



VI. Litosfera. Procesy zewnętrzne

1. Wietrzenie. Procesy krasowe

Rola procesów egzogenicznych w kształtowaniu rzeźby naszej planety

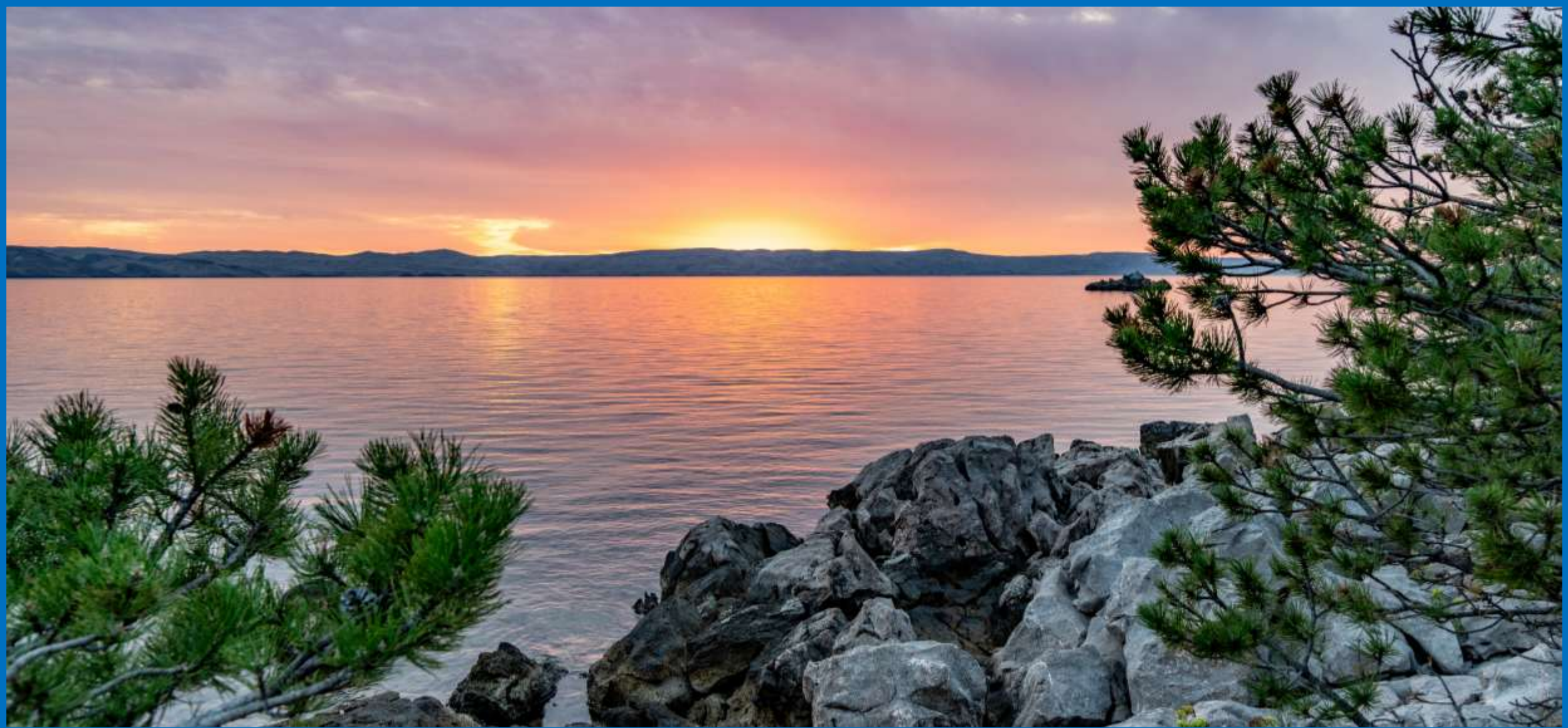
→ **Procesy egzogeniczne (zewnętrzne)** – obejmują różnorodne procesy rzeźbotwórcze zachodzące na powierzchni Ziemi, prowadzące do wyrównywania powierzchni naszej planety.

→ Są one napędzane głównie **energią promieniowania słonecznego** oraz **siłą grawitacji**.

→ Bezpośrednia praca rzeźbotwórcza następuje w wyniku działania procesów i czynników zewnętrznych, w tym:

- **wietrzeń,**
- **ruchów masowych,**
- **erozji,** będącej efektem ruchu wody, lodu i wiatru.





Wietrzenie

Pojęcie wietrzenia

- **Wietrzenie** – proces przystosowywania się skał do panujących na Ziemi warunków fizycznych i chemicznych.
- Zachodzi na styku głównych **powłok ziemskich**: **litosfery z atmosferą, hydrosferą i biosferą**.
- Proces ten polega na fizycznym rozdrabnianiu (kruszeniu) lub chemicznym rozkładzie materiału skalnego.
- Prowadzi to do systematycznego zmniejszenia jego zwięzłości i spoistości.



Zwietrzelina – zewnętrzna część skały o zmienionych właściwościach fizycznych lub/i chemicznych.

Jaki jest skutek wietrzenia?

- **Proces wietrzenia** nie transportuje materiału, ale odgrywa kluczową rolę przygotowawczą – bezpośrednio poprzedza i warunkuje wystąpienie kolejnych procesów rzeźbotwórczych: **erozji**, **transportu**, a w ostateczności **akumulacji**.
- Wietrzenie odgrywa kluczową rolę przygotowawczą w kształtowaniu rzeźby terenu – bez wcześniejszego rozdrobnienia skał, procesy erozji byłyby drastycznie spowolnione.
- **Materiał zwietrzelinowy** (gruz i okruchy skalne) porwany przez wodę, lód lub wiatr staje się potężnym, naturalnym narzędziem ściernym.
- Dzięki niemu żywioły te potrafią niszczyć i żłobić twarde podłoże ze wielokrotną siłą.

Woda, lód i wiatr są czynnikami rzeźbotwórczymi, w wyniku których następuje niszczenie podłoża skalnego, czyli zachodzi erozja. Niszczony materiał skalny jest następnie transportowany w inne miejsce, gdzie osadza się on, czyli akumuluje.



Czynniki warunkujące proces wietrzenia

- **Rodzaj, intensywność oraz tempo przebiegu wietrzenia** nie są wszędzie jednakowe.
- Zależą one przede wszystkim od czterech **głównych grup czynników wietrzenia**, obejmujących:
 - **warunki klimatyczne** (temperaturę i opady),
 - **budowę podłoża skalnego** (rodzaj skały),
 - **warunki orograficzne i ekspozycję stoków**,
 - **wpływ świata organicznego** (zwłaszcza szaty roślinnej).



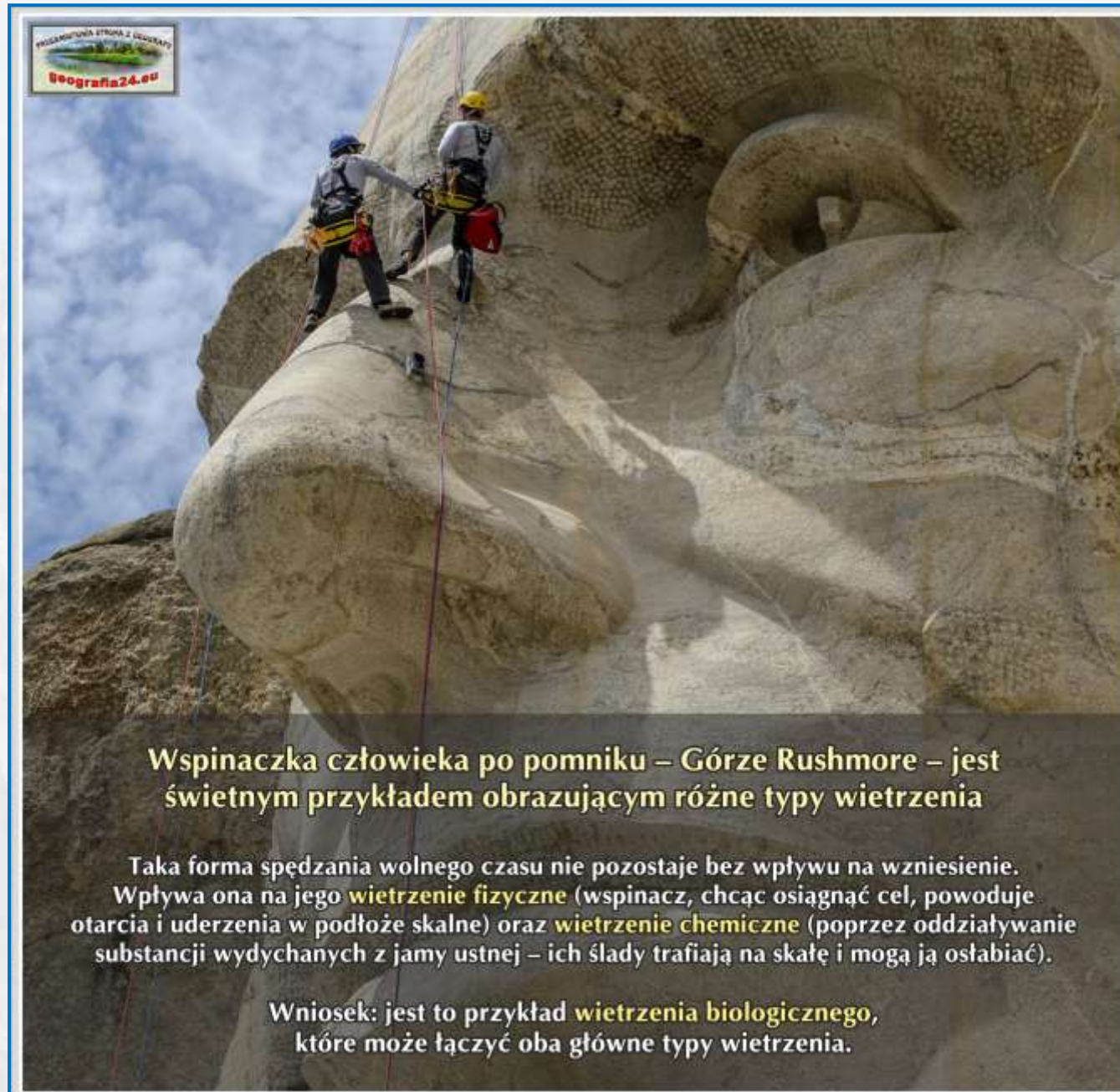
Czy przed wietrzeniem można uciec?

- Na Ziemi **nie istnieje żadna naturalna skała**, która **byłaby w stanie całkowicie oprzeć się procesom wietrzenia**.
- Rozpad każdego odsłoniętego fragmentu Ziemi to wyłącznie kwestia czasu, a nie tego, czy zjawisko to w ogóle nastąpi.
- Oznacza to, że prędzej czy później nawet najtwardsze minerały ulegną nieubłaganej presji sił przyrody.



