

Energetyka geotermalna

Dr inż. Tomasz Hałon

Historia i rozwój energetyki geotermalnej

Charakterystyka procesu powstawania źródeł energii geotermalnej

Klasyfikacja źródeł

Prehistoria

- ▶ 6 - 2 mln lat temu - pierwsi „ludzie”.
- ▶ 1,8 mln lat temu - wykorzystanie ciepłych źródeł do kąpieli leczniczych oraz prawdopodobnie do **gotowania pokarmów**.
- ▶ 1 mln lat temu - wykorzystanie ognia w sposób kontrolowany



Historia - kult

- ▶ Od początków historii ciepłe źródła były uznawane za miejsce przebywania bóstw.
- ▶ Starożytni Rzymianie oraz ludy rdzenne Ameryki chętnie zakładały miasta lub osady w pobliżu ciepłych źródeł



Historia - wellness & spa

- ▶ III - I wiek p.n.e. - Teplice na terenie Czech używane przez Celtów

Ciepłe źródła:

- ▶ Starożytna Grecja, Rzym, Chiny, Japonia, Ludy Rdzenne Ameryk
- ▶ Użycie bezpośrednio niezabudowanych źródeł
- ▶ Termy, Łaźnie
- ▶ Picie i przemywanie



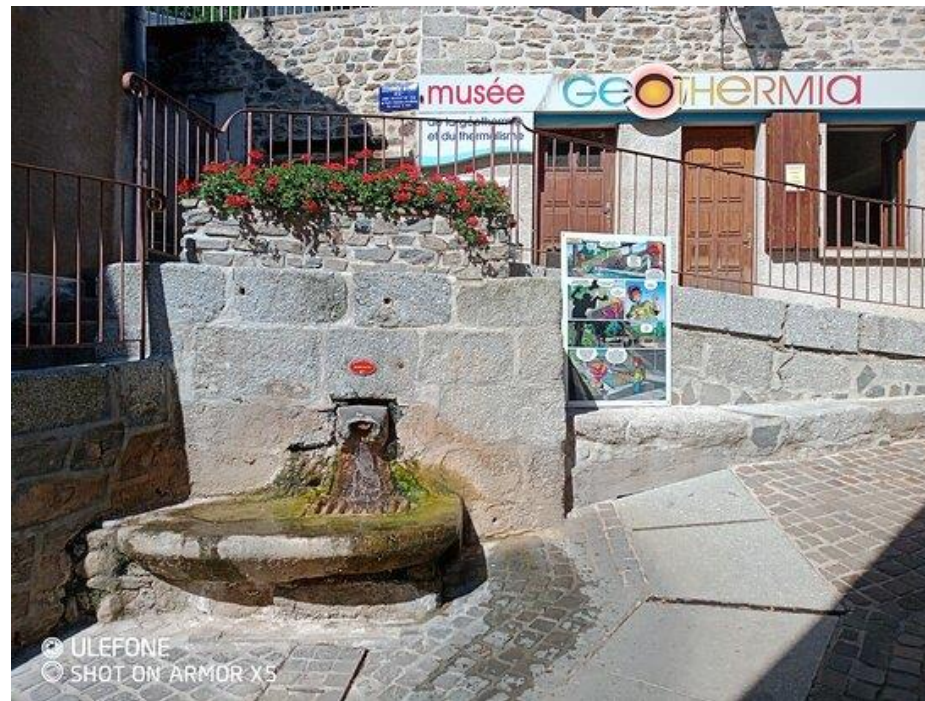
Historia - Ogrzewanie

- ▶ Wykorzystywanie ciepłych źródeł - dostarczanie ciepłej wody za pomocą tuneli, akweduktów, rur kamiennych, drewnianych, ołowianych.
- ▶ Pompeje - ok. 0 rok n.e. sieć ciepłownicza dostarczająca ciepło do domów i łaźni.



Historia - Ogrzewanie

- ▶ XIV wiek Chaudes-Aigues - najstarsza geotermalna sieć ciepłownicza nadal w użytku- rozprowadzenie wody ze źródeł o temp. 40-80°C za pomocą drewnianych rur w dół zbocza. System zaopatrywał ponad 100 budynków oraz miejskie fontanny.



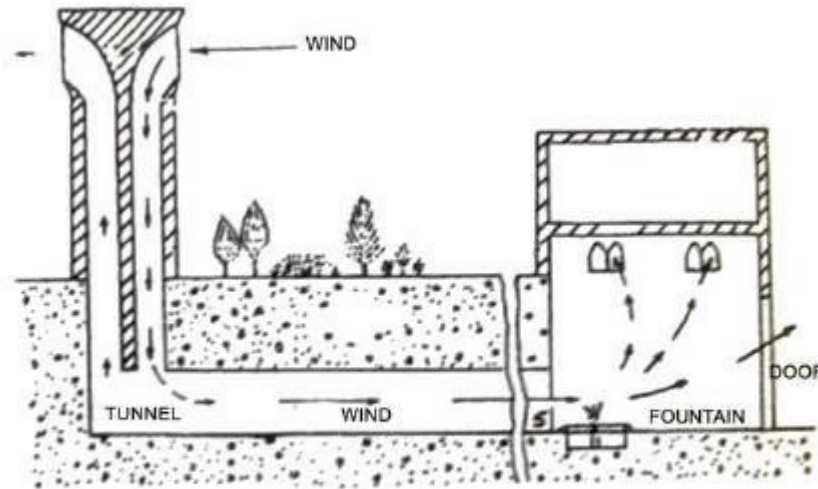
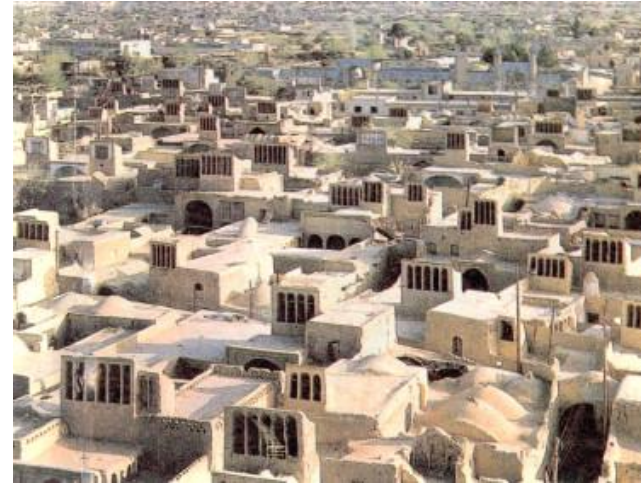
Historia - obrona oraz rolnictwo

- ▶ Wykorzystanie wody ciepłych źródeł do roztopienia wody w fosie.
- ▶ IV - VI wiek - dostarczanie ciepłej wody z gorących źródeł w starożytnych Chinach pozwalało na skrócenie okresu wegetacji i wcześniejsze oraz częstsze zbiory



