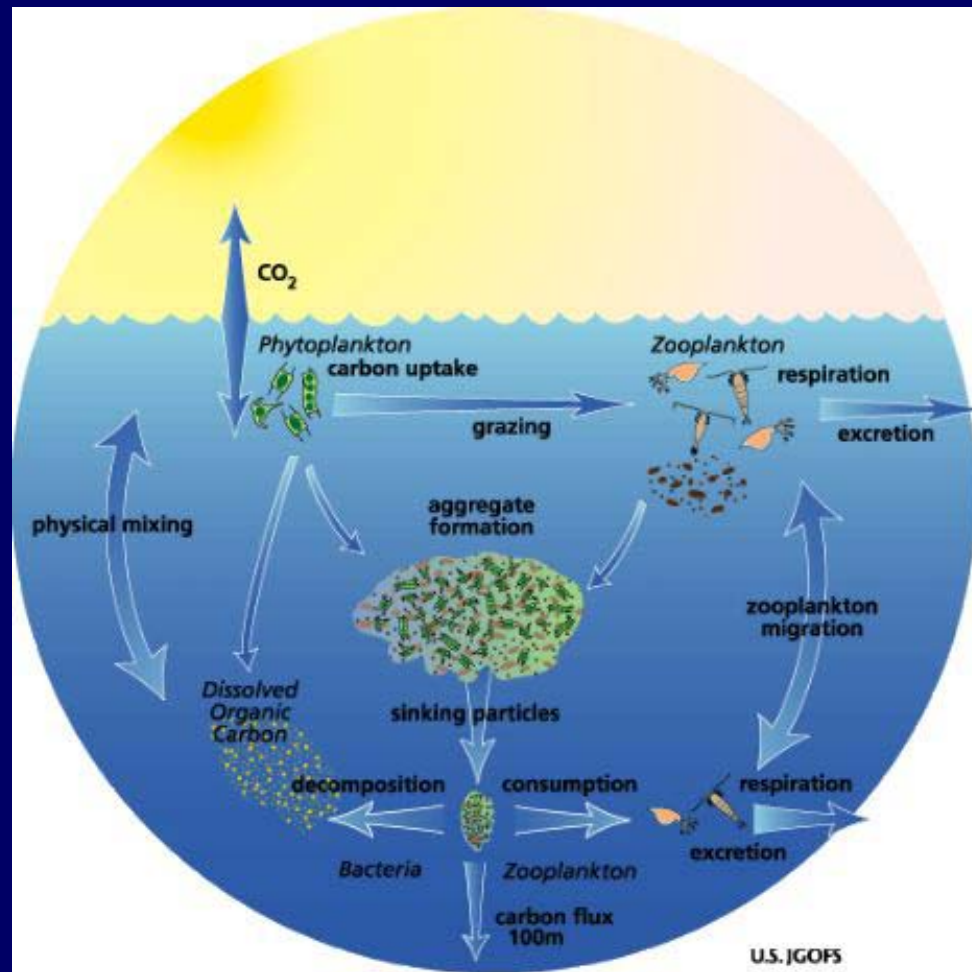


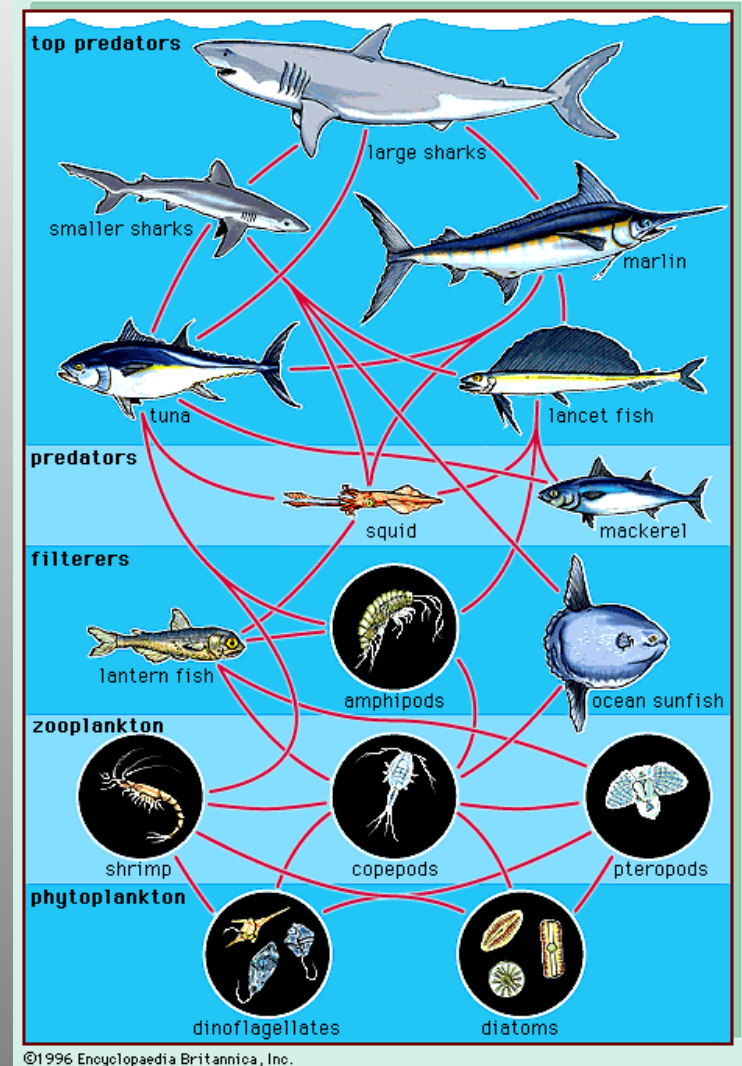
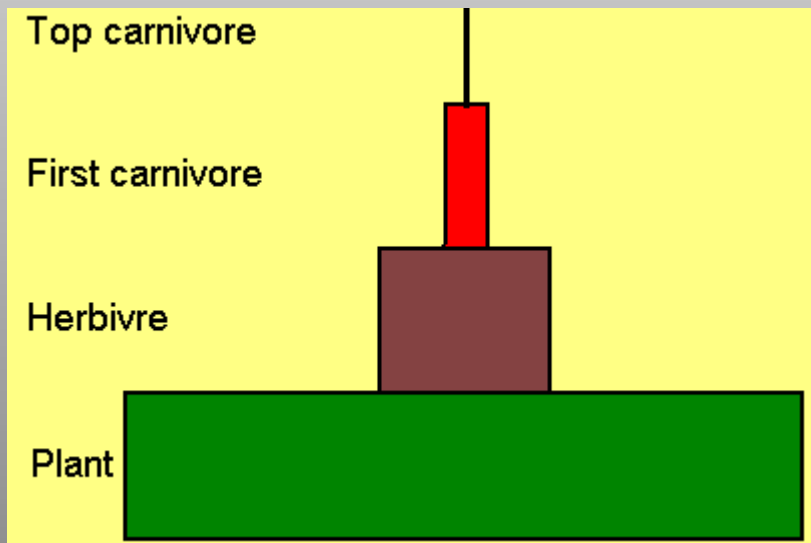
# Protok energije i kruženje tvari u moru

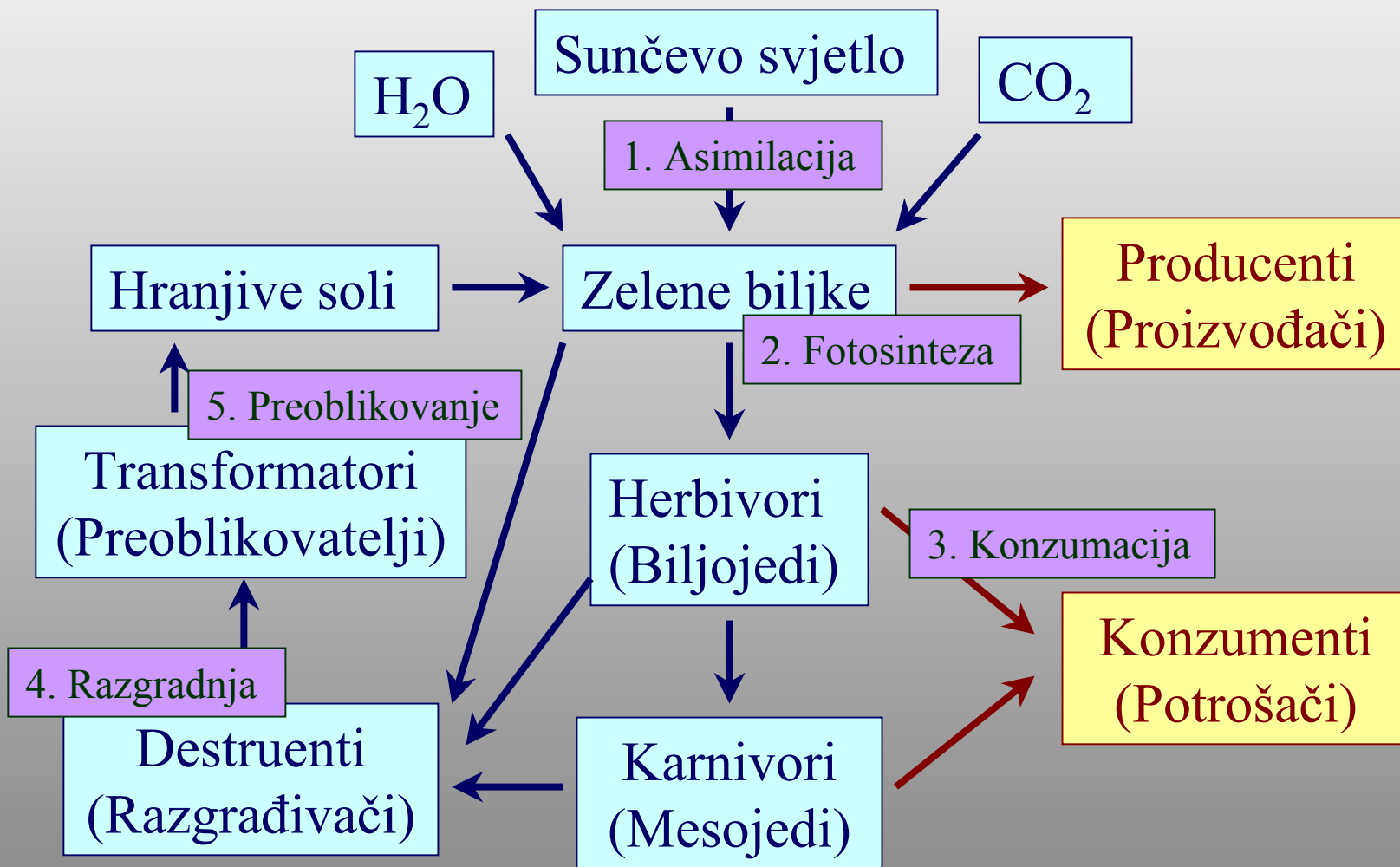


# **Protok energije i kruženje tvari u moru**

- 1. Trofičke razine u ekosistemu**
- 2. Proizvodnja i protok energije kroz ekosistem**
- 3. Kruženje tvari kroz ekosistem**
- 4. Regeneracija hranjiva u ekosistemu**

