

Sesja: Bezpieczeństwo wód podziemnych.
Monitoring, zagrożenia, ochrona.
14.03.2025 r. Warszawa

Sztuczne zasilanie warstw wodonośnych (MAR) metody i możliwości

Autor prezentacji: mgr inż. Kamil Pawelec



DEEPWATER-CE, 2020



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



Wprowadzenie – Co to jest MAR?

Sztuczne zasilanie warstwy wodonośnej

Niezamierzone

„Dodatkowe zasilanie wód podziemnych występuje jako **efekt uboczny**, a sam cel działania nie koncentruje się na zasilaniu warstwy wodonośnej.

Managed Aquifer Recharge – MAR

„Proces **celowego** zwiększania zasilania warstwy wodonośnej w celu jej późniejszego odzyskania lub dla osiągnięcia korzyści środowiskowych.”
Dillon i in., 2009

NIEZAMIERZONE ZASILANIE (PRZYPADKOWE)	CELOWE/ZARZĄDZANE ZASILANIE (ODZYSK)
<ul style="list-style-type: none">• Usuwanie głęboko zakorzenionej roślinności lub orka• Infiltracja wody na obszarach nawadnianych• Wycieki z rur wodociągowych i kanalizacyjnych• Ograniczanie powierzchni utwardzonych	<ul style="list-style-type: none">• Modyfikacje koryt rzek• Filtracja brzegowa• Rowy infiltracyjne• Studnie chłonne• Stawy infiltracyjne• Zbieranie wody deszczowej



Kluczowe cele, które można osiągnąć dzięki zastosowaniu technik MAR

Cele ilościowe

- Zabezpieczenie (przyszłego) zaopatrzenia w wodę.
- Zrekompensowanie niektórych skutków zmian klimatycznych.
- Zwiększenie zasobów wód podziemnych i przeciwdziałanie ich nadmiernej eksploatacji.
- Redukcja osiadania terenu.
- Zapobieganie sptywowi burzowemu
- Zachowanie przepływów w ciekach/rzekach.
- Ograniczenie strat spowodowanych parowaniem w zbiornikach powierzchniowych.
- Ochrona powiązanych ekosystemów wodnych oraz ekosystemów lądowych zależnych od wód podziemnych.



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



Kluczowe cele, które można osiągnąć dzięki zastosowaniu technik MAR

Cele jakościowe

- Proces wstępnego uzdatniania w celu poprawy jakości wód zasilających.
- Kontrola zanieczyszczeń.
- Zapobieganie intruzji wód słonych w przybrzeżnych warstwach wodonośnych.
- Zapobieganie przedostawaniu się wód o wysokim naturalnym stężeniu niektórych parametrów fizykochemicznych do nadmiernie eksploatowanych warstw wodonośnych.
- Redukcja zanieczyszczenia wód powierzchniowych (geooczyszczanie), aby osiągnąć wymaganą jakość wody do późniejszego wykorzystania.



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



Źródła wody w projektach MAR

Managed Aquifer Recharge (MAR) umożliwia uzupełnianie zasobów wód podziemnych za pomocą różnych źródeł wody. Wybór źródła zależy od lokalnej dostępności i jakości wody. Najczęściej wykorzystuje się łatwo dostępne zasoby, przy jednoczesnym zachowaniu kontroli jakości wód.

Wody powierzchniowe (rzeki, jeziora)

Wody powierzchniowe z rzek, jezior czy zbiorników retencyjnych są powszechnie wykorzystywane w projektach MAR ze względu na ich dostępność. Zanim jednak trafią do gruntu, wymagane jest **oczyszczenie lub filtracja** w celu usunięcia osadów i zanieczyszczeń (np. zawiesin, patogenów). Naturalne wody powierzchniowe zwykle wymagają *mniej intensywnej uzdatniania* niż np. ścieki czy deszczówka, ale wciąż istotne jest zapewnienie odpowiedniej jakości, aby nie zanieczyścić warstwy wodonośnej. Często stosuje się **baseny infiltracyjne lub stawy** umożliwiające powolne przesiąkanie takiej wody do gruntu.



