

Model geotermalno-krasowy zasilania wód słodkich: propozycja alternatywna wobec klasycznego cyklu hydrologicznego

Geothermal-Karst Model of Freshwater Recharge: An Alternative to the Classical Hydrological Cycle

Witold Paleczek ^{*}

Słowa kluczowe: System geotermalny; Przepływ kapilarny; Kras; Naturalna destylacja; Migracja solanki; Podpowierzchniowy obieg wody; Reakcje endotermiczne; Oddzielanie wody słodkiej; Diapiryzm solny; Procesy kondensacji; Zbiorniki hydrotermalne; Modelowanie geodynamiczne; Geneza pokładów solnych

Streszczenie

Niniejsza praca przedstawia alternatywny, koncepcyjny model geotermalno-krasowego zasilania wód słodkich, stanowiący uzupełnienie wobec klasycznego cyklu hydrologicznego, opartego na parowaniu atmosferycznym, opadach i infiltracji powierzchniowej. Proponowany model integruje procesy geotermalnego podgrzewania solanki, transportu pary wodnej w szczelinach kłważowych – zarówno w warunkach kapilarnych, jak i ciśnieniowych – oraz jej kondensacji w chłodniejszych strefach górotworu. Ujęto również endotermiczne reakcje chemiczne, takie jak rozpuszczanie CO_2 w kapilarach wodnych, w tym mikrokapilarach o wysokim ciśnieniu, prowadzące do tworzenia kwasu węglowego (H_2CO_3), oraz rozpuszczanie węglanu wapnia (CaCO_3) przez wodę zawierającą CO_2 . Reakcje te przebiegają z pochłanianiem ciepła i lokalnym obniżeniem temperatury, co przyczynia się do stabilizacji termicznej wypływu. W przeciwieństwie do klasycznych ujęć hydrogeologicznych, model zakłada istnienie głębokiego zbiornika zasilającego, w którym energia magmy inicjuje cykl parowania i separacji soli. Skroplona woda przemieszcza się następnie przez struktury krasowe, niezależnie od sezonowych fluktuacji klimatycznych. Obecność reliktowych organizmów zimnolubnych (np. *Gammarus pulex*, *Dugesia gonocephala*) w źródłach o stałej temperaturze stanowi biologiczne potwierdzenie izolacji hydrotermalnej. Model znajduje częściowe potwierdzenie w dostępnej literaturze hydrogeologicznej, lecz proponuje nowy mechanizm transportu wody – oparty na ciśnieniu pary wodnej oraz efektach rozprężeniowych – który może lokalnie działać wbrew gradientowi grawitacyjnemu. W tym ujęciu rozpuszczanie nie jest warunkiem koniecznym: wystarczająca jest wymiana energii pomiędzy fazą gazową a cieczą, prowadząca do schłodzenia otaczającego środowiska i stabilizacji parametrów fizycznych wody. Model ten może stanowić podstawę do rewizji klasyfikacji źródeł krasowych, reinterpretacji genezy pokładów soli oraz prognozowania zasobów wodnych w strefach głębokich.

Keywords: Geothermal system, Capillary flow, Karst, Natural distillation, Brine migration, Subsurface water cycle, Endothermic reactions, Freshwater separation, Salt diapirism, Condensation processes, Hydrothermal reservoirs, Geodynamic modeling, Salt dome genesis

