s}{\ln \frac{R}{r_o}} \quad [6.1a]$$

a dla wód o zwierciadle naporowym:

$$Q = \frac{2\pi km}{\ln \frac{R}{r_o}} (H - h_o) = \frac{2,73km(H - h_o)}{\lg \frac{R}{r_o}} \quad [6.2]$$

lub podstawiając $H - h_o = s$ oraz $km = T$

$$Q = \frac{2\pi Ts}{\ln \frac{R}{r_o}} \quad [6.2a]$$

gdzie:

- Q – dopływ wody [m³/h],
- k – współczynnik filtracji [m/h],
- H – wysokość statycznego zwierciadła wody [m],
- h_o – wysokość dynamicznego zwierciadła wody w studni [m],
- s = H – h_o – depresja zwierciadła wody [m],
- m – miąższość warstwy wodonośnej [m],
- R – promień leja depresji [m],
- r_o – promień studni [m].

Zasięg promienia leja depresji oblicza się orientacyjnie za pomocą wzorów empirycznych:

- dla wód o zwierciadle swobodnym według wzoru Kusakina:

$$R = 575 s \sqrt{kH} \quad [6.3]$$

- dla wód o zwierciadle naporowym według wzoru Sichardta:

$$R = 3000 s \sqrt{k} \quad [6.4]$$

gdzie:

k – współczynnik filtracji w m/s; pozostałe oznaczenia bez zmian.

Wyniki obliczeń według wzorów empirycznych są zwykle orientacyjne. W związku z tym przy obliczeniach wydajności studni na potrzeby oszacowania zasobów eksploatacyjnych, tam gdzie nie stosowano pompowań hydrowęzłowych, pozwalających na bezpośrednie określenie zasięgu leja depresji pomiarami terenowymi, należy obliczenia empiryczne porównać z przeliczeniem kontrolnym zasięgu leja depresji R jako równoważnego promieniu koła obejmującego swoim zasięgiem obszar zasilania związany ze wstępnie oszacowaną wielkością zasobów eksploatacyjnych:

$$R = \sqrt{\frac{Q_e}{\pi M_d}} \quad [6.5]$$

gdzie:

Q_e – szacowana wstępnie wielkość zasobów eksploatacyjnych [m^3/h],

M_d – moduł zasobów odnawialnych przyjęty z hydrogeologicznych badań regionalnych (modelowanie) albo badań hydrologicznych (odpływ podziemny rzek) [$\text{m}^3/\text{h}/\text{km}^2$].

W obliczeniach wydajności trzeba odrębnie potraktować przypadki studni, które w swojej konstrukcji nie spełniają założeń przyjętych w schemacie Dupuita i tylko częściowo ujmują daną warstwę wodonośną (studnie niezupełne). P. Forchheimer (1930) przedstawił obliczenia odpowiednich poprawek, które wprowadzone do wzorów odnoszących się do studni zupełnych [6.1] i [6.2] umożliwiają poprawne obliczenia wydajności studni niezupełnych.

Wydajność studni niezupełnej Q_n jest wówczas równa:

$$Q_n = Q \cdot b \quad [6.6]$$

gdzie:

Q – wydajność studni zupełnej [m^3/h],

b – poprawka Forchheimera [1].

Poprawkę Forchheimera określa się z zależności:

- dla warstwy wodonośnej o zwierciadle swobodnym:

$$b = \sqrt{\frac{L}{h_0}} \sqrt{\frac{2h_0 - L}{h_0}} \quad [6.7]$$

➤ dla warstwy wodonośnej o zwierciadle naporowym:

$$b = \sqrt{\frac{L}{m}} \sqrt[4]{\frac{2m-L}{m}} \quad [6.8]$$

gdzie:

L – długość części czynnej filtra [m],

h_0 – wysokość dynamicznego (obniżonego) zwierciadła wody w studni [m],

m – miąższość warstwy wodonośnej [m].

Inne sposoby obliczania poprawki na niezupełność studni, bardziej szczegółowe ze względu na położenie filtra w warstwie wodonośnej, podane są w dostępnej literaturze (np. Turek – red., 1971; Jarodzki, 1972).

B. Obliczenia dopływu ustalonego do pojedynczej studni w warstwie wodonośnej ograniczonej jednostronnie granicą zasilającą

Wzory Forchheimera (1930) dla warstwy zasilanej np. z rzeki, której koryto spełnia warunek granicy $H = \text{const}$ mają następującą postać:

➤ wydajność studni w warstwie o zwierciadle swobodnym:

$$Q = \frac{\pi k(2H - s)s}{\ln \frac{2a_z}{r_0}} \quad [6.9]$$

➤ wydajność studni w warstwie o zwierciadle naporowym:

$$Q = \frac{2\pi Ts}{\ln \frac{2a_z}{r_0}} \quad [6.10]$$

gdzie:

a_z – odległość studni od granicy zasilającej, pozostałe objaśnienia oznaczeń jak wyżej w tekście. Dla odległości $a_z = 0,5 R$ wzory [6.9] i [6.10] są identyczne z wzorami [6.1] i [6.2].

C. Obliczenia dopływu ustalonego do studni w warunkach jej współdziałania w zespole ujmującym warstwę nieograniczoną

Współdziałanie dwóch otworów studziennych ma miejsce, gdy odległość pomiędzy nimi L jest mniejsza niż suma promieni przez nie wytworzonych: (rys. 6.1-1.) Zmniejszenie wydajności studni w warunkach ich współdziałania określa współczynnik interferencji:

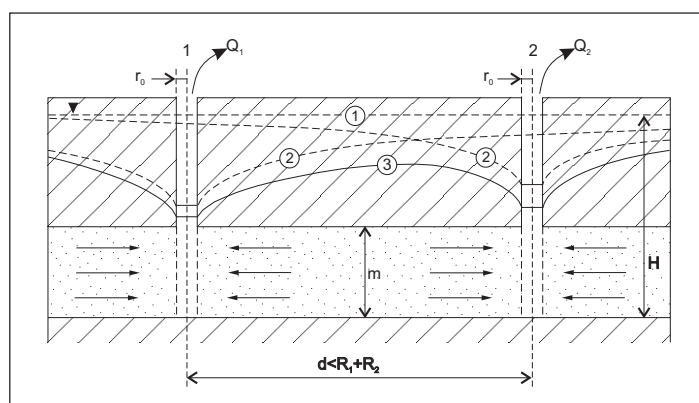
$$\alpha = \frac{Q'}{Q} \quad [6.11]$$

gdzie:

Q' – wydajność studni w warunkach współdziałania,

Q – wydatek studni pracującej indywidualnie.

Obliczenia hydrogeologiczne, wykonywane dla studni w warunkach ich współdziałania, zmierzają do określenia wydajności poszczególnych otworów eksploatacyjnych (składowych zasobów eksploatacyjnych ujęcia). Jak podkreśla R. Kulma (1995), przy korzystaniu z licznych wzorów zamieszczonych w fachowej literaturze należy pamiętać, że zostały one wyprowadzone dla określonego rozlokowania otworów, ich liczby i kształtu konturu zasilania. Suma wydajności obliczonych dla każdej ze współdziałających studni może być rozważana jako wielkość zasobów eksploatacyjnych ujęcia pod warunkiem wykazania ich odnawialności oraz spełnienia innych kryteriów wniosku zasobowego.



Rys. 6.1-1. Schemat współdziałania dwóch otworów studziennych (za Kulmą 1995).

1 – zwierciadło wody początkowe (napór hydrodynamiczny), 2 – krzywa depresji przy pompowaniu indywidualnym, 3 – krzywa depresji w pompowaniu zespołowym.

Najczęściej w praktyce współdziałanie zespołu studni liczone jest przy założeniu stałości wydatków poszczególnych studni dla układów:

- dwie studnie współdziałające – wzory Muskata (1937) zmodyfikowane przez A. Haładusa (1983):
 - a. warstwa wodonośna o zwierciadle swobodnym:

$$Q' = \frac{\pi k (2H - s_0) s_0}{\ln \frac{R^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}{r_0 d}} \quad [6.12]$$

- b. warstwa wodonośna o zwierciadle naporowym:

$$Q' = \frac{2\pi T s_0}{\ln \frac{R^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}{r_0 d}} \quad [6.13]$$

- trzy studnie rozmieszczone w barierze:
 - a. warstwa wodonośna o zwierciadle swobodnym:

$$Q' = \frac{\pi k (2H - s_0) s_0}{3 \ln \frac{R}{\sqrt[3]{d^2 r_0}}} \quad [6.14]$$

- b. warstwa wodonośna o zwierciadle naporowym:

$$Q' = \frac{2\pi T s_0}{3 \ln \frac{R}{\sqrt[3]{d^2 r_0}}} \quad [6.15]$$

W podanych wzorach poszczególne symbole oznaczają:

- Q' – wydajność studni w warunkach jej współdziałania w zespole [m^3/h],
- T – przewodność warstwy wodonośnej [m^2/h],
- k – współczynnik filtracji [m/h],
- H – miąższość warstwy wodonośnej o zwierciadle swobodnym [m],
- s_0 – depresja w studni współdziałającej [m],
- R – promień leja depresji [m],
- d – odległość między sąsiednimi studniami [m],
- r_0 – promień studni [m].

D. Obliczenia dopływu ustalonego wody do zespołu otworów metodą wielkiej studni

Metoda ta może być stosowana dla systemu (zespołu studni) o regularnym lub nieregularnym kształcie, przy czym zakłada się, że najbliższa zespołowi studni hydroizohipsa dynamicznego zwierciadła wody wyznacza kontur wielkiej studni. Powierzchnia F w m^2 (zamknięta tą hydroizohipsą) służy do wyznaczania promienia zastępczego r_k wielkiej studni w wyniku zastosowania wzoru:

$$r_k = 0,565 \sqrt{F} \quad [6.16]$$

Metoda wielkiej studni jest szczegółowo omówiona w podręcznikach i poradnikach hydrogeologicznych (m.in. Pazdro Kozerski, 1990).

Dla ujęcia (w warstwie nieograniczonej) o długości nie przekraczającej 3-4-krotnie jego szerokości można również stosować metodę wielkiej studni, obliczając promień zastępczy wzorem podanym przez Bindemanna i Jazwina (1970):

$$r_k = \alpha \sqrt[n]{F^{n-1}} \quad [6.17]$$

gdzie:

- F – obszar ujęcia zamknięty najbliższą hydroizohipsą [m^2],
- n – liczba studni ujęcia,
- α – współczynnik korygujący (tab. 6.1-1).

Tabela 6.1-1. Wartości współczynnika α .

n	5	9	25	8
α	0,42	0,46	0,47	0,56

Dla liniowej bariery studni można stosować wzór Boczewiera (Bindemann, Jazwin 1970):

$$r_k = 0,2l \quad [6.18]$$

gdzie: l oznacza długość bariery.

Dla bariery studni o nieparzystej liczbie otworów w jednostkach ograniczonych można obliczyć wartość r_k również wg Wierygina:

$$r_k = \alpha d(n-1) \quad [6.19]$$

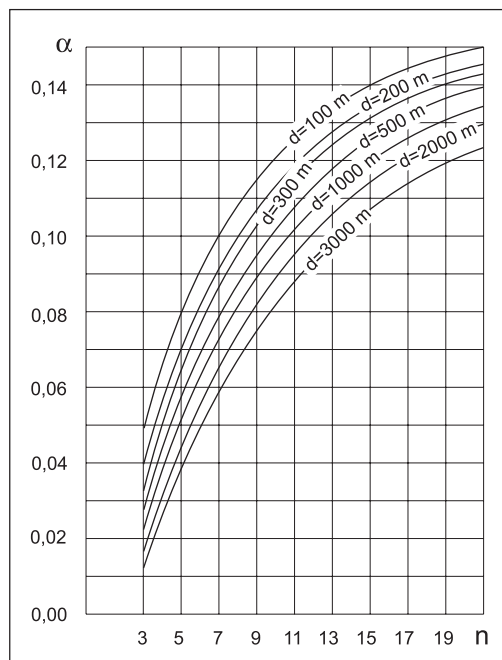
gdzie:

α – parametr odczytywany z nomogramu Wierygina (rys. 6.1-2),

d – rozstaw studni w barierze [m],

n – liczba studni w barierze.

Obliczony promień wielkiej studni jest wprowadzany do podanych już wzorów Dupuita [6.1] i [6.22], zastępując w tych wzorach promień pojedynczej studni.

Rys. 6.1-2. Nomogram do odczytywania parametru α według Wierygina.

Poza podanymi wzorami można stosować inne wzory bazujące na teorii współdziałania studni (Macioszczyk 1969; Wieczysty, 1970; Pazdro, Kozerski, 1990) oparte na:

1. Zasadzie odbić zwierciadlanych stosowanej w obliczeniach dopływu do studzien w warstwach ograniczonych (wpływ granicy warstwy na dopływ do studni jest taki, jak gdyby w warstwie o nieograniczonym rozprzestrzenieniu pracowały studnie zwielokrotnione poprzez odbicia zwierciadlane, przy czym granica warstwy jest linią zwierciadła),
2. Zasadzie superpozycji (sumowania, nakładania się strumieni cząstkowych) – zasadzie Forchheimera, polegającej na tym, że depresja wywołana w jakimś punkcie poprzez pompowanie zespołu studzien jest sumą algebraiczną depresji wywołanych przez poszczególne studnie; stosowana w szczególności dla wód o zwierciadle swobodnym w warstwach ograniczonych lub nieograniczonych,
3. Interferencji (nakładania się lejów depresyjnych) stosowanej dla wód o napiętym zwierciadle wody, głównie w jednostkach nieograniczonych.

E. Prognoza zasobów eksploatacyjnych ujęć według obliczeń filtracji nieustalonej

Prognozowanie wydajności ujęć metodami filtracji nieustalonej jest możliwe w przypadku występowania wód o napiętym zwierciadle i przy stosunkowo niewiele zróżnicowanej przewodności, obliczonej na podstawie pompowań hydrowęzłowych. Wzory obliczeniowe zestawiono w tabeli 6.1-2.

Funkcje charakterystyczne studni $W(u)$, $W(u, \frac{r}{B})$ i funkcje uwzględniające

wpływ granic zasilających $W(u_1)$ i nieprzepuszczalnych $W(u_2)$ można zastąpić wartością ϕ , czyli sumarycznym oporem filtracyjnym. Zestawienie wzorów do obliczania zasobów eksploatacyjnych metodami hydrodynamicznymi w połączeniu z hydraulicznymi w zależności od schematu zasilania ujęcia podano w pracy J. Pleczyńskiego i J. Przybyłka (1974).

Współdziałanie studni można uwzględniać w obliczeniach depresji s lub dopływu Q do każdej ze studni współdziałających w barierze liniowej w warstwie nieograniczonej o nieparzystej liczbie studni z uwzględnieniem funkcji podawanej w tabeli 6.1-3. Innym sposobem uwzględnienia studni współdziałających jest przyjmowanie depresji na promieniu wielkiej studni – s_{rej} , celem uzyskania prognozowanej wydajności ujęcia wielootworowego.

Tabela 6.1-2. Prognoza zasobów eksploatacyjnych ujęć według obliczeń filtracji nieustalonej.

Założenia techniczne ujęcia	Wzór		
	Theisa	Hantusha	Theisa
stała depresja $s = \text{const}$	$Q = \frac{4\pi Ts}{W(u)}$	$Q = \frac{4\pi Ts}{W\left(u, \frac{r}{B}\right)}$	dla granic zasilających $Q = \frac{4\pi Ts}{W(u) - W(u_1)}$ dla granic nieprzepuszczalnych $Q = \frac{4\pi Ts}{W(u) + W(u_2)}$
stały wydatek $Q = \text{const}$	$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$	$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W\left(u, \frac{r}{B}\right) \right]$	dla granic zasilających $s = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) - W(u_1)]$ dla granic nieprzepuszczalnych $s = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) + W(u_2)]$
Zakres stosowania	Warstwa nieograniczona bez przesiąkania	Warstwa nieograniczona, przesiąkanie z warstw sąsiednich	Warstwa ograniczona granicą zasilającą ($H=\text{const}$) lub nieprzepuszczalną ($Q=0$)

Q – zasoby eksploatacyjne w określonym czasie [m^3/h],

s – depresja [m],

T – uśredniona przewodność warstwy wodonośnej [m^2/h],

$W(u)$ – funkcja charakterystyczna studni w schemacie Theisa,

$W\left(u, \frac{r}{B}\right)$ – funkcja charakterystyczna studni w warunkach przesiąkania, zwana funkcją Hantusha,

u – zmienna funkcji określana wzorem: $u = \frac{r^2}{4at}$,

r – odległość od środka ciężkości ujęcia do konturu studzien, lub promień wielkiej studni [m],

a – współczynnik piezoprzewodności [m^2/h],

t – czas, dla którego wykonuje się obliczenia zasobów [h],

B – wskaźnik przesiąkania [m],

$W(u_{1,2})$ – funkcja charakterystyczna uwzględniająca wpływ warunków granicznych:

$$u_1 = \frac{d_1^2}{4at}, \quad u_2 = \frac{d_2^2}{4at}$$

d_1, d_2 – podwojona odległość konturu studzien od granicy zasilającej (d_1) lub nieprzepuszczalnej (d_2) (zgodnie z zasadą odbić zwierciadlanych Forchheimera) lub odległość studni rzeczywistej od studni fikcyjnej [m].

Tabela 6.1-3. Wartości funkcji $\sum_{i=1}^n W\left(\frac{d^2 i^2}{4at}\right)$ w zależności $u = \frac{d^2}{4at}$ od według Wierigina.

$u = \frac{d^2}{4at}$	n							
	1	2	3	4	5	6	10	20
0,005	4,73	8,08	10,7	12,7	14,3	15,6	18,8	20,7
0,01	4,04	6,72	8,46	10,0	11,1	11,9	13,4	13,9
0,02	3,35	5,38	6,69	7,55	8,13	8,47	8,97	9,03
0,04	2,68	4,09	4,87	5,28	5,5	5,61	5,7	5,7
0,1	1,82	2,53	2,79	2,87	2,88	2,9	2,9	2,9
0,2	1,22	1,53	1,6	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61
0,4	0,702	0,789	0,85	0,851	0,851	0,851	0,851	0,851
1	0,219	0,223	0,223	0,233	0,233	0,233	0,233	0,233
2	0,0489	0,0489	0,048 9	0,0489	0,0489	0,0489	0,0489	0,0489
4	0,00378	0,00378	0,00378	0,00378	0,00378	0,00378	0,00378	0,00378

n – liczba studni w barierze po jednej stronie bariery (ogólna liczba studni w barierze wynosi $N=2n+1$), i – kolejna studnia na zewnątrz od studni środkowej, d – rozstaw studni w barierze.

F. Całkowanie graficzne siatki hydrodynamicznej

Siatki hydrodynamiczne w hydrogeologii praktycznej służą przede wszystkim do obliczania wielkości dopływu do ujęcia wody z różnych kierunków, dzięki temu z dużym powodzeniem można je wykorzystywać do obliczania i wydzielania zasobów eksploatacyjnych, pochodzących ze zlewni podziemnej i infiltracji brzegowej.

Siatki hydrodynamiczne sporządza się na mapach hydroizohips uzyskanych dla stanu eksploatacji całego ujęcia przy dokładnych pomiarach zwierciadła wody w otworach położonych wzdłuż rzeki zasilającej, wzdłuż frontu zasilania podziemnego oraz w otworach i studniach wzdłuż bariery.

Skonstruowana siatka hydrodynamiczna powinna być ortogonalna, aby można ją było sprowadzić do wycinków prostokątnych. Szczegółowe warunki i sposoby jej wykreślenia podaje A. Wiczysty (1970). Przepływ przez każdy wycinek siatki oblicza się przekształconym wzorem Darcy:

$$Q = T \Delta H \frac{b}{l} \quad [6.20]$$

gdzie (rys. 6.1-3):

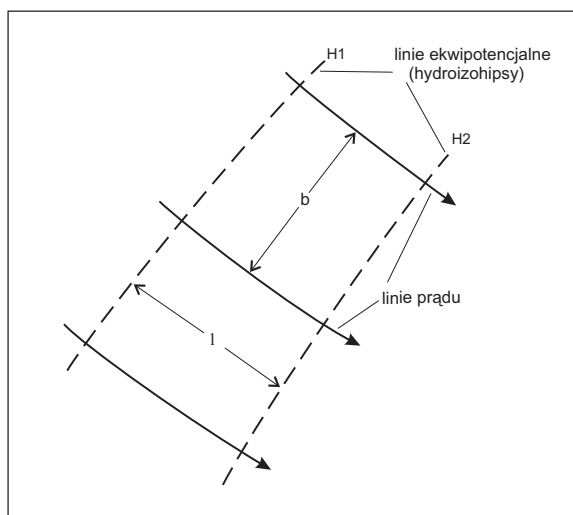
T – przewodność warstwy wodonośnej [m^2/h],

$\Delta H = H_1 - H_2$ – różnica między kolejnymi wartościami linii równych ciśnień (hydroizohips) [m],

b – odstęp między liniami strug w pasie obliczeniowym [m],

l – szerokość wycinka między hydroizohipsami [m].

Dopływ do ujęcia będzie sumą przepływów przez wszystkie wycinki siatki hydrodynamicznej.



Rys. 6.1-3. Elementy siatki hydrodynamicznej.

6.1.2. Metody bilansowe eksploatacji

Zasoby eksploatacyjne związane są z następującym równaniem bilansowym (bez uwzględnienia zasobów sztucznych):

$$Q_e = (Q_d + Q_i) + \frac{V}{t} \quad [6.21]$$

gdzie:

Q_d – zasoby dynamiczne,

Q_i – zasoby uzupełniające (wzbudzone),

V – zasoby statyczne,

t – czas eksploatacji ujęcia równy okresowi szczytowania zasobów statycznych (dla ujęć wody przyjmuje się 10-25 lat).

Zasoby dynamiczne z obszaru zasilania ujęcia oraz pojemność warstw wodonośnych (zasoby statyczne) rozpatruje się w całości i można jedynie mówić o średnich wielkościach parametrów obliczeniowych. Pozwala to jednak na podjęcie próby zbilansowania składników zasobów eksploatacyjnych, charakterystykę przepływu i odnawiania się zasobów wód podziemnych w obrębie całej struktury hydrogeologicznej.

Potrzeba takiej oceny zasobów coraz ostrzej zarysowuje się na obszarach, gdzie istnieje wiele małych ujęć o wcześniej ustalonych zasobach eksploatacyjnych, nie przeanalizowanych w stosunku do:

- wielkości zasobów naturalnych danej jednostki hydrogeologicznej,
- zasobów eksploatacyjnych sąsiednich, z reguły współdziałających ujęć.

Z regionalnego punktu widzenia zespół ujęć pojedynczych stanowi praktycznie jedno duże ujęcie (szczególnie na terenie aglomeracji). Zasoby poszczególnych odrębnie dokumentowanych ujęć są w wielu przypadkach zawyżone, bowiem pomijają wpływ współdziałania z sąsiednimi ujęciami. Zdarza się, że skoncentrowany pobór wody przewyższa zasoby dynamiczne użytkowego poziomu wodonośnego. Dla racjonalizacji poboru w takim przypadku należy wykonać badania bilansowe całej struktury hydrogeologicznej z zastosowaniem modelowania matematycznego. Metoda analityczna bilansu eksploatacji w dokumentowaniu ujęć wód podziemnych (przy $t \rightarrow \infty$) powinna być stosowana jako kontrolna przy obliczaniu zasobów w strefach zasilania niewielkich zlewni i w problematyce ochrony zasobów ujęć w nich położonych.

Gdy istnieje konieczność udokumentowania maksymalnych zasobów ujęcia dla założonego krótkiego okresu eksploatacji ($t = 10-25$ lat) można wykonać obliczenie zasobów następującym wzorem (Bindemann, Jazwin, 1970):

$$Q_e = Q_d + \frac{\alpha V_s}{t} \quad [6.22]$$

gdzie:

Q_d – zasoby dynamiczne [m^3/d],

α – stopień wykorzystania zasobów statycznych przez ujęcie, przyjmowany w przedziale wartości 0,3-0,5,

V_s – zasoby statyczne obliczone na podstawie wzoru:

$$V_s = \mu s F \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad [6.23]$$

gdzie:

μ – współczynnik odsączalności grawitacyjnej [1],

s – maksymalna depresja eksploatacyjna na ujęciu [m],

F – powierzchnia obszaru objętego zasięgiem leja depresyjnego [m^2].

Analityczna metoda bilansu eksploatacji ujęcia powinna być w ocenie zasobów eksploatacyjnych stosowana w powiązaniu z metodą hydrauliczną, opierającą się na wzorach empirycznych określających związek między wydajnością i depresją podczas pompowania studni.

6.1.3. Metody hydrauliczne

Metody hydrauliczne opierają się na wzorach empirycznych określających związek między wydajnością i depresją podczas pompowania studni zależny od oporów hydraulicznych w warstwie wodonośnej, strefie wokół filtra i w samej studni. Wzory te nie uwzględniają odnawialności zasobów, bowiem nie włączają do swoich formuł parametrów bilansowych strumienia filtracyjnego. Najczęściej stosowana jest metoda obliczania zasobów eksploatacyjnych polegająca na przyjęciu lub ograniczonej ekstrapolacji wyników próbnego pompowania dla poje-

dynczych studni na podstawie stwierdzonej zależności $Q=f(s_0)$ w pompowaniu wielostopniowym. W odniesieniu do warstw swobodnych ta ekstrapolacja nie może przekroczyć wielkości depresji $s_0 < 0,4H$ (Podniesiński, 1963), a w warstwie naporowej dynamiczne zwierciadło wody nie może być obniżone poniżej spągu warstwy napinającej. Analiza funkcji $Q=f(s_0)$ oraz $q=f(s_0)$ lub innych zależności w postaci funkcji przekształconych ($s_0=s_0/Q$, $\lg Q=f(\lg s_0)$, $Q=f(\lg s_0)$) pozwala na właściwy dobór wzorów obliczeniowych, które są przedstawione w podręcznikach (np. Pazdro, Kozerski, 1990). Przy obliczeniach zasobów metodą hydrauliczną trzeba pamiętać, że oprócz wydajności i depresji wniosek zasobowy wymaga wyznaczenia obszaru wpływu i obszaru zasobowego ujęcia (rozdz. 6.2). Dlatego też metody hydrauliczne należy stosować zawsze w połączeniu z obliczeniami odnawialności zasobów wód podziemnych w warstwie wodonośnej, korzystając z danych zaczerpniętych z opracowań regionalnych: hydrogeologicznych i hydrologicznych.

6.2. Analityczne określanie obszaru zasobowego i obszaru wpływu ujęcia

Zgodnie z definicją (rozdz. 2) obszar zasobowy stanowi część obszaru spływu wody do ujęcia. Kluczowym dla jego określenia jest więc właściwe rozpoznanie granic obszaru spływu. W przypadku symulacji modelowych zadanie to nie przedstawia trudności, gdyż siatka hydrodynamiczna kreślona jest automatycznie jako wynik obliczeń symulacyjnych. Dla prostych przypadków stosuje się metody przybliżone. Można wykorzystywać metodę Wysslinga (Macioszczyk i inni, 1994), właściwszym jest jednak stosowanie graficznej metody wyznaczania obszaru spływu. Polega ona na naniesieniu na mapę hydroizohips stanu naturalnego (tj. bez eksploatacji) izolinii depresji dla założonego wydatku i czasu trwania eksploatacji (schematy obliczeniowe w warunkach przepływu nieustalonego lub quasi-ustalonego), a następnie na odjęciu od hydroizohips wartości depresji jak to pokazano schematycznie na rysunku 6.2-1. Powstała w wyniku tej operacji nowa siatka hydrodynamiczna wyznacza graficznie obszar spływu wód do ujęcia.

Niezbędne do stosowania tej metody prognozowane izolinie depresji obliczamy z reguły dla prognozy długotrwałej eksploatacji, gdy następuje ustalenie się warunków filtracji. Można wówczas korzystać ze wzorów na ustalony dopływ do studni przedstawionych w rozdziale 4.1-5. W najprostszym przypadku możliwe jest stosowanie wzoru Dupuita, który po odpowiednim przekształceniu umożliwia obliczenie promienia izolinii depresji o kolejnych podstawianych wartościach (objaśnienia jak w rozdz. 4.1-5).

➤ dla warstwy o napiętym zwierciadle wody:

$$s(r) = H - h(r) = H - \left(\frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r}{r_0} + h_0 \right)$$

stąd:

$$r = r_0 e^{\frac{2\pi T (H - s(r) - h_0)}{Q}}$$

➤ dla warstwy o swobodnym zwierciadle wody:

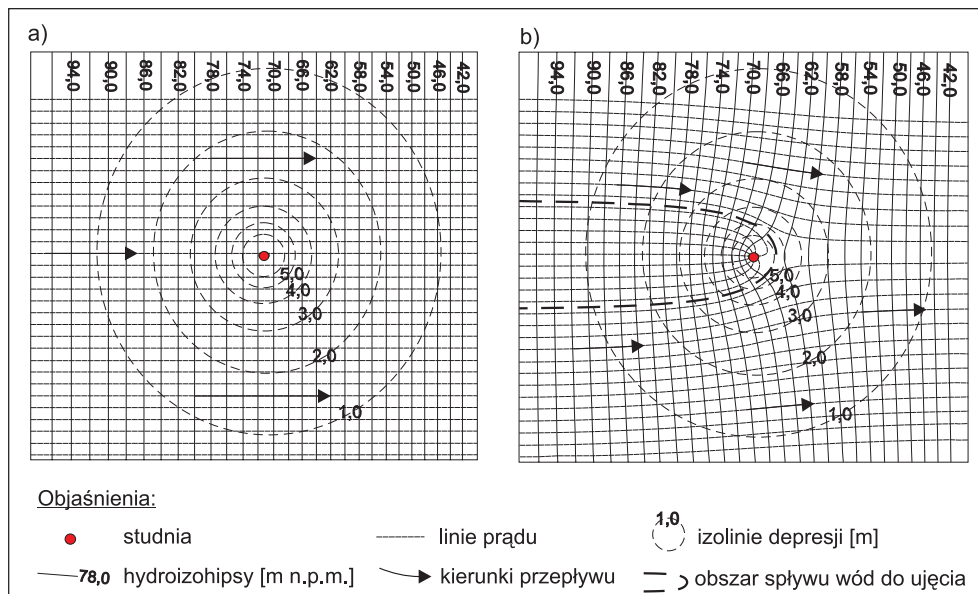
$$s(r) = H - h(r) = H - \sqrt{\frac{Q}{\pi k} \ln \frac{r}{r_0} + h_0^2}$$

stąd:

$$r = r_0 e^{\frac{\pi k [(H - s(r))^2 - h_0^2]}{Q}}$$

Podstawiana do wzorów wartość dynamicznego zwierciadła wody – h_0 może być obliczana ze wzorów na ustalony dopływ do studni i przy wykorzystaniu formuły ograniczającej zasięg oddziaływania ujęcia (np. wzór Sichardta). Lepiej jednak przyjmować ją jako wynik obserwacji bezpośrednich prowadzonych podczas próbnego pompowania w przypadku, jeśli osiągnięto stabilizację zwierciadła wody. Ważne przy tym, aby współczynnik filtracji charakteryzował warstwę wodonośną, a nie tylko strefę przyfiltrową.

Dla przypadków bardziej skomplikowanych należy stosować odpowiednie wzory uwzględniające zmienność cech hydrostrukturalnych ujętego poziomu wodonośnego jak np. warunki przesiekania z warstw podległych/nadległych, opóźnione odsączanie, obecność granic hydrodynamicznych, a także poprawkę na niezupełność studni.



Rys. 6.2-1. Schemat graficznego wyznaczania obszaru spływu.

a) stan naturalny – $Q=0$ b) stan eksploatacyjny – $Q>0$

Wyznaczony zgodnie z powyższymi zasadami obszar spływu odznacza się niejednokrotnie znaczną rozciągłością w górę strumienia wód podziemnych. Szczególnie ujęcia o słabym zasilaniu infiltracyjnym, a więc zlokalizowane w izolowanych strukturach hydrogeologicznych, mogą cechować się obszarami spływu sięgającymi aż do naturalnych granic hydrodynamicznych, np. wododziałów lub granic zasilających, albo do granic strukturalnych jak wychodnie warstw, czy nieciągłości tektoniczne. Ze względów praktycznych konieczne jest więc przyjęcie pewnych umownych granic w obrębie obszaru spływu, które wyznaczą obszar zasobowy. Zgodnie z definicją przedstawioną w rozdziale 2 zasadnym jest stosowanie dwóch kryteriów ograniczających:

- kryterium rozległości obszaru wpływu (depresji), lub
- kryterium czasu dopływu wody do ujęcia.

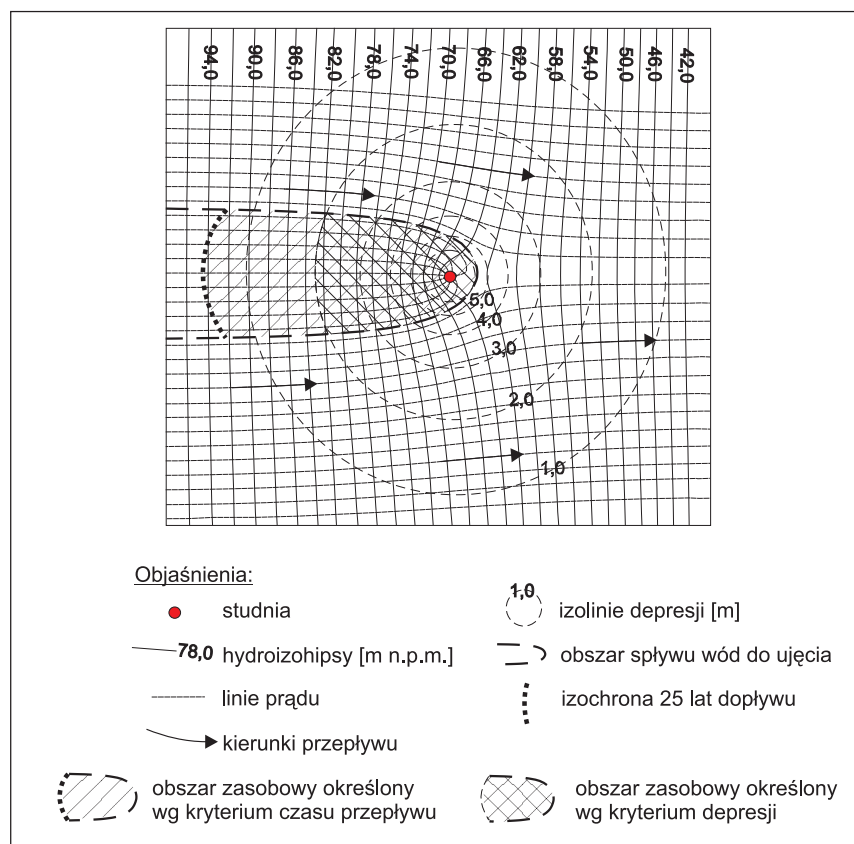
W pierwszym przypadku w obrębie obszaru spływu wyznacza się zasięg wpływu poprzez wykreślenie granicznej izolinii depresji. Ponieważ dla prognoz wykonywanych w ruchu ustalonym wpływ może objąć teoretycznie cały system wodonośny, dla ujęć wielootworowych o znacznej wydajności proponuje się przyjęcie ograniczenia taką wartością izolinii depresji, która jest porównywalna ze średnioroczną amplitudą wahań ujętego do eksploatacji poziomu wodonośnego. Z praktyki wynika, że z reguły będzie to wartość mieszcząca się w przedziale 0,5-2 m. W prognozach wykonywanych dla pojedynczych ujęć o małych wydajnościach graniczna wartość depresji powinna być mniejsza i wynosić 0,2-0,5 m.

W przypadku drugim w obrębie obszaru spływu wyznacza się izochronę poziomu dopływu wody do ujęcia o wartości wynikającej z naturalnej odporności ujętego poziomu wodonośnego na zanieczyszczenia (zgodnie z zasadami przyjętymi przy projektowaniu stref ochronnych). Dla odkrytego poziomu wodonośnego (warstwa o zwierciadle swobodnym) może to być izochrona 25-letniego przepływu wody, dla poziomu częściowo izolowanego jej wartość będzie pomniejszona o czas pionowej migracji wody do ujętej warstwy. Tą metodą można jednak określać obszary zasobowe tylko tych ujęć, dla których uzasadnione jest określanie i ustanawianie stref ochronnych.

Wzajemne położenie obszaru zasobowego wyznaczonego według kryterium depresji i kryterium czasu dopływu pokazuje schemat zamieszczony na rysunku 6.2-2.

Określone w powyższy sposób granice obszaru zasobowego powinny być następnie skonfrontowane z modułem zasilania ujętego poziomu wodonośnego. Przy znanej wartości tego modułu oblicza się powierzchnię obszaru niezbędną do pokrycia zasadniczej części przewidywanego poboru wody przez dokumentowane ujęcie (ok. 50-70% zasobów eksploatacyjnych). Powierzchnia ta powinna być w przybliżeniu równa powierzchni obszaru zasobowego wykreślonego z zastosowaniem jednego z dwóch przedstawionych powyżej kryteriów. W ten sposób możliwe jest wskazanie tej z metod, która w badanych warunkach hydrogeologicznych wykazuje większą zgodność z wynikami obliczeń bilansowych.

Źródłem informacji o wielkości modułów zasilania infiltracyjnego powinny być dokumentacje regionalne obejmujące bilans krążenia wód z rozdziałem na po-



Rys. 6.2-2. Obszar zasobowy wyznaczony według różnych kryteriów.

szczególne poziomy wodonośne. W praktyce rolę taką spełniają jedynie badania modelowe i z tego względu powinny być one preferowane przy analizie warunków i intensywności zasilania. Przy braku odpowiednich danych z opracowań regionalnych, należy korzystać z wartości modułów zamieszczonych do arkuszy Mapy hydrogeologiczne Polski w skali 1:50 000 oraz Mapy Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (Kleczkowski – red., 1990). Można też posługiwać się metodą analogii, biorąc wartości modułów z terenów o podobnych warunkach zasilania infiltracyjnego (stopień izolacji, morfologia, zagospodarowanie terenu, głębokość poziomu, itp.). W tabeli 6.2-1 przedstawiono zmienność wielkości modułów zasilania ustaloną w wyniku badań modelowych dla struktur hydrogeologicznych (poziomów) o zróżnicowanych warunkach zasilania. Z kolei w tabeli 6.2-2 pokazano przykładowe wartości modułów zasilania dla wybranych zbiorników wód podziemnych.

Tabela 6.2-1. Zmienność modułów zasilania infiltracyjnego i przez przesączanie z warstw nadległych wg badań modelowych (dane własne).

Piętro/poziom	Głębokość występowania [m]	Wykształcenie (litologia poziomu)	Moduł zasilania [m ³ /h/km ²]	Uwagi
I. Czwartorzęd 1. Poziomy wód o swobodnym zwierciadle wody (odkryte) a) sandry, tarasy wysokie dolin i pradolin, $T > 10 \text{ m}^2/\text{h}$ b) sandry, doliny i pradoliny ogólnie	1-30 lokalnie do 50	piaski różnoziarniste, pospółki i żwiry	a) 8,7-25,5 b) 3,5-11,5	Największe wartości modułów w strefach wododziałowych i strefach głębokości zalegania zwierciadła wody poniżej 3-5 m.
2. Poziomy międzyglinowe płytkie a) doliny kopalne, poziomy fluwiogłacjalne międzymorenowe o $T > 10 \text{ m}^2/\text{h}$ b) jw. o $T < 10 \text{ m}^2/\text{h}$	5-35 lokalnie do 50	piaski różnoziarniste, pospółki i żwiry	a) 7,5-14,2 b) 3,2-7,8	Moduły maleją ze wzrastającą głębokością poziomu i stopniem jego izolacji
3. Poziomy międzyglinowe (podglinowe) głębokie	30-80	piaski różnoziarniste, pospółki i żwiry	0,84-8,7	
II. Trzeciorzęd - niecki i poziomy wielowarstwowe 1. Poziom mioceni i oligoceni – strop warstwy do głębokości 110 m 2. Poziom mioceni – warstwy dolne oraz oligoceni – strop warstw poniżej głębokości 110 m	50-120 120-300	piaski drobne i pylaste, lokalnie średnie i grube ze żwirami	0,1-4,4 0,03-0,8	
III. Mezozoik 1. Kreda górna – zbiorniki szczelinowe 2. Kreda dolna – zbiorniki porowe i porowo-szczelinowe	10-300 30-800	margle, wapienie, opoki, gezy piaski różnoziarniste i piaskowce	0,03-7,5 0,01-4,0	Wielkości infiltracji uzależnione od głębokości występowania poziomu
3. Jura górna – zbiorniki szczelinowe i skrasowiałe	1-600	wapienie, margle	0,7-10,5	
4. Jura środkowa i dolna – monokliny, zbiorniki szczelinowo-porowe i porowe	1-300	piaski i piaskowce różnoziarniste	0,2-7,0	
5. Trias środkowy – zbiorniki szczelinowe, lokalnie skrasowiałe	1-300	wapienie, margle	2,0-15,2	
6. Trias dolny – zbiorniki porowo-szczelinowe	1-500	piaskowce	0,1-7,1	
IV. Paleozoik – zbiorniki porowo-szczelinowe, szczelinowe i skrasowiałe 1. Perm – pstry piaskowiec 2. Dewon	1-500 1-600	piaskowce, zlepienie wapienie, margle	0,05-3,5 0,05-16,0	

Tabela 6.2-2. Przykładowe wartości modułów zasilania dla wybranych zbiorników wód podziemnych (wg dokumentacji regionalnych ustalających zasoby dyspozycyjne, dokumentacji GZWP i danych własnych).

Zbiornik (powierzchnia), stratygrafia	Typ zbiornika	Głębokość występowania stropu poziomu wodonośnego [m]	Wielkość modułu zasilania [m ³ /h/km ²]
1	2	3	4
Sandr Kurpie – GZWP nr 216 (2180 km ²), czwartorzęd	Sandrowy – odkryty	< 10	14,0
Sandr leszczyński (90 km ²), czwartorzęd	Sandrowo-dolinny	1-3	13,4
Sandr jeziora Lusowskiego (59 km ²)	Sandrowy izolowany	1-3	8,7
Międzyrzecze Narwi-Wisły (211 km ²), czwartorzęd	Słabo izolowany kompleks osadów dolin współczesnych i kopalnych o miąższości do 80 m	1,5-3,0	14,2
Pradolina warszawsko-berlińska między Pyzdrami a Wolsztynem – GZWP nr 150 (ok. 1200 km ²), czwartorzęd	Pradolina z dolinami holocenijskimi cieków w tym Basen Mosiński z lejem dużego ujęcia wody	1-5 1-9	4,3-6,2 4-36 (śr. 16,4)
Kotlina Odolanowska Pradoliny Baryczy (ok. 1900 km ²), czwartorzęd	Zbiornik wielowarstwowy pradolinny – poziom gruntowy – poziom wgłębny	1-5 12-60	4,8 3,0
Kotlina Żmigrodzka Pradoliny Baryczy (850 km ²), czwartorzęd	Zbiornik wielowarstwowy pradolinny – poziom gruntowy – poziom wgłębny	1-5 10-65	4,6 3,2
Zlewnia Tywy i Rurzyca (1091 km ²), czwartorzęd, trzeciorzęd, lokalnie kreda	Zbiornik wielowarstwowy porowy poziomy czwartorzędowe: – gruntowy doliny Odry – międzymorenowy górny – międzymorenowy środk. – podglinowy poziom mioceński górny poziom mioceński dolny i poziom górnokredowy	 0,5-2,0 3,0-25,0 30-80 50-110 60-95 50-190	 3,7 8,6 4,1 0,84 4,0 0,8

Tab. 6.2-2 cd.

1	2	3	4
Zlewnia Regi i Przymorza (2860 km ²), czwartorzęd, kreda, jura	Zbiornik wielowarstwowy porowy i porowo-szczelinowy poziomy czwartorzędowe: – gruntowy i międzyglinowy górny – międzyglinowy dolny poziomy kredowy i jurajski	1-35 40-80 60-220	3,2-14,0 (śr. 10,2) 5,54 1,44
Zlewnia Wieprzy i Przymorza (2572 km ²), czwartorzęd, trzeciorzęd, kreda	Zbiornik wielowarstwowy porowy, lokalnie szczelinowy poziomy czwartorzędowe: – gruntowy i międzyglinowy górny, – poziom międzyglinowy dolny poziomy trzeciorzędowy i kredowy	1-35 40-80 120-250	9,1-17,5 2,6-4,8 0,15-0,54
Wielkopolska dolina kopalna – GZWP nr 144 (ok. 23 500 km ²), czwartorzęd	Dolina kopalna z okresu interglacjału mazowieckiego	35-65	4,3-5,7
Zlewnia Pilicy (9258 km ²), czwartorzęd, trzeciorzęd, kreda, jura, trias	Zbiornik wielowarstwowy porowy i szczelinowy poziom czwartorzędowy gruntowy i międzymorenowy poziom trzeciorzędowy (N część zlewni) poziomy kredowe: – poziom górnokredowy – poziom dolnokredowy poziomy jurajskie: – poziom górnójurajski – poziom środkowójurajski – poziom dolnojurajski poziom triasowy	1-30 20-150 5-150 20-450 5 do ponad 150 kilka do ok. 200 kilka do ok. 150 > 10 m	5,8-9,7 1,9 0,9-5,9 0,8-6,5 0,8-6,5 0,8-5,0 5,2-5,5 4,8-5,3
Zlewnia Górnej Kamiennej (134,8 km ²), czwartorzęd, jura dolna, trias (Haładus i inni, 1997)	Szczelinowo-porowy zbiornik piaskowcowo-piaszczysty i węglanowy	10-ok.100	14,8

Tab. 6.2-2 cd.

1	2	3	4
Zlewnia Górnej Warty (2 660 km ²), czwartorzęd, kreda, jura	Zbiornik wielowarstwowy porowy i szczelinowo-krasowy poziom czwartorzędowy: doliny, pokrywy sandrowe poziom kredy i jury – masyw szczelinowy i szczelinowo-krasowy poziomy triasu i dewonu – masyw szczelinowy i szczelinowo-krasowy	1-7 1-80 > 10	5,4-7,8 (śr. 6,5) 1,6-6,6 2,8
Trzeciorzędowy zbiornik Wielkopolski (ok. 35 000 km ²), trzeciorzęd	Zbiornik wielowarstwowy porowy – poziom mioceński górny – poziom mioceński dolny – poziom oligoceński	40-100 (cz. E) 140-220 (cz. W) 160-270	0,1-4,4 0,03-0,21 0,01-0,3
Niecka Wrocławska (6741 km ²), trzeciorzęd	Zbiornik porowy o dobrej izolacji – poziom górny – poziom dolny	40-100 80-150	0,63-1,35 (śr. 0,9) 0,1-0,6 (śr. 0,24)
Niecka Mazowiecka, centralna część (14 928 km ²), trzeciorzęd (Kazimierski inni, 1999),	Zbiornik porowy o dobrej izolacji	40-200	0,6-3,9 (śr. 1,2)
Niecka Radomska (zlewnie: Radomki, Zagożdżanki i Iłżanki – 1281 km ²), czwartorzęd, kreda	Poziom wielowarstwowy porowy i szczelinowy poziom czwartorzędowy poziom górnokredowy poziom dolnokredowy	1-30 10-50 10-150	125-229* (śr. 18,1) 4,6-12,7 (śr. 7,5) 0,9- 4,0 (śr. 2,2)
Niecka Krzeszowska (255 km ²), kreda górna, trias, perm	Masyw szczelinowo-porowy	10-150	3,4-10,2 (śr. 6,8)
Depresja i monoklina opolska (5813 km ²), czwartorzęd, trzeciorzęd, trias	Zbiornik wielowarstwowy porowy, szczelinowy i szczelinowo-krasowy poziom czwartorzędowy: doliny kopalne, poziomy międzymorenowe poziom trzeciorzędowy miocenu poziom wapienia muszlowego: – obszar wychodni – izolacja seria kajpru	1-20 30-90 5-10 10-400	2,0-7,1 0,58 3,9-15,2 0,2-5,1

Tab. 6.2-2 cd.

1	2	3	4
GZWP nr 330 – Gliwice (411 km ²), trias (wg Kowalczyk, Kropka, Rubin, 1997)	Kompleks wodonośny szczelinowy i szczelinowo-krasowy (wapienie, margle)	1-130	5,4-12,4 (śr. 10,9)
Zlewnia Drwęcy (5133 km ²), czwartorzęd	Zbiornik porowy wielowarstwowy	5-30	9,3
Zlewnia Bugu granicznego (9962 km ²), czwartorzęd, trzeciorzęd, lokalnie kreda	Zbiornik wielowarstwowy porowy i szczelinowy	2-40	7,3
Zlewnia Bugu na odcinku od granicy państwa do zbiornika zegrzyńskiego (9397 km ²), czwartorzęd, lokalnie trzeciorzęd i kreda	Zbiornik wielowarstwowy porowy, lokalnie szczelinowy	5-20	7,9

* – obszary zdepresjonowania i zaniku cieków na dużych obszarach

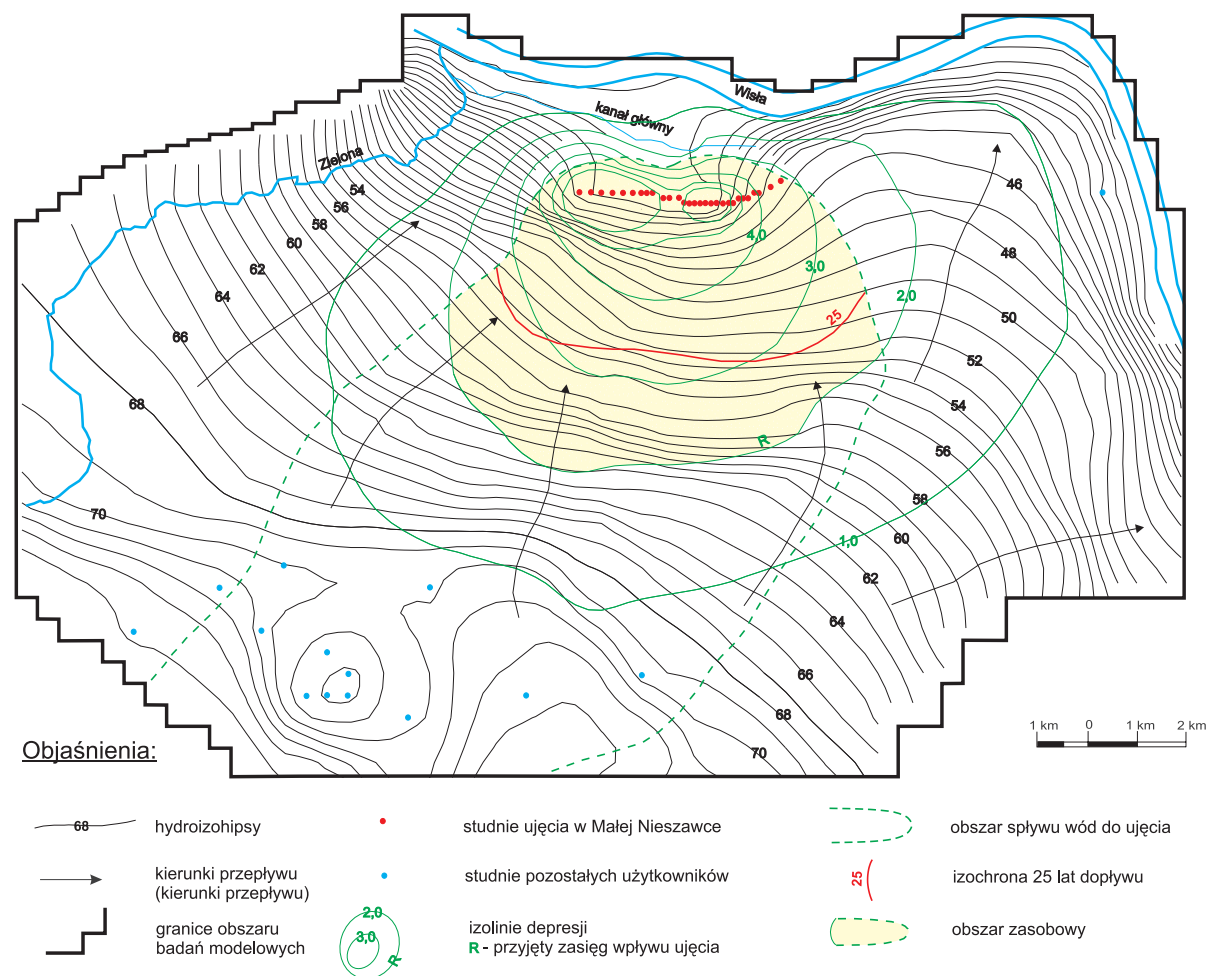
Zamieszczone w powyższych tabelach wielkości modułów zasilania przedstawiają uśredniony wynik bilansu z badań modelowych. Nie powinny one zwalniać hydrogeologa od obowiązku wnikliwej analizy lokalnych warunków zasilania ujętego poziomu wodonośnego opartej na wykonanych dokumentacjach regionalnych. Należy przy tym pamiętać, że ujęcia dolinne zlokalizowane w strefach drenażowych z reguły charakteryzują się przewagą zasilania pionowego z głębszych poziomów wodonośnych. Dlatego w module zasilania uwzględnione są natężenia dopływu pionowego przez spąg eksploatowanego poziomu. Z kolei przy analizie zasilania głębokich struktur nieckowych należy zwracać uwagę na zróżnicowanie modułów zasilania w zależności od głębokości występowania struktury i lokalizacji ujęcia (strefa centralna i peryferyjna niecki).

Reasumując, procedura określania w dokumentacji hydrogeologicznej obszaru zasobowego i obszaru wpływu ujęcia uwzględnia kolejno:

1. Wyznaczenie granic zasięgu wpływu ujęcia,
2. Wyznaczenie obszaru spływu wód do ujęcia,
3. Wyznaczenie izochrony poziomego dopływu wody o wartości wynikającej z zasad obliczania stref ochronnych,
4. Wyznaczenie granic i powierzchni obszaru zasobowego w oparciu o:
 - a. zasięg wpływu ujęcia,
 - b. izochrony przepływu wody.
5. Wyznaczenie w oparciu o moduł zasilania powierzchni niezbędnej do pokrycia 50-70% poboru wody,
6. Wybór właściwie określonego obszaru zasobowego wg procedury 4a lub 4b.

Rzeczywiste wyznaczanie obszaru zasobowego przy użyciu powyższych zasad pokazano na przykładzie jednowarstwowego modelu matematycznego wykonanego na potrzeby weryfikacji zasobów i określenia stref ochronnych ujęcia „Mała

Nieszawka” zaopatrującego w wodę Toruń (rys. 6.2-3). Zwierciadło wody na większości obszaru badań ma swobodny charakter, naturalny spadek hydrauliczny wynosi $0,002 \pm 0,01$. Miąższość warstwy na przeważającym obszarze określono na $30 \div 40$ m, a współczynnik filtracji zmienia się w granicach $0,7 \div 2,0$ m/h. Analizowane ujęcie ma postać bariery rozciągniętej wzdłuż doliny Wisły. Obszar spływu wyznaczony dla sumarycznej wydajności bariery $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{h}$ sięga w górę strumienia na odległość przekraczającą 14 km. Naturalne wahania zwierciadła wód ujętego poziomu wynoszą w skali roku ok. 1,5 m. Ze względu na brak izolacji izochrona poziomego dopływu wyznaczająca zasięg strefy ochronnej ma wartość 25 lat. Powierzchnia obszaru zasobowego wyznaczonego wg kryterium depresji (ograniczona wielkością depresji 2,0 m) wynosi ok. 80 km^2 , a wg kryterium czasu dopływu wody – 30 km^2 . W oparciu o moduł zasobowy wynoszący wg badań modelowych $9,3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}^2$ (na obszarze ograniczonym izolinią depresji 2,0 m) obliczono powierzchnię obszaru zasilania potrzebną do pokrycia 70% symulowanego poboru. Wynosi ona 90 km^2 . Zbliżoną powierzchnię posiada obszar zasobowy wyznaczony wg kryterium depresji i z tego względu ta właśnie metoda jest właściwa do określenia obszaru zasobowego dla prognozowanej wydajności $1200 \text{ m}^3/\text{h}$.



Rys. 6.2-3. Przykład wyznaczania obszaru zasobowego i obszaru wpływu dla ujęcia „Mała Nieszawka” k. Torunia.

6.3. Ustalanie zasobów eksploatacyjnych metodą modelowania matematycznego

Badania modelowe do oceny zasobów eksploatacyjnych wód podziemnych są stosowane w Polsce od połowy lat 60. XX wieku (Szczepański, 1974). Stosowane początkowo metody analogowe zostały w połowie lat 70. uzupełnione, a później zastąpione modelowaniem matematycznym.

Powszechne zastosowanie modelowania do oceny zasobów eksploatacyjnych ujęć wynika z faktu, że stosowane dotąd obliczenia hydrodynamiczne bazowały na daleko idących uproszczeniach. Dokumentowanie zasobów to przedsięwzięcie złożone ze względu na zmienność warunków hydrodynamicznych (parametry, warunki zasilania i krążenia wód), budowę geologiczną zbiorników i niewystarczające rozpoznanie tych elementów do schematu hydrogeologicznego (rozdz. 4.1). Zastosowanie modelowania pozwala na weryfikację tego schematu i uwiarygodnienie prognozy hydrogeologicznej (zasobowej), z uwagi na wielokryterialny i wielowariantowy charakter dochodzenia do rozwiązań optymalnych.

Problem budowy modeli matematycznych na potrzeby dokumentowania zasobów wód podziemnych jest również zagadnieniem złożonym z uwagi na wielkość ujęć (małe, duże), ich typ (infiltracyjne, podziemne), współdziałanie studni oraz różnorodność jednostek hydrogeologicznych, w których pracują. Wspólnymi, niezależnymi od wielkości ujęcia, problemami są: wielkość obszaru i skala modelu, jego struktura wynikająca z warstwowości systemu wodonośnego oraz nierównomierność rozpoznania obszaru badań modelowych.

Do ustalania zasobów eksploatacyjnych ujęć należy tworzyć modele matematyczne o parametrach rozłożonych, pozwalające na ocenę skutków eksploatacji wód prowadzonej w zbiorniku. Takie modele pozwalają także na wykonywanie bilansów wodnych w obrębie jednostki hydrogeologicznej, w tym wydzielanie wielkości zasobów dodatkowych wzbudzanych w wyniku pracy ujęcia (rys. 2.1 w rozdziale 2) oraz uwzględnianie współdziałania pracujących w niej ujęć i systemów drenażowych (odwadniających). Metody modelowania matematycznego można wykorzystywać także do analiz czasu przepływu wody, a więc w konsekwencji do wyznaczania granic stref ochronnych ujęć (tereny ochrony pośredniej). Zasięg stref ochronnych obliczany jest na podstawie siatki hydrodynamicznej otrzymanej jako wynik prognozy modelowej.

6.3.1. Prace i badania na potrzeby modelowania

Powodzenie badań modelowych, oprócz posiadania programów, maszyn cyfrowych (nie licząc umiejętności zawodowych), zależy szczególnie od rozpoznania podstawowych danych hydrogeologicznych, pozyskiwanych poprzez realizację projektu prac geologicznych (rozdz. 5). Dla wykonania prognozy hydrogeologicznej tą metodą należy zrealizować kilka etapów tworzenia modelu matematycznego wg schematu nakreślonego na rysunku 6.3-1:



Rys. 6.3-1. Postępowanie w badaniach modelowych.

Cele zadania geologicznego, a tym samym i badań modelowych formułuje zamawiający lub wynikają one z potrzeb zadania nadrzędnego, jakim jest ustalenie zasobów eksploatacyjnych. Sformułowanie zadań badawczych decyduje o konstrukcji modelu lub modeli matematycznych, o jego zakresie rzeczowym, czasie i kosztach badań. Należy przy tym zauważyć, że często trudno jest spełnić wszystkie postawione do rozstrzygnięcia zadania poprzez budowę jednego modelu. Związane jest to najczęściej z różną szczegółowością potrzebnych rozwiązań dla poszczególnych zadań badawczych, a więc ze skalą modelu i stopniem skomplikowania hydrogeologicznych i technicznych warunków kształtowania się zasobów eksploatacyjnych ujęć i sposobem ich eksploatacji. W szczególnie złożonych warunkach zaleca się stworzenie modelu regionalnego, a po jego zweryfikowaniu wydzielenie modelu szczegółowego (lokalnego) i wykonanie na nim obliczeń prognostycznych.