Główne typy wietrzenia

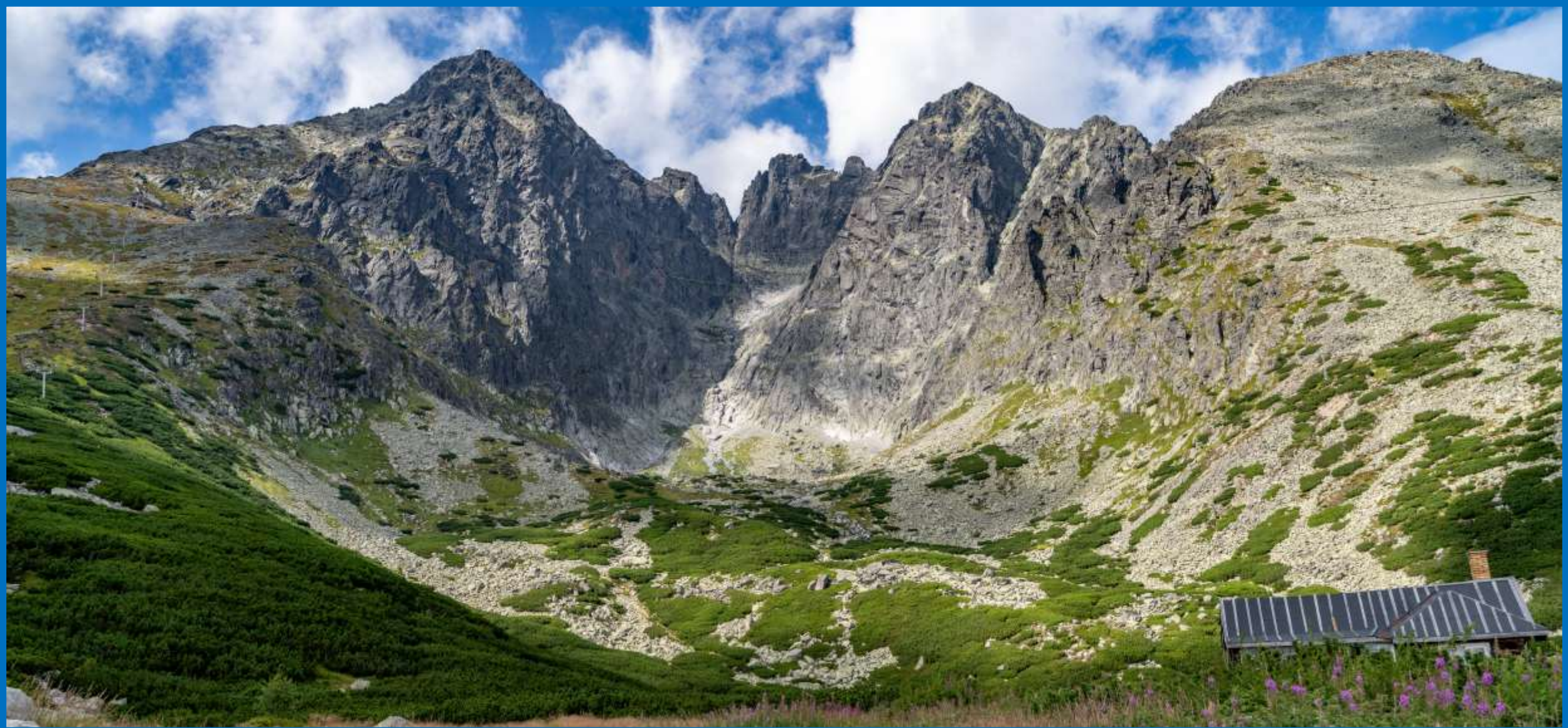
- Wyróżniamy **trzy główne typy wietrzenia**.
 - **Wietrzenie fizyczne (mechaniczne)** – prowadzi wyłącznie do zmian cech fizycznych podłoża.
 - Jego rezultatem jest rozpad litych skał na coraz mniejsze fragmenty (bloki, okruchy, ziarna, aż po pył).
 - W procesie tym drastycznie zmniejsza się zwięzłość i spoistość materiału, jednak jego pierwotny skład chemiczny pozostaje całkowicie nienaruszony.
 - **Wietrzenie chemiczne (dekompozycja)** – proces, w wyniku którego zmianie ulega nie tylko fizyczna spoistość materiału, ale przede wszystkim skład chemiczny i mineralny skały, co prowadzi do powstania zupełnie nowych związków chemicznych.
 - **Wietrzenie biologiczne** – obejmuje destrukcyjne zmiany podłoża będące bezpośrednim efektem rozwoju i aktywności życiowej organizmów.
 - Łączy ono w sobie cechy niszczenia mechanicznego (np. rozsadzanie przez korzenie) oraz chemicznego (np. działanie kwasów organicznych).



Wspinaczka człowieka po pomniku – Górze Rushmore – jest świetnym przykładem obrazującym różne typy wietrzenia

Taka forma spędzania wolnego czasu nie pozostaje bez wpływu na wzniesienie. Wpływa ona na jego **wietrzenie fizyczne** (wspinacz, chcąc osiągnąć cel, powoduje otarcia i uderzenia w podłoże skalne) oraz **wietrzenie chemiczne** (poprzez oddziaływanie substancji wydychanych z jamy ustnej – ich ślady trafiają na skałę i mogą ją osłabiać).

Wniosek: jest to przykład **wietrzenia biologicznego**, które może łączyć oba główne typy wietrzenia.



Wietrzenie fizyczne

Wietrzenie fizyczne (mechaniczne)

- **Wietrzenie fizyczne (mechaniczne)** – prowadzi wyłącznie do zmian cech fizycznych podłoża skalnego poprzez jego rozdrabnianie.
- Jego rezultatem jest rozpad litych skał na coraz mniejsze fragmenty (bloki, okruchy, ziarna, aż po pył).
- W procesie tym znacząco maleje zwięzłość i spoistość materiału, a jednocześnie wzrasta jego całkowita powierzchnia, jednak jego pierwotny skład chemiczny pozostaje całkowicie nienaruszony.



Przedstawiona góra w kolejnych etapach ulega stopniowemu niszczeniu – od wysokiej, stromej i słabo spękanej formy po coraz niższą, silniej spękaną i rozdrobnioną, przy jednoczesnym gromadzeniu się u jej podnóża coraz większej ilości materiału skalnego. W trakcie kolejnych etapów wietrzenia mechanicznego zmieniają się wyłącznie cechy fizyczne skał, natomiast ich skład chemiczny pozostaje niezmienny.

Główne przyczyny wietrzenia fizycznego (mechanicznego)

→ **Głównymi przyczynami wietrzenia fizycznego** są:

1. **wahania temperatury w obrębie jednej skały** wywołane zmianami nasłonecznienia,
2. **proces wietrzenia mrozowego (kongelacji)**, polegający na naprzemiennym zamarzaniu i rozmarzaniu wody w szczelinach skał,
3. **cykliczne zmiany wilgotności podłoża**, które prowadzą do pęcznienia i kurczenia się minerałów,
4. **krystalizacja soli mineralnych** w szczelinach i porach skalnych (**wietrzenie solne**), której narastające kryształy rozsadzają skałę od środka,
5. **odciążenie skał** w wyniku usuwania warstw leżących powyżej, co prowadzi do ich rozprężania i pękania,
6. **mechaniczna działalność organizmów roślinnych i zwierzęcych**, bezpośrednio naruszająca strukturę skały.

Główne rodzaje wietrzenia fizycznego (mechanicznego)



1. Wietrzenie insolacyjne (termiczne)



2. Wietrzenie mrozowe (kongelacja)



3. Wietrzenie skał ilastych (deflokulacja)



4. Wietrzenie solne (salinarne, eksudacja)



5. Wietrzenie odciążeniowe



6. Wietrzenie biologiczne

1. Wietrzenie insolacyjne (termiczne)

- **Wietrzenie insolacyjne (termiczne)** – proces mechanicznego rozpadu skał wywołany częstymi i gwałtownymi zmianami ich temperatury, szczególnie na obszarach o dużych dobowych amplitudach temperatury powietrza.
 - Dogodne warunki występują **na pustyniach gorących strefy zwrotnikowej** i terenach położonych **w górach**.
 - Pod wpływem promieniowania słonecznego skały ulegają wielokrotnemu, naprzemiennemu silnemu nagrzaniu (np. w dzień), a następnie, w wyniku wypromieniowania ciepła, gwałtownemu schłodzeniu (np. w nocy).
 - Proces ten przebiega najintensywniej w przypadku skał **o niejednorodnym składzie mineralnym** (np. w **granitach**).
 - **Ciemne ziarna minerałów** charakteryzują się niskim albedo, przez co **nagrzewają się szybciej i silniej**, co prowadzi do ich znacznego rozszerzania.
 - Z kolei **jasne ziarna minerałów w większym stopniu odbijają promienie słoneczne**, ogrzewając się wolniej i słabiej.
 - Na granicy stykających się ziaren o różnych kolorach powstają potężne naprężenia wewnętrzne, które ostatecznie prowadzą do kruszenia i rozpadu litej skały.



Wietrzenie insolacyjne (termiczne)

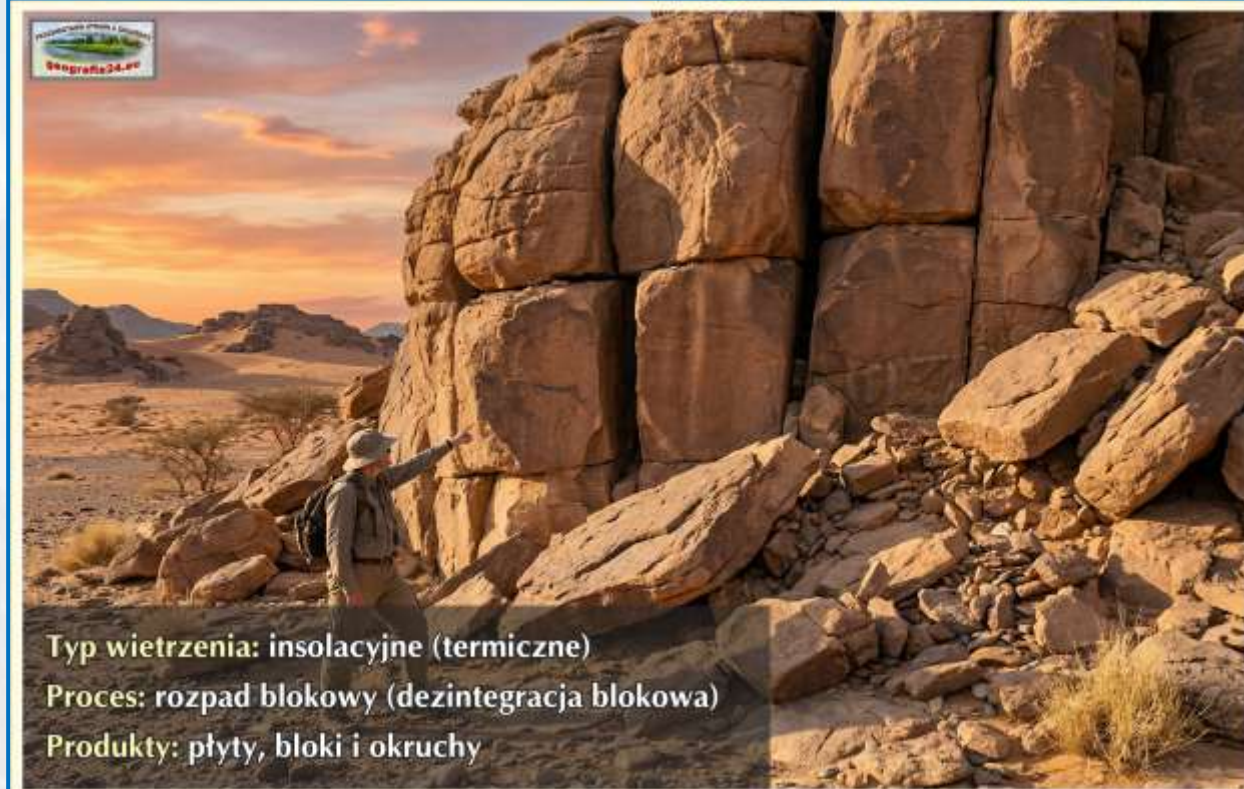
- Obecność chmur w ciągu dnia może paradoksalnie przyspieszać wietrzenie termiczne poprzez zwiększenie częstotliwości cykli nagrzewania i wychładzania.
- Zjawisko to jest szczególnie widoczne przy chmurach Cumulus, gdy słońce jest wielokrotnie zasłaniane i odsłaniane.
- Powoduje to szybkie zmiany temperatury powierzchni skały oraz naprzemienne rozszerzanie i kurczenie się minerałów.
- W efekcie powstają częste naprężenia osłabiające wiązania między minerałami skuteczniej niż pojedynczy cykl dobowy.



Wietrzenie insolacyjne (termiczne) – rozpad ziarnisty (dezintegracja granularna)

- ♦ Wskutek wielokrotnych zmian temperatury (ogrzewania i wychładzania skał) dochodzi do zluźnienia wiązań między poszczególnymi minerałami, co skutkuje wykruszaniem się pojedynczych ziaren z powierzchni skały.
- ♦ Proces ten nazywamy **rozpadem ziarnistym** (**dezintegracją granularną**), a jego bezpośrednim produktem jest tzw. **kasza ziarnista**.

- ♦ W innym przypadku, gdy skała traci ciepło, jej partie zewnętrzne kurczą się gwałtowniej niż cieplejsze wnętrze, co prowadzi do powstawania głębokich szczelin prostopadłych do powierzchni, dzielących skałę na mniejsze, lecz wciąż masywne fragmenty.
- ♦ Zjawisko to nazywamy **rozpadem blokowym** (**dezintegracją blokową**), prowadzącym do rozpadu skał tworzących większe struktury na **plyty**, **bloki** i **okruchy**.



Wietrzenie insolacyjne (termiczne) – łuszczenie (eksfoliacja)

- **Łuszczenie (eksfoliacja)** – specyficzna odmiana wietrzenia termicznego, wynikająca z bardzo słabego przewodnictwa cieplnego skał litych i dość mało zróżnicowanych kolorystycznie.
- Podczas intensywnej insolacji **nagrzaniu ulega jedynie zewnętrzna warstwa skały** (zwykle do głębokości kilkudziesięciu cm), podczas gdy jej głębsze partie pozostają znacznie chłodniejsze.
- Różnica temperatur między cieplejszą powierzchnią (bardziej ogrzaną i bardziej powiększającą się) a chłodnym wnętrzem skały generuje **silne napięcia**, prowadzące do powstawania **pęknięć** biegnących równoległe do powierzchni terenu.
- Z biegiem czasu szczeliny te powiększają się i łączą, co skutkuje oddzielaniem się od litej skały kolejnych, cienkich warstw przypominających łuski lub łupiny cebuli.