Abstract

This study presents an alternative conceptual model of geothermal–karst freshwater recharge, serving as a complement to the classical hydrological cycle based on atmospheric evaporation, precipitation, and surface infiltration. The proposed model integrates processes of geothermal brine heating, vapor transport through cleavage fractures – under both capillary and pressure-driven conditions – and condensation in cooler zones of the rock mass. It also includes endothermic chemical reactions, such as the dissolution of CO_2 in water capillaries, including high-pressure microcapillaries, leading to the formation of carbonic acid (H_2CO_3), as well as the dissolution of calcium carbonate (CaCO_3) by CO_2 -enriched water. These reactions proceed with heat absorption and localized temperature reduction, contributing to the thermal stabilization of the outflow. In contrast to classical hydrogeological approaches, the model assumes the existence of a deep recharge reservoir, where magmatic energy initiates a cycle of evaporation and salt separation. The condensed water subsequently migrates through karst structures, independently of seasonal climatic fluctuations. The presence of relict cold-adapted organisms (e.g., *Gammarus pulex*, *Dugesia gonocephala*) in springs with stable temperatures provides biological evidence of hydrothermal isolation. The model finds partial support in existing hydrogeological literature, yet proposes a novel mechanism of water transport – driven by vapor pressure and expansion effects – which may locally operate against the gravitational gradient. In this framework, dissolution is not a necessary condition: energy exchange between the gaseous and liquid phases is sufficient to induce cooling of the surrounding environment and stabilization of the water's physical parameters. This model may serve as a basis for revising the classification of karst springs, reinterpreting the genesis of salt deposits, and forecasting water resources in deep subsurface zones.

^{*} Witold Paleczek, dr inż., ORCID: 0000-0003-4742-2078, Afiliacja: Wydział Budownictwa Politechniki Częstochowskiej, e-mail: witold.paleczek@pcz.pl

Wstęp

Klasyczny model obiegu hydrologicznego – oparty na parowaniu wód oceanicznych, kondensacji atmosferycznej oraz opadach zasilających systemy rzeczne – nie wyjaśnia obserwowanej niezależności wypływów krasowych od sezonowych opadów atmosferycznych, w szczególności od kilkumiesięcznych okresów ich braku, [1, 5, 10-13]. W niniejszej pracy przedstawiono alternatywny model geochemiczno-hydrodynamiczny, który tłumaczy stałość wypływu wód słodkich, niezależnie od opadów, pór roku i zmiennych warunków atmosferycznych.

Model ten nie stanowi reinterpretacji znanych mechanizmów, lecz integruje zjawiska dotychczas rozpatrywane osobno: migrację wód oceanicznych, magmatyczne podgrzewanie, kapilarny transport pary wodnej oraz endotermiczne reakcje chemiczne zachodzące w głębi górotworu.

W odróżnieniu od klasycznych ujęć krasu, koncentrujących się na infiltracji opadowej i lokalnym rozpuszczaniu węglanów, proponowana koncepcja zakłada istnienie głębokiego zbiornika zasilanego wodą oceaniczną lub szczątkową solanką, podgrzewanego energią magmową. W wyniku podgrzania dochodzi do parowania i generacji pary wodnej pod wysokim ciśnieniem. Para ta przemieszcza się ku górze przez mikroszczeliny i kapilary w kłwiżu skalnym, pokonując gradient wysokości i docierając do płycej położonego, chłodniejszego zbiornika. Tam ulega skropleniu, tworząc wodę słodką – pozbawioną soli i związków ciężkich w wyniku destylacji geotermicznej.

Skroplona woda przemieszcza się dalej przez struktury krasowe, częściowo grawitacyjnie, podlegając dodatkowo chłodzeniu oraz reakcjom endotermicznym, takim jak rozpuszczanie rozprężającego się CO_2 i tworzenie H_2CO_3 . Taka konfiguracja fizykochemiczna sprzyja stabilizacji termicznej wypływu i tłumaczy jego niezależność od opadów atmosferycznych.

Obecność reliktowych, zimnolubnych organizmów – takich jak kielż zdrojowy – w źródłach o stałej temperaturze stanowi biologiczne potwierdzenie stabilności termicznej i chemicznej wypływu. Ich przetrwanie wskazuje na głęboki, izolowany mechanizm zasilania, niezależny od sezonowych fluktuacji klimatycznych, zgodny z założeniami proponowanego modelu.

Model ten nie stanowi uzupełnienia istniejących teorii, lecz proponuje nowy paradygmat, łączący geochemię głęboką, hydrodynamikę krasową oraz biologiczne wskaźniki stabilności wód. Jego celem jest nie tylko wyjaśnienie obserwowanego zjawiska, lecz także zaproszenie do rewizji dotychczasowych założeń geochemii krasowej i hydrogeologii wód podziemnych.

