



V. Wnętrze Ziemi. Procesy endogeniczne

1. Budowa wnętrza Ziemi

Źródła wiedzy – badania bezpośrednie

- Wiedza na temat **budowy i właściwości wnętrza Ziemi** tylko w niewielkim stopniu opiera się na **bezpośrednich badaniach**.
- Wynika to z faktu, że najgłębsze “dziury” w Ziemi sięgają ułamka procenta promienia ziemskiego:
 - wiercenie dotarło do głębokości około 13,5 km,**
 - 13 500 metrów (odwiert Exxon’a w dnie Morza Ochockiego na Sachalinie z 2014 r.);
 - 12 289 m (odwiert w Katarze z 2008 r.),
 - 12 262 m (odwiert SG-3 na Płw. Kolskim z 1989 r.),
 - kopalnie udostępniają skały do głębokości około 4000 metrów,**
 - 4000 metrów (kopalnia złota Mponeng w RPA; do niedawna najgłębszą kopalnią była TouTona też leżąca w RPA),
 - temperatura na tej głębokości sięga powyżej 60°C,
 - w celu wydobycia surowca konieczne jest zastosowanie klimatyzacji.



Najgłębsza kopalnia na świecie – Mponeng w RPA

Źródła wiedzy – badania pośrednie

- Jako podstawowe źródło informacji służą **pośrednie badania geofizyczne**, polegające głównie na **badaniu przebiegu fal sejsmicznych** oraz w mniejszym stopniu na **badaniu zróżnicowania pola grawitacyjnego i magnetycznego Ziemi**, **analizie przewodnictwa elektrycznego skał** i innych **właściwości fizycznych wnętrza naszej planety**.



Pomiary sejsmiczne z wykorzystaniem wibratorów sejsmicznych i geofonów

1. W wybranych miejscach pojazdy wzbudzają fale sejsmiczne za pomocą wibratorów sejsmicznych



3. Sygnał rejestrowany przez geofony jest przekazywany kablami do dalszej obróbki, w celu wykonania przekroju terenu

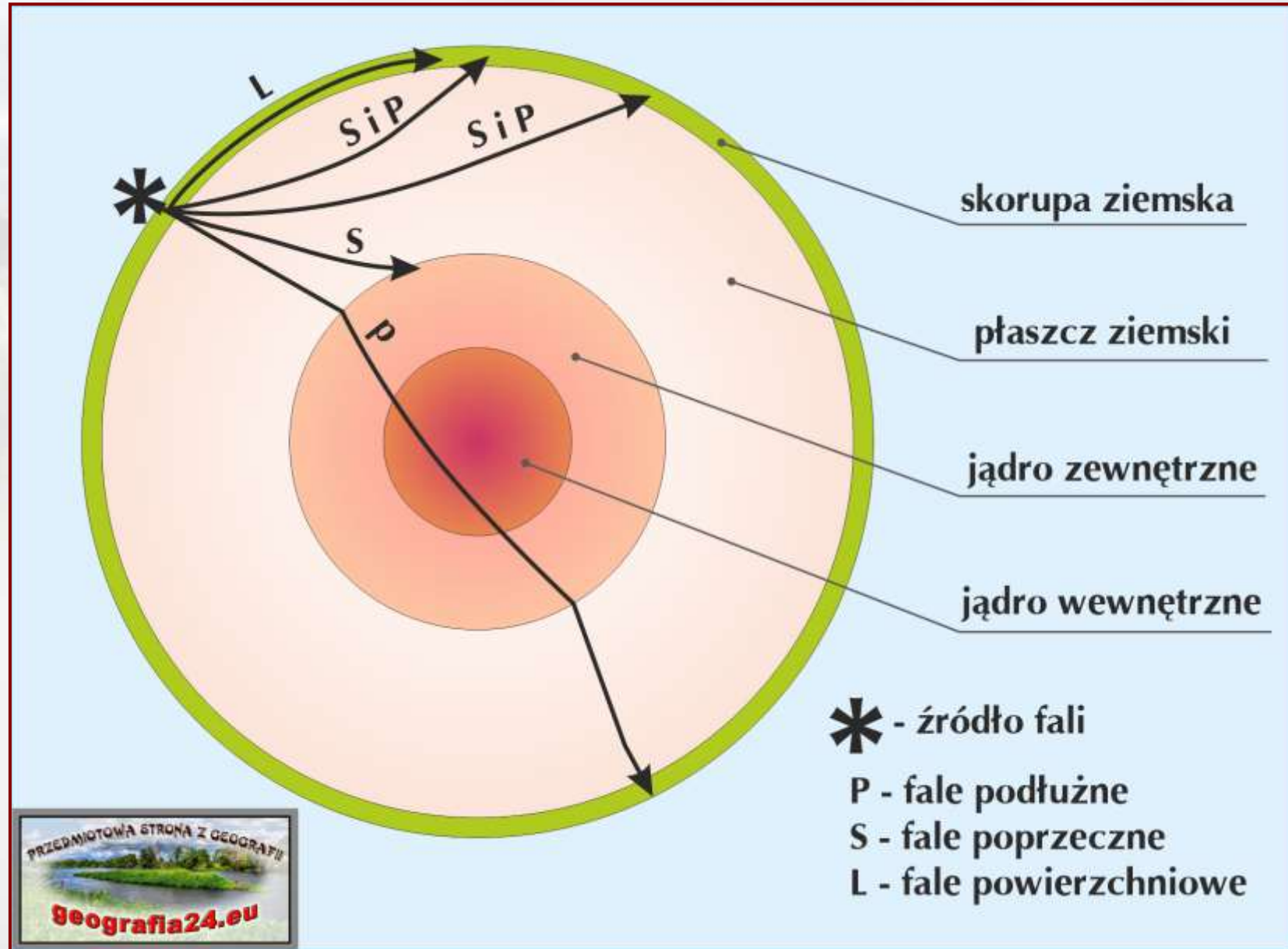


2. Odbite od skał fale sejsmiczne powracają na powierzchnię Ziemi i są rejestrowane przez geofony, czyli specjalistyczne czujniki



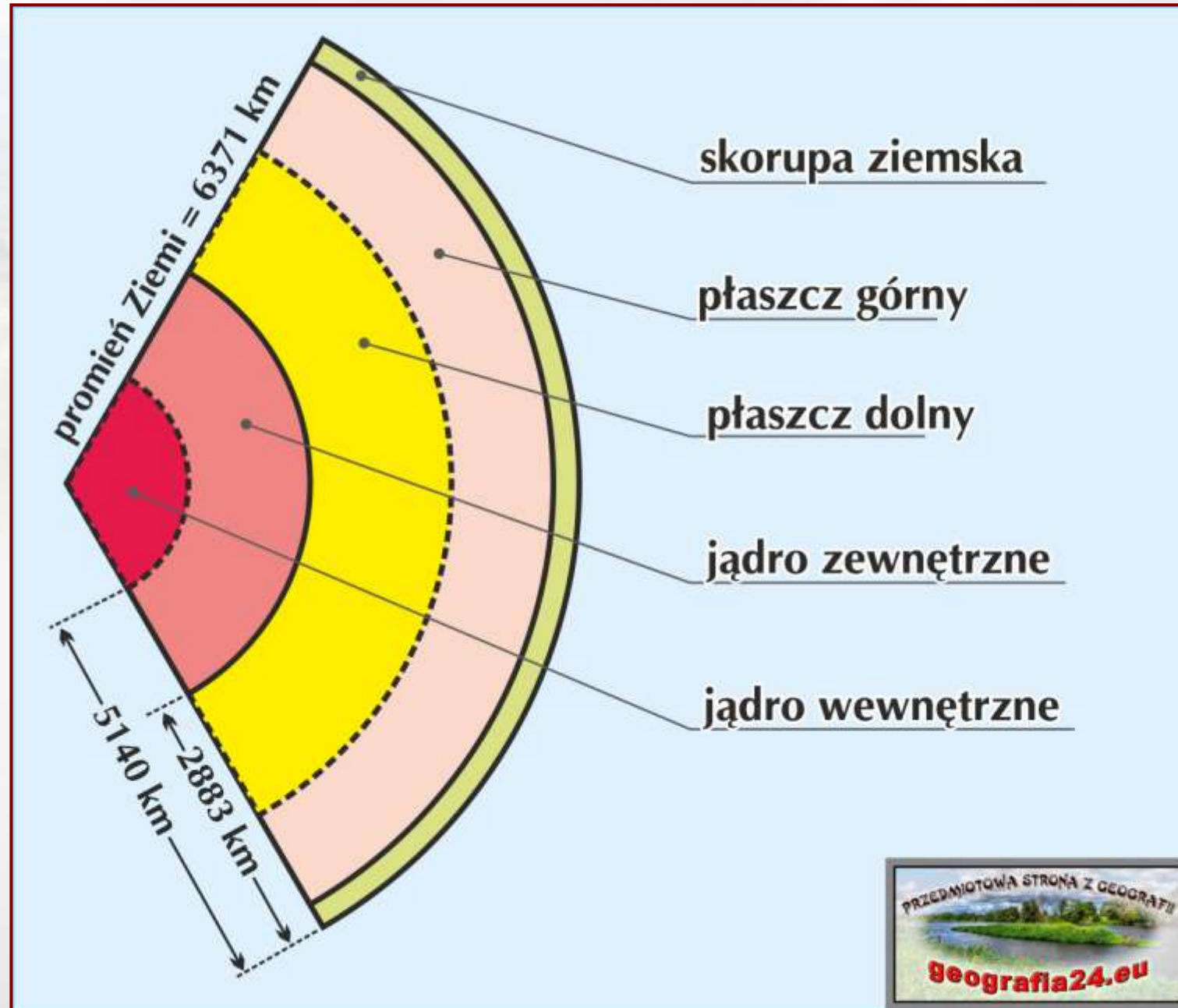
Rozchodzenie fal sejsmicznych w różnych ośrodkach

