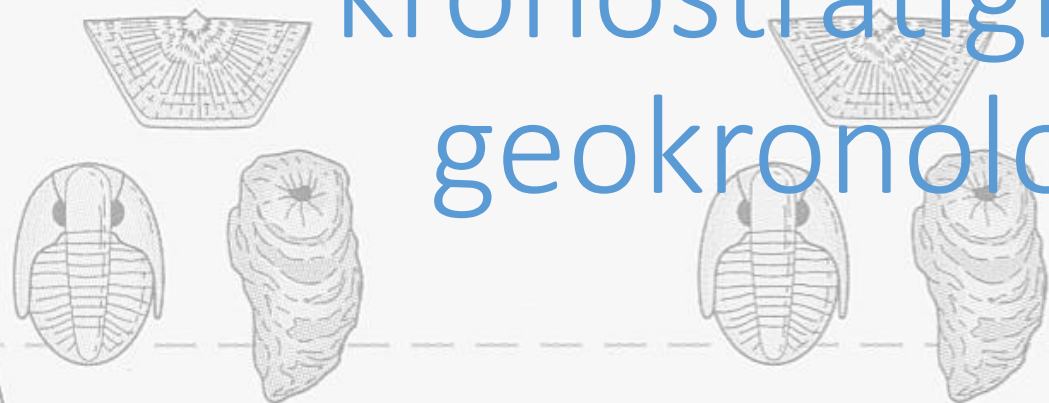




Biostratigrafija, kronostratigrafija i geokronologija



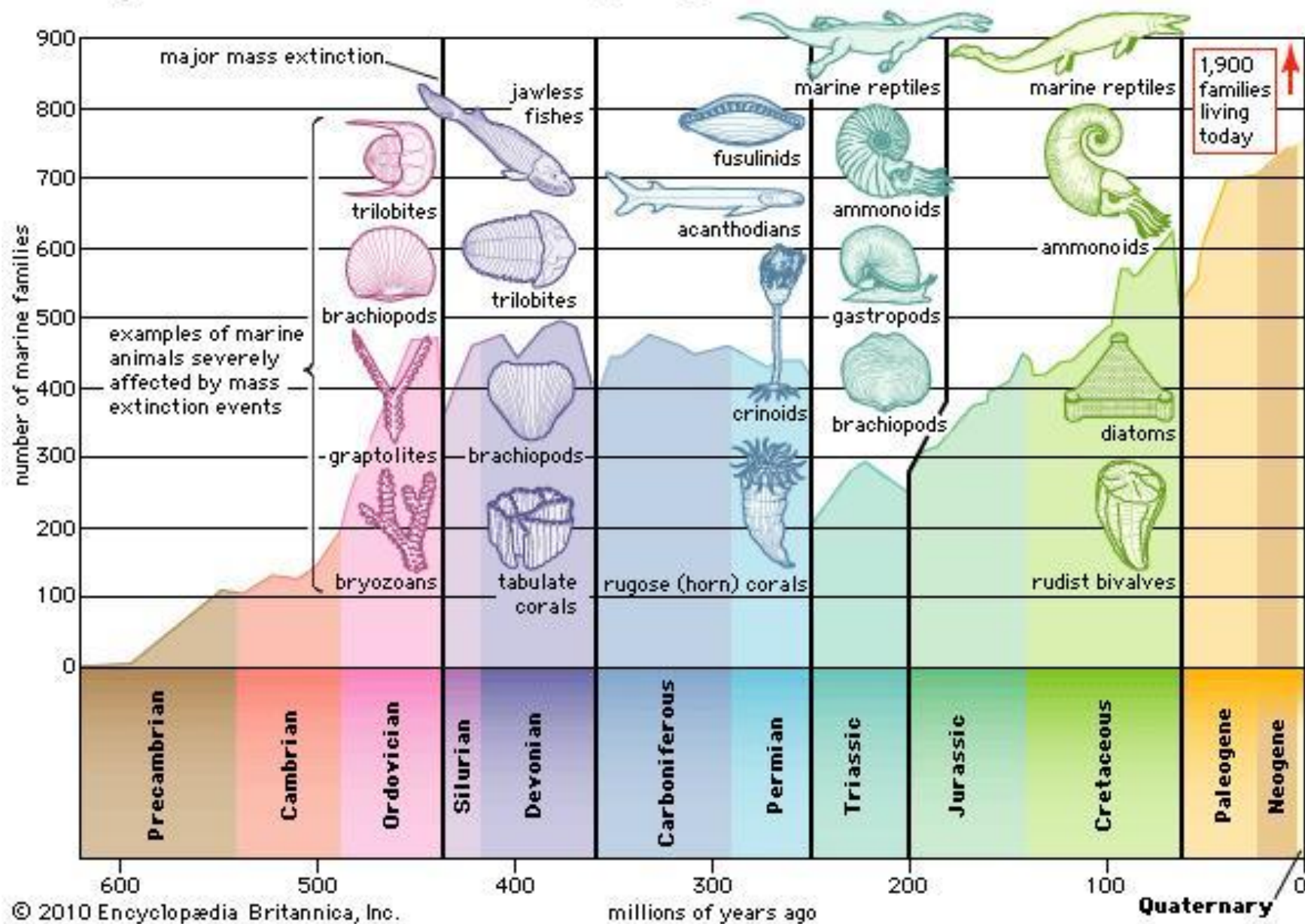
Apsolutna i relativna starost

Canal doc. dr. sc. Karmen Fio Firi
karmen.fio@geol.pmf.unizg.hr

Biostratigrafija

- određivanje relativne starosti sedimentnih naslaga (**kronostratigrafija**) na temelju pojavljivanja određenih oblika fosila
- Temeljna biostratigrafska jedinica – **BIOZONA**
 - prema razlikama u fosilnom sadržaju u stijenama u vertikalnom (vremenskom) slijedu

Diversity of marine animal families over geologic time

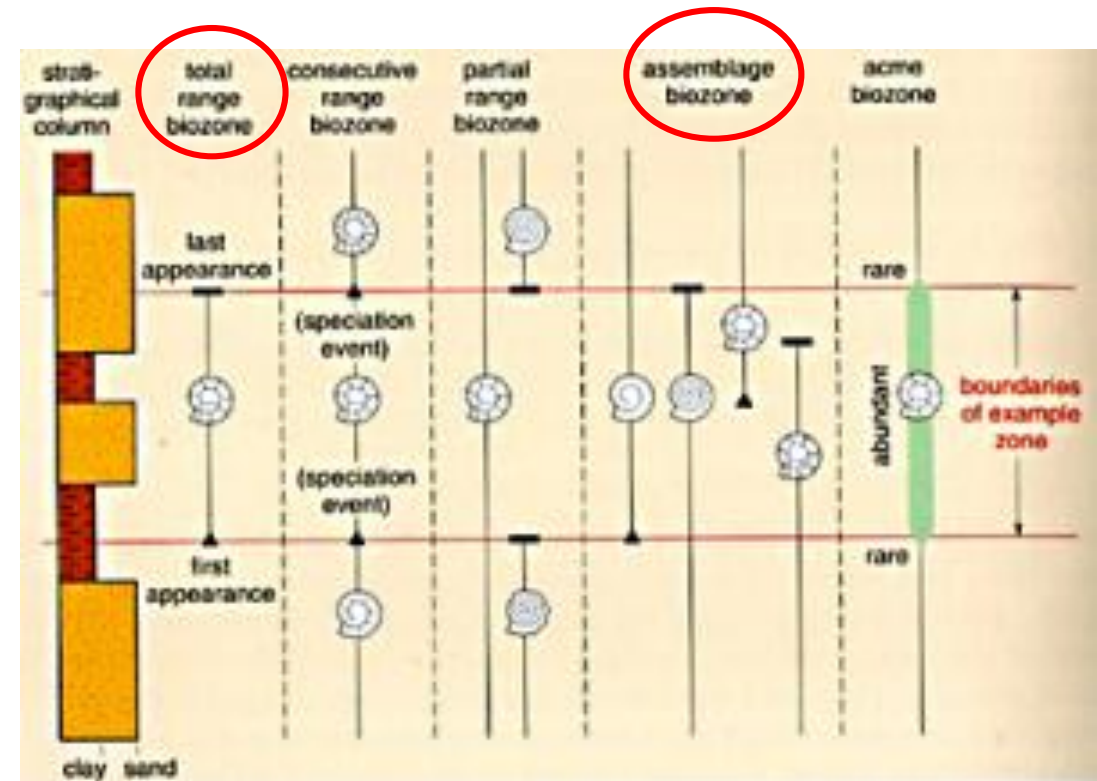


Osnovne zone u biostratigrafiji

- Prvo pojavljivanje određene vrste (*First Appearance Datum* – FAD)
- Posljednje pojavljivanje (*Last Appearance Datum* – LAD)

RASPONSKA ZONA (AKROZONA; *total range biozone*)
→ obuhvaća sve naslage koje su nastale u doba života **jedne** provodne vrste, od njezine prve pojave (FAD) do njenog potpunog nestanka (LAD).