2. Wietrzenie mrozowe (kongelacja)

Wietrzenie mrozowe (kongelacja)

Kluczowe znaczenie ma naprzemienne zamarzanie w nocy i odmarzanie w dzień wody w szczelinach skalnych, wynikające z wahań temperatury wokół 0°C . Rosnące ciśnienie lodu rozszerza szczeliny i prowadzi do mechanicznego rozpadu skały.



- **Wietrzenie mrozowe (kongelacja)** – polega na mechanicznym rozpadzie skał porowatych i szczelinowych wskutek **zamarzania wody**, która zwiększa wtedy swoją objętość o **9%**.
 - Wywierane wówczas ciśnienie rozsadza strukturę skały od wewnątrz, prowadząc do jej systematycznego niszczenia.
 - Efektywność tego procesu zależy przede wszystkim od **częstotliwości wahań temperatury w pobliżu 0°C** .
 - Im częściej dochodzi do naprzemiennego zamarzania i rozmarzania wody w szczelinach, tym gwałtowniejsze są skutki niszczenia – zjawisko to nazywamy **multigelacją**.
 - Z tego powodu wietrzenie mrozowe dominuje w regionach o **klimacie zimnym i wilgotnym**, głównie w **strefach polarnych, subpolarnych oraz w górach**.

2. Wietrzenie mrozowe (kongelacja)

- Wielokrotne niszczenie mrozowe prowadzi do **rozpadu blokowego, okrucowego, ziarnistego lub pyłowego**, dając w efekcie **materiał ostrokrawędzisty**.
- W wyniku tego procesu powstają charakterystyczne formy rzeźby, takie jak **stożki usypiskowe (piargi)** u podnóża ścian skalnych oraz rozległe **rumowiska skalne**.
- Najbardziej znanymi przykładami takich rumowisk w Polsce są **gołoborza w Górach Świętokrzyskich (Łysogóry)** oraz **rozwaliska skalne** występujące w **Karkonoszach i Tatrach**.
- Proces ten daje o sobie znać również w polskich warunkach klimatycznych, czego namacalnym dowodem są liczne pęknięcia asfaltu odłaniane wiosną na drogach.



Kolejne etapy wietrzenia mrozowego (kongelacji), będącego efektem wielokrotnego, naprzemiennego zamarzania i odmarzania wody w szczelinach skalnych

3. Wietrzenie solne (salinarne, eksudacja)

- **Wietrzenie solne (salinarne, eksudacja)** – polega na mechanicznym niszczeniu skał (zwłaszcza porowatych skał osadowych) przez krystalizujące w ich porach i szczelinach **sole (sodowe, potasowe, magnezowe)**.
- W odmianach bardziej wilgotnych klimatu dominującym procesem jest ich **ługowanie (wymywanie) soli**, co tworzy puste przestrzenie wewnątrz skał, prowadząc do osłabienia ich struktury i zapadania się i w efekcie **rozpadu ziarnistego**.
- W odmianach bardziej suchych klimatu i w strefach nadmorskich intensywne parowanie powoduje **krystalizację roztworów solnych**.
 - Rosnące wewnątrz skały kryształy wywierają potężny nacisk na ściany szczelin, powodując ich rozsadzanie i niszczenie spójności podłoża.
 - Rezultatem wietrzenia solnego jest powstanie pokrywy zwietrzelinowej złożonej z ostrokrawędzistego gruzu, łusek i pyłu solnego, określanego mianem **“mleka pustynnego”** i form typu **tafoni** (struktury typu **plastra miodu**).



4. Wietrzenie skał ilastych (deflokulacja)

- **Wietrzenie skał ilastych (deflokulacja)** – polega na mechanicznym niszczeniu spistości skał ilastych wskutek **naprzemiennej hydracji i dehydracji**.
- Zjawisko to występuje najintensywniej w regionach, gdzie **po ulewnych deszczach następują okresy suszy**.
- **W porze wilgotnej minerały ilaste nasiąkają wodą i pęcznieją**, co znacznie zwiększa ich objętość, natomiast **w porze suchej** – w wyniku intensywnego parowania – **gwałtownie się kurczą**.
- Te cykliczne zmiany objętości prowadzą do rozluźnienia struktury skały oraz powstawania sieci pęknięć – tzw. **szczelin z wysychania**, które dzielą powierzchnię terenu na charakterystyczne **wieloboczne poligony**.
- Tak osłabione podłoże staje się bardzo podatne na dalsze niszczenie przez wodę opadową i wiatr.





Wietrzenie chemiczne (dekompozycja)

Wietrzenie chemiczne (dekompozycja)

- **Wietrzenie chemiczne (dekompozycja)** – prowadzi do głębokiego rozkładu skał oraz trwałej zmiany ich pierwotnego składu mineralnego i chemicznego.
- Najważniejszym czynnikiem napędzającym ten proces jest woda (opadowa, podziemna), która w atmosferze lub w podłożu skalnym reaguje z gazami, takimi jak tlen i dwutlenek węgla, a na obszarach uprzemysłowionych także ze związkami azotu i siarki oraz związkami chloru obecnymi w zanieczyszczeniach powietrza.
- Przenikając w głąb podłoża, woda tworzy **aktywne roztwory chemiczne** – m.in. **kwas węglowy**, **siarkowy** i **kwas humusowy** pochodzące z rozkładu materii organicznej.
- Rozkład skał przebiega najszybciej w warunkach wysokiej temperatury, dużej wilgotności oraz przy silnym rozdrobnieniu materiału skalnego.
- Oznacza to, że intensywne wietrzenie fizyczne, poprzez rozdrabnianie skał, znacząco zwiększa ich powierzchnię kontaktu z roztworami wodnymi, co przyspiesza przebieg procesów chemicznych.



Główne procesy – rodzaje wietrzenia chemicznego (dekompozycji)

→ W zależności od składu chemicznego skał oraz warunków środowiskowych wietrzenie chemiczne zachodzi poprzez takie procesy jak: **utlenianie (oksydacja)**, **redukcja**, **rozpuszczanie (solucja)**, **uwęglanowanie (karbonatyzacja)**, **uwodnienie (hydracja)** i **hydroliza**.

Główne rodzaje wietrzenia chemicznego (dekompozycji)



1. Utlenianie (oksydacja)



2. Redukcja



3. Rozpuszczanie (solucja)



4. Uwęglanowanie (karbonatyzacja)



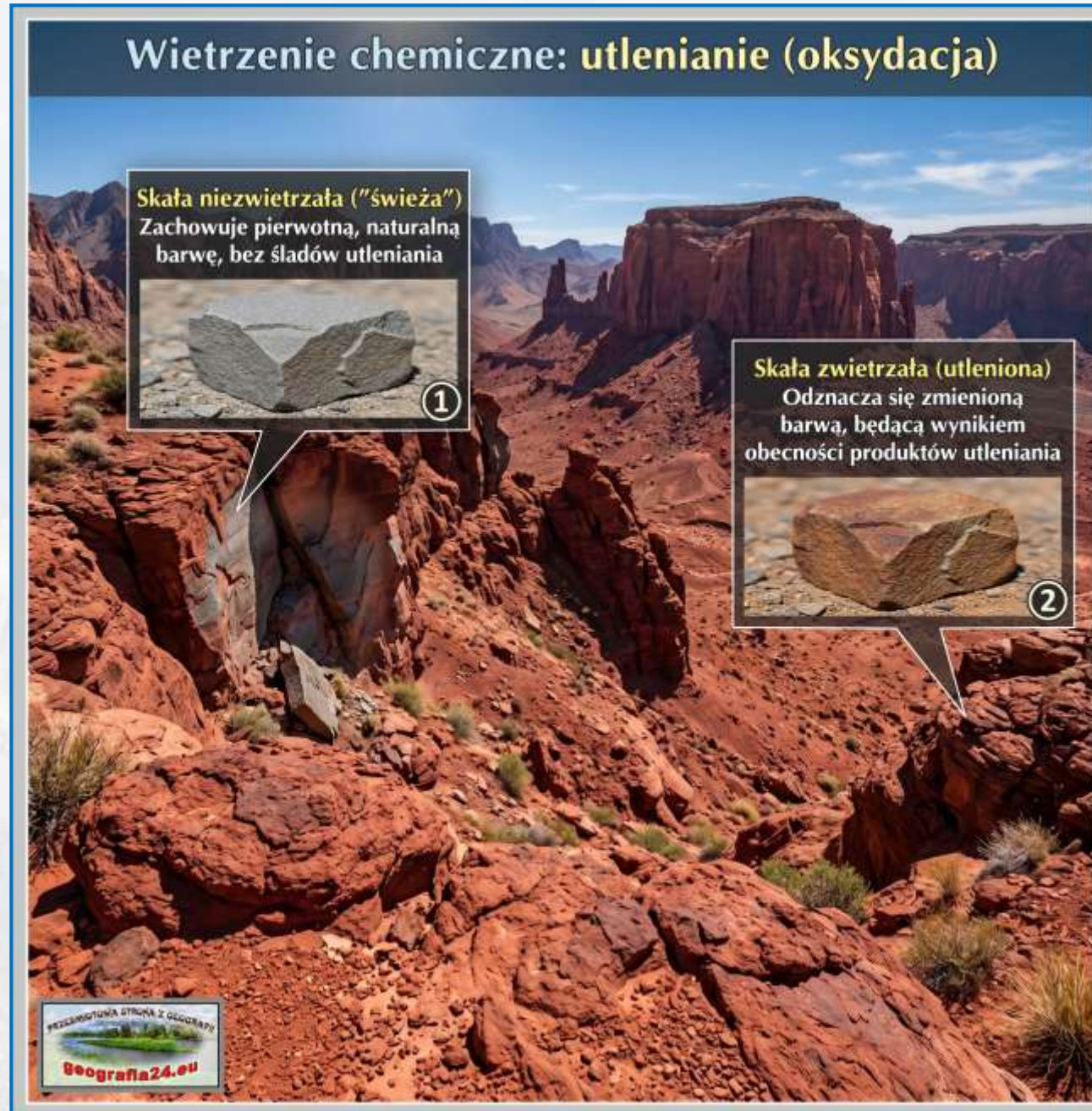
Uwodnienie (hydracja)



6. Hydroliza

1. Utlenianie (oksydacja)

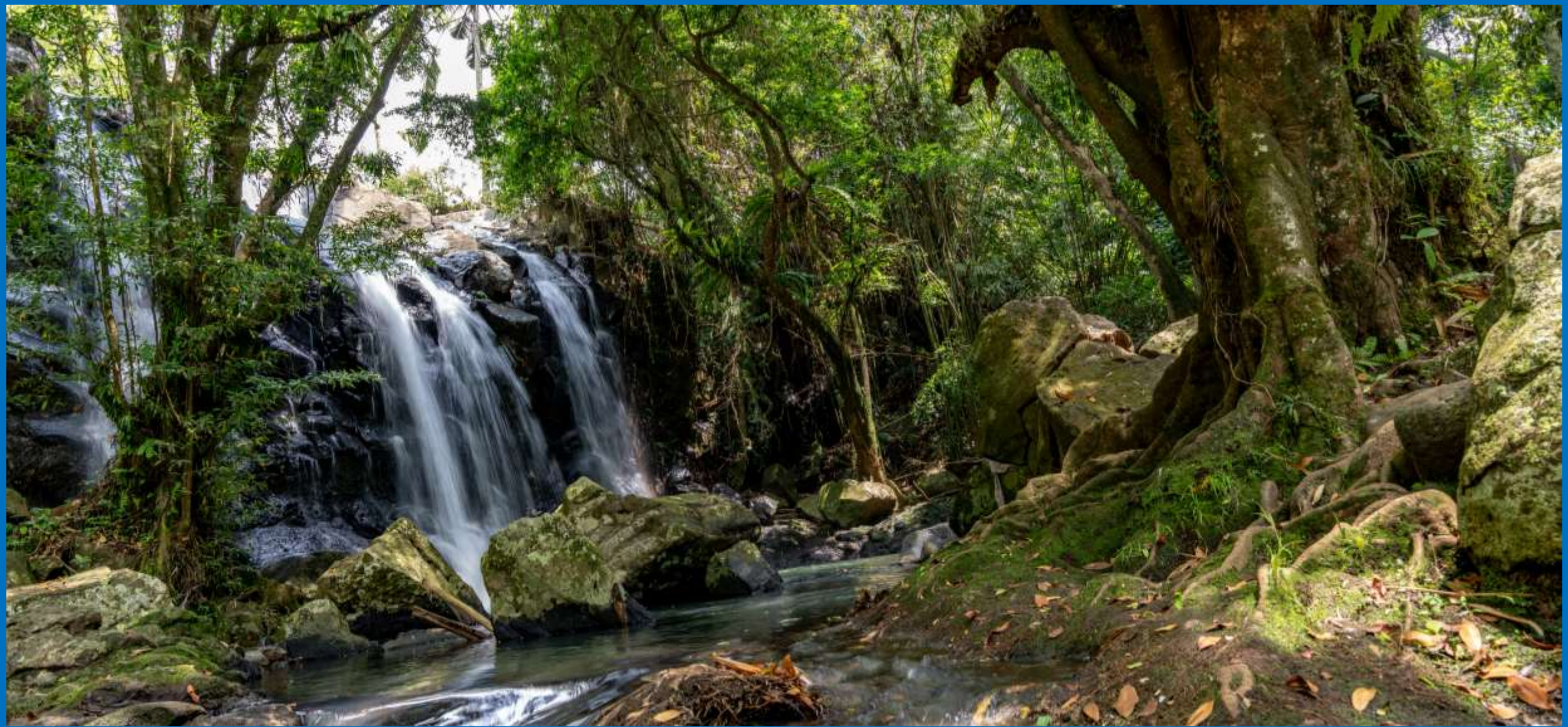
- **Utlenianie (oksydacja)** – polega na chemicznym łączeniu się składników mineralnych z tlenem (zachodzi np. w piaskowcach lub bazaltach).
- Proces ten dotyczy głównie pierwiastków o zmiennej wartościowości (żelazo, mangan i siarka) i prowadzi do zmian ich stanu utlenienia:
 - **związki beztlenowe przekształcają się w tlenowe**: np. siarczki (jak piryt) przechodzą w siarczany (jak gips).
 - **wzrost stopnia utlenienia pierwiastków**: związki żelaza dwuwartościowego Fe^{2+} (zazwyczaj o barwie zielonkawej lub czarnej) przechodzą w związki żelaza trójwartościowego Fe^{3+} .
 - Zmiana barwy skał jest najbardziej widocznym efektem tych procesów, np. **przejście czarnego magnetytu w czerwony hematyt** (częste w klimacie gorącym i suchym).
 - To właśnie utlenianie odpowiada za charakterystyczne “rdzawe” przebarwienia na powierzchniach skalnych.
- Utlenianie wpływa również na materię organiczną – **ciemne substancje** zawierające węgiel (C) w wyniku reakcji z tlenem **ulegają rozkładowi i odbarwieniu**, co prowadzi do wyraźnego rozjaśnienia osadów.