Historia - chłodzenie

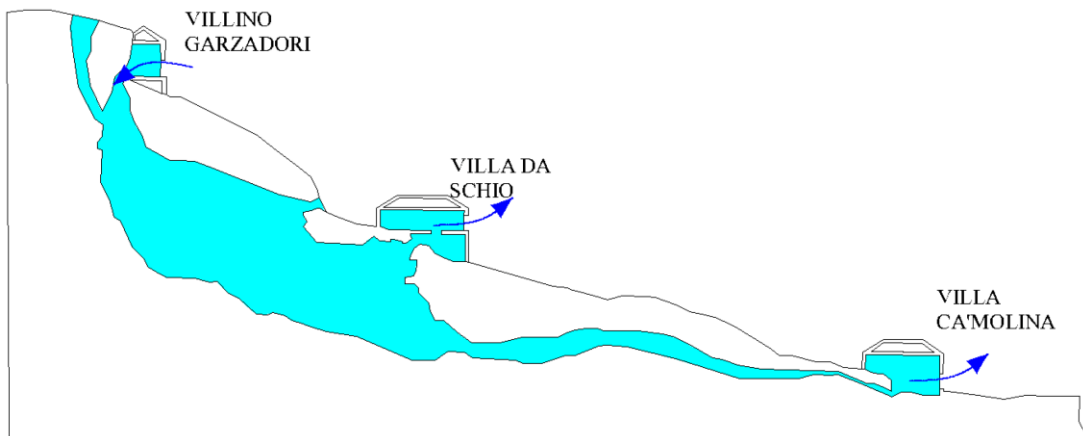
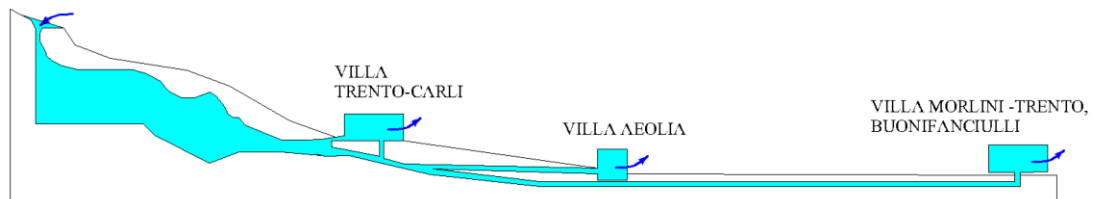
Wykorzystanie stałej temperatury gruntu w ciągu roku.



Four side wind-catcher functional section

Historia - chłodzenie

Wykorzystanie stałej temperatury gruntu w ciągu roku.

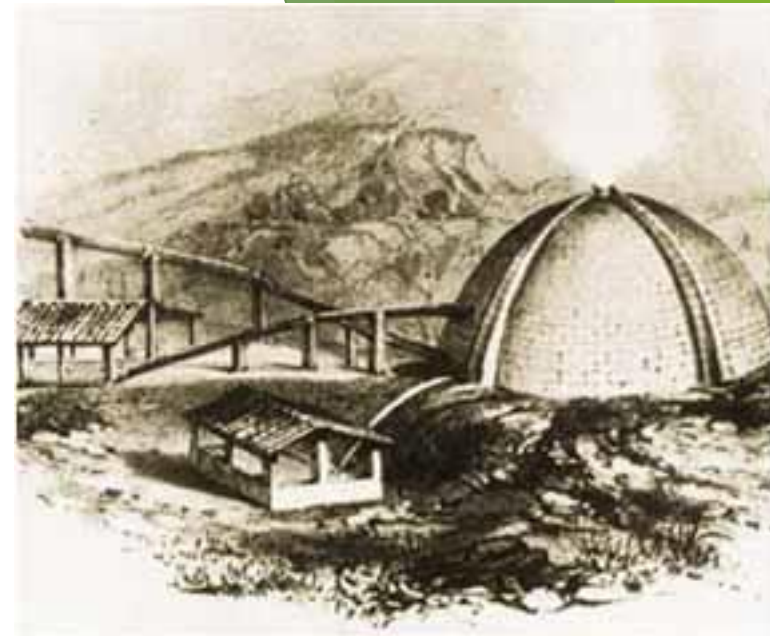


Włochy, XV - XVII wiek



Historia - Larderello, Włochy

- ▶ 1827 - pierwsza fabryka wykorzystująca ciepło geotermalne do produkcji boru (kwas borowy)
- ▶ 1904 - pierwsza elektrownia - zasilenie 5 żarówek
- ▶ 1913 - Elektrownia o mocy 250 kW
- ▶ 1915 - Elektrownia o mocy 15 MW
- ▶ 1939 - 66 MW
- ▶ Teraz - 34 elektrownie o łącznej mocy 800 MW
(2% energii elektrycznej Włoch)



Historia - XIX wiek i później

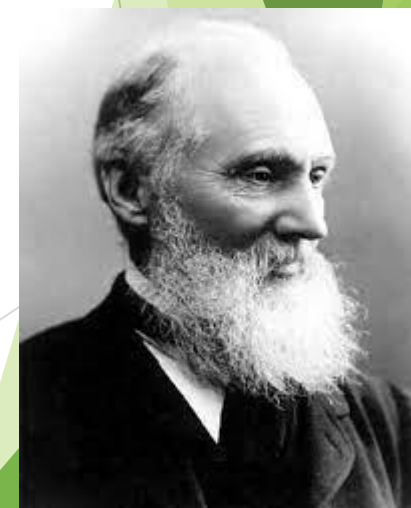
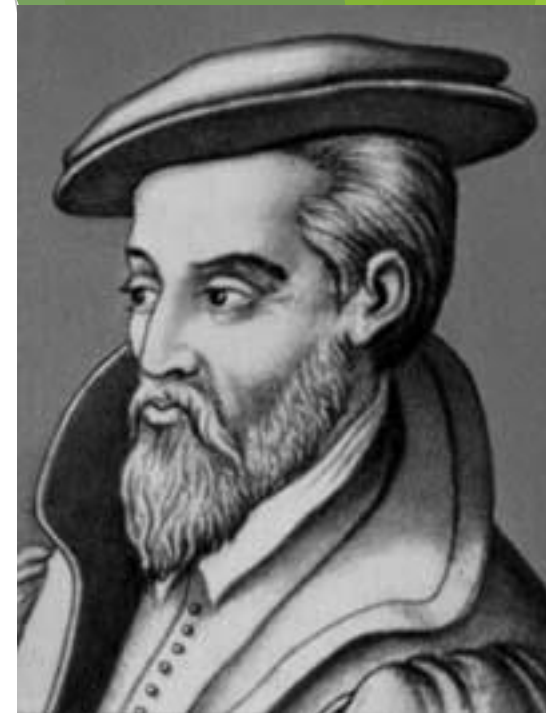
- ▶ Koniec XIX wieku - Sieci ciepłownicze w wielu miastach USA - zarówno ciepłe źródła jak i gejzery
- ▶ 1920 - rozpoczęcie na szeroką skalę ogrzewania Islandii (dziś 53% energii pochodzi z geotermii)
- ▶ 1952 - Rozwój geotermii w Nowej Zelandii
- ▶ 1940 - pierwsze poziome gwc dla pompy ciepła - USA
- ▶ 1974 - pierwsze odwierty pod pionowe gwc dla pomp ciepła - Niemcy

System działa do dziś. W 2005 roku doszło do pierwszej awarii.

- ▶ 1980 - Spory rozwój głębokiej geotermii w Niemczech - po kilku latach zatrzymany ze względu na ceny
- ▶ 2003 - powrót do energii geotermalnej w Niemczech (budowa elektrowni)

Historia - badania

- ▶ 1530 - Georgius Agricola zauważa że im niżej pod powierzchnią, tym wyższa temperatura.
- ▶ 1740 - pierwszy pomiar temperatury pod ziemią w kopalni - Belfort.
- ▶ 1791 - pierwszy opis gradientu (stopnia) geotermicznego. Aleksander von Humboldt zauważył wzrost temperatury o $3,8^{\circ}\text{C}$ na każde 100 m we Freibergu.
- ▶ 1831 - 1863 - pomiary w wielu odwiertach do 1000 m. Potwierdzenie gradientu na poziomie ok. $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.
- ▶ 1839 - Neuffen, pierwsza zanotowana anomalia geotermalna ($9^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$).
- ▶ Połowa XIX wieku - William Thomson (Kelvin) zaproponował hipotezę, że Ziemia wychładza się stopniowo od czasu swojego powstania.
- ▶ 1913 - Arthur Holmes zauważa, że wpływ na temperaturę planety może mieć rozpad jądrowy. Potwierdzono to w 2002 roku.