- 🌐 **Fale sejsmiczne** są wzbudzone w wyniku trzęsień ziemi (lub sztucznie przez człowieka).
- 🌐 Dochodzi wówczas do **zaburzenia równowagi Ziemi**, która zachowuje się jak **ciało sprężyste**.
- 🌐 Skutkiem tego jest powstanie i rozchodzenie się dwóch głównych rodzajów fal sejsmicznych:
 - 🌐 **podłużnych** (drżania rozchodzą się w tym samym kierunku co ruch fali), szybszych – które przechodząc przez ośrodki ciekłe załamują się i zmieniają nieco kierunek rozchodzenia;
 - 🌐 **poprzecznych** (drżania rozchodzą się prostopadle do kierunku ruchu fali), wolniejszych – które są **wygaszane w ośrodkach ciekłych** (jest nim jądro zewnętrzne).
- 🌐 Po dotarciu fal podłużnych i poprzecznych do powierzchni Ziemi wzbudzone są **fale powierzchniowe**.



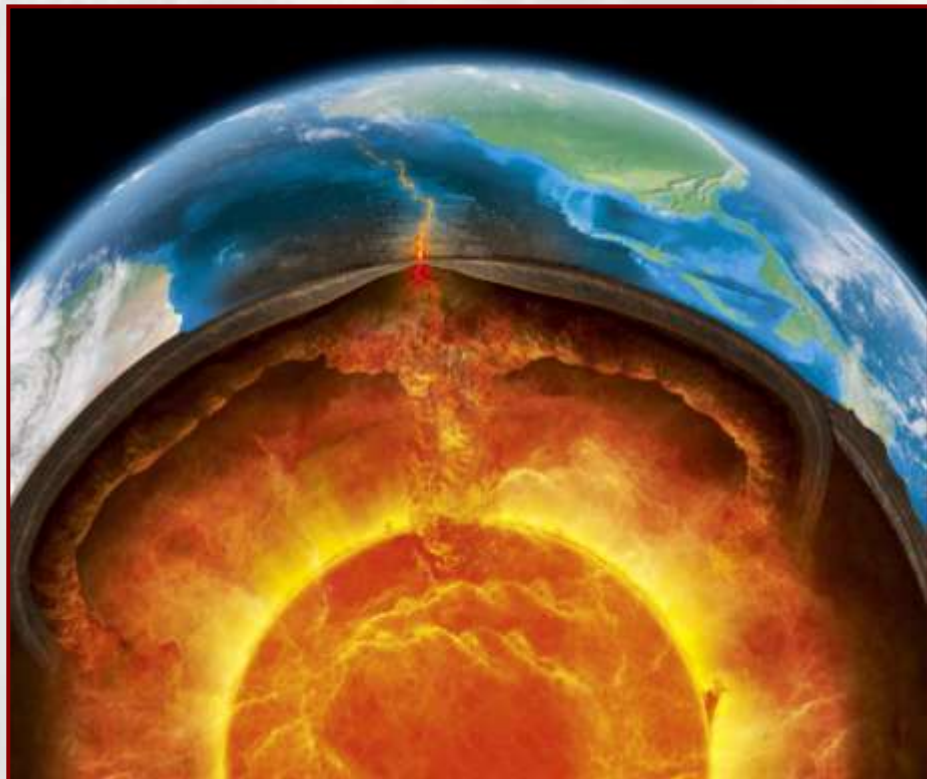
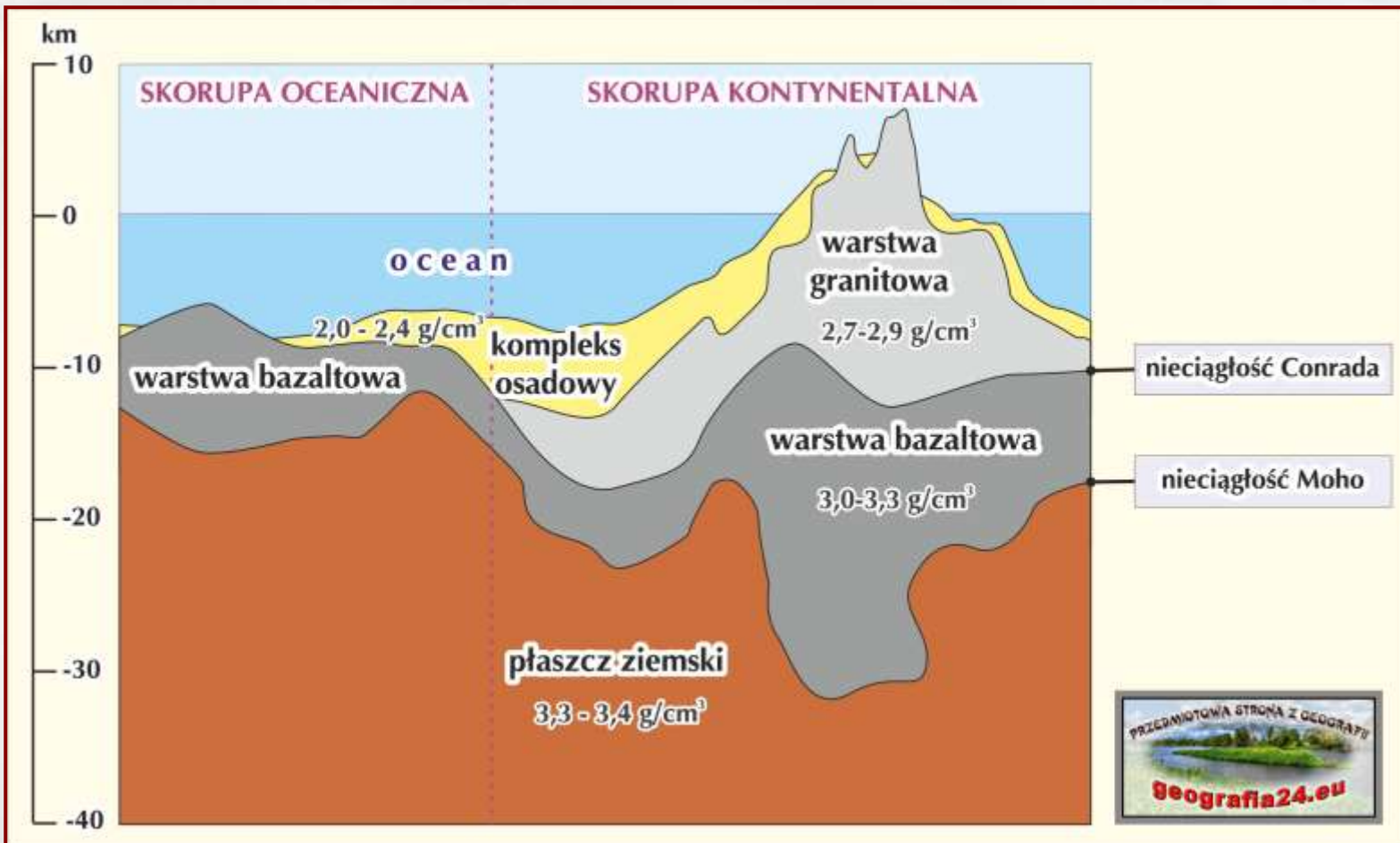
Fale sejsmiczne źródłem wiedzy o budowie Ziemi

- 🌐 **Rozchodzące się fale sejsmiczne** na pewnych głębokościach, skokowo zmieniają swoje parametry (przede wszystkim prędkość), ulegając dodatkowo załamaniu lub nawet odbiciu.
- 🌐 Dzięki obserwacji tych zjawisk możliwe jest poznanie **budowy wnętrza Ziemi** oraz wyodrębnienie kolejnych warstw, zwanych **geosferami**.
- 🌐 Warstwy te rozdzielone są przez **powierzchnie nieciągłości**, na których zachodzą nagłe zmiany właściwości ośrodka.
- 🌐 Powierzchnie nieciągłości są często związane ze stosunkowo cienkimi warstwami Ziemi, w obrębie których następuje bardzo szybka zmiana parametrów fizycznych skał.
- 🌐 Geosfery (warstwy Ziemi) różnią się od siebie m.in. **parametrami fizycznymi** (temperaturą i ciśnieniem) oraz **chemicznymi** (składem chemicznym).



