

Możliwość gromadzenia i przewodzenia wody w środowisku podziemnym zależy od cech hydrogeologicznych skał, z których najważniejszymi są: porowatość, szczelinowatość, krasowatość. Odległość między spągami i stropem warstwy wodonośnej określa się jako **miąższość warstwy wodonośnej**. Może ona wynosić od kilku centymetrów do kilkuset metrów. Jeżeli strop warstwy wodonośnej stanowią utwory przepuszczalne, zwierciadło wód podziemnych jest swobodne i miąższość strefy zawodnionej zmienia się na skutek wahań zwierciadła wody pod wpływem czynników atmosferycznych, hydrologicznych lub antropogenicznych. Jeśli strop warstwy wodonośnej wypełnionej wodą stanowi warstwa nieprzepuszczalna, zwierciadło wody może być pod ciśnieniem.

Warstwa, lub zespół warstw wodonośnych należących do tego samego okresu geologicznego, nazywa się **piętrzem wodonośnym** (np. piętro wód kredowych, jurajskich, triasowych). Natomiast warstwę lub zespół warstw wodonośnych należących do określonej epoki (serii) geologicznej nazywa się **poziomem wodonośnym** (np. poziom wód plejstoceniowych, holoceniowych).

### 5.1.1. Kartograficzne odwzorowania zwierciadła wód podziemnych

Swobodne zwierciadło wód podziemnych (gruntowych), podobnie jak powierzchnia terenu, ma określony kształt i może być przedstawione na mapie hipsometrycznej w postaci hydroizohips. **Hydroizohipsy** są to linie łączące punkty o jednakowej rzędnej zwierciadła wody podziemnej nad poziomem morza. Mapa hydroizohips powstaje drogą interpolacji, na podstawie pomiarów zwierciadła wód w wielu punktach jednocześnie; przedstawia ona wtedy stan zwierciadła w danym dniu. Można też wykonać mapę hydroizohips średniego, maksymalnego lub minimalnego stanu zwierciadła na podstawie wielokrotnych pomiarów w każdym punkcie. Należy pamiętać, że hydroizohipsy odzwierciedlają kształt zwierciadła wody występującej w tej samej warstwie wodonośnej i błędne jest ich wyznaczanie na podstawie danych pochodzących z punktów pomiarowych reprezentujących różne warstwy. Przy wyznaczaniu hydroizohips przydatne są też:

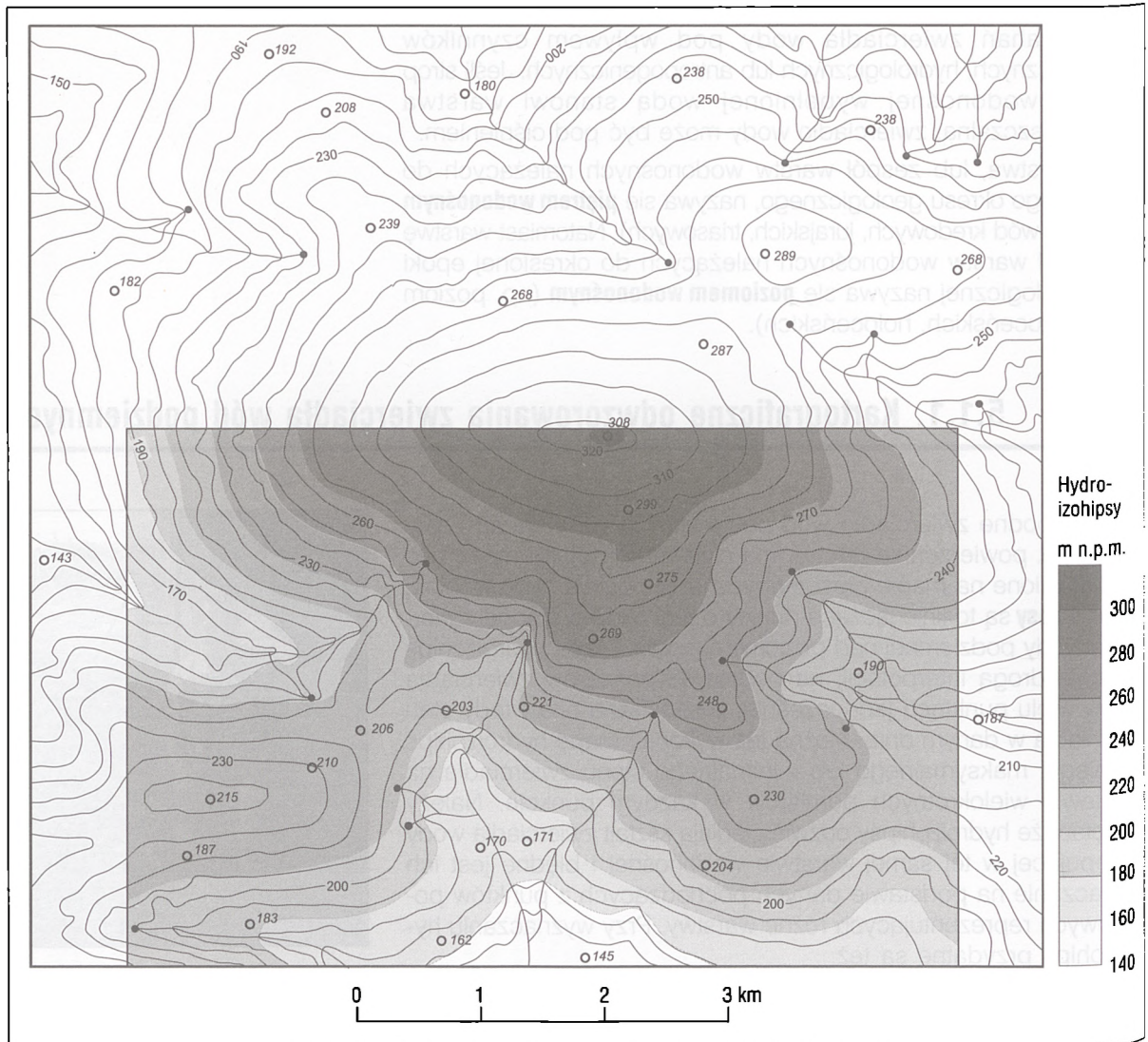
- mapa hipsometryczna terenu (zwierciadło wód podziemnych jest zwykle współkształtne z powierzchnią terenu; można to sprawdzić, wykreślając profil hipsometryczno-hydrogeologiczny – zob. dalej),



Pomiar zwierciadła wód podziemnych w piezometrze

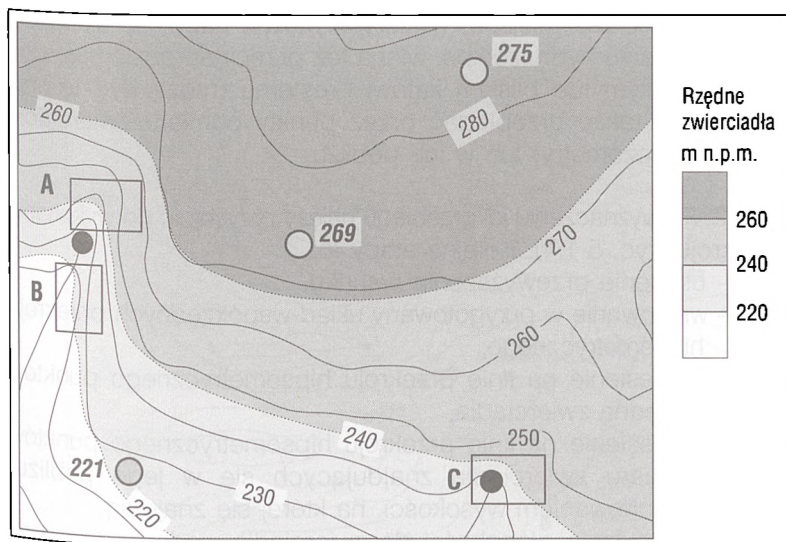
- mapa hydrograficzna (w przypadku istnienia kontaktu między ciekami a zwierciadłem wody podziemnej, sieć rzeczna wyznacza miejsca, w których rzędne zwierciadła wód podziemnych są równe wysokości zwierciadła wody w cieku; także źródła i podmokłości wyznaczają miejsca, gdzie rzędna zwierciadła wód podziemnych jest równa rzędnej powierzchni terenu lub nieco niższa).

