



V. Wnętrze Ziemi. Procesy endogeniczne

1. Budowa wnętrza Ziemi

Źródła wiedzy – badania bezpośrednie

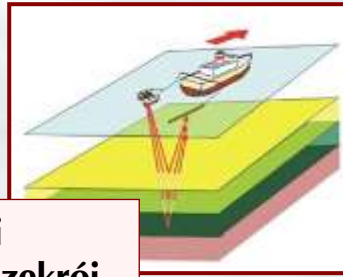
- Wiedza na temat budowy i właściwości wnętrza Ziemi tylko w niewielkim stopniu opiera się na bezpośrednich obserwacjach.
- Wynika to z faktu, że najgłębsze “dziury” w Ziemi sięgają ułamka procenta promienia ziemskiego:
 - wiercenie dotarło do głębokości około 13,5 km,
 - 13 500 metrów (odwiert Exxon’a 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.



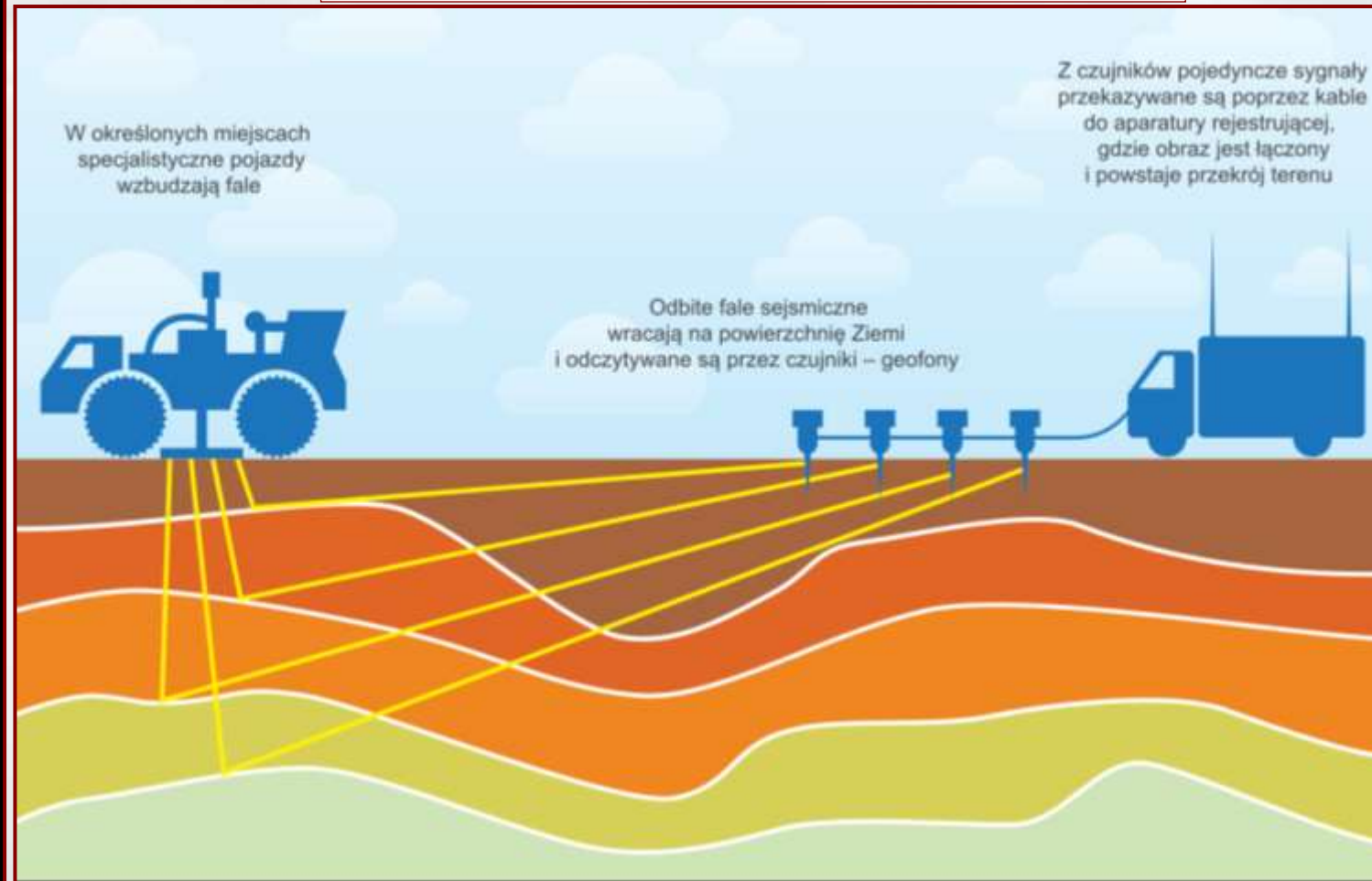
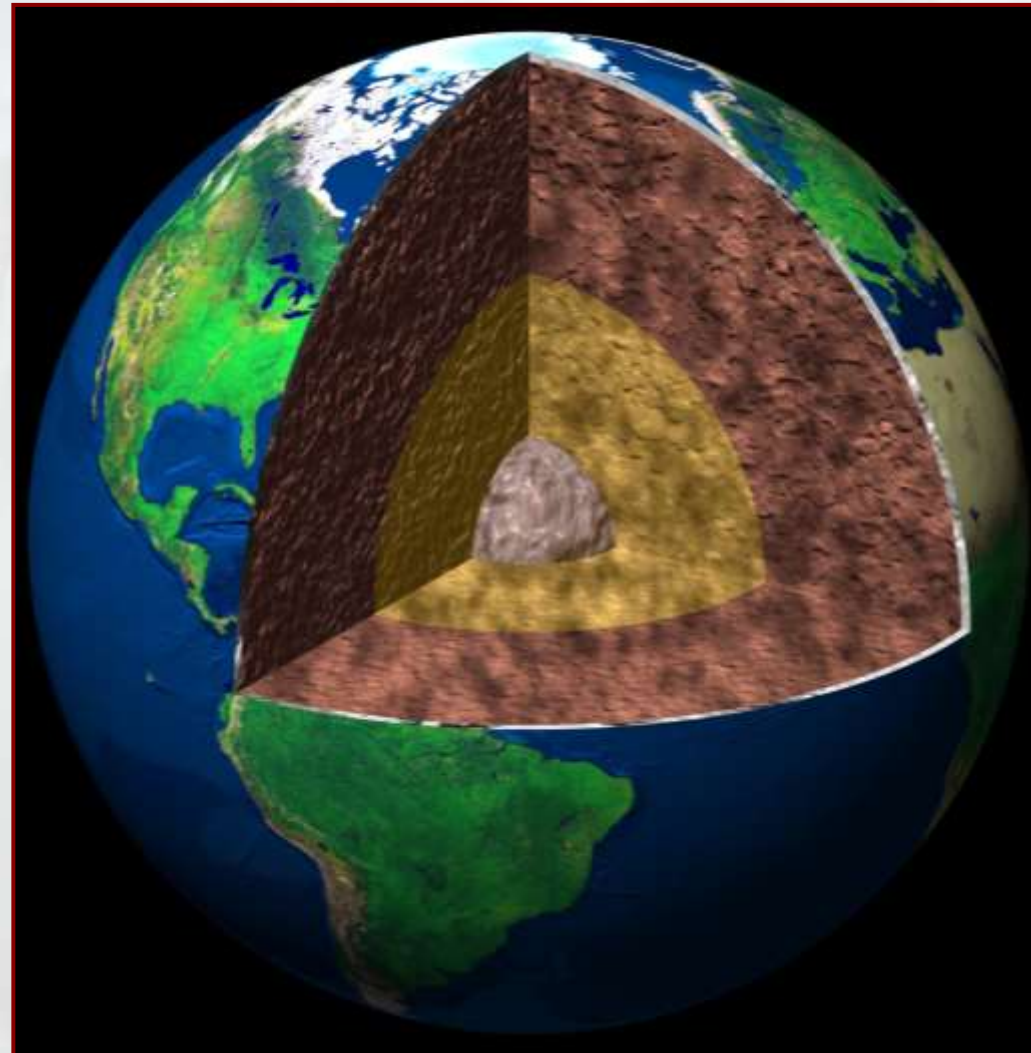
Najgłębsza kopalnia na świecie – Mponeng w RPA

Źródła wiedzy – badania pośrednie

🌐 Jako podstawowe źródło informacji pozostają zatem **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.



Schemat badań dna morskiego metodami sejsmoakustycznymi, pozwalającymi śledzić przekrój warstw osadowych do około 2 km pod dnem morskim.