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



Źródła wody w projektach MAR

Managed Aquifer Recharge (MAR) umożliwia uzupełnianie zasobów wód podziemnych za pomocą różnych źródeł wody. Wybór źródła zależy od lokalnej dostępności i jakości wody. Najczęściej wykorzystuje się łatwo dostępne zasoby, przy jednoczesnym zachowaniu kontroli jakości wód.

Wody opadowe i powodziowe

Wody deszczowe (opadowe) oraz **wody powodziowe** można przechwytywać i magazynować pod ziemią zamiast pozwalać im spłynąć bezproduktywnie do rzek czy morza. Tworzenie systemów retencji – takich jak zbiorniki na deszczówkę, suche poldery czy rozsączające ogrody deszczowe – pozwala gromadzić nadmiar wody w trakcie ulewnych deszczy. Następnie ta woda może być **stopniowo infiltrowana** do warstw wodonośnych. Takie podejście ma podwójną korzyść: *redukuje ryzyko powodzi* oraz **uzupełnia zasoby podziemne** na okresy suszy. Wymagane jest jednak oczyszczenie deszczówki z zanieczyszczeń miejskich (np. metale ciężkie z dachów, zanieczyszczenia z ulic), zanim trafi ona do gruntu.



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



Źródła wody w projektach MAR

Managed Aquifer Recharge (MAR) umożliwia uzupełnianie zasobów wód podziemnych za pomocą różnych źródeł wody. Wybór źródła zależy od lokalnej dostępności i jakości wody. Najczęściej wykorzystuje się łatwo dostępne zasoby, przy jednoczesnym zachowaniu kontroli jakości wód.

Wody przemysłowe

Wody przemysłowe (np. woda używana w procesach chłodniczych lub technologicznych w fabrykach) również mogą zasilać wody podziemne, o ile zostaną odpowiednio oczyszczone. Często zawierają one specyficzne zanieczyszczenia (związki chemiczne, metale ciężkie) zależne od branży, dlatego wymagają **zaawansowanych metod uzdatniania**. W niektórych projektach MAR odzyskuje się np. *wody kopalniane* czy wody z procesów przemysłowych, najpierw je neutralizując. Ze względu na potencjalne ryzyko (np. obecność toksyn lub związków organicznych) takie wody muszą być **ściśle monitorowane**, aby nie zagrozić jakości wód podziemnych.



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



Źródła wody w projektach MAR

Managed Aquifer Recharge (MAR) umożliwia uzupełnianie zasobów wód podziemnych za pomocą różnych źródeł wody. Wybór źródła zależy od lokalnej dostępności i jakości wody. Najczęściej wykorzystuje się łatwo dostępne zasoby, przy jednoczesnym zachowaniu kontroli jakości wód.

Oczyszczone ścieki komunalne

Oczyszczone ścieki z komunalnych oczyszczalni stanowią stabilne i przewidywalne źródło wody przez cały rok. Po odpowiednim doczyszczeniu (np. filtracja, dezynfekcja) mogą być wykorzystywane do zasilania wód podziemnych, zwłaszcza w okresach suszy. Kluczowa jest tu **kontrola jakości** – woda pościekowa musi spełniać rygorystyczne normy, aby nie wprowadzać do warstwy wodonośnej szkodliwych mikroorganizmów czy związków chemicznych. Zaletą takiego źródła jest **niezależność od warunków pogodowych** – ścieki powstają ciągle, więc mogą wspierać bilans wodny nawet, gdy brak jest opadów.



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



Źródła wody w projektach MAR

Managed Aquifer Recharge (MAR) umożliwia uzupełnianie zasobów wód podziemnych za pomocą różnych źródeł wody. Wybór źródła zależy od lokalnej dostępności i jakości wody. Najczęściej wykorzystuje się łatwo dostępne zasoby, przy jednoczesnym zachowaniu kontroli jakości wód.

