

WYZNACZANIE ZMIAN ZASOBÓW WÓD PODZIEMNYCH W REJONACH ZBIORNIKÓW MAŁEJ RETENCJI

pod redakcją

Janusza Michalaka i Zbigniewa Nowickiego

Informator

PAŃSTWOWEJ SŁUŻBY HYDROGEOLOGICZNEJ



KRAJOWY ZARZĄD
GOSPODARKI WODNEJ



Sfinansowano ze środków
Narodowego Funduszu Ochrony
Środowiska i Gospodarki Wodnej

**Państwowy Instytut Geologiczny
Warszawa 2009**

Zespół autorski:

Tomasz GRUSZCZYŃSKI, Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii,
ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa;

Paweł LEŚNIAK, Polska Akademia Nauk. Instytut Nauk Geologicznych,
ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa;

Janusz MICHALAK, Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii,
ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa;

Zbigniew NOWICKI, Państwowy Instytut Geologiczny,
ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa.

Redaktorzy wydawnictwa: *Janina Malecka, Teresa Lipniacka*

Projekt okładki: *Wojciech Markiewicz*

Zdjęcie na okładce: *Zbigniew Nowicki*

Akceptował do druku 23.03.2009 r.

Dyrektor ds. państwowej służby hydrogeologicznej

dr *Lesław SKRZYPCZYK*

© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 2009

ISBN 978-83-7538-451-2



Druk i oprawa: Argraf sp. z o.o.

03-301 Warszawa, ul. Jagiellońska 76, tel. 0 22 811 51 11

www.argraf.pl

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	5
2. Rola małej retencji w aspekcie przyrodniczym, gospodarczym i ekonomicznym	6
3. Zasoby wód podziemnych w świetle przepisów prawnych	11
4. Klasyfikacje zbiorników małej retencji	16
5. Zbiorniki małej retencji w Polsce przed 1939 r.	19
6. Warunki hydrogeologiczne lokalizacji zbiornika	21
7. Hydrodynamiczne podstawy oddziaływania zbiornika zaporowego na wody podziemne	23
7.1. Zmiana pola filtracji wywołana podpiętrzeniem wód powierzchniowych	23
7.2. Wododział podziemny w ujęciu hydrodynamicznym – jako skutek, a nie przyczyna	24
7.3. Zmiana położenia wododziału podziemnego – zmiana powierzchni zlewni podziemnej	24
7.4. Zmiana gradientów hydrodynamicznych i związanych z tym wielkości przepływów	25
8. Potencjalne zmiany środowiskowe wywołane podpiętrzeniem wód powierzchniowych i podziemnych	27
9. Zasoby wód podziemnych i ich związek z wodami powierzchniowymi	32
9.1. Klasyfikacja zasobów wód podziemnych i podstawowe pojęcia	32
9.2. Wpływ zmiany warunków hydrogeologicznych na zmianę zasobów	35
9.3. Rodzaje oddziaływań wód powierzchniowych na zasoby wód podziemnych	37
9.4. Aspekty przestrzenne zasobów wód podziemnych i ich zmian pod wpływem antropopresji	38
9.5. Aspekty czasowe zasobów wód podziemnych	39
10. Przegląd metod wyznaczania zasobów	42
10.1. Klasyfikacja metod wyznaczania zasobów	42

10.2. Metody hydrologiczne wyznaczania zasobów wód podziemnych i ich zastosowanie w rejonach zbiorników małej retencji	45
10.3. Metody oparte na modelowaniu pola filtracji	50
10.4. Metody mieszane	52
10.5. Metody oparte na modelowaniu pola filtracji z uwzględnieniem bilansu hydrologicznego.	53
10.6. Metody wyznaczania zmian zasobów w wyniku działalności człowieka – w tym podpiętrzenia wód powierzchniowych	54
11. Zastosowanie metod modelowania pola filtracji do określania zmian warunków hydrogeologicznych wywołanych podpiętrzeniem	56
11.1. Ogólny opis metod wykorzystujących modele przepływu	56
11.2. Ograniczenia metod wykorzystujących modele i warunki ich stosowania	58
12. Określanie zasobów wód podziemnych na podstawie badań modelowych pola filtracji	60
12.1. Model jako narzędzie do szczegółowego bilansowania przepływów wód podziemnych	60
12.2. Sposoby uwzględniania powiązania w modelu wód podziemnych z wodami powierzchniowymi.	61
12.3. Specyfikowanie warunków ograniczających zasoby wód podziemnych wynikających z wymagań ochrony środowiska i ze względu na jakość wody podziemnej.	61
12.4. Wyznaczanie przestrzennej zmienności zasobów wód podziemnych	63
13. Uwagi metodyczne dotyczące procedury budowy modelu numerycznego dla oceny zmian zasobów	65
14. Przykłady zastosowania metod modelowania pola filtracji do określania zmian zasobów	70
14.1. Przykład 1. Zlewnia rzeczna jako obszar bilansowy	70
14.2. Przykład 2. Zmiany zasobów wód podziemnych w warunkach dobrego kontaktu zbiornika z wodami podziemnymi	80
14.3. Przykład 3. Zmiany zasobów wód podziemnych w warunkach utrudnionego kontaktu z wodami powierzchniowymi	85
15. Podsumowanie wyników badań modelowych.	80
Literatura	92
Podstawowe terminy hydrologiczne i hydrotechniczne	96
Dodatek. Model pojęciowy oddziaływania wód powierzchniowych na wody podziemne	99

1. WSTĘP

Wśród krajów europejskich Polska należy do grupy krajów ubogich w zasoby wodne. W przeliczeniu na jednego mieszkańca nasze zasoby wody są 3 do 5 razy mniejsze niż w krajach takich jak Niemcy, Francja, a także w krajach rejonu śródziemnomorskiego – w Hiszpanii i Włoszech. W Polsce wody podziemne stanowią ponad 50% wód pobieranych na cele komunalne, przemysłowe i rolnicze, pozostała część to wody powierzchniowe, często złej jakości i wymagające kosztownego uzdatniania.

Możliwości znaczącego zwiększenia zasobów wody są bardzo ograniczone, jednak nawet niewielki ich wzrost, szczególnie w przypadku wód podziemnych jest nie tylko bardzo pożądanym, ale także realnie możliwym. Jednym ze sposobów zwiększenia zasobów wód są działania zmierzające do zwiększenia retencji zarówno powierzchniowej, jak i podziemnej.

Sposoby zwiększania retencji dzielą się na naturalne i sztuczne. Mianem naturalnych określa się te sposoby, które polegają na przywracaniu naturalnych pierwotnych warunków środowiskowo-wodnych, na przykład zwiększeniu stopnia lesistości lub przywróceniu naturalnych warunków panujących kiedyś w środowiskach wodno-błotnych. Do sposobów sztucznych zalicza się wszelkiego rodzaju budowle hydrotechniczne, bez względu na ich wielkość. Mogą to być zarówno duże zbiorniki zaporowe, jak i małe groble.

Ze względu na czynniki ekonomiczne i sposób oddziaływania na środowisko szczególną rolę odgrywa w tych działaniach tak zwana mała retencja, której istotą jest wielka liczba małych przedsięwzięć rozproszonych na dużym obszarze. W tej działalności mieszczą się także rozproszecznione ostatnio inicjatywy budowy małych zbiorników zaporowych nazywanych zbiornikami małej retencji.

2. ROLA MAŁEJ RETENCJI W ASPEKcie PRZYRODNICZYM, GOSPODARCZYM I EKONOMICZNYM

Retencja wody rozumiana jako spowolnienie jej przemieszczania się stanowi bardzo istotny czynnik w obiegu wody w przyrodzie. Zjawisko to występuje głównie w fazach obiegu, które mieszczą się w przedziale od chwili dotarcia wody atmosferycznej na powierzchnię terenu do chwili dotarcia wody płynącej w ciekach do morza lub oceanu. Biorąc pod uwagę podział obiegu na te fazy można mówić o retencji:

- wody, która zatrzymała się w strefie powierzchni terenu, na przykład na roślinności (biosfera), na budynkach i innych urządzeniach zbudowanych przez człowieka (technosfera), na powierzchni terenu, w tym także woda w postaci śniegu i lodu, gdy występują temperatury ujemne;
- wody spływającej po powierzchni terenu. W tym przypadku zakłada się, że woda znajduje się w ruchu i jej prędkość zależy głównie od nachylenia powierzchni terenu, od mikro-rzeźby tej powierzchni i od rodzaju pokrycia;
- wody, która infiltrowała w głąb pod powierzchnię terenu i przemieszcza się przez strefę aeracji w dół do strefy saturacji. W tym przypadku o wielkości retencji decydują głównie parametry geometryczne i hydrodynamiczne tej strefy i panująca tam dodatnia lub ujemna temperatura. Innym istotnym czynnikiem jest w tym przypadku stan występującej tam fazy gazowej – czy faza ta (powietrze, para wodna) mogą się swobodnie przemieszczać. Brak tej możliwości istotnie zwiększa retencję strefy aeracji, ponieważ obie te fazy mogą sobie wzajemnie utrudniać tą wędrówkę – wody w dół i konieczną w takim przypadku wędrówkę fazy gazowej do góry;
- wody płynącej w ciekach. Wielkość retencji w ciekach zależy głównie od spadku (nachylenia lustra wody w cieku), parametrów hydraulicznych koryta cieku, a także od ukształtowania powierzchni terenu w bezpośrednim (a często także dalszym) sąsiedztwie koryta. W tym przypadku jest to konsekwencją wahań poziomu wody w cieku przy ich wysokich stanach, gdy woda płynąca korytem występuje z brzegów i rozlewa się (często bardzo szeroko) po tarasach zalewowych. W przypadku wody płynącej w ciekach również istotne znaczenie ma fakt czy temperatura jest dodatnia czy ujemna, ponieważ zamrażanie powierzchni cieku pogarsza hydrauliczne warunki przepływu, a spływająca kora może powodować powstawanie zatorów i w konsekwencji dużych niekontrolowanych rozlewisk.

Retencja wody w przyrodzie jest zazwyczaj zjawiskiem korzystnym i do jej pozytywnych skutków można zaliczyć:

- zwiększenie wilgotności w strefie powierzchni terenu, a w szczególności w glebie, co ma podstawowe znaczenie dla rozwoju biosfery,

- wzrost wilgotności powietrza w przypowierzchniowej warstwie atmosfery, co przekłada się na łagodniejszy klimat,
- wzrost zasobów wód powierzchniowych i podziemnych,
- wyrównanie (złagodzenie) zmienności przepływów w ciekach, a w szczególności złagodzenie kulminacji fal powodziowych i także głębokich niżówek. Skutki powodzi są powszechnie znane i nie wymagają szczegółowego opisu, jednak głębokie niżówki są często katastrofalne dla życia biologicznego w wodach powierzchniowych i obszarach bagiennych, a także powodują wzrost koncentracji zanieczyszczeń, co w konsekwencji prowadzi do bezużyteczności tych wód.

Retencja wody jest zjawiskiem naturalnym i w środowisku nie przeobrażonym przez człowieka w naszych warunkach klimatycznych jest z reguły wysoka. Działalność człowieka może w istotny sposób zmienić wielkość retencji naturalnej jakiegoś określonego obszaru lub elementu uczestniczącego w obiegu wody w przyrodzie. Niestety, w większości przypadków ingerencji człowieka mamy do czynienia ze zmniejszeniem się retencji, co jest zjawiskiem niekorzystnym.

Przeciwdziałanie zmniejszaniu się retencji – spowodowanemu działalnością gospodarczą zarówno rolniczą, jak i przemysłową i urbanizacyjną – jest jednym z podstawowych działań racjonalnej gospodarki wodnej. Działania zmierzające do zwiększenia retencji wodnej można podzielić na dwie grupy:

- działania przywracające retencję naturalną, nazywane często metodami nietechnicznymi. Do tej grupy należą między innymi: zwiększanie stopnia lesistości terenu, przywracanie pierwotnego stanu podmokłości i bagien, a także odtwarzanie naturalnego stanu (renaturyzacja) wód powierzchniowych i ich najbliższego otoczenia, w tym w szczególności dolin rzecznych.
- działania techniczne prowadzące do powstawania retencji sztucznej. W tej kategorii znajdują się wszelkie budowle piętrzące, zaczynając od małych grobli podnoszących o kilkadziesiąt centymetrów poziom wody w obrębie podmokłości, a kończąc na wielkich sztucznych zbiornikach zaporowych.

Istotnym czynnikiem w planowaniu działań zmierzających do zwiększenia retencji wody jest analiza ekonomicznej efektywności tych działań. Wiele analiz ekonomicznych wykonanych w tym zakresie wykazuje, że małe przedsięwzięcia są znacznie bardziej ekonomiczne. Według danych przedstawionych przez Centrum Koordynacji Projektów Środowiskowych koszt retencjonowania 1 m³ wody w dużych zbiornikach retencyjnych wynosi od 15 do 40 zł, a w zbiornikach małej retencji mieści się w granicach 2 do 5 zł. Tak zwana mała retencja, obok zdecydowanej przewagi w aspekcie ekonomicznym – jest kilkakrotnie tańsza – ma również wiele zalet w trudnym do wycenienia aspekcie środowiskowym:

- bardzo często jest to przywracanie naturalnych warunków wodnych otoczenia,
- jeżeli zmienia warunki środowiskowe, to w sposób łagodny i jedynie lokalnie,
- wiele małych przedsięwzięć zlokalizowanych na określonym obszarze daje rezultat znacznie lepszy niż jedno duże. Wynika to z równomierności rozłożenia efektów i zmniejszenia odległości pomiędzy miejscem lokalizacji przedsięwzięcia a miejscami, w których spodziewamy się pozytywnych rezultatów.

Szczególną rolę w małej retencji pełnią małe sztuczne zbiorniki wodne, nazywane także zbiornikami małej retencji. Kryteria kwalifikowania, które zbiorniki należy zaliczyć do zbiorni-

ków małej retencji nie są jednoznacznie określone. Najczęściej przyjmuje się (Mioduszewski, 2006), że są to zbiorniki o wysokości piętrzenia mniejszej niż 5 m lub/i o pojemności mniejszej niż 500 tys. m³ (lub mniejszej niż 1 mln m³), z zastrzeżeniem, że tak zwane mikrozbiorniki o piętrzeniu do 0,5 m lub o pojemności poniżej 100 tys. m³ nie mają istotnego znaczenia w tworzeniu retencji wody i z tego względu nie są brane pod uwagę. Bez znajomości dokładnych parametrów technicznych zbiornika trudno jest ustalić czy konkretny zbiornik należy do kategorii zbiorników małej retencji. W takich przypadkach można posłużyć się uproszczonymi wzorami pozwalającymi oszacować pojemność zbiornika (V), gdy zna się jego długość (L), szerokość (S) i wysokość piętrzenia (H). Najprostszy schemat przedstawiony jest na figurze 2.1.

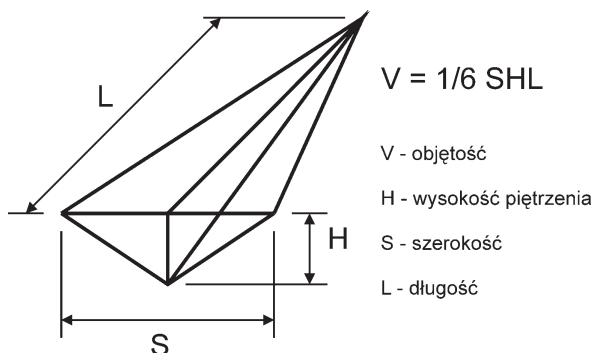


Fig. 2.1. Prosty schemat szacowania pojemności zbiornika

Podobny, jednak nieco inny wzór na pojemność zbiornika, bo uwzględniający często spotykane w takich przypadkach płaskie dno doliny na odcinku podpiętrzenia podaje Mioduszewski (2006):

$$V = 0,4 HA$$

gdzie:

A – powierzchnia zbiornika.

Wzory te pozwalają na określenie przybliżonych wymiarów przeciętnego zbiornika małej retencji, czyli o pojemności w granicach od 200 tys. do 400 tys. m³ i wysokości piętrzenia w granicach od 2 do 4 m. Zestawienie tych wymiarów jest przedstawione w tabeli 2.1.

Wszelkie budowle piętrzące oddziałują na warunki panujące na powierzchni terenu, ale także na wody podziemne. Oddziaływanie to przejawia się głównie poprzez podniesienie naturalnej podstawy drenażu wód podziemnych w obszarze czaszy zbiornika, który powstał w wyniku podpiętrzenia wód powierzchniowych. Zmienia to istotnie warunki hydrogeologiczne panujące w bliskim, a także częściowo dalszym sąsiedztwie zbiornika. Do najistotniejszych zmian należy zaliczyć:

- zmniejszenie się głębokości położenia zwierciadła wody podziemnej, a w szczególnych przypadkach powstawanie podtopień na powierzchni terenu, gdy rzędna zwierciadła jest wyższa niż rzędna terenu;
- wynikiem tego jest zwiększenie się parowania terenowego i w konsekwencji zmniejszenie zasilania warstwy wodonośnej przez infiltrację opadów atmosferycznych;

Tabela 2.1

Typowe wymiary przeciętnego zbiornika małej retencji

Wysokość piętrzenia	Kształt zbiornika	Objętość zbiornika: $V \approx 200$ tys. m^3		Objętość zbiornika: $V \approx 400$ tys. m^3	
$H \approx 2$ m	zbiornik szeroki: $L/S \approx 2$	powierzchnia zbiornika: $A \approx 40$ tys. m^2 (4 ha)		powierzchnia zbiornika: $A \approx 80$ tys. m^2 (8 ha)	
		$L \approx 400$ m	$S \approx 200$ m	$L \approx 600$ m	$S \approx 300$ m
	zbiornik wąski: $L/S \approx 8$	$L \approx 800$ m	$S \approx 100$ m	$L \approx 1200$ m	$S \approx 150$ m
$H \approx 4$ m	zbiornik szeroki: $L/S \approx 2$	powierzchnia zbiornika: $A \approx 20$ tys. m^2 (2 ha)		powierzchnia zbiornika: $A \approx 40$ tys. m^2 (4 ha)	
		$L \approx 300$ m	$S \approx 150$ m	$L \approx 400$ m	$S \approx 200$ m
	zbiornik wąski: $L/S \approx 8$	$L \approx 600$ m	$S \approx 75$ m	$L \approx 800$ m	$S \approx 100$ m

- zmniejszenie się gradientu (spadku) hydrodynamicznego wód drenowanych przez ciek na kierunku prostopadłym do linii cieku, na którym powstał zbiornik zaporowy. W szczególnych przypadkach może nawet wystąpić odwrócenie kierunku tego gradientu – zbiornik nie będzie drenował, lecz zasilał powiązany z nim system wodonośny.
- konsekwencją zmiany gradientu jest zmniejszenie się wydatku strumienia wody podziemnej, co następnie przekłada się na zmniejszenie odpływu podziemnego w rejonie zbiornika;
- w wyniku tych zmian część wód opadowych infiltrujących w strefie wododziałowej będzie płynęła w kierunku innego systemu drenażu, na przykład do sąsiedniego cieku;
- spowoduje to przesunięcie się wododziału podziemnego w kierunku sztucznego zbiornika, czyli zmniejszenia się powierzchni zlewni podziemnej cieku, na którym powstał zbiornik zaporowy;
- rezultatem powstania budowli piętrzącej, najczęściej zapory ziemnej, i wypełnienia wodą czaszy zbiornika jest szczególna sytuacja hydrodynamiczna w warstwie wodonośnej wokół samej zapory. Powstaje tam zupełnie nowy inny obraz pola filtracji z gradientami znacznie wyższymi, niż te, jakie występowały tam przed podpiętrzeniem i sytuacja ta wymaga dokładnej analizy, aby móc zapobiec negatywnym tego skutkom. Jednak zagadnienie to leży w obszarze problematyki hydrogeologii inżynierskiej, nie ma istotnego wpływu na zasoby wód podziemnych i z tego względu nie jest przedmiotem tego opracowania.

Wymienione powyżej zmiany warunków hydrogeologicznych (z wyjątkiem punktu ostatniego) mają istotny wpływ na kształtowanie się zasobów wód podziemnych. Wpływ ten jest jednak bardzo złożony, z jednej strony, płytsze zwierciadło wody to mniejsze zasilanie przez opady atmosferyczne. Z drugiej strony, zmniejszenie odpływu podziemnego – zmniejszenie ilości wody drenowanej przez ciek – to więcej wody, którą można eksploatować. Jednak zarówno powierzchnia zlewni podziemnej, jak i wielkość sumy strumieni wody podziemnej w tej zlewni po podpiętrzeniu uległy zmniejszeniu, co by sugerowało, że jednak ilość wody, jaka jest do dyspozycji też uległa zmniejszeniu. Te porównania zmian to jedynie przykład złożoności powiązań pomiędzy różnymi zmieniającymi się czynnikami kształtującymi zasoby wód podziemnych

w sąsiedztwie sztucznego zbiornika wodnego, bez względu na to, czy jest to zbiornik duży czy mały.

Złożoność przedstawionej powyżej problematyki wymaga opracowania metodyki analizy wzajemnych oddziaływań szeregu czynników i metodyki oceny wpływu zbiorników małej retencji na warunki hydrogeologiczne obszarów przyległych w aspekcie zmian zasobów wód podziemnych. Złożoność ta sprawia, że jedynymi w tym przypadku skutecznymi narzędziami badawczymi są metody oparte na modelach numerycznych, których podstawą są różniczkowe cząstkowe równania fizyki matematycznej opisujące pole filtracji wody podziemnej. Podstawowym zadaniem tego opracowania jest określenie metod opartych na modelach numerycznych pozwalających na racjonalną ocenę rozpatrywanego tu wpływu.

3. ZASOBY WÓD PODZIEMNYCH W ŚWIELE PRZEPISÓW PRAWNYCH

Problem kurczenia się zasobów wód pitnych wobec zwiększającej się liczby ludności świata, jak też zwiększonego zużycia wody związanego z rozwojem cywilizacji stawiany jest przez światowe organizacje WMO, WHO jako zupełnie podstawowy i jako taki, który musi być rozwiązywany na drodze legislacyjnej, a za podstawę mieć przesłanki ekonomiczne. W przeciwnym przypadku zasoby wodne świata będą ilościowo marnotrawione i jakościowo degradowane.

Światowa organizacja meteorologiczna (WMO) uważa zasoby za całość aktualnie i potencjalnie dostępnych wód o odpowiednich charakterystykach, ilościowych i jakościowych przeznaczoną do zaspokojenia określonego zapotrzebowania.

Warto w tym miejscu powiedzieć o definicji zasobów wodnych. Pojęcie zasoby wód jest pojęciem dualnym. Pojęcie „zasoby” użyte jak wyżej określa całość dostępnych lub rozpoznanych wód. Co innego oznacza pojęcie „zasoby wodne” w sensie prawnym, najczęściej jest to ilość wód dozwolona do eksploatacji lub potencjalnej eksploatacji. Dalsze niuanse związane z definicją „zasoby” są podane poniżej.

Ogólny podział „prawny” zasobów wód podziemnych opiera się na kryteriach związanych z warunkami eksploatacyjnymi, stanem hydrodynamicznym i warunkami rozpoznania.

Zagadnienie zmiany zasobów wód podziemnych w rejonach zbiorników małej retencji podlega ogólnym przepisom prawa polskiego, a w szczególności przepisom: Prawo wodne (Dz. U. z dnia 18.VII.2001, nr 115, poz. 1229) i Prawo geologiczne i górnicze (Dz. U. z dnia 1.09.2005, nr 228, poz. 1247), Rozporządzeniu Ministra Środowiska w sprawie wymagań jakim powinny odpowiadać dokumentacje hydrogeologiczne (Dz. U. z dnia 3 października 2005, nr 201, poz. 1673) i Rozporządzeniu Ministra Środowiska w sprawie zakresu i trybu opracowywania planów gospodarowania wodami na obszarach dorzeczy (Dz. U. z dnia 14 lipca 2006 r. nr 126 poz. 878). Powyższe akty prawne są spójne z Ramową Dyrektywą Wodną (RDW) obowiązującą w Unii Europejskiej.

Rozporządzenie Ministra Środowiska (Dz. U. z dnia 3 października 2005, nr 201, poz. 1673) rozdz. 1 ustala, że:

- **Zasoby eksploatacyjne** [L^3/T]: „... ilość wód możliwa do pobrania z ujęcia w określonych warunkach hydrogeologicznych i techniczno-ekonomicznych z uwzględnieniem zapotrzebowania na wodę i przy zachowaniu wymogów ochrony środowiska. Zasoby eksploatacyjne służą według rozporządzenia „określeniu parametrów hydrogeologicznych ujętego poziomu wodonośnego oraz parametrów eksploatacyjnych ujęcia”.
- **Zasoby dyspozycyjne** [L^3/T]: „... ilość wód podziemnych możliwa do pobrania z obszaru bilansowego w określonych warunkach środowiska i hydrogeologicznych bez wskazywania szczegółowej lokalizacji i warunków technicznych”. Zasoby dyspozycyjne służą: ocenie stopnia zagospodarowania zasobów wód podziemnych i wielkości dostępnych

rezerw zasobowych albo deficytu zasobów wodnych w obszarze bilansowym, w tym w regionie wodnym lub w zlewni, rozpoznaniu terenów perspektywicznych do budowy ujęć wód podziemnych, bilansowaniu i weryfikacji zasobów w rejonach o intensywnej, skupionej eksploatacji wód podziemnych i wykonaniu bilansu wodnogospodarczego dla ustalenia warunków korzystania z wód regionu wodnego lub zlewni.

W świetle rozporządzenia z roku 2005 za **obszar bilansowy** rozumie się jednostkę hydrogeologiczną wytypowaną w celu ustalenia zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych wraz z oceną ich zagospodarowania. Jednostka hydrogeologiczna jest fragmentem litosfery, stanowiącym przestrzennie i dynamicznie zdefiniowany system krążenia wód podziemnych, dającym się opisać parametrami hydrogeologicznymi warstw wodonośnych i rozdzielających je warstw nieprzepuszczalnych.

Warto zaznaczyć, że wskazana w rozporządzeniu ministra z roku 2005 ilość wód możliwych do pobrania z obszaru bilansowego nie jest w żadnym razie ilością wód odpowiadającą całkowicie przepływowi, lecz tylko jego częścią.

Ustawa Prawo wodne dzieli państwo na obszary dorzeczy Odry i Wisły zawierające wydzielone hydrograficznie regiony wodne, dzielone z kolei na zlewnie wód powierzchniowych (Prawo wodne, Art. 3, 9.12). Rozporządzenie Ministra Środowiska z roku 2006 określa przebieg granic dorzeczy oraz przyporządkowuje zbiorniki wód podziemnych do właściwych obszarów dorzeczy. Rozporządzenie to nie precyzuje pojęć:

- zasoby odnawialne,
- zlewnia wód podziemnych i powierzchniowych,
- zasoby perspektywiczne.

Z obowiązującej w Polsce Ramowej Dyrektywy Wodnej Unii Europejskiej wynika, że dla zbiorników małej retencji konieczne jest wyznaczenie statusu ekologicznego poprzez EQR (*ecological quality ratio*), zapobieganie obniżeniu statusu, redukcja istniejących zagrożeń, odwracanie niekorzystnych trendów w jakości, utrzymywanie zgodności ze standardami i przyjętymi celami. Zgodnie z celami wyznaczonymi do roku 2010, RDW zobowiązuje kraje członkowskie do uwzględniania zasady zwrotu kosztów usług wodnych przez zastosowywanie taryfikatora cen wody.

Ramowa Dyrektywa Wodna (Dyrektywa 2000/60/EC Parlamentu Europejskiego i Rady Wspólnoty Europejskiej z 23 października 2000 r. ustalająca ramy działań Wspólnoty w zakresie polityki wodnej), podaje definicję zasobów dostępnych do zagospodarowania w aspekcie kryteriów spełnienia dobrego stanu wód podziemnych w jednolitej części wód podziemnych (JCWPd) (tab. 3.1).

Bilans wodnogospodarczy i czynności prawne związane z projektowaniem zbiornika małej retencji

Bilans wodnogospodarczy jest według Rozporządzenia Rady Ministrów z roku 2005 porównaniem zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych ze stanem ich zagospodarowania, w celu wskazania istniejących na obszarze bilansowym albo w jednostce bilansowej rezerw lub deficytu wód podziemnych.

Koncepcja zbiornika małej retencji powinna zawierać informacje o środowisku i jego ochronie, aby wyeliminować niekorzystne oddziaływania na otoczenie. Mają to zapewnić akty prawne takie jak ustawa o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Dz. U. z dnia 27.III.2003,

Tabela 3.1

**Kryteria dobrego stanu ilościowego wód podziemnych
(wg Herbicha, 2007 – na podstawie RDW, zał. V.2.1)**

Element hydrodynamiki JCWPd	Wymagana charakterystyka hydrodynamiczna jednolitej części wód podziemnych (JCWPd) dla warunków dobrego stanu ilościowego
Bilans zasobów i poboru wód podziemnych	Długoterminowa średnioroczna wielkość poboru wód podziemnych PW z danej JCWPd nie przekracza ilości dostępnych do zagospodarowania zasobów wód podziemnych ZD (zachodzi zależność: $PW < ZD$). Dostępne do zagospodarowania zasoby wód podziemnych stanowią średnią z wieloletnia wielkość całkowitego zasilania JCWPd pomniejszoną o średnią z wieloletnia wielkość przepływu niezbędnego dla osiągnięcia pożądanego stanu wód powierzchniowych i ekosystemów lądowych związanych z JCWPd.
Położenie zwierciadła wód podziemnych	Położenie zwierciadła wód podziemnych w JCWPd nie podlega zmianom antropogenicznym, które mogłyby spowodować: – niespełnienie celów środowiskowych przez wody powierzchniowe związane z wodami podziemnymi, – znaczne obniżenie stanu retencji wód powierzchniowych, – istotne szkody w ekosystemach lądowych bezpośrednio zależnych od wód podziemnych (w mokradłach, torfach, łąkach, łęgach itp.).
Przepływ wód podziemnych	Antropogeniczne zmiany położenia zwierciadła wód podziemnych: – nie powodują trwałych zmian kierunku przepływu wód podziemnych i związanych z tymi zmianami ingresji wód morskich, ascencji wód zasolonych lub innych wód, mogących pogorszyć stan chemiczny JCWPd, – nie wskazują na trwałą i o wyraźnie antropogenicznym charakterze tendencję do zmian kierunku przepływu, mogącą spowodować takie ingresje lub ascencje.

nr 80, poz. 717). Lokalizacja zbiornika małej retencji musi omijać krajowy system obszarów chronionych, takich jak parki i rezerваты.

Powstanie zbiornika małej retencji musi uwzględniać uwarunkowania prawne, bowiem jego powstanie kreuje, „sztuczną część wód ...”, a zgodnie z RDW należy „chronić i poprawiać stan wszystkich sztucznych i silnie zmienionych części wód w celu osiągnięcia dobrego potencjału ekologicznego i dobrego stanu chemicznego wód”. Na etapie koncepcji zbiornika małej retencji konieczne jest rozeznanie czy zachodzą przesłanki w sprawie rodzajów przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko uregulowane w następujących aktach prawnych: Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 9.11.2004, §8, Prawo ochrony środowiska (Dz. U. nr 62, poz. 627 z dnia 27.04.2001) i Rozporządzenie Rady Ministrów (Dz. U. 257 poz. 2573 z dnia 9.11.2004) i Ustawa o ochronie przyrody (Dz. U. nr 92, poz. 880 z dnia 16.04.2004). W dalszej kolejności należy ustalić następujące czynności prawne i uzyskać następujące pozwolenia (fig. 3.1):

- sporządzić warunki zabudowy i zagospodarowania terenu zgodnie z przepisami o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Dz. U. nr 80, poz. 717 z dnia 27.03.2003);
- pozwolenie na budowę obiektu budowlanego gospodarki wodnej;

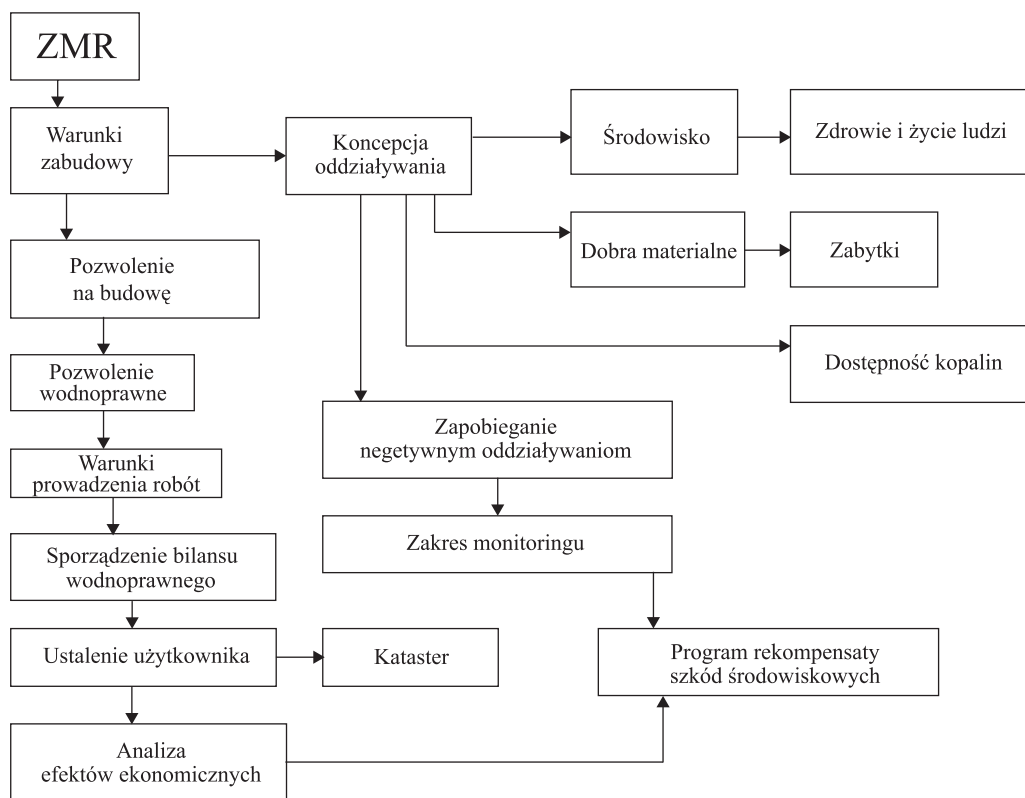


Fig. 3.1. Uwzględnienie potrzeb człowieka i środowiska oraz czynności prawne związane powstawaniem zbiornika małej retencji

- pozwolenie wodnoprawne w zakresie wykonywania urządzeń wodnych;
- pozyskać decyzję ustalającą warunki prowadzenia robót;
- sporządzić bilans wodnogospodarczy zbiornika przez uprawnionego hydrologa;
- ustalić stałego użytkownika obiektu;
- przedstawić analizę efektów ekonomicznych funkcjonowania zbiornika.

Pozwolenie wodnoprawne jest wydawane na wniosek inwestora przez organ administracji lokalnej. W szczególności służy do wykonania urządzeń wodnych, piętrzenia wody podziemnej i gromadzenia ścieków (Art. 122, Prawo wodne). Wydawane jest na 10 lat, określa ilość pobieranej wody, sposób gospodarowania, sposób i zakres kontroli oraz działania przeciwdziałające negatywnemu oddziaływaniu na środowisko.

Informacja o powstaniu zbiornika małej retencji winna się znaleźć w katastrze wodnym prowadzonym dla obszaru państwa, z uwzględnieniem podziału na dorzecze i regiony wodne.

Należy podkreślić, że nawet w wielu opracowaniach naukowych dotyczących problematyki zasobowej czyni się znak równości pomiędzy odpływem podziemnym a zasobami wód podziemnych. W niniejszym opracowaniu wyraźnie oddziela się te dwa pojęcia. Odpływ podziemny jest pojęciem przyrodniczym, na którego obliczenie składają się różne metody, jego oszacowanie

przybliżyć w zasadniczy sposób ocenę zasobów, ale nie jest tożsame z zasobami wód podziemnych. Odpływ podziemny może być transformowany w przestrzeń zasobów wód podziemnych po przyjęciu przepływów nienaruszalnych w rzece opartych na nie do końca spójnych kryteriach przyrodniczych i administracyjnych, kryteriach uwzględniających wymagania technologiczne dla wody, kryteriach związanych ze zmianami zwierciadła wód podziemnych i ze zmianami obszaru zlewni podziemnej.

Powstanie zbiornika małej retencji ze względu na pewną zmianę stosunków wodnych w otoczeniu skłania także do rewizji dotychczas ustalonych zasobów wód podziemnych na danym obszarze. Obecnie przy dokumentowaniu zasobów wód podziemnych nie uwzględnia się infiltracji z wód powierzchniowych do wód podziemnych. Doświadczenie wskazuje (Nowicki i in., 2006), że w większości przypadków zbiorników nizinnych, na skutek powstania zbiornika małej retencji należy uwzględnić infiltrację z wód powierzchniowych do warstw wodonośnych, choć infiltracja ta może maleć z czasem na skutek kolmatacji dna zbiornika. Wyjątkiem mogą być zbiorniki wodne otoczone wzgórzami, które drenowane są przez zbiornik. W omawianej sytuacji, w większości przypadków należy przy powstawaniu zbiornika małej retencji ponownie określić zasoby dyspozycyjne.

Warto w tym miejscu podkreślić, że w istniejącym prawodawstwie wodnym jak wyżej, istnieje poważna luka, gdyż zdarzają się przypadki, że na wyznaczonym obszarze zasobowym zasoby dyspozycyjne są mniejsze od zasobów eksploatacyjnych jednego czy sumy zasobów kilku ujęć, podczas gdy powinien być spełniony warunek $Z_{dys} \geq Z_{eksp!}$. Wynikać to może z faktu, że nieuwzględniana jest infiltracja z wód powierzchniowych do warstw wodonośnych. Taki przypadek ma często miejsce w przypadku zbiorników wodnych z infiltracją przez dno zbiornika. Tę lukę prawną należałoby jak najszybciej usunąć, być może poprzez powiązanie definicji zasobów eksploatacyjnych i dyspozycyjnych.

Wykorzystane akty prawne:

- Ramowa Dyrektywa Wodna (Dyrektywa 2000/60/EC Parlamentu Europejskiego i Rady Wspólnoty Europejskiej z dnia 23 października 2000 r.);
- Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. Prawo wodne (Dz. U. z dnia 11 października 2001 r. nr 115 poz. 1229) z późn. zm.;
- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z dnia 20 czerwca 2001 r. nr 62 poz. 627) z późn. zm.;
- Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Dz. U. z dnia 10 maja 2003 r. nr 80 poz. 717);
- Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody (Dz. U. z dnia 30 kwietnia 2004 r. nr 92 poz. 880);
- Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie wymagań, jakim powinny odpowiadać dokumentacje hydrogeologiczne (Dz. U. z dnia 3 października 2005, nr 201, poz. 1673);
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 czerwca 2006 r. w sprawie zakresu i trybu opracowywania planów gospodarowania wodami na obszarach dorzeczy oraz warunków korzystania z wód regionu wodnego (Dz. U. z dnia 14 lipca 2006 r. nr 126 poz. 878).

4. KLASYFIKACJE ZBIORNIKÓW MAŁEJ RETENCJI

Sztucznym zbiornikiem wodnym nazywamy zbiornik retencjonujący stale lub okresowo wody powierzchniowe, bez względu na cel ich magazynowania (Mioduszeński, 2006).

W podstawowym podziale zbiorników wyróżnia się:

- zbiorniki zaporowe – powstają w wyniku przegrodzenia koryta i doliny cieku budowlą piętrzącą, zazwyczaj groblą ziemną z budowlą upustową;
- zbiorniki na ciekach (liniowe) – tworzone są w wyniku przegrodzenia koryta (cieku) budowlą piętrzącą; nie powodują zalania terenów przyległych;
- zbiorniki kopane (stawy) – powstają w wyniku wykonania wykopu w naturalnym podłożu i wypełnieniu go wodą;
- mieszane typy zbiorników wodnych (Mioduszeński, 2006).

Zbiorniki małej retencji są to zbiorniki o pojemności do 5 mln m³, w których przepływ nie przekracza 2 m³/s (Mioduszeński, 2003). Ten typ zbiorników jest rozpatrywany w ramach niniejszego opracowania.

Zbiorniki małej retencji można sklasyfikować pod względem:

- **wielkości:**
 - wysokości piętrzenia np.: 0,5; 1; 1,5; 5 m,
 - pojemności np.: 100 tys. m³; 1, 2, 3, 5 m³ mln,
 - wielkości przepływu 0,5; 1; 1,5; 2 m³/s.
- **przeznaczenia głównego i dodatkowego** (Mioduszeński, 1999, 2006):
 - zbiorniki magazynujące wodę na potrzeby gospodarcze np.: zaopatrzenie w wodę, hodowla ryb, wodopoje dla zwierząt, przeciwpożarowe, do pozyskiwania energii (małe elektrownie);
 - ochrona przed powodzią lub przed suszą w zależności od sytuacji i aktualnych potrzeb panujących na danym obszarze;
 - zwiększenie zasobów wód podziemnych poprzez jej retencjonowanie. Zasilanie warstwy wodonośnej odbywa się poprzez infiltrację wód ze zbiornika zlokalizowanego w obrębie utworów przepuszczalnych;
 - zbiorniki ekologiczne do regulowania obiegu wody i materii oraz do poprawy jej jakości. Do tej grupy należą m.in. biofiltry; czyli płytkie zbiorniki o głębokości 0,3–0,6 m, porośnięte roślinnością, w których średnia prędkość przepływu wynosi 0,15 m/s. Najczęściej lokalizowane są u wylotu sieci melioracyjnej, w celu oczyszczania ze środków ochrony roślin czy też substancji organicznej. W tej samej grupie

- są zbiorniki filtracyjne, w których woda oczyszcza się w procesie filtracji przez dno zbiornika oraz zbiorniki infiltracyjne budowane w obrębie utworów przepuszczalnych i stosowane do wzbogacania zasobów wód podziemnych;
- zwiększenie biologicznej różnorodności; w miejscu lokalizacji nowego zbiornika może ulec zmianie lokalny mikroklimat, szata roślinna i fauna;
 - zbiorniki rekreacyjne (kąpieliska) i ozdobne (stawy, oczka wodne);
 - zbiorniki do ochrony przed erozją wodną; spowolnienie spływu powierzchniowego ma wpływ na zmniejszenie siły erozyjnej rzeki.
- **źródeł zasilania** (Mioduszeński, 1995, 2006):
 - zbiorniki zasilane z przepływów bieżących cieków. Są utworzone w wyniku przegrodzenia budowlą piętrzącą koryta i doliny cieku. Należą do nich typowe zbiorniki zaporowe. Budowlę piętrzącą w obrębie doliny najczęściej stanowi grobla. Odmianą tego typu są zbiorniki utworzone w wyniku przegrodzenia budowlą piętrzącą koryta cieku, w których spiętrzoną wodę utrzymuje się poniżej powierzchni terenu. Regulacja poziomu wody odbywa się za pomocą progu stałego lub z zamknięciami. W grupie tej występują również zbiorniki w dolinie poza korytem rzeki – zbiornik zlokalizowany jest w dolinie, a na rzece buduje się urządzenie piętrzące, umożliwiające doprowadzenie wody do zbiornika;
 - zbiorniki zasilane wodami ze spływów powierzchniowych – lokalizacja takiego zbiornika uzależniona jest od ukształtowania terenu i kierunku spływu powierzchniowego, dlatego najczęściej budowany jest w zagłębieniach terenu. Zbiorniki zasilane wodami pochodzącymi ze spływów powierzchniowych mogą być w niektórych warunkach geologicznych wykorzystane do zasilania wód podziemnych. Pełnią wówczas rolę zbiorników infiltracyjnych. W tym przypadku dno zbiornika powinno znajdować się w przepuszczalnej warstwie wodonośnej;
 - zbiorniki zasilane wodami gruntowymi, w tym przede wszystkim zbiorniki zasilane wodami naporowymi i ze źródeł. Taka sytuacja ma miejsce w przypadku wykonania wykopu pod zbiornik w słaboprzepuszczalnym gruncie, tak aby dno tego zbiornika osiągnęło warstwę wodonośną. Jeżeli warstwa wodonośna zalega głębiej, po wykonaniu wykopu pod zbiornik, w jego dnie instaluje się studnię drenażową. Istotne jest wtedy zainstalowanie zaworu w celu kontrolowania zużycia zasobów wód podziemnych (zabezpieczenie przed nadmiernym obniżeniem powierzchni piezometrycznej wód podziemnych). Do tej grupy należą również stawy kopane w warunkach wysokiego poziomu wód gruntowych. Lokalizowane są na obszarach o wysokim poziomie wód gruntowych, często w obniżeniach terenu, kopalniach odkrywkowych kruszców. Są zasilane w sposób ciągły wodą z warstwy wodonośnej. Ilość dopływającej wody zależy od rozmiarów zbiornika, współczynnika filtracji, typu podłoża oraz różnicy poziomów wody w zbiorniku i wód gruntowych na terenach przyległych;
 - zbiorniki zasilane wodami infiltracyjnymi i z powierzchni szczelnych. Zbiorniki infiltracyjne stosuje się do zasilania warstwy wodonośnej. W okresach wezbrań woda z rzeki doprowadzana jest do zbiornika, z którego infiltrowuje do warstwy wodonośnej. W przypadku zanieczyszczonych wód deszczowych z obszarów zurbanizowanych (powierzchnie szczelne), należy je uprzednio oczyścić np.: w zbiornikach ekologicznych;

- zbiorniki zasilane wodą z systemów odwadniających. Są to systemy drenarskie odprowadzające wody pochodzenia atmosferycznego. Ten typ zasilania charakteryzuje się sezonowością. Woda zgromadzona w tych zbiornikach może być wykorzystana do zasilania innych typów zbiorników.
- **reżimu pracy w czasie:**
 - sterowany – są to zazwyczaj duże zbiorniki (sztuczne lub podpiętrzone jeziora), o pojemności umożliwiającej regulowanie przepływu w dłuższych okresach oraz wykorzystanie zgromadzonej wody w dowolnym czasie (Mioduszewski, 1994). Przy odpowiednim regulowaniu można utrzymać stały przepływ w cieku poniżej upustu i stałe zasilanie wód podziemnych;
 - niesterowalny – są to małe zbiorniki, bez stałej obsługi eksploatacyjnej, ze stałym progiem (Mioduszewski, 2006). Mamy tu do czynienia z niekontrolowaną retencją o pojemności trudnej do określenia (Mioduszewski, 1994). Wpływ na wody podziemne uzależniony jest m.in. od szeregu czynników w tym parowania, spływów powierzchniowych itp.;
- **lokalizacji geologicznej;** wpływ zbiornika małej retencji na wody podziemne uzależniony jest od rodzaju utworów znajdujących się w podłożu zbiornika oraz jego sąsiedztwie.
- **zasięgu wpływu zbiornika na warunki hydrogeologiczne,** a więc zależny od budowy geologicznej, tektoniki, morfologii itd. Zbiornik zlokalizowany w obrębie utworów nieprzepuszczalnych ma nieznaczny wpływ na dynamikę wód podziemnych, natomiast oddziaływanie zbiorników, w których w podłożu chociaż częściowo występują utwory przepuszczalne może być rzędu od kilkudziesięciu metrów do kilku kilometrów.