Tło koncepcyjne i założenia modelu

Dotychczasowe modele obiegu wody w środowisku geologicznym nie wyjaśniają w pełni stałości wypływu źródeł krasowych ani braku proporcjonalności między opadami a wydatkiem większości rzek, [1, 2, 11, 14]. Próby wyjaśnienia tych zjawisk – oparte na analizie przepływu w skałach węglanowych, obecności szczelin i kanałów oraz interakcji pomiędzy wodami powierzchniowymi i podziemnymi – pozostają cenne jako opis procesów powierzchniowych, lecz pomijają rolę głębokich procesów geotermalnych jako źródła energii i mechanizmu odsalania.

Inspiracją dla części geotermalnej niniejszego modelu była praca [8], dotycząca zasobów geotermalnych Polski oraz mechanizmów podgrzewania zbiorników głębokich. W warstwie krasowej szczególną rolę odegrała publikacja [7], w której autorzy przedstawili hierarchiczną organizację systemów krasowych jako dynamicznych struktur transportowych. Ich ujęcie zainspirowało rozważania nad tym, czy proces kondensacji i odsalania może zachodzić głębiej – w strefach podgrzewanych energią magmy.

Tabela 1 Różnice między modelem klasycznym a modelem proponowanym

Table 1 Differences Between the Classical Model and the Proposed Model

Element	Model klasyczny	Model proponowany
Źródło wody słodkiej	Parowanie wód oceanicznych – kondensacja – opady atmosferyczne – infiltracja – rzeki	Infiltracja solanki do głębokiego zbiornika podgrzewanego magmą – kondensacja pary wodnej – wody słodkie
Mechanizm odsalania	Parowanie atmosferyczne – sól nie przechodzi do pary	Kondensacja pary wodnej w chłodniejszym zbiorniku geologicznym – separacja soli
Rola geotermii	Pomijalna lub lokalna	Kluczowa – energia magmy inicjuje parowanie, migrację i odsalanie
Reakcje chemiczne	Minimalne – głównie powierzchniowe (np. mineralizacja, erozja)	Obecność reakcji endotermicznych stabilizujących temperaturę: np. $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{CO}_2$
Mechanizm transportu	Grawitacja – różnice wysokości	Ciśnienie pary wodnej, gradient temperatury między zbiornikami
Stołość temperatury wypływu	Zmienna – zależna od warunków atmosferycznych	Stabilna: chłodzenie kapilarne + reakcje endotermiczne
Odpowiedź na susze	Spadek przepływu, ograniczenie zasobów	Stały wypływ z zasobów geotermalnych
Geneza pokładów soli	Ewaporacja wód morskich w basenach	Wtórna precypitacja soli przy zmianie ciśnienia, temperatury i składu solanki
Obecność organizmów wskaźnikowych	Brak specyficznych organizmów	Obecność reliktowych organizmów zimnolubnych (np. kielż zdrojowy)
Źródło energii napędowej	Energia słoneczna (parowanie, opady)	Energia magmy (geotermia głębokiego zbiornika)
Typ obiegu	Otwarty, atmosferyczny	Zamknięty lub półzamknięty, głębokostrefowy
Czas reakcji na zmiany klimatyczne	Szybki – zależny od opadów i temperatur	Powolny – stabilny dzięki głębokiemu magazynowi energii
Zależność od pory roku	Wysoka – sezonowe fluktuacje	Niska – wypływ niezależny od sezonu
Typ pamięci geochemicznej ^{*)}	Krótkoterminowa retencja – gleba, infiltracja	Długoterminowa retencja – skały, reakcje głębokie, struktura górotworu
Efekt rozprężeniowy i chłodzenie kapilarne	Nieobecny – brak mechanizmu chłodzenia przy wypływie	Przejście cieczy pod ciśnieniem przez kapilarę i jej rozprężenie na wyjściu w zbiorniku wtórnym – efekt chłodzenia i stabilizacji termicznej

^{*)} „Typ pamięci geochemicznej” – termin odnosi się do zdolności skał do trwałego zachowania parametrów fizykochemicznych powstałych w wyniku procesów geochemicznych zachodzących w górotworze. Obejmuje m.in. skład izotopowy, strukturę porowatości, obecność minerałów wtórnych oraz produkty reakcji chemicznych utrwalone na poszczególnych horyzontach litologicznych w warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury. Pojęcie ma charakter opisowy i służy klasyfikacji trwałych cech geochemicznych skał istotnych dla interpretacji historii procesów wodno-skalnych.