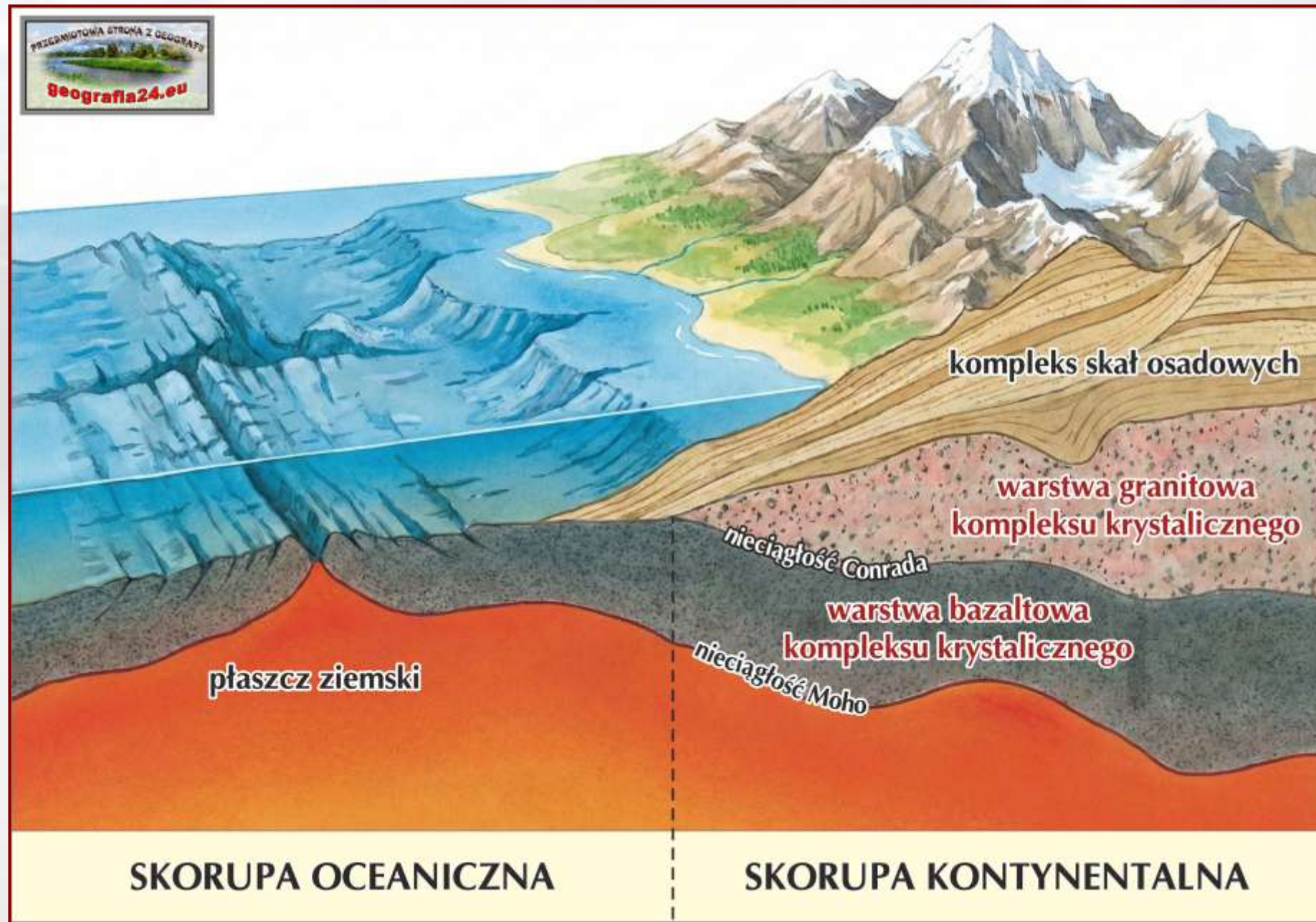
Skorupa ziemska

- 🌐 **Skorupa ziemska** – wierzchnia, niejednorodna i najmniejsza objętościowo geosfera Ziemi (stanowi niecały 1% masy planety), zbudowana ze wszystkich znanych pierwiastków chemicznych, w tym niektórych cennych i wykorzystywanych gospodarczo.
- 🌐 Dolną granicę skorupy wyznacza **strefa nieciągłości Moho (Mohorovičića)**, a poniżej niej znajduje się płaszcz ziemski.
- 🌐 W obrębie skorupy ziemskiej wyróżnia się dwie mniejsze struktury, różniące się zasięgiem przestrzennym oraz rodzajem skał:
 - 🌐 **skorupa kontynentalna** – pod lądami,
 - 🌐 **skorupa oceaniczna** – pod oceanami.



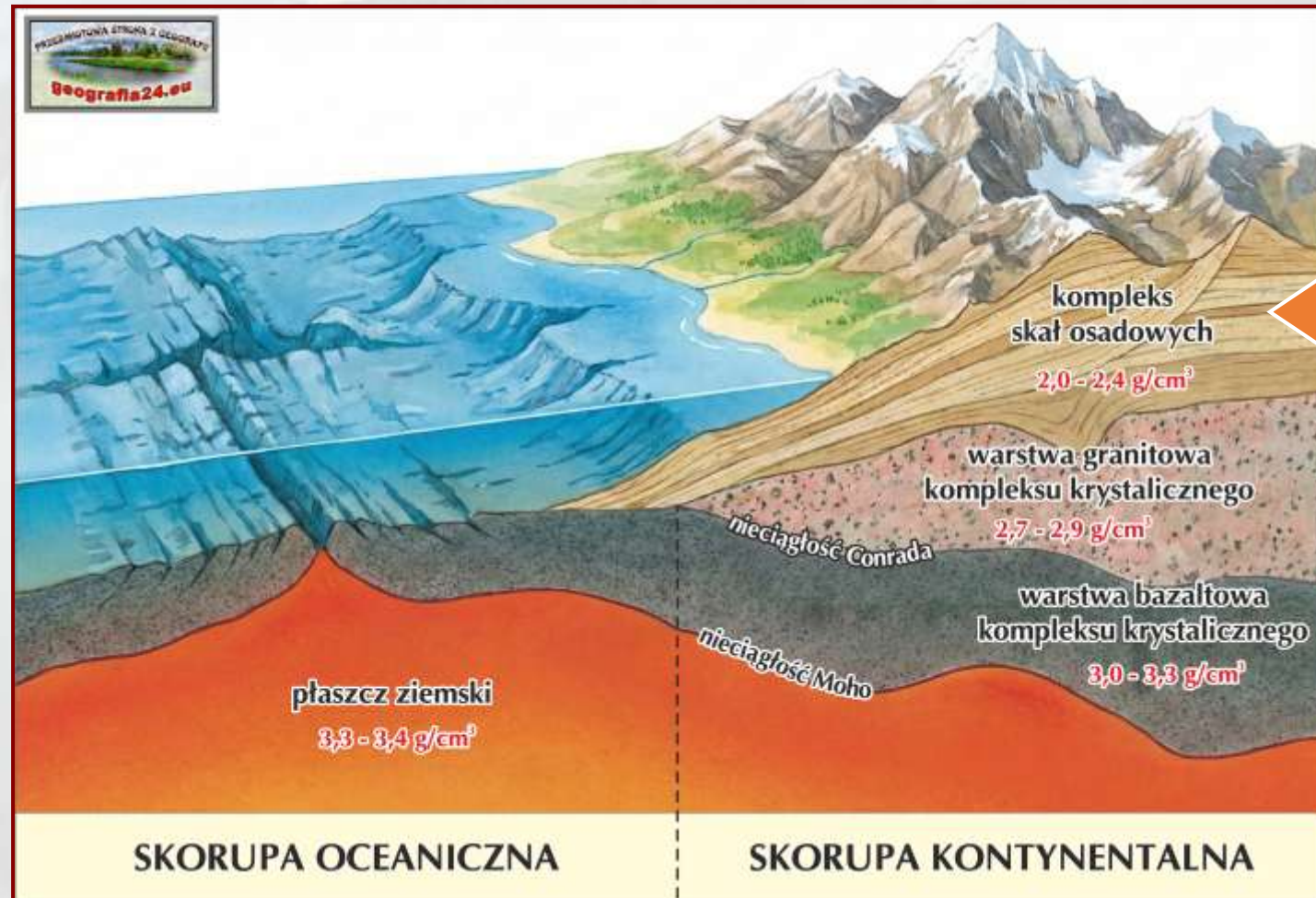
Skorupa ziemska – kontynentalna

- 🌐 **Skorupa kontynentalna** – wierzchnia część Ziemi, znajdująca się pod kontynentami, ukształtowana już w **prekambrze** (nawet 4,2 mld lat temu).
- 🌐 Charakteryzuje się **najmniejszą średnią gęstością skał** spośród wszystkich warstw Ziemi, wynoszącą około **2,7 g/cm³**.
- 🌐 W jej obrębie wyróżnia się dwie warstwy, licząc od góry:
 - 🌐 **wierzchni – kompleks skał osadowych,**
 - 🌐 **dolny – kompleks krystaliczny, obejmujący:**
 - 🌐 **warstwę granitową,**
 - 🌐 **warstwę bazaltową.**