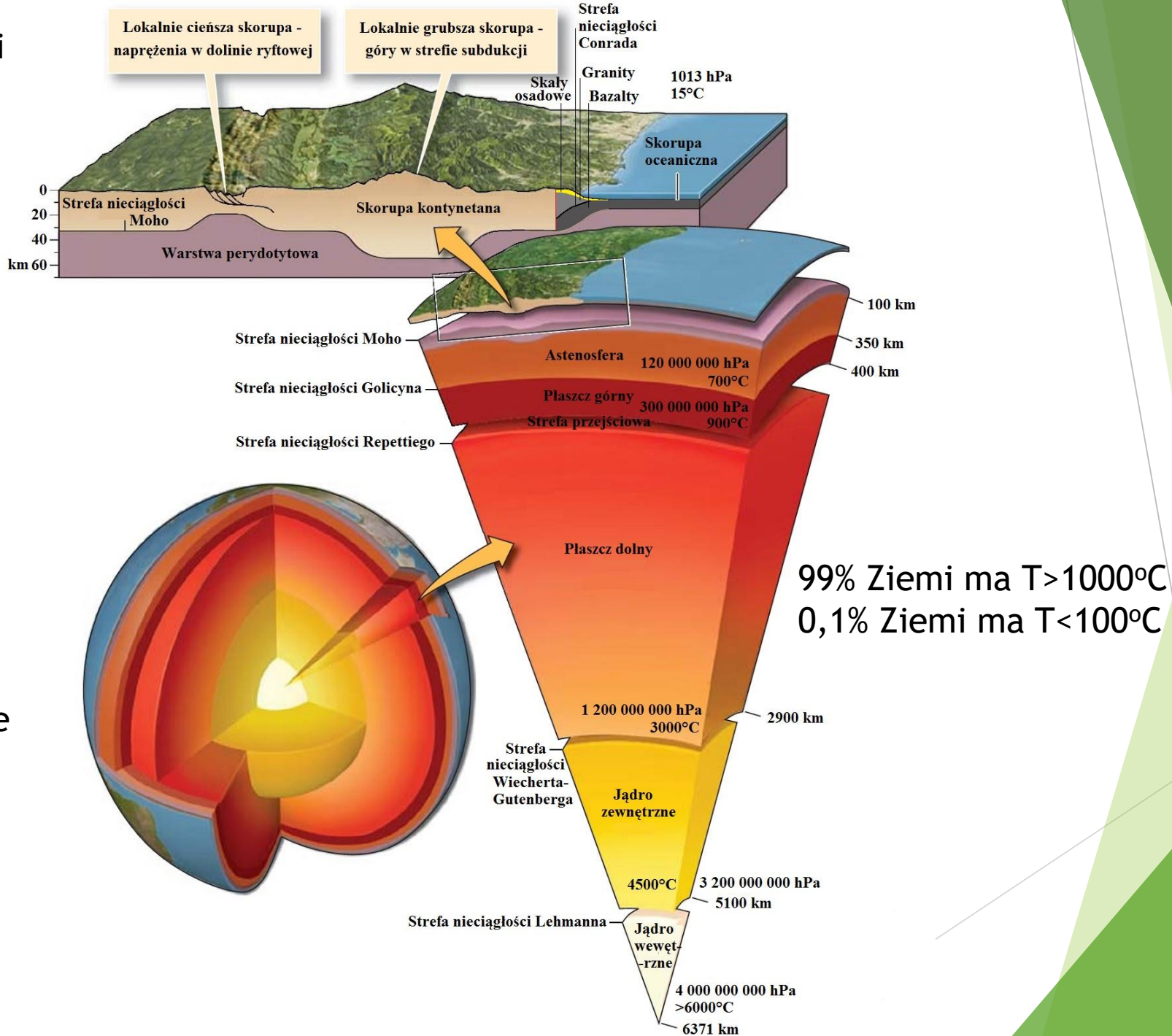
Ok. 50% ciepła Ziemi pochodzi z rozpadu promieniotwórczego wewnątrz planety.

Ok. 46% pochodzi z okresu powstania planety.

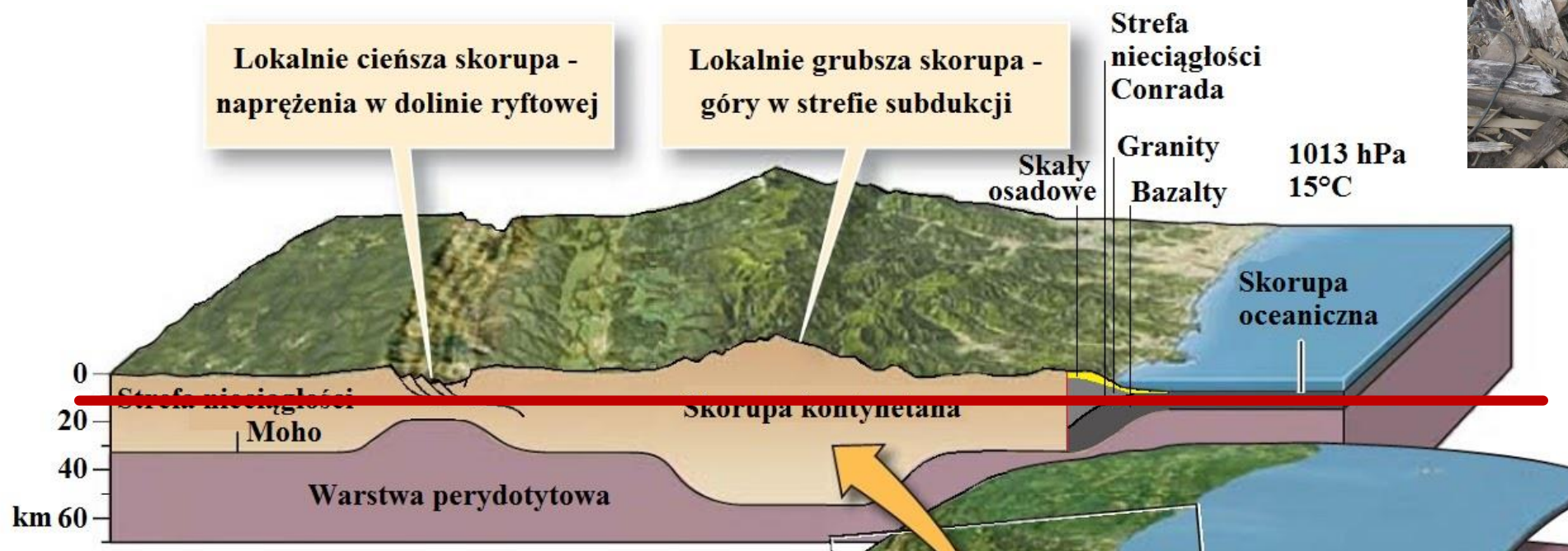
Pozostałe to:
Ciepło przemiany fazowej jądra planety

Energia grawitacji

Ogrzewanie pływowe - oddziaływanie grawitacji Ziemi i Księżyca powoduje tarcie w wew. partiach planety.