Do zbiorników retencyjnych zalicza się również mokradła, roślinne strefy buforowe, jeziora, poldery służące do ochrony przed powodzią oraz starorzecza, tworzące zbiorniki nie przepływowe w dolinach rzecznych. W ich obrębie mamy do czynienia z niewielką wymianą wód, z wyjątkiem wezbrań powodziowych.

Wszystkie wyżej wymienione typy zbiorników, chociaż częściowo zlokalizowane w obrębie utworów przepuszczalnych umożliwiających wymianę wód ze zbiornika z wodami warstwy wodonośnej, mają istotny wpływ na zasoby wód podziemnych. W przypadku, gdy dno takiego zbiornika zlokalizowane jest w warstwie nieprzepuszczalnej mamy do czynienia ze zbiornikiem w zagłębieniu bezodpływowym. Z punktu widzenia hydrogeologii zbiornik taki ma znikomy wpływ na wody podziemne.

Budując zbiornik retencyjny należy zatem dokładnie rozpoznać warunki geologiczne i hydrogeologiczne panujące w podłożu oraz precyzyjnie określić jego oddziaływanie na otaczające środowisko.

5. ZBIORNIKI MAŁEJ RETENCJI W POLSCE PRZED 1939 R.

Przed II wojną światową na obszarze ówczesnej Polski było kilkanaście tysięcy zbiorników wód powierzchniowych wykorzystywanych do celów energetycznych oraz zupełnie nieznana i trudna do oszacowania liczba zbiorników małej retencji wykorzystywanych do innych celów. Z tej ogromnej liczby w wyniku działań wojennych, a zwłaszcza katastrofalnych w skutkach decyzji powojennych władz komunistycznych dotyczących państwowej monopolizacji energetyki, do końca lat sześćdziesiątych zostało zniszczonych ponad 90% niewielkich budowli piętrzących wody powierzchniowe. Skala zniszczeń była ogromna, a w połączeniu ze skutkami intensywnie prowadzonych prac melioracyjnych doprowadziło to do znacznego obniżenia wód gruntowych w Polsce, zwłaszcza na obszarze Nizy Polskiego. To właśnie wówczas, ponad 40 lat temu, po raz pierwszy zaczęto mówić o stepowaniu Polski Centralnej, zwłaszcza Wielkopolski, Kujaw i Mazowsza. Świadomość tego stanu rzeczy niewiele poprawiła sytuację – w latach siedemdziesiątych i później powstało niewiele zbiorników małej retencji, a władze ówczesnej Polski preferowały budowę wielkich zapór na dużych rzekach (osławiony projekt kaskadyzacji Wisły, którego realizacja doprowadziłaby do katastrofy ekologicznej o trudnej do przewidzenia skali). W latach dziewięćdziesiątych wzrosło zainteresowanie sprawą retencionowania wód w małych zbiornikach, jednak brak środków finansowych w budżecie państwa spowodował, że sprawy zbiorników małej retencji zostały przekazane do samorządów.

W ostatnich latach powstało i powstaje nadal szereg programów małej retencji dla poszczególnych obszarów Polski. Jest zatem nadzieja, że w niedługim czasie rozpocznie się realizacja tych programów w zakresie znacznie większym niż dotychczas. Warto zatem przyjrzeć się rozmieszczeniu zbiorników małej retencji przed wojną, bowiem daje to pogląd o skali możliwości ich budowy obecnie. Na figurze 5.1 przedstawiono fragment przedwojennej mapy obejmującej obszar między Warszawą i Krakowem.

I tu słowo dygresji. Jednemu z autorów (Z.N.) nie udało się dotrzeć do oryginalnej mapy Rybczyńskiego – prezentowany fragment jest odbitką. Niewykluczone, że większość egzemplarzy została zniszczona podczas planowej akcji unicestwiania przedwojennych materiałów kartograficznych prowadzonej w latach czterdziestych i pięćdziesiątych ubiegłego wieku przez ówczesne władze PRL.

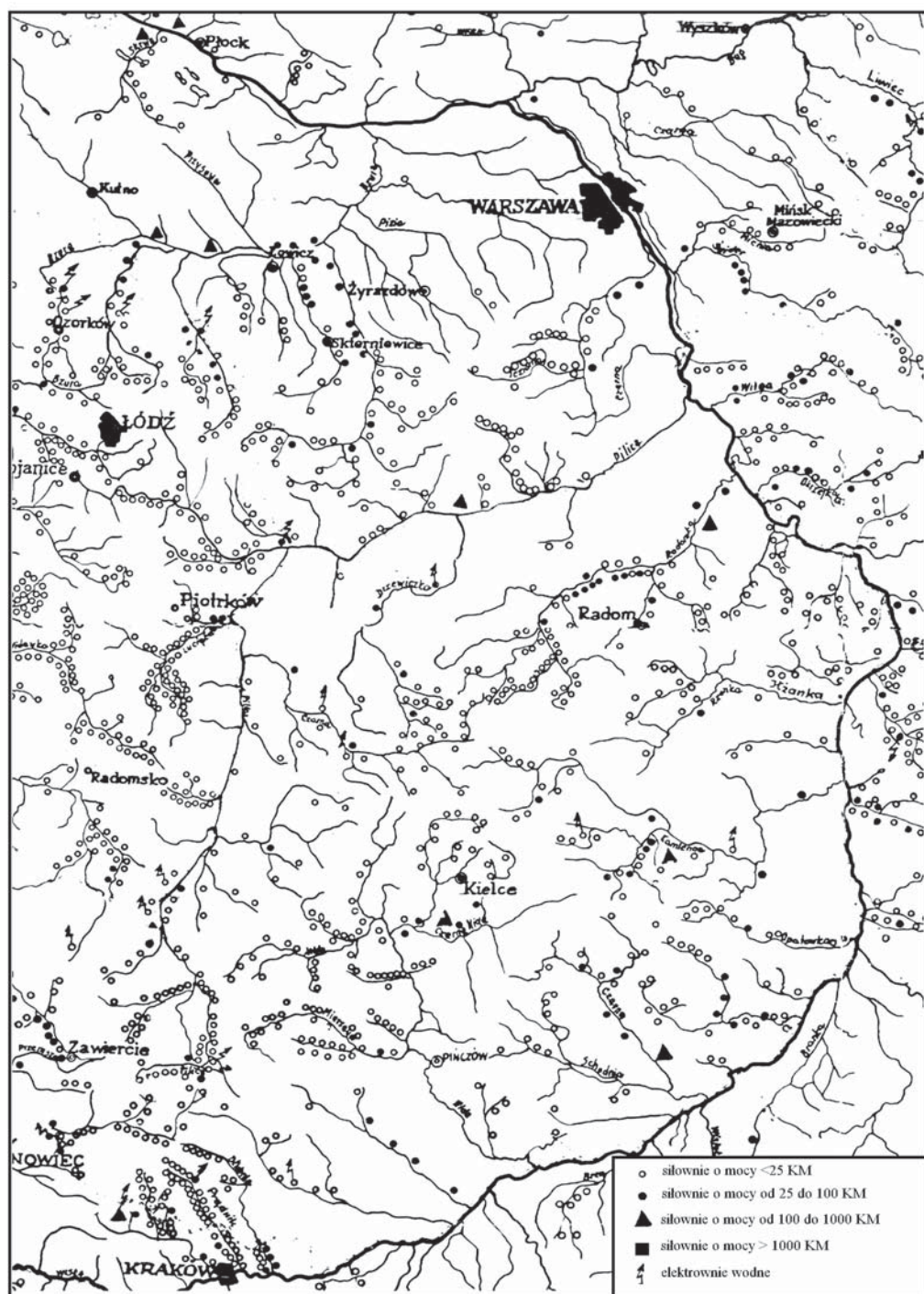


Fig. 5.1. Fragment przedwojennej mapy Rybczyńskiego „Rozmieszczenie siłowni wodnych w latach 1925–1935”

6. WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE LOKALIZACJI ZBIORNIKA

Wielkość wzrostu zasobów wód podziemnych uzależniona jest przede wszystkim od budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych występujących na obszarze w rejonie zbiornika wód powierzchniowych. Analizując to zagadnienie warto zwrócić uwagę na przypadki skrajne. Pierwszym z nich jest sytuacja, gdy w podłożu zbiornika występują jedynie utwory nieprzepuszczalne. W ujęciu poglądowym przedstawia to fig. 6.1. W przypadku tym wzrost zasobów wód podziemnych równy jest zeru, zatem retencja całkowita równa się retencji wód powierzchniowych w obrębie zbiornika $R_c = R_p$.

Drugim skrajnym przypadkiem jest sytuacja, gdy w podłożu zbiornika występują utwory przepuszczalne. Poglądowo przedstawiono to na fig. 6.2.

W tym przypadku retencja wód podziemnych jest największa, przy czym stosunkowo często obserwowane jest zjawisko, że jest ona zdecydowanie większa od retencji wód powierzch-

Fig. 6.1. Lokalizacja zbiornika w obrębie utworów nieprzepuszczalnych

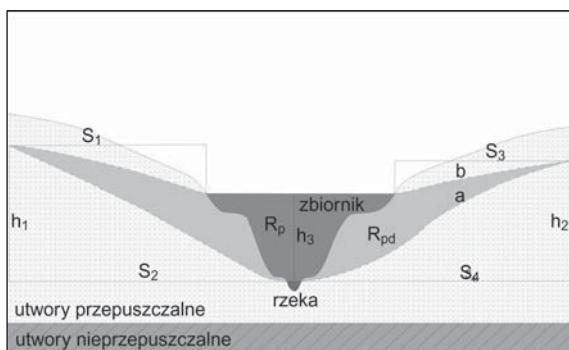
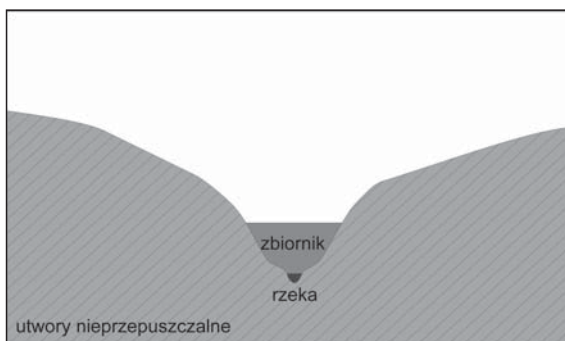


Fig. 6.2. Lokalizacja zbiornika w obrębie utworów przepuszczalnych (szkic poglądowy)

a – pierwotne zwierciadło wód podziemnych;
b – zwierciadło wód podziemnych po napełnieniu zbiornika; S_1 , S_3 – zasięgi oddziaływania zbiornika; S_2 , S_4 – zasięgi oddziaływania zbiornika w stosunku do rzeki; h_1 , h_2 – wysokości zwierciadła wód podziemnych na granicach zasięgu; h_3 – wysokość piętrzenia; R_p – retencja wód powierzchniowych; R_{pd} – retencja wód podziemnych

niowych $R_{pd} > R_p$. Wielkość retencji wód podziemnych jest tu funkcją geometrii przestrzennej zasięgu oddziaływania zbiornika (h_1 , h_2 , S_1 , S_2 itd.) i parametrów hydrogeologicznych ośrodka (głównie wielkości porowatości).

Miedzy przypadkami skrajnymi istnieje oczywiście nieskończenie dużo przypadków pośrednich wynikających z różnorodności budowy geologicznej. Poniżej, na szkicach poglądowych, przedstawiono dwa z nich, dość typowe dla obszaru Nizy Polskiego (fig. 6.3 i 6.4).

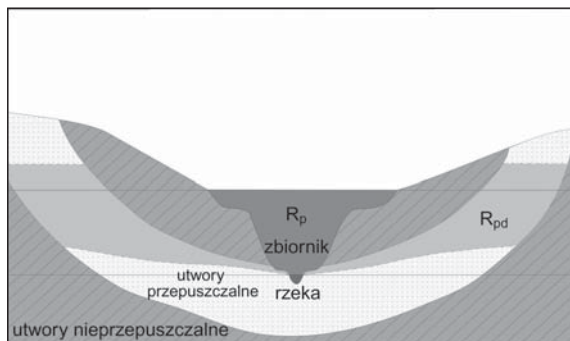


Fig. 6.3. Lokalizacja zbiornika w obrębie utworów przepuszczalnych, których wychodnie znajdują się w zasięgu oddziaływania zbiornika

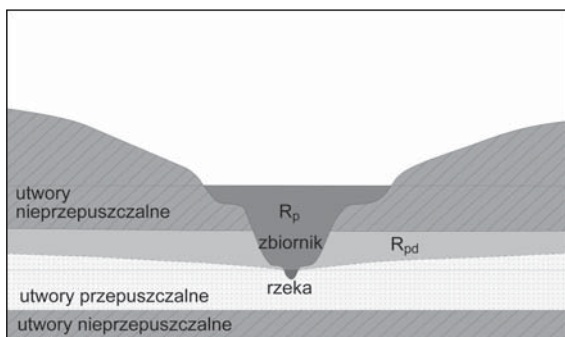


Fig. 6.4. Lokalizacja zbiornika w obrębie utworów przepuszczalnych pod przykryciem utworów nieprzepuszczalnych

7. HYDRODYNAMICZNE PODSTAWY ODDZIAŁYWANIA ZBIORNIKA ZAPOROWEGO NA WODY PODZIEMNE

Głównymi czynnikami zewnętrznymi oddziaływującymi na wody podziemne w warunkach naturalnych są czynniki atmosferyczne i wody powierzchniowe. Zbiorniki zaporowe należące do wód powierzchniowych także w istotny sposób kształtują warunki hydrogeologiczne w rejonach do nich przyległych. Dodatek znajdujący się na końcu opracowania zawiera opis modelu pojęciowego będącego podstawą metodologiczną przedstawianej tu problematyki. Zgodnie z tym modelem oddziaływanie to jest wyrażone poprzez warunki brzegowe. Aby określić, w jaki sposób warunki brzegowe wpływają na stan wnętrza – na przestrzeń hydrogeologiczną, w której odbywa się przepływ wody podziemnej – trzeba również odwołać się do przedstawionych w załączonym Dodatku równań fizyki matematycznej opisujących ten przepływ.

7.1. Zmiana pola filtracji wywołana podpiętrzeniem wód powierzchniowych

W przyjętym tu modelu pojęciowym podpiętrzenie wód powierzchniowych to zmiana w określony czasie jednego z warunków brzegowych określających wpływ poziomu wody w cieku, jako czynnika zewnętrznego, oddziaływującego na stan wnętrza, czyli środowiska hydrogeologicznego w tym rejonie. Zgodnie z modelem pojęciowym, przedstawionym w załączonym Dodatku, jest to jeden ze składników tworzących wynikowy obraz superponowany. Nałożenie tego składnika na obraz wcześniej istniejący daje w rezultacie istotne zmiany w obrazie pola filtracji:

- na określonym odcinku cieku następuje zmiana (podwyższenie) rzędnej podstawy drenażu. Zmiana ta rozkłada się liniowo od punktu lokalizacji budowli piętrzącej, gdzie ma wartość najwyższą, do punktu końca cofki, gdzie jest równa zeru;
- na tym odcinku ulega istotnej zmianie charakter kontaktu hydraulicznego pomiędzy ciekim powierzchniowym a warstwą wodonośną leżącą w podłożu koryta tego cieku. Zmiana ta zależy także od kształtu dna doliny poza korytem cieku i od litologii utworów tarasowych pod korytem cieku i pod dnem doliny;
- głównym efektem podniesienia się podstawy drenażu jest ograniczenie dopływu wód podziemnych do tego fragmentu cieku i, jako konsekwencja, zmiana kierunków spływu podziemnego w stronę odcinka położonego poniżej budowli piętrzącej, a także do innych cieków położonych w pobliżu tego miejsca;
- zgodnie z modelem pojęciowym zasięg oddziaływania podpiętrzenia wód powierzchniowych na wody podziemne obejmuje cały obszar wnętrza, czyli sięga do jego najodleglej-

szych (względem miejsca podpiętrzenia) granic wnętrza. Wpływ ten maleje stosunkowo szybko wraz z oddalaniem się od miejsca, gdzie jest największy, jednak w malejący sposób oddziałuje nawet na najodleglejsze fragmenty wnętrza. Teoretyczny obraz zasięgu tego oddziaływania jest trudny do potwierdzenia w obserwacjach terenowych, ponieważ będące wynikiem tego oddziaływania bardzo małe zmiany potencjałów hydrodynamicznych są zakłócanie szumem powstającym w rezultacie oddziaływania innych czynników zewnętrznych, a w szczególności oddziaływań często zmieniających się warunków atmosferycznych;

- jedną z najistotniejszych zmian pola filtracji w wyniku podpiętrzenia jest szczególna sytuacja, jaka powstaje w najbliższym otoczeniu budowli piętrzącej, co już było opisane wcześniej. Jest to miejsce, w którym warunki hydrogeologiczne zostają radykalnie zmienione, ponieważ sąsiadują tu miejsca, gdzie podstawa drenażu nie ulega zmianie – rejon wody dolnej poniżej budowli piętrzącej i gdzie ulega maksymalnemu podniesieniu – rejon wody górnej tuż powyżej budowli piętrzącej.

7.2. Wododział podziemny w ujęciu hydrodynamicznym – jako skutek, a nie przyczyna

Matematyczno-fizyczny opis zjawisk związanych z ruchem wód podziemnych pozwala na analizę tych zjawisk także w aspekcie związków „przyczyna–skutek”. Takie podejście porządkuje wzajemne zależności pomiędzy poszczególnymi elementami modelu pojęciowego i pozwala uniknąć popełnienia często spotykanych błędów przy konstruowaniu modeli opisujących rzeczywiste systemy hydrogeologiczne. Jednym z takich błędów jest przenoszenie hydrologicznego modelu pojęciowego dotyczącego zlewni powierzchniowej na obszar problematyki hydrogeologicznej. Wododział powierzchniowy, jako element ukształtowania powierzchni terenu, jest zjawiskiem trwałym i niezależnym od zmiennych stanów w obrębie zlewni powierzchniowej. Jako istotny czynnik kształtujący te stany, wododział powierzchniowy jest w tym modelu traktowany jako przyczyna. Pomimo pewnego podobieństwa, wododział podziemny nie może być traktowany jako przyczyna stanów, które występują we wnętrzu układu, ponieważ nie jest czymś niezależnym od tych stanów. W przypadku wód podziemnych inne czynniki zewnętrzne kształtują stany wnętrza systemu. Należy do nich między innymi zasilanie pochodzące z opadów atmosferycznych i wód powierzchniowych, a także system drenażu, który tworzy sieć cieków powierzchniowych.

Konsekwencją powyższego jest fakt, że położenie wododziału podziemnego jest rezultatem stanu wytworzonego przez inne czynniki. Tak jak stan wnętrza systemu jest on skutkiem, a nie przyczyną. Pod wpływem zmian czynników-przyczyn wododział podziemny może zmieniać swoje położenie, a także może czasowo zanikać. Przykładem takiej sytuacji jest długookresowa zmiana charakteru cieków z roli drenującej wody podziemne do roli zasilającej te wody.

7.3. Zmiana położenia wododziału podziemnego – zmiana powierzchni zlewni podziemnej

Podwyższenie podstawy drenażu wód podziemnych, co ma miejsce, gdy poziom wody w cieku zostanie podwyższony w wyniku działania budowli piętrzącej, powoduje zmianę położenia wododziału podziemnego w kierunku tego cieków. Przybliżenie wododziałów do linii cieków

prowadzi w konsekwencji do zmniejszenia się powierzchni zlewni podziemnej. Dalszą konsekwencją tego jest fakt, że wody pochodzące z infiltracji opadowej w strefach wododziałowych będą płynęły w kierunku cieków sąsiednich, zwiększając w ten sposób ich zasilanie podziemne. Stwarza to sytuację pozornego zmniejszenia się zasobów wód podziemnych w obrębie zlewni cieków, który został podpiętrzony. Wyjaśnienie tego pozornego paradoksu zawarte jest w dalszej części opracowania dotyczącej zasobów wód podziemnych.

7.4. Zmiana gradientów hydrodynamicznych i związanych z tym wielkości przepływów

Zmiana obrazu pola hydrodynamicznego wywołana podpiętrzeniem cieku stanowiącego podstawę drenażu wód podziemnych podlega, opisaną w załączonym na końcu Dodatku, zasadzie superpozycji. Obraz wynikowy jest złożeniem obrazu pierwotnego, który istniał w tym systemie wcześniej i najczęściej miał charakter naturalny, i obrazu dodatkowego, przedstawiającego wyłącznie zmiany spowodowane podpiętrzeniem cieku.

Przestrzenny rozkład potencjałów hydrodynamicznych pola dodatkowego przedstawia różnice potencjałów pomiędzy stanem pierwotnym i wynikowym stanem końcowym. Bez względu na geometrię rozpatrywanego systemu hydrogeologicznego obrazy strumieni dodatkowych mają wiele cech wspólnych. Należą do nich:

- maksymalny potencjał występuje w bezpośrednim sąsiedztwie budowli piętrzącej;
- w obrębie zbiornika potencjał ten maleje liniowo do zera w punkcie końcowym cofki;
- na odcinku cieku poniżej budowli piętrzącej i powyżej punktu końcowego cofki potencjał jest równy zeru;
- w systemie wodonośnym potencjał stopniowo maleje w miarę oddalania się od budowli piętrzącej i od czaszy zbiornika;
- na granicy systemu, gdzie jest warunek I rodzaju, osiąga zawsze wartość zero;
- w przypadku warunku III rodzaju wielkość potencjału zależy od parametrów tego warunku, gdy jest on zbliżony do warunku I rodzaju, wartość potencjału jest bliska zeru;
- warunek II rodzaju ma bardzo różny wpływ na wartość potencjału. Gdy warunek ten jest spowodowany przez obiekty istniejące przed podpiętrzeniem, na przykład ujęcia wody podziemnej, które istniały już wcześniej, skutek tego warunku jest zawarty w obrazie stanu pierwotnego. Szczególny przypadek tego warunku w postaci granicy szczelnej ($Q = 0$) przejawia się w obrazie strumienia dodatkowego jako „zatrzymanie” efektu obniżania się potencjału do wartości zerowej. W takim przypadku na szczelnej granicy systemu wartość potencjału pozostaje taka, jakiej można by się spodziewać, gdyby wewnętrzna przestrzeń systemu kontynuowała się dalej.

Obraz pola potencjałów przekłada się bezpośrednio na obraz pola prędkości filtracji i w konsekwencji na obraz pola wydatków przepływów. Linie prądów będące ilustracją tego obrazu mają największe zagęszczenie w bezpośrednim sąsiedztwie budowli piętrzącej. Ponieważ strumień dodatkowy jest obrazem zmian, przedstawia on także, w jaki sposób ulega przekształceniu ogólny układ krążenia w analizowanym systemie. Dominującą cechą jest przepływ (wyrażony strumieniem dodatkowym) skierowany od rejonu budowli piętrzącej i czaszy zbiornika do peryferyjnych fragmentów systemu, gdzie występują inne elementy systemu drenażu – pozostałe odcinki cieku, na którym wybudowano zbiornik, i cieki sąsiednie.

Zmiany ilościowe, w zależności od ich wielkości, mogą doprowadzić do zmian jakościowych. Typowym przykładem zmiany jakościowej w tym przypadku jest odwrócenie kierunku przepływu wody podziemnej. Jeżeli w jakimś miejscu wnętrza systemu gradient strumienia dodatkowego jest skierowany przeciwnie niż gradient strumienia pierwotnego i jego wartość jest bezwzględnie większa, mamy do czynienia z odwróceniem wynikowego gradientu i kierunku przepływu wody w warstwie. Sytuacja taka nie musi pociągać za sobą znaczących skutków, lecz w przypadku występowania w rozpatrywanym obszarze wód o niekorzystnym składzie chemicznym może nastąpić skierowanie strumienia tych wód w rejon, gdzie jakość wód podziemnych jest istotnym problemem, na przykład z powodu występowania w tym rejonie ujęć wód dla celów komunalnych.

Przedstawiony tu opis zmian pola filtracji wywołany podpiętrzeniem ma charakter ogólny – przedstawia ogólne tendencje, jakie można obserwować w większości przypadków. Jednak poszczególne przypadki mogą prowadzić do sytuacji wyjątkowych, rzadko spotykanych i z tego względu dokładna analiza obrazu strumienia dodatkowego jest niezbędna dla oceny skutków zmian, jakie pociąga za sobą lokalna zmiana podstawy drenażu wywołana funkcjonowaniem budowli piętrzącej.

8. POTENCJALNE ZMIANY ŚRODOWISKOWE WYWOŁANE PODPIĘTRZENIEM WÓD POWIERZCHNIOWYCH I PODZIEMNYCH

Dla oceny przypuszczalnych zmian środowiskowych wywołanych podpiętrzeniem wód konieczne jest przedstawienie zintegrowanej charakterystyki zlewni, jej aktualnego i przewidywanego współdziałania z wodami podziemnymi oraz scharakteryzowania potencjalnych zagrożeń środowiskowych. Zagrożenia dla stanu ilościowego i jakościowego wód powierzchniowych i podziemnych mogą wynikać z nadmiernego poboru przemysłowego lub komunalnego, wymywania składników mineralnych z pól, odpadów przemysłowych, sprzecznych interesów pomiędzy społecznościami i podmiotami prawnymi w planowaniu i zagospodarowaniu zbiornika, w zakresie poboru wód powierzchniowych i podziemnych. Zagadnienia zagrożeń wymagają oddzielnej oceny ekonomicznej dla oszacowania zysków i strat. W analizie ekonomicznej zbiorników małej retencji konieczne jest uwzględnienie także kosztów monitoringu i zabezpieczenie środków na roszczenia.

Ogólny pogląd na potencjalne zmiany środowiskowe w sąsiedztwie zbiorników małej retencji przedstawiony jest na fig. 8.1. Na takie zmiany składają się czynniki hydrologiczno-hydrograficzne, geologiczne, hydrogeologiczne, biologiczne i klimatyczne. Z punktu widzenia oceny przepływów i zasobów wód podziemnych najważniejsze są pierwsze trzy czynniki zmian, tworzące dość skomplikowaną sieć sprzężeń zwrotnych i nie jest możliwe szczegółowe rozważenie tych zależności tutaj. Następny czynnik, jakim jest potencjalny wzrost opadów w rejonie małego zbiornika, nie wydaje się być istotnym. Z przedstawionego diagramu wynika, że wymuszenia hydrologiczno-hydrograficzne w postaci przebudowy sieci rzecznej i rozbudowy sieci melioracyjnej spowodują wymuszenie:

- zmiany pola przepływów,
- zmiany składu chemicznego wód i ewentualnej zmiany liczebności źródeł.

Te przemiany zachodzą zwykle w okresie krótszym niż zmiany geologiczne, jak zamulanie zbiornika, abrazja brzegów i erozja koryta. Ta ostatnia może być szczególnie intensywna poniżej spiętrzenia. Na czynniki hydrogeologiczne składają się przemiany hydrodynamiczne i hydrochemiczne i one najsilniej oddziałują na oszacowanie zmian w dostępności do zasobów wód podziemnych.

Zmiany składu chemicznego wód podziemnych w rejonie zbiorników małej retencji są intensywne i polegają w znacznej mierze na zmianie stref redukcyjno-oksydacyjnych związanych ze zmianami w większości strefy aeracji oraz, jako konsekwencja, zmianami w obiegu węgla skutkujące zwykle emisją CO_2 z powstałego zbiornika małej retencji.

Z kolei w każdym zbiorniku wód śródlądowych, niezależnie od jego głębokości, zachodzi stratyfikacja związana przede wszystkim z gradientem temperatury i dostępem światła. W górnej warstwie wody zbiornika, gdzie zachodzi proces fotosyntezy, dwutlenek węgla jest wiązany

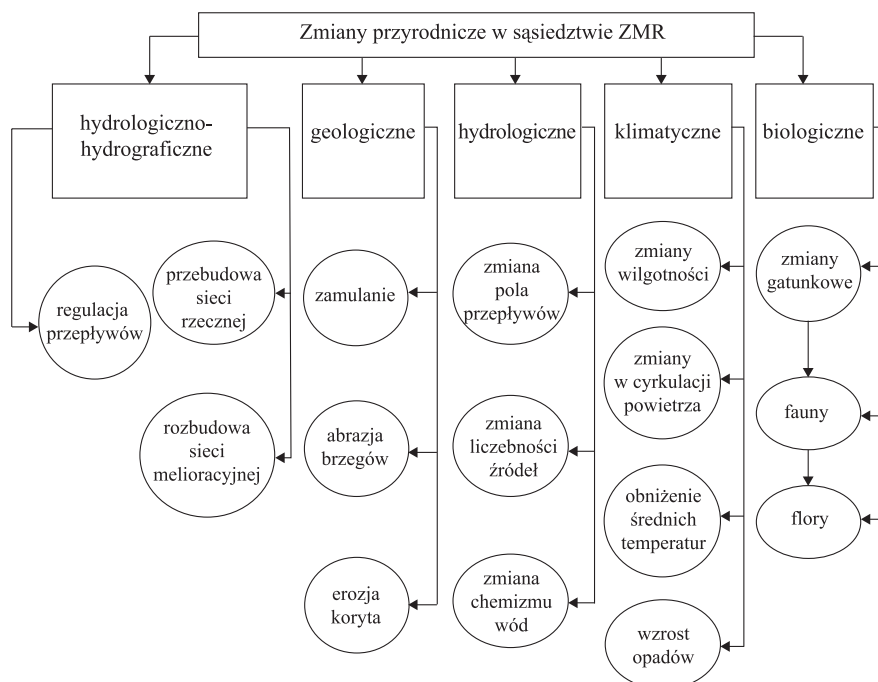


Fig. 8.1. Potencjalne zmiany przyrodnicze w sąsiedztwie ZMR

w organizmach roślinnych, a zostaje uwalniany tlen. pH wody przy powierzchni zbiornika jest zwykle wyższe niż w jego głębi. W związku z tym węglan wapnia strąca się zwykle w płytszej części zbiornika, a rozpuszczany w głębszej. W większości zbiorników wodnych produkcja CO_2 w głębszych warstwach przekracza możliwości jego konsumpcji przez organizmy w procesie fotosyntezy. Dlatego też poniżej strefy aktywnej fotosyntezy przeważają procesy oddychania i rozkładu opadającej materii organicznej. W dnie zbiornika w warunkach beztlenowych w procesie fermentacji i/lub redukcji CO_2 powstaje metan. Schemat obiegu węgla w hipotetycznym zbiorniku przedstawiono na fig. 8.2. Nadwyżka materii organicznej, która pierwotnie jest inerta w środowisku lądowym, a staje się mobilna w środowisku wodnym, prowadzi najczęściej do dodatkowej emisji dwutlenku węgla do atmosfery.

W glebie, która przeistoczyła się w strefę nasyconą na skutek podtopienia, wzrasta zawartość rozpuszczonego węgla organicznego i intensywność jego transformacji w CO_2 . Konsekwencją takich przemian jest proces rozpuszczania węglanów dostarczający do roztworu jonów węglanowych i wapniowych. Po początkowym obniżeniu pH wód podziemnych można spodziewać się jego wzrostu. Po zapełnieniu zbiornika, na skutek podpiętrzenia w sąsiadujących wodach podziemnych, można spodziewać się zawężenia strefy aeracji, a rozszerzenia strefy anaerobowej, gdzie podobnie jak w środowisku wodnym dna zbiornika dominować będą procesy fermentacji ($\text{C}_{\text{org}} \rightarrow \text{CH}_4$) i metanogenezy ($\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4$).

Także zmiana pola przepływów wód podziemnych wymuszać będzie zmiany w rozkładzie stężeń węgla i azotu w całym układzie wody powierzchniowe–wody podziemne.

Bardzo istotnym składnikiem, który powinien być rozpatrywany w zagadnieniach zmian środowiskowych przy powstawaniu zbiornika małej retencji, jest azot. W cyklu naturalnym azot

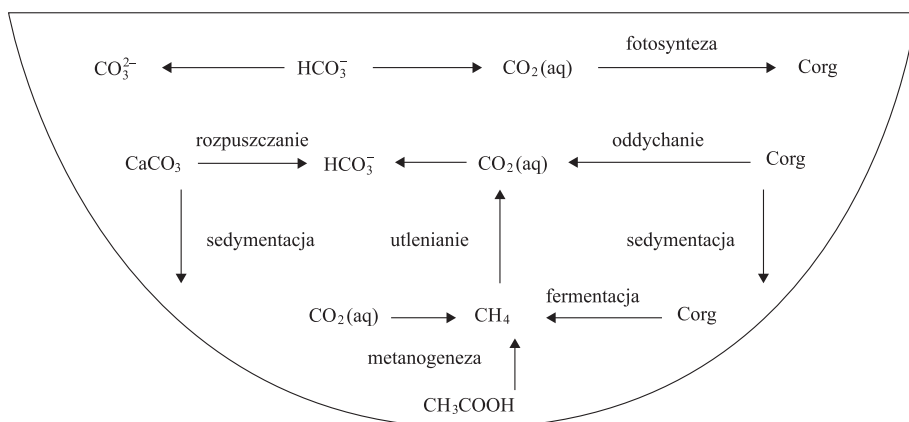


Fig. 8.2. Hipotetyczny obieg węgla w środowisku zbiornika małej retencji

C_{org} oznacza węgiel organiczny, a strzałki – odpowiednie procesy transformacji węgla i metanogenezy

atmosferyczny jest wiązany przez bakterie produkujące amoniak, który hydrolizowany jest następnie w środowisku glebowym. Kolejny etap obiegu azotu to proces nityfikacji powodujący utlenianie związków amonowych do azotanów. Cykl jest zamknięty przez proces denityfikacji, który wytwarza gazowy azot, który uwalnia się do atmosfery. Ten naturalny proces został definitywnie zaburzony przez człowieka poprzez wprowadzanie do środowiska ilości azotu znacznie przekraczających tło naturalne. W skali lokalnej, w warunkach istnienia ZMR, może mieć to bardzo negatywne następstwa. Zwłaszcza przy małym przepływie przez ZMR zbiornik może kumulować wypłukane z pól azotany, sprzyjając niepożądanemu procesowi eutrofizacji.

Figura 8.3 przedstawia hipotetyczny obieg azotu w rejonie zbiornika małej retencji. Uwzględnia on także udział form roślinnych i zwierzęcych, jak też czynniki antropogeniczne jak nawozy i ścieki. Z figury wynika, że choć azot może być retencjonowany przez organizmy i ich szczątki, to główną formą jego występowania są rozpuszczone w wodach związki nieorganiczne jak azotany i azot amonowy. Osady nie są źródłem azotanów, ale są wnoszone z pól do środowiska wód powierzchniowych jako zanieczyszczenia rozproszone, a w przypadku nawozów i ścieków jako zanieczyszczenia punktowe. W rzeczywistości praktyka rozpraszania ścieków na polach uprawnych czyni z nich źródło zanieczyszczeń rozproszonych. Faktyczne pochodzenie zanieczyszczeń może być rozstrzygnięte za pomocą oznaczeń izotopowych (Leśniak, 2006).

Fosfor jest inaczej zachowującym się pierwiastkiem, którego nadmiar zagraża równowadze środowiskowej w zbiorniku małej retencji. Fosforany pochodzące z nawożonych pól i ścieków powodują przekroczenie dopuszczalnych norm i dyskwalifikują wody jako przeznaczone do spożycia. Z figury 8.4 wynika, że głównym czynnikiem powodującym usuwanie różnych form kwasu fosforowego (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}) z pól jest przepływ cieku, ale pobór przez organizmy roślinne i buforowanie układu przez osady będzie prawie niewystarczające dla usuwania nadmiaru fosforu z wód zbiornika. Stąd nadmiarowy fosfor ($[\text{P}_T] > 35 \mu\text{g/L}$) w wodach zbiornika grozi nadmierną eutrofizacją, ze względu na nieograniczoną wprost asymilację fosforu przez bakterie i algi. Konsekwencją takiego stanu rzeczy jest więc intensywny rozwój fitoplanktonu, zarastanie zbiornika przez roślinność jeziorną, zamulanie i w dalszej perspektywie utrata jego pierwotnych funkcji stabilizującej ekosystem wodny. Proces eutrofizacji zbiornika może nabrać szczególnego tempa, jeżeli zbiornik małej retencji powstaje na obszarze będącym uprzednio polem użytkiwności.

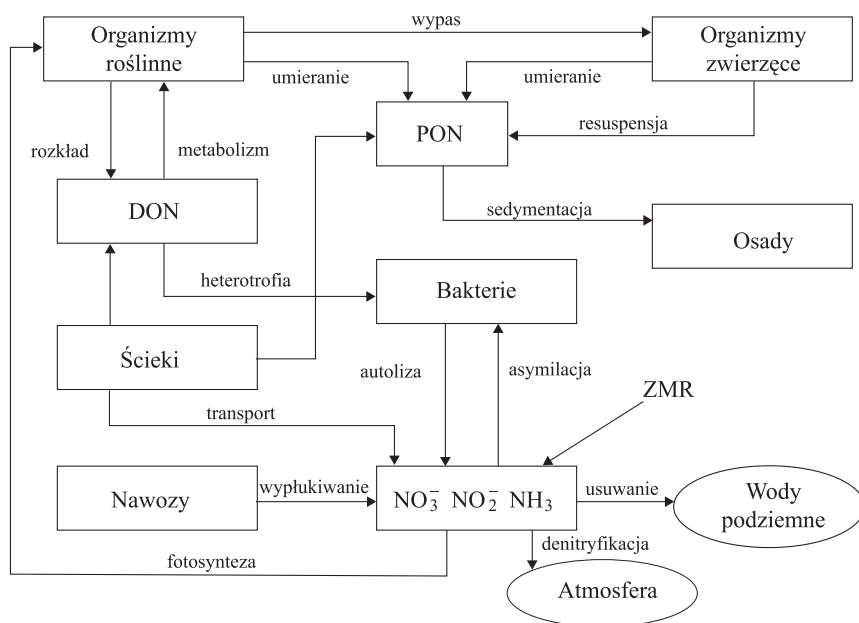


Fig. 8.3. Hipotetyczny obieg azotu w rejonie ZMR (wg Astona, 1980, zmodyfikowano)

Symbol DON oznacza rozpuszczony azot organiczny, PON – cząsteczkowy azot organiczny, strzałki oznaczają procesy transportu z jednego zbiornika do drugiego

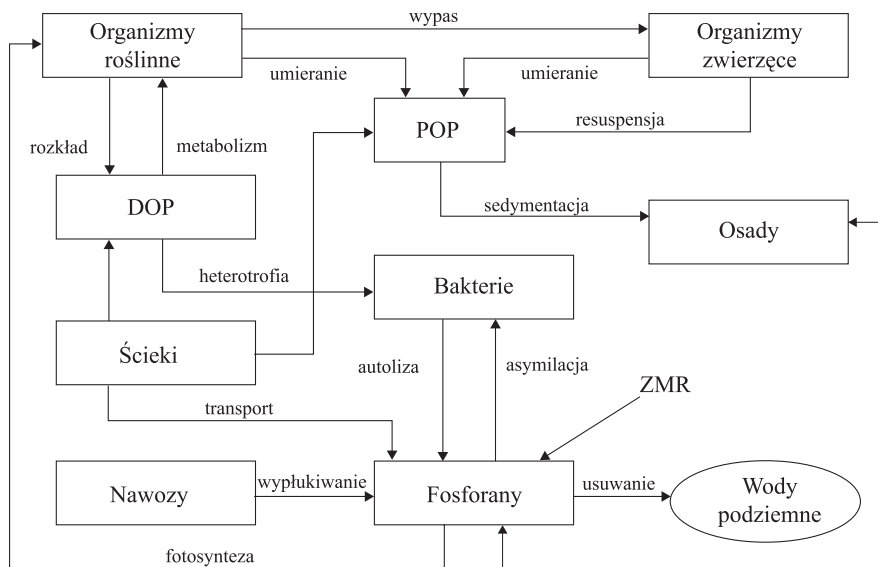


Fig. 8.4. Hipotetyczny obieg fosforu w rejonie ZMR (wg Astona, 1980, zmodyfikowano)

Symbol DOP oznacza rozpuszczony fosfor organiczny, POP – cząsteczkowy fosfor organiczny, strzałki oznaczają procesy transportu z jednego zbiornika do drugiego

nym nawozami sztucznymi. Deficyt tlenu w dnie zbiornika powoduje uruchomienie fosforanów zalegających w osadach jeziornych adsorbowanych na tlenkach i wodorotlenkach żelaza albo tworzących samodzielne fazy jak strengit, wiwianit i apatyt.

Wpływ samego akwenu (zbiornika małej retencji) na biosferę związany jest ze zmianami cech hydrometrycznych otoczenia, zwiększenie średniej wilgotności na obszarze, podtopienie łąk, pastwisk i pól uprawnych. Takie zjawiska powodują zmiany w biosferze. Roślinność sucholubna jest wypierana przez preferującą wilgoć. Biologiczne konsekwencje zmian dynamiki przepływu rzeczniczego są trudne do określenia, ponieważ dotyczą sprzężeń pomiędzy cechami morfometrycznymi koryta, zmianami w wysokości saturacji w strefie brzegowej, natężeniem przepływu i transportu materii rozpuszczonej i zawieszonej, związku pomiędzy drapieżcami i ofiarami a dostępnością pokarmu, sezonową zmiennością przepływów i jej wpływem na obszary siedliskowe roślin etc.

Powstały zbiornik zwiększa parowanie terenowe, zmieniając lokalnie klimat. Z kolei roślinność otaczająca zbiornik retencyjny zmniejsza parowanie ze zbiornika, zwłaszcza gdy powoduje zacienienie zbiornika. Drenaż transpiracyjny wód podziemnych podczas pobierania wód przez system korzeniowy roślin kształtuje stan ekologiczny ekosystemów łąkowych i bagiennych tarasu niskiego dolin rzecznych (Kiciński, 1988). Jego intensywność zależy od temperatury, wilgotności, prędkości wiatru, rodzaju gleby, rodzaju roślinności.

Podsumowując, na potencjalne korzyści środowiskowe wynikające z rozwoju małej retencji składają się:

- spowolnienie odpływu wód powierzchniowych i podziemnych,
- podniesienie poziomu wód gruntowych na obszarach przyległych do zbiornika,
- zapobieganie degradacji siedlisk roślinnych,
- poprawa warunków rozwoju ptactwa wodnego,
- powstanie wodopojów dla zwierzyny,
- zwiększenie atrakcyjności turystycznej i rybackiej terenów,
- zwiększenie bezpieczeństwa pożarowego w sąsiadujących lasach.

Jednakże do potencjalnych efektów niepożądanych można zaliczyć zwiększenie erozji i obniżenie poziomu wód gruntowych poniżej zbiornika, zwiększenie emisji dwutlenku węgla do atmosfery, zmianę mikroklimatu sprzyjającą rozwojowi siedlisk niepożądanych owadów.