2. Uwęglanowanie (karbonatyzacja)

- **Uwęglanowanie (karbonatyzacja)** – proces wietrzenia chemicznego polegający na oddziaływaniu na skały **wody** zawierającej **rozpuszczony dwutlenek węgla (CO_2)**, czyli słabego **roztworu kwasu węglowego**, który ma zdolność **rozpuszczania minerałów węglanowych**.
- Proces ten prowadzi do **rozpuszczania i wymywania węglanów wapnia i magnezu**.
- Objawia się to intensywnym rozkładem skał zbudowanych z **kalcytu** (np. **wapieni**), które pod wpływem kwasu węglowego ulegają stopniowemu **przechodzeniu w roztwór wodny**, z którego mogą powstawać kolejne formy, np. **nacieki jaskiniowe**.
- Zjawisko to jest najlepiej widoczne w środowisku krasowym, np. w **jaskiniach**, gdzie główny składnik wapieni – kalcyt (CaCO_3) – ulega rozpuszczaniu już w słabym roztworze kwasu węglowego.





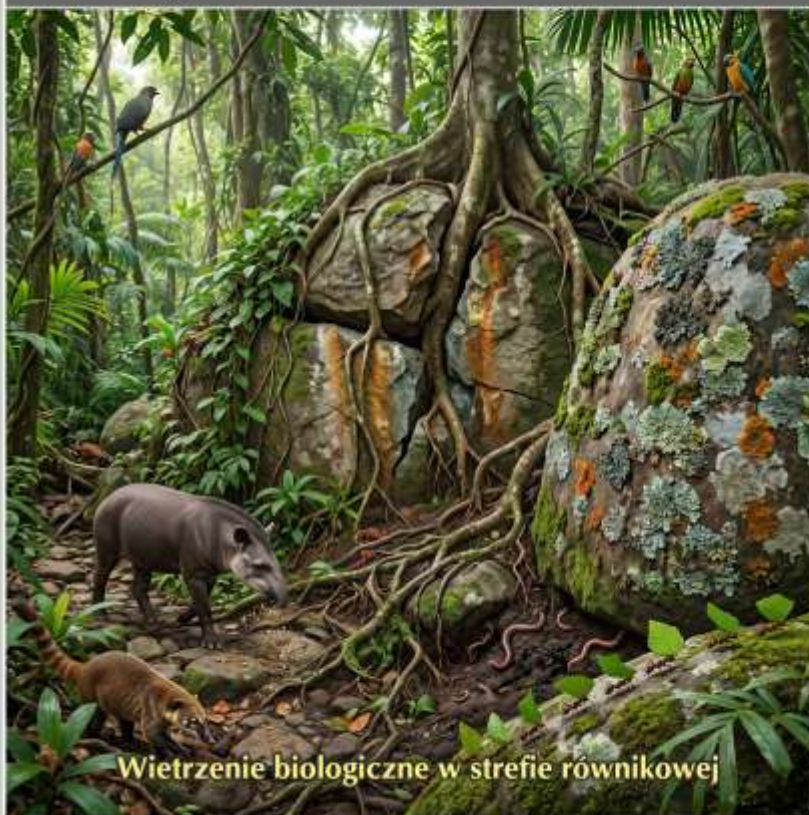
Wietrzenie biologiczne

C. Wietrzenie biologiczne

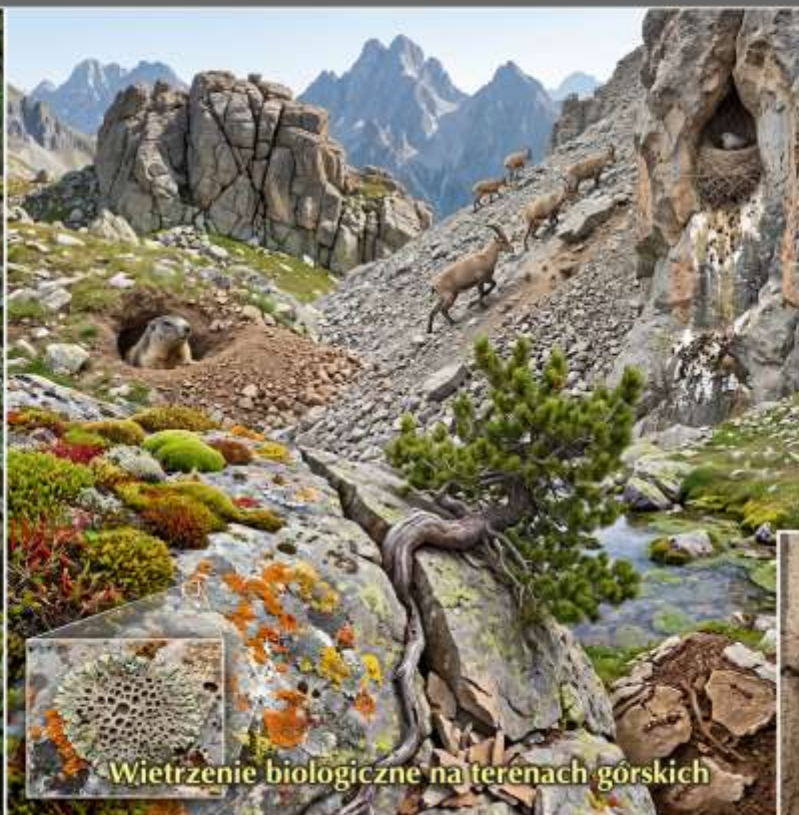
- **Wietrzenie biologiczne** – polega na niszczeniu skał w wyniku bezpośredniego lub pośredniego **oddziaływania organizmów żywych** (roślin, zwierząt, grzybów i drobnoustrojów).
 - Jest to forma wietrzenia, która łączy procesy mechaniczne i chemiczne wywołane działalnością organizmów.
 - Najintensywniej zachodzi w klimatach gorących i wilgotnych (równikowych i monsunowych), gdzie biomasa jest największa, a rozkład materii organicznej przebiega bardzo szybko (na innych terenach przebiega słabiej).

Wietrzenie biologiczne

Wietrzenie biologiczne to niszczenie skał przez organizmy żywe, zachodzące zarówno mechanicznie (np. poprzez rozsadzanie szczelin przez korzenie drzew), jak i chemicznie (poprzez działanie kwasów organicznych).



Wietrzenie biologiczne w strefie równikowej



Wietrzenie biologiczne na terenach górskich



Wietrzenie biologiczne na pustyniach



Wietrzenie biologiczne w miastach

Wietrzenie – podsumowanie

- **Wietrzenie** to **najcierpliwszy rzeźbiarz wszechświata**: podczas gdy za 100 lat jedynie nieznacznie nadgryzie mury naszych domów i pomników, za milion lat zdoła zrównać z poziomem morza dzisiejsze potężne łańcuchy górskie, a za miliard lat – po niezliczonych cyklach chemicznego i fizycznego rozpadu – uczyni z tego samego pyłu planetę o zupełnie nowym, całkowicie nierozpoznawalnym dla nas dzisiaj krajobrazie.
- Wracając dzisiaj do domu, spróbuj sobie wyobrazić, jak wygląda Twoje ulubione miejsce w takich skalach czasowych.





Procesy krasowe

Istota procesów krasowych i rozwoju rzeźby krasowej

- **Rzeźba krasowa** – rozwija się w wyniku **wietrzenia chemicznego**, polegającego na rozpuszczaniu skał łatwo rozpuszczalnych przez wody powierzchniowe i podziemne.
- Proces ten zachodzi głównie dzięki obecności **dwutlenku węgla (CO_2) rozpuszczonego w wodzie**, który prowadzi do powstawania **słabego kwasu węglowego**.
- To on umożliwia **rozpuszczanie skał węglanowych**, takich jak **wapienie**.
- W późniejszym etapie może dochodzić do **wtórny wytrącania się minerałów**, przede wszystkim **węglanu wapnia (kalcytu)**, co prowadzi do powstawania charakterystycznych **form krasowych** (np. **nacieków jaskiniowych**).

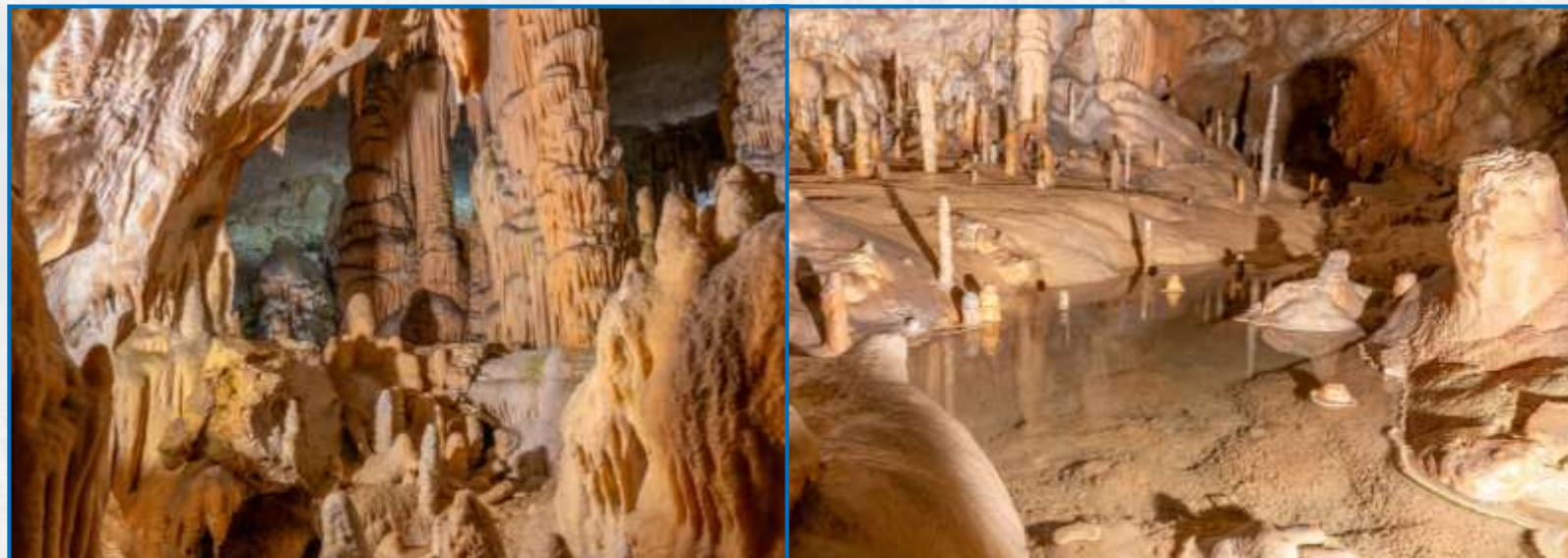


Kras – skały krasowiejące

- **Procesy krasowe** – zachodzą w obrębie skał łatwo ulegających rozpuszczaniu, zwanych **skałami krasowiejącymi**.
- Należą do nich przede wszystkim:
 - **skały węglanowe**: **wapienie** (najbardziej podatne), **dolomity**, **margle**, **opoki** i **kreda**;
 - **skały siarczanowe**: **gipsy** i **anhydryty**;
 - **skały chlorkowe**: **sól kamienna** i **sól potasowa**.
- Termin "**kras**" wywodzi się od nazwy wapiennej **Wyżyny Kras** (zlokalizowanej na terytorium **Słowenii** i **Włoch** na pograniczu z **Chorwacją**).
 - To właśnie tam po raz pierwszy opisano ten typ rzeźby w sposób naukowy.
 - Z czasem lokalna nazwa geograficzna stała się ogólnoświatowym terminem stosowanym w geomorfologii.