# TROFIČKE RAZINE U EKOSISTEMU





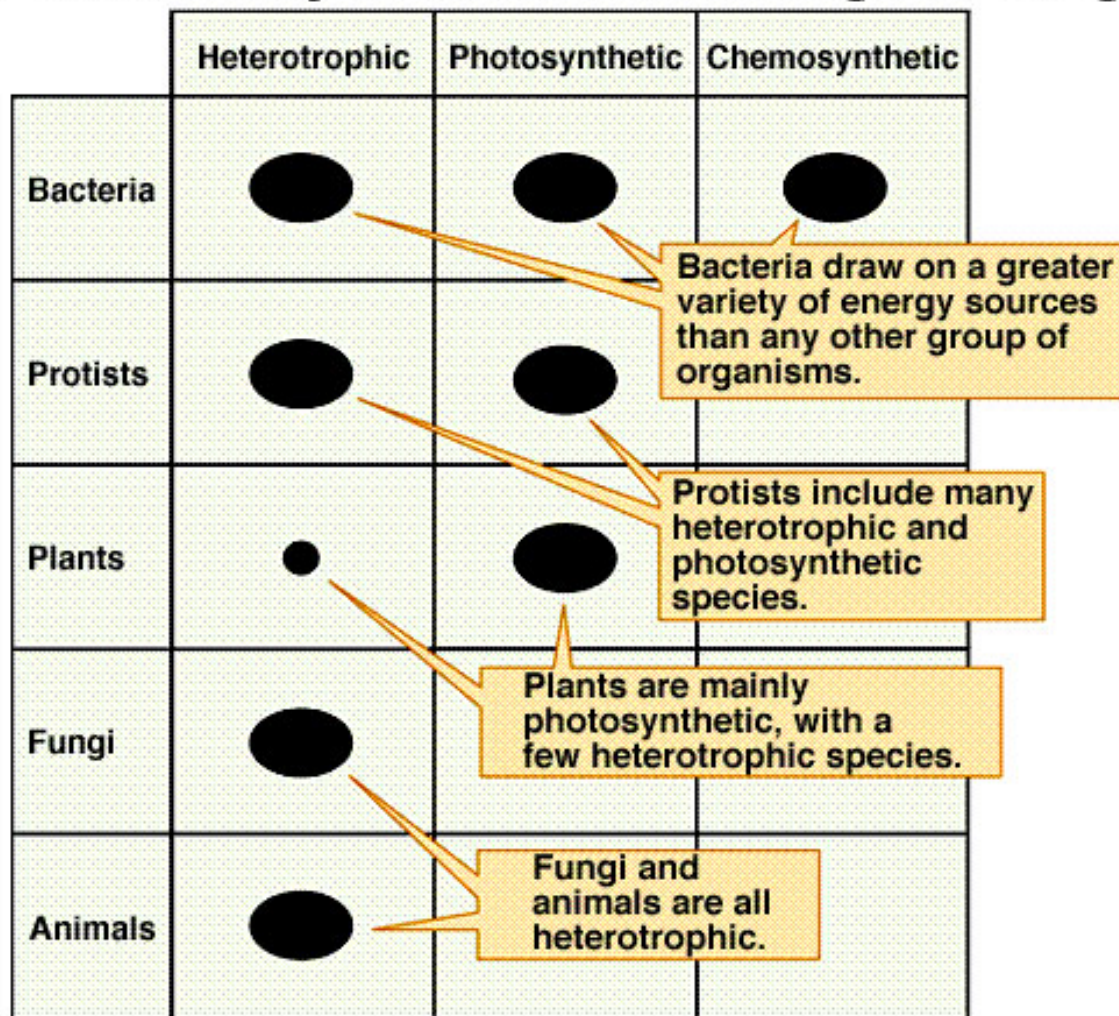
**TROFIČKE RAZINE I  
TEMELJNI PROCESI U  
EKOSISTEMU**

# Trofički (hranidbeni) status organizama

Osnovni načini ishrane (asimilacije ugljika) kod morskih organizama.

NAČIN ASIMILACIJE UGLJIKA	IZVOR UGLJIKA	IZVOR ENERGIJE	DONATOR ELEKT.	ORGANIZMI
<b>I AUTOTROFNI</b>				
<b>1. FOTOAUTOTROFI</b>	CO <sub>2</sub>	Svjetlo	H <sub>2</sub> O	Zelene biljke
<b>2. KEMOAUTOTROFI</b>	CO <sub>2</sub>	Oksidacija anorganskih supstrata	Anorganski spojevi (H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> , Fe <sup>2+</sup> , H <sub>2</sub> )	Bakterije
<b>II HETEROTROFNI</b>				
<b>3. OSMOTROFI</b>	DOM	Oksidacija organskih spojeva (Disimilacija)	Disimilacija	Bakterije
<b>4. FAGOTROFI</b>	POM	Disimilacija	Disimilacija	Životinje

## Trophic diversity across the biological kingdoms.



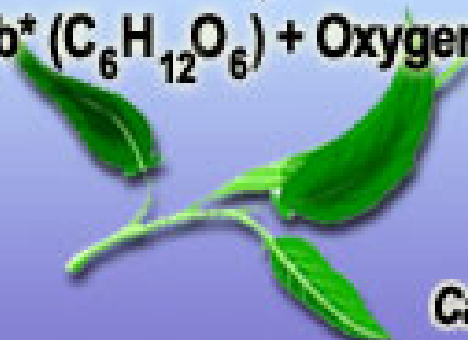
## FOTOSINTEZA

### SOLAR ENERGY & PHOTOSYNTHESIS

Carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) + Water ( $\text{H}_2\text{O}$ )



Carb\* ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ) + Oxygen ( $\text{O}_2$ )



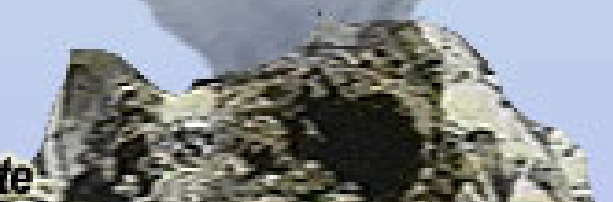
## KEMOSINTEZA

### HYDROTHERMAL ENERGY & CHEMOSYNTHESIS

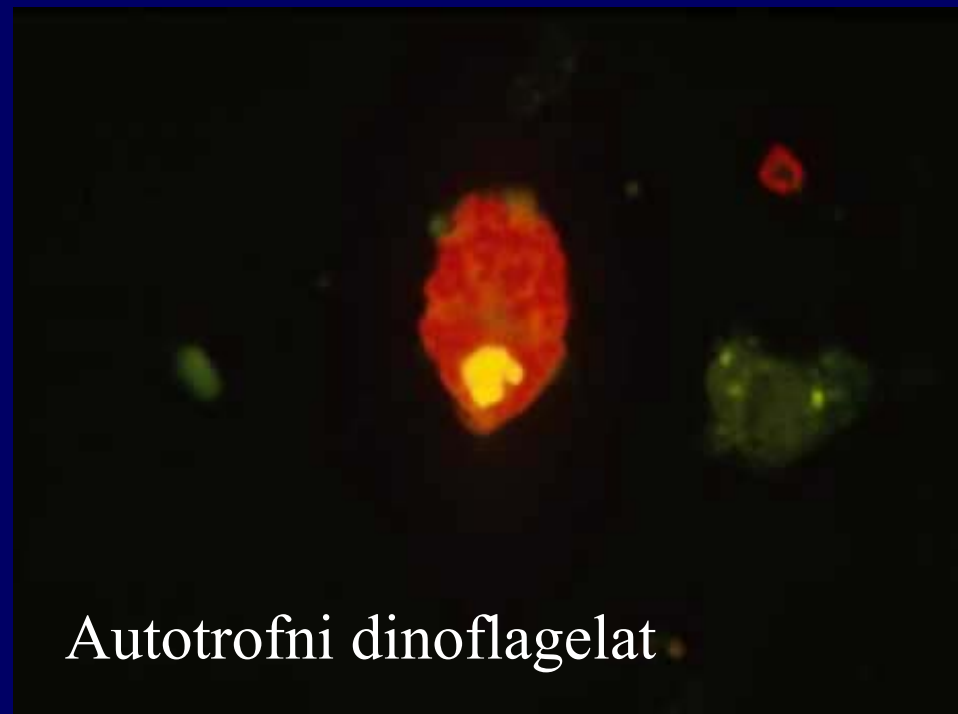
Carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) + Water ( $\text{H}_2\text{O}$ ) +  
Hydrogen Sulfide ( $\text{H}_2\text{S}$ ) + Oxygen ( $\text{O}_2$ )



Carb\* ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) + Sulphuric Acid ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )



Carb\* = Carbohydrate

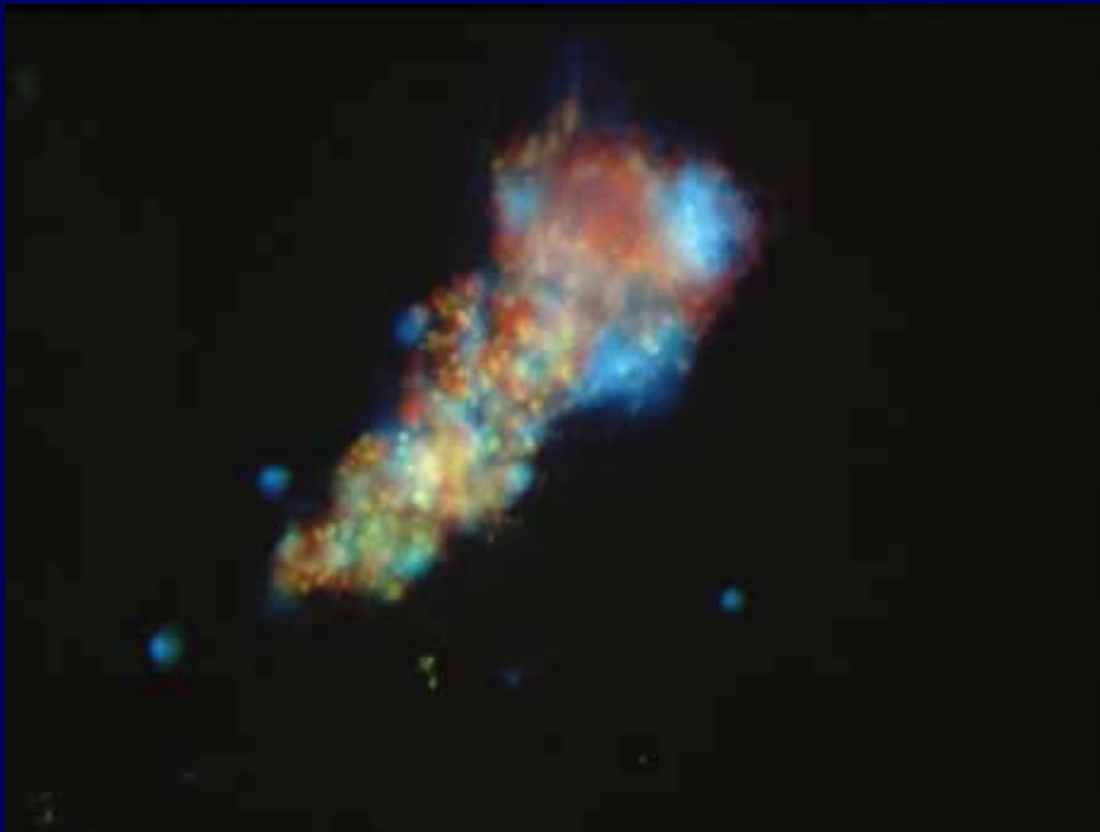


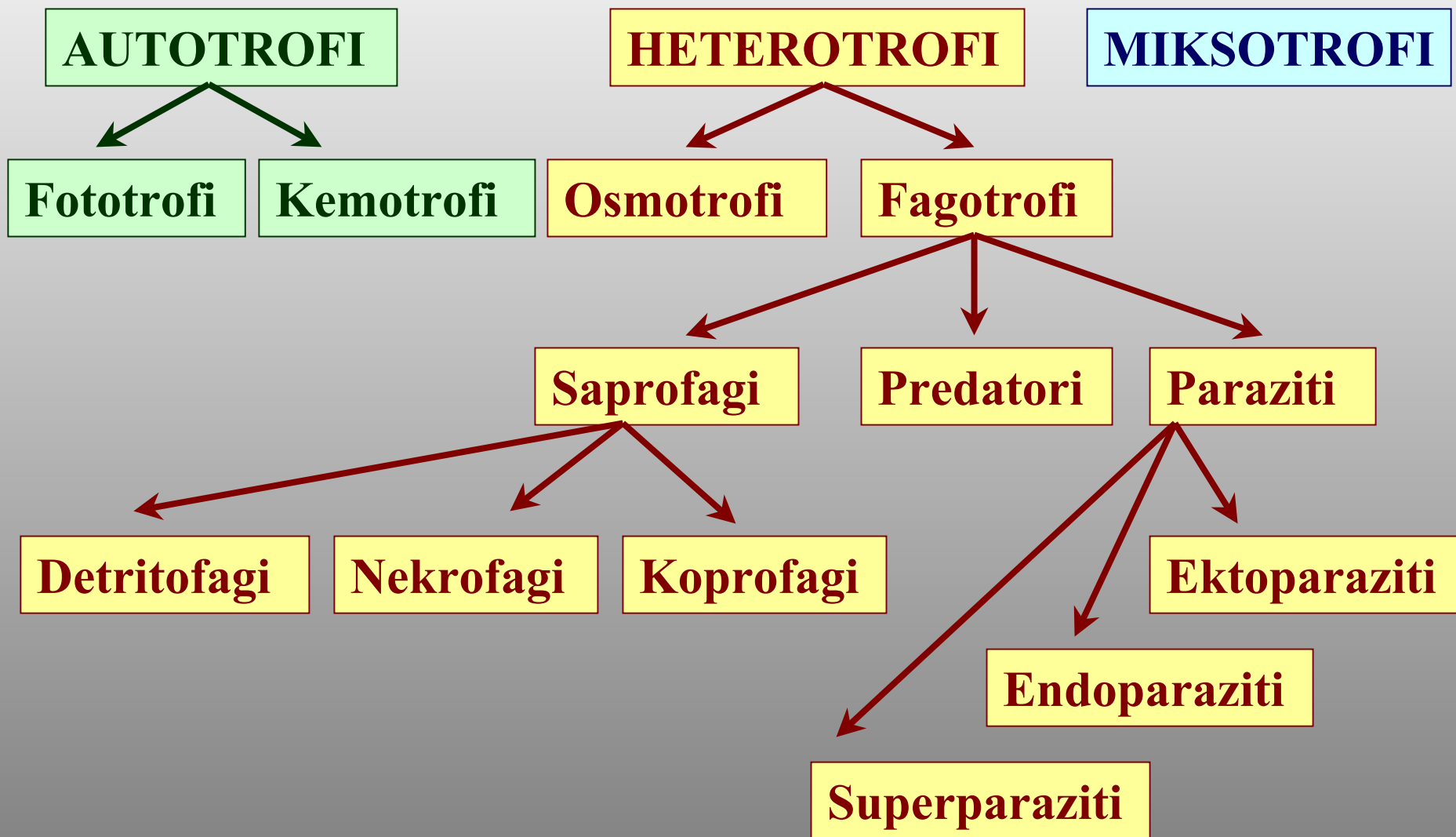


## Heterotrofni nanoflagelati

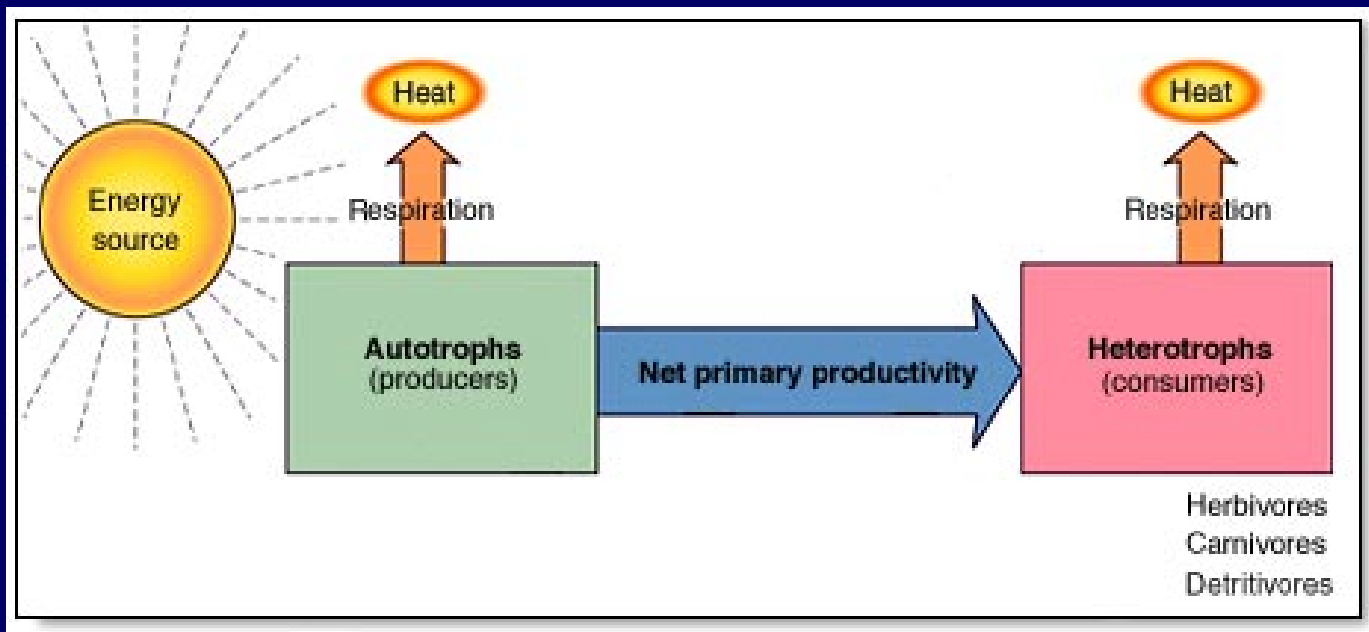


*Laboea strobila* - miksotrofni cilijat





# PROIZVODNJA I PROTOK ENERGIJE KROZ EKOSISTEM



# **Produktivnost ekosistema**

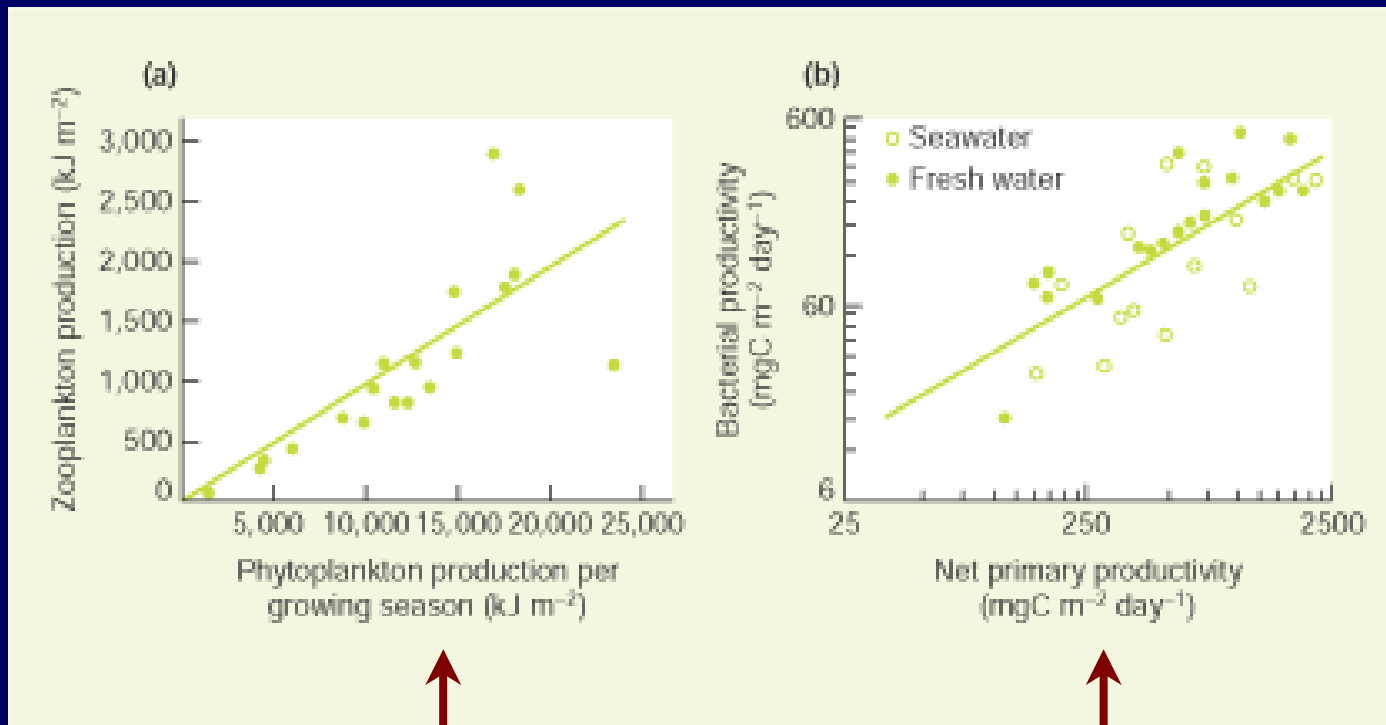
**PRIMARNI PRODUKTIVITET: Produktivitet na razini proizvođača (autotrofna proizvodnja)**

**SEKUNDARNI PRODUKTIVITET: Produktivitet na razini potrošača (heterotrofna proizvodnja)**

**NETO-AUTOTROFNI EKOSISTEM – Ekosistem u kojem je autotrofna proizvodnja veća od heterotrofne**

**NETO-HETEROTROFNI EKOSISTEM – Ekosistem u kojem je heterotrofna proizvodnja veća od autotrofne**

## Između primarne i sekundarne proizvodnje općenito postoji pozitivna korelacija

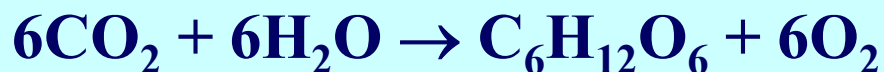


Fitoplanktonska proizvodnja :  
zoplanktonska proizvodnja

Primarna proizvodnja :  
bakterijska proizvodnja

# Primarna proizvodnja: **Fotosinteza**

Fotosinteza je proces pomoću kojega biljke hvataju energiju sunca i transformiraju je u energiju kemijskih veza u ugljikohidratima:



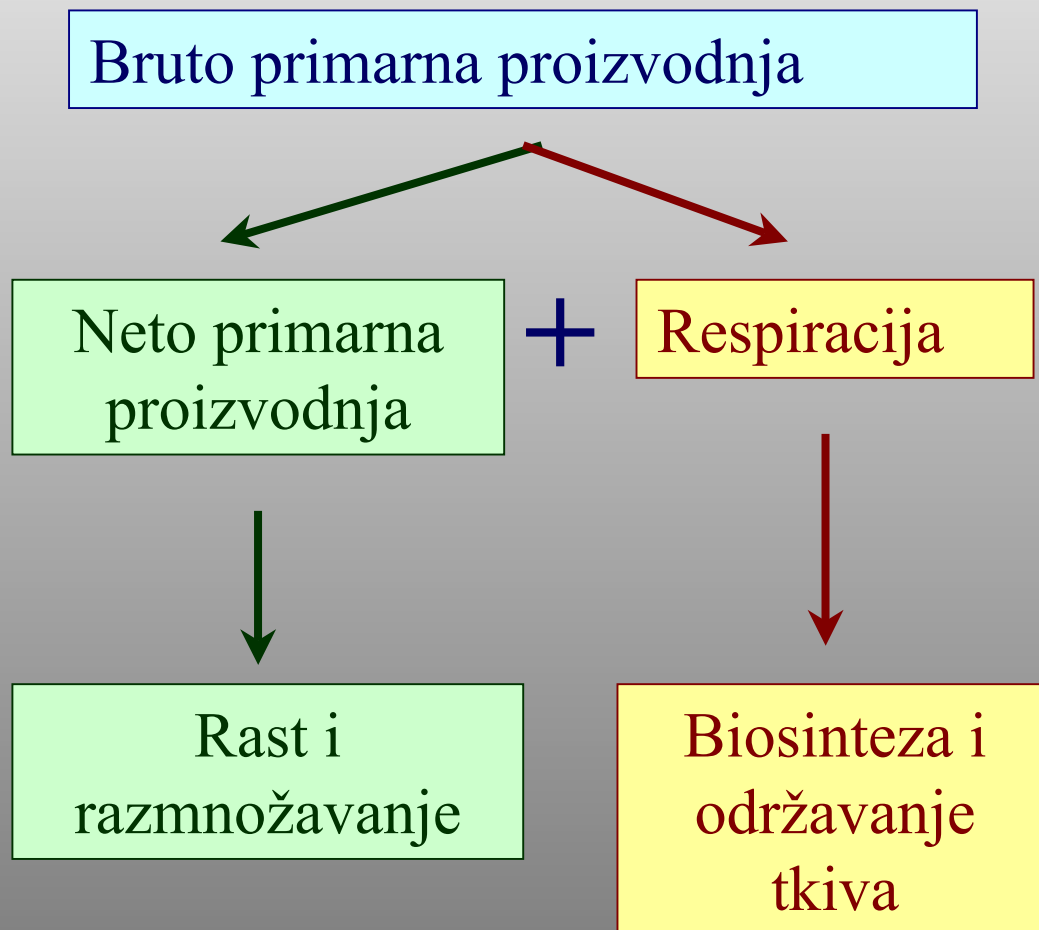
Fotosinteza transformira atom ugljika iz oksidiranog stanja ( $\text{CO}_2$ ) u reducirano (ugljikohidrat). Za taj je proces potrebna energija koju biljka dobiva od sunca.

Za svaki gram asimiliranog ugljika biljka pohranjuje 39 kJ energije.

Zbog neefikasnosti fotosinteze od ukupne energije koju apsorbiraju fotosintetski pigmenti, u molekule ugljikohidrata se ugradi najviše 34%, a često i znatno manje

Ukupna fiksacija energije na Zemlji kroz primarnu proizvodnju iznosi oko  $10^{17}$  kcal godišnje

# Primarna proizvodnja: Fotosinteza





# **FOTOSINTETSKI AKTIVNO ZRAČENJE**

**Od ukupnog sunčevog spektra na morskoj razini imamo:**

**45% - fotosintetski aktivno zračenje (PAR)**

**53% - infracrveno**

**2% - UV-zračenje**

# Primarna proizvodnja: Kemosinteza

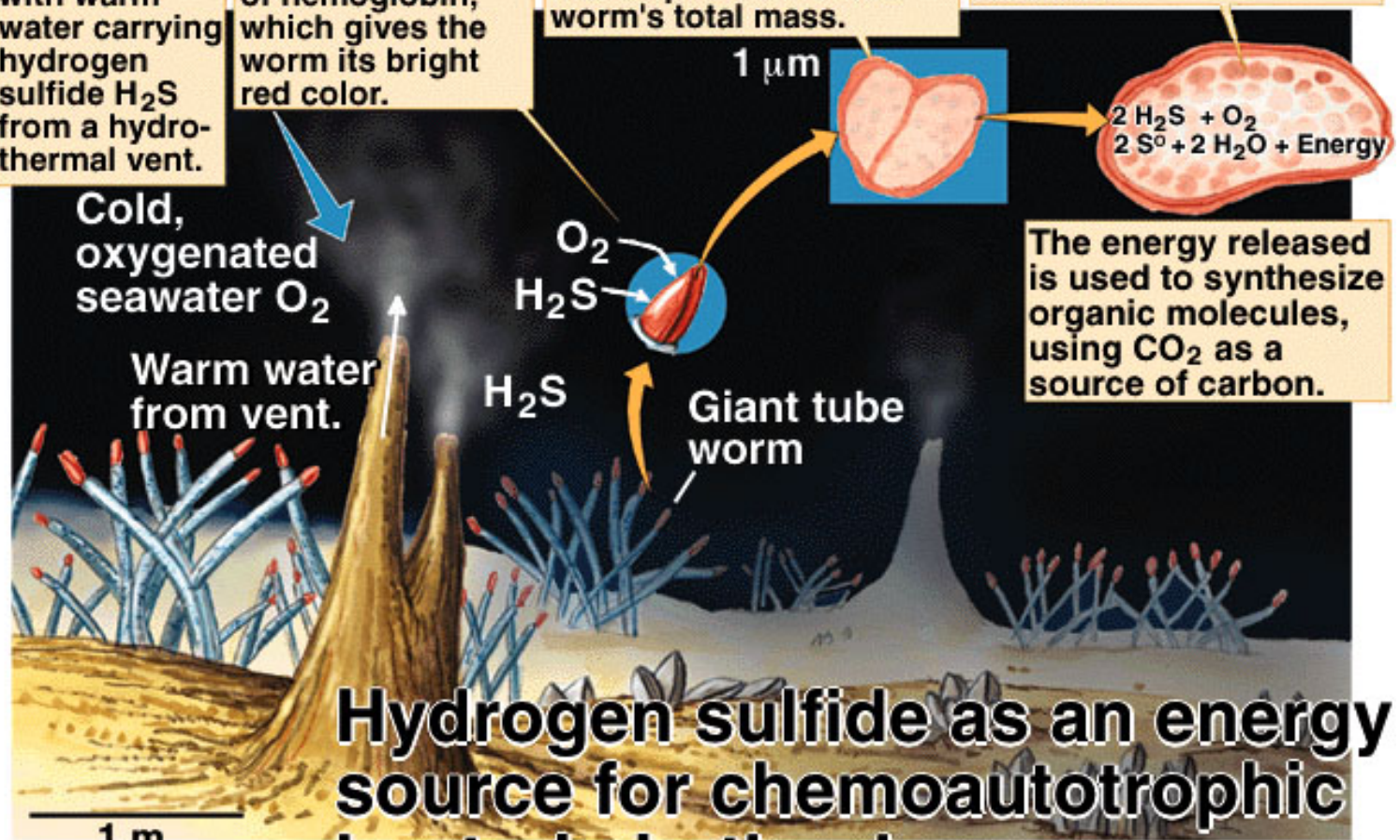
Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

Cold, oxygen-bearing seawater mixes with warm water carrying hydrogen sulfide  $H_2S$  from a hydrothermal vent.

A giant tube worm takes up  $O_2$  and  $H_2S$  with the aid of hemoglobin, which gives the worm its bright red color.

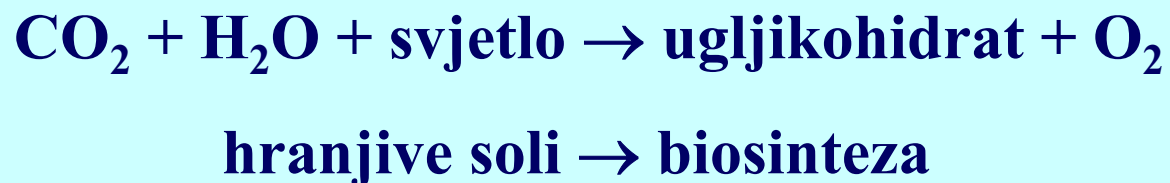
Chemoautotrophic sulfur-oxidizing bacteria in the tissues of the worm can make up to 60% of the worm's total mass.

Sulfur-oxidizing bacteria oxidize  $H_2S$  to elemental sulfur, an energy-yielding reaction.



Hydrogen sulfide as an energy source for chemoautotrophic bacteria in the deep sea.

# Metode mjerenja primarne proizvodnje

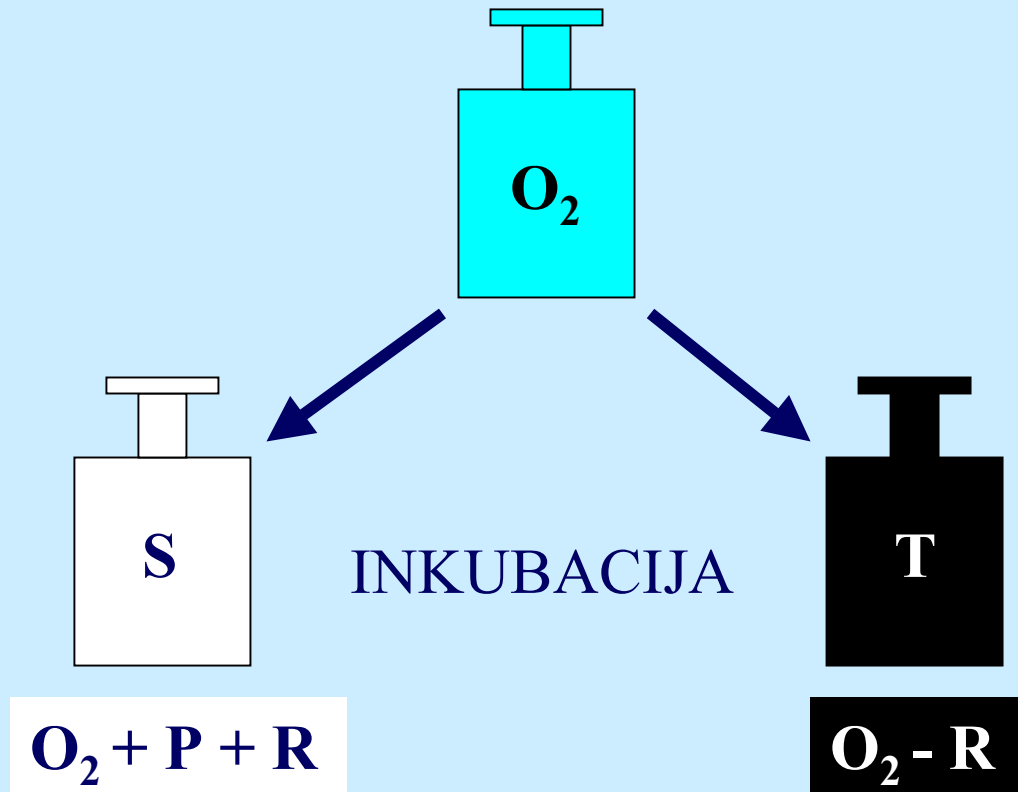


**Svaki od navedenih parametara s lijeve i desne strane kemijske reakcije može biti potencijalni parametar za procjenu primarne proizvodnje**

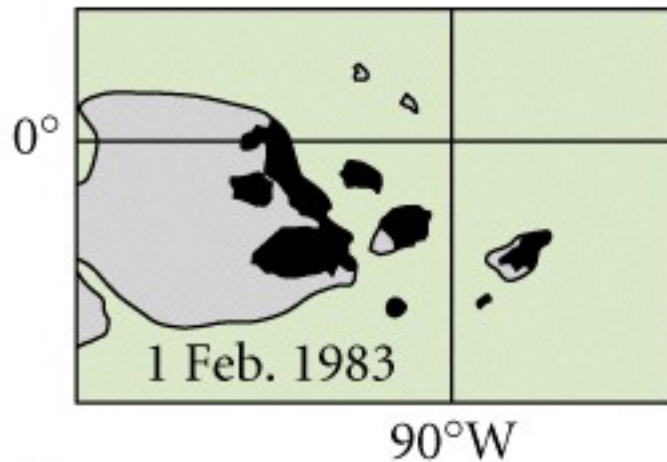
## Metode za mjerenje biljne proizvodnje variraju ovisno o staništu i formi rasta

Metoda	Kopnena staništa	Vodena staništa
Kalorimetrija	Koristi se	Ne koristi se
Porast biljne biomase (berba, žetva)	Česta metoda (neto proizvodnja iznad tla)	Rijetka u vodama (kelp)
Potrošnja CO <sub>2</sub>	Pogodna metoda zbog niske konc. CO <sub>2</sub>	Neprikladna metoda zbog visoke konc. CO <sub>2</sub>
Proizvodnja kisika	Neprikladna metoda zbog visoke konc. O <sub>2</sub>	Pogodna metoda zbog niske konc. O <sub>2</sub>
Radioaktivno obilježavanje ( <sup>14</sup> C)	Pogodna metoda ( <sup>14</sup> C-CO <sub>2</sub> )	Najvažnija metoda u vodama ( <sup>14</sup> C-HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )
Koncentracija klorofila (korištenje satelita)	Ne koristi se za kopno	Često se koristi (neprecizna, ali brza)

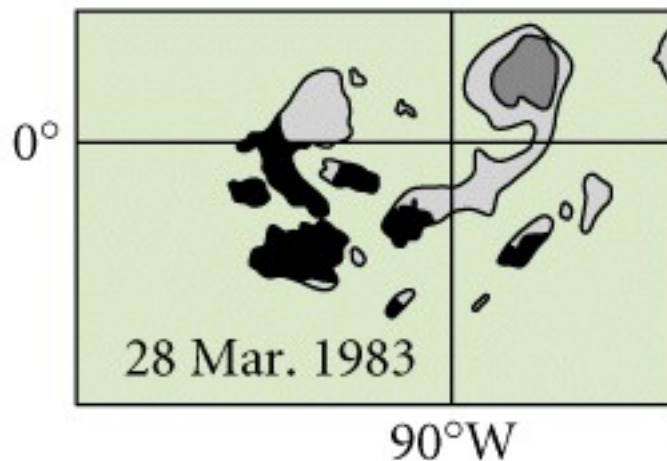
# Metoda proizvodnje kisika



$$S - T = (O_2 + P - R) - (O_2 - R) = P$$



(a)



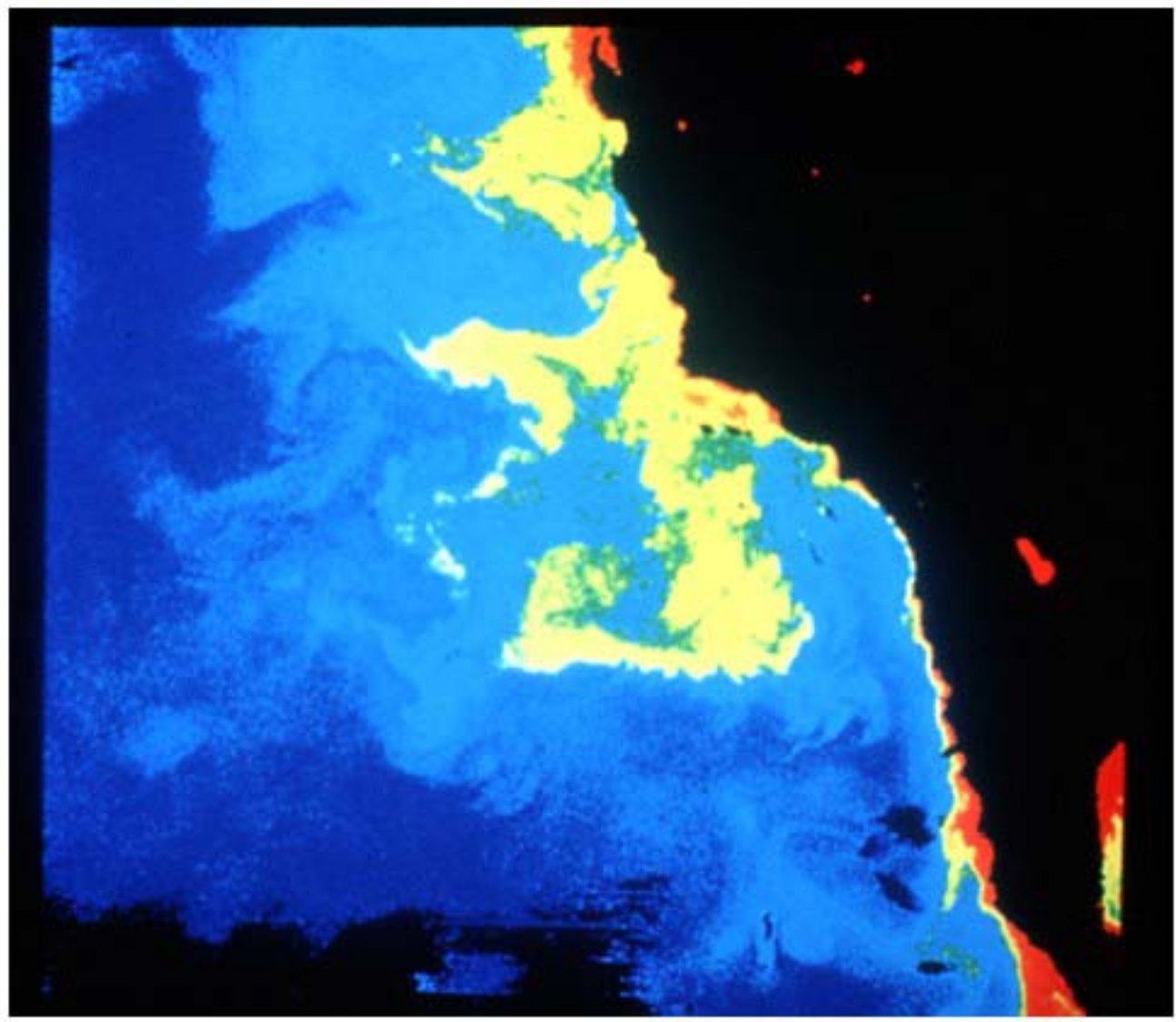
(b)

### **Metoda klorofila:**

Morske alge asimiliraju 3.7 grama ugljika po gramu klorofila po satu (ova vrijednost varira između 2.1 i 5.7)

Nedostatak preciznosti nadoknađuje brzina i jednostavnost, te mogućnost mapiranja produktivnosti površinskih voda na velikim područjima, te praćenje promjena na prostornoj i vremenskoj skali

## **Satelitska slika obale Kalifornije**



## **Faktori o kojima ovisi fotosinteza**

- Stopa fotosinteze ovisi o nizu ekoloških faktora od kojih su najvažniji: svjetlo, temperatura, CO<sub>2</sub>, voda i hranjive soli
- Faktori koji ograničavaju proizvodnju su različiti u kopnenim i vodenim staništima
  - Primarna proizvodnja na kopnu općenito je ograničena **temperaturom i vlažnošću**
  - Primarna proizvodnja u vodenim staništima općenito je ograničena **hranjivima**



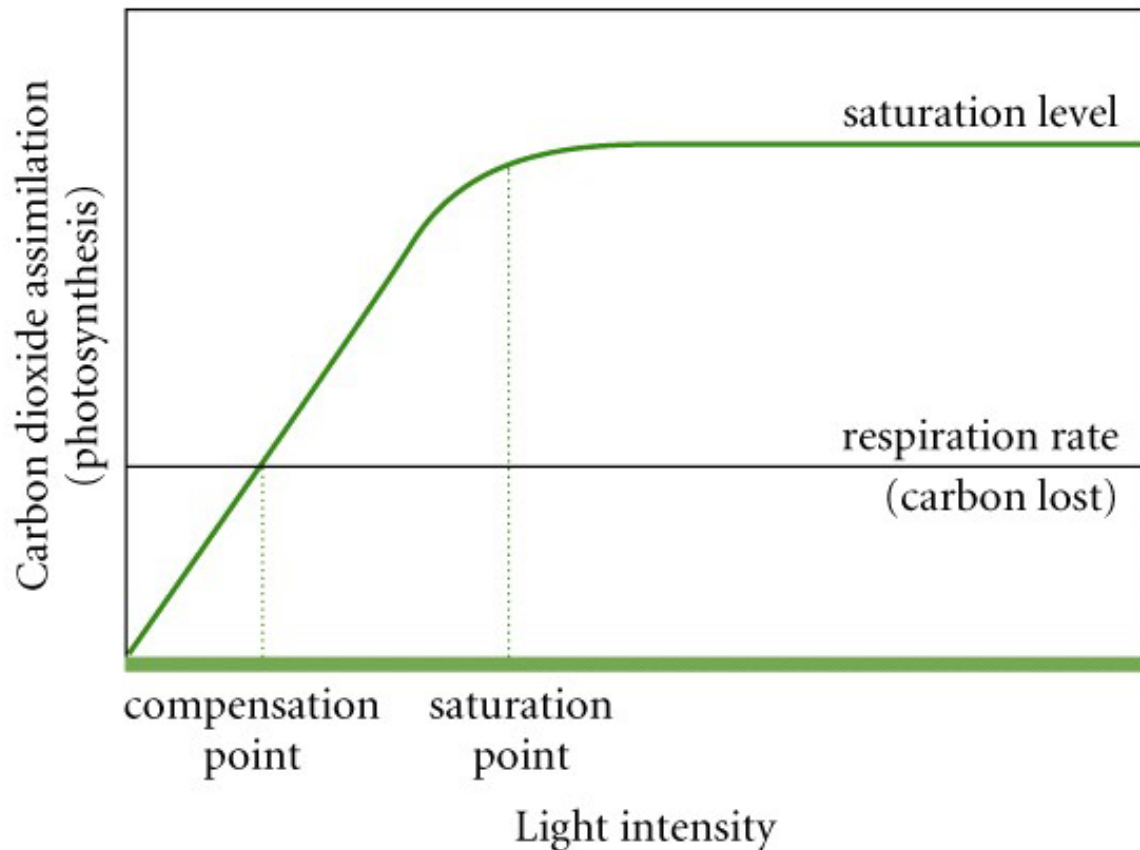
## Ovisnost stope fotosinteze o svjetlu

- Stopa fotosinteze varira u direktnoj proporciji s intezitetom svjetla do neke kritične razine (obično niže od  $\frac{1}{4}$  punog sunčevog svjetla)
- Daljnje povećanje inteziteta svjetla rezultira usporavanjem rasta stope fotosinteze, njenom stagnacijom ili čak opadanjem (štetno djelovanje)

Odgovor fotosinteze na intezitet svjetla ima dvije referentne točke:

**TOČKA KOMPENZACIJE (fotosinteza = respiracija)**

**TOČKA ZASIĆENJA**



# Efikasnost fotosinteze

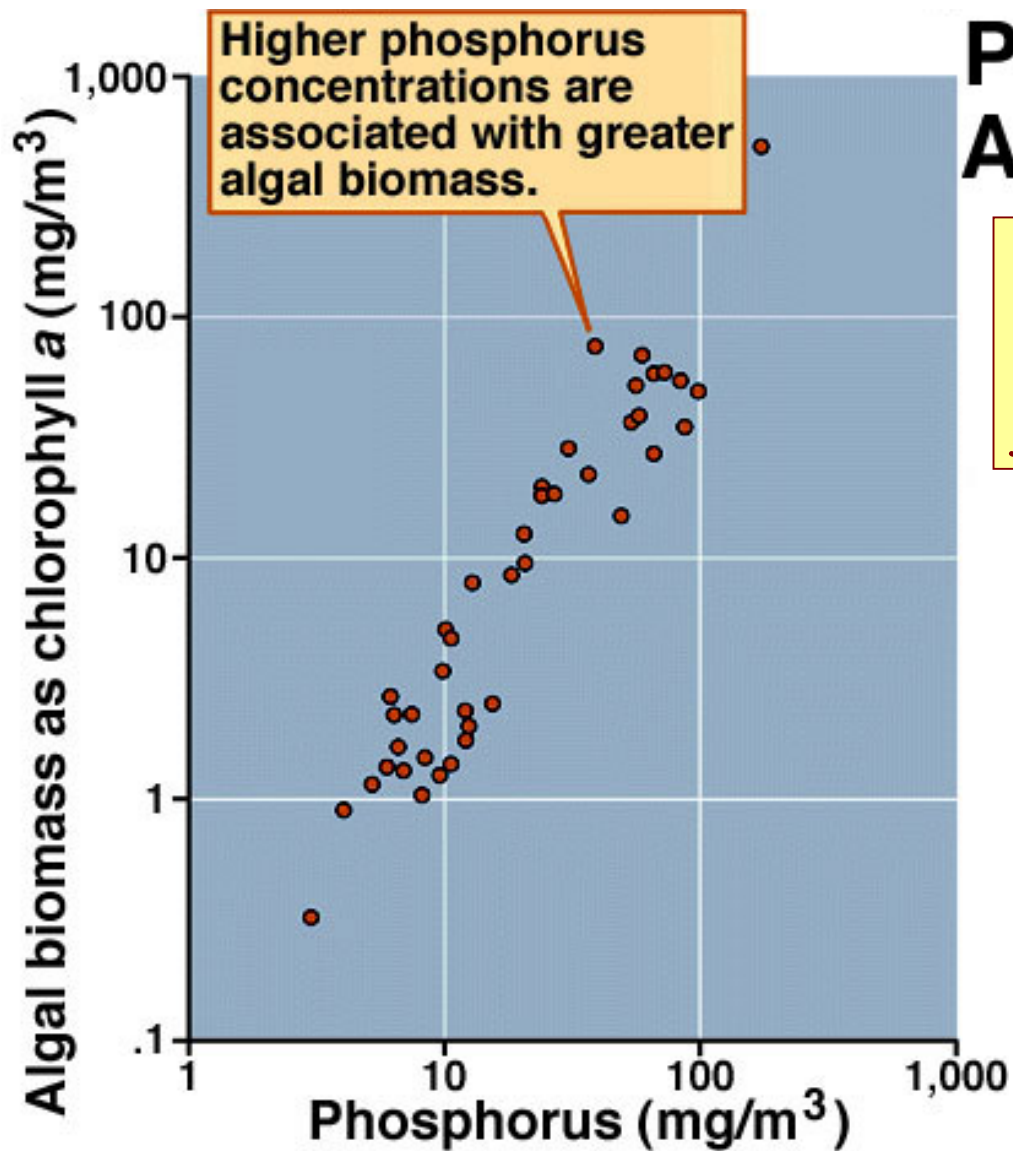
- **Efikasnost fotosinteze** je postotak od energije sunčevog svjetla koje padne na listove biljaka koji se pretvori u neto proizvodnju
- Efikasnost fotosinteze iznosi maksimalno **1-2%** (u uvjetima kada voda i hranjiva nisu ograničavajući), dok je prosječna efikasnost znatno manja:
  - ŠUMSKE ZAJEDNICE 0.91 %
  - MORSKE PLANKTONSKE ZAJEDNICE 0.066 %
  - PROSJEČNA EFIKASNOST NA ZEMLJI 0.27 %
- Od preostalih 98-99% energije se najveći dio reflektira (25-75%), a preostali dio apsorbiraju molekule koje nisu pigmenti i on se pretvara u toplinu (zrači se u okoliš ili se rasipa kroz proces evaporacije)

## **Primarna proizvodnja je u vodenim staništima ograničena na eufotički sloj**

- Primarna proizvodnja se u moru događa u relativno tankom površinskom sloju u kojem ima dovoljno svjetla (najviše do 200 m dubine)
- U priobalnim područjima točka kompenzacije može biti na znatno manjoj dubini (ispod 20 m)

## **Primarna proizvodnja je u vodenim staništima općenito određena raspoloživošću hranjivih soli**

- Pozitivan odnos između količine hranjivih soli i primarne proizvodnje u vodenim staništima jedan je od najbolje dokumentiranih obrazaca u biosferi
- Najčešće, u slatkovodnim ekosistemima primarnu proizvodnju ograničava fosfor, a u morskim ekosistemima dušik

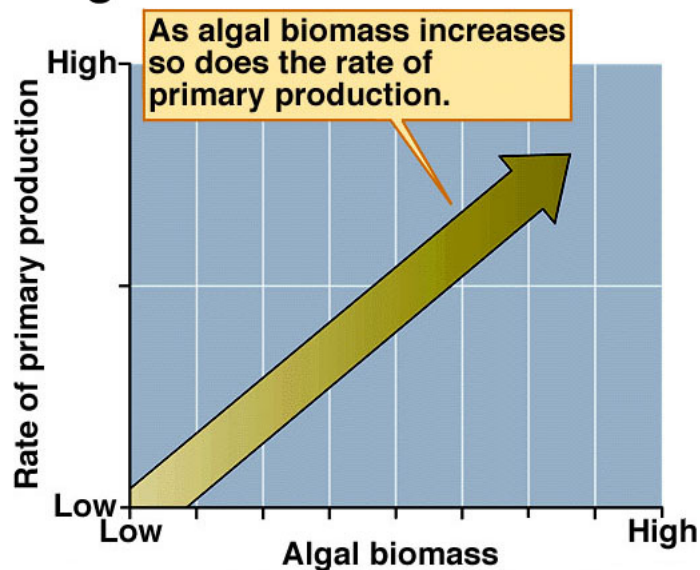


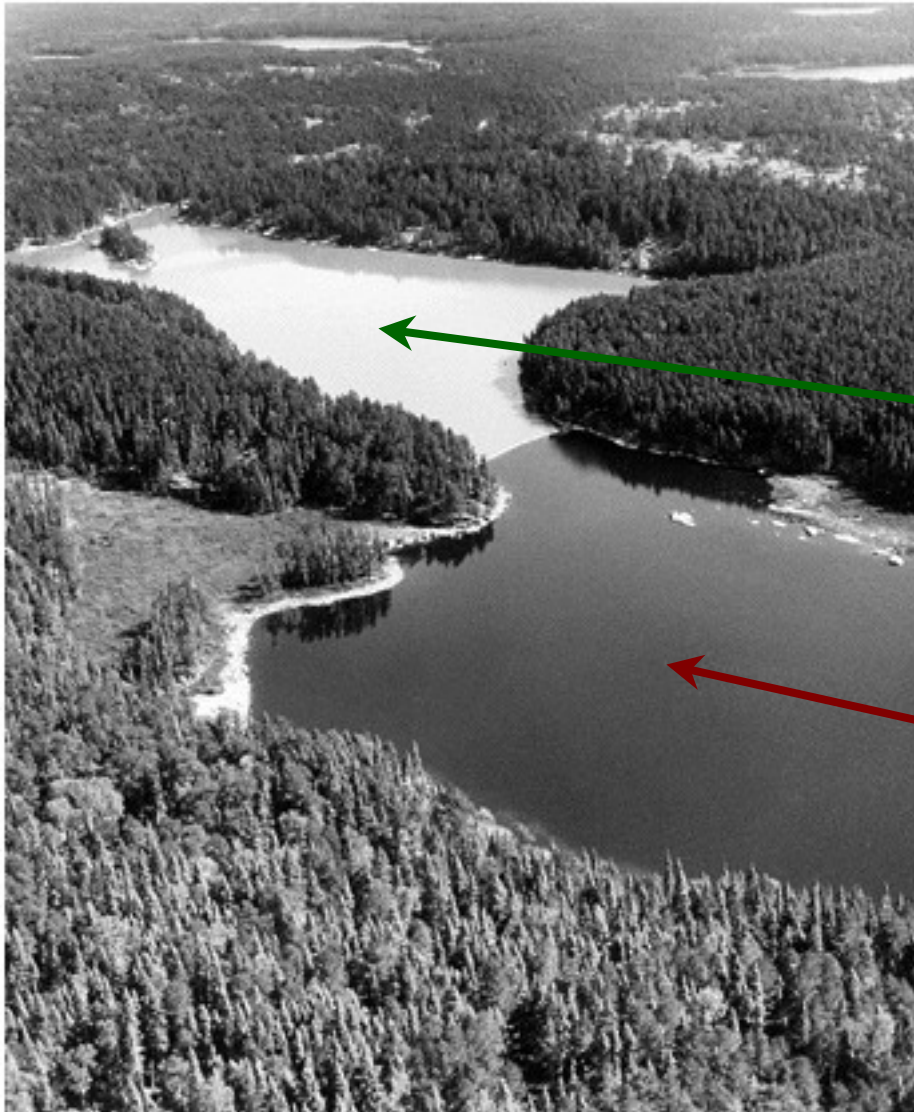
## Phosphorus & Algal Biomass

Utjecaj količine fosfora na primarnu proizvodnju u jezerima umjerenog područja

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

### Algal Biomass & Production



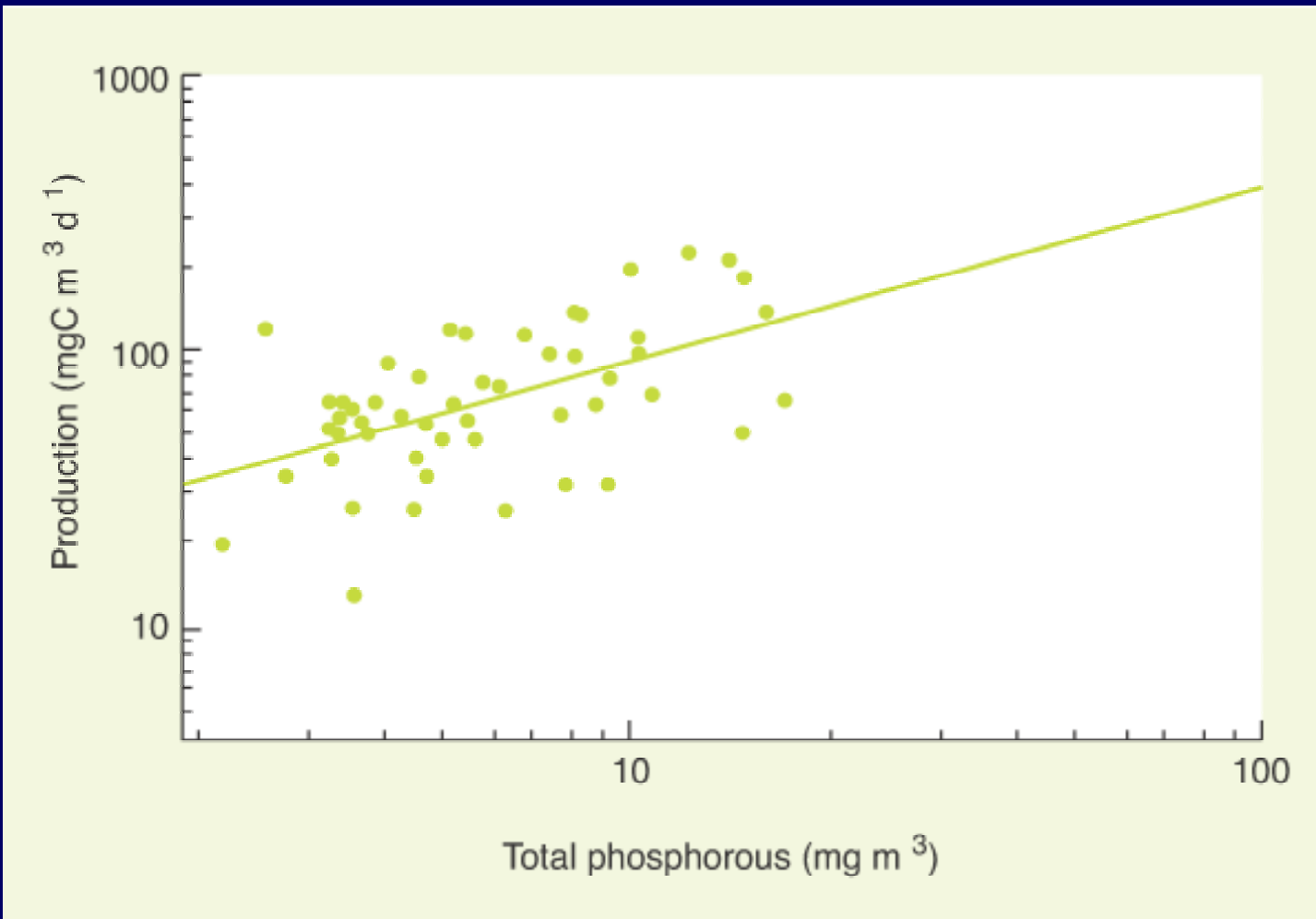


**Fosfor je ograničavajući faktor za proizvodnju u slatkovodnim ekosistemima**

Jezero fertilizirano fosforom (cvatnja je nastupila nakon 2 mjeseca)

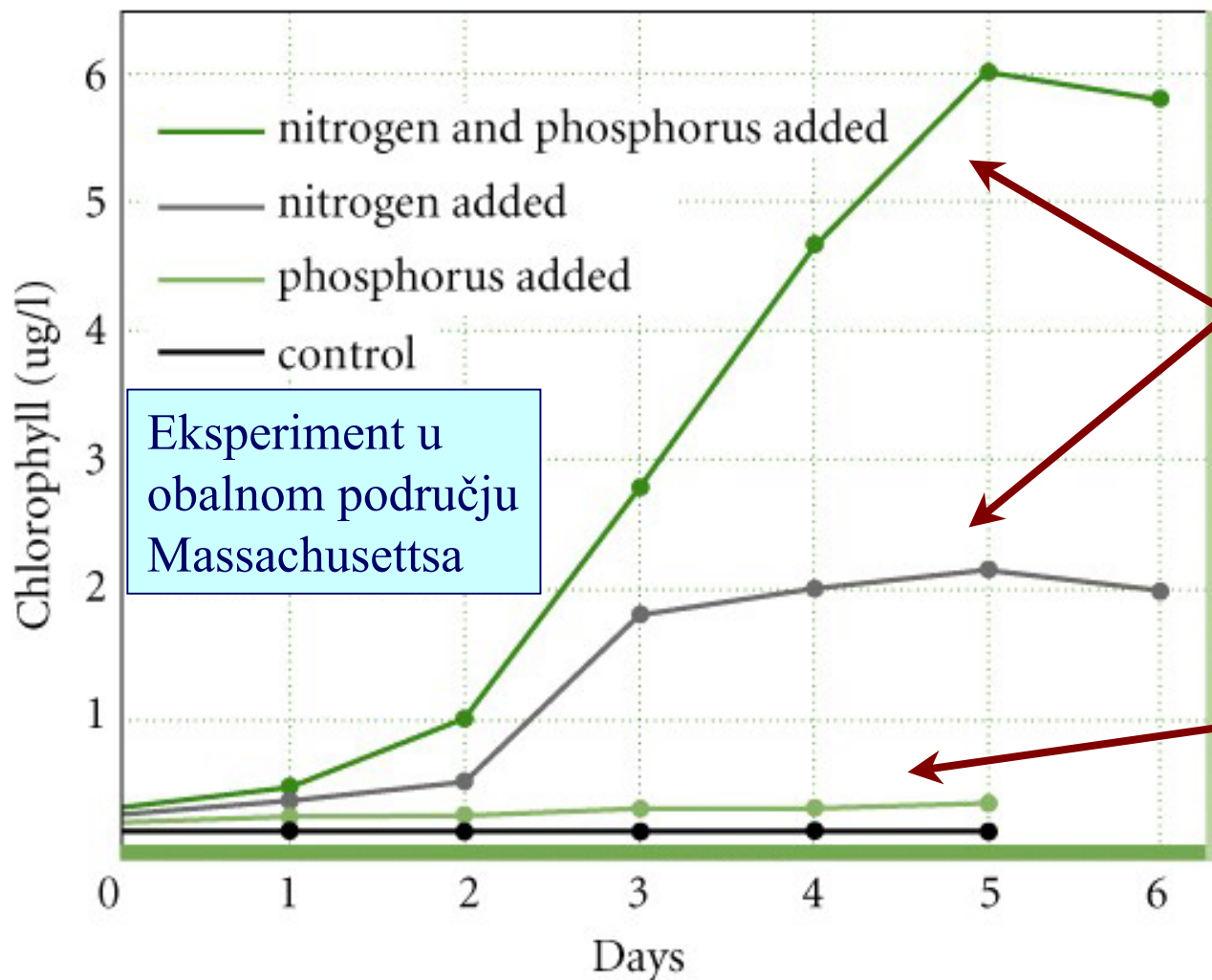
Jezero fertilizirano ugljikom i dušikom (nije bilo cvatnje)

## Utjecaj koncentracije fosfora na proizvodnju fitoplanktona u jezerima širom svijeta





**Dušik je ograničavajući faktor za proizvodnju u morskim ekosistemima**



Eksperiment u obalnom području Massachusettsa

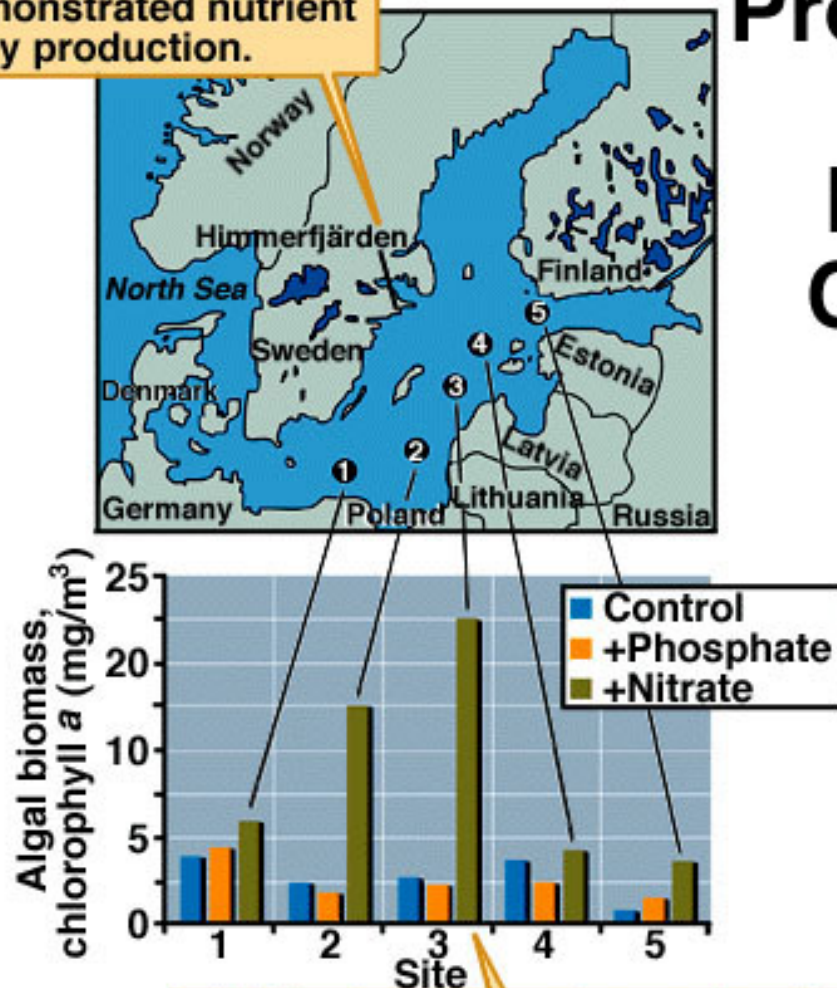
Utjecaj dodatka dušika ili dušika i fosfora zajedno povećavaju proizvodnju u moru

Dodatak samo fosfora nije utjecao na proizvodnju

A large-scale manipulation of Himmerfjärden demonstrated nutrient limitation of primary production.