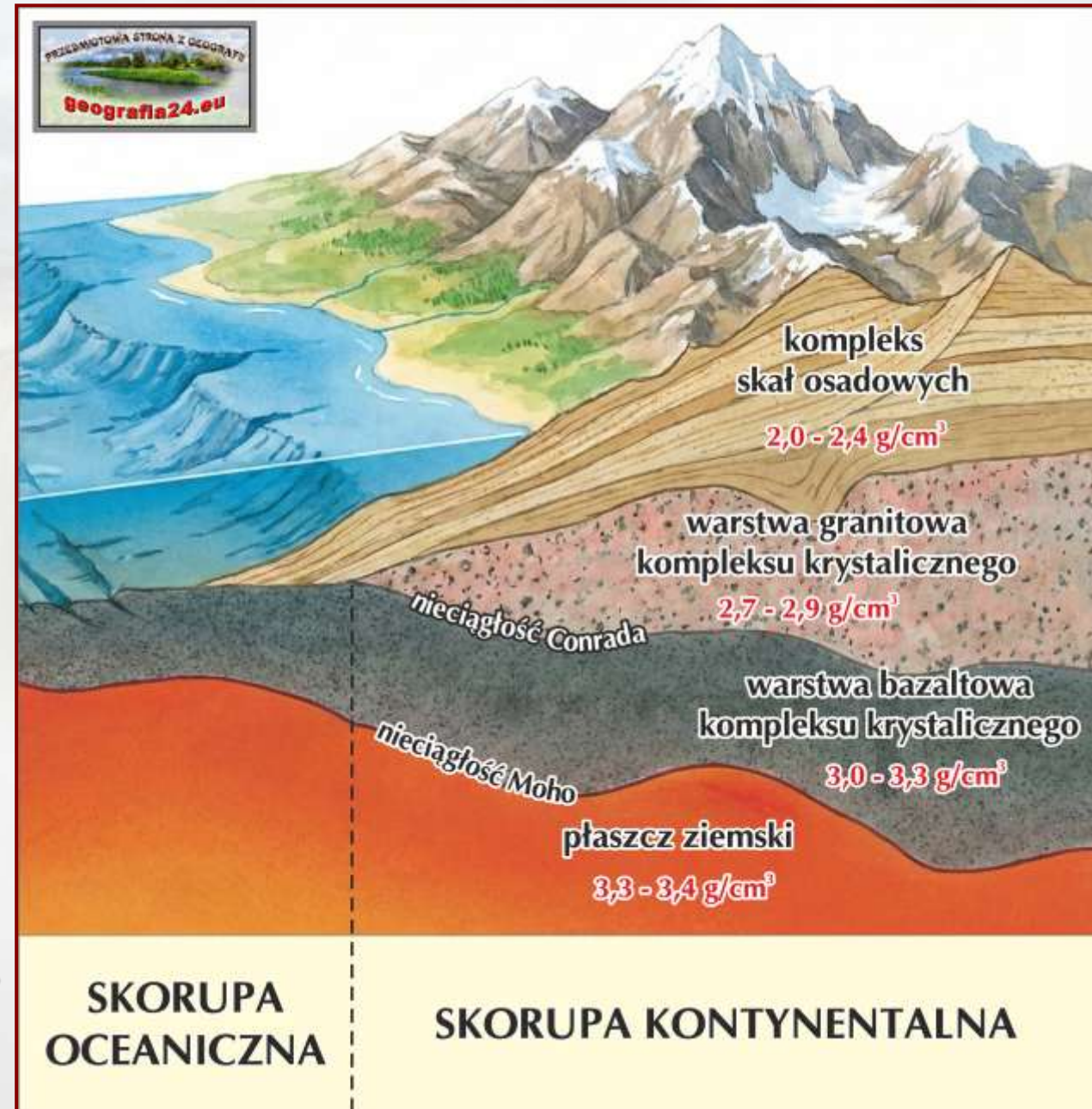
Skorupa ziemska – **kontynentalna**: skały osadowe

- 🌐 **Wierzchni kompleks skał osadowych** – zbudowany jest ze skał osadowych o gęstości wynoszącej $2,0 - 2,4 \text{ g/cm}^3$, zróżnicowany pod względem grubości:
 - 🌐 **od 0 m** (czyli brak), w obrębie mocno wypiętrzonych pasm górskich zbudowanych ze skał krystalicznych (odstania się tu bezpośrednio na powierzchni leżący niżej dolny kompleks krystaliczny),
 - 🌐 **do ponad 20 km** pod osadowymi, **fałdowymi strukturami górskimi** (np. Himalajami).



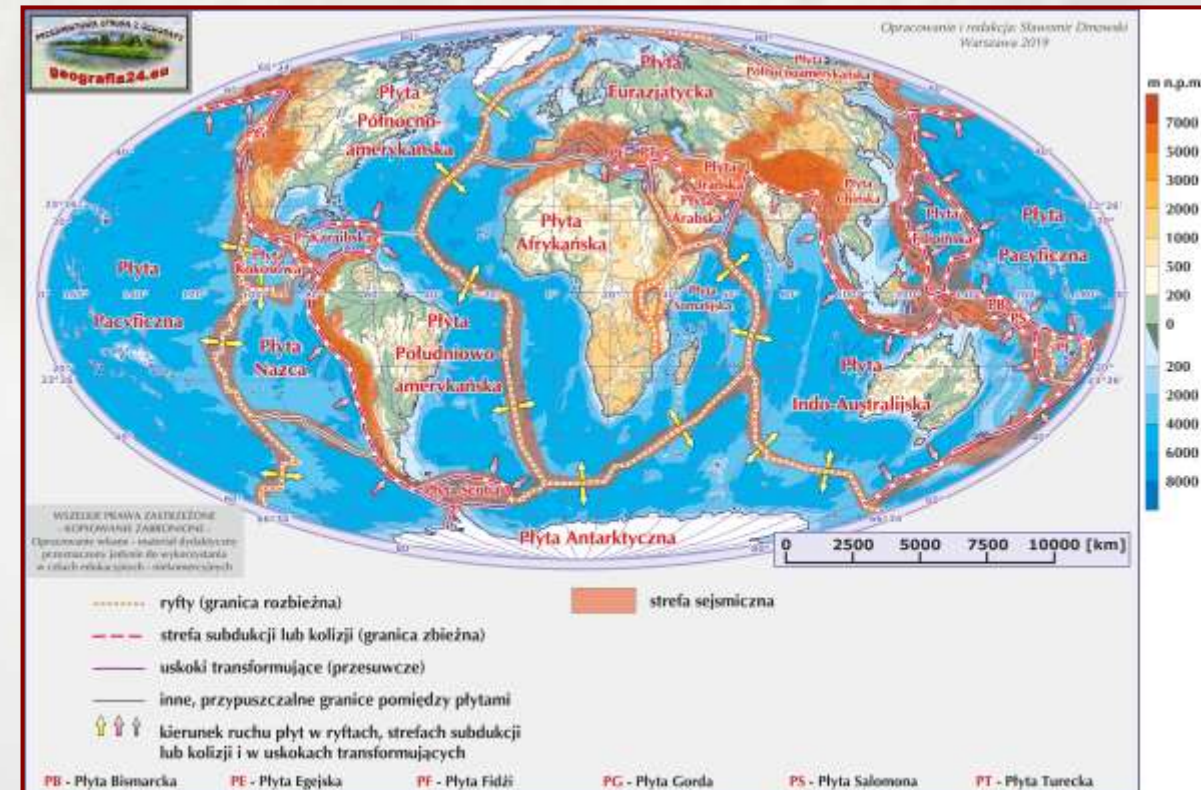
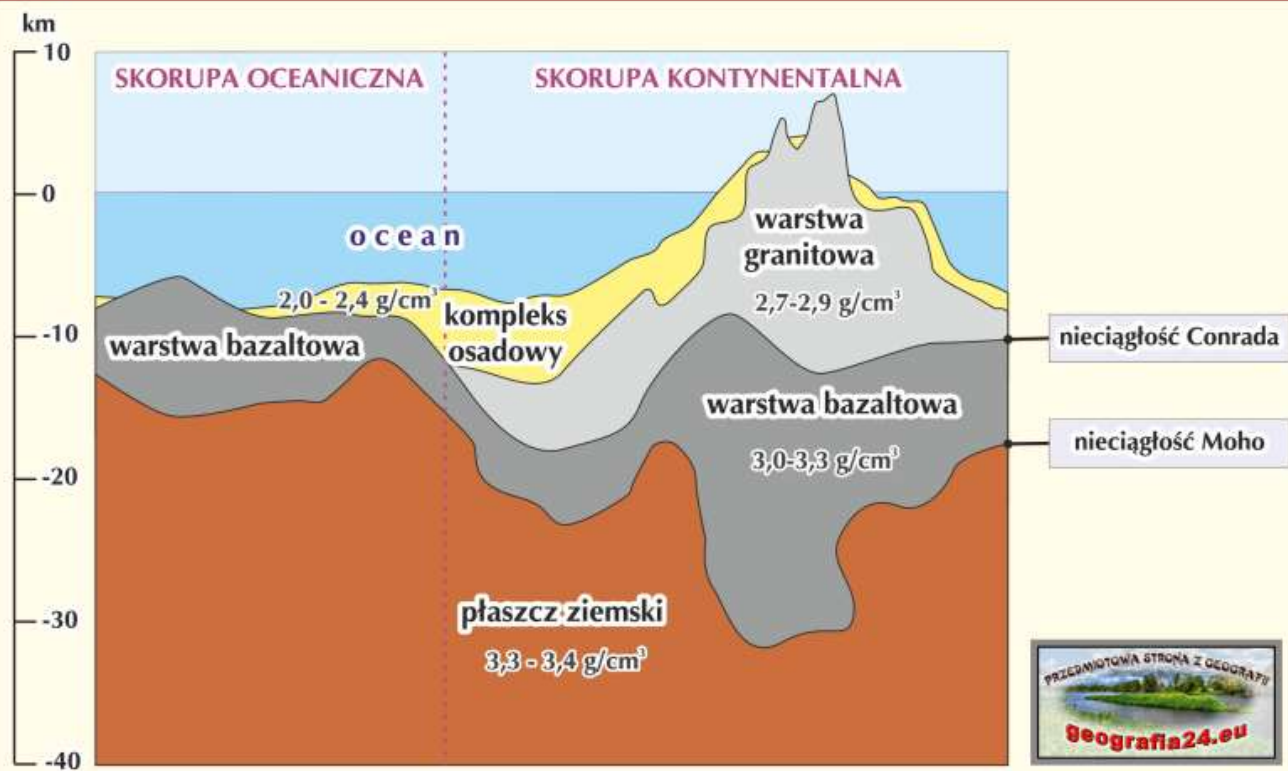
Skorupa ziemska – **kontynentalna**: skały krystaliczne