Odsalana woda morska

Odsalana woda morska może być teoretycznie używana do zasilania wód podziemnych i stanowi stabilne źródło niezależne od opadów. W praktyce jednak rzadko się ją stosuje w projektach MAR. Powodem są przede wszystkim **bardzo wysokie koszty** odsalania oraz duże zużycie energii. Proces odsalania generuje też *koncentraty solankowe*, które mogą negatywnie wpływać na środowisko przy ich utylizacji. Dlatego odsolona woda wykorzystywana jest raczej bezpośrednio do zaopatrzenia w wodę pitną, a nie do magazynowania podziemnego – wyjątkiem mogą być regiony szczególnie ubogie w inne zasoby słodkiej wody, gdzie każda metoda uzupełniania wodonośnych jest rozważana.

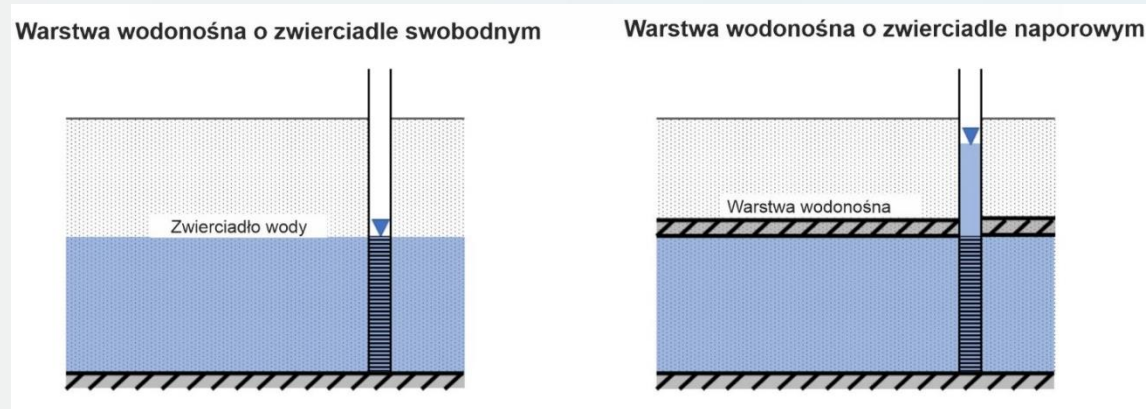


Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



Ocena warstwy wodonośnej

Ocena warstwy wodonośnej pod kątem MAR obejmuje zrozumienie jej typu, budowy geologicznej, parametrów hydrogeologicznych oraz kontekstu geotechnicznego. W warstwach **swobodnych** stosuje się metody infiltracyjne i należy uważać na nadmierne spiętrzenie wody podziemnej. W warstwach **naporowych** konieczne jest **kontrolowane** wtłaczanie wody pod ciśnieniem, aby nie uszkodzić struktury warstw i nie wywołać migracji wód czy innych efektów ubocznych. **Litologia** warstwy determinuje szybkość i ścieżki przepływu – osady porowate sprzyjają przewidywalnej infiltracji, podczas gdy skały spękane wymagają szczegółowego nadzoru. **Potencjał magazynowy** warstwy decyduje o skuteczności MAR, ale jego przekroczenie grozi zaburzeniem równowagi hydrogeologicznej (np. podtopieniami). Również **aspekty geotechniczne i środowiskowe** muszą być ocenione, aby MAR przyniosło zamierzony efekt (uzupełnienie zasobów wód) bez negatywnych konsekwencji dla terenu i infrastruktury.



Dzięki kompleksowej ocenie i monitorowaniu, MAR może być bezpiecznym i efektywnym narzędziem zwiększającym dostępne zasoby wód podziemnych przy minimalizacji ryzyk.