Niezależnie od stosowanej metody modelowania zbudowanie modelu wymaga przeprowadzenia analizy systemowej obiektu (jednostki – struktury hydrogeologicznej), której podstawy zostały przedstawione w rozdziale 4.1. Ujęcie wód podziemnych, dla którego należy określić wielkość zasobów jest zwykle zlokalizowane w jednostce hydrogeologicznej o mniej lub bardziej wiarygodnie rozpoznanych zasobach odnawialnych i dyspozycyjnych, kształtowanych pod wpływem uwarunkowań naturalnych:

- budowy geologicznej,
- warunków hydrogeologicznych wynikających z tej budowy i parametrów użytkowych poziomów wodonośnych,
- intensywności i rodzaju zasilania,
- kontaktów hydraulicznych wód podziemnych z powierzchniowymi,
- jakości wód i jej zagrożeń,
- prowadzonej już eksploatacji wód podziemnych lub odwodnienia górniczego.

Warunki te mogą ulegać lokalnym zmianom wynikającym z pracy ujęcia, dla którego określamy wielkość zasobów eksploatacyjnych. Na ich kształtowanie wpływ mogą wywierać także czynniki antropogeniczne, jak np. zagospodarowanie powierzchni i sposób jej wykorzystania, praca czynnego już ujęcia lub systemu odwadniającego, złoża kopalin działające w użytkowym poziomie wodonośnym.

Wydzielenie jednostki hydrogeologicznej do badań modelowych następuje na podstawie istniejącego lub zaprojektowanego (i zrealizowanego) rozpoznania hydrogeologicznego, hydrologicznego, geofizycznego itd. Jednostka może być wydzielona w naturalnych granicach hydrostrukturalnych (wychodnie, uskoki, itp.) lub hydrodynamicznych (działy wodne, strefy zasilania i drenażu). Należy przy tym określić jej związek z nadległymi i podległymi poziomami wodonośnymi oraz wodami powierzchniowymi. Obiektem badań jest często fragment jednostki hydrogeologicznej związany z obszarem oddziaływania i zasilania ujęcia wody. Szczególną uwagę trzeba wówczas zwrócić na konieczność zachowania relacji między obszarem badań stricte hydrogeologicznych, tj. realizowanych na terenie ujęcia (próbné pompowania), a obszarem rozpoznania regionalnego do badań modelowych. Ustalenie tych relacji jest konieczne celem sporządzenia projektu, realizacji badań i konstrukcji modelu hydrogeologicznego dla obliczeń modelowych.

Projekt badań modelowych jest bardzo ważnym etapem, od którego zależy uzyskanie wystarczających i wiarygodnych danych do modelowania. Projekt powinien przewidywać dokonanie oceny istniejącego rozpoznania hydrostrukturalnych warunków krążenia wód, a w przypadku modeli migracji zanieczyszczeń również stanu jakości wód i ich zagrożeń. W projekcie badań należy zwrócić uwagę na równomierność rozpoznania i zróżnicowanie hydrogeologiczne jednostki, a także na konieczność uzyskania informacji o reakcji systemu na pobór wód oraz na zmiany krążenia wód i zasilania.

Bardzo często dla oceny zasobów eksploatacyjnych ujęć badania modelowe nie są projektowane, a potrzebę ich wykonania dostrzega się dopiero na etapie

sporządzania dokumentacji hydrogeologicznej ujęcia. Wówczas prowadzenie badań modelowych można oprzeć o dodatkowo opracowane założenia projektowe tych badań, uzgodnione pomiędzy zamawiającym i prowadzącym zadanie hydrogeologiczne.

Rozpoznanie hydrogeologiczne dla sporządzenia schematu warunków hydrogeologicznych decyduje o jakości i powodzeniu badań modelowych. Rozpoznanie to musi zawsze obejmować obszar większy od przewidywanego obszaru badań modelowych. Efektem rozpoznania jest model hydrogeologiczny (obliczeniowy) z zakresem danych, wymaganych stosownymi programami do budowy modeli matematycznych.

Symulacje komputerowe zmierzające do określenia zasobów eksploatacyjnych ujęcia wykonuje się zwykle dla ustalonych warunków filtracji zdeterminowanych wybranymi wydajnościami studni (maksymalne, dopuszczalne), wymogami ochrony zasobów dyspozycyjnych zbiornika wód podziemnych i ochrony środowiska (racjonalne) oraz ochrony ilościowej i jakościowej eksploatowanych wód (optymalne). W stosowanych programach obliczeniowych istnieje także możliwość przeprowadzenia obliczeń w warunkach przepływów nieustalonych dla systemów słabo odnawialnych (nieodnawialnych) lub odnawialnych okresowo. Programy obliczeniowe umożliwiają również symulację prognostyczną transportu masy (migracja zanieczyszczeń) z naturalnych lub antropogenicznych powierzchniowych ognisk zanieczyszczeń do warstwy wodonośnej i w strumieniu wód podziemnych do ujęcia.

6.3.2. Konstrukcja modelu matematycznego

Strukturę modelu matematycznego, czyli przestrzenny rozkład warstw wodonośnych mogących brać udział w systemie kształtowania się zasobów narzuca generalnie model hydrogeologiczny. Powinien być on opisany przestrzennym rozkładem parametrów hydrogeologicznych oraz kierunkami przepływu wody (poziomy w warstwach wodonośnych, pionowy w słabo przepuszczalnych i strefie aeracji). W obrębie takiego modelu, po niezbędnych uproszczeniach, uśrednieniach i agregacjach (łączenie warstw, określenie przeciekania, przepływów poprzez okna hydrogeologiczne, uskoki, itp.) dokonuje się zamiany systemu ciągłej filtracji na zapis dyskretyzujących ją równań między węzłami siatki obliczeniowej o wybranym kroku.

Struktura modelu matematycznego powinna odzwierciedlać wielowarstwowość jednostki hydrogeologicznej. Nie można zastępować rzeczywistego systemu wielowarstwowego przez model jednowarstwowy, sprowadzając go do odwzorowania wypadkowego układu krążenia, o uśrednionych parametrach. Na modelu takim nie można byłoby właściwie określić granic obszaru zasilania, czasu wymiany wód w warstwie wodonośnej i czasu przepływu do niej zanieczyszczeń z powierzchni terenu, niezbędnych do ustalenia strefy ochronnej ujęcia wody. Z analiz wiarygodności dotąd wykonanych prognoz modelowych wynika, że najczęstszym przypadkiem braku ich zgodności było nieuwzględnianie wielowar-

stwowości ujmowanego zbiornika i tym samym zróżnicowanych warunków zasilania warstw i krążenia wód. Można stwierdzić za Emsellemem (1975), że „*Jeśli uprości się zbytnio strukturę modelu i zdeformuje rzeczywistość, to prognozy staną się nierealne. Jeżeli natomiast uwzględni się złożoność rzeczywistości i szuka się sposobów jej przedstawienia otrzymuje się zawsze lepsze wyniki*”.

Podstawę do określenia struktury modelu stanowi mapa dokumentacyjna zawierająca wyznaczenie: granic modelu w obrębie poszczególnych warstw, podział dyskretyzacyjny modelu, rozkład warunków brzegowych (zewnętrznych i wewnętrznych) ze wskazaniem lokalizacji bloków dyskretyzacyjnych (węzłów siatki) z zadawanymi wymuszeniami (studnie, ujęcia, bariery odwadniające, ciek i zbiorniki wód). Na tym etapie modelowania dokonuje się także transformacji parametrów hydrogeologicznych w postaci map i tabel na dyskretne parametry modelu (wartości dyskretne w blokach i węzłach siatki).

Obszar badań modelowych powinien wynikać z charakteru zbiornika i jego granic, wielkości projektowanej eksploatacji ujęcia oraz konieczności uwzględnienia współdziałania z innymi ujęciami wód podziemnych (i/lub systemami drenażowymi). Granice modelu powinny być odpowiednio odległe od rejonów symulowanej eksploatacji w taki sposób, aby objęły cały spodziewany zasięg obszaru zasilania oraz zasięg wpływu ujęć, z których pobór symulowany ma być na modelu. Rzadko kiedy jednak granice modelu konstruowanego dla ustalenia zasobów eksploatacyjnych mogą być oparte na naturalnych granicach hydrodynamicznych, jak rzeki, wododziały, wychodnie warstw. Zwykle wydziela się do modelowania fragment strumienia wód podziemnych i ogranicza się go warunkami I-go rodzaju $H = \text{const}$. Ważna jest wówczas odpowiednio duża powierzchnia obszaru badań modelowych, aby warunki te (o nieograniczonych możliwościach „dostarczania” wody do modelowanego obszaru) nie wpływały w istotny sposób na bilans zasilania ujęć.

Skala modelu wiąże się z jednej strony z wielkością obszaru, z drugiej zaś z charakterem jednostki, granicami jej zasilania, koniecznością odwzorowania studni itp. Dla ujęć infiltracyjnych oraz ujmujących poziom wody gruntowej o zróżnicowanych warunkach zasilania i drenażu, będą to modele szczegółowe w skalach od 1:1 000 do 1:25 000, zaś dla ujęć wód głębinnych – modele w skalach 1:25 000 – 1:50 000. Możliwość właściwego odwzorowania w wybranej skali granic zasilania, stref drenażu i lokalizacji punktów poboru (studni, ujęć) decyduje o wiarygodności modelu i prognoz modelowych.

Warunki brzegowe modelu I, II i III rodzaju (rozdz. 4.1.) powinny zgodnie z założeniami algorytmu obliczeniowego odwzorowywać istniejący układ hydrodynamiczny badanej jednostki lub jej części. Ze względu na jednoznaczność rozwiązania równania filtracji warunki brzegowe I rodzaju powinny być zadawane na granicy strumieni dopływających i odpływających z obszaru badań. Stosowanie warunków brzegowych I rodzaju znacząco wpływa na bilans przepływu wody na modelu i deformacje siatki hydrodynamicznej. Dlatego ich wprowadzenie musi opierać się na wiarygodnym rozpoznaniu rzędnych zwierciadła wody poszczególnych warstw, dla których określany jest warunek brzegowy I rodzaju.

Warunki brzegowe II rodzaju reprezentują wielkości wydatków wody: zasila-
nia infiltracyjnego i drenażu (eksploatacji) na całym obszarze badań (obszar
pokryty siatką dyskretyzacyjną).

Cieki i zbiorniki wodne w większości przypadków powinny być odwzorowane
warunkami brzegowymi III rodzaju. W tym przypadku ważne jest określenie
stanów cieków i różnicy ciśnień między ciekiem i warstwą wodonośną, pozwala-
jących określić parametr oporu filtracyjnego między tymi elementami. Jedynie
na granicach zewnętrznych modelu, w przypadku stwierdzonej pełnej więzi hy-
draulicznej, dopuszczalne jest odwzorowanie cieków powierzchniowych warun-
kami I rodzaju.

Uwzględnienie odsączania z warstw wodonośnych i słabo przepuszczalnych
jest możliwe tylko w modelach niestacjonarnych (nieustalonych). Wówczas za-
dawane warunki I, II i III rodzaju muszą być określone funkcją zmian w czasie:
 $Q=f(t)$, $H=f(t)$.

Krok siatki dyskretyzacyjnej decyduje o szczegółowości wyników otrzymywa-
nych w punktach poboru wody. Im jest mniejszy tym otrzymana w wyniku symu-
lacji modelowej depresja w bloku modelującym pobór (war. II rodzaju $Q<0$)
jest bardziej zbliżona do rzeczywistej depresji w warstwie wodonośnej. Optymalny
sposób dyskretyzacji polega więc na zadawaniu zmiennego kroku siatki – małe-
go w rejonach symulowanego poboru i większego w rejonach oddalonych od
symulowanych ujęć. Zmienny krok siatki powinien być stosowany także z uwagi
na lepszą możliwość odwzorowania elementów strukturalnych modelowanego
systemu wodonośnego takich jak: geometria naturalnych ciągów drenażowych
(doliny rzeczne), granice występowania warstw wodonośnych, granice stwierdzo-
nych nieciągłości (tektonika) czy wreszcie granice samego modelu.

Parametry hydrogeologiczne (filtracyjne) powinny być rozpoznane w grani-
cach całego obszaru badań modelowych a nie tylko w rejonie, dla którego okre-
ślane mają być na modelu zasoby eksploatacyjne. Rozpoznanie parametryczne
dotyczy wszystkich warstw wodonośnych i rozdzielających je warstw słabo prze-
puszczalnych oraz strefy aeracji tworzących łącznie system krążenia wód pod-
ziemnych. Ustalić należy wartości i przestrzenną zmienność współczynnika fil-
tracji, miąższości i przewodności oraz współczynnika odsączalności (w przypadku
sporządzania modelu filtracji nieustalonej).

6.3.3. Etapowanie badań modelowych

Po skonstruowaniu modelu matematycznego w wybranym programie oblicze-
niowym można przystąpić do realizacji obliczeń, które składają się z kilku eta-
pów:

1° – **Identyfikacja modelu.** Jest to niezwykle ważna czynność, w ramach któ-
rej stosuje się procedury mające na celu określenie dla wybranej struktury mo-
delu ilościowych wartości parametrów i warunków brzegowych. Proces identyfi-
kacji polega na rozwiązywaniu tzw. zadań odwrotnych, tj. porównywaniu pracy
modelu o pierwotnie przyjętych parametrach i warunkach brzegowych (które

mogą być niedostatecznie rozpoznane) z pracą systemu rzeczywistego. Procedura ta posiada zawsze charakter iteracyjny z tego powodu, że nigdy nie dysponuje się pełnym rozpoznaniem warunków hydrostrukturalnych (parametry hydrogeologiczne, warunki brzegowe, zasilanie). Proces identyfikacji realizuje się najczęściej metodą kolejnych przybliżeń. Oceny poprawności przeprowadzenia tego etapu dokonuje się po spełnieniu kryterium zgodności modelu matematycznego z modelem hydrogeologicznym, czyli porównaniu obliczonych na modelu stanów wód w jego granicach z rzeczywistymi (zmierzonymi) wysokościami stanów (mapa hydroizohips), a także generowanych przez model wydatków z wydajnościami rzeczywistymi (drenaże rzeczne). Zwykle porównania stanów dokonywane są w wybranych punktach pomiaru zwierciadła wody, przy zachowaniu kształtu powierzchni piezometrycznej badanych warstw wodonośnych, gradientów i kierunków przepływu wód.

2° – **Weryfikacja modelu.** W tym etapie modelowania dokonuje się porównania reakcji modelu na zadane wymuszenia z reakcjami systemu rzeczywistego, a następnie analizuje się zgodności między danymi generowanymi przez oba te układy. Zwykle wykorzystuje się w tym celu stany dobrze rozpoznane w modelowanym obszarze, w warunkach naturalnych (pierwotnych, początkowych) i eksploatacyjnych (odtworzenie przebiegu eksploatacji czynnych ujęć, przebieg próbnego pompowania, itp.). Powinno być przy tym zasadą, że do weryfikacji wykorzystuje się inny zestaw danych niż do identyfikacji (tarowania) modelu.

Zweryfikowany model powinien spełniać kryteria bilansowe przepływów ze spodziewaną dokładnością oraz wymagania co do zgodności poszczególnych składników bilansowych z wartościami określonymi inną niż modelowanie metodą: poprzez sporządzenie hydrologicznego bilansu wodnego, porównanie przepływów w ciekach, itp. W procedurze weryfikacyjnej określa się zazwyczaj na koniec stopień zgodności modelu z systemem rzeczywistym w odniesieniu do stanów i wydatków wody.

3° – **Prognozy symulacyjne.** Po prawidłowo przeprowadzonych etapach identyfikacji i weryfikacji modelu można przystąpić do obliczeń prognostycznych, najczęściej wielowariantowych, zmierzających do ustalenia wielkości zasobów eksploatacyjnych oraz optymalnych parametrów eksploatacyjnych ujęcia. W poszczególnych rozwiązaniach wariantowych zmianom ulegają warunki brzegowe wewnętrzne: ilość studni, ich rozmieszczenie oraz wielkości wydatku (lub depresji), w zależności od zadań stawianych przez hydrogeologa. Kryteriami wyboru optymalnego wariantu warunków poboru wód jest ochrona zasobów dyspozycyjnych zbiornika, z którego prowadzi się (lub planuje) eksploatację, dopuszczalna depresja ujęcia dokumentowanego oraz ujęć sąsiadujących (stopień współdziałania), a także niedopuszczenie do geogenicznego lub antropogenicznego zanieczyszczenia wód podziemnych.

W każdym wariantcie obliczeniowym można uzyskać siatki hydrodynamiczne oraz wyznaczyć granice obszaru spływu wód do ujęcia, kierunki przepływu (linie prądu), granice obszaru wpływu (zasięgu) ujęcia i wreszcie granice obszaru za-

sobowego (rozdz. 6.2). Wyznaczenie tych obszarów pozwala na poprawne określenie warunków ochrony ujęcia poprzez określenie granic stref jego ochrony ilościowej i jakościowej.

6.3.4. Dokumentowanie prac modelowych

Badania modelowe zrealizowane na potrzeby określenia zasobów eksploatacyjnych ujęcia wody powinny zostać podsumowane **dokumentacją prac modelowych**, traktowaną jako integralna część hydrogeologicznej dokumentacji zasobowej. Dokumentacja prac modelowych może stanowić samodzielne opracowanie i występować jako odrębny załącznik do dokumentacji zasobowej, może też być włączona do jej zasadniczej części w postaci odpowiednich rozdziałów.

Część tekstowa dokumentacji prac modelowych powinna zawierać:

- 1) Określenie celu badań, wskazanie dokumentacji hydrogeologicznej zawierającej szczegółowy opis budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych jako podstawy wykonania prac modelowych.
- 2) Określenie obszaru i skali modelu.
- 3) Syntetyczny opis modelu hydrogeologicznego jednostki i przyjętych dla niego zasad schematyzacji modelowej.
- 4) Sposób przygotowania map parametrycznych do modelu.
- 5) Opis konstrukcji modelu; krok dyskretyzacji, warunki brzegowe, zróżnicowanie parametrów filtracyjnych i zasilania modelu, stan hydrodynamiczny przyjęty jako warunki początkowe.
- 6) Opis algorytmu obliczeń i uzasadnienie wyboru programu obliczeniowego.
- 7) Opis metodyki identyfikacji i weryfikacji modelu ze wskazaniem przyjętych kryteriów tarowania, np. zgodność ciśnień piezometrycznych zmierzonych i obliczonych na modelu (hydroizohipsy lub punkty reperowe), zgodność parametrów bilansowych otrzymanych na modelu z obliczonymi przy użyciu innych metod.
- 8) Udokumentowanie identyfikacji i weryfikacji modelu poprzez wskazanie stopnia spełnienia kryteriów tarowania. Dla kryterium zgodności ciśnień piezometrycznych najlepszą formą udokumentowania wyników prac jest:
 - zamieszczenie tabeli porównawczej, zawierającej ciśnienia piezometryczne zmierzone i obliczone, bądź przedstawienie na jednej planszy przebiegu hydroizohips wykreślonych w oparciu o pomiary terenowe oraz hydroizohips otrzymanych w wyniku obliczeń modelowych,
 - przedstawienie w formie tabelarycznej lub graficznej wyników odwzorowania na modelu próbnych pompowań badawczych.

Dla kryterium bilansowego najlepszą formą jest przedstawienie procentowych różnic poszczególnych składników bilansu. Podsumowaniem identyfikacji modelu powinna być tabela bilansowa uwzględniająca wszystkie źródła przychodów i rozchodów wód na modelu z podziałem na wydzielone rejony bilansowe i modelowane warstwy wodonośne.

- 9) Charakterystyka kryteriów przyjętych do obliczenia (optymalizacji) zasobów eksploatacyjnych (np. dopuszczalne depresje, dopuszczalna zmiana struktury bilansu, dopuszczalny zasięg oddziaływania, maksymalna rozległość obszaru zasobowego lub inne).
- 10) Opis symulacji modelowych wykonanych dla oceny zasobów eksploatacyjnych, w tym szczegółowo wybranego wariantu optymalnego.
- 11) Ocena wiarygodności stworzonego modelu i wykonanych symulacji.

W części graficznej dokumentacji badań modelowych powinny się znaleźć następujące załączniki:

- mapa dokumentacyjna badań modelowych przedstawiająca granice modelu w obrębie poszczególnych warstw, rozkład warunków brzegowych ze wskazaniem lokalizacji bloków z zadawanymi wymuszeniami (ujęcia, cieki i inne), siatkę dyskretyzacyjną dla poszczególnych modelowanych warstw wodonośnych,
- mapy hydroizohips warunków początkowych modelowanych warstw wodonośnych z podaniem daty mierzonego stanu,
- mapy hydroizohips odtwarzające na modelu warunki (stany) początkowe, a także stany w okresie długotrwałych pompowań symulowanych dla weryfikacji modelu,
- wynikowe mapy hydroizohips stosownie do wykonanych wielowariantowych symulacji i potrzeb hydrogeologicznej dokumentacji zasobowej,
- mapy parametrów filtracyjnych wszystkich warstw wodonośnych a także warstw słabo przepuszczalnych,
- mapa warunków zasilania infiltracyjnego modelu,
- mapy poborów (wydatków) wody w poszczególnych wykonanych symulacjach.

Skale tych map powinny wynikać z potrzeb hydrogeologicznej dokumentacji zasobowej (zwykle od 1:10 000 do 1: 50 000).

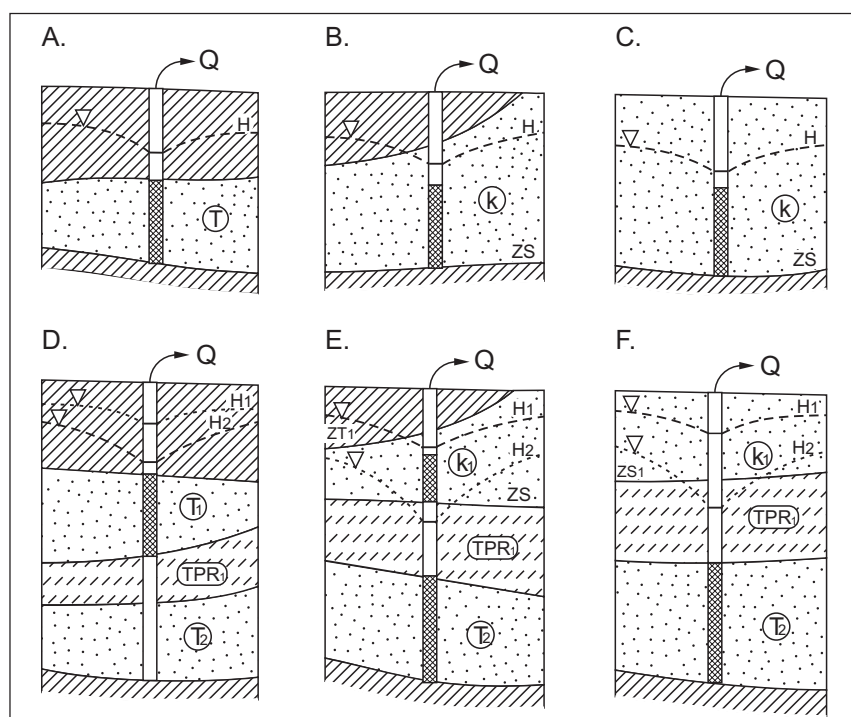
6.3.5. Stosowane programy obliczeniowe

W polskiej praktyce hydrogeologicznej najczęściej stosowanymi programami obliczeniowymi są pakiety z bibliotek HYDRYLIB i MODFLOW*. Na każdy z pakietów składa się kilka lub kilkanaście programów; oprócz sensu stricto symulacyjnych, również programy pomocnicze umożliwiające przygotowanie danych, ich poprawianie, wizualizację, programy do kreślenia map, itp. Poszczególne pakiety przeznaczone są do symulacji przepływu wód podziemnych i migracji zanieczyszczeń w warunkach filtracji ustalonej i nieustalonej, w systemie jedno- lub wielowarstwowym oraz dla warunków swobodnego, naporowego i mieszanego zwierciadła wody.

* W niektórych ośrodkach stosowane są także inne programy np. ANPLA lub rekomendowane przez Waterloo Hydrogeologic oraz Scientific Software Group (np: Aqua 3D, Groundwater Vistas, GMS, Feflow, i inne).

Programy symulacyjne z biblioteki HYDRYLIB

Biblioteka programowa zorganizowana jest w postaci pakietów umożliwiających wybór programu w zależności od przyjętej schematyzacji warunków hydrogeologicznych i rodzaju rozwiązywanego problemu. Podstawowe schematy warunków hydrogeologicznych wykorzystywane w modelowaniu zasobów wód podziemnych programami biblioteki HYDRYLIB przedstawiono na rysunku 6.3-2.



Rys. 6.3-2. Schematy typowych warunków hydrogeologicznych możliwych do symulacji programami obliczeniowymi z biblioteki HYDRYLIB (Kulma, 1995).

A,B,C – pojedyncza warstwa wodonośna o zwierciadle napiętym (A), mieszanym (B) i swobodnym (C), D, E, F – układ wielowarstwowy z pierwszą warstwą o zwierciadle napiętym (D), mieszanym (E) lub swobodnym (F).

Każdy z pakietów stwarza możliwości przygotowania danych potrzebnych do obliczeń symulacyjnych, ich przeprowadzenia oraz prezentacji uzyskanych rezultatów. Podstawowymi pakietami programowymi są:

- PAKSP – przeznaczony do symulacji przepływu wód podziemnych w ustalonych warunkach filtracji dla pojedynczej warstwy wodonośnej.
- PAKEPD – umożliwia symulację przepływu w warunkach nieustalonych dla pojedynczej warstwy wodonośnej.

PAKAR	–	wykorzystywany do symulacji przepływu wody w pojedynczej warstwie wodonośnej z uwzględnieniem wpływu strefy aeracji na przebieg infiltracji efektywnej.
PAKSW	–	umożliwiający symulację przepływu wody w ustalonych warunkach filtracji dla układu kilku warstw wodonośnych przedzielonych warstwami słabo przepuszczalnymi.
PAKSWOR	–	modyfikacja pakietu PAKSW dopuszczająca możliwość całkowitego odwodnienia pierwszej warstwy wodonośnej.
PAKEW	–	przeznaczony do modelowania przepływu wody w warunkach filtracji nieustalonych dla układu kilku warstw wodonośnych przedzielonych warstwami słabo przepuszczalnymi.
PAKEWN	–	stanowi modyfikację programów obliczeniowych z pakietu PAKEW uwzględniającą zjawiska zachodzące w nakładzie pierwszej warstwy wodonośnej. Zakłada się, że w tym fragmencie obszaru filtracji (warstwie słabo przepuszczalnej) formuje się swobodne zwierciadło wód podziemnych, którego stan jest uzależniony od zmian powierzchniowego zasilania pochodzącego z infiltracji opadów atmosferycznych oraz od zmian stanu wód w warstwie wodonośnej.
PAKEWP	–	modyfikacja pakietu PAKEW uwzględniająca szczególną rolę warstw słabo przepuszczalnych. Programy z tego pakietu stosuje się, gdy współczynniki inercji tych warstw są znaczne i proces stabilizacji przepływu w ich obrębie zachodzi ze znacznym opóźnieniem.
PAKOD2	–	wykorzystywany do symulacji przepływu wody w nieustalonych warunkach filtracji, dla układu dwóch warstw wodonośnych przedzielonych warstwą słabo przepuszczalną, z możliwością jej osuszenia w wyniku intensywnej eksploatacji ujęć.
PAKOD3	–	przeznaczony do modelowania nieustalonego przepływu filtracyjnego w układzie trzech warstw wodonośnych przedzielonych warstwami słabo przepuszczalnymi z możliwością osuszenia pierwszej i drugiej warstwy w wyniku intensywnej eksploatacji ujęć.
PAKSCH	–	pakiet programów obliczeniowych przeznaczonych do symulacji transportu zanieczyszczeń rozpuszczalnych w wodzie, w warunkach nieustalonych na bazie ustalonego stanu hydrodynamicznego, dla pojedynczej warstwy wodonośnej.
PAKECH	–	pakiet przeznaczony do symulacji rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń rozpuszczalnych w wodzie w reżimie nieustalonym, przy jednoczesnej symulacji nieustalonego przepływu wody dla układu jednej warstwy wodonośnej.
PAKSWCH	–	pakiet programów symulacyjnych wykorzystywanych do prognozy rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń rozpuszczalnych w wodzie w warunkach nieustalonych na bazie ustalonego zwierciadła wody dla układu kilku warstw wodonośnych rozdzielonych warstwami słabo przepuszczalnymi.

Parametry modelu zorganizowane są w postaci tablic o wymiarach odpowiadających przyjętej siatce dyskretyzacyjnej (liczba wierszy, liczba kolumn). Rodzaj i kolejność stosowania tablic zależą od programu obliczeniowego (tab. 6.3-1). W bibliotece HYDRYLIB do operacji wczytywania, poprawia-

Tabela 6.3-1. Zestawienie tablic danych do podstawowych programów symulacyjnych z biblioteki HYDRYLIB.

Lp.	Nazwa tablicy wczytywanej programem KRET	Symbol tablicy danych	Ustalone warunki filtracji						Nieustalone warunki filtracji					
			Model jednowars- towy (PAKSP)			Model wielowars- towy (PAKSW)			Model jednowars- towy (PAKEPD)			Model wielowars- towy (PAKEW)		
			Schemat warunków hydrogeologicznych*						Schemat warunków hydrogeologicznych*					
			A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
1.	Przewodność warstwy wodonośnej	T	X			X			X			X		
2.	Współczynnik filtracji	K		X	X		X	X		X	X		X	X
3.	Informacyjna	INF	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4.	Spąg warstwy wodonośnej	ZS		X	X		X	X		X	X		X	X
5.	Strop warstwy wodonośnej	ZT		X			X			X			X	
6.	Zasilanie i wydatki wody (typ 2)	Q	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7.	Rzędne zwierciadła wody	H	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
8.	Wydatki studni (typ 22)	QST	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
9.	Rzędne położenia zw. wody dla warunków III rodzaju**	HGWB	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
10.	Przewodnictwo pionowe	TPR				X	X	X				X	X	X
11.	Zasobność sprężysta	S							X	X		X	X	
12.	Współczynnik odsączalności	MI								X	X		X	X
13.	Informacyjna dla warunków III rodzaju (typy zmian)**	ITYP							X	X	X	X	X	X
14.	Maksymalny gradient pionowy dla warunków III rodzaju (głębokość ciekłu)**	GL							X	X	X	X	X	X

*Oznaczenia warunków hydrogeologicznych wg rysunku 6.3-2: pojedyncza warstwa wodonośna o zwierciadle naporowym (A), mieszanym (B) i swobodnym (C) oraz układ wielowarstwowy o naporowym (D), mieszanym (E) bądź swobodnym (F) charakterze zwierciadła w pierwszej warstwie.

**Tablice te występują opcjonalnie (tzn. jeżeli w tablicy INF występuje jeden z symboli oznaczających warunki III rodzaju).

nia i wizualizacji tablic parametrów wykorzystywany jest program o nazwie KRET.

Pakiety z biblioteki HYDRYLIB wykorzystuje się zwykle dla modelowania procesów filtracji w układach jedno-, dwu- i trójwarstwowych. Do symulowania przepływu wody w strukturach o dużej ilości warstw korzystniejszym jest stosowanie programów obliczeniowych z programu MODFLOW.

Program MODFLOW

Biblioteka programów związanych z programem MODFLOW obejmuje szereg pakietów, których zadaniem jest przygotowywanie danych wejściowych do obliczeń, realizacja obliczeń oraz analiza i wizualizacja wyników.

PROCESSING MODFLOW (PM)

Jest to program sterujący wprowadzaniem i wyprowadzaniem danych dla programów MODFLOW, MODPATH, MODPATH-PLOT, MODINV i MT3D. Można powiedzieć, że program ten łączy w sobie cechy programu KRET oraz programów wizualizacyjnych biblioteki HYDRYLIB, ale jest elastyczniejszy w działaniu i posiada większe możliwości wprowadzania, korekty i wizualizacji danych. Przy jego pomocy można automatycznie np. wygenerować siatkę kwadratowych lub prostokątnych bloków obliczeniowych i dopasować je do rozwiązywanego obszaru filtracji, przypisać blokom parametry hydrogeologiczne i warunki graniczne (początkowe i brzegowe) oraz sprawdzić wprowadzone dane. Program umożliwia zapisywanie wyników w postaci plików w formatach: HPGL, DXF i SURFER.

MODFLOW^{EM}

Program obliczeniowy pozwalający, przy wykorzystaniu danych przygotowanych przez PM, zamodelować 80 warstw przy podziale każdej na 15 tys. bloków obliczeniowych kwadratowych lub prostokątnych, z uwzględnieniem przepływów ustalonych i nieustalonych. Program uwzględnia typ warstw o zwierciadle swobodnym, naporowo-swobodnym i naporowym oraz anizotropię obszaru geofiltracji.

MODPATH^{EM} i MODPATH-PLOT^{EM}

Programy: symulacyjny i wizualizacji przemieszczania się cząstek zanieczyszczeń (konwekcja). Za pomocą tych programów można przedstawić także kierunki przepływu wód podziemnych (linie prądu) oraz czasy przepływu wód od wskazanego punktu na linii prądu do punktu drenażu.

MODINV^{EM}

Program służący do optymalizacji parametrów modelu, tj. pozwalający na automatyczną ich weryfikację. Umiejętnie stosowany może być bardzo dobrym narzędziem wspomagającym etap identyfikacji i weryfikacji modelu. Proces ten musi być jednak precyzyjnie kontrolowany, gdyż stosowane pro-

cedury matematyczne prowadzą do uśredniania obliczanych parametrów modelu.

MT3D

Program przeznaczony do obliczania rozkładu zanieczyszczeń na modelu trójwymiarowym. Posiada szereg zalet w porównaniu do poprzednich wersji i innych programów, np. nie generuje dyspersji numerycznej, ponieważ zamienia koncentrację rozpatrywanego składnika na określoną ilość cząstek masy. Ponadto w danym bloku modelu cząstki rozmieszcza losowo.

MODGRAF^{EM}

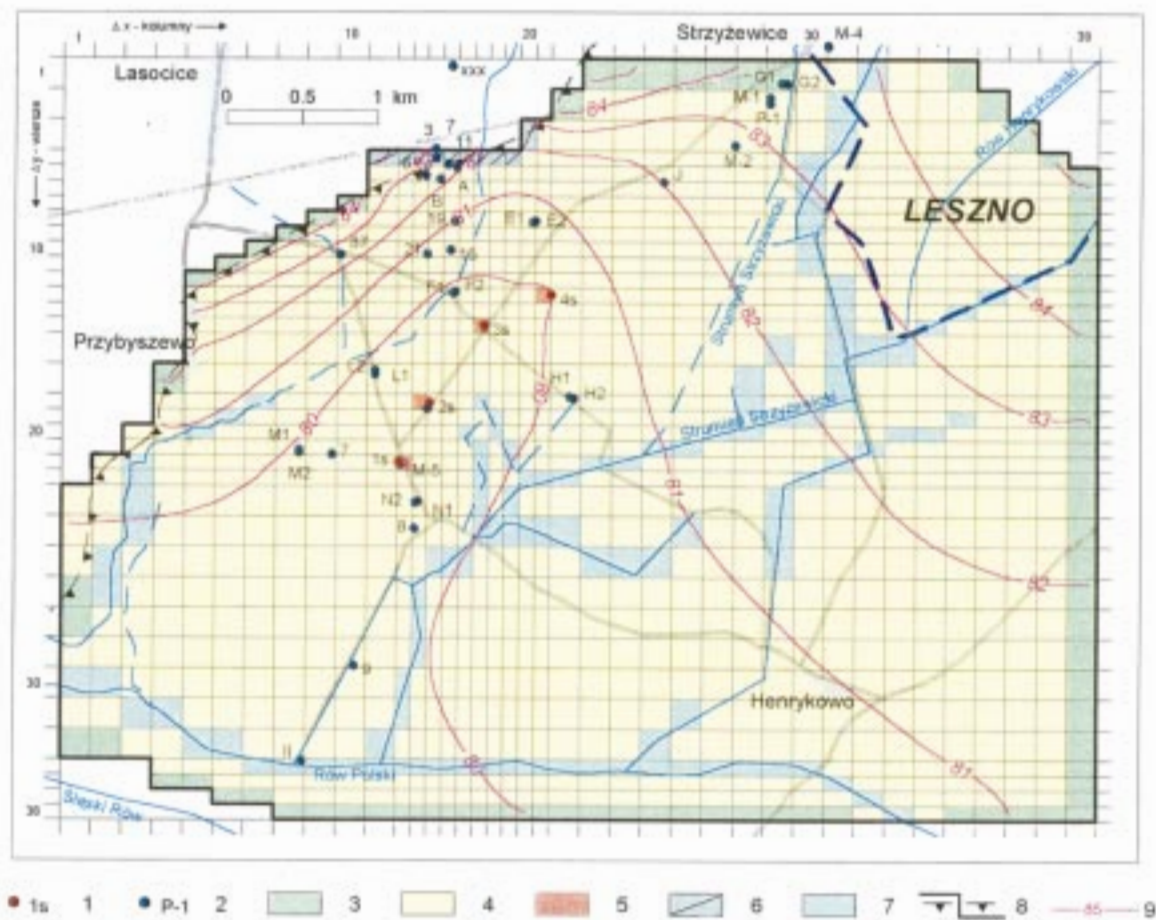
Program służący do wizualizacji wyników obliczonych za pomocą MODFLOW. Interesujący jest zawarty w MODGRAF program MODEL, przeznaczony do generowania wektorów prędkości filtracji.

MODLOCAL^{EM}

Program (kompatybilny z MODFLOW) przeznaczony do tworzenia lokalnych modeli w oparciu o modele regionalne. Stwarza możliwość, w zależności od wersji, zagęszczenia siatki bloków obliczeniowych dla wybranego fragmentu pola filtracji do 200×200 lub 400×400 .

6.3.6. Przykład modelowych obliczeń bilansu zasilania ujęcia

Na rysunku 6.3.-3 przedstawiono mapę dokumentacyjną badań modelowych wykonanych dla ustalenia zasobów eksploatacyjnych ujęcia Przybyszewo (szczegółowo omówiono ten przykład w rozdz. 8.4). Do obliczeń zastosowano jednowarstwowy model filtracji ustalonej, który zrealizowano przy użyciu programu PAKSP z biblioteki HYDRYLIB. Na rysunku przedstawiono podział obszaru filtracji na bloki obliczeniowe, sposób użycia warunków brzegowych I, II i III rodzaju oraz prognostyczną mapę hydroizohips dla poboru odpowiadającego zasobom ujęcia. Bilans przepływów wód w modelowanym obszarze wraz z określeniem wydajności ujęcia przedstawiono w tabeli 6.3-2.



Rys. 6.3-3. Podział obszaru filtracji rejonu ujęcia Przybyszewo na bloki obliczeniowe wraz z prognozowanym stanem zwierciadła wody przy eksploatacji ujęcia z wydajnością $Q=330 \text{ m}^3/\text{h}$.

1 – studnie ujęcia, 2- inne otwory hydrogeologiczne, 3 - bloki z warunkami brzegowymi I rodzaju, 4 – bloki z warunkami II rodzaju modelujące zasilenie infiltracyjne, 5 – bloki z warunkami II rodzaju modelujące eksploatację studni, 6 - bloki z warunkami II rodzaju modelujące stały dopływ z kierunku północnego, 7 - bloki z warunkami brzegowymi III rodzaju, 8 – rzeczywiste i schematyzowane granice występowania warstwy wodonośnej, 9 – hydroizohipsy dla prognozowanej eksploatacji ujęcia z wydajnością $330 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabela 6.3.-2. Bilans krążenia wód podziemnych na modelu ujęcia „Przybyszewo” według badań modelowych.

Składniki bilansu	Prognoza eksploatacji			
	Cały model pow. 29,2 km ²		Obszar zasilania ujęcia pow. 10,4 km ²	
	m ³ /d	m ³ /h	m ³ /d	m ³ /h
Przychody:				
Infiltracja	2061,0	85,9	862,6	35,9
Dopływ boczny	9429,0	392,9	4349,0	181,2
Zasilanie z cieków	804,7	33,5	2708,4	112,9
Razem:	12294,7	512,3	7920,0	330,0
Rozchody:				
Odływ poza obszar	3361,0	140,0	0,0	0,0
Drenaż do cieków	1013,7	42,2	0,0	0,0
Eksploatacja	7920,0	330,0	7920,0	330,0
Razem:	12294,7	512,3	7920,0	330,0

6.3.7. Interpretacja wyników badań modelowych

W wyniku przeprowadzonych badań modelowych otrzymujemy prognozę eksploatacyjną ujęcia, której najistotniejszymi składnikami są: bilans zasilania z wydzieleniem poszczególnych jego składników, stopień współdziałania ujęć, charakterystyka elementów strumienia filtracyjnego (obszar zasilania, obszar zasobowy, czasy przepływu) oraz depresje dla przyjętych w prognozie wielkości wydatków. Depresja w symulacji modelowej odnosi się nie do samej studni, lecz do bloku obliczeniowego modelującego pracę studni, jest więc kształtowana w pewnej odległości od rzeczywistego punktu poboru. W przypadku kwadratowej sieci dyskretyzacyjnej jest to odległość równa połowie kroku siatki. Wymowa praktyczna tak obliczonej depresji jest taka, że jest ona bliższa depresji rejonowej (patrz rozdz. 2) niż depresji w samej studni. Z tego wynika, że depresje otrzymane w wyniku symulacji modelowych nie mogą być wprost użyte do określania parametrów eksploatacyjnych ujęcia. Aby prawidłowo sformułować wniosek zasobowy, który wymaga podania depresji całkowitej w studniach ujęcia (s_c) niezbędne jest dysponowanie wynikami badań parametrów techniczno-eksploatacyjnych studni, czyli wynikami odpowiednio przeprowadzonych próbnych pompowań (rozdz. 5.5). Określenie prognozowanej depresji eksploatacyjnej polega na przyjęciu depresji rejonowej otrzymanej w wyniku symulacji modelowej oraz depresji eksploatacyjnej z badań przeprowadzonych w samej studni. Suma tych dwóch wartości określa właściwą wartość prognozowanej depresji eksploatacyjnej.

Połączenie metody modelowania matematycznego z wiarygodnym rozpoznaniem parametrów techniczno-eksploatacyjnych studni stanowi najdokładniejszy i najbardziej wiarygodny sposób sporządzania prognozy eksploatacyjnej ujęcia.

6.4. Prognozowanie zmian jakości wód i optymalizacja ich poboru

Prognoza jakości wody podziemnej pozyskiwanej na ujęciu jest zadaniem bardzo skomplikowanym. Wynika to przede wszystkim ze słabego rozpoznania parametrów i procesów decydujących o migracji substancji rozpuszczonych w wodach podziemnych, takich jak: dyspersja hydrodynamiczna, dyfuzja molekularna, reakcje pomiędzy substancją rozpuszczoną a fazą stałą szkieletu gruntowego, reakcje pomiędzy substancjami występującymi w wodzie, reakcje powodujące przekształcenia analizowanej substancji w środowisku gruntowym.

W związku z powyższym problemy migracji zanieczyszczeń rozwiązywane są najczęściej dla uproszczonych schematów uwzględniających tylko niektóre z wyżej wymienionych procesów. Są to najczęściej modele uwzględniające tylko konwekcję i dyspersję hydrodynamiczną, wykonywane do analizy migracji tzw. substancji konserwatywnych, czyli takich, które nie podlegają procesom sorpcji i przekształceniom chemicznym w środowisku gruntowym (np. chlorki).

Podejmowane są również próby wykorzystania modelowania geochemicznego do interpretacji pochodzenia składu chemicznego wód i prognozowania zmian ich jakości przy wykorzystaniu programów modelowych takich jak WATEQ4F BALANCE, PHREEQE (Macioszczyk, Dobrzyński, 2002). Zastosowanie tych modeli wymaga jednak, oprócz szczegółowych danych hydrochemicznych (w tym temperatury, Eh i pH), również danych o składzie mineralnym i chemicznym ośrodka skalnego oraz danych termodynamicznych. Są one trudne do uzyskania i dlatego wykorzystanie tych modeli jest bardzo ograniczone i sprowadza się najczęściej do interpretacji pochodzenia składu chemicznego badanej wody.

Metody prognozowania jakości wód wykorzystywane w praktyce można uszeregować następująco:

- metody analogii warunków hydrogeochemicznych,
- metody bilansowe,
- metody obliczeń analitycznych migracji zanieczyszczeń dla prostych schematów hydrogeologicznych,
- metody modelowania matematycznego.

Metoda analogii może być stosowana w formie najbardziej uproszczonej, kiedy rozpoznanie warunków hydrogeochemicznych ograniczone jest tylko do samego ujęcia, a przewidywaną jakość odnosimy do ogólnej wiedzy na temat typu struktury hydrogeologicznej i możliwych zmian jakości w warunkach eksploatacji (patrz rozdz. 4.3). W prognozie takiej określa się tylko czy należy się spodziewać zmian jakości wody, jakich wskaźników zmiany te mogą dotyczyć oraz jaki może być ich zakres.

Metodę bilansową można stosować jeśli dysponuje się rozpoznaniem warunków hydrodynamicznych i hydrochemicznych w obszarze zasilania ujęcia. W metodzie tej niezbędna jest znajomość bilansu składników zasilania ujęcia w aspekcie

ilościowym i jakościowym. W przypadku prostych warunków hydrogeologicznych obliczenia możemy wykonać posługując się siatką hydrodynamiczną i obliczając dopływ do ujęcia z poszczególnych sektorów pola hydrodynamicznego o zróżnicowanej jakości wód. Obliczenia prowadzi się posługując się wzorem:

$$C = \frac{C_1 Q_1 + C_2 Q_2 + \dots + C_n Q_n}{Q}$$

gdzie:

- C – koncentracja badanego parametru w wodzie pobieranej z ujęcia [mg/l],
- $C_1, C_2 \dots C_n$ – koncentracja badanego parametru w wodzie dopływającej z poszczególnych sektorów pola hydrodynamicznego [mg/l],
- $Q_1, Q_2 \dots Q_n$ – dopływ do ujęcia z poszczególnych sektorów pola hydrodynamicznego [m^3/h],
- Q – całkowita ilość wody dopływającej do ujęcia [m^3/h],
- n – ilość sektorów.

W przypadku bardziej skomplikowanych warunków hydrogeologicznych obliczenia powinny być wykonane na podstawie bilansu składników zasilania ujęcia otrzymanych z modelu matematycznego.

W metodzie bilansowej można prognozować jakość wody w zasadzie tylko dla składników konserwatywnych. Upraszczając zagadnienie można również szacunkowo prognozować zawartość składników, które wykazują konserwatywność tylko w określonych warunkach redukcyjno-oksydacyjnych, np. azotany lub siarczany. W tym przypadku należy jednak ocenić warunki redukcyjno-oksydacyjne w polu filtracji, wykorzystując metodę analogii lub modelowania geochemicznego.

W przypadku natomiast takich parametrów jak żelazo i mangan o ich zawartości w wodzie dopływającej do ujęcia decydować będzie głównie charakter środowiska hydrogeochemicznego w otoczeniu ujęcia. Wykonanie prognozy wymaga więc w tym przypadku dobrego rozpoznania tego środowiska, co może pozwolić na szacunkową ocenę stężeń Fe i Mn na podstawie metody modelowania geochemicznego lub analogii.

Metody obliczeń analitycznych migracji zanieczyszczeń oparte są na rozwiązaniu równań konwekcyjno-dyspersyjnych dla strumieni jednowymiarowych (rzadziej dla uproszczonych strumieni dwuwymiarowych) oraz dla strumieni radialnych mających swe rozwiązania analityczne, które są zaprezentowane w literaturze polskiej w podręczniku „Ochrona wód podziemnych” (Kleczkowski, 1984 red.), a także w publikacjach zagranicznych (np. Bedient i in., 1994).

Pozwalają one na wykonanie takich obliczeń jak:

- a) ocena możliwości wpływu określonego ogniska zanieczyszczeń na ujęcie i obliczenie czasu dopływu zanieczyszczenia przy założeniu przepływu tłokowego (bez uwzględnienia dyspersji),
- b) obliczenie udziału zanieczyszczonych wód powierzchniowych w zasilaniu ujęcia i koncentracji zanieczyszczenia w wodzie pobieranej z ujęcia,

- c) obliczenie migracji zanieczyszczeń w jednowymiarowym i radialnym strumieniu wód podziemnych z uwzględnieniem dyspersji podłużnej,
- d) obliczenie dopływu do ujęcia w dwuwymiarowym polu hydrodynamicznym wód zanieczyszczonych w wyniku oddziaływania różnego typu ognisk zanieczyszczeń.

Przedstawione wyżej przykłady pozwalają na opracowanie prognoz jakości wody dla ujęcia określających zarówno przewidywaną koncentrację rozpatrywanego zanieczyszczenia konserwatywnego jak i zmienność koncentracji w czasie.

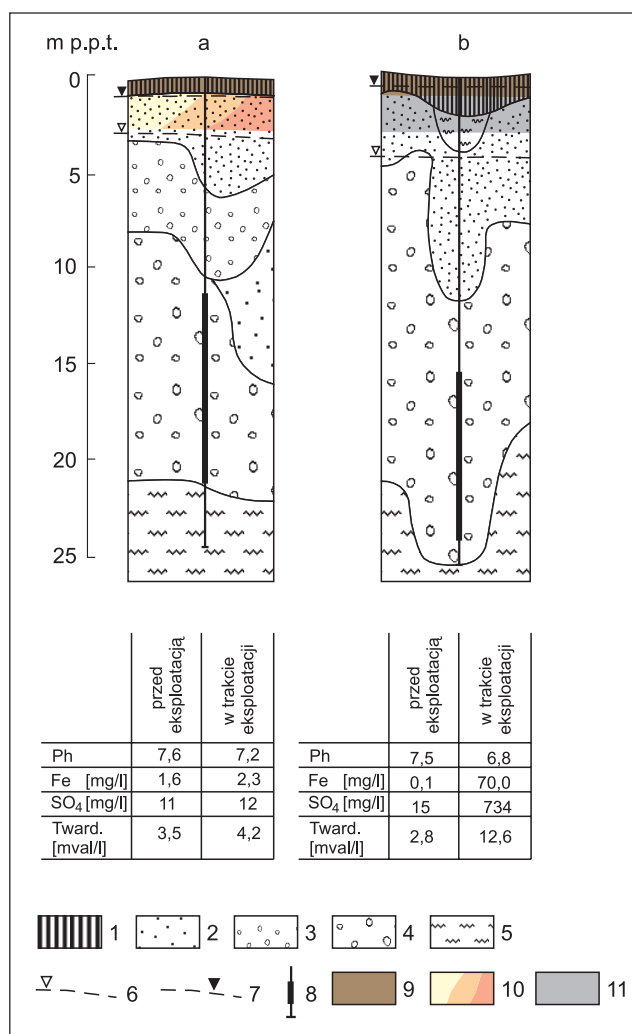
Zastosowanie **modelowania matematycznego** do prognozowania jakości wód pozyskiwanych z ujęcia jest, jak już wspomniano, na razie bardzo ograniczone ze względu na trudności w pozyskaniu parametrów oraz żmudną i czasochłonną procedurą testowania modeli. Są już jednak pozytywne przykłady zastosowania tej metody. Można tu wskazać na model bilansowy opracowany dla GZWP Opole-Zawadzkie (Żurek, 1996). Model ten przygotowany na bazie modelu hydrodynamicznego przy wykorzystaniu pakietu programów PAKSCH z biblioteki HYDRYLIB oraz programu CREAMS (do oceny ładunku związków azotowych wnoszonych do wód podziemnych) pozwolił na obliczenie wiarygodnych prognoz stężeń azotanów w wodach pozyskiwanych z ujęć na terenie GZWP.

Prognozowanie jakości wody w warunkach spodziewanych **przemian hydrogeochemicznych związanych z utlenianiem siarczków** musi przede wszystkim uwzględniać składniki, które będą uwalniać się w wyniku utleniania, tj. siarczany i żelazo oraz wypłukiwać się ze środowiska gruntowego, tj. żelazo, mangan, wapń i magnez, w warunkach dużego zakwaszenia przez powstający kwas siarkowy.

Sporządzenie prognozy zmian jakości wody w wyniku tego procesu jest bardzo trudne. Proces ma bowiem charakter dynamiczny, a jego przebieg warunkuje bardzo dużo trudnych do dokładnego zwymiarowania czynników takich jak:

- zawartość siarczków w osadach,
- warunki rozwoju i aktywność bakterii siarkowych,
- własności buforujące środowiska gruntowego (zdolność sorpcyjna środowiska w stosunku do jonów H^+ , oraz zawartość węglanów),
- reżim eksploatacji ujęcia, a w szczególności jego zmienność,
- wpływ czynników meteorologicznych na zmienność procesu.

Dla szacunkowej oceny możliwości rozwoju procesu można wykorzystać dane na temat charakteru środowiska gruntowego w strefie objętej zdepresjonowaniem zwierciadła wody uzyskane w trakcie wiercenia. Dane te muszą jednak zawierać dokładny opis litologiczny tej strefy, z uwzględnieniem zawartości materii organicznej w osadzie oraz ich barwy. Dysponując tymi danymi można w przybliżeniu określić czy wystąpią zmiany jakości wody i jaki będzie ich zakres posługując się katalogiem profilów środowisk hydrogeochemicznych przedstawionych w publikacji T. Błaszyka i J. Górskiego (1978). Wybrane przykłady z tego katalogu przedstawiono na rysunku 6.4-1.



Rys. 6.4-1. Przykład typowych profili środowiska hydrogeochemicznego w dolinach rzecznych – profil „a” – brak warunków do rozwoju niekorzystnych przemian hydrogeochemicznych, profil „b” – warunki sprzyjające przemianom.

1 – mady, 2 – piaski drobno- i średnioziarniste, 3 – piaski ze żwirem, 4 – piaski ze żwirem i otoczkami, 5 – mułki i iły, 6 – zwierciadło wody w trakcie eksploatacji, 7 – zwierciadło wody przed eksploatacją, 8 – zafiltrowanie otworu, 9 – osady barwy żółtej, brunatnej i rdzawej, 10 – osady barwy żółtoszarej lub brunatnoszarej, 11 – osady barwy ciemnoszarej.

W przypadku dysponowania lepszym rozpoznaniem środowiska hydrogeochemicznego, w szczególności w zakresie koncentracji siarczków, można wyliczyć jakie ilości siarczanów i żelaza dwuwartościowego uwolnią się w wyniku utleniania siarczków. Utlenianie 1 g FeS powoduje powstanie 1,728 g FeSO₄ czyli 1,093 g SO₄²⁻ i 0,635 g Fe²⁺. Przebieg tego procesu wymaga jednocześnie 0,728 g tlenu, czyli ok. 0,5 litra.

W oparciu o dane na temat zasięgu i kształtu leja depresyjnego i zawartości siarczków można z kolei wyliczyć całkowitą ilość siarczanów jakie mogą powstać. Obliczenie to pozwala na wyznaczenie szacunkowych stężeń siarczanów w eksploataowanej wodzie i ich rozkładu w czasie przy założeniu, że przebieg procesu będzie miał podobny charakter jak na ujęciu Zawada (patrz rys. 4.3-10), co potwierdzają również obserwacje z innych ujęć. Możemy również oszacować przybliżone stężenia żelaza w wodzie wiedząc, że stosunek żelaza do siarczanów w warunkach środowisk dolinnych Polski zachodniej w okresie rozwoju procesu utleniania siarczków wynosi ok. 0,1 (Górski, 1981).

Jakość wód pozyskiwanych z ujęcia może się zmieniać w znacznym stopniu w zależności od wielkości poboru. W takim przypadku należy opracować wariantowe scenariusze eksploatacji, dla których powinny być opracowane prognozy jakości wód. Analiza tych prognoz w świetle potrzeb użytkownika w zakresie jakości wody będzie wtedy podstawowym kryterium ustalania wielkości zasobów eksploatacyjnych ujęcia. Przykład takiego problemu dla ujęcia zlokalizowanego w pradolinny zbiorniku wodonośnym przedstawiono w rozdziale 8.7. W rozpatrywanym przypadku zwiększony pobór zwiększa w miarę proporcjonalnie ilość wody o niekorzystnej jakości dopływającej do ujęcia. Często jednak pogorszenie jakości następuje skokowo, po przekroczeniu pewnej wielkości poboru i/lub depresji eksploatacyjnej. Dotyczy to w szczególności następujących sytuacji:

- uruchomienia przesączania wód o niekorzystnej jakości z podległej lub nadległej warstwy po przekroczeniu określonych depresji,
- objęcie obszarem zasilania ujęcia strefy o szczególnie niekorzystnych warunkach hydrogeochemicznych,
- uruchomienie infiltracji zanieczyszczonych wód powierzchniowych.

W przypadku takich zagrożeń powinny być określone wydajności i depresje, których przekroczenie jest niedopuszczalne ze względu na jakość wody. Jednoznaczne określenie warunków poboru wód jest szczególnie ważne w przypadku, jeśli przekroczenie określonych depresji eksploatacyjnych może spowodować gwałtowną zmianę warunków redox pociągającą za sobą uruchomienie procesów utleniania siarczków i substancji organicznych. Dotyczy to sytuacji, w których warstwa wodonośna wzbogacona w materię organiczną i siarczki przykryta jest serią utworów słabo przepuszczalnych o odpowiedniej miąższości, np. delty rzek lub niektóre odcinki tarasów zalewowych dolin i pradolin. Eksploatacja w tych warunkach powinna być tak prowadzona, aby zwierciadło wody nie schodziło poniżej spągu utworów słabo przepuszczalnych.

Stabilny reżim eksploatacji jest również istotny z uwagi na to, że procesy przemian hydrogeochemicznych rozwijają się głównie w strefie aeracji w obrębie leja depresyjnego. Przenikanie produktów przemian do dolnej, zafiltrowanej części warstwy wodonośnej następuje w tej sytuacji głównie w okresie podnoszenia się zwierciadła wody (np. w wyniku zmniejszenia poboru lub wyłączenia ujęcia). Wynika z tego, że w celu uniknięcia gwałtownego pogorszenia się jakości wody ważne jest utrzymywanie w miarę możliwości wyrównanego poboru wód z ujęcia.

6.5. Ocena wiarygodności metod obliczeniowych

Przedkładane w dokumentacjach wielkości zasobów stanowią przybliżone prognozy hydrogeologiczne i powinny być weryfikowane w trakcie eksploatacji ujęć. Różnice między prognozowanymi i rzeczywistymi parametrami eksploatacji ujęcia stanowią o wiarygodności uzyskiwanych w dokumentowaniu rezultatów.

Wiarygodność prognoz przedstawianych w dokumentacjach zasobów eksploatacyjnych wód podziemnych determinują:

- dokładność rozpoznania jednostki hydrogeologicznej, jej granic i charakteru hydrodynamicznego, związków z otoczeniem (zasilanie, drenaż, zagrożenia) oraz parametrów hydrogeologicznych,
- dokładność odwzorowania wyników rozpoznania w schemacie hydrogeologicznym,
- zastosowana metodyka obliczeń wydajności ujęć i ustalenia zasobów.

Z praktyki hydrogeologicznej wynika, że mniejsze znaczenie dla wiarygodności oceny zasobowej mają błędy wynikłe z niedokładnego rozpoznania parametrów hydrogeologicznych niż niepełne lub błędne rozpoznanie granic jednostki i jej związków z otoczeniem (głównie warunki i intensywność zasilania). Pierwsze mogą powodować błędny szacunek zasobów rzędu $\pm 30\%$, zaś drugie $\pm 100-200\%$, a nierzadko więcej. Wybór metodyki obliczeń warunkuje stopień wiarygodności prognozy zasobowej, o ile sporządzono właściwy schemat hydrogeologiczny. W tym schemacie najwłaściwszą metodą pozyskiwania parametrów obliczeniowych jest przeprowadzenie próbnych pompowań i poprawna interpretacja ich wyników umożliwiająca także ustalenie warunków zasilania badanej warstwy wodonośnej.

Dla małych ujęć, przy braku rozpoznania regionalnego jednostki, wybór metody determinuje jedynie lokalne, a często wręcz punktowe, rozpoznanie warstwy wodonośnej (np. tylko z 1 otworu badawczego, w którym wykonano jedynie krótkotrwałe pompowanie wielostopniowe). W takich przypadkach zaleca się stosowanie w ocenie zasobów co najmniej dwóch metod obliczeń z różnych grup (najwłaściwiej hydrodynamiczne i bilansowe).

Szacunkową ocenę wiarygodności zalecanych metod prognozowania zasobowego w systemach jedno- i wielowarstwowych, z uwzględnieniem zakresu ich rozpoznania, przedstawiono w tabeli 6.5-1.

Tab. 6.5-1. Ocena wiarygodności zalecanych metod obliczeń zasobów eksploatacyjnych.