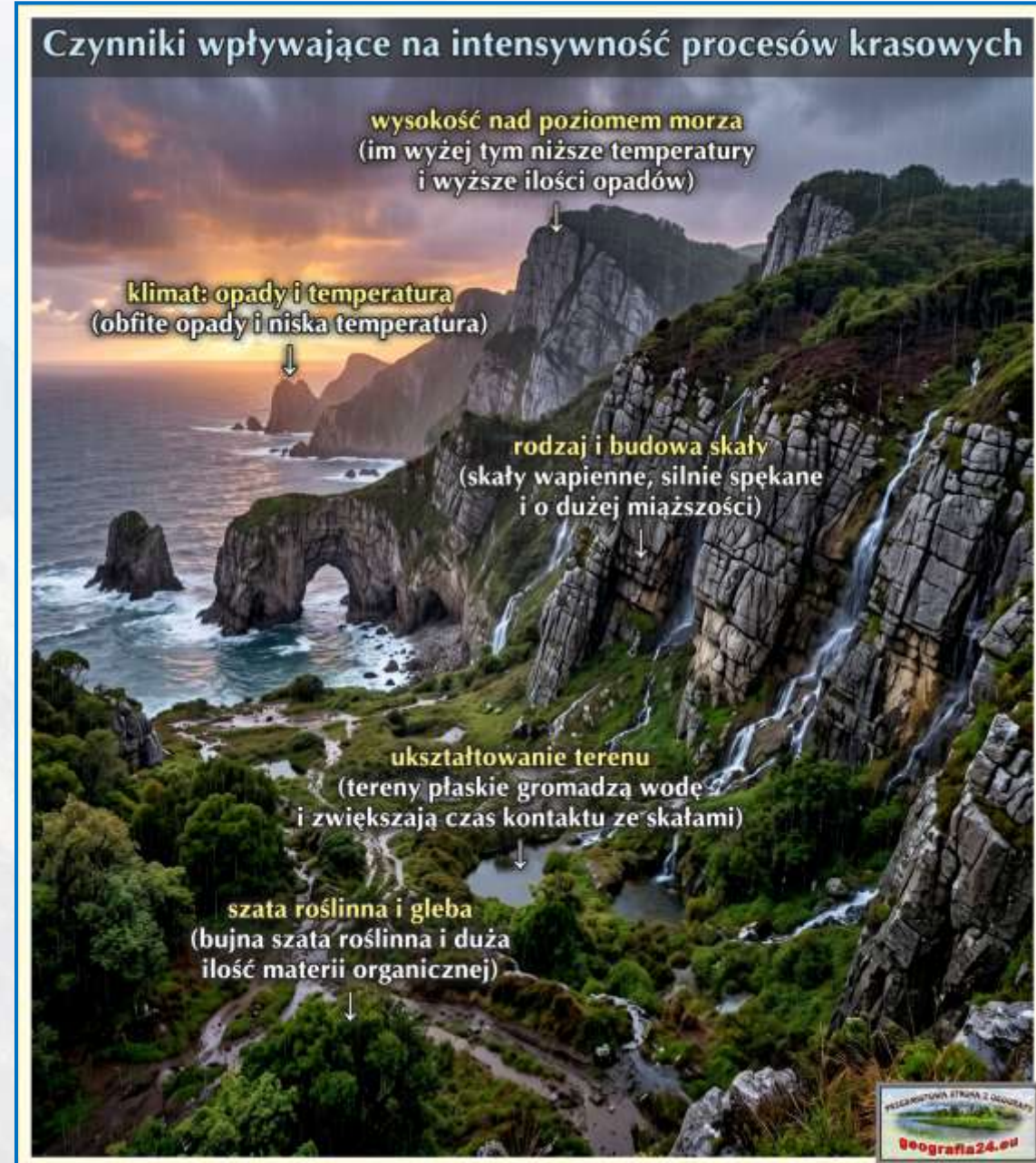
Wyżyna Kras – naturalne środowisko Zamku Predjama, wbudowanego w skały krasowe



Wyżyna Kras – znajduje się tu Jaskinia Postojna, jedna z najbardziej znanych jaskiń świata

Czynniki wpływające na intensywność procesów krasowych

- **Intensywność rozwoju procesów krasowych** nie zależy wyłącznie od obecności **skał rozpuszczalnych**, lecz wynika ze współdziałania kilku **czynników środowiskowych**:
 - **rodzaj i budowa skały** – proces zachodzi najszybciej w skałach silnie rozpuszczalnych (np. wapieniach i gipsach), o dużej miąższości, silnym spękaniu (ułatwiającym infiltrację) i małej zawartości domieszek ilastych (ograniczających przepływ wody);
 - **klimat (opady i temperatura)** – obfite opady dostarczają wody, a niższa temperatura sprzyja rozpuszczaniu większej ilości CO_2 (co zwiększa ilość kwasu węglowego i zdolność rozpuszczania skał);
 - **szata roślinna i gleba** – woda wsiąkająca wzbogaca się w CO_2 (z oddychania organizmów i rozkładu materii organicznej) i kwasy humusowe (zwiększające jej aktywność chemiczną);
 - **ukształtowanie terenu** – na terenach płaskich woda dłużej zalega i dominuje infiltracja, natomiast na stromych stokach szybki spływ ogranicza czas kontaktu wody ze skałą;
 - **wysokość nad poziomem morza** – wraz ze wzrostem wysokości rosną opady i spada temperatura (co sprzyja większej zawartości CO_2 w wodzie i intensywniejszemu krasowieniu).



Chemizm procesów krasowych – przebieg procesów krasowienia

CHEMIZM PROCESÓW KRASOWYCH

Oddziaływanie wody wzbogaconej CO₂ na skały krasowiejące

ETAP 1: Powstawanie kwasu węglowego

Woda opadowa pochłania CO₂ i wnika w glebę, tworząc słaby kwas zdolny rozpuszczać skały



ETAP 2: Rozpuszczanie skał (krasowienie)

Kwas węglowy reaguje z wapniem, tworząc rozpuszczalny wodorowęglan wapnia



ETAP 3: Wytrącanie węglanu wapnia (kalcytu)

Z roztworu wytrąca się węglan wapnia (kalcyt), tworząc nacieki jaskiniowe i trawertyn



- Podstawą **procesów krasowienia** jest **chemiczne oddziaływanie wody wzbogaconej w dwutlenek węgla na skały ulegające krasowieniu** (“rozpuszczalne”).
- **Woda opadowa** pochłania **dwutlenek węgla** z atmosfery, a następnie, **infiltrując w podłoże** i przechodząc przez **warstwę gleby**, ulega **dotychczasowemu wzbogaceniu w ten gaz** pochodzący z rozkładu materii organicznej.
- **Rozpuszczony w wodzie dwutlenek węgla** (pełniący rolę **bezwodnika kwasowego**) **łączy się z nią**, tworząc **roztwór kwasu węglowego** (który umożliwia w dalszym etapie rozpuszczanie skał), zgodnie z reakcją:



(**woda + dwutlenek węgla → roztwór kwasu węglowego**)

Rozpuszczanie skał wapiennych i wytrącanie węglanu wapnia

CHEMIZM PROCESÓW KRASOWYCH

Oddziaływanie wody wzbogaconej CO₂ na skały krasowiejące

ETAP 1: Powstawanie kwasu węglowego

Woda opadowa pochłania CO₂ i wnika w glebę, tworząc słaby kwas zdolny rozpuszczać skały



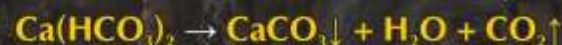
ETAP 2: Rozpuszczanie skał (krasowienie)

Kwas węglowy reaguje z wapieniem, tworząc rozpuszczalny wodorowęglan wapnia



ETAP 3: Wytrącanie węglanu wapnia (kalcytu)

Z roztworu wytrąca się węglan wapnia (kalcyt), tworząc nacieki jaskiniowe i trawertyn



→ Woda przesączająca się i spływająca systemem spękań skalnych, wcześniej wzbogacona w dwutlenek węgla (który reagując z wodą tworzy roztwór kwasu węglowego – H₂CO₃), powoduje w kolejnych etapach:

→ **rozpuszczanie skał węglanowych** (np. **wapieni**) – następuje reakcja węglanu wapnia (budującego skały wapienne) z kwasem węglowym, czego efektem jest **powstanie wodorowęglanu wapnia** (kwaśnego węglanu wapnia), który jest dobrze rozpuszczalny w wodzie:



(**węglan wapnia** budujący skały wapienne + roztwór **kwasu węglowego** → **wodorowęglan wapnia**);

→ **wytrącanie węglanu wapnia** (kalcytu) – zachodzące np. podczas tworzenia **nacieków jaskiniowych** lub **trawertynu**:



(spływający roztwór wodorowęglanu wapnia → **węglan wapnia** (kalcyt; budujący nacieki) + woda + dwutlenek węgla).



Kras powierzchniowy

Formy krasu powierzchniowego

- **Formy krasu powierzchniowego** – powstają w wyniku rozpuszczającej działalności wód wzbogaconych w dwutlenek węgla, głównie w obszarach zbudowanych ze skał węglanowych.
- Tworzą one bardzo zróżnicowaną i często malowniczą rzeźbę terenu, wśród której występują m.in.:
 - **żłobki i żeberka krasowe**,
 - **ospa krasowa**,
 - **kamenice (miseczki krasowe)**,
 - **jamy krasowe**,
 - **lapiez (lapiaz)**,
 - **lejki krasowe, uwały i polja** (w ich obrębie **jeziorka krasowe**),
 - **ostańce krasowe (mogoty)**,
 - **doliny krasowe (ślepe i półślepe)**,
 - **ponory i wywierzyska**,
 - **jary i kaniony krasowe**,
 - **kopuły i kaskady trawertynowe**.



Żłobki i żeberka krasowe (żebra krasowe)

- Przemieszczanie się i spływanie wód opadowych po pochyłych lub stosunkowo płaskich, odsłoniętych powierzchniach skalnych prowadzi do ich **rozpuszczania** (w mniejszym stopniu także erozji), czego efektem jest powstawanie charakterystycznych **mikroform krasowych**:
 - **żłobki krasowe** – podłużne, wąskie rynny (najczęściej o przekroju zbliżonym do litery U), powstające w wyniku rozpuszczającej działalności wody spływającej zgodnie ze spadkiem powierzchni terenu i pogłębiające się w głąb skały;
 - zazwyczaj są dość płytkie, chociaż najlepiej rozwinięte formy (np. w Alpach) mogą osiągać głębokość kilku metrów, a występując gromadnie, obejmują całą powierzchnię skały w postaci zespołu równoległych rynien;
 - **żeberka krasowe (żebra krasowe)** – podłużne, wypukłe grzbiety skalne oddzielające sąsiednie żłobki;
 - ulegają one stopniowemu niszczeniu w miarę pogłębiania się sąsiednich żłobków, aż do ich całkowitego zaniku.



Lejki krasowe (leje krasowe)

- **Lejki krasowe (leje krasowe)** – okrągłe lub owalne zagłębienia terenu, znacznie większe od ospy krasowej, kamenic czy jam krasowych, występujące pojedynczo lub grupowo (tworząc tzw. **poła lejków krasowych**).
- Ich średnica waha się od kilku do kilkuset metrów, a głębokość zazwyczaj od kilku do kilkudziesięciu metrów (w wyjątkowych przypadkach może być większa i wynosić nawet powyżej 100 metrów).
- Największe formy rozwijają się na obszarach o sprzyjających warunkach geologicznych (duża miąższość skał krasowiejących i ich silne spękanie), które umożliwiają intensywne rozpuszczanie i rozwój pustek podziemnych.