Jeśli zwierciadło wód podziemnych nawiązuje do ukształtowania terenu (tak jest najczęściej w przypadku porowych zbiorników wód podziemnych o zwierciadle swobodnym), to **przebieg hydroizohips** nawiązuje do przebiegu poziomicy (ryc. 5.1.1). Wyznaczając



Ryc. 5.1.1. Fragment mapy hydroizohips wyznaczonej na podstawie rzędnych zwierciadła w studniach, występowania źródeł i przebiegu cieków

przebieg hydroizohips, należy zwrócić szczególną uwagę, czy hydroizohipsa przebiega po „właściwej stronie” poziomicy o tej samej rzędnej, tzn. po stronie wartości wyższych. Ulokowanie bowiem hydroizohipsy po przeciwnej stronie sugeruje, iż zwierciadło wód podziemnych znajduje się ponad powierzchnią terenu (prostokąt A na ryc. 5.1.2). W przypadku gdy wody podziemne zasilają ciek, hydroizohipsa o danej wartości przecina ciek na wysokości równej w przybliżeniu jego rzędnej o takiej samej wartości, nie zaś powyżej lub poniżej niej (prostokąt B na ryc. 5.1.2). Hydroizohipsy powinny przebiegać przez źródła położone na wysokości o tej samej rzędnej, nie zaś powyżej źródła (prostokąt C na ryc. 5.1.2).



Ryc. 5.1.2. Najczęściej popełniane błędy w trakcie wyznaczania przebiegu hydroizohips. Miejsca, w których popełniono błędy, oznaczono ramkami (A, B, C)

Analizy zwierciadła wód podziemnych można także dokonać na podstawie mapy hydroizobat, obrazującej głębokość do wód podziemnych i jednocześnie miąższość strefy aeracji. **Hydroizobaty** są to linie łączące punkty o tej samej głębokości zwierciadła wody podziemnej. W obszarach o zróżnicowanej rzeźbie terenu głębokość do zwierciadła wody jest zróżnicowana, nawet w miejscach znajdujących się w niewielkiej odległości od siebie. Z tego względu, mapa głębokości do zwierciadła wód podziemnych (miąższości strefy aeracji) wykonywana jest w konwencji dazymetrycznej, tzn. izobaty wyznaczają zasięg stref (obszarów), w których zwierciadło znajduje się w pewnym przedziale głębokości (np. 2–5 m), zaś głębokość w danym punkcie, wyznaczona na podstawie takiej mapy, nie zawsze jest ściśle związana z odległością od hydroizobat wyznaczających zasięg poszczególnych stref. Przy wyznaczaniu hydroizobat pomocna jest mapa hydrograficzna z zaznaczonym przebiegiem cieków, rozmieszczeniem wypływów i obszarów podmokłych.