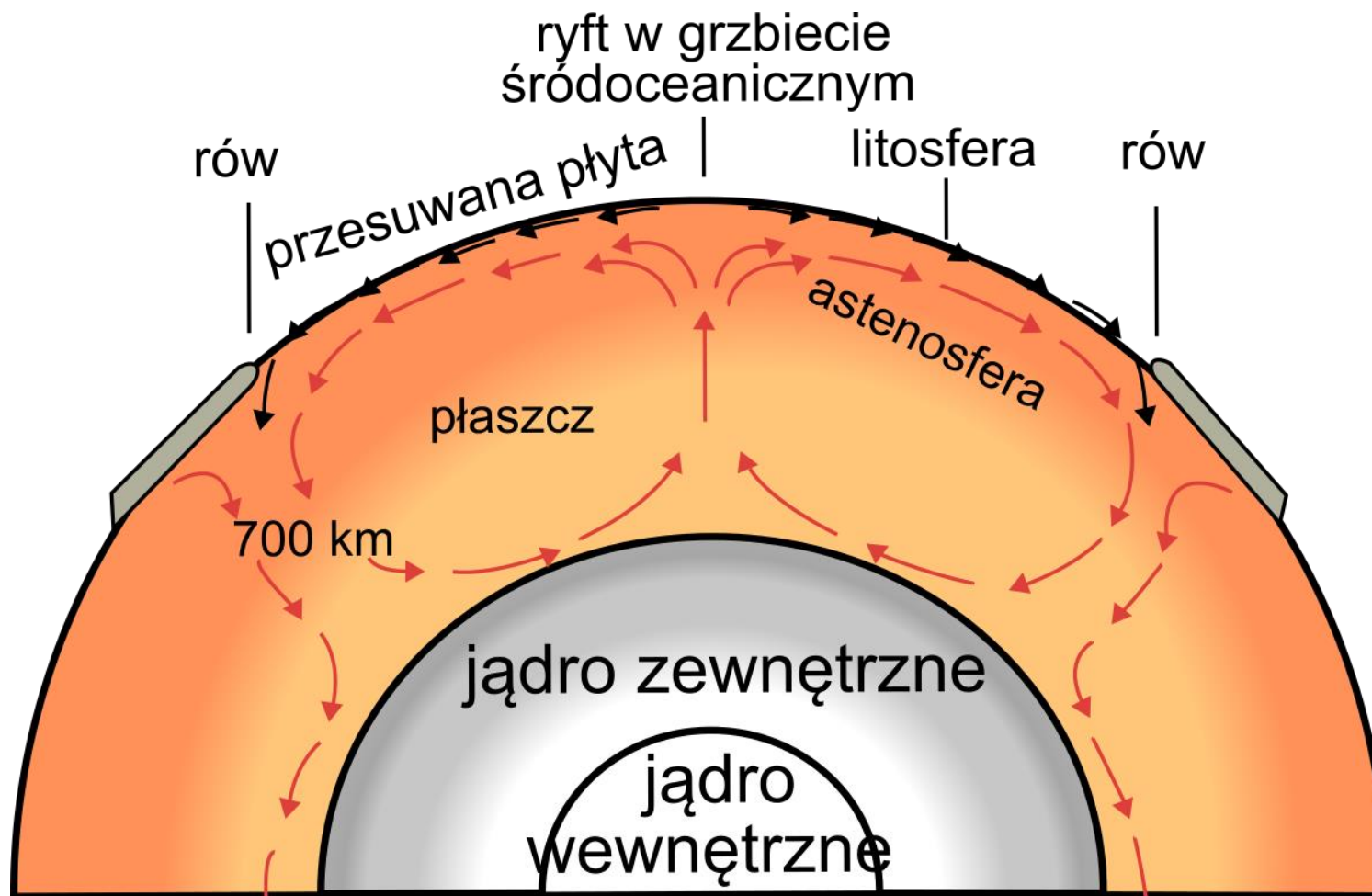


Charakterystyka procesu powstawania źródeł energii geotermalnej



Skorupa nie jest jednorodna!

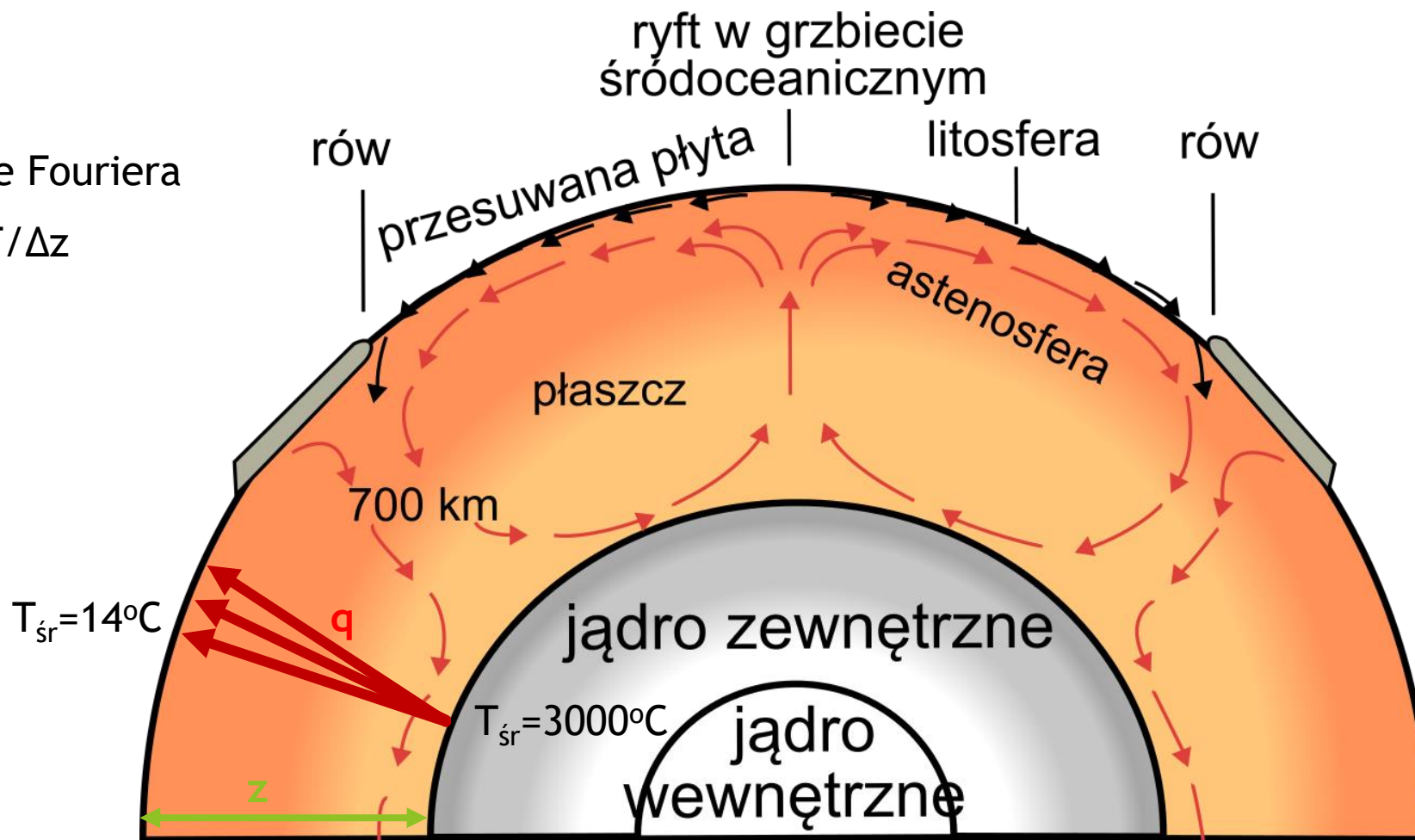
Charakterystyka procesu powstawania źródeł energii geotermalnej