ZAJEDNIŠNA ZONA (CENOZONA; *assemblage biozone*) → temelji se na **dvije ili više** (provodnih) vrsta u određenoj grupi slojeva; npr. Bulimina-Bolivina zajedniška zona



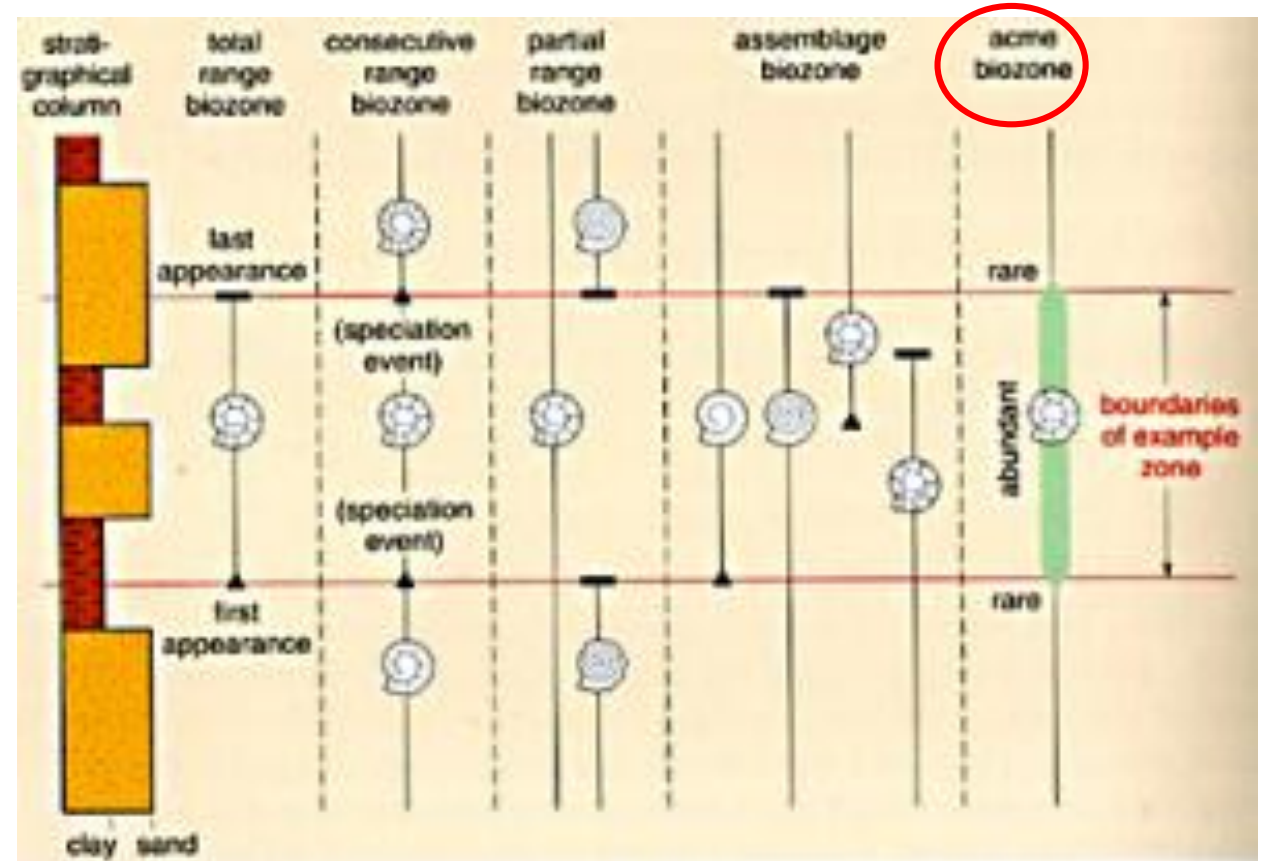
Osnovne zone u biostratigrafiji

VRŠNA ZONA (EPIBOLA; *acme biozone*)

Obuhvaća naslage koje su taložene u vrijeme **maksimuma razvoja** određene vrste (ne za vrijeme cijeloga života).

INTERVALNA ZONA

Između dva, jasno obilježena horizonta.



Litostratigrafski, kronostratigrafski i geokronološki klasifikacijski sustavi

Litostratigrafski sustav – sloj → član → formacija → grupa

- formacija – **skupina stijena** koje su vertikalno i horizontalno više-manje ujednačena sastava; nastala u jednoličnim uvjetima

Kronostratigrafski sustav – kat → serija → sistem → eratem → eonotem

- smještaj različitih lito- i biostratigrafskih jedinica u vremenski okvir; **stijene** litosfere nastale u istom vremenskom razdoblju
- Za ovakve se naslage pri daljnjoj podjeli koriste termini donji, srednji, gornji, npr. fosili nađeni u gornjokrednoj seriji

Geokronološki sustav – doba → epoha → period → era → eon

- geološko **vrijeme** koje odgovara pojedinim kronostratigrafskim jedinicama
- Korištenje vremenskih termina (npr. mlađe, srednje, starije) u jedinicama manjim od perioda, npr. *Tyrannosaurus rex* živio je tijekom mlađe krede

*Pisanje nazivlja geoloških razdoblja malim početnim slovom u HR, u ENG velikim početnim slovom

Kronostratigrafski i geokronološki sustav

Kronostratigrafski	Geokronološki sustav
eotem	eon
eratem	era
sistem	period
serija	epoha
kat	doba



INTERNATIONAL CHRONOSTRATIGRAPHIC CHART

www.stratigraphy.org

International Commission on Stratigraphy

v 2024/12



Phanerozoic	System / Period	Eon / Era	Series / Epoch	Stage / Age	GSSP	numerical age (Ma)
Cenozoic	Quaternary	Holocene	U/L	Meghalayan	present	0
			M	Northgipian	0.0082	
			L/E	Greenlandian	0.0117	
			U/L	Upper	0.129	
			M	Chibanian	0.774	
	Pleistocene	Calabrian	L/E	Calabrian	1.80	
			U/L	Gelasian	2.58	
			L/E	Piacenzian	3.600	
			U/L	Zanclean	5.333	
			M	Messinian	7.246	
Neogene	Miocene	Serravallian	U/L	Tortonian	11.63	
			L/E	Serravallian	13.82	
			U/L	Langhian	15.98	
			L/E	Burdigalian	20.45	
			M	Aquitanian	23.04	
	Oligocene	Chattian	U/L	Chattian	27.30	
			L/E	Rupelian	33.9	
			M	Priabonian	37.71	
			U/L	Bartonian	41.03	
			L/E	Lutetian	48.07	
Paleogene	Eocene	Ypresian	U/L	Thanetian	56.00	
			L/E	Selandian	59.24	
			M	Danian	61.66	
			U/L	Maastrichtian	72.2 ± 0.2	
			L/E	Campanian	83.6 ± 0.2	
	Paleocene	Upper	Santonian	U/L	Santonian	85.7 ± 0.2
				L/E	Coniacian	89.8 ± 0.3
				M	Turonian	93.9 ± 0.2
				U/L	Cenomanian	100.5 ± 0.1
				L/E	Albian	113.2 ± 0.3
Mesozoic	Cretaceous	Lower	U/L	Aptian	121.4 ± 0.6	
			L/E	Barremian	125.77	
			M	Hauterivian	132.6 ± 0.6	
			U/L	Valanginian	137.05 ± 0.2	
			L/E	Berriasian	143.1 ± 0.6	

Phanerozoic	System / Period	Eon / Era	Series / Epoch	Stage / Age	GSSP	numerical age (Ma)
Mesozoic	Jurassic	Upper	Tithonian	U/L	Tithonian	149.2 ± 0.7
				L/E	Kimmeridgian	154.8 ± 0.8
				M	Oxfordian	161.5 ± 1.0
				U/L	Callovian	165.3 ± 1.1
				L/E	Bathonian	168.2 ± 1.2
	Triassic	Lower	Rhaetian	U/L	Bajocian	170.9 ± 0.8
				L/E	Aalenian	174.7 ± 0.8
				M	Toarcian	184.2 ± 0.3
				U/L	Pliensbachian	192.9 ± 0.3
				L/E	Sinemurian	199.5 ± 0.3
Paleozoic	Permian	Guadalupian	U/L	Hettangian	201.4 ± 0.2	
			L/E	Norian	~ 205.7	
			M	Carnian	~ 227.3	
			U/L	Ladinian	~ 237	
			L/E	Anisian	241.464 ± 0.28	
	Carboniferous	Pennsylvanian	Upper	U/L	Olenekian	246.7
				L/E	Induan	249.9
				M	Changhsingian	251.902 ± 0.024
				U/L	Lopingian	254.14 ± 0.07
				L/E	Wuchiapingian	259.51 ± 0.21
Paleozoic	Permian	Cisuralian	U/L	Capitanian	264.28 ± 0.16	
			L/E	Wordian	266.9 ± 0.4	
			M	Roadian	274.4 ± 0.4	
			U/L	Kungurian	283.3 ± 0.4	
			L/E	Artinskian	290.1 ± 0.26	
	Carboniferous	Mississippian	Lower	U/L	Sakmarian	293.52 ± 0.17
				L/E	Asselian	298.9 ± 0.15
				M	Gzhelian	303.7 ± 0.1
				U/L	Kasimovian	307.0 ± 0.1
				L/E	Moscovian	315.2 ± 0.2
Paleozoic	Carboniferous	Upper	U/L	Bashkirian	323.4 ± 0.4	
			L/E	Serpukhovian	330.3 ± 0.4	
			M	Visean	346.7 ± 0.4	
			U/L	Tournaisian	358.86 ± 0.19	
			L/E	Tournaisian	358.86 ± 0.19	