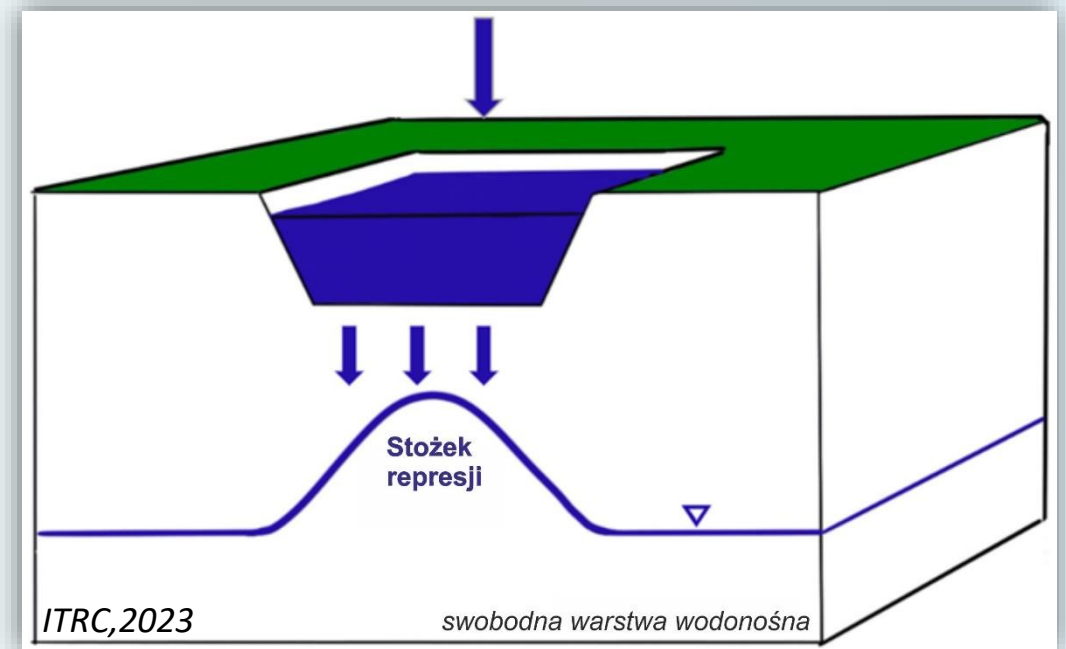
Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



Technologie zasilania warstwy wodonośnej w systemach MAR

Managed Aquifer Recharge (MAR) to zbiór metod celowego zasilania warstw wodonośnych w celu zwiększenia zasobów wód podziemnych. W systemach MAR stosuje się różne technologie umożliwiające sztuczne zasilanie wód podziemnych. Poniżej przedstawiono najczęściej stosowane technologie wraz z ich charakterystyką:

Baseny infiltracyjne to płytkie, naziemne zbiorniki (tzw. pola infiltracyjne) służące do stopniowego przesączania wody w głąb gruntu, najczęściej do płytkich, swobodnych warstw wodonośnych. Charakteryzują się stosunkowo niskim kosztem budowy i eksploatacji w porównaniu z innymi metodami, jednak wymagają odpowiednich warunków gruntowych i regularnej konserwacji, ponieważ są podatne na kolmatację (zamulenie) dna.