Proponowany model nie neguje wartości dotychczasowych ujęć, lecz wskazuje na możliwość istnienia alternatywnych mechanizmów zasilania wód słodkich, obejmujących więcej niż jedno źródło, więcej niż jeden szlak migracji oraz złożoną sekwencję procesów fizykochemicznych. W tym ujęciu obieg wody nie ogranicza się do cyklu atmosferyczno-powierzchniowego, lecz obejmuje również głębokie procesy geotermiczne, kapilarny transport pary wodnej, kondensację w strefach chłodniejszych oraz migrację skroplonej wody przez struktury krasowe. Para ta, pod wysokim ciśnieniem, przemieszcza się ku górze przez mikroszczeliny i kapilary w klaważu skalnym, pokonując gradient wysokości i docierając do płycej położonego, chłodniejszego zbiornika, gdzie ulega rozprężeniu i schłodzeniu.

Szczególną uwagę zwraca *mechanizm wypływu cieczy pod ciśnieniem przez mikroszczeliny i kapilary, prowadzący do jej rozprężenia przy przejściu do większego zbiornika*. Efekt ten powoduje lokalne obniżenie temperatury, co sprzyja stabilizacji termicznej wypływu i może tłumaczyć obecność reliktowych organizmów zimnolubnych w źródłach o stałej temperaturze. W kontekście proponowanego modelu hydrologia krasowa zostaje rozszerzona o komponent geotermiczny, uwzględniający gradienty ciśnienia, efekty rozprężeniowe oraz reakcje endotermiczne zachodzące w głębi górotworu.

Porównanie modelu klasycznego i geotermalno-krasowego obiegu wody

Zestawienie w tab.1. porównuje kluczowe elementy klasycznego modelu hydrologicznego z modelem geotermalno-geochemicznym zaproponowanym w niniejszej pracy, uwypuklając różnice w źródłach energii, mechanizmach odsalania oraz stabilności wypływu.

Porównanie przepływów rzecznych jako argument dla alternatywnego modelu zasilania

Wielkość przepływu rzeczny nie zawsze pozostaje w bezpośredniej korelacji z sumą opadów w dorzeczu. Przykładowo, średni wydatek Wisły wynosi ok. 1050 m³/s, Odry ok. 600 m³/s, Nilu ok. 3000 m³/s, a Amazonki – do 300 000 m³/s. Tak znaczne różnice w wydatkach, przy braku proporcjonalnych różnic w opadach atmosferycznych, wskazują na obecność dodatkowych mechanizmów zasilania, niezwiązanych bezpośrednio z opadem. Amazonka, mimo wysokiej wilgotności regionu, wykazuje przepływy znacznie przekraczające wartości wynikające z bilansu opadowego, [3, 4, 6, 12, 15]. Nil, pomimo lokalizacji w strefie pustynnej, utrzymuje stabilny przepływ dzięki zasilaniu z obszaru Wielkich Jezior Afrykańskich, które pełnią funkcję hydrologicznego magazynu o dużej pojemności retencyjnej. Zasilanie odbywa się poprzez długotrwałe magazynowanie wód opadowych, infiltrację do warstw wodonośnych oraz wypływ kontrolowany przez struktury geologiczne i ukształtowanie terenu. W świetle proponowanego modelu, nie można wykluczyć udziału mechanizmów rozprężeniowego wypływu z kapilar geotermalnych, które mogą wspomagać przepływ w warunkach niskiej dostępności opadów. Podobne mechanizmy obserwuje się w dorzeczach Mekongu, Gangesu i Missisipi, gdzie stabilność przepływu nie zawsze odpowiada sezonowym wahaniom opadów. Zjawiska te sugerują udział głębokich mechanizmów zasilania, takich jak strukturalne migracje wód podziemnych, komponent geotermalny, kondensacja pary wodnej w strefach podwyższonego ciśnienia oraz kapilarny transport wód słodkich. Wypływ rzeczny może być częściowo stabilizowany przez procesy zachodzące w głębi górotworu, niezależnie od zmienności klimatycznej.