9. ZASOBY WÓD PODZIEMNYCH I ICH ZWIĄZEK Z WODAMI POWIERZCHNIOWYMI

Problematyka zasobów wód podziemnych jest jednym z najważniejszych działów hydrogeologii stosowanej, od lat stanowi temat wielu prac badawczych i aplikacyjnych. Przykładem może być lista 68 publikacji zawarta w poradniku metodycznym „Ustalanie dyspozycyjnych zasobów wód podziemnych” (Paczyński i in., 1996). Jednak ciągle przy rozwiązywaniu praktycznych problemów dotyczących tych zagadnień napotyka się wiele wątpliwości wynikających głównie z trudności pogodzenia wymogów formalnoprawnych z przyrodniczą naturą tych zasobów. Jak widać, jest to dziedzina rozległa, złożona i ciągle jeszcze budząca wiele dyskusji i kontrowersji. Jedną z przyczyn takiego stanu jest brak spójnego wewnątrznie i zgodnego z innymi działami hydrogeologii modelu pojęciowego dotyczącego całości problematyki zasobów.

Zawarty w tym rozdziale opis ma na celu przedstawienie podstawowych problemów teoretycznych i praktycznych związanych z zasobami wód podziemnych, przedstawienie pewnej propozycji w zakresie spójnego wewnątrznie modelu pojęciowego i w zakresie metod wyznaczania tych zasobów, a także szacowania ich zmian spowodowanych zmianami warunków hydrogeologicznych. Ten ostatni problem wpisuje się ściśle w problematykę wpływu sztucznych zbiorników wodnych, także zbiorników małej retencji, na zasoby wód podziemnych.

9.1. Klasyfikacja zasobów wód podziemnych i podstawowe pojęcia

Jak wspomniano wcześniej, brak jest kompleksowego i spójnego wewnątrznie modelu pojęciowego dotyczącego zagadnień związanych z zasobami wód podziemnych. Bez takiego modelu trudno jest przedstawić w sposób klarowny wpływ zbiorników małej retencji na zmiany tych zasobów w ich sąsiedztwie. Przedstawione poniżej rozważania mają na celu przybliżenie wstępnego zarysu takiego modelu, jednak z uwagi na cel tego opracowania nie ma miejsca na pełną analizę wszystkich aspektów problematyki zasobowej i na szczegółowe przedstawianie wszystkich zagadnień dotyczących poszczególnych elementów takiego modelu i relacji, jakie pomiędzy tymi elementami występują.

Podstawą przedstawianej koncepcji jest analiza głównych pojęć z tego zakresu. Pojęcie zasobów w hydrologii ma inny sens, niż to jest przyjęte w odniesieniu do wód podziemnych. Tam ma się na myśli objętość całej wody, jaka występuje na określonym obszarze lub w określonej formie (Dębski, 1970). Na podkreślenie zasługuje to, że w hydrologii do zasobów stosuje się miarę objętości i że mierzy się całą ilość wody bez względu na jej dostępność i jakość. W hydrogeologii pojęcie zasobów jest rozumiane inaczej, bardziej praktycznie – uwzględnia się tylko tę wodę, która jako surowiec może być w eksploatowana do wykorzystania komunalnego, przemysłowego lub rolniczego. Pomijając nieistotny tu podział na wody zwykłe i mineralne, w hy-

drogeologii zasoby wody obejmują te wody, które spełniają określone kryteria jakości i które mogą być wydobywane bez szkody dla ich naturalnego środowiska. W wielu przypadkach jest to istotnie ograniczona część wszystkich wód, jakie występują w danym rejonie pod ziemią, także wód dobrej jakości.

Dla przybliżenia złożoności problematyki zasobów wód podziemnych i związanych z tym niejasności dotyczących wzajemnych relacji pomiędzy poszczególnymi pojęciami poniżej przedstawiona jest analiza definicji tych pojęć.

Zasoby statyczne i zasoby dynamiczne. Na pozór podział ten wydaje się być sensowny – zasoby statyczne rozumiane są tu podobnie jak w hydrologii i są wyrażane w jednostkach objętości. Zasoby dynamiczne odnoszą się do wody podziemnej będącej w ruchu – określają sumę wszystkich strumieni w rozpatrywanym układzie i są wyrażane w jednostkach wydajności przepływu. Jednak rodzi się pytanie, czy oba rodzaje zasobów można w jakiś sposób zsumować i jakie reguły obowiązują przy takim sumowaniu. Aby zasoby statyczne mogły być wykorzystane, muszą w jakiś sposób dotrzeć do ujęcia – gdy woda stanowiąca zasoby statyczne przemieszcza się w kierunku ujęcia, staje się częścią zasobów dynamicznych, co prowadzi do wniosku, że sumowanie obu tych rodzaj zasobów jest niemożliwe. Ponadto można zauważyć, że zasoby statyczne ujawniają się tylko w przypadku, gdy zmienia się położenie zwierciadła wody, co świadczy o wzroście lub zmniejszeniu się zasobów statycznych. Zmiana położenia zwierciadła wody świadczy o tym, że mamy do czynienia z ruchem nieustalonym, czyli z sytuacją dynamiczną. Prowadzi to do wniosku, że zasoby statyczne ujawniają się tylko w sytuacjach dynamicznych. Gdy przepływ jest ustalony, czyli gdy nie zachodzą żadne zmiany jego parametrów, jedynymi „widocznymi” zasobami są zasoby dynamiczne.

Powyższe uwagi skłaniają do głębszego przemyślenia wzajemnych relacji pomiędzy tymi dwoma rodzajami zasobów wód podziemnych. Wstępną propozycją, jedynie na użytek tego opracowania, jest pominięcie zasobów statycznych w analizach bilansowych, ponieważ przyjętą tu podstawą metodyczną jest ocena zasobów odnosząca się tylko do długookresowych uśrednionych stanów ustalonych.

Zasoby regionalne i zasoby lokalne. Podział na zasoby regionalne i lokalne najczęściej jest rozumiany jako podział pod względem szczegółowości i dokładności analizowania i wyznaczania zasobów. Zasoby regionalne są na ogół wyznaczane metodami hydrologicznymi i w tym przypadku najmniejszym podobszarem bilansowym jest zlewnia powierzchniowa lub jej fragment określony przez dwa przekroje wodowskazowe. Dla głębokich poziomów wodonośnych zasoby regionalne są wyznaczane metodami modelowania numerycznego. Problematyka hydrogeologiczna związana ze zbiornikami małej retencji dotyczy zagadnień lokalnych i z tego względu dokładniejsze omawianie metod szacowania zasobów regionalnych wykracza poza zakres tego opracowania.

Wyznaczanie zasobów lokalnych kojarzy się głównie z projektami budowy konkretnych ujęć i ze związanymi z tymi projektami badaniami hydrogeologicznymi dotyczącymi lokalizacji tych ujęć i możliwości zagwarantowania planowanej wielkości eksploatacji. Określenie „zasoby lokalne” wymaga jednak dużej ostrożności – analizowany obszar nie może ograniczać się do małej jednostki zasobowej, ponieważ, zgodnie z przyrodniczą naturą zasobów wód podziemnych, wpływ poboru wody w jednym obszarze istotnie wpływa na zmniejszenie się zasobów w obszarach sąsiednich. Z tego względu przy wyznaczaniu zasobów lokalnych jakiegoś stosunkowo niewielkiego obszaru obszar poddany analizie musi być znacznie większy i w rezultacie analizowany problem przestaje być lokalny.

Zasoby dyspozycyjne i zasoby eksploatacyjne. Oba te pojęcia wywodzą się z przepisów prawnych dotyczących zasobów wód podziemnych. Problematyka prawna w tym zakresie jest przedstawiona w innym rozdziale i tu można ograniczyć się jedynie do komentarzy dotyczących zagadnień metodycznych.

Opierając się na urzędowym brzmieniu definicji zasobów dyspozycyjnych, trzeba zauważyć, że Prawo geologiczne i górnicze nie stawia wymogu określenia wielkości tych zasobów w postaci jednej liczby, wymóg ten wyrażony jest jedynie w przepisach wykonawczych do tej ustawy, których ranga jest znacznie niższa. Biorąc pod uwagę przyrodniczą naturę zasobów wód podziemnych, ilość wody, jaką można pobierać z jakiegoś rozpatrywanego obszaru, istotnie zależy od położenia miejsc, w których woda ta byłaby pobierana. Z tego względu wynikiem oszacowania zasobów dyspozycyjnych powinna być mapa jednostki zasobowej, przedstawiająca obszary o dobrych, średnich i złych warunkach zasobowych. Dzięki takiej mapie „rozdysponowywanie” zasobów dyspozycyjnych byłoby decyzjami racjonalnymi i pozwalającymi na optymalne rozmieszczenie potencjalnych miejsc poboru wody podziemnej.

Zasoby eksploatacyjne to, zgodnie z definicją, dopuszczalny pobór wód podziemnych w ujęciu, przy określonym sposobie eksploatacji i uwzględnieniu warunków środowiskowych (Dowgiałło i in., red., 2002).

Zasoby naturalne i zasoby sztuczne. Każda ingerencja człowieka w naturalne środowisko hydrogeologiczne powoduje zmianę warunków hydrogeologicznych tego środowiska i w konsekwencji zmianę zasobów wody podziemnej. Jako zasoby naturalne rozumie się tę część zasobów, która jest wynikiem działania czynników naturalnych. Najistotniejszym czynnikiem naturalnym tworzącym zasoby wody podziemnej jest infiltracja opadów atmosferycznych. Działalność człowieka może spowodować wzrost zasobów, na przykład poprzez sztuczne zasilanie, jednak może również przyczynić się do ich zmniejszenia. Jednym z istotniejszych czynników antropogenicznych wpływających na wielkość zasobów jest podpiętrzanie podstawy drenażu. Ponieważ problem ten jest ściśle związany z zagadnieniem wpływu zbiorników małej retencji na wody podziemne, jest oddzielnie omówiony w dalszej części opracowania.

Zasoby stałe i zasoby zmienne. Zarówno warunki hydrogeologiczne, jak i będące ich pochodną zasoby wód podziemnych ulegają stałym cyklicznym zmianom, głównie sezonowym, czyli w cyklu rocznym. Krótkookresowe zmiany pogodowe również mają wpływ na warunki i zasoby, jednak ich częsta zmienność sprawia, że charakteryzujące się dużą inercją środowisko hydrogeologiczne reaguje na te zmiany znacznie słabiej. Wyjątkami są tu jedynie długotrwałe okresy pogody odbiegającej od średniej normy, jak na przykład wielomiesięczne letnie susze lub długotrwałe opady. W takich przypadkach mamy do czynienia z nietypowymi latami, w których zasoby wód podziemnych mogą znacznie odbiegać od wartości średnich wieloletnich. Z tego względu wyodrębnienie zasobów stałych i zmiennych jest racjonalnie uzasadnione. W tym przypadku, jako zasoby stałe rozumie się pewną bazową wielkość odpowiadającą wielkości minimalnej z wielolecia, a jako zasoby zmienne rozumie się pewną nadwyżkę przypadającą na określony rok lub inny okres czasu w stosunku do wielkości minimalnej z wielolecia.

Uwzględniając wymagania dotyczące bezpieczeństwa w zakresie zaopatrzenia w wodę dla celów komunalnych, przemysłowych i rolniczych, jako zasoby określonego obszaru należy rozumieć wielkość zbliżoną w sensie statystycznym do zasobów stałych.

Zasoby wzbudzone. Pojęcie to wymaga szerszego wyjaśnienia, ponieważ nasuwa szereg wątpliwości, między innymi dotyczących jego relacji z pojęciem zasoby sztuczne. Definicja zawarta w Słowniku hydrogeologicznym (Dowgiałło i in., red., 2002) zakłada, że zasoby te są

wynikiem pracy ujęcia wody podziemnej i że w wyniku tego na skutek obniżenia się zwierciadła wody podziemnej nastąpił wzrost infiltracji opadów atmosferycznych i w konsekwencji wzrost zasobów wód podziemnych. Takie określenie bardzo ogranicza znaczenie tego terminu, ponieważ zgodnie z zawartą w nim myślą, każde obniżenie zwierciadła w jakimś stopniu zwiększa infiltrację i w konsekwencji wielkość zasobów, a ponadto zjawisko odwrotne, podniesienie się zwierciadła, powinno zmniejszyć wielkość zasobów. Jest to w przedstawianej tu problematyce bardzo istotne, ponieważ wpływ zbiorników małej retencji na wody podziemne głównie sprowadza się do podniesienia poziomu zwierciadła wody.

Biorąc pod uwagę powyższe fakty, można uznać, że pojęcie to jest przykładem niejasności, które powstają, gdy nie ma kompleksowego i spójnego wewnątrznie modelu pojęciowego dotyczącego problematyki zasobowej. W tej sytuacji, na potrzeby tego opracowania, można przyjąć, że:

- zasoby wzbudzone występują w każdym przypadku, gdy w wyniku działalności człowieka obniżenie poziomu wody podziemnej spowoduje zwiększenie zasilania pochodzącego z opadów atmosferycznych;
- zasoby te ujawniają się dopiero, gdy wystąpi obniżenie zwierciadła, czyli gdy nastąpi ingerencja człowieka;
- nie w każdym przypadku obniżenie zwierciadła powoduje istotne zwiększenie infiltracji, ma to miejsce, gdy zwierciadło znajduje się płytko względem powierzchni terenu;
- z powyższego wynika, że gdy zwierciadło leży płytko i nie ma tam ujęcia, to można mówić o „potencjalnych zasobach wzbudzonych”, które ujawnią się, gdy zostanie tam wybudowane ujęcie;
- wszelka działalność człowieka prowadząca do podniesienia się zwierciadła wody podziemnej prowadzi do pozornego zmniejszenia zasobów – w tej sytuacji bardziej odpowiednim określeniem jest „do ukrycia potencjalnych zasobów wzbudzonych”;
- w przypadku, gdy pierwotnie zwierciadło znajdowało się stosunkowo głęboko i w wyniku znacznego podpiętrzenia znalazło się płytko pod powierzchnią, wielkość ukrytych, a raczej „potencjalnych” zasobów wzbudzonych może być znaczna.

Problematyka ta ma istotne znaczenie przy rozpatrywaniu wpływu zbiorników małej retencji na zmiany zasobów dyspozycyjnych i w tym aspekcie będzie jeszcze przedstawiana w dalszej części opracowania.

9.2. Wpływ zmiany warunków hydrogeologicznych na zmianę zasobów

Na wielkość zasobów wód podziemnych, a zatem także na ich zmiany, mają wpływ dwie kluczowe grupy czynników:

- warunki hydrogeologiczne rozpatrywanego systemu,
- ograniczenia przyrodniczo-środowiskowe decydujące, jaka część wód znajdujących się w rozpatrywanym systemie może stanowić zasoby. Do grupy tej zalicza się wszelkie decyzje administracyjne dotyczące różnych stref ochrony, a w szczególności te, które bezpośrednio przekładają się na ograniczenia zmian warunków hydrogeologicznych, na przykład ograniczenie obniżania zwierciadła.

Odwołując się do modelu pojęciowego zagadnienia brzegowego (*vide* Dodatek), można w dużym uproszczeniu przyjąć, że warunki hydrogeologiczne to warunki brzegowe określające

oddziaływanie otoczenia i atrybuty wnętrza opisujące właściwości wnętrza systemu, a przez to sposób, w jaki warunki brzegowe kształtują stan tego wnętrza. W ujęciu „przyczyna–skutek”, warunki hydrogeologiczne są przyczyną, a skutkiem jest stan, jaki powstaje w systemie. W ramach tego sformalizowanego schematu można przyjąć, że zasoby są funkcją warunków hydrogeologicznych, i że każda zmiana warunków pociąga za sobą zmianę zasobów. Przykład takich zmian i ich wpływu na zasoby został przedstawiony w poprzednim podrozdziale dotyczącym zasobów wzbudzonych. Jednak, aby uniknąć zbyt daleko idących uproszczeń, trzeba tu zaznaczyć, że warunki hydrogeologiczne to cały kompleks wielu czynników, które wzajemnie na siebie oddziałują. Na przykład, nie wystarczy samo obniżenie się zwierciadła wody, aby wzrosły zasoby, zwierciadło to musiało przedtem znajdować się na odpowiednio małej głębokości.

Wspomniany wcześniej, przy okazji omawiania zasobów stałych i zmiennych, a także będący przedmiotem oddzielnego rozdziału, aspekt czasowy zasobów wiąże się bezpośrednio z zagadnieniem zmienności tych zasobów. Jako zmianę zasobów należy tu rozumieć długotrwały efekt, a nie ich fluktuacje związane ze zmianami pogody, ani też zmiany sezonowe w ciągu roku.

Rozpatrując problem wpływu zmian warunków hydrogeologicznych na zmiany zasobów, należy podkreślić, że nie cała woda dobrej jakości znajdująca się w obiegu podziemnym w rozpatrywanym systemie stanowi zasoby. W przeciwieństwie do koncepcji hydrologicznej, w hydrogeologii jest to tylko ta część wody podziemnej, która może być eksploatowana bez naruszenia określonych ograniczeń środowiskowych. W konsekwencji takiego podejścia należy uznać, że zmiana zasobów może nastąpić, gdy:

- pod wpływem zmiany czynników zewnętrznych, najczęściej w wyniku działalności człowieka, nastąpi pogorszenie jakości wody w jakimś fragmencie systemu;
- również pod wpływem tych czynników nastąpi istotna zmiana kierunku lub odwrócenie gradientów hydrodynamicznych i w konsekwencji wody złej jakości znajdujące się na granicy lub w części peryferyjnej systemu zaczną napływać do obszarów, gdzie wcześniej występowały wody spełniające wymagane kryteria jakościowe;
- powyższe procesy mogą także prowadzić do zwiększenia zasobów w przypadku, gdy ich skutek jest pozytywny – prowadzi do poprawy jakości wody w jakimś fragmencie systemu hydrogeologicznego;
- pod wpływem zmiany czynników zewnętrznych, najczęściej w wyniku działalności człowieka, nastąpi zmiana ilości wody zasilającej system, rozumiana tu jako zmiana całkowitego przepływu w strefach zasilania systemu;
- czynniki zewnętrzne pochodzenia antropogenicznego mogą także spowodować wzrost zasobów poprzez ujawnienie się zasobów wzbudzonych.

To, w jaki sposób system reaguje na czynniki zewnętrzne i w konsekwencji – jaka w wyniku tego może nastąpić zmiana zasobów, w znacznym stopniu zależy od rodzaju systemu. Na przykład, czy jest to system głęboki, oddzielony od powierzchni terenu innymi systemami, czy jest pierwszym poziomem o dobrym kontakcie z powierzchnią terenu i wodami powierzchniowymi. Istotne znaczenie ma również to, czy jest to system typu małej zlewni w rejonie wysoczyzny, czy jest to fragment doliny dużej rzeki. W każdym z tych przypadków reakcja systemu na zmianę czynników zewnętrznych przejawiająca się zmianą zasobów może być różna. Z tego powodu kierowanie się ogólnymi regułami, mającymi zastosowanie do wszystkich przypadków, może okazać się bardzo zawodne.

Nie tylko czynniki zewnętrzne wyrażone warunkami brzegowymi, ale także zmiana kryteriów ograniczających, wyrażających wymogi ochrony środowiska naturalnego, może istotnie

wpłynąć na zmianę zasobów wody podziemnej. Stosunek wody stanowiącej zasoby wód podziemnych do całej ilości wody znajdującej się w danym systemie hydrogeologicznym zależy od kryteriów ograniczających te zasoby. Na przykład ustanowienie obszaru chronionego w bezpośrednim sąsiedztwie systemu pociąga za sobą nałożenie rygorystycznego ograniczenia na wielkość obniżenia poziomu wody podziemnej w granicach tego obszaru, a często także w jego sąsiedztwie. Innym przykładem jest określenie nowych wielkości przepływów nienaruszalnych w ciekach, które stanowią system drenażu dla rozpatrywanego systemu hydrogeologicznego.

9.3. Rodzaje oddziaływań wód powierzchniowych na zasoby wód podziemnych

Wody powierzchniowe są jednym z głównych czynników kształtujących warunki hydrogeologiczne i w konsekwencji wielkość zasobów. Poza nielicznymi przypadkami, gdy zasilają systemy hydrogeologiczne, w zdecydowanej większości przypadków ich rola sprowadza się do drenowania wód podziemnych. O roli drenującej wód powierzchniowych w stosunku do wód podziemnych decydują dwa podstawowe parametry. Pierwszy, to rzędna podstawy drenażu, określana poprzez średnią rzędną zwierciadła wody powierzchniowej. Drugim parametrem jest przewodność kontaktu hydraulicznego pomiędzy poziomem wodonośnym a ciekim lub zbiornikiem wód powierzchniowych. Każda zmiana któregoś z tych parametrów pociąga za sobą zmianę warunków hydrogeologicznych i w konsekwencji zmianę zasobów tych wód. Najczęściej zmiana podstawy drenażu w wyniku działalności człowieka polega na podpiętrzeniu wód powierzchniowych i z taką zmianą mamy do czynienia w przypadkach sztucznych zbiorników wodnych, a w tym zbiorników małej retencji. Inną przyczyną zmiany podstawy drenażu może być regulacja koryta cieku, w której rezultacie ulegają zmianie opory hydrauliczne tego koryta i w konsekwencji spadki, co najczęściej prowadzi do obniżenia średnich rzędnych zwierciadła wody w poszczególnych przekrojach cieku.

Jakość kontaktu hydraulicznego cieku lub zbiornika z warstwą wodonośną zależy od wielu czynników, między innymi od:

- miąższości i parametrów filtracyjnych utworów stanowiących warstwę wodonośną,
- stopnia wcięcia koryta cieku w tę warstwę,
- miąższości i parametrów filtracyjnych utworów oddzielających warstwę wodonośną od koryta cieku lub od zbiornika, jeżeli takie utwory tam występują,
- wielkości powierzchni dna cieku lub zbiornika,
- miąższości i parametrów filtracyjnych utworów wyścielających dno cieku lub zbiornika.

Z reguły wybudowanie zbiornika zaporowego na cieku zwiększa znacznie kontakt hydrauliczny, ponieważ zwiększa się powierzchnia dna; jednak z upływem czasu dno zbiornika jest sukcesywnie wyścielane osadami o złych parametrach filtracyjnych i w rezultacie kontakt ten pogarsza się stopniowo z upływem lat. Szybkość tego procesu zależy od rodzaju i ilości zawiesiny, jaką wody cieku niosą i pozostawiają w zbiorniku.

Wpływy zmian warunków dotyczących wód powierzchniowych na zmiany zasobów wód podziemnych można podzielić na dwie kategorie – wpływy bezpośrednie i wpływy pośrednie. Podstawowym wpływem bezpośrednim jest podpiętrzenie wód podziemnych przez podniesienie podstawy drenażu. Wielkość tego podpiętrzenia maleje wraz z oddalaniem się od czaszy zbiornika i w dużym przybliżeniu można przyjąć, że jest to proporcjonalne do kwadratu odległości,

jednak zależy to w dużym stopniu od geometrii rozpatrywanego systemu hydrogeologicznego. Ponieważ, jak wcześniej wspomniano, powoduje to zmniejszenie gradientów pola filtracji w otoczeniu zbiornika, w konsekwencji zmniejszenie wielkości przepływów i powierzchni zlewni podziemnej, można by odnieść wrażenie, że zasoby wód podziemnych uległy zmniejszeniu. Jest to jednak błędny wniosek i błąd ten wynika z traktowania zasobów wody podziemnej jako wielkości statycznej (nie zmieniającej się w czasie), niezależnej od okoliczności, jakie mogą wystąpić w przypadku poboru tej wody. Bardziej szczegółowa analiza tego zagadnienia zawarta jest w dalszej części opracowania.

Do pośrednich oddziaływań należy zaliczyć wszystkie te czynniki, które wpływają, naturalnie lub sztucznie, na inne elementy środowiska naturalnego i które są związane z obiegiem wody w tym środowisku. Są to jednak oddziaływania słabe i w wielu przypadkach mogą być pomijane. Należą do nich między innymi:

- zmiana szaty roślinnej wpływająca na zmniejszenie gwałtowności spływu powierzchniowego i zwiększenie retencji powierzchniowej;
- zmiana mikroklimatu w sąsiedztwie zbiornika na bardziej wilgotny i mniej wietrzny, co powoduje ograniczenie parowania terenowego i zwiększenie zasilania infiltracyjnego;
- wyrównanie wielkości przepływów w cieku poniżej zbiornika z przepływem sterowanym, co przekłada się na złagodzenie środowiskowego ograniczenia dotyczącego odpływu podziemnego do cieku i w konsekwencji na złagodzenie ograniczeń dotyczących zasobów wód podziemnych;
- wykorzystanie wody w zbiorniku do celów irygacyjnych, co w wielu przypadkach prowadzi do zwiększenia zasilania systemu hydrogeologicznego – wprowadza element sztucznego zasilania.

Odwołując się do modelu pojęciowego zagadnienia brzegowego, można ogólnie przyjąć, że zmiany w zakresie wód powierzchniowych na zasoby wód podziemnych wyrażają się albo poprzez zmiany warunków brzegowych, albo poprzez zmiany kryteriów ograniczających wielkość tych zasobów.

9.4. Aspekty przestrzenne zasobów wód podziemnych i ich zmian pod wpływem antropopresji

Z definicji zasobów mówiącej, że jest to ilość wody, którą można eksploatować, wynika, że można się spodziewać znacznych poborów wody z rozpatrywanego systemu hydrogeologicznego. Jedynymi ograniczeniami tego poboru są wymagania środowiska naturalnego, najczęściej formułowane jako kryteria ograniczające pobór wody ze względu na niekorzystne przyrodniczo skutki tego poboru, do których nie można zaliczyć zmiany granic określonego wcześniej systemu. Systemy hydrogeologiczne, takie jak systemy krążenia lub zlewnie podziemne, w wyniku dużego poboru wody mogą ulegać znacznym deformacjom przestrzennym – poczynając od istotnych zmian granic i kończąc na zaniku systemu lub łączenia się razem systemów sąsiednich. Sens wyznaczania zasobów dla takich systemów budzi poważne wątpliwości metodyczne – do czego będą się w przyszłości odnosiły te zasoby, czy do przestrzeni, w której był pierwotny system, czy też do nowego układu, który utworzy się w wyniku poboru wody jako silnego wymuszenia zewnętrznego. Wynika z tego, że zasoby powinny być wyznaczane tylko dla systemów odpornych na deformacje przestrzenne, czyli o granicach charakteryzujących się słabymi więziami hydraulicznymi z otoczeniem.

Z powyższych powodów określanie przestrzennych lub obszarowych wyróżnień (jednostek) dla wyznaczania zasobów powinno być oparte na analizie zmienności poziomej i pionowej więzi hydraulicznych pomiędzy poszczególnymi fragmentami rozpatrywanej przestrzeni hydrogeologicznej. Takie wyróżnienie przestrzenne jest najbliższe definicji systemu wodonośnego i w zależności od potrzeb może być określone jako przestrzeń trójwymiarowa (3D), w której ten system się mieści, lub jako obszar (2D) odpowiadający temu systemowi. W konsekwencji tego trzeba założyć, że tylko taki obszar może być przyjęty jako obszar dla wyznaczania zasobów.

Inny problem związany z aspektem przestrzennym zasobów to ich zmienność w obrębie obszaru, dla którego są wyznaczane. Badania modelowe wykazują bezspornie, że zmienność ta jest znaczna i pomijanie tego faktu może prowadzić do dużych błędów w decyzjach dotyczących pozwoleń na eksploatację wody podziemnej. Obok czynników przestrzennie zmiennych charakteryzujących system hydrogeologiczny, jakim są parametry hydrodynamiczne, a w szczególności przewodność pozioma warstwy, do innych istotnych czynników przestrzennie zmiennych należy zaliczyć:

- względną odległość od cieków powierzchniowych stanowiących potencjalne źródło zasilania wody podziemnej, w przypadkach dużych skupionych poborów powodujących znaczne lokalne depresje;
- przestrzennie zmienny rozkład parametrów określających warunki infiltracji wód opadowych;
- przestrzennie zmiennie czynniki ograniczające wielkość zasobów wynikające z konieczności ochrony przyrodniczo cennych siedlisk;
- zmienność przestrzenną parametrów określających jakość wody i czynniki mogące wpłynąć na pogorszenie się tej jakości.

Problem zmienności przestrzennej zasobów w obrębie obszaru, dla którego są wyznaczane, jest często niedoceniany, brak jest metod analizy tej zmienności, a większość metod wyznaczania zasobów całkowicie pomija aspekt ich zmienności przestrzennej. W dalszej części opracowania, przy opisie poszczególnych metod szacowania zasobów, zagadnienie to będzie poruszone ponownie.

9.5. Aspekty czasowe zasobów wód podziemnych

Zmienność zasobów wód podziemnych w czasie można rozpatrywać w dwóch aspektach. Pierwszy to zmienność cykliczna tych zasobów, spowodowana głównie czynnikami klimatycznymi i atmosferycznymi. Można tu wyróżnić zmiany zasobów wywołane:

- zmianami pogody, gdy cykliczność tych zmian mierzy się w tygodniach. Sytuacje ekstremalne spowodowane są długotrwałą suszą, intensywnymi lub długotrwałymi opadami atmosferycznymi, a także wahaniami temperatury w okolicach zera;
- zmiennością sezonową w cyklu rocznym;
- obserwowane są także cykliczne tendencje wieloletnie, obok sporadycznie występujących, tak zwanych lat suchych i mokrych, można zaobserwować, że często kilka kolejnych lat odbiega znacznie od wartości średnich dla wielolecia.

Biorąc pod uwagę potrzebę zagwarantowania stabilności w zaopatrzeniu w wodę, przy wyznaczaniu zasobów wód podziemnych rozpatruje się sytuację mniej korzystną – odpowiadającą niskim stanom zarówno wód powierzchniowych, jak i podziemnych. Przyjmowana jest tu różna

wartość graniczna, najczęściej jednak zakłada się, że krótkookresowe wahnięcia wielkości zasobów poniżej stanów niskich nie mogą stanowić więcej niż 5 do 10% rozpatrywanego wieloletniego okresu czasu.

Drugi aspekt czasowy zasobów wód podziemnych dotyczy zmian wywołanych działalnością człowieka. W tym przypadku można mówić o pewnych wieloletnich fazach zmian warunków hydrogeologicznych i w konsekwencji zmian wielkości zasobów. W takich przypadkach punktem wyjścia jest faza początkowa, można ją nazwać także fazą pierwotną, w której panują warunki naturalne, gdy mamy do czynienia z wyłącznie naturalnym zasilaniem i naturalnym drenażem. Każda kolejna znacząca ingerencja człowieka w panujące tam warunki rozpoczyna nową fazę, w której mamy do czynienia z innymi warunkami i inną wielkością zasobów. W tym przypadku skala czasu ma bardziej charakter topologiczny niż geometryczny – mniejsze znaczenie ma odległość czasowa poszczególnych zdarzeń, a większe ich następstwo czasowe pozwalające na powiązanie ich w łańcuch zależności typu „przyczyna–skutek”. Dwa poniższe przykłady stanowią ilustrację takiego podejścia.

Pierwszy przypadek przedstawia sytuację najbardziej typową. W obrębie obszaru wyznaczania zasobów pracuje szereg ujęć eksploatujących znaczącą część zasobów tego obszaru. Fazę tę można określić jako stan aktualny. Wyznaczając zasoby tego obszaru, dysponujemy najczęściej informacjami, które w przybliżeniu można uznać za obraz stanu aktualnego. Dane dotyczące stanu pierwotnego – naturalnego – są bardzo skąpe i niedokładne. Należy przypuszczać, że znaczący pobór wody spowodował uruchomienie zasobów wzbudzonych, ponieważ jednak nasza znajomość stanu naturalnego jest bardzo ograniczona, nie mamy możliwości określenia, jak duże są w tym przypadku zasoby wzbudzone. Sytuację tę komplikuje jeszcze bardziej fakt, że również naturalne pole filtracji uległo przeobrażeniu i prawdopodobnie położenie wododziałów podziemnych również uległo zmianie. Naturalne granice systemu zostały w wyniku tego zmienione, a powierzchnia systemu, dla którego wyznaczono zasoby, jest obecnie inna niż w fazie pierwotnej. W tej sytuacji rodzi się pytanie, co właściwie należy uznać za zasoby tego obszaru, czy zasoby odpowiadające sytuacji naturalnej, czy panującej obecnie. Pierwsze są trudne do ustalenia, a drugie są rezultatem sytuacji przejściowej, ponieważ wkrótce na tym obszarze mogą powstać nowe ujęcia i w wyniku tego zmieniać się warunki hydrogeologiczne i zmieniać wielkość zasobów. Przyczyną tej zmiany mogą być nowe zasoby wzbudzone zwiększające zasoby aktualne, ale także pogorszenie się jakości wody w wyniku zwiększonej eksploatacji, co prowadzi do pominięcia części wód zaliczanych wcześniej do zasobów.

Drugi przypadek jest bardziej złożony, ponieważ wpływ na wielkość zasobów mają także podpiętrzenia wód powierzchniowych. Faza początkowa to niewielka liczba ujęć eksploatujących mało znaczącą część zasobów wód podziemnych. Kolejna faza w tym przypadku jest związana z wybudowaniem kilku zbiorników małej retencji na ciekach drenujących wody podziemne tego obszaru. W wyniku podniesienia się podstawy drenażu w wielu miejscach ulega zmianie obraz pola filtracji. W konsekwencji tego następują przesunięcia wododziałów podziemnych, zmniejszenie gradientów i w rezultacie zmniejszenie odpływu podziemnego, rozumianego jako suma strumieni wód podziemnych trafiających do wód powierzchniowych. Jako skutek tych zmian w obrębie obszaru wyznaczania zasobów następuje pozorne zmniejszenie się tych zasobów – część zasobów zostaje „ukrytych” w postaci zasobów potencjalnych, które w przyszłości mogą się ujawnić, na przykład jako zasoby wzbudzone. Sposoby „ukrycia” zasobów mogą być różne, podniesienie się zwierciadła sprawia, że warunki ograniczające nie działają tak radykalnie. Na przykład, ograniczenie minimalnej rzędnej zwierciadła wody podziemnej w nowej sytuacji dopuszcza większą wielkość depresji. Płytsze położenie zwierciadła w stosunku do powierzchni

terenu sprawia, że zasilanie pochodzące z infiltracji opadów atmosferycznych jest mniejsze – zwiększa się wielkość parowania terenowego. Kolejną fazą zmian zasobów w tym obszarze jest wybudowanie szeregu ujęć, których skutkiem jest obniżenie położenia zwierciadła w ich otoczeniu. Przestrzenna zmienność tego skutku zależy od wzajemnych relacji przestrzennych pomiędzy nowymi ujęciami i istniejącymi wcześniej zbiornikami zaporowymi. Jeżeli ujęcia zostały wybudowane w pobliżu zbiorników, to efekt ich działania jest w pewnym sensie odwrotny do efektu wywołanego zbiornikami. W dużym przybliżeniu można uznać, że wododziały podziemne oddalą się od miejsc eksploatacji wody, gradienty i przepływy wzrosną, czyli nowa sytuacja będzie zbliżona do tej, jaka była w fazie początkowej. Bardziej złożony obraz powstanie, gdy lokalizacja nowych ujęć nie będzie miała bezpośredniego związku przestrzennego z lokalizacją zbiorników. W takim przypadku powstanie „mozaikowy” obraz pola filtracji, będący złożoną superpozycją wpływów dwóch rodzajów czynników – zbiorników i ujęć.

Aspekt czasowy zasobów wody podziemnej jest ściśle związany z inercją (bezwładnością) czasową procesów przepływu wody. Przejawem tej inercji jest przesunięcie w czasie (opóźnienie) i złagodzenie wielkości skutków w stosunku do przyczyny. Wielkość tej inercji zależy od właściwości środowiska, w którym ten przepływ się odbywa. W przypadku wód powierzchniowych inercja ta jest bardzo mała w porównaniu do znacznej inercji przepływu wód podziemnych. W tym drugim przypadku wielkość inercji także może być bardzo różna, na przykład w warunkach zwierciadła swobodnego inercja może być o kilka rzędów większa niż w warunkach zwierciadła napiętego. Wielkość inercji zależy od dwóch podstawowych parametrów charakteryzujących środowisko hydrogeologiczne – od przewodności hydraulicznej i od parametru określającego pojemność ośrodka. Im większa przewodność, tym inercja jest mniejsza i odwrotnie, większa pojemność sprawia, że inercja również jest większa.

Z powyższej analizy wynika, że z największą inercją mamy o czynienia w przypadku, gdy zmiany zawartości wody są związane ze zjawiskami odsączania i nasączenia, czyli ze zjawiskami zachodzącymi w strefie aeracji, a ściślej w strefie ciśnień ujemnych. Procesy zachodzące w strefie ciśnień ujemnych są znacznie bardziej skomplikowane niż te, z którymi mamy do czynienia poniżej zwierciadła wody podziemnej. Zarys opisu matematycznego przepływu wody w tej strefie przedstawiony jest w załączonym na końcu książki Dodatku. Główną cechą wyróżniającą zachodzące tam procesy są silnie nieliniowe zależności pomiędzy ciśnieniem panującym w wodzie a stopniem nasycenia i w konsekwencji współczynnikiem filtracji. Zmiany stanu strefy aeracji przekładają się bezpośrednio na zmiany zasobów wód podziemnych, a złożoność zachodzących tam procesów jest przyczyną stosunkowo dużych błędów przy określaniu rzeczywistej ilości wody znajdującej się w rozpatrywanym profilu warstwy wodonośnej. W szczególnych przypadkach błędy te mogą być porównywalne z wielkością rocznego odpływu podziemnego (Michalak, 1984).

10. PRZEGLĄD METOD WYZNACZANIA ZASOBÓW

Pomimo dużej wagi zagadnienia, polska literatura naukowa dotycząca metod wyznaczania zasobów wód podziemnych nie jest zbyt bogata. Znacznie łatwiej jest znaleźć ogólne wskazówki dotyczące klasyfikacji zasobów i sposobów przedstawiania ich wielkości niż opisy konkretnych metod prowadzących do wyznaczenia ich wielkości. Pewien wyjątek stanowi tu opracowanie dotyczące metodyki wyznaczania zasobów eksploatacyjnych ujęć (Dąbrowski i in., 2005), jednak w tym przypadku zasoby widziane są jako zagadnienie lokalne, obejmujące najbliższe otoczenie ujęcia i obszar objęty jego bezpośrednim wpływem. Metodyka wyznaczania zasobów pewnego obszaru rozumianych jako zasoby potencjalne tego obszaru, w sensie zbliżonym do prawnej definicji zasobów dyspozycyjnych, różni się znacznie od metodyki wyznaczania zasobów eksploatacyjnych konkretnego ujęcia.

10.1. Klasyfikacja metod wyznaczania zasobów

Do wyznaczania zasobów wód podziemnych określonego obszaru stosowanych jest bardzo wiele metod, różniących się między sobą nie tylko algorytmami, ale także podstawą pojęciową, na której są oparte. Metody te można klasyfikować na różne sposoby, przy zastosowaniu różnych kryteriów, między innymi na podstawie: wielkości badanego obszaru, relacji przestrzennej obszaru względem zlewni, głębokości badanego poziomu wodonośnego i stopnia rozpoznania warunków hydrogeologicznych.

Wielkość obszaru, dla którego wyznacza się zasoby. Ten podział w pewnym stopniu koresponduje z pojęciami zasobów regionalnych i zasobów lokalnych. Wielkość obszaru przekłada się na skalę opracowania i w dalszej kolejności na dokładność wyznaczania zasobów. Dla dużych obszarów najczęściej stosowaną metodą jest metoda hydrologiczna, gdzie analizowany jest pierwszy poziom wodonośny będący w bezpośrednim związku z wodami powierzchniowymi i znajdujący się pod bezpośrednim wpływem czynników atmosferycznych. Dla głębokich poziomów wodonośnych, także w skali regionalnej, najodpowiedniejsze są metody wyznaczania zasobów oparte na numerycznym modelowaniu pola filtracji. Wyznaczanie zasobów lokalnych, pod względem metodyki jest zbliżone do wyznaczania zasobów eksploatacyjnych, ponieważ problem lokalny najczęściej wynika z planów budowy nowego ujęcia. Podstawowa różnica polega na tym, że do wyznaczenia zasobów eksploatacyjnych wykorzystuje się wyniki pomiarów uzyskane podczas budowy tego ujęcia, na przykład wyniki próbnego pompowania. W przypadku ujęcia planowanego lub projektowanego, do obliczeń zasobowych przyjmuje się dane hipotetyczne wynikające z aktualnego stopnia rozpoznania warunków hydrogeologicznych i z założeń projektowych dotyczących tego ujęcia.

Relacja przestrzenna obszaru względem zlewni. Podstawowe znaczenie ma tu stosunek powierzchni obszaru wyznaczania zasobów do powierzchni zlewni, a także położenie tego obszaru względem zlewni, gdy obszar stanowi tylko część zlewni. Można tu wyróżnić kilka przypadków:

- Do typowych przypadków można zaliczyć pokrywanie się obszaru wyznaczania zasobów z obszarem zlewni – ma to miejsce, gdy sformułowanie zadania wyznaczenia zasobów zawiera w sobie obszar zlewni i niestety najczęściej dotyczy to zlewni powierzchniowej. W takich przypadkach zastosowanie metod modelowania filtracji napotyka na istotne przeszkody, ponieważ granicami systemu są wododziały i poprawność metodyczna wymaga opracowania modelu i wyznaczenia zasobów dla znacznie większego obszaru, a następnie ograniczenia uzyskanego wyniku jedynie do powierzchni zlewni, z zastrzeżeniem, że zmiana warunków hydrogeologicznych może w przyszłości istotnie zmienić położenie wododziałów podziemnych i przez to także wielkość obszaru przypisanego do systemu, dla którego wyznaczono zasoby.
- Innym często spotykanym przypadkiem jest fragment tarasu położony w dolinie dużej rzeki z założeniem możliwości zasilania wód podziemnych tarasu wodami infiltrującymi z tej rzeki – jest to jedynie niewielki fragment zlewni tej rzeki i stosowanie metod opartych na bilansie zlewni tej rzeki w takim przypadku nie ma sensu. Jediną odpowiednią metodą wyznaczenia zasobów jest zastosowanie modelu pola filtracji, przy założeniu, że woda infiltrująca z rzeki do tarasu stanowi składnik zasobów tego tarasu i że wielkość tego strumienia w porównaniu z przepływem w rzece jest tak mała, że nie ma żadnego ryzyka obniżenia przepływu poniżej przepływu nienaruszalnego tej rzeki.
- Sytuacja, gdy obszar wyznaczania zasobów jest tak duży, że obejmuje kilka lub kilkanaście zlewni sprowadza się do przypadku wyznaczania zasobów regionalnych opisanego powyżej.
- Wyznaczanie zasobów głębokich poziomów wodonośnych nie jest uzależnione od relacji przestrzennych pomiędzy obszarem wyznaczania zasobów a granicami znajdujących się tam zlewni powierzchniowych. Więż hydrauliczna takiego poziomu z wodami powierzchniowymi jest bardzo słaba, ponieważ pośredniczą w niej inne płytsze poziomy wodonośne rozdzielone utworami słaboprzepuszczalnymi.

Głębokości badanego poziomu wodonośnego. Z pojęciem zasobów wód podziemnych związane jest pojęcie obszaru, dla którego te zasoby są wyznaczane. W obrębie tego obszaru może występować kilka poziomów wodonośnych o zróżnicowanej więzi pomiędzy tymi poziomami. Dobór odpowiedniej metody wyznaczania zasobów zależy od głębokości rozpatrywanego poziomu i od więzi, jaka występuje pomiędzy nim a poziomem nadległym i w pewnym stopniu także poziomem położonym niżej. Wyznaczanie zasobów metodami hydrologicznymi dla głębokich poziomów nie może być stosowane, ponieważ składniki bilansu przepływów takiego poziomu nie mają związku ze składnikami bilansu hydrologicznego.