Charakterystyka procesu powstawania źródeł energii geotermalnej

Równanie Fouriera

$$q = - \lambda \Delta T / \Delta z$$



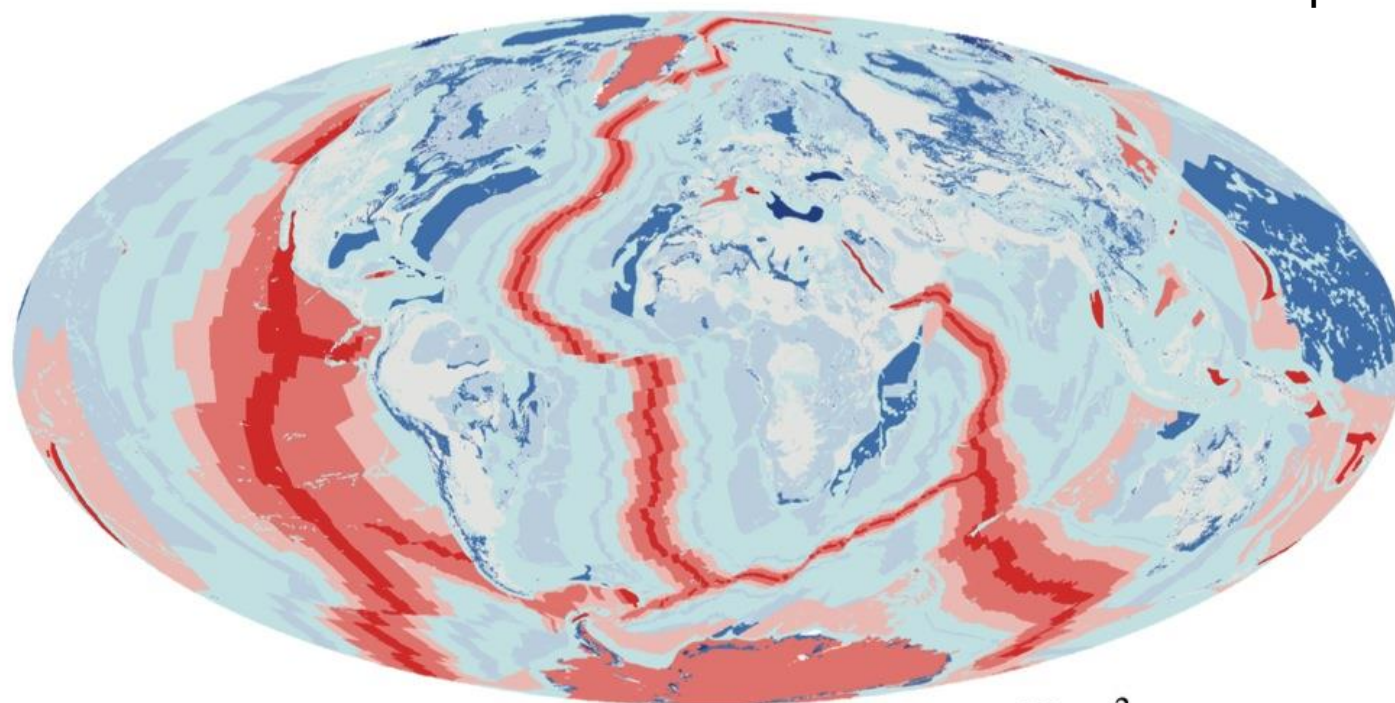
Ok. 50% ciepła Ziemi pochodzi z rozpadu promieniotwórczego wewnątrz planety.

Ok. 46% pochodzi z okresu powstania planety.

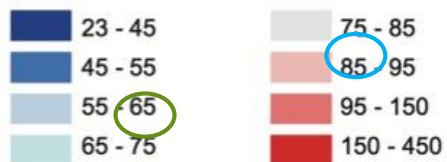
Przyjmuje się że pojemność cieplna planety wynosi $12,6 \times 10^{12}$ MJ

Charakterystyka procesu powstawania źródeł energii geotermalnej

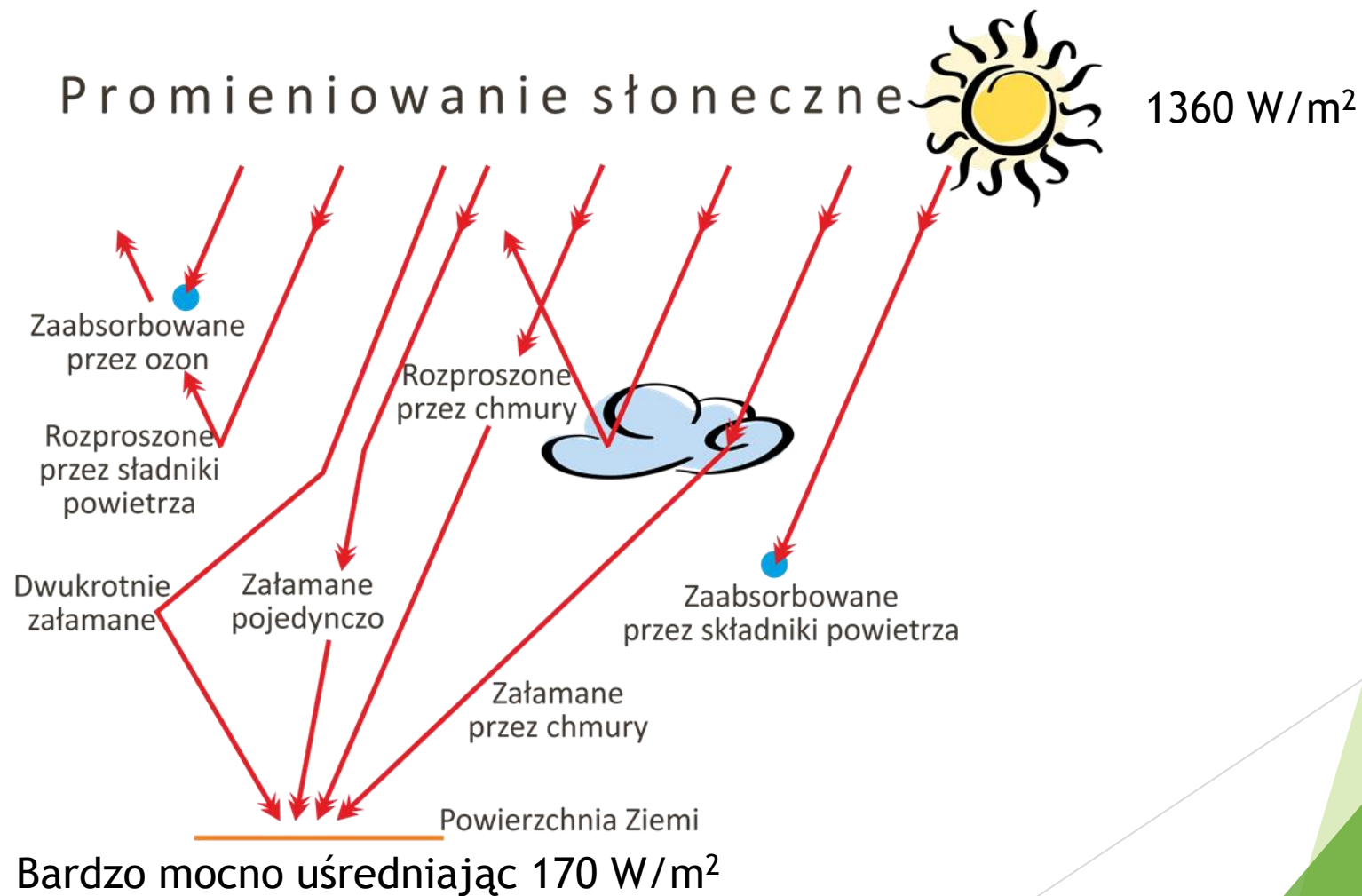
Skorupa nie jest jednorodna!