Jeziorka krasowe

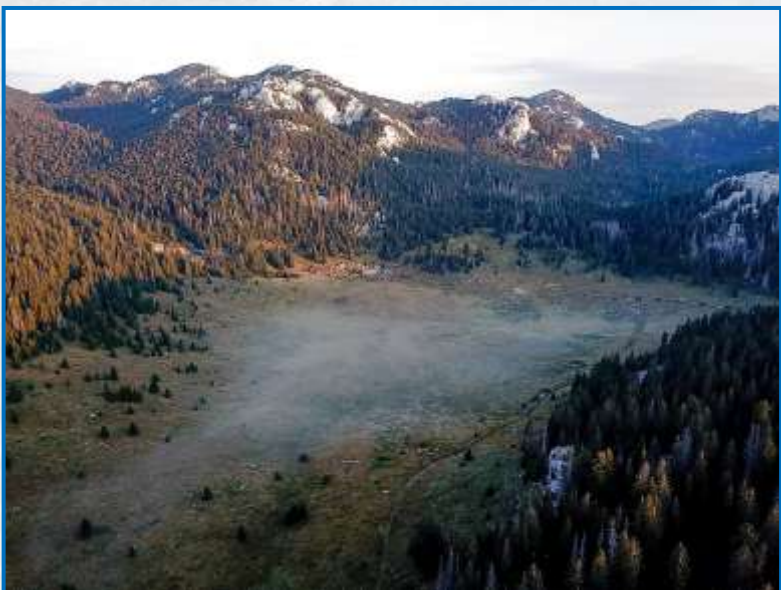
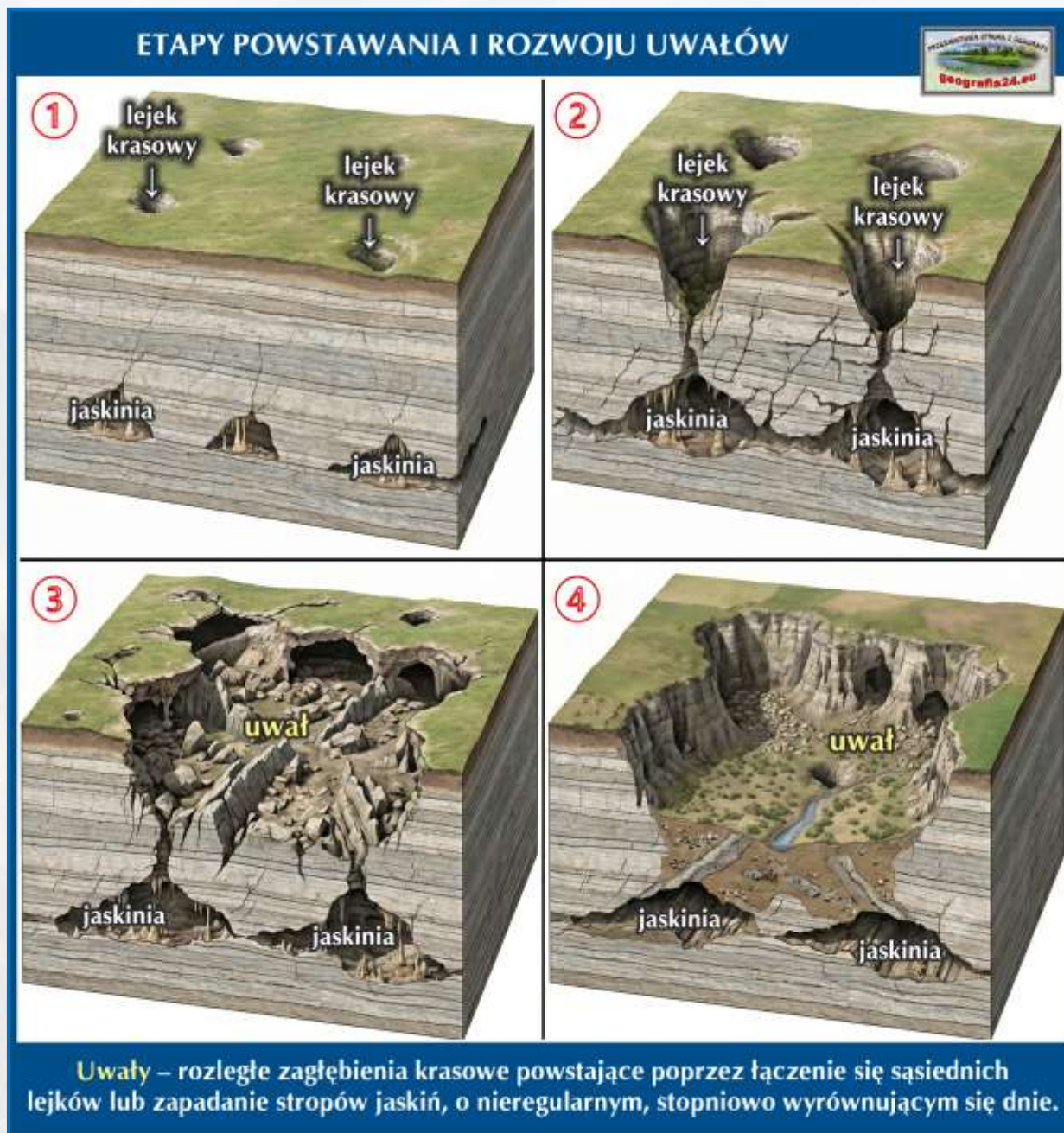
- **Jeziorka krasowe** – niewielkie zbiorniki wodne powstające na dnie lejków krasowych (rzadziej także innych form krasowych), mające najczęściej charakter okresowy, choć mogą występować również stale.
- Tworzą się wówczas, gdy woda opadowa gromadzi się w zagłębieniu i nie może swobodnie wnikać w głąb podłoża.
- Zjawisko to zachodzi najczęściej w przypadku uszczelnienia dna leja krasowego materiałem nierozpuszczalnym (np. gliną), który blokuje infiltrację wody do systemu podziemnych spękań, lub gdy dno zagłębienia znajduje się blisko poziomu wód podziemnych.



Czerwone Jezioro (Crveno jezero) – spektakularne jezioro krasowe położone na dnie leja krasowego w południowej Chorwacji w regionie Dalmacji

Uwały

- **Uwały** – rozległe zagłębienia terenu, znacznie większe od lejków krasowych (o rozmiarach do kilku kilometrów długości i szerokości), powstające głównie w wyniku stopniowego rozszerzania się i łączenia sąsiadujących ze sobą lejków, a także miejscami w wyniku zapadania się stropów podziemnych pustek krasowych (np. jaskiń).
- Charakteryzują się bardzo nieregularnym kształtem oraz dnem, które w początkowych fazach rozwoju jest nierówne i pocięte pozostałościami grzęd skalnych.
- W późniejszych stadiach dno ulega wyrównaniu wskutek całkowitego zniszczenia grzęd oraz akumulacji osadów i materiału zwietrzelinowego w obrębie obniżień.



Polja (popławy)

- **Polja (popławy)** – najbardziej rozległe, kotlinne formy krasu powierzchniowego, powstające najczęściej w wyniku łączenia się wielu uwałów w specyficznych warunkach tektonicznych i geologicznych.
- Są to duże, niemal zamknięte obniżenia terenu o bardzo dużych rozmiarach (od 1 km² do ponad 500 km²), często rozwijające się wzdłuż stref uskokowych i obniżień tektonicznych.
- Charakteryzują się rozległym, stosunkowo płaskim dnem, z którego miejscami mogą wyrastać ostańcowe, skaliste wzniesienia zwane **mogotami**.
- Najbardziej znane polja występują w **Górach Dynarskich** (np. Popovo Polje, Kosovo Polje).
- W Polsce formy zbliżone do poljów występują m.in. w obrębie **Niecki Nidziańskiej**.



Chińska prowincja **Guilin**

ETAPY POWSTAWANIA I ROZWOJU POLJI



Polja (popławy) – ogromne, niemal zamknięte obniżenia krasowe o płaskim dnie, z którego mogą wyrastać skaliste mogoty. Powstają najczęściej wskutek łączenia się uwałów, rozwijając się wzdłuż stref uskokowych i obniżień tektonicznych.

Ostańce krasowe (mogoty, humy, homy, mosory)

- **Ostańce krasowe** (**mogoty**; lokalnie **humy**, **homy** lub **mosory**) – izolowane wzniesienia o charakterze ostańcowym, najczęściej o kształcie wież, stożków lub kopuł, osiągające wysokość do kilkuset metrów, powstające w wyniku długotrwałego i zróżnicowanego rozpuszczania skał krasowięjących oraz usuwania materiału skalnego z otoczenia.
- Stanowią pozostałości dawnych powierzchni krasowych, które uległy niemal całkowitemu zniszczeniu w wyniku intensywnego krasowienia i denudacji.
- W obrębie mogotów występują liczne formy krasu powierzchniowego (np. żłobki i żeberka krasowe) oraz podziemnego (np. jaskinie z rozwiniętymi formami naciekowymi).
- Najbardziej znane przykłady występują m.in. w rejonie Guilin (Chiny), w zatoce Ha Long (Wietnam), w Indonezji (Jawa i Celebes), Tajlandii, na Kubie, Jamajce, Nowej Gwinei, Portoryko, Madagaskarze, w Meksyku i Chorwacji.



Mogoty w chińskiej prowincji Guilin



Mogoty – wyspy Jamesa Bonda w Tajlandii

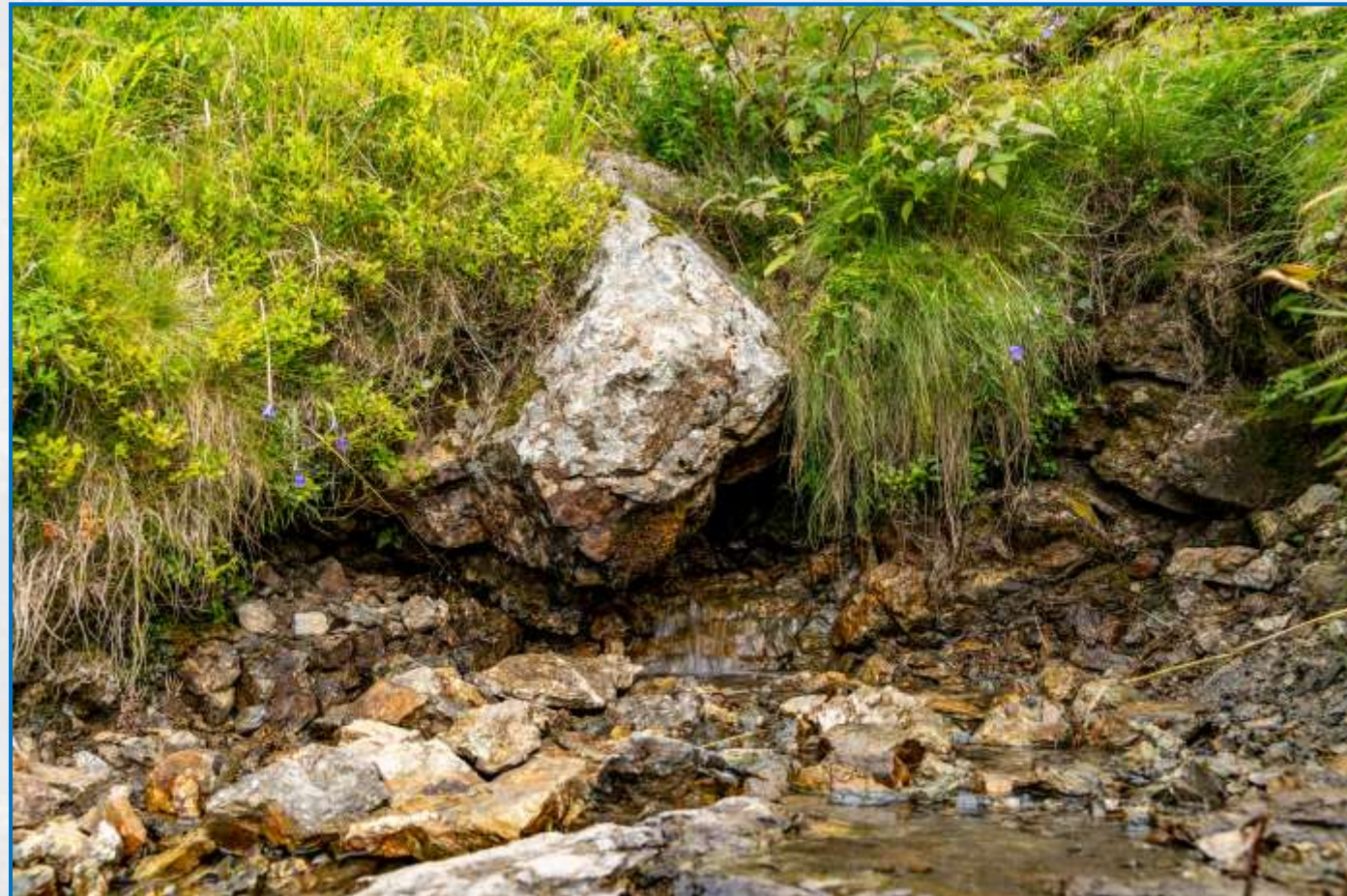
Ponor

- **Ponor** – forma krasowa stanowiąca miejsce zaniku wód powierzchniowych (np. potoków lub rzek), które wnikają w głąb skał i zasilają system krasowych wód podziemnych.
- Posiada najczęściej postać pionowego otworu, poszerzonej szczeliny krasowej lub korytarza wydrążonego w skale przez przepływającą wodę.
- W Polsce, na obszarze Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej, formy te potocznie zwane są **łykawicami**.