W tej sytuacji do dyspozycji pozostają jedynie metody oparte na numerycznych modelach pola filtracji. Innym istotnym problemem w tym przypadku jest bardzo ograniczona znajomość warunków hydrogeologicznych panujących na większych głębokościach. Wynika to z podstawowej reguły, że im głębiej tym mniej danych o zjawiskach i procesach tam zachodzących. Na korzyść w tym przypadku przemawia jednak to, że obraz pola hydrodynamicznego w poziomach głębokich jest znacznie prostszy, łagodniejszy i „gładszy” w sensie równań fizyki matematycznej, to znaczy, że nie ma tam gwałtownych zmian w układzie przestrzennym. Przykładem

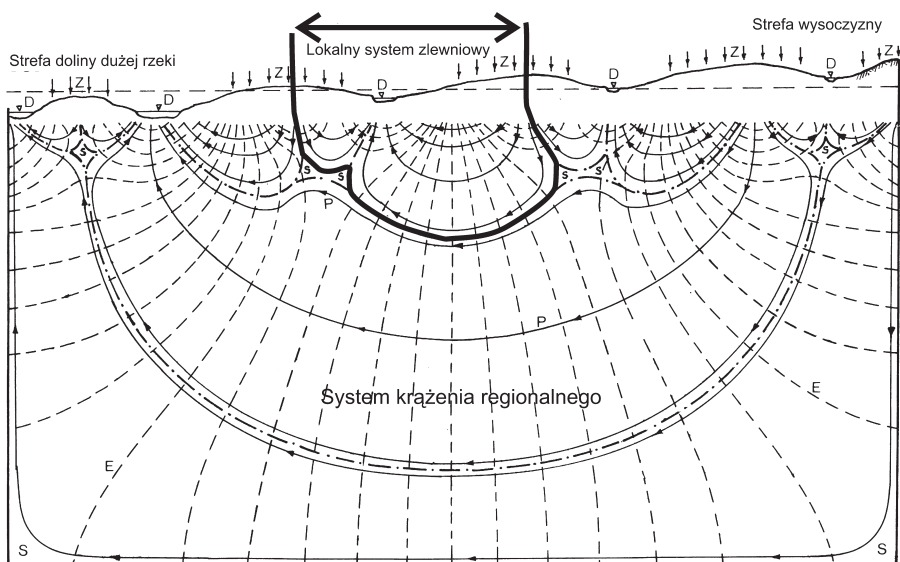


Fig. 10.1. Schematyczne przedstawienie dróg krążenia wód podziemnych w systemie o ośrodku jednorodnym i o zmiennej hipsometrii powierzchni terenu, w konsekwencji z wieloma strefami zasilania i drenażu (Toth, 1963, z uzupełnieniami Szymanki i Michalaka)

Z – strefy zasilania z infiltracji opadów atmosferycznych, D – strefy drenażu przez wody powierzchniowe, P – linie prądu, E – linie ekwipotencjalne, S – strefy stagnacji wód podziemnych, — – granica wydzielonego lokalnego systemu zlewniowego

złożonej sytuacji wynikającej ze zmienności pionowej pola hydrodynamicznego jest cytowany w wielu publikacjach schemat dróg krążenia w ośrodku jednorodnym, czyli bez przewarstwień słaboprzepuszczalnych, wywołany jedynie zmienną hipsometrią powierzchni terenu, co w konsekwencji prowadzi do wielu stref zasilania i drenażu (Toth, 1963). Dla sprowadzenia tego przykładu do bardziej realnej sytuacji można przyjąć, że obraz przedstawiony na przekroju (fig. 10.1) jest dziesięciokrotnie przewyższony, a jednocześnie ośrodek porowaty charakteryzuje się współczynnikiem anizotropii również również dziesięć.

Stopień rozpoznania warunków hydrogeologicznych. Zastosowanie określonej metody wyznaczania zasobów jest uzależnione także od stopnia rozpoznania warunków hydrogeologicznych. Metody oparte na numerycznych modelach pola filtracji wymagają znacznie dokładniejszego rozpoznania hydrogeologicznego niż metody szacunkowe oparte na wyznaczeniu przybliżonej wielkości całkowitego strumienia wód podziemnych lub metody oparte na bilansie hydrologicznym zlewni. Z tego względu stopień rozpoznania jest istotnym czynnikiem branym pod uwagę przy wyborze metody. Przyjmując, że metoda wyznaczania zasobów jest już wybrana pozostaje problem dokładności jej wyników. Zupełnie oczywistym stwierdzeniem jest to, że jakość i w tym dokładność uzyskanych wyników zależy od jakości danych wejściowych – ich ilości, kompletności i dokładności, co w rozpatrywanej tu problematyce przekłada się na stopień rozpoznania warunków hydrogeologicznych.

10.2. Metody hydrologiczne wyznaczania zasobów wód podziemnych i ich zastosowanie w rejonach zbiorników małej retencji

Zasoby dostępne dla zagospodarowania stanowią wyróżnioną za pomocą kryteriów formalnych część zasobów odnawialnych wód podziemnych.

Głównym ograniczeniem środowiskowym dla wydzielania zasobów perspektywicznych jako dostępnych dla zagospodarowania jest zachowanie określonego natężenia przepływu w rzece, definiowanego jako przepływ nienaruszalny. Pojęcie przepływu nienaruszalnego jest ustalane na zasadzie konwencji (Kostrzewa, 1977; Witowski i in., 2001) i w Polsce jest nim graniczna wartość przepływu rzeczno, poniżej którego przepływy wody w rzekach nie powinny być zmniejszane na skutek działalności człowieka. Konieczność utrzymywania takiego przepływu nie podlega kryteriom ekonomicznym.

Zagadnienie określenia zasobów czy ich zmian sprowadza się do określenia przepływu (zagadnienie merytoryczne) i wydzielenia z niego za pomocą wybranych kryteriów takiej części, której eksploatacja zgodnie z obowiązującymi przepisami nie naruszy przepływu nienaruszalnego w cieku poniżej zbiornika i nie zmieni jego stanu chemicznego i ekologicznego opisanego w odpowiednich aktach prawnych (RDW).

Podstawowymi kryteriami określenia przepływu nienaruszalnego są:

- przesłanki hydrobiologiczne warunkujące zachowanie podstawowych form flory i fauny,
- ochrona obiektów przyrodniczych prawnie chronionych,
- wymagania rybacko-wędkarskie,
- wymagania sportu i turystyki wodnej,
- wymagania, co do jakości wód do celów spożywczych i komunalnych.

Przepływ nienaruszalny oparty na kryterium hydrobiologicznym oblicza się za pomocą wzoru (Witowski i in., 2001 za Kostrzewą, 1977) jako:

$$Q_h = k SNQ \quad [10.1]$$

gdzie:

Q_h – przepływ oparty na kryterium hydrobiologicznym,

k – stała charakterystyczna, która dla rzek nizinnych przybiera wartości z zakresu 0,5, 1,0,

SNQ – strumień przepływu rzeki (cieku) dla stanów średnich niskich.

Jednakże z pracy Witowskiego i in. (2005) wynika, że k jest bardziej zależne od powierzchni zlewni niż od podziału na rzeki nizinne, przejściowe i górskie. Stąd też dla rzek, które są potencjalnie powiązane ze zbiornikami małej retencji $k > 1$ (dla $A < 1000 \text{ km}^2$). Gdy przepływ nienaruszalny obliczany jest dla kilku kryteriów wybiera się wartość największą.

Z hydrogeologicznego punktu widzenia określenie przepływu nienaruszalnego powinno być także powiązane z zagadnieniem depresjonowania zwierciadła wód podziemnych i ewentualną zmianą zlewni podziemnej. Dlatego też metody hydrologiczne wydają się być dalece niewystarczające dla zgodnej z obowiązującym prawem oceny środowiska i tym samym niekorzystnie ingerować w rozdysponowane prawnie zasoby wód podziemnych.

Transformacja i udział opadu w przepływach wód powierzchniowych określana jest różnymi metodami, lecz dokładność tych oszacowań nie może być określona wprost. W okresie opadowym zasilanie wód gruntowych ujawnia się poprzez podniesienie wysokości zwierciadła wód

warstwy o zwierciadle swobodnym, ale przyczyn wahań takich zmian zwierciadła wód może być znacznie więcej. Długoterminowe wahania zwierciadła mogą być przypisane do przyczyn klimatycznych lub antropogenicznych (użycie ziemi, pompowania, irygacja, wypełnianie zbiornika, parowanie, występowanie przechwyconego powietrza). Sezonowe fluktuacje związane są z opadem, wahaniami ciśnienia czy pompowaniem. Długotrwałe opady o niskiej intensywności nie są optymalnym zjawiskiem dla oszacowania zasobów, bowiem prędkość drenażu może być bliska prędkości zasilania.

Problematyka odpływu gruntowego należy do często poruszanych w literaturze hydrologicznej i hydrogeologicznej. Do najstarszych i popularnych metod określania zasobów wód podziemnych rozumianych jako przepływ należy rodzina metod hydrologicznych, oparta na analizie odpływu gruntowego jako części składowej odpływu rzecznej. Pod pojęciem odpływ gruntowy należy rozumieć tę część odpływu rzecznej, która tworzy odpływ wód podziemnych pochodzących ze strefy aeracji lub pierwszego poziomu wodonośnego do rzeki. W celu określenia wielkości odpływu podziemnego rzek stosuje się metodę tzw. genetycznego rozdziału hydrogramu. Mimo subiektywizmu i kontrowersji, szczególnie przy analizie odpływu gruntowego w okresie wezbraniowym, metoda ta uznawana jest przez hydrologów przy obecnym stopniu znajomości procesu odpływu za optymalną (Bajkiewicz-Grabowska, Mikulski, 1984). Opierając się na analizie wahań zwierciadła wód podziemnych Dębski (1970), Pietrygowa (1975) i Sawicki (1978), zakładają w okresie wezbrań wzrost zasilania podziemnego. Krytycznym etapem rozdziału hydrogramu wezbrania jest wyznaczanie punktów określających moment rozpoczęcia i zakończenia odpływu powierzchniowego i wyznaczanie maksymalnej wartości odpływu gruntowego.

Inne metody obliczania przeciętnych wartości odpływu gruntowego, bazujące na przepływach charakterystycznych, reprezentuje niemiecka szkoła hydrologów (Fischer, Wundt i Kille). Wartości odpływu gruntowego uzyskane metodami podziału hydrogramu i Wundta i Kille'go są podobne (Chelmiński, Wolski, 1978; Jokiel, 1994), a wybór metody zależy wyłącznie od przyjętego przez autora merytorycznego uzasadnienia.

Założenia metody podziału hydrogramu polegają na fakcie, że kulminacja odpływu gruntowego wywołana zwiększonym zasilaniem następuje po przejściu kulminacji wezbrania w połowie czasu między kulminacją a końcem wezbrania. Przy graficznej interpretacji możliwe jest wykorzystanie wykresu codziennych stanów wód podziemnych, ponieważ termin kulminacji odpływu gruntowego pokrywa się z terminem wystąpienia maksymalnego stanu wód podziemnych w okresie wezbrania. Punkt, w którym ustaje odpływ powierzchniowy, a w rzece obserwuje się tylko odpływ gruntowy, wyznacza się na podstawie wykresu, skonstruowanego w skali półlogarytmicznej, obrazującego fazę opadającą wezbrania. Szukany punkt otrzymuje się w miejscu przecięcia przedłużonych prostych opisujących odcinki krzywych opadania i wysychania. Oddzielnej analizy wymaga wyznaczenie maksymalnej wartości odpływu gruntowego. Dla potwierdzenia wiarygodności uzyskanych wyników analizy porównawcze trzech metod – podziału hydrogramu, Wundta i Kille'go przeprowadził Wrzesiński (1998). Uzyskane wyniki wskazują, że średnie przepływy podziemne obliczone tymi metodami są silnie skorelowane.

Hydrologiczne metody określania zasobów wód podziemnych są do siebie podobne i są metodami przybliżonymi, ale prostymi, żeby nie powiedzieć uproszczonymi, nie uwzględniają heterogeniczności gleb i gruntów, w których występują wody ani komplikacji związanych z trójwymiarową strukturą jednolitych części wód podziemnych.

Metoda zlewniowego układu krążenia wód podziemnych. Ogólne równanie bilansu hydrogeologicznego zlewniowego systemu wodonośnego (fig. 10.3) można zapisać w postaci (Herbich, 2005):

$$ZO = QG + DE + PG \pm \Delta U \pm \Delta R \quad [10.2]$$

gdzie:

ZO – zasoby odnawialne wód podziemnych zlewniowych systemów wodonośnych;

QG – odpływ podziemny do wód powierzchniowych;

DE – drenaż ewapotranspiracyjny wód podziemnych tarasu łąkowego;

PG – pobór wód podziemnych;

ΔU – bilans przepływu wód podziemnych przez wododział zlewni hydrograficznej;

ΔR – zmiany stanu retencji wód podziemnych w okresie bilansowym.

Przy zestawianiu bilansu hydrogeologicznego dla okresu wieloletniego, przy spełnieniu warunków:

$\Sigma \Delta U = 0$ – regionalna zgodność wododziału podziemnego i hydrograficznego,

$\Delta R \ll ZO$ – dla okresu wieloletniego ($t > 10$ lat),

$ZS \geq 0,7 PG$ – co najmniej dwie trzecie pobranych wód podziemnych z poziomów użytkowych zlewniowego systemu wodonośnego powraca do zlewni jako ZS zrzut ścieków, równanie [10.2] przyjmuje postać uproszczoną:

$$ZO_{\Delta t} = QG_{\Delta t} + DE_{\Delta t} \quad [10.3]$$

gdzie:

$ZO_{\Delta t}$ – zasoby odnawialne wód podziemnych zlewniowych systemów wodonośnych średnie w wieloleciu Δt ,

$QG_{\Delta t}$ – odpływ podziemny do wód powierzchniowych,

$DE_{\Delta t}$ – drenaż ewapotranspiracyjny wód podziemnych tarasu niskiego.

Badania regionalne (Herbich i in., 2003) wykazały, że powyższe założenia mają dokładność wystarczającą do prowadzenia obliczeń zasobów dostępnych dla zagospodarowania w zlewniowych systemach wodonośnych o powierzchni $A \geq 500 \text{ km}^2$.

Zgodnie z ogólnym uproszczonym równaniem określającym zasoby dyspozycyjne ZD wód podziemnych w zlewniowym obszarze bilansowym:

$$ZD = QG - Qn \quad [10.4]$$

gdzie:

QG – odpływ podziemny do rzek,

Qn – przepływ nienaruszalny w rzece:

$$Qn = Qng - Qnp \quad [10.5]$$

gdzie:

Qng – część przepływu Qn pochodząca z zasilania podziemnego,

$Qnp = Qnp_p + Qnp_z + Qnp_z$ – część przepływu Qn pochodząca ze spływu powierzchniowego (bieżącego Qnp_p lub retencjonowanego Qnp_z) oraz ze zrzutu ścieków, powstających po wykorzystaniu wód podziemnych na cele komunalne i przemysłowe oraz z wód odwodnieniowych (kopalnie, budownictwo).

Należy tu podkreślić, że „ścieki” są tu rozumiane jako wody określonej klasy czystości oraz, że często są spotykane sytuacje, w których mają one wyższą klasę czystości od ich odbiornika.

Potrzeby wodne ekosystemów lądowych zależnych od wód podziemnych, wyrażone przez drenaż ewapotranspiracyjny DE wód podziemnych tarasu niskiego, są uwzględnione poprzez wprowadzenie do obliczeń odpływu podziemnego QG , zamiast zasobów odnawialnych ZO :

$$ZO = QG + DE \quad [10.6]$$

W okresach stanów nizinowych przepływ rzek w zlewni, w której brak powierzchniowych zbiorników retencyjnych oraz znaczącego odprowadzania ścieków, jest w całości kształtowany przez zasilanie podziemne, co powoduje, że równanie [10.4] przyjmuje postać:

$$ZD = QG - Q_{ng} \quad [10.7]$$

Oznacza to, że dyspozycyjne ZD (lub perspektywiczne ZP) zasoby wód podziemnych danej zlewni w określonych warunkach odnawialności zasobów wód podziemnych są limitowane przez odpływ nienaruszalny Q_{ng} pochodzący z zasilania podziemnego rzek (Herbich, 1996, 1997; Herbich, Tyszewski, 1994).

Wówczas można istotnie zwiększyć zasoby dyspozycyjne ZD poprzez utworzenie w zlewni warunków dla istnienia znaczącej składowej Q_{np_z} , co może być uzyskane w wyniku budowy i funkcjonowania zbiorników małej retencji (fig. 10.3) co wpłynie na obniżenie składowej Q_{ng} :

$$ZD = QG - Q_n = QG - Q_{ng} - Q_{np_z} \quad [10.8]$$

Taki tryb kształtowania zasobów dyspozycyjnych ma znaczenie szczególnie w górnych (źródłiskowych) partiach zlewni, które ze względu na panujące tam warunkach hydrologiczne i geomorfologiczne są predestynowane do lokalizacji zbiorników małej retencji.

Hydrogeologiczny schemat warunków umożliwiających wzrost zasobów wód podziemnych dostępnych do zagospodarowania w zlewni po wybudowaniu zbiornika małej retencji ZMR obrazuje figura 10.2.

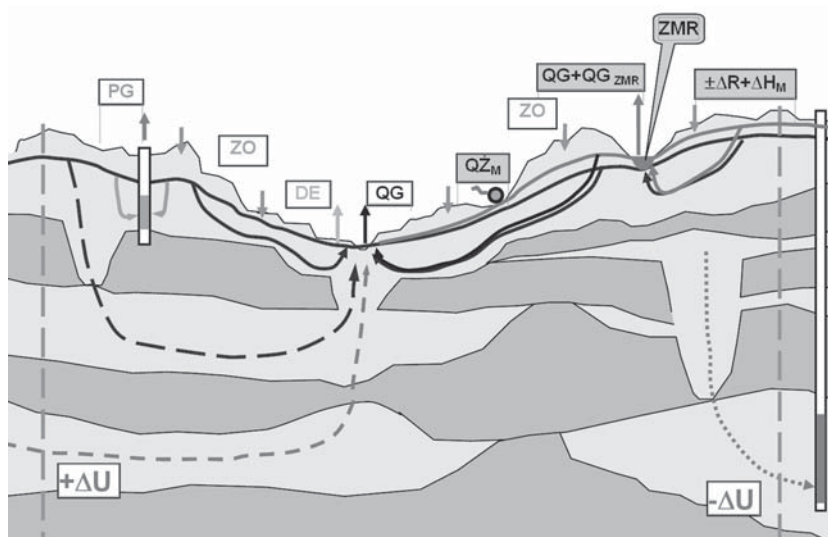


Fig.10.2. Schemat zlewniowego systemu krążenia wód podziemnych w warunkach funkcjonowania zbiornika małej retencji w partiach źródłiskowych zlewni, wg Herbicha (2005). Objaśnienia (pozostałe jak we wzorze [10.2]):

ZMR – zbiornik małej retencji; QZ_M – źródło (lub inna forma zwiększonego zasilania systemu hydrograficznego przez wody podziemne w wyniku wzrostu stanu retencji); $\pm\Delta R + \Delta H_M$ – wzrost stanu retencji wód podziemnych w rejonie piętrzącego oddziaływania zbiornika; QG_{ZMR} – odpływ podziemny ze strefy zwiększonej retencji występujący w warunkach okresowego spuszczenia wody ze zbiornika dla zapobiegania nadmiernemu spadkowi przepływów w rzece poniżej zbiornika (utrzymanie przepływu nienaruszalnego Q_n)

Metoda hydrologiczna – niżówkowa. Opiera się na pomiarach przepływów w przekrojach rzecznych w okresie niżówkowym, kiedy rzeka jest zasilana wyłącznie przez drenaż podziemny:

$$Q_h = (q_2 - q_1)/2X \quad [10.9]$$

gdzie:

Q_h – strumień wód podziemnych [L^2/T],

q – przepływy w przekrojach 1 i 2 [L^3/T],

X – odległość między wodowskazami [L].

Metoda ta zakłada, że rzeka jest zasilana wyłącznie przez drenaż wód podziemnych w obrębie zlewni lub jej fragmentów zamkniętych wodowskazami w okresie suszy. Metoda może być przydatna dla określenia zasobów w przypadku podpiętrzenia, na skutek którego zmieniają się przepływy w przekrojach 1 i 2, powyżej i poniżej zbiornika.

Przyrosty przepływów, a więc i zasobów w rejonie ZMR mogą być związane z: wodami infiltrującymi w głębię i pochodzącymi z opadów atmosferycznych i roztopów, wodami wsiąkającymi ze ZMR i cieków powierzchniowych, wodami z kondensacji pary wodnej w strefie aeracji, z podziemnego dopływu z sąsiednich obszarów.

Zmniejszenie przepływów, a więc i zasobów w rejonie ZMR może wynikać z: drenażu przez źródła i bezpośrednio do cieków powierzchniowych, parowania podziemnego do strefy aeracji i do atmosfery, poboru wody przez rośliny, podziemnego odpływu do innych obszarów, strat na wiązanie w procesach geochemicznych jak hydratacja, wietrzenie, eksploatacji za pośrednictwem ujęć wodociągowych, studziennych oraz pompowania wody do kopaliń.

Dynamiczna metoda bezpośrednia pozwala na określenie przepływu podziemnego ze wzoru:

$$Q = k \cdot I \cdot A \quad [10.10]$$

gdzie:

Q – strumień przepływu podziemnego [L^3/T],

k – współczynnik przewodności hydraulicznej [L/T],

I – spadek hydrauliczny określony z hydroizohips [],

A – powierzchnia przekroju [L^2].

Metoda ta jest przeznaczona dla wód o zwierciadle napiętym i bazuje całkowicie na odpływie podziemnym, nie uwzględnia opadów i ewapotranspiracji. W przypadku dużej powierzchni przekroju i stwierdzonej heterogeniczności, ze względu na współczynnik przewodności hydraulicznej można zaproponować jej modyfikację jako:

$$Q = \sum k_i I_i A_i \quad [10.11]$$

gdzie:

i – indeks sumujący.

Warunki stosowania tej metody są bardzo ogólne. Przy podpiętrzeniu wód ciekła zmienia się układ hydroizohips w bezpośrednim sąsiedztwie, stąd też zmienia się spadek hydrauliczny. Dlatego metoda ta może być przydatna dla oszacowania przepływu podziemnego i w związku z tym także zasobów.

Metoda regresji zwierciadła wody. Metoda regresji zwierciadła wody jest jedną z szacunkowych metod obliczania zasobów dynamicznych uwzględniającą parametr wodonośca tj., współczynnik odsączalności:

$$Q_d = A \cdot \mu \cdot \Delta h / t \quad [10.12]$$

gdzie:

Q_d – jest strumieniem wody odpływającym ze zlewni podziemnej [L^3/T],

A – powierzchnia badanej zlewni [L^2],

μ – współczynnik odsączalności,

Δh – średnia amplituda wahań zwierciadła wód podziemnych [L],

t – czas trwania okresu bezopadowego.

Przy podpiętrzeniu wód cieką metoda może być przydatna dla określenia przepływu w wodach o zwierciadle swobodnym w przypadku zmian w powierzchni zlewni.

Z przedstawionych metod wynika, że ich stosowanie zależne jest od dostępnych danych i stopnia rozpoznania danego terenu. Są to metody proste nieuwzględniające czynnika przestrzennego, a więc zmienności parametrów zlewni powierzchniowej i podziemnej. Nie umożliwiają więc przedstawiania alternatywnych scenariuszy w zakresie gospodarowania wodami powierzchniowymi i podziemnymi w zlewni. Takie możliwości działania oferują natomiast metody numeryczne.

10.3. Metody oparte na modelowaniu pola filtracji

Metody analizy warunków hydrogeologicznych oparte na modelach numerycznych pola filtracji wody podziemnej w ostatnich latach rozwinęły się tak bardzo, że stanowią niezastąpione narzędzie w wielu działach hydrogeologii. Podstawę tych metod stanowi fizyczno-matematyczny opis przepływu wody podziemnej przedstawiony w Dodatku. Współczesna technika komputerowa wsparta różnorodnym oprogramowaniem pozwala na prowadzenie wieloetapowych skomplikowanych badań w zakresie analizowania powiązanych ze sobą zjawisk i procesów dotyczących przepływu wody podziemnej. Modele pola filtracji znalazły także zastosowanie w określaniu zasobów wody podziemnej, w tym także zasobów dyspozycyjnych i eksploatacyjnych. Model pola filtracji jest jednak w tym przypadku tylko narzędziem i może być wykorzystany bardzo różnie. Istnieje wiele sposobów zastosowania modelu do wyznaczania zasobów wody podziemnej i wynika to z różnych koncepcji opartych na różnych poglądach dotyczących określania jakie czynniki hydrogeologiczne i hydrologiczne, a także w jaki sposób i z jaką siłą oddziałują na wielkość tych zasobów. Metody te można pogrupować następująco:

Metody oparte wyłącznie na prognozie eksploatacji. Do tej grupy należą jedne z pierwszych prób wykorzystania modelu do wyznaczania zasobów. W tym przypadku procedura sprostawała się do kalibracji i weryfikacji modelu w oparciu o dane opisujące sytuację „obecną” i następnie przeprowadzano szereg symulacji jakiejś sytuacji „przyszłej”, w której przyjmowano rozkład przestrzenny poboru wody taki sam jak obecny, ale zwiększając proporcjonalnie pobór we wszystkich punktach. Po kilku próbach dobierania maksymalnej eksploatacji, ale jednocześnie nie naruszającej radykalnie równowagi bilansowej jednostki, przyjmowano, że jest to wynik poprawny i sumowano wielkości poboru wody we wszystkich miejscach traktując sumę jako zasoby tej jednostki. Metoda ta okazała się jednak nie w pełni racjonalna ponieważ zakładała, że rozkład przestrzenny poboru będzie w przyszłości taki sam, a jedynie zwiększy się proporcjonalnie wielkość tego poboru. Realne przykłady wykazały jednak, że takie założenie nie potwierdza się w praktyce, ponieważ tendencje przestrzennego rozwoju gospodarczego okazały się inne, niż zakładano w przeszłości.

Metody oparte na bilansie wodnym systemu hydrogeologicznego z zastosowaniem modelu pola filtracji. W metodach tych zasoby są wyznaczane na podstawie bilansu wód podziemnych dotyczącego określonego stanu systemu. W części tych metod dostosowuje się przepływy symulowane na modelu do wymagań narzuconych przez dane hydrologiczne – ma to zastosowanie szczególnie w przypadku pierwszego poziomu silnie związanego z wodami powierzchniowymi. Przy wyznaczaniu zasobów poziomów głębokich takie podejście nie zawsze jest uzasadnione, ponieważ ich więź z wodami powierzchniowymi jest słaba i znacznie większą rolę odgrywają tam przepływy regionalne i przepływy pomiędzy różnymi poziomami.

Metody oparte na bilansie stanu „obecnego”. W wielu opracowaniach dotyczących wyznaczania zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych analizowany jest tak zwany stan „obecny” i zasoby są wyznaczane przy założeniu ich niezmienności w czasie. Tymczasem wiele czynników kształtujących warunki hydrogeologiczne może ulec zmianie pod wpływem działalności człowieka. Pociąga to za sobą zmianę także zasobów, jednak wielkość tej zmiany bywa bardzo różna. Podejście takie można uznać za poprawne, gdy przewidywany wzrost eksploatacji jest stosunkowo niewielki – obejmuje około 10 do 20% całości zasobów, wywołane nim zmiany pola filtracji nie są znaczące i uruchomione przez tę eksploatację lub inne działania hydrotechniczne zasoby wzbudzone nie stanowią znaczącego składnika całych zasobów. Jednak, gdy zasoby tak wyznaczone zostaną zatwierdzone, metoda ich wyznaczenia nie będzie brana pod uwagę i w konsekwencji tego, w przypadku dużego zapotrzebowania na wodę, uzyskane w ten sposób wyniki można interpretować niepoprawnie.

Metody oparte na bilansie stanu prognozowanego. W przeciwieństwie do metod opartych na bilansie stanu aktualnego, metody te umożliwiają uwzględnienie przewidywanych zmian warunków hydrogeologicznych. Główną zaletą takiego podejścia jest możliwość uwzględnienia także zasobów wzbudzonych, rozumianych najczęściej jako wzrost zasilania systemu hydrogeologicznego wodą pochodzącą z opadów atmosferycznych, w wyniku obniżenia się poziomu zwierciadła wody, spowodowanego zwiększeniem poboru wody. Zagadnienie zasobów wzbudzonych jest w literaturze dotyczącej tej problematyki tematem nowym i wymagającym wielu dalszych prac nad rozwojem metodyki. Najczęściej zakłada się, że przyczyną ich powstawania jest zmniejszenie parowania w wyniku obniżenia zwierciadła wody podziemnej i że wielkość zasobów wzbudzonych jest stosunkowo niewielka. Obserwacje terenowe wykazują jednak, że pobór wody nie jest tu jedyną przyczyną – w zależności od typu pokrycia terenu i litologii utworów powierzchniowych może wystąpić znaczne zmniejszenie lokalnego spływu powierzchniowego jako skutek wzrostu infiltracji, a także infiltracja opóźniona wód powierzchniowych pochodzących ze spływu i okresowo gromadzących się w zagłębieniach bezodpływowych. Te zjawiska, spowodowane nie tylko poborem wód podziemnych, ale także innymi obiektami hydrotechnicznymi, mogą w sposób znaczący zmienić składowe bilansu hydrologicznego na rzecz odpływu podziemnego, co w konsekwencji przekłada się na wzrost zasobów wody podziemnej.

Metody oparte na ograniczeniach środowiskowych i jakościowych. Oddzielną grupę metod będących wyrazem nowego spojrzenia na zasoby wód podziemnych, a w szczególności na zasoby dyspozycyjne, stanowią metody, w których na pierwszym miejscu stawiana jest sprawa ograniczeń dotyczących warunków hydrogeologicznych wynikających z potrzeb ochrony środowiska naturalnego i zagwarantowania dostatecznej jakości eksploatowanej wody. Do grupy tej należy, przedstawiona w zarysie w dalszej części opracowania, metoda PDE – „Przestrzeni dopuszczalnych eksploatacji” (Michalak, 2002) i metoda PSO – „Przekształcenia stało-objętościowego” zaproponowana w rozprawie doktorskiej Śmietańskiego (2005). Metoda PSO

nie służy do wyznaczenia wielkości zasobów dyspozycyjnych, lecz jedynie do określenia ich przestrzennej zmienności. W pierwszym etapie tej metody, przy założeniu, że zasilanie systemu wodonośnego infiltracją opadów atmosferycznych jest równe wielkości odpływu podziemnego, zasilanie to rozkłada się przestrzennie na cały obszar zasobowy, zgodnie ze zmiennością wskaźnika infiltracji. W drugim etapie dokonuje się korekty tego rozkładu w oparciu o współczynniki wagowe określające obszary zasilania lub drenażu, obszary perspektywiczne i obszary o złej jakości wody podziemnej. W metodzie tej całkowita wielkość zasobów dyspozycyjnych dla konkretnego obszaru wyznaczona jest jako arbitralnie określona część zasobów odnawialnych wyznaczonych dowolną inną metodą, na przykład jako odpływ podziemny, będący składnikiem bilansu hydrologicznego lub jako oszacowana w inny sposób wielkość infiltracji efektywnej dla całego obszaru.

10.4. Metody mieszane

Jako metody mieszane rozumie się tu wszelkie połączenia metod hydrologiczno-„zlewniowych” i hydrogeologicznych, w tym także opartych na numerycznych modelach przepływu wody podziemnej. Przedstawiona powyżej metoda przekształcenia stało-objętościowego zaproponowana przez Śmietkańskiego (2005) także należy do tej grupy. Cechą wyróżniającą tę grupę metod jest przyjmowanie zlewni powierzchniowej jako obszaru wyznaczania zasobów i założenie, że odpływ podziemny wyznaczony na przekroju wodowskazowym jest równy sumie wszystkich strumieni składających się na obraz pola hydrodynamicznego w poziomach wodonośnych na rozpatrywanym obszarze. Spełnienie tych warunków jest koniecznością pozwalającą na zastosowanie metod mieszanych i z tego względu nie we wszystkich przypadkach można te metody stosować. Podejście takie jest w pełni uzasadnione w prostych przypadkach, np. gdy jest jeden znaczący poziom wodonośny, przy czym jest to pierwszy poziom o dobrej więzi z wodami powierzchniowymi i najczęściej o zwierciadle swobodnym. Schematyczny ideowy przykład takiego przypadku jest przedstawiony na figurze 10.3.

Gdy geometria systemu i warunki hydrogeologiczne odbiegają wyraźnie od tak prostego przypadku, jak ten przedstawiony na figurze 10.3, zastosowanie metod mieszanych i metod „czysto hydrologicznych” wymaga szczególnej rozwagi, ponieważ uzyskane tymi metodami wyniki mogą być obciążone znacznymi błędami. Pierwszym źródłem błędów jest utożsamianie nieruchomych granic zlewni powierzchniowej ze zmiennymi, a często także nietrwałymi granicami zlewni podziemnej. Kolejnymi przyczynami błędów może być nieuwzględnienie:

- zmian wielkości zasobów spowodowanych obecną lub przyszłą działalnością człowieka, w tym tak zwanych zasobów wzbudzonych. Składniki bilansu hydrologicznego uwzględniane w tych metodach odnoszą się do przeszłego okresu wieloletniego;
- przypadki głębokich, często regionalnych, systemów krążenia i powiązanych z nimi przepływów pomiędzy poziomami głębokimi i płytkimi. Przepływy regionalne w głębszych poziomach wodonośnych wykraczają swoim zasięgiem poza jedną zlewnię, a często także poza wiele zlewni (fig. 10.1);
- czynnika inercji systemu hydrogeologicznego przejawiającego się efektem czasowym polegającym na opóźnieniu i złagodzeniu reakcji wnętrza systemu na stosunkowo szybkie zmiany w funkcji czasu czynników zewnętrznych, takich jak zmienność wielkości infiltracji i wahania poziomu wód powierzchniowych.

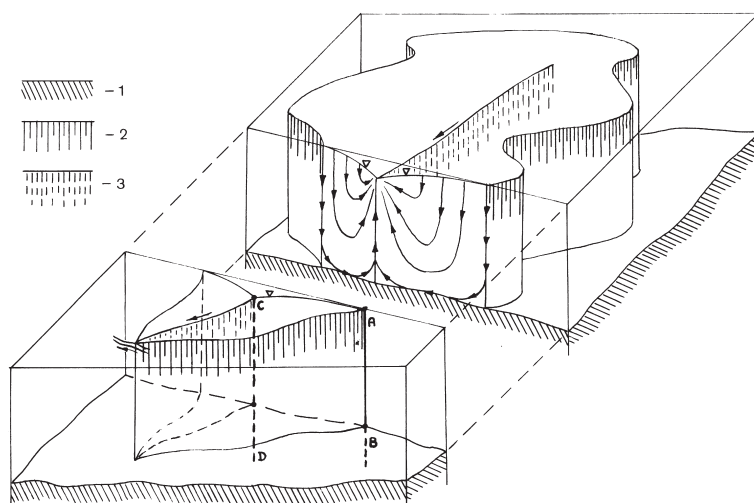


Fig. 10.3. Schematyczne ideowe przedstawienie prostego systemu zlewniowego z zaznaczeniem powierzchni granicznych podziemnej przestrzeni zlewni (Michalak, 1989)

1 – powierzchnia dolna jako strop nieprzepuszczalnego podłoża, 2 – powierzchnie boczne wyznaczone przez linie wododziałów powierzchniowych, 3 – powierzchnia wewnętrzna wyznaczona przez koryto cieku i dzieląca przestrzeń podziemną zlewni na dwie hydrodynamiczne strefy, AB – półprosta tworząca powierzchnię boczną, CD – półprosta tworząca powierzchnie wewnętrzną

10.5. Metody oparte na modelowaniu pola filtracji z uwzględnieniem bilansu hydrologicznego

Jest to oddzielna grupa metod, których podstawą są numeryczne modele przepływu wody podziemnej i procedura wyznaczania zasobów jest taka sama, jaką stosuje się w opisanych wcześniej metodach opartych wyłącznie na modelach. Istotną różnicą jest to, że model jest kalibrowany i weryfikowany dla przeszłego okresu wieloletniego z uwzględnieniem składników bilansu hydrologicznego tego okresu, a uzyskane wyniki są porównywane i korygowane z uwzględnieniem wielkości przepływów nienaruszalnych w ciekach. Istotną cenną cechą tych metod jest możliwość poprawnego zdefiniowania granic modelowanego systemu niepokrywających się z granicami zlewni podziemnej, a tym bardziej powierzchniowej – weryfikacja modelu jest dokonywana na podstawie części wspólnej modelu i zlewni. Metody te pozwalają na przyjęcie, obok kryterium przepływów nienaruszalnych, także wielu innych ograniczeń związanych z ochroną środowiska i z jakością eksploatowanej wody. Możliwe jest także w symulacjach prognostycznych wyznaczenie potencjalnego zwiększenia zasobów, między innymi wyznaczanie zasobów wzbudzonych.

Metody należące do tej grupy pozwalają na analizę zagadnień zasobowych w sposób najbardziej kompleksowy, z uwzględnieniem największej liczby czynników wpływających na wielkość zasobów i na ich przestrzenną zmienność. Pozwalają także na analizę zmienności czasowej tych zasobów spowodowanej działalnością człowieka lub decyzjami administracyjnymi, których konsekwencją jest powstanie nowych warunków ograniczających wielkość zasobów, na przykład decyzje utworzenia nowych obszarów chronionych.

Dalszy rozwój tych metod pozwoli na bardziej precyzyjne określanie wielkości zasobów, a także ich przestrzennej i czasowej zmienności. Jednak warunkiem koniecznym jest opracowanie odpowiednich narzędzi w postaci oprogramowania komputerowego ukierunkowanego na zagadnienia zasobowe. Typowe programy przeznaczone do zadań ogólnych z zakresu modelowania przepływu wody podziemnej nie są tu w pełni przydatne, między innymi z powodu braku wyspecjalizowanych modułów, na przykład takich jak niezbędne w tych zagadnieniach procedury optymalizacji nieliniowej.

10.6. Metody wyznaczania zmian zasobów w wyniku działalności człowieka – w tym podpiętrzenia wód powierzchniowych

Za zmianę zasobów wód podziemnych można uznać zmianę całkowitej wielkości zasobów rozpatrywanego obszaru lub zmianę przestrzennego rozmieszczenia tych zasobów. Najczęściej oba te przypadki są ze sobą powiązane – jakiś czynnik zewnętrzny powoduje zarówno w pewnym stopniu zmianę całkowitej wielkości zasobów, jak i zmianę obrazu ich przestrzennej zmienności.

Najprostszym sposobem wyznaczenia zmiany zasobów jest zastosowanie wybranej metody dwukrotnie – raz dla stanu przed zaistnieniem czynnika powodującego zmianę i drugi raz, gdy stan systemu zostanie zmieniony, a następnie określenie różnic pomiędzy tymi dwoma wynikami. Inną metodą jest wykorzystanie zasady superpozycji pól hydrodynamicznych. W takim przypadku symulacja komputerowa dotyczy wpływu jednego czynnika na system hydrogeologiczny – tego, który jest przyczyną zmiany, pozostałe czynniki są „wyłączone” poprzez odpowiednie określenie warunków brzegowych modelu. Uzyskany w ten sposób wynik jest różnicą pomiędzy stanem po i stanem przed wystąpieniem zmiany. Należy tu jednak pamiętać, że zasada superpozycji może być stosowana tylko do układów liniowych i w każdym przypadku potrzebne jest sprawdzenie, czy przypadek ten może być traktowany jako liniowy lub przynajmniej w przybliżeniu spełniający warunki liniowości. Metoda ta niestety nie pozwala na pełne i poprawne uwzględnianie zasobów wzbudzonych, ponieważ równania opisujące przepływ wody podziemnej ze zmiennym zasilaniem infiltracyjnym zależnym od głębokości zwierciadła wody są równaniami nieliniowymi.

Wśród różnych czynników powodujących zmiany zasobów wód podziemnych podniesienie postawy drenażu zajmuje szczególne miejsce. Po pierwsze, jest to czynnik występujący bardzo często, po drugie, wielkość wpływu tego czynnika jest na ogół znaczna i po trzecie, pociąga za sobą inne czynniki, których jednak wpływ na zasoby nie jest tak duży. Głównym przejawem reakcji systemu hydrogeologicznego na podpiętrzenie podstawy drenażu jest podniesienie poziomu wód podziemnych w bezpośrednim sąsiedztwie, które słabnie stopniowo wraz z odległością. Jak już wcześniej wspomniano, ta zmiana powoduje zmniejszenie się gradientów hydrodynamicznych i w pewnym stopniu także kierunków tych gradientów, a w szczególnych przypadkach może dojść do całkowitego odwrócenia spadku zwierciadła. W takiej sytuacji ciek pełniący rolę drenażu może stać się ciekim zasilającym podziemny system wodonośny.

Odwołując się do przedstawionych wcześniej zjawisk wywołanych oddziaływaniem wód powierzchniowych na wody podziemne, można ograniczyć się jedynie do zmian dotyczących zasobów. W skali zlewni lub większego obszaru nie jest to zmiana radykalna – wpływ podpiętrzenia ma względnie mały zasięg. Istotna jest tu wielkość podpiętrzenia i także wymiarowy jego zasięg – duży zbiornik wodny wpływa znacznie i radykalnie zmienia zasoby w jego sąsiedztwie,

w porównaniu ze zbiornikiem małym. Jednak idea małych zbiorników polega na ich wielkiej liczbie, ich słabe oddziaływania sumują się, cząstkowe wpływy poszczególnych małych zbiorników dają w rezultacie stan superponowany o istotnym znaczeniu. W efekcie mamy do czynienia z łagodną rozproszoną zmianą zasobów wody podziemnej na dużym obszarze.

W końcowej części tego opracowania przedstawione są eksperymenty z zakresu modelowania wpływu małych zbiorników wodnych na zasoby wód podziemnych. Eksperymenty te dotyczą pojedynczych zbiorników i nie pokazują efektów superpozycji ich oddziaływań. Zadaniem eksperymentów było określenie sposobu wyznaczania wpływu podpiętrzenia, spowodowanego tymi zbiornikami, na wielkość zmiany zasobów wód podziemnych w ich otoczeniu. Wybrana do tego celu metoda polegała na szukaniu maksymalnej wielkości punktowego poboru wody z różnych miejsc, leżących w pobliżu małego zbiornika, przy założonej lokalnej depresji o ustalonej wielkości, na przykład 1 m. W eksperymentach tych nie uwzględniano innych ograniczeń dotyczących zasobów, ponieważ mogłyby przeszkadzać w interpretacji wyników i niepotrzebnie komplikować algorytmy obliczeniowe przez konieczność stosowania procedur optymalizacji nieliniowej. Otrzymany w ten sposób zbiór punktowych pomiarów pozwolił na wyznaczenie w otoczeniu zbiornika przestrzennej zmienności poboru wody, którego efektem jest lokalna depresja wynosząca 1 m. Powtarzając tę procedurę dwukrotnie, raz dla stanu przed wybudowaniem zbiornika i drugi raz, gdy zbiornik już oddziaływał na wielkość zasobów, można było wyznaczyć przy tej samej depresji wielkość zmiany poboru wody, która jest efektem względnego wzrostu zasobów. Eksperymenty te składały się z szeregu wariantów różniących się między sobą geometrią i topologią badanych systemów, różnymi warunkami hydrogeologicznymi i różnymi wielkościami parametrów środowiska hydrogeologicznego.

Uzyskane wyniki potwierdzają poprawność przyjętych założeń metodycznych i pozwalają uznać tą metodę za dostatecznie poprawną do wyznaczania wielkości zmian zasobów spowodowanych oddziaływaniem małych zbiorników zaporowych.

11. ZASTOSOWANIE METOD MODELOWANIA POLA FILTRACJI DO OKREŚLANIA ZMIAN WARUNKÓW HYDROGEOLOGICZNYCH WYWOŁANYCH PODPIĘTRZENIEM

Zastosowanie modeli przepływu wody podziemnej do określania zmian warunków hydrogeologicznych terenów przyległych, w tym zmian zasobów tych wód, ma w Polsce wieloletnią tradycję. Pierwsze prace badawcze z tego zakresu były prowadzone na Wydziale Geologii Uniwersytetu Warszawskiego w latach 1973–1978, początkowo z zastosowaniem modeli analogowych, a następnie przy pomocy pakietu programowego ANPLA przeznaczonego do budowy modeli hydrogeologicznych i analizy pola filtracji (Michalak, 1983). Badania te dotyczyły głównie dużych zbiorników, często położonych w dużych dolinach rzecznych, gdzie istotnym elementem były obwałowania boczne ograniczające powierzchnię zbiornika i pozostawiające fragment doliny w warunkach lokalnej depresji w stosunku do poziomu wody w zbiorniku. W ramach szerszego programu zatytułowanego: „Metodyka określania zasobów wód podziemnych w obszarach przyległych bezpośrednio do czaszy zbiorników wodnych” zrealizowano szereg projektów badawczych, między innymi dla istniejących lub projektowanych zbiorników: Słup (Macioszczyk i in., 1974), Przeczyca (Michalak, 1975), Ciechocinek (Macioszczyk i in., 1975) i Włodawa (Kazimierski i in., 1976). Także późniejsze prace uwzględniające nowsze podejście do tych zagadnień wniosły istotny wkład w zakresie tej problematyki (Michalak, Więclaw, 1985). Nie ma istotnej różnicy w sposobie oddziaływania na zasoby wody pomiędzy zbiornikami dużymi i małymi – doświadczenia zdobyte w trakcie tamtych prac badawczych pozwalają obecnie szerzej spojrzeć na zagadnienia wpływu zbiorników małych.