Głębokość zwierciadła wód podziemnych można mierzyć w studniach

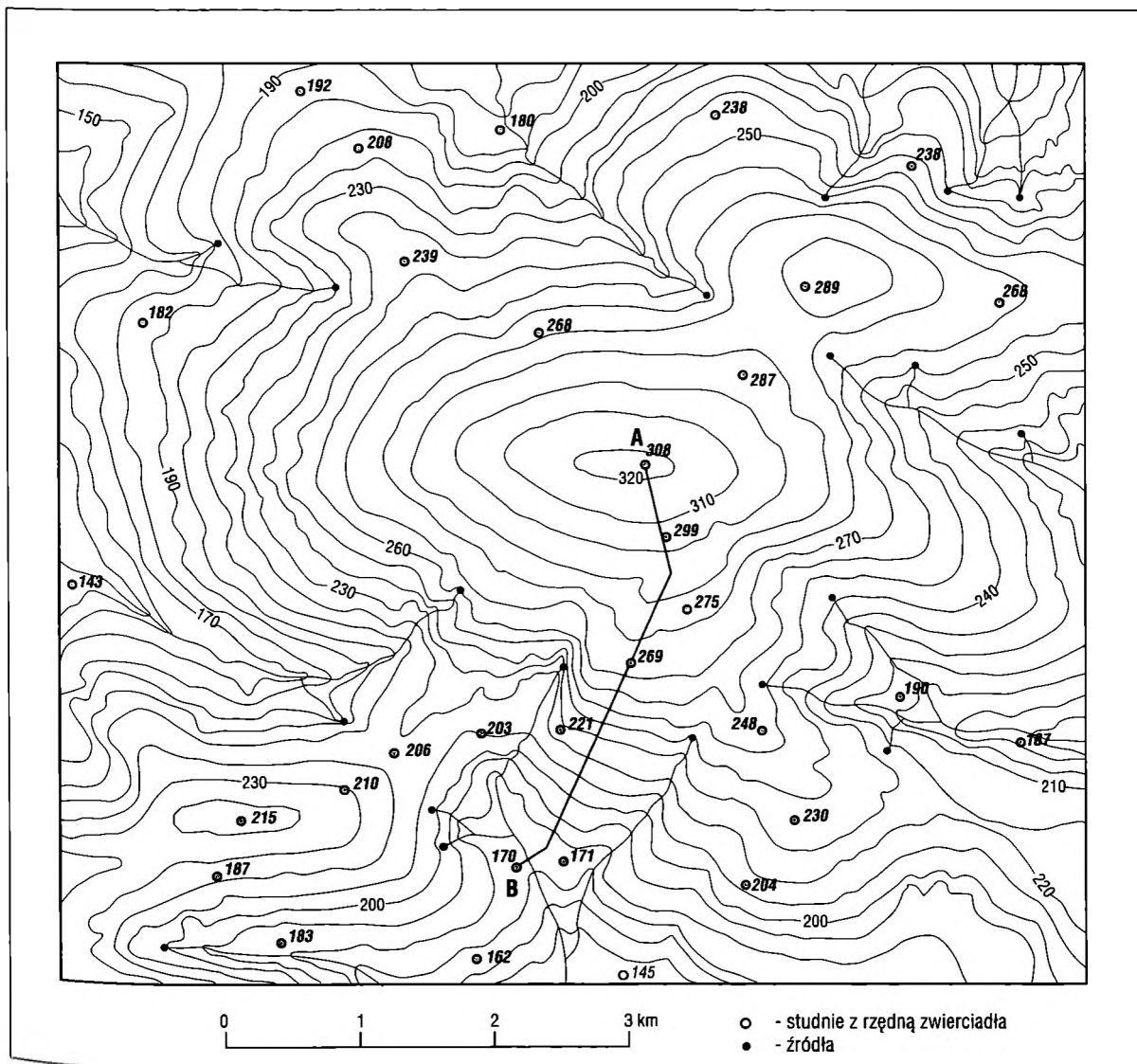
Informacji dotyczącej liczby poziomów wodonośnych występujących na danym obszarze oraz wzajemnych relacji między zwierciadłem wód podziemnych i rzeźbą terenu może dostarczyć **przekrój hipsometryczno-hydrogeologiczny**. Ułatwia on stwierdzenie, czy w danym terenie występuje jeden czy kilka poziomów wodonośnych, czy zwierciadło wody podziemnej nawiązuje do ukształtowania terenu (znajduje się wyżej pod wzniesieniami i odpowiednio niżej pod obniżeniami), czy też występuje niezależnie od ukształtowania powierzchni. Przekrój hipsometryczno-hydrogeologiczny wyznacza się w następujący sposób:

1. Na podkładzie mapy hipsometrycznej z zaznaczonymi studniami (ryc. 5.1.3) wyznacza się linię przekroju. Powinna ona przebiegać przez miejsca, w których można napotkać trudności w wyznaczaniu hydroizohips; winna też przecinać poziomicę pod kątem prostym lub bliskim kątowni prostemu (może być to linia łamana), a także przebiegać przez punkty pomiaru zwierciadła (studnie, piezometry) lub w ich pobliżu.