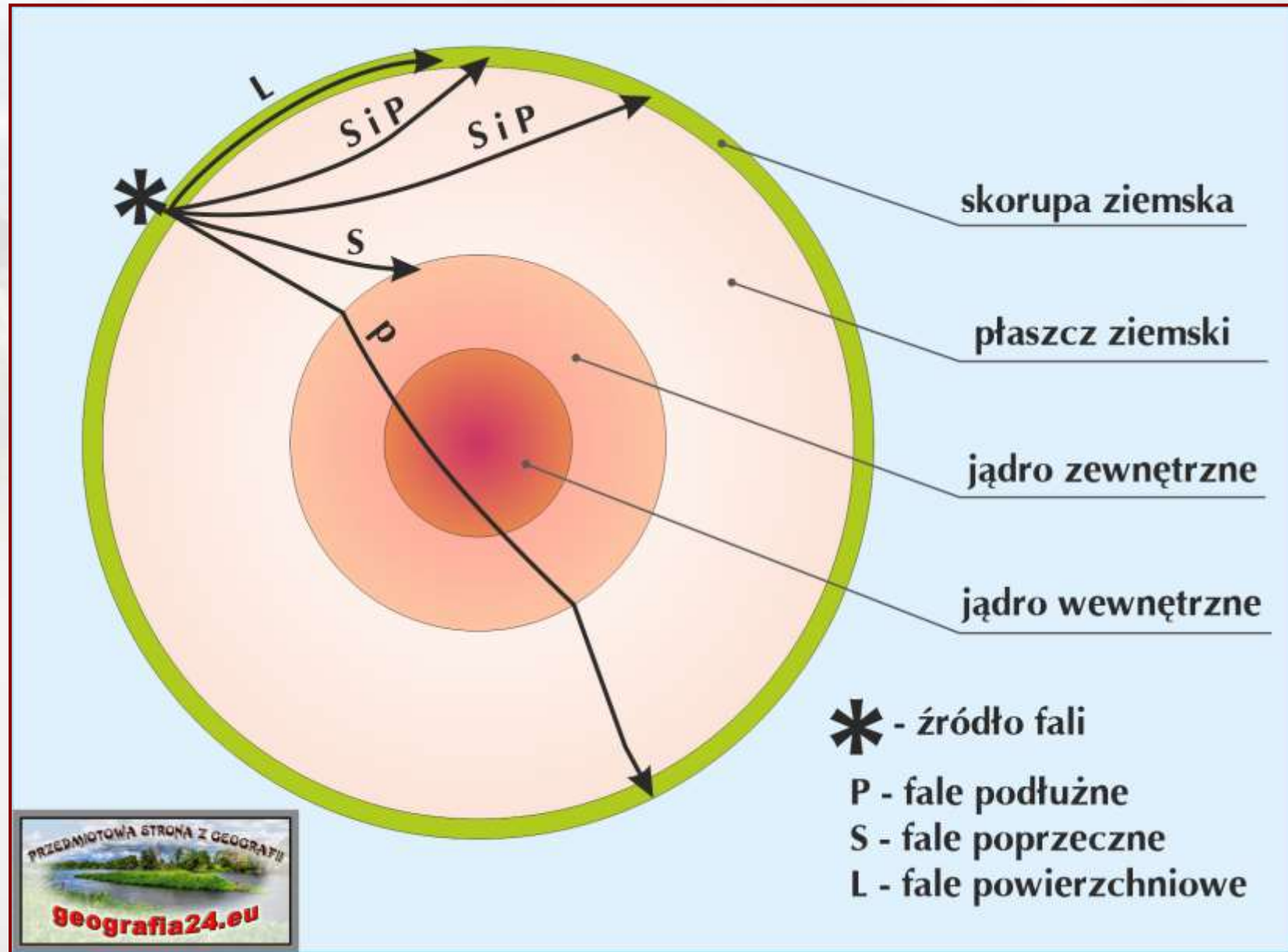
W określonych miejscach specjalistyczne pojazdy wzbudzają fale

Odbite fale sejsmiczne wracają na powierzchnię Ziemi i odczytywane są przez czujniki – geofony

Z czujników pojedyncze sygnały przekazywane są poprzez kable do aparatury rejestrującej, gdzie obraz jest łączony i powstaje przekrój terenu

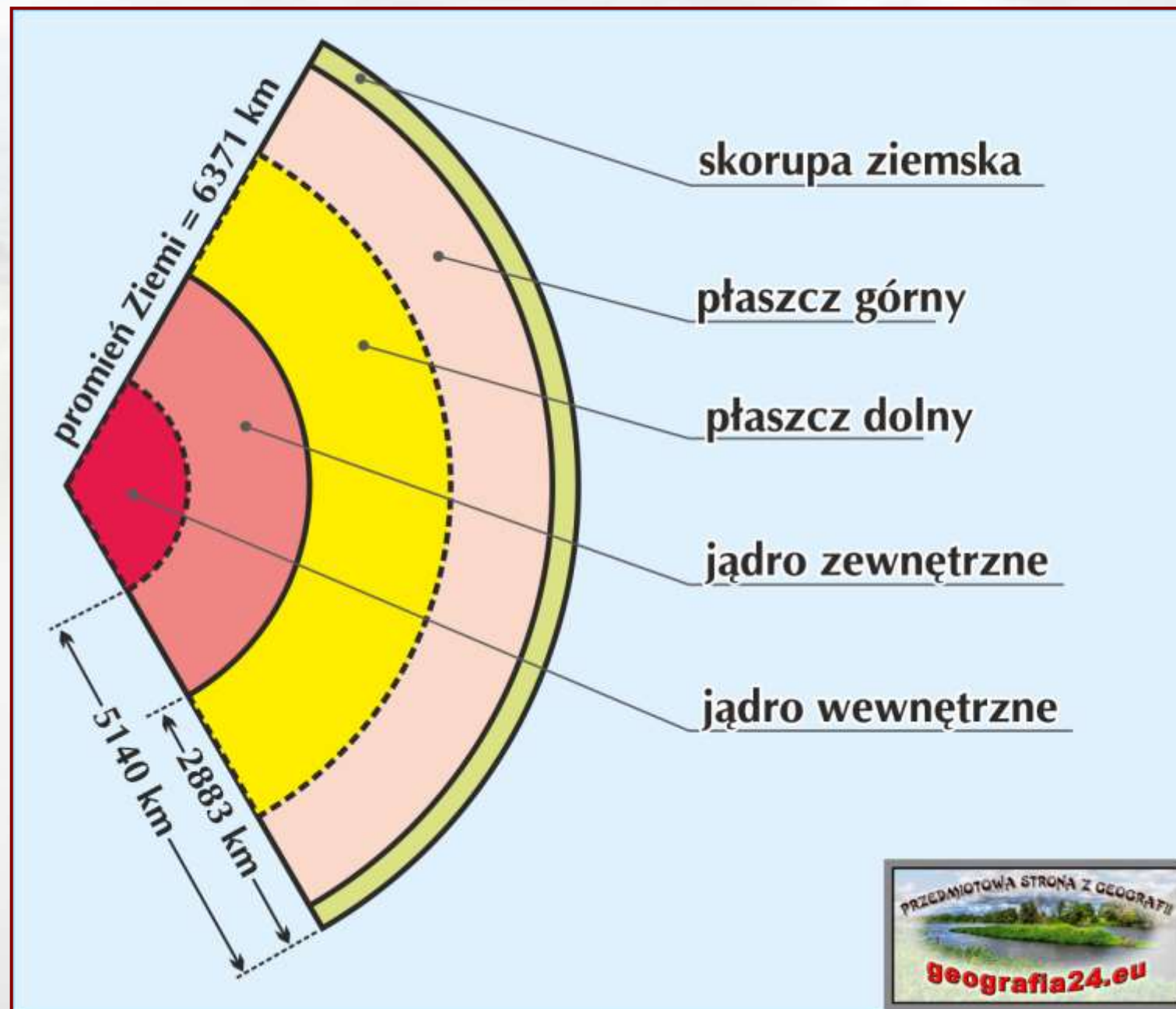
Rozchodzenie fal sejsmicznych w różnych ośrodkach

- 🌐 **Fale sejsmiczne** wzbudzone są w wyniku trzęsień ziemi (lub sztucznie przez człowieka),
- 🌐 powstaje zaburzenie równowagi Ziemi, która zachowuje się jak ciało sprężyste,
- 🌐 skutkiem jest powstanie i rozchodzenie się dwóch rodzajów fal sejsmicznych:
 - 🌐 **podłużnych** (drżenia rozchodzą się w tym samym kierunku), szybszych – które przechodząc przez ośrodki ciekłe załamują się i zmieniają nieco kierunek rozchodzenia;
 - 🌐 **poprzecznych** (drżenia 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**.