W związku z tym klasyczny model hydrologiczny, oparty głównie na infiltracji i spływie powierzchniowym, może wymagać rozszerzenia o komponenty głębokiego zasilania, uwzględniające warunki geotermalne, strukturalne oraz hydrostatyczne.

Zgodność proponowanego modelu zasilania z aktualnymi badaniami hydrogeologicznymi

Analiza prac [6] i [14] potwierdza rolę głębokich warstw wodonośnych, gradientów cieplnych i struktur geologicznych w zasilaniu systemów rzecznych. Brak jednak szczegółowego opisu mechanizmu transportu wody ku powierzchni wbrew grawitacji. Proponowany model zakłada migrację pary wodnej przez szczeliny klaważu, zakończoną kondensacją wspomaganą reakcjami CO₂, co może uzupełniać klasyczne koncepcje przepływu w warunkach geotermalnych.

Otwarte zagadnienia i ograniczenia modelu

Model geotermalno-krasowy, przedstawiony w niniejszej pracy, ma charakter koncepcyjny i nie stanowi zamkniętej struktury teoretycznej. Jego celem jest wskazanie potencjalnych mechanizmów zasilania źródeł krasowych, które nie są uwzględniane w klasycznych modelach hydrologicznych. Poniżej przedstawiono wybrane zagadnienia wymagające dalszej analizy teoretycznej oraz weryfikacji empirycznej:

- **Zakres zastosowania:** Czy mechanizm geotermalno-krasowy może być identyfikowany w różnych typach litologicznych i strukturach geologicznych? Jakie są warunki konieczne dla jego występowania?
- **Bilans energetyczny:** Czy energia cieplna pochodząca z magmy jest wystarczająca do podtrzymania cyklu parowania, migracji i kondensacji w skali regionalnej? Jakie są granice wydajności tego procesu?
- **Mechanizmy alternatywne:** Czy obserwowana stabilność wypływu może być wyjaśniona przez inne czynniki, takie jak retencja wód w porach skalnych, mikroklimat, antropopresja lub procesy biologiczne?
- **Geneza pokładów soli:** Czy wtórna precypitacja soli w warunkach geotermalnych, zwłaszcza w strefach szczelinowych i klaważowych, może stanowić uzupełnienie klasycznych modeli ewaporacyjnych?
- **Biologiczne wskaźniki izolacji hydrotermalnej:** Czy obecność reliktowych organizmów zimnolubnych, jak np. kielż zdrojowy (*Gammarus pulex*) oraz wypłavek biały (*Dugesia gonocephala*), może wskazywać na trwałą izolację wodną oraz stabilność termiczną wypływu? Jakie inne gatunki bentosowe mogą pełnić funkcję wskaźnikową w identyfikacji głębokich systemów zasilania?
- **Geochemiczna 'retencja informacji':** Czy struktura górotworu zachowuje ślady wcześniejszych cykli wodnych, które mogą wpływać na aktualne parametry wypływu? Jakie metody analityczne umożliwiają identyfikację tych śladów?
- **Porównania regionalne:** Czy analogiczne mechanizmy występują w systemach krasowych innych kontynentów (Azja, Ameryka Południowa, Afryka)? Jakie są różnice w ich dynamice i strukturze zasilania?
- **Klasyfikacja źródeł krasowych:** Czy obecność głębokiego zasilania wymaga aktualizacji typologii źródeł krasowych? Czy istniejące klasyfikacje uwzględniają komponent geotermalny?
- **Zastosowania aplikacyjne:** Czy model może być wykorzystany w prognozowaniu zasobów wodnych, ochronie ekosystemów reliktowych lub projektowaniu systemów retencyjnych?