11.1. Ogólny opis metod wykorzystujących modele przepływu

Modele przepływu wód podziemnych wykorzystują w pełni dorobek jednego z podstawowych działów hydrogeologii, jakim jest dynamika wód podziemnych. Na ten dorobek składają się między innymi opisane wcześniej następujące elementy:

- Model pojęciowy zagadnienia brzegowego odniesiony do systemu hydrogeologicznego. Stanowi on podstawę zrozumienia zjawisk zachodzących w tych systemach.
- Równania fizyki matematycznej opisujące elementy związane z ruchem wody podziemnej i ich wzajemne relacje. Opis ten jest tak pełny, kompletny i precyzyjny, że wyczerpuje całkowicie wszystkie zagadnienia dotyczące przepływu wody podziemnej i pomijanie go lub szukanie innych podstaw interpretacji tych zjawisk jest metodologicznie błędne.
- Koncepcje opisu zjawisk i procesów zachodzących w systemach hydrogeologicznych i związanych z przepływem wody podziemnej oparte na modelu pojęciowym zagadnień

brzegowych i na równaniach fizyki matematycznej. Koncepcje te są przedmiotem tak wielu publikacji, że nie sposób jest tu wymienić nawet małej ich części. Można jedynie podać przykłady opracowań będących syntezami obejmującymi poszczególne zagadnienia – do takich prac w zakresie podstaw dynamiki należy zaliczyć prace Beara i innych (Bear, Zaslavsky, Irmay, 1971; Bear, 1972) i inne (Domenico, Schwartz, 1998). Cennym dorobkiem w zakresie podejścia systemowego do tej problematyki jest praca Szymanki (1980), a w zakresie budowy modeli matematycznych i zastosowania metod numerycznych w tych modelach monografia Remsona, Hornberger i Molza (1971), publikacja Em-sellema (1975) i także podręcznik Lucknera i Szestakowa (1975).

Z racji tak bogatej literatury dotyczącej podstaw, metod i zastosowań modeli przepływu wody podziemnej, tu można przedstawić jedynie ogólne uwagi dotyczące wyłącznie problemu samego wpływu podpiętrzenia wód powierzchniowych:

- Zgodnie z przedstawionym w załączonym Dodatku modelem pojęciowym podpiętrzenie wód powierzchniowych jest zjawiskiem zewnętrznym w stosunku do systemu hydrogeologicznego – jest zdarzeniem, które wystąpiło w jego otoczeniu i jego oddziaływanie jest wyrażone warunkiem brzegowym I rodzaju lub warunkiem III rodzaju o charakterze zbliżonym do I rodzaju.
- Zgodnie z podstawami dynamiki wód podziemnych wpływ tego podpiętrzenia sięga do granic fizycznych systemu hydrogeologicznego.
- Jak już wspomniano wcześniej, słabnie on jednak stosunkowo szybko w miarę oddalania się od miejsca tego podpiętrzenia, jednak zależy to bardzo od geometrii wnętrza systemu.
- Zgodnie z poglądami przedstawionymi wcześniej, w aspekcie czasu można tu wyróżnić trzy kolejne fazy: fazę stanu ustalonego poprzedzającą okres podpiętrzenia, fazę stanu nieustalonego obejmującą okres wypełniania zbiornika i okres podnoszenia się poziomu wód podziemnych i ostatnią fazę, która jest również stanem ustalonym, gdy po upływie określonego czasu zapanuje ponownie równowaga, jednak w zmienionych podpiętrzeniem warunkach. Ponieważ faza druga jest tylko przejściem z fazy pierwszej do trzeciej, z punktu widzenia metodyki modelowania symulacja tej fazy (stanu nieustalonego) jest konieczna jedynie w przypadku, gdy potrzebne jest określenie czasu jej trwania – czasu po którym nastąpi ponowna stabilizacja systemu.
- Podpiętrzenie wód powierzchniowych jest tylko jednym z elementów wpływających na stan systemu hydrogeologicznego. Z tego powodu ustalenie, w jaki sposób ten czynnik zmienia oddziaływanie innych czynników, na przykład jak wpływa na możliwości poboru wody podziemnej, wymaga wielowariantowej analizy stanów przed i po podpiętrzeniu. Taka wielowariantowa analiza wymaga przeprowadzenia wielu symulacji i porównywania wyników tych symulacji dla określenia powiązań i zależności pomiędzy poszczególnymi czynnikami kształtującymi stan systemu. Gdy celem analizy jest określenie zmian zasobów wód podziemnych, czynnikiem tym jest pobór wody w różnych punktach należących do wnętrza systemu i w poszczególnych wariantach zakłada się istnienie fikcyjnej studni o określonej wydajności. Kilkadziesiąt takich wariantów pozwala wyznaczyć przestrzenną zmienność skutków punktowego poboru wody z systemu.
- Ponieważ wielkość zasobów wody podziemnej w określonym miejscu systemu zależy od wielu ograniczeń, punktowe wariantowe testowanie dopuszczalnej wielkości poboru wody wymaga algorytmu obliczeniowego uwzględniającego wszystkie te ograniczenia.

Z powodu braku odpowiednich programów komputerowych zawierających takie algorytmy i pozwalających na uwzględnianie różnych ograniczeń jednocześnie, najczęściej przyjmuje się jedno proste ograniczenie dotyczące maksymalnej wielkości depresji lub minimalnej rzędnej zwierciadła wody podziemnej – jest to jednak daleko idące uproszczenie i w konsekwencji uzyskany wynik należy traktować z dużą ostrożnością, ponieważ jest obarczony błędami, często znacznymi.

- Poszukiwanie maksymalnej wielkości punktowego poboru wody przy jednoczesnym spełnieniu przyjętych ograniczeń wymaga zastosowania procedur optymalizacji nieliniowej i z tego względu nie zawsze może być stosowane. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie rozwiązania odwrotnego, w którym w punkcie fikcyjnej studni przyjmuje się warunek brzegowy I rodzaju, odpowiadający albo maksymalnej dopuszczalnej depresji, albo minimalnej rzędnej zwierciadła wody w tym miejscu, a następnie wielkość dopuszczalnej eksploatacji wyznacza się z bilansu dopływów i odpływów z tego miejsca. Jest to jednak bardzo uproszczona metoda, zakładająca, że naruszenie ograniczenia nastąpi w miejscu maksymalnej depresji, czyli w miejscu poboru wody, co w wielu przypadkach nie jest prawdziwe, szczególnie gdy w pobliżu znajdują się obszary chronione, gdzie zwierciadło wody może obniżyć się jedynie o bardzo niewielką wartość.

11.2. Ograniczenia metod wykorzystujących modele i warunki ich stosowania

Podstawowym warunkiem zastosowania numerycznego modelu przepływu do określania zmian w systemie hydrogeologicznym spowodowanych podpiętrzeniem jest jego poprawność formalna i wierność modelowanemu systemowi rzeczywistemu. Doświadczenia wynikające z licznych przykładów wykazują, że ten pozornie prosty wymóg bardzo często nie jest spełniany. Poprawność formalna modelu to między innymi spełnienie wymagań wynikających z modelu pojęciowego zagadnienia brzegowego. Często spotykanym przykładem niepoprawności formalnej modelu jest złe zdefiniowanie granic modelowanego systemu, w wyniku czego stan wnętrza wpływa na jego otoczenie. W takim przypadku warunki brzegowe wyrażające niezależne od wnętrza czynniki zewnętrzne nie spełniają swojej roli – przedstawiają nieprawdziwy obraz oddziaływań zewnętrznych. Przykładem takiej sytuacji jest przyjęcie wododziału (podziemnego lub powierzchniowego) jako granicy modelowanego systemu i ma to często miejsce, gdy jako analizowany system przyjmuje się zlewnię (podziemną lub powierzchniową). W zagadnieniach dynamiki wód podziemnych, stanowiących podstawę modeli przepływu wody podziemnej, podstawowym elementem systemowym nie jest zlewnia, lecz tak zwane międzyrzecze – obszar położony między dwoma ciekami powierzchniowymi. W przypadku międzyrzecza, rzeki zamykające ten obszar są poprawnymi formalnie jego granicami. Jak przedstawiono to szczegółowo już wcześniej, wododział podziemny, dzielący międzyrzecze na dwie części, jest rezultatem stanu systemu i w konsekwencji pośrednio czynników zewnętrznych wyrażonych warunkami brzegowymi, na przykład poziomem wody w rzekach i wielkością, a także zmiennością przestrzenną zasilania pochodzącego z opadów atmosferycznych.

Przedstawione powyżej warunki stosowania modeli przepływu wody podziemnej nie wykluczają możliwości zastosowania tych metod do analizy stanu panującego w zlewni. W przypadku modelowania zlewni obszar modelu powinien być jednak znacznie większy – jego granicami powinny być rzeki sąsiadujące z rzeką, której zlewnia jest przedmiotem badań modelowych.

W ten sposób zostaje spełniony wymóg formalnej poprawności konstrukcji modelu przepływu wody podziemnej wobec modelu pojęciowego zagadnienia brzegowego – w przeciwieństwie do wododziału podziemnego rzeka jest formalnie poprawną granicą płytkiego systemu krążenia, a położenie wododziału podziemnego, uzyskanego jako wynik z modelu, pozwala na poprawne bilansowanie strumieni wody podziemnej w obrębie wyznaczonej tą drogą zlewni. Wymownym przejawem poprawności takiego modelu jest brak „dopływów podziemnych” i „odpływów podziemnych” przez granice zlewni podziemnej.

Zagadnienie wierności modelu wobec systemu rzeczywistego, przy założeniu jego formalnej poprawności, jest ściśle związane ze stopniem rozpoznania systemu hydrogeologicznego – z ilością, kompletnością i dokładnością informacji o tym systemie. Jednak nawet przy słabym stopniu rozpoznania systemu wierność modelu może być wystarczająca dla rozwiązania postawionych zadań. Metodyka budowy modeli dostarcza narzędzi pozwalających na poprawienie wierności modelu – należą do nich metody identyfikacji parametrów wnętrza i warunków brzegowych, procedury optymalizacji pozwalające na wyznaczenie efektywnych wartości parametrów modelu, czyli takich, przy których reakcje modelu są dostatecznie zbliżone do reakcji systemu rzeczywistego. Problematyka ta jednak wykracza poza ramy zagadnień będących przedmiotem niniejszego opracowania i tu można jedynie odwołać się do publikacji wymienionych na początku tego rozdziału.

12. OKREŚLANIE ZASOBÓW WÓD PODZIEMNYCH NA PODSTAWIE BADAŃ MODELOWYCH POLA FILTRACJI

Większość zagadnień związanych z wykorzystaniem numerycznych modeli pola filtracji do wyznaczania wpływu różnych czynników na stan systemu hydrogeologicznego i w konsekwencji na wielkość zasobów wód podziemnych jest przedstawiona we wcześniejszych rozdziałach. Z tego względu tu można jedynie zwrócić uwagę na te zagadnienia, które są specyficzne dla problematyki zasobowej. Do tej grupy zagadnień między innymi należą:

- model jako narzędzie do szczegółowego bilansowania przepływów wód podziemnych;
- sposoby uwzględniania powiązania w modelu wód podziemnych z wodami powierzchniowymi;
- specyfikowanie warunków ograniczających zasoby wód podziemnych, wynikających z wymagań ochrony środowiska i ze względu na jakość wody podziemnej.

Część z tych zagadnień jest już dostatecznie poznana i uwzględniana w metodyce modelowania, jednak nie zawsze doceniana przez całe środowisko badawcze zajmujące się zagadnieniami zasobów wód podziemnych. Inne zagadnienia, mające istotny wpływ na metodykę wyznaczania zasobów, pomimo że ich waga jest niekwestionowana, nie mają jeszcze pełnego i poprawnego przełożenia na praktyczne rozwiązania stosowane w modelach pola filtracji jako narzędziach do wyznaczania zasobów.

12.1. Model jako narzędzie do szczegółowego bilansowania przepływów wód podziemnych

Często modele przepływu wody podziemnej są traktowane jako odmienne podejście do zagadnień zasobowych niż metody bilansowe. To konkurencyjne (przeciwstawne) traktowanie obu grup metod wynika w dużym stopniu z nieporozumienia. Niepotrzebnie wynik badań modelowych w postaci obrazu pola filtracji jest traktowany jako coś zupełnie innego niż bilans hydrogeologiczny lub hydrologiczny jakiegoś określonego obszaru. Zasada zachowania masy, wyrażona w równaniach dynamiki wód podziemnych poprzez zasadę ciągłości przepływu, sprawia, że model przepływu sprowadzony ostatecznie do układu matematycznych równań liniowych może być traktowany jako zbiór cząstkowych bilansów. Każde z tych równań jest także równaniem bilansowym, a liczba bilansów cząstkowych jest równa liczbie równań stanowiących układ. Niezwykle ważne jest to, że bilanse te są wzajemnie w pełni zgodne, to znaczy, że każdy dopływ lub odpływ w jakimś elemencie przestrzeni ma komplementarny do niego odpływ lub dopływ w innym sąsiadującym elemencie tej przestrzeni. Grupując odpowiednio te elementy, można wyznaczyć pełen dokładny bilans dowolnego fragmentu rozpatrywanej przestrzeni. Po-

nadto w bilansach tych uczestniczą nie tylko punkty wewnętrzne i przepływy wewnątrz systemu, ale także punkty brzegowe, a przepływy w punktach brzegowych są określone przez warunki brzegowe, albo jawnie w postaci warunku II rodzaju, albo pośrednio przez warunek I lub III rodzaju.

12.2. Uwzględnianie powiązań wód podziemnych z wodami powierzchniowymi

Zasada zachowania masy, znajdująca swój wyraz w modelach poprzez spełnienie warunku ciągłości przepływu, pozwala na uwzględnianie w modelach zasobowych jednego z najważniejszych ograniczeń, którym jest zachowanie przepływów nienaruszalnych w ciekach. Jednak sprawdzenie tego warunku następuje najczęściej dopiero po wyznaczeniu na modelu stanu systemu i wynikiem może być jedynie stwierdzenie, że został on spełniony lub że nie jest spełniony. Bardziej poprawnym formalnym i metodycznym sposobem uwzględniania tego ograniczenia jest objęcie tą zasadą również cieku, który w ten sposób staje się elementem modelu. Na szczęście takie rozwiązanie nie musi pociągać za sobą konieczności spełnienia zasady zachowania energii w elementach modelujących ten ciek, bo taka konieczność prowadziłaby do modelowania cieku w oparciu o równanie Saint-Venanta, co by niepotrzebnie niezwykle skomplikowało model przeznaczony jedynie do wyznaczania zasobów.

12.3. Specyfikowanie warunków ograniczających zasoby wód podziemnych wynikających z wymagań ochrony środowiska i ze względu na jakość wody podziemnej

Wielkość zasobów wód podziemnych zależy w dużej mierze od ograniczeń związanych z wymaganiami ochrony środowiska naturalnego, a także ze względu na jakość wody podziemnej. Ograniczenia te można pogrupować według różnych kryteriów. Podział dziedzinowy wyróżnia między innymi ograniczenia hydrogeologiczne i hydrologiczne. Grupa ograniczeń hydrologicznych to przede wszystkim przepływy nienaruszalne w ciekach i zagwarantowanie odpowiedniego poziomu wody w obszarach wodno-błotnych. Pierwszy warunek ograniczający w tej grupie jest w sensie fizycznym podobny do warunku brzegowego II rodzaju, jest powiązany z zasadą ciągłości przepływu i sprawdza się go obliczeniami bilansowymi. Drugi z kolei warunek ograniczający tej grupy, dotyczący poziomu wody, ma sens fizyczny odpowiadający warunkowi brzegowemu I rodzaju i związany jest z polem potencjału hydrodynamicznego.

Bardziej złożona sytuacja ma miejsce w przypadku ograniczeń natury hydrogeologicznej. Ograniczenia hydrogeologiczne mogą dotyczyć rzędnej zwierciadła, wielkości wytworzonej depresji, wielkości i kierunku gradientu hydrodynamicznego, natężenia przepływu, a także różnych kombinacji tych elementów. Aby ograniczenia wyrażone w formie stosownej dla opisu zjawisk przyrodniczych mogły być uwzględnione w algorytmie obliczeniowym symulatora będącego częścią modelu numerycznego muszą być przekształcone do formy zapisu matematycznego. Dla zilustrowania takich złożonych warunków ograniczających przedstawiono poniżej kilka przykładów, które pochodzą z konkretnych rzeczywistych zadań dotyczących wyznaczania zasobów:

- Jeżeli względna depresja zwierciadła wody w rozpatrywanym głębszym poziomie wodonośnym jest większa niż 10 m, to zwierciadło to nie może obniżyć się poniżej powierzch-

ni znajdującej się w połowie pomiędzy spągiem poziomu leżącego powyżej a stropem poziomu rozpatrywanego:

$$H_l^d \geq \min \left(H_0^d - 10, \left(\frac{z_{st}^d + z_{sp}^g}{2} \right) \right) \quad [12.1]$$

gdzie:

H_l^d – rzędne zwierciadła w dolnym poziomie obliczane w procedurach optymalizacyjnych,

H_0^d – rzędne zwierciadła w dolnym poziomie obliczone przy istniejącej eksploatacji w górnym poziomie i bez eksploatacji w dolnym poziomie,

z_{sp}^g – rzędna spągu górnego poziomu,

z_{st}^d – rzędna stropu dolnego poziomu.

- Względna depresja w poziomie górnym wywołana eksploatacją wody w rozpatrywanym poziomie dolnym nie może być większa niż 5 m:

$$H_l^g \geq H_0^g - 5 \quad [12.2]$$

gdzie:

H_0^g – rzędne zwierciadła w poziomie górnym obliczone przy istniejącej eksploatacji w tym poziomie i bez eksploatacji w poziomie dolnym,

H_l^g – rzędne zwierciadła w poziomie górnym obliczane w procedurach optymalizacyjnych.

- Względna ilość wody uczestnicząca w obiegu poziomu górnego i nieuczestnicząca w obiegu poziomu dolnego nie może zmienić się więcej niż dwukrotnie. W terminologii opisu modelu oznacza to, że stosunek względnych różnic przepływów całkowitych w danym elemencie modelu (bloku) w poziomie górnym i w warstwie rozdzielającej musi zmieścić się w przedziale zawartym pomiędzy 0,5 i 2,0:

$$0,5 \leq \frac{\left\{ \frac{q_d^g - q_d^p}{q_d^g} \right\}}{\left\{ \frac{q_0^g - q_0^p}{q_0^g} \right\}} \leq 2,0 \quad [12.3]$$

gdzie:

q_d^g – całkowity przepływ wody w poziomie górnym w danym elemencie modelu przy rozpatrywanym poborze wody z poziomu dolnego,

q_d^p – całkowity przepływ wody pomiędzy poziomami w danym elemencie przy rozpatrywanym poborze wody z poziomu dolnego,

q_0^g – całkowity przepływ wody w poziomie górnym w danym elemencie przy braku poboru wody z poziomu dolnego,

q_0^p – całkowity przepływ wody pomiędzy poziomami w danym elemencie przy braku poboru wody z poziomu dolnego.

- Rzędne zwierciadła w rozpatrywanym poziomie nie mogą obniżyć się poniżej powierzchni ni znajdującej się 5 m ponad spągiem tego poziomu:

$$H_l \geq z_{sp} + 5. \quad [12.4]$$

gdzie:

H_l – rzędne zwierciadła w rozpatrywanym poziomie,

z_{sp} – rzędna spągu tego poziomu.

- Ze względu na zanieczyszczenia chemiczne poziomu górnego nie można dopuścić do odwrócenia pionowych gradientów potencjałów hydraulicznych pomiędzy poziomem górnym i dolnym. W rezultacie zwierciadło w dolnym poziomie w rejonach zanieczyszczeń nie może obniżyć się poniżej powierzchni zwierciadła w górnym poziomie:

$$H_l^d \geq H_l^g \quad [12.5]$$

gdzie:

H_l^d – rzędne zwierciadła w dolnym poziomie,

H_l^g – rzędne zwierciadła w górnym poziomie.

Powyższe przykłady dotyczą systemu hydrogeologicznego złożonego z dwóch poziomów wodonośnych i z tego powodu uwzględniają także wzajemne relacje pomiędzy tymi poziomami. W analogiczny sposób można zapisać relacje pomiędzy pierwszym poziomem wodonośnym i wodami powierzchniowymi.

12.4. Wyznaczanie przestrzennej zmienności zasobów wód podziemnych

Pomimo stale utrzymującej się tendencji traktowania zasobów wody podziemnej jako określonej wielkości o charakterze skupionym i przypisanej do pewnego fragmentu przestrzeni 3D lub obszaru (2D), co niestety znalazło swoje odbicie w przepisach prawnych, fakt przestrzennego uzależnienia możliwości poboru wody od innych, również przestrzennie zmiennych czynników, nie budzi już takiego sprzeciwu, jak to miało miejsce w przeszłości. Liczba prac badawczych i publikacji, w których zagadnienie zmienności przestrzennej zasobów wód podziemnych stanowi jeden z podstawowych poruszanych problemów, rośnie z każdym rokiem. Przekonanie, że całkowita ilość wody, jaką można pobierać z systemu hydrogeologicznego, zależy od rozmieszczenia miejsc, w których ta woda będzie pobierana, jest ostatnio coraz częściej akceptowane. Z tego względu metody wyznaczania przestrzennej zmienności tych zasobów stają się obecnie jednym z podstawowych narzędzi badawczych w zagadnieniach zasobowych. Przykładem takiego narzędzia jest metodyka przestrzeni dopuszczalnych eksploatacji, określana akronimem PDE (Michalak, 2002). Krótkie przedstawienie tej metodyki pozwoli zrozumieć zależności przestrzenne, jakie występują pomiędzy zasobami wody podziemnej a czynnikami, które je kształtują, i warunkami, które je ograniczają.

Określenie metodyki, w odróżnieniu od terminu metoda, jest tu stosowane celowo, ponieważ jest to dość ogólna i nie w pełni precyzyjnie sformułowana koncepcja traktowania zasobów wód podziemnych jako rezultatu wzajemnego oddziaływania różnych czynników i bardzo istotnym aspektem tych oddziaływań są wzajemne relacje przestrzenne. W takim ujęciu metodyka jest pewnego rodzaju modelem pojęciowym, który może, ale nie musi, być podstawą jakiegś konkretnej metody lub grupy metod.

W metodyce tej zakłada się, że zarówno zasoby, jak i czynniki je kształtujące i ograniczające są zmiennymi przestrzennymi. Inne założenia tej metodyki to:

- Pobór wody w określonym punkcie może być scharakteryzowany dwoma wielkościami progowymi:
 - Pierwsza wartość progowa, nazywana tu progiem dolnym, to pobór tak mały, że nie powoduje on naruszenia któregoś dowolnego z przyjętych warunków ograniczających w dowolnym punkcie systemu. Pobór wody poniżej tej wielkości progowej jest zawsze bezpieczny, jest to jednak najczęściej pobór bardzo mały. Jednak wodę

w tak małej ilości można pobierać z wielkiej liczby punktów i mimo to ograniczenia nie będą naruszone. Suma wszystkich takich poborów punktowych jest maksymalną wielkością poboru wody w rozpatrywanym systemie bez naruszenia ograniczeń – jest maksymalną wielkością zasobów tego systemu. Ma niestety jednak jedną wadę – jej sens jest czysto teoretyczny, ponieważ nie ma praktycznej możliwości pobierania wody w tak małych ilościach z tak wielkiej liczby punktów.

- Druga wartość progowa (próg górny) to pobór znacznie większy, ponieważ zakłada się, że woda jest pobierana tylko z jednego punktu w całym systemie. W takim przypadku wartością progową jest taki pobór w tym jednym punkcie, powyżej którego następuje naruszenie któregośkolwiek z przyjętych ograniczeń w dowolnym punkcie systemu. To również jest pojęcie czysto teoretyczne, ponieważ założenie, że pobór wody będzie się odbywał tylko w jednym punkcie jest całkowicie nierealne. Trzeba tu konieczne zaznaczyć, że sumowanie tych wielkości progowych nie ma sensu, gdyż suma tylko dwóch z nich z pewnością spowoduje naruszenie ograniczeń.
- Pomimo że obie te wielkości progowe mają sens jedynie teoretyczny, to jednak wyznaczają pewne granice, w których mieszczą się wszystkie przypadki rzeczywiste.
- Zbiór punktów z wartościami progowymi dolnymi tworzy powierzchnię (funkcję przestrzenną) nazywaną powierzchnią ograniczającą dolną, a zbiór punktów z wartościami progowymi górnymi tworzy powierzchnię ograniczającą górną. Przekraczanie powierzchni górnej jest w żadnym przypadku niedopuszczalne, ponieważ powoduje naruszenie któregoś z warunków ograniczających. Przekroczenie powierzchni dolnej jest dopuszczalne – można powiedzieć, że w warunkach rzeczywistych jest powszechne – jednak wymagana jest tu duża ostrożność i w konsekwencji tego konieczna jest korekta kształtu tej granicy w otoczeniu punktu, gdzie nastąpiło jej przekroczenie.

Algorytm wyznaczania powierzchni górnej z zastosowaniem procedur optymalizacji nieliniowej jest w zasadzie prosty i nie stwarza istotnych problemów obliczeniowych. Jednak wyznaczanie powierzchni dolnej jest znacznie bardziej złożone. Zastosowanie metod optymalizacyjnych daje wyniki niejednoznaczne, a cykliczne optymalizowanie rozkładu przestrzennego z jednoczesnym „ręcznym” wprowadzaniem korekt, wyznaczonych przy pomocy dodatkowych szacunkowych obliczeń, nie zawsze prowadzi do optymalnego wyniku. W tej sytuacji należy uznać, że metodyka ta wymaga jeszcze dalszych prac badawczych, aby mogła się stać podstawą metody, którą można w szerokim zakresie stosować w praktyce.

Pomimo że szersze praktyczne stosowanie metodyki PDE do wyznaczania zasobów wód podziemnych nie jest jeszcze możliwe, to z pewnością jest to najbardziej kompleksowa, poprawnie formalnie zdefiniowana i efektywna podstawa dla metod analizy zmienności przestrzennej tych zasobów.

13. UWAGI METODYCZNE DOTYCZĄCE PROCEDURY BUDOWY MODELU NUMERYCZNEGO DLA OCENY ZMIAN ZASOBÓW

Wykorzystanie numerycznych modeli przepływu wody podziemnej do analizy różnych problemów hydrogeologicznych w ostatnich latach stało się bardzo powszechne. W pewnej dysproporcji do liczby tych zastosowań pozostaje znajomość metodyki budowy tych modeli i metodyki wykorzystania ich jako narzędzi badawczych. Z tego względu potrzebne jest tu przedstawienie podstawowych ogólnych reguł, które mają zastosowanie w modelach przeznaczonych do określania zmiany zasobów wód podziemnych w wyniku podpiętrzenia wód powierzchniowych.

Pierwszym etapem opracowania modelu jest określenie uproszczonego schematu systemu, który ma być odwzorowany modelem. Na tym etapie można popełnić wiele różnych błędów i aby tego uniknąć, trzeba wziąć pod uwagę, że:

- Nie ulega wątpliwości, że wpływ małego zbiornika jest mniejszy niż dużego – również zmiana zasobów jest odpowiednio mniejsza. W wielu przypadkach zmiana ta może być tak mała, że nie warto jest stosować tak złożonych metod, jak modele przepływu wody podziemnej. W takich przypadkach wystarczy posłużyć się zasadą analogii i przyjąć, że zmiana zasobów jest bardzo zbliżona do zmiany, jaką wyznaczono dla innego podobnego zbiornika małej retencji. Jednak koniecznym warunkiem jest podobieństwo pomiędzy zbiornikami i pomiędzy warunkami hydrogeologicznymi w ich otoczeniu.
- Role, jakie mogą pełnić małe zbiorniki w rozpatrywanych tu oddziaływaniach, sprowadzają się do dwóch kategorii – hydrologicznej i hydrogeologicznej. Rola hydrologiczna to głównie wyrównywanie przepływu w cieku poniżej zbiornika. Przekłada się to na wielkość zasobów wód podziemnych poprzez złagodzenie warunku wynikającego z wielkości przepływu nienaruszalnego. To może mieć miejsce tylko w przypadku, gdy praca zbiornika jest sterowana przez człowieka, a bardzo często tak nie jest. Rola hydrogeologiczna polega na podpiętrzeniu strumienia wód podziemnych i przekształceniu pola filtracji. To oddziaływanie jest głównym przedmiotem tego opracowania – było szczegółowo i wszechstronnie przedstawione wcześniej. Na etapie opracowywania schematu trzeba ustalić, która z tych dwóch ról małego zbiornika jest ważniejsza i czy któraś z nich być może jest tak mała, że może być pominięta. Od tego zależy dobór odpowiedniej metody określania zmian zasobów i być może model przepływu wód podziemnych nie jest w tym przypadku potrzebny.
- Jeżeli jednak wstępna analiza rozpatrywanego przypadku wykaże, że wskazane jest wyznaczenie zmian zasobów za pomocą modelu hydrogeologicznego, to kolejnym etapem prac jest zdefiniowanie struktury przestrzennej i granic modelu. Podejście „zlewniowe” skłania do przyjęcia jako obszaru modelu obszar zlewni podziemnej lub zlewni powierzchniowej. Przedstawione wcześniej rozważania wykazały jednak, że nie jest to

poprawne ustalenie granic modelu – granice modelu muszą być „oparte” na sąsiednich rzekach;

- W większości przypadków struktura pionowa modelu może być bardzo prosta – najczęściej wystarczy model jednowarstwowy (fig. 13.1), a do bardzo nielicznych można zaliczyć przypadki, gdy model dwuwarstwowy (fig. 13.2) jest niewystarczający.
- Model przepływu wody podziemnej jest bardzo uniwersalnym narzędziem badawczym. Nie znaczy to oczywiście, że taki sam model może służyć do zupełnie różnych zadań. Dobór właściwego rodzaju modelu to jedno z trudniejszych zadań, jakie trzeba rozwiązać we wstępnych etapach badań modelowych. W tym miejscu kluczowym pytaniem jest to, czy model ma służyć odtworzeniu na nim jakiegoś konkretnego znanego stanu przeszłego, obecnego lub przyszłego, czy ma być użyty do symulacji różnych, nieznanych jeszcze, stanów wywołanych określonymi wymuszeniami. Z punktu widzenia metodyki modelowania te dwa przypadki są diametralnie różne:
 - W pierwszym przypadku mamy dużo większą swobodę w określaniu struktury przestrzennej modelu, jego granic i przyjętych na tych granicach warunków brzegowych. Przykładem może być opisywana wcześniej zlewnia. Jeżeli mamy zamiar jedynie odtworzyć na modelu jakiś znany stan wieloletni, to można spokojnie przyjąć, że granicą modelu jest wododział podziemny, jaki w tym okresie był obserwowany, i że jest to granica szczelna. Na takim modelu można przeprowadzić wiele różnych analiz, a w tym różne obliczenia bilansowe zmierzające do wyznaczenia różnych rodzajów zasobów, jednak z ograniczeniem, że pobór wody odpowiadający tym zasobom będzie tak mały, że nie zmieni stanu systemu, co raczej jest bardzo mało prawdopodobne. Przedstawiony rodzaj modelu, niestety, nie może być użyty do zadań prognostycznych.

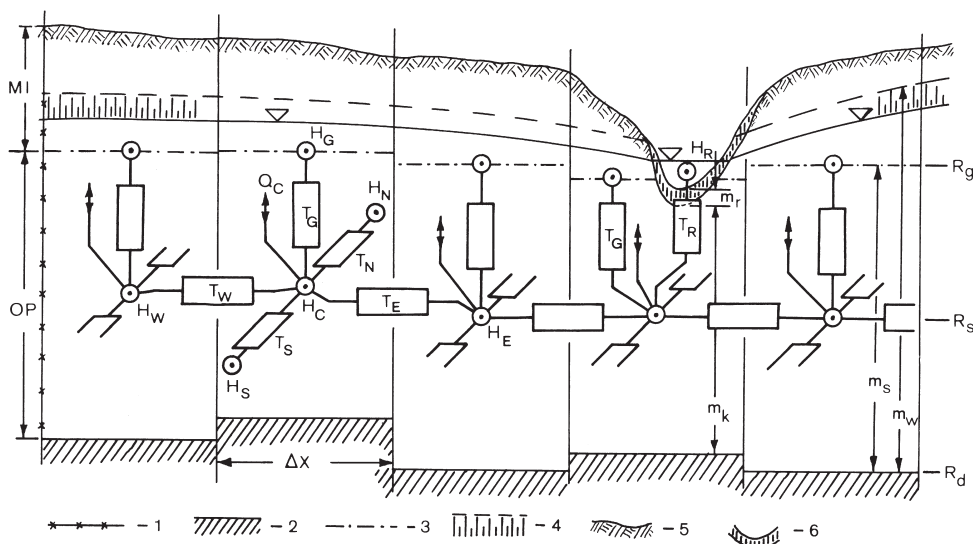


Fig. 13.1. Schemat struktury pionowej modelu jednowarstwowego (Michalak, 1989)

1 – granica boczna, 2 – dolna powierzchnia graniczna, 3 – górna powierzchnia graniczna, 4 – granica podsiąkania kapilarnego, 5 – powierzchnia terenu, 6 – utwory wyścielające dno koryta rzeki

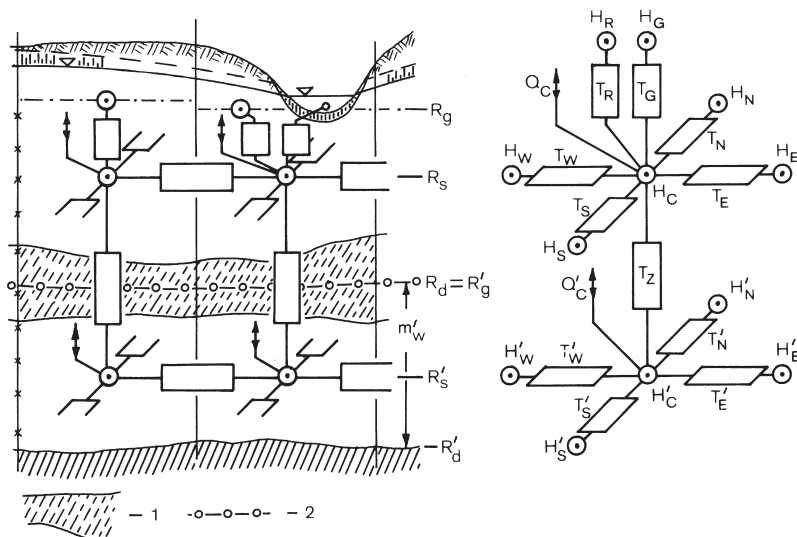


Fig. 13.2. Schemat struktury pionowej modelu dwuwarstwowego (Michalak, 1989)

1 – warstwa słabo przepuszczalna, 2 – powierzchnia graniczna oddzielająca dwa poziomy, (pozostałe oznaczenia jak na fig. 13.1)

nych, gdy znamy przewidywane wymuszenia, ale nie znamy reakcji wnętrza systemu na te wymuszenia.

- Drugi przypadek jest zadaniem trudniejszym, ponieważ model musi być wierny systemowi rzeczywistemu w różnych nieznanach do końca sytuacjach. Aby to było spełnione, przedstawione wcześniej zasady dotyczące struktury modelu, jego granic i warunków brzegowych muszą być w pełni respektowane. W przypadku zlewni dotyczy to między innymi granic „opartych” na rzekach sąsiednich. Z samej definicji pojęcia „zasoby” wynika potencjalna możliwość ich eksploatacji i nie ma tu żadnych zastrzeżeń, że pobór wody będzie bardzo mały. Z tego względu wyznaczanie zasobów, a także wyznaczanie zmiany ich wielkości, jest w pewnym sensie zadaniem prognostycznym, ponieważ zakłada się w domyśle, że w przyszłości, gdy przyjdzie taka potrzeba, zasoby te będą eksploatowane – być może w znacznej ich części. Ponieważ eksploatacja jest istotnym wymuszeniem wpływającym na stan wnętrza systemu, badania modelowe mające za zadanie określenie zasobów należą do tego drugiego przypadku – zadań prognostycznych;
- Prognostyczny charakter badań modelowych zmierzających do wyznaczenia zasobów wód podziemnych wiąże się jeszcze z jednym problemem, a mianowicie z zasobami wzbudzonymi, a ujmując to szerzej, ze zwiększeniem zasobów lub ewentualnym ich zmniejszeniem w wyniku działalności człowieka. Określenie tych zmian możliwe jest jedynie za pomocą symulacji prognostycznych, co w konsekwencji prowadzi do rygorystycznego przestrzegania przedstawionych powyżej zasad metodycznych w zakresie definiowania struktury i granic modelu przeznaczonego do zadań prognostycznych.

Druga grupa uwag metodycznych dotyczy technicznych zagadnień realizacji modelu. Na szczególną uwagę zasługuje tu dobór środków realizacji modelu. Niezbędną podstawą badań modelowych jest oprogramowanie. Niestety, poniższe uwagi i zalecenia w większości przypadków nie mogą być traktowane jako warunki konieczne, ponieważ realna sytuacja najczęściej nie pozwala na ich spełnienie:

- Każde oprogramowanie, w tym także przeznaczone do budowy modeli, ma określone przez jego autorów ramy. Ramy te dotyczą zakresu zastosowań, komunikacji z innymi systemami programowymi i obszaru możliwości, jaki autorzy oprogramowania pozostawili jego użytkownikowi. Każde z tych koniecznych ograniczeń ma istotny wpływ na jakość, złożoność i poprawność budowanego modelu.
- Obecnie mamy do dyspozycji wiele programów przeznaczonych do modelowania przepływu wody – wiele z nich ma unikalne możliwości, na przykład łączenie modelowania przepływu w strefie saturacji i aeracji, jednak są to na ogół programy o stosunkowo wąskim zakresie zastosowań. Najbardziej uniwersalnym oprogramowaniem do takich celów jest opracowany i nadal rozwijany przez ośrodek badawczy USGS system Modflow. System ten jest najbardziej na świecie rozpowszechnionym oprogramowaniem tego typu. Ma on także wiele wersji komercyjnych, a ściślej to ujmując różnych „opakowań” w postaci interfejsu użytkownika ułatwiającego posługiwanie się tym systemem przez użytkowników z mniejszą wiedzą informatyczną. Czy jest to najbardziej odpowiednie oprogramowanie dla zadań związanych z wyznaczaniem zasobów? Nie jest to proste pytanie, ale trzeba tu jednak szczerze odpowiedzieć, że raczej nie. Obserwując jednak tendencje w zakresie stosowania różnych programów w badaniach hydrogeologicznych, należy przypuszczać, że będzie to jednak podstawowe narzędzie wykorzystywane przy wyznaczaniu zasobów. Uwzględniając ten bezsporny fakt, nowe metody wyznaczania zasobów przeznaczone do szerszego stosowania powinny zakładać, że będą one realizowane za pomocą programu Modflow. Z tego względu zamieszczone w tym opracowaniu przykłady zostały opracowane za pomocą właśnie tego oprogramowania.
- Równoległe do systematycznego rozwoju metod modelowania hydrogeologicznego ciągle wzrasta ilość dostępnych danych w postaci cyfrowej, które w modelach są niezbędne. Dane te w formie zorganizowanej i przypisane do określonych miejsc na Ziemi stanowią geoinformację. Przykładami geoinformacji wykorzystywanej w modelowaniu są cyfrowe mapy hydrogeologiczne, geologiczne, hydrograficzne i topograficzne, a także inne zestawy danych, jak na przykład numeryczne modele terenu, dane dotyczące form pokrycia terenu i wiele innych. Również informacja zgromadzona w bazach danych, gdy zawiera także atrybuty geoprzestrzenne w postaci współrzędnych, po odpowiednim przetworzeniu stanowi cenne źródło danych wykorzystywanych w modelach. Można przyjąć, że obecnie około 80% danych potrzebnych do opracowania modelu jest dostępne w formie cyfrowej jako geoinformacja. Taka sytuacja zmienia zasadniczo sposób przygotowywania danych do modelu i radykalnie zmniejsza pracochłonność – dawniej prace te trwały miesiącami, a obecnie czas ten można określać w dniach. Jednak wykorzystanie danych w takiej postaci wymaga stosowania systemów geoinformatycznych, popularnie nazywanych systemami GIS, i wymaga także dalszego rozwoju metod przetwarzania geoinformacji na potrzeby modeli.
- Oprogramowanie przeznaczone do budowy modeli zawiera w swoich algorytmach wiele różnych metod, na przykład procedur interpolacji lub numerycznych metod rozwiązy-

wania układów równań liniowych o macierzach pasmowych. Każda metoda ma swój zakres zastosowania i poza tym zakresem może dawać błędne wyniki. Z tego względu znajomość zakresu stosowalności metod zawartych w używanym do modelowania oprogramowaniu i staranna weryfikacja wyników, także w poszczególnych fazach obliczeń, jest koniecznością.

- Współczesne oprogramowanie komputerowe dzieli się pod względem uprawnień użytkownika na dwie grupy – oprogramowanie otwarte i zamknięte. Między innymi główną zaletą oprogramowania otwartego, w przeciwieństwie do oprogramowania zamkniętego, jest nieograniczony dostęp do kodu źródłowego tego oprogramowania. Pozwala to na dowolne modyfikowanie tego kodu i w rezultacie możliwość dostosowania oprogramowania do jakichś specyficznych wymagań rozwiązywanego zadania. W przypadku modeli przepływu wody podziemnej pozwala to na uwzględnianie dodatkowych czynników kształtujących warunki hydrogeologiczne, a także takich zjawisk przyrodniczych, których w typowym oprogramowaniu nie można uwzględnić. Przykładem może tu być dołączenie do procedury symulacyjnej modułów optymalizacji nieliniowej, bardzo przydatnych w zagadnieniach zasobowych, lub funkcji nieliniowych opisujących zjawiska zachodzące w strefie aeracji.
- Oddzielnym ważnym problemem w zagadnieniach tu przedstawianych jest zasada ponownego użycia (*reuse*). Jest to jeden z kluczowych problemów współczesnej informatyki i polega na umożliwieniu wielokrotnego wykorzystania tego, co już raz zostało zrobione – odnosi się to zarówno do oprogramowania, jak i do danych. W przypadku modelowania przepływu wody podziemnej zasadę tę należy odnieść do samych modeli – model raz opracowany może być wielokrotnie w przyszłości wykorzystywany. Jeżeli wyznaczy się zasoby za pomocą opracowanego w tym celu modelu, a następnie po jakimś czasie nastąpią zmiany warunków, których konsekwencją będzie zmiana zasobów, to racjonalnym podejściem jest ponowne wykorzystanie tego modelu dla wyznaczenia nowej wielkości zasobów. Jednak zastosowanie zasady ponownego użycia w przypadku modeli hydrogeologicznych wymaga przyjęcia pewnych zasad organizacyjnych i technicznych, co nie zawsze jest łatwe lub możliwe.

Przedstawione tu wybrane uwagi metodyczne to jedynie zasygnalizowanie problematyki dotyczącej metod modelowania i wykorzystania tych metod w problematyce zasobowej. Wiele różnych innych zagadnień z tym związanych jest opisanych w licznych publikacjach, jednak rozproszenie tej wiedzy po różnych, często bardzo specjalistycznych, czasopiśmie i książkach, sprawia, że dotarcie do niej nie jest sprawą łatwą.

14. PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA METOD MODELOWANIA POLA FILTRACJI DO OKREŚLANIA ZMIAN ZASOBÓW

Podstawowym elementem proponowanej metody jest numeryczny model przepływu wód podziemnych. Model powinien zostać opracowany w dwóch wariantach, opisujących system krążenia wód przed powstaniem zbiornika oraz w trakcie jego eksploatacji. Następnie dokonywane jest punktowe próbkowanie obu modeli w celu określenia dopływu wód podziemnych do badanego bloku, przy założonym *a priori* obniżeniu zwierciadła. Próbkowanie dokonywane jest za pomocą warunku I rodzaju. W bloku zadawana jest wysokość hydrauliczna, a następnie obliczany jest bilans przepływu. Wymiana wody za pośrednictwem warunku I rodzaju reprezentuje wydatek możliwy do uzyskania przy założonym zdepresjonowaniu zwierciadła. Różnice wydatków uzyskane w tych samych blokach dla warunków naturalnych oraz warunków eksploatacji zbiornika wykorzystywane są następnie do określenia względnego wzrostu zasobów ΔQ w punkcie:

$$\Delta Q = \frac{Q_R - Q_Z}{Q_R} \cdot 100\% \quad [14.1]$$

gdzie:

Q_R – wydatek bloku z warunkiem I rodzaju na modelu bez symulacji zbiornika (warunki naturalne),

Q_Z – wydatek bloku z warunkiem I rodzaju w trakcie eksploatacji zbiornika.

Kolejnym etapem jest przestrzenne zorientowanie punktów próbkowania. Polega to na przypisaniu punktom współrzędnych kartezjańskich przyjętego układu odniesienia. Może to być jeden z układów topograficznych lub układ lokalny przyjęty dla modelu. Następnie interpretowany jest przestrzenny rozkład względnego wzrostu zasobów. Na tym etapie najbardziej wskazane jest zastosowanie metod geostatystycznych. W prezentowanych poniżej przykładach rozkłady przestrzenne były interpretowane metodą krigingu. Podstawowym materiałem wynikowym metody są mapy prezentujące przestrzenny rozkład wzrostu zasobów wód podziemnych w otoczeniu zbiorników małej retencji.

Obliczenia pola filtracji prezentowane w poniższych przykładach zostały wykonane za pomocą programu Modflow 2000, dostępnego w pakiecie Visual Modflow. Do obliczeń bilansu wodnego wykorzystano program ZoneBudget.