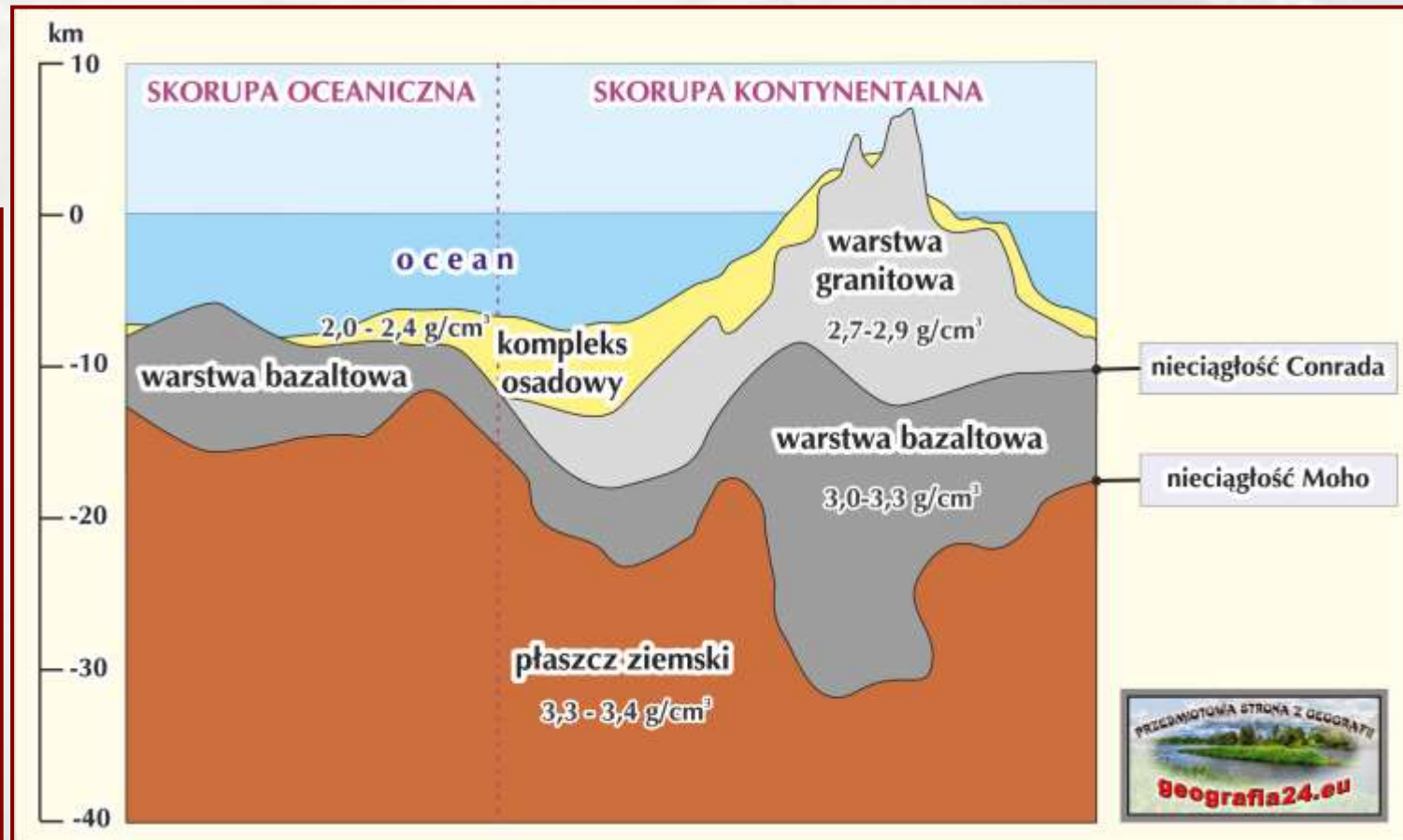
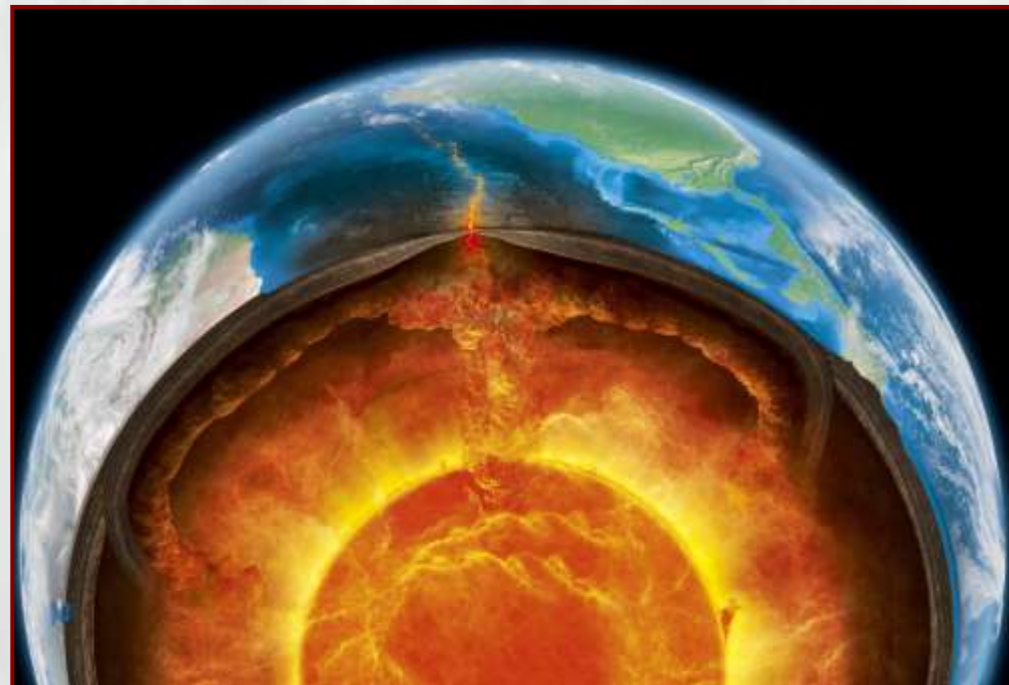
Fale sejsmiczne źródłem wiedzy o budowie Ziemi

- 🌐 Rozchodzące się fale sejsmiczne na pewnych głębokościach, skokowo zmieniają swoje parametry (prędkość), ulegając dodatkowo załamaniu lub nawet odbiciu.
- 🌐 Dzięki tym miejscom możemy określić budowę wnętrza Ziemi, wyszczególniając kolejne warstwy, zwane **geosferami**, rozdzielane przez **powierzchnie nieciągłości**, gdzie właśnie to zjawisko się objawia.
- 🌐 Powierzchnie nieciągłości często tworzone są przez stosunkowo cienkie warstwy Ziemi, w których następuje bardzo szybka zmiana ich parametrów.
- 🌐 Geosfery (warstwy Ziemi) różnią się od siebie m.in. parametrami fizycznymi (temperaturą i ciśnieniem) oraz chemicznymi (składem chemicznym).



Skorupa ziemska

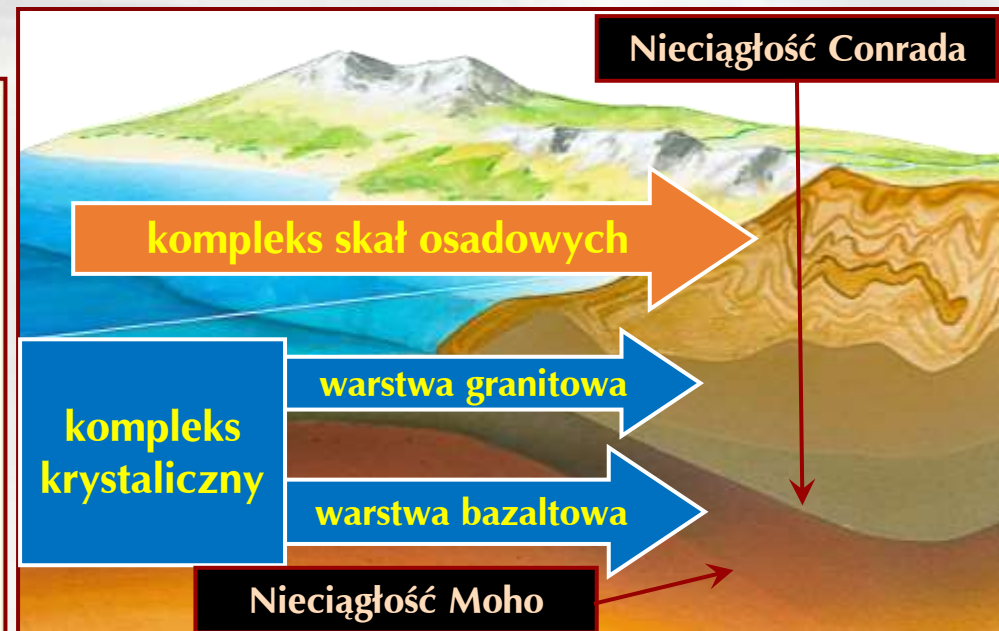
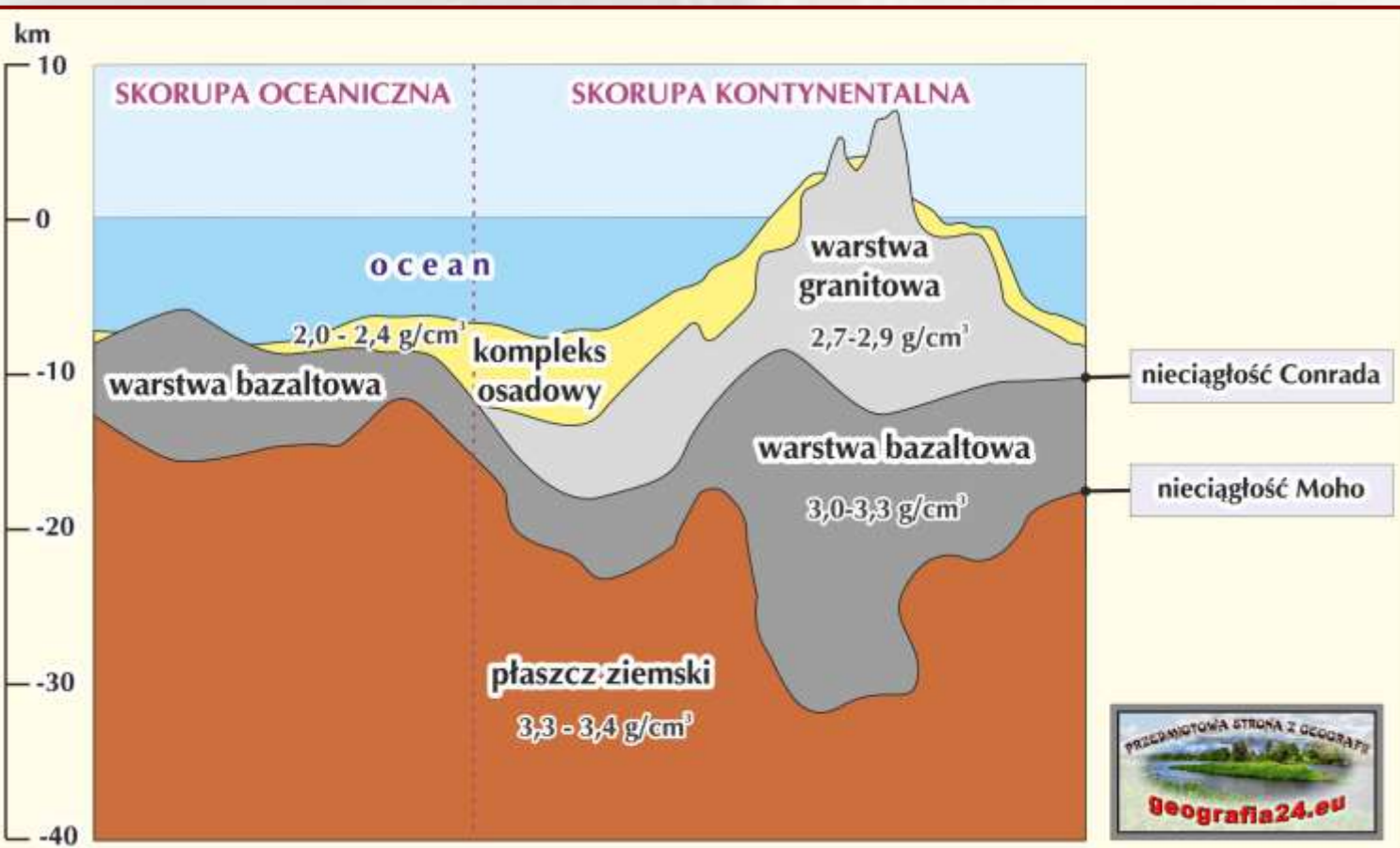
- ☉ **Skorupa ziemska** – wierzchnia, niejednorodna i najmniejsza objętościowo geosfera Ziemi (stanowi niecały 1% masy Ziemi), zbudowana ze wszystkich znanych pierwiastków chemicznych, czasem cennych i wykorzystanych gospodarczo.
- ☉ Dolną granicę wyznacza **strefa nieciągłości Moho (Mohorovicicia)**,
 - ☉ poniżej niej znajduje się już płaszcz ziemski.
- ☉ W jej obrębie znajdują się dwie mniejsze struktury, zróżnicowane pod względem zasięgu przestrzennego oraz rodzaju skał z których są zbudowane:
 - ☉ skorupa kontynentalna,
 - ☉ skorupa oceaniczna.