Phanerozoic	System / Period	Eon / Era	Series / Epoch	Stage / Age	GSSP	numerical age (Ma)	
							Series / Epoch
Paleozoic	Devonian	Upper	Famennian	U/L	Famennian	372.15 ± 0.46	
				L/E	Frasnian	382.31 ± 1.36	
				M	Givetian	387.95 ± 1.04	
				U/L	Eifelian	393.47 ± 0.99	
				L/E	Emsian	410.62 ± 1.95	
	Silurian	Lower	Pridoli	U/L	Pragian	413.02 ± 1.91	
				L/E	Lochkovian	419.62 ± 1.36	
				M	Ludlow	422.7 ± 1.6	
				U/L	Ludfordian	425.0 ± 1.5	
				L/E	Gorstian	426.7 ± 1.5	
Paleozoic	Ordovician	Upper	Katian	U/L	Wenlock	430.6 ± 1.3	
				L/E	Sheinwoodian	432.9 ± 1.2	
				M	Telychian	438.6 ± 1.0	
				U/L	Aeronian	440.5 ± 1.0	
				L/E	Rhuddanian	443.1 ± 0.9	
	Cambrian	Series 2	Lower	Tremadocian	U/L	Hirnantian	445.2 ± 0.9
					L/E	Sandbian	452.8 ± 0.7
					M	Darriwilian	458.2 ± 0.7
					U/L	Dapingian	469.4 ± 0.9
					L/E	Floian	471.3 ± 1.4
Paleozoic	Cambrian	Series 2	Upper	Tremadocian	U/L	Tremadocian	477.1 ± 1.2
					L/E	Furongian	486.85 ± 1.5
					M	Stage 10	~ 491.0
					U/L	Jiangshanian	~ 494.2
					L/E	Paibian	~ 497.0
	Cambrian	Terreneuvian	Lower	Fortunian	U/L	Guzhangian	~ 497.0
					L/E	Miaolingian	~ 500.5
					M	Drumian	~ 504.5
					U/L	Wuliuan	~ 506.5
					L/E	Stage 4	~ 514.5
Cambrian	Terreneuvian	Lower	Fortunian	U/L	Stage 3	~ 521.0	
				L/E	Stage 2	~ 529.0	
				M	Fortunian	~ 529.0	
				U/L	Fortunian	~ 529.0	
				L/E	Fortunian	~ 529.0	

Precambrian	System / Period	Eon / Era	Series / Epoch	Stage / Age	GSSP	numerical age (Ma)
Proterozoic	Neoproterozoic	Ediacaran	Ediacaran	U/L	Ediacaran	538.8 ± 0.6
				L/E	Cryogenian	~ 635
				M	Tonian	~ 720
				U/L	Stenian	1000
				L/E	Ectasian	1200
	Mesoproterozoic	Calymmian	Calymmian	U/L	Calymmian	1400
				L/E	Statherian	1600
				M	Orosirian	1800
				U/L	Rhyacian	2050
				L/E	Siderian	2300
Archean	Paleoarchean	Paleoarchean	U/L	Siderian	2500	
			L/E	Neoarchean	2800	
			M	Mesoarchean	3200	
			U/L	Paleoarchean	3600	
			L/E	Eoarchean	4031 ± 3	
	Hadean	Hadean	Hadean	U/L	Hadean	4567
				L/E	Hadean	4567
				M	Hadean	4567
				U/L	Hadean	4567
				L/E	Hadean	4567

Units of all ranks are in the process of being defined by Global Boundary Stratotype Section and Points (GSSP) for their lower boundaries, including those of the Archean and Proterozoic, long defined by Global Standard Stratigraphic Ages (GSSA). Ratified Subseries/Subepochs are abbreviated as U/L (Upper/Late), M (Middle) and L/E (Lower/Early). Italic fonts indicate informal units and placeholders for unnamed units. Previous versions and detailed information on ratified GSSPs are available at the website <http://www.stratigraphy.org>. The URL to this chart is provided below.

Numerical ages are subject to ongoing revision and do not define units in the Phanerozoic and the Ediacaran; only GSSPs do. For boundaries in the Phanerozoic without ratified GSSPs or without constrained numerical ages, an approximate numerical age (~) is provided.

Most numerical ages are taken from 'A Geologic Time Scale 2020' by Gradstein et al. (2020), but some ages differ as provided by the relevant ICS subcommissions, with advice from the Timescale Calibration subcommission. These are approved by the ICS executive as the current consensus.

Colouring follows the Commission for the Geological Map of the World (www.ccgmw.org)

Chart drafted and maintained online by officers K.M. Cohen and N. Car. The chart is a product of collective work by all ICS members past and present.

(c) International Commission on Stratigraphy, December 2024

URL: <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2024-12.pdf>

To cite: Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. & Fan, J.-X. (2013; updated) The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36: 199-204

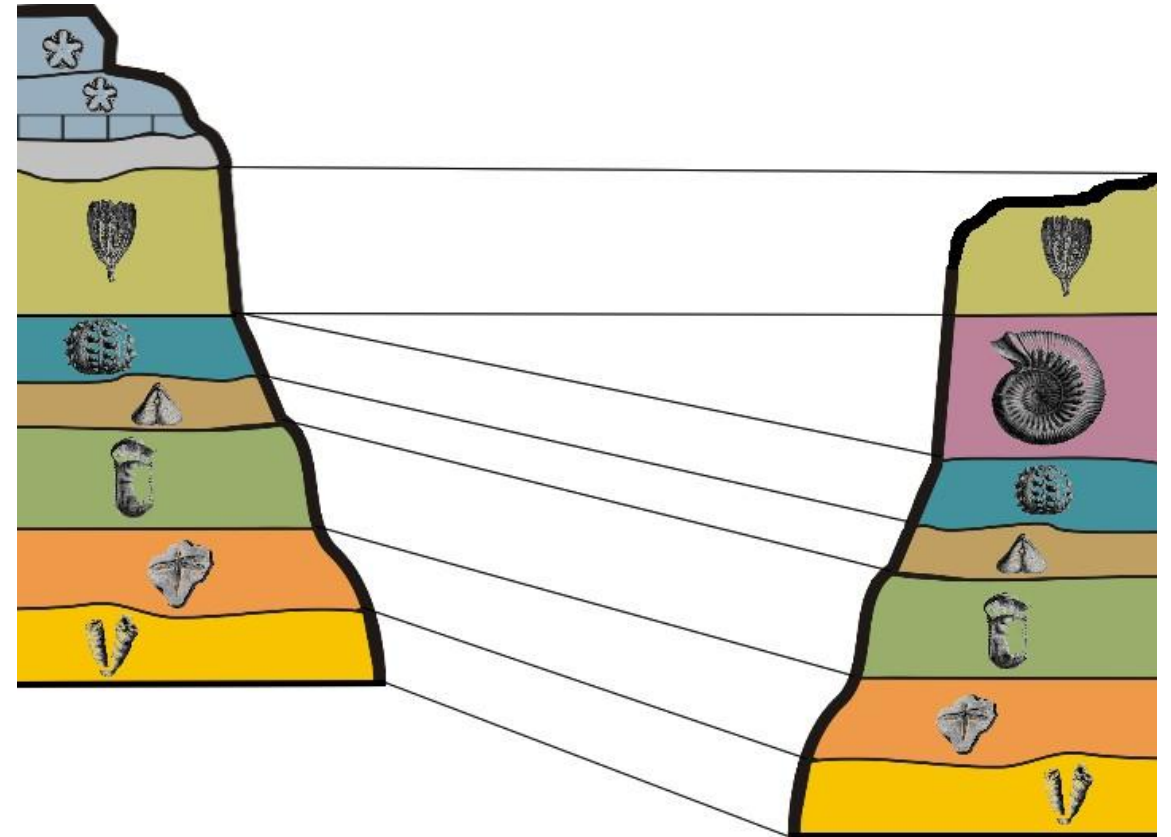
Relativna starost

Različiti principi za određivanje relativne (indirektne) starosti i utvrđivanje redoslijeda događaja u geološkoj prošlosti:

- izvorni horizontalni položaj – taloženje sedimentnih stijena u vodi → horizontalni ili približno horizontalni slojevi
- superpozicija – unutar slijeda neporemećenih sedimentnih stijena, dublje se nalaze starije, a pri površini mlađe stijene
- koso presijecanje – „tijelo” koje presjeca mlađe je od naslaga kroz koje presjeca
- princip uklopaka – stariji uklopci u mlađim naslagama
- princip biološkog slijeda → **PALEONTOLOŠKI NALAZI**
- zapažanje kontakata među stijenama...