2. Po wyznaczeniu jej przebiegu należy przystąpić do wykonania przekroju (ryc. 5.1.4). Kolejne etapy to:

- ustalenie przewyższenia rysunku,
- rysowanie w przygotowany układ współrzędnych przekroju hipsometrycznego,
- naniesienie na linię przekroju hipsometrycznego punktów z rzędną zwierciadła,
- naniesienie na linię przekroju hipsometrycznego punktów pomiaru zwierciadła znajdujących się w jego pobliżu z zachowaniem wysokości, na której się znajdują,
- rysowanie głębokości do zwierciadła wody podziemnej, wyznaczając tym samym rzędną zwierciadła,
- wyznaczenie linii zwierciadła wód podziemnych, ze zwróceniem szczególnej uwagi na to, by nie połączyć ze sobą różnych poziomów. W praktyce, ustalenie poszczególnych poziomów może być trudne i wymagać dodatkowych, szczegółowych badań terenowych. Szczególnie przydatne mogą być dodatkowe informacje o temperaturze i składzie chemicznym wody, gdyż można zakładać, że wody tego samego poziomu mają podobną temperaturę i skład chemiczny.

3. Kolejnym etapem jest ustalenie przedziału hydroizohips (np. co 10 m) i rysowanie, w wykonany uprzednio przekrój, linii rzędnych (co 10 m). Hydroizohipsy przebiegają przez punkty przecięcia tych linii z zaznaczonym uprzednio zwierciadłem. Przekrój hipsometryczno-hydrogeologiczny pozwala na stwierdzenie, czy zwierciadło wód podziemnych nawiązuje do ukształtowania terenu. Jeśli tak, to przebieg poziomic będzie pomocny przy wyznaczaniu przebiegu hydroizohips. Należy też zwrócić uwagę na to, czy ciekli

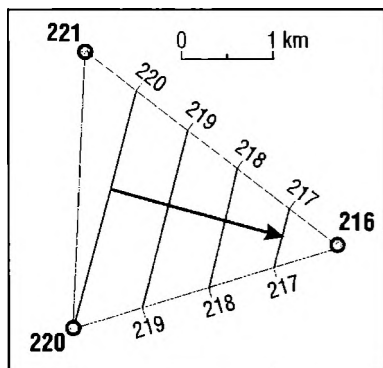
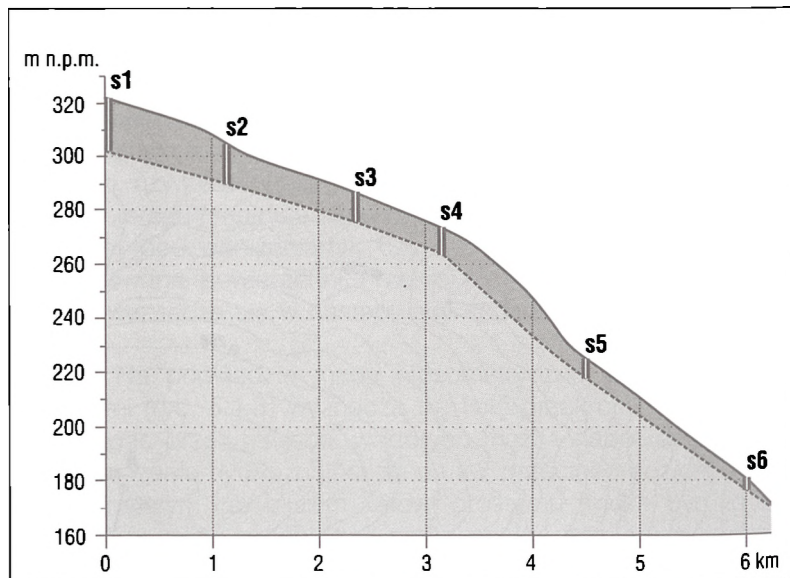


Ryc. 5.1.3. Mapa hipsometryczna terenu z zaznaczonymi studniami z rzędną zwierciadła wody podziemnej, ciekami i źródłami oraz przebiegiem linii przekroju hipsometryczno-hydrogeologicznego (A-B)

mają związek hydrauliczny z wodami podziemnymi, tzn. czy są przez nie zasilane, czy też je zasilają.