Lp	Grupa metod	Rodzaj metody	System wodonośny jednostki		Posiadane dane z rozpoznania		Stopień wiarygodności metody	Uwagi
			jedno-warstwowy	wielowarstwowy	lokalnego	lokalnego i regionalnego		
I	Metody hydrauliczne	Metody wykorzystujące zależność $s=f(Q)$ z uwzględnieniem współdziałania studni	+		+	+	N N, ŚR BN N	Metody mogą być stosowane tylko dla ujęć małych o wydatku $Q < 50 \text{ m}^3/\text{h}$ w jednostkach nieograniczonych lub z granicą zasilającą typu $H=\text{const}$
II	Metody hydrodynamiczne	Obliczenia według wzorów filtracji ustalonej (wzory Dupuita, Dupuita-Thiema)	+		+	+	N ŚR BN ŚR	Metody mogą być stosowane do prognozowania pracy ujęć o wydajności poniżej $100 \text{ m}^3/\text{h}$, w jednostkach nieograniczonych, bez współdziałania studni z innymi ujęciami.
		Obliczenia według wzorów filtracji nieustalonej (schematy Theisa i Hantusha)	+		+	+	N, ŚR W ŚR ŚR, N	Metody mogą być stosowane do prognozowania pracy ujęć w jednostkach nieograniczonych i ograniczonych z uwzględnieniem współdziałania niewielkiej liczby pojedynczych ujęć pracujących w tej samej jednostce hydrogeologicznej.
III	Całkowanie graficzne siatki hydrodynamicznej	Filtracja ustalona i pseudoustalona – schemat Dupuita	+		+	+	N ŚR N ŚR	Obliczenia dopływów ze strumieni płasko- i sferyczno-radialnych do ujęć w warunkach monitorowania stanów wód podziemnych.
IV	Metody bilansowe eksploatacji	Metody analityczne Bindemana i Bindemana-Boczewiera	+		+	+	BN ŚR BN N, ŚR	Metody stosowane zastępczo za modelowanie, przy konieczności zbilansowania zasilania dużych ujęć współdziałających. Stosowane także jako porównawcze do grup I, II i III
V	Modelowanie matematyczne	Modelowanie przepływu wód (filtracji)	+		+	+	N, ŚR W N W	Metody stosowane szczególnie do: – sporządzania bilansu przepływu wód, – oceny zasobów przy współdziałaniu ujęć, – oceny zasobów ujęć pracujących w specyficznych warunkach hydrogeologicznych
		Modelowanie migracji zanieczyszczeń	+		+	+	N, ŚR ŚR N ŚR	Metody stosowane do prognoz migracji składników: chlorków i innych składników konserwatywnych

Przedziały stopnia wiarygodności prognozy zasobowej: W (wysoki) $< 20\%$; ŚR (średni) $20-30\%$, N (niski) $30-50\%$, BN (b. niski) $> 50\%$.

W procentach wyrażone są szacunkowe błędy prognozy zasobowej.

7. Dokumentacja zasobów eksploatacyjnych ujęcia wód podziemnych

7.1. Wymagana treść dokumentacji

Wymogi prawne obowiązujące przy sporządzaniu dokumentacji hydrogeologicznej ustalającej zasoby eksploatacyjne wód podziemnych zawiera ustawa z dnia 4 lutego 1994 r. – Prawo geologiczne i górnicze (Dz. U. Nr 27 poz. 96 z późn. zm.) oraz rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać dokumentacje hydrogeologiczne i geologiczno-inżynierskie (Dz. U. Nr 153, poz. 1779).

Zasadniczym zadaniem dokumentacji hydrogeologicznej jest przedstawienie wyników prac geologicznych wraz z ich interpretacją, określenie stopnia osiągnięcia zamierzonego celu i przedstawienie wniosku zasobowego. Umowny podział ujęć na małe, duże i pracujące w warunkach specyficznych (rozdz. 5.1) powinien znaleźć swoje odbicie w treści dokumentacji, która musi przedstawiać sposób zrealizowania wszystkich zaplanowanych prac i badań oraz metodykę obliczeń zasobów.

Część tekstowa dokumentacji powinna zawierać następujące elementy:

1. Wstęp z określeniem:
 - zleceniodawcy, wykonawcy, użytkownika ujęcia,
 - lokalizacji ujęcia: arkusz mapy w skali 1:50 000, położenie administracyjne (województwo, powiat, gmina),
 - dotychczasowego sposobu zaopatrzenia obiektu w wodę oraz omówienie zamierzeń inwestora w zakresie gospodarki wodnej,
 - średniego rocznego zapotrzebowania inwestora na wodę oraz przeznaczenia wody,
 - wymagań jakościowych wody,
 - podstawy prawnej wykonania prac, tj. decyzji zatwierdzającej projekt prac geologicznych.

2. Opis wykonanych prac i badań, w tym:
 - opis przeprowadzonych prac wiertniczych: przebieg wiercenia, użyte narzędzia wiertnicze, pobór próbek geologicznych, zarurowanie, profil geologiczny otworu,
 - opis zafiltrowania otworu: rodzaj filtra, wymiary, głębokość posadowienia, rodzaj obsypki,
 - zakres przeprowadzonych badań hydrogeologicznych: opis przeprowadzonych pompowań (pompowanie oczyszczające i próbne), charakterystyka urządzeń pompowych i pomiarowych, zakres i częstotliwość obserwacji prowadzonych w otworze pompowanym i otworach obserwacyjnych, czas pompowań, uzyskane wydajności,
 - wyniki badania jakości wody: ilość próbek pobranych do badań fizyczno-chemicznych i bakteriologicznych, sposób poboru, zakres oznaczeń, wskazanie laboratorium wykonującego analizy,
 - rezultaty inwentaryzacji ognisk zanieczyszczeń w obrębie obszaru zasobowego,
 - wyniki prac geodezyjnych: określenie położenia geograficznego ujęcia w państwowym układzie współrzędnych oraz rzędnej terenu (na podstawie pomiarów terenowych),
 - ewentualny opis innych wykonanych prac (np. badania geofizyczne, pomiary hydrologiczne, prace modelowe).
3. Charakterystyka terenu badań:
 - morfologia i hydrografia rejonu dokumentowanego ujęcia na tle podziału geograficznego,
 - omówienie budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych z uwzględnieniem: pozycji stratygraficznej ujętego poziomu wodonośnego, lokalizacji innych ujęć wód podziemnych w badanym zbiorniku, warunków zasilania i drenażu ujętego poziomu wodonośnego, kierunków przepływu i zagrożeń jakości wód w świetle dotychczasowego i prognozowanego poboru wód podziemnych,
 - charakterystyka jakości wód w oparciu o wyniki wykonanych oznaczeń,
 - omówienie stanu środowiska w rejonie dokumentowanego ujęcia, wskazanie ognisk zanieczyszczeń z określeniem charakteru zagrożenia, ewentualnie określenie zagrożeń wynikających z eksploatacji kopalin w sąsiedztwie ujęcia.
4. Ustalenie zasobów eksploatacyjnych:
 - obliczenie parametrów hydrogeologiczno-eksploatacyjnych: współczynnika filtracji, przewodności, wydajności dopuszczalnej studni i jej sprawności,
 - określenie zasobów eksploatacyjnych ujęcia na podstawie przeprowadzonych prac badawczych, wykonanych obliczeń i w nawiązaniu do zapotrzebowania na wodę,
 - prognozowana depresja ujęcia, zasięg leja depresji, obszar zasilania ujęcia, obszar zasobowy, kierunki i prędkości dopływu wody,

- bilans zasilania ujęcia: wskazanie źródeł zasilania, określenie stopnia wykorzystania zasobów dyspozycyjnych i zasobów wzbudzonych,
 - określenie dopuszczalnej wydajności studni oraz ewentualnych okresowych zmian w wydajności ujęcia,
 - prognoza trwałości składu fizyczno-chemicznego wód,
 - analiza wpływu zagospodarowania zasobów eksploatacyjnych ujęcia na środowisko, w tym prognoza współdziałania z istniejącymi ujęciami wód podziemnych,
 - analiza czasów dopływu wody do ujęcia, określenie strefy ochronnej i terenów ochronnych oraz ich granic, wskazanie zasad ochrony jakości wód podziemnych (ochrona czynna i profilaktyczna),
 - określenie obszaru zasobowego.
5. Wytyczne sposobu eksploatacji:
- wskazanie optymalnej wydajności eksploatacyjnej ujęcia i zalecanych głębokości umieszczenia pomp głębinowych,
 - określenie rodzaju i częstotliwości pomiarów, które użytkownik powinien dokonywać w trakcie eksploatacji,
 - określenie potrzeb i zasad prowadzenia monitoringu osłonowego ujęcia.
6. Ocena stopnia osiągnięcia założeń projektowych – zestawienie porównawcze przedstawiające wyniki wykonanych prac w porównaniu z założeniami projektowymi zgodnie z poniższym schematem:

Zakres prac	Założenia projektowe	Wyniki wykonanych prac
głębokość wiercenia		
głębokość posadowienia filtra		
średnica filtra		
długość części czynnej filtra		
Warstwa wodonośna: – stratygrafia – przelot		
Zarurowanie: – liczba kolumn rur pozostawionych w otworze – średnica pierwszej kolumny – średnica końcowej kolumny		
Parametry warstwy wodonośnej: – miąższość – współczynnik filtracji – przewodność		
Parametry eksploatacyjne studni: – depresja – wydajność – wydajność jednostkowa		

7. Wnioski i zalecenia:

- syntetyczne podsumowanie wszystkich wykonanych prac dokumentacyjnych,
- określenie wysokości zasobów eksploatacyjnych, depresji eksploatacyjnej, obszaru zasobowego oraz pozycji stratygraficznej ujętego poziomu wodonośnego,
- określenie jakości wody oraz prognoza zmian jakości podczas eksploatacji ujęcia,
- wytyczne do ustanowienia stref ochronnych ujęcia,
- wytyczne dla użytkownika do prowadzenia obserwacji i pomiarów podczas eksploatacji ujęcia (położenie zwierciadła wody, analizy fizyczno-chemiczne wody „surowej”),
- ocena wiarygodności określenia zasobów,
- sformułowanie wniosku zasobowego.

Część graficzna i tabelaryczna dokumentacji powinna zawierać:

1. Lokalizację terenu prowadzonych prac na mapie przeglądowej.
2. Mapę dokumentacyjną lub dokumentacyjno-hydrogeologiczną przedstawioną na podkładzie topograficznym w skali nie mniejszej niż 1:25 000. Mapa powinna zawierać w szczególności lokalizację wykonanych otworów oraz charakterystykę warunków hydrogeologiczno-sozologicznych, w tym granice obszaru spływu wody do ujęcia i obszaru zasobowego, granicę terenu ochrony pośredniej (jeśli występuje zasadność jej ustanowienia), a także lokalizację potencjalnych ognisk zanieczyszczeń. W przypadku braku możliwości przedstawienia granic strefy ochronnej na mapie w skali 1:25 000 należy pokazać ją na mapie o skali odpowiednio większej lub na planie.
3. Przekrój/przekroje hydrogeologiczne.
4. Geodezyjny szkic wytyczenia lokalizacji studni.
5. Graficzne przedstawienie wyników próbných pompowań.
6. Zestawienie zbiorcze wyników wiercenia.
7. Wyniki analiz fizyczno-chemicznych i bakteriologicznych, wyniki badań granulometrycznych.
8. Karty kodowe wykonanych otworów.
9. Dzienniki próbných pompowań (wskazane wraz z z wersją elektroniczną).
10. Wyniki badań i pomiarów specjalnych (geofizycznych, hydrologicznych, izotopowych i innych).

Podsumowaniem wykonanych prac dokumentacyjnych powinna być karta zasobowa ujęcia, której wzór przedstawiono na rysunku 7.1-1.

KARTA DOKUMENTOWANEGO UJĘCIA
Ujęcie wód podziemnych
z utworów.....

Miejscowość:
 Gmina:
 Powiat:
 Województwo:
 Zlewnia rzeki: (do IV rzędu)
 Region wodny: RZGW (siedziba)
 Zbiornik wód podziemnych (GZWP, UPWP)
 Użytkownik:
 Arkusz mapy 1:50 000 (układ 42)
 Współrzędne położenia geograficznego ujęcia:.....E,.....N.
 Rzędne terenu ujęcia:.....-m n.p.m.

Zasoby eksploatacyjne ustalone według stanu rozpoznania hydrodynamicznego na dzień.....

Zasoby eksploatacyjne ujęcia	Depresja zwierciadła wody na ujęciu	
Q=..... m ³ /h Ilość studni	rejonowa	otworowa
	s _{rej} =.....m	s _c =.....m w tym: rzeczywista – s _w =.....m, zeskok hydrauliczny – Δs=.....m
Klasa jakości wody.....		
Obszar zasobowy o powierzchni km ² określony w granicach przedstawionych na załączniku nr		

Geolog dokumentujący:.....
 uprawnienia geologiczne nr.....

.....
 Miejscowość, data

Ryc. 7.1-1. Karta dokumentowanego ujęcia.

7.2. Określanie wielkości zasobów eksploatacyjnych – wniosek zasobowy

Wielkość zasobów eksploatacyjnych ujęcia, będąca efektem przeprowadzonych prac i badań, schematyzacji warunków hydrogeologicznych oraz dokonanych obliczeń stanowi prognozę, którą należy przedstawić w postaci wniosku zasobowego. Dokumentacja hydrogeologiczna stanowi opis i komentarz autorski dokumentatora zasobów oparty na wynikach badań i obliczeń oraz ich interpretacji.

Podstawowych danych umożliwiających właściwe sformułowanie wniosku zasobowego dostarczają testy pomiarowe próbnego pompowania oraz wyniki obliczeń wydajności ujęcia i/lub rezultaty prac modelowych. W oparciu o wyniki tych badań i obliczeń określić można maksymalną wydajność studni, prognozować depresję w warstwie wodonośnej – s_w , wielkość zeskoku hydraulicznego – Δs , depresję całkowitą – s_c , a także jakość wody. Dla określenia wielkości zasobów eksploatacyjnych decydujące znaczenie ma rzeczywiste zapotrzebowanie użytkownika na wodę i możliwość jej pozyskania ograniczona wieloma czynnikami, z których najistotniejsze to:

- stopień rozdysponowania zasobów dyspozycyjnych w badanej jednostce zasobowej,
- ograniczenia wynikające z eksploatacji ujęć sąsiednich,
- ograniczenia wynikające z wymogów ochrony środowiska,
- konieczność uzyskania możliwie korzystnej jakości wody i utrzymania jej w procesie eksploatacji.

Podstawową formą wyrażania zapotrzebowania jest przewidywana wielkość **całkowitego poboru rocznego** – Q_{rocz} [m^3/r] bądź też **poboru dobowego** – $Q_{srd} = Q_{rocz}/365$ [m^3/d]. Po przeliczeniu jednostek zapotrzebowanie określa się jako **średnie zapotrzebowanie godzinowe** – $Q_{srh} = Q_{rocz}/8760$ [m^3/h]. Oprócz tego niezbędna jest znajomość stopnia nierównomierności poboru wynikająca ze zmienności potrzeb w ciągu doby zobrazowana wielkością **maksymalnego poboru godzinowego** – Q_{maxh} [m^3/h].

Jako zasoby ujęcia przyjmuje się wartość Q_{srh} wynikającą z wielkości średniego zapotrzebowania rocznego. Czynnikiem ograniczającym jest zawsze wydajność dopuszczalna ujęcia – Q_{dop} , która obliczana jest w oparciu o stwierdzone parametry filtracyjne ujętej warstwy wodonośnej. Dla ustalonych zasobów określa się: obszar spływu wód, zasięg oddziaływania, obszar zasobowy, zasięg strefy ochronnej. Oprócz tego w dokumentacji przedstawia się depresję dla **maksymalnego poboru godzinowego** – Q_{maxh} .

Do celów praktycznych proponuje się stosowanie przedstawionej niżej procedury optymalizacyjnej umożliwiającej właściwe określenie wniosku zasobowego. Ma ona charakter analizy wielokryterialnej uwzględniającej 2 zasadnicze elementy zasobów:

- ilość wód podziemnych wyrażona wielkością wydatku, depresji, oraz wielkością obszaru zasobowego,
- jakość wód podziemnych i prognoza jej zmian w trakcie trwania eksploatacji.

Metodykę prac nad ustaleniem wniosku zasobowego różnicuje się w zależności od charakteru przewidywanego poboru. Wyróżnić można ujęcia o ciągłej eksploatacji oraz pracujące okresowo, np. zaopatrujące w wodę zakłady przemysłowe pracujące głównie w okresach kampanii rolnych (zakłady przetwórstwa owocowo-warzywnego, cukrownie), bądź zasilające urządzenia nawadniające uprawy rolne w okresach wegetacyjnych.

I. Ujęcia o ciągłej eksploatacji

Niezbędne dane:

1. Wyniki badań i obliczeń hydrogeologicznych:

- $Q_{dop.}$ – wydajność dopuszczalna studni wynikająca z maksymalnej możliwej prędkości wlotowej wody do filtra,
- k , m , T , współczynnik sprawności studni (ew. współczynniki B i C),
- dopuszczalne obniżenie zwierciadła wody w studniach ($s_c^{dop.}$) dokumentowanego ujęcia w zależności od konstrukcji studni i wymogów urządzeń pompowych (wysokość podnoszenia słupa wody dostosowana do konkretnego typu agregatu pompowego),
- dopuszczalne obniżenie zwierciadła wody w warstwie wodonośnej ($s_w^{dop.}$) na terenie dokumentowanego ujęcia.

2. Wyniki rozpoznania hydrogeologicznego obszaru badań

- dopuszczalne rejonowe obniżenie zwierciadła wody w warstwie wodonośnej na terenie przyległym do dokumentowanego ujęcia ($s_{rej}^{dop.}$) niezbędne dla:
 - zapewnienia pracy istniejących ujęć (ograniczenia wynikające z wysokości ustalonych zasobów, wzajemnego współdziałania i rozległości ich obszarów zasobowych),
 - zachowania stanu środowiska gruntowo-wodnego ze względu na statykę budowli,
 - utrzymania niezbędnych parametrów ekosystemów wodnych uzależnionych od stanów wód podziemnych (w tym dopuszczalne obniżenie przepływów w ciekach powierzchniowych).
- ograniczenia wynikające z innych komponentów środowiska i ochrony jakości wód:
 - możliwość generowania dopływów z obszarów o geogenicznie lub antropogenicznie uwarunkowanej złej jakości wody,
 - ryzyko wzbudzenia procesów hydrogeochemicznych na skutek zmian hydrodynamicznych.

3. Zapotrzebowanie na wodę:

Q_{rocz} [m³/r] – określa Inwestor,

Q_{maxh} [m³/h] – określa Inwestor,

$Q_{śrh} = Q_{rocz} / 8760$ [m³/h].

Kolejność optymalizacji:**1. Określenie zasobów eksploatacyjnych ujęcia – Q_e :**

- a) $Q_e = Q_{srh}$ gdy $Q_{srh} \leq Q_{dop.}$
 b) $Q_e = Q_{dop.}$ gdy $Q_{srh} > Q_{dop.}$

W przypadku b) zasoby będą niewystarczające dla pokrycia zapotrzebowania. Inwestor może podjąć decyzję o budowie dodatkowych studni, co wymaga sporządzenia i zatwierdzenia aneksu do projektu prac geologicznych.

2. Obliczenia depresji s_w i s_c dla wydajności Q_e . Dopuszczalne wartości depresji wyrażają się zależnościami:

- a) $s_w \leq s_w^{dop.}$
 i
 b) $s_c \leq s_c^{dop.}$

Niespełnienie tych kryteriów oznacza konieczność weryfikacji koncepcji zaopatrzenia w wodę w kierunku zwiększenia ilości studni ujęcia lub – dla ujęć wielootworowych – zmianę lokalizacji studni. Jeśli nie jest spełniony tylko warunek b) – poprawę mogą przynieść zabiegi zwiększające sprawność studni.

3. Obliczenia depresji s_w i s_c dla wydajności Q_{maxh} . W tym przypadku niespełnienie kryteriów jak w punkcie powyższym oznacza również konieczność powtórnej analizy koncepcji zaopatrzenia w wodę, przy czym, oprócz zwiększenia ilości studni ujęcia, rozwiązaniem może być budowa ujęciowego zbiornika wyrównawczego dla zmniejszenia nierównomierności poboru wody.

4. Obliczenia depresji rejonowej – s_{rej} dla wydajności Q_e wraz z określeniem granic obszaru wpływu. Kryterium dopuszczalności depresji sformułowane jest w postaci:

$$s_{rej} \leq s_{rej}^{dop.}$$

i dotyczy depresji w każdym punkcie obszaru wpływu ujęcia. W przypadku, gdy nie jest spełnione, koncepcja zaopatrzenia w wodę powinna być optymalizowana poprzez zmianę lokalizacji otworów lub zwiększenie ilości studni ujęcia.

5. Wykonanie prognozy jakości wód uwzględniającej:

- obecność ognisk zanieczyszczeń w obszarze spływu wody do ujęcia,
- możliwość przemian hydrogeochemicznych na skutek zmian hydrodynamicznych w zbiorniku wód podziemnych.

Negatywny wynik prognozy jakości dla przyjętej wartości Q_e oznacza konieczność optymalizowania (zmniejszania) zasobów aż do osiągnięcia wysokości poboru bezpiecznej dla jakości wody. Elementem optymalizacji mogą być propo-

zycie eliminowania konkretnych punktowych i liniowych ognisk zanieczyszczeń. W każdym przypadku istnienia zagrożeń należy wskazać na konieczność monitoringu jakości wód.

Wniosek zasobowy dla ujęć o ciągłej eksploatacji zawiera:

- a) zasoby eksploatacyjne ujęcia – Q_e [m³/h],
- b) depresję całkowitą studzienną – s_c [m],
- c) w przypadku ujęć wielootworowych depresję rejonową – s_{rej} [m].
Wielkość depresji jest datowana z podaniem stanu hydrodynamicznego ustalenia zasobów (patrz karta ujęcia – rys. 7.1-1). Uzasadnienie wniosku powinno zawierać opis charakteru zwierciadła wody:
 - zwierciadło wody pierwotne (naturalne),
 - zwierciadło wody zmienione w wyniku już istniejącej eksploatacji (w tym przypadku z podaniem średniej wieloletniej wielkości eksploatacji);
- d) powierzchnię obszaru zasobowego wraz ze wskazaniem jego granic na mapie w skali nie mniejszej niż 1:25 000 (wyjątkowo 1: 50 000).

II. Ujęcia eksploatowane okresowo

Niezbędne dane:

1. Wyniki badań i obliczeń oraz rozpoznania hydrogeologicznego obszaru badań – analogicznie jak dla ujęć o stałym poborze.
2. Zapotrzebowanie na wodę:
 - Q_{rocz} [m³/r] - określa Inwestor,
 - Q_{maxh} [m³/h] – określa Inwestor,
 - przewidywany okres eksploatacji w ciągu roku – t (doby, godziny) – określa Inwestor.
 - Q_{srh} w odniesieniu rocznym:

$$Q_{srh} = Q_{rocz}/8760 \text{ [m}^3\text{/h]},$$

- Q_{srh} w odniesieniu do okresu eksploatacji:

$$Q_{srh} = Q_{rocz}/t[h] \text{ [m}^3\text{/h]}.$$

Kolejność optymalizacji:

Optymalizacja zasobów dla ujęć o eksploatacji okresowej prowadzona jest generalnie według tego samego schematu jak dla ujęć o ciągłej eksploatacji. Różnica dotyczy prognoz skutków eksploatacji, którą w przypadku ujęć eksploatowanych okresowo wykonuje się dla dwóch wariantów poboru:

- w wysokości zapotrzebowania rocznego,
- na koniec okresu eksploatacji okresowej.

W pierwszym przypadku do obliczeń wykorzystuje się schematy dla ruchu ustalonego, w drugim należy posługiwać się wzorami dla filtracji nieustalonej. Prognozy dotyczą każdego aspektu obliczeń, tj. zagadnień hydrodynamicznych (depresja s_w , s_c , s_{rej}) oraz prognoz jakościowych.

Wniosek zasobowy dla ujęć eksploatowanych okresowo zawiera:

- a) zasoby eksploatacyjne ujęcia – Q_c określone jako zapotrzebowanie w odniesieniu rocznym [m^3/h],
- b) depresję studzienną – s_c określoną dla zapotrzebowania w okresie rocznym [m],
- c) dla ujęć wielootworowych depresję rejonową – s_{rej} [m].
Wielkość depresji jest datowana analogicznie jak dla ujęć o ciągłej eksploatacji (z podaniem odniesienia do zwierciadła wody pierwotnego, lub zmniejszonego już istniejącą eksploatacją),
- d) średni pobór w okresie planowanej eksploatacji [m^3/h],
- e) depresję studzienną s_c dla końca okresu eksploatacji [m],
- f) dla ujęć wielootworowych depresję rejonową – s_{rej} dla końca okresu eksploatacji [m],
- g) powierzchnię obszaru zasobowego wraz ze wskazaniem jego granic na mapie w skali nie mniejszej niż 1:25 000 (wyjątkowo 1: 50 000).

III. Weryfikacja zasobów eksploatacyjnych ujęcia

Nowy wniosek zasobowy należy sporządzić w następujących przypadkach:

1. Stwierdzenie zmian warunków hydrogeologicznych w rejonie ujęcia lub zmian jego parametrów eksploatacyjnych (w aspekcie ilościowym i jakościowym).
2. Konieczność zmiany wielkości zasobów lub poboru wody w wyniku określenia lub weryfikacji zasobów dyspozycyjnych zbiornika wód podziemnych lub z powodu opracowania zasad rozrządu wody we wspólnej dokumentacji hydrogeologicznej obejmującej obszar skupionej eksploatacji (aglomeracje miejskie, odwadniane obszary górnicze).

W każdym z powyższych przypadków procedura wymaga opracowania dodatku do dokumentacji hydrogeologicznej z nowym wnioskiem zasobowym uwzględniającym stwierdzone ograniczenia. W dodatku należy przedstawić szczegółową charakterystykę przebiegu dotychczasowej eksploatacji i jej skutków.

Wniosek zasobowy formułowany jest analogicznie jak w pkt. I i II.

7.3. Zasadność ustanowienia strefy ochronnej i monitoringu ujęcia

Strata ochronna ujęcia

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać dokumentacje hydrogeologiczne i geologiczno-inżynierskie (Dz. U. Nr 153, poz. 1779) nakłada na dokumentującego obowiązek, by w dokumentacji hydrogeologicznej ustalającej zasoby eksploatacyjne ujęcia wód podziemnych było zawarte uzasadnienie potrzeby ustanowienia strefy ochronnej lub koncepcja ochrony źródła naturalnego.

W ustawie z dnia 18 lipca 2001 r. – Prawo wodne (Dz. U. Nr 115, poz. 1229) w art. 51 zapisano, że w celu zapewnienia odpowiedniej jakości wody ujmowanej do zaopatrzenia ludności w wodę przeznaczoną do spożycia oraz zaopatrzenia zakładów wymagających wody wysokiej jakości, a także ze względu na ochronę zasobów wodnych, mogą być ustanawiane:

- 1) strefy ochronne ujęć wody,
- 2) obszary ochronne zbiorników wód śródlądowych.

W art. 52 zapisano:

ust. 1 – strefę ochronną ujęcia wody, zwaną dalej „strefą ochronną”, stanowi obszar, na którym obowiązują zakazy, nakazy i ograniczenia w zakresie użytkowania gruntów oraz korzystania z wody,

ust. 2 – strefę ochronną dzieli się na **tereny ochrony**:

- 1) bezpośredniej,
- 2) pośredniej;

ust. 3 – dopuszcza się ustanowienie strefy ochronnej, obejmującej wyłącznie teren ochrony bezpośredniej, jeśli jest to uzasadnione lokalnymi warunkami hydrogeologicznymi i geomorfologicznymi oraz zapewnia konieczną ochronę ujmowanej wody.

W art. 58 – strefę ochronną ustanawia się na wniosek i koszt właściciela ujęcia wody.

Z analizy powyższych zapisów wynika, że dokumentacja hydrogeologiczna ujęcia wód podziemnych służących do zaopatrzenia w wodę ludności przeznaczoną do spożycia oraz zaopatrzenia zakładów wymagających wody wysokiej jakości (przemysł spożywczy, farmaceutyczny) powinna zawierać uzasadnienie potrzeby ustanowienia strefy ochronnej ujęcia (również ze źródła) jej rodzaj i proponowane granice.

Potrzeba ustanowienia strefy i jej granice powinny wynikać z przesłanek hydrogeologicznych i istniejącego zagrożenia antropogenicznego, popartych stosownymi obliczeniami i analizą hydrogeologiczną przedstawioną na mapach. Generalne zasady w tym względzie podane są w rozdz. 5.7 poradnika, zaś szczegółowo w Prawie wodnym (art. 52-58) oraz w problemowym poradniku metodycznym (Macioszczyk i inni, 1994). Rodzaj strefy i jej wielkość wynika z art. 55 Prawa wodnego, który określa:

- „Teren ochrony pośredniej ujęcia wód podziemnych obejmuje obszar zasilania ujęcia wody; jeżeli czas przepływu wody od granicy obszaru zasilania do ujęcia jest dłuższy od 25 lat, strefa ochronna powinna obejmować obszar objęty 25-letnim czasem wymiany wody w warstwie wodonośnej”.
- „Teren ochrony pośredniej ujęcia wód podziemnych wyznacza się na podstawie ustaleń zawartych w dokumentacji hydrogeologicznej ujęcia”.

Z powyższych zapisów Prawa wodnego wynika, że w dokumentacji hydrogeologicznej określającej potrzebę ustanowienia strefy ochronnej ujęcia, powinien być określony w obszarze jego zasilania 25-letni czas wymiany wody w warstwie wodonośnej. Jeżeli ten czas, biorący również pod uwagę szczelność nadkładu, jest większy od 25 lat, dla ujęcia należy ustanowić strefę ochronną obejmującą tylko tereny ochrony bezpośredniej. Wówczas dla strefy ochronnej ujęcia należy określić zakazy, nakazy i ograniczenia (art. 53 ust. Prawa wodnego), gdyż dokumentacja hydrogeologiczna takiego ujęcia stanowi podstawę ustanowienia strefy ochronnej ujęcia wody przez organ właściwy do wydania pozwolenia wodnoprawnego (art. 58 ust. 5 Prawa wodnego). Ustanowienie następuje na wniosek i koszt właściciela ujęcia wody.

W przypadku, gdy wymagane jest ustanowienie terenów ochrony pośredniej, dokumentacja hydrogeologiczna stanowi załącznik do wniosku o ustanowienie strefy ochronnej ujęcia przedkładanego przez jego właściciela do dyrektora regionalnego zarządu gospodarki wodnej (art. 58 ust. 1 – 4 Prawa wodnego). Wniosek jest odrębnym opracowaniem, którego zawartość precyzuje art. 58 ust. 2 Prawa wodnego.

Monitoring ujęcia wody

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać dokumentacje hydrogeologiczne i geologiczno-inżynierskie (Dz. U. Nr 153, poz. 1779) w rozdz. 2 §8 ust. 1 pkt. 10 określa konieczność podania w dokumentacji hydrogeologicznej ustalającej zasoby eksploatacyjne ujęcia wody „zalecenia racjonalnej eksploatacji i obserwacji ujęcia”.

Z powyższego wynika, że oprócz danych ograniczających wielkość eksploatacji, którymi są wydatek i depresja, należy określić:

- sposób i częstotliwość pomiarów wydatku i zwierciadła wody na ujęciu,
- badania jakości wód, ich zakres i częstotliwość.

W przypadku małych ujęć wody ten „monitoring” powinien być ustalony dla studni ujęcia biorąc pod uwagę uwarunkowania hydrogeologiczne i zagrożenia zmian jakości w czasie jego eksploatacji oraz rodzaj strefy ochronnej i jej zasięg.

Natomiast dla dużych ujęć lub ujęć o stwierdzonych zagrożeniach (w czasie i przestrzeni) powinien być zaprojektowany monitoring osłonowy ujęcia. Podstawowe zasady takiego monitoringu zostały podane w pracy metodycznej (Kazimierski, Sadurski-red., 1999). Projekt monitoringu osłonowego ujęcia powinien być przedstawiony w rozszerzonym rozdziale dokumentacji hydrogeologicznej lub w oddzielnym opracowaniu, ze szczegółowym określe-

niem zasad monitorowania wydatków studni ujęcia, jakości wody, stanów zwierciadła wody w studniach eksploatowanych i otworach obserwacyjnych, a także sposobu i częstotliwości opracowywania raportów z wykonanych badań i obserwacji.

8. Przykłady dokumentowania zasobów i optymalizacji poboru wody

Przytoczone w tym rozdziale przykłady dokumentowania zasobów dla różnych typów ujęć oraz weryfikacji wielkości ich zasobów wskazują, że do optymalizacji warunków pracy ujęć zawsze należy podchodzić indywidualnie. Przekonują, także, że pobór musi być monitorowany w zakresie rejestracji przebiegu eksploatacji (wydajność ujęcia, depresja w studni, depresja regionalna) oraz zmian jakości pobieranych wód.

Zamieszczone zostały przykłady dwóch ujęć małych pracujących w ośrodku porowatym (rozdz. 8.1.1) oraz w ośrodku szczelinowym (rozdz. 8.1.2). Zasoby ustalano w nich metodami hydrodynamicznymi i hydraulicznymi na podstawie próbnych pompowań pojedynczego otworu (8.1.1) oraz na podstawie analizy wyników próbnych pompowań w studni eksploatacyjnej i awaryjnej (8.1.2). Trzeba zaznaczyć, że prezentowane wyniki prac obrazują praktykę dokumentowania zasobów eksploatacyjnych małych ujęć stosowaną w czasie prowadzenia tych prac (koniec lat 90.). Uzyskane doświadczenia pozwoliły na wypracowanie zasad dokumentowania prezentowanych w niniejszym poradniku i zalecanych do praktycznego stosowania.

Kolejny przykład (rozdz. 8.2) dotyczy pracy ujęcia (jednego z wielu) zlokalizowanego w zbiorniku sandrowym, w wodach którego zaznaczają się silne wpływy ognisk zanieczyszczeń. Wieloletnie obserwacje i badania pozwoliły na zbudowanie modelu krążenia wód i wykonanie symulacji komputerowych, w wyniku których zweryfikowano wielkość zasobów eksploatacyjnych ujęcia i zoptymalizowano warunki poboru wody ze zbiornika dla zminimalizowania zagrożenia ich jakości.

Pojawiające się zagrożenie geogeniczne eksploatowanych wód (zmienna jakość ze wzrostem wydatku) i wyniki wieloletniej, monitorowanej eksploatacji zmusiły dokumentatorów do zbudowania modelu i weryfikacji zasobów w jed-

nowarstwowym zbiorniku wód podziemnych (rozdz. 8.3) celem ustalenia optymalnych warunków pracy studni.

W kolejnym przykładzie (rozdz. 8.4) zaprezentowano metodykę postępowania w dokumentowaniu zasobów ujęcia pracującego w wielowarstwowym zbiorniku, wody którego są zagrożone czynnikami antropogenicznymi. W trakcie postępowania reinterpretowano wyniki pompowań badawczych ustalając drogi uprzywilejowanych przepływów wody i ustalono kryteria hydrodynamiczne, przyjęcie których pozwoliło na zweryfikowanie zasobów metodą kolejnych przybliżeń z zastosowaniem wzorów hydrodynamicznych.

Konieczność wielokrotnej weryfikacji zasobów eksploatacyjnych dużego ujęcia komunalnego pracującego w szczelinowo-krasowym zbiorniku wód (GZWP 41-Kielce, rozdz. 8.5) wynikała bądź to z przeszacowania zasobów, bądź też pojawiających się wpływów innych ujęć, pracujących w tej samej strukturze hydrogeologicznej, czy wreszcie w wyniku silnego zagrożenia jakości wód ze strony ujawnionego ogniska zagrożeń. Ustalone pierwotnie metodami bilansowymi i obliczeń hydrogeologicznych zasoby ujęcia były kilkakrotnie weryfikowane na modelu analogowym i numerycznym. Wielowariantowe rozwiązania pozwoliły na wybór optymalnych parametrów eksploatacyjnych ujęcia i korektę wielkości jego zasobów oraz warunków poboru wody z innych, współdziałających ujęć (kierunkowa przepuszczalność dewońskich skał wodonośnych).

Równie duże problemy z ustaleniem zasobów eksploatacyjnych ujęcia brzegowego w dolinie rzeki Warty przedstawiono w rozdziale 8.6. Główną rolę w kształtowaniu się wielkości zasobów tego ujęcia odgrywają: intensywność i źródła zasilania zależne od zmienności warunków atmosferycznych i hydrologicznych, procesy hydrogeochemiczne oraz zróżnicowanie typów ujęć (studnie tarasowe, lewarowe i głębinowe, studnie brzegowe oraz studnia promienista). W przykładzie tym wielkość zasobów eksploatacyjnych ustalono i zweryfikowano wieloma metodami: bilansowymi, hydrologicznymi, modelowania analogowego i numerycznego. Szczególną uwagę zwrócono na rolę wpływu procesów hydrogeochemicznych w formowaniu się zasobów i konieczność zmian warunków eksploatacji (wydajność odcinków barier studziennych, ich rozmieszczenie, wielkość depresji) i konieczność lokalnego uzupełnienia zasilania warstwy wodonośnej drogą sztucznej infiltracji w części ujęcia.

Również w kolejnym przykładzie (rozdz. 8.7) zaprezentowano metodykę weryfikacji zasobów ujęcia pracującego w pradolinnym zbiorniku wód podziemnych. Konieczność weryfikacji wynikała z obserwowanego pogarszania się jakości wód. Pierwotnie ustalona (metodą ekstrapolacji wyników próbnego pompowania i obliczeń analitycznych) wielkość zasobów ujęcia została zmniejszona po szczegółowym rozpoznaniu warunków hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych metodą modelowania numerycznego. Wiele miejsca w prezentacji tego przykładu poświęcono rozpoznaniu przebiegu procesów hydrogeochemicznych, wyniki którego umożliwiły ustalenie warunków brzegowych do symulacji modelowych.

W ostatnim przykładzie (rozdz. 8.8) omówiono historię i warunki pracy ujęcia bazującego na naturalnych wypływach wody podziemnej (źródle) na południowym stoku wzgórza w dolinie Popradu.

Jak z powyższego przeglądu wynika, w większości przykładów omówiono zagadnienia związane z koniecznością weryfikacji zasobów eksploatacyjnych ujęć po kilku lub kilkunastu latach ich pracy. Konieczność taka wynika bądź to z pogarszania się jakości wód, bądź też z nadmiernego przyrostu depresji w studniach, często powiązanej z nadmiernym i niepożądanym rozwojem depresji regionalnej. Przyczyną tych zjawisk jest przekroczenie wielkości zasobów dyspozycyjnych zbiornika, które nie zostały uwzględnione przy ustalaniu zasobów eksploatacyjnych. Zwrócono także uwagę na zakres właściwego rozpoznania szeroko rozumianych warunków hydrogeologicznych oraz efektywność obliczeń numerycznych w ustalaniu i weryfikowaniu wielkości zasobów eksploatacyjnych ujęć, szczególnie w przypadku ujęć dużych i pracujących w specyficznych warunkach.

8.1. Małe ujęcie wody w prostych warunkach hydrogeologicznych

8.1.1. Ujęcie ze zbiornika porowego

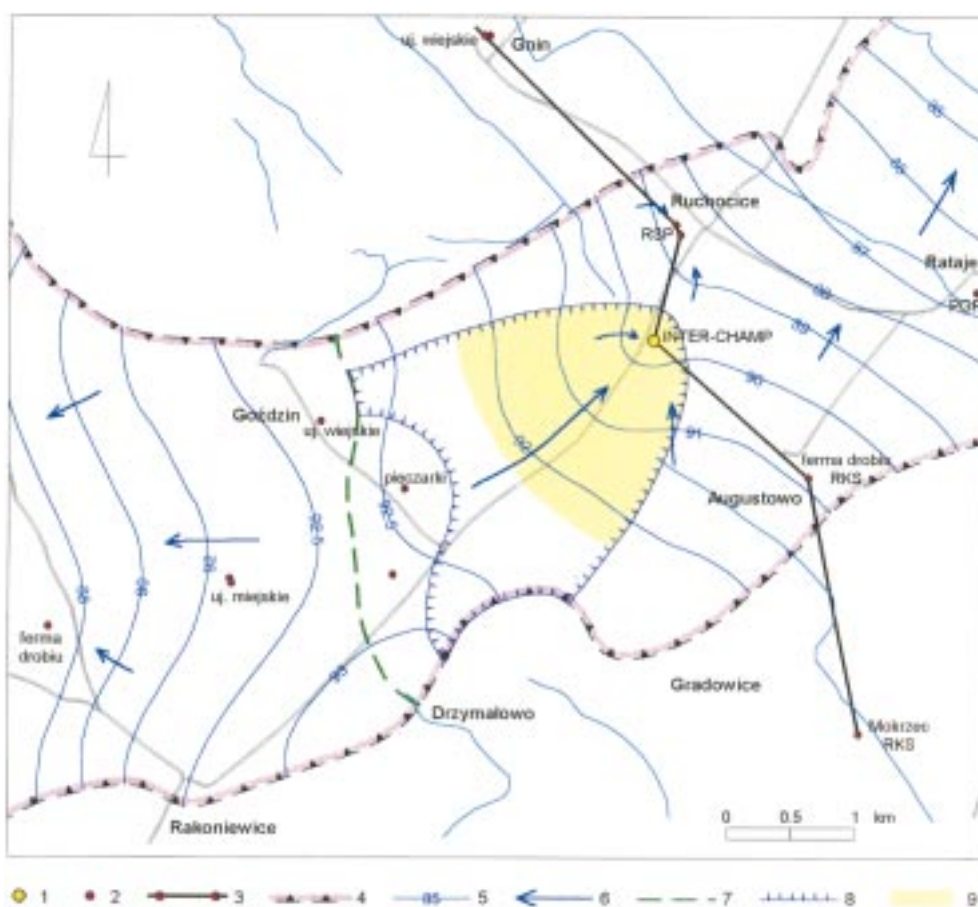
Dokumentowanie zasobów eksploatacyjnych dla ujęcia wody zakładu Inter – Champ Company Limited, Ruchocice – Poland wykonała firma Hydroservis Zakład Geologiczno-Wiertniczy w Poznaniu w roku 2001. Zadaniem geologicznym było udokumentowanie na terenie zakładu zasobów wód podziemnych w ilości 17 200 m³/rok, tj. 20 m³/h przy maksymalnym zapotrzebowaniu godzinowym 40,0 m³/h. Woda o jakości odpowiadającej wodzie pitnej przeznaczona jest do celów pitnych i gospodarczych.

Wieś Ruchocice znajduje się w powiecie grodziskim, województwo wielkopolskie. Położona jest na wysoczyźnie Pojezierza Poznańskiego w subregionie wału Lwówecko-Rakoniewickiego (rys. 8.1-1). Jest to falista wysoczyzna morenowa o rzędnych terenu 88-100 m n.p.m. Sieć hydrograficzną stanowią bezimienne cieki i rowy melioracyjne odprowadzające wody do doliny Obry znajdującej się w odległości ok. 8 km na południe od Ruchocic. Rzędna terenu przy dokumentowanym otworze wynosi 97,8 m n.p.m.

Budowa geologiczna rejonu ujęcia zobrazowana jest na przekroju hydrogeologicznym – rysunek 8.1-2. Osady czwartorzędowe mają tu miąższość od 30 do 90 m i zalegają na trzeciorzędowych iłach poznańskich górnego miocenu. W obrębie utworów czwartorzędowych wyróżnia się kilka różnowiekowych poziomów glin zwałowych (od zlodowacenia południowopolskiego po zlodowacenie bałtyckie – Wisły), oraz cztery serie osadów fluwioglacjalnych i rzecznych o zmiennej miąższości i rozprzestrzenieniu. Budują je piaski, piaski ze żwirem, lokalnie iły i mułki zastoiskowe. Zasięg doliny kopalnej wypełnionej piaskami i żwirami

z okresu interglacjału wielkiego i zlodowacenia środkowopolskiego, będącej przedmiotem rozpoznania hydrogeologicznego, ustalono na podstawie badań geofizycznych i wierceń hydrogeologicznych.

Warunki hydrogeologiczne. W obrębie utworów czwartorzędowych można wyróżnić poziom wód gruntowych, poziomy międzyglinowe górny i dolny oraz lokalnie poziom podglinowy.



Rys. 8.1-1. Mapa hydrogeologiczna rejonu Ruchocic.

1 – otwór dokumentowany (ujęcie wody), 2 – otwory hydrogeologiczne innych ujęć, 3 – linia przekroju hydrogeologicznego, 4 – granica występowania międzyglinowej jednostki hydrogeologicznej (dolina kopalna), 5 – hydroizohipsy poziomego międzyglinowego przy eksploatacji ujęcia $Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$, 6 – kierunki spływu wód, 7 – dział wód podziemnych, 8 – granica spływu wody do ujęcia, 9 – obszar zasobowy ujęcia (wyznaczony 25-letnim czasem dopływu wody do ujęcia).

Poziom wód gruntowych występuje w serii przypowierzchniowej piasków wodnolodowcowych o miąższości do 9 m. Swobodne zwierciadło wody poziomu zalega na głębokości od ok. 1 m do ok. 8,5 m.

Poziom ten zasilany jest na drodze infiltracji opadów, a drenowany przez sieć rowów i drobnych cieków. Nie stanowi on aktualnie poziomu użytkowego, również z uwagi na zanieczyszczenie antropogeniczne wód.

Poziom międzyglinowy górny występuje lokalnie w strefie głębokości 10-30 m w osadach piaszczysto-żwirowych rozdzielających gliny zlodowacenia środkowopolskiego od glin zlodowacenia bałtyckiego. Jest to poziom o ciśnieniu subartezyjskim, którego zwierciadło wody w rejonie Ruchocic zalega na głębokości 8-9 m. Nie stanowi on poziomu użytkowego.

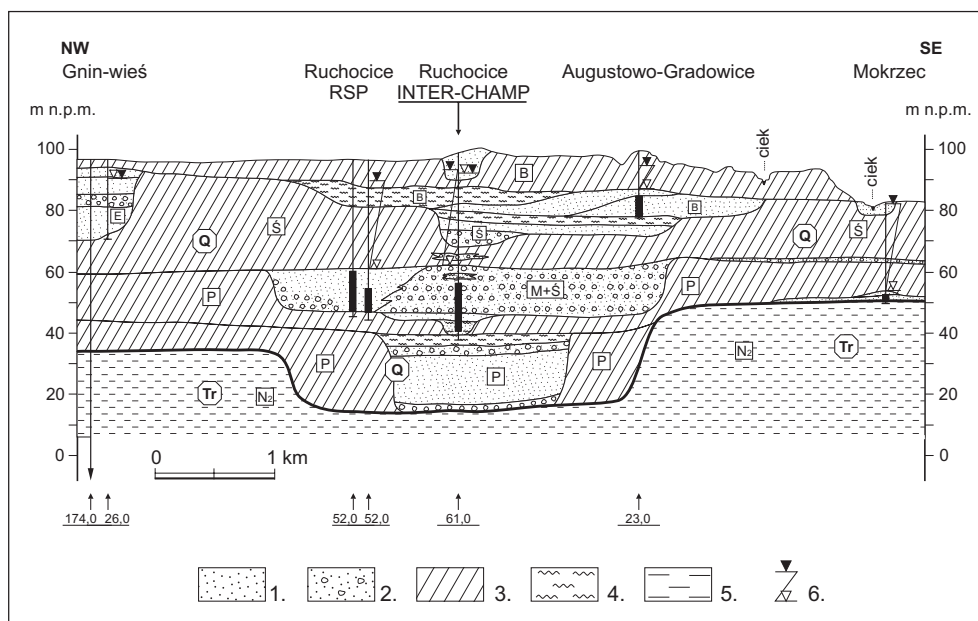
Poziom międzyglinowy dolny występujący w strefie głębokości 35-60 m w osadach doliny kopalnej stanowi główny poziom użytkowy rejonu. Ujmują go do eksploatacji ujęcia wiejskie w Ruchocicach i w sąsiednich miejscowościach: Rataje i Gnin. Poziom ten tworzą piaski średnio- i gruboziarniste, piaski ze żwirem, żwiry oraz piaski pylaste, o miąższości 10-20 m. Jest to poziom o ciśnieniu subartezyjskim, zwierciadło wody stabilizuje się na głębokości 6-9 m. Parametry filtracyjne obliczone na podstawie próbnych pompowań kształtują się następująco: współczynnik filtracji $k = 0,2-2,3$ m/h, przewodność $T = 6-32$ m²/h. Wydatki jednostkowe studni są zmienne w granicach 1,7-12 m³/h/m. Zasilanie poziomu odbywa się na drodze przesączania wód z nadległych poziomów czwartorzędowych lub przez infiltrację opadów poprzez kompleks gliniasty. Według badań modelowych rejonu GZWP nr 144 – Wielkopolska Dolina Kopalna (WDK) położonej w sąsiedztwie (na północ od Ruchocic), zasilanie to w warunkach naturalnych wynosi średnio 4,34 m³/h/km². Przepływ wód podziemnych ma miejsce od działu wodnego w rejonie Goździna w kierunku NE do WDK, w której znajduje się badane ujęcie w Ruchocicach.

Woda spełnia wymogi określone dla wody pitnej, za wyjątkiem zawartości żelaza i manganu (0,5-1,2 mgFe/l, 0,15-0,2 mgMn/l). Mineralizacja ogólna wynosi 0,36 g/l, wody są średnio twarde.

Poziom podglinowy występuje w tym rejonie w spągu osadów czwartorzędowych, lecz nie został przestrzennie rozpoznany.

Zakres prac projektowanych dla wykonania ujęcia

Na potrzeby projektu zebrano i przeanalizowano dane z archiwalnych wierceń hydrogeologicznych, badań elektrooporowych i hydrogeologicznych badań regionalnych z obszaru ok. 30 km². Posłużyły one do wykonania przekroju hydrogeologicznego oraz mapy występowania poziomu użytkowego. Uznano, że dla zabezpieczenia potrzeb wodnych Zakładu Inter-Champ w Ruchocicach należy wykonać jeden otwór o głębokości ok. 60 m w celu ujęcia czwartorzędowej warstwy wodonośnej, która powinna wystąpić w strefie głębokości 36/40-55/70 m. Warstwę wodonośną zaprojektowano ująć kolumną filtrową z rur PVC Ø 315 mm, atestowaną dla wód pitnych, z częścią roboczą filtra o długości 15,0 m, której dopuszczalną wydajność ustalono na ok. 40 m³/h.



Rys. 8.1-2. Przekrój hydrogeologiczny w rejonie ujęcia Ruchocice INTER-CHAMP

1 – piaski, 2 – piaski ze żwirem i żwiry, 3 – gliny morenowe, 4 – muły, 5 – ropy, 6 – nawiercone i ustalone zwierciadło wody; czwartorzęd – Q: B – zlodowacenie bałtyckie, E – interglacjał eemski, Ś – zlodowacenie środkowopolskie, M – interglacjał mazowiecki, P – zlodowacenie południowopolskie; trzeciorzęd – Tr: N₂ – górny miocen.

Zaprojektowano następujące badania geologiczne:

- pobór próbek skał zgodnie z obowiązującymi w tym zakresie przepisami i normami,
- wykonanie analiz sitowych z projektowanej do ujęcia warstwy wodonośnej,
- próbne pompowanie otworu,
- pobór próbek wody pod koniec próbnego pompowania i wykonanie badań fizyczno-chemicznych (oznaczenie 40 parametrów jakościowych) oraz badań bakteriologicznych.

Próbne pompowanie zaprojektowano wg następującego schematu:

- pompowanie oczyszczające, zrywami ze zróżnicowaną wydajnością przez 8-12 h,
- dezynfekcja otworu i 24-godzinna przerwa technologiczna,
- pompowanie pomiarowe jednostopniowe przez ok. 72 h z wydatkiem ustalonym przez dozór hydrogeologiczny ($\sim 40 \text{ m}^3/\text{h}$).

Podczas pompowania pomiarowego zaprojektowano szczegółowe wykonywanie pomiarów opadania zwierciadła wody w otworze pompowanym, a po jego zakończeniu – pomiary wzniosu w czasie ok. 72 h. Wyniki pomiarów próbnego pompowania zalecono zinterpretować wg metody filtracji nieustalonej i ustalonej.

Wstępne obliczenia czasu przepływu zanieczyszczeń z powierzchni terenu wykazały, że będzie on dłużej trwał niż 25 lat, stąd uznano, że ustanowienie te-

renu ochrony pośredniej ujęcia nie będzie wymagane i nie zaprojektowano rejonowego rozpoznania ognisk zanieczyszczeń antropogenicznych.

Projekt badań został zatwierdzony decyzją starosty powiatu grodziskiego.

Wyniki wykonanych prac

Otwór nr 1 na terenie Zakładu Inter-Champ Company Ltd. wykonano metodą udarowo-obrotową bez użycia płuczki do głębokości 61,0 m, w końcowej kolumnie rur $\varnothing$ 457 mm. Projektowana do ujęcia warstwa wodonośna wystąpiła na głębokości 41,0-59,0 m (od 55 m piaski pylaste) – rysunek 8.1-2. Ujęto ją filtrem z rur PVC $\varnothing$ 315 mm, gwintowanych o następującej konstrukcji:

- rura podfiltrowa o długości 1,0 m,
- część czynna o długości 15,0 m (siatka nylonowa nr 10),
- rura nadfiltrowa o długości 43,0 m.

Wokół części czynnej filtra wykonano obsypkę o granulacji 1,4-2,0 mm, a kolumnę rur $\varnothing$ 457 mm podciągnięto do głębokości 40 m w celu odsłonięcia części czynnej filtra.

Po zakończeniu próbnego pompowania wyciągnięto kolumny tych rur, a wprowadzono kolumnę $\varnothing$ 406 mm, którą pozostawiono jako rury studzienne, zamykające po zaizolowaniu również poziom wód gruntowych i międzyglinowy górny.

Pompowanie oczyszczające wykonano w łącznym czasie 7 h uzyskując wydatek 57,0 m³/h (maksymalną wydajność pompy). Potem otwór zachlorowano i zarządzono postój technologiczny.

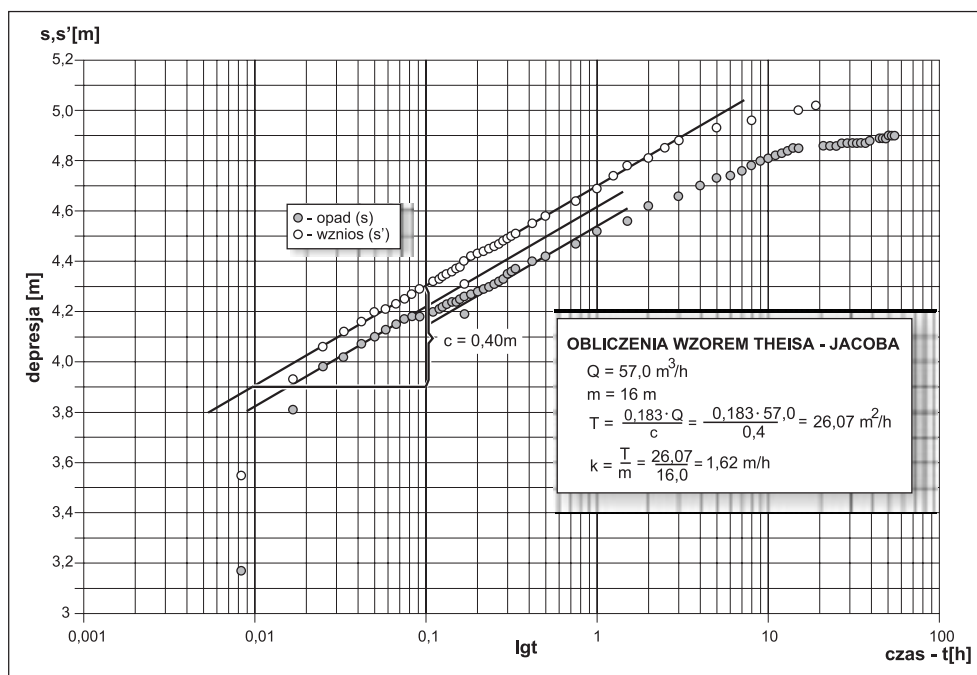
Pompowanie pomiarowe wykonano w czasie 54 h na jednym stopniu dynamicznym ze średnią wydajnością 57,0 m³/h uzyskując na koniec pompowania depresję $s = 4,90$ m i nie uzyskując jej stabilizacji. Podczas pompowania wykonywano w otworze pomiary zwierciadła wody, a po zakończeniu – pomiary wzniosu przez 20 h. Wyniki pomiarów oraz obliczenie parametrów hydrogeologicznych (T , k) z filtracji nieustalonej podano na rysunku 8.1-3. Pod koniec pompowania pobrano wodę do badań fizyczno-chemicznych.

Analiza wykresów (s , s') = $f(lgt)$ wykazuje, że:

- w zasilaniu ujęcia dużą rolę odgrywa przesączanie wód z poziomu podglinowego górnego o czym świadczy położenie wykresu wzniosu powyżej linii opadania;
- obszar wpływu pompowania nie objął granic bocznych (szczelnych) warstwy wodonośnej;
- na filtrze istnieje znaczny zeskok wynikły przede wszystkim z powodu niezupełności studni, a także z uwagi na fakt, że jednym odcinkiem filtra ujęto piaski drobne i żwiry przy zastosowaniu jednakowej siatki filtracyjnej i jednakowej granulacji obsypki.

Wyniki obliczeń hydrogeologicznych

- 1) Współczynnik filtracji wg wzoru Hazena: $k = 1,07$ m/h ($d_{10} = 0,161$ mm – średnia ważona z przesiewów).



Rys. 8.1-3. Wykres pompowania pomiarowego w funkcji $(s,s')=f(\lg t)$ otworu INTER-CHAMP w Ruchocicach.

2) Filtracja ustalona, wzór Dupuita:

$k = 0,93 \text{ m/h}$ ($Q = 57 \text{ m}^3/\text{h}$, $s = 4,9 \text{ m}$, $r = 0,215 \text{ m}$, $m = 15,0 \text{ m}$), $R = 253 \text{ m}$ (wielkość obciążona błędem wynikłym z nieuwzględnienia zeskoku na filtrze).

3) Dopuszczalna prędkość wlotowa wody do filtra wg wzoru Truelsen'a (dla studni wodociagowych):

$$V_{\text{dop.}} = 9,8\sqrt{k} \quad (k \text{ w m/d}) = 46,3 \text{ m/d} = 1,93 \text{ m/h}$$

4) Wydatek dopuszczalny filtra wg wzoru Sichardta:

$$Q_{\text{dop.}} = V_{\text{dop.}} \cdot F, \text{ gdzie } F = 3,14 \cdot d \cdot l = 3,14 \cdot 0,457 \text{ m} \cdot 15,0 \text{ m} = 21,5 \text{ m}^2$$

$$\text{stąd } Q_{\text{dop.}} = 1,93 \text{ m/h} \cdot 21,5 \text{ m}^2 = 41,5 \text{ m}^3/\text{h}$$

5) Wydatek jednostkowy: $q = Q/s = 57,0/4,9 = 11,63 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$

6) Wydajność zgodna z zapotrzebowaniem:

$$Q_e = 20,0 \text{ m}^3/\text{h} \text{ i } s_e = 1,80 \text{ m} \quad (s_e = Q_e/q)$$

7) Zasięg leja depresji przy $Q_e = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ wg wzoru Sichardta: $R = 83,0 \text{ m}$

8) Filtracja nieustalona, wzór Theis'a-Jacoba (rys. 8.1-3):

$$T = 26,07 \text{ m}^2/\text{h}, k = 1,62 \text{ m/h}$$

9) Depresja dla studni zupełnej, idealnej przy $Q = 57,0 \text{ m}^3/\text{h}$

$$\text{wg wzoru Dupuita przy } T = 26,07 \text{ m}^2/\text{h}: s_i = 2,46 \text{ m}$$

10) Zeskok na filtrze: $\Delta s = s - s_i = 4,9 \text{ m} - 2,46 \text{ m} = 2,44 \text{ m}$

$$\text{Sprawność: } \frac{\Delta s}{s} = \frac{2,44}{4,9} = 0,5 \text{ (50\%)}$$

Ustalenie zasobów eksploatacyjnych ujęcia

Badany obszar nie posiada udokumentowanych zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych. Dla nowo wykonanego otworu hydrogeologicznego ujęcia Inter-Champ-Company Ltd. w Ruchocicach gm. Rakoniewice, ujmującego wody podziemne z utworów czwartorzędowych, ustalono zasoby eksploatacyjne w ilości: $Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ przy depresji 1,80 m dla stanu zwierciadła wody 6,0 m p.p.t., tj. dla rzędnej 91,84 m n.p.m. Otwór ten może być eksploatowany z dopuszczalnym maksymalnym wydatkiem $Q_{\text{dop.}} = 41,5 \text{ m}^3/\text{h}$, stąd możliwe jest osiągnięcie $Q_{\text{maxh}} = 40,0 \text{ m}^3/\text{h}$, przy depresji 3,5 m.

Dla ujęcia o wydatku $20 \text{ m}^3/\text{h}$ ustalono obszar spływu o powierzchni $4,12 \text{ km}^2$ wyznaczony graficznie z uwzględnieniem obszarów zasilania innych ujęć (rys. 8.1-1). Stąd moduł zasilania poziomu w obszarze spływu wód do ujęcia wynosi $4,85 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}^2$.