Princip biološkog slijeda (*The principle of faunal succession*)

- usporedba stijena iste starosti na različitim geografskim područjima na temelju fosilnih nalaza – princip biološke sukcesije
- pojam uveo **William Smith** (1769. – 1839.)
 - prilikom rada u rudniku uočio da su slojevi karakteristično poredani te da se slijed naslaga može pratiti na različitim lokacijama
 - temeljem fosilnog sadržaja uočio da se u pojedinim slojevima nalaze iste grupe fosila te odredio starije i mlađe
 - uspoređivao naslage/slojeve na različitim lokacijama

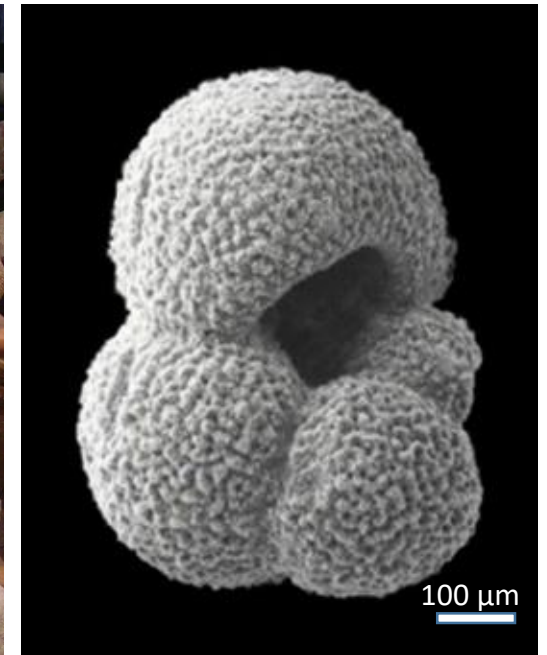


By אמי יצחקי, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17935309>






















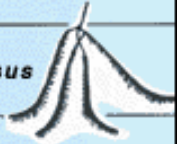


ZADATAK: proučite život i djelo Williama Smitha

Provodni fosili

- kratak vremenski raspon, a rasprostranjeni na širem geografskom prostoru
→ određivanje “relativne starosti” stijena



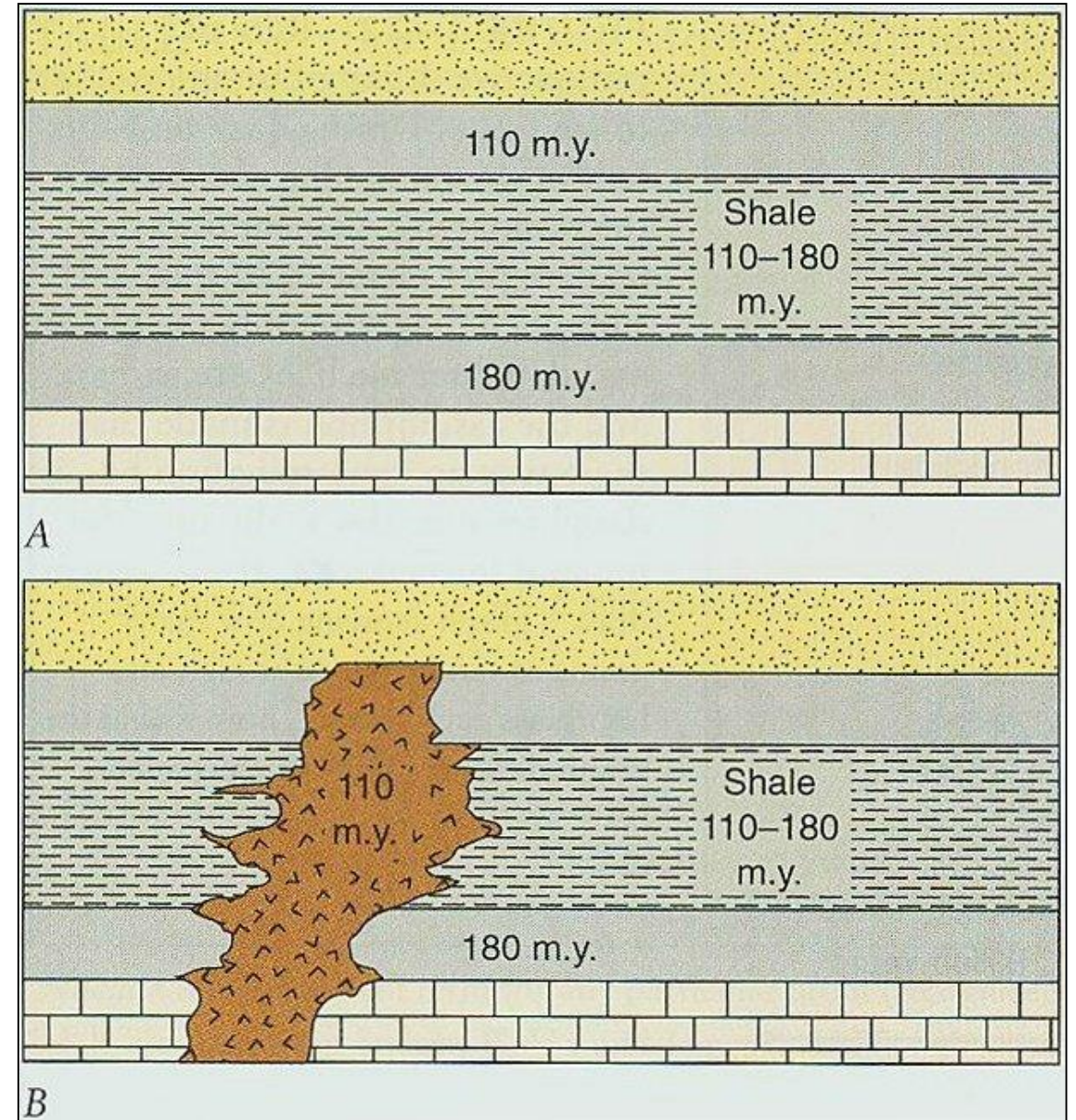
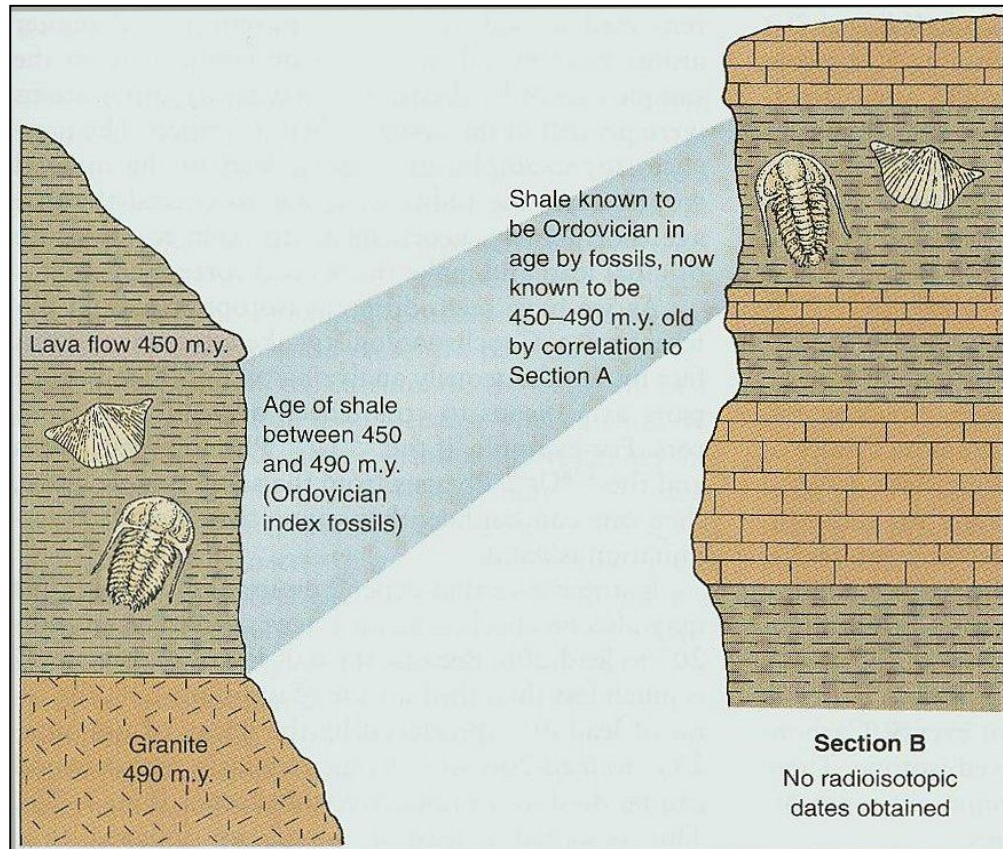
Provodni fosili

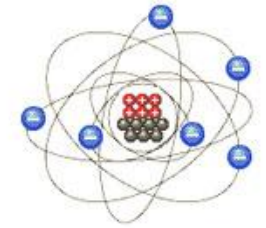
CENOZOIC ERA (Age of Recent Life)	Quaternary Period	<i>Pecten gibbus</i>		<i>Neptunea tabulata</i>	
	Tertiary Period	<i>Calyptrophorus velatus</i>		<i>Venericardia planicosta</i>	
MESOZOIC ERA (Age of Medieval Life)	Cretaceous Period	<i>Scaphites hippocrepis</i>		<i>Inoceramus labiatus</i>	
	Jurassic Period	<i>Perisphinctes tiziani</i>		<i>Nerinea trinodosa</i>	
	Triassic Period	<i>Trochites subbullatus</i>		<i>Monotis subcircularis</i>	
	Permian Period	<i>Leptodus americanus</i>		<i>Parafusulina bosei</i>	
PALEOZOIC ERA (Age of Ancient Life)	Pennsylvanian Period	<i>Dictyoclostus americanus</i>		<i>Lophophyllidium proliferum</i>	
	Mississippian Period	<i>Cactocrinus multibrachiatus</i>		<i>Prolecanites gurleyi</i>	
	Devonian Period	<i>Mucrospirifer mucronatus</i>		<i>Palmatolepus unicornis</i>	
	Silurian Period	<i>Cystiphyllum niagarensis</i>		<i>Hexamoceras hertzeri</i>	
	Ordovician Period	<i>Bathyurus extans</i>		<i>Tetragraptus fructicosus</i>	
	Cambrian Period	<i>Paradoxides pinus</i>		<i>Billingsella corrugata</i>	
PRECAMBRIAN					

By United States Geological Survey - <http://pubs.usgs.gov/gip/geotime/fossils.html>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3092986>