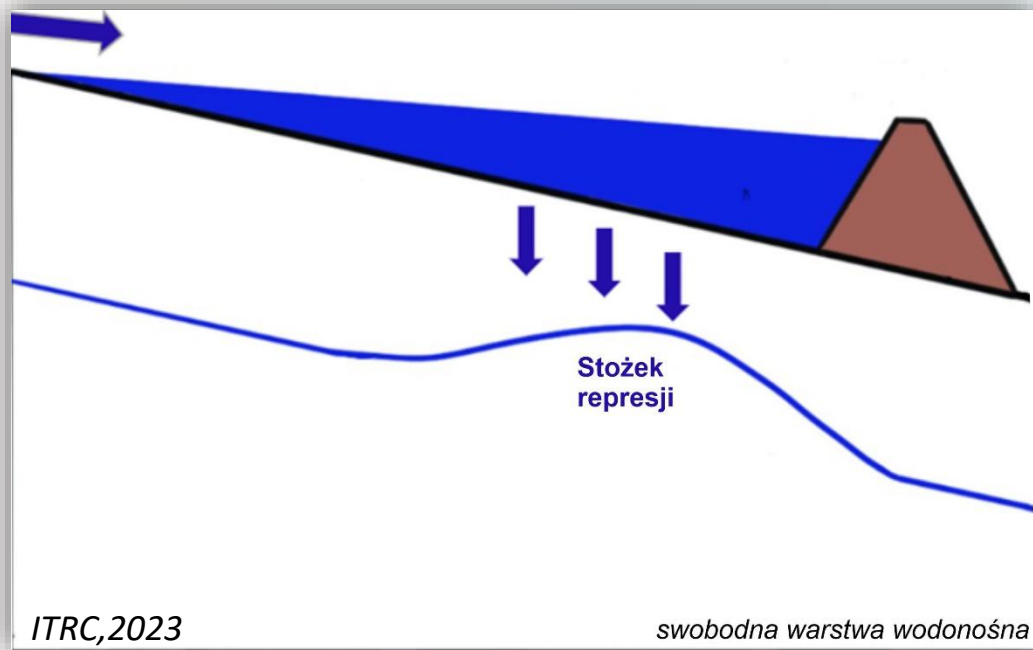


Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



Technologie zasilania warstwy wodonośnej w systemach MAR

Managed Aquifer Recharge (MAR) to zbiór metod celowego zasilania warstw wodonośnych w celu zwiększenia zasobów wód podziemnych. W systemach MAR stosuje się różne technologie umożliwiające sztuczne zasilanie wód podziemnych. Poniżej przedstawiono najczęściej stosowane technologie wraz z ich charakterystyką:



Struktury retencyjne i dywersyjne polegają na wykorzystaniu naturalnych elementów terenu (np. zagłębień, koryt rzek, mokradeł czy istniejących szczelin w skale) jako miejsc infiltracji wody. Poprzez budowę niewielkich zapór (retencyjnych) lub kanałów odprowadzających (dywersyjnych) kieruje się dostępne wody powierzchniowe do takich obszarów, co umożliwia ich wsiąkanie do podłoża. Rozwiązania te mogą być bardzo opłacalne, gdyż korzystają z istniejących uwarunkowań naturalnych, jednak ich zastosowanie ograniczone jest do lokalizacji ze specyficznymi cechami terenu.



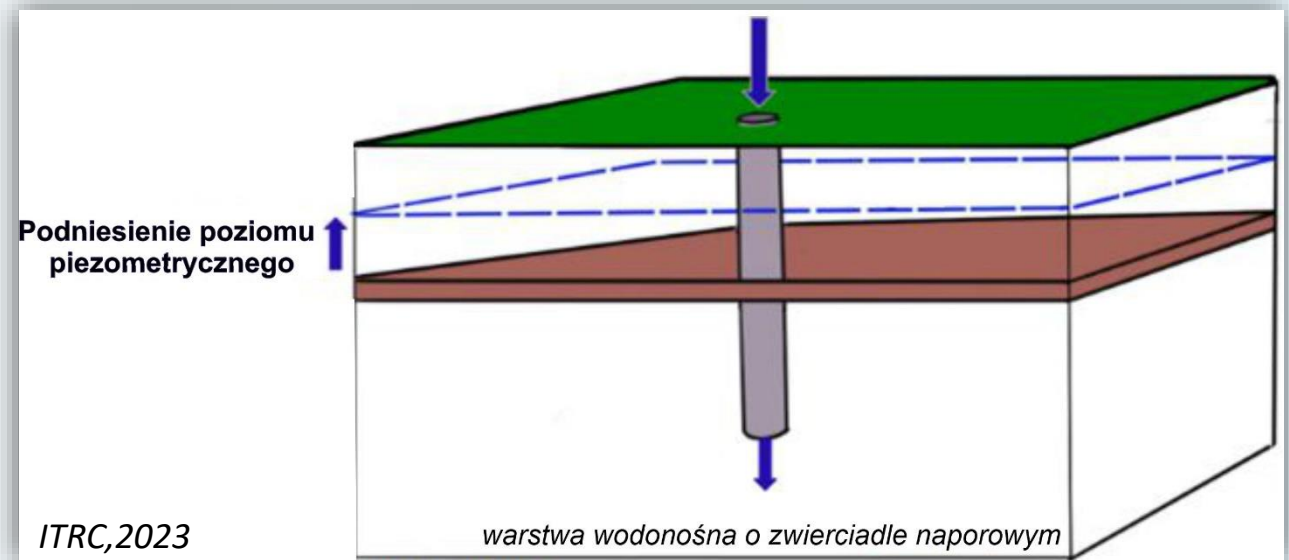
Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