14.1. Przykład 1

Zlewnia rzeczna jako obszar bilansowy

Zlewnia rzeczna jest najczęściej wydzielanym obiektem, wykorzystywanym do szacowania zasobów wód podziemnych. Granice zlewni powierzchniowej zdefiniowane są w sposób jednoznaczny przebiegiem morfologicznych działów wodnych. Zasięg zlewni podziemnej jest

przestrzennie zróżnicowany. Lokalne systemy krążenia mogą mieścić się w granicach zlewni, podczas gdy głębsze systemy, o charakterze regionalnym, zwykle wykraczają poza jej obszar. Za granice zlewni podziemnej przyjmuje się wododziały podziemne pierwszego poziomu wodonośnego (Paczyński, Sadurski, red., 2007). Przebieg tych wododziałów jest najczęściej zbliżony do działów morfologicznych, przy czym zwykle brak jest pełnego pokrycia. Ustalenie przebiegu wododziału podziemnego wymaga szczegółowego rozpoznania stanu hydrodynamicznego systemu. W przypadku, gdy obiektem wydzielonym z przestrzeni hydrogeologicznej jest zlewnia podziemna, wododział podziemny stanowi powierzchnię brzegową. Powierzchnia ta wyznacza granice systemu, a za jej pośrednictwem określana jest relacja wydzielonego obiektu z otoczeniem. Powierzchnia brzegowa zlewni podziemnej ma charakter przejściowo zamknięty (Szymanko, 1980). Oznacza to, że w określonych warunkach sygnały z otoczenia nie są przekazywane do systemu. Zmiana warunków spowodowana pojawieniem się dodatkowych wymuszeń wewnętrznych i/lub zewnętrznych może prowadzić do zmiany charakteru powierzchni na otwarty. Zmienny charakter powierzchni brzegowej stanowi główną trudność przy tworzeniu matematycznych modeli pola filtracji w systemach zlewniowych.

Relacja systemu wodonośnego z otoczeniem określana jest w modelu matematycznym za pośrednictwem warunków brzegowych. Zamknięty charakter powierzchni brzegowej zlewni może być odwzorowany warunkiem II rodzaju, uwzględniającym brak wymiany wody między systemem a otoczeniem. Takie sformułowanie zagadnienia brzegowego jest niewystarczające w przypadku, gdy model ma być wykorzystany od określania zasobów wód podziemnych. Metodyka szacowania zasobów wymaga symulacji wymuszeń wewnętrznych, skutkujących zmianą geometrii systemu zlewniowego. Wododziały podziemne w wyniku wymuszeń zmieniają położenie, a granice systemu zmieniają charakter na otwarty. Stąd w modelach numerycznych zlewni podziemnej często stosuje się dla wododziałów warunki III rodzaju. Pozwala to symulować wymianę wody z otoczeniem podczas symulacji prowadzonych na modelu. Warunek III rodzaju wymaga określenia dwóch parametrów powierzchni brzegowej: wysokości hydraulicznej i przewodności wodnej. Wysokość hydrauliczna na brzegu obszaru musi odpowiadać stanowi pola filtracji w warunkach braku dodatkowych wymuszeń. Gwarantuje to spełnienie warunku zerowego przepływu na linii wododziału podziemnego. Natomiast symulacja wymuszeń wewnętrznych przy zastosowaniu warunku III rodzaju pozwala uwzględnić wymianę wody przez powierzchnię brzegową. Zatem można by uznać, że opisanie wododziału podziemnego warunkiem III rodzaju jest rozwiązaniem optymalnym dla numerycznego modelu zlewni. Niestety, tak nie jest.

W systemie rzeczywistym wielkość przepływu przez powierzchnię brzegową, wyznaczoną pierwotnym położeniem wododziału, jest ściśle zdeterminowana wydłużeniem lub skróceniem strumienia. Prawidłowe odwzorowanie powyższego warunku na modelu numerycznym wymagałoby założenia *a priori*, o jaką odległość zmieni się położenie wododziału w trakcie symulacji dodatkowych wymuszeń. Następnie należałoby tak dobrać wartość przewodności wodnej powierzchni brzegowej, aby warunek III rodzaju prawidłowo opisywał natężenie przepływu między systemem a otoczeniem. Spełnienie powyższych warunków nie jest jednak możliwe. Stała wartość przewodności wodnej przypisana do warunku III rodzaju nie pozwala na prawidłowe określenie natężenia przepływu przez powierzchnię brzegową. Przepływ ten jest zmienny i zależy od natężenia wymuszeń wewnętrznych. Zatem przy stałym H granicy (warunek konieczny – patrz wyżej) przewodność wodna jest zmienna i zależy nieliniowo od natężenia wymuszeń wewnętrznych. W tej sytuacji wydaje się, że rozwiązaniem najbardziej optymalnym jest rozszerzenie modelu poza granice zlewni. Jeżeli jest to możliwe, powierzchnia brzegowa wydzielonego obiektu powinna zostać odniesiona do cieków powierzchniowych, stanowiących główne

strefy drenażu. Oznacza to tym samym, że obiektem optymalnym do obliczeń pola filtracji jest obszar międzyrzecza. Takie podejście minimalizuje komplikacje związane ze zmienną geometrią systemu. Jednocześnie model międzyrzecza nie wyklucza możliwości obliczenia bilansu wodnego w ramach zlewni, w tym także zlewni powierzchniowej. Zatem możliwe jest odniesienie wyników obliczeń do obszaru zlewni, jako najczęściej wydzielanego obszaru bilansowego do wyznaczania zasobów wód podziemnych. Ilustracją stosowalności powyższej metodyki jest przykład przytoczony poniżej.

Przykład obliczeń. Wydzielony system wodonośny obejmuje obszar zamknięty w międzyrzeczu dwóch głównych cieków (fig. 14.1). W granicach obszaru znalazła się zlewnia powierzchniowa dopływu jednego z cieków głównych. Na rzece tej planuje się wybudowanie zbiornika małej retencji, o maksymalnej wysokości piętrzenia wód wynoszącej 1,8 m. Na obszarze międzyrzecza wydzielono jeden użytkowy poziom wodonośny w piaskach wodnolodowcowych o zmiennej miąższości i granulacji. Wodoprzepuszczalność poziomu kształtuje się na poziomie $1 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-5}$ m/s. Osady wodnolodowcowe podścielone są przez trudno przepuszczalne iły neogenu. System zasilany jest infiltracyjnie oraz dopływem podziemnym od południowego wschodu. Dominującym kierunkiem przepływu wód podziemnych jest NW. Drenaż odbywa się za pośrednictwem cieków powierzchniowych, które są w pełni penetrujące w stosunku do rozważanego poziomu. Po stronie rozchodów w bilansie wodnym systemu należy uwzględnić odpływ podziemny przez brzeg północno-zachodni oraz straty na ewapotranspirację.

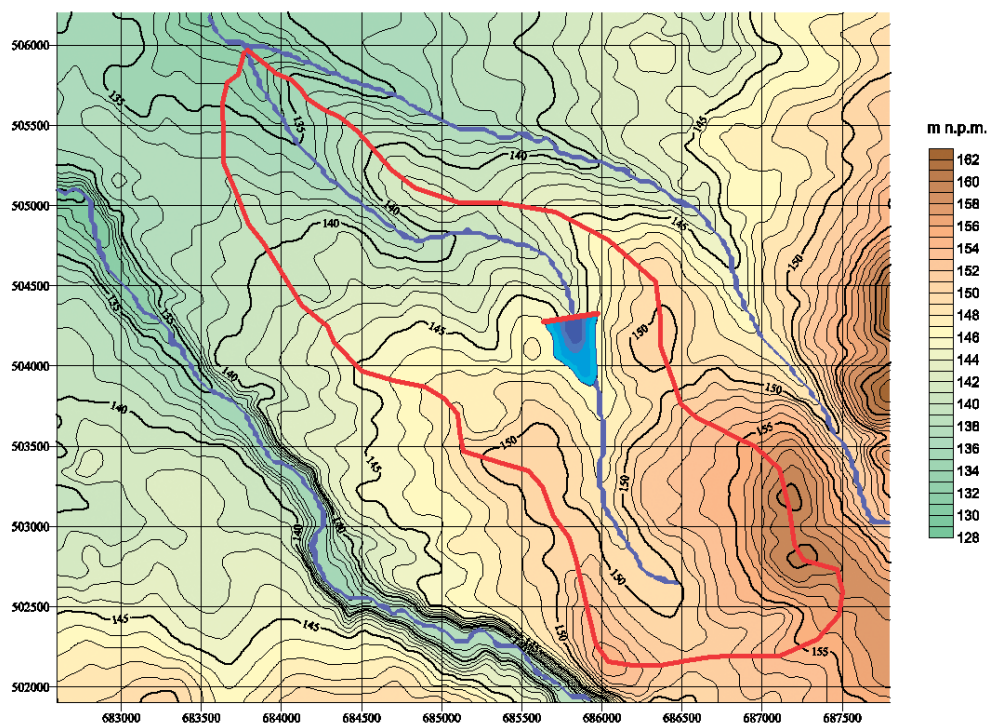


Fig. 14.1. Otoczenie zbiornika małej retencji – szkic sytuacyjny. Czerwona linia odpowiada przebiegowi wododziału powierzchniowego

Schemat przestrzenny modelu numerycznego. System wodonośny odwzorowano za pomocą ortogonalnej siatki dyskretyzacji o kroku $\Delta x = \Delta y = 25$ m. Wielkość przyjętego kroku odpowiada rozdzielczości numerycznego modelu powierzchni terenu. Następnie dokonano dyskretyzacji przestrzeni po osi z , dzieląc badany poziom wodonośny na trzy podwarstwy. Wielowarstwowa struktura modelu umożliwiła odwzorowanie wymiany wody przez dno zbiornika retencyjnego. Zmienną miąższość poszczególnych warstw określono na drodze interpretacji powierzchni stropu i spągu. Wykorzystano w tym celu numeryczny model powierzchni terenu oraz powierzchnie spągu interpretowane metodą krigingu. Relację modelu z otoczeniem określono za pomocą warunków brzegowych II i III rodzaju. Warunki III rodzaju (typ RIVER) zadano dla cieków powierzchniowych w najwyższej warstwie modelu (fig. 14.2). Bloki na zewnątrz od linii cieków ograniczających obszar międzyrzecza potraktowano jako nieaktywne we wszystkich warstwach modelu. Było to jednoznaczne z zadaniem na powierzchni rozgraniczającej bloki aktywne od nieaktywnych warunku brzegowego II rodzaju ($Q = 0$). W ten sposób zdeterminowano w pełni penetrujący charakter cieków ograniczających. Na brzegu północno-zachodnim oraz południowo-wschodnim we wszystkich warstwach modelu zadano warunek III rodzaju typu GHB¹. Pozwoliło to na uwzględnienie w obliczeniach przepływu podziemnego przez wymienione powierzchnie brzegowe. Warunek GHB wykorzystano także do symulacji zbiornika małej retencji.

Zasilanie infiltracyjne systemu odwzorowano poprzez kombinację warunków II i III rodzaju. Warunkiem II rodzaju zadano stałą dla całego obszaru wielkość zasilania. Warunek III rodzaju wykorzystano do obliczeń ewapotranspiracji. Zastosowano w tym celu pakiet *Evapotranspiration*, który umożliwia obliczenie wielkości strat (wydatku strumienia) w funkcji głębokości występowania zwierciadła wody podziemnej (fig. 14.3). Warunek posiada ograniczenie dolne, tzw. głębokość wygaśnięcia (*extinction depth*), poniżej której wielkość ewapotranspiracji jest równa zero. Z drugiej strony użytkownik definiuje maksymalną wartość ewapotranspiracji (ogranicze-

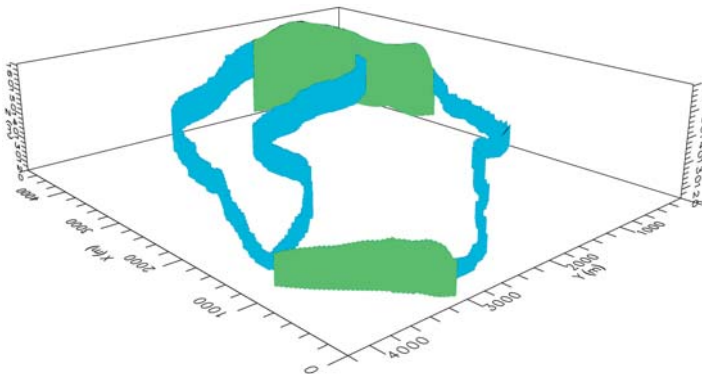


Fig. 14.2. Topologia modelu – warunki brzegowe III rodzaju. Kolor niebieski – pakiet RIVER, kolor zielony – GHB

¹ W programie Modflow istnieje kilka wariantów (typów) warunku III rodzaju. Typ GHB (*General Head Boundary*) odpowiada klasycznej definicji warunku Cauchy'ego. Natężenie wymiany wody przez powierzchnię brzegową zależy od jej wodoprzepuszczalności i jest proporcjonalne do różnicy ciśnień. W warunku tym (w przeciwieństwie do innych wariantów, jak RIVER czy DRAIN) nie stosuje się dodatkowych ograniczeń wymiany wody między systemem a otoczeniem.

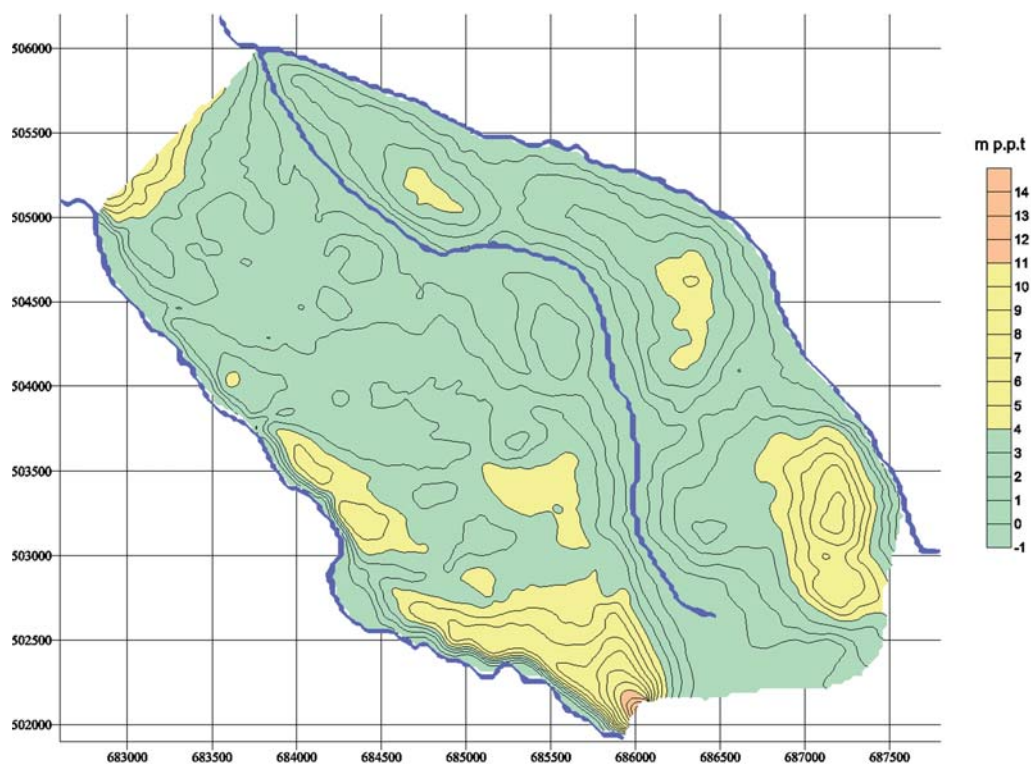


Fig. 14.3. Obliczona głębokość do zwierciadła wód gruntowych

nie górne). Złożenie warunków II i III rodzaju w połączeniu z zastosowaniem numerycznego modelu powierzchni terenu pozwala na określenie siatki zasilania, jako jednej z map wynikowych modelu (fig. 14.4). Obraz warunków zasilania uzyskany z modelu jest zgodny z powszechnie uznawanymi modelami pojęciowymi strefy aktywnej wymiany. Zasilanie systemu odbywa się w strefach wysoczyznowych, podczas gdy w dolinach rzecznych, z uwagi na płytkie występowanie zwierciadła, następuje intensyfikacja strat związanych z ewapotranspiracją. Natężenie zasilania w strefie dolinnej (określanej często jako dolinna strefa drenażowa) może być bliskie zeru lub przyjmować wartości ujemne (Macioszczyk red., 2006; Paczyński, Sadurski, red., 2007).

Wyniki obliczeń. Obliczenia przeprowadzono w dwóch wariantach. Pierwszy dotyczył stanu pola filtracji w warunkach naturalnych. Wariant drugi pozwolił na odwzorowanie stanu systemu w trakcie eksploatacji zbiornika małej retencji. Numeryczne modele pola filtracji obu wariantów zostały wykorzystane do obliczeń bilansu wodnego zlewni. Bilans wodny nie jest bilansem masy w ścisłym znaczeniu tego terminu, ponieważ odnosi się do objętości wody i objętości przepływu w modelowanym systemie. Obliczenie bilansu wodnego pozwala między innymi na ocenę poprawności iteracyjnego rozwiązania układu równań różnicowych. Bilans wodny ułatwia także oszacowanie wielkości zasobów odnawialnych systemu wodonośnego.

Do obliczenia bilansu wodnego wykorzystano program ZoneBudget, dostępny w pakiecie Visual Modflow. Program ten liczy bilans wodny systemu na podstawie numerycznego modelu

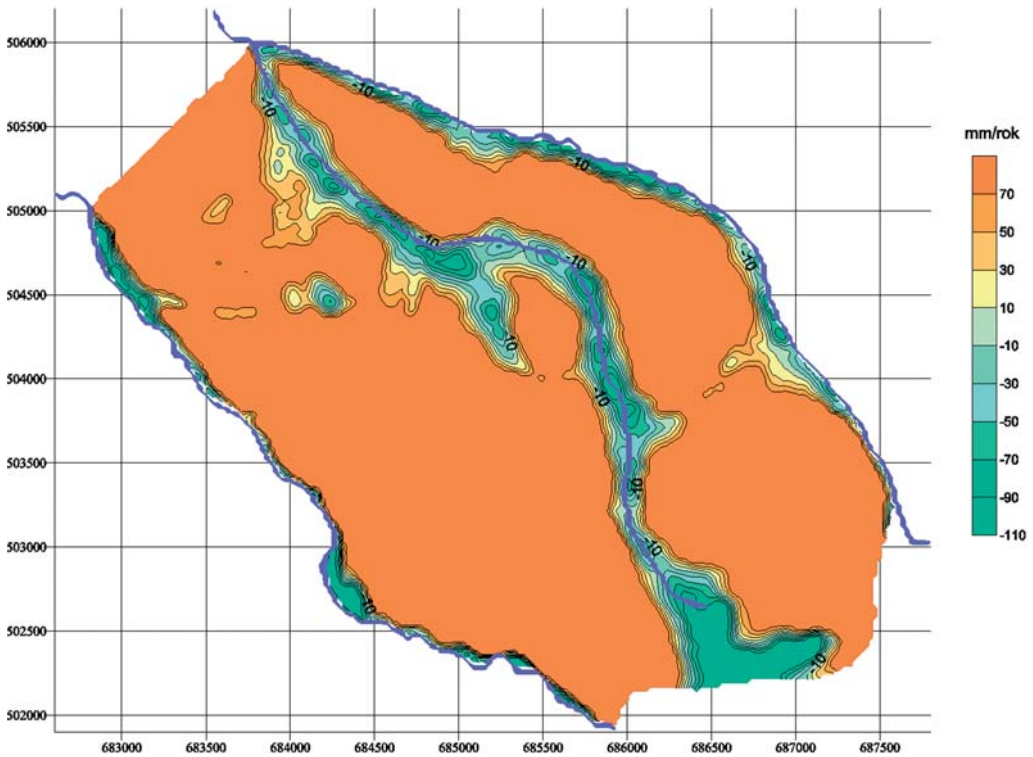


Fig. 14.4. Siatka zasilania modelowanego systemu. Wartości dodatnie odpowiadają obszarom, w których zasilanie przewyższa straty na ewapotranspirację; wartości ujemne reprezentują sytuację odwrotną

pola filtracji. Możliwe jest obliczenie poszczególnych składowych bilansu wodnego, tzn. objętości przepływu w odniesieniu do wszystkich źródeł i upustów związanych z zadanymi wymuszeniami. Program dodatkowo daje możliwość wydzielenia stref, dla których liczone są bilanse cząstkowe. Obliczenia wykonywane w strefach wymagają zachowania wartości bilansu wodnego dla każdego bloku obliczeniowego (opcja *cell-by-cell*). Wyróżnia się cztery główne typy dopływu lub odpływu z pojedynczego bloku w opcji *cell-by-cell*: (1) przepływ związany z zewnętrznymi wymuszeniami jak zasilanie infiltracyjne i ewapotranspiracja, (2) przepływ związany z magazynowaniem lub uwalnianiem zasobów wodnych (tylko w modelach filtracji nieustalonej), (3) przepływ do lub z bloku, w którym zadano warunek brzegowy, (4) bilans przepływu między blokiem obliczeniowym a blokami sąsiadującymi. ZoneBudget pozwala na wyznaczenie stref w granicach modelowanego obszaru poprzez przypisanie numeru strefy do każdego bloku obliczeniowego. Następnie program wykonuje obliczenia bilansu wodnego, zestawiając wymienione cztery elementy ze wszystkich bloków przypisanych do danej strefy.

Sposób przestrzennego wydzielenia stref w prezentowanym przykładzie wynikał z potrzeby uzyskania bilansu wodnego zlewni. Celem obliczeń bilansowych było wyznaczenie zasobów odnawialnych oraz określenie roli zbiornika retencyjnego w formowaniu tych zasobów. Bilans wodny pozwolił także na prześledzenie roli poszczególnych czynników odpowiedzialnych za

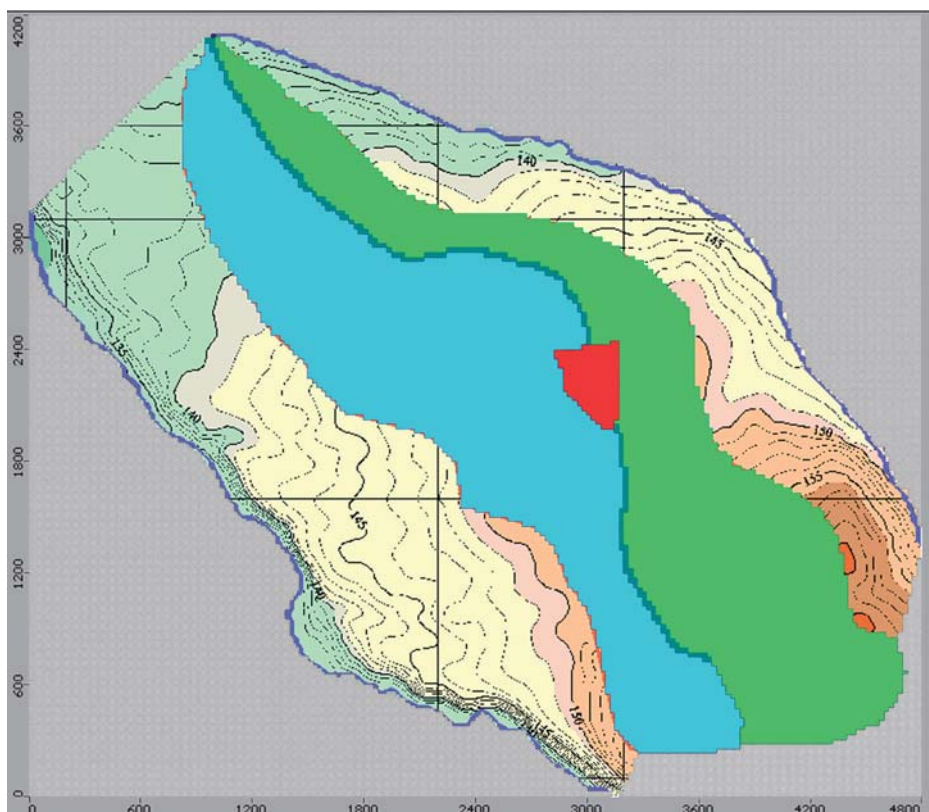


Fig. 14.5. Strefy wyznaczone do obliczeń bilansów częściowych zlewni

zasilanie i drenaż systemu wodonośnego. W granicach rozpatrywanej zlewni wydzielono cztery strefy (fig. 14.5):

- bloki reprezentujące prawobrzeżną część zlewni,
- bloki reprezentujące część lewobrzeżną,
- bloki z warunkiem III rodzaju (typ RIVER),
- bloki z warunkiem III rodzaju (typ GHB dla czaszy zbiornika).

Dodatkowo wydzielona została piąta strefa obejmująca fragment międzyrzecza poza granicami zlewni.

Bilanse częściowe uzyskane w poszczególnych strefach posłużyły następnie do obliczenia bilansu wodnego całej zlewni (tab. 14.1). Zgodnie z przyjętym modelem pojęciowym, dominującą rolę w zasilaniu wód podziemnych odgrywa infiltracja efektywna (70% przychodów). O rozchodach decydują odpływ podziemny (45%), ewapotranspiracja (31%) i drenaż rzeczny (24%). Uwagę zwraca tu zwłaszcza znaczący udział odpływu podziemnego, wynikający z niezgodności wododziału podziemnego z powierzchniowym działem wodnym.

Tabela 14.1

Elementy bilansu	Przychody				Rozchody					
	Infiltracja efektywna	Dopływ podziemny	Infiltracja wód powierzchniowych	Suma przychodów	Drenaż rzeczny			Ewapotranspiracja	Odpływ podziemny	Suma rozchodów
					lewo-brzeżny	prawo-brzeżny	całkowity			
Warunki naturalne	1269,1	493,8	20,8	1783,7	255,9	170,6	428,0	553,6	794,3	1775,9
Eksploatacja zbiornika	1269,1	481,8	251,9	2002,8	334,2	188,0	522,2	641,2	838,0	2001,4

Obliczenia bilansu wodnego pozwoliły także na ilościową ocenę zasobów odnawialnych zlewni. W warunkach naturalnych zasoby te można szacować na blisko 1800 m³/d. W tym kontekście szczególnie interesujące było określenie zasobów odnawialnych w trakcie eksploatacji zbiornika małej retencji. Przeprowadzane obliczenia wykazały, że przy zadanej wysokości piętrzenia zasoby odnawialne zlewni wzrosłyby o ponad 12%, osiągając wartość około 2000 m³/d. Odnotowany wzrost spowodowany jest przekształceniem struktury zasilania systemu, związanym głównie ze wzrostem infiltracji wód powierzchniowych w rejonie zbiornika. O ile w warunkach naturalnych infiltracja wód powierzchniowych stanowiła zaledwie około 1% całkowitego zasilania, o tyle w trakcie eksploatacji zbiornika udział ten przekracza 12%. Po stronie rozchodów szczególnie zauważalny jest wzrost natężenia drenażu rzecznoego (o 22%) i ewapotranspiracji (o blisko 16%).

Różnica między wielkością zasobów odnawialnych przed i po wybudowaniu zbiornika (w rozważanym przypadku około 220 m³/d) nie może być automatycznie utożsamiana ze wzrostem zasobów dyspozycyjnych. Te, jak wiadomo, zależą od szeregu kryteriów i powinny być ustalane na drodze optymalizacji. Ponieważ kryteria wyznaczania zasobów dyspozycyjnych charakteryzują się zwykle nierównomiernym rozkładem, istotnego znaczenia nabiera przestrzenna interpretacja spodziewanego wzrostu. W tym celu można posłużyć się opisaną wcześniej metodą próbkowania. Metoda ta wymaga żmudnego i wielokrotnego przeliczenia obu wariantów modelu. Aby podnieść jej efektywność, warto uprzednio zidentyfikować strefy, w których spodziewana jest zmiana zasobów. W tym celu obliczono rozkład wysokości hydraulicznej odpowiednio przed i w trakcie eksploatacji zbiornika. Odjęcie powierzchni zwierciadła obliczonej dla stanu naturalnego od powierzchni uzyskanej w warunkach piętrzenia wód pozwoliło na uzyskanie mapy różnicowej. Mapa ta (fig. 14.6) stanowi przestrzenną i ilościową charakterystykę zmiany położenia zwierciadła. Uzyskany obraz jest pomocny w optymalnym rozmieszczeniu punktów próbkowania. Chodzi tu głównie o uzyskanie jak największej dokładności rozkładu przestrzennego, przy możliwie najmniejszej liczbie przeliczeń modelu numerycznego. Największych zmian zasobów wód podziemnych należy oczekiwać w strefach największego wzniosu zwierciadła. W rozważanym

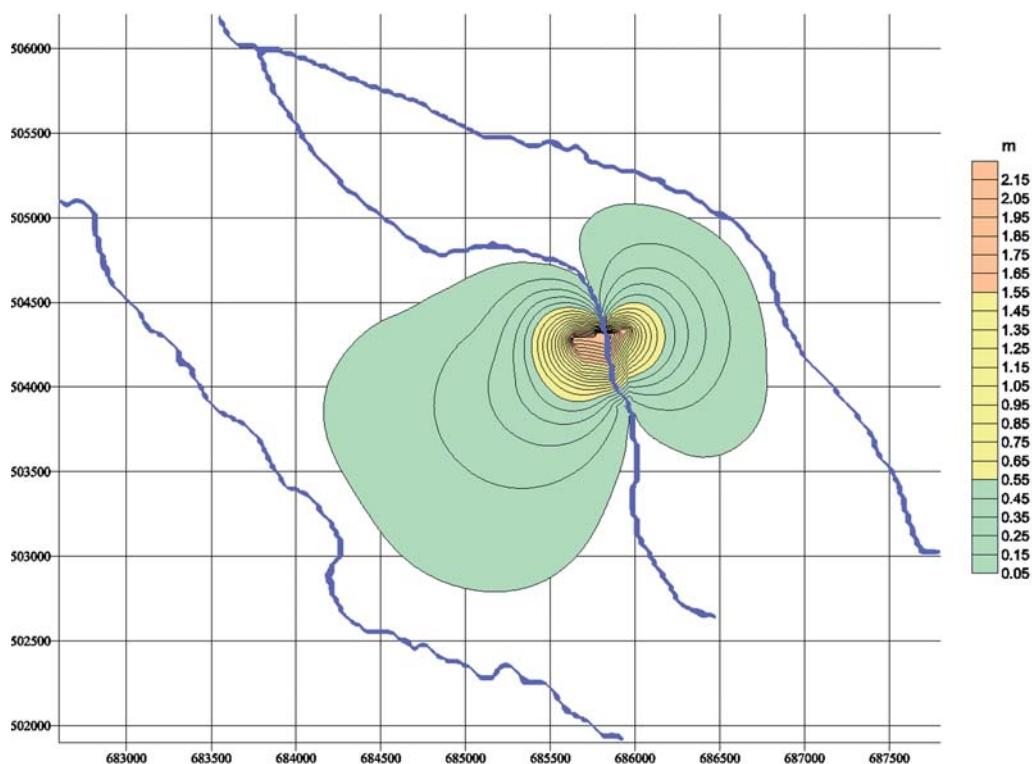


Fig. 14.6. Wznios zwierciadła wód gruntowych w trakcie eksploatacji zbiornika w odniesieniu do stanu naturalnego

przypadku jest to bezpośrednie otoczenie zbiornika retencyjnego. Z tego powodu zdecydowano się na lokalizację większej liczby punktów próbkowania w bezpośrednim otoczeniu zbiornika, zmniejszając jednocześnie gęstość próbkowania wraz z odległością (fig. 14.7).

Próbkowania dokonano warunkiem Dirichleta, zgodnie z metodyką opisaną we wstępie. W celu oszacowania względnego wzrostu zasobów w przestrzeni systemu symulowano obniżenie zwierciadła wód gruntowych o 1,5 m w stosunku do stanu naturalnego. W każdym wariancie modelu obliczenia wykonano w 33 punktach, co wiązało z koniecznością 66-krotnego powtórzenia procedury iteracyjnej. Bilans wodny punktów próbkowania pozwolił na oszacowanie wydatków możliwych do uzyskania przy założonym poziomie zdepresjonowania zwierciadła. Wydatki uzyskane na modelach symulujących warunki naturalne i eksploatację zbiornika posłużyły następnie do oceny względnego wzrostu zasobów w punktach próbkowania. Kolejnym krokiem była interpretacja przestrzennego rozkładu wzrostu zasobów w systemie. Ponieważ punkty próbkowania zostały zorientowane przestrzennie, do interpretacji rozkładu można było zastosować metody interpolacji. W efekcie uzyskano mapę rozkładu względnego wzrostu zasobów w warunkach eksploatacji zbiornika małej retencji. Najwyższy wzrost zasobów (na poziomie przekraczającym 100%) uzyskano w bezpośrednim otoczeniu czaszy zbiornika. Ponieważ model został opracowany dla obszaru międzyrzecza, możliwe było wykazanie wzrostu zasobów także poza granicami zlewni powierzchniowej. Wzrost ten był niewielki i zwykle nie przekraczał 5%.

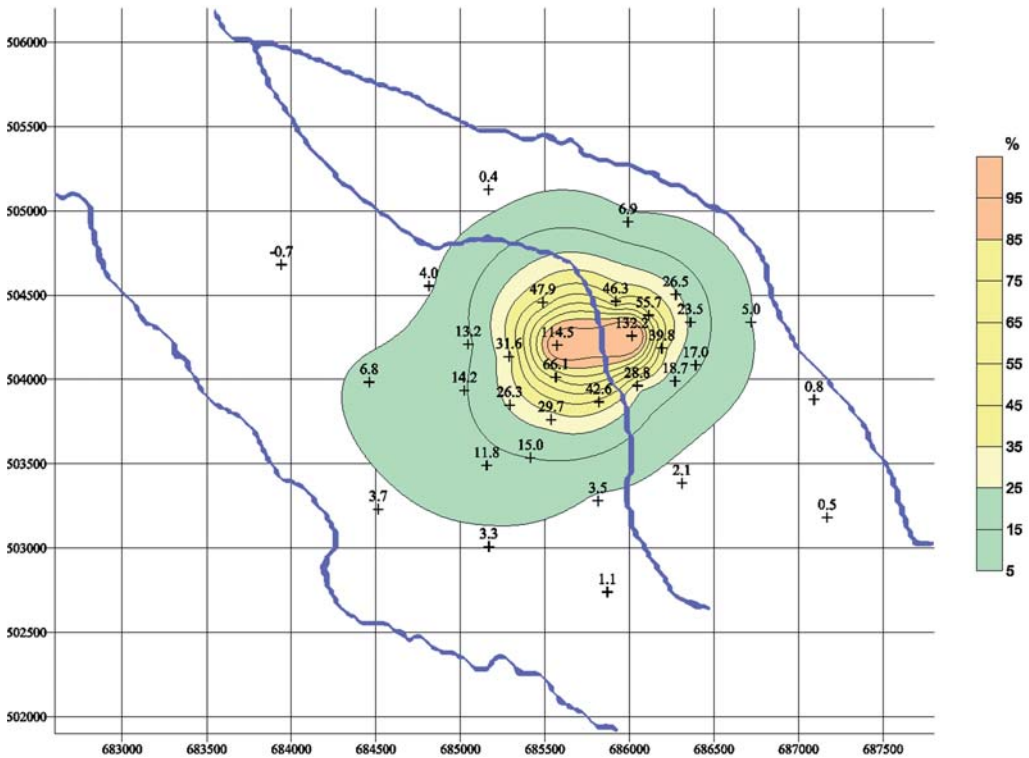


Fig. 14.7. Względny wzrost zasobów wód podziemnych w otoczeniu zbiornika

Na rysunku przedstawiono rozmieszczenie punktów próbkowania wraz z obliczonym w punktach względ-
nym wzrostem zasobów

14.2. Przykład 2

Zmiany zasobów wód podziemnych w warunkach dobrego kontaktu zbiornika z wodami podziemnymi

Przykład ilustruje sytuację, w której zbiornik retencyjny pozostaje w dobrej łączności hydraulicznej z poziomem wodonośnym o wysokiej wodoprzepuszczalności. Obliczenia wykonano w dwóch wariantach. W pierwszym oszacowano względny przyrost zasobów w odniesieniu do strumienia naturalnego (bez dodatkowych wymuszeń). Drugi wariant ilustruje strukturę zmian zasobów poziomu wodonośnego, przy uwzględnieniu aktualnego poboru wód. Wszystkie obliczenia i symulacje wykonano dla warunków filtracji ustalonej.

Wariant I: obliczenia bez uwzględnienia aktualnego poboru wód podziemnych

Wydzielony system wodonośny obejmuje fragment równiny sandrowej ograniczony przez koryta dwóch rzek. Przez centralną część obszaru przepływa rzeka, na której projektowany jest zbiornik małej retencji (fig. 14.8) o wysokości piętrzenia nieprzekraczającej 2 m. Rolę użytkową pełni pierwszy poziom wodonośny związany z osadami wodnolodowcowymi. W litologii war-

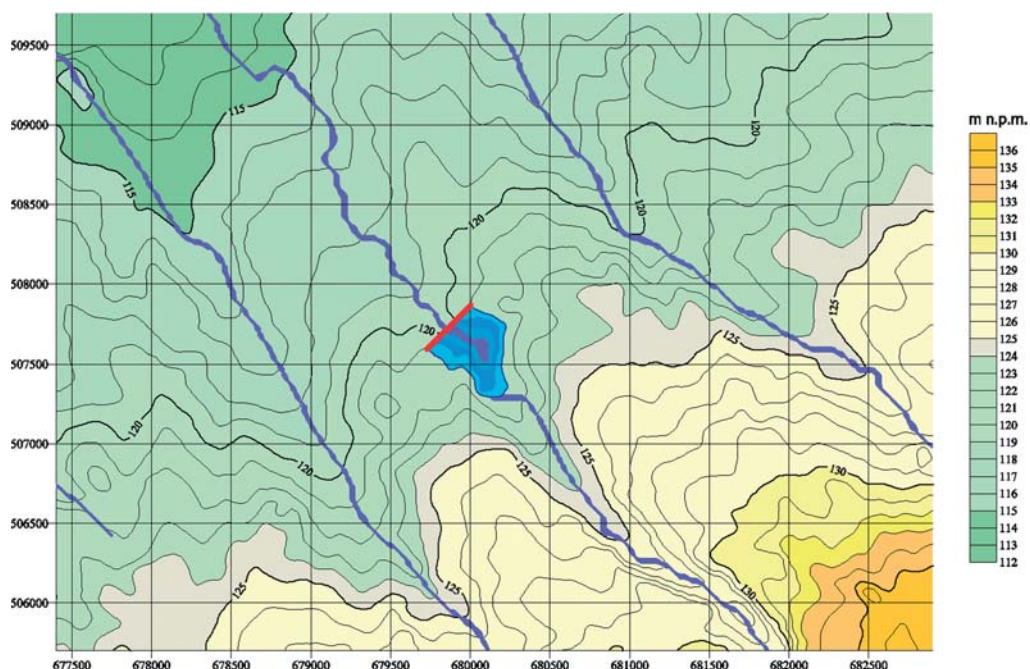


Fig. 14.8. Szkic sytuacyjny otoczenia zbiornika małej retencji

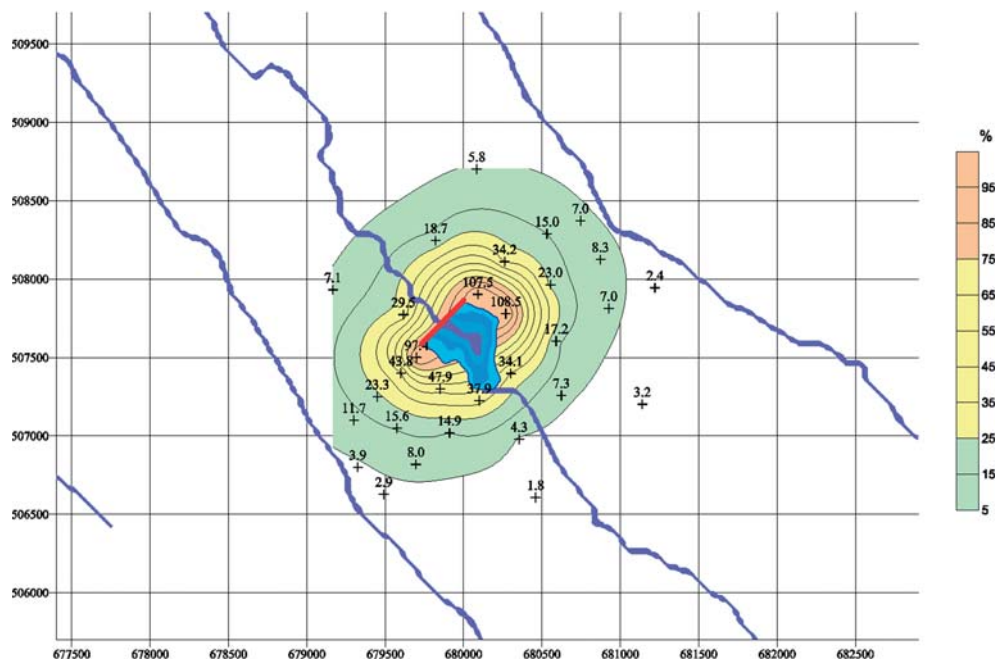
Czerwoną linią przedstawiono projektowany przebieg zapory

stwy dominują piaski i żwiry rzeczne, a jej wodoprzepuszczalność kształtuje się na poziomie 1×10^{-5} m/s. W spągu poziomym wodonośnego występują ily zastoiskowe o miąższości dochodzącej do 40 m, spoczywające na trudno przepuszczalnych seriach osadowych neogenu. System zasilany jest infiltracyjnie oraz dopływem podziemnym od południowego wschodu. Przepływ wód odbywa się generalnie ku północnemu zachodowi. Wydzielony system drenowany jest przez sieć rzeczną oraz na drodze odpływu podziemnego.

Schemat przestrzenny modelu. Dyskretnego odwzorowania przestrzeni w płaszczyźnie poziomej (XY) dokonano za pomocą siatki ortogonalnej, dzielącej obszar na kwadratowe bloki o boku długości 25 m. Następnie odwzorowano zmienną miąższość modelowanej warstwy poprzez uwzględnienie przestrzennego rozkładu rzędnej stropu ilów oraz morfologii terenu. Podstawą do wyznaczenia przebiegu tych powierzchni była siatka interpolacyjna sporządzona metodą krigingu dla powierzchni spągowej oraz numeryczny model powierzchni terenu. Kolejnym krokiem było sprowadzenie modelowanego obszaru do międzyrzecza. Wszystkie bloki siatki spoza tego obszaru wyłączono z obliczeń, traktując je jako bloki nieaktywne. Następnie dokonano dyskretyzacji przestrzeni po osi pionowej. Użytkowy poziom wodonośny odwzorowano za pomocą 3 podwarstw o zróżnicowanej miąższości. Taki schemat dyskretyzacji pozwolił na uwzględnienie w obliczeniach wymiany wody przez dno zbiornika.

Warunek brzegowy II rodzaju ($Q = 0$) przyjęto na powierzchni rozdzielającej bloki aktywne od nieaktywnych oraz dla powierzchni spągu najniższej podwarstwy. Powierzchnia ta reprezentuje strop trudno przepuszczalnych ilów zastoiskowych. Zgodnie z przyjętym modelem

Wyniki obliczeń. Obliczenia bez uwzględnienia aktualnego poboru przeprowadzono w dwóch wariantach. W pierwszym odwzorowano stan systemu przed wybudowaniem zbiornika. Wariant drugi reprezentuje stan systemu po spiętrzeniu wód w zbiorniku małej retencji. Modele pola filtracji w obu wariantach posłużyły następnie do oceny wzrostu zasobów wód podziemnych w otoczeniu zbiornika. W tym celu zastosowano opisaną we wstępie metodę próbkowania.



Na rysunku przedstawiono rozmieszczenie punktów próbkowania wraz z obliczonym w punktach względnym wzrostem zasobów

sce we wcześniejszym przykładzie, także tu największy wzrost zasobów odnotowano w bezpośrednim otoczeniu zbiornika. Mapa wynikowa nie uwzględnia jednak aktualnego poboru wód, dlatego też zdecydowano się na próbę oszacowania przestrzennej zmienności wzrostu zasobów z uwzględnieniem istniejącej eksploatacji poziomu wodonośnego.