NAČINI DATIRANJA

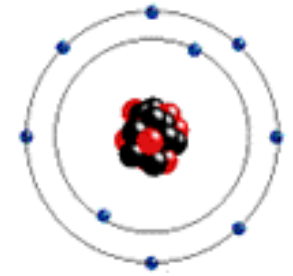
- Relativno datiranje (indirektno)
- Apsolutno datiranje





Apsolutna starost

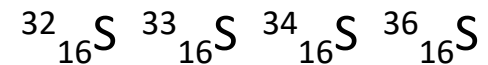
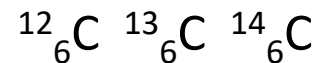
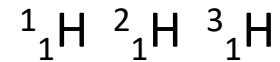
- Otkriće radioaktivnosti pomoglo u preciznijem datiranju događaja i vremenskom trajanju pojedinih geoloških razdoblja → radiometrijsko datiranje starosti (kvantitativna geokronologija)
- Najbolje za određivanje radiometrijske starosti su **magmatske** stijene – jer imaju najmanju mogućnost gubitka novonastalih elemenata („djece”) → važno za točno određivanje starosti
- Sedimentne stijene mogu dati samo podatak o starosti minerala koji izgrađuju tu sedimentnu stijenu, tj. stijene su uvijek mlađe od minerala koji je izgrađuju
- Metamorfne stijene su nepogodne za odredbu starosti jer daju podatak o vremenu metamorfoze, a ne o vremenu nastanka prvotne stijene



IZOTOPI (općenito)

- Izotopi su elementi s **istim atomskim brojem** (Z = broj protona u jezgri, odnosno elektrona u elektronskom omotaču), ali s **različitim masenim brojem** (A) zbog razlike u broju neutrona (N).

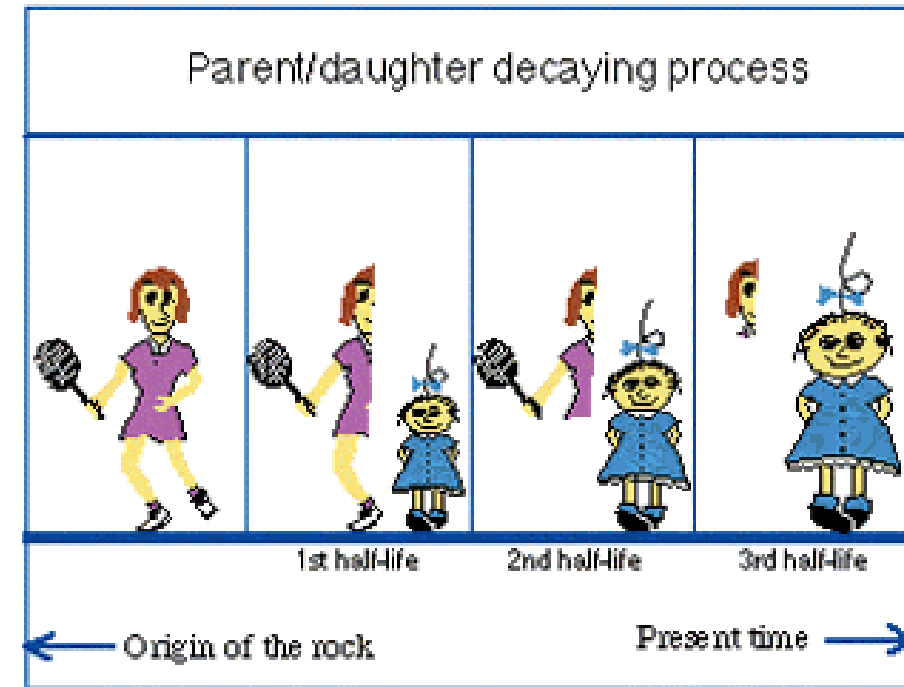
- Primjeri za izotopni sastav su:



- Izotopi istog elementa imaju ista kemijska, ali različita fizikalno-kemijska svojstva zbog njihove razlike u masenom broju
- Razlike u masi dovode do **izotopne frakcionacije**, odnosno odvajanja težih i lakših izotopa istog elementa
- Izotopi mogu biti:
 - **stabilni**
 - nestabilni (**radioaktivni**)

Radioaktivnost i vrijeme poluraspada

- Radioaktivnost – pojava kada se nestabilni (radioaktivni) izotopi raspadaju na atome manjeg atomskog broja (broj protona u jezgri), tj. atomske mase (zbroj protona i neutrona u jezgri)
- Vrijeme početka raspada nekog elementa, tj. vrijeme nastanka neke stijene koja sadrži taj radioaktivni element, može se odrediti poznavanjem njegova vremena **poluraspada** (vrijeme potrebno da se prvotna količina nekog radioaktivnog elementa smanji na pola)
- Prirodno radioaktivni su svi elementi rednog broja ≥ 83 , ali i neki izotopi lakših elemenata
- >40 različitih postupaka korištenja radioaktivnih elemenata i metoda za mjerenje radioaktivnosti



Izotopi za radiometrijsko datiranje

Parent Nuclide*	Half-Life†	Daughter Nuclide	Source Materials
Carbon-14	5730 years	Nitrogen-14	Organic matter
Uranium-238	4.5 billion years	Lead-206	Zircon, uraninite, pitchblende
Uranium-235	704 million years	Lead-207	
Thorium-232	14 billion years	Lead-208	
Rubidium-87	48.8 billion years	Strontium-87	Potassium mica, potassium feldspar, biotite, glauconite, whole metamorphic or igneous rock
Potassium-40	1251 million years (1.251 billion years)	Argon-40 (and calcium-40)‡	Muscovite, biotite, hornblende, whole volcanic rock, glauconite, and potassium feldspar†‡

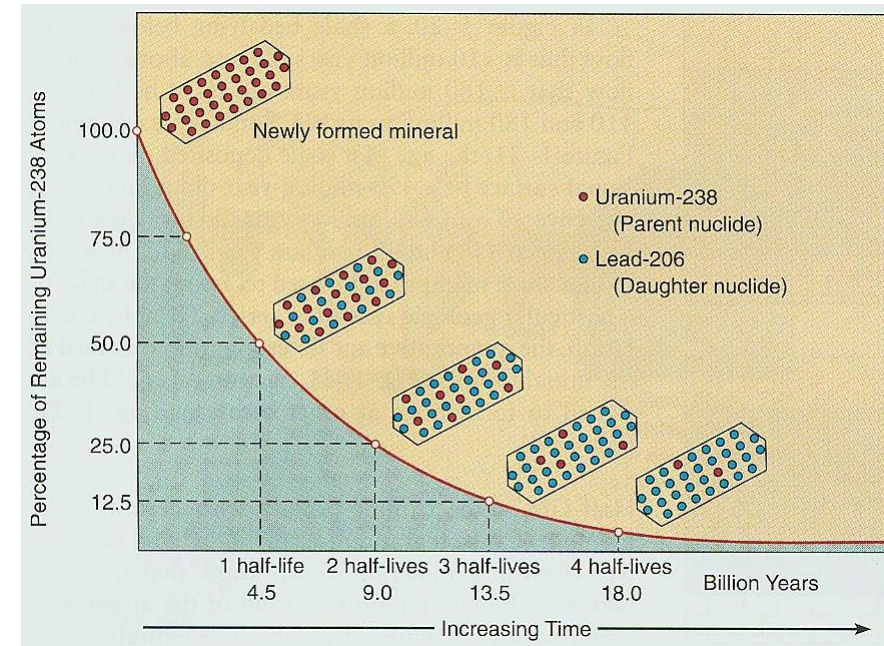
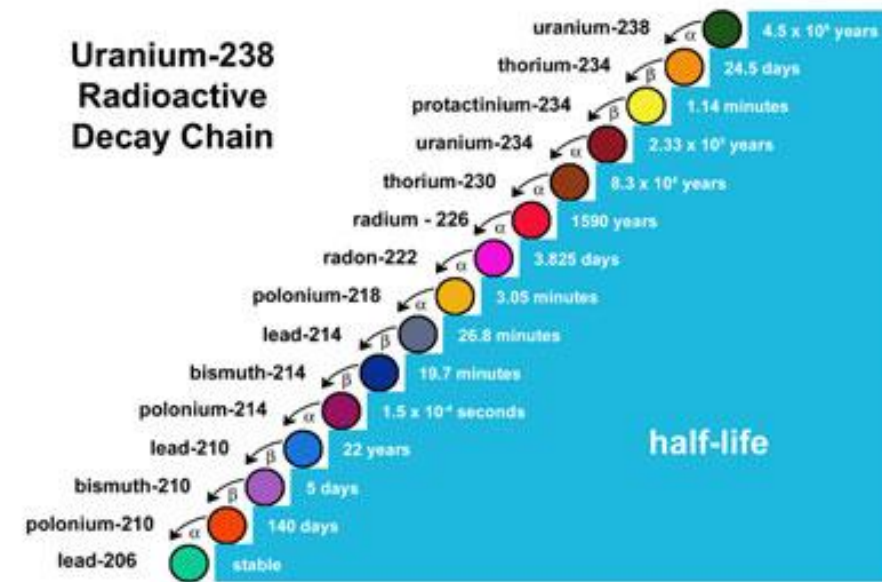
Neki elementi imaju vrlo dugo vrijeme poluraspada, a neki kratko.