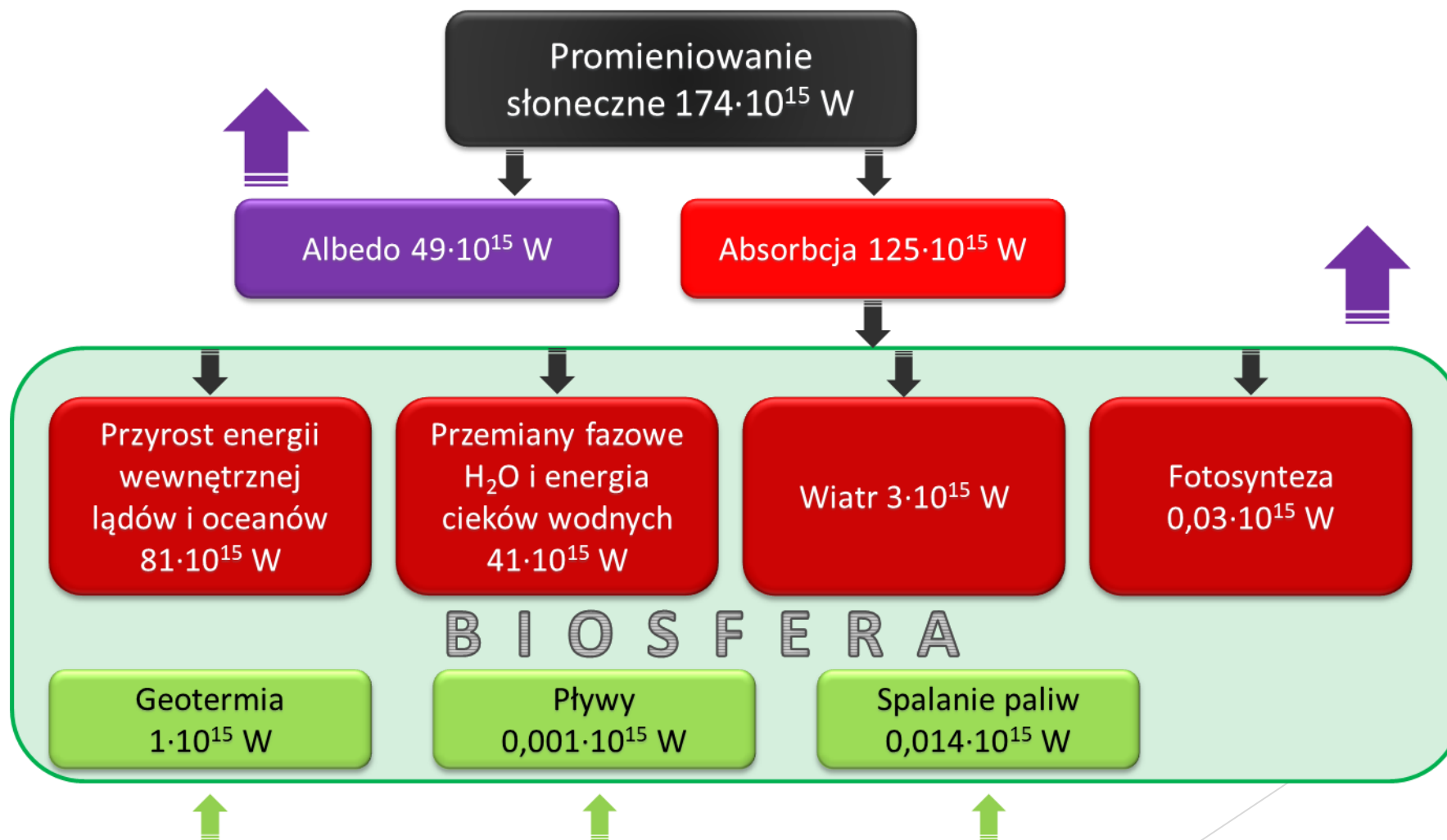
mW m^{-2}



Charakterystyka procesu powstawania źródeł energii geotermalnej



Charakterystyka procesu powstawania źródeł energii geotermalnej



Charakterystyka procesu powstawania źródeł energii geotermalnej

- ▶ Do 20 m od powierzchni realny wpływ promieniowania słonecznego
- ▶ Do 70 m od powierzchni realny wpływ otoczenia

Ciepło z wnętrza planety dostarczane jest do powierzchni na 2 sposoby:

- ▶ Konwekcja przez skorupę - warstwy skał
- ▶ Adwekcja - transport przez poruszające się płyny, takie jak magma, woda, para wodna, gazy.

Wszystkie warstwy skał posiadają pustki i wnęki. Niektóre są wypełnione wodą lub powietrzem albo innymi gazami/cieczami.

Charakterystyka procesu powstawania źródeł energii geotermalnej

Skąty/płyny	Przewodność cieplna λ [$\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$]	Pojemność cieplna właściwa [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
Żwir, piasek suchy	0.3-0.8	0.50-0.59
Żwir, piasek mokry	2.0-4.0	1.30-1.80
Gлина, gleba wilgotna	0.9-2.3	0.80-2.00
Wapień	1.3-3.5	0.90
Dolomit	2.5-4.0	0.90
Marmur	2.5-3.5	0.88
Piaskowiec	2.0-4.0	0.92
Łupek	1.5-3.0	0.75
Granit	2.5-3.5	0.79
Gnejs	2.5-3.5	0.79
Bazalt	1.5-3.5	0.84
Kwarcyt	3.0-5.0	0.80
Sól kamienna	4.5-6.0	0.85
Powietrze	0.02-0.03	1.00
Woda	0.58	4.18

Charakterystyka procesu powstawania źródeł energii geotermalnej

Równanie Fouriera

$$q = - \lambda \Delta T / \Delta z$$



Gradient temperatury

$$\Delta T / \Delta z = q / \lambda$$

Wiedząc, że $q_{\text{sr}} = 0,065 \text{ W/m}^2$ i że średnio skorupa kontynentalna składa się z granitu i gnejsu o $\lambda = 2,2 \text{ W/(mK)}$ to $\Delta T / \Delta z = 0,03 \text{ K/m} \rightarrow 3 \text{ K/100 m}$

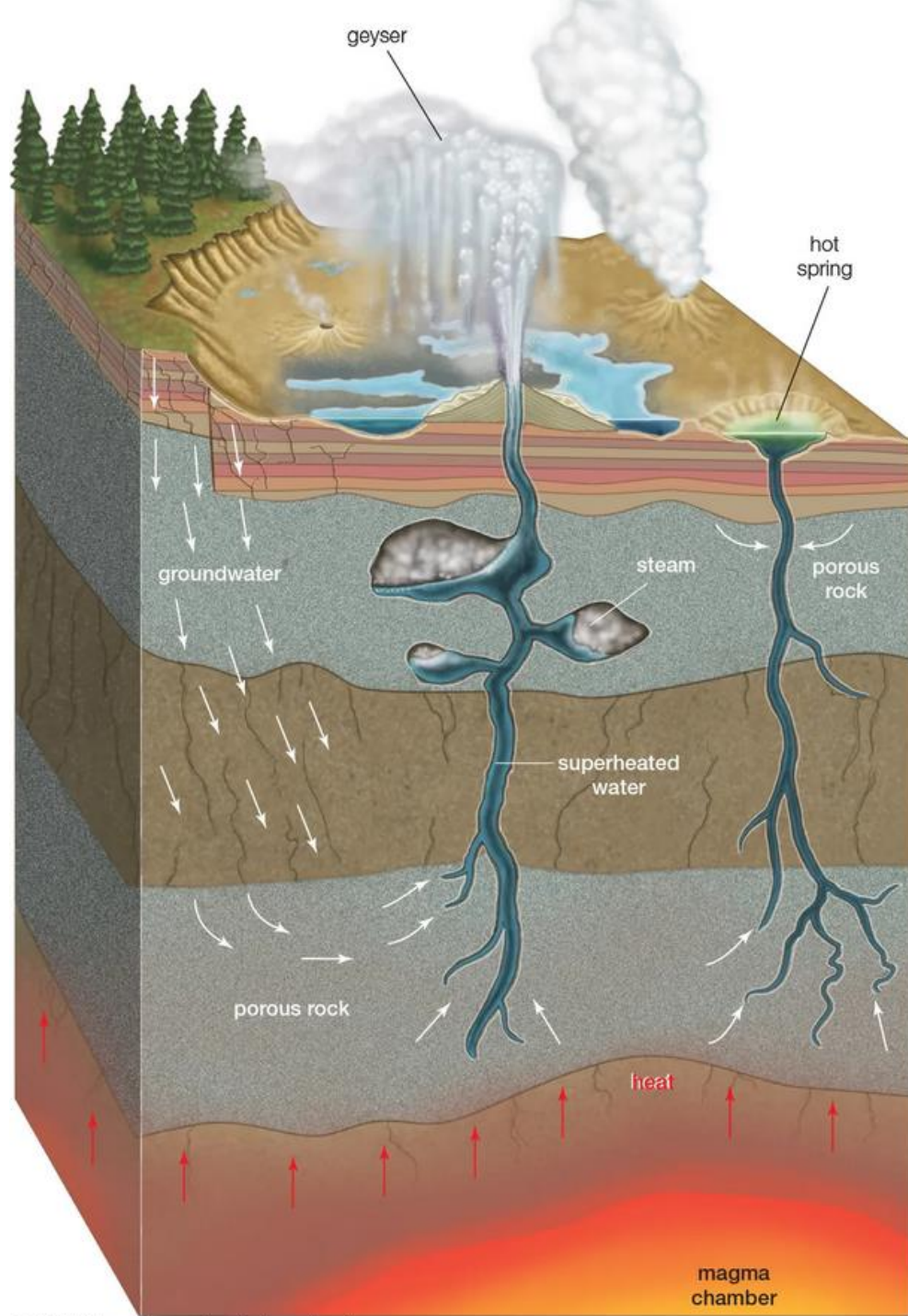
Charakterystyka procesu powstawania źródeł energii geotermalnej