Wariant II: zmiany zasobów przy uwzględnieniu aktualnego poboru wód podziemnych

Schemat przestrzenny modelu wykorzystanego do symulacji aktualnego poboru wód podziemnych pozostał zasadniczo niezmieniony w stosunku do wcześniej opisanych wariantów. Jedyna różnica polegała na uwzględnieniu dodatkowych wymuszeń wewnętrznych reprezentujących wydatki eksploatacyjne otworów studziennych. Zastosowano w tym celu warunek II rodzaju. Rozmieszczenie otworów studziennych przedstawia figura 14.10. Łączny wydatek wszystkich studzien wynosił $2155 \text{ m}^3/\text{d}$, co stanowi blisko 60% zasobów odnawialnych wydzielonego systemu ($3820 \text{ m}^3/\text{d}$) w warunkach naturalnych.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano przestrzenne rozkłady wysokości hydraulicznej w warunkach eksploatacji poziomu wodonośnego. Obliczenia pola filtracji wykonano w dwóch wariantach, odnoszących się do stanu przed i po wybudowaniu zbiornika małej retencji. Uzyskane rozkłady wysokości hydraulicznej posłużyły następnie do przestrzennej interpretacji obniżenia zwierciadła w warunkach eksploatacji. W tym celu powierzchnię reprezentującą stan systemu w warunkach naturalnych odjęto od powierzchni obliczonych przy uwzględnieniu eksploatacji poziomu. W efekcie uzyskano mapy obniżenia zwierciadła dla obu wariantów obliczeń (fig. 14.11, 14.12). Jak należało oczekiwać, mapa różnicowa dla wariantu obliczeń bez zbiornika obrazuje wyraźne obniżenie poziomu zwierciadła w całym systemie. Wielkość zmian zależy tu od rozmieszczenia otworów studziennych i ich wydajności. Interesujący obraz zmian uzyskano w wariantcie uwzględniającym spiętrzenie wód powierzchniowych (fig. 14.12). Mimo intensywnej eksploatacji poziomu, w bezpośrednim otoczeniu czaszy zbiornika nastąpiło podniesienie zwierciadła wód gruntowych. Jest to strefa najbardziej perspektywiczna dla spodziewanego wzrostu zasobów dyspozycyjnych. Wzrost ten, podobnie jak we wcześniejszych przykładach, został oszacowany metodą próbkowania. Wyniki odwzorowano graficznie na mapie względnego wzrostu zasobów wód podziemnych (fig. 14.14). Dla porównania na figurze 14.13 przedstawiono obraz uzyskany metodą próbkowania w wariantcie bez zbiornika. Zestawienie

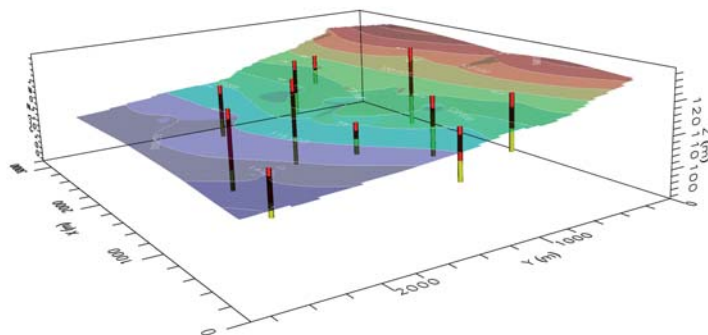


Fig. 14.10. Lokalizacja otworów studziennych na tle obliczonych rzędnych zwierciadła wód gruntowych

Kolorem żółtym oznaczono przedział głębokości zafiltrowania studni

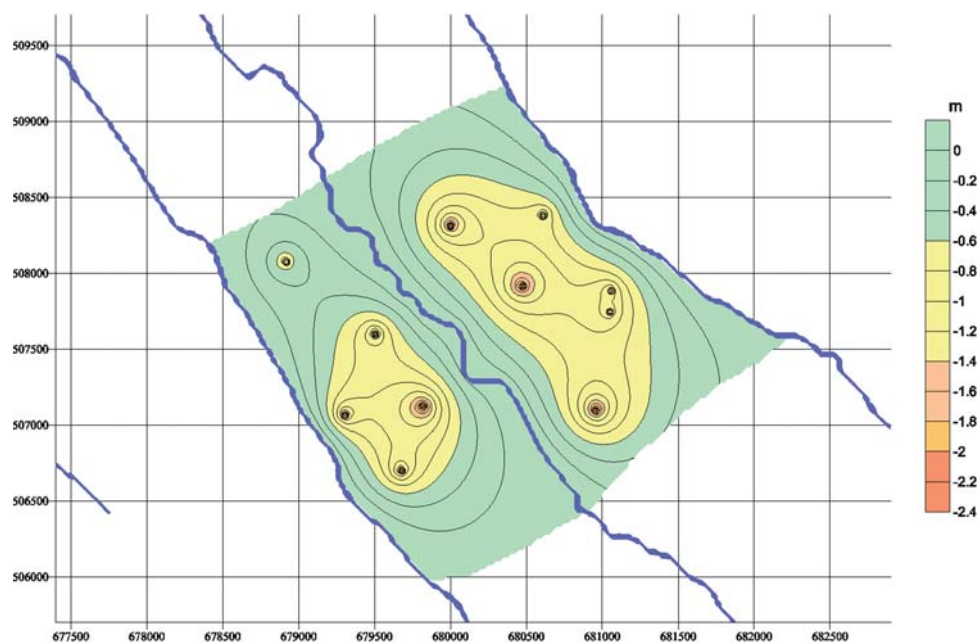


Fig. 14.11. Mapa różnicowa zwierciadła w warunkach eksploatacji poziomej w odniesieniu do stanu naturalnego (wariant bez zbiornika retencyjnego)

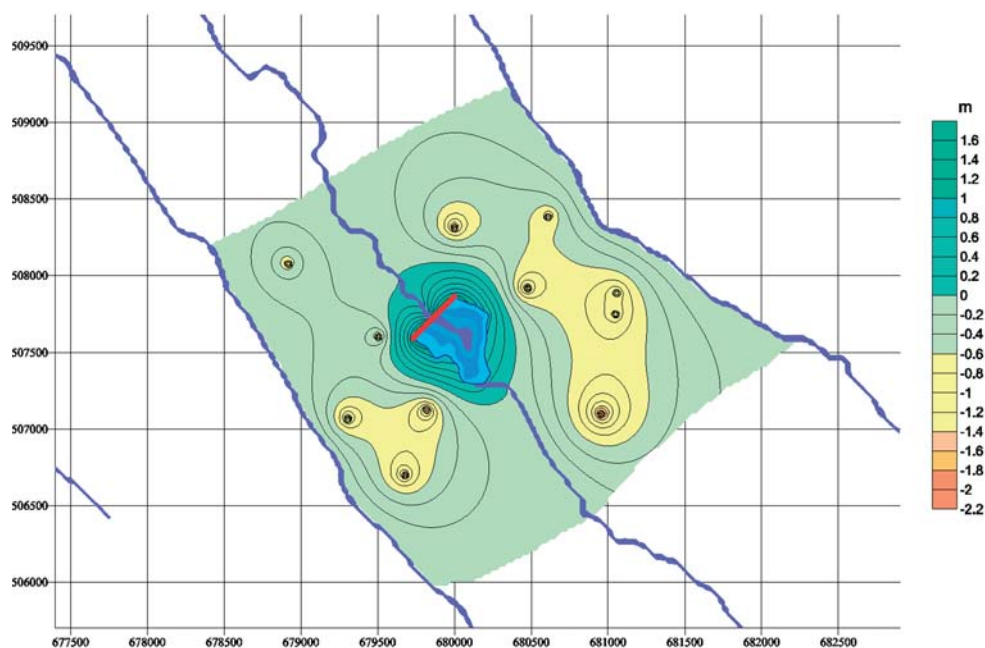


Fig. 14.12. Mapa różnicowa zwierciadła w warunkach eksploatacji poziomej w odniesieniu do stanu naturalnego (wariant ze zbiornikiem retencyjnym)

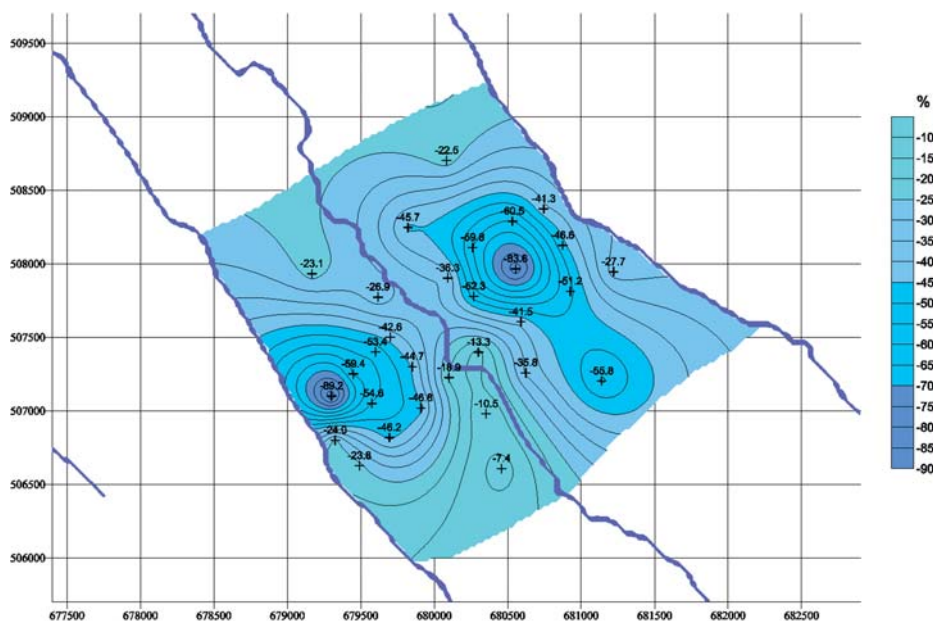


Fig. 14.13. Zmiana zasobów wód podziemnych w warunkach intensywnego poboru wód (wariant bez zbiornika retencyjnego)

Na rysunku przedstawiono rozmieszczenie punktów próbkowania wraz z obliczonym w punktach względnym wzrostem zasobów

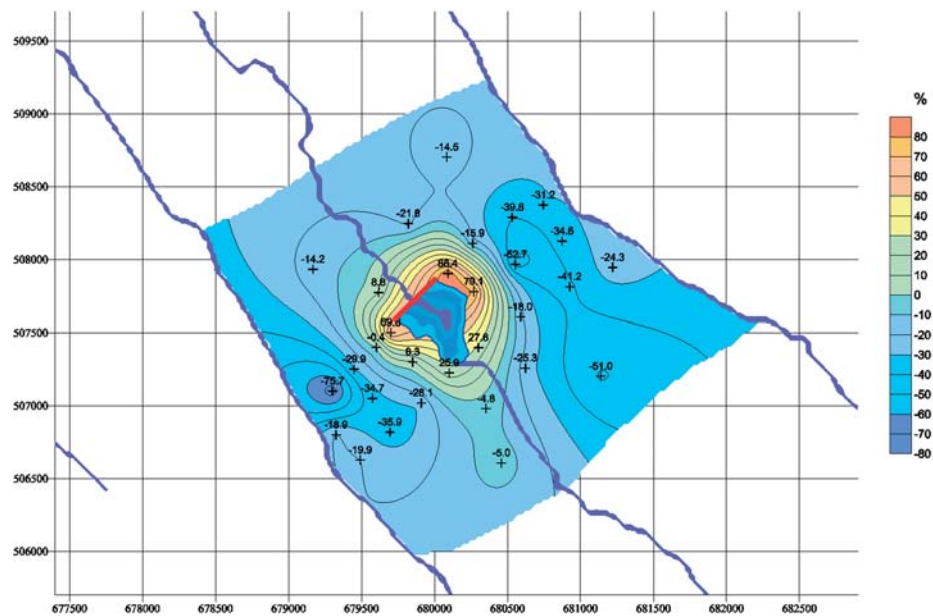


Fig. 14.14. Zmiana zasobów wód podziemnych w warunkach intensywnego poboru wód (wariant ze zbiornikiem retencyjnym)

obu map daje wyobrażenie o roli zbiornika małej retencji w formowaniu zasobów wód podziemnych. Mimo intensywnej eksploatacji poziomu wodonośnego, zasoby możliwe do uzyskania w bezpośrednim otoczeniu zbiornika są wyższe niż w warunkach naturalnych.

14.3. Przykład 3

Zmiany zasobów wód podziemnych w warunkach utrudnionego kontaktu z wodami powierzchniowymi

Przykład ilustruje sytuację, w której użytkowy poziom wodonośny oddzielony jest od zbiornika małej retencji pakietem utworów trudnoprzepuszczalnych o miąższości dochodzącej do 10 m. Celem przeprowadzonych obliczeń było określenie względnego wzrostu zasobów w warunkach utrudnionego kontaktu wód podziemnych z powierzchniowymi. Obliczenia pola filtracji i symulacje przeprowadzono na wielowarstwowym (pseudotrójwymiarowym) modelu numerycznym.

Rozpatrywany system wodonośny zlokalizowany jest w obszarze wysoczyznowym o niejednorodnej budowie, porożcinanym przez doliny rzeczne (fig. 14.15). Występują tu dwa poziomy wodonośne związane z osadami wodnolodowcowymi. Poziomy te rozdzielone są warstwą glin zwałowych o niskiej wodoprzepuszczalności. Poziom przypowierzchniowy (górny) z uwagi na

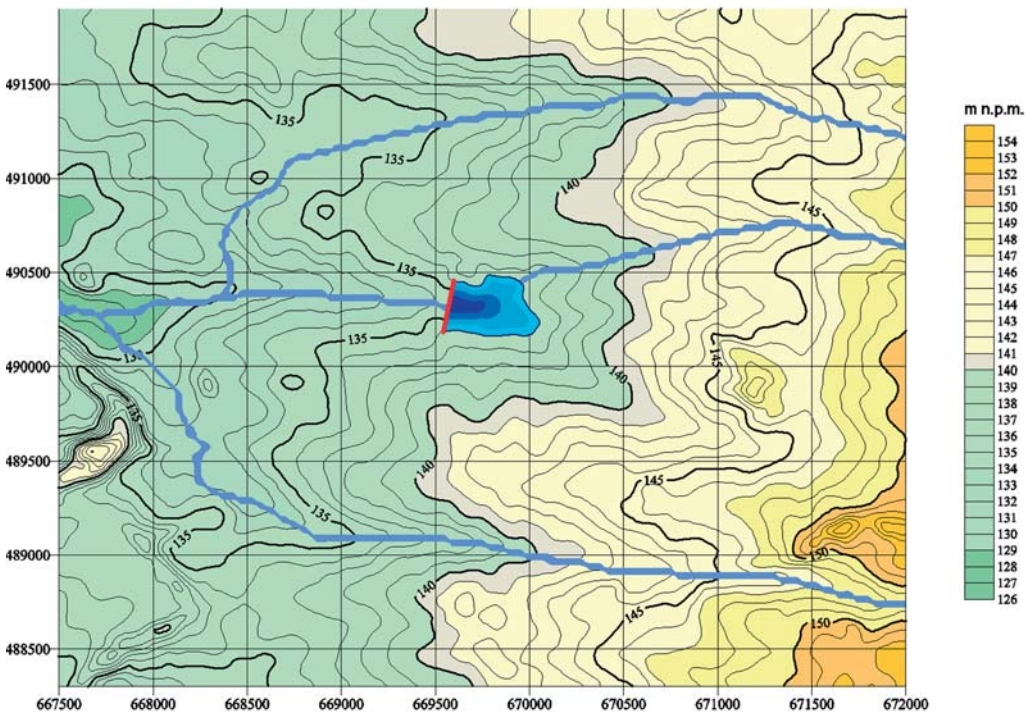


Fig. 14.15. Szkic sytuacyjny otoczenia zbiornika małej retencji

Czerwoną linią zaznaczono lokalizację projektowanej zapory

ograniczoną miąższość i wodoprzepuszczalność na poziomie 1×10^{-5} m/s nie ma znaczenia użytkowego. Zwierciadło ma tu swobodny charakter, a system krążenia nawiązuje do sieci rzecznej. Poziom zasilany jest infiltracyjnie oraz dopływem podziemnym od wschodu. W dolinach rzecznych możliwe jest dodatkowe zasilanie na drodze przesączania wód z dolnego poziomu przez utwory trudno przepuszczalne. Drenaż wody odbywa się głównie za pośrednictwem cieków powierzchniowych, a w strefach płytkiego występowania wód gruntowych także na drodze ewapotranspiracji. Poziom dolny charakteryzuje się wysoką wodoprzewodnością i pełni na rozpatrywanym obszarze rolę głównego poziomu użytkowego. Zasilany jest przede wszystkim dopływem podziemnym od wschodu oraz na drodze przesączania wód z górnego poziomu przez utwory trudno przepuszczalne. Przesączanie w tym kierunku odbywa się na obszarach wysoczyznowych. Zwierciadło wody ma charakter napięty. Drenaż wód odbywa się głównie na drodze odpływu podziemnego przez zachodni brzeg systemu.

Schemat przestrzenny modelu. Przestrzeń systemu wodonośnego zdyskretyzowano siatką o kroku $\Delta x = \Delta y = 25$ m. Wielkość przyjętego kroku odpowiada rozdzielczości numerycznego modelu powierzchni terenu. Dyskretyzacja przestrzeni po osi z wynikała z budowy geologicznej obszaru. Wydzielono tu 3 warstwy odpowiadające poszczególnym typom genetycznym skał (fig. 14.16). Górna i dolna warstwa modelu reprezentują odpowiednio przypowierzchniowy i użytkowy poziom wodonośny. Za pomocą warstwy środkowej odwzorowano poziom rozdzielający. Wielowarstwowa struktura modelu umożliwiła obliczenie wymiany wody między poziomami. Zmienną miąższość poszczególnych warstw określono na drodze interpretacji powierzchni stropu i spągu. Dla pierwszej warstwy zastosowano w tym celu numeryczny model powierzchni terenu oraz powierzchnię spagową wyinterpretowaną metodą krigingu. Metoda ta posłużyła także do interpretacji przebiegu stropu i spągu pozostałych warstw modelu.

Relację systemu z otoczeniem określono za pomocą warunków brzegowych II i III rodzaju. Warunki III rodzaju (typ RIVER) zadano dla cieków powierzchniowych w najwyższej warstwie modelu. Bloki na zewnątrz od linii cieków ograniczających obszar międzyrzecza potraktowano jako nieaktywne. Na wschodnim brzegu zadano warunek III rodzaju typu GHB, co pozwoliło uwzględnić w obliczeniach dopływ podziemny. Dodatkowo zadano wewnętrzne warunki brzegowe III rodzaju. Odwzorowano w ten sposób wymuszenia związane z korytem rzecznym (wa-

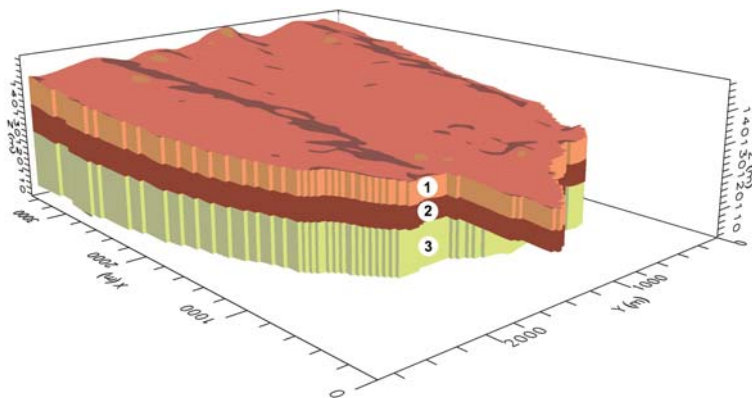


Fig. 14.16. Warstwy modelu numerycznego

1 – poziom górny, 2 – poziom rozdzielający, 3 – poziom użytkowy (dolny)

runek typu RIVER) oraz czasą zbiornika (typ GHB). Na brzegach warstwy drugiej (poziom rozdzielający) zadano warunek zerowego przepływu. Wynikało to z założenia o dominującej roli składowej pionowej ruchu w utworach trudno przepuszczalnych. W trzeciej warstwie modelu, reprezentującej poziom użytkowy, warunki brzegowe III rodzaju pozwoliły na uwzględnienie w obliczeniach dopływu i odpływu podziemnego. Na brzegach północnym i południowym (poniżej linii cieków ograniczających zadano warunki II rodzaju ($Q = 0$)). Podobnie jak we wcześniejszych przykładach, zasilanie infiltracyjne systemu odwzorowano poprzez kombinację warunków II i III rodzaju. Strumień zasilania infiltracyjnego został przypisany wyłącznie do najwyższej warstwy modelu.

Wyniki obliczeń. Podobnie jak we wcześniejszych przykładach obliczenia pola filtracji przeprowadzono w dwóch wariantach. Wariant pierwszy pozwolił na uzyskanie we wszystkich warstwach modelu przestrzennego rozkładu wysokości hydraulicznej w warunkach naturalnych (przed wybudowaniem zbiornika). W wariantcie drugim symulowano stan systemu po spiętrzeniu wód powierzchniowych. Następnie zastosowano metodę próbkowania w sposób analogiczny jak w poprzednich przykładach. Warunek I rodzaju zadawano do pojedynczych bloków w najniższej warstwie modelu. Symulowano w ten sposób obniżenie zwierciadła o 2 m w stosunku do stanu naturalnego. Wydatki możliwe do uzyskania w punktach próbkowania obliczono sporządzając po każdej symulacji bilans wodny systemu. Względny wzrost zasobów wód podziemnych w punktach obliczono na podstawie różnicy wydatków możliwych do uzyskania przed i w trakcie eksploatacji zbiornika małej retencji. Po zorientowaniu punktów próbkowania, dokonano przestrzennej interpretacji wzrostu zasobów wód podziemnych poziomu użytkowego. Rozkład wzrostu uzyskany metodą krigingu przedstawia figura 14.17. Podobnie jak we wcześniejszych przykładach najwyższy wzrost zasobów związany jest z bezpośrednim otoczeniem zbiornika.

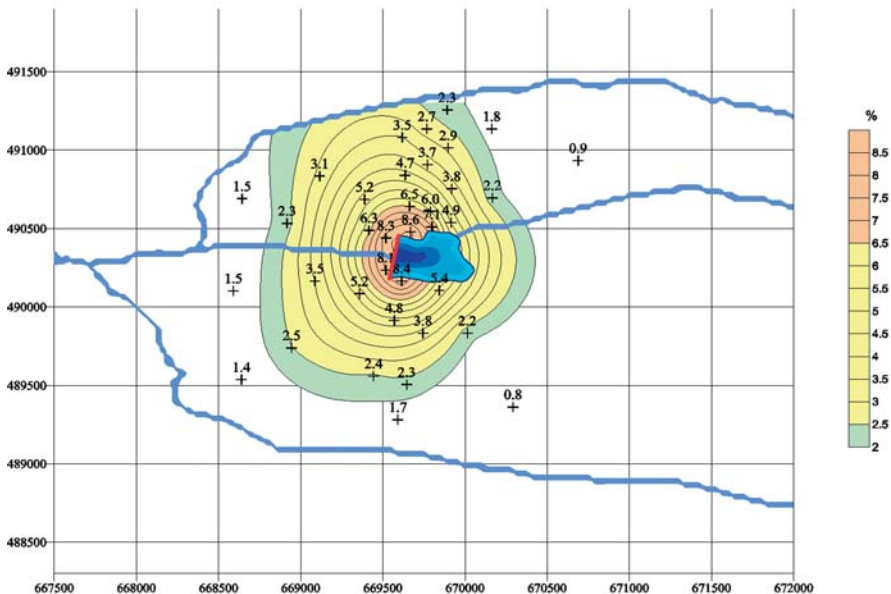


Fig. 14.17. Względny wzrost zasobów wód podziemnych w otoczeniu zbiornika

Na rysunku przedstawiono rozmieszczenie punktów próbkowania wraz z obliczonym w punktach względnym wzrostem zasobów

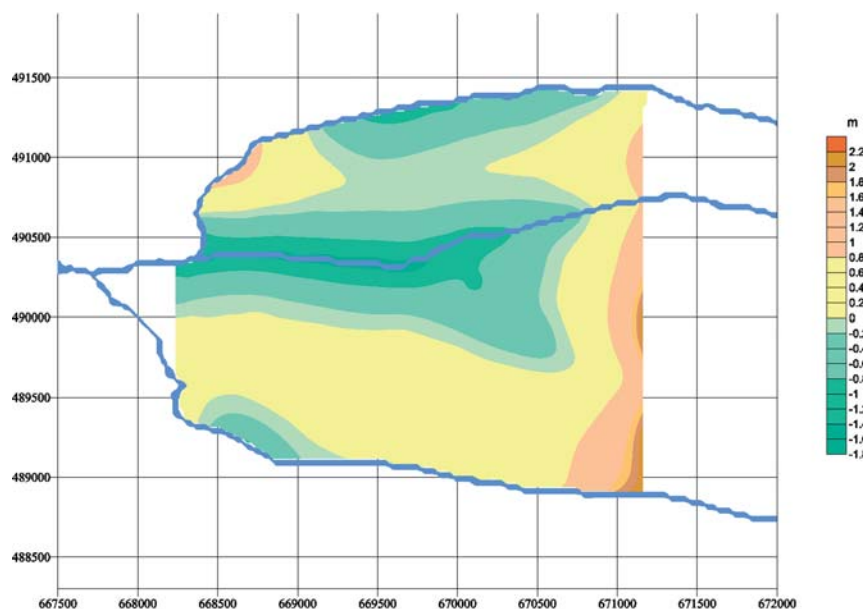


Fig. 14.18. Różnice ciśnień w górnym i dolnym poziomie wodonośnym przed powstaniem małego zbiornika retencji

Wartości dodatnie oznaczają przepływ wód z górnego do dolnego poziomu, wartości ujemne wskazują na kierunek przeciwny

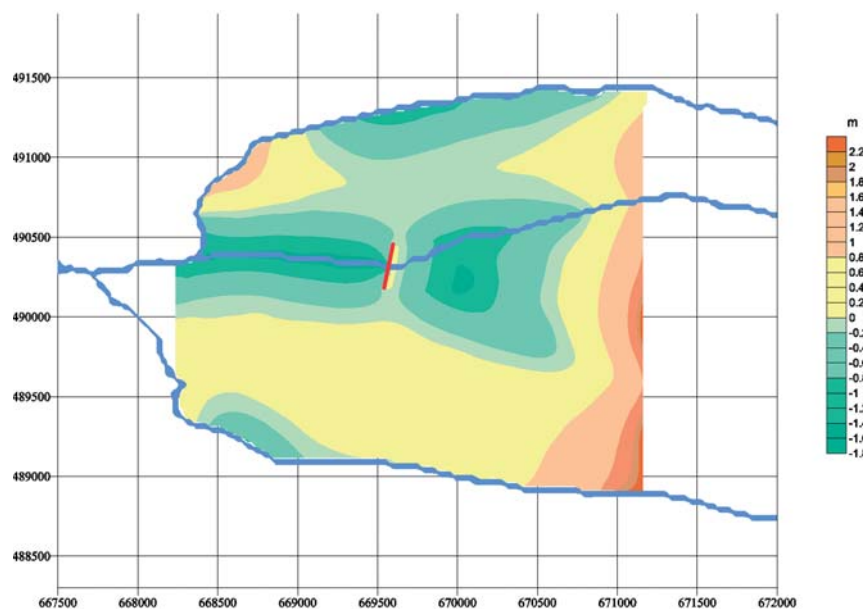


Fig. 14.19. Różnice ciśnień w górnym i dolnym poziomie wodonośnym w trakcie eksploatacji zbiornika małej retencji

Czerwoną linią oznaczono lokalizację zapory, pozostałe oznaczenia jak na fig. 14.18

Zarejestrowany wzrost kształtuje się jednak na zdecydowanie niższym poziomie i nie przekracza 9%. Uwagę zwraca także zdecydowanie słabsza zmiana wzrostu zasobów wraz z odległością od zbiornika.

Wzrost zasobów w poziomie użytkowym wynika ze zmiany struktury zasilania. Doskonale ilustrują to mapy różnicowe wysokości hydraulicznej między poziomami przypowierzchniowym i międzymorenowym (fig. 14.18, 14.19). Obliczony układ ciśnień wskazuje, że doliny rzeczne w warunkach naturalnych stanowią zwykle strefy drenażu także dla dolnego poziomu. Po spiętrzeniu wód w zbiorniku małej retencji lokalnie doszło do zmiany kierunku przesączania wód przez poziom rozdzielający (fig. 14.19).

15. PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ MODELOWYCH

Wyznaczenie wzrostu zasobów wód podziemnych w otoczeniu zbiorników małej retencji ma kluczowe znaczenie dla racjonalnego gospodarowania wodami. Przytoczone powyżej przykłady ilustrują możliwość szacowania wzrostu zasobów z wykorzystaniem numerycznego modelu pola filtracji. Przy szacunkach posługiwano się opracowaną specjalnie w tym celu metodą próbkowania. Główną zaletą metody jest możliwość przestrzennej analizy struktury wzrostu. Pozwala to na wytypowanie w otoczeniu zbiornika obszarów najbardziej perspektywicznych dla wzrostu zasobów wód podziemnych. Z drugiej strony możliwe jest wydzielenie tych części obszaru bilansowego, w których wpływ zbiornika retencyjnego na formowanie zasobów będzie ograniczony.

Pierwszy z przytoczonych przykładów ilustruje konsekwencje przyjęcia za obszar zasobowy zlewni powierzchniowej. Przy tego typu podejściu trudno uniknąć błędów już na etapie szacowania zasobów odnawialnych systemu. Wynika to przede wszystkim z niezgodności morfologicznego działu wód z wododziałem podziemnym (zwłaszcza w głębszych systemach krążenia). Trudno także prawidłowo opisać funkcjonowanie powierzchni brzegowej w numerycznym modelu pola filtracji. W tej sytuacji wydaje się, że optymalnym rozwiązaniem jest przeprowadzenie obliczeń w obszarze międzyrzecza. Warunkiem niezbędnym jest, aby cieki ograniczające charakteryzowały się możliwie najpełniejszą penetracją w stosunku do rozważanego systemu. Ułatwia to sformułowanie zagadnienia brzegowego oraz pozwala na zminimalizowanie błędów związanych z niepełnym zamknięciem systemu. Dodatkową zaletą takiego rozwiązania jest możliwość oszacowania zmian zasobów poza obszarem zlewni. O tym, że takie zmiany są możliwe, świadczą wyniki obliczeń przytoczone w przykładzie pierwszym. Dodatkowo model międzyrzecza w dalszym ciągu daje możliwość prowadzenia obliczeń w odniesieniu do obszaru zasobowego zlewni. W tym celu można wykorzystać możliwość szacowania bilansu wodnego w strefach, jaką daje między innymi program ZoneBudget.

W przykładzie drugim przedstawiono metodykę szacowania wzrostu zasobów w warunkach dobrego kontaktu wód podziemnych z powierzchniowymi. Obliczenia przeprowadzono w dwóch wariantach. Pierwszy opisywał skutki piętrzenia wód powierzchniowych w warunkach braku dodatkowych wymuszeń. Obliczenia wykonane w drugim wariancie uwzględniały intensywną eksploatację systemu wodonośnego za pomocą zespołu studzien. Wyniki eksperymentu numerycznego wskazują, że w takich warunkach strefa spodziewanego wzrostu zasobów (w odniesieniu do stanu naturalnego) ograniczona jest wyłącznie do bezpośredniego otoczenia zbiornika. Na pozostałym obszarze wpływ zbiornika zaznacza się poprzez minimalizację strat zasobów związanych z aktualnym poborem. Przykład ten doskonale ilustruje, jak istotną rolę może pełnić matematyczny model przepływu wód podziemnych. Znajduje on zastosowanie nie tylko przy wyznaczaniu zasobów wód podziemnych, ale może i powinien stanowić podstawę racjonalnego gospodarowania dostępnymi zasobami już w trakcie eksploatacji zbiornika.

Przykład trzeci ilustruje sytuację, w której kontakt wód podziemnych z powierzchniowymi jest utrudniony. W tych warunkach rola zbiornika małej retencji w formowaniu zasobów wód podziemnych jest wyraźnie ograniczona. Wzrost zasobów jest limitowany natężeniem przesączania wód przez warstwy trudno przepuszczalne. Istotną rolę w tym procesie odgrywa przekształcenie układu ciśnień, jako efekt piętrzenia wód. Proces ten prowadzi do zmian natężenia, a lokalnie także kierunku przesączania. Zmiany zasobów w poziomie międzymorenowym zależą od wodoprzepuszczalności poziomu rozdzielającego.

W przytoczonym przykładzie współczynnik filtracji glin zwałowych kształtował się na poziomie 10^{-8} m/s. W tych warunkach maksymalny wzrost zasobów dochodził do 9%. Eksperyment numeryczny polegający na obniżeniu współczynnika filtracji osadów trudno przepuszczalnych o jeden rząd wielkości wykazał, że w tych warunkach wzrost zasobów byłby już tylko śladowy. Jest to doskonała ilustracja tego, jak ważna w opracowaniach zasobowych jest prawidłowa identyfikacja parametrów hydrogeologicznych warstw rozdzielających. W podobnych przypadkach należy także zachować dużą ostrożność przy agregowaniu poziomów wodonośnych.

LITERATURA CYTOWANA I ZALECANA

- ARAVENA R., EVANS M.L. CHERRY J.A., 1993 – Stable isotopes of oxygen and nitrogen in source identification of nitrates from septic system. *Ground Water*, **31**: 180–186.
- ASTON S.R., 1980 – Nutrient and dissolved gases in estuaries. *W: Chemistry and biogeochemistry of estuaries* (E. Olausson, I. Cato, red.): 233–262. Wiley.
- BAJKIEWICZ-GRABOWSKA E., MIKULSKI Z., 1984 – Hydrogram wezbrania, jego podział genetyczny i podstawowe pojęcia. *Prz. Geofiz.*, **3**.
- BAJKIEWICZ-GRABOWSKA E., MIKULSKI Z., 1993 – Hydrologia ogólna. PWN, Warszawa.
- BEAR J., 1972 – Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier, New York.
- BEAR J., ZASLAVSKI D., IRMAY S., 1971 – Physical principles of water percolation and seepage. Unesco.
- BRENDER R.F., 1970 – A programing system for the simulation of cellular space. Doctoral dissertation, University of Michigan, Technical Report nr 25, 160 pp.
- BYCZKOWSKI A., 1972 – Hydrologiczne podstawy projektowania budowli wodno-melioracyjnych. PWRiL, Warszawa.
- CHELMICKI W., WOLSKI W., 1978 – Porównanie i ocena przydatności metod wydzielenia odpływu podziemnego w zlewniach górskich. *Fol. Geogr. Ser: Geogr. Phys.*, **11**.
- DĄBROWSKI S., GÓRSKI J., KAPUŚCIŃSKI J., PRZYBYŁEK J., SZCZEPAŃSKI A., 2005 – Metodyka określania eksploatacyjnych zasobów wód podziemnych. Borgis Wyd. Medyczne, Warszawa.
- DEPCZYŃSKI W., SZAMOWSKI A., 1999 – Budowle i zbiorniki wodne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- DĘBSKI K., 1970 – Hydrologia. Arkady, Warszawa.
- DOMENICO P.A., SZWARTZ F.W., 1998 – Physical and chemical hydrogeology. II wyd. Wiley Inc., New York.
- DOWGIAŁŁO J. i in., 2002 – Słownik hydrogeologiczny. Wyd. II. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- DZIEWOŃSKI Z., 1973 – Rolnicze zbiorniki retencyjne. PWN, Warszawa.
- EMSELLEM Y., 1975 – Budowa modeli matematycznych w hydrogeologii. Zjedn. Przeds. Hydrogeol., PH w Poznaniu, Poznań (tłumaczenie z francuskiego).
- HERBICH P., 1996 – Bilans wodno-gospodarczy wód podziemnych zlewni rzeki Czarnej Staszowskiej i Wschodniej wraz z oceną wpływu użytkowania wód podziemnych na zasoby wód powierzchniowych. Pr. niepubl., wykonana na zamówienie RZGW w Krakowie.
- HERBICH P., 1997 – Określanie wpływu eksploatacji ujęć wód podziemnych na zasoby wód powierzchniowych dla potrzeb bilansów wodno-gospodarczych zlewni. Współczesne problemy hydrogeologii, t. VIII.
- HERBICH P., 2002 – Dokumentowanie i bilansowanie zasobów wód podziemnych w gospodarowaniu wodami. Mat. XIV konf. „Problemy wykorzystania wód w gospodarce komunalnej”: 58–67. PZiTŚ, SUW, Częstochowa.

- HERBICH P., 2005 – Zasoby perspektywiczne wód podziemnych – cel ustalenia i metodyka obliczeń dla zlewniowych systemów wodonośnych. Współczesne problemy hydrogeologii, t. XII.
- HERBICH P., 2007 – Określenie odpływu podziemnego do rzek i wstępne ustalenie zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych w podobszarze bilansowym „D – RADZYMIN”. CAG Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- HERBICH P., TYSZEWSKI S., 1994a – Bilans wodno-gospodarczy i warunki korzystania z wód zlewni Wkry. W: Aktualna problematyka gospodarki wodnej w skali zlewni rzecznej. Wyd. SGGW, Warszawa.
- HERBICH P., TYSZEWSKI S., 1994b – Wybrane problemy bilansu wodno-gospodarczego w świetle doświadczeń pierwszej edycji warunków korzystania z wód zlewni Wkry. Z. Nauk. PWr. **248**, Wrocław.
- IE_PWN, 2008 – Internetowa Encyklopedia Państwowych Wydawnictw Naukowych. PWN, Warszawa, URL: <http://encyklopedia.pwn.pl/>
- JOKIEL P., 1994 – Zasoby, odnawialność i odpływ wód podziemnych strefy aktywnej wymiany w Polsce. *Acta Geogr. Łodz.*: 66–67.
- KASZTELAN D., PRZYBYŁEK J., 2007 – Problematyka i metodyka badań wpływu zbiorników retencyjnych na stany wód podziemnych w ich otoczeniu – na przykładzie zbiornika Jeziorsko. *Nauka, Przyroda, Technologie*, **1**: 1–12.
- KAZIMIERSKI B., MACIOSZCZYK T., MICHALAK J., SIKORSKA M., 1976 – Wstępne badania modelowe dla określenia prognozy wpływu piętrzenia projektowanego zbiornika wodnego Włodawa na tereny przyległe. Raport niepublikowany. Arch. ZPG UW, Warszawa.
- KICIŃSKI T., 1962 – Krzywe opadania i wysychania przepływów. Z. Nauk. SGGW, **5**.
- KICIŃSKI T. (red.), 1988 – Zasilanie dolin rzecznych wodami gruntowymi. Z. Probl. Post. Nauk. Roln. PAN, z. 347. PWN, Warszawa.
- KOSTRZEWA H., 1977 – Weryfikacja kryteriów i wielkości przepływu nienaruszalnego dla rzek Polski. Materiały Badawcze IMGW, Seria Gospodarka Wodna i Ochrona Wód.
- KOWALCZYK A., ŁUKASZEWICZ A., MICHALAK J., 2007 – Problemy metodyczne modelowania przepływu wody podziemnej na przekrojach. Współczesne problemy hydrogeologii, t. 13, cz. 3: 677–686.
- KUCZMENT L.S., 1974 – Matematyczne modelowanie zlewni rzecznych. W: Matematyczne modele zlewni. Ossolineum, Wrocław.
- LEŚNIAK P.M., 2006 – Zastosowanie badań izotopowych w hydrogeologii. W: Podstawy hydrogeologii stosowanej (Macioszczyk red.): 305–332. PWN, Warszawa.
- LUCKNER L., SZESTAKOW W.M., 1975 – Simulation der Geofiltration. Leipzig.
- MACIOSZCZYK A. i in., 2006 – Podstawy hydrogeologii stosowanej. PWN, Warszawa.
- MACIOSZCZYK T., KAZIMIERSKI B., MICHALAK J., 1974 – Wytyczne do programu terenowych hydrogeologicznych prac badawczych dla opracowania prognozy i analizy wpływu spiętrzenia zbiornika Słup. Raport niepublikowany. Arch. ZPG UW, Warszawa.
- MACIOSZCZYK T., KAZIMIERSKI B., SIKORSKA M., MICHALAK J., 1975 – Orientacyjna hydrogeologiczna prognoza modelowa dla projektowanego zbiornika wodnego Ciechocinek. Raport niepublikowany. Arch. ZPG UW, Warszawa.
- MACIOSZCZYK T., SIKORSKA-MAYKOWSKA M., MICHALAK J., BIERNACKA-PIECKO G., 1978 – Modelowa analiza współzależności wód podziemnych i powierzchniowych w eksperymentalnej zlewni Wierciy. Raport niepublikowany. Arch. ZPG UW, Warszawa.
- MACIOSZCZYK T., SZESTAKOW W.M., 1983 – Dynamika wód podziemnych. Wyd. Geol., Warszawa.
- MAŁECKA D., MICHALAK J., MAŁECKI J.J., 2001 – Zasoby dyspozycyjne wód podziemnych zlewni rzeki Krynki. Współczesne problemy hydrogeologii, t. X, cz. 1: 209–218. Oficyna Wyd. SUDETY, Wrocław.

- MICHALAK J., 1975 – Badania modelowe na EMC dla określenia zasobów wód podziemnych w sąsiedztwie zbiornika Przeczyce. *W: Metodyka określania zasobów wód zmagazynowanych w obszarach przylegających bezpośrednio do czaszy zbiorników wodnych. Raport niepublikowany. Arch. ZPG UW, Warszawa.*
- MICHALAK J., 1983 – Pakiet programów ANPLA – przeznaczenie i ogólna organizacja. *Pr. Inst. Biocybernetyki i Inż. Biomedycznej PAN*, 14: 137–144.
- MICHALAK J., 1984 – Wpływ niepełnej przystawalności równania Boussinesqa na dokładność modeli opartych na tym równaniu. *W: Metody badania wód podziemnych, ich użytkowania i ochrony*: 78–87. Warszawa, Tuczno.
- MICHALAK J., 1989 – Odpływ podziemny. *W: Procesy hydrologiczne – fizyczno-geograficzne podstawy modelowania* (U. Soczyńska, red.): 222–256. PWN, Warszawa.
- MICHALAK J., 1997a – Modelowanie procesów hydrogeologicznych w środowisku GIS. *W: Modelowanie matematyczne w hydrogeologii i ochronie środowiska*: 9–15. Częstochowa.
- MICHALAK J., 1997b – Obiektowe modele w hydrogeologii – system ASPAR. Wyd. UW, Warszawa.
- MICHALAK J., 1999 – Symulacyjne badania modelowe dla wyznaczenia zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych czwartorzędowego poziomu międzyglinowego na obszarze podziemnej zlewni rzeki Krynki. Rozdział w pracy zbiorowej. Raport niepublikowany. Arch. ZPG UW, Warszawa.
- MICHALAK J., 2002 – Wyznaczanie zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych oparte na metodyce PDE. *Prz. Geol.*, **50**, 10: 846–851.
- MICHALAK J., 2005 – Zwierciadło wody podziemnej jako metafora ontologiczna. Współczesne problemy hydrogeologii, t. XII: 25–34.
- MICHALAK J., 2006 – Badania modelowe. *W: Dokumentacja zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych części obszaru bilansowego Z8b wraz ze wskazaniem optymalnej lokalizacji i wydajności ujęcia komunalnego dla Warszawy zasilanego wodami z poziomu plejstocénskiego w tym z infiltracji brzegowej* (Bug, Zalew Zegrzyński). Raport niepublikowany. CAG Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- MICHALAK J., 2007 – Wysokorozdzielcze hydrogeologiczne modele przepływu. Współczesne problemy hydrogeologii, t. 13, cz. 3: 707–714.
- MICHALAK J., WIĘCŁAW E., 1985 – Modelowanie procesu podtapiania terenu przez wody podziemne na obszarach dolin rzek nizinnych. *W: Aktualne problemy hydrogeologii*, t. III: 111–118. Kraków.
- MIODUSZEWSKI W., 2006 – Małe zbiorniki wodne. Wyd. IMUZ, Falenty.
- NAWALANY M., 1986 – FLOSA-3D – Introduction to System Analysis of Three-Dimensional Groundwater Flow System. Raport no. OS86-07, Project no. 9800. IAG DGV-TNO, Delft.
- NOWICKI Z. i in., 2006 – Dokumentacja zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych części obszaru bilansowego Z 8b. CAG Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- NOWICKI Z. (red.), 2007 – Wody podziemne miast wojewódzkich Polski. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PACZYŃSKI B., MACIOSZCZYK T., KAZIMIERSKI B., MITRĘGA J., 1996 – Ustalanie dyspozycyjnych zasobów wód podziemnych. Wyd. TRIO, Warszawa.
- PACZYŃSKI B., SADURSKI A. (red.), 2007 – Hydrogeologia regionalna Polski. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PAZDRO Z., KOZERSKI B., 1990 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa.
- PIETRYGOWA Z., 1975 – Odpływ podziemny w ogólnym obiegu wody w Karpatach na przykładzie dorzecza Skawy. *Mat. Badań IMGW*, **5**.
- PLECZYŃSKI J., PRZYBYŁEK J., 1974 – Problematyka dokumentowania zasobów wód podziemnych w dolinach rzecznych. Wyd. Geol., Warszawa.
- REMSON I., HORNBERGER G.M., MOLZ F.I., 1971 – Numerical methods in subsurface hydrology. Wiley-Interscience, New York.