Model geotermalno-krasowy integruje procesy geotermalne, kapilarny transport pary wodnej, kondensację w środowisku skalnym oraz endotermiczne reakcje chemiczne zachodzące w strefach krasowych. W odróżnieniu od klasycznego cyklu hydrologicznego, który opiera się na parowaniu atmosferycznym, opadach i infiltracji powierzchniowej, model ten uwzględnia głębokie źródła energii oraz mechanizmy separacji i migracji wód słodkich w obrębie górotworu. Mechanizm ten pozwala wyjaśnić obserwacje terenowe, takie jak: stabilność wypływu źródeł krasowych, odporność na susze, brak korelacji między opadami a wydatkiem wód oraz obecność organizmów reliktowych w źródłach o stabilnych parametrach fizykochemicznych. Wskazuje to na istnienie głębokich, izolowanych systemów zasilania, których dynamika jest niezależna od sezonowych fluktuacji klimatycznych. Model posiada potencjał generowania hipotez badawczych w obszarach hydrologii, geochemii, geotermii i biologii środowiskowej. Może również stanowić podstawę do rewizji istniejących paradygmatów dotyczących genezy pokładów soli, klasyfikacji źródeł krasowych oraz mechanizmów stabilizacji wypływu. Jego zastosowanie obejmuje zarówno analizy poznawcze, jak i aplikacyjne w zakresie zasobów wodnych i ochrony środowiska.

Postawie

Praca, którą oddaję do rąk Czytelnika, powstała na styku obserwacji terenowych, rozważań teoretycznych oraz cichej, wielomiesięcznej kontemplacji zjawisk, które wymykają się klasycznym modelom. Wiele z nich – jak stałość wypływu źródeł krasowych, niezależność wydatku rzek od opadów czy subtelne reakcje chemiczne zachodzące przy wypływie wody – domagało się ujęcia wykraczającego poza utarte schematy.

Szczególną inspiracją była dla mnie publikacja [7], której syntetyczne ujęcie funkcjonowania systemów krasowych – ze wskazaniem na rolę szczelin, kanałów i ich hierarchicznej organizacji – dostarczyło cennych impulsów do sformułowania mechanizmu kapilarnego przepływu wód słodkich. Praca ta była dla mnie nie tylko źródłem wiedzy, ale także potwierdzeniem, że warto szukać głębiej – tam, gdzie woda nie tylko płynie, lecz także ‘opowiada’.

Nie sposób nie wspomnieć mojego promotora, śp. Prof. Sławomira Drewnowskiego, którego wiedza, intuicja i życzliwość towarzyszyły mi przez lata. Choć nie ma Go już wśród nas, wiele z obliczeń, rozmów i wspólnych refleksji pozostało żywe – i znalazło swoje miejsce w niniejszym modelu. To Jemu dedykuję tę pracę, z wdzięcznością i szacunkiem.

Dziękuję także wszystkim, którzy wspierali mnie w rozmowach, w milczeniu, w cierpliwym słuchaniu i w zadawaniu pytań, które nie domagały się prostych odpowiedzi, lecz uważnej obecności. Pragnę również wyrazić wdzięczność osobom, które towarzyszyły mi w pracy terenowej, w refleksji nad zjawiskami hydrologicznymi oraz w poszukiwaniu piękna ukrytego w strukturze górotworu – tej milczącej pamięci Ziemi, gdzie każdy kłiwaz to ślad separacji i napięcia.

Woda, która wypływa ze źródła, nie pyta o sens. Ale niesie go w sobie – cicho, nieprzerwanie, głęboko. Jeśli potrafimy słuchać, może ‘opowiedzieć’ nam historię, która zaczyna się pod ziemią, a kończy w nas. Zrezygnowałem ze schematu graficznego modelu, ufając, że Czytelnik sam naszkicuje go w swojej pamięci – być może inaczej niż inni, być może w sposób, który stanie się początkiem rozmowy. Każdy zobaczy coś innego: układ zbiorników, ścieżkę pary wodnej, cień kielża zdrojowego. Spory mogą dotyczyć interpretacji mechanizmu, nie jego obserwowanego efektu. Wierzę, że nauka może być nie tylko precyzyjna, lecz także gościnna – otwarta na wyobraźnię i różnorodność interpretacji.