- ▶ Rozpad radioaktywny - każda skała posiada mierzalną ilość pierwiastków promieniotwórczych, głównie ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K .

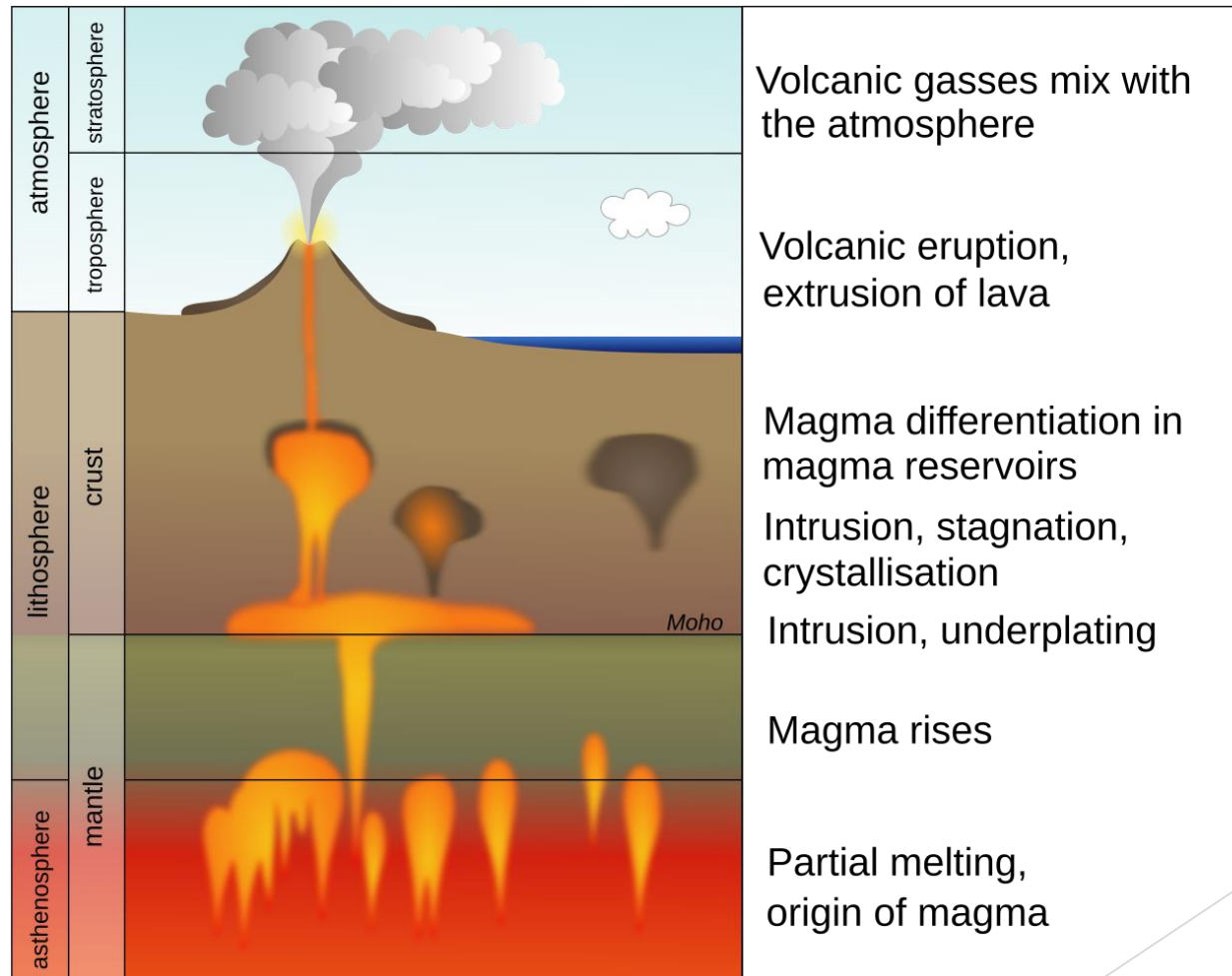
$$A = 10^{-5} \rho (9.52c_{\text{U}} + 2.56c_{\text{Th}} + 3.48c_{\text{K}}) \quad [\mu\text{J s}^{-1} \text{m}^{-3}]$$