RADIOAKTIVNE METODE

Metoda Uran-Olovo

($^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ i $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$)

- kod ove metode bitno je razlikovati olovo nastalo radioaktivnim raspadom urana od onog olova koje je bilo prisutno kao originalni sastojak stijene iz vremena njena nastanka
- obično se kombiniraju obje metode jer je poluraspad ^{235}U brži, pa se uočavanjem promjena odnosa ^{207}Pb i ^{206}Pb u stijeni također može određivati starost

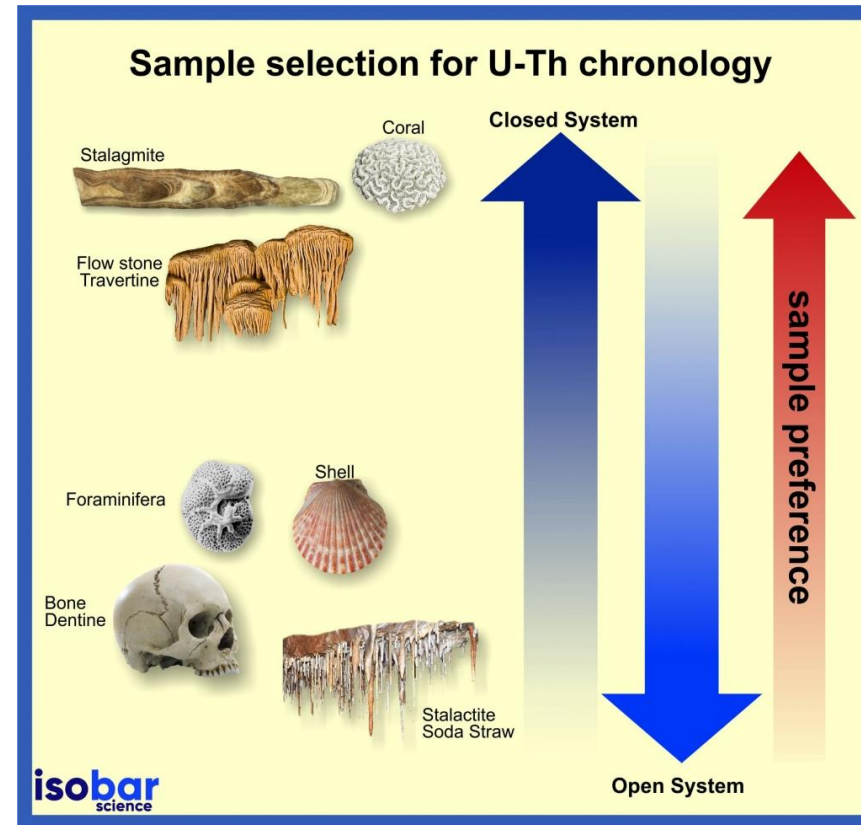


Princip radioaktivnog raspada ^{238}U

RADIOAKTIVNE METODE

Metoda Uran-Torij ($^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$)

- ovaj uranski izotop ima relativno kratko vrijeme poluraspada u ^{230}Th , a često se nalazi u kalcitnim skeletima grebenotvoraca
- starost grebena tako se može određivati u rasponima od nekoliko pa do 300 000 godina



U-datiranje se koristi za datiranje nastanka stalagmita (kalcitne tvorevine koje nastaju u krškom podzemlju) i koralja.

→ Oborinska voda s površine dolazi do podzemlja → otapa vapnenačke stijene i stvara naslage kristala kalcita → voda koja nosi kristale kalcita sadrži i tragove urana (U topiv u vodi, za razliku od Th koji nije topiv u vodi) → torij koji se nalazi u mineralnim naslagama u špiljskom okruženju nastaje samo raspadom urana 234.

RADIOAKTIVNE METODE

Metoda Kalij-Argon ($^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$)

- pogodna metoda jer mnoge magmatske stijene sadrže kalij (npr. u feldspatima; kalij i u glinama, evaporitima i tinjcima)
- Ar je inertan plin i ostaje „zarobljen” u stijeni prilikom hlađenja
- oprez jer se pri zagrijavanju stijene iznad 125°C Ar počinje isparavati; oprez i kod pojave ^{36}Ar u mjehurićima
- za uzorke stare od 100 000 do 4 milijarde godina

Metoda Rubidij-Stroncij ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$)

- često se koristi kao pomoćna metoda prethodnoj jer je rubidij uglavnom prisutan u mineralima u kojima je i kalij, a stroncij nije tako osjetljiv na visoke temperature kao argon

RADIOAKTIVNE METODE

Neodimij ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)

- za određivanje paleooceanskih promjena, morske cirkulacije, kontinentalnog utjecaja, miješanja morskih masa i klimatskih uvjeta u geološkoj prošlosti. Nd ima “kratko” vrijeme zadržavanja u morskoj vodi, s obzirom na globalnu oceansku cirkulaciju, a potiče najviše iz atmosfere i riječnim donosom.

Stroncij ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)

- za određivanje utjecaja kopnenog zaleđa u odnosu na oceanske vode, i njihov utjecaj na lokalne vode, a time i na sastav fosila. Sr ima dugo vrijeme zadržavanja (duže od vremena izmjene vode u oceanima), pa izotopi Sr mogu ukazivati na sastav morske vode u određenom vremenskom razdoblju, a samim time i na starost sedimenata

- stroncij ima konfiguraciju elektrona sličnu kalciju pa često ulazi na mjesto Ca u mineralima

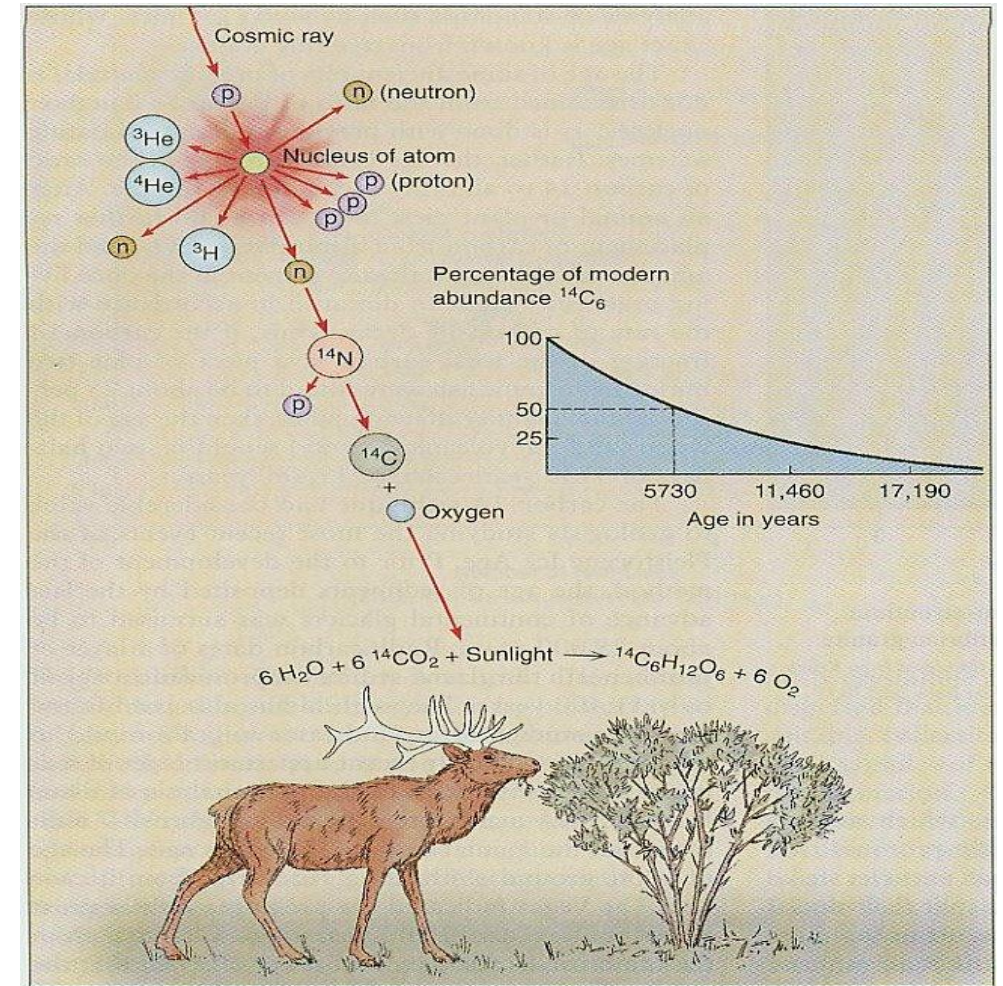
RADIOAKTIVNE METODE

Metoda Ugljika (^{14}C)

U gornjim slojevima atmosfere kozmičke zrake (uglavnom protoni) sudaraju se s atomima različitih plinova razbijajući njihove jezgre, čime nastaju slobodni neutroni, koji udaraju u jezgre atoma ^{14}N , izbace proton, a ostaje vezan dodatni neutron, čime nastaje ^{14}C . On se veže s kisikom i nastaje CO_2 , koji biljke koriste za fotosintezu, a preko biljaka konzumiraju ga i životinje.

Kako se za života nekog bića C stalno unosi u organizam, njegov raspad ne utječe na smanjenje njegove količine u organizmu. Nakon uginuća, količina ^{14}C se više ne unosi u organizam te se smanjuje pa je moguće odrediti koliko je vremena proteklo od smrti organizma.

Određivanje starosti metodom radioaktivnog izotopa ugljika ^{14}C , pogodna je metoda za **apsolutno datiranje materijala organskog porijekla starosti do oko 60 000 godina**.



Produkcija ^{14}C u atmosferi nije uvijek bila jednaka, te to treba uzeti u obzir.