Zarówno profil hipsometryczno-hydrogeologiczny, jak i mapa hydroizohips umożliwiają wyznaczenie kierunku przemieszczania się wód podziemnych. Jest on zawsze prostopadły do hydroizohips i zgodny z grawitacją. Jeśli jednak nie wyznaczono przebiegu hydroizohips i profilu, **kierunek ruchu wód podziemnych** można określić na podstawie informacji o rzędnych zwierciadła w trzech sąsiadujących ze sobą studniach. Na terenach o rzeźbie falistej lub górskiej należy wybrać studnie znajdujące się na tym samym skłonie wzniesienia. Linie łączące studnie powinny tworzyć trójkąt –

Ryc. 5.1.4. Przekrój hipsometryczno-hydrogeologiczny (S1-S6 – studnie)



Ryc. 5.1.5. Wyznaczanie kierunku ruchu wód podziemnych

w przybliżeniu – równoramienny. Dysponując wartościami rzędnych zwierciadła w tych studniach dokonuje się między nimi interpolacji (ryc. 5.1.5). Następnie punkty znajdujące się na ramionach trójkąta i posiadające jednakowe wartości rzędnych łączy się liniami; są to hydroizohipsy. Można teraz wyznaczyć kierunek ruchu wód podziemnych (prostopadły do wyznaczonych hydroizohips – od wartości wyższych do niższych) oraz **spadek hydrauliczny zwierciadła wód podziemnych** – na podstawie informacji o różnicy wysokości zwierciadła wody nad poziomem morza i odległości między nimi:

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (5.1.1)$$

gdzie:

- $i$  – spadek hydrauliczny wód podziemnych,
- $\Delta H$  – różnica rzędnej zwierciadła [m],
- $L$  – odległość między studniami i hydroizohipsami [m].

Przy wyborze studzien lub hydroizohips, należy pamiętać o tym, aby wybrać takie miejsca, w których ogólny kierunek ruchu wód podziemnych jest podobny. Uwzględnienie w obliczeniach studzien lub hydroizohips znajdujących się na przeciwnych stokach tego samego wzniesienia lub przeciwległych zboczach tej samej doliny prowadzi do uzyskania błędnych wyników. Znajomość spadku zwierciadła wody podziemnej przydatna jest do obliczenia **prędkości ruchu wody podziemnej** zgodnie z wzorem Darcy:

$$v = k i \quad (5.1.2)$$

**prawo Darcy'ego** – określa jednostkowe natężenie przepływu wód podziemnych w ruchu laminarnym, w zależności od współczynnika filtracji i spadku hydraulicznego

gdzie:

- $v$  – prędkość ruchu wody podziemnej [ $m \cdot doba^{-1}$ ,  $cm \cdot s^{-1}$ ,  $mm \cdot s^{-1}$ ],  
 $k$  – współczynnik filtracji ośrodka skalnego (warstwy wodonośnej) [ $m \cdot doba^{-1}$ ,  $cm \cdot s^{-1}$ ,  $mm \cdot s^{-1}$ ],  
 $i$  – spadek hydrauliczny wód podziemnych.