Źródła krasowe – tzw. wywierzyska

- **Wywierzyska** (źródła krasowe) – specyficzne źródła występujące na obszarach krasowych, stanowiące miejsca wypływu wód podziemnych na powierzchnię terenu, często będących wcześniej wodami, które zanikły w **ponorach**.
- Ze względu na zasilanie z rozległych systemów podziemnych szczelin i kanałów krasowych cechują się dużą wydajnością i zmiennością przepływu.
- Doliny rzeczne rozpoczynające się w obrębie wywierzysk są często silnie zasilane już u źródła, co sprzyja intensywnemu rozcinaniu terenu i powstawaniu wyraźnie głęboko wciętych dolin.

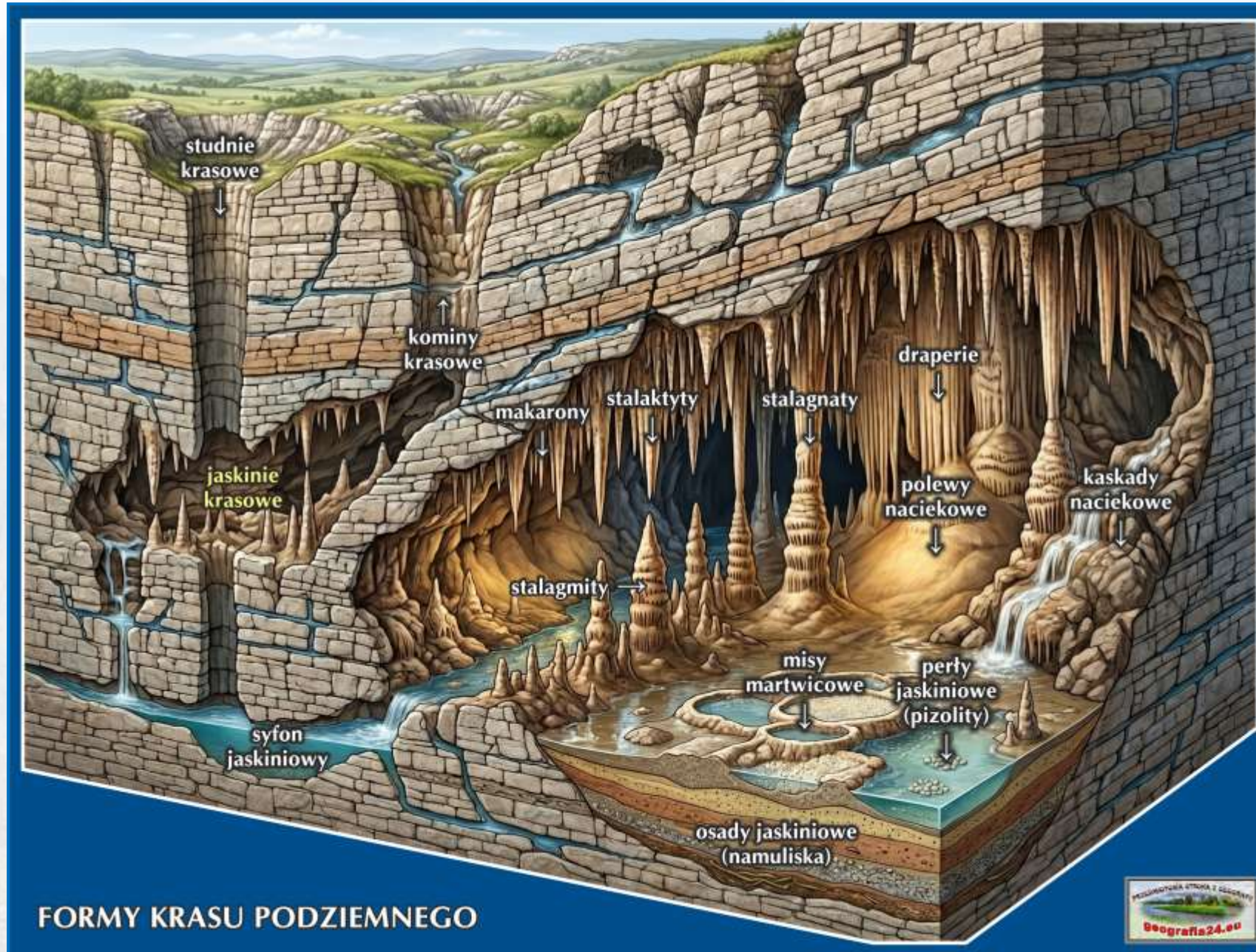




Kras podziemny

Formy krasu podziemnego

- **Formy krasu podziemnego** – powstają w wyniku przenikania wód do systemu podziemnego oraz rozpuszczania skał (węglanowych, siarczanowych i chlorkowych), a także wytrącania minerałów i akumulacji materiału.
- Wśród nich wyróżnia się m.in.:
 - studnie krasowe,
 - kominy krasowe,
 - jaskinie krasowe,
 - syfony jaskiniowe,
 - formy naciekowe (stalaktyty, stalagmity, stalagnaty, makarony, draperie, polewy naciekowe i kaskady naciekowe),
 - misy martwicowe i perły jaskiniowe (pizolity),
 - osady jaskiniowe (namuliska).



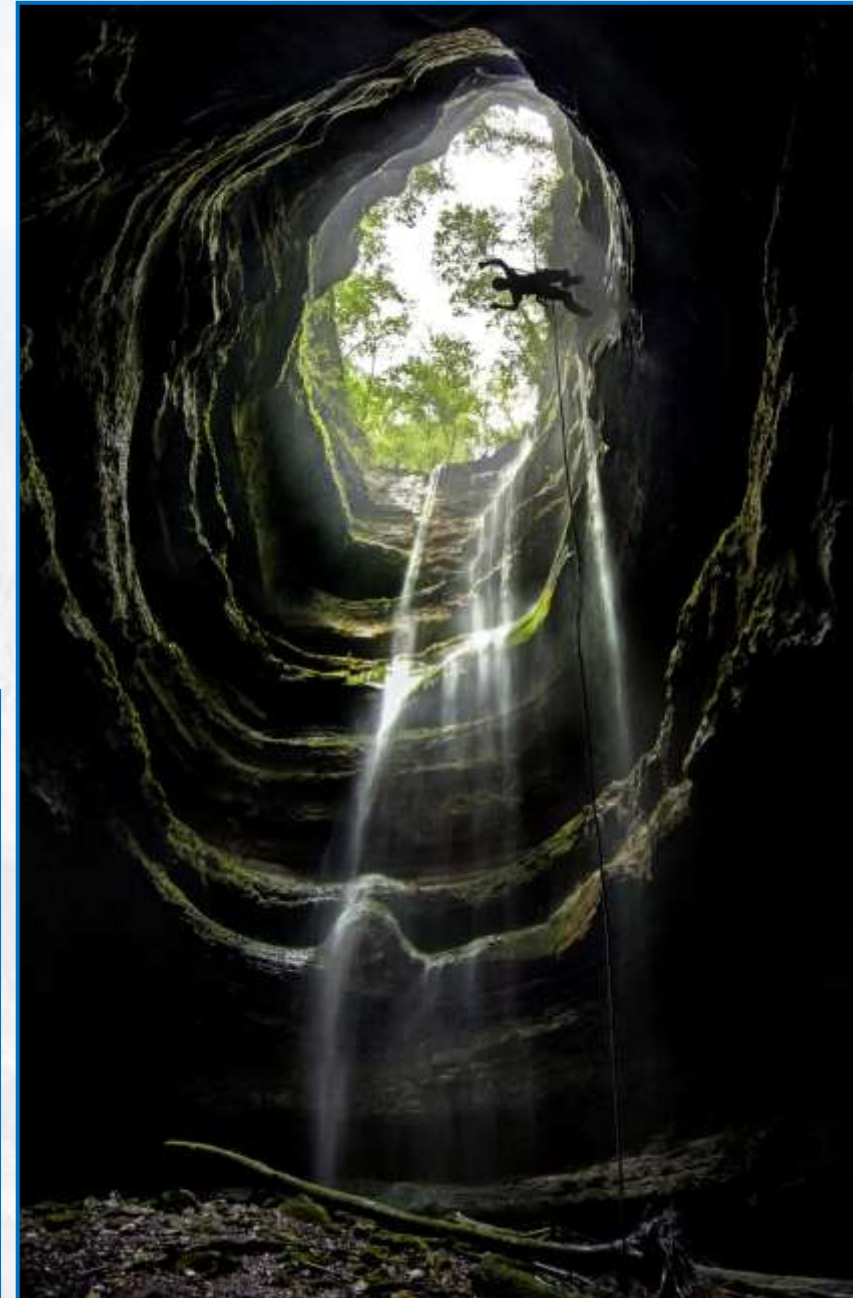
Studnie krasowe

- **Studnie krasowe** – pionowe formy krasu podziemnego o charakterze szybu, stanowiące fragmenty systemu jaskiniowego, które łączą powierzchnię terenu z jego głębszymi partiami (stanowią drogi pionowego transportu wód do systemu krasowego).
- Charakteryzują się przekrojem zbliżonym do okrągłego lub nieregularnego, a ich ściany mogą ulegać miejscowym rozszerzeniom lub zwężeniom w zależności od budowy skał i przebiegu szczelin (przy czym im głębiej, tym zazwyczaj stają się one szersze).
- Powstają najczęściej wzdłuż pionowych pęknięć i szczelin skalnych, którymi wody powierzchniowe wnikają w głąb podłoża, zasilając system krasowy.
- Określenie to stosuje się do pionowego korytarza w sytuacji, gdy obserwujemy go z góry, patrząc w dół.



Kominy krasowe

- **Kominy krasowe** – pionowe korytarze w obrębie systemu krasowego, łączące jego różne poziomy lub powierzchnię z głębszymi partiami (umożliwiają przepływ wód w obrębie systemu jaskiniowego).
- Powstają w wyniku poszerzania pionowych szczelin i spękań skalnych, którymi wody opadowe i roztopowe wnikają w głąb podłoża.
- Charakteryzują się nieregularnym przebiegiem i zmiennym przekrojem, uzależnionym od budowy geologicznej skał.
- Ich szerokość często wzrasta w dolnych partiach.
- Najgłębsze formy osiągają nawet kilkaset metrów.
- Pod względem genezy są zbliżone do studni krasowych, lecz termin “komin” stosuje się, gdy pionowy korytarz obserwowany jest z wnętrza jaskini.



Jaskinie krasowe

- **Jaskinie krasowe** – naturalne pustki skalne o rozmiarach umożliwiających eksplorację przez człowieka, powstałe w wyniku rozpuszczania skał, głównie wapieni i dolomitów.
- Tworzą się i powiększają najczęściej w miejscach, gdzie poziomy przepływ wód krasowych łączy się z systemami pionowymi, np. studniami lub kominami.
- Rozwijają się w pionie lub poziomie, często tworząc kilka poziomów odpowiadających dawnym położeniom dna dolin, a sieć połączonych ze sobą jaskiń tworzy rozległe **systemy jaskiniowe**.
- W miejscach krzyżowania się szczelin ulegają poszerzeniu, tworząc większe przestrzenie w postaci **sal jaskiniowych**.
- Naukowym badaniem i eksploracją jaskiń zajmują się **speleolodzy**.