Obszar zasobowy ustalono w granicach spływu wody do ujęcia, dla 25-letniego czasu dopływu (rys. 8.1-1). Ma on powierzchnię $2,4 \text{ km}^2$ a w jego obrębie formuje się w ok. 60% zasobów ujęcia.

Wytyczne do ustanowienia strefy ochronnej ujęcia

Na podstawie ówczesnie obowiązujących przepisów zaproponowano ustanowienie terenu ochrony bezpośredniej w pasie gruntu o szerokości 8-10 m od zarysu obudowy studni. Zrezygnowano z wyznaczenia terenów ochrony pośredniej ujęcia, gdyż obliczony czas potencjalnego dopływu wody (zanieczyszczeń) do ujęcia wyniósł 25,3 lat.

8.1.2. Ujęcie ze zbiornika szczelinowego

Pierwszy otwór dla ujęcia wiejskiego w Bełdowie wykonano w roku 1968 ustalając zasoby eksploatacyjne w kat. „B” z utworów szczelinowych kredy górnej w ilości $24,7 \text{ m}^3/\text{h}$ (Wodrol Łódź). W roku 1996 zaistniała konieczność odwiercenia otworu awaryjnego dla ujęcia i ustalenia na nowo zasobów eksploatacyjnych. Zadanie geologiczne polegało na udokumentowaniu zwiększonych zasobów, co przy ujęciu składającym się tylko z 2 studni (podstawowa, awaryjna) oznaczało konieczność uzyskania z pojedynczego otworu wydajności przekraczającej możliwości eksploatacyjne istniejącej studni.

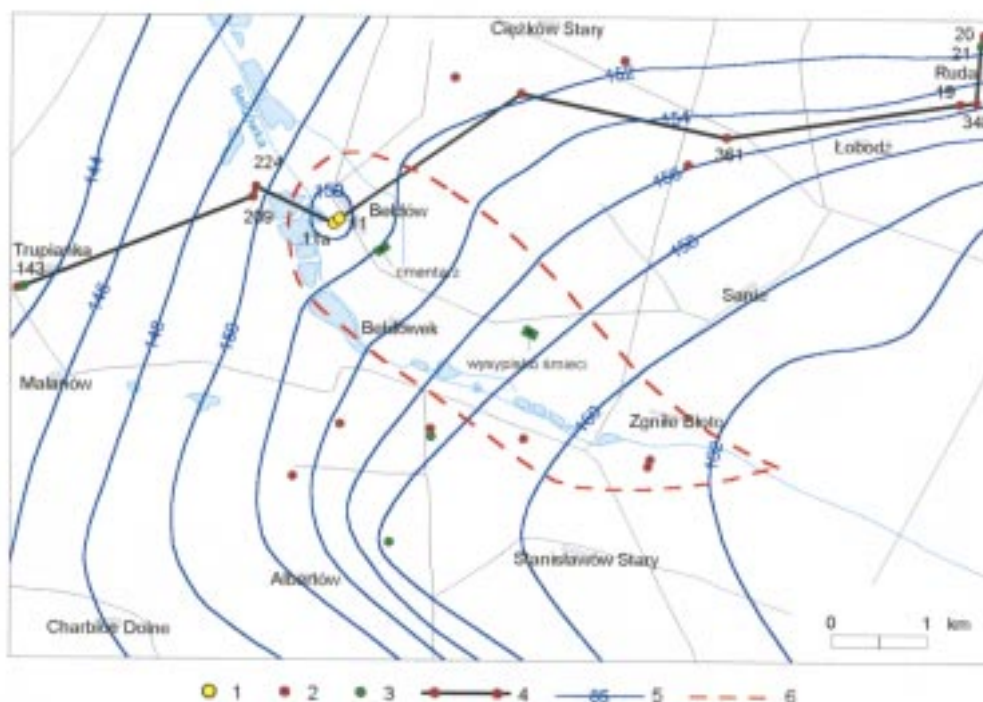
Wieś Bełdów położona jest na terenie gminy Aleksandrów Łódzki, na zdenurowanej równinie morenowej o rzędnych terenu 150-160 m n.p.m. stanowiącej fragment Wysoczyzny Łaskiej powstałej w okresie zlodowacenia środkowopolskiego. Przez wieś przepływa rzeka Bełdówka będąca dopływem Neru, na której pobudowano w tym rejonie szereg stawów (rys. 8.1-4).

Budowę geologiczną rejonu ujęcia obrazuje przekrój hydrogeologiczny – rysunek 8.1-5. Wierceniami do głębokości ok. 200 m rozpoznano tu utwory czar-

torzędu, trzeciorzędu i kredy górnej. Osady czwartorzędowe osiągają miąższość do ok. 50 m i zalegają na wapieniach marglistych kredy górnej. Utwory trzeciorzędowe występują jedynie w rejonie na wschód od Bełdowa, gdzie strop podłoża kredowego zapada głębiej. W obrębie osadów czwartorzędowych występuje kilka serii glin zwałowych oraz utwory piaszczyste stanowiące wypełnienia dolin kopalnych o niewielkim rozprzestrzenieniu. Na powierzchni terenu dominują utwory piaszczyste o miąższości kilku-, kilkunastu metrów.

Warunki hydrogeologiczne. W rejonie Bełdowa rozpoznano wody podziemne w utworach czwartorzędów i kredy górnej. W obrębie czwartorzędów tworzą one poziom wód gruntowych w powierzchniowych osadach fluwiogłacjalnych i rzecznych oraz dwa poziomy międzymorenowe w osadach piaszczysto-żwirowych, rozdzielających poziomy glin zwałowych. Czwartorzędowe piętro wodonośne jest powszechnie ujmowane do eksploatacji, mimo zróżnicowanych i niezbyt korzystnych parametrów hydrogeologicznych oraz niskich wydajności studni. Zwierciadło wody poziomu gruntowego oraz poziomów międzymorenowych występuje na podobnej głębokości; 1,2-2,5 m p.p.t. (rzedne 152,0-150,6 m n.p.m.).

Górnokredowy poziom wodonośny stanowią spękane i zwietrzałe w stropie wapienie margliste i jest to poziom o rozprzestrzenieniu regionalnym. Wodono-



Rys. 8.1-4. Mapa hydrogeologiczna rejonu Bełdowa.

1 – studnie ujęcia w Bełdowie, inne otwory hydrogeologiczne; 2 – piętra czwartorzędowego, 3 – poziomu górnokredowego; 4 – linia przekroju hydrogeologicznego, 5 – hydroizohipsy poziomu górnokredowego przy wydatku ujęcia w Bełdowie $Q = 24,0 \text{ m}^3/\text{h}$, 6 – granica obszaru zasilania ujęcia w Bełdowie.

śność poziomu jest wyraźnie zróżnicowana w pionie na dwie strefy: górną o miąższości ok. 5,0 m zbudowaną ze zwietrzałych wapieni i rumoszy w stropie osadów kredowych i dolną zbudowaną z wapieni marglistych o drobnych szczelinach. Według badań na ujęciu w Bełdowie przewodność całkowita strefy górnej wynosi 7,8-8,3 m²/h, zaś strefy dolnej – 4,3 m²/h. Zasilanie poziomu zachodzi na drodze przesączania wód z piętra czwartorzędowego w ilości 3-4 m³/h/km². Zwierciadło wody poziomu górnokredowego stabilizuje się na głębokości 1,5-3,0 m (rzędne 152,1-151,7 m n.p.m.).

Jakość wód jest korzystna na potrzeby komunalne, gdyż są to wody o niskiej mineralizacji (0,15-0,2 g/l) i twardości (2,5 mval/l), o niewielkiej, chociaż ponadnormalnej zawartości związków żelaza (1,2-1,5 mgFe/l) i manganu (0,1-0,12 mgMn/l). Wody poziomów międzymorenowych piętra czwartorzędowego charakteryzują się mineralizacją i zawartością związków żelaza i manganu dwukrotnie wyższą.

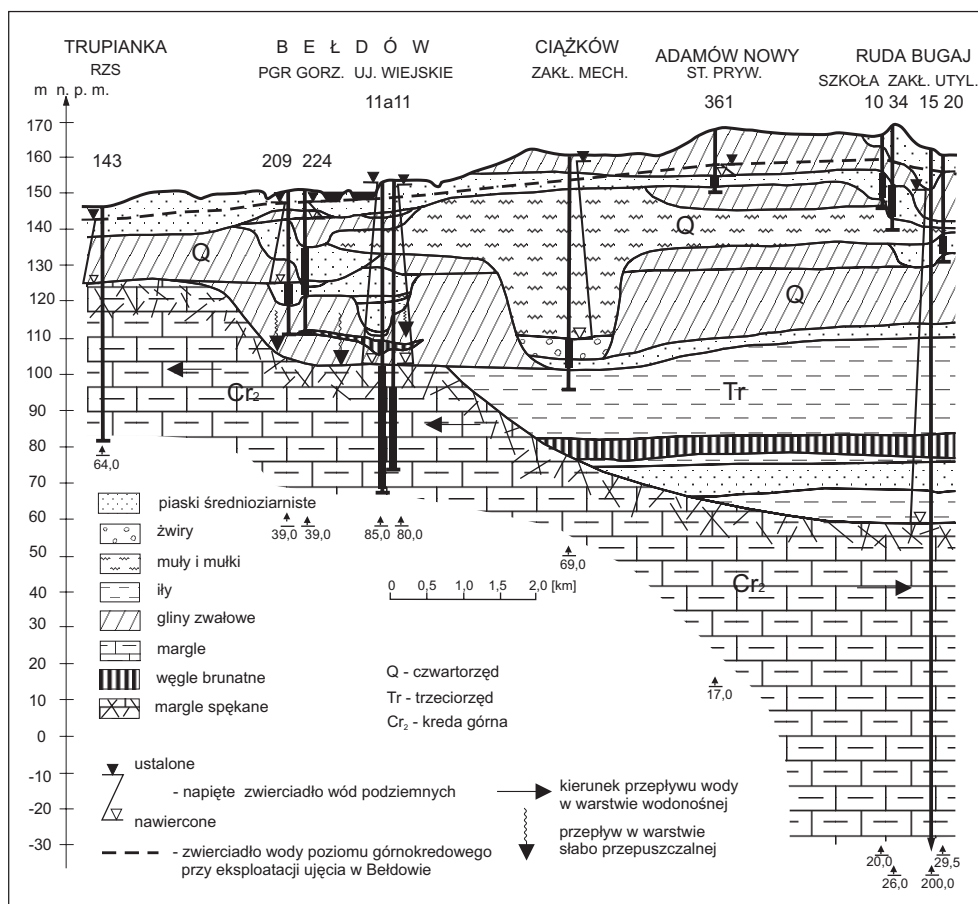
Prace geologiczne wykonane na ujęciu. Pierwszy otwór studzienny dla ujęcia wiejskiego w Bełdowie wykonano w latach 1967/1968 – otwór nr 11 na rysunku 8.1-4. Odwiercenie tego otworu odbyło się w dwóch etapach: w 1967 r. odwiercono go do głębokości 37,0 m i przebadano czwartorzędową warstwę wodonośną w przelocie 29,5-35,0 m uzyskując w próbnym pompowaniu wydajność 3,5 m³/h przy depresji 17,1 m. Wydajność ta nie pokrywała zapotrzebowania wynoszącego 16,0 m³/h, wobec czego w roku 1968 wiercenie otworu kontynuowano do głębokości 80 m. Poniżej głębokości 49,3 m stwierdzono poziom wodonośny w utworach wapieni marglistych kredy górnej. Otwór wiercony w rurach o średnicy 11^{3/4}” osadzono w 3-metrowym korku łożowym na głębokości 58,0 m w wapieniach marglistych twardych, zakrywając na głębokości 49,3-55,0 m strefę rumoszy i wapieni silnie spękanych. Do końcowej głębokości otwór wiercono „na boso” średnicą 10” (rys. 8.1-5). Pompowanie oczyszczające prowadzono ze zmienną wydajnością przez 73 h, uzyskując wydatek maksymalny 40,51 m³/h. Pompowanie pomiarowe prowadzono przez 26 h na 3 stopniach dynamicznych uzyskując następujące wyniki:

$Q_1 = 12,26 \text{ m}^3/\text{h}$	$s_1 = 3,10 \text{ m}$	$q_1 = 4,06 \text{ m}^3/\text{h/m}$	$t_1 = 8 \text{ h}$
$Q_2 = 24,68 \text{ m}^3/\text{h}$	$s_2 = 8,25 \text{ m}$	$q_2 = 2,92 \text{ m}^3/\text{h/m}$	$t_2 = 8 \text{ h}$
$Q_3 = 40,51 \text{ m}^3/\text{h}$	$s_3 = 23,70 \text{ m}$	$q_3 = 1,71 \text{ m}^3/\text{h/m}$	$t_3 = 10 \text{ h}$

Po zakończonym pompowaniu prowadzono pomiary wzniosu zwierciadła wody, uzyskując po 8 godzinach stan ustabilizowany – rysunek 8.1-6.

Po koniec każdego cyklu pompowania pobierano próby wody do badań jakościowych, a na koniec pompowania do badań technologicznych. Na podstawie osiągniętych wyników prac i badań opracowano dokumentację hydrogeologiczną ustalającą zasoby ujęcia w kat. „C” w ilości $Q = 40,5 \text{ m}^3/\text{h}$ przy depresji 23,7 m i w kat. „B” – $Q = 24,7 \text{ m}^3/\text{h}$ przy depresji 8,25 m. Zgodnie z ówczesnym stanem prawnym zasoby te w roku 1968 zostały zatwierdzone decyzją Prezydium WRN w Łodzi.

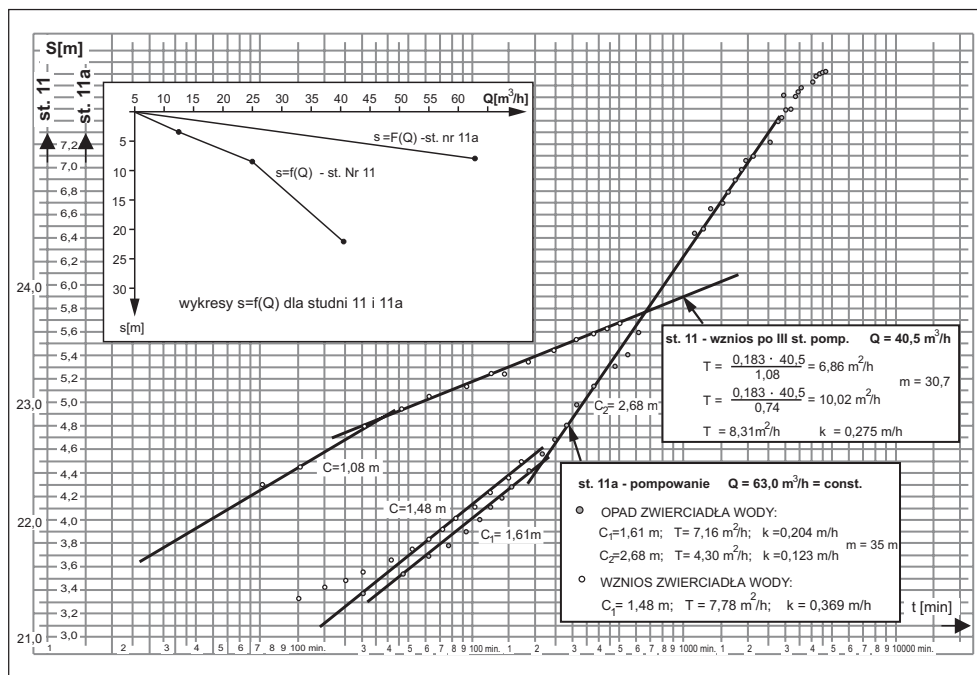
Wniosek zasobowy sformułowano na podstawie wyników pompowania pomiarowego na II i III stopniu dynamicznym (analiza wykresu $s=f(Q)$ i obliczeń



Rys. 8.1-5. Przekrój hydrogeologiczny rejonu Bełdowa.

współczynnika filtracji wzorem Krasnopolskiego dla poszczególnych stopni pompowania, przyjmując miąższość warstwy wodonośnej 22,0 m oraz zasięg leja depresji $R = 476$ m dla wydatku studni $Q = 40,51$ m³/h).

W roku 1996 dla ujęcia wiejskiego w Bełdowie opracowano projekt prac geologicznych na wykonanie otworu awaryjnego nr 11a o głębokości 85,0 m. Otwór ten wykonało w roku 1997 przedsiębiorstwo Wodrol Poznań. Jako rury studzienne pozostała kolumna rur średnicy 299 mm posadowiona w korku iłowym do głębokości 51,0 m. W przelocie 51,0-85,0 m otwór odwiercono bez rurowania. Pompowanie oczyszczające wykonano zrywami przez okres ok. 40 h. Pompowanie pomiarowe prowadzono przez 73,5 godziny jednym stopniem z wydatkiem 63,0 m³/h uzyskując na koniec pompowania depresję 7,85 m ($q = 8,03$ m³/h/m). W czasie pompowania pomiarowego wykonywano ciągłe obserwacje zwierciadła wody w pompowanym otworze 11a, a po jego zakończeniu pomiary wzniosu przez 3,5 h – rysunek 8.1-6, natomiast w otworze 11 pomiary prowadzono okresowo. Studnia nr 11 położona w odległości 11,5 m od otworu 11a w trakcie pompowania była



Rys. 8.1-6. Wykresy próbnych pompowań studni nr 11 i 11a w Bełdowie.

włączana rano i wieczorem w okresach godzinnych z wydatkiem ok. $3,0 \text{ m}^3/\text{h}$ dla zaopatrzenia w wodę 5 użytkowników w Bełdowie. Zmierzona depresja w otworze 11 na koniec pompowania otworu 11a wynosiła 6,14 m. Pod koniec próbnego pompowania pobrano próbę wody do analizy fizyczno-chemicznej i bakteriologicznej. Wyniki próbnego pompowania zinterpretowano określając:

- dla warunków filtracji ustalonej:
 - współczynnik filtracji ze wzoru Krasnopolskiego $k = 0,296 \text{ m/h}$,
 - wydatek jednostkowy $q = 8,03 \text{ m}^3/\text{h/m}$,
 - zasięg lejki depresji według wzoru Sichardta $R = 213 \text{ m}$.
- dla warunków filtracji nieustalonej metodą Theisa-Jacoba:
 - $T_1 = 7,78 \text{ m}^2/\text{h}$ i $k_1 = 0,222 \text{ m/h}$ przy $m = 35,0 \text{ m}$,
 - $T_2 = 4,30 \text{ m}^2/\text{h}$ i $k_2 = 0,123 \text{ m/h}$.

Analiza wykresu opadania i wzniosu zwierciadła wody po pompowaniu otworu 11a i wykonane obliczenia wykazują, że ujęty do eksploatacji masyw skał szczelinowych wykazuje podwójną przepuszczalność:

- przepuszczalność szczelin wietrzelinowych i tektonicznych, którą charakteryzuje przewodność T_1 i współczynnik filtracji k_1 ,
- przepuszczalność szczelin tektonicznych, którą charakteryzują parametry T_2 i k_2 .

Sporządzony obecnie na podstawie zachowanego dziennika pompowania wykres wzniosu zwierciadła wody po pompowaniu otworu nr 11 (rys. 8.1-6) wykazu-

je dla odcinka filtracji quasi ustalonej przewodność średnią $T_{sr} = 8,31 \text{ m}^2/\text{h}$, podobną do przewodności szczelin wietrzelinowych i tektonicznych z otworu nr 11a, przy braku odcinka charakteryzującego szczeliny tektoniczne. Brak tego odcinka filtracji na wykresie wynika z faktu zasłonięcia w otworze nr 11 strefy szczelin wietrzelinowych (najbardziej wodonośnych) rurami osłonowymi studni, co w pompowaniu na III stopniu wydajności doprowadziło do przekroczenia dopuszczalnej prędkości dla dopływu laminarnego do otworu i wywołało duży zeskok hydrauliczny (patrz wykres $s = f(Q)$).

Powyższe porównanie wykazuje, że poziom wodonośny górnokredowego masywu skał szczelinowych, o tych samych parametrach filtracyjnych i zasilania, posiada dla dwóch sąsiednich studni dwa różne parametry eksploatacyjne, w zależności od strefy ujętej do eksploatacji.

Ustalenie zasobów eksploatacyjnych ujęcia

W aneksie do dokumentacji hydrogeologicznej ujęcia w Bełdowie z 1997 r., opracowanym na podstawie wyników pompowania otworu nr 11a, ustalono zasoby ujęcia w ilości $Q = 30,0 \text{ m}^3/\text{h}$ przy $s = 3,75 \text{ m}$. Zasoby te są równe maksymalnym potrzebom godzinowym ujęcia. Obszar zasilania wyznaczono graficznie na mapie hydroizohips poziomu górnokredowego na podstawie siatki hydrodynamicznej w warunkach eksploatacji ujęcia z wydajnością równą średniorocznemu zapotrzebowaniu na wodę, tj. $24 \text{ m}^3/\text{h}$ przy depresji $3,0 \text{ m}$ – rysunek 8.1-4. Powierzchnia obszaru zasilania wyniosła $7,3 \text{ km}^2$.

Dokumentacja ustalająca zasoby została przyjęta w roku 1998 decyzją wojewody łódzkiego. Jednocześnie tą decyzją przyjęto również aneks nr 2 zawierający określenie terenów strefy ochronnej dla ujęcia opracowany przez „Hydroconsult” Sp. z o.o. Oddział w Poznaniu.

Wytyczne do ustanowienia strefy ochronnej ujęcia

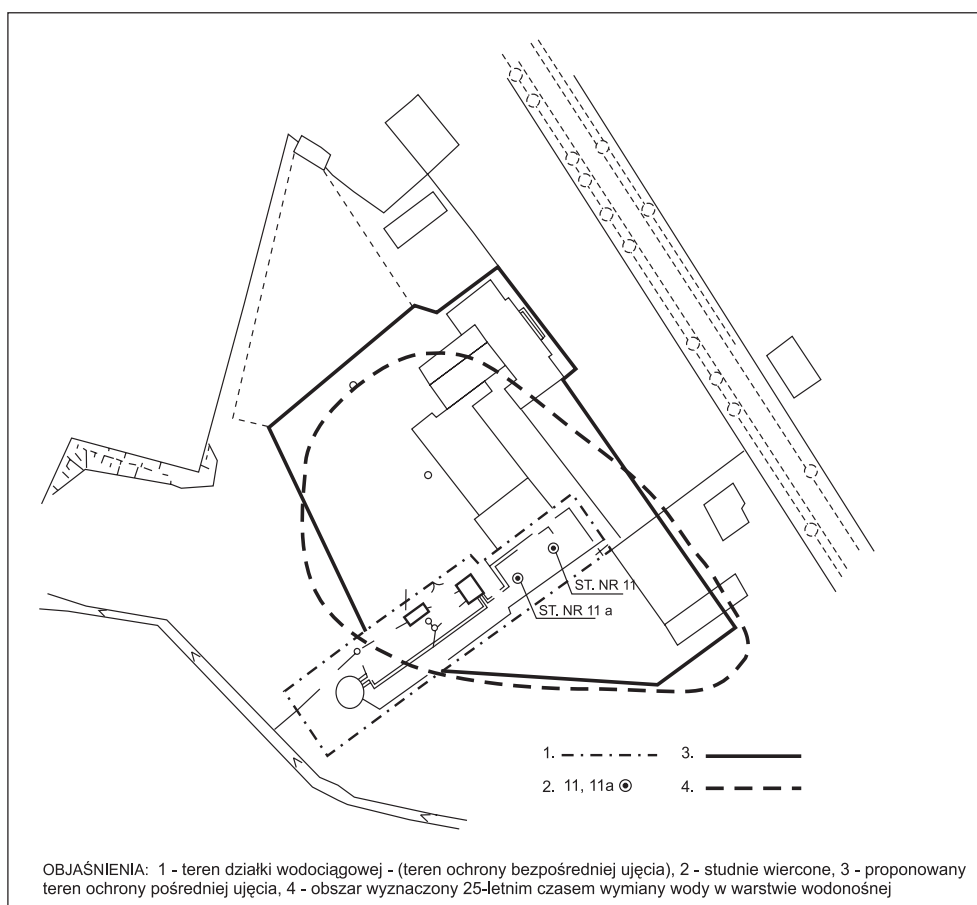
Strefę ochronną w Bełdowie określono dla ujęcia złożonego z dwóch studni o numerach 11 i 11a o średnim wydatku $Q = 24,0 \text{ m}^3/\text{h}$. W obrębie obszaru zasilania znajdują się wsie Bełdów, Bełdówek i Zgniłe Błoto, oraz gminne wysypisko śmieci i cmentarz, które stanowią potencjalne ogniska zanieczyszczeń wód podziemnych. Dla ujęcia zaistniała konieczność ustanowienia stref ochronnych zgodnie z obowiązującym wówczas stanem prawnym. Ustalono następujące tereny ochronne (rys. 8.1-7):

- 1) Teren ochrony bezpośredniej – ogrodzona działka wodociągowa o powierzchni 1740 m^2 , na której znajdują się studnie i obiekty budowlane wodociągu.
- 2) Zewnętrzny teren ochrony pośredniej wyznaczony 25-letnim czasem wymiany wód w warstwie wodonośnej, na który składają się:
 - czas pionowego dopływu zanieczyszczeń z powierzchni terenu do warstwy przez nakład utworów słabo przepuszczalnych (rys. 8.1-5) = $17,7 \text{ lat}$,
 - czas poziomego dopływu w warstwie równy $7,3 \text{ lat}$.

Obszar ograniczony izolinią 25-letniej wymiany wód w warstwie wodonośnej ma powierzchnię 7500 m² – rysunek 8.1-7. Teren ochrony pośredniej ujęcia obejmuje obszar upraw rolniczych, prywatnego gospodarstwa oraz szkoły. Dla tych terenów, jak i terenu ochrony bezpośredniej ujęcia sformułowano zakazy, nakazy i ograniczenia wynikające z oceny charakteru zagrożeń dla jakości wód podziemnych.

W dokumentacji wskazano na konieczność prowadzenia monitoringu ujęcia w postaci:

- prowadzenia rejestru poboru wody,
- comiesięcznych pomiarów położenia zwierciadła wody w studniach,
- badania podstawowego składu fizyczno-chemicznego wody raz do roku przez 3 lata i dalej co 2 lata.



Rys. 8.1-7. Zasięg stref ochronnych ujęcia w Bełdowie.

8.2. Ujęcie w jednowarstwowym zbiorniku wód podziemnych w warunkach silnej antropopresji

Rejon badań: Przybyszewo – ujęcie komunalne dla miasta Leszno.

Problematyka: Zagrożenie jakości wód zbiornika sandrowego. Zagrożenie wynika z braku izolacji zbiornika i z obecności licznych ognisk zanieczyszczeń (wysypisko, mogilnik, zanieczyszczone cieki powierzchniowe).

Typ ujęcia: Duże ujęcie w zbiorniku porowym.

Metodyka weryfikacji zasobów: Badania modelowe połączone z modelowaniem transportu zanieczyszczeń oraz kontrolowaną eksploatacją ujęcia.

Lokalizacja

Ujęcie „Przybyszewo” położone jest w obrębie rozległej równiny sandru leszczyńskiego, po południowo-zachodniej części miasta. Powierzchnia równiny jest tu płaska (deniwelacje nie przekraczają 3,0 m), o rzędnej 82,5-87,5 m n.p.m. i łagodnie opada w kierunku doliny Rowu Polskiego (rzędne ok. 80,0-81,0 m n.p.m.) – rysunek 8.2-1.

Sieć hydrograficzną tworzą naturalne cieki odwadniające lub zasilające wody gruntowe sandru leszczyńskiego: Strumień Święciechowski i Strumień Strzyżewicki oraz liczne rowy melioracyjne, będące dopływami Rowu Polskiego, który stanowi bazę drenażu wód powierzchniowych i podziemnych tego obszaru.

Historia badań

Ujęcie „Przybyszewo” jest jednym z kilku ujęć wykorzystującym płytkie wody gruntowe zbiornika sandrowego dla zaopatrzenia w wodę Leszna. Najstarsze duże ujęcie wody dla Leszna – „Zaborowo” istnieje od 1909 roku. Pierwszą dokumentację hydrogeologiczną ustalającą jego zasoby eksploatacyjne wg przepisów ówczesnego prawa geologicznego opracowano w 1961 r. ustalając zasoby w kategoriach: „A” w wysokości 300 m³/h, w „B” – 100 m³/h, „C” – 310 m³/h przy ówczesnej eksploatacji ujęcia z wydajnością 260-290 m³/h. W 1963 r. określono powtórnie zasoby wód podziemnych dla ujęcia „Zaborowo” ustalając: zasoby dynamiczne z przepływu strumienia w wysokości 1400 m³/h i eksploatacyjne w kat. „B”-1000 m³/h dla 12 studni. Woda w tym czasie posiadała korzystne parametry fizyczno-chemiczne, a normę dla wód pitnych przekraczały jedynie jony żelaza i okresowo manganu oraz barwa. Stabilny skład fizyczno-chemiczny wody obserwowano do 1974 r., gdy ujęcie nie przekraczało wydatku 500 m³/h. Po zwiększeniu wydajności zaobserwowano wzrost zawartości związków żelaza, manganu, barwy, stwierdzono pojawienie się w wodzie azotynów i azotanów. Trend pogarszania się jakości wody narastał sukcesywnie w miarę zwiększenia się wydatku ujęcia.

Na podstawie szczegółowego rozpoznania geologicznego sandru, w roku 1979 opracowano dokumentację hydrogeologiczną dla całej jednostki określając zasoby eksploatacyjne metodą modelowania matematycznego i bilansu hydrolo-

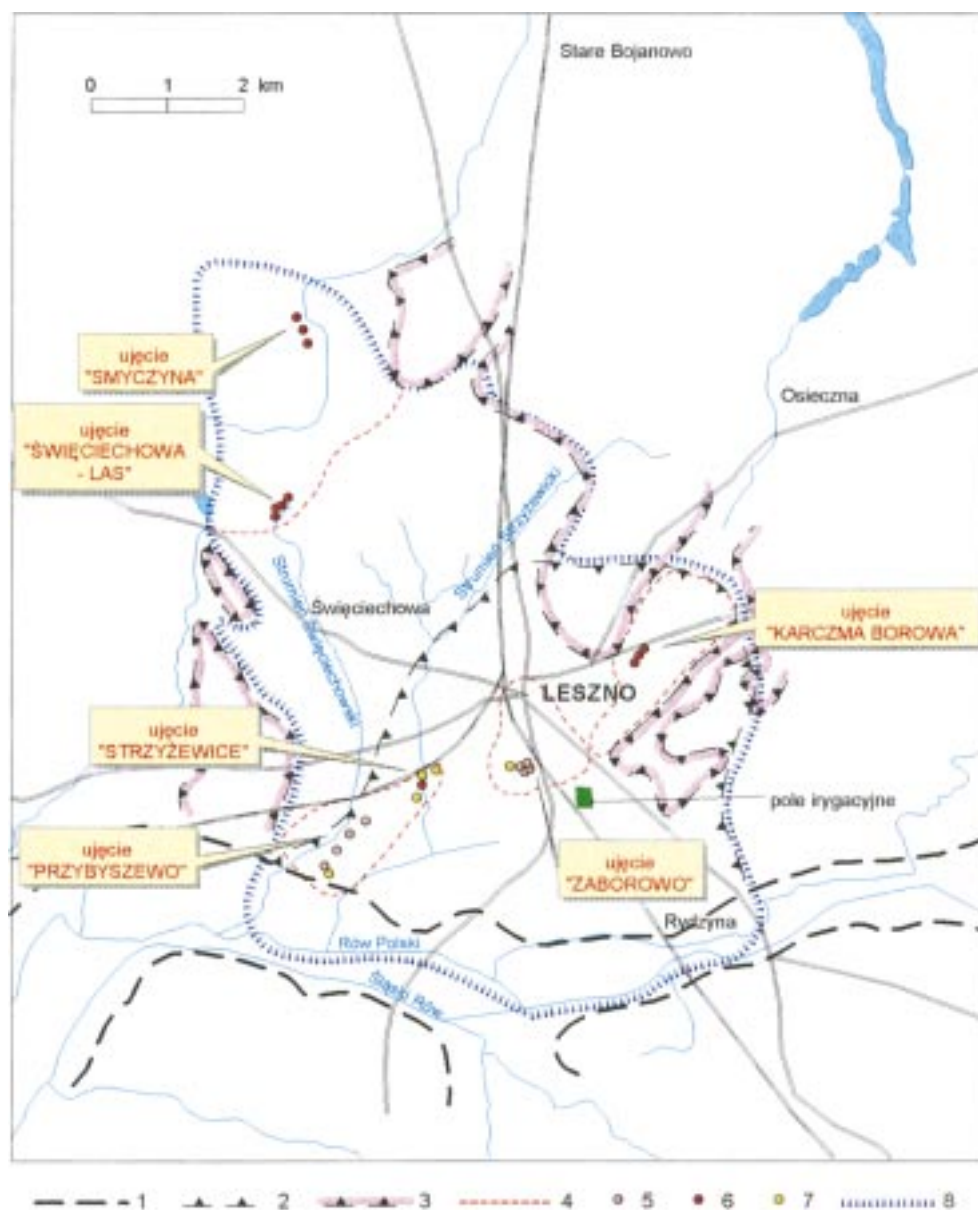
gicznego w ilości 1545 m³/h z obszaru 80 km², w tym dla ujęcia „Zaborowo” 1000 m³/h i dla nowo projektowanego „Przybyszewo” w zachodniej części sandru w ilości 330 m³/h. Ustalono wówczas, że przyczyną degradacji jakości wód ujęcia „Zaborowo” jest istnienie w obszarze jego zasilania groźnych ognisk zanieczyszczeń jak pola irygacyjne ścieków, zanieczyszczony infiltrujący ciek Rów Henrykowski i nieskanalizowane osiedle Zaborowo. Nie wykonano jednak prognozy zagrożeń jakości, wskazano tylko na konieczność prowadzenia obserwacji monitoringowych ujęcia.

Najwyższe zanieczyszczenie wód ujęcia zaobserwowano przy maksymalnym poborze w wysokości 1070 m³/h w 1984 r. Stwierdzono wówczas zawartość amoniaku do 20 mgN/l, przy jednoczesnym pojawieniu się związków specyficznych. Groźba zamknięcia ujęcia wody spowodowała podjęcie prac badawczych dla szczegółowego określenia przyczyn zanieczyszczenia ujęcia „Zaborowo” oraz poszukania dla miasta alternatywnych źródeł zaopatrzenia. W pierwszej kolejności podjęto budowę ujęcia „Przybyszewo” z poziomu sandrowego, którą zakończono w 1985 r. i zatwierdzono dokumentację ustalającą zasoby w kat. „B”, w ilości 330 m³/h przy depresji 4,5-7,0 m.

W latach 1986-1988 udokumentowano zasoby eksploatacyjne dwu kolejnych ujęć wód podziemnych poza strukturą sandrową służących do zaopatrzenia w wodę Leszna: ujęcia „Smyczyna” o zasobach 270 m³/h i „Święciechowa-Las” o zasobach 300 m³/h. Lokalizację ujęć pokazano na rysunku 8.2-1.

Zaopatrzenie miasta w wodę w tym czasie skomplikowała groźba zanieczyszczenia budowanego ujęcia wody „Przybyszewo” przez mogilnik i wysypisko śmieci położone 1-2 km na północ od niego, co wykazano w pracach badawczych w latach 1987-89. Eksploatacja ujęcia „Przybyszewo” została wstrzymana do czasu przeprowadzenia badań modelowych połączonych z prognozą migracji zanieczyszczeń celem wskazania bezpiecznego sposobu eksploatacji ujęcia. Jednocześnie podjęto działania dla poszukiwania i udokumentowania nowych źródeł wody. Doprowadziły one w latach 1989-1991 do budowy w Strzyżewicach nowego ujęcia wód z utworów trzeciorzędowych o zasobach 160 m³/h oraz ujęcia z utworów plejstocenijskich o zasobach 20 m³/h, a także wykrycia i udokumentowania nowego ujęcia w rejonie Karczmy Borowej (tuż przy granicy Leszna), o zasobach 250 m³/h w poziomie doliny kopalnej połączonej hydraulicznie ze strukturą sandru leszczyńskiego.

W roku 1992 opracowano dokumentację hydrogeologiczną zasobów wód podziemnych (dyspozycyjnych) z utworów czwartorzędowych systemu wodonośnego rejonu Leszna o powierzchni 176,9 km², gdzie zbilansowano zasoby możliwe do eksploatacji przez różnych użytkowników, w tym i przez ujęcia komunalne miasta Leszna. W dokumentacji tej potwierdzono możliwość eksploatacji wód podziemnych w ilościach wcześniej ustalonych dla miasta Leszna, w tym możliwości eksploatacji ujęcia „Przybyszewo” z wydajnością 330 m³/h. Wydajność ujęcia „Zaborowo” zmniejszono ostatecznie do 260 m³/h, ze względu na konieczność wyłączenia z obszaru jego zasilania terenu pól irygacyjnych ścieków. Dla tej wielkości eks-



Rys. 8.2-1. Mapa lokalizacyjna ujęć komunalnych m. Leszna.

Granice występowania poziomów wodonośnych czwartorzędu: 1 – gruntowego pradoliny Rowu Polskiego, 2 – gruntowego sandru leszczyńskiego, 3 – wgłębnych, dolin kopalnych i poziomów międzymorenowych, 4 – ujęcia komunalne miasta Leszna, 5 – studnie w poziomie gruntowym, 6 – studnie w poziomie wgłębny czwartorzędu, 7 – studnie w poziomie mioceńskim trzeciorzędu, 8 – granica czwartorzędowego systemu wodonośnego rejonu Leszna.

ploatacji ujęcia „Zaborowo”, równej zasobom z początku lat 60 XX wieku, określono strefę ochronną oraz uzyskano nowe pozwolenie wodnoprawne.

Badania hydrogeologiczne dla ujęć „Przybyszewo” oraz „Zaborowo” do roku 1989 prowadziły: Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Poznania i dalej – po reorganizacji – Przedsiębiorstwo Geologiczne we Wrocławiu, oddział w Poznaniu oraz Wodrol Poznań. Od roku 1990 badania prowadziły firmy: Hydroserwis s.c. oraz Hydroconsult sp. z o.o.

Warunki hydrogeologiczne

Osady sandru leszczyńskiego zalegają na glinach zlodowacenia środkowopolskiego, a w części zachodniej i południowo-zachodniej bezpośrednio na pstrych łach trzeciorzędowych. Sandr leszczyński i pradolinę Rowu Polskiego budują głównie osady piaszczysto-żwirowe z przewarstwieniami osadów zastoiskowych: ilów, mułków, a w obrębie tarasu niskiego pradoliny również torfów, mad i namułów – rysunek 8.2-3. Łączna miąższość tych osadów dochodzi do 36,0 m, najczęściej jednak wynosi 12-18 m.

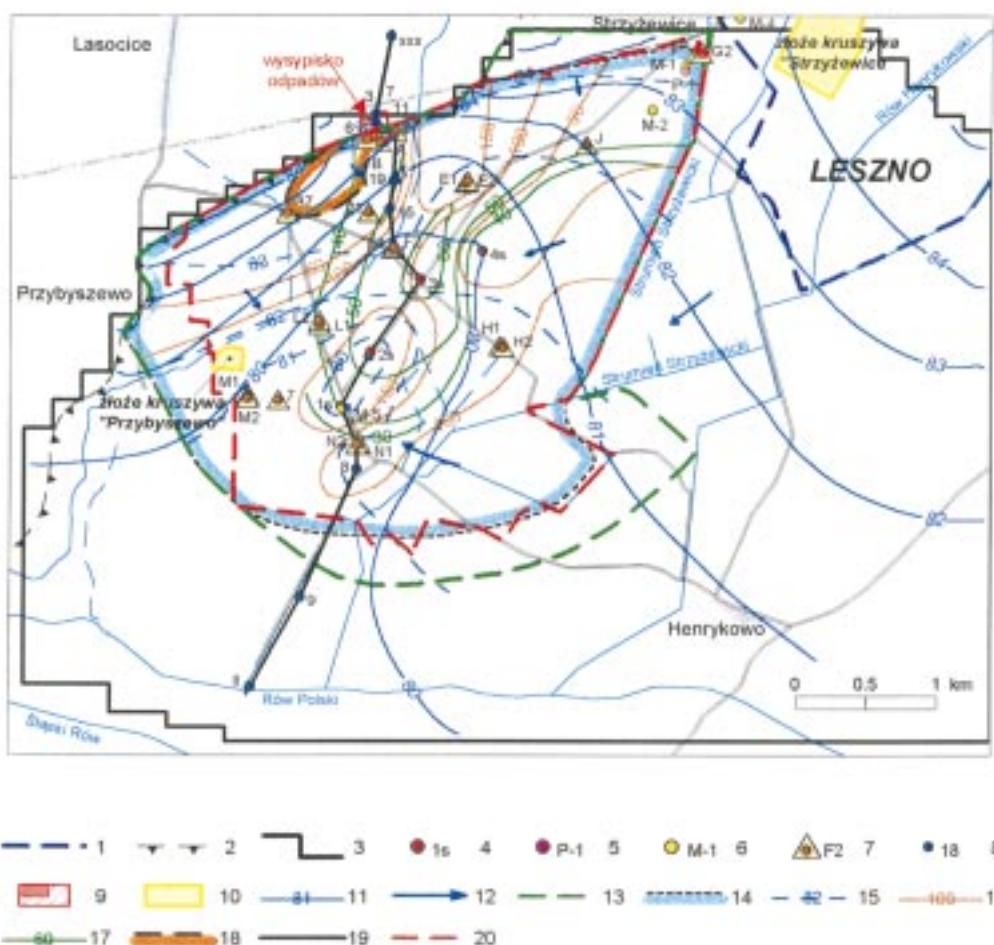
Średnia miąższość warstwy wodonośnej sandru leszczyńskiego wynosi ok. 20 m. W rejonie ujęcia „Przybyszewo” jest ona większa i wynosi do 23-35 m. Wartość współczynnika filtracji w studniach ujęcia waha się od 0,5 do 3,2 m/h, a przewodności 13-85 m²/h. Swobodne zwierciadło wody zalega średnio na głębokości 1,5-2,2 m ppt. Ujęcie składa się z 4 studni o numerach 1S – 4S o głębokościach 27-37 m, ujmujących filtrami dolną część poziomu wodonośnego – rysunki 8.2-2 i 8.2-3. Wydajności eksploatacyjne poszczególnych studni wynoszą: 1S – 75 m³/h, 2S – 90 m³/h, 3S-80 m³/h, 4S – 85 m³/h.

Poziom sandrowy zasilany jest na drodze bezpośredniej infiltracji wód opadowych, której natężenie jest zmienne w cyklu rocznym. W okresach suchych składnikiem zasilania jest także infiltracja wód ze Strumienia Święciechowskiego i Strumienia Strzyżewickiego, które po wypłynięciu z wysoczyzny na obszar sandru, infiltrowują w niego całkowicie. W okresie wysokich i średnich stanów wód gruntowych stanowią one z kolei bazy drenażu dla tego poziomu. Spadki hydrauliczne w strumieniach w strefie północnej mają wartość $I = 0,003-0,004$, a w części centralnej $I = 0,001-0,002$.

Jakość wód podziemnych

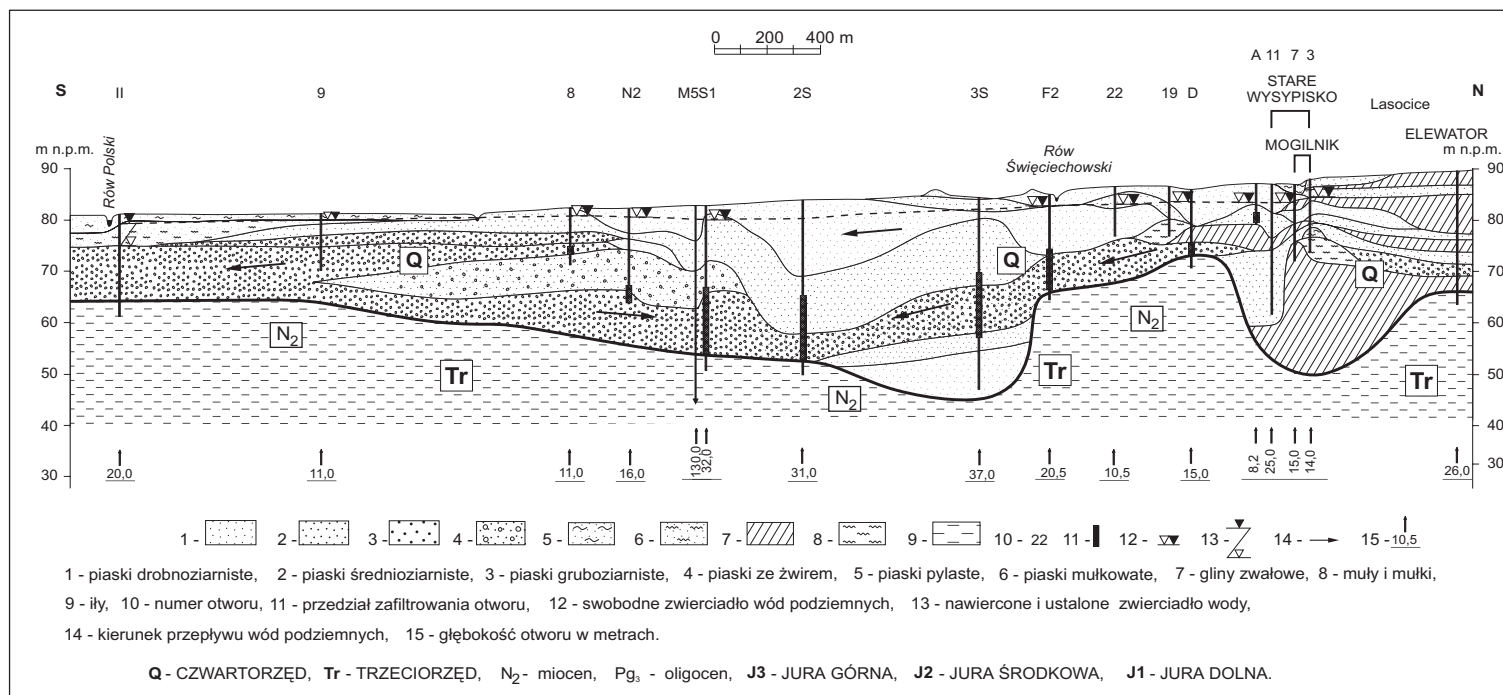
Szczegółowe badania jakości wód sandru leszczyńskiego przeprowadzono w latach 1985-1988. Z badań tych wynikało, że wody podziemne całego sandru zostały zanieczyszczone i w niektórych rejonach nie nadają się do picia. Korzystną jakość wód stwierdzono jednak na obszarze ujęcia „Przybyszewo”, a zwłaszcza w studniach 1S i 2S i na wschód od nich, aż do Strumienia Strzyżewickiego. Wiąże się to z naturalnymi warunkami przyrodniczymi – występują tu obszary zalesione i brak w bezpośrednim sąsiedztwie ognisk zanieczyszczeń.

Jakość wody ujęcia „Przybyszewo” wg stanu z 1985 r. była następująca: w rejonie studni 1S – 3S wody gruntowe należały do typu wodorowęglanowo-siar-



Rys. 8.2-2 Mapa hydrogeologiczna ujęcia Przybyszewo.

1 – granica m. Leszno, 2 – granica struktury hydrogeologicznej sandru leszczyńskiego, 3 – granica obszaru badań modelowych struktury sandrowej, 4 – studnie ujęcia „Przybyszewo” z poziomu wód gruntowych sandru leszczyńskiego, 5 – studnia wgłębnej poziomu plejstoceńskiego, 6 – studnie ujęcia „Strzyżewice” z poziomu mioceńskiego trzeciorzędu, 7 – otwory monitoringowe ujęcia „Przybyszewo”, 8 – inne otwory geologiczne, 9 – nieczynne od 1990 r. wysypisko odpadów z mogilnikiem, 10 – złoża kruszywa naturalnego „Przybyszewo” i „Strzyżewice”, 11 – hydroizohipsy przy prognozowanej eksploatacji ujęcia „Przybyszewo”, 12 – kierunki przepływu wód gruntowych, 13 – zasięg zasilania ujęcia „Przybyszewo” przy eksploatacji $Q = 330 \text{ m}^3/\text{h}$, 14 – granica 25-letniego czasu wymiany wód w obszarze zasilania ujęcia, 15 – hydroizohipsy wg stanu hydrodynamicznego z 11.04.2001 r. przy eksploatacji studni S1 i S2, 16 – izolinie siarczanów w $\text{mg SO}_4/\text{l}$, 17 – izohaliny w $\text{mg Cl}/\text{l}$, 18 – zasięg aureoli zanieczyszczeń od strony mogilnika w 1990 r. (chlorki > 100 , siarczany $> 200 \text{ mg/l}$), 19 – linia przekroju hydrogeologicznego, 20 – ustalone granice terenu ochrony pośredniej zewnętrznej.



Rys. 8.2-3. Przekrój hydrogeologiczny w rejonie ujęcia „Przybyszewo”.

czanowo-wapniowego, a w rejonie studni nr 4S do wodorowęglanowo-wapniowego (typowy dla obszarów leśnych). Cechowała je zawartość związków żelaza od 0,8 do 1,3 mgFe/l oraz manganu 0,15 – 0,3 mgMn/l, chlorków od 21 do 65 mgCl/l, siarczanów od 47 do 160 mgSO₄/l, amoniaku od 0,1 do 0,6 mgN/l, odczyn wody pH od 7,0 do 7,4, twardość ogólna 4,0 do 8,3 mval, utlenialność 1,8 do 4,0 mgO₂/l, mineralizacja od 251 do 580 mg/l, barwa 5 do 50 mgPt/l. W wodzie nie wykryto azotanów.

Weryfikacja zasobów eksploatacyjnych ujęcia

Badania dla zweryfikowania zasobów ujęcia wykonano przy użyciu modelowania matematycznego. Głównym ich celem było dokonanie prognozy wpływu wysypiska śmieci wraz z mogilnikiem na jakość wód ujęcia „Przybyszewo”. Od wyników tych prac uzależniano możliwość podjęcia eksploatacji ujęcia, które na skutek stwierdzonych zagrożeń od okresu budowy nie było eksploatowane.

Zagrożenia dla jakości wód ujęcia „Przybyszewo” pochodzą z dwóch zidentyfikowanych ognisk zanieczyszczeń:

- a) Istniejące od 1973 r. niezorganizowane wysypisko odpadów z mogilnikiem środków ochrony roślin – rysunek 8.2-2. Zanieczyszczenie wód w rejonie wysypiska i na jego przedpolu stwierdzono w roku 1988 w ponad 40 otworach badawczych. Cechowało go występowanie w ilościach ponadnormatywnych azotu amonowego, substancji organicznych (WWA, detergenty), chlorków (ponad 200 mgCl/l), siarczanów (do 290 mgSO₄/l) i metali ciężkich. W sześciu otworach stwierdzono znaczne przekroczenie norm zawartości rtęci i ołowiu, a w większości otworów także siarczanów. Twardość ogólna przekraczała normę czterokrotnie (do 40 mval/l). Wysypisko jest nieczynne od końca lat 80.
- b) Zanieczyszczenia powierzchniowe z pól i osiedli, które spływają do cieków powierzchniowych. Najmniej zanieczyszczony jest **Strumień Święciechowski** – w rejonie infiltracji posiadał w wodzie zawartość chlorków ok. 50-70 mgCl/l, siarczanów 110-165 mgSO₄/l, azotu amonowego 0,04-2,5 mgN/l (dane z 1988 r.). W wodzie tej stwierdzono występowanie związków metali ciężkich, detergentów oraz fenoli. **Strumień Strzyżewicki** nie odpowiadał klasom czystości wód z uwagi na zawartość fosforanów, azotu azotanowego, cynku i detergentów, a w **Rowie Henrykowskim** między innymi stwierdzono duże ilości azotu amonowego: 10-28 mgN/l, suchej pozostałości 1268-1325 mg/l, miedzi 0,085-0,26 mgCu/l, chromu 0,6-4,0 mgCr/l, fenoli 0,1-0,6 mg/l, detergentów 1,2-3,6 mg/l.

Badania modelowe wykonała firma „Hydroconsult” Sp. z o.o. w Poznaniu w roku 1990. Krążenie wód odtworzono na jednowarstwowym modelu filtracji ustalonej i nieustalonej obejmującym obszar o powierzchni 29 km².

Na modelu zasymulowano dwa warianty eksploatacji ujęcia:

1. Q = 165 m³/h ze studni 1S i 2S położonych najdalej od wysypiska,
2. Q = 330 m³/h ze wszystkich studni: 1S, 2S, 3S, 4S (zasoby eksploatacyjne ujęcia).

Oba warianty eksploatacji wykazały, że dopływ wód do ujęcia będzie realizował się głównie ze strefy wysypiska, a duży udział w jego bilansie zasilania będą miały wody infiltrujące z cieków. Dla wydajności docelowej ujęcia ($330 \text{ m}^3/\text{h}$) za pomocą programu DRSP z biblioteki HYDRYLIB wykonano obliczenia czasu wymiany wody w warstwie wodonośnej i określono przebieg izochrony 25 lat. Dla każdej ze studni określono teren ochrony bezpośredniej ($8 \times 10 \text{ m}$), teren ochrony pośredniej wewnętrznej (o promieniu od 6,6 m do 70,0 m) oraz teren ochrony pośredniej zewnętrznej o powierzchni $8,44 \text{ km}^2$, który wyznaczono biorąc pod uwagę obliczenia hydrogeologiczne (izochrona 25 lat), istniejące zagospodarowanie terenu i zagrożenia jakości wód, a także możliwość ustanowienia strefy łącznie z egzekucją zakazów, nakazów i ograniczeń. Granice terenu ochrony pośredniej zewnętrznej zostały poprowadzone wzdłuż granic działek własnościowych gruntów.

Migrację zanieczyszczeń analizowano wykorzystując ustalony model pola hydrodynamicznego i prowadząc na jego podstawie obliczenia migracji jako procesu nieustalonego w czasie. Dokonano oceny migracji tylko w stosunku do wybranych konserwatywnych składników zanieczyszczeń – jonu chlorkowego i siarczanowego. Dla kilku pozostałych charakterystycznych zanieczyszczeń wykonano obliczenia prognostyczne przybliżone (NH_4 , NNO_3 , Cu, Zn, Pb, Ni, Co).

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uznano, że:

- aureola zanieczyszczeń konserwatywnych (Cl , SO_4) wokół wysypiska z mogilnikiem osiągnęła już stan bliski ustalonego,
- rozpatrywane wskaźniki fizyko-chemiczne w wodzie studziennej nie przekroczą w obu wariantach eksploatacji dopuszczalnych norm dla wód pitnych,
- brak ścisłych danych o migracji zanieczyszczeń z cieków powierzchniowych i rozprzestrzenianiu się metali ciężkich, fenoli, detergentów, WWA i innych powoduje konieczność eksploatacji ujęcia „Przybyszewo” wg bezpieczniejszego wariantu, tj. z wydajnością $165 \text{ m}^3/\text{h}$, z równoczesnymi obserwacjami procesu migracji w okresie 2-3 lat.

W dokumentacji podsumowującej pracę modelowe nie przedstawiono formalnego wniosku o zmniejszenie zasobów. Podano za to ścisłe wytyczne prowadzenia kontrolowanej eksploatacji ujęcia i monitorowania jakości wód. Wskazano na możliwość włączenia do eksploatacji studni 3S i 4S dla osiągnięcia docelowej wydajności zgodnej z zasobami eksploatacyjnymi ujęcia ($Q = 330 \text{ m}^3/\text{h}$) w przypadku zadowalających wyników obserwacji monitoringowych.

Szczegółowy program obserwacji przedstawiono w opracowanym w 1991 r. projekcie badań hydrogeologicznych dla prowadzenia monitoringu. Projekt ten zakładał obserwacje jakości wody w studniach eksploatacyjnych i otworach obserwacyjnych istniejących w obrębie wysypiska i na jego przedpolu, w rejonie ujęcia wody „Przybyszewo” oraz w otworach wykonanych dodatkowo: L1, L2, M1, M2, N1 i N2 zafiltrowanych w dolnej i górnej części warstwy, leżących pomiędzy ciekami powierzchniowymi i studniami ujęcia – rysunek 8.2-2. Przewidziano następujący zakres oznaczeń laboratoryjnych:

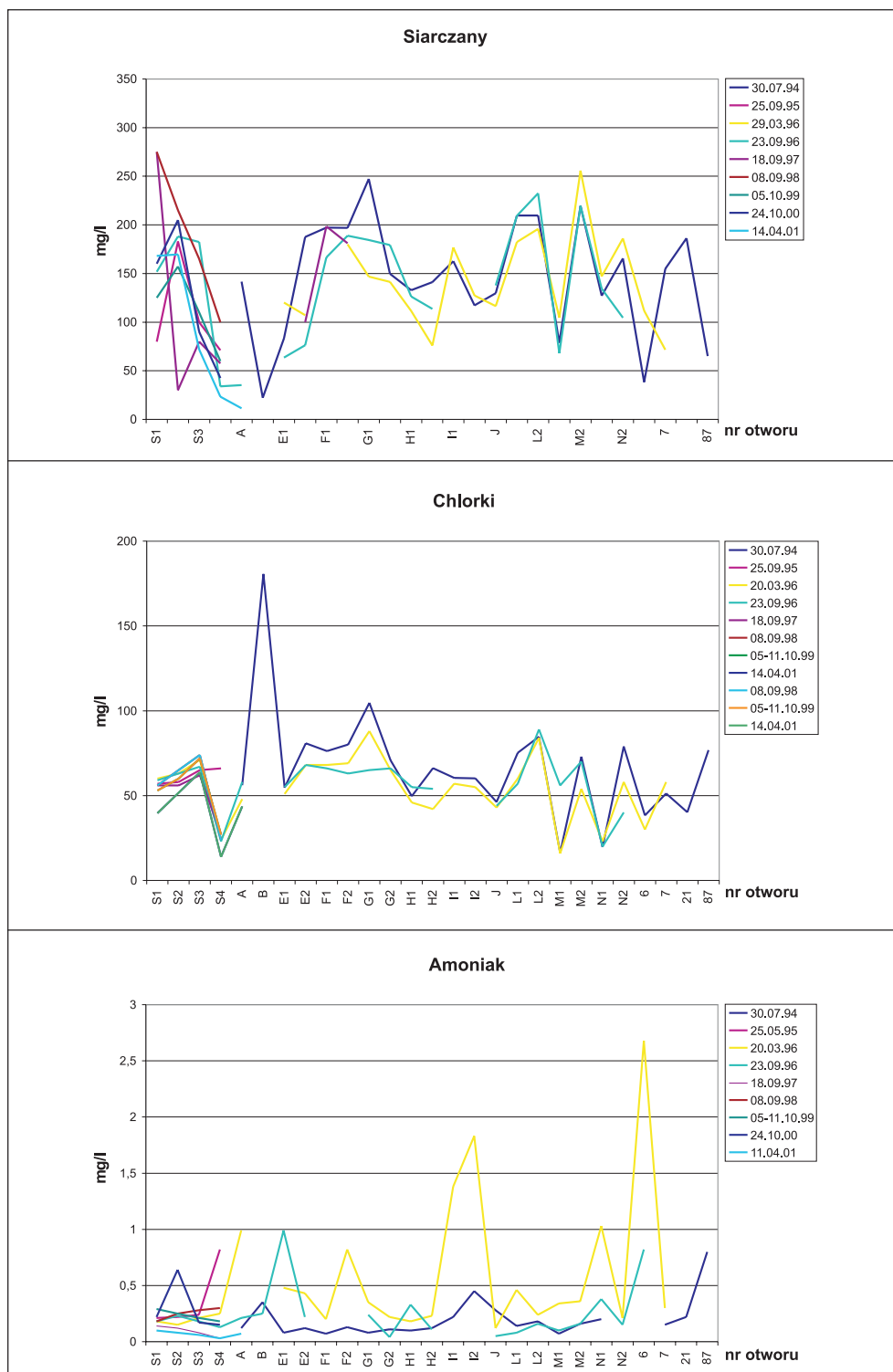
- standardowe oznaczenia parametrów fizyczno-chemicznych (23 parametry),
- zawartości metali ciężkich (ołów, miedź, kadm, cynk, chrom, nikiel, kobalt, rtęć),
- zawartość substancji specyficznych: detergenty anionowe, WWA (6 związków), fenole i pestycydy (4 rodzaje).

Projekt został zatwierdzony z obowiązkiem corocznego przedstawiania wyników badań.