Technologie zasilania warstwy wodonośnej w systemach MAR

Managed Aquifer Recharge (MAR) to zbiór metod celowego zasilania warstw wodonośnych w celu zwiększenia zasobów wód podziemnych. W systemach MAR stosuje się różne technologie umożliwiające sztuczne zasilanie wód podziemnych. Poniżej przedstawiono najczęściej stosowane technologie wraz z ich charakterystyką:

Studnie iniekcyjne (chłonne) to głębokie odwierty służące do wtłaczania wody pod ciśnieniem bezpośrednio do warstw wodonośnych, szczególnie tych przykrytych warstwami nieprzepuszczalnymi. Stosuje się je tam, gdzie naturalna infiltracja z powierzchni jest utrudniona lub niemożliwa. Studnie chłonne pozwalają magazynować wodę głęboko pod ziemią i nie wymagają rozległego terenu na powierzchni, jednak ich budowa oraz utrzymanie są kosztowne (konieczne jest tłoczenie wody i jej uzdatnianie w celu zapobiegania kolmatacji studni).

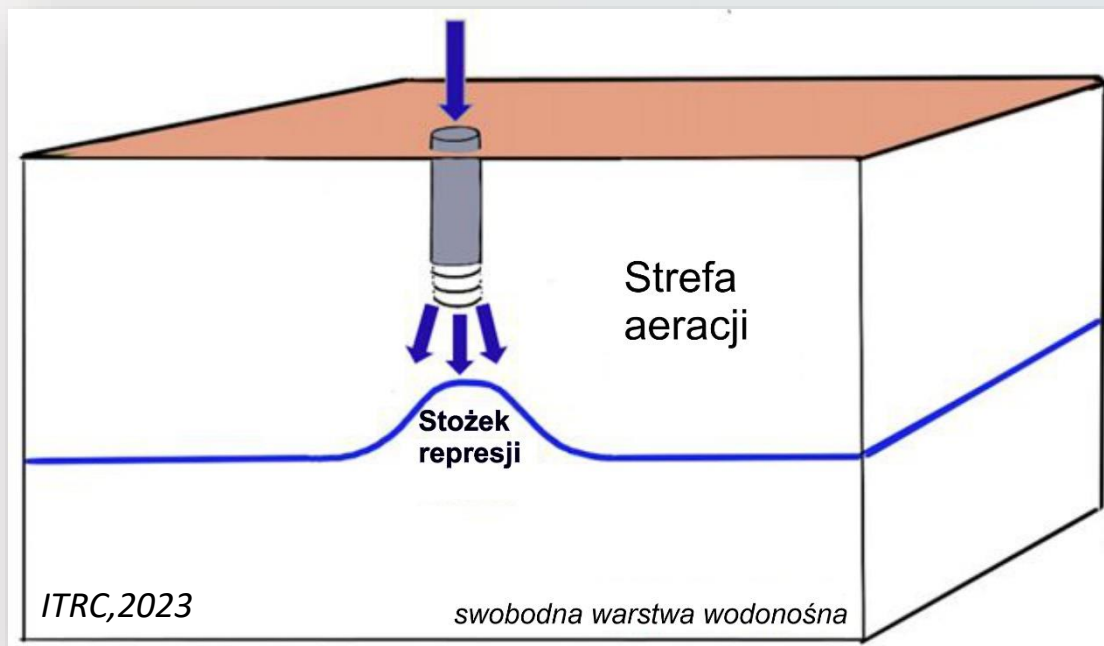


Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



Technologie zasilania warstwy wodonośnej w systemach MAR

Managed Aquifer Recharge (MAR) to zbiór metod celowego zasilania warstw wodonośnych w celu zwiększenia zasobów wód podziemnych. W systemach MAR stosuje się różne technologie umożliwiające sztuczne zasilanie wód podziemnych. Poniżej przedstawiono najczęściej stosowane technologie wraz z ich charakterystyką:



Studnie suche to pionowe odwierty, przez które woda spływa grawitacyjnie w głąb gruntu w celu zasilenia płytkich swobodnych warstw wodonośnych. Działają podobnie jak baseny infiltracyjne czy galerie, ale dzięki pionowej konstrukcji zajmują niewielką powierzchnię i mogą przenikać przez warstwy słabo przepuszczalnej gleby, doprowadzając wodę do bardziej chłonnych utworów głębiej w podłożu. Ich efektywność zależy jednak głównie od hydraulicznej przewodności otaczającego gruntu, co oznacza, że w terenach o niskiej przepuszczalności wydajność studni suchych będzie ograniczona



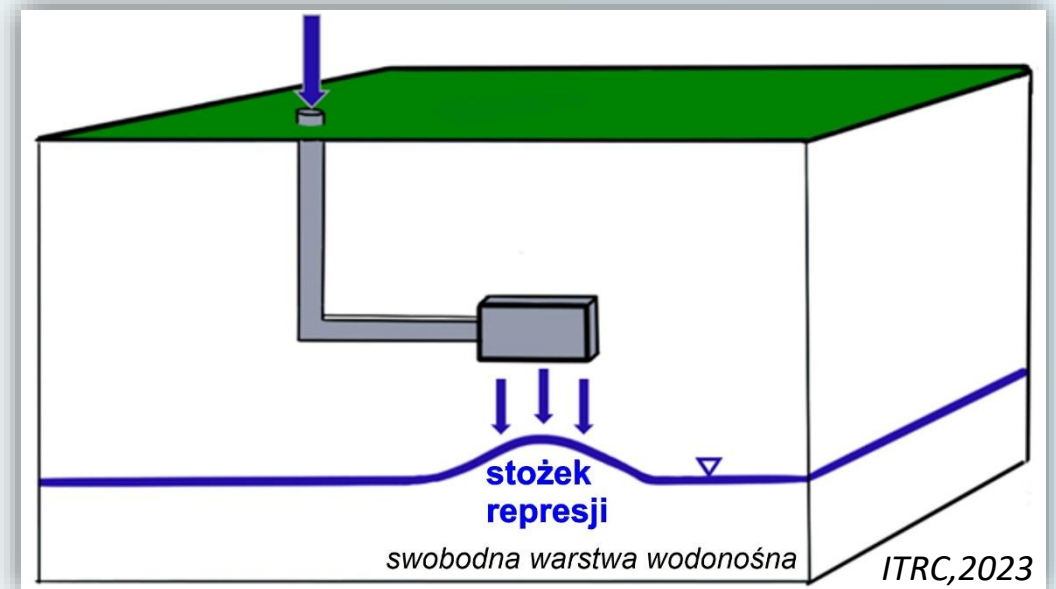
Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



Technologie zasilania warstwy wodonośnej w systemach MAR

Managed Aquifer Recharge (MAR) to zbiór metod celowego zasilania warstw wodonośnych w celu zwiększenia zasobów wód podziemnych. W systemach MAR stosuje się różne technologie umożliwiające sztuczne zasilanie wód podziemnych. Poniżej przedstawiono najczęściej stosowane technologie wraz z ich charakterystyką:

Galerie infiltracyjne to systemy podziemnych perforowanych rur drenarskich lub żwirowych rowów, które rozprowadzają wodę pod powierzchnią terenu i umożliwiają jej szybkie wsiąkanie do rozległych obszarów płytkich warstw wodonośnych. Instalacje te mogą być umieszczane płytko pod ziemią lub nawet w strukturach skalnych; podobnie jak otwarte baseny infiltracyjne są jednak narażone na kolmatację oraz wrastanie korzeni roślin w ich wypełnienie. Ich istotną zaletą jest to, że teren nad galeriami pozostaje dostępny do innych celów, ponieważ cała infrastruktura zlokalizowana jest pod ziemią.