- 🌐 **Dolny kompleks krystaliczny** – sięga najczęściej do **głębokości 35-40 km**, maksymalnie do niemal 80 km w rejonie Himalajów i dzieli się dalej na:
 - 🌐 **warstwę granitową** – zbudowaną ze skał o gęstości wynoszącej około **2,7-2,9 g/cm³**,
 - 🌐 tworzą ją skały magmowe i metamorficzne zbliżone własnościami geofizycznymi do **granitów**,
 - 🌐 skały o odczynie kwaśnym, tj. **granity, gnejsy i łupki krystaliczne**,
 - 🌐 w składzie dominują: **krzem (Si), glin (Al) i tlen (O)**,
 - 🌐 stąd jej dawna nazwa – **sial**,
 - 🌐 warstwę tę kończy (oddziela od leżącej niżej) **strefa nieciągłości Conrada**;
 - 🌐 **warstwę bazaltową** – zbudowaną ze skał o gęstości około **3,0-3,3 g/cm³**,
 - 🌐 tworzą ją skały magmowe zbliżone własnościami geofizycznymi do **bazaltów**,
 - 🌐 skały o odczynie zasadowym, tj. **gabra i bazalty**,
 - 🌐 w składzie dominują: **krzem (Si), magnez (Mg) i tlen (O)**,
 - 🌐 stąd dawna nazwa – **sima**.



Skorupa ziemska – oceaniczna

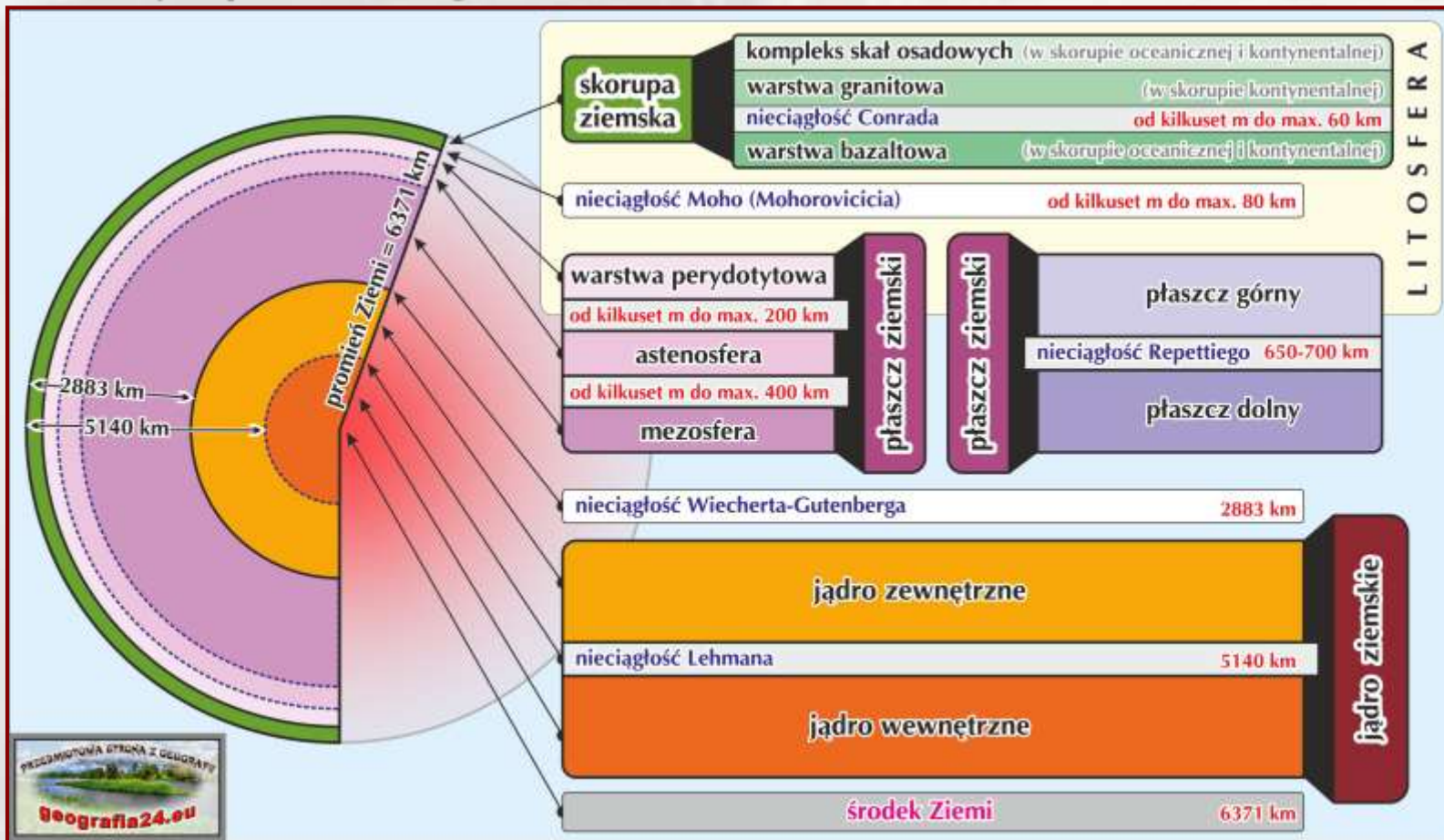
- 🌐 **Skorupa oceaniczna** – o średniej gęstości skał wynoszącej **około $3,0 \text{ g/cm}^3$** oraz miąższości wahającej się:
 - 🌐 **od kilkuset metrów** – w centralnych częściach grzbietów śródoceanicznych,
 - 🌐 **do około 7-15 km** – w brzeżnych strefach oceanów (przy kontynentach);
- 🌐 tworzy się nieustannie w **strefach ryftowych** i zostaje przetapiana w **strefach subdukcji** – proces ten najczęściej nie przekracza **100-200 mln lat**;
- 🌐 cechuje się budową podobną (choć prostszą) do skorupy kontynentalnej, za wyjątkiem faktu, że **bezpośrednio pod kompleksem skał osadowych zalega bazaltowa warstwa kompleksu krystalicznego**,
- 🌐 **brak warstwy granitowej!**



Płaszcz ziemski

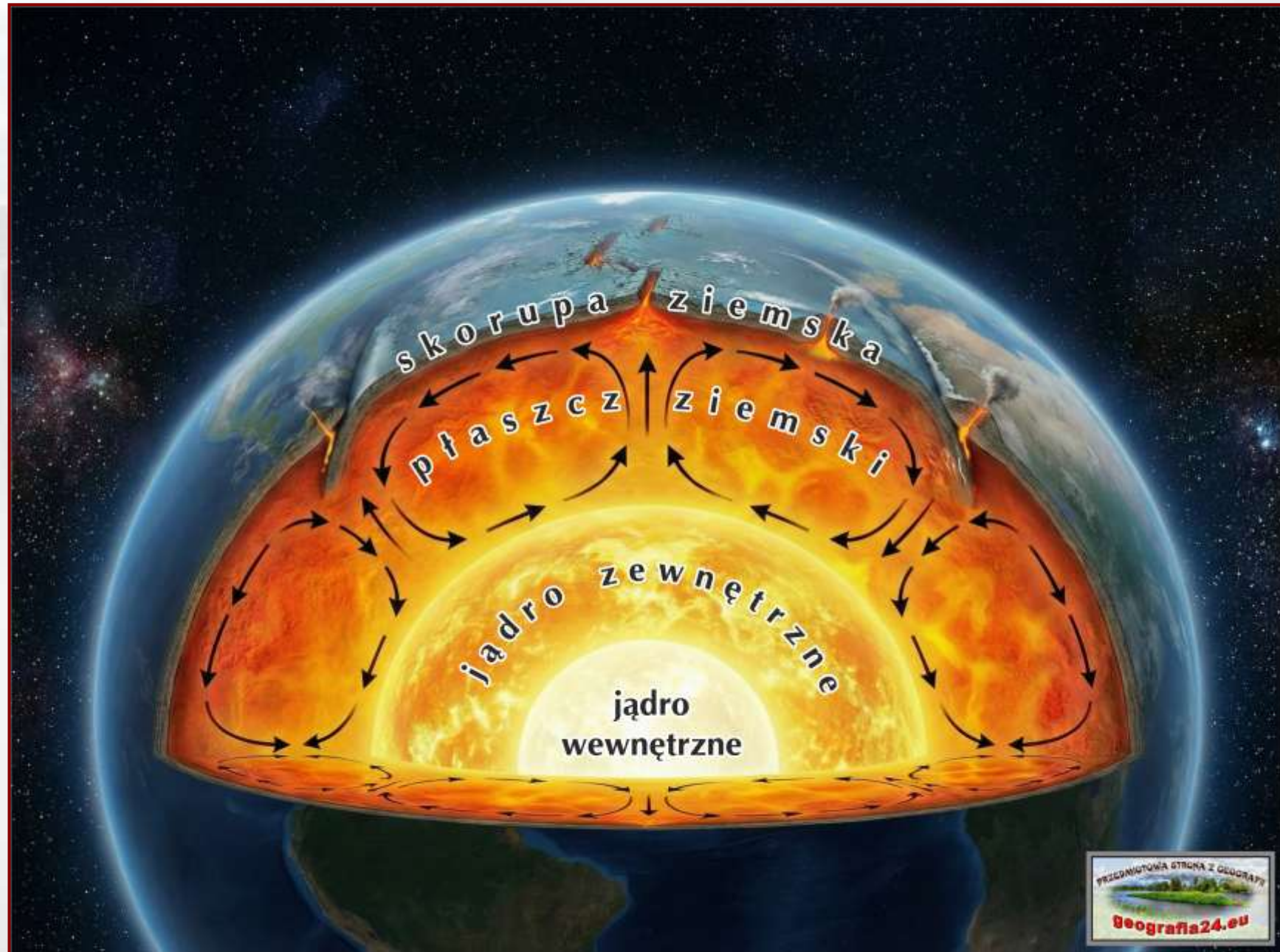
🌐 **Płaszcz ziemski** – jest najgrubszą warstwą obejmującą około **2/3 masy Ziemi** (około 68%), wykazującą pewne cechy stanu skupienia ciekłego i znajdującą się pomiędzy:

- 🌐 **nieciągłością Moho (Mohorovičicia)** – stanowi ona **granice ze skorupą ziemską**,
 - 🌐 występuje na głębokości od kilkuset metrów do **maksymalnie 80 km**;
- 🌐 **nieciągłością Wiecherta-Gutenberga** – stanowi ona **granice z jądrem ziemskim**,
 - 🌐 występuje ona na głębokości **około 2900 km (2883 km)**.



Płaszcz ziemski

- 🌐 **Płaszcz ziemski** jest geosferą bardzo istotną z punktu widzenia sejsmiki.
- 🌐 W wyniku **konwekcji cieplnej**, prowadzących do powstania **prądów konwekcyjnych** (zamkniętego obiegu ciepła w płaszczu ziemskim), następuje ruch materii skutkujący występowaniem na powierzchni Ziemi, m.in. **trzęsień ziemi**, **ruchów górotwórczych** oraz **wulkanizmu**.
- 🌐 Jest to także główna przyczyna **wędrowki kontynentów**.



Płaszcz ziemski – podział starszy

🌐 **Płaszcz ziemski** dzieli się zgodnie ze starszym podziałem na dwie części:

🌐 **płaszcz górny** – sięgający do głębokości około 650-700 km (do **nieciągłości Repettiego**),

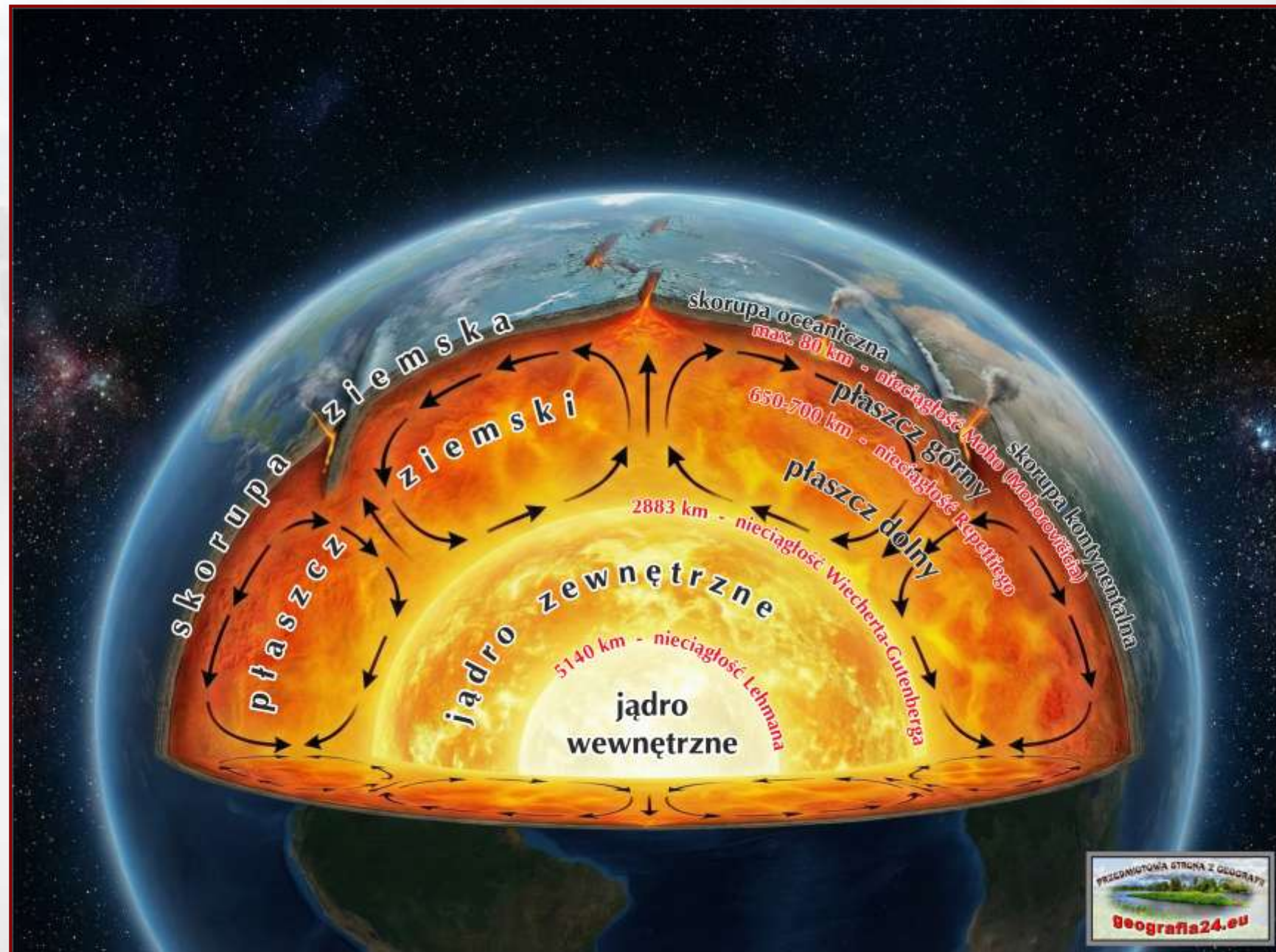
🌐 w składzie dominują:

🌐 **chrom (Cr)**, **żelazo (Fe)**, **krzem (Si)** i **magnez (Mg)** – **crofesima**;

🌐 **płaszcz dolny** – sięgający do głębokości około 2900 km (do **nieciągłości Wiecherta-Gutenberga**),

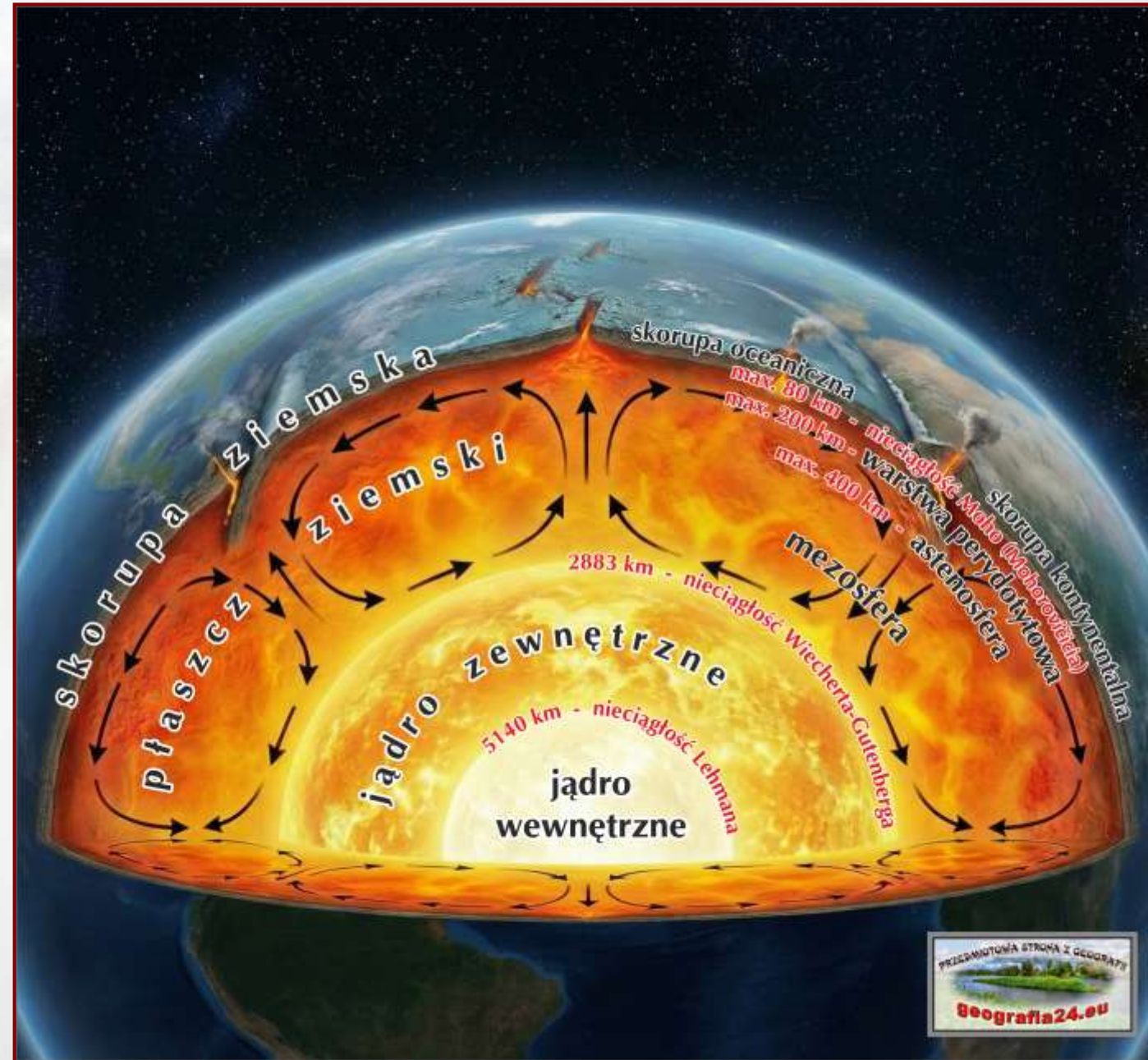
🌐 w składzie dominują:

🌐 **nikiel (Ni)**, **żelazo (Fe)**, **krzem (Si)** i **magnez (Mg)** – **nifesima**.



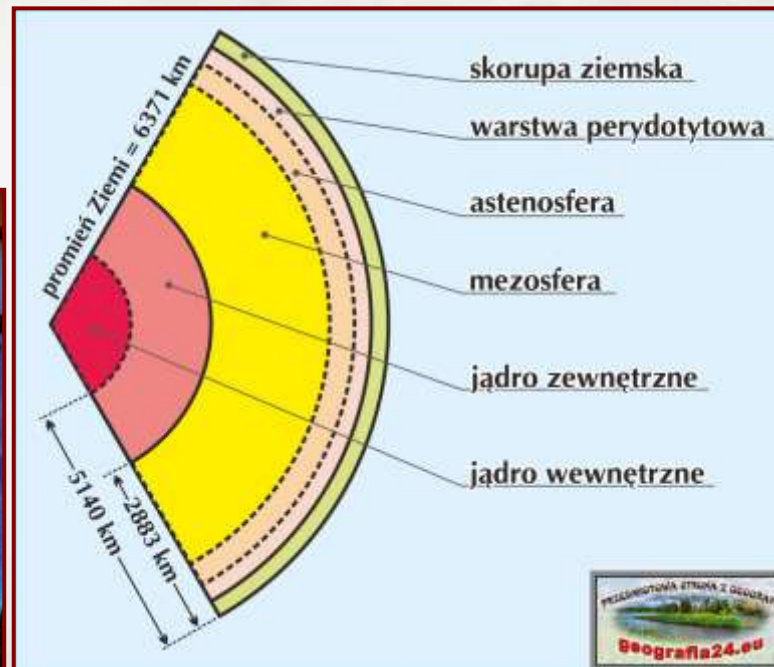
Płaszcz ziemski – podział aktualny

- 🌐 **Płaszcz ziemski** dzieli się, według nowszych podziałów, na trzy części.
- 🌐 **Warstwa perydotytowa** – sztywna struktura skalna, sięgająca w głąb Ziemi do **około 200 km** (górną część płaszcz górnego, w obrębie młodych orogenów), o gęstości skał wynoszącej **około 3,4 g/cm³**.
- 🌐 **Wraz ze skorupą ziemską tworzy litosferę**, podzieloną na **płyty tektoniczne** będące w ciągłym ruchu.
- 🌐 **Astenosfera** – warstwa półpłynna, sięgająca do głębokości **około 400 km**.
- 🌐 Wykazuje cechy ciała plastycznego i jest podatna na deformacje, co wynika głównie z wysokiej temperatury w stosunku do głębokości, bliskiej temperaturze topnienia skał.
- 🌐 **Mezosfera** – warstwa nieco sztywniejsza od astenosfery, wykazująca jednak cechy ciała plastycznego w dłuższym okresie czasu.
- 🌐 Obejmuje dolną część płaszcz górnego i cały płaszcz dolny, w których temperatura rośnie wraz z głębokością do **około 4000°C**.



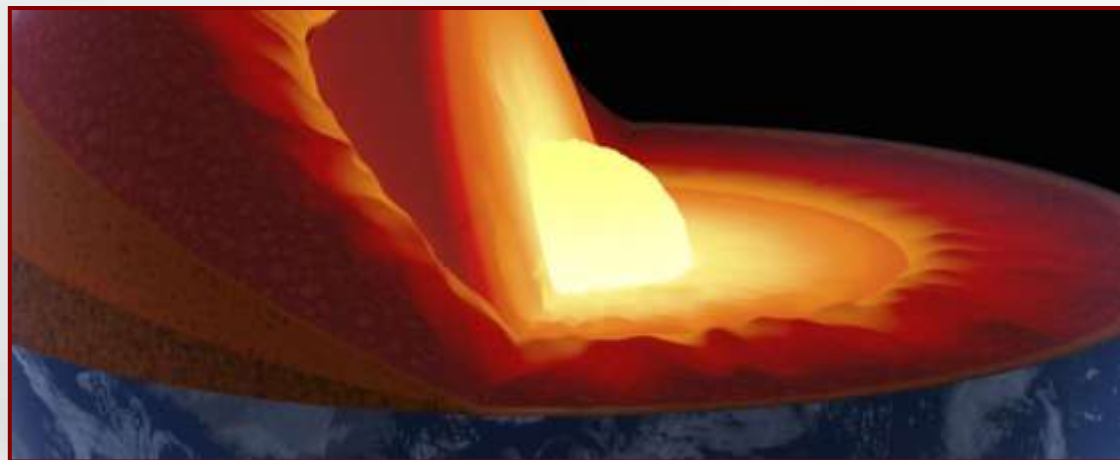
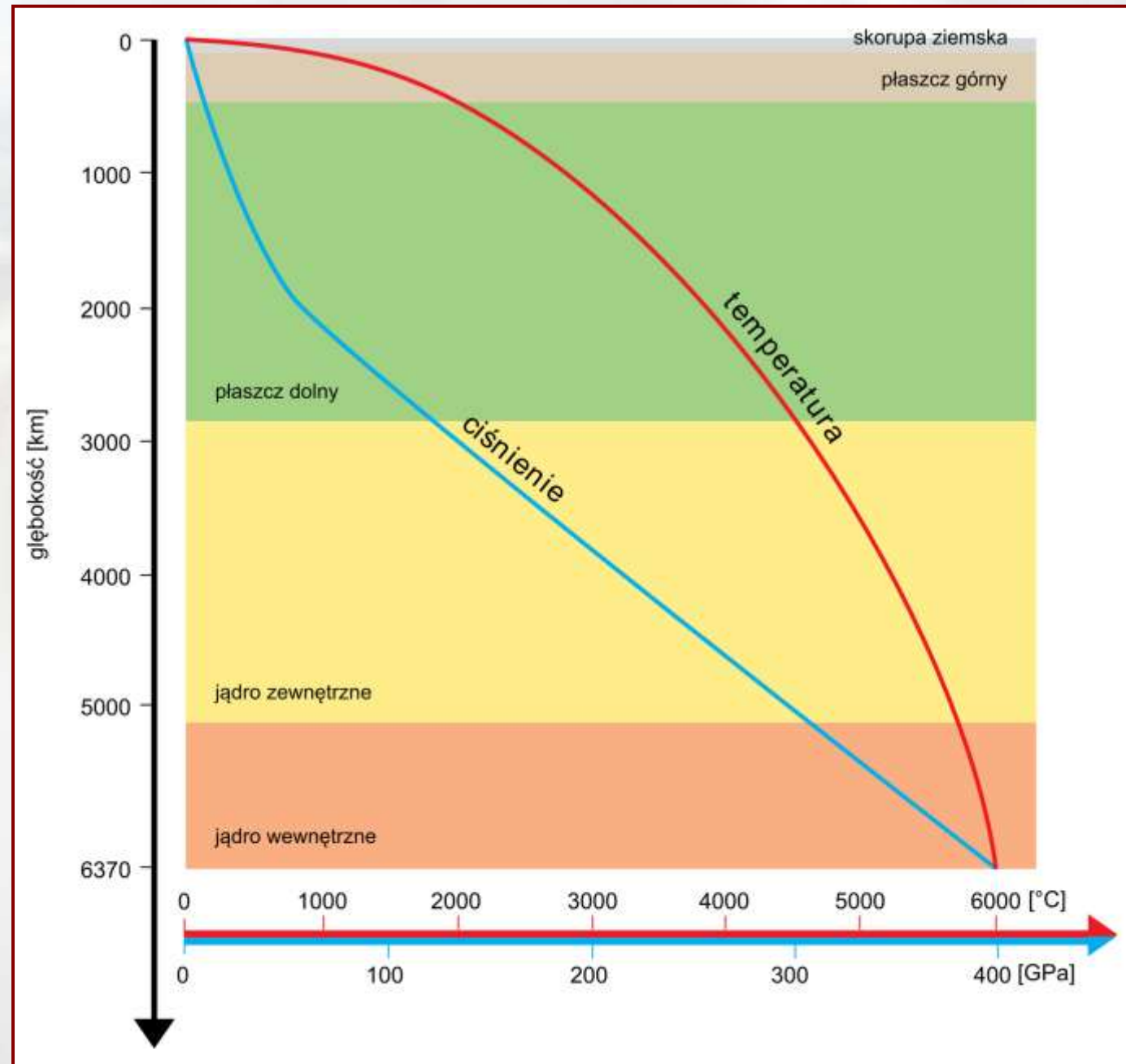
Jądro Ziemi (barysfera)