$$T(z) = T_0 + 1/\lambda q_0 \Delta z - A/(2\lambda) \Delta z^2$$

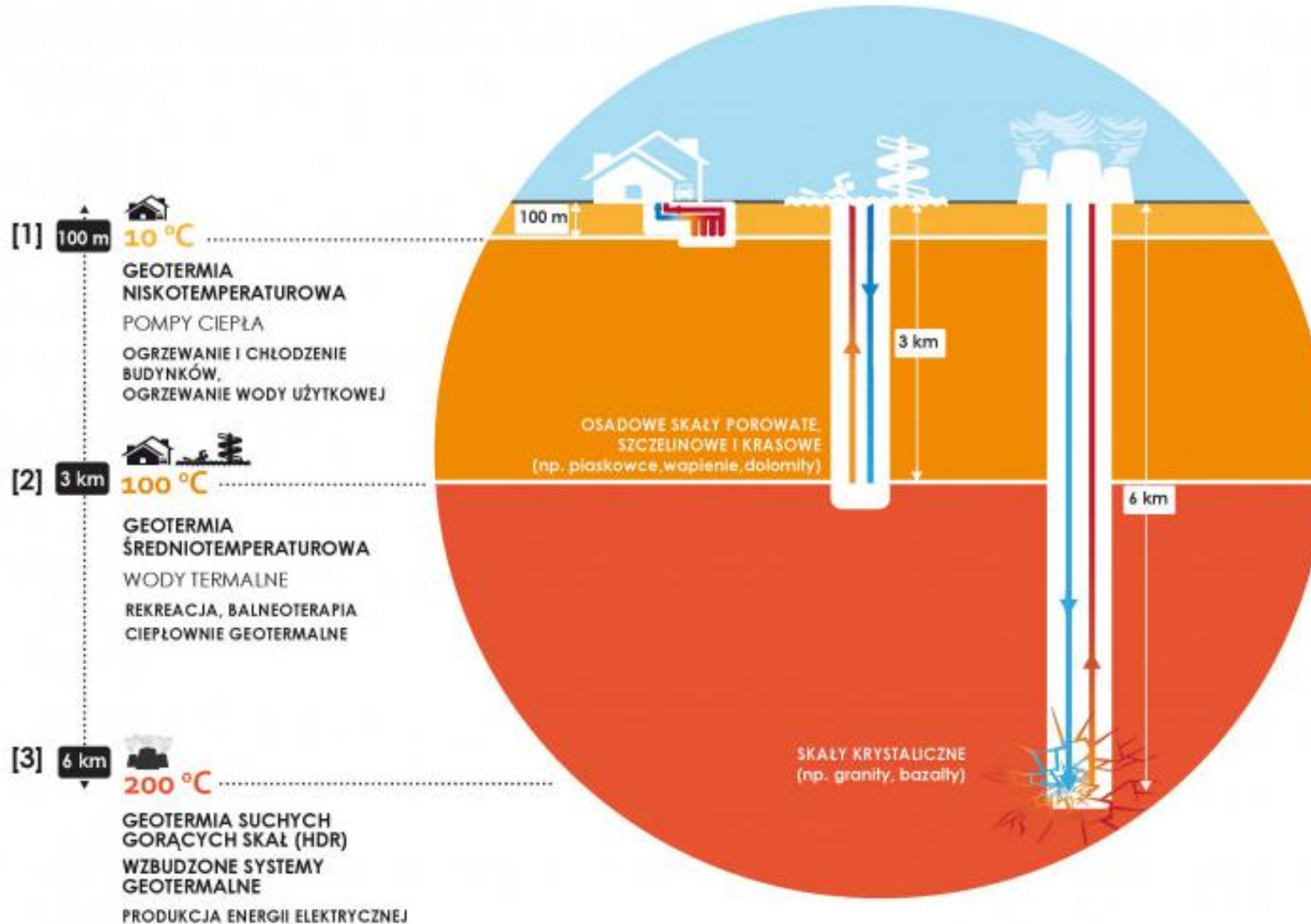
Typ skały	Produkcja ciepła [$\mu\text{J s}^{-1} \text{m}^{-3}$]
Granit	3.0 (<1-7)
Gabro	0.46
Granodioryt	1.5 (0.8-2.1)
Diorit	1.1
Gnejs	4.0 (<1-7)
Amfibolit	0.5 (0.1-1.5)
Serpentynit	0.01
Piaskowiec	1.5 (0.2-2.3)
Łupek ilasty	1.8



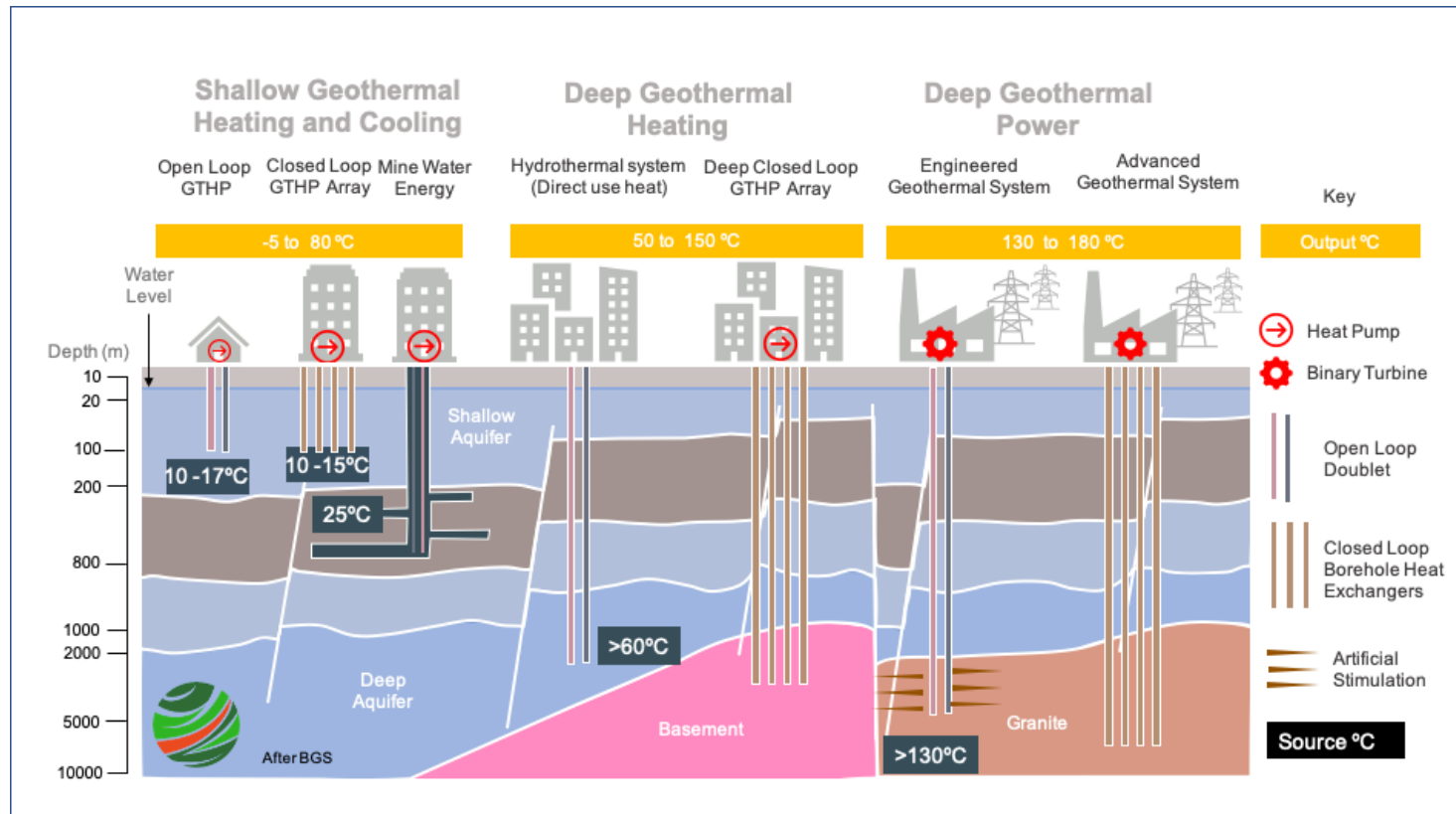
Charakterystyka procesu powstawania źródeł energii geotermalnej



Klasyfikacja źródeł



Klasyfikacja źródeł



Klasyfikacja źródeł

Ze względu na sposób występowania:

- ▶ **Grunty i skały:** Ciepło pobierane przy pomocy sond ciepła.
- ▶ **Wody gruntowe:** Wykorzystywane do pozyskiwania ciepła.
- ▶ **Wody gorące i ciepłe:** Wydobywane przy pomocy otworów eksploatacyjnych.
- ▶ **Para wodna:** Wydobywana przy pomocy otworów wiertniczych.
- ▶ **Wysady solne:** Energia odprowadzana przy pomocy solanki
- ▶ **Gorące suche skały:** Energia odbierana przez wodę cyrkulującą pod wysokim ciśnieniem.
- ▶ **Sztuczne geologiczne zbiorniki ciepła:** Tworzone w wyniku eksplozji ładunków wybuchowych.
- ▶ **Gorąca magma:** Bezpośrednie źródło ciepła

Klasyfikacja źródeł

Ze względu na temperaturę:

- ▶ Zimne: Do 20° C.
- ▶ Ciepłe/niskotemperaturowe: 20-35° C.
- ▶ Gorące/średnotemperaturowe: 35-80° C.
- ▶ Bardzo gorące/wysokotemperaturowe: 80-100° C.
- ▶ Przegrzane: Ponad 100° C

Klasyfikacja źródeł

Ze względu na ciśnienie:

- ▶ **Artezyjskie:** Woda samoczynnie wypływa na powierzchnię.
- ▶ **Subartezyjskie:** Woda nie przekracza powierzchni terenu, wymaga pompowania.
- ▶ **Grawitacyjne:** Woda jest pompowana z głębokości zbliżonych do głębokości złoża