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



UN WATER
22 MARCA
ŚWIATOWY
DZIEŃ WODY



PODSUMOWANIE

Ochrona zasobów wodnych

- Sztuczne zasilanie warstw wodonośnych pozwala na **zwiększenie dostępności wód podziemnych**, zwłaszcza w obszarach narażonych na deficyty wodne.
- Może przeciwdziałać **skutkom zmian klimatu**, ograniczając ryzyko susz oraz zmniejszając straty wody spowodowane parowaniem.

Korzyści ilościowe i jakościowe

- MAR może **zwiększać zasoby wód podziemnych**, ograniczać **subsycję terenu** i wspierać ekosystemy zależne od wód podziemnych.
- Pozwala również na **poprawę jakości wody** poprzez procesy naturalnej filtracji i oczyszczania wód

Wyzwania i potrzeba dalszego rozwoju

- Skuteczność MAR zależy od **odpowiedniej oceny hydrogeologicznej**, monitoringu jakości wód oraz dostosowania technologii do lokalnych warunków.
- Wymagana jest także **świadoma polityka zarządzania wodą**, uwzględniająca zarówno aspekty techniczne, ekologiczne, jak ekonomiczne.

Perspektywy na przyszłość

- W obliczu rosnącego zapotrzebowania na wodę oraz zmian klimatycznych MAR staje się **kluczowym elementem strategii gospodarki wodnej**
- Rozwój technologii i badań nad MAR może przyczynić się do **zrównoważonego zarządzania wodami podziemnymi**, wspierając zarówno ochronę środowiska, jak i potrzeby gospodarcze.



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



Źródła:

Dillon, Peter, Alley, William, Zheng, Yan, Vanderzalm, Joanne, Ward, John, Megdal, Sharon, Hipke, Wesley, Thomas, Paul, Tuthill, David & Carlson, Ronald, 2022. Managed Aquifer Recharge: Overview and Governance.□

Dillon, Peter, Pavelic, Paul, Page, Declan, Beringen, Helen & Ward, John, 2009. Managed Aquifer Recharge: An Introduction. Waterlines Report Series No. 13, National Water Commission.□

Dillon, Peter, Escalante, Enrique, Megdal, Sharon & Massmann, Gudrun, 2021. Managed Aquifer Recharge for Water Resilience.□

Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC), 2023. Managed Aquifer Recharge. Dostępne na: <https://mar-1.itrcweb.org>□

Jordan, Rob, 2016. Freshwater Vulnerability Threatens Developing Nations' Stability, Stanford News Service, 11 stycznia.□

Luxem, Katja, 2017. Managed Aquifer Recharge: A Tool to Replenish Aquifers and Increase Underground Water Storage. American Geosciences Institute.□

Pyne, R. David G., 1995. Groundwater Recharge and Wells: A Guide to Aquifer Storage Recovery. 1st Edition. CRC Press.□

Pyne, R. David G., 2005. Aquifer Storage and Recovery: A Guide to Groundwater Recharge through Wells. 2nd Edition. ASR Press.□

United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2005. Protecting Water Quality from Agricultural Runoff. Nonpoint Source Control Branch.□

DEEPWATER-CE, 2020: Development of an integrated implementation framework for Managed Aquifer Recharge solutions to facilitate the protection of Central European water resources endangered by climate change and user conflict. Dostępne na: <https://programme2014-20.interreg-central.eu/Content.Node/DEEPWATER-CE.html>□



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ!

**W razie pytań proszę o kontakt:
e-mail: kpaw@pgi.gov.pl**

© **PGI-PIB**, Warszawa 2025



**Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna**