Skorupa ziemska – kontynentalna

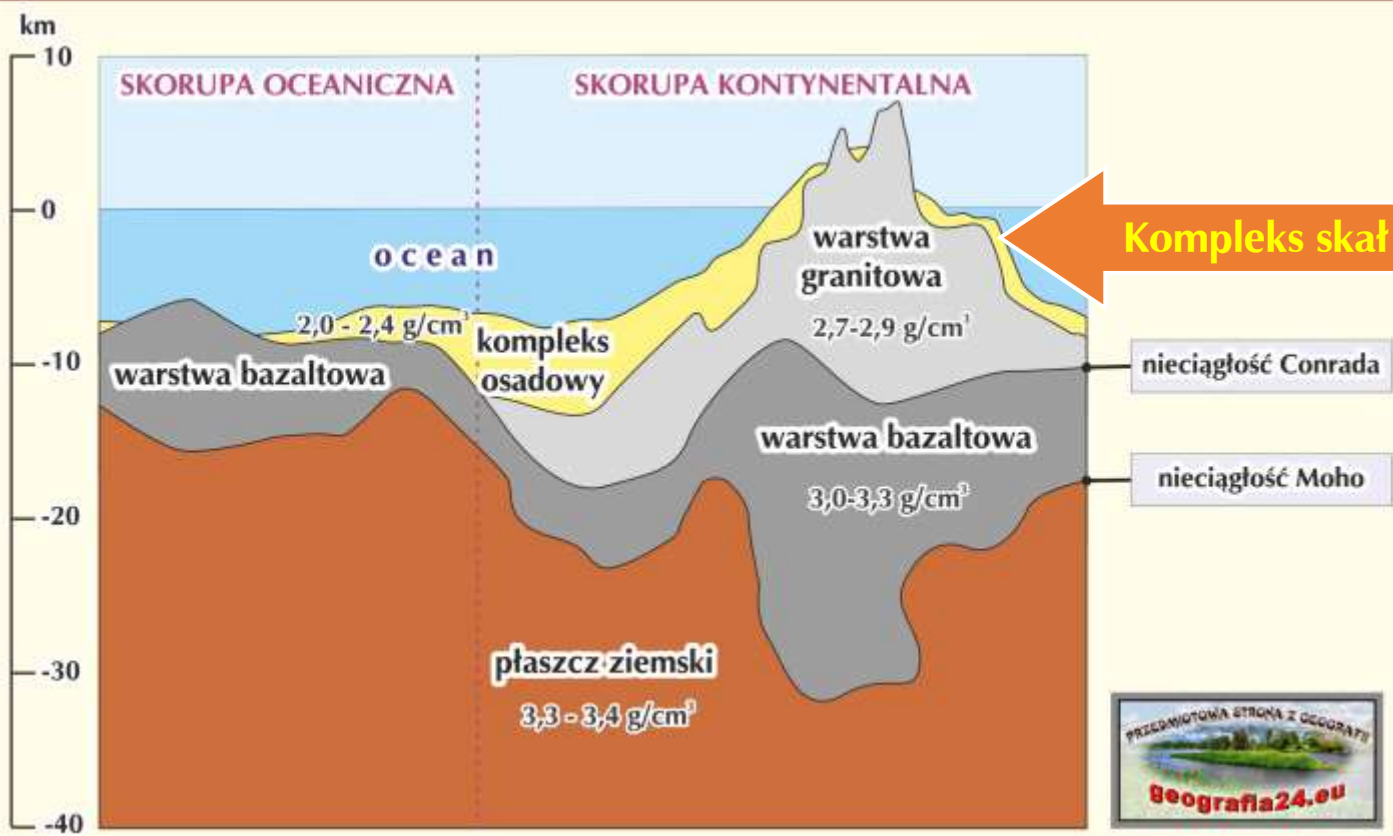
🌐 **Skorupa kontynentalna** – wierzchnia część Ziemi, zlokalizowana w obrębie kontynentów, ukształtowana w prekambrze (nawet 4,2 mld lat temu), o najmniejszej średniej gęstości skał (wynosi ona około $2,7 \text{ g/cm}^3$), w obrębie której możemy wyróżnić dwie warstwy poczynając od góry:

- 🌐 **wierzchni kompleks skał osadowych**,
- 🌐 **dolny kompleks krystaliczny** (warstwa granitowa i bazaltowa).



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.



Kompleks skał osadowych



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 $2,7-2,9 \text{ g/cm}^3$,

☉ 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 $3,0-3,3 \text{ g/cm}^3$,

☉ tworzą ją skały magmowe zbliżone własnościami geofizycznymi do bazaltów,

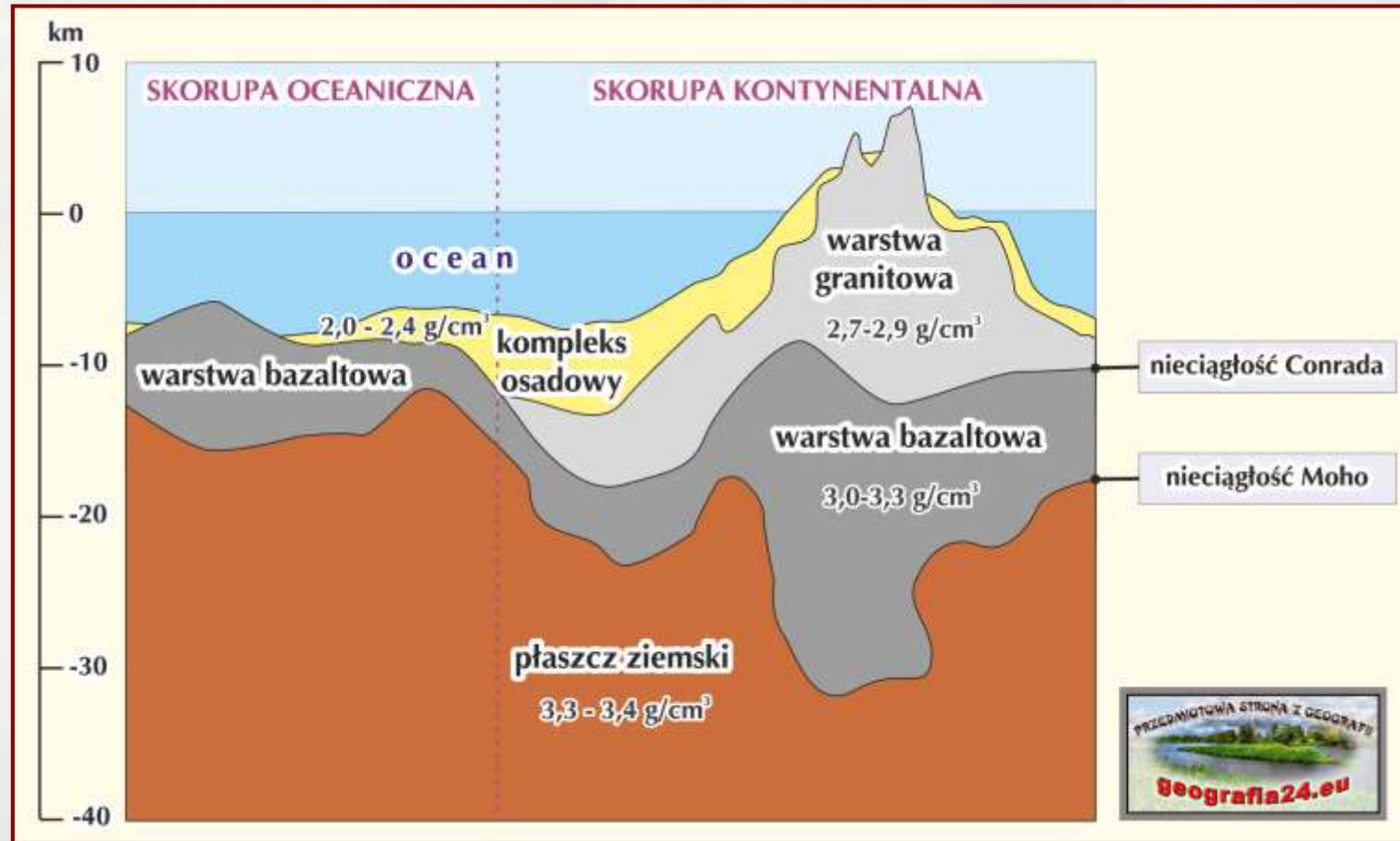
☉ skały o odczynie zasadowym,

☉ tj. gabra i bazalty,

☉ w składzie dominują:

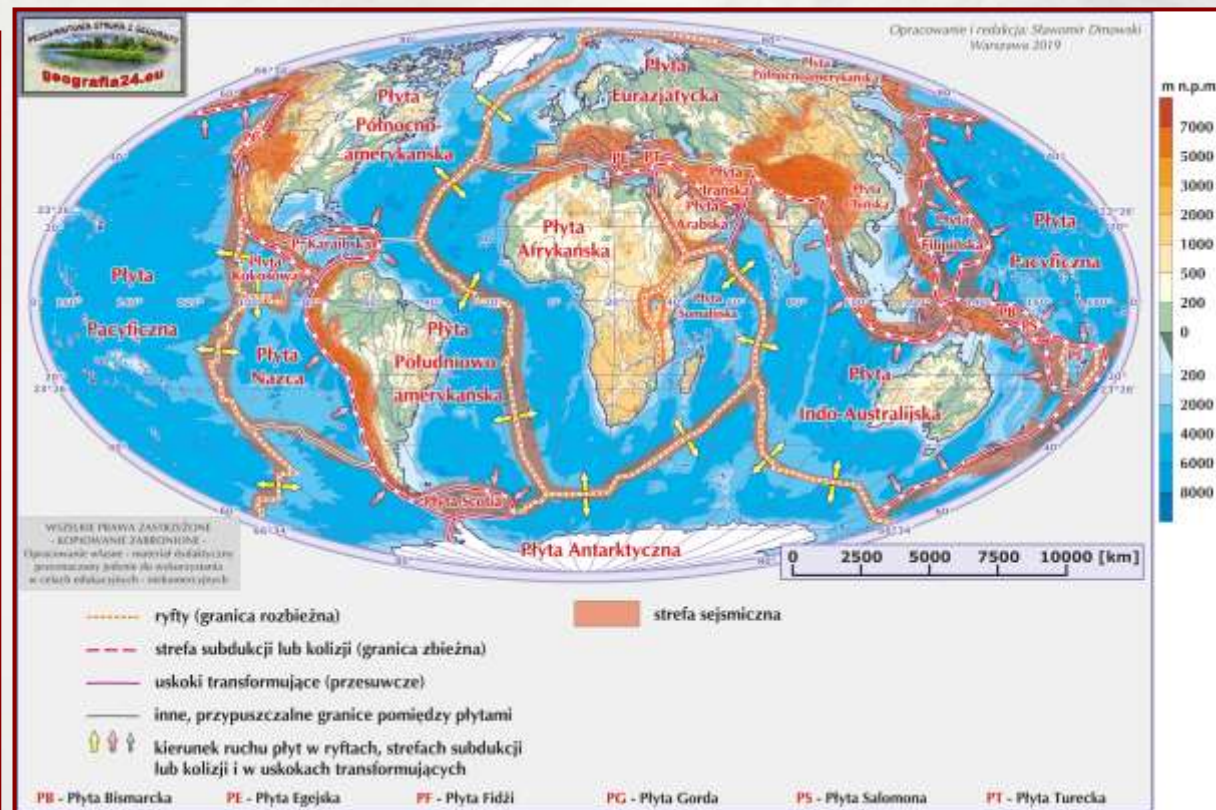
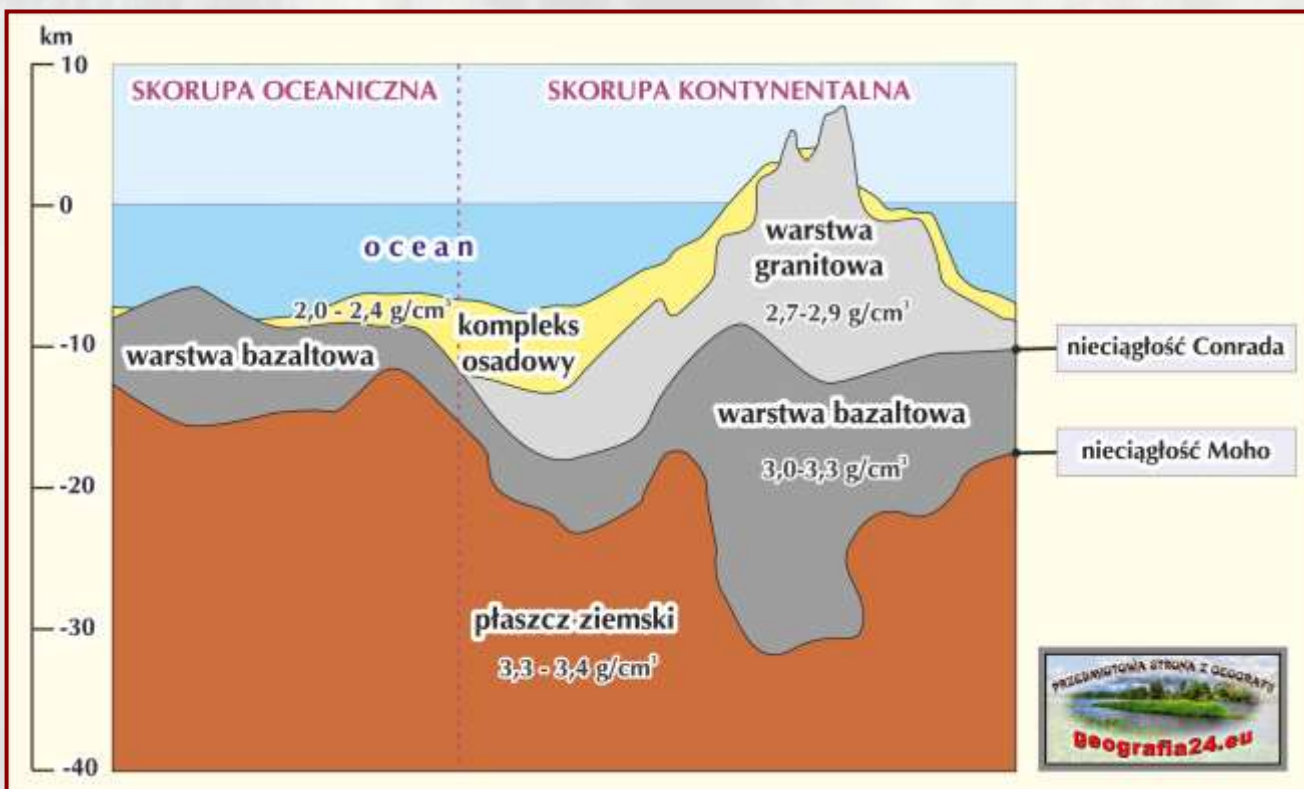
☉ krzem (Si), magnez (Mg) i tlen (O),

☉ stąd dawna nazwa – **sima**.



Skorupa ziemska – oceaniczna

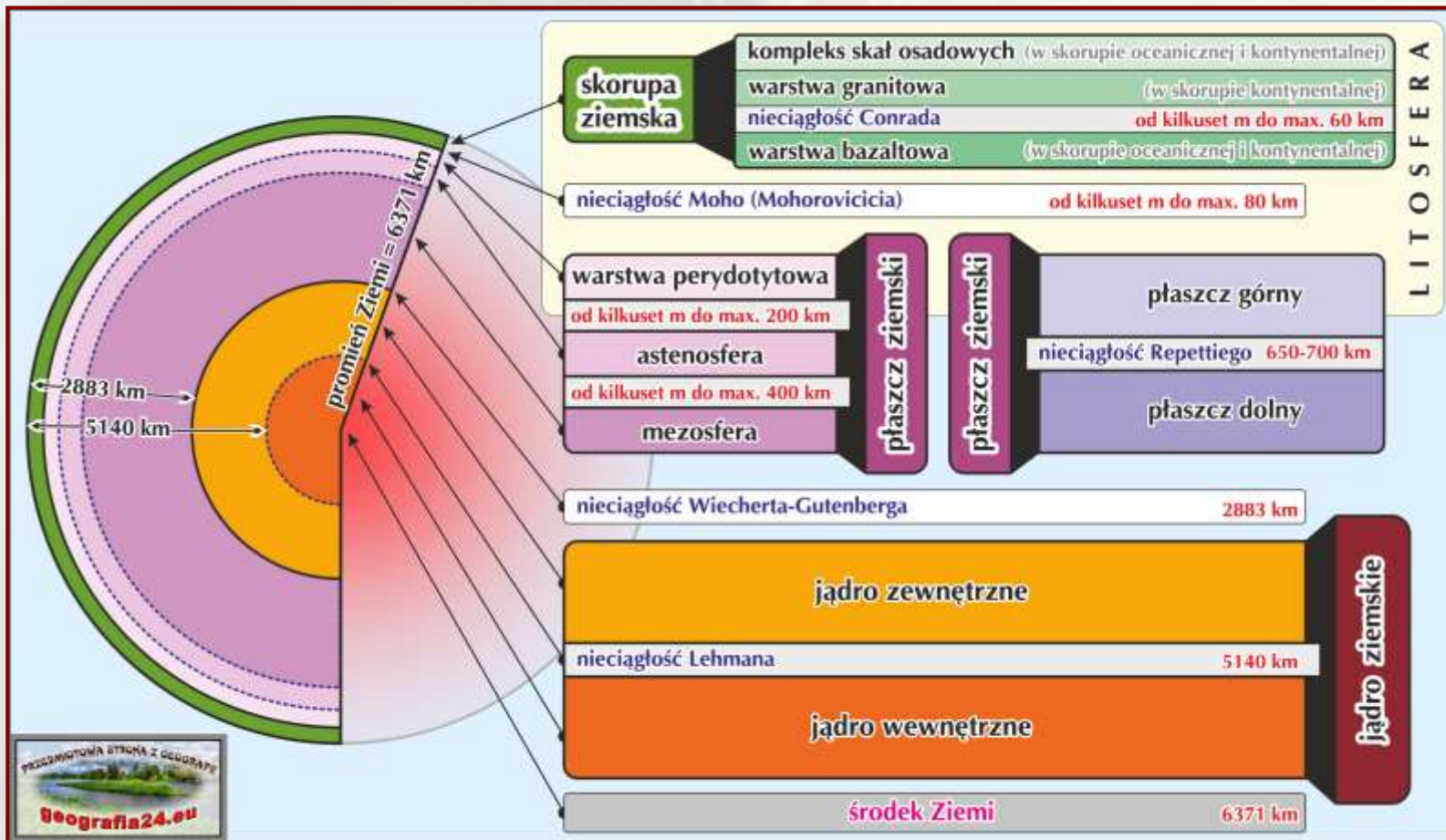
- 🌐 **Skorupa oceaniczna** – o średniej gęstości skał wynoszącej około $3,0 \text{ g/cm}^3$ oraz miąższości wahającej się:
 - 🌐 **od kilkuset metrów** – w centralnych częściach grzbietów śródoceanicznych,
 - 🌐 **do około 7-15 km** – w brzeżnych strefach oceanów (przy kontynentach);
- 🌐 tworzy się nieustannie 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