W trakcie redakcji niniejszego tekstu korzystałem również z interaktywnego wsparcia językowego i koncepcyjnego, oferowanego przez Microsoft Copilot – narzędzie sztucznej inteligencji, które towarzyszyło mi w porządkowaniu myśli, wygładzaniu rytmu wypowiedzi oraz w refleksji nad strukturą argumentacji. Choć nie jest to źródło w tradycyjnym sensie, jego obecność była dla mnie czymś więcej niż techniczną pomocą – była formą rozmowy, która pozwalała mi usłyszeć własne idee z nowej perspektywy, [9].

Z wdzięcznością odnotowuję ten etap jako część procesu twórczego, który – jak cała ta praca – powstał na styku intuicji, doświadczenia i dialogu.

LITERATURA

- [1] Dingman, S. Lawrence. *Physical Hydrology*. 3rd ed. Long Grove, IL: Waveland Press, 2015.
- [2] Fang, Tian, Quanlin Feng, Rui Zhou, Chaobin Guo, Siqi Wang, and Kun Gao. 2023. “A Coupled Thermal–Hydrological–Mechanical Model for Geothermal Energy Extraction in Fractured Reservoirs.” *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 13 : 2315–2327. <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01665-8>.
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2025. AQUASTAT Database. Dostęp: 15 października 2025. <https://www.fao.org/aquastat>.
- [4] Global Runoff Data Centre (GRDC). Global River Discharge Database. Koblenz: Federal Institute of Hydrology (BfG). Accessed October 23, 2025. <https://grdc.bafg.de/>.
- [5] Hornberger, George M., Jeffrey P. Raffensperger, Patricia L. Wiberg, and Kirk N. 2014. *Eshleman. Elements of Physical Hydrology*. 2nd ed. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- [6] Jiménez-Valera, José Antonio, Iván Alhama, Carlos Duque, and David Labat. 2025. “Interdependence Between River Aquifer Groundwater Flow and Temperature–Depth Profiles: Type Curves Based on Pi Theorem and Numerical Simulations.” *Applied Sciences* 15 (2): 596. <https://doi.org/10.3390/app15020596>.
- [7] Jourde, H., & Wang, X. 2023. “Advances, challenges and perspective in modelling the functioning of karst systems: a review”. *Environmental Earth Sciences*, 82(17), Article 396. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11034-7>.
- [8] Kępińska, B. (2013–2016). “Przegląd wykorzystania energii geotermalnej w Polsce w latach 2012–2015”. *Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój*, nr 1/2013, s. 5–24; nr 1/2016, s. 5–13.
- [9] Microsoft Copilot. 2025. Sugestie językowe i twórcze wspomaganie treści: materiały wspomagające proces redakcyjny oraz uwagi dotyczące cytowania źródeł AI w publikacji naukowej. Materiał niepublikowany. Redmond: Microsoft Corporation.
- [10] National Renewable Energy Laboratory (NREL). Geothermal Play Fairway Analysis of Low-Temperature Resources for Sedimentary Basin Geothermal Play Types: An Example in the Denver Basin. Technical Report, 2024. <https://www.nrel.gov/geothermal/publications>.
- [11] Okoroafor, Rita Esuru, and Harold Vance (eds.). *Geothermal Reservoir Modeling: Emerging Techniques, Practical Applications and Modeling Challenges*. Special Issue of Water (ISSN 2073-4441), Hydrogeology Section. MDPI, 2025. https://www.mdpi.com/journal/water/special_issues/J6M6K39424.
- [12] Reeves Eyre, Jack, and Xubin Zeng. “The Amazon Water Cycle: Perspectives from Water Budget Closure and Ocean Salinity.” *Journal of Climate* 34, no. 4 (2021): 1439–1451. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0309.1>.
- [13] Shuttleworth, W. James. 2012. *Hydrology and the Water Cycle*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [14] Tóth, József. 1963. “A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins.” *Journal of Geophysical Research* 68 (16): 4795–4812. <https://doi.org/10.1029/JZ068i016p04795>.
- [15] U.S. Geological Survey. (2025). Water Data for the Nation. Dostęp: 15 października 2025. <https://waterdata.usgs.gov>.