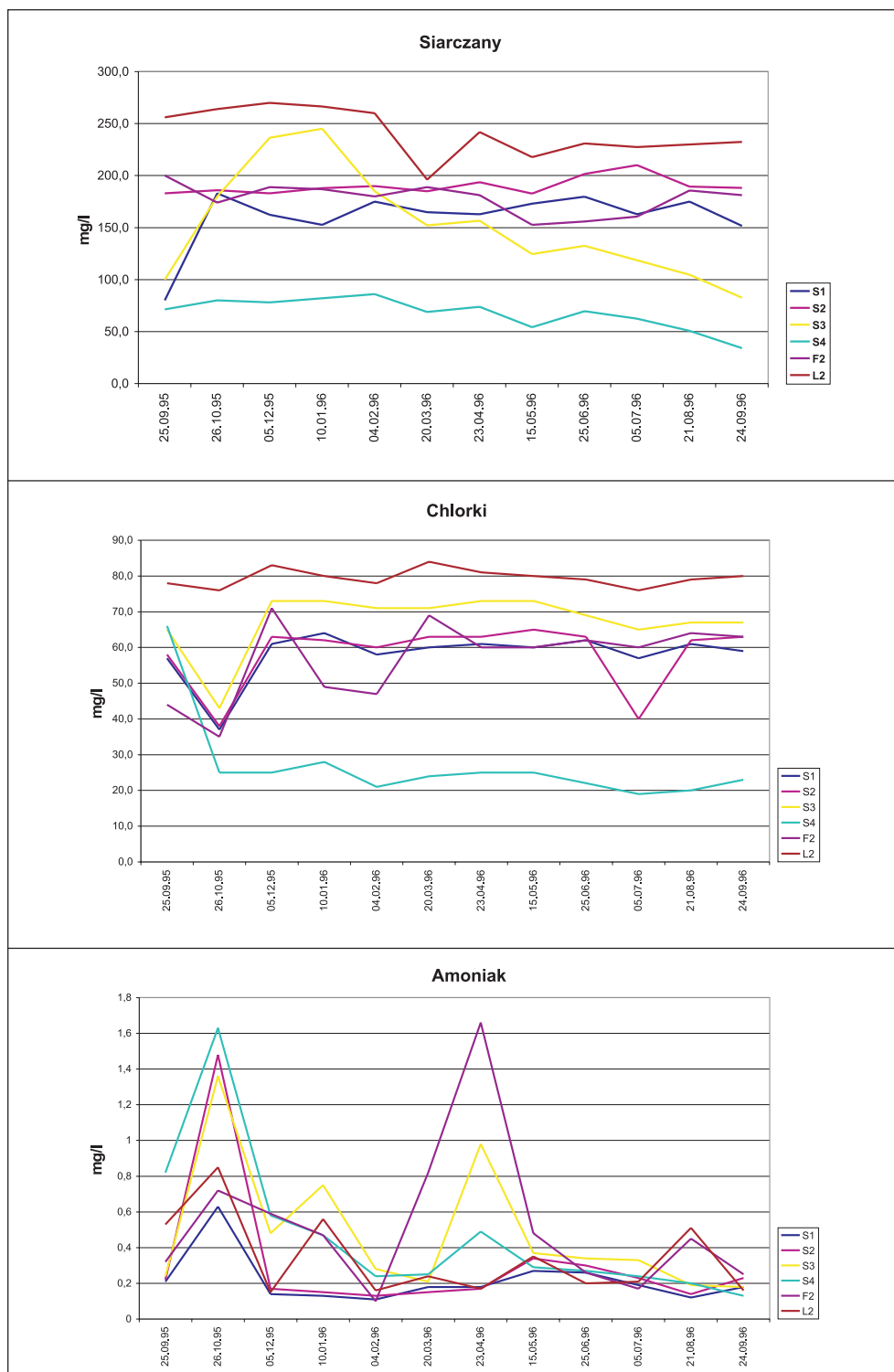
Wyniki prac monitoringowych za lata 1994-2001 zawarte w sprawozdaniach rocznych oraz w sprawozdaniu końcowym wskazują na nieznaczną poprawę (w stosunku do roku 1990) jakości wód powierzchniowych, przy utrzymujących się nadal zanieczyszczeniach ściekami typu komunalnego. Również stan jakości wód podziemnych na przedpolu wysypiska z mogiłnikiem wykazał wyraźny spadek (w stosunku do roku 1990) zawartości chlorków, siarczanów oraz amoniaku i azotanów, jak również suchej pozostałości. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 8.2-4, natomiast rysunek 8.2-5 pokazuje zmienność wybranych parametrów w roku hydrologicznym 1995/96. Generalnie poprawa jakości wód związana jest ze stopniowym zanikiem dopływu zanieczyszczeń z wysypiska śmieci (nieczynnego od końca lat 80) oraz z intensywną odnawialnością poziomu sandrowego i odpływem wód zanieczyszczonych do cieków.

Także w obszarze leja depresji ujęcia „Przybyszewo” od 1998 r. obserwuje się nieznaczną tendencję zmniejszania się zawartości głównych jonów – rysunek 8.2-4. Wyniki badań wody z kwietnia 2001 r. wykazują, że jakość wody w studniach eksploatowanych, nieeksploatowanych i piezometrach, mieści się w klasie jakości wód podziemnych Ib i II. Nadal najpoważniejszym zagrożeniem pozostają zanieczyszczone wody Strumienia Święciechowskiego, które w okresach suchych infiltrują do warstwy wodonośnej.

W podsumowaniu obserwacji monitoringowych z lat 1994-2001 dopuszczono zwiększenie eksploatacji ujęcia „Przybyszewo” z pełną wydajnością, uwarunkowano to jednak budową sieci kanalizacyjnej dla miasta i związaną z tym radykalną poprawą jakości wód powierzchniowych. Zalecono także dalsze prowadzenie systematycznych obserwacji jakości wód.



Rys. 8.2-4. Wyniki badań wybranych parametrów jakościowych wody z monitoringu ujęcia „Przybyszewo” w latach 1994-2001.



Rys. 8.2-5. Wyniki badań wybranych parametrów jakościowych wody z monitoringu ujęcia „Przybyszewo” w roku hydrogeologicznym 1995/1996.

8.3. Ujęcie w jednowarstwowym zbiorniku wód podziemnych w warunkach zagrożenia geogenicznego

Rejon badań: Piła – ujęcie komunalne dla miasta.

Problematyka: Zagrożenie eksploatowanego zbiornika oligoceńsko-liasowego ascensją wód zasolonych z podłoża mezozoicznego. Na skutek tego zagrożenia wystąpiła konieczność ustalenia zasobów z uwzględnieniem zapewnienia właściwej jakości wody.

Typ ujęcia: Duże ujęcie w zbiorniku porowo-szczelinowym.

Metodyka ustalania zasobów: Modelowanie matematyczne powiązane z analizą wyników wieloletniej kontrolowanej eksploatacji ujęcia (zmiany jakości wody w zależności od wydajności).

Lokalizacja

Ujęcie komunalne w Pile znajduje się w dolinie rzeki Gwdy w jej odcinku dolnym bezpośrednio przyległym do Pradoliny Toruńsko-Eberswaldzkiej (rys. 8.3-1). Rzeka Gwda jest głęboko wcięta w podłoże (w centrum miasta do rzędnej 56,8 m n.p.m), a różnica wysokości dna doliny w stosunku do przyległej równiny sandrowej wynosi 43 m, a do wysoczyzny morenowej 77 m. Studnie ujęcia oligoceńsko-liasowego, rozrzucone w obrębie całego miasta, znajdują się na terenach tarasu niskiego, średniego i wysokiego (rzędna od 58,6 m do ponad 81 m n.p.m).

Historia badań

Komunalne ujęcie wody z utworów oligoceńsko-liasowych Piły, mimo że należy do najstarszych ujęć wód podziemnych w Polsce (eksploatacja od końca XIX w.), nie posiadało do 1998 r. ustalonych zasobów eksploatacyjnych. Brak jest danych o eksploatacji wód sprzed i bezpośrednio po 1945 r. Eksploatację ujęcia wznowiono w 1957 r. wykonując dwie nowe studnie. Od 1969 r. rozpoczęto kontrolowaną eksploatację i w tym roku opracowano dokumentację hydrogeologiczną zasobów w kat. „C” wraz z projektem rozbudowy ujęcia, który został zatwierdzony decyzją Prezesa Centralnego Urzędu Geologii w 1970 roku. Na bazie wyników uzyskanych z realizacji projektu prac i badań geologicznych, w tym badań modelowych, sporządzono w 1973 r. dokumentację hydrogeologiczną ujęcia w kat. „B” (Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne w Poznaniu). Zaproponowana wówczas wielkość zasobów eksploatacyjnych z poziomu oligoceńsko-liasowego w wysokości 970 m³/h przy depresji 27,5-26,7 m nie została przyjęta, z uwagi na wskazaną w dokumentacji możliwość degradacji jakości wód. Postanowieniem Prezesa CUG zalecono pobór wód w ilości nie przekraczającej 800 m³/h, z równoczesnym pozwoleniem wykonywania studni zastępczych w północnej części miasta. Oprócz obserwacji wielkości eksploatacji poszczególnych studni, od 1980 r. rozpoczęto systematyczne badania jakości wód w zakresie wybranych parametrów fizyko-chemicznych (zapach, barwa, odczyn, twardość, utlenialność, chlorki, zasadowość,

mangan, żelazo, siarczki, amoniak). W latach 1980-1997 w skład ujęcia wchodziło 13 studni, w tym 1 eksploatująca poziom liasowy. Woda o niekorzystnej jakości (barwa i chlorki) eksploatowana samowypływem ze studni nr 2a ujmującej poziom oligoceński była zrzucana do wód powierzchniowych.

Wydatek ujęcia w latach 1969-1989 wzrastał systematycznie od 175 m³/h do 556,5 m³/h. Po roku 1989 wydatek ten malał i osiągnął w 1997 r. średnią wartość 413,2 m³/h.

Monitorowany przebieg eksploatacji ujęcia pozwolił w 1998 roku dokonać ustalenia jego zasobów eksploatacyjnych (Hydroconsult sp. z o.o. z Poznania). Procedura dokumentowania zasobów wymagała uwzględnienia współdziałania wszystkich studni eksploatujących oligoceńsko-liasowy poziom wodonośny, a także problematyki jakości wód. Na potrzeby oceny zasobowej konieczne było wykonanie badań modelowych na obszarze o powierzchni 2842 km² – rysunek 8.3-1.

Warunki hydrogeologiczne

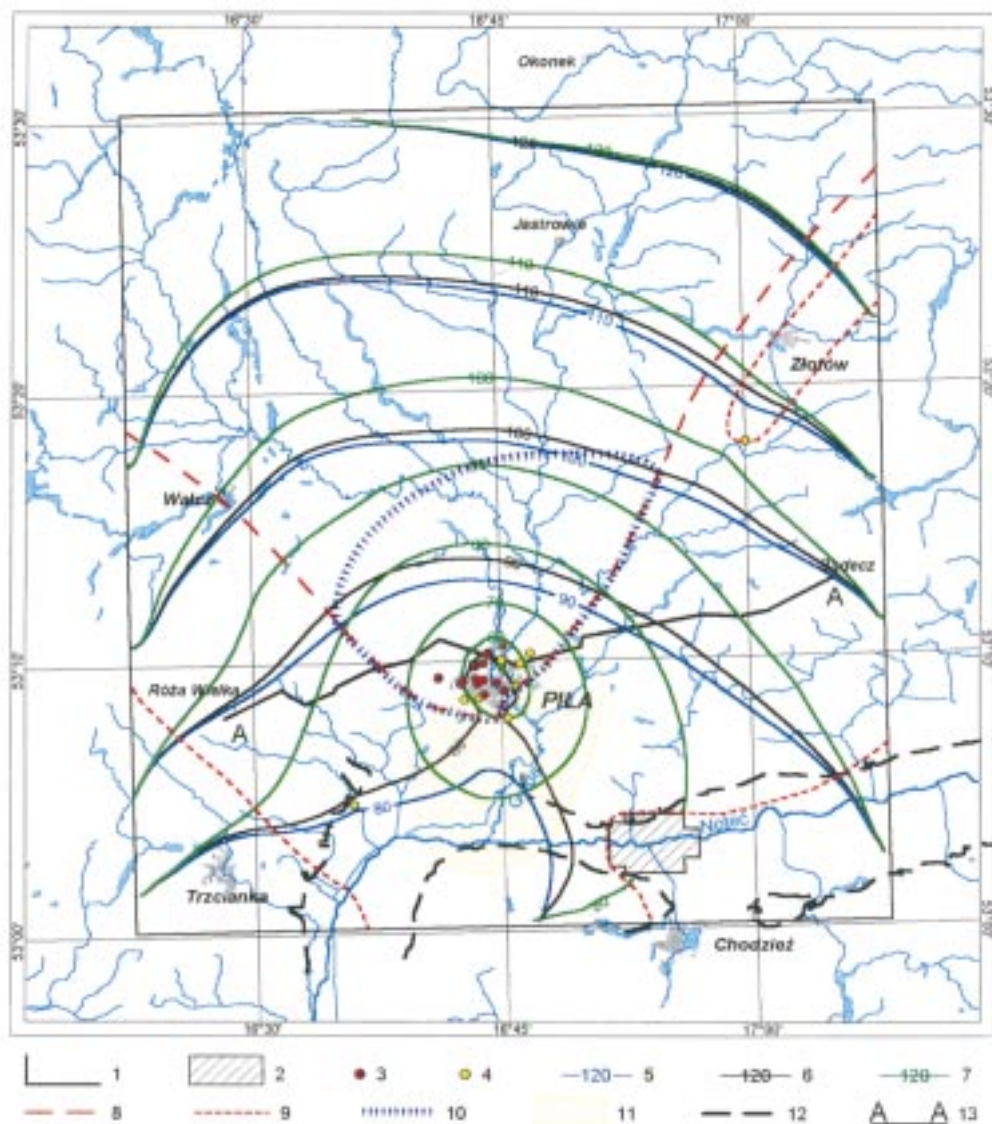
Wody zwykle występują w rejonie Piły do głębokości ponad 350 m w utworach czwartorzędu, trzeciorzędu i mezozoiku, w obrębie części antyklinorium pomorskiego i niecki szczecińsko-mogileńskiej. W obrębie utworów czwartorzędowych wyróżnia się tu 4 poziomy wodonośne: gruntowy i 3 międzyglinowe o zróżnicowanym rozprzestrzenieniu i miąższości (rys. 8.3-2). Według badań modelowych zasilanie piętra czwartorzędowego wynosi średnio 11,3 m³/h/km². Występowanie wód w trzeciorzędzie związane jest z warstwami piaszczystymi miocenu i oligocenu tworzącymi dwa poziomy wodonośne: mioceński i oligoceński:

Mioceński poziom wodonośny o charakterze naporowym budują piaski różnoziarniste niekiedy ze żwirem występujące w przedziale głębokości 35-40 m w obrębie dolin i 100-140 m w obrębie wysoczyzn. Warstwy cechuje znaczne rozprzestrzenienie i ciągłość występowania. Zasilanie poziomu zachodzi na drodze przesiąkania wód z nadległych poziomów czwartorzędowych i wynosi średnio 0,49 m³/h/km²,

Oligoceński poziom wodonośny tworzą piaski drobnoziarniste i średnioziarniste o średniej miąższości 26 m, występujące pod warstwami ilów i mułków. Pod warstwą wodonośną występuje nieciągła warstwa łu o miąższości do 3 m, oddzielająca ją od wodonośnych piaskowcowych jury dolnej. Poziom charakteryzują następujące parametry hydrogeologiczne:

- współczynnik filtracji: 0,06-0,98 m/h,
- przewodność: 1,0-20,2 m²/h (w rejonie: Piły 14,0-20,2 m²/h),
- współczynnik zasobności sprężystej: 0,0001-0,0006,
- wydajność jednostkowa studni: 2,4-12,8 m³/h/m.

Poziom oligoceński jest poziomem naporowym o ciśnieniu artezyjskim na rozległym obszarze doliny Gwdy i Noteci. Główne obszary zasilania poziomu położone są na północy w zlewni Górnej Gwdy, w strefie pomorskich wyniesień morenowych. Natomiast w rejonie Piły zasilany jest on przez przesiąkanie z



Rys. 8.3-1. Mapa hydrogeologiczna rejonu ujęcia komunalnego miasta Piły w skali 1:500 000.

1 – granica obszaru badań modelowych poziomu oligoceńskiego, 2 – obszary pozbawione warstwy wodonośnej w poziomie oligoceńskim, 3 – studnie ujęcia komunalnego w Pile, 4 – inne studnie eksploatujące poziom oligoceński i liasowy, 5 – hydroizohipsy poziomu oligoceńskiego dla stanu z października 1997 r., 6 – hydroizohipsy dla prognozowanej eksploatacji przy $Q = 650 \text{ m}^3/\text{h}$, 7 – hydriohipsy dla prognozowanej eksploatacji przy $Q = 2670 \text{ m}^3/\text{h}$, 8 – granica obszaru zasilania ujęcia komunalnego w Pile przy $Q = 650 \text{ m}^3/\text{h}$, 9 – granica obszaru zasilania ujęcia komunalnego w Pile przy $Q = 2670 \text{ m}^3/\text{h}$, 10 – granica obszaru zasobowego ujęcia komunalnego w Pile przy $Q = 650 \text{ m}^3/\text{h}$, 11 – obszar występowania wód o niekorzystnej jakości (barwa i chlorki) w poziomie oligoceńskim i liasowym, 12 – granica pradoliny Noteci, 13 – linia przekroju hydrogeologicznego.

poziomu liasowego i lokalnie mioceńskiego. W obszarze badań modelowych wielkość tego zasilania wynosi średnio $0,75 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}^2$, w tym $0,37 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}^2$ dla obszaru zasilania ujęcia zasilania komunalnego w Pile (stan 1997 r.). Poziom drenowany jest przez ujęcie wody w Pile oraz w dolinach Gwdy Dolnej i Noteci.

Liasowy poziom wodonośny tworzą piaski i piaskowce drobnoziarniste i średnioziarniste. Poziom zawiera w rejonie Piły wody o ciśnieniu artezyjskim, o wartościach zbliżonych do poziomu oligoceńskiego.

Parametry hydrogeologiczne poziomu liasowego są następujące:

- współczynnik filtracji: $0,0017\text{--}0,97 \text{ m/h}$,
- przewodność: $1,0\text{--}22,2 \text{ m}^2/\text{h}$,
- wydajność jednostkowa studni: $1,32 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}\text{--}11,7 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.

Poziom ten jest zasilany przez przesiąkanie z nadległych poziomów trzeciorzędowych w zlewni Górnej Brdy – wg badań modelowych moduł zasilania osiąga średnio $0,22 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}^2$. Poziom drenowany jest przez ujęcia wody w Pile oraz w dolinie Dolnej Gwdy i Noteci, analogicznie jak poziom oligoceński, skąd wynikają ich współkształtne powierzchnie piezometryczne. W Pile ujmuje go do eksploatacji jedna studnia ujęcia komunalnego oraz jedna ujęcia przemysłowego.

Jakość wód podziemnych

W północnej części Piły wody poziomu oligoceńskiego i liasowego charakteryzują się bardzo dobrą jakością i nie wymagają uzdatniania. Są to wody o niskiej mineralizacji ($0,16\text{--}0,25 \text{ g/l}$), miękkie ($1,0\text{--}3,0 \text{ mval/l}$), o niskiej utlenialności ($2,0\text{--}4,0 \text{ mgO}_2/\text{l}$), małej zawartości związków żelaza ($0,05\text{--}0,5 \text{ mgFe/l}$) i manganu (do $0,08 \text{ mgMn/l}$) oraz chlorków ($3\text{--}32 \text{ mgCl/l}$).

Natomiast w południowej części miasta i na południe od Piły wody zarówno poziomu oligoceńskiego jak i liasowego są niskiej jakości, przejawiającej się przede wszystkim wysoką barwą (do 210 mgPt/l) i zawartością chlorków do 315 mgCl/l (rys. 8.3–1). Wyniki obserwacji jakości wód prowadzone przez MWiK Sp. z o.o. w Pile w latach 1980–1998 wskazują, że zmiany stężenia chlorków i barwy korelują się ze zmianami wydajności ujęcia. Zwiększenie wydajności powoduje wzrost zawartości chlorków i zwiększenie barwy, spadek wydatku skutkuje zaś zmniejszeniem się wartości tych parametrów. Uznano, że proces ten związany jest ze zmianami natężenia dopływu wód z poziomu liasowego, co w toku dalszych prac potwierdziły badania modelowe. Zaobserwowane związki między jakością wody, a wielkością eksploatacji dały podstawę do przeprowadzenia prognozy eksploatacji ujęcia ustalającej jego zasoby eksploatacyjne.

Ustalenie wielkości zasobów eksploatacyjnych ujęcia

Podstawą określenia zasobów eksploatacyjnych ujęcia był trójwarstwowy model matematyczny o powierzchni 2200 km^2 . Na modelu odwzorowano krążenie wód w poziomie czwartorzędowym (warstwa górna na modelu), w poziomie mioceńskim (warstwa środkowa) i w poziomie oligoceńsko-liasowym (warstwa dolna).

Model umożliwił:

- ustalenie naturalnego (pierwotnego) stanu zwierciadła wody zbiornika oligoceńsko-liasowego (niezbędne ze względu na istnienie leja depresji od końca XIX wieku),
- rozpoznanie odnawialności wód podziemnych zbiornika w granicach oddziaływania wszystkich ujęć w Pile,
- dokonanie optymalizacji wydatku ujęcia komunalnego (13 studni), z wymogiem zachowania wysokich parametrów jakościowych wody.

Ustalenie stanu pierwotnego zwierciadła wody

Na modelu obrazującym stan hydrodynamiczny roku 1997 „wyłączono” z eksploatacji wszystkie ujęcia otrzymując w ten sposób zwierciadło wody – „naturalne”. Tak ustalony stan pierwotny zwierciadła wody poziomu oligoceńskiego i liasowego uznaje się za wiarygodny, gdyż istnienie leja w tych poziomach nie powoduje praktycznie zmian w zasilaniu i krążeniu wód poziomów nadległych – co wynika z analiz modelowych. Stan „naturalny” był podstawą określenia wielkości zdepresjonowania w rejonach prognozowanej eksploatacji.

Odnawialność wód podziemnych

Poziom oligoceński i poziom liasowy w obszarze wspólnego występowania w zlewni Gwdy-Noteci tworzą jeden zbiornik wód podziemnych, charakteryzujący się wspólnym obszarem zasilania i drenażu. Badania modelowe objęły ok. 50% obszaru wspólnego występowania obu poziomów w granicach ich drenażu, a główny obszar ich zasilania (od północy) pozostał poza obrębem siatki dyskretnej.

Zasilanie obu poziomów wodonośnych stanowi suma dopływów zewnętrznych do modelowanego obszaru oraz przesączania do poziomu oligoceńskiego z nadległych poziomów wodonośnych (mioceńskiego i czwartorzędowego). Średni dla całego obszaru badań modelowych moduł zasilania wynosi $0,75 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}^2$.

Optymalizacja wydatku ujęcia w aspekcie utrzymania jakości wody

Optymalizację tę wykonywano dwutorowo:

- a) Ustalenie wielkości eksploatacji poszczególnych studni i całego ujęcia.
W I etapie ustalano wydajności poszczególnych studni na podstawie ich stanu technicznego, dopuszczalnych wydatków oraz zamierzeń użytkownika.
W II etapie zoptymalizowano na modelu matematycznym wydatek ujęcia, ustalając dopuszczalne rzędne obniżenia w studniach oraz zasięg jego obszarów zasilania i oddziaływania.
- b) Obliczenia parametrów jakościowych wody (chlorki, barwa, utlenialność) zależnych od wydajności studni i ujęcia.

Podstawą do prognozowania parametrów jakościowych było ustalenie ich związków z wydajnością studni i całego ujęcia na podstawie danych z monitorin-

gu lat 1980-1997 oraz danych ze szczegółowych badań jakości w październiku 1997 r. w powiązaniu z wydajnością każdej studni w tym okresie.

Poniżej w zestawieniu tabelarycznym (tab. 8.3-1) podano prognozę jakości wody w zakresie chlorków, barwy i utlenialności dla wody zbiorczej przy prognozie wydatku ujęcia 650 m³/h i 800 m³/h z 12 studni wykorzystywanych do zaopatrzenia w wodę oraz ze studni nr 2a, z której woda jest zrzucana do wód powierzchniowych.

Tabela 8.3-1. Prognozy jakości wody w zależności od wydajności ujęcia.

Stan eksploatacji ujęcia		Wielkość wydatku ujęcia w m ³ /h	Parametry jakościowe w mg/l		
			Chlorki Cl	Barwa Pt	Utlenialność O ₂
Październik 1997 r.	a)	524,4	31,6	14,7	3,0
	b)	514,0	25,8	12,1	2,7
Prognoza I	a)	650,0	42,0	18,2	3,4
	b)	639,0	37,4	15,0	3,1
Prognoza II	a)	800,0	48,2	22,4	4,6
	b)	789,0	39,6	18,8	4,1

a) Przy wykorzystaniu studni nr 2a do zaopatrzenia miasta

b) Po jej wyłączeniu z sieci miejskiej

Na podstawie analizy stanu hydrodynamicznego, prognozowanych parametrów jakościowych wody oraz zamierzeń użytkownika jako zasoby eksploatacyjne komunalnego ujęcia wody w Pile przedstawiono wielkość 650 m³/h przy depresji 8,8-12,9 m dla 12 studni z poziomu oligoceńskiego i jednej liasowego. Ze względu na rozległy obszar zasilania ujęcia, sięgający działu wodnego na linii moren pomorskich, jego obszar zasobowy od strony północnej został ograniczony izolacją obniżenia zwierciadła wody 1,0 m (według badań modelowych) – rysunek 8.3-1.

Ustalenie maksymalnej wielkości zasobów zbiornika liasowego w rejonie Piły

Wielkość tę oceniono w badaniach modelowych na 2670 m³/h przy założeniu likwidacji ciśnienia artezyjskiego zbiornika w Pile i na północnym obniżeniu miasta. Jest to wielkość, którą można uznać za zasoby dyspozycyjne wód podziemnych bez uwzględniania jakości wód. Ocena jakości wód ujęć przy tym wydatku wymagałaby odrębnych badań modelowych, gdyż w obręb zasilania ujęć pilskich włączony byłby cały obszar występowania wód o niekorzystnych parametrach (chlorki – ponad 1000 mg/l) w dolinie Dolnej Gwdy i Noteci – rysunek 8.3-1.

8.4. Zagrożenie antropogeniczne jako kryterium weryfikacji zasobów w wielowarstwowym systemie wodonośnym

Rejon badań: Siemiatycze – ujęcie komunalne dla miasta.

Problematyka: Zagrożenie antropogeniczne eksploatowanego zbiornika czwartorzędowego spowodowane przez wybudowanie cmentarza parafialnego w obszarze zasilania ujęcia.

Typ ujęcia: Duże ujęcie w zbiorniku porowym.

Metodyka weryfikacji zasobów: Obliczenia analityczne po uprzedniej reinterpretacji wyników próbnych pompowań.

Lokalizacja

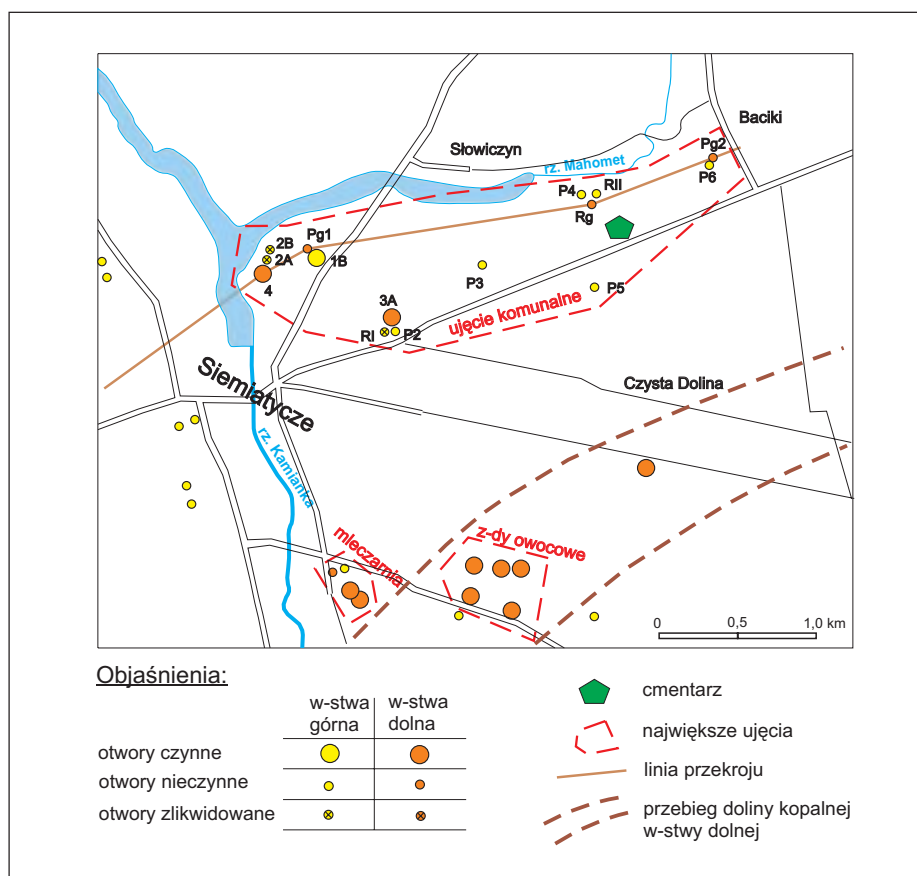
Ujęcie komunalne w Siemiatyczach zlokalizowane jest w północnej części miasta, w zlewni rzeki Kamianka stanowiącej prawostronny dopływ Bugu. Po północnej stronie miasta do rzeki tej wpada niewielki ciek o nazwie Mahomet. Rzeka ta jest spiętrzona i na terenie miasta tworzy niewielki zbiornik rekreacyjny. Poszczególne studnie ujęcia położone są wzdłuż jej koryta, jednak już poza doliną rzeczną – na wysoczyźnie o rzędnych terenu ponad 165 m n.p.m. (wobec rzędnej terenu w dolinie rzecznej ok. 150-155 m n.p.m.). Ujęcie składa się z 3 czynnych studni i 9 piezometrów.

Historia badań

Ujęcie komunalne dostarczające wodę do miejskiej sieci wodociągowej w Siemiatyczach zaopatrywane jest w wodę wyłącznie z czwartorzędowego piętra wodonośnego, które wykształcone jest w tym rejonie w postaci dwu zasadniczych użytkowych warstw wodonośnych. Prace wiertnicze na terenie ujęcia zapoczątkowane zostały w 1961 roku. Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne z Warszawy odwierteło wówczas 2 studnie, które do roku 1976 stanowiły jedyne źródło zaopatrzenia miasta w wodę. W latach 1975-1976 przeprowadzono rozległe prace poszukiwawcze w rejonie na wschód od miasta. Wykonano 5 otworów poszukiwawczych o głębokościach od 53 do 73 m oraz 2 otwory rozpoznawcze o głębokościach 52 i 71 m. Otwory poszukiwawcze przystosowano do prowadzenia obserwacji piezometrycznych poprzez zabudowę filtrów o średnicy 4" i długości ok. 2 m. W otworach rozpoznawczych zafiltrowano całą miąższość warstwy wodonośnej filtrami o średnicy 11¾" przystosowując je w ten sposób do celów eksploatacyjnych. W wyniku przeprowadzonego pompowania zespołowego, które obejmowało studnie istniejące oraz nowo odwiercone otwory rozpoznawcze uzyskano sumaryczną wydajność ujęcia ok. 112 m³/h. Całość prac zakończono sporządzeniem w roku 1976 dokumentacji hydrogeologicznej ustalającej zasoby eksploatacyjne w kat. „B” dla górnej warstwy międzylodowej w wysokości 270 m³/h przy depresji 23 m. Dokumentacja została zatwierdzona decyzją prezesa CUG w 1976 roku.

Kolejny etap prac badawczych w obrębie ujęcia miał miejsce w latach 1977-1983. Badaniami objęto warstwę głębszą. Odwiercono 2 otwory poszukiwawcze oraz jeden otwór rozpoznawczy. Otwory poszukiwawcze pozostawiono jako piezometry, zaś otwór rozpoznawczy przystosowano do celów eksploatacyjnych. Pompowanie pomiarowe otworu rozpoznawczego przeprowadzono z maksymalnym wydatkiem $116 \text{ m}^3/\text{h}$ uzyskując ustaloną depresję 21 m. Na podstawie tych prac, drogą ekstrapolacji wyników pompowania ustalono zasoby w kat. „B” dla dolnej warstwy podglinowej w wysokości $200 \text{ m}^3/\text{h}$ przy depresji 26 m. Dokumentacja zawierająca ustalenie zasobów została zatwierdzona decyzją prezesa CUG w 1983 roku.

Tak więc od roku 1983 łączna wielkość zasobów ujęcia wynosiła $470 \text{ m}^3/\text{h}$, w tym dla warstwy górnej $270 \text{ m}^3/\text{h}$ i dla dolnej $200 \text{ m}^3/\text{h}$. Obecną lokalizację poszczególnych otworów pokazuje rysunek 8.4-1.



Rys. 8.4-1. Mapa lokalizacyjna rejonu ujęcia komunalnego w Siemiatyczach.

Na początku lat 90. w zasięgu obszaru zasobowego ujęcia wybudowany został cmentarz parafialny stanowiący potencjalne zagrożenie dla jakości ujmowanych wód. Cmentarz zlokalizowano w obrębie płytkich utworów piaszczystych tworzących przypowierzchniową warstwę wodonośną w dolinie rzeki Mahomet.

Zagrożenie dla jakości ujmowanych wód dostrzeżono stosunkowo późno, jednak likwidacja cmentarza po pewnym okresie jego funkcjonowania okazała się niemożliwa. Z tego względu Komisja Dokumentacji Hydrogeologicznych wyraziła opinię, że konflikt lokalizacyjny należy rozwiązać poprzez dokonanie weryfikacji zasobów ujęcia w taki sposób, aby wyeliminować niebezpieczeństwo szkodliwego oddziaływania cmentarza na jakość wód podziemnych.

Warunki hydrogeologiczne

W rejonie Siemiatycz do zaopatrzenia w wodę wykorzystywane są dwie użytkowe warstwy wodonośne: warstwa górna – międzyglinowa i warstwa dolna – podglinowa. Obie wykształcone są w postaci piasków, przy czym warstwa dolna zawiera dużą ilość frakcji grubej: pospółek i żwirów. Współczynnik filtracji tych utworów wynosi do 1,41 m/h, natomiast dla warstwy górnej jest on mniejszy i osiąga do 0,52 m/h. Miąższość warstwy dolnej zmienia się w granicach od ok. 30 do ponad 50 m, natomiast miąższość warstwy górnej jest mniej zróżnicowana i wynosi 10-19 m. Z uwagi na charakterystyczne wykształcenie granulometryczne warstwy dolnej obserwujemy w tym rejonie bardzo korzystne warunki hydrogeologiczne. Wydajności jednostkowe pojedynczych studni ujmujących tę warstwę dochodzą do 30 m³/h/m.

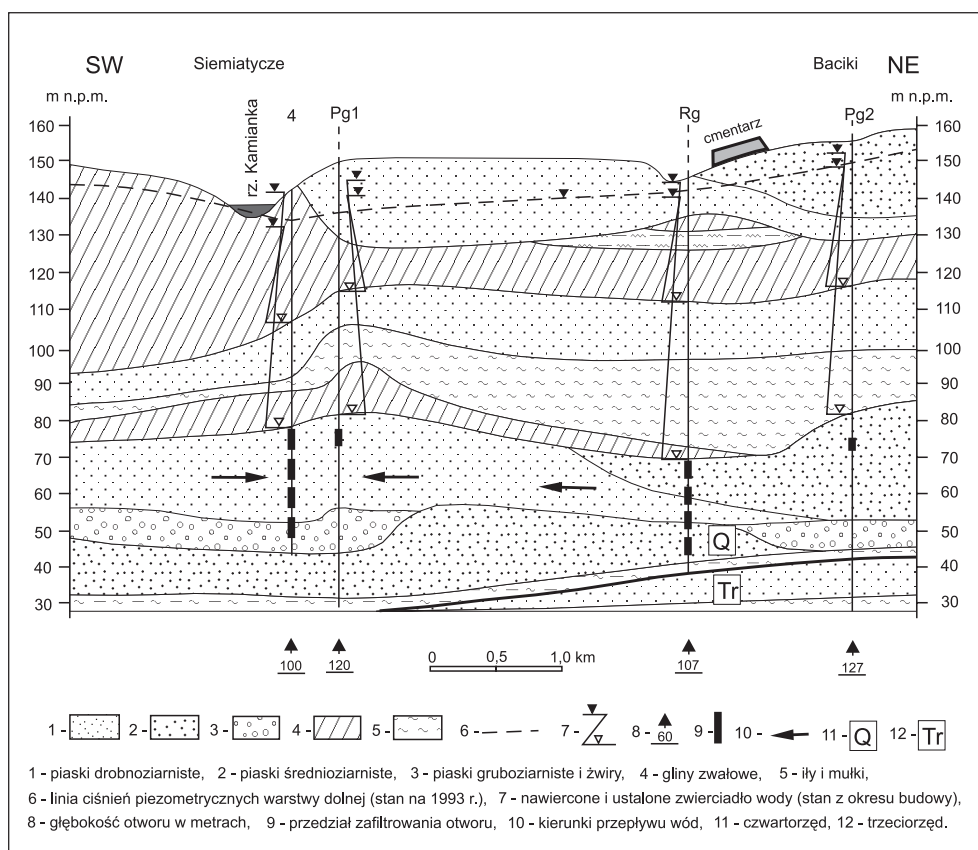
W dolinie rzeki Mahomet wykształcona jest dodatkowo warstwa przypowierzchniowa o nieznanych parametrach hydrogeologicznych ze względu na to, że ujmowana jest do eksploatacji wyłącznie płytkimi studniami kopanymi. Swoobodne zwierciadło wody tej warstwy zostało nieznacznie podniesione na skutek spiętrzenia rzeki i wybudowania zbiornika rekreacyjnego w północnej części Siemiatycz.

Obie użytkowe warstwy wodonośne odizolowane są od siebie pakietem utworów słabo przepuszczalnych o dość jednorodnej budowie. Są to głównie gliny zwałowe, które zostały częściowo wyerodowane i na ich miejsce osadziły się utwory zastoiskowe w postaci ilów i ilów pylastych. Łączna miąższość kompleksu glin i utworów zastoiskowych wynosi do 30 m. Parametry filtracyjne tego kompleksu nie zostały rozpoznane. Podobnie wykształcony pakiet izolacyjny zalega pomiędzy warstwą przypowierzchniową a warstwą górną – międzyglinową. Łączna miąższość glin zwałowych z wkładkami ilów wynosi 10-25 m, a parametry filtracyjne pakietu również nie są znane.

Analiza ciśnień piezometrycznych we wszystkich warstwach wodonośnych wskazuje na istnienie pomiędzy nimi więzi hydraulicznej, co przejawia się wspólnym rejonem drenażu (doliny rzek Kamianka i Mahomet) przy niewiel-

kim zróżnicowaniu ciśnień nie przekraczającym kilku metrów w rejonie wysoczyzny i 0,5-1 m w dolinie rzecznej. Całe analizowane ujęcie położone jest w dolinnej strefie drenażu, gdzie pionowe przesączania pomiędzy warstwami skierowane są ku górze, dzięki czemu warstwy występujące głębiej zasilały warstwy płytsze.

Na całość warunków hydrodynamicznych w rejonie Siemiatycz istotny wpływ wywierają największe ujęcia przemysłowe w mieście: Zakłady Mleczarskie czerpiące wodę z warstwy dolnej w ilości 19,6 m³/h oraz Zakłady przetwórstwa owocowo-Warzywnego (dawny Hortex) eksploatujące również warstwę dolną w ilości 88,8 m³/h (wartości średnie z roku 1992). Wielkości poboru ustalone dla wartości średnich z 2001 roku wynoszą odpowiednio 34,2 m³/h i 43,2 m³/h. Ujęcia te zlokalizowane są w dzielnicy przemysłowej miasta, na jego południowo-wschodnich krańcach i z tego względu nie obserwuje się ich współdziałania z ujęciem komunalnym, które położone jest w części północno-wschodniej Siemiatycz.



Rys. 8.4-2. Przekrój hydrogeologiczny przez ujęcie komunalne w Siemiatyczach.

Jakość wód podziemnych

Jakość wód ujmowanych na ujęciu komunalnym w Siemiatyczach w okresie prowadzenia prac badawczych (1977-1983) nie odbiegała od typowej dla dobrze izolowanych poziomów wodonośnych. Woda jest dobrej jakości, obserwuje się jedynie ponadnormatywne zawartości żelaza i manganu. W warstwie górnej zawartość żelaza wynosi 1,2-1,6 mg/l, w warstwie dolnej: 1,1-2,6 mg/l. Mineralizacja wynosi 206-306 mg/l w warstwie górnej i 237-325 mg/l w warstwie dolnej. Nie obserwuje się istotnych trendów zmian jakości wody.

Weryfikacja zasobów eksploatacyjnych ujęcia

Do weryfikacji przystąpiono w 1992 roku w Przedsiębiorstwie Geologicznym POLGEOL S.A. w Warszawie, przy czym względy finansowe zadecydowały, że nie mogła być ona wykonana metodą modelowania matematycznego. Wykorzystane zostały metody analityczne poprzedzone reinterpretacją archiwalnych pompowań badawczych. Interpretacja ta polegała na analizie nieustalonej fazy dopływu podczas pompowania otworów Rg i 3A ujmujących warstwę dolną oraz otworów RI i RII ujmujących warstwę górną. Otrzymane w wyniku reinterpretacji archiwalnych pompowań parametry warstw wodonośnych wykazały w niektórych przypadkach istotną rozbieżność w stosunku do pierwotnych obliczeń zamieszczonych w dokumentacji zasobowej ujęcia prowadzonych w oparciu o wzory na dopływ ustalony (tab. 8.4-1).

Niezależnie od reinterpretacji parametrycznej pompowań badawczych, charakterystyka zmian depresji obserwowanej w poszczególnych piezometrach na wy-

Tabela 8.4-1. Parametry hydrogeologiczne określone w dokumentacji hydrogeologicznej (1992 r.) i otrzymane w wyniku powtórnej interpretacji pompowań badawczych (2002 r.).

Nr otworu	Ujęta warstwa	Parametry hydrogeologiczne	
		Wartości pierwotne	Wartości zreinterpretowane
RI	górną	k= 0,20 m/h T=2,31 m ² /h	k= 0,36 m/h T=4,39 m ² /h
RII	górną	k= 0,45 m/h T=5,17 m ² /h	k= 0,46 m/h T=5,50 m ² /h
Rg	dolną	k= 0,27 m/h T=8,1 m ² /h	I odcinek na wyk. $s=f(\log t)$ – parametry warstwy w sąsiedztwie studni: k= 0,23 m/h, T=6,8 m ² /h II odcinek na wyk. $s=f(\log t)$ – parametry warstwy w oddaleniu od studni: k= 0,52 m/h T=15,6 m ² /h
3A	dolną	k= 0,93 m/h T=9,30 m ² /h	k= 1,41 m/h T=14,10 m ² /h

kresach $s=f(\log t)$ umożliwiła wskazanie uprzywilejowanych stref dopływu. Stwierdzono, że dominujące zasilanie następuje z kierunku zachodniego, natomiast rejon na wschód od ujęcia charakteryzuje się gorszymi parametrami filtracyjnymi.

Rozpoznanie hydrogeologiczne przeprowadzone w ramach prac weryfikacyjnych wykazało, że w rejonie cmentarza swobodne zwierciadło wody warstwy przypowierzchniowej występuje na rzędnej ok. 140 m n.p.m.. Zwierciadło górnej warstwy międzyglinowej stabilizuje się tu na rzędnej ok. 144 m n.p.m. Tak więc pomiędzy tymi warstwami występuje znacząca różnica ciśnień dochodząca w rejonie cmentarza do 4 m, przy czym kierunek przesączania przez utwory rozdzielające jest typowy dla dolinnych stref drenażowych, tzn. przepływ pionowy następuje z warstwy leżącej niżej do wyższej warstwy przypowierzchniowej.

Zadaniem prognozy weryfikującej zasoby eksploatacyjne dla ujęcia było określenie takiego wydatku, który nie spowoduje obniżenia ciśnień piezometrycznych górnej warstwy międzyglinowej poniżej ciśnień obserwowanych w warstwie przypowierzchniowej. Spełnienie tego warunku wyklucza możliwość dopływu wody z warstwy przypowierzchniowej – bezpośrednio narażonej na zanieczyszczenia z cmentarza – do warstw leżących głębiej. Zachowanie typowego dla dolin rzecznych naturalnego układu ciśnień poszczególnych warstw wodonośnych było więc głównym kryterium określającym dopuszczalną wielkość weryfikowanych zasobów eksploatacyjnych.

Obliczenia przeprowadzono metodą kolejnych przybliżeń, sprawdzając stopień spełnienia założonego kryterium dla różnych testowanych wydajności obu eksploatowanych warstw międzyglinowych. Przyjęto, że depresja w rejonie cmentarza jest dostatecznie dokładnie określona dla warstwy dolnej w nieczynnym otworze Rg oraz dla warstwy górnej w nieczynnym otworze RII. W prognozach przyjęto schemat filtracji ustalonej, ponieważ przedmiotem zainteresowania jest depresja maksymalna, tj. taka, która ukształtuje się na skutek wieloletniego poboru wody.

Obliczenia dla warstwy dolnej

Do obliczeń wykorzystano teorię Forchheimera wzajemnego oddziaływania studni. Wzory stosowane do obliczeń wyprowadzone zostały w oparciu o równanie krzywej depresji Dupuita wymagające poczynienia założeń wejściowych scharakteryzowanych w rozdziale 4.1.5.

Wykorzystując równanie depresji dla napiętego zwierciadła wody możemy napisać:

1) dla studni nr 4 i otworu obserwacyjnego Rg:

$$h_{Rg} - h_4 = \frac{Q_4}{2 \pi T} \ln \frac{x_{(4/Rg)}}{r_4}$$

2) dla studni nr 3A i otworu obserwacyjnego Rg:

$$h_{Rg} - h_{3A} = \frac{Q_{3A}}{2 \pi T} \ln \frac{x_{(3A/Rg)}}{r_{3A}}$$

Znaczenia poszczególnych symboli oraz wartości przyjęte do obliczeń są następujące:

Symbol	Znaczenie	Wartość przyjęta do obliczeń
h_4, h_{3A}	rzędne zwierciadła wody w eksploatowanych studniach nr 4 i 3A	–
h_{Rg}	rzędna zwierciadła wody w otworze obserwacyjnym nr Rg	$h_{Rg} = 143,3$ m n.p.m. (rzędna zarejestrowana w okresie prowadzenia badań – 1992 r.)
Q_4, Q_{3A}	wydajność otworów nr 4 i 3A	$Q_4 = 20$ m ³ /h, $Q_{3A} = 81$ m ³ /h, (wydajności z okresu prowadzenia badań, tj. średnia z roku 1992)
r_4, r_{3A}	promień studni nr 4 i 3A	$r_4 = 0,23$ m, $r_{3A} = 0,20$ m
T	przewodnictwo wodne warstwy	$T = 11,2$ m ² /h
$x_{(4/Rg)}, x_{(3A/Rg)}$	odległości otworów nr 4 i Rg oraz 3A i Rg	$x_{(4/Rg)} = 1800$ m, $x_{(3A/Rg)} = 1400$ m.

Położenie zwierciadła wody w dowolnie zlokalizowanym punkcie obserwacyjnym – h_M obliczyć można ze wzoru:

$$h_{Rg} - h_M = \frac{Q_4}{2 \pi T} \ln \frac{x_{(4/Rg)}}{r_4} + \frac{Q_{3A}}{2 \pi T} \ln \frac{x_{(3A/Rg)}}{r_{3A}}$$

stąd:

$$h_M = h_{Rg} - \left(\frac{Q_4}{2 \pi T} \ln \frac{x_{(4/Rg)}}{r_4} + \frac{Q_{3A}}{2 \pi T} \ln \frac{x_{(3A/Rg)}}{r_{3A}} \right)$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy: $h_M = 143,3 - (2,5 + 10,2) = 130,6$ m n.p.m.

Wobec rzędnej statycznego zwierciadła wody w otworze Rg równej 145,1 m n.p.m. depresja wyniesie:

$$s_M = 145,1 - 130,6 = 14,5 \text{ m}$$

Jest to hipotetyczna depresja w środku ciężkości ujęcia wywołana pracą studni eksploatujących dolną warstwę podglinową z aktualnymi wydajnościami.

Następnym krokiem w obliczeniach jest założenie w środku ciężkości ujęcia prognozowanego wydatku i analiza skutków oddziaływania tego poboru na rejon cmentarza (tj. depresja w otworze obserwacyjnym Rg). Zadanie rozwiązywane jest w kolejnych krokach iteracyjnych, gdzie wartością zmienną – testowaną jest wydatek. Metodyka obliczeń pokazana zostanie poniżej dla wydajności ostatecznie zoptymalizowanej na poziomie 200 m³/h. Przy tej wielkości poboru depresja w środku ciężkości ujęcia może być obliczona w oparciu o liniową zależność wydatku i depresji:

$$s_p = \frac{s_M \cdot Q_p}{Q_a}$$

gdzie:

- Q_a – wydatek aktualny ujęcia,
- Q_p – wydatek prognozowany ujęcia,
- s_M – depresja aktualna (przy poborze Q_a),
- s_p – depresja prognozowana.

Depresja wynosi:

$$s_p = \frac{14,5 \text{ m} \cdot 200 \text{ m}^3/\text{h}}{101 \text{ m}^3/\text{h}} = 28,7 \text{ m}$$

co odpowiada rzędnej $h_M = 116,4 \text{ m n.p.m.}$. Wykorzystując równanie krzywej depresji pomiędzy otworem obserwacyjnym R_g , a środkiem ciężkości ujęcia, obliczono wielkość depresji w otworze R_g :

$$h_{R_g} = h_M + \left(\frac{Q_4}{2 \pi T} \ln \frac{x_{(4/R_g)}}{r_4} + \frac{Q_{3A}}{2 \pi T} \ln \frac{x_{(3A/R_g)}}{r_{3A}} \right)$$

Wartości poszczególnych parametrów pozostają bez zmian, natomiast przy wydajnościach $Q_4 = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ i $Q_{3A} = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ otrzymujemy $h_{R_g} = 141,7 \text{ m n.p.m.}$, co odpowiada depresji 3,4 m. Rzeczywista depresja zmierzona w otworze R_g w okresie prowadzenia badań, tj. w 1992 roku wyniosła 1,8 m. Odzwierciedla ona eksploatację prowadzoną ze średnim wydatkiem $101 \text{ m}^3/\text{h}$.

Obliczenia dla warstwy górnej

Obliczenia dla warstwy górnej są prostsze, bo eksploatowana jest ona tylko jednym otworem. Wzór krzywej depresji Dupuita dla otworu eksploatacyjnego nr 1B i otworu obserwacyjnego RII ma postać:

$$h_{RII} - h_{1B} = \frac{Q_{1B}}{2 \pi T} \ln \frac{x_{(RII/1B)}}{r_{1B}}$$

Znaczenie poszczególnych symboli oraz wartości przyjęte do obliczeń są następujące:

Symbol	Znaczenie	Wartość przyjęta do obliczeń
h_{RII}, h_{1B}	rzędna zw. wody w otworach RII i 1B	$h_{1B} = 124,4 \text{ m n.p.m.}$
Q_{1B}	wydajność otworu 1B	$Q_{1B} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ - wartość zoptymalizowana w wyniku kolejnych prób
$x_{(RII/1B)}$	odległość otworów nr RII i 1B	$x_{(RII/1B)} = 1500 \text{ m}$
r_{1B}	promień otworu 1B	$r_{1B} = 0,23 \text{ m}$
T	przewodnictwo wodne warstwy	$T = 4,8 \text{ m}^2/\text{h}$

Podstawiając odpowiednie wartości otrzymano $h_{\text{RII}} = 140,0$ m n.p.m., co odpowiada depresji $s=4,3$ m, wobec depresji rzeczywistej zmierzonej w otworze RII w roku 1992 wynoszącej 0,4 m.

W efekcie przeprowadzonych obliczeń prognostycznych można stwierdzić, że przy wydajności ujęcia wynoszącej 250 m³/h maksymalna depresja w rejonie cementarza wyniesie:

- dla warstwy górnej: 4,2 m,
- dla warstwy dolnej: 3,4 m.

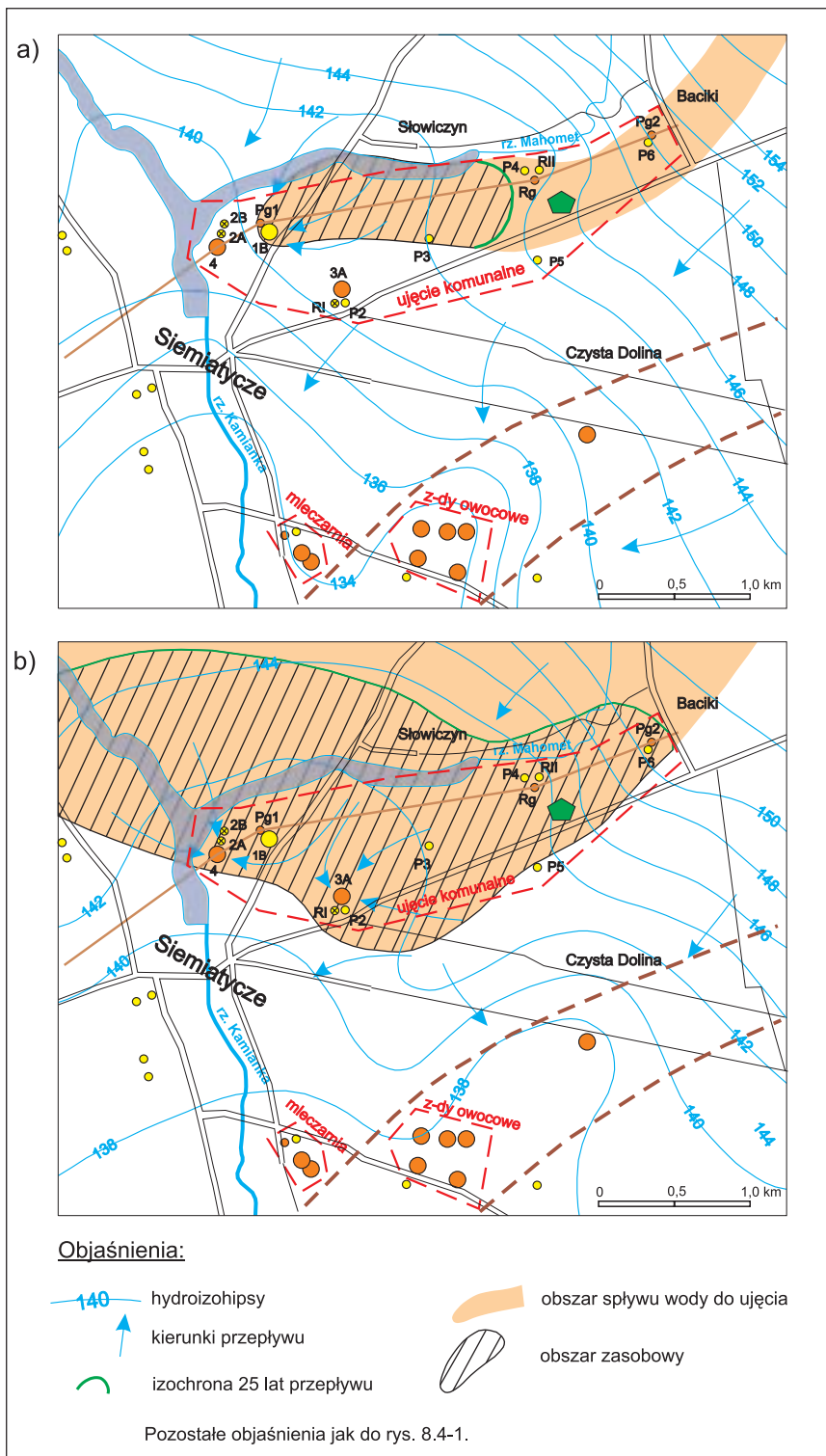
Są to wartości, przy których zachowane zostaną naturalne kierunki pionowego przesączania wód poprzez utwory słabo przepuszczalne, co gwarantuje utrzymanie bezpieczeństwa jeśli chodzi o możliwość przedostawania się zanieczyszczeń z warstwy przypowierzchniowej do warstw wgłębnych.

W wyniku obliczeń łączne zasoby ujęcia zostały zmniejszone z 470 m³/h do 250 m³/h. Dla warstwy dolnej, która nie jest zagrożona zanieczyszczeniem, zasoby pozostawiono bez zmian (tj. 200 m³/h), dla warstwy górnej obniżono je z 270 do 50 m³/h. W oparciu o prognozowany rozkład hydroizohips określono obszar spływu wody i w jego obrębie obszar zasobowy ograniczony umownie izochroną 25 lat dopływu wody do ujęcia (rozłączny dla obu warstw) – rysunek 8.4-3. Obszar zasobowy dla warstwy górnej ma powierzchnię $\sim 1,8$ km², a dla warstwy dolnej $\sim 7,5$ km². Powierzchnia obu obszarów zasobowych jest stosunkowo niewielka z uwagi na dominujące zasilanie pochodzące z przesączania z niżej ległych utworów wodonośnych przy mniejszej roli zasilania infiltracyjnego w obrębie obszaru spływu wody.

Stwierdzono, że w obszarze ograniczonym izochroną 25 lat poziomego dopływu wody do ujęcia (dla każdej z warstw) nie występują okna hydrogeologiczne mogące wpływać na czas dopływu i w związku z tym nie wyznaczono terenu ochrony pośredniej. Dokumentacja określająca zasoby eksploatacyjne ujęcia została zatwierdzona decyzją Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa w roku 1994.

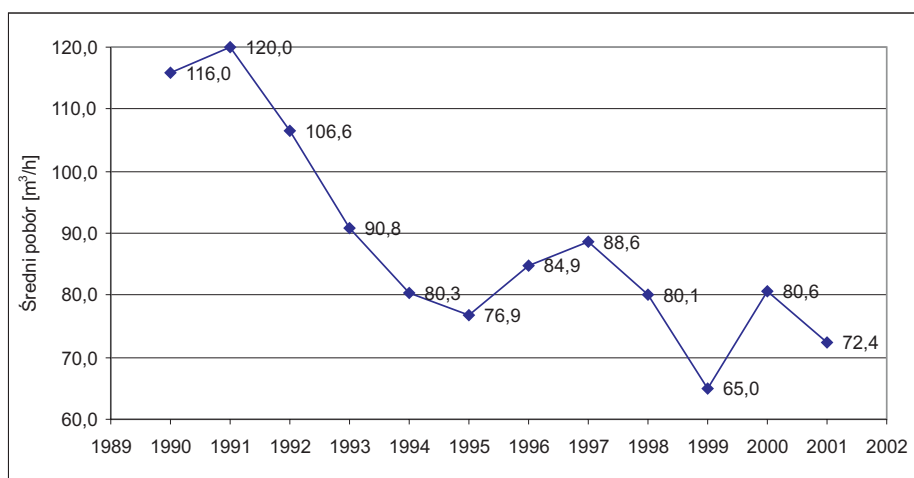
Podkreślić należy, że przedstawiony sposób weryfikacji zasobów zastosowano z uwagi na brak możliwości wykonania modelu matematycznego. Na użycie modelowania nie pozwalał szczupły budżet tematu oraz wymagany szybki termin realizacji. Schematyzacja stosowana do obliczeń analitycznych stanowi zawsze znaczne uproszczenie naturalnych warunków hydrogeologicznych. W tym przypadku możliwa była do zaakceptowania tylko dzięki przeprowadzonej reinterpretacji próbnych pompowań badawczych opartych o analizę nieustalonej fazy dopływu. Pozwoliło to wykazać stosunkowo jednorodny charakter obu eksploatowanych warstw wodonośnych oraz brak widocznej więzi hydraulicznej pomiędzy nimi. Samą prognozę natomiast wykonano dla ustalonych warunków filtracji, co pozwoliło określić depresję maksymalną, która ukształtuje się na skutek długotrwałej eksploatacji.

Kontrolne pomiary i obserwacje dokonane przez Przedsiębiorstwo Geologiczne Polgeol S.A. na terenie ujęcia wiosną 2002 roku wskazują, że średni pobór roczny wykazuje systematyczny spadek (rys. 8.4-4). Przy eksploatacji na pozio-



Rys. 8.4-3. Mapa hydrogeologiczna rejonu Siemiatycz.

a) warstwa górna, b) warstwa dolna



Rys. 8.4-4. Zmienność poboru wody przez ujęcie komunalne w Siemiatyczach.

mie 70 m³/h wykorzystanie zasobów wynosi zaledwie ok. 28 %. W stosunku do pozwolenia wodnoprawnego (dopuszczalny średni dobowy pobór wody z ujęcia w ilości 196 m³/h) wykorzystanie to wynosi ok. 35 %.