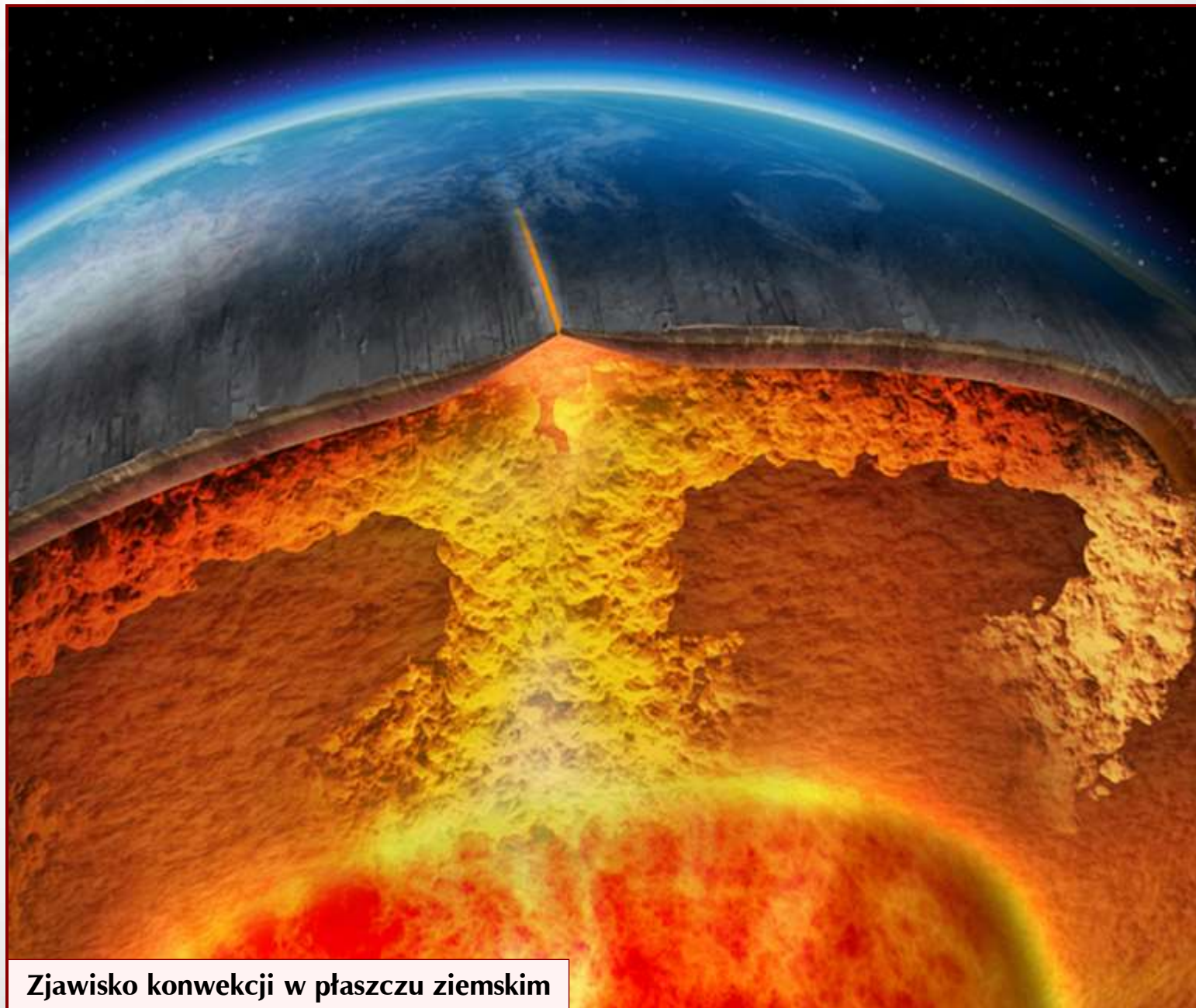
🌐 **Płaszcz ziemski** – jest najgrubszą warstwą obejmującą około 2/3 masy Ziemi (około 68%), wykazującą pewne cechy stanu skupienia ciekłego i znajdującą się pomiędzy:

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

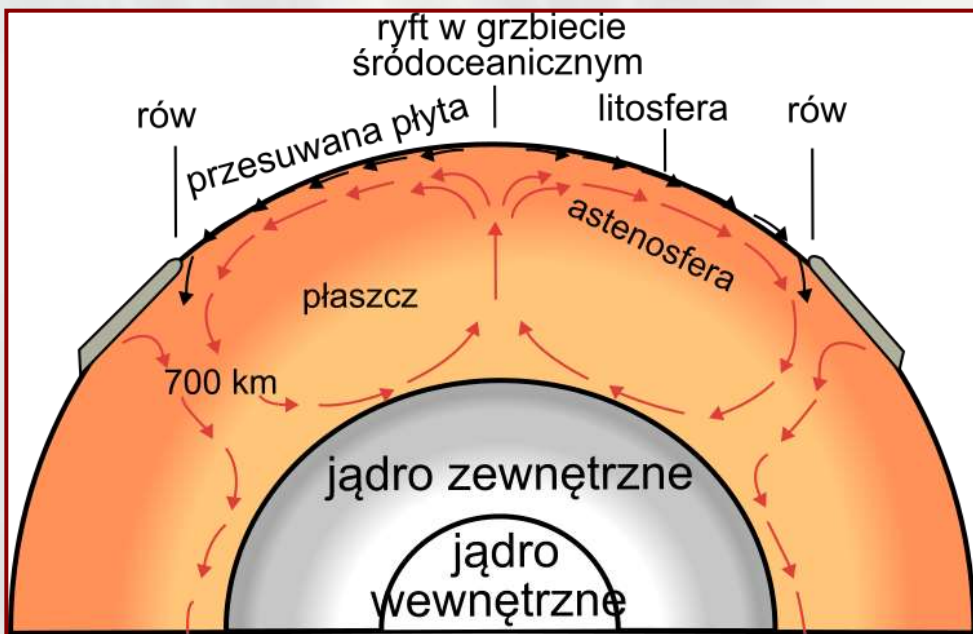


Płaszcz ziemski

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



Zjawisko konwekcji w płaszczu ziemskim



Płaszcz ziemski – podział starszy

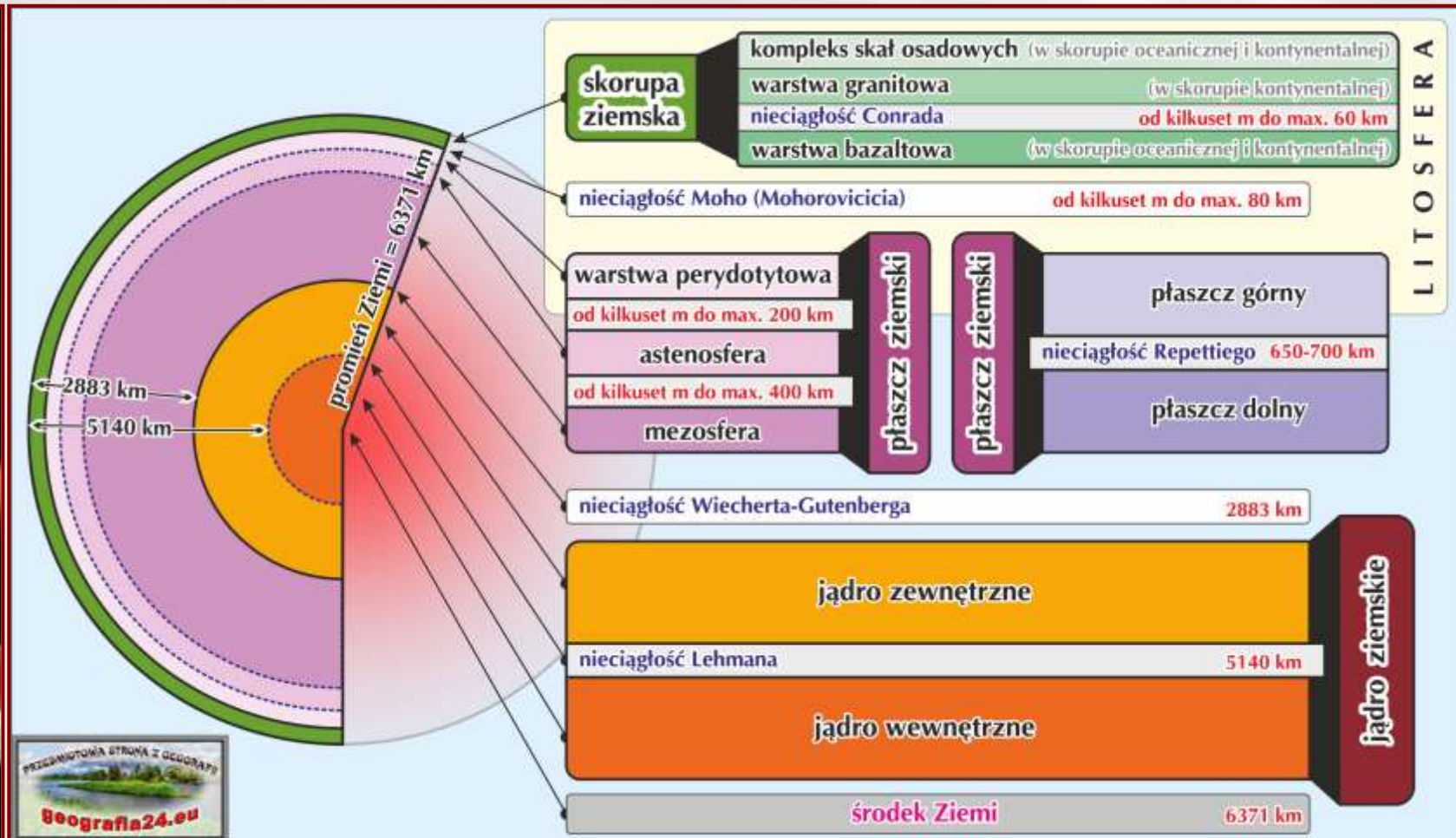
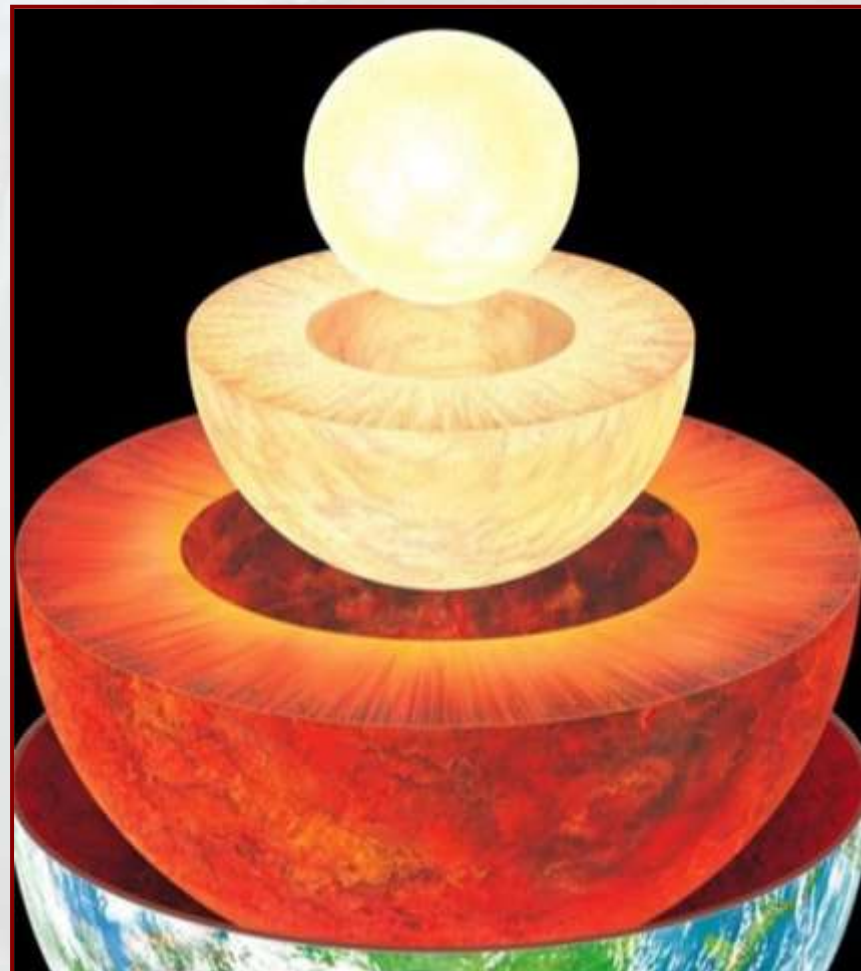
🌐 **Płaszcz ziemski** dzieli się zgodnie ze starszym podziałem na dwie części:

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

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

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

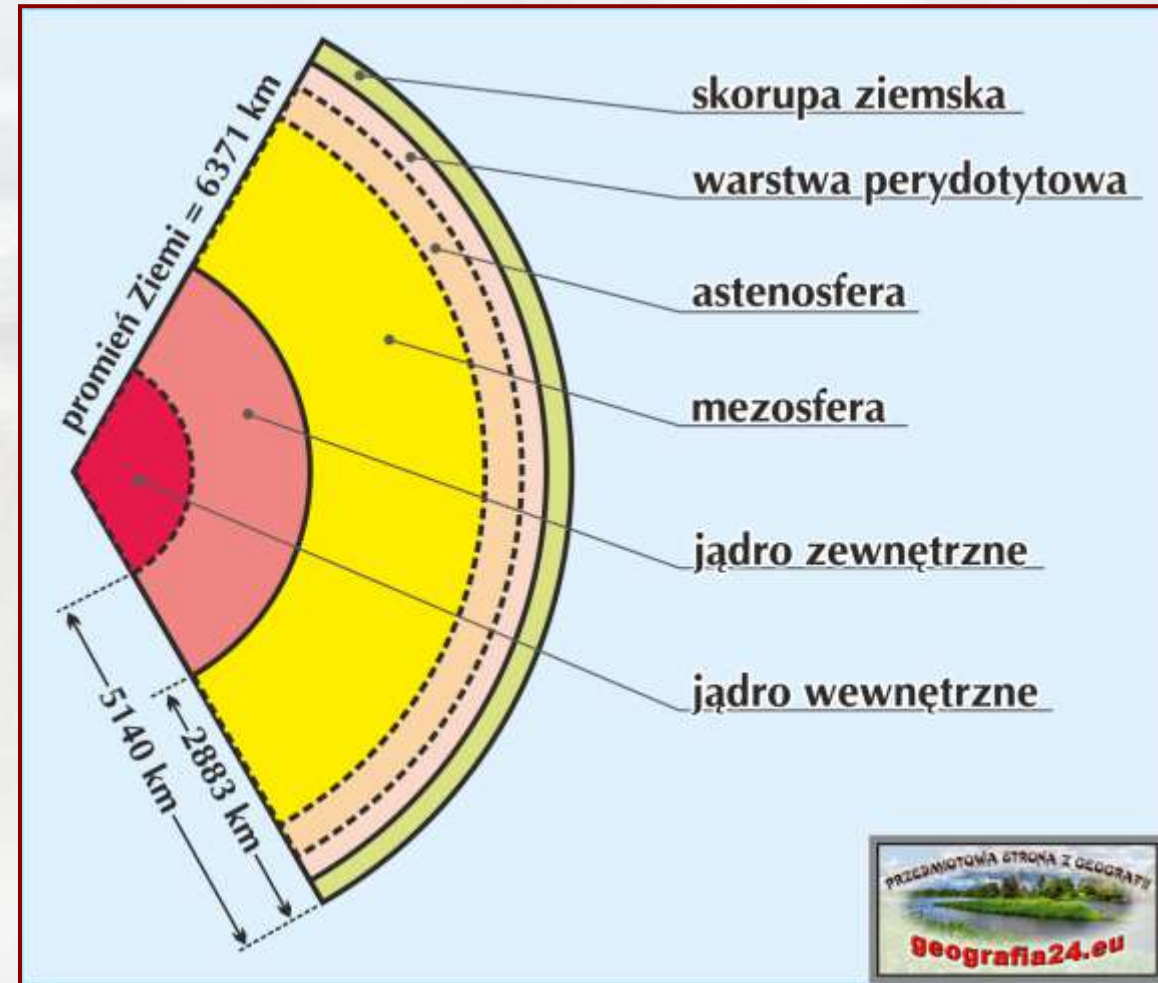
🌐 w składzie dominują: nikiel (Ni), żelazo (Fe), krzem (Si) i magnez (Mg) – **nifesima**.