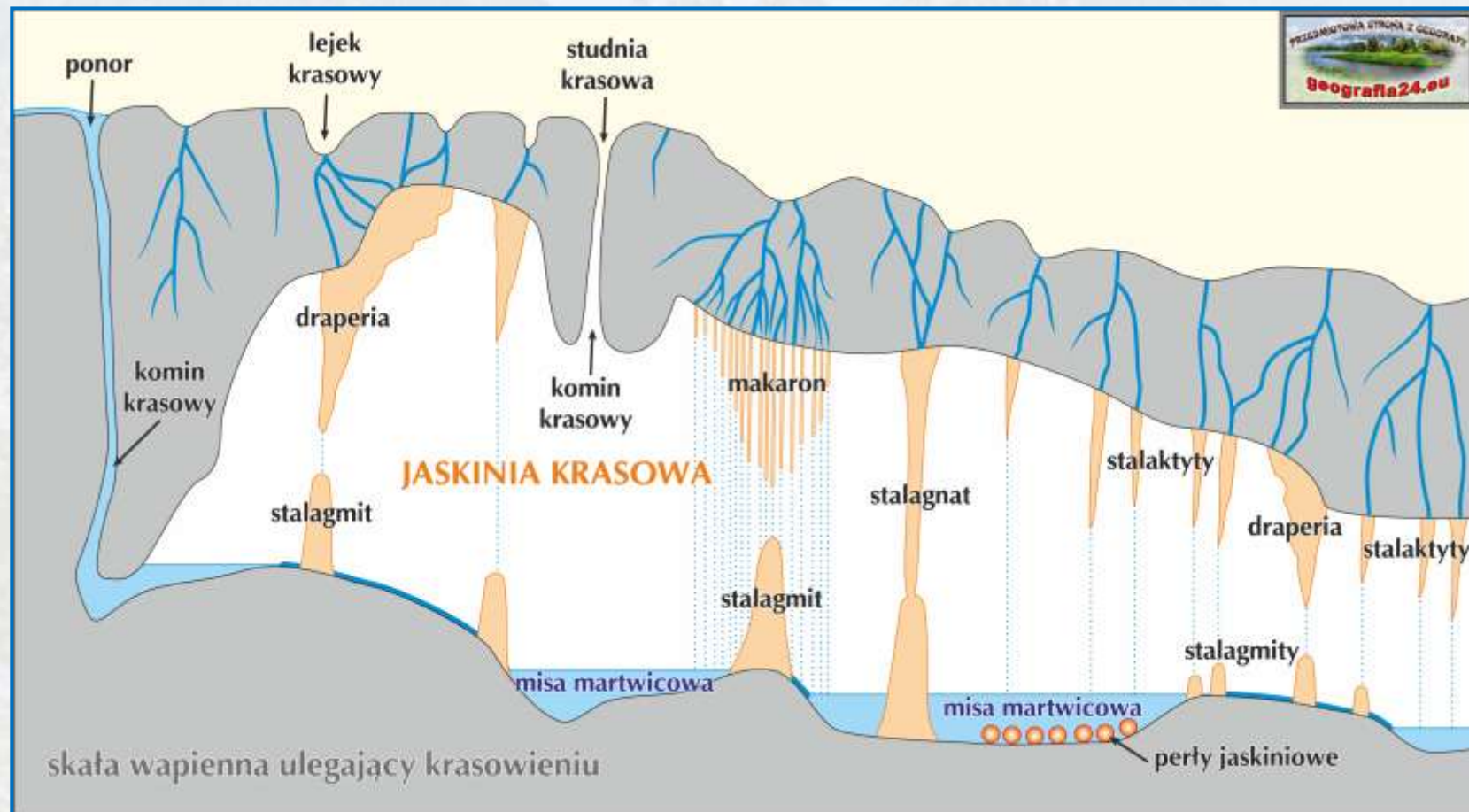
Jaskinia Niedźwiedzia w Sudetach (Polska)



Jaskinia Cuevas del Drach na Majorce (Hiszpania)

Formy naciekowe

- **Formy naciekowe** – powstają w jaskiniach oraz szczelinach skalnych w wyniku wytrącania się węglanu wapnia z wód przesączających się przez skały (proces ich powstawania jest bardzo powolny i może trwać tysiące lat).
- Nacieki mogą przybierać różne barwy w zależności od domieszek innych związków chemicznych.
 - Często są zabarwione przez związki żelaza, które nadają im odcienie od żółtego po brązowy.
- Do najważniejszych form naciekowych zalicza się: **stalaktyty**, **stalagmity**, **stalagnaty**, **makarony** (stalaktyty rurkowe), **draperie** (zastony naciekowe), **polewy naciekowe** i **kaskady naciekowe**.



Stalaktyty

- **Stalaktyty** – wydłużone, zwisające ze stropu jaskini formy naciekowe o kształcie stożków lub sopli, powstające u wylotu szczelin stropowych wskutek skapywania wody zawierającej rozpuszczony węglan wapnia i jego wytrącania się, co prowadzi do ich narastania ku dołowi.
- Ich rozwój i kształt zależą od warunków mikroklimatycznych panujących w jaskini, zwłaszcza wilgotności powietrza oraz intensywności i regularności skapywania roztworu zawierającego węglan wapnia.
- Tworzą się wolno – ich tempo wzrostu wynosi średnio około 0,1 mm/rok.

Formy naciekowe w jaskiniach: stalaktyty



Makarony (stalaktyty rurkowe)

- **Makarony (stalaktyty rurkowe)** – najcieńsze i zwykle wydłużone stalaktyty, mające postać cienkich, pustych w środku rurek o średnicy zbliżonej do wielkości pojedynczej kropli wody.
- Przez ich wnętrze spływa roztwór zawierający węglan wapnia, który wytrąca się wyłącznie na końcu rurki, co powoduje ich wydłużanie się ku dołowi bez zwiększania grubości.
- Tworzą się w warunkach bardzo słabego ruchu powietrza i są niezwykle kruche, przez co łatwo ulegają uszkodzeniu.

Formy naciekowe w jaskiniach: makarony (stalaktyty rurkowe)



Stalagmity

- **Stalagmity** – formy naciekowe **narastające od dna jaskini ku górze**, zwykle szersze od stalaktytów, o kształcie kopuł lub stożków.
- Powstają wskutek skapywania wody ze stropu (najczęściej ze stalaktytów) – krople spływające na podłoże powodują wytrącanie węglanu wapnia, który gromadzi się, budując formę ku górze.
- Największe formy rozwijają się pod stalaktytami lub większymi szczelinami, którymi spływa roztwór zawierający węglan wapnia.
- Ich tempo wzrostu jest bardzo powolne i wynosi, w zależności od warunków środowiskowych, zwykle poniżej 0,1 mm na rok.

Formy naciekowe w jaskiniach: stalagmity



Stalagnaty

- **Stalagnaty (kolumny naciekowe)** – masywne formy naciekowe łączące strop jaskini z jej dnem, powstające w wyniku stopniowego wzrostu i połączenia **stalaktytu** (od stropu jaskini) i **stalagmitu** (od dna jaskini).
- Tworzą się w miejscach długotrwałego i regularnego skapywania roztworu zawierającego węglan wapnia, co umożliwia jednoczesny rozwój obu form aż do ich połączenia w kolumnę.
- Po połączeniu dalszy rozwój kolumny polega głównie na zwiększaniu jej szerokości (przyroście na grubość) wskutek ciągłego lub okresowego osadzania się węglanu wapnia spływającego po jej powierzchni.

Formy naciekowe w jaskiniach: stalagnaty



Draperie (zasłony naciekowe)

- **Draperie (zasłony naciekowe)** – formy naciekowe przypominające **cienkie**, często **pofalowane zasłony** zwisające w dół.
- Tworzą się na nachylonych ścianach lub pochyłych stropach jaskiń, gdzie woda nie kapie bezpośrednio, lecz spływa cienką warstwą po powierzchni skały.
- W trakcie spływu węglan wapnia wytrąca się wzdłuż drogi przepływu, tworząc narastające ku dołowi, często półprzezroczyste i pasiaste struktury przypominające zwisające tkaniny.
- Jasne (białe) pasy w draperiach tworzy czysty kalcyt, natomiast odcienie czerwone wynikają z obecności związków żelaza w kalcycie.

Formy naciekowe w jaskiniach: draperie (zasłony naciekowe)



Misy martwicowe

- **Misy martwicowe** – płytkie zagłębienia (**baseny**) w dnie jaskini, otoczone **progami** i **groblami** utworzonymi z wytrąconego z wody węgla wapnia.
- Powstają w miejscach gromadzenia się i powolnego przelewania wody, gdzie kalcyt osadza się na krawędziach przepływu, stopniowo nadbudowując otaczające je progi.
- Często występują na różnych poziomach, tworząc rozległe, kaskadowe układy ciągnące się wzdłuż korytarzy jaskiniowych, które w niektórych jaskiniach osiągają długość dziesiątek, a nawet setek metrów.
- Wypełnione są zwykle wodą lub okresowo pozostają suche.

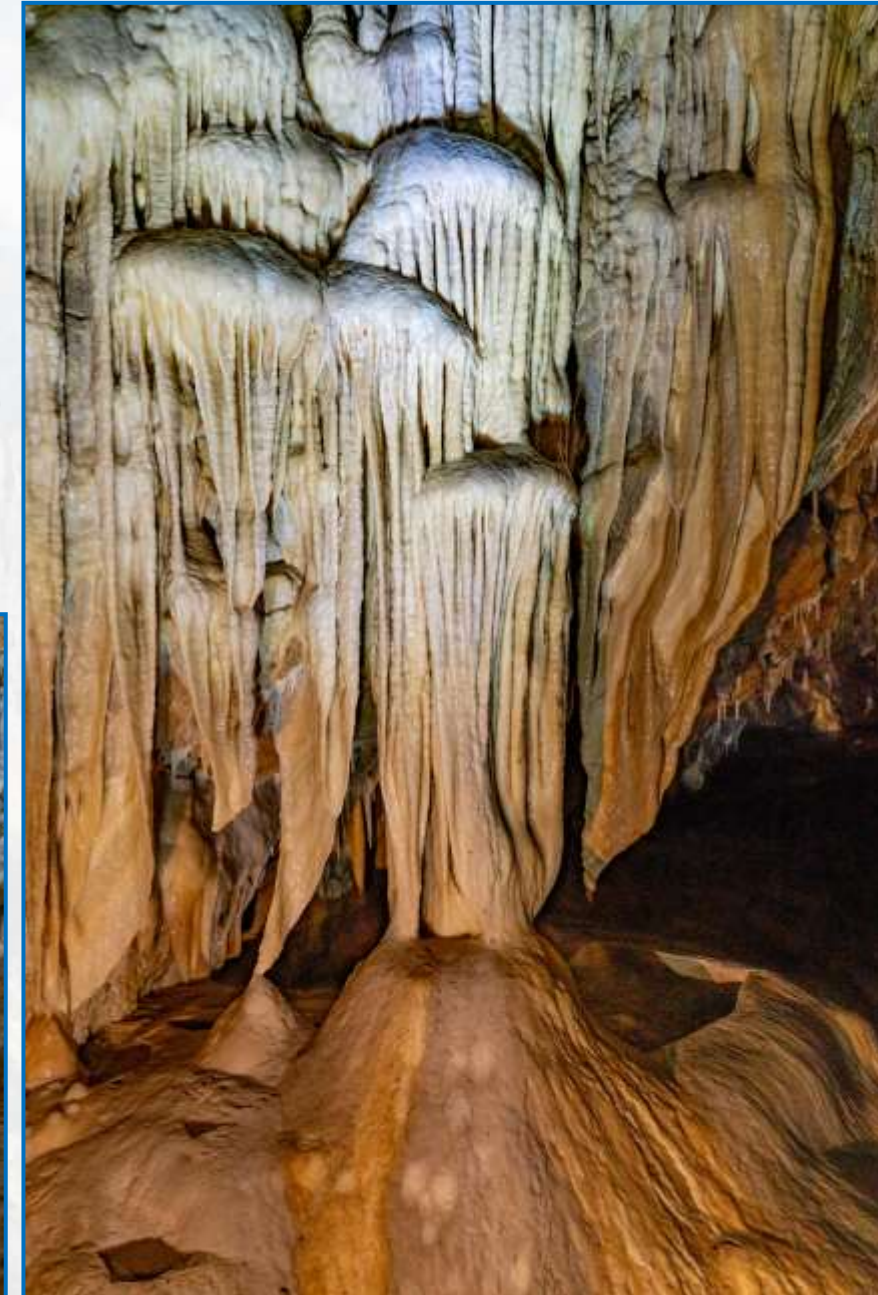




Jaskinie w Polsce – wybrane przykłady

Jaskinia Niedźwiedzia

- **Jaskinia Niedźwiedzia w Kletnie** – jedna z najpiękniejszych jaskiń naciekowych w Polsce, położona w **Sudetach**, w **Masywie Śnieżnika**.
- Obszerne sale i korytarze wypełnione są niezwykle urozmaiconymi naciekami, które aktywnie narastają, są barwne i efektownie kontrastują z ciemnymi ścianami skalnymi.
- W namuliskach znaleziono liczne kości niedźwiedzia jaskiniowego.
- Jaskinia wciąż aktywnie się rozwija – w korytarzach występują liczne kałuże i jeziora, a ściekająca woda powoduje dalsze narastanie nacieków.
- Według badań długość korytarzy wynosi około 4,5 km, a jaskinia rozwija się na trzech poziomach.



Jaskinia Raj

- **Jaskinia Raj** – jedna z najpiękniejszych jaskiń krasowych w Polsce, położona w **Górach Świętokrzyskich**.
- Mimo niewielkich rozmiarów wyróżnia się wyjątkowo bogatą i doskonale zachowaną szatą naciekową, obfitującą w liczne stalaktyty, stalagmity i stalagnaty tworzące gęste skupiska.
- Jej korytarze powstały w wapieniach środkowego dewonu, które około 360 milionów lat temu osadziły się na dnie płytkiego morza.
- Rozwój jaskini przebiegał wieloetapowo, głównie pod koniec neogenu i w czwartorzędzie.
- Długość naturalnych korytarzy: 240 m.
- Temperatura wewnątrz: 8-10°C.
- Wilgotność: powyżej 95%.



KONIEC



Materiały pomocnicze do nauki
Opracowane w celach edukacyjnych (niekomercyjnych)

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

WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE
- KOPIOWANIE ZABRONIONE -