Stwierdzono, że część piezometrów wybudowana specjalnie do prowadzenia kontrolowanej eksploatacji ujęcia obecnie nie nadaje się do tego celu. Zostały one zniszczone, bądź też zasypane i są obecnie suche. W tych z nich, które ocalały dokonano pomiaru głębokości występowania zwierciadła wody. Pomiary te wykonano także w czynnych studniach ujęcia komunalnego oraz w studniach z nim sąsiadujących. Wyniki pomiarów ilustruje tabela 8.4-2.

Ujęcie nie prowadzi kontroli jakości wody surowej. Badana jest jedynie woda po uzdatnieniu, mieszana ze wszystkich trzech czynnych studni.

Po zebraniu informacji dotyczących obecnej eksploatacji ujęcia można stwierdzić, że brak jest wystarczających danych do rzetelnej oceny jego funkcjonowania i – co za tym idzie – do pełnej oceny poprawności wykonanej w roku 1993 prognozy zasobowej. Odniesienie depresji z okresu weryfikacji zasobów do depresji z roku 2002 nie jest porównywalne, bo pobór wody z ujęcia nigdy nie zbliżył się nawet do wartości prognozowanych (tj. 250 m³/h). Jedyną możliwość porównania daje wydajność jednostkowa rozumiana w tym przypadku jako sumaryczna wydajność warstwy odniesiona do depresji w tejże warstwie obserwowanej w rejonie cmentarza parafialnego. Wykorzystuje się do tego celu średni pobór wody z ostatnich 5 lat, który w sposób pełniejszy niż wydatek z ostatniego roku kształtuje obecne położenie zwierciadła wody w piezometrach. Po przeliczeniu na jednostki godzinowe wynosi on 77,3 m³/h, przy czym z warstwy górnej pompowano 7,0 m³/h, a z warstwy dolnej 70,3 m³/h. Prognozowane i rzeczywiste wartości wydajności jednostkowych pokazuje tabela 8.4-3.

Tabela 8.4-2. Porównanie stanów wód zarejestrowanych w roku 1992 ze stanami zmierzonymi w roku 2002 w wybranych studniach na terenie Siemiatycz.

lp	nr st. BH	nr st. użyt.	Użytkownik	rzędna otworu [m n.p.m.]	rzędna stat. zw. wody [m n.p.m.]	rok 1992				rok 2002			
						pobór [m³/h]	głęb. do zw. w. [m]	rzędna zw. wody [m n.p.m.]	Uwagi	pobór [m³/h]	głęb. do zw. w. [m]	rzędna zw. wody [m n.p.m.]	Uwagi
1	377	4	wodociągi – studnia	143,8	142,0	106,6	2,6	141,2	pomiar po 12 h przerwy	72,4	2,2	141,6	pomiar po 15 min. przerwy
2	378	1B	wodociągi – studnia	151,4	140,4		10,7	140,7	pomiar po 10 h przerwy		11,5	139,9	pomiar po 15 min. przerwy
3	351	3A	wodociągi – studnia	164,6	142,4		23,3	141,3	pomiar po 1 h przerwy		22,5	142,1	pomiar po 10 dniach przerwy
4	348	Rg	wodociągi – piezom.	145,9	145,1		2,6	143,3			2,2	143,7	
5	11	RII	wodociągi – piezom.	146,8	144,3		2,9	143,9			3,39	143,41	
6	349	Pg2	wodociągi – piezom.	155,9	152,7		4,8	151,1			4,65	151,25	
7	350	Pg1	wodociągi – piezom.	149,9	144,8		8,75	141,15			bd	bd	nieodnaleziony – zniszczony
8	13	P2	wodociągi – piezom.	164,9	140,4		b.d.	b.d.			bd	bd	do gł. 22,5 m zasypany
9	15	P4	wodociągi – piezom.	168,0	166,4		b.d.	b.d.			2,1	165,9	
10	14	P3	wodociągi – piezom.	168,1	142,1		26,3	141,8			bd	bd	nieodnaleziony – zniszczony
11	16	P5	wodociągi – piezom.	158,0	142,6		b.d.	b.d.			bd	bd	nieodnaleziony – zniszczony
12	17	Pg	wodociągi – piezom.	155,5	150,7		b.d.	b.d.			bd	bd	do gł. 4,4 m zasypany
13	27	1	Baner – Hortex	163,1	138,8	88,8	27,8	135,3	chwilowo nieczynna	43,2	25,2	137,9	chwilowo nieczynna
14	28	2	Baner – Hortex	164,7	140,6		26,7	138	chwilowo nieczynna		25,5	139,2	chwilowo nieczynna
15	29	3	Baner – Hortex	160,0	139,2		28,4	131,6	pomiar po 15 min. przerwy		27,2	132,8	chwilowo nieczynna
16	30	4	Baner – Hortex	166,0	136,8		30,9	135,1	chwilowo nieczynna		29,2	136,8	chwilowo nieczynna
17	382	5	Baner – Hortex	165,1	137,1		29	136,1	pomiar po 10 min. przerwy		27,55	137,55	pomiar po 15 min. przerwy
18	24		Starostwo Powiat.	151,5	132,0	0,0	18,6	132,9	st. nieczynna	0,0	18,6	132,9	st. nieczynna
19	23		Szpital	150,9	133,4	0,0	17,85	133,05	st. nieczynna	0,0	17,4	133,5	st. nieczynna
20	31		PGKiM	160,0	131,4	0,0	30,3	129,7	st. nieczynna	0,0	29,65	130,35	st. nieczynna
21	379		Z-d Usług. Mech.	172,0	162,1	0,0	11,05	160,95	st. nieczynna	0,0	10,8	161,2	st. nieczynna
22	383		prywatna-p.Błoccy	158,8	138,8	ok.1,0	21,75	137,05		1,0	20,85	137,95	

Tabela 8.4-3. Prognozowane i rzeczywiste depresje wywołane pracą ujęcia komunalnego.

	Wartości prognozowane			Wartości rzeczywiste – rok 2002		
	Q	Depresja w rejonie cmentarza	Wydajność jednostkowa	Q – średnia z lat 1997-2001	Depresja w rejonie cmentarza	Wydajność jednostkowa
warstwa górna	50 m ³ /h	4,3 m	11,63 m ³ /h/m	7,0 m ³ /h	144,3-143,4=0,9 m	7,78 m ³ /h/m
warstwa dolna	200 m ³ /h	3,4 m	58,82 m ³ /h/m	70,3 m ³ /h	145,1-143,7=1,4 m	50,21 m ³ /h/m

Wydajności jednostkowe wykazują stosunkowo niewielkie rozbieżności pomiędzy wartościami prognozowanymi, a rzeczywistymi; dla warstwy górnej rzeczywiste są o ok. 33%, a dla warstwy dolnej ok. 15% niższe niż prognozowane. Jest to zadowalająca dokładność, pomimo tego, że zastosowano uproszczoną metodę weryfikacji zasobów. Z przyczyn, o których wspomniano powyżej nie posłużono się metodą modelowania matematycznego, co uniemożliwiło m.in. uwzględnienie współdziałania z innymi ujęciami wód podziemnych.

Należy jednak stwierdzić, że wykonana prognoza spełniła swoje zadanie praktyczne doprowadzając do zmniejszenia wielkości zasobów eksploatacyjnych. Kontrolne pomiary wykonane w roku 2002 nie wykazały istotnych deformacji strumienia filtracyjnego w rejonie cmentarza parafialnego stanowiącego potencjalne ognisko zanieczyszczeń dla eksploatowanych wód podziemnych. Po 10 latach od weryfikacji zasobów ujęcie nadal odporne jest na antropopresję w tym rejonie z uwagi na zachowanie pionowych gradientów ciśnień charakterystycznych dla strefy drenażowej.

8.5. Optymalizacja poboru wody w warunkach współdziałania ujęć w szczelinowo-krasowym zbiorniku wód podziemnych (GZWP 417)

Rejon badań: GZWP 417 – dewoński zbiornik wód podziemnych eksploatowany głównie przez ujęcie Białogon na potrzeby zaopatrzenia w wodę Kielc.

Problematyka: Zagrożenie jakości wód z uwagi na szczelinowo-krasowy charakter zbiornika i bardzo małą odporność na przenikanie zanieczyszczeń z powierzchni terenu.

Typ ujęcia: Duże ujęcie w zbiorniku szczelinowo-krasowym.

Metodyka ustalania zasobów: Wieloletnie badania regionalne, bilans wodny rejonu i model hydrogeologiczny ujęcia Białogon.

Lokalizacja

GZWP 417 (Zbiornik Kielce) zlokalizowany jest w obszarze paleozoicznego trzonu Gór Świętokrzyskich – po południowej stronie Kielc. Ujęcie Białogon znajduje się w południowej części zbiornika i składa się z 23 studni.

Zbiornik GZWP 417 drenowany jest przez rzeki Bobrza i Sufraganiec oraz przez Silnicę, która przepływa przez ujęcie Białogon dzieląc go na 2 części.

Historia badań

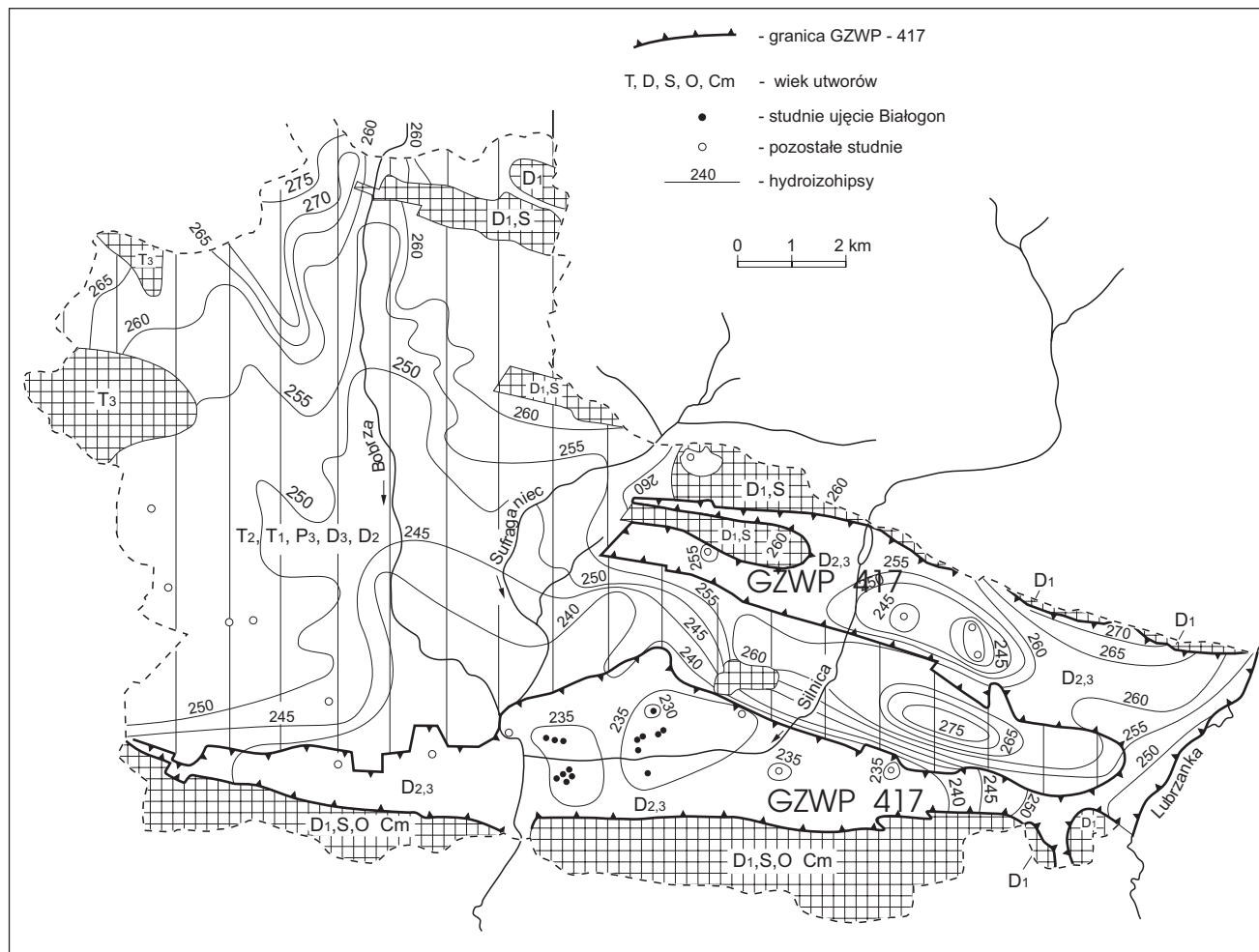
Do początku XX wieku miasto Kielce, wieś i zakłady przemysłowe leżące na terenie obecnego GZWP Kielce zaopatrywały się w wodę ze studni kopanych. Studnie te ujmowały wody piętra czwartorzędowego lub wody występujące w stropowej, zwietrzalej partii utworów starszego podłoża. Ścieki były zrzucane do gruntu lub do wód powierzchniowych. Głównym odbiornikiem ścieków z terenu miasta była rzeka Silnica. Pierwsze studnie głębinowe odwiercono w okresie międzywojennym w końcu lat dwudziestych. Były to studnie zakładu energetycznego (st. 53/1, 53/2) i studnia na terenie obecnych Zakładów Łożysk Tocznych FŁT „Iskra” – ówczesne Zakłady „Granat” (st. 55/1). Ujmowały one wodę z wapieni dewońskich. W tym samym czasie amerykańskie towarzystwo „Ulen and Company” rozpoczęło prace związane z budową wodociągu komunalnego i kanalizacji sanitarnej w Kielcach. Po szczegółowej analizie warunków wodnych w rejonie Kielc zdecydowano się na zaopatrzenie wodociągu w wodę ze źródeł wypływających z wapieni dewońskich u podnóża Stokowej Góry, na skraju doliny rzeki Bobrzy. Było to tzw. ujęcie „Siedem Źródeł”. Pobierano z niego wodę już od 1929 r. W tym samym czasie wybudowano oczyszczalnię ścieków w dzielnicy Pakosz, w której uzdatniano ścieki doprowadzane przez rozbudowującą się stopniowo kanalizację sanitarną. W okresie II wojny światowej rozpatrywano możliwość zaopatrzenia wodociągu miejskiego w dodatkowe ilości wody z bariery studni kopanych zlokalizowanych wzdłuż rzek Bobrzy i Sufragańca lub bezpośrednio z rzeki Bobrzy. Planowano także przeprowadzenie badań hydrogeologicznych pomiędzy Górą Stokową a rzeką Silnicą na terenie obecnego ujęcia komunalnego w Białogonie. Budowę ujęć wód podziemnych rozpoczęto jednak dopiero od drugiej połowy lat pięćdziesiątych. Wykonano wówczas między innymi pierwsze studnie głębinowe ujęcia wody w Białogonie. Jednak największą ilość studni odwiercono w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych. Później wiercono już tylko pojedyncze studnie. Przeważająca ilość studni głębinowych ujmuje wodę z warstw środkowo-górnodewońskich, z tym że największy jest pobór w obrębie granic GZWP 417 Kielce (rys. 8.5-1). Część studni ujmuje też wodę z subzbiornika permsko-triasowego (obszar zasilania GZWP). Czwartorzędowe piętro wodonośne w granicach GZWP było stosunkowo rzadko przedmiotem badań hydrogeologicznych. Ujęte jest zaledwie kilkoma studniami głębinowymi (rys. 8.5-2).

Najwięcej badań hydrogeologicznych wykonano w południowej części GZWP (południowe skrzydło synkliny kieleckiej), w rejonie ujęcia komunalnego Kielc w Białogonie. W 1955 r. ówczesne Prezydium Miejskiej Rady Narodowej zleciło Przedsiębiorstwu Geologicznemu „Południe” we Wrocławiu wykonanie pierwszych dwóch otworów studziennych (st. 1/II i 2/II). Był to początek budowy ujęcia komunalnego opartego na studniach ujmujących wodę z wapieni dewońskich, bowiem do tej pory wodociąg był zaopatrywany w wodę tylko z ujęcia „Siedem Źródeł”. Do 1961 r. rozbudowę ujęcia prowadziło przedsiębiorstwo wrocławskie przy współpracy z Instytutem Geologicznym. W 1961 r. całość przejęło Przedsiębiorstwo Geologiczne w Kielcach – Białogonie. Na terenie ujęcia wykonano łącznie 21 wierconych studni głębinowych o głębokościach od 34,5 do 101 m (rys. 8.5-2). Zasoby wód podziemnych ujęcia z utworów dewonu środkowego i górnego udokumentowano w kategorii „B” w wysokości 3600 m³/h przy depresji 22,0 m. Wielkość tę ustalono na podstawie wyników pompowań indywidualnych (lub grup) studni oraz obliczeń prowadzonych klasycznymi wzorami hydrogeologicznymi (wielka studnia) zakładając wzmożenie dopływu drogami „dalekiego krążenia” ze wschodniej części synklinorium kielecko-łagowskiego. Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne ujęcia została zatwierdzona decyzją Prezesa Centralnego Urzędu Geologii w roku 1968 r. (część studni była dowiercana już po zatwierdzeniu dokumentacji).

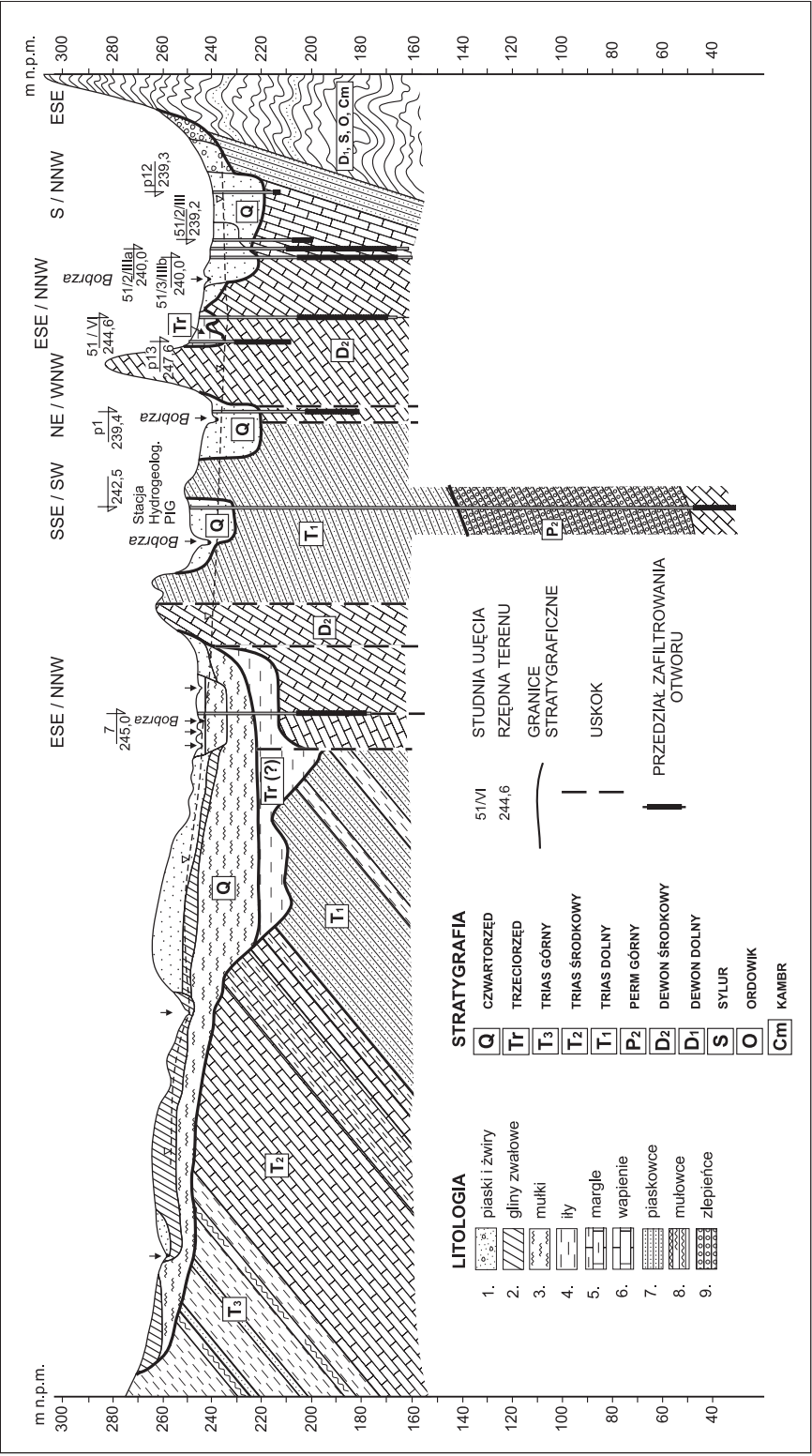
W 1972 r. Instytut Gospodarki Komunalnej w Poznaniu wykonał przy pomocy analogowego modelowania w AGH opracowanie pt.: „Ocena warunków i prognoza eksploatacji ujęć wód podziemnych z utworów środkowego dewonu w Dolinie Białogońskiej na podstawie badań analogowych”. Po rozpatrzeniu tego opracowania Komisja Dokumentacji Hydrogeologicznych wydała opinię, że zasoby ujęcia należy skorygować do ilości 2000 m³/h, a ze względu na brak dostatecznego rozpoznania ustalić je można tylko w kategorii „C”. Po tym orzeczeniu nie została jednak wydana decyzja Prezesa CUG i zasoby ujęcia w kategorii „B” wynosiły nadal 3600 m³/h.

Wspólne, wzajemne oddziaływanie wszystkich ujęć w południowej części GZWP (południowe skrzydło synkliny kieleckiej) w latach 1971-1981 było obserwowane w sieci piezometrów przez Oddział Świętokrzyski Instytutu Geologicznego w Kielcach, w ramach tematu „Zmiany reżimu wód podziemnych Doliny Białogońskiej, rejonu Zagnańska i rejonu Białego Zagłębia”. Po kilkuletniej przerwie badania zostały wznowione po renowacji piezometrów w 1988 r. i są one prowadzone do chwili obecnej przez Przedsiębiorstwo Geologiczne w Kielcach.

W związku z narastającym deficytem wody w 1983 r. został opracowany „Program prac i badań dla udokumentowania zasobów wód podziemnych dla aglomeracji kieleckiej”. W trakcie prac objętych programem wykonano projekt hydrogeologicznych badań szczegółowych dla rejonu Kielce-Piekoszów. Integralną część projektu stanowiły badania modelowe (numeryczny model jed-



Rys. 8.5-1. Mapa hydroizohips dewońskiego piętra wodonośnego wg stanu na rok 2001.



Rys. 8.5-2. Przekrój hydrogeologiczny w rejonie GZWP 417.

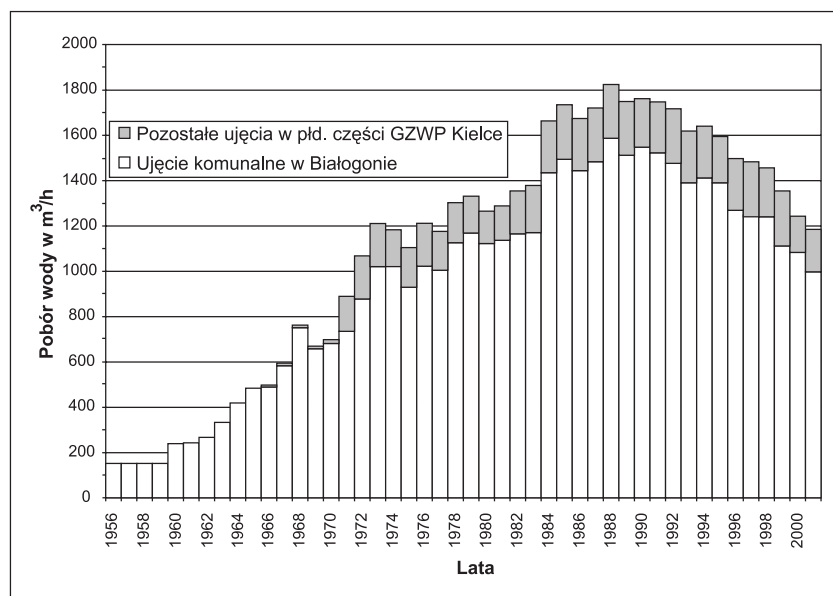
nowarstwowy, pakiet HYDRYLIB), wykonane w celu prognozy rozwoju eksploatacji wód podziemnych w tym rejonie. Projektowane badania zostały wykonane tylko w części zachodniej rejonu (zlewnia rzeki Łososiny), nie wykonano ich natomiast w częściach: centralnej (zlewnia rzeki Bobrzy) i wschodniej (zlewnia rzeki Lubrzanki) tam, gdzie rozprzestrzenia się GZWP Kielce. Tym samym nie nastąpiło przewidywane w projekcie skorygowanie zasobów eksploatacyjnych w kategorii „B” ujęcia komunalnego w Białogonie.

W ramach prac objętych Centralnym Programem Badań Podstawowych – Program 04.10.09 „Strategia ochrony głównych zbiorników wód podziemnych (GZWP) w Polsce” (1987-1990) została opracowana „Mapa głównych zbiorników wód podziemnych (GZWP) w Polsce wymagających szczególnej ochrony” w skali 1:500 000 (Kleczkowski A. S. 1990). Na tym etapie badań został wydzielony GZWP Nr 417 Kielce. Wykonano także „Koncepcję szczegółową ochrony GZWP Kielce”. Nie były to oczywiście pierwsze prace związane z ochroną wód podziemnych na tym terenie. Prowadzono je już w latach sześćdziesiątych na potrzeby wyznaczenia stref ochronnych ujęcia komunalnego w Białogonie. Powrócono do nich ponownie w 1989 r. po wykryciu zanieczyszczeń gruntu i wód podziemnych produktami naftowymi na terenie Zakładu Gospodarki Produktami Naftowymi CPN w Białogonie. Stwierdzone tam zanieczyszczenie stanowiło poważne zagrożenie dla jakości wody ujęcia komunalnego. Niezależnie od prac zmierzających do szczegółowego rozpoznania i likwidacji zanieczyszczenia opracowane zostały wytyczne dla ochrony ujęcia w Białogonie przed zanieczyszczeniem. Jednocześnie PG w Kielcach przystąpiło do szczegółowego kartowania sozologicznego na terenie południowej części GZWP i obszarach jego zasilania. Wyniki kartowania stanowiły podstawę dla dalszych prac sozologicznych i hydrogeologicznych prowadzonych w ramach „Systemu ochrony ujęcia komunalnego Kielc w Białogonie”.

Wody całego zbiornika GZWP 417 eksploatowane są głównie przez ujęcie Białogon. Eksploatacja wód na ujęciu wyniosła w roku 2001 średnio ok. 1000 m³/h (rys. 8.5-3).

Warunki hydrogeologiczne

Wody podziemne występują w GZWP 417 w wapieniach dewonu środkowego (w dolnej części także dolomity) oraz górnego. Wypełniają one strukturę synkliny kieleckiej i rozprzestrzeniają się na powierzchni 39,5 km² (drugorzędna struktura w synklinorium kielecko-łagowskim). Miąższość utworów wodonośnych (warstwy szczelinowo-krasowe) przekracza 200 m. Głębokość strefy aktywnego krążenia wód przyjmuje się w obliczeniach na 150 m, jednak w strefach dyslokacji jej głębokość sięga nawet 250 m. Do tej głębokości nie stwierdzono w badaniach terenowych wzrostu mineralizacji wód. Obszar alimentacji tej struktury wodonośnej przekracza wychodnie utworów dewońskich, zbiornik ma charakter przepływowy o znaczącym zasilaniu lateralnym, zwłaszcza



Rys. 8.5-3. Pobór wód w GZWP 417.

cza w zachodniej części synkliny (rys. 8.5-1). Wielkość zasilania lateralnego nie została dotychczas ustalona w badaniach terenowych; została jedynie oszacowana na modelach matematycznych. Zasoby odnawialne szacuje się na 2615 m³/h, z czego 734,4 m³/h stanowi zasilanie z infiltracji opadów atmosferycznych (bezpośrednio na wychodniach, pośrednio poprzez osady czwartorzędowe). Zasilanie lateralne pochodzi z utworów triasowych i permskich (ośrodek szczelinowo-porowy), być może także karbońskich (rys. 8.5-1, 8.5-2). W wielu miejscach w zasilaniu biorą także udział wody spływające ze stoków okalających wzgórz zbudowanych z utworów nieprzepuszczalnych.

Naturalną bazę drenażu struktury stanowią ciekły: Bobrza, Silnica, Sufraganiec i Lubrzanka (rys. 8.5-1). Obecnie Bobrza i Silnica są w granicach wpływu ujęcia białogórskiego drenowane i zasilają w tych odcinkach dolin utwory czwartorzędowe i pośrednio dewońskie.

Wielkość zasobów dyspozycyjnych GZWP oszacowano w roku 1990 na 2000 m³/h, obszarem ochronnym zbiornika objęto powierzchnię 121,9 km² (konceptcja ochrony zatwierdzona przez Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa w 1996 roku na podstawie dokumentacji opracowanej przez A.S. Kleczkowskiego i innych – AGH, maj 1996).

Jakość wód i jej zagrożenia

Jakość wód występujących w GZWP jest zmienna i mieści się w klasach od I do IV. Oprócz lokalnych i okresowych skażeń nieznacznie przekraczane są wartości dopuszczalne w zakresie jonów Fe i Mn oraz azotanów w wodach eksploatowanych przez niektóre studnie ujęcia. Generalnie eksploatowane wody

cechują się dobrą jakością i nie wymagają uzdatniania. Pojawiające się zagrożenia i okresowe przekroczenia wartości dopuszczalnych wymagają sterowania pracą ujęcia i poszczególnych studni w zakresie czasu ich pracy, wydajności i depresji.

Wody są silnie zagrożone degradacją jakości z uwagi na bardzo małą odporność zbiornika szczelinowo-krasowego na przenikanie zanieczyszczeń z powierzchni terenu (rys. 8.5-2). Liczne wychodnie skał wodonośnych (dolomity i wapienie), nieciągłość warstw czwartorzędowych stanowiących nadkład i ich nieduża miąższość (na ogół mniejsza niż 30 m) wskazują na krótki czas wymiany wód. Ocenia się go na mniej niż 30 lat.

Zagrożenie dla jakości wód stanowią występujące na powierzchni terenu liczne ogniska zanieczyszczeń, z których największe stanowią: zlikwidowany zakład CPN, dzikie wysypiska odpadów w nieczynnych kamieniołomach, wody Silnicy i Bobrzy w obrębie leja depresji ujęcia białogońskiego, stacje paliwowe, kolektor sanitarny Kielc biegnący przez teren ujęcia wzdłuż rzek Silnicy i Bobrzy i zakłady przemysłowe, w tym szczególnie były zakłady „Iskra”. Od 1989 r. trwają prace oczyszczające poziom czwartorzędowy z produktów ropopochodnych nagromadzonych po awariach na terenie zakładu CPN, leżącym w odległości około 350 m od studni ujęcia w Białogonie. Skażony obszar obejmował powierzchnię 300 m². Aktualnie największe zagrożenia dla eksploatowanych wód stanowi TRI i inne substancje toksyczne, których stężenia lokalnie, w znaczący sposób przekroczyły dopuszczalne wartości. Ogniskiem tych stężeń są ścieki i odpady z zakładów przemysłowych. W efekcie wyłączono jedną ze studni ujęcia, w pozostałych ogranicza się eksploatację i zmniejsza depresję.

Obliczenie zasobów eksploatacyjnych ujęcia

W roku 1994 została opracowana dokumentacja hydrogeologiczna, pt. „Dokumentacja hydrogeologiczna rejonu eksploatacji (RE) Kielce, w tym GZWP 417”, zawierająca wnioski zasobowe dla ustalenia:

- zasobów eksploatacyjnych ujęcia „Białogon” z utworów dewonu środkowego na okres 10 lat w ilości 1420 m³/h, przy obniżeniu zwierciadła wody do rzędnej 229 m n.p.m. i wydajności innych ujęć pracujących w GZWP zgodnej z tabelą 8.5-1,
- zasobów dyspozycyjnych z utworów triasowych, permskich i dewońskich dla RE Kielce (w tym GZWP 417 – tab. 8.5-1), w ilości 1800 m³/h, z obszaru zasobowego o powierzchni 176 km²,
- zasobów dynamicznych dla tego samego obszaru w ilości 2400 m³/h,
- granic zbiornika GZWP nr 417 i jego strefy ochronnej o powierzchni 121,9 km², wg stanu rozpoznania na dzień 30.10.1994 r.

Przedłożona dokumentacja i wnioski zasobowe oparto na wynikach wieloletnich badań regionalnych, bilansie wodnym rejonu i modelu hydrogeologicznym ujęcia Białogon.

Minister Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa zatwierdził 18.10.1995 r. dokumentację z ustalonymi w niej wielkościami zasobów:

- dyspozycyjnych w ilości 1800 m³/h dla obszaru zasobowego o powierzchni 176 km²,
- eksploatacyjnych w ilości 1400 m³/h, przy obniżeniu zwierciadła wody do rzędnej 226 m n.p.m.

Odrębną decyzją Minister zatwierdził dokumentację w części dotyczącej zbiornika GZWP 417 z ustaleniem warunków hydrogeologicznych tego zbiornika oraz wydzieleniem strefy ochronnej o powierzchni 121,9 km².

Obecnie na ujęciu Białogon (ujęcie nr 51) istnieją 23 studnie wiercone, z których 15 posiada pozwolenia wodnoprawne na pobór wód. Czynnych jest 13 studni, które ze względu na potrzebę ochrony ujęcia przed zanieczyszczeniami są eks-

Tabela 8.5-1. Wskazania optymalnej wielkości poboru wody z ujęć podziemnych w południowej części środkowodewońskiego GZWP (417) Kielce.

Obszar	Nr ujęcia (studni)	Użytkownik (właściciel)	Optymalna wielkość poboru wody w m ³ /h- stan w 1994 r.	
zachodni	30	Szkoła Podstawowa w Jaworzni – studnia nieczynna (szkołę podłączono do wodociągu wiejskiego)	–	Łącznie 13
	34	KZWP w Miedziance k. Kielc – studnia na terenie nieczynnego kamieniołomu w Jaworzni	0,1	
	37	Ogródki Działkowe w Dobromyślu/Związek Komunalny Wodociągów i Kanalizacji w Kielcach	8,3	
	38	Kielce – Zalesie – studnia Związku Komunalnego Wodociągów i Kanalizacji w Kielcach	4,5	
centralny teren ujęcia komunalnego w Białogonie	44/2	Kielecka Fabryka Pomp	6,3	Łącznie 1420
	49	Przedsiębiorstwo „Piaseck” – studnia nieczynna	–	
	51	Ujęcie Komunalne w Białogonie/Związek Komunalny Wodociągów i Kanalizacji w Kielcach	1413	
wschodni	55/2	Fabryka Łożysk Tocznych „Iskra”	65,0	Łącznie 210
	56	Stadion/Związek Komunalny Wodociągów i Kanalizacji w Kielcach	24,4	
	65	Wojewódzki Specjalistyczny Szpital Dziecięcy – studnia nieczynna	–	
	66	Szpital Poliklinika – studnia nieczynna	–	
	67	Psie Górki/Związek Komunalny Wodociągów i Kanalizacji w Kielcach – studnia nieczynna	–	
	68	ul. Wojska Polskiego Związek Komunalny Wodociągów i Kanalizacji w Kielcach	120	
	69	Barwinek/Szkoła Podstawowa – studnia nieczynna	–	

plloatowane z zachowaniem dopuszczalnych obniżeń zwierciadła wód do rzędnych w granicach od 226,0 do 231,5 m n.p.m. Do czasu likwidacji zanieczyszczeń wód w poziomie czwartorzędowym pozostałe studnie nie powinny być włączane do eksploatacji.

Z uwagi na ważność decyzji zatwierdzającej dokumentację hydrogeologiczną zasobów eksploatacyjnych ujęcia w Białogonie na okres do 30.10.2004 r. obecnie opracowywana jest nowa dokumentacja, w której zasoby ujęcia „Białogon” i pozostałych ujęć w GZWP 417 zostaną ustalone drogą modelowania matematycznego. Wieloletnie monitorowanie przebiegu eksploatacji ujęcia oraz wyniki badań hydrogeologicznych prowadzonych dla ustalenia przyczyn zanieczyszczenia wód i oceny efektów likwidacji ognisk zagrożeń pozwolą na określenie zasad odnowy ilościowej i jakościowej wód całego zbiornika GZWP 417 Kielce oraz optymalizację warunków pracy ujęcia Białogon.

8.6. Wpływ czynników środowiskowych na zasoby eksploatacyjne ujęć wód podziemnych w dolinach dużych rzek nizinnych

Rejon badań: Mosina – ujęcie komunalne dla Poznania.

Problematyka: Ocena zasobów eksploatacyjnych wód podziemnych w specyficznych warunkach środowiskowych związanych z zasilaniem ujęcia z infiltrujących wód rzeki Warty. Na wielkość zasobów silny wpływ wywiera zróżnicowanie składników zasilania uzależnione od warunków atmosferycznych i związane z tym procesy hydrogeochemiczne.

Typ ujęcia: Wielootworowe ujęcie infiltracyjne w dolinie rzecznej – zbiornik porowy.

Metodyka ustalania zasobów: Badania modelowe.

Lokalizacja

Ujęcie położone jest na południe od aglomeracji poznańskiej na obszarze wycinka Pradoliny Warszawsko-Berlińskiej, nazywanym „basenem mosińskim” (Tomaszewski, 1967). Ta wyraźnie zarysowana wśród otaczających ją wysoczyzn morenowych jednostka przestrzenna ma wymiary ok. 20 x 8 km (rys. 8.6-1). Obszar basenu wyraźnie asymetrycznie przecina rzeka Warta. Szerokość koryta tej rzeki przy stanach niskich wynosi 60-80 m. Jej lewobrzeżnymi dopływami w obrębie basenu mosińskiego są: Kanał Mosiński z Samicą Stęszewską i Olszynką oraz Kanał Szymanowo-Grzybno (rys. 8.6-1). W granicach basenu mosińskiego występują trzy rodzaje tarasów: zalewowy, nadzalewowy i bifurkacyjny. Taras zalewowy ma zmienną szerokość; od kil-

kuszet metrów do 2 km po obu stronach rzeki. Na jego obszarze występują liczne starorzecza i oczka o trwałym lub okresowym zatopieniu. Taras nadzalewowy ma szerokość 1-3 km i zajęty jest pod uprawy rolnicze. Taras najwyższy bifurkacyjny rozwinięty jest wyłącznie w lewobrzeżnej części basenu. Na jego obszarze występują pola wydymowe z wydymami o wysokości do 20 m i niecki deflacyjne. W przewodzie jest zalesiony. Wysoczyzny morenowe okalające obszar pradolinny górują nad nim o ponad 20 m.

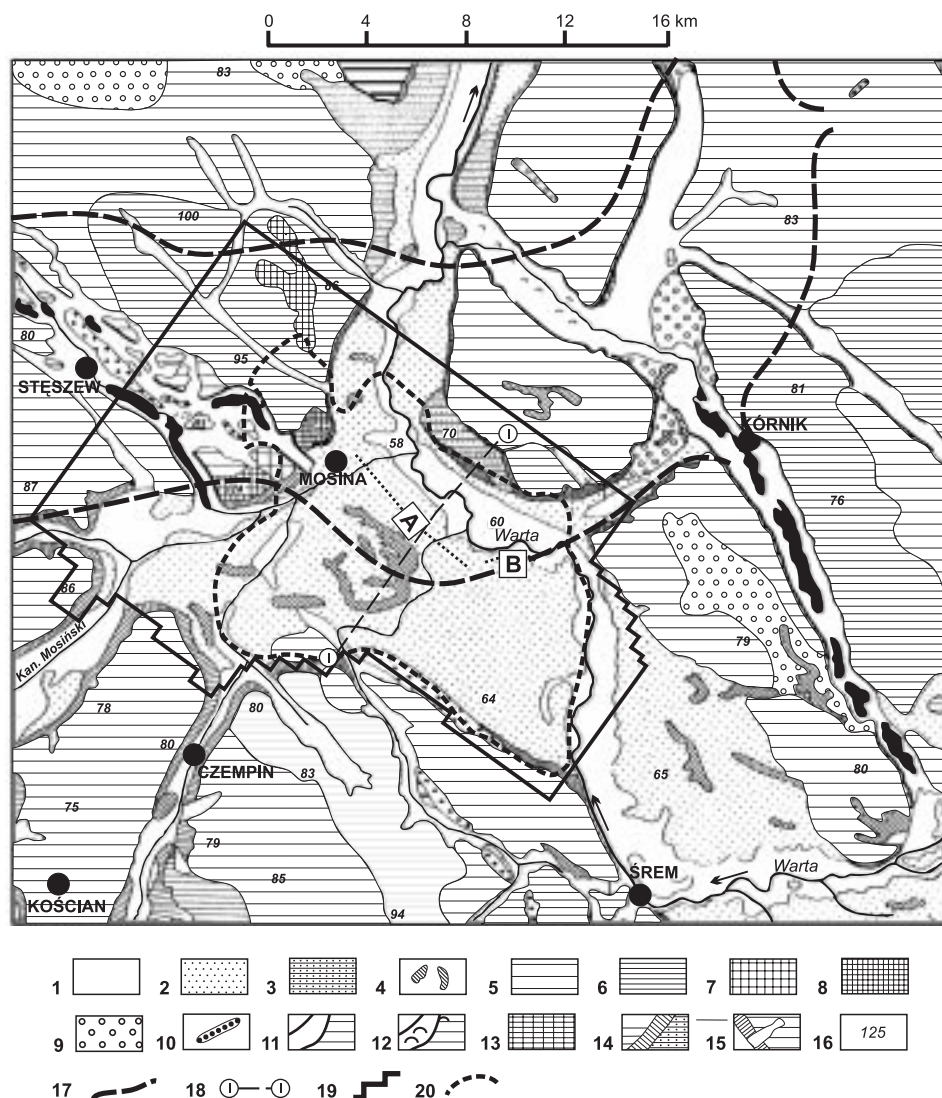
W skład ujęcia mosińskiego wchodzi obecnie dwie bariery studni pionowych:

- bariera na tarasie nadzalewowym (ujęcie tarasowe) o długości 7300 m z 56 studniami w oddaleniu co najmniej kilkuset metrów od koryta rzeki Warty (rys. 8.6-1 i 8.6-2),
- bariera brzegowa (ujęcie brzegowe) o długości 1980 m założona w rejonie wsi Krajkowo w bliskości lewego brzegu rzeki Warty, na jej tarasie zalewowym, z 29 studniami położonymi w odległości 60-70 m od koryta rzeki (rys. 8.6-1 i 8.6-3).

Ponadto przy barierze w Krajkowie funkcjonuje studnia promienista, wybudowana w 273 km biegu Warty, która posiada 8 poziomych drenów ułożonych na głębokości 5 m pod dnem rzeki. Skrajnymi drenami studnia ta obejmuje odcinek rzeki o długości 320 m. W rejestrach produkcji wody z ujęcia mosińskiego przyjęto podział bariery studni na tarasie nadzalewowym (symbol TNZ) na cztery odcinki: A1 – studnie 1F-15, A2 – studnie 16-35, A3 – studnie 36-45 oraz A4 studnie 46-54 oraz bariery brzegowej (symbol TZ) również na cztery odcinki: B1 – studnie 1CL-9L, B2 – studnie 11L-19L, B3 – studnie 21L-29L i B4 – studnie 30L-39L.

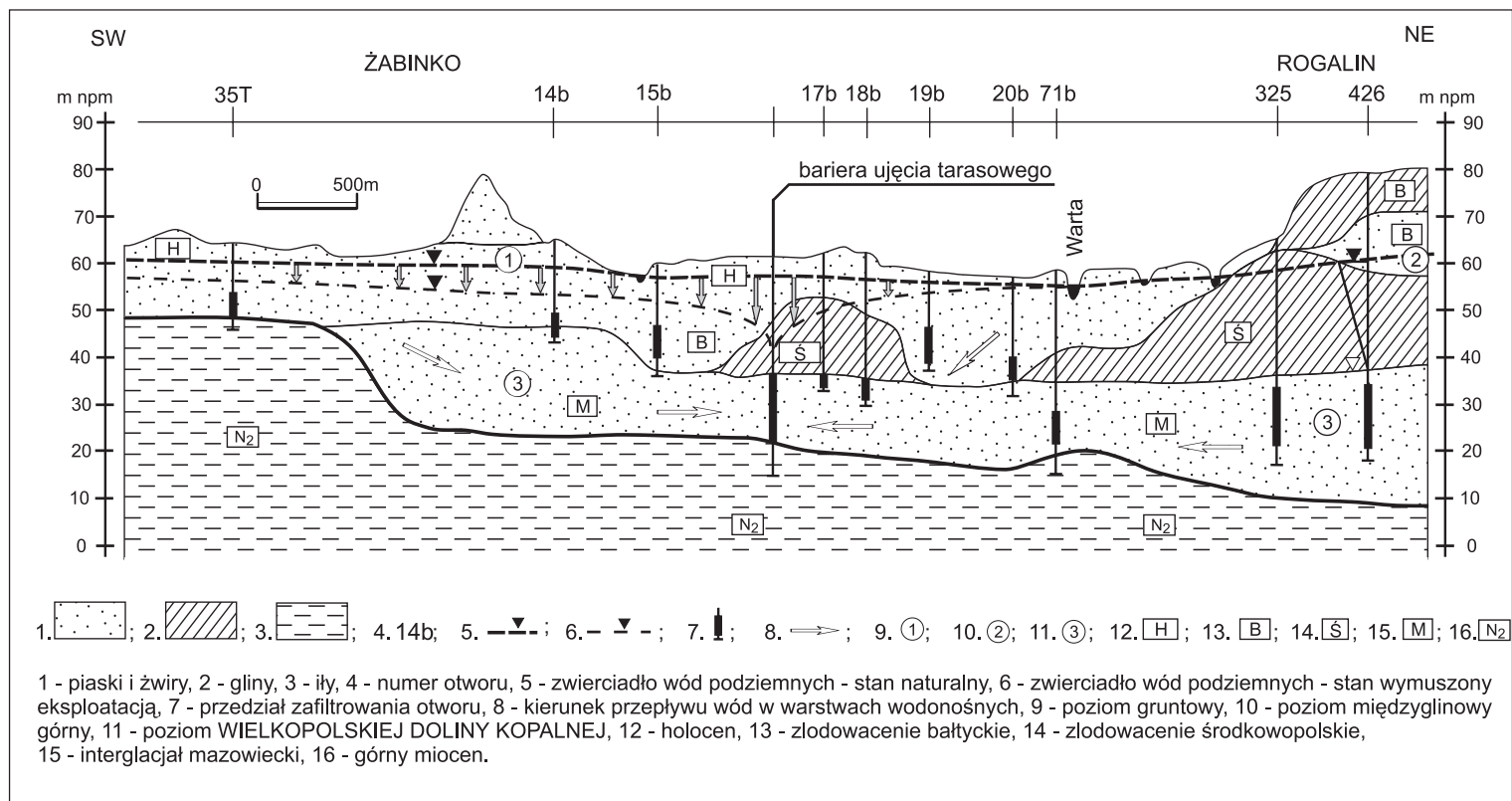
Warunki hydrogeologiczne

W podłożu Pradoliny Warszawsko-Berlińskiej, pasmem o szerokości kilku kilometrów (rys. 8.6-1), przebiega starsza jednostka hydrogeologiczna nazywana wielkopolską doliną kopalną, stanowiąca GZWP nr 144. W strefie nałożenia się ich osadów wodonośnych zaistniały najkorzystniejsze warunki do budowy dużego ujęcia wód podziemnych z możliwościami pozyskiwania dodatkowych zasobów poprzez infiltrację wód powierzchniowych z rzeki Warty. Wzajemne usytuowanie osadów obu struktur hydrogeologicznych: pradolin (pwb) i wielkopolskiej doliny kopalnej (wdk) przedstawiono na przekroju hydrogeologicznym (rys. 8.6-2). Obrazuje on poligenetyczny charakter zbiornika wód podziemnych o łącznej miąższości osadów wodonośnych sięgającej 40 m. W licznych oknach hydrogeologicznych, w których uległy erozji gliny zwałowe z okresu zlodowacenia środkowopolskiego, poziom wód (pwb) łączy się z poziomem wodonośnym wód wgłębnych (wdk). Czwartorzędowe piętro wodonośne podścielają w przewodzie ily serii poznańskiej (trzeciorzęd).



Rys. 8.6-1. Szkic geomorfologiczny okolic Mosiny z sytuacją barier studziennych ujęcia wody Mosina – Krajkowo (A – bariera tarasowa, B – bariera brzegowa).

1 – terasa zalewowa, denną, dna basenów (materiał budujący: piaski, mady piaszczyste, rzadziej gliniaste, namuły próchnicze, torfy), 2 – terasa środkowa – „wydmowa” (piaski dolinne, głębiej żwiry), 3 – terasa wysoka (piaski dolinne, żwiry, sporadyczne gliny, ropy), 4 – pagórki wydymowe (piaski wydymowe), 5 – wysoczyzna morenowa płaska zlodowacenia bałtyckiego (deniwel. 3-5 m), przeważnie gliny zwałowe, 6 – wysoczyzna morenowa falista (deniwelacje 3-10 m piaski zwałowe, gliny zwałowe), 7 – wysoczyzna morenowa pagórkowata pochodzenia akumulacyjnego (deniwel. 5-20 m), gliny, piaski, żwiry, 8 – strefa pagórków moreny czołowej o drobnym rytmie (deniwel. 5-30 m, piaski, żwiry), 9 – równiny sandrowe (piaski, żwiry), 10 – wały ozowe (żwiry, torfy), 11 – rynna o dnie płaskim (zbocza: gliny, piaski, żwiry; dno: piaski, namuły próchnicze, torfy), 12 – rynna o dnie pagórkowatym (jak wyżej), 13 – wały morenowe typu ostańcowego (gliny, piaski, żwiry), 14 – stopnie tarasowe, krawędzie, załomy, zbocza dolinne (gliny, żwiry, piaski, utwory pokrywowe), 15 – drobne doliny i parowy rozcinające wysoczyznę (gliny, żwiry, piaski, utwory pokrywowe), 16 – punkty wysokościowe, 17 – granica Wielkopolskiej Doliny Kopalnej, 18 – linia przekroju hydrogeologicznego, 19 – granica modelu matematycznego z 1994 r., 20 – linia zasięgu wpływu ujęcia



Rys. 8.6-2. Przekrój hydrogeologiczny – Basen Mosiński (wg J.Przybyłka).

Historia badań

Ujęcie tarasowe (TNZ). W latach 1964-1966 Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne w Poznaniu wykonało 20 pierwszych otworów rozpoznawczych w rozstawie około 100 m na odcinku A1 ujęcia na tarasie zalewowym przy Mosinie, których wstępny rozruch eksploatacyjny systemem lewarowym przeprowadzono od sierpnia do listopada 1967 roku osiągając wydajność globalną w granicach 46,5-49,5 tys. m³/dobę z bariery o długości 2 km w warunkach filtracji nieustalonej. Od lutego 1968 roku rozpoczęto ciągłą eksploatację ujęcia lewarowego jako inwestycji I etapu budowy wodociągu mosińskiego dla m. Poznania. Po dłuższym okresie eksploatacji i ustaleniu się warunków dopływu wydajność tego odcinka spadła do 21 tys. m³/d bez możliwości zwiększenia depresji w związku z zastosowanym lewarowym systemem eksploatacji ($s_{rej}=3,5m$). Równocześnie podjęto II etap inwestycji, w którym począwszy od 1968 roku wykonywano w kolejnych latach do 1974 roku łącznie dalsze studnie wiercone na odcinkach bariery A2, A3, A4 pomiędzy wsiami Sowiniec i Krajkowo, które w miarę pogłębiającego się deficytu wody w aglomeracji Poznania były włączane do eksploatacji. Studnie ujęcia tarasowego wykonane w ramach II etapu budowy ujęcia mosińskiego były od początku eksploatowane za pomocą pomp głębinowych w przeciwieństwie do odcinka I etapu (A1), który aż do 1989 roku był eksploatowany systemem lewarowym.

Ujęcie brzegowe (TZ). W badaniach hydrogeologicznych prowadzonych w latach 70. w związku z planami rozbudowy ujęcia mosińskiego stwierdzono bardzo korzystne warunki do budowy ujęcia infiltracyjnego wzdłuż lewego brzegu Warty w rejonie wsi Krajkowo-Radzewice, gdzie istnieje rozległe okno hydrogeologiczne powodujące, że miąższość utworów wodonośnych sięga 36 m. Budowę ujęcia brzegowego w Krajkowie zrealizowano w latach 1978-1982. Pierwsze studnie podłączono do eksploatacji w sierpniu 1982 roku, a całą barierę o długości 1,8 km od stycznia 1984 roku – razem 24 studni od 1L do 39L w rozstawie 90 m, z możliwością ich zagęszczenia do rozstawu 45 m. W lipcu 1992 roku wykonano dodatkowe studnie 1AL, 1Bl i 1Cl, przedłużając barierę brzegową w stronę wsi Baranowo. Bariera w ostatecznym rozwinięciu ma długość 1980 m (rys. 8.6-3). Ujęcie brzegowe znajduje się na sztucznej wyspie, która powstała po wybudowaniu kanału przepływowo-ochronnego od strony wsi Krajkowo. Obszar tej wyspy stanowi teren ochrony bezpośredniej ujęcia.

Wydajności ujęcia tarasowego i brzegowego w okresie trwania długotrwałej suszy 1990-1992 i dla lat normalnych 2000-2002 zestawiono w tabelach 8.6-1, 8.6-2. Mapę hydroizohips dla stanu dynamicznego okresu suszy (1992 r.) przedstawiono na rysunku 8.6-3. Układ hydroizohips wyraźnie ilustruje współdziałanie obu barier studni oraz przechodzenie leja depresji na prawobrzeżny taras Warty.

Na rysunku 8.6-4 przedstawiono wykres średniej dobowej wydajności całego ujęcia mosińskiego za okres 35 lat (1968-2002). Wykres obrazuje etapy rozwoju ujęcia wyrażone przyrostem jego wydajności w kolejnych latach aż do okresu wielkiej suszy lat 1990-1992. Do 1971 roku wydajność ujęcia (I etap budowy

Tabela 8.6-1. Zestawienie wydajności ujęcia tarasowego (TNZ) w okresie lat suszy (1990-1992) oraz w latach normalnych (2000-2002) .

Grupa studni (odcinek)	Numer studni	Wydajność [m ³ /d]			Długość odcinka [m]
		1990-1992 (susza)	2000/01*	2001/02*	
TNZ - A1	1E - 15	20 907	18 538	22 699	2 100
TNZ - A2	16 - 35	20 845	1 927	464	2 750
TNZ - A3	36 - 45	17 044	1 299	795	1 300
TNZ - A4	46 - 54	24 998	3 049	2 315	1 000
Razem:	1E - 54	83 794	24 813	26 272	7 150

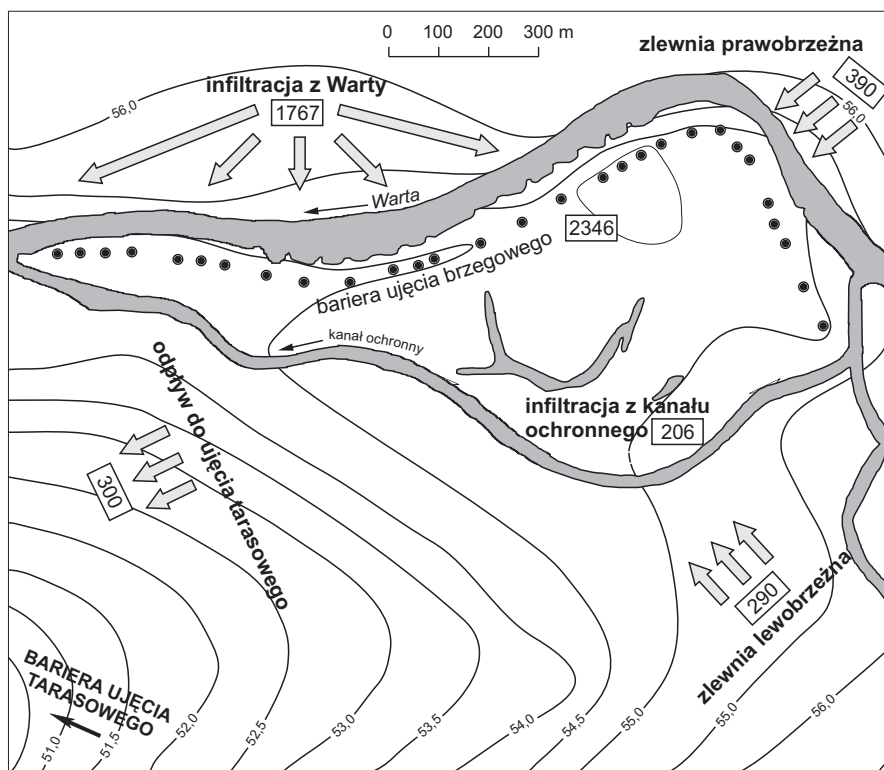
* radykalne zmniejszenie się wydobywania wody z tej bariery nastąpiło w związku ze spadkiem zapotrzebowania na wodę oraz na skutek pogorszenia jej jakości w wyniku zatopienia strefy aeracji w likwidowanym po suszy rozległym i głębokim leju depresji, co wyjaśnione jest w dalszej części opisu.

Tabela 8.6-2. Zestawienie wydajności ujęcia brzegowego (TZ) i studni promienistej (SP) w okresie suszy (1990-1992) oraz w latach normalnych (2000-2002).

Grupa studni (odcinek)	Numer studni	Wydajność [m ³ /d]			Długość odcinka [m]
		1990-1992 (susza)	2000/01	2001/02*	
TZ - B1	1CI - 9L	11 975	14 524	11 411	600
TZ - B2	11L - 19L	11 204	10 970	7 614	460
TZ - B3	21L - 29L	13 001	10 167	7 700	420
TZ - B4	30L - 39L	16 350	12 579	10 865	500
Razem	1CI - 39L	52 530	48 241	37 589	1 980
Studnia prom.	SP	13 872	18 487	11 584	350

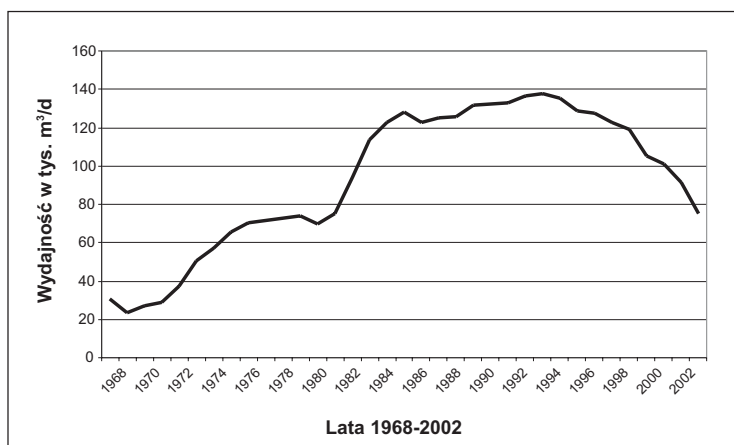
* zmniejszenie się poboru wody z ujęcia brzegowego spowodowane spadkiem zapotrzebowania na wodę w Poznaniu.

– odcinek A1) oscylowała w granicach 23-28 tys. m³/d, by w następnych latach, w miarę przyrostu ilości studni bariery tarasowej, osiągnąć pod koniec lat siedemdziesiątych wielkość 72-74 tys. m³/d. Lata 1982-1984 to okres włączania do eksploatacji kolejnych studni ujęcia brzegowego w Krajkowie, skutkujące wzrostem wydajności całkowitej do wielkości 123 tys. m³/d w 1984 roku. Lata 1984-1988 charakteryzują się wyrównaną eksploatacją na poziomie 123-128 tys. m³/d. Zapoczątkowana w roku 1089 kilkuletnia susza wywołała wzrost zapotrzebowania na wodę, w związku z czym pobór z ujęcia osiągnął maksymalne wielkości, dochodząc prawie do 140 tys. m³/d. W ostatnich latach, począwszy od 1995 roku można zaobserwować spadek wydajności ujęcia w związku ze zmniejszeniem się zapotrzebowania na wodę oraz pogorszeniem jej jakości w barierze na tarasie nadzalewowym. W 2003 roku średnia wydajność ujęcia wyniosła niespełna 80 tys. m³/d.



Uwaga: wszystkie wartości podano w m^3/h

Rys. 8.6-3. Mapa hydroizohips w rejonie ujęcia brzegowego „Wyspa Kąkowska” wg stanu na dzień 21.12.1992.



Rys. 8.6-4. Średnia dobową wydajność ujęcia mosińskiego dla m. Poznania w latach 1968-2002.