- 🌐 **Jądro Ziemi (barysfera)** – jest warstwą obejmującą około 31% masy Ziemi, znajdującą się poniżej **nieciągłości Wiecherta-Gutenberg**.
 - 🌐 W składzie dominują: **nikiel (Ni)** i **żelazo (Fe)** – stąd jego dawna nazwa – **nife**.
 - 🌐 W jego obrębie możemy wyróżnić dwie odmienne części.
 - 🌐 **Jądro zewnętrzne** – będące w **stanie ciekłym** (zanikają w nim fale poprzeczne).
 - 🌐 W jego obrębie **występują prądy konwekcyjne**, przyczyniające się do powstania **ziemskiego pola magnetycznego**.
 - 🌐 Sięga do głębokości wynoszącej około 5140 km (do **nieciągłości Lehmana**).
 - 🌐 **Jądro wewnętrzne** – będące w **stanie stałym** (przenikają przez nie fale podłużne).
 - 🌐 Sięga aż do wnętrza Ziemi, znajdującego się na głębokości 6371 km.
 - 🌐 Temperatura wynosi tu około 6000°C.
 - 🌐 Ciśnienie sięga około 400 GPa.
 - 🌐 Gęstość dochodzi do około 14 g/cm³.



Właściwości fizyczne wnętrza Ziemi

- 🌐 Wraz z głębokością Ziemi obserwujemy wzrost ciśnienia, gęstości i temperatury.
- 🌐 Ocenia się, że na głębokości około 2 000 km ciśnienie jest już prawie milion razy większe niż ciśnienie atmosferyczne.
- 🌐 W samym środku Ziemi wynosi ono około 400 GPa i tym samym jest nawet 3,5-4 mln razy większe od ciśnienia atmosferycznego.
- 🌐 Znaczne różnice gęstości poszczególnych warstw Ziemi wynikają z ich właściwości, składu i budowy – najlepiej widać to w przypadku jądra zewnętrznego, będącego w stanie ciekłym i jądra wewnętrznego, które wskutek olbrzymiego ciśnienia tam panującego jest już w stanie stałym.



Skład chemiczny Ziemi

🌐 **Skład chemiczny Ziemi** zmienia się wraz z głębokością i kolejnymi warstwami:

🌐 w **skorupie ziemskiej** oprócz **tlenu** (jego stężenie szybko zmniejsza się wraz z głębokością), występuje także w przypadku:

🌐 **skorupy kontynentalnej**: **krzem** i **glin** (do dnia dzisiejszego nazywa się czasem tą warstwę jako **sial**),

🌐 **skorupy oceanicznej**: **krzem** i **magnez** (dawną nazwą – **sima**);

🌐 w **płaszczu górnym** przeważa: **chrom**, **żelazo**, **krzem** i **magnez** (stąd dawną nazwą – **crofesima**);

🌐 w **płaszczu dolnym** występuje głównie: **nikiel**, **żelazo**, **krzem** i **magnez** (**nifesima**);

🌐 w **jądrze Ziemi** znajdziemy przede wszystkim: **nikiel** i **żelazo** (**nife**).

WARSTWA ZIEMI		PIERWIASTEK CHEMICZNY
skorupa ziemska		<ul style="list-style-type: none"> ➔ tlen (O) – 47% ➔ krzem (Si) – 28% ➔ glin (Al) – 8% ➔ żelazo (Fe) – 5% ➔ wapń (Ca) – 4% ➔ sód (Na) – 3% ➔ potas (K) – 3% ➔ magnez (Mg) – 2%
płaszcz ziemski	płaszcz górny	<ul style="list-style-type: none"> ➔ chrom (Cr), ➔ żelazo (Fe), ➔ krzem (Si), ➔ magnez (Mg)
	płaszcz dolny	<ul style="list-style-type: none"> ➔ niklu (Ni), ➔ żelaza (Fe), ➔ krzemu (Si), ➔ magnezu (Mg)
jądro Ziemi		<ul style="list-style-type: none"> ➔ nikiel (Ni), ➔ żelazo (Fe), z domieszkami: ➔ tlenu, siarki, ➔ krzemu, potasu.

Stopień i gradient geotermiczny

- 🌐 **Stopień geotermiczny** – liczba metrów, o którą należy się przesunąć w głąb Ziemi, aby temperatura wzrosła o 1°C .
 - 🌐 Dla naszej planety wynosi on **około 33 m** (przynajmniej do głębokości około 100 km – ponieważ później wzrost temperatury jest już wolniejszy).
 - 🌐 Wartość stopnia geotermicznego zależy od bardzo wielu czynników, np.:
 - 🌐 budowy geologicznej, i tak:
 - 🌐 w strukturach młodych jest na ogół niższy niż średni naszej planety,
 - 🌐 np. młodych pasmach fałdowych oraz na obszarach czynnego wulkanizmu;
 - 🌐 w strukturach starszych jest zwykle wyższy,
 - 🌐 np. na terenach starych struktur prekambryjskich (w obrębie tarcz krystalicznych).
 - 🌐 Na obszarze Polski średnia wartość stopnia geotermicznego wynosi około 47 m.
- 🌐 **Gradient geotermiczny** – liczba o jaką wzrośnie temperatura w $^{\circ}\text{C}$ na odcinku wynoszącym 1 m (w praktyce najczęściej stosuje się większą wartość – **100 m**).
- 🌐 Średnia wartość gradientu geotermicznego wynosi **około $3,1^{\circ}\text{C}$** (na 100 m).



Zadanie

Oblicz temperaturę w kopalni rud miedzi "Rudna" na głębokości około 550 m przyjmując, że:

- wartość stopnia geotermicznego w rejonie kopalni wynosi $46,6 \text{ m}/1^\circ\text{C}$,
- wysokość średniej rocznej temperatury powietrza w rejonie kopalni wynosi około $8,5^\circ\text{C}$,
- roczne zmiany temperatury powietrza sięgają do głębokości 20 m; na tej głębokości temperatura gruntu jest stała i wynosi tyle, ile średnia roczna temperatura powietrza na powierzchni.

Dane:

Szukane:

.....
.....
.....

.....

Obliczenia:

.....
.....
.....
.....

Odpowiedź: Temperatura w kopalni "Rudna" na głębokości 550 m wynosi przez cały rok ... $^\circ\text{C}$.



Zadanie - odpowiedź

Oblicz temperaturę w kopalni rud miedzi "Rudna" na głębokości około 550 m przyjmując, że:

- wartość stopnia geotermicznego w rejonie kopalni wynosi $46,6 \text{ m}/1^\circ\text{C}$,
- wysokość średniej rocznej temperatury powietrza w rejonie kopalni wynosi około $8,5^\circ\text{C}$,
- roczne zmiany temperatury powietrza sięgają do głębokości 20 m; na tej głębokości temperatura gruntu jest stała i wynosi tyle, ile średnia roczna temperatura powietrza na powierzchni.

Dane:

średnia roczna temp. na Dolnym Śląsku $T=8,5^\circ\text{C}$

stopień geotermiczny w rejonie kopalni "Rudna" = $46,6 \text{ m}/1^\circ\text{C}$

głębokość do której następują zmiany temp. $h = 20 \text{ m}$

Szukane:

temp. w kopalni "Rudna"

$T = ?$

Obliczenia:

1. Wzrost temperatury wraz z głębokością dotyczy warstwy:

$$550 \text{ m} - 20 \text{ m} = 530 \text{ m};$$

2. Wzrost temperatury gruntu w tej warstwie obliczamy z proporcji:

$$46,6 \text{ m} - 1^\circ\text{C}$$

$$530 \text{ m} - x^\circ\text{C}$$

$$x^\circ\text{C} = \frac{530 \text{ m} \times 1^\circ\text{C}}{46,6 \text{ m}} = 11,4^\circ\text{C}$$

3. Obliczamy temperaturę w kopalni na głębokości 550 m:

$$8,5^\circ\text{C} + 11,4^\circ\text{C} = 19,9^\circ\text{C}.$$

Odpowiedź: Temperatura w kopalni "Rudna" na głębokości 550 m wynosi przez cały rok $19,9^\circ\text{C}$.



KONIEC



Materiały pomocnicze do nauki
Opracowane w celach edukacyjnych (niekomercyjnych)

Opracowanie i redakcja: *Sławomir Dmowski*
Kontakt: *kontakt@geografia24.eu*

WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE
- KOPIOWANIE ZABRONIONE -