Płaszcz ziemski – podział aktualny

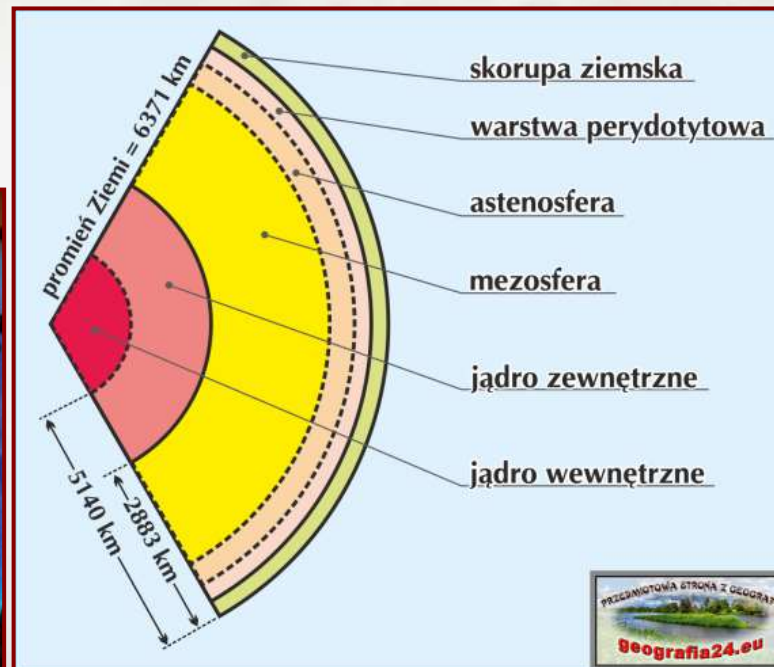
🌐 **Płaszcz ziemski** dzieli się zgodnie z nowszymi podziałami na trzy części:

- 🌐 **warstwę perydotytową** – będącą dość sztywną strukturą skalną, sięgającą do około 200 km (górna część płaszcz górnego) w głąb Ziemi (w obrębie młodych orogenów), o gęstości skał wynoszącej $3,4 \text{ g/cm}^3$,
- 🌐 **wraz ze skorupą ziemską tworzy litosferę**, dzielącą się na będące w ciągłym ruchu płyty tektoniczne,
- 🌐 **astenosferę** – sięgającą do głębokości około 400 km,
 - 🌐 wykazuje ona cechy ciała plastycznego – jest to warstwa półpłynna, podatna na deformacje, co wynika głównie z faktu, iż cechuje się stosunkowo wysoką temperaturą (w stosunku do głębokości), która jest bardzo bliska temperaturze topnienia skał,
- 🌐 **mezosferę** – jest nieco bardziej sztywną warstwą od astenosfery (wykazuje jednak także cechy ciała plastycznego – szczególnie w dłuższym okresie czasu),
 - 🌐 ze względu na jej znaczne rozmiary (obejmuje dolną część płaszcz górnego i całość płaszcz dolnego) następuje wzrost temperatury wraz z głębokością do około $4\ 000^\circ\text{C}$ w jej dolnej części.



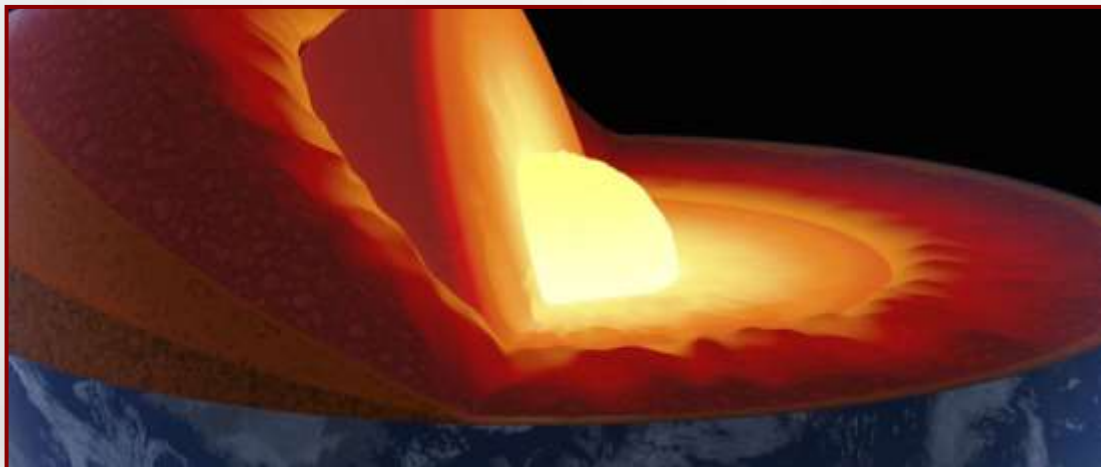
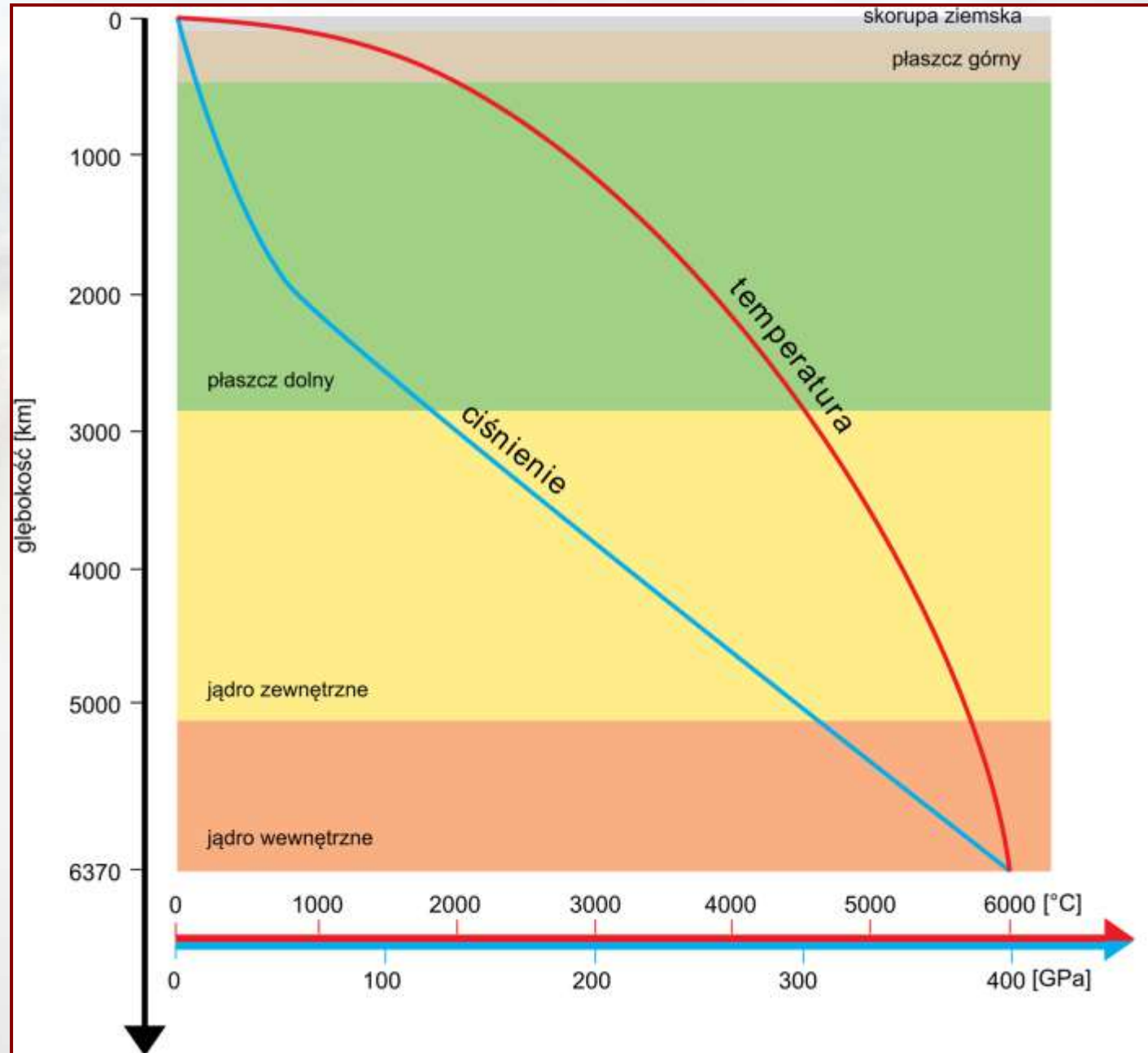
Jądro ziemskie (barysfera)

- 🌐 **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 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,
 - 🌐 sięgające do wnętrza Ziemi, znajdującego się na głębokości 6371 km,
 - 🌐 temperatura wynosi tu około 6000°C,
 - 🌐 ciśnienie sięga ok. 400 GPa,
 - 🌐 gęstość przekracza 17 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 w 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 wnętrza Ziemi

- Skład chemiczny Ziemi zmienia się wraz z głębokością i kolejnymi warstwami:
 - w **skorupie ziemskiej** prócz **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 nazwa – **sima**);
 - w **płaszczu górnym** przeważa: **chrom**, **żelazo**, **krzem** i **magnez** (stąd dawną nazwa – **crofesima**);
 - w **płaszczu dolnym** występuje głównie: **nikiel**, **żelazo**, **krzem** i **magnez** (**nifesima**);
 - w **jądrze ziemskim** znajdziemy przede wszystkim: **nikiel** i **żelazo** (**nife**).

WARSTWA ZIEMI		PIERWIASTEK CHEMICZNY
skorupa ziemska		<ul style="list-style-type: none"> ➔ tlen (O) – 47,00 ➔ krzem (Si) – 29,50 ➔ glin (Al) – 8,05 ➔ żelazo (Fe) – 4,65 ➔ wapń (Ca) – 2,96 ➔ sód (Na) – 2,50 ➔ potas (K) – 2,50 ➔ magnez (Mg) – 1,87
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 ziemskie		<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),
 - czyli wzrost temperatury wynoszący 1°C następuje co każde 33 m.
 - Wartość stopnia geotermicznego zależy od bardzo wielu parametrów, 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 $3,1^{\circ}\text{C}$** .



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:

$$\begin{aligned} 46,6 \text{ m} &- 1^\circ\text{C} \\ 530 \text{ m} &- x^\circ\text{C} \end{aligned}$$

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

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 -**