Na podstawie kompleksowych obliczeń hydrogeologicznych i wstępnej eksploatacji ujęcia z lat 1969-1975, zatwierdzona została dokumentacja hydrogeologiczna zawierająca ustalenie zasobów eksploatacyjnych wód podziemnych ujęcia mosińskiego według stanu na grudzień 1975 roku. Zasoby obliczone zostały z wykorzystaniem badań modelowych przeprowadzonych na modelu analogowym. Dla obszaru zasobowego o powierzchni 90 km², określono zasoby w ilości 178 tys. m³/dobę (tab. 8.6-3) przy depresji rejonowej 2-9 m, w tym:

- bariera studni na tarasie nadzalewowym (ujęcie tarasowe) na długości 7,3 km
 - zasoby 88 tys. m³/dobę przy depresji 3,5-9 m;
- bariera studni na tarasie zalewowym (ujęcie brzegowe) na długości 3,6 km
 - zasoby 90 tys. m³/dobę z depresją rejonową 2 m.

Po 17 latach od ustalenia zasobów eksploatacyjnych opracowano w 1994 roku „Dokumentację hydrogeologiczną w zakresie bilansu wód podziemnych piętra czwartorzędowego i podstaw gospodarki wodnej w zasobowej strefie ujęcia mosińskiego dla miasta Poznania”, w której przedstawiono kompleksową analizę 25-letniej eksploatacji ujęcia (lata 1968-1994) ze szczególnym uwzględnieniem okresu suszy hydrologicznej w latach 1989-1992. Stan eksploatacji ujęcia w 1992 roku był analizowany na modelu numerycznym, bowiem pobór wody wysokości blisko 140 tys. m³/dobę w okresie trwającej suszy w latach 1989-1992 spowodował przekroczenie ustalonych depresji rejonowych na niektórych odcinkach barier studziennych. Przy braku znaczącej odnawialności zasobów w tym okresie, przyrost depresji rejonowej ponad dopuszczalną spowodował ekspansję leja depresji m.in. na prawobrzeżny obszar doliny Warty gdzie w rejonie Rogalina znajduje się rezerwat „Dęby Rogalińskie” (rys. 8.6-1). W dokumentacji, ocenionej pozytywnie przez Komisję Dokumentacji Hydrogeologicznej, nie wnioskowano o zmianę decyzji zasobowej z 1977 roku, natomiast przedstawiono możliwości zagospodarowania zasobów w dotychczasowym zakresie rozbudowy ujęcia przy wskazaniu konieczności ich sztucznego zasilania w związku z objawami stwierdzonymi w okresie trwania suszy regionalnej.

Tabela 8.6-3. Bilans składników zasilania ujęcia mosińskiego wg badań modelowych z 1975 r. (dane w m³/dobę).

Typ ujęcia	Składniki zasilania zasobów eksploatacyjnych ujęcia mosińskiego w m ³ /dobę			Zasoby eksploatacyjne
	Zasoby odnawialne, stałe	Infiltracja z rzek	Zasoby uzupełniające	
Tarasowe (7,3 km)	31 920	41 040	15 120	88 080
Brzegowe (3,6 km)	13 680	71 040	5280	90 000
Ogółem ujęcie:	45 600	112 080	20400	178 080
Udział w %	26,81	62,94	11,45	100,00

Obliczenia zasobów eksploatacyjnych ujęcia wraz z szacowaniem składników jego zasilania

Na etapie dokumentowania zasobów eksploatacyjnych ujęcia mosińskiego wydzielono z obszaru pradolinowego, przedstawionego na rysunku 8.6-1, podsystem wodonośny w obrębie którego zamykać się powinno bilansowanie zasobów wód podziemnych i rozwój leja depresji. Przyjęto, że granicami I rodzaju tego podsystemu są cieki ograniczające jego obszar z uwagi na szerokość swoich koryt (Warta, Kanał Mosiński w części ujściowej) lub ze względu na odległość od ujęcia (Kanał Mosiński powyżej Mosiny, rzeczka Olszynka). Granicą naturalną zasięgu pradolinowego zbiornika wód podziemnych jest krawędź wysoczyzny morenowej od strony Równiny Kościańskiej (od SW). Ciekami wewnętrznymi wydzielonego podsystemu są: Strumień Sowiniecki i Kanał Szymanowo-Grzybno. Tak zarysowany obszar miał powierzchnię 90 km². Mosiński zbiornik wód podziemnych był przedmiotem kilkunastu badań modelowych, wykonywanych w różnych okresach przez różne jednostki zarówno w celach naukowych jak i ściśle praktycznych: dokumentacyjnych i projektowych. W niniejszym opisie przywołuje się wyniki badań na modelach matematycznych, wykonanych w ośrodku poznańskim, które posłużyły do ustalenia jego zasobów eksploatacyjnych oraz weryfikacji warunków jego eksploatacji:

- Model analogowy podsystemu wodonośnego ujęć Mosina-Krajkowo, wykonany w 1975 roku na potrzeby oszacowania zasobów wód podziemnych, został sporządzony na analizatorze AP-600 przy użyciu kwadratowej siatki dyskretyzacyjnej 400 x 400 m w granicach wzmiankowanego podsystemu wodonośnego.
- Model pomocniczy na przekroju hydrogeologicznym dla obliczeń infiltracji wody z rzeki Warty do ujęcia brzegowego Krajkowo został wykonany w dwóch wersjach: analogowej – na AP-600 w roku 1975 z zastosowaniem siatki prostokątnej 5 x 8 m, oraz numerycznej, wg programu SP-600 – biblioteka HYDRYLIB w roku 1979 z zastosowaniem siatki kwadratowej 4 x 4 m.
- Model numeryczny lokalny ujęcia brzegowego w Krajkowie wykonany dla analizy stanu jego eksploatacji w czerwcu 1991 roku w okresie trwania suszy hydrologiczno-meteorologicznej (najniższe stany i przepływy Warty w XX wieku) wykonany według programu SWW2 ze zmienną siatką dyskretyzacyjną od 10 x 10 m do 30 x 40 m.
- Model numeryczny weryfikacji hydrogeologicznej bilansu wód podziemnych i eksploatacji ujęcia mosińskiego, związanej ze skutkami suszy hydrologiczno-meteorologicznej lat 1990-1992 wykonany został przy użyciu programu SWW2 z biblioteki HYDRYLIB w granicach podanych na rysunku 8.6-1. Powierzchnia modelu wyniosła 347 km², a więc została znacznie zwiększona w stosunku do modelu z 1975 roku.

Bilans wody w leju depresji po ustaleniu głównych strumieni dopływu wód do ujęcia w dolinie rzecznej, co ma miejsce po upływie kilku lat od rozpoczęcia eksploatacji, ma następującą postać:

$$Q_e = Q_{ds} + Q_i + Q_{dz} \quad (L^3/T)$$

gdzie:

Q_e – zasoby czerpane z ujęcia,

Q_{ds} – stały dopływ z zasobów dynamicznych,

Q_i – dopływ z infiltracji wód rzecznych do warstwy wodonośnej w obszarze leja depresji,

Q_{dz} – zmienny dopływ z infiltracji opadów atmosferycznych i dodatkowa podziemna retencja wód powierzchniowych w obrębie leja depresyjnego w okresach roztopowych i po wezbraniach rzek.

Na podkreślenie zasługuje zwiększona zdolność retencyjna strefy leja depresji. Manifestowanie się udziału dopływu zmiennego w zasilaniu ujęcia przy jego stałej wydajności przejawia się „pulsacją leja depresyjnego”, to znaczy okresowym jego spływaniem się i zmniejszaniem zasięgu w warunkach dodatkowego zasilania.

Zasoby dynamiczne stałe (Q_{ds}). Dla przypadku lokalizacji barier studziennych na lewobrzeżnych tarasach Warty, jak to ma miejsce w rejonie basenu mosińskiego, można liczyć na stały dopływ wody z zasobów dynamicznych, równoważny co do wielkości obustronnemu drenażowi wód podziemnych przez Wartę między Radzewicami i Rogalinkiem oraz przez Kanał Mosiński i Kanał Szymanowo-Grzybno w obrębie wydzielonego podsystemu wodonośnego (rys. 8.6-1).

Według szacunku wykonanego dla stanów średnich niskich na modelu numerycznym z przyjęciem warunków III rodzaju na ciekach, wielkość zasobów dynamicznych wynosi na tym obszarze: 54 681 m³/d, w tym:

drenaż Warty	43 743 m ³ /d	(80%)
drenaż Kanału Mosińskiego	5 948 m ³ /d	(11%)
drenaż Kanału Szymanowo-Grzybno	4 990 m ³ /d	(9%)

Jako godny odnotowania wskaźnik porównawczy określono stały jednostkowy obustronny drenaż Warty na odcinku 1 m biegu koryta rzeki na badanym odcinku w wielkości $q_{ds} = 4,37$ m³/d. W podanych wielkościach mieści się zasilanie stałe całego piętra czwartorzędowego objętego drenażem przez rzeki.

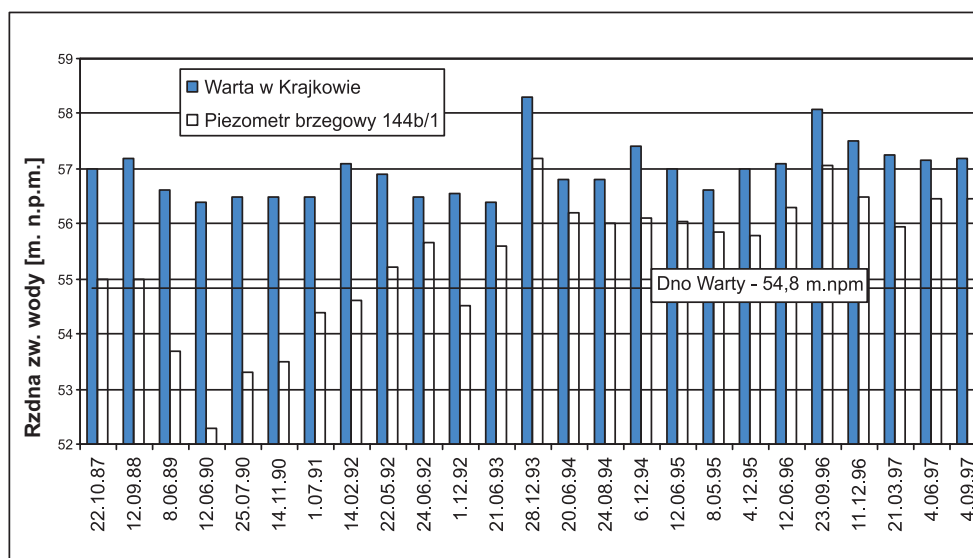
Infiltracja wód warciańskich. Podana powyżej wielkość stałych zasobów dynamicznych stanowi górną granicę odzysku przez ujęcie wód pochodzących ze zlewni podziemnej. Wyższe wartości poboru wody musiały się wiązać z dopływem wód z infiltracji brzegowej. Przy dokumentowaniu zasobów eksploatacyjnych w dolinach rzecznych rodzi się zawsze konkretne pytanie: ile wody może infiltrować z rzeki do warstwy wodonośnej? Zagadnienie to rozpatrywano w roku 1975 na modelu analogowym zbudowanym na AP-600 oraz powtórzono w roku 1979 na modelu numerycznym. Badania wykonano dla przekroju hydrogeologicznego, poprowadzonego prostopadle do koryta rze-

ki Warty, w miejscu lokalizacji specjalnego hydrowęzła – poligonu badawczego, wykonanego w trakcie badań prowadzonych przy projektowaniu ujęcia brzegowego. Badania hydrogeologiczne przeprowadzone na tym poligonie zostały opisane w publikacji metodycznej (Macioszczyk, Szestakow, 1983) jako przykład (tamże: zadanie 5.4: „Pompowanie studni w pobliżu rzeki”). Z obu rozwiązań modelowych otrzymano zbliżone wyniki. Dla depresji rejonowej $s_{rej}=1,0$ m w linii ujęcia, odległego o 60 m od brzegu rzeki, uzyskano wielkości:

model analogowy $q_i = 0,910 \text{ m}^3/\text{h} = 21,84 \text{ m}^3/\text{d}$

model numeryczny $q_i = 0,840 \text{ m}^3/\text{h} = 20,16 \text{ m}^3/\text{d}$

W trakcie eksploatacji ujęcia brzegowego w okresie długotrwałej suszy okazało się, że bardzo niskie stany Warty i postępująca kolmatacja osadów rzecznych w procesie infiltracji spowodowały, że zbliżone do podanych wartości infiltracji jednostkowej z 1m koryta były możliwe dopiero przy depresji rejonowej od dwu- do trzykrotnie większej w związku z okresowym obniżeniem się zwierciadła dynamicznego poniżej dna rzeki (patrz: wykresy stanów Warty i wód podziemnych w jej brzegu na rysunku 8.6-5), co skutkowało rozwojem leja depresji na obszarze prawobrzeżnym – pod korytem Warty i infiltracją wymuszoną wzdłuż obu brzegów, a w końcu koniecznością mechaniczno-hydraulicznej dekolmatacji osadów w korycie rzeki dla ich spulchnienia.



Rys. 8.6-5. Obserwacje stacjonarne stanów wody rzecznej (Warta) i podziemnej (piezometr 144b/1) wskazujące na utratę więzi hydraulicznej przy wzmożonej kolmatacji koryta rzeki Warty wzdłuż bariery pionowych studni wierconych ujęcia w Krajkowie podczas suszy w latach 1989-1992.

Skutki regionalnej suszy hydrologiczno-meteorologicznej na stan zasobów i warunki eksploatacji ujęcia mosińskiego

W latach suszy regionalnej 1989-1993, przy wzmożonej eksploatacji wód podziemnych (blisko 140 tys.m³/d, tj. 90% zasobów eksploatacyjnych) na ujęciu Mosina-Krajkowo, zasięg ekspansji leja depresji najpierw objął całą przestrzeń obszaru zasobowego ujęcia (90 km²), przekraczając następnie przyjęte w prognozie zasobowej (1975 r.) granice hydrauliczne ($H=\text{const}$) wyznaczone korytami Warty i Kanału Mosińskiego. Lej depresyjny wkroczył zatem na tereny prawobrzeżnej doliny Warty w stronę Rogalina (rys. 8.6-1 i 8.6-2) oraz na tereny Wielkopolskiego Parku Narodowego na północ od Mosiny, obejmując w ostateczności obszar o powierzchni 130 km². W części centralnej lej uległ znacznemu pogłębieniu, powodując depresję rejonową na ujęciu tarasowym (TNZ) miejscami do 14 m, a więc o 5 metrów większą od przyjętej w decyzji zasobowej (9 m). W km 272-274 biegu Warty, na wysokości bariery brzegowej (TZ) w Krajkowie, depresja zwierciadła wody podziemnej przekroczyła wysokość słupa wody w rzece i osuszeniu zaczęły ulegać starorzecza licznie występujące na tarasie prawobrzeżnym. Rozwój leja depresji wywołany suszą i nadmiernym w tych warunkach poborem został powstrzymany dopiero długotrwałym stanem powodziowym, który miał miejsce zimą i wiosną 1994 roku. Stan długotrwałego wezbrania Warty odbudował zasoby statyczne w obrębie leja depresji, doprowadzając do jego znacznego spłylenia wskutek zmagazynowania zasobów uzupełniających (zasoby statyczne zmienne). Budowa modeli matematycznych dla zaobserwowanych skrajnych stanów wód rejonu ujęcia mosińskiego (stan niski – grudzień 1992; stan wysoki – kwiecień 1994) umożliwiła obliczenie wielkości zmagazynowania wód w obrębie wytworzonego leja depresyjnego i na obszarze spływu wody podziemnej do ujęcia. Zwierciadło wód w kwietniu 1994 roku podniosło się względem stanów z grudnia 1992 roku od 0,5 m na peryferiach leja do 6,8 m w rejonie studni ujęcia tarasowego. Na podstawie sporządzonej mapy różnicowej stanów i znanej wielkości współczynnika odsączalności obliczono wielkość zmagazynowania wód w obszarze zasilania o powierzchni 129 km² na blisko 41 mln m³, to jest w objętości stanowiącej 1/4 pojemności użytkowej zbiornika retencyjnego Jeziorsko na Warcie. Zmagazynowana woda pochodziła zarówno z przechwycenia odpływu powierzchniowego i podpowierzchniowego z lokalnej zlewni hydrograficznej oraz ze wzmożonej infiltracji wód powierzchniowych z Warty, Kanału Mosińskiego, Kanału Szymanowo-Grzybno w okresie ich wysokich stanów, a w szczególności w zimowo-wiosennym okresie powodziowym w 1994 roku, kiedy to długotrwale utrzymywała się woda powierzchniowa na znacznych połaciach tarasu zalewowego po obu brzegach Warty, pozostająca w zasięgu leja depresji ujęcia mosińskiego. W wyniku tego procesu lej depresji w otoczeniu bariery studzien uległ spłyleniu o 2 do 7 metrów oraz zmniejszył się jego zasięg. Nastąpił zanik leja de-

presji na tarasie prawobrzeżnym oraz została odbudowana pełna więź hydrauliczna warstwy wodonośnej z korytem Warty (rys. 8.6-5). Dalsza odbudowa zasobów statycznych miała miejsce po powodzi lipcowo-sierpniowej 1997 roku, kiedy to w wyniku dodatkowego zasilania, jak również przy zmniejszonym poborze wody z ujęcia, jeszcze bardziej wypełnił się lej depresyjny wokół bariery tarasowej.

Warunki eksploatacji ujęcia mosińskiego panujące w ostatnich latach, a więc 2000-2002, są przeciwstawne do sytuacji sprzed 10 lat zarówno w zakresie zasięgu i głębokości leja depresji (rys. 8.6-1, 8.6-2, 8.6-3) jak i poboru wody (dane porównawcze w tabelach 8.6-1 i 8.6-2). Stan aktualny charakteryzuje się zanikiem głębszego leja depresji wokół studni ujęcia tarasowego za wyjątkiem odcinka dawnego ujęcia lewarowego (TNZ odcinek A1, studnie 1E do 15). Na podstawie pomiarów zwierciadła wody podziemnej z października 2002 roku stwierdzono, że na odcinku bariery tarasowej poza dawnym lewarem pojawił się w obrazie hydroizohips lokalny wododział wód podziemnych świadczący o zaniku infiltracji rzeki Warty na tym obszarze – obecnie ma tu miejsce obustronny drenaż wód podziemnych do Warty. Również w rejonie Krajkowa nastąpiła zmiana obrazu hydroizohips. Zaniknął lej depresji wokół odcinka A4 (studnie od nr 46 do nr 54) ujęcia tarasowego (TNZ), gdzie w okresie suszy występowała nadmierna depresja rejonowa ($s_{rej}=14$ m) i miało miejsce znaczne wzajemne oddziaływanie obu barier (rys. 8.6-3).

Czynniki kształtujące czasową i przestrzenną zmienność jakości wód ujęcia Mosina-Krajkowo

Opisane przemiany hydrodynamiczne oraz związane z nimi proporcje udziału składników zasilania, a także procesy hydrogeochemiczne nimi spowodowane są przyczynami dużej przestrzennej i czasowej zmienności jakości wód pozyskiwanych z ujęcia Mosina-Krajkowo w jego dotychczasowej, blisko 35-letniej eksploatacji.

Wody pozyskiwane z poszczególnych części ujęcia, tj. bariery tarasowej, bariery brzegowej, studni promienistej, wykazują odrębne cechy jakościowe i dynamikę zmian czasowych. Wpływ na to ma przede wszystkim zróżnicowany udział wód powierzchniowych w zasilaniu oraz zakres i charakter przekształceń jakości wód rzecznych w środowisku gruntowym, a także zmienność jakości wód gruntowych dopływających do poszczególnych części ujęcia.

Czynniki, które mają największy wpływ na zróżnicowanie jakości wód bariery tarasowej są:

- 1) udział wód Warty i wód gruntowych w zasilaniu poszczególnych studni wynikający z układu okien hydrogeologicznych pomiędzy Wielkopolską Doliną Kopalną i poziomem gruntowym (pradolinnym), warunków infiltracji wód z Warty wynikających z układu koryta rzeki, odległości od rzeki, odległości studni od krawędzi tarasu zalewowego,

- 2) wpływ na określone fragmenty ujęcia wód infiltrujących z Kanału Szymanowo-Grzybno i Kanału Mosińskiego,
- 3) zmienność jakości wód gruntowych uwarunkowana czynnikami naturalnymi i antropogenicznymi,
- 4) wpływ zmiennego środowiska hydrogeochemicznego na zakres i charakter przekształceń wód infiltrujących z Warty,
- 5) zmienność środowiska gruntowego z punktu widzenia jego podatności na przemiany hydrogeochemiczne związane z utlenianiem siarczków i substancji organicznych, a także procesy denitryfikacji azotanów,
- 6) reżim eksploatacji ujęcia (wydajności i depresja),
- 7) konstrukcja studni, a w szczególności położenia filtrów poszczególnych studni w przestrzeni warstwy wodonośnej.

W przypadku bariery brzegowej jakość ujmowanych wód kształtuje się głównie pod wpływem wód Warty. Obserwuje się tu jednak również dość znaczne, choć wyraźnie mniejsze niż w barierze tarasowej, zróżnicowanie chemizmu wód z poszczególnych studni. Zróżnicowanie to jest spowodowane:

- zmiennością warunków infiltracji na poszczególnych odcinkach rzeki,
- zmianami przepuszczalności utworów występujących pomiędzy rzeką a barierą studni,
- niejednorodną konstrukcją studni,
- zmiennymi reżimami eksploatacji.

Wpływ strumienia wód gruntowych na zróżnicowanie jakości jest tu mniejszy. Środowisko gruntowe wykazuje dość dużą jednorodność, a warunki hydrogeochemiczne są korzystne. Stosunkowo nieznaczne są również oddziaływania antropogeniczne. Niekorzystny wpływ strumienia wód gruntowych ujawnił się jednak w warunkach skrajnej suszy hydrologicznej po rozwinięciu się leja depresji po prawej stronie Warty.

Na zmienność czasową, ale i przestrzenną jakości wód pozyskiwanych z różnych fragmentów ujęcia mają również duży wpływ cykliczne zjawiska sezonowe i hydrologiczno-meteorologiczne oraz długookresowe trendy zmian zaznaczające się głównie w zakresie: jakości wód rzecznych, oddziaływania ognisk zanieczyszczeń, przekształceń środowiska hydrogeochemicznego.

Zmiany jakości wód w trakcie eksploatacji ujęcia

Jakość wód podziemnych bariery tarasowej stwierdzona w trakcie próbnych pompowań poszczególnych studni była stosunkowo korzystna, choć lokalnie występowały wody o podwyższonej barwie i utlenialności. W pierwszych latach zaobserwowano pogorszenie jakości wód w zakresie większości parametrów, a w szczególności jonów żelaza, manganu, azotu amonowego i siarczanów, i chlorków.

Zmiany te związane były z:

- efektem rozwoju infiltracji wód powierzchniowych,

- uruchomieniem dopływu do poziomu Wielkopolskiej Doliny Kopalnej wód występujących w górnych partiach poziomu pradolinne, w tym w szczególności w rejonie tarasu zalewowego,
- rozwojem przemian hydrogeochemicznych związanych z utlenianiem siarczków i substancji organicznych.

Główny wpływ na istotne zwiększanie stężeń jonów żelaza, siarczanów i manganu miały przemiany hydrogeochemiczne. Zaznaczyły się one głównie w rejonie tarasu zalewowego Kanału Mosińskiego gdzie w studni 1B stężenie jonów żelaza wzrosło do 43 mg/l a siarczanów do 273 mg/l, a także w rejonie studni 4G gdzie stwierdzono wzrost zawartości siarczanów do 215 mg/l, a żelaza do 6 mg/l. Wzrost zawartości jonów żelaza, manganu i siarczanów zaznaczył się także we wszystkich pozostałych studniach. Wzrost stężeń chlorków i azotu amonowego był natomiast głównie skutkiem dopływu wód rzecznych, a także wód gruntowych z tarasu zalewowego. Zaznaczył się również wpływ ognisk zanieczyszczeń, głównie z rejonu Mosiny.

Jak wykazują dane z odcinka dawnego lewaru (A1) wpływ przemian hydrogeochemicznych był najsilniejszy w latach 1972-1978. Następnie zaznaczył się pewien spadek stężeń żelaza w wyniku wyczerpywania się składników przemian hydrogeochemicznych. Rozwój eksploatacji ujęcia w kierunku Krajkowa spowodował jednak nasilenie się przemian hydrogeochemicznych w rejonach podłączonych stopniowo do eksploatacji nowych studni ujęcia.

Zdjęcie wykonane w roku 1989 wykazało nasilenie przemian hydrogeochemicznych głównie w rejonie doliny Kanału Szymanowo-Grzybno. Badania wykazały również znaczący wpływ rowu ściekowego i infiltracji z Kanału Szymanowo-Grzybno na pogorszenie się jakości wód.

Potężnym impulsem do rozwoju przemian hydrogeochemicznych była susza lat 1989-1992, a na odcinku od studni 1F do 15 również przejście z systemu lewarowego na pompowy. Spowodowało to rozwój przemian hydrogeochemicznych na znacznych obszarach leja depresyjnego ujęcia, przy czym źródłem przemian hydrogeochemicznych były nie tylko naturalne substancje organiczne, ale również wprowadzone do środowiska gruntowego z wodami infiltracyjnymi oraz z ognisk zanieczyszczeń. Efekty przemian hydrogeochemicznych wywołanych suszą widoczne są do chwili obecnej. Do ujęcia spływają ciągle wody z rozległego obszaru tych przemian. Należy dodać, że zmiana systemu eksploatacji z lewarowego na pompowy spowodowała również wzrost oddziaływania ognisk zanieczyszczeń, a w szczególności wysypiska odpadów w Mosinie. Zanieczyszczenia z tego wysypiska w warunkach eksploatacji lewarowej były drenowane głównie do Kanału Mosińskiego, a obecnie przemieszczają się w kierunku ujęcia.

W trakcie eksploatacji bariery tarasowej zaobserwować można również pewne trendy długookresowe związane głównie ze zmianą jakości wód Warty. Należy wskazać w szczególności na zmniejszenie się stężeń azotu amonowego począwszy od początku lat 90., a jednocześnie pewien niewielki wzrost azotu azotanowego. Zaznacza się również znacząco wzrost w wodzie siarkowodoru jako

efekt wzbogacania środowiska w materię organiczną wraz z infiltrującymi wodami.

Jakość wód bariery brzegowej kształtuje się głównie pod wpływem wód Warty. Mniejszy wpływ mają tu przemiany hydrogeochemiczne oraz ogniska zanieczyszczeń. Migracja wód Warty w środowisku gruntowym znacząco poprawia ich jakość w zakresie zawiesin, koloidów, bakterii oraz planktonu, a w pewnym stopniu również związków azotu i mikrozanieczyszczeń. Do niektórych studni przedostają się jednak niewielkie ilości bakterii oraz planktonu. Następuje również wzbogacenie wód rzecznych w związki manganu, żelaza oraz wapnia i magnezu. Stężenia jonów manganu są stosunkowo wysokie (rzędu 0,5-0,6 mg/l), nieco wyższe niż na barierze tarasowej. Stężenia jonów żelaza są natomiast znacznie niższe, rzędu 1-2 mg/l. Jedynie po głębokiej suszy lat 1989-1992 notowano okresowo stężenie znacznie wyższe (do 7 mg/l), co było związane z dopływem wód z tarasu zalewowego po prawej stronie rzeki Warty, gdzie rozwinęły się procesy przemian hydrogeochemicznych związane z utlenianiem się siarczków i substancji organicznych. Było to jednak zjawisko okresowe, które ustąpiło po polepszeniu się warunków infiltracji z rzeki w wyniku wysokich stanów powodziowych oraz sztucznych zabiegów dekolmatacyjnych.

Podsumowując można stwierdzić, że jakość wód z poszczególnych studni ujęcia brzegowego jest stosunkowo wyrównana. Z punktu widzenia technologii uzdatniania należy uwzględniać natomiast zmienność czasową, szczególnie przy występowaniu skrajnych zjawisk hydrologiczno-meteorologicznych takich jak: długotrwała susza, powódzie oraz długotrwałe okresy zlodzenia rzeki.

Jakość wód ze studni promienistej jest ściśle zależna od jakości wód Warty i charakteryzuje się występowaniem podwyższonych, często przekraczających normę dla wód do picia, stężeń manganu, substancji organicznych (barwa, utlenialność), bakterii oraz azotu amonowego. Jakość wód jest szczególnie niekorzystna w okresie spływów wód roztopowych, dłuższych okresów zlodzenia rzeki, spływów fali powodziowej. Obserwuje się również pogarszanie jakości w wyniku ruchu rumowiska nad drenami w okresie powodzi oraz długotrwałego zlodzenia. Dotyczy to szczególnie składu bakteriologicznego, barwy i manganu.

Aktualny stan jakości wody surowej czerpanej z ujęcia

Z badań monitoringowych ujęcia (stan na październik 2002) wynika, że główny problem w zakresie jakości wód na ujęciu to występowanie bardzo wysokich stężeń siarczanów i żelaza w studniach bariery tarasowej poza odcinkiem dawnego lewaru. Zjawisko to związane jest z występowaniem ciągle skutków głębokiej suszy lat 1989-1992 kiedy nastąpił rozwój głębokiego leja depresyjnego. Spowodowało to powstanie znacznej strefy aeracji, w której zaczęły rozwijać się procesy utleniania siarczków i substancji organicznych. Zjawisko to zostało zarejestrowane na zdjęciu hydrochemicznym z września 1993 roku. Wody te spły-

wały systematyczne do ujęcia, co rejestrowano przy okazji budowy studni zastępczych.

Pomimo upływu 10 lat wody o wysokiej zawartości siarczanów i żelaza występują w dalszym ciągu w obszarze zasilania, o czym świadczy analiza z otworu 42b/1 na wysokości odcinka A4 ujęcia tarasowego, gdzie stwierdzono zawartość siarczanów w ilości 376,6 mg/l i żelaza w ilości 11,28 mg/l. Zasięg strefy tych wód uległ jednak zmniejszeniu w stosunku do stanu z września 1993 roku.

Pojawienie się szczególnie wysokich stężeń siarczanów i żelaza w studniach w październiku 2002 roku (wyższych niż notowano wcześniej w studniach zastępczych) jest efektem splotu kilku czynników, a przede wszystkim praktycznego wyłączenia poboru z bariery tarasowej poza odcinkiem dawnego lewara (A1). W tej sytuacji nastąpiło znaczące podniesienie zwierciadła wody i wyeliminowanie dopływu wód infiltrujących z Warty oraz przemycie podtopionej strefy aeracji, z której zaczęły wypłukiwać się produkty przemian hydrogeochemicznych. Proces wypłukiwania ma miejsce także na skutek infiltracji wód opadowych, ale zachodzi on z mniejszą intensywnością niż przy zatopieniu fragmentów strefy aeracji.

Dodatkowym czynnikiem sprzyjającym przepłukiwaniu strefy aeracji była sytuacja hydrologiczno-meteorologiczna w 2001 i na początku 2002 roku, kiedy wystąpiły wysokie stany wód gruntowych, które od wiosny do jesieni 2002 systematycznie się obniżały. Sprzyjało to również wypłukiwaniu zanieczyszczeń i produktów przemian hydrogeochemicznych ze strefy aeracji.

W związku z tym stężenie siarczanów wzrosło również wyraźnie w studniach dawnego lewara. Zaznaczył się tu także wzrost chlorków w związku ze wzmożoną eksploatacją z tego odcinka bariery tarasowej. Wyrażna strefa zanieczyszczenia (podwyższone stężenia chlorków i manganu) utrzymuje się również w strefie infiltracji wód z Kanału Szymanowo-Grzybno.

Jakość wód z bariery brzegowej w dominującym stopniu kształtuje się pod wpływem wód rzeki Warty. W związku z tym ujmowane tu wody charakteryzują się znacznie lepszymi parametrami w zakresie siarczanów i żelaza w porównaniu do bariery tarasowej. Nie obserwuje się również dużego zróżnicowania jakości wód z poszczególnych studni.

Podsumowanie

W zasobowej prognozie modelowej z 1975 roku przyjęto tok obliczeń zakładających, że eksploatacja ujęcia przebiegać będzie w stanach najdłużej utrzymujących się, tj. w warunkach stanów średnich niskich wód podziemnych i powierzchniowych. Pojawienie się czteroletniego okresu regionalnej suszy hydrologicznej w Wielkopolsce (największej w XX wieku) w latach 1989-1992 wywołało ekstremalnie niskie stany wód powierzchniowych i podziemnych i prawie całkowity brak zasilania tych ostatnich z infiltracji opadów atmosferycznych, co było trudne do przewidzenia i przyjęcia na etapie wykonywanej prognozy.

W tych warunkach mniejsze rzeki tracą swoje zdolności infiltracyjne na skutek kolmatacji rumowiska.

Bariera studni na terenie nadzalewowym pomiędzy Mosiną i Krajkowem w ostatnim 10-leciu pracowała w bardzo przemiennych warunkach przyrodniczych (susza, lata mokre) i eksploatacyjnych. Pobór w latach suchych 1989-1992 osiągał 84 tys. m³/d, zaś w latach mokrych 2001-2002 zaledwie 25 tys. m³/d. Skutkiem tych przeciwstawnych warunków wielkim wahaniom podlegało dynamiczne zwierciadło wody (depresja rejonowa) w przedziale rzędnych od 45 m n.p.m. do 57 m n.p.m. ($\Delta H=12$ m). Przy tak przebiegającej zmienności hydrodynamicznej nastąpiły zasadnicze zmiany w strumieniach zasilania podziemnego oraz zostały zdecydowanie zachwiane proporcje pomiędzy dopływem wody ze zlewni podziemnej, infiltracją z Warty oraz ilością wód magazynowanych w leju depresyjnym ujęcia w czasie długotrwałych wezbrań rzeki. Ponadto drastyczne zmniejszenie poboru wody w ostatnich latach spotęgowało efekt zatopienia uprzednio bardzo rozwiniętej strefy aeracji na obszarze kilkudziesięciu km², co zwiększyło w znacznym stopniu udział produktów przemian hydrogeochemicznych we wzroście mineralizacji wody podziemnej napływającej do studni przy jednoczesnym zaniku procesu infiltracji wód o niskiej mineralizacji z koryta rzeki Warty.

Przemienność stanów dynamicznego zwierciadła wody podziemnej stała się podstawowym mechanizmem dopływu do ujęcia wody o pogorszonej jakości. Jednocześnie dotychczasowa analiza przebiegu eksploatacji omawianej bariery wskazuje na możliwość powtarzalności opisanych zjawisk w związku z ostatnio spotęgowaną przemiennością długotrwałych suszy z okresami bardzo mokrymi. W tych warunkach kierunkowym rozwiązaniem powinno być dążenie do stabilizacji hydrodynamicznej w rejonie bariery poprzez sztuczne zasilanie górnej warstwy wodonośnej za pomocą basenów infiltracyjnych zlokalizowanych wzdłuż biegu bariery.

8.7. Jakość wody jako podstawowe kryterium weryfikacji zasobów eksploatacyjnych ujęcia w pradolinny zbiorniku wód podziemnych

Rejon badań: Wroniawy – ujęcie komunalne dla miasta.

Problematyka: Weryfikacja (zmniejszenie) zasobów w wyniku obserwowanych niekorzystnych przemian jakości wody. Ujęcie zlokalizowano w Pradolinie Warszawsko-Berlińskiej w strefie występowania wód o dobrej jakości, a wielkość jego zasobów eksploatacyjnych ustalono w oparciu o obliczenia dopływu wód do studni, bazując wyłącznie na wynikach próbnych pompowań pojedynczych studni w barierze. Jednak już pobór wody z wydajnością nie przekraczającą 20% ustalonych zasobów wykazał znaczące pogorszenie jej jakości.

Typ ujęcia: Duże ujęcie w zbiorniku porowym.

Metodyka weryfikacji zasobów: Badania modelowe połączone z poszerzonym rozpoznaniem warunków hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych.

Lokalizacja

Ujęcie we Wroniawach położone jest na terenie Pradoliny Warszawsko-Berlińskiej przy Kanale Północnym Obry (rys. 8.7-1). Stanowi je bariera ośmiu studni wierconych o głębokościach około 30 m ujmujących pradoliną warstwę wodonośną. System wodny Pradoliny jest już od wielu lat skanalizowany. Główne Kanały to: Północny, Środkowy i Południowy. Kanały mają sztuczny przebieg swoich koryt. Jedynie Północny Kanał Obry został w przybliżeniu poprowadzony wzdłuż biegu pierwotnego koryta rzecznej Obry. W hydrografii zachowany został naturalny przebieg cieków Kopanica, który odwadnia obszar Pradoliny w rejonie wsi: Solec i Solec Nowy, położonych pomiędzy Środkowym Kanałem Obry i Południowym Kanałem Obry (rys. 8.7-1). Od północnego wschodu do Północnego Kanału Obry wpływa rzeka Dojca, odwadniająca rynną jeziorną rejonu Wolsztyna i przyległą do niej wysoczyznę. Na omawianym obszarze występuje również bogata sieć małych cieków bez nazw oraz rowów melioracyjnych, okresowo suchych. Obra należy do rzek o reżimie nizinnym, a jej średni spadek hydrauliczny wynosi przy Wroniawach 0,023 ‰.

Historia badań

Eksploatację ujęcia rozpoczęto w 1973 roku. Początkowo pracowały tylko studnie nr 3 i 4. W 1977 roku włączono do eksploatacji studnię nr 5. Studnie nr 1 i 2 są eksploatowane od 1979/80 a studnia nr 6 od 1988 roku. W 1982 roku, po uszkodzeniu filtra studni nr 5, wykonano studnię zastępczą. W latach 1989/90 wykonano remonty studni nr 6 i 3 po uszkodzeniu zabudowanych tu pierwotnie filtrów kamionkowych. W czerwcu 1990 roku odwiercono nową studnię nr 7, a następnie studnię zastępczą nr 3 usytuowaną w tym samym miejscu, co studnia pierwotna (wydłużono filtr). W 1996 roku wykonano dwie studnie zastępcze nr 5 i 6 położone około 25 m od studni pierwotnych, a w roku 1998 dwie dalsze studnie nr 2 i 4. W roku 2002 wykonano dodatkową studnię nr 8.

W początkowym okresie nieuzdatnioną wodę z ujęcia Wroniawy przesyłano do stacji uzdatniania w Wolsztynie. W 1978 roku Błaszyk i Górski przeprowadzili badania terenowe w celu oceny możliwości uzdatniania wód podziemnych w warstwie wodonośnej metodą HYDROX. Wyniki tych badań stanowiły podstawę do zastosowania metody HYDROX do uzdatniania wód podziemnych na ujęciu we Wroniawach. Projekt technologiczny i techniczny ujęcia opracowany został w 1979 roku przez Biuro Projektów Budownictwa Komunalnego w Poznaniu. Realizację projektu prowadzono od 1981 roku i ukończono w 1989/90. Wdrażanie metody HYDROX rozpoczęto w 1989 roku.



Rys. 8.7-1. Szkic hydrogeologiczny rejonu ujęcia wody Wroniawy.

1 – studnie ujęcia Wroniawy, 2 – studnie wiercone innych ujęć wód podziemnych, 3 – otwory obserwacyjne (piezometry), 4 – otwory badawcze, 5 – linia przekroju hydrogeologicznego, 6 – cieki naturalne i kanały, 7 – krawędź wysoczyzny, 8 – hydrizohipsy wg badań modelowych przy eksploatacji ujęcia $Q_e = 300 \text{ m}^3/\text{h}$, 9 – skrajne strumienie wód podziemnych dopływających do ujęcia, 10 – strumienie wód podziemnych omijające ujęcie, 11 – granica obszaru wpływu ujęcia (leja depresji), 12 – granica obszaru spływu wody do ujęcia, 13 – wyznaczony obszar zasobowy ujęcia Wroniawy przy eksploatacji z wydajnością $Q_e = 300 \text{ m}^3/\text{h}$

Zasadnicza technologia systemu HYDROX polega na zastosowaniu systemu iniekcji poprzez układ hydrauliczny, składający się z trzech otworów iniekcyjnych lub studni oraz jednego otworu iniekcyjnego. Iniekcja prowadzona jest z wydajnością około 90 m³/h przez okres 20-24 h. Następnie, po około 4 h postoju studnia włączona jest do eksploatacji. Eksploatacja wody uzdatnionej, pozbawionej żelaza i manganu trwa 3 do 10 dób. Po tym okresie należy ponownie przeprowadzić iniekcję.

Pierwszą dokumentację hydrogeologiczną zasobów eksploatacyjnych ujęcia Wroniawy wykonało Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne w Poznaniu w roku 1969. Obliczenia wydajności zespołowej wykonano dla zespołu sześciu studni, rozmieszczonych w barierze o rozstawie 100 m przy depresji zwierciadła wody 4 m i przy wstępnie zaprojektowanym lewarowym systemie eksploatacji ujęcia. Do obliczeń zastosowano metodę J.A. Czarnego z poprawką Abramowa na współdziałanie studni w warstwie wodonośnej o swobodnym zwierciadle wody. Jest to metoda ekstrapolacyjna obliczania wydatku zespołowego na podstawie danych z pompowań pojedynczych otworów. Przyjęte dane (k – współczynnik filtracji, H – statyczny słup wody w danej studni, s – założona depresja, R – maksymalny zasięg leja depresyjnego) i wynik obliczeń (Q_e – zasoby eksploatacyjne) zestawiono w tabeli 8.7-1. Z porównania obliczonych wydajności eksploatacyjnych z wynikami uzyskanymi w pompowaniach indywidualnych na najwyższym stopniu dynamicznym oszacowano, że współdziałanie studni w zespole wahać się będzie w granicach od 31 do 53% (średnio do 45%).

W wyniku przeprowadzonych obliczeń w dokumentacji przedstawiono zasoby w ilości 617 m³/h przy depresji 4,0 m. Komisja Dokumentacji Hydrogeologicznych zaleciła obliczenie wielkości zasobów eksploatacyjnych ujęcia niezależnie od przyszłego systemu eksploatacji. Aneks do dokumentacji, z nową wersją zasobów eksploatacyjnych, wykonano w 1970 r.

Tabela 8.7-1. Obliczenia wydatku zespołowego bariery studni „Wroniawy”.

Nr	k (m/h)	H (m)	s (m)	R (m)	Q_e (m ³ /h)
1	5,68	27,0	4,0	1000	100,28
2	6,20	26,0	4,0	1031	102,74
3	7,00	25,6	4,0	1088	108,77
4	7,42	24,8	4,0	1102	110,15
5	5,60	26,2	4,0	984	97,10
6	5,41	27,2	4,0	986	98,01

Razem 647,14

Jako zasoby eksploatacyjne ujęcia przyjęto sumę wydatków sześciu studni (tab. 8.7-2). Wydatki te obliczono z przepustowości zastosowanych filtrów studziennych przy dopuszczalnej prędkości wlotowej wody na filtr obliczonej według wzoru Abramowa.

Tabela 8.7-2. Wyniki hydraulicznych obliczeń zespołowej wydajności studni w barierze ujęcia „Wroniawy”.

Nr studni	1	2	3	4	5	6	RAZEM
Wydajność w m ³ /h	153,5	184,2	178,1	181,6	165,3	163,4	1026
Depresja w metrach	6,1	7,2	6,5	6,6	6,8	6,7	śr. 6,6

W tekście dokumentacji podkreślono, że badania wykonywano w warunkach filtracji niustalonej (krótkie czasy pompowań). Stwierdzono ponadto, że mając na uwadze filtrację niustaloną oraz proces starzenia się otworów („kolmatacja filtrów”) dopuszcza się zwiększenie depresji w studniach do 14 m, czyli do wielkości $1/2 H$ przy maksymalnej eksploatacji zasobów. Dokumentacja zawierająca ustalenie zasobów eksploatacyjnych przytoczonych powyżej tj. 1026 m³/h przy depresji 6,6 m została zatwierdzona.

Należy stwierdzić, że zasoby ustalone w zatwierdzonym w roku 1970 aneksie do dokumentacji obliczono wyłącznie w oparciu o metody hydrauliczne (ekstrapolacja wyników krótkotrwałych pompowań indywidualnych) bez sporządzenia bilansu wodnego, a nawet bez obliczeń zasobów dynamicznych. Nie uwzględniono w obliczeniach warunków środowiskowych w obrębie systemu hydrogeologicznego bardzo podatnego na przeobrażenia hydrogeochemiczne w przypadku obniżania pierwotnego zwierciadła wody podziemnej poniżej głębokości jego naturalnych wahań.

Pobór wody z ujęcia Wroniawy odbywa się przy wykorzystaniu wszystkich siedmiu studni pracujących zespołowo w barierze o długości 600 metrów (rys. 8.7-1). W okresie od początku stycznia 1995 roku do końca czerwca 2002 roku pobrano z ujęcia w sposób bezzwrotny – do sieci wodociągowej – 12,2 mln m³ wody. W tabeli 8.7-3 zestawiono liczby charakteryzujące rozbiór wody na ujęciu Wroniawy:

- **średnia miesięczna produkcja** wody w przeliczeniu na godzinę wynosiła 185 m³/h przy rozkładzie od 181,9 m³/h w latach 1996 i 1998 do 192,7 m³/h w 2000 roku,
- **produkcja minimalna średnia** wynosiła 163 m³/h przy rozkładzie od 154,7 m³/h w 1998 roku do 167,2 m³/h w 1995 roku,
- **produkcja maksymalna średnia** wynosiła 222,0 m³/h przy rozkładzie od 210,7 m³/h w 1999 roku do 240,4 m³/h w 2000 roku.

Nierównomierność rozbioru w okresach miesięcznych, która kształtowała się na omawianym ujęciu w przedziale wskaźnika min/max od 0,80 do 0,87, jest stosunkowo niewysoka.

Tabela 8.7-3. Nierównomierność rozbioru wody w latach 1995-2002 na podstawie zestawień produkcji miesięcznej ujęcia Wroniawy.

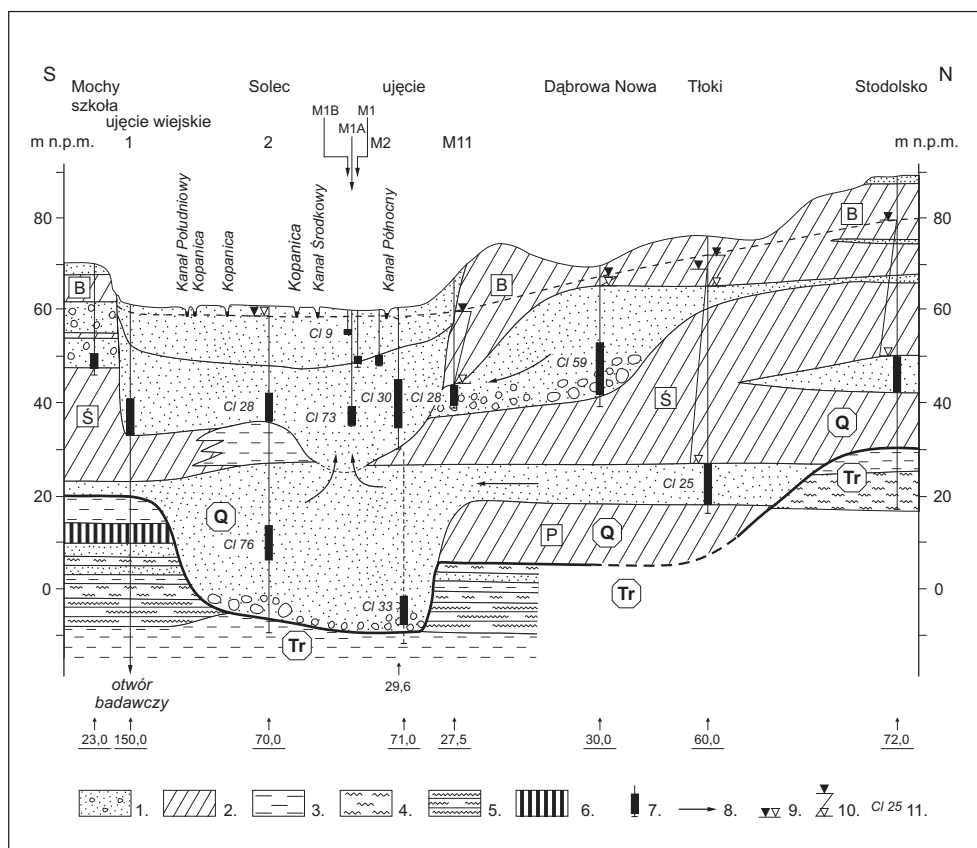
Rok	Produkcja miesięczna m ³ /h			
	Min	Średnia	Max	min/max
1995	167,24	187,64	225,49	0,832
1996	165,75	181,93	223,71	0,813
1997	164,48	188,77	225,48	0,837
1998	159,28	181,93	214,92	0,846
1999	154,72	182,38	210,71	0,866
2000	162,34	192,74	240,41	0,802
2001	165,51	183,34	216,60	0,846
2002	163,01	183,75	218,31	0,842
Średnia	162,79	185,31	221,95	0,835

Warunki hydrogeologiczne

Obszar zasilania ujęcia Wroniawy obejmuje część Pradoliny Warszawsko-Berlińskiej oraz przyległą do niej północną wysoczyznę morenową, w rejonie wsi Wroniawy i Podlas (rys. 8.7-1). Dno Pradoliny kształtuje się w przedziale rzędnych 60-62 m n.p.m. (za wyjątkiem utworzonych na jej obszarze wydmy), a sąsiednie wysoczyzny osiągają wysokość od 80 do 110 m n.p.m. Krawędź Pradoliny jest nacięta licznymi dolinkami.

Na szkicu hydrogeologicznym (rys. 8.7-1) przedstawiono strumień wód podziemnych w ujętym poziomie wodonośnym, a na przekroju (rys. 8.7-2) litologię osadów i miąższości wymienionych poziomów wodonośnych oraz ich wzajemne odniesienie.

Po wykonaniu w roku 2002 głębszych badawczych otworów hydrogeologicznych (Solec – otwór nr 2, Błocko – otwór nr 3), oraz otworów badawczo-obszaryjnych (M1A, M1B – przy Kanale Środkowym) można w sposób bardziej dokładny aniżeli w okresie sporządzania pierwotnej dokumentacji zasobowej (1969-1970) określić warunki hydrogeologiczne panujące w rejonie ujęcia komunalnego Wroniawy. Przede wszystkim udokumentowano występowanie starszej od ujętej we Wroniawach warstwy wodonośnej, prawdopodobnie z okresu interglacjalu mazowieckiego, w której może zachodzić eksfiltracja wód zasilających strefę ujęcia (przekrój – rys. 8.7-2). Za pomocą wiercenia otworu badawczo-obszaryjnego M11 w krawędzi wroniawskiej udowodniono łączność międzyglinowego poziomu wodonośnego na wysoczyźnie morenowej (Dąbrowa Nowa) z wodonośnymi utworami w Pradolinie.



Rys. 8.7-2 Poglądowy przekrój hydrogeologiczny przez Pradolinę Warszawsko-Berlińską oraz sąsiednią wysoczyznę morenową w rejonie Wroniaw

I Litologia i stratygrafia: 1 – piaski i żwiry; 2 – gliny zwałowe; 3 – ły; 4 – pyły, mułki; 5 – mułowce; 6 – węgle brunatne;

II. Hydrodynamika: 7 – położenie filtra, 8 – kierunki przepływu wód podziemnych, 9 – swobodne zwierciadło wód podziemnych, 10 – napięte zwierciadło wód podziemnych, 11 – zawartość jonu chlorkowego [mg/l].

W obrębie analizowanego obszaru zasilania ujęcia Wroniawy w piętrze czwartorzędowym występują 3 podstawowe poziomy wodonośne:

- poziom wód gruntowych – tylko w obrębie Pradoliny,
- poziom międzyglinowy górny – wyłącznie pod wysoczyznami morenowymi pomiędzy glinami zlodowacenia północnopolskiego i glinami zlodowacenia środkowopolskiego, z lateralnym kontaktem hydraulicznym z poziomem wód gruntowych w Pradolinie,
- poziom międzyglinowy dolny lub podglinowy – zarówno pod wysoczyznami jak i pod Pradolina w pozycji: a) pomiędzy glinami zlodowacenia środkowopolskiego i glinami zlodowacenia południowopolskiego; b) pod glinami zlodowacenia środkowopolskiego bezpośrednio na łożach lub mułach trzeciorzędowych.

Warstwa wodonośna ujęta wierconymi studniami pionowymi na ujęciu we Wroniawach zbudowana jest z dwóch serii utworów fluwiogłacjalnych i fluwialnych o łącznej miąższości osadów nawodnionych od 25 do 27 m. Seria górna to piaski drobno- i średnioziarniste o miąższości do 10 metrów. Seria dolna zbudowana jest z osadów gruboklastycznych w postaci gruboziarnistych piasków z wkładkami żwirów (pospółki) a nawet ławic żwirowych z rumoszem o zawartości frakcji kamienistej od 40 do 60%. Ławice żwirowe z rumoszem występują w przedziale głębokości od 18 do 24 m p.p.t. Bardzo znaczne zróżnicowanie w uziarnieniu osadów wodonośnych, uwidocznione we wzajemnym odniesieniu serii górnej – przypowierzchniowej (piaski drobno- i średnioziarniste) i serii dolnej (żwiry z rumoszem, piaski żwirowate), ma niewątpliwy wpływ na kształtowanie się warunków krążenia i przepływu wód podziemnych w obrębie opisywanej warstwy wodonośnej. Dla piasków serii górnej współczynnik filtracji, oceniony na podstawie uziarnienia, wynosi: $k_1 = 2,5 \cdot 10^{-5} - 1,0 \cdot 10^{-4}$ m/s, a dla serii dolnej, żwirowo-rumoszowej, na podstawie próbnych pompowań: $k_2 = 1,5 \cdot 10^{-3} - 2,1 \cdot 10^{-3}$ m/s. Porównując średnie wartości współczynnika filtracji obu serii otrzymamy iloraz zróżnicowania $k_2/k_1 = 30$.

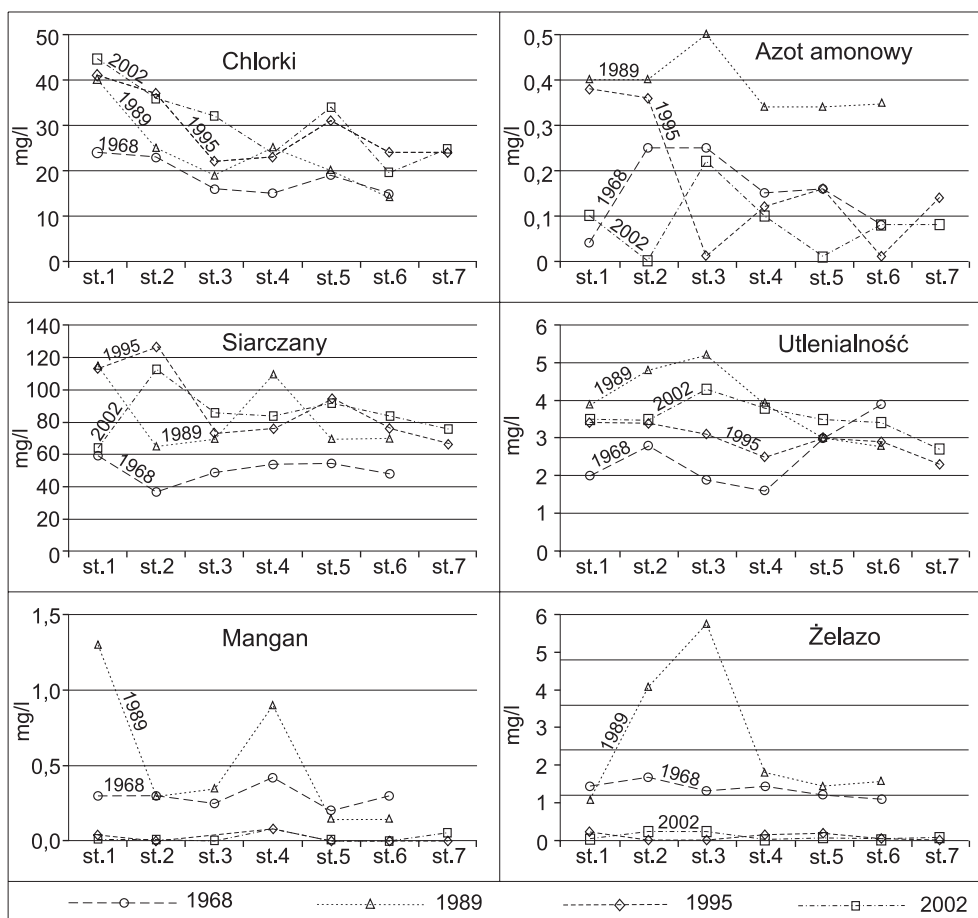
Bardzo dobre warunki filtracyjne decydują o wysokiej wydajności jednostkowej wykonanych studni, które kształtowały się w przedziale od 42 do 82 m³/h/m.

Jakość wód i jej zmiany w trakcie eksploatacji ujęcia

Wody podziemne z ujęcia Wroniawy, wg badań z okresu budowy studni (1968 rok), charakteryzowały się korzystną jakością (rys. 8.7-3). Stężenia jonu żelaza nie przekraczały 1,5 mg/l, a manganu 0,4 mg/l.

Jakość wód była typowa dla przykrawędziowych stref pradolin zasilanych z międzymorenowych zbiorników na wysoczyźnie i/lub infiltrujących na terenie wyższych tarasów dolinnych. Początkowo zmiany jakości wody były niewielkie i objawiały się głównie wzrostem stężeń żelaza, siarczanów i twardości wody (rys. 8.7-4). Większe zmiany jakości wód zaobserwowano w latach 1986-90. W okresie tym nastąpił w szczególności wzrost stężeń azotu amonowego, siarczanów i utlenialności. Zaznaczył się również wzrost stężeń żelaza i manganu szczególnie w studniach 2, 3 i 4 (rys. 8.7-3).

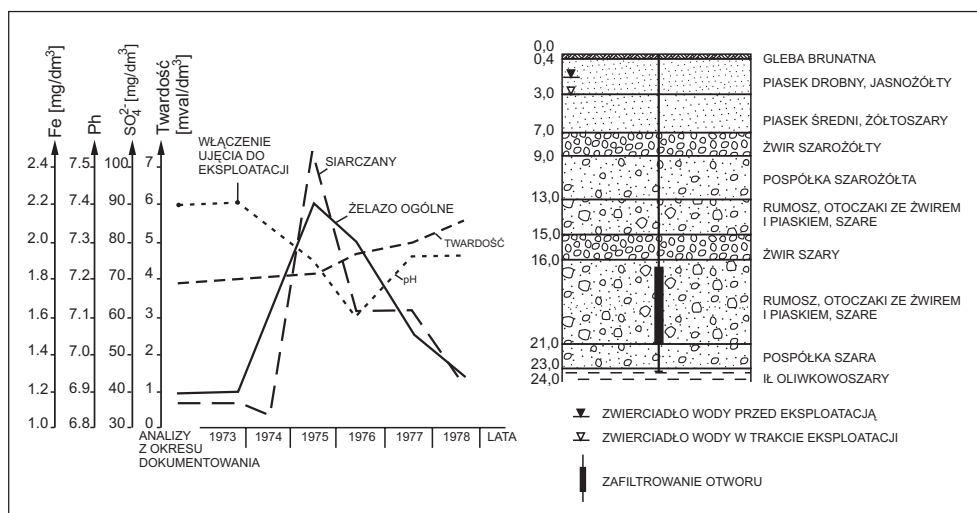
Powyższe zmiany analizowane były w ramach prac związanych z wdrożeniem metody HYDROX. Na podstawie wykonanych badań ustalono, że związane było to między innymi z infiltracją wód Kanału Północnego Obry w wyniku wybudowania kanału przelewowo-spustowego ze zbiorników wody czystej. Wylot tego kanału znajdował się na rzędnej ok. 58,6 m n.p.m., co przy wyższych stanach w Kanale Północnym Obry umożliwiało dopływ zanieczyszczonych wód powierzchniowych w bezpośrednie sąsiedztwo studni nr 2 i 3. W latach 1989-90 zwierciadło wód w Kanale utrzymywało się przeważnie na rzędnej powyżej 59,0 m npm, co przy rzędnej wylotu kanału ok. 58,6 m npm umożliwiało wnikanie wód do kanału przelewowo-spustowego i ich infiltrację do warstwy wodonośnej. W celu ograniczenia tego zjawiska wybudowano ok.



Rys. 8.7-3. Charakterystyka jakości wody z ujęcia Wroniawy w różnych latach.

półmetrowej wysokości murek na wylocie kanału. W następnych latach jakość wód na ujęciu uległa poprawie nie tylko w zakresie żelaza i manganu, ale również utlenialności i azotu amonowego. Następował natomiast niewielki, ale systematyczny wzrost chlorków i azotanów.