## 5.1.2. Wahania zwierciadła wód podziemnych

Wahania zwierciadła wód podziemnych są wynikiem zmieniających się relacji pomiędzy zasilaniem i drenażem zbiorników wód podziemnych. W przypadku płytkich wód podziemnych, obniżanie zwierciadła może być spowodowane ewapotranspiracją. Wielkość wahań zwierciadła zależy w istotnym stopniu od cech skał wodonośnych. Dostawa tej samej ilości wody powoduje większy wznios zwierciadła w skałach o niskim współczynniku odsączalności  $\mu$ . Współczynnik ten wyraża stosunek objętości wody odsączonej ze skały  $V_0$  do jej objętości  $V$ :

$$\mu = \frac{V_0}{V} \quad (5.1.3)$$

Przyrost lub ubytek zasobów wody podziemnej  $H_g$ , wyrażony w postaci warstwy wody [mm], jest wyznaczany z iloczynu różnicy stanu wody podziemnej w dwóch terminach  $\Delta H$  i współczynnika odsączalności skał wodonośnych  $\mu$  (tab. 5.1.1):

$$H_g = \Delta H \mu \quad (5.1.4)$$

Ze względu na zróżnicowanie cech hydrogeologicznych podłoża (przepuszczalność) oraz miąższości strefy aeracji, analiza rytmu wahań zwierciadła wód podziemnych wymaga standaryzacji danych, polegającej na wyrażeniu stanu wody w wartościach niemianowanych (lub procentowych):

$$H_s = \frac{H_{max} - H}{H_{max} - H_{min}} \cdot 100 \quad (5.1.5)$$

gdzie:

- $H_s$  – standaryzowany stan wody podziemnej [%],  
 $H_{max}$  – największa głębokość do zwierciadła wody podziemnej [m],  
 $H_{min}$  – najmniejsza głębokość do zwierciadła wody podziemnej [m],  
 $H$  – głębokość do zwierciadła w danym dniu [m].

Wartość 0 (0%) oznacza najniższe położenie zwierciadła (największą głębokość do wody), a wartość 1 (100%) – położenie najwyższe (najmniejszą głębokość do wody).

Tab. 5.1.1. Współczynnik odsączalności  $\mu$  niektórych skał (Pazdro, Kozerski, 1990)

Rodzaj utworu	$\mu$
Piasek mułkowy	0,12
Piasek drobnoziarnisty	0,17
Piasek średnioziarnisty	0,19
Piasek gruboziarnisty	0,22
Żwir	0,26
Rumosz skalny	0,26
Skały masywne szczelinowate lub skrasowiałe	0,01

Dobłą miarą wahań zwierciadła wód podziemnych, poza amplitudą, jest odchylenie przeciętne  $d$  obliczane według wzoru:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n |H_i - \bar{H}|}{n} \quad (5.1.6)$$

gdzie:

$H_i$  – stan (głębokość) wody podziemnej w danym dniu [cm],

$\bar{H}$  – średni stan (głębokość) wody podziemnej [cm];

oraz odchylenie standardowe  $\sigma$  wyrażone wzorem:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n}} \quad (5.1.7)$$

### Zadanie 1

Po opadach deszczu o sumie 120 mm stwierdzono wznios zwierciadła wód podziemnych o 5 cm na obszarze 10 km<sup>2</sup>. Przyjmując, że warstwę wodonośną tworzą drobnoziarniste piaski (tab. 5.1.1), oblicz wielkość zasilania wód podziemnych na tym obszarze w mm warstwy wody i w jednostkach objętości. Jaka część opadu została zużyta na zasilanie wód podziemnych?

### Zadanie 2

Uzupełnij mapę (ryc. 5.1.1) o hydroizohipsy w miejscach, gdzie ich przebieg nie został jeszcze wyznaczony.

### Zadanie 3

Na mapie przedstawionej na ryc. 5.1.3 zaznacz przy studniach głębokości do zwierciadła wody w każdej z nich oraz wyznacz hydroizobaty o wartościach: 2, 5 i 10 m.

### Zadanie 4

Wybierz trzy studnie (ryc. 5.1.3) i wyznacz kierunek płynięcia wód podziemnych na obszarze znajdującym się między nimi. Oblicz spadek zwierciadła wód podziemnych.

### Zadanie 5

Na podstawie danych, pochodzących z *Rocznika hydrologicznego wód podziemnych*, sporządź wykres wahań zwierciadła wody w dwóch wybranych studniach, a następnie sporządź drugi wykres, przedstawiający wartości standaryzowane. Porównaj oba wykresy. Jakie wnioski można wyciągnąć na podstawie ich analizy?