STABILNI IZOTOPI KAO INDIKATORI PALEOOKOLIŠA

- u geološko-paleontološkim istraživanjima od stabilnih izotopa najčešće se koriste izotopi šest elemenata koji se javljaju u živim organizmima: H, C, N, O, S i Cl
- za izražavanje izotopnog sastava standardno se u izotopnoj geokemiji koristi **delta (δ) notacija**
- Vrijednost R predstavlja omjer težeg i lakšeg izotopa, npr. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$
- Za tvar A, čiji je izotopni sastav izmjeren u laboratoriju metodom **masene spektrometrije**, delta vrijednost iznosi:

$$\delta (A) = R_A/R_{st} - 1 * 10^3 (\text{‰})$$

ELEMENT	IZOTOPI	OMJERI IZOTOPA, δ VRIJEDNOSTI	STANDARD
Vodik (H)	H, D	D/H, δD	V-SMOW
Ugljik (C)	^{12}C , ^{13}C	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, δ ^{13}C	PDB
Dušik (N)	^{14}N , ^{15}N	$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, δ ^{15}N	Zrak
Kisik (O)	^{16}O , (^{17}O), ^{18}O	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, δ ^{18}O	V-SMOW, PDB
Sumpor (S)	^{32}S , (^{33}S), ^{34}S , (^{36}S)	$^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, δ ^{34}S	CDT

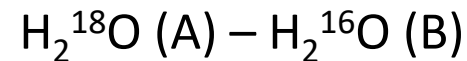
(V-SMOW = Vienna Standard Mean Ocean Water, PDB = Peedee Belemnite, CDT = Canon Diablo Troilite)

STABILNI IZOTOPI

1) Kinetička frakcionacija (kinetički efekt)

→ proces koji je povezan uz procese poput isparavanja, disocijacije, bioloških reakcija i difuzije. Tijekom reakcije dolazi do **preferiranog uklapanja lakših izotopa** nekog elementa u produkte reakcije.

Može se prikazati pomoću jednostavne jednadžbe:



$$E_{\text{kin}} \text{ (A)} = E_{\text{kin}} \text{ (B)}$$

$$\frac{1}{2} m_a v_a^2 = \frac{1}{2} m_b v_b^2$$

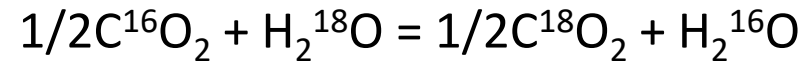
$$(20/18)^{1/2} = v_b/v_a$$

$$v_b/v_a = 1.054$$

STABILNI IZOTOPI

2) Ravnotežna frakcionizacija (**izotopna zamjena**)

→ dolazi do izmjene izotopa između različitih kemijskih supstanci, odnosno različitih faza ili molekula.



$$a = (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{CO}_2} / (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{H}_2\text{O}}$$

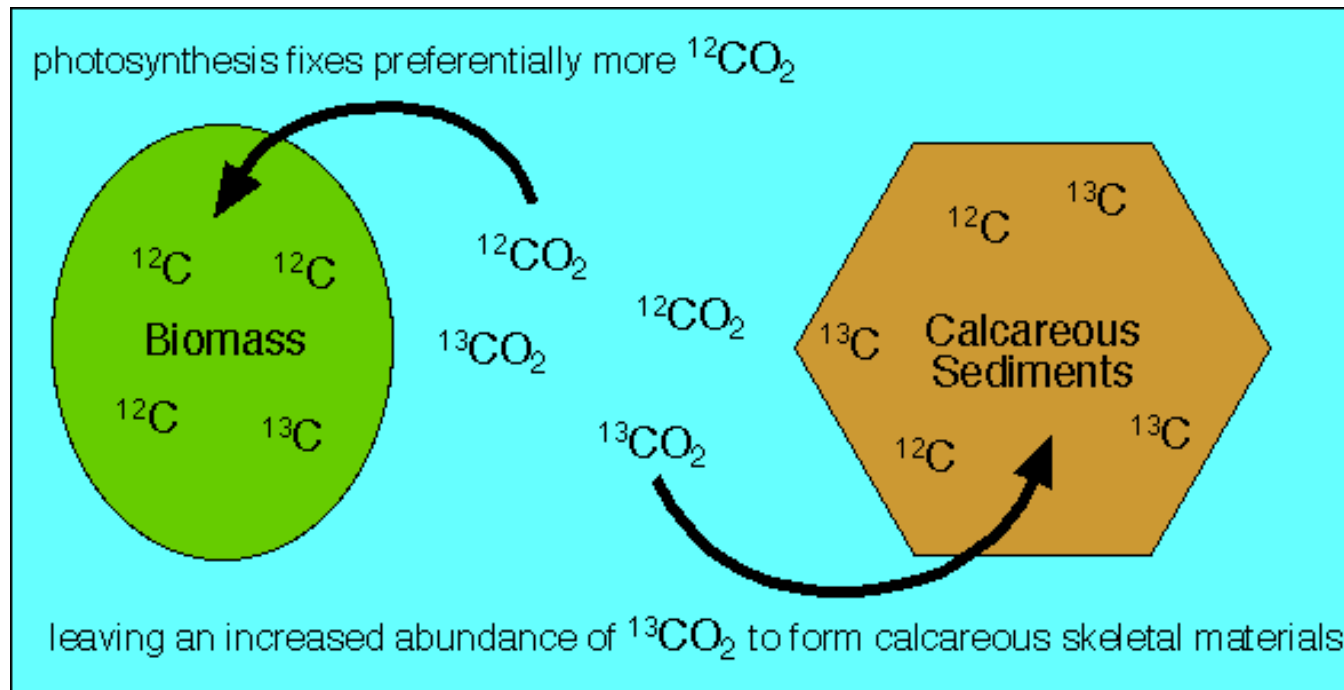


faktor frakcionizacije (a)

IZOTOPI UGLJIKA ($\delta^{13}\text{C}$)

Dva glavna rezervoara ugljika, organska tvar i sedimentne karbonatne naslage, imaju različite izotopne karakteristike zbog dva različita mehanizma:

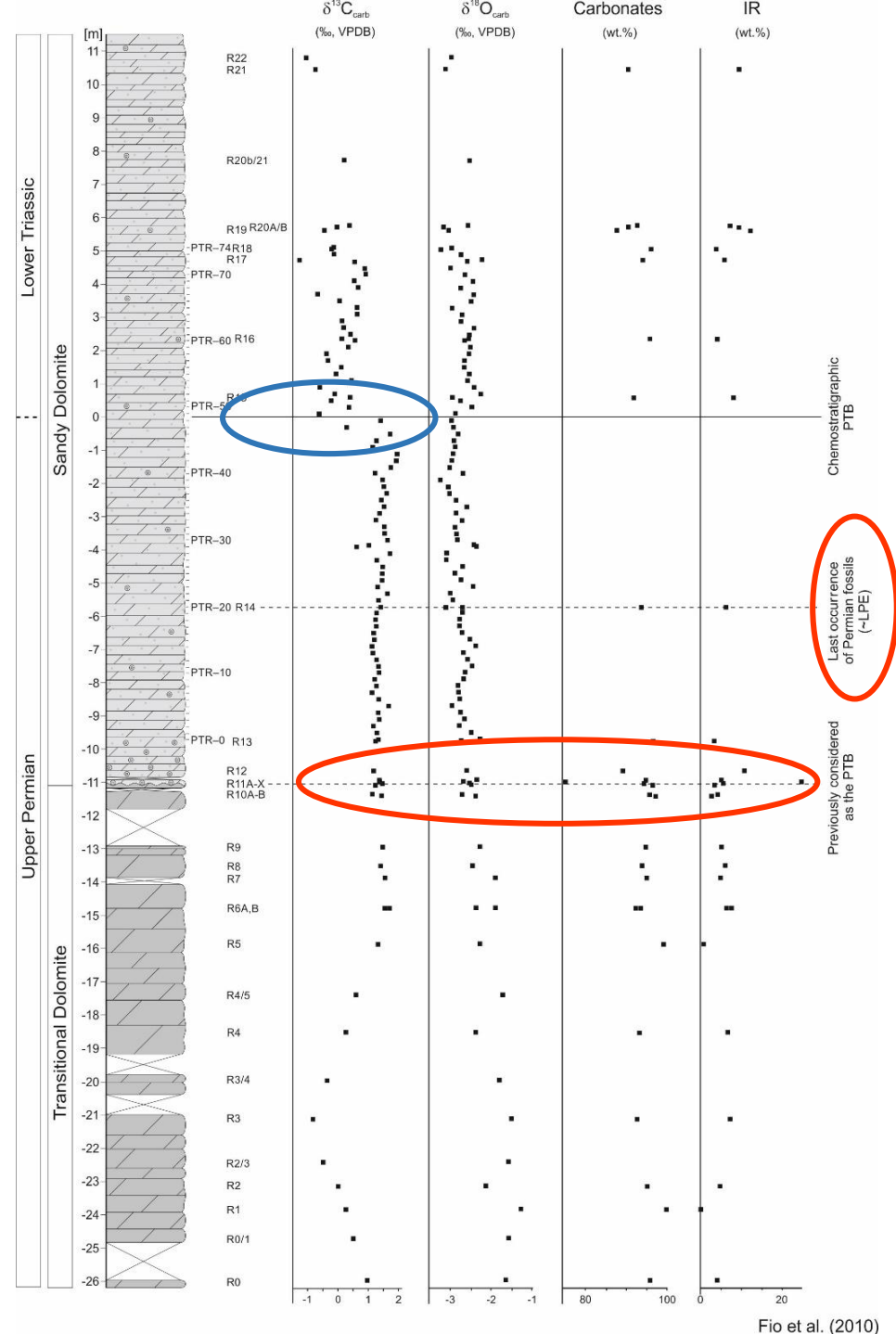
- Reakcija izotopne ravnotežne izmjene kod anorganskog ugljika – „atmosferski ugljik – otopljeni bikarbonatni ion – čvrsti karbonat“, vodi do **obogaćenja na ^{13}C** .
- Kinetički izotopni efekt za vrijeme fotosinteze dovodi do **koncentriranja lakšeg izotopa ^{12}C u organskoj tvari**