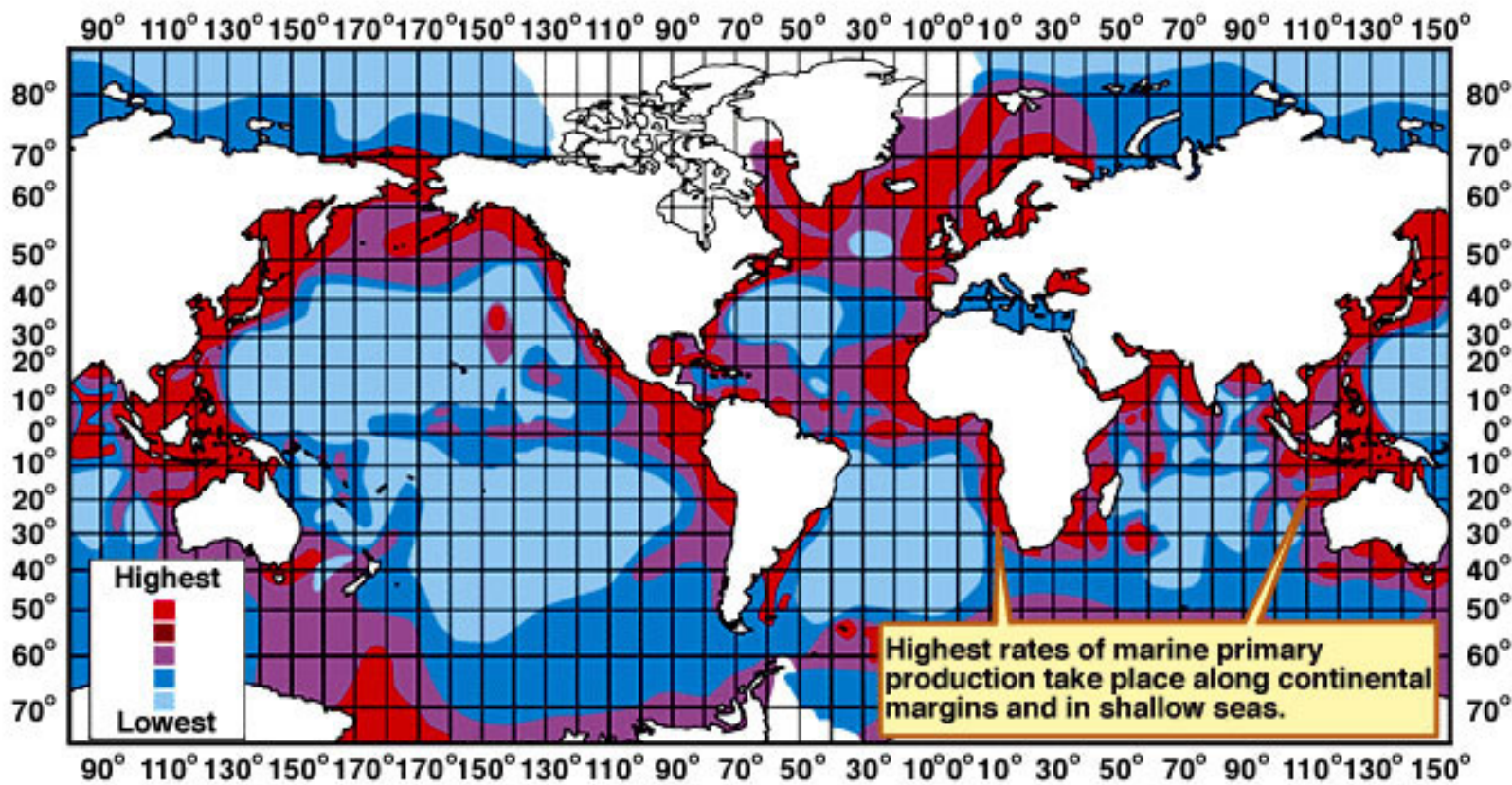
# Production & Nitrate Control

Eksperiment fertilizacije morske vode pokazao je da je primarna proizvodnja u Baltičkom moru ograničena dušikom



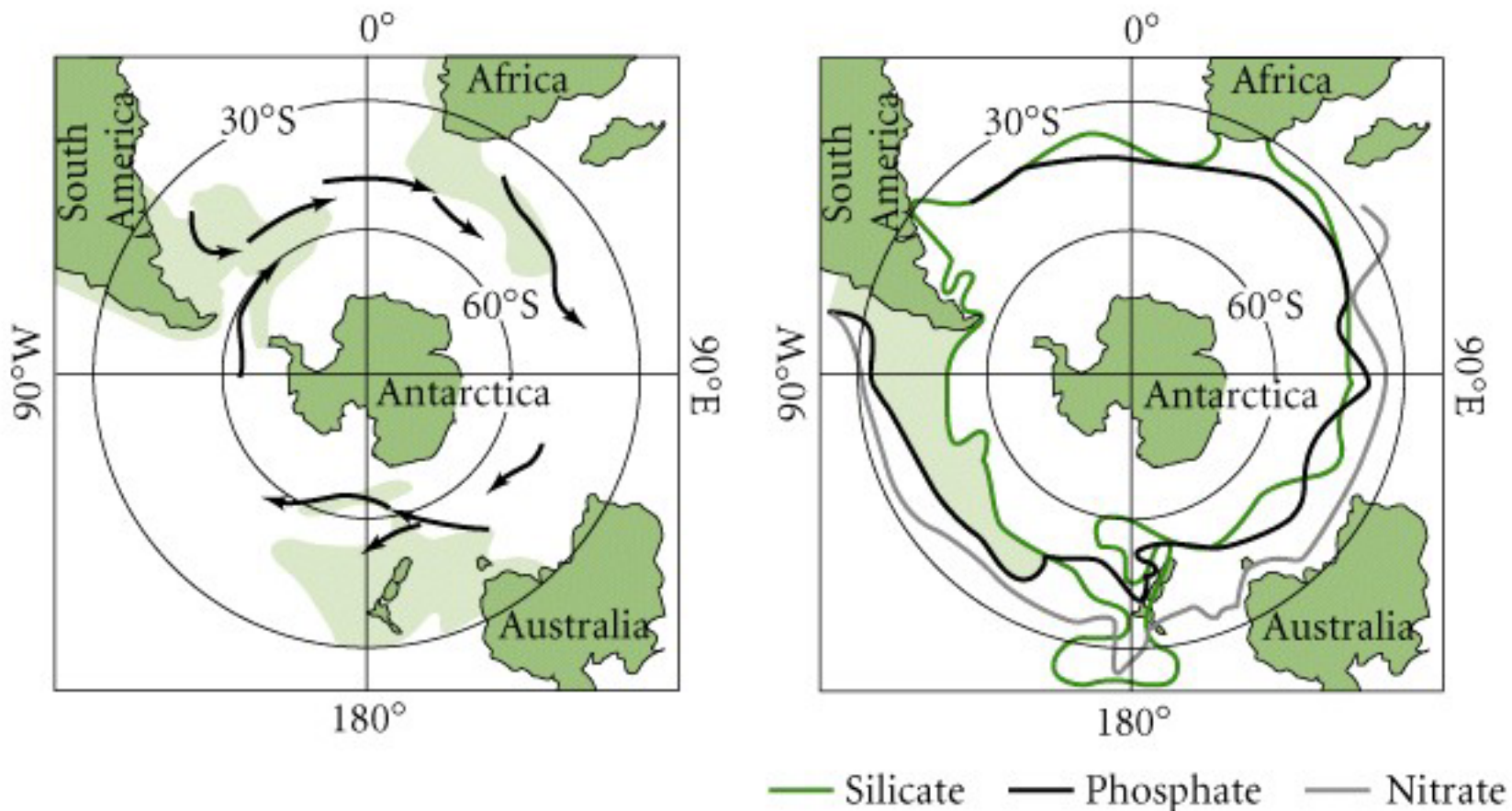
Nutrient enrichment experiments conducted in culture flasks showed that nitrate limits primary production across the Baltic Sea.

## Raspodjela primarne proizvodnje u moru

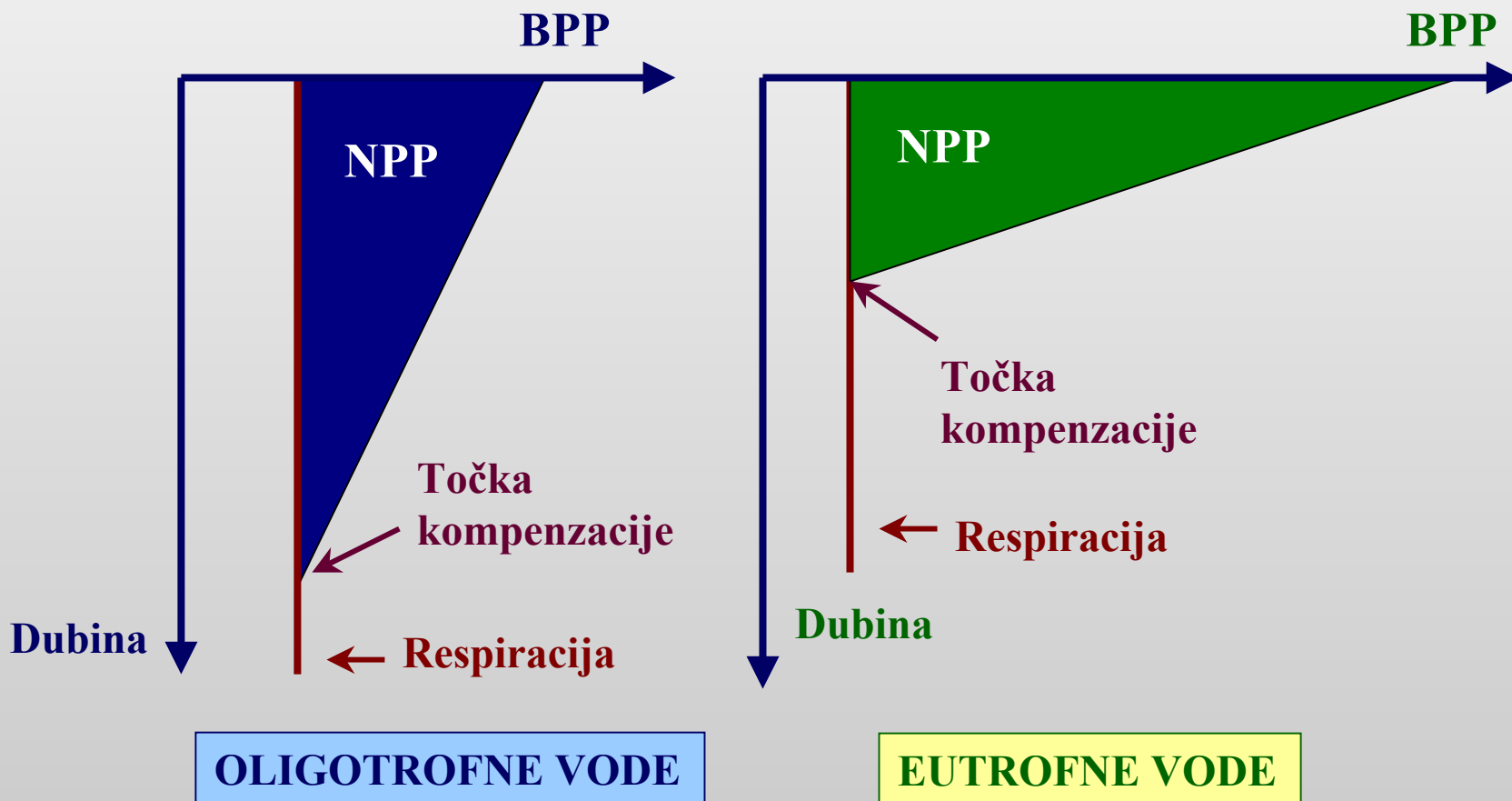


# M. Šolić: Ekologija mora

Preko 20% otvorenih oceana ima dovoljne koncentracije dušika i fosfora, ali je gustoća fitoplanktona unatoč tome vrlo niska (**HNLC područja: high-nutrient low-chlorophyll**). U ovim je područjima proizvodnja ograničena drugim hranjivima kao što je silicij ili željezo



Koncentracija hranjiva i debljina eufotičkog sloja su u pravilu obrnuto proporcionalni



## Usporedba primarne proizvodnje u različitim kopnenim i vodenim ekosistemima