Stan jakości wody w obszarze zasilania ujęcia rozpoznano w 1995 roku w oparciu o otwory badawcze (M1 do M-9) zafiltrowane w górnych partiach warstwy wodonośnej (rys. 8.7-2). Badania te wykazały znaczny stopień zanieczyszczenia wód podziemnych w górnej części poziomu wodonośnego dopływających od strony wsi Wroniawy. Stwierdzono tu w szczególności wysokie stężenie azotanów (do 14 N-NO_3 mg/l), a także podwyższone stężenie chlorków i siarczanów. Wykazano również występowanie wód o niekorzystnej jakości dopływających do ujęcia od strony centrum Pradoliny. Stwierdzono, że wody te charakteryzują się wysokimi stężeniami azotu amonowego (0,6-1,6 mg/l) i wysoką utlenialnością (9,3-20,0 mg O_2 /l). Zawierają również wysokie stężenia żelaza



Rys. 8.7-4. Zmiany jakości wody po uruchomieniu eksploatacji na ujęciu Wroniawy (dane ze studni nr 3).

i manganu. Badania wykazały, że dotyczy to zarówno otworów położonych pomiędzy linią studni i Kanałem, jak i tych na południe od Kanału. Wskazywało to, że niekorzystna jakość wynika z cech środowiska hydrogeochemicznego tej części Pradoliny, choć nie wykluczano pewnego wpływu infiltracji zanieczyszczonych wód z Kanału.

Szczególnie niekorzystną jakość wód stwierdzono w rejonie otworów M2, M3 i R1. Występowały tu wody o bardzo wysokich stężeniach żelaza (do 60 mg/l), siarczanów (do 288 mg/l) i manganu (do 0,76 mg/l) oraz o niskim odczynie (6,8 pH). Wskazywało to na rozwój procesów przemian hydrogeochemicznych związanych z utlenianiem się siarczków i substancji organicznych w odsoniętej w wyniku obniżania się zwierciadła wody górnej części warstwy wodonośnej. Rozwój procesu związany był ze zwiększającym się poborem wód oraz okresem suszy hydrologicznej, która występowała w Wielkopolsce w latach 1989-1992.

Bliższe rozpoznanie warunków kształtowania się jakości wód na ujęciu uzyskano w 2002 roku w oparciu o wyniki badań przeprowadzonych na potrzeby weryfikacji zasobów i opracowania strefy ochronnej ujęcia, a także badań prowadzonych równoległe przez firmę Hydroconsult z Poznania na terenie Pradoliny w związku z opracowywaniem dokumentacji zasobów eksploatacyjnych dla odcinka Pradoliny pomiędzy Kościanem a Wolsztynem. Wyniki tego rozpoznania przedstawiono na mapie hydrochemicznej (rys. 8.7-5), a także na przekroju (rys. 8.7-2). Analiza materiałów, w powiązaniu z danymi w zakresie bilansu zasilania ujęcia wskazuje, że stosunkowo korzystna jakość wody pozyskiwanej z ujęcia (przy poborze rzędu 180 m³/h) wiąże się ze znacznym udziałem (około 58%) strumienia wód dopływającego z poziomu międzymorenowego na wysoczyźnie. Woda tego poziomu, jak wynika z analizy dla otworu M11, cechuje się stosunkowo korzystną

jakością w zakresie żelaza (2,2 mg/l) i manganu (0,22 mg/l) i jest tylko w niewielkim stopniu zanieczyszczona azotanami (1,2 mg N-NO₃/l) i chlorkami (28 mg/l). Wody gruntowe spływające w strefie krawędziowej wysoczyzny z terenów rolniczych są natomiast w znacznym stopniu zanieczyszczone azotanami (otwór M11A – 31 mg N-NO₃/l).

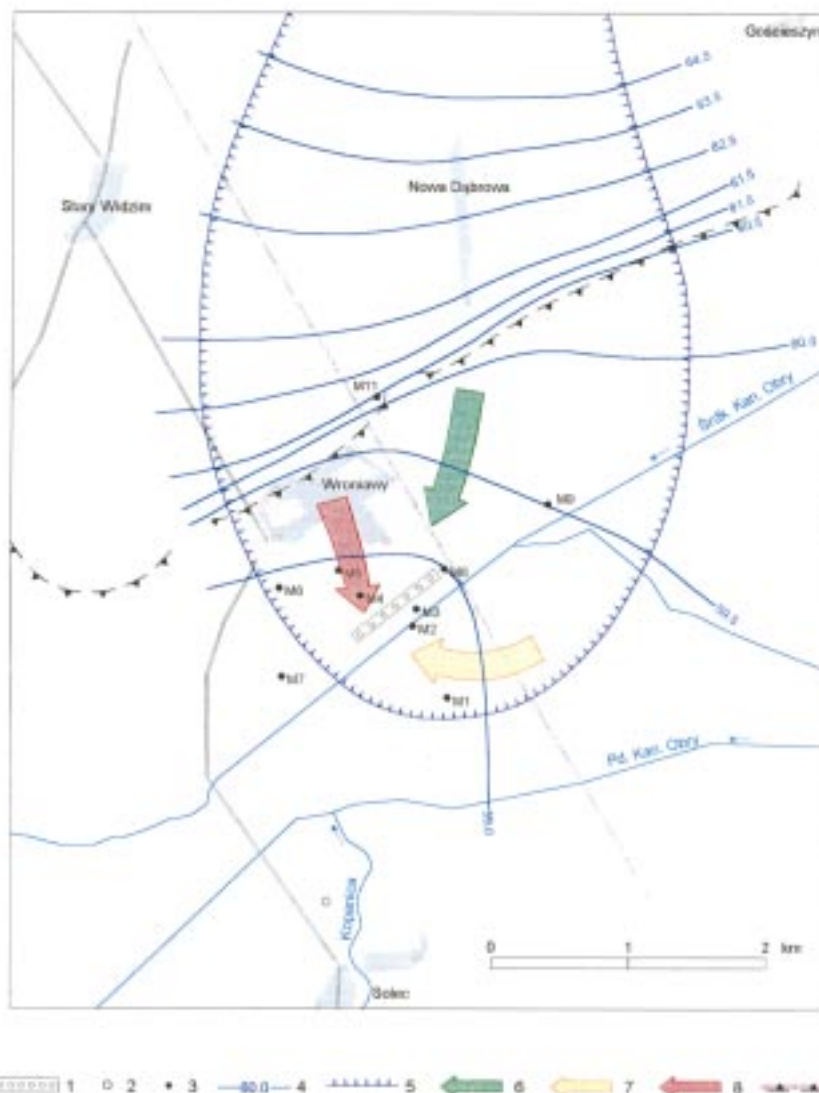
Silnie zanieczyszczone azotanami a także siarczanami i chlorkami są również wody infiltrujące w rejonie Wroniaw. Oprócz wysokich stężeń azotanów (do 20 mg N-NO₃/l) przejawem zanieczyszczenia są również podwyższone stężenia azotynów (do 0,45 mg N-NO₂/l), a także manganu (do 2,5 mg/l). Zanieczyszczenia te są głównie efektem mineralizacji ścieków oraz nawozów organicznych w strefie aeracji. Wpływ powyższych zanieczyszczeń zaznacza się na ujęciu. Jest on jednak stosunkowo niewielki, bowiem udział wód ze strefy krawędziowej i infiltrujących pomiędzy krawędzią wysoczyzny a barierą studni wynosi około 4%.

Badania na terenie Pradoliny pozwoliły natomiast na bliższe wyjaśnienie warunków kształtowania się jakości wód dopływających do ujęcia od strony południowej. Potwierdziły one przedstawione już wcześniej przypuszczenia, że niewłaściwa jakość wód dopływających do ujęcia od południa wynika z występowania niekorzystnych warunków hydrogeochemicznych w Pradolinie, a w szczególności w centralnych jej partiach.

Stwierdzono, że w podłożu Pradoliny występuje głębsza, starsza struktura wodonośna, która kontaktuje się z poziomem mioceńskim i drenuje wody tego poziomu (rys. 8.7-2). Cechą tych wód jest podwyższona zawartość chlorków pochodzenia geogenicznego, wysoki udział sodu, a także wysokie stężenia żelaza (do 20 mg/l), manganu i azotu amonowego. Niekorzystna jakość wód w zakresie tych parametrów związana jest z występowaniem w profilu utworów wzbogaconych w materię organiczną oraz stagnującym charakterem wód w centralnych partiach Pradoliny. Poza strefami krawędziowymi Pradoliny brak tu bowiem warunków do przepływu wód. Występuje tylko powolny ruch ascenzyjny ku powierzchni terenu, a wody infiltrujące w wyżej położonych partiach Pradoliny płytkimi systemami krążenia sprowadzane są do cieków i zabagnień.

Wykonane testowe badania geochemiczne wykazały jednocześnie występowanie siarczków zarówno w płytkich jak i głębszych partiach Pradoliny. W warunkach trwałego obniżenia zwierciadła wody mogą więc występować niekorzystne zmiany jakości wód wynikające z utleniania siarczków i substancji organicznych. Zjawisko to stwierdzono na ujęciu w rejonie otworów M2 i M3 w 1995 roku. Jego skutki są nadal widoczne w postaci wysokich stężeń żelaza (28,2 mg/l) i siarczanów (195 mg/l). Jakość wody w tym rejonie jest już znacznie lepsza niż w 1995 roku, kiedy to stężenie żelaza w wodzie z otworu M2 wynosiło 60 mg/l.

Wyniki rozpoznania hydrochemicznego oraz wykonane modelowanie pozwoliło również na bliższe wyjaśnienie roli Kanału Północnego Obry w zasilaniu ujęcia oraz zmienności jakości wód w poszczególnych jego studniach, a także efektywności ich uzdatniania. Podobieństwo chemizmu wód po obu stronach Kanału, a w szczególności wysoki udział sodu wskazuje, co potwierdzają wyniki modelo-



Rys. 8.7-5. Ujęcie wody Wroniawy – szkieł warunków hydrochemicznych.

1 – bariera studni ujęcia, 2 – otwory obserwacyjne, 3 – otwór badawczy Solec, 4 – hydroizohipsa [m n.p.m.], 5 – zasięg obszaru spływu wód do ujęcia. **Charakterystyka hydrochemiczna wód zasilających ujęcie:** 6 – strumień wód dopływających z poziomu międzymorenowego na wysoczyźnie (58% w bilansie zasilania ujęcia). Wody o korzystnej jakości słabo zanieczyszczone antropogenicznie – Fe 2,2 mg/l, Mn 0,22 mg/l, N-NO₃ 1,2 mg/l, Cl 28 mg/l, 7 – strumień wód dopływających z terenu Pradoliny Warszawsko-Berlińskiej (34% w bilansie zasilania ujęcia) – Fe do 20 mg/l, Mn do 0,8 mg/l, N-NH₄ do 1,6 mg/l, Cl do 70 mg/l, 8 – strumień wód spływających ze strefy krawędziowej wysoczyzny i infiltrujących w strefie przykrawędziowej Pradoliny (8% w bilansie zasilania ujęcia). Wody silnie zanieczyszczone antropogenicznie – Cl do 82 mg/l, SO₄ do 260 mg/l, N-NO₃ do 20 mg/l, 9 – krawędź Pradoliny Warszawsko-Berlińskiej.

wania, że infiltracja z Kanału nie odgrywa istotnej roli w zasilaniu ujęcia, zaś obserwowany wpływ pod koniec lat 80. i na początku 90. był głównie związany z intruzjami poprzez kanał przelewowo-spustowy ze zbiorników wody czystej.

Analiza systemu krążenia wód wyjaśnia również zróżnicowanie chemizmu wód widoczne na ujęciu, tj. korzystniejszą jakość w studniach położonych we wschodniej części (studnie nr 7, 8 i 6) w stosunku do pozostałych. Ta część ujęcia zasilana jest wodą o najkorzystniejszej jakości dopływającą z rejonu wysoczyzny poza strefą oddziaływania zwartej zabudowy Wroniaw. W zasilaniu pozostałych studni biorą udział wody zanieczyszczone z rejonu Wroniaw, a ponadto w większym stopniu wody płynące z centralnej części Pradoliny. Wykonane zdjęcie hydrochemiczne wykazało, że zanieczyszczenie wód górnej części poziomu pradolinowego spływających z rejonu Wroniaw wzrasta, czego przejawem jest w szczególności wzrost zawartości azotanów, a także azotynów i chlorków. Niepokojący jest również wzrost stężeń manganu. Stwierdzone wysokie stężenia zanieczyszczeń mogą częściowo być wynikiem sytuacji hydrologicznej (wysokie stany wód na początku 2002 roku, a następnie obniżanie się zwierciadła wody), wzrost poziomu zanieczyszczenia w stosunku do roku 1995 jest jednak wyraźnie widoczny. Pogarszanie jakości wody w zakresie chlorków i siarczanów, a także manganu widoczne jest również na terenach rolniczych (otwory M9, M8 i M7).

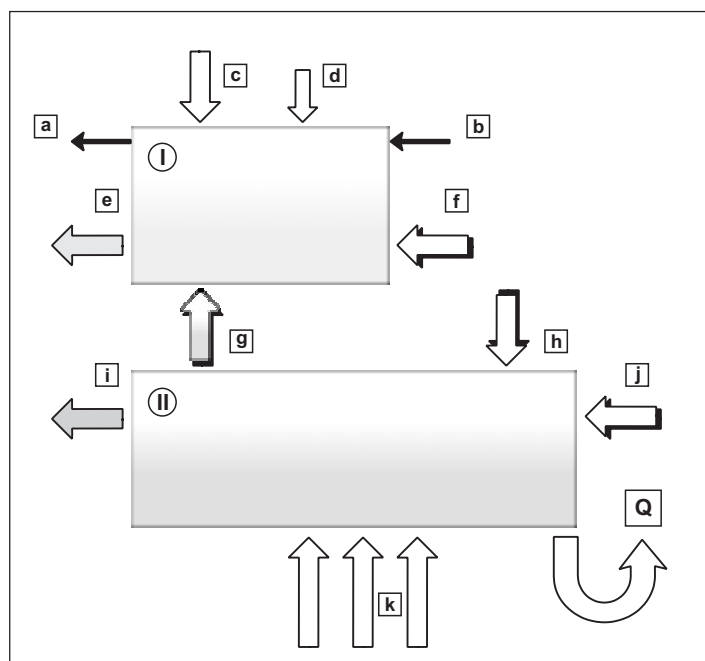
Weryfikacja zasobów eksploatacyjnych

Do przeprowadzenia badań weryfikacyjnych wykorzystano badania modelowe w formie symulacji bieżącej eksploatacji ujęcia Wroniawy z zastosowaniem numerycznych programów obliczeniowych z biblioteki HYDRYLIB. Rejon ujęcia wody odwzorowano korzystając z programu symulacyjnego SWPRN (wersja 8.05). Na rysunku 8.7-6 podano schemat modelu matematycznego odwzorowującego w przybliżeniu przedstawiony uprzednio system hydrogeologiczny (rys. 8.7-1 i 8.7-2).

Analizie komputerowej poddano obszar o powierzchni ponad 57 km², który zdyskretyzowano siatką prostokątną o wymiarze całkowitym: 89 wierszy na 78 kolumn za pomocą bloków o wymiarach 100 x 100 metrów oraz 100 x 200 metrów. Warstwę górną odwzorowano za pomocą 2993, natomiast warstwę dolną, za pomocą 5408 elementarnych bloków obliczeniowych z warunkami brzegowymi I, II, i III rodzaju.

Na podstawie danych archiwalnych oraz przeprowadzonych pomiarów terenowych do początkowych symulacji komputerowych przyjęto następujące dane wyjściowe:

- przewodność hydrauliczna warstwy górnej (na obszarze Pradoliny): 5 m²/h,
- przewodność hydrauliczna warstwy dolnej (na obszarze Pradoliny): 80 m²/h,
- przewodność hydrauliczna warstwy dolnej (na obszarze wysoczyzny): 5-7 m²/h,
- infiltracja efektywna dla warstwy górnej, w stosunku do rocznej sumy opadów: 600 mm – 1,46 % (na obszarze Pradoliny),
- infiltracja efektywna dla warstwy II, w stosunku do rocznej sumy opadów: 600 mm – 8% (na obszarze wysoczyzny – zasilany poziom międzyglinowy górny),



Rys. 8.7-6. Schemat modelu matematycznego i struktury bilansu wodnego.

I – warstwa górna: Pradolina Warszawsko-Berlińska: a – drenaż cieków (cieki odwzorowane w warstwie górnej), b – infiltracja wód powierzchniowych, c – infiltracja efektywna na leję depresyjny (na obszarze Pradoliny), d – infiltracja efektywna (spływ krawędziowy), e – odpływ z warstwy górnej poprzez bloki z warunkami brzegowymi I rodzaju, f – dopływ od strony wysoczyzny (Tłoki, Rostarzewo, Gościeszyn), zasilanie warstwy górnej poprzez bloki z warunkami I rodzaju z lokalnej zlewni powierzchniowej przyległej do krawędzi Pradoliny;

II – warstwa dolna: jw. oraz wysoczyzna: Wroniawy, Dąbrowa, Widzim, g – zasilanie warstwy górnej z warstwy dolnej w obrębie Pradoliny, h – infiltracja efektywna na obszarze wysoczyzny do poziomu międzyglinowego górnego, i – odpływ z warstwy dolnej poprzez bloki z warunkami brzegowymi I rodzaju, j – dopływ od strony wysoczyzny (Tłoki, Rostarzewo, Gościeszyn), zasilanie warstwy II poprzez bloki z warunkami I rodzaju założonymi na przepływie wód podziemnych z poziomem międzyglinowym górnym, k – eksfiltracja z głębszego poziomu wodonośnego na obszarze Pradoliny z dopływem wody z poziomu międzyglinowego dolnego (patrz: przekrój – rys. 8.7-2), Q – eksploatacja ujęcia Wroniawy.

- eksfiltracja do pradolinnej warstwy dolnej, z warstwy podłoża zasilanej z poziomu międzyglinowego,
- parametry warstwy słabo przepuszczalnej (aluwiów rzecznych), określone wielkością TRP, wyrażającą jednostkowe przesączanie przez warstwę osadów dennych cieków, przyjęto od 20 do $200 \cdot 10^{-6}$, co w założeniu odpowiadało wysokiej izolacji koryt rzecznych i tym samym znikomemu stopniowi oddziaływania na przepływ wód w symulowanym polu filtracji,
- eksploatacja ujęcia na stan z lipca 2002 roku – eksploatacja 6 studni z wydajnością łączną $180 \text{ m}^3/\text{h}$.

Kalibrację modelu wykonano metodą kolejnych przybliżeń modyfikując początkowe parametry obliczeniowe (infiltracja efektywna, parametr TRP). Na bazie wytarowanego modelu, odwzorowującego stan eksploatacji ujęcia z lipca 2002 roku, przeprowadzono symulacje komputerowe o charakterze prognozy, celem określenia warunków eksploatacji ujęcia z założoną wydajnością. Istotną i jedyną zmianę, którą wprowadzono do modelu matematycznego, na którym przeprowadzono symulacje prognostyczne, było odwzorowanie wielkości eksploatacji ujęcia w ośmiu węzłach siatki dyskretyzacyjnej, co odpowiadało eksploatacji ośmiu studni z jednakową wydajnością 37,5 m³/h każda.

Metodą kolejnych przybliżeń optymalizowano wielkość eksploatacji ujęcia w zakresie od 270 do 360 m³/h, ostatecznie wybrano wariant $Q = 300 \text{ m}^3/\text{h}$. W tej wersji modelu udział poszczególnych składników bilansu w zasilaniu ujęcia pokazuje tabela 8.7-4.

Z przeprowadzonego bilansu zasilania ujęcia Wroniawy wynikało, że wydajność ujęcia nie powinna być większa od 300 m³/h, a więc utrzymana w granicach wielkości naturalnego przepływu strumienia wód podziemnych w obszarze pomiędzy północną krawędzią Pradoliny a Kanałem Północnym Obry, przy ograniczonym udziale eksfiltracji wody podziemnej z podłoża Pradoliny. Większy pobór wody z ujęcia jest oczywiście hydraulicznie możliwy, lecz wywoła skutki nadmiernego zdepresjonowania zwierciadła wody, zagrażające jej jakości. Zagrożenie to związane jest ze zwiększeniem się udziału w bilansie wód o niekorzystnej jakości (wysokie stężenia żelaza, manganu i azotu amonowego) dopływających z terenu Pradoliny przy zwiększeniu poboru oraz tworzeniem się warunków do rozwoju procesów utleniania siarczków i substancji organicznych w wyniku zdepresjonowania zwierciadła wody. Występowanie warunków do roz-

Tabela 8.7-4. Struktura parametrów bilansowych ujęcia (prognoza eksploatacji z wydajnością 300 m³/h).

Składniki bilansowe		Wartość w m ³ /h	% w stosunku do eksploatacji $Q = 300 \text{ m}^3/\text{h}$
Warstwa I (górną)			
Dopływ od strony wysoczyzny	(Tłoki, Rostarzewo, Gościeszyn)	3	1,0
Infiltracja efektywna	(spływ krawędziowy)	7	2,3
Infiltracja efektywna	(w obrębie Pradoliny)	12	4,0
Warstwa II (dolna)			
Dopływ od strony wysoczyzny	(Tłoki, Rostarzewo, Gościeszyn)	72	24,0
Infiltracja efektywna (na wysoczyznę – Wroniawy, Dąbrowa, Widzim)		92	30,7
Eksfiltracja	(w obrębie Pradoliny)	114	38,0
Eksploatacja ujęcia		300	100,0

woju powyższego niekorzystnego zjawiska potwierdzone zostało wynikami badań hydrogeochemicznych na terenie Pradoliny.

W świetle analizy hydrodynamicznej i hydrogeochemicznej wyników dotychczasowej eksploatacji ujęcia ze średnią wydajnością 180 m³/h, ustalone zasoby eksploatacyjne w wysokości $Q_c = 1\,026$ m³/h przy depresji 6,6 m uznaje się za znacznie zawyżone. Z obliczeń optymalizacyjnych przeprowadzonych na modelu numerycznym symulującym eksploatację ujęcia z wydajnościami: 270, 300, 320 i 360 m³/h przyjęto wariant poboru w wysokości 300 m³/h, jako odpowiadający stanowi eksploatacji z maksymalnym udziałem wód zasilających ujęcie od strony wysoczyzny i z terenu Pradoliny pomiędzy jej krawędzią a Północnym Kanałem Obry, ale przy minimalizacji dopływu wód z wysoką zawartością związków żelaza z centralnej i południowej części Pradoliny. Pobór wody w tej wielkości z ujęcia, składającego się z ośmiu studni rozmieszczonych w barierze o długości 700 metrów, odbywałby się z depresją rejonową $s_{rej} = 2,1-3,0$ m w warstwie wodonośnej na terenie ujęcia. Zmienność depresji rejonowej jest związana z czynnikami naturalnymi wynikającymi z wahań zwierciadła wody podziemnej. Depresja eksploatacyjna w poszczególnych studniach nie powinna przekraczać 1/3 miąższości warstwy wodonośnej, a więc wielkości $s_c = 8-10$ m.

8.8. Ujęcie wód źródła z utworów trzeciorzędowych w zlewni Popradu

Wykonawcą dokumentacji hydrogeologicznej ujęcia wód podziemnych wypływających z utworów trzeciorzędowych płaszczowiny magurskiej było Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne w Krakowie (1974 r.).

Dokumentowane źródło posiada dwa wypływy na rzędnej 369,5 m n.p.m. na południowym stoku wzgórza, które leży w paśmie Jaworzyny (Beskid Sądecki). Źródło to daje początek ciekowi, który stanowi prawy dopływ potoku Głęboczanka (dopływ Popradu). Jest to źródło typu zboczowego o charakterze zstępującym, występujące z rumoszu piaskowca i łupków tworzących stropowe partie warstw podmagurskich (eocen środkowy i górny). Współczynniki filtracji tej serii otworów są zmienne w granicach od 0,004 do 3,38 m/d.

Podstawę wniosku zasobowego stanowiły jednoroczne pomiary i obserwacje wydajności źródła i badania jakości wody. Pomiary wydajności, po wykonaniu komory betonowej i zamontowaniu rurki odpływowej, prowadzono metodą objętościową mierząc równocześnie temperaturę wody i powietrza w okresie od 02.05.1973 r. do 30.04.1974 r. co 3-4 dni. Próby wody do badań fizykochemicznych pobierano w cyklu kwartalnym.

W wyniku prowadzonych prac stwierdzono, że:

- wydajność źródła zmienia się w granicach od 4,8 do 21,0 m³/h (1,33-5,83 dm³/s),
- średnia wydajność źródła kształtuje się na poziomie 9,2 m³/h (2,55 dm³/s),
- maksymalne wypływy przypadają na lipiec-sierpień,

- maksymalna temperatura wody wynosi 11°C przy temperaturze powietrza 21°C (sierpień), a najniższa (8°C) występuje w styczniu-lutym, przy temperaturach powietrza od -5°C do +12°C, co świadczy o płytkim krążeniu wód podziemnych,
- wyniki 4 analiz wód wskazują, że jakość wody nie budzi zastrzeżeń pod względem fizyczno-chemicznym (jest to woda wodorowęglanowo-siarczanowo-wapniowo-magnezowa o odczynie słabo alkalicznym, średnio twarda, o mineralizacji poniżej 400 mg/l),
- badania bakteriologiczne wskazują na zanieczyszczenia przenikające z powierzchni terenu,
- wskaźnik jednorocznej zmienności wydajności źródła (wg. R.Maillete'a) wynosi: $R = 4$, co pozwala zaliczyć go do grupy mało zmiennych,
- wg podziału O. Meiznera, którego kryterium jest średnia wydajność w okresie pomiarowym, dokumentowane źródło zakwalifikowano do klasy V.

Zapotrzebowanie na wodę budowanego wówczas ośrodka wypoczynkowego zostało określone na:

- średnie zapotrzebowanie godzinowe: 3,10 m³/h,
- maksymalne zapotrzebowanie dobowe: 86,0 m³/d.

Dokumentatorzy wnioskowali o zatwierdzenie dokumentacji ustalającej zasoby źródła w wysokości: 4,8 m³/h (115,2 m³/d). Wielkość ta odpowiada minimalnej wydajności źródła stwierdzonej w okresie rocznych pomiarów i obserwacji. Minima takie zarejestrowano w dniach od 19 do 29.03.1974 r. Równocześnie wielkość ta z nadwyżką zabezpiecza potrzeby użytkownika ujęcia.

Strefy ochrony sanitarnej ujęcia wyznaczono zgodnie z zarządzeniem Prezesa CUWG z dn. 7.02.1969 r. wydzielając:

- Strefę ochrony bezpośredniej o promieniu 15 m od wypływu. Obszar został ogrodzony, zamknięty a teren oczyszczony.
- Strefę ochrony pośredniej w promieniu 70-100 m od granicy ochrony bezpośredniej. Granica tej strefy została oznakowana tablicami informacyjnymi.

Dokumentatorzy zalecili rozwiązanie techniczne ujęcia wody ze źródła w postaci obudowy betonowej źródła oraz rurociągu doprowadzającego wodę grawitacyjnie do odbiorcy. Obudowa została przykryta szczelną pokrywą a teren wokół obudowy pokryty warstwą łu i gliny oraz zacementowanymi otoczkami piaskowca.

Dokumentacja zasobowa została zatwierdzona przez Wydział Gospodarki Przestrzennej, Geologii i Ochrony Środowiska Urzędu Wojewódzkiego w Krakowie. Użytkownik, PPiWO „Prodlew”, uzyskał pozwolenie wodnoprawne na pobór wody pod warunkiem przeprowadzania okresowych badań kontrolnych w zakresie składu fizykochemicznego wody i jej stanu bakteriologicznego.

Wykonane ujęcie nigdy nie stało się przedmiotem ciągłej eksploatacji, gdyż budowany ośrodek czasowy przechodził zmienne koleje losu. Okresowo wykonywane pomiary wydajności źródła i badania fizykochemiczne ujmowanej wody potwierdzały wyniki prac prowadzonych w latach 70. zawarte w dokumentacji hydrogeologicznej.

Literatura cytowana

1. Aquifer Test User's Manual, Intuitive Analysis and Reporting of Pumping Test and Slug Test Data, 2002 – Waterloo hydrogeologic
2. Atlas hydrogeologiczny Polski zwykłych wód podziemnych w skali 1:500 000 – red. B. Paczyński, cz. I – 1993, cz. II – 1995
3. Bear J., 1972 – Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier. New York.
4. Bear J., Zaslavski D., Irmay S., 1971 – Physical Principles of Water Percolation and Seepage. Unesco, 1968. Translated into Russian.
5. Bedient P. B., Hanadi S. R., Newell Ch. J., 1994 – Ground water contamination. Transport and remediation. Prentice Hall PTR, New Jersey, p. 541.
6. Białostocki R., 1974 – Wytyczne do stosowania metod geofizycznych w badaniach hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich. Wyd. Geolog. Warszawa.
7. Bindemann N. N., Jazwin L.S., 1970 – Ocena eksploatacyjnych zasobów podziemnych wód. Nedra, Moskwa.
8. Błaszyk T., Byczyński H., 1986 – Wody podziemne. Zagrożenie i ochrona. Wyd. IKŚ Warszawa.
9. Błaszyk T., Górski J., 1978 – Zmiany jakości wód podziemnych w warunkach intensywnej eksploatacji. Wyd. Akc., Warszawa.
10. Błaszyk T., Górski J., 1979 – Dokumentowanie i prognozowanie zmian jakości wody na ujęciach zagrożonych przeobrażeniem środowisk hydrogeo-chemicznych. Wyd. Geol. Warszawa.
11. Błaszyk T., Górski J., 1981 – Ground water quality changes during exploitation. Ground Water, z. 1-2.
12. Błaszyk T., Macioszczyk A., 1993 – Klasyfikacja jakości zwykłych wód podziemnych dla potrzeb monitoringu środowiska. PIOŚ Warszawa Biblioteka Monitoringu Środowiska.
13. Bonnet M., Ungemach P., Suzanne P., 1967 – Interpretation des essais de pompage en regime transitoire. L'effet de puits et la postproduction. C.R. 86e congr, Assoc. fr. Avanc.sc. Chron. Hydrogeol. Nr 12. Bordeaux.
14. Borewskij B.W., Samsonow B.G., Jazwin L.S., 1973 – Opređenje gidrogeologiczeskich parametrov po dannym otkaczek. Nedra. Moskwa.
15. Boulton N.S., 1963 – analysis of data from non-equilibrium pumping test allowing for delayed yield from storage. Proc. Inst. Civil. Eng. 26, 469-482.
16. Castany G., 1972 – Poszukiwanie i eksploatacja wód podziemnych. Tłum. z francuskiego. Wyd. Geologiczne. Warszawa.
17. Castany G., 1982 – Hydrogeologie. Principes et methodes. Dunod, Paris.
18. Dąbrowski J., Mysiak M., 1973 – Ustalanie dopuszczalnych prędkości wlotowych miarodajnych do obliczania dopuszczalnych wydajności studni wierconych. Prace Naukowe Instytutu Inż. Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Nr17. Studia i Materiały 15. Wrocław.

19. Dąbrowski S., 1978 – Ocena zastosowania modelowania matematycznego do prognozowania zasobów eksploatacyjnych wód podziemnych. W: Rozpoznawanie wód podziemnych dla potrzeb gospodarki narodowej. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
20. Dąbrowski S., 1993 – Ocena zeskoku i sprawności technicznej studni ujęć wielootworowych na podstawie badań wzniosu zwierciadła wody. W: „Problemy ujmowania i ochrony wód podziemnych”, Wyd. UAM Poznań.
21. Dąbrowski S., 1997 – Uwagi dotyczące modeli matematycznych dla potrzeb hydrogeologii. W: Problemy wykorzystania wód podziemnych w gospodarce komunalnej. Materiały XII Symposium pt: „Modelowanie matematyczne w hydrogeologii i ochronie środowiska”, Częstochowa.
22. Dąbrowski J., Mysiak M., Siwoń Z., 1973 – Badanie wydajności studni i przepływów w rurach perforowanych. Prace Nauk. Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały 15, Wrocław.
23. Dąbrowski S., Przybyłek J., 1980 – Metodyka próbnych pompowań. Wyd. Geol., Warszawa.
24. Doktor, S., Graniczny M., Sokołowski M., 2004 – Co zrobić, żeby dowiedzieć się – czyli zasady udostępniania informacji geologicznej. Prz. Geol. T. 42, styczeń 2004.
25. Dupuit J., 1865 – Etudes theoretiques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux decouverts et a travers les terrains permeables. Paris.
26. Elbanowska H., Zerbe J., Górski J., Siepak J., 2001 – Fizyczno-chemiczne badania gruntów na potrzeby hydrogeologiczne. Wyd. Nauk. UAM, Poznań.
27. Emsellem Y., 1975 – Budowa modeli matematycznych w hydrogeologii. Zjedn. Przeds. Hydrogeol., PH w Poznaniu, Poznań (tłumaczenie z francuskiego).
28. Forchheimer P., 1930 – Hydraulic. 3 Aufgabe Leipzig-Berlin.
29. Forkasiewicz J., 1973 – Interpretacja wyników próbnego pompowania dla oceny parametrów warstw wodonośnych. ZPH – PH Poznań.
30. Forkasiewicz J., 1978 – Essais de puits par palier de debit. Analyse et interpretation des donnees. Doc. B.R.G.M. Orleans.
31. Gabryszewski T., 1983 – Wodociągi. Wyd. Arkady, Warszawa.
32. Gawriłko W.M., 1964 – Filtry studzien ujęciowych, odwodnieniowych i hydrogeologicznych, Wyd. Geol., Warszawa.
33. Gonet A., Macuda J., 1997 – Wiertnictwo hydrogeologiczne. Wydawnictwa AGH. Kraków.
34. Górski J., 1989a – Chemizm wód podziemnych utworów kenozoiku środkowej Wielkopolski. Zesz. Nauk. AGH Kraków. Z. 45.
35. Górski J., 1989b – Rozpoznanie tła hydrogeochemicznego miasta Mosiny. Sprawozdanie z realizacji zadania 02.06.06 w ramach CPBP 04.10.09, Maszynopis, IGPiK Poznań.
36. Górski J., 2001 – Propozycja oceny antropogenicznego zanieczyszczenia wód podziemnych na podstawie wybranych wskaźników hydrochemicznych. Współ. Probl. Hydrogeol. TX, Wrocław, s. 309-313.
37. Grenier B., 1985 – La pratique des pompages d'essai en hydrogeologie. Editions du BRGM. Orleans.
38. Haładus A., 1983 – Uwagi o obliczeniach dopływu do zespołu studni w warunkach ich współdziałania. Materiały seminaryjne IHiGI AGH (maszynopis). Kraków.
39. Haładus A., Kania J., Kulma R., Prażak J., 1997 – Weryfikacja zasobów wód podziemnych zlewni Górnej Kamiennej na podstawie badań modelowych. Materiały symposium pt. „Współczesne Problemy Hydrogeologii”, t. VIII. Wyd. Wind-Wrocław.
40. Hantush M.S., Jacob C.E., 1955 – Non steady radial flow in an infinite leaky aquifer. Am. Geophys. Union Trans., vol.36, 95-100.
41. Iciek A., Tkaczyk A., 1996 – Bank danych elektrooporowych i możliwości jego wykorzystania dla potrzeb hydrogeologii kartografii geologicznej i ochrony środowiska przyrodniczego. W: Problemy hydrogeologiczne południowo-zachodniej Polski. Zakład Geologii Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
42. Instrukcja obsługi wierceń hydrogeologicznych, 1981, Centralny Urząd Geologii, Wyd. Geologiczne., Warszawa.

43. Jacob C.E., 1946 – Radial flow in a leaky artesian aquifer. *Trans. Amer. Geophys. Un.*, 27, nr2, 198-208.
44. Jacob C.E., 1946a – Drawdown test to determine effective radius of artesian well. *Am. Soc. of Civil Eng. Papers*, May, vol.72.
45. Jacob C.E., 1950 – *Engineering Hydraulics (Flow of groundwater)*. Rouse. John Wiley & Sons. New York.
46. Jarodzki L., 1972 – Zasady obliczeń hydrogeologicznych ujęć wód podziemnych. Zeszyt 4: Wytyczne obliczeń współczynnika filtracji na podstawie polowych metod badań hydrogeologicznych. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
47. Kapuściński J., 1989 – Rola wyznaczania oporów hydraulicznych studni w prognozie zasobowej rejonów intensywnej eksploatacji na przykładzie modelu wykonanego dla Łomży. Materiały sympozjum Politechniki Krakowskiej pt. „Matematyczne modelowanie ujęć wody podziemnej”, Kraków.
48. Kapuściński J., Hulboj A., Aniołkowski W., 1999 – Wolny rynek a jakość prac hydrogeologicznych – próba diagnozy i propozycje działań. Materiały sympozjum pt. „Współczesne problemy hydrogeologii”, t. IX, Warszawa-Kielce.
49. Kazimierski B., Sadurski A. (red), 1999 – *Monitoring osłony ujęć wód podziemnych – metody badań*. PIG Warszawa.
50. Kazimierski B., 2002 – Metodyczne aspekty ustanawiania zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych. Materiały sympozjum pt. „Gospodarowanie zasobami wód podziemnych”, Wyd. PZLiTS, Częstochowa
51. Kleczkowski A.S. (red.), 1984 – *Ochrona wód podziemnych*. Wyd. Geol., Warszawa.
52. Kowalczyk A., Kropka J., Rubin K. 1997 – Zasoby wód podziemnych zbiornika triasowego (GZWP) Gliwice na podstawie badań modelowych. Materiały sympozjum pt. „Współczesne problemy hydrogeologii”, t. VIII. Wyd. Wind-Wrocław.
53. Kubisz E., Ratajczak W., 1972 – Przyczyny i wielkość zanieczyszczenia komunalnego ujęcia wód podziemnych w dolinie Odry. *Prz. Inform. IGK Wodociągi i kanalizacja* 5.
54. Kulma R., 1995 – *Podstawy obliczeń filtracji wód podziemnych*. Wyd. AGH, Kraków.
55. Macioszczyk T., 1969 – *Obliczenia hydrogeologiczne ujęć wód podziemnych*. Wydawnictwo „Prasa ZSL”. Warszawa.
56. Macioszczyk T., 1974 – Zmienność parametrów nieliniowej filtracji wód podziemnych. *Biul. Geol. Wydz. Geol. UW*, t. 4.
57. Macioszczyk T., Szestakow W.M., 1983 – *Dynamika wód podziemnych*. Wyd. Geologiczne. Warszawa.
58. Macioszczyk A., 1987a – *Hydrogeochemia*. Wyd. Geol. Warszawa.
59. Macioszczyk A., 1987b – System oceny jakości i stopnia zanieczyszczenia wód podziemnych eksploatowanych dla celów pitnych. *Prz. Geol.* Nr 12.
60. Macioszczyk A., Dobrzyński D., 2002 – *Hydrogeochemia strefy aktywnej wymiany wód*. Wyd. Nauk. PWN Warszawa.
61. Macioszczyk T., Rodzoch A., Frączek E. 1993 – Projektowanie stref ochronnych źródeł i ujęć wód podziemnych MOŚZNiL. Warszawa.
62. Marciniak M., 1999 – Identyfikacja parametrów hydrogeologicznych na podstawie skokowej zmiany potencjału hydraulicznego – metoda Paramex. Wyd. Nauk. UAM, Poznań.
63. Marciniak M., 2002: Metoda oceny stanu technicznego piezometrów na potrzeby monitoringu wód podziemnych. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
64. Marciniak M., Przybyłek J., Herzig J., Szczepańska J., 1999 – Badania współczynnika filtracji utworów półprzepuszczalnych. Wyd. Sorus, Poznań-Kraków.
65. Mogg J.L., 1969 – Step drawdown test needs critical revive. *Ground Water*, vol.7, nr 1.
66. Muskat M., 1937 – *The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media*. New York-London.
67. Okrasa T., Jagodziński A., 1978 – Wykorzystanie i praktyczne wdrożenie do badań hydrogeologicznych wyników kartowania geofizycznego (geoelektrycznego). W: *Rozpoznawanie wód podziemnych dla potrzeb gospodarki narodowej*. Wyd. Geolog. Warszawa.

68. Pazdro Z., 1977 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. II, Wyd. Geol., Warszawa.
69. Pazdro Z., 1983 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. III, Wyd. Geol., Warszawa.
70. Pazdro Z., Kozerski B., 1990 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa.
71. Pilch J., 1979 – Z doświadczeń prac eksportowych. Techn. Poszuk. Geol., nr 4.
72. Pleczyński J., Przybyłek J., 1974: Problematyka dokumentowania zasobów wód podziemnych w dolinach rzecznych. Wyd. Geol., Warszawa.
73. Podniewski A., 1963 – Analiza metod hydromechanicznych wyznaczania granicznych parametrów w zastosowaniu do studni zupełnych i grobli ziemnych. Prace Instytutu Gospodarki Wodnej, Tom I, Zesz. 3, Wyd. Komunikacji i Łączności, s: 11-65.
74. Polska Norma „Studnie wiercone, zasady projektowania, wykonania i odbioru”, Polski Komitet Normalizacyjny (22 grudnia 1994 r.).
75. Przybyłek J., Brylska E., Dąbrowski S., 1971 – Zasady obliczeń filtracji nieustalonej według wzorów Theisa i Hantusha. Wyd. Geol., Warszawa.
76. Rogoż M. (red.), 1987 – Poradnik hydrogeologa w kopalni węgla kamiennego. Wyd. Śląsk, Katowice.
77. Rorabaugh M.I., 1953 – Graphical and theoretical analysis of step drawdown test of artesian well. ASCE Proc., No 362, Vol.79.
78. Rudzki M., 2002 r. – Zastosowanie metody tomografii elektrooporowej do wykrywania podziemnych obiektów antropogenicznych. Publis. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., M – 25 (313).
79. Siwek Z., 1978 i 1979 – Amerykańskie mierniki usprawnienia ujęcia wód podziemnych, część I i II. Techn. Poszuk. Geol., nr 1.
80. Siwek Z., 1980 – Techniki usprawniania ujęć wód podziemnych, część I i II. Techn. Poszuk. Geol., nr 4 i 5.
81. Siwek Z., Mańkowski M., 1981: Wyznaczanie parametrów hydraulicznych ujęcia wód podziemnych na podstawie pompowań próbných. Wyd. Geologiczne. Warszawa.
82. Słownik hydrogeologiczny, 2002 – praca zbiorowa, red. J. Dowgiałło i inni.
83. Soczyńska U., (red.), 1997 – Hydrologia dynamiczna. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
84. Stenzel P., Szymanko J., 1973 – Metody geofizyczne w badaniach hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich. Wyd. Geologiczne. Warszawa.
85. Szczepański A., 1974 – Prognozowanie wydajności i warunków eksploatacji wód podziemnych metodą analogii hydraulicznych. Pr. Geol. Nr 81 PAN, Wyd. Geol. W-wa.
86. Szczepański A., 1977 – Dynamika wód podziemnych. Wyd. Geologiczne. Warszawa.
87. Szczepański A., 1979 – Eksploatacyjne zasoby złóż wód podziemnych na tle schematyzacji warunków obliczeń. Zeszyty Naukowe AGH, t.5, z.1, Kraków
88. Szymanko J., 1980 – Koncepcje systemu wodonośnego i metod jego modelowania. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
89. Śmietański Z. (red. nauk.), 1972 – Modelowanie filtracji wód podziemnych w rejonach ujęć wodnych. Wyd. Geol. Warszawa.
90. Theis C.V., 1935 – The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage. Am. Geophys. Trans., vol.16, 519-524.
91. Thiem G., 1906 – Hydrologische Methoden. Leipzig.
92. Turek S. – red. (praca zbiorowa), 1971 – Poradnik hydrogeologa, Wyd. geol., Warszawa.
93. Ustalanie dyspozycyjnych zasobów wód podziemnych, 1996 – (Autorzy: B. Paczyński, T. Macioszczyk, B. Kazimierski, J. Mitreğa). MOŚNiL – Wyd. TRIO, Warszawa.
94. Walton W.C., 1962 – Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. III. St. Water Surv., Bull, 49.
95. Wieczysty A., 1970 – Hydrogeologia inżynierska. PWN. Warszawa.
96. Witczak S., Adamczyk A., 1994 T.I; 1995 T.II – Katalog wybranych fizycznych i chemicznych wskaźników zanieczyszczeń wód podziemnych i metod ich oznaczania. PIOŚ Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.
97. Zuber A., 1986 – Zastosowanie metod znacznikowych w zagadnieniach ochrony wód podziemnych. Część I. Metody izotopowe. Sprawozdanie do zadania 02.04.01 pt. „Katalog pod-

- stawowych parametrów migracji niezbędnych do wyznaczenia stref ochronnych – instrukcja metodyczna”. AGH Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie.
98. Żurek A., 1996 – Model bilansowy głównego zbiornika wód podziemnych GZWP 333 Opole-Zawadzkie jako narzędzie sterowania jakością wód podziemnych. Problemy hydrogeologiczne południowo-zachodniej Polski. T. IV., Wrocław, s. 137-144.

Literatura uzupełniająca

1. Jarodzki L. (red. – praca zbiorowa), 1971 – 1977 – Zasady obliczeń hydrogeologicznych ujęć wód podziemnych, Wyd. Geol. W-wa.
 - Zeszyt 1: Wieczysty A., Flisowski J., 1971 – Wytyczne obliczeń statycznych i dynamicznych zasobów wód podziemnych. Zasady obliczeń hydrogeologicznych ujęć wód podziemnych.
 - Zeszyt 2: Wieczysty A., Flisowski J., 1971 – Wytyczne obliczeń wydatku pojedynczych ujęć wód podziemnych.
 - Zeszyt 3: Dąbrowski J., Mysiak M., 1971 – Wytyczne obliczeń dopuszczalnych prędkości wlotowych wody do studni.
 - Zeszyt 4: Jarodzki L. 1972 – Wytyczne obliczeń współczynnika filtracji na podstawie polowych metod badań hydrogeologicznych.
 - Zeszyt 5: Flisowski J. Wieczysty A., 1977 – Wytyczne obliczania wydatku zespołowych ujęć wód podziemnych.
 - Zeszyt 6: Kozerski B., 1977 – Wytyczne określenia współczynnika filtracji metodami pośrednimi i laboratoryjnymi.
2. Gabryszewski T. Wieczysty A., 1985 – Ujęcia wód podziemnych. Wyd. Arkady, Warszawa.
3. Kapuściński J., Nagy S., Długosz P., Biernat H., Bentkowski A., Zawisza L., Macuda J., Buja-kowska K., 1997 – Zasady i metodyka dokumentowania zasobów wód termalnych i energii geotermalnej oraz sposoby odprowadzania wód zużytych, Wyd. „Borgis”, Warszawa.
4. Kruseman G.P., de Ridder N.A. 1989 – Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, ILRI publ. 47, Sec. Ed.
5. Lane H.S., Lee W.J., Watson A.T., 1991 – An Algorithm for Determination Smooth, Continuous Pressure Derivatives From Well Test Data, SPE Formation Evaluation, Dec.
6. Lee J. 1982 – Well Testing, SPE Textbook Series, Vol.1, SPE, Dallas.

Indeks haseł

B

badania geofizyczne, 80, 81, 82, 91, 93, 97, 100, 190, 192
 metody geoelektryczne, 93
 metoda elektrooporowa, 93, 94, 95
 metoda naturalnego potencjału elektrycznego, 93
 tomografia elektrooporowa, 97
 metody geotermiczne, 98
 metody radiometryczne, 93, 97, 98
badania modelowe *patrz* modelowanie matematyczne
bilans zasilania ujęcia, 17, 54, 170, 181, 191

D

denitryfikacja, 68, 70
depresja zwierciadła wody, 13, 52, 143, 144
 całkowita, 15, 52, 59, 181
 dodatkowa (zeskok hydrauliczny), 15, 52
 dopuszczalna, 16
 maksymalna, 53, 54
 regionalna, 16
 rejonowa, 15, 16, 54, 181, 196
 rzeczywista, 15, 52, 56, 59, 116
 wypadkowa, 16
dokumentacja hydrogeologiczna, 17, 22, 24, 86, 87, 113, 125, 137, 163, 169, 173, 189, 198, 199, 200
 likwidowanego otworu, 107
 zasobów dyspozycyjnych, 91, 92
 zasobów eksploatacyjnych, 8, 137, 189, 199, 200
 karta zasobowa, 192
 przyjęcie, 24, 89, 106

 dopływ do studni, 15, 36, 37, 42, 43, 44, 56, 110, 119, 150, 155, 156, 183
 płasko-radialny, 43, 52
 sferyczno-radialny, 43, 188
 zanieczyszczeń, 67, 138
drenaż, 35, 48, 62, 187

E

eksploatacja wód, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 26, 27, 35, 51, 52, 54, 55, 60, 61, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 82, 86, 88, 91, 106, 108, 116, 129, 131, 133, 136, 137, 139, 143, 152, 153, 154, 155, 157, 166, 167, 168, 170, 171, 172, 176, 180, 181, 182, 184, 186, 187, 188, 190, 191, 192, 194, 195, 197, 198, 200
 nadmierna, 7
 skupiona, 8, 86, 198
ewapotranspiracja, 17, 34

F

filtracja
 nieustalona, 37, 46, 116, 119, 121, 125, 144, 150, 151, 171, 176, 188, 198
 pionowa, 28, 47
 płasko-radialna, 27
 pozioma, 28
 sferyczno-radialna, 27
 trójosiowa (trójwymiarowa), 52
 ustalona, 144, 174, 179, 188
filtrowanie otworów, 101
 dobór siatek filtracyjnych, 102

G

gradient hydrauliczny, 35, 40, 41, 44
 granice warstw wodonośnych, 26
 dolne, 35
 górne, 35
 naturalne, 34
 szczelne, 26, 36
 zasilające, 27, 126

I

infiltracja
 efektywna, 26, 38, 139
 strefowa, 27
 infiltracja wód powierzchniowych, 15, 17, 26
 naturalna, 27
 sztuczna, 27

J

jakość wody, 8, 12, 22, 60, 61, 62, 70, 72, 73,
 75, 76, 77, 81, 86, 87, 90, 100, 101, 129,
 130, 133, 134, 136, 137, 140, 142, 182, 184,
 186, 190, 192, 194, 195, 196, 199, 201

K

krzywa depresji, 41, 42, 43, 44

L

lej depresji, 13, 15, 16, 17, 30, 36, 37, 42, 51,
 82, 108, 109, 110, 111, 116, 120, 122, 143,
 144, 145, 148
 linie ekwipotencjalne, 36, 37
 linie prądu, 36, 37, 172, 178

M

miąższość
 nadkładu, 83
 strefy aeracji, 139
 warstwy wodonośnej, 16, 34, 40, 41, 51, 53,
 101, 120, 121, 144, 146, 148
 międzynarodowy słownik hydrologiczny, 10
 modelowanie matematyczne, 33, 59, 82, 154,
 158, 159, 163, 164, 166, 167, 168, 169, 170,
 171, 174, 179, 181, 182, 184
 identyfikacja modelu, 171
 interpretacja wyników, 94
 prognozy symulacyjne, 172

programy obliczeniowe, 174
 skala modelu, 166
 struktura modelu, 170, 171
 weryfikacja modelu, 172
 moduł odnawialności, 35
 monitoring wód podziemnych, 61, 199
 lokalny, 141
 osłonowy, 137, 191, 200

O

obszar górniczy, 21, 23
 obszar spływu wody do ujęcia, 13, 15, 27, 34,
 78, 143, 155, 156, 157, 163, 172, 192
 obszar wpływu ujęcia, 13, 15, 78, 82, 110, 121,
 143, 155, 157, 163, 165, 172, 196
 obszar zasilania ujęcia, 13, 15, 34, 80, 81, 87,
 138, 143, 145, 153, 164, 169, 170, 181, 190,
 199, 200
 obszar zasobowy ujęcia, 13, 15, 78, 80, 87, 88,
 90, 91, 143, 155, 157, 163, 164, 165, 174,
 181, 190, 191, 192, 194, 197, 198
 ochrona jakości wód, 8, 22, 24, 191, 195
 ochrona środowiska, 99
 odsączalność, 30
 ogniska zanieczyszczeń, 60, 62, 63, 67, 73, 77,
 80, 81, 83, 87, 92, 137, 139, 140, 169, 183,
 184, 190, 192, 196, 197
 okna hydrogeologiczne, 32, 33, 169
 opory filtracyjne (hydrauliczne) studni, 41,
 52, 56

P

parametry filtracyjne, 33, 51, 52, 108, 110,
 116, 122, 173, 174
 parowanie, 35
 plan ruchu zakładu górniczego, 23
 pojemność wodna, 26, 28, 30
 porowatość, 28, 30, 34, 139
 poszukiwanie wód podziemnych, 19, 20, 22
 poziom wodonośny, 26, 27, 28, 32, 33, 48, 82,
 137, 138, 158
 o pełnej więzi hydraulicznej, 27, 33
 o więzi ograniczonej, 27
 o więzi strefowej, 27, 32
 pozwolenie wodnoprawne, 22, 25, 86, 87, 88,
 92, 200
 prace geologiczne, 7, 8, 19, 20, 21, 25, 78, 79,
 80, 82, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 104, 105, 106,
 107, 116, 118, 129, 189
 prędkość filtracji, 139
 dopuszczalna, 55

graniczna, 40
 rzeczywista, 40
 prognozowanie
 wydajności, 143, 144
 zmian jakości, 129, 182, 184
 projekt prac geologicznych, 20, 22, 23, 24, 79, 80, 88, 90, 99, 103, 105, 106, 166, 196
 decyzja zatwierdzając projekt, 23, 189
 karta projektowanego ujęcia, 83
 zatwierdzanie, 23
 próbné pompowania, 22, 24, 46, 52, 99, 103, 104, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 117, 119, 122, 123, 124, 125, 129, 154, 156, 168, 172, 173, 181, 187, 192, 194
 hydrowęzłowe, 110, 118, 125
 jednostopniowe, 110, 116
 jednostopniowe powtarzalne, 111, 112
 oczyszczające, 59, 190
 test studni, 110
 test systemu wodonośnego, 110
 test warstwy wodonośnej, 110
 przemiany (procesy) hydrogeochemiczne, 12, 60, 61, 72, 75, 77, 133, 184, 185, 186, 195, 196
 przepływ
 laminarny, 56, 57
 turbulentny, 51, 56, 57
 przesiąkanie, 26, 35, 44, 45, 47, 151
 z warstwy nadległej, 27
 z warstwy podścielającej, 27

R

regionalny zarząd gospodarki wodnej, 7, 8, 19, 90, 200
 roboty geologiczne, 21, 22, 23, 86
 rozpoznawanie wód podziemnych, 7, 13, 19, 20, 22, 93
 ruch laminarny, 40
 ruch turbulentny, 40
 ruch zakładu górniczego, 21

S

schemat obliczeniowy, 51, 119
 Boultona, 27, 46, 47, 48, 119, 122, 123, 125, 126
 Dupuita, 27, 44, 45, 123, 144, 145, 149, 155, 188
 Theisa, 27, 46, 110, 113, 116, 117, 119, 122, 123, 125, 144, 151, 188
 schematyzacja hydrogeologiczna, 26, 27, 28, 31, 51, 97, 143, 166, 173, 175, 187, 194

siatka hydrodynamiczna, 152, 155
 skażenie wód, 61
 spadek hydrauliczny, 139, 164
 sprawność studni, 51, 56, 59, 87, 143, 195, 196
 strefa
 aeracji, 33, 34, 63, 67, 68, 75, 77, 98, 134, 139, 169, 171, 176, 186
 saturacji, 33, 134, 139
 strefa ochronna, 8, 13, 24, 81, 90, 91, 137, 138, 139, 140, 164, 169, 191, 192, 194, 199, 200
 teren ochrony bezpośredniej, 199
 teren ochrony pośredniej, 22, 137
 strefy hydrogeochemiczne, 66, 73
 strumień filtracyjny wód podziemnych, 15, 26, 27, 38, 52, 154, 181
 studnie, 15, 16, 24, 27, 31, 32, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 48, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 64, 65, 69, 71, 73, 75, 86, 87, 88, 89, 100, 108, 109, 110, 111, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 125, 130, 131, 132, 135, 140, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 156, 166, 169, 170, 172, 177, 181, 188, 190, 191, 192, 194, 195, 196, 200, 201
 awaryjne, 24
 likwidacja, 89, 104, 107, 108
 niezupełne, 41, 54, 56, 142
 stan techniczny, 57, 58, 59
 zastępcze, 24
 zupełne, 40, 142, 145
 system wodonośny, 11, 15, 28, 33, 49, 50, 52, 118, 119, 157, 166, 171

Ś

środowisko hydrogeochemiczne, 64, 73, 130, 133, 135, 136, 183, 185
 przemiany, 12, 60, 61, 72, 75, 77, 133, 184, 185, 186, 196

T

teoria odbić zwierciadlanych, 35
 teren ochrony bezpośredniej, 13
 teren ochrony pośredniej, 13, 192

U

ujęcia
 dolinne, 163
 infiltracyjne, 79, 82, 98, 129, 170
 małe, 80, 87, 138

w obszarach o zagrożonej jakości wód, 83
 w obszarach odwodnienia kopalnianego
 (górniczego), 79
 w specyficznych warunkach, 78, 79, 82, 88, 188
 w terenach ograniczonego użytkowania,
 79, 83
 współdziałające, 79

W

warstwa wodonośna, 26, 28, 35, 46, 108, 109,
 110, 114, 116, 122, 123, 126, 147, 148, 175,
 177, 186
 nieograniczona, 27, 36, 41, 42, 45, 122,
 123, 126, 144, 148, 150
 o zwierciadle naporowym, 26, 31, 177, 178
 o zwierciadle naporowym (napiętym), 16,
 27, 31, 34, 42, 53, 110, 111, 116, 144,
 145, 146, 147, 148, 177
 o zwierciadle swobodnym, 16, 26, 27, 28,
 31, 32, 35, 37, 43, 46, 53, 101, 108, 110,
 116, 122, 123, 126, 144, 145, 146, 147,
 148, 150, 157, 178
 ograniczona, 122
 warunki brzegowe, 37, 54, 170, 171, 174, 179
 I rodzaju (Dirichleta), 38, 170
 II rodzaju (Neumanna), 38
 III rodzaju (Cauchy'ego), 38
 warunki dopływu
 nieustalone, 46
 ustalone, 41
 warunki graniczne, 35, 37, 51, 52, 108, 111,
 143, 151, 178
 warunki początkowe, 37, 173
 warunki zasilania
 złożone, 17
 właściwości filtracyjne skał, 28
 wniosek zasobowy, 147, 155, 181, 189, 192,
 194, 195, 198
 wodoprzepuszczalność, 28, 40
 współczynnik
 filtracji, 28, 31, 34, 40, 45, 51, 52, 54, 55,
 105, 108, 112, 116, 144, 145, 148, 156,
 164, 171, 190, 191
 fluacji, 40
 odsączalności, 31, 34, 46, 47, 51, 52, 108,
 110, 111, 113, 120, 154, 171
 piezoprzewodności, 34, 51, 52, 151
 przesiąkania, 46
 współdziałanie ujęć, 8, 53, 91, 181, 188
 wysokość hydrauliczna (wysokość naporu),
 15, 31, 34, 35, 38, 44, 53, 54, 58, 123

Z

zagrożenia jakości wód
 antropogeniczne, 8
 geogeniczne, 60
 zanieczyszczenie wód, 61, 68, 71
 antropogeniczne, 60, 61, 70, 71, 72, 130,
 137, 140, 172
 zasięg leja depresji, 45, 143, 190
 zasilanie, 32, 35, 44, 48, 83, 138, 172, 187
 infiltracyjne, 35
 moduł zasilania, 157, 159
 zasoby wód podziemnych
 dodatkowe, 17
 dynamiczne, 10, 16, 17, 18, 143, 153, 154
 stałe, 16
 zmienne, 16
 dyspozycyjne, 7, 10, 11, 12, 13, 80, 86, 87,
 90, 91, 92, 160, 169, 172, 191, 194
 eksploatacyjne, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 16,
 18, 19, 26, 27, 35, 37, 49, 51, 52, 60, 80,
 81, 85, 86, 87, 88, 91, 92, 137, 138, 142,
 143, 145, 147, 150, 151, 152, 153, 154,
 157, 166, 167, 168, 169, 171, 172, 173,
 174, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192,
 194, 196, 197, 198
 aktualizacja, 86, 87, 88
 ustalanie, 7, 8, 9, 20, 80, 143, 166, 170,
 179
 weryfikacja, 83, 87, 163, 198
 nienaruszalne, 12
 odnawialne, 7, 10, 12, 143, 145
 sprężyste, 16, 122
 statyczne, 10, 16, 17, 153, 154
 stałe, 16
 sztuczne, 10
 uzupełniające (wzbudzone), 153
 wzbudzone, 10, 17, 18, 191
 zbiorniki wód podziemnych, 8, 15, 48, 169,
 198
 główne, 19, 48, 49, 91, 160, 161, 162, 184
 lokalne, 48
 miejscowe, 48
 zeskok hydrauliczny, 15, 51, 52, 59, 117
 zwierciadło wody
 dynamiczne, 15, 16, 38, 42, 110, 112, 116,
 117, 122, 125, 144, 148, 156
 statyczne, 15, 16, 36, 37, 144

Ź

źródło naturalne, 13