Omjer izotopa ugljika $\delta^{13}\text{C}$ kao pokazatelj okolišnih promjena

Granica perma i trijasa

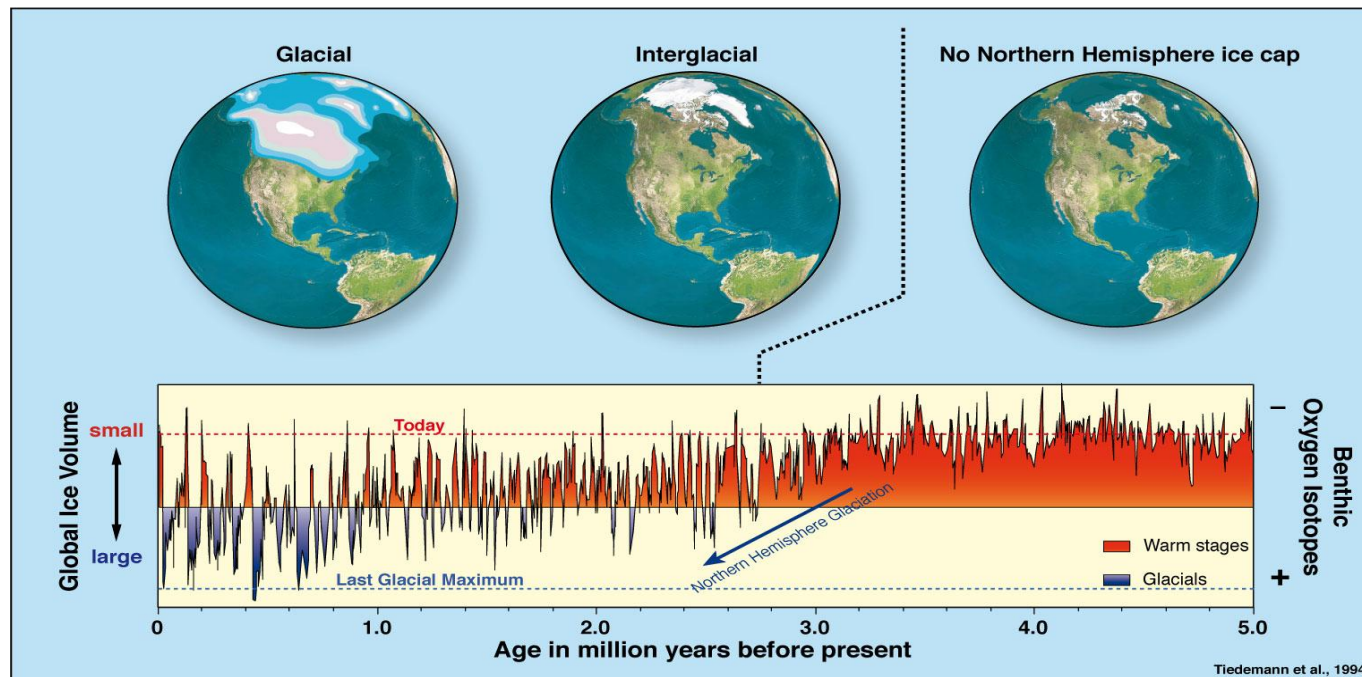
- Istraživanja na području Velebita (lokalitet Rizvanuša), granica perma i trijasa, najveće izumiranje u geološkoj prošlosti
- Negativan pomak u vrijednostima $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ s **+1.4 na -0.6 ‰** ukazuje na kemostratigrafsku granicu perma i trijasa



IZOTOPI KISIKA ($\delta^{18}\text{O}$)

- Izotopi kisika ($\delta^{18}\text{O}$) najčešće se koriste u paleotermometriji; na temelju vrijednosti kalcita i vode može se odrediti aproksimativna temperatura vode (mora)
- Različite jednadžbe, ovisno o materijalu koji se analizira (različite kućice foraminifera npr.)
- npr. jednadžba Epstein (1953):

$$T = 16,9 - 4,3 (\delta^{18}\text{O}_{\text{kalcit}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{voda}}) + 0,14 (\delta^{18}\text{O}_{\text{kalcit}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{voda}})^2$$



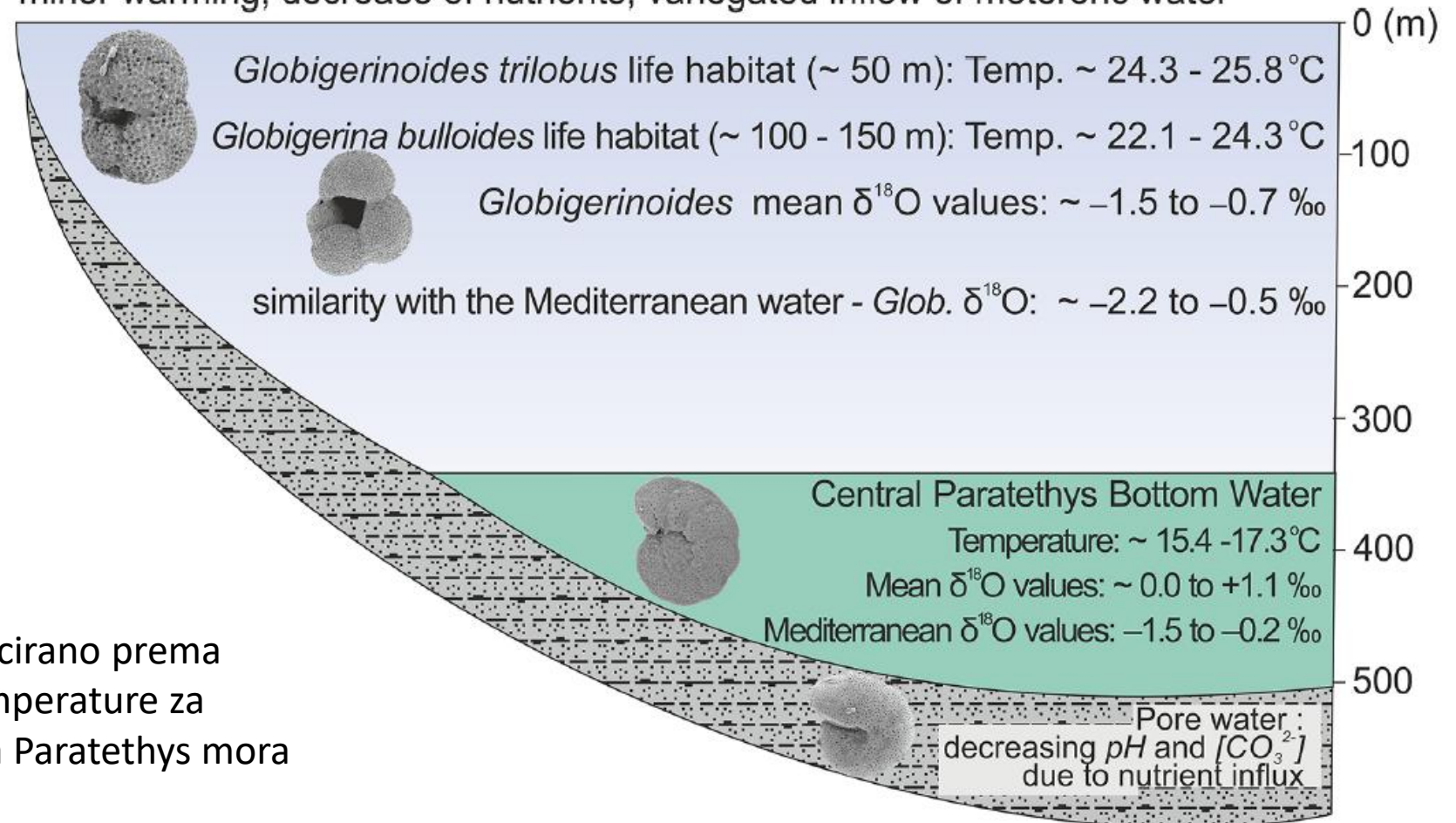
Krivulja **izotopa kisika** iz bentičkih foraminifera u zadnjih 5 mil. godina, za praćenje promjena globalnog volumena leda i dubokomorske temperature

- 5–3 mil. god. (pliocen) – koncentracije CO_2 slične današnjim, toplija klima, razina mora 30 cm viša od današnje, nema ledenih kapa na sjevernom polu
- Zadnjih 3 milijuna god. – izmjene glacijala i interglacijala

IZOTOPI KISIKA ($\delta^{18}\text{O}$)

Temperature and isotopic composition of the Carpathian Foredeep Sea after the Middle Miocene Climatic Optimum

Subtropical climate; 14.4 Ma - 14.35 Ma
minor warming; decrease of nutrients; variegated inflow of meteoric water



Scheiner i sur. (2018, modificirano prema Kovač i sur., 2017), paleotemperature za slovački dio središnjeg dijela Paratethys mora