- RZGW, 2005 – Wybrane zagadnienia związane z programowaniem zbiorników małej retencji, wymagające analizy przy opracowywaniu wstępnych koncepcji zbiorników. Kraków.
- SAWICKI J., 1978 – Krzywe zasilania podziemnego rzek i krzywe stanów retencji – konstrukcja i zastosowanie. *Acta Univ. Wratisl.*, **5**.
- SOCZYŃSKA U. (red.), 1997 – Hydrologia dynamiczna. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- SZYMANKO J., 1980 – Koncepcje systemu wodonośnego i metod jego modelowania. Wyd. Geol., Warszawa.
- ŚMIETAŃSKI L., 2005 – Studium zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych zlewni rzeki Łeba w świetle badań modelowych. Rozprawa doktorska. CAG, Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- TOTH J., 1963 – A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *J. Geoph. Res.*, **68**: 4785–4812.
- TUSZKO A., 1967 – Gospodarka wodna. Wyd. Arkady, Warszawa.
- WIECZYSTY A., 1970 – Hydrogeologia inżynierska. PWN, Warszawa.
- WIKIPEDIA, 2008 – Definicje terminów. Internetowa encyklopedia wielu autorów. URL: <http://pl.wikipedia.org/wiki/>
- WITOWSKI K., FILIPKOWSKI A., GROMIEC M.J., 2001 – Obliczanie przepływu nienaruszalnego. Poradnik. IMGW, Warszawa.
- WOJEWODA J., 2008 – Zjawiska i procesy. Materiały do wykładu z sedymentologii. URL: <http://img.ing.uni.wroc.pl/~jurand/zajęcia/sedymentologia>
- WOŁOŻYŃ J., CZAMARA W., ELIASIEWICZ R., KRĘŻEL J., 1994 – Regulacja rzek i potoków. Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- WRZESIŃSKI D., 1998 – Sezonowa struktura odpływu rzecznoego w wybranych zlewniach dorzecza Warty. [Online] <http://main.amu.edu.pl/~darwrze/sezon.html>, Instytut Geografii Fizycznej UAM, Poznań.
- ZEJGLER B.P., 1984 – Teoria modelowania i symulacji. PWN, Warszawa.

PODSTAWOWE TERMINY HYDROLOGICZNE I HYDROTECHNICZNE

Bilans wodny zbiornika – bilans hydrologiczny akwenu wykonywany dla zbiornika w celu sprawdzenia, czy możliwe jest uzyskanie odpowiedniej ilości retencjonowanej wody.

Budowla piętrząca – budowla wodna (najczęściej rzeczna) służąca do spiętrzania wody; budowle piętrzące dzielą się na zapory i jazy.

Ciek (wodny) – wody powierzchniowe znajdujące się w ruchu (rzeki, potoki, strumienie, kanały), płynące (przepływające) korytem stale lub w ciągu dłuższego czasu, w stosunku do wód podziemnych. Ciek może być drenujący, zasilający lub obojętny (neutralny) w stosunku do wód podziemnych.

Cofka – zjawisko podwyższenia lustra wody postępujące w górę biegu cieku wodnego, powstające wskutek podniesienia się stanu wody w zbiorniku jako rezultat spiętrzenia wody przez zaporę wodną.

Czasza zbiornika (wodnego) – przestrzeń, którą wypełnia woda w wyniku podpiętrzenia zaporą wodną. Czasza zbiornika charakteryzuje się parametrami: objętość, powierzchnia (lustra wody), średnia głębokość i głębokość maksymalna (nie musi być równa wysokości piętrzenia). Dno czaszy zbiornika (pierwotnie jest to dno doliny) podczas budowy zapory może być odpowiednio ukształtowane i przygotowane do swojej funkcji.

Jaz – budowla hydrotechniczna wybudowana w poprzek rzeki lub kanału, piętrząca wodę w celu utrzymania stałego poziomu rzeki dla celów żeglugowych lub (w ograniczonym zakresie) zabezpieczenia przed powodzią, zaopatrywania w wodę oraz do celów energetycznych. Na jazach czasami wbudowane są też śluzy i przepławki. Jazy można podzielić na ziemne, ziemno-betonowe, gumowe. Jaz jest rodzajem zapory wodnej.

Jezioro nadpiętrzone – jezioro odpływowe, na którego odpływie znajduje się jaz z zamknięciami, umożliwiające zatrzymanie w jeziorze większej ilości wody (roztopy, deszcze) w celu jej gospodarczego wykorzystania w okresach suszy.

Jezioro zaporowe – sztuczny zbiornik wodny utworzony przez budowlę piętrzącą – zaporę lub jaz.

Kolmatacja – osadzanie cząstek ilastych i koloidalnych na dnie rzek, jezior, stawów oraz na urządzeniach hydrotechnicznych. Proces prowadzi do ograniczania kontaktów wód podziemnych i powierzchniowych. Kolmatacja jest istotnym czynnikiem w oddziaływaniu sztucznych zbiorników wodnych (w tym także małej retencji) na wielkość zasobów wód podziemnych.

Korona zapory (wodnej) – górna powierzchnia ograniczająca bryłę zapory. Jest to najczęściej szeroki poziomy pas o długości równej maksymalnej długości całej zapory.

Model numeryczny – w hydrogeologii pod terminem model numeryczny rozumiemy dwa rodzaje modeli. W pierwszym przypadku jest to model procesu i jego podstawą jest matematycz-

ny opis wyrażony równaniem różniczkowym. W drugim przypadku jest to model konkretnego systemu hydrogeologicznego, zdefiniowanego poprzez określenie granic, struktury przestrzennej, zmiennych przestrzennie parametrów wnętrza i oddziaływań zewnętrznych wyrażonych za pomocą warunków brzegowych.

Naturalny zbiornik wodny – naturalny akwen, na przykład jezioro, staw lub oczko wodne, w którym retencja nie jest zwiększona w wyniku działalności człowieka.

Pojemność zbiornika (wodnego) – objętość wody, jaką może zgromadzić zbiornik przy maksymalnym piętrzeniu. Parametr charakteryzujący geometrię czaszy zbiornika i często stosowany do określenia wielkości zbiornika.

Powierzchnia zbiornika (wodnego) – powierzchnia lustra wody przy maksymalnym piętrzeniu. Parametr charakteryzujący geometrię czaszy zbiornika i często stosowany do określenia wielkości zbiornika.

Próg (wodny) – budowla stale piętrząca wodę w celu podwyższenia dna wyerodowanego koryta, ograniczenia prędkości przepływu wody lub podniesienia poziomu wody w cieku oraz poziomu wód gruntowych na terenach przyległych.

Przelew (spust) – element zapory wodnej lub innego obiektu hydrotechnicznego, którego zadaniem jest odprowadzanie wód wielkich.

Przepławka – element zapory wodnej zachowujący kontinuum rzeki i przez to umożliwiający rybom wędrówkę wzdłuż rzeki.

Rzeka drenująca – rzeka zasilana przez wody podziemne. Nie musi to być sytuacja trwała i często w pewnych okresach rzeka może być drenująca, a w innych infiltrująca. Może wystąpić również taki przypadek, gdy w stosunku do warstwy położonej po jednej stronie rzeki jest ona drenująca, a w stosunku do warstwy po stronie przeciwnej jest infiltrująca.

Rzeka infiltrująca – rzeka zasilająca wody podziemne. Porównaj termin: rzeka drenująca.

Śpiętrzenie wody – podniesienie poziomu wody w zbiorniku, kanale lub rzece wskutek powstania przeszkód w przepływie (np. za pomocą zapory lub jazu); powoduje wzrost energii potencjalnej cieczy; wartość zgromadzonej energii jest proporcjonalna do wysokości spiętrzenia wody i do natężenia przepływu.

Spływ powierzchniowy – część opadu, która spływa po powierzchni terenu i trafia do cieku. Udział spływu powierzchniowego w zasilaniu cieków jest szczególnie duży w czasie intensywnego opadu i na obszarach o złych warunkach infiltracji.

Sztuczny zbiornik wodny – zbiornik wykonany przez człowieka, retencjonujący stale lub okresowo wody powierzchniowe dla różnych potrzeb gospodarczych lub przyrodniczych. Do tej kategorii można zaliczyć także naturalne zbiorniki wodne (stawy, jeziora), gdy zostały podpiętrzone za pomocą budowli piętrzącej.

Upust (wodny) – element zapory wodnej lub innego obiektu hydrotechnicznego, którego zadaniem jest odprowadzanie części wody ze zbiornika i regulowanie poziomu wody umożliwiające eksploatację zbiornika.

Wysokość piętrzenia (wody w zbiorniku) – różnica rzędnych lustra wody przed i po spiętrzeniu w punkcie położonym w korycie cieku na linii przepustu przy maksymalnym wypełnieniu zbiornika. Parametr charakteryzujący geometrię czaszy zbiornika i często stosowany do określenia wielkości zbiornika.

Zapora (wodna) – budowla hydrotechniczna w formie bariery przegradzająca dolinę w celu spiętrzenia wody, zwykle betonowa lub żelbetowa. W przypadku zapór dla zbiorników nizinnych i małych zbiorników jest to najczęściej zapora ziemna (zapora sypana).

Zapora ziemna (grobla) – zapora wodna zbudowana poprzez nasypywanie i zagęszczanie miejscowego mało spoistego materiału sypkiego. Zapora ziemna często ma rdzeń z materiału nieprzepuszczalnego.

Zastawka – małe budowle piętrzące (jazy), stosowane w rowach, małych kanałach, niewielkich ciekach naturalnych i małych zbiornikach. Zastawki umożliwiają regulowanie poziomu wody.

Zbiornik (wodny) kopany – zbiornik powstały w wyniku wykonania wykopu w naturalnym podłożu i wypełnieniu go wodą. Nie występuje tu zalanie powierzchni terenu. Do tego typu zbiorników zalicza się także poszerzone istniejące koryta rzek.

Zbiornik (wodny) na cieku (liniowy) – zbiornik powstały w wyniku podpiętrzenia wody w cieku na skutek przegrodzenia koryta budowlą piętrzącą, gdy podpiętrzona woda nie powoduje zalania terenów przyległych – woda nie występuje z brzegów.

Zbiornik wodny – zagłębienie terenu wypełnione wodą stojącą (w przeciwieństwie do rzek – wód płynących). Wyróżnia się zbiorniki wodne naturalne: jeziora, stawy itp. oraz sztuczne zbiorniki wodne – jeziora zaporowe, zbiorniki powyrobiskowe, zbiorniki elektrowni szczytowo-pompowych i inne.

Zbiornik zaporowy – zbiornik powstały w wyniku przegrodzenia koryta i doliny cieku budowlą piętrzącą, zazwyczaj groblą ziemną z budowlą upustową. Po wykonaniu budowli następuje podpiętrzenie wody i zalanie części doliny. Do tego typu zbiorników zalicza się także podpiętrzone stawy i jeziora, gdy wykonana jest zapora ziemna.

Zlewnia podziemna – obszar, z którego wody podziemne odpływają do tego samego systemu drenażowego. W przeciwieństwie do zlewni hydrologicznej (powierzchniowej), zlewnia podziemna może okresowo zmieniać swoje granice, swój obszarowy zasięg, a dla niewielkich cieków w pewnych przypadkach nawet całkowicie zanikać. Warunkiem koniecznym istnienia zlewni podziemnej jest drenujący charakter cieku.

DODATEK

Model pojęciowy oddziaływania wód powierzchniowych na wody podziemne

A. Formalizm modelu pojęciowego opisującego zjawiska związane z przepływem wody podziemnej i oddziaływaniem czynników zewnętrznych

Przedstawiony tu schematycznie podstawowy model pojęciowy dotyczący zagadnień brzegowych jest jedynie zarysem zagadnień należących do tej problematyki, jednak zarysem określonym dostatecznie jednoznacznie i kompletnie dla potrzeb zagadnień będących przedmiotem tego opracowania. Stopień abstrakcji przedstawionego tu modelu pojęciowego może się wydawać zbyt wysoki, jednak model ten dotyczy podstaw metodycznych proponowanych tu rozwiązań praktycznych i z tego względu jest warunkiem koniecznym pełnego zrozumienia propozycji metodycznych przedstawionych w tym opracowaniu.

Przepływ wody podziemnej jest złożonym procesem wymuszonym przez wiele różnych czynników zewnętrznych, często znacząco zmieniających się w czasie. Z tego powodu do opisu zjawisk i procesów składowych przepływu wody podziemnej wykorzystywany jest aparat pojęciowy i matematyczny stosowany w teorii pól fizycznych, uzupełniony pojęciami i zależnościami z zakresu dynamiki wód podziemnych, traktowanej jako dział hydrogeologii (Bear, 1972). W niektórych zagadnieniach znalazł zastosowanie aparat pojęciowy teorii sterowania, a ściślej – wchodzącej w jej skład teorii systemów dynamicznych (Szymanko, 1980, Zeigler, 1984). Spośród wielu teorii wchodzących w skład analizy systemowej najbardziej użyteczna jest tak zwana *teoria przestrzeni komórkowej* zaproponowana przez Van Neumana (Brender, 1970). Elementy tej teorii wykorzystywane są w opisie i analizie struktury przestrzennej i funkcjonalnej numerycznych modeli komórkowych – nazywanych także siatkowymi lub blokowymi, do których można sprowadzić różnicowe aproksymacje równań różniczkowych cząstkowych, opisujących przepływ wody podziemnej jako ruch w polu potencjałów hydrodynamicznych.

B. Matematyczny opis przepływu wody podziemnej jako zagadnienie brzegowe

Podstawowe równania opisujące przepływ wody podziemnej w ośrodku porowatym lub drobnoszczelinowym, należące do kategorii równań różniczkowych cząstkowych stopnia drugiego, stanowią jedynie część modelu pojęciowego dotyczącego zjawisk i procesów związanych z przepływem wody podziemnej. Podstawę tego modelu stanowią pojęcia:

- **Wnętrze** – fizyczna przestrzeń filtracji, trój-, dwu- lub jednowymiarowa, stanowiąca nieskończony zbiór punktów, które sąsiadując ze sobą leżą od siebie nieskończenie blisko. Wnętrze jest w tym przypadku wyodrębnionym fragmentem rzeczywistości. Wspomniane powyżej równania różniczkowe określają jedynie, jakie elementy modelu pojęciowe-

go są w tych punktach (i punktach sąsiadujących nieskończenie blisko) brane pod uwagę i jakie są między tymi elementami rodzaje powiązań.

- **Brzeg** (przestrzeni filtracji) – granica zamykająca w sposób całkowity przestrzeń filtracji. Jej wymiarowość przestrzenna jest o jeden stopień niższa niż wymiarowość przestrzeni. Dla przestrzeni 3D jest to powierzchnia (2D), dla przestrzeni 2D (powierzchni) jest to linia (krzywa) zamknięta (1D), a dla przestrzeni jednowymiarowej (1D, linii) granicę stanowią dwa punkty (0D). Brzeg przestrzeni filtracji nie należy do przestrzeni filtracji, a ściślej – punkty stanowiące zbiór brzegu są jedynie topologicznym otoczeniem punktów stanowiących zbiór stanowiący przestrzeń filtracji, są jedynymi ich sąsiadami. Z tego względu równania różniczkowe nie odnoszą się do punktów należących do brzegu.
- **Otoczenie** – przestrzeń o takiej samej wymiarowości jak fizyczna przestrzeń filtracji leżąca po przeciwnej stronie granicy, najczęściej na zewnątrz w stosunku do przestrzeni filtracji. Otoczenie może być także „wyspą” wewnątrz przestrzeni filtracji i w takim przypadku jest ono oddzielone od niej brzegiem wewnętrznym. Jest to jednak zagadnienie czysto topologiczne i mamy tu przynajmniej dwa otoczenia składowe (oddzielne podzbiory), stanowiące łącznie otoczenie całkowite (sumę tych podzbiorów). Zasada ta przenosi się w konsekwencji na podzbiory brzegów wewnętrznych i ich sumę – brzeg całkowity. Analogicznie do relacji „brzeg–wnętrze”, punkty należące do brzegu nie należą do otoczenia.
- **Warunki brzegowe** – atrybuty przypisane punktom należącym do zbioru określającego brzeg. Tymi atrybutami mogą być wielkości fizyczne lub współczynniki określające powiązania pomiędzy wielkościami fizycznymi. Mogą one być stałe lub zmienne w czasie. Warunek brzegowy określa oddziaływanie otoczenia, czyli tego wszystkiego co jest na zewnątrz, na wewnątrz – czyli na charakter i skalę zjawisk i procesów zachodzących w analizowanej przestrzeni ograniczonej przez brzeg.
- **Funkcja stanu wnętrza** – kompletny opis relacji pomiędzy elementami modelu pojęciowego dotyczący tego, co dzieje się w dowolnie wybranym punkcie należącym do wnętrza pod wpływem warunków brzegowych. Do elementów tych zalicza się wielkości fizyczne charakteryzujące opisywane zjawiska i procesy, na przykład zmienną podstawową charakteryzującą pole fizyczne, parametry przestrzeni fizycznej i parametry stanowiące fizyczne ograniczenia rozpatrywanego procesu. Najczęściej funkcja ta ma postać uwikłaną (nie można jej wyrazić formułą $x = f(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$) i w większości przypadków jest to równanie różniczkowe o pochodnych cząstkowych, a jego typ zależy od fizycznej natury rozpatrywanych zjawisk i procesów.
- **Parametry wnętrza** – atrybuty przypisane punktom należącym do zbioru stanowiącego wewnątrz i określające właściwości przestrzeni stanowiącej wewnątrz. Właściwości te decydują o sposobie reagowania wnętrza na czynniki zewnętrzne docierające z otoczenia i wyrażone w postaci warunków brzegowych. Sens fizyczny tych atrybutów zależy od natury fizycznej opisywanego procesu wyrażonej przy pomocy funkcji stanu.

Powiązanie podstawowych elementów opisywanego tu modelu pojęciowego przedstawia schematycznie figura B.1.

Relacje pomiędzy przedstawionymi powyżej podstawowymi elementami tego modelu są następujące:

- to, co się dzieje we wnętrzu, zależy wyłącznie od czynników zewnętrznych leżących wyłącznie w otoczeniu i określonych przez warunki brzegowe;

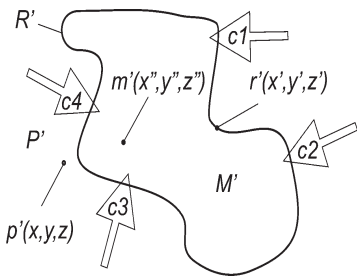


Fig. B.1. Schematyczne powiązanie elementów podstawowego modelu pojęciowego dotyczącego zagadnienia brzegowego

R' – brzeg systemu – zbiór punktów brzegowych $r'(x', y', z')$,
 M' – wnętrze systemu – zbiór punktów wnętrza $m'(x'', y'', z'')$,
 P' – otoczenie systemu – zbiór punktów należących do otoczenia $p'(x, y, z)$, $c1, c2, c3, c4$ – oddziaływania otoczenia na wnętrze systemu

- sposób, w jaki wnętrze reaguje na te czynniki zewnętrzne, zależy od funkcji stanu wnętrza, czyli równania fizyki matematycznej opisującego analizowane procesy, i od właściwości wnętrza określonych parametrami fizycznymi zmiennymi przestrzennie, także często zależnych od czasu i wyrażonych w postaci funkcji typu: $f(x)$, $f(x, t)$, $f(x, y)$, $f(x, y, t)$, $f(x, y, z)$ lub $f(x, y, z, t)$;
- stan wnętrza nie ma wpływu na to, co się dzieje na granicy i w otoczeniu, a w konsekwencji na czynniki zewnętrzne i warunki brzegowe wyrażające te czynniki;
- w typowych zagadnieniach brzegowych zakłada się niezmienność położenia granicy pomiędzy wnętrzem i otoczeniem. Przypadki, w których ta granica może zmienić położenie pod wpływem zmian zachodzących we wnętrzu, należą do przypadków szczególnych;
- również właściwości wnętrza wyrażone parametrami fizycznymi w typowych przypadkach nie zależą od stanu wnętrza.

C. Przyrodniczy sens pojęć brzeg i warunek brzegowy

W sensie fizyki matematycznej brzeg pełni rolę granicy pomiędzy analizowanym układem o parametrach przestrzennie rozłożonych z jego otoczeniem. W takim przypadku warunki brzegowe określają wpływ otoczenia na analizowany układ. Przekładając te określenia na grunt przyrody, a w tym przypadku hydrogeologii i hydrologii, brzeg to granica systemu hydrogeologicznego tak zdefiniowanego i tak ograniczonego, że to, co dzieje się w jego wnętrzu, nie ma wpływu na jego otoczenie.

Pojęcie *warunek brzegowy* przeniesione z fizyki teoretycznej do przyrodniczej (w tym przypadku hydrogeologicznej) w rzeczywistości nastrocza wiele problemów. Warunek brzegowy to formalizm matematyczny sprowadzający się do trzech czysto matematycznych kategorii:

1. W punkcie należącym do brzegu znana jest wartość podstawowej zmiennej niewiadomej (w hydrogeologii jest to potencjał hydrodynamiczny lub jego wysokość wyrażona w metrach słupa wody). Warunek taki określany jest jako warunek I rodzaju (warunek Dirichleta).
2. W punkcie należącym do brzegu znana jest pierwsza przestrzenna pochodna podstawowej zmiennej niewiadomej w kierunku prostopadłym do granicy w tym punkcie (w hydrogeologii jest to prędkość filtracji, jednak najczęściej wyrażana w formie natężenia przepływu lub wydajności mierzonej w metrach sześciennych na jednostkę czasu, na przykład m^3/d). Warunek taki określany jest jako warunek II rodzaju (warunek Neumanna).

3. Warunek brzegowy III rodzaju (nazywany także warunkiem Cauchy'ego) jest w przyjętym tu modelu pojęciowym szczególnym wyjątkiem, ponieważ specyfikacja dopuszcza dowolne wartości zarówno podstawowej zmiennej niewiadomej, jak i jej pierwszej pochodnej dla kierunku

ku prostopadłego do brzegu. Tak duża swoboda w tym zakresie przekłada się na relatywne rozumienie niezmienności granicy pod wpływem zmian stanu wewnątrz analizowanej przestrzeni. Wynikająca z tego warunku ścisła zależność pomiędzy podstawową niewiadomą a jej pierwszą pochodną wyrażoną równaniem liniowym sugeruje, że gdzieś w jakimś punkcie należącym do otoczenia, czyli położonym na zewnątrz brzegu rozpatrywanej przestrzeni, jest spełniony warunek I lub II rodzaju. Warunek ten robi wyraźny wyłom w formalnej logice przyjętego tu modelu pojęciowego w zakresie zagadnień brzegowych, ale jest to niezbędny krok dla umożliwienia stosowania tego modelu w rzeczywistych zagadnieniach przyrodniczych, w tym także w analizie przepływu wód podziemnych.

D. Relacje pomiędzy różnymi typami warunków brzegowych

Z przedstawionego powyżej opisu wynika, że warunek brzegowy III rodzaju jest liniową kombinacją warunku I i II rodzaju:

$$w_{b3} = \{a, b\} \text{ gdzie: } w_{b2} = a + b w_{b1}$$

Warunek brzegowy III rodzaju (w_{b3}) jest specyfikowany za pomocą pary współczynników $\{a, b\}$ równania liniowego wiążącego wzajemnie warunek I i II rodzaju (w_{b1} i w_{b2}). Przenosząc powyższą specyfikację matematyczną warunku III rodzaju na pojęcia z zakresu dynamiki wód podziemnych, jako równanie liniowe można przyjąć równanie Darcy w formie opisującej natężenie poziomego strumienia w warstwie wodonośnej:

$$Q_B = (T s / l) (H_3 - H_B) \text{ i w konsekwencji: } Q_B = (T s / l) H_3 - (T s / l) H_B$$

gdzie:

- Q_B – wielkość strumienia na brzegu [m^3/d],
- H_B – wysokość potencjału hydraulicznego na brzegu [m],
- H_3 – wysokość potencjału hydraulicznego w punkcie odniesienia [m],
- T – przewodność warstwy [m^2/d],
- s – szerokość strumienia [m],
- l – odległość punktu odniesienia od brzegu [m].

Przy takich założeniach równanie liniowe dla tego warunku ma postać:

$$H_B = H_3 - (l/sT) Q_B$$

gdzie:

- $H_3 = a$ – pierwszy współczynnik warunku III rodzaju,
- $l/sT = b$ – drugi współczynnik warunku III rodzaju.

Szczególna pozycja warunku III rodzaju przejawia się między innymi w tym, że warunki I i II rodzaju są jego szczególnymi przypadkami:

- gdy współczynnik b dąży do zera, warunek III rodzaju staje się warunkiem I rodzaju;
- gdy oba współczynniki dążą do nieskończoności, warunek ten staje się warunkiem II rodzaju;
- gdy jedynie współczynnik b dąży do nieskończoności, to pojawia się warunek granicy szczelnej – szczególnie przypadek warunku II rodzaju, gdy $Q_B = 0$.

W zagadnieniach przyrodniczych, w tym także z zakresu przepływu wody podziemnej, zastosowania warunku III rodzaju są bardzo szerokie – niemalże w każdym przypadku użycie tego warunku jest formalnie poprawne i merytorycznie uzasadnione. Warunki I i II rodzaju, jako abstrakcyjny formalizm matematyczny, w sytuacjach rzeczywistych w czystej postaci prawie nigdy nie występują, bo najczęściej w odpowiadającym im przypadkach przyrodniczych mamy do czynienia z warunkiem III rodzaju, bardzo zbliżonym do któregoś z pozostałych warunków. Jednak dla uproszczenia schematu przyjmowanie w takich przypadkach warunku I lub II rodzaju jest metodycznie jak najbardziej poprawne – jednak z zastrzeżeniem, że jest to przybliżenie sytuacji rzeczywistej, obarczone pewnymi niewielkimi błędami.

E. Zmienność stanu w czasie i pojęcie „warunek początkowy”

W zdecydowanej większości przypadków, gdy analizujemy wpływ sztucznego zbiornika, także małej retencji, na warunki hydrogeologiczne, czynnik czasu może być pominięty. Wpływ ten w funkcji czasu dzieli się na trzy fazy:

1. Stan poprzedzający wybudowanie zbiornika, który można nazwać stanem naturalnym. W tej fazie występują naturalne sezonowe lub pogodowe oscylacje oddziaływania cieków i czynników atmosferycznych na wody podziemne. Jednak wywołane tymi oscylacjami zmiany stanów wód podziemnych nie można uznać za zmiany warunków hydrogeologicznych – ta zmienność jest jedynie ich cechą. W skali dłuższego okresu czasu przyjmuje się, że w fazie tej panuje stan ustalony i jego matematyczny opis pomija zmienną niezależną czasu.

2. Stan przejścia od stanu naturalnego (początkowego) do stanu wynikowego – stanu pełnego ustabilizowanego oddziaływania zbiornika. W tej fazie, której początkiem jest rozpoczęcie wypełniania zbiornika, a końcem – ustabilizowanie się jego wpływu na wody podziemne, mamy do czynienia z warunkami nieustalonymi, czyli zmiennymi w czasie. Matematyczny opis zmian zachodzących w tej fazie wymaga uwzględnienia zmiennej niezależnej czasu i w konsekwencji zastosowania równań zawierających człon pojemnościowy z pochodną po czasie. Jednak analiza tych zmian nie zawsze jest potrzebna, a praktyka wykazuje, że najczęściej nie jest. Wynika to z faktu, że zmiany te mają charakter łagodnego przejścia z jednej skrajnej sytuacji ustalonej do drugiej skrajnej sytuacji ustalonej i dla potrzeb praktyki wystarczy analiza i porównanie tych dwóch sytuacji skrajnych. Jedynym przypadkiem, w którym analiza stanu nieustalonego jest niezbędna, jest przypadek, gdy trzeba określić po jakim czasie nastąpi pełna stabilizacja warunków hydrogeologicznych po spiętrzeniu wody w zbiorniku.

3. Stan wynikowy – to stan ustalony, który wytworzy się po pewnym czasie od pełnego podpiętrzenia wody w zbiorniku. W tym przypadku również mamy do czynienia z sezonowymi i pogodowymi oscylacjami oddziaływania czynników atmosferycznych, ale dochodzą do tego jeszcze oscylacje oddziaływania pracy zbiornika – zmiany poziomu wody w zbiorniku, których rytm czasowy jest bardzo zbliżony do oscylacji o charakterze naturalnym i z tego względu ten czynnik także najczęściej może być pomijany w analizie warunków hydrogeologicznych.

Analiza zmienności w czasie, wymagająca uwzględnienia zmiennej niezależnej czasu i członu pojemnościowego równania filtracji zawierającego pochodną po czasie, wymaga dodatkowo określenia warunku początkowego. Jego sens jest nieco zbliżony do warunku brzegowego – wyraża oddziaływanie na stan panujący we wnętrzu, jednak nie czynników zewnętrznych, lecz sytuacji panującej we wnętrzu w okresie poprzedzającym. Można powiedzieć, że jest to oddziaływanie przeszłości na okres rozpatrywany – względnie aktualny.

F. Równania opisujące przepływ wody podziemnej

W ośrodku porowatym lub drobnoszczelinowym, z jakimi mamy najczęściej do czynienia, ruch wody traktowany jest jako ruch potencjalny, to znaczy odbywa się jedynie przy występowaniu w wodzie różnicy potencjałów i przepływ jest skierowany w stronę potencjału niższego. Pojęcie ruchu potencjalnego wywodzi się z termodynamiki procesów nieodwracalnych, a potencjał wody podziemnej wyprowadza się z pojęcia energii potencjalnej zawartej w jednostce objętości w istniejącym w ośrodku porowatym lub szczelinowym polu sił i definiuje się następująco:

$$\Psi = \int -F_f dn''$$

gdzie:

Ψ – potencjał wody podziemnej w polu sił f [L^2T^{-2}],

F_f – siła wypadkowa (wektor) w polu sił f działający na jednostkę objętości [LT^{-2}],

dn'' – przemieszczenie w polu sił f względem układu odniesienia [L].

W zagadnieniach praktycznych wygodniej jest posługiwać się miarą potencjału wyrażoną wysokością słupa wody. Taką możliwość daje pojęcie wysokości, definiowane jako

$$\Phi = \frac{1}{g} \Psi$$

gdzie:

Φ – wysokość potencjału wody podziemnej [L],

g – przyspieszenie ziemskie [LT^{-2}].

Na wielkość potencjału wody podziemnej wpływają różne czynniki i z tego względu wydziela się różne jego składowe: pole grawitacyjne tworzące potencjał grawitacyjny – ψ_g , ciśnienie hydrostatyczne – potencjał hydrostatyczny – ψ_h , siły adhezji szkieletu i wody – potencjał macierzysty, nazywany także kapilarnym – ψ_m .

Potencjał temperaturowy i elektryczny, a także potencjały dyfuzyjne składników wody zostały w tym przypadku pominięte z uwagi na ich małe znaczenie. Potencjał macierzysty i hydrostatyczny może być traktowany łącznie i wtedy jest określany jako potencjał ciśnieniowy – ψ_p . Wprowadzając odpowiedniki potencjałów ψ_g , ψ_h , ψ_m i ψ_p wyrażone wysokością słupa wody: φ_g , φ_h , φ_m i φ_p otrzymujemy zależności:

$$\Phi = \varphi_g + \varphi_p = z + \frac{p}{\gamma} = H \quad \text{ponieważ: } \varphi_g = z \quad \text{i} \quad \varphi_p = \frac{p}{\lambda}$$

gdzie:

z – wysokość położenia rozpatrywanego elementu wody [L],

p – ciśnienie panujące w wodzie wypełniającej pory lub szczelinki tego elementu, mierzone w stosunku do ciśnienia atmosferycznego [$ML^{-1}T^{-2}$],

γ – ciężar właściwy wody [$ML^{-2}T^{-2}$],

H – wysokość potencjału wody, nazywana także wysokością hydrauliczną [L].

Inne wielkości fizyczne charakteryzujące przepływ wody i zależne od niego parametry ośrodka są funkcjami wysokości potencjału, jego pochodnych lub składowych; na przykład wydzielanie w różnych zagadnieniach praktycznych dwóch stref – strefy saturacji i strefy aeracji powinno być oparte na znaku składowej ciśnieniowej – fizycznie uzasadniona granica tego podziału to powierzchnia, na której składowa ciśnieniowa jest równa ciśnieniu atmosferycznemu,

strefa położona poniżej jest w takim przypadku nazywana strefą ciśnień dodatnich, a powyżej – strefą ciśnień ujemnych.

W środowisku wody podziemnej oprócz fazy stałej (szkieletu ośrodka skalnego) i fazy ciekłej (w tym przypadku tylko wody) występuje, w większym lub mniejszym stopniu, także faza gazowa. Rezultatem tego jest niepełne nasycenie przestrzeni między ziarnami. Miarą niepełnego nasycenia jest objętościowa zawartość wody Θ lub stopień nasycenia c , obie te wielkości są bezwymiarowe i są zdefiniowane wzorami:

$$\Theta = \frac{V_w}{V_c}, \quad c = \frac{V_w}{V_c - V_s} = \frac{\Theta}{n_c}, \quad n_c = \frac{V_c - V_s}{V_c}$$

gdzie:

V_c – objętość rozpatrywanego elementu ośrodka porowatego [L^3],

V_w – objętość wody zawartej w tym elemencie [L^3],

V_s – objętość fazy stałej (szkieletu) zawartej w rozpatrywanym elemencie [L^3],

n_c – współczynnik porowatości całkowitej [–].

Wielkości Θ i c są funkcjami ciśnienia (φ_p) i w przedziale ciśnień ujemnych są silnie nieliniowe. Nieliniowość ta, obok zjawiska histerezy kapilarnej, w zasadniczy sposób wpływa na procesy zachodzące w strefie aeracji i strefie tuż ponad zwierciadłem wody podziemnej (strefie wzniosu kapilarnego) i ma dominujący wpływ na charakterystykę pojemnościową poziomu wodonośnego ze zwierciadłem swobodnym. Z tego względu poprawny opis matematyczny procesów zachodzących w strefie saturacji nie może pomijać zjawiska niepełnego nasycenia, które występuje głównie ponad zwierciadłem, ale także występuje często poniżej zwierciadła, również na większych głębokościach.

W problematyce tej kluczową rolę odgrywa współczynnik proporcjonalności pomiędzy gradientem potencjałów a prędkością przepływu, nazywany współczynnikiem filtracji i oznaczany symbolem k . Ta zależność jest wyrażona podstawowym dla hydrogeologii równaniem Darcy'ego, które w postaci operatorowej ma formę następującą:

$$\mathbf{v} = -k(\theta)\nabla\Phi$$

gdzie:

$\mathbf{v}$ – wektor prędkości filtracji [LT^{-1}],

k – współczynnik filtracji [LT^{-1}],

Θ – objętościowa zawartość wody [–],

∇ – operator różniczkowy Hamiltona (nabla),

Φ – wysokość potencjału wody podziemnej [L].

Uzupełnieniem powyższego równania jest równanie ciągłości ruchu – dla zgodności opisu podane poniżej w analogicznej formie:

$$-\frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} = \nabla\rho\mathbf{v} + \rho q$$

gdzie:

ρ – gęstość wody [ML^{-3}],

t – zmienna niezależna czasu [T],

q – funkcja wyrażająca zasilanie lub pobór wody [T^{-1}], pozostałe oznaczenia jak wyżej.

Z połączenia obu powyższych równań można otrzymać ogólne równanie przepływu wody podziemnej w warunkach występowania ciśnień dodatnich i ujemnych, czyli powyżej i poniżej zwierciadła (Remson i in., 1971):

$$\frac{\partial(\rho\theta)}{\rho\partial t} = \nabla[k(\theta)\nabla\Phi] + q$$

Równanie to w postaci różniczkowej można zapisać:

$$\frac{\partial(\rho\theta)}{\rho\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\theta) \frac{\partial\Phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\theta) \frac{\partial\Phi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\theta) \frac{\partial\Phi}{\partial z} \right] + q$$

gdzie:

x, y, z – zmienne niezależne przestrzeni [L],

k_x, k_y, k_z – składowe tensora współczynnika filtracji k [LT^{-1}], pozostałe oznaczenia jak wyżej.

Zgodnie z przedstawionym wcześniej modelem pojęciowym, równanie to definiuje atrybuty punktu należącego do wnętrza i wzajemne relacje pomiędzy poszczególnymi atrybutami. W konsekwencji, wraz z wartościami parametrów (ośrodka, również przypisanymi do tych punktów) określa, w jaki sposób wnętrze reaguje na czynniki zewnętrzne wyrażone poprzez warunki brzegowe. Z tego względu równanie powyższe można rozwiązać jedynie, gdy podane są dla całego brzegu warunki brzegowe i dla całego wnętrza – warunek początkowy. Specyfikacja warunków brzegowych dla tego równania jest następująca: przy: $t_0 \leq t \leq t_k$ i $r'(x'', y'', z'') \in R'$ określony jest

warunek I rodzaju: $\Phi(x'', y'', z'') = B'(x', y', z')$

lub warunek II rodzaju: $\frac{\partial\Phi}{\partial n'}(x'', y'', z'') = C'(x'', y'', z'')$

lub warunek III rodzaju: $D'(x, y, z) \Phi(x'', y'', z'') + E'(x, y, z) \frac{\partial\Phi}{\partial n'}(x'', y'', z'') = F'(x, y, z)$

Warunek początkowy w tym przypadku ma postać:

przy $t = t_0$ i $m'(x', y', z') \in M'$ określone jest: $\Phi(x', y', z') = A'(x, y, z)$

gdzie:

t_0 – wartość zmiennej niezależnej określająca moment początkowy [T],

t_k – wartość zmiennej niezależnej określająca moment końcowy [T],

x', y', z' – współrzędne punktu m' [L],

x'', y'', z'' – współrzędne punktu r' [L],

A', B', C', D', E', F' – stałe lub zmienne w czasie wielkości dane,

M' – zbiór punktów należących do wnętrza,

R' – zbiór punktów należących do brzegu,

m' – punkt należący do zbioru wnętrza M' ,

r' – punkt należący do zbioru brzegu R' ,

n' – kierunek prostopadły do powierzchni brzegowej w punkcie (x'', y'', z'') , pozostałe oznaczenia jak poprzednio.

W przedstawionym tu opisie występują zależności funkcyjne o charakterze silnie nieliniowym (Bear, 1972):

$$\theta = f(\varphi_p), \quad \rho = f(\varphi_p), \quad k = f(\theta) \quad \text{ i } \quad q = f(\varphi_p)$$

Z tego względu przy konkretnych zastosowaniach dokonuje się możliwie daleko idących uproszczeń i dąży się do uzyskania postaci liniowej lub quasi-liniowej. Jedną z najczęściej stosowanych wersji uproszczonych jest równanie ograniczone do stanu pełnej saturacji i do przestrzeni dwuwymiarowej (x, y). Równanie to otrzymuje się przez scałkowanie elementów równania ogólnego, przedstawionego powyżej, po zmiennej z w granicach od spągu warstwy wodonośnej do jej stropu. Przed operacją całkowania należy wykonać następujące przekształcenia i uproszczenia:

- 1) przepływ wody podziemnej odbywa się tylko w obszarze ciśnień dodatnich – przy: $p > 0$ w danym punkcie $m'(x', y', z')$;
- 2) z tego wynika, że w danym obszarze:

$$\theta(\varphi_p) = \theta_{\max} = n_c = \text{const}, \quad k(\theta) = k_{\max} = \text{const}, \quad \frac{d\varphi_p}{dt} = \frac{dH}{dt}, \quad \Phi = H$$

gdzie:

$\theta_{\max}$ – maksymalna względna zawartość wody odpowiadająca stanowi pełnego nasycenia,
 $k_{\max}$ – maksymalna wartość współczynnika filtracji odpowiadająca stanowi pełnego nasycenia.

- 3) przyjmując, że: $\frac{\theta d\rho}{\rho d\varphi_p} = \beta^*$, gdy $p \geq 0$ i

$$\mu_e = \int_{\varphi_{p\max}}^0 \mu^* d\varphi_p \quad \text{i} \quad \frac{d\theta}{d\varphi_p} = \mu^*, \quad \text{gdy} \quad p < 0$$

gdzie:

$\varphi_{p\max}$ – wysokość potencjału ciśnieniowego odpowiadająca tak zwanej wodzie kapilarnie zawieszzonej,

można napisać:

$$\frac{d(\rho\theta)}{\rho dt} = (\mu^* + \beta^*) \frac{d\varphi_p}{dt}$$

gdzie:

$\mu^* = f(\varphi_p)$ – funkcja odłączalności właściwej [L^{-1}],
 $\beta^* = f(\varphi_p)$ – funkcja ściśliwości [L^{-1}],
 μ_e – współczynnik odsączalności efektywnej [-].

Po uwzględnieniu tych założeń równanie ogólne przybiera postać:

$$(\beta^* + \mu^*) \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla[k\nabla H] + q$$

Następnie przyjmując, że:

- 4) odsączalność odbywa się tylko na powierzchni zwierciadła wody:

$$\mu'_e = \begin{cases} 0 & \text{gdy } \varphi_p > 0 \\ \mu_e & \text{gdy } \varphi_p = 0 \\ 0 & \text{gdy } \varphi_p < 0 \end{cases}$$

gdzie:

μ'_e – współczynnik odsączalności efektywnej jako parametr skupiony i przypisany powierzchni zwierciadła wody [–].

- 5) pojemność sprężysta wody jak i szkieletu ma istotne znaczenie tylko w strefie ciśnień dodatnich:

$$\beta = \begin{cases} \frac{1}{d\varphi_p} \left(n_c \frac{d\rho}{\rho} - \frac{d\rho_s}{\rho_s} \right) & \text{gdy } \varphi_p > 0 \\ 0 & \text{gdy } \varphi_p \leq 0 \end{cases}$$

gdzie:

ρ_s – gęstość szkieletu [ML⁻³],

β – współczynnik pojemności sprężystej [L⁻¹].

- 6) w myśl założeń Dupuita-Forchheimera składowa pionowa wektora prędkości filtracji w warstwie wodonośnej jest na tyle mała, że może być pominięta. Wynika to z geometrii warstwy, ponieważ stosunek wymiaru w kierunku pionowym do wymiarów poziomych jest na ogół mniejszy niż 1:100, a często mniejszy niż 1:1000.

W wyniku całkowania parametrów równania przedstawionego powyżej po zmiennej z w granicach od R_d do R_g otrzymuje się nowe parametry równania filtracji:

$$S_B = \int_{R_d}^{R_g} \beta dz, \quad \mu_z = \int_{R_d}^{R_g} \mu^* dz, \quad T_p = \int_{R_d}^{R_g} k dz \quad \text{ i } \quad H = \frac{1}{R_g - R_d} \int_{R_d}^{R_g} H dz, \quad W_B = \int_{R_d}^{R_g} q dz.$$

Są to parametry skupione w kierunku z i rozłożone w kierunkach x i y , a równanie z tymi parametrami ma postać:

$$(S_B + \mu_z) \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + W_B$$

gdzie:

H – średnia wysokość potencjału hydrodynamicznego w warstwie wodonośnej w danym profilu o współrzędnych x i y [L],

T_x, T_y – przewodność wodna pozioma danego profilu [L²T⁻¹],

S_B – zasobność sprężysta warstwy w danym profilu [–],

μ_z – wskaźnik odsączalności danego profilu [–],

W_B – suma zasilania lub/i poboru wody w danym profilu [LT⁻¹],

x i y – niezależne współrzędne układu poziomego [L].

Przedstawione powyżej równanie różniczkowe jest daleko posuniętym uproszczeniem równania ogólnego, jednak dla zastosowań praktycznych dotyczących wpływu zmian warunków hydrologicznych, jakimi jest wybudowanie zbiornika małej retencji na cieku powierzchniowym, na warunki hydrogeologiczne terenów przyległych, jest dostatecznie dobrym przybliżeniem zachodzących tam procesów.

G. Zasada superpozycji strumieni

Zasada superpozycji strumieni wynika z założeń będących podstawą teorii pól fizycznych. W przedstawianej tu problematyce może być stosowana przy założeniu liniowości równań opisujących przepływ wód podziemnych. Równanie przepływu zakłada jego liniowość, jednak w wielu przypadkach, z jakimi mamy do czynienia w praktyce, liniowość ta nie jest w pełni zachowana. W rezultacie pozostaje problem ustalenia, w jakich przypadkach nieliniowość jest na tyle mała, że może być pominięta, i analizowany proces może być traktowany jako liniowy.

W ogólnym ujęciu superpozycja to „sumowanie” pól fizycznych o jednakowej naturze, wywołanych różnymi przyczynami. Przenosząc tę koncepcję na przedstawiony wcześniej model pojęciowy, można założyć, że każdy warunek brzegowy oddziałując na wnętrze powoduje powstanie w nim określonego wynikowego pola, które jest reakcją wnętrza na ten czynnik zewnętrzny. Całkowity rezultat, jaki powstaje we wnętrzu, jest „sumą” pól będących reakcjami na oddziaływanie poszczególnych warunków brzegowych. Słowo „suma” nie jest tu najbardziej odpowiednie, ponieważ dotyczy to nałożenia na siebie pewnego rodzaju „obrazów” zmienności przestrzennej jakiejś wielkości fizycznej, na przykład pola potencjałów lub pola prędkości. Z tego względu w fizyce matematycznej stosowany jest termin „superpozycja”.

W rozpatrywanej tu problematyce oddziaływania zbiorników małej retencji na warunki hydrogeologiczne i w konsekwencji na zmiany zasobów wód podziemnych zasada superpozycji daje możliwość traktowania stanu przed spiętrzeniem wód powierzchniowych jako jeden składnik cząstkowy, a obraz wpływu podpiętrzenia jako drugi składnik cząstkowy. Końcowy obraz, jaki się wytworzy po pełnej stabilizacji oddziaływań, jest stanem superponowanym z dwóch wymienionych tu stanów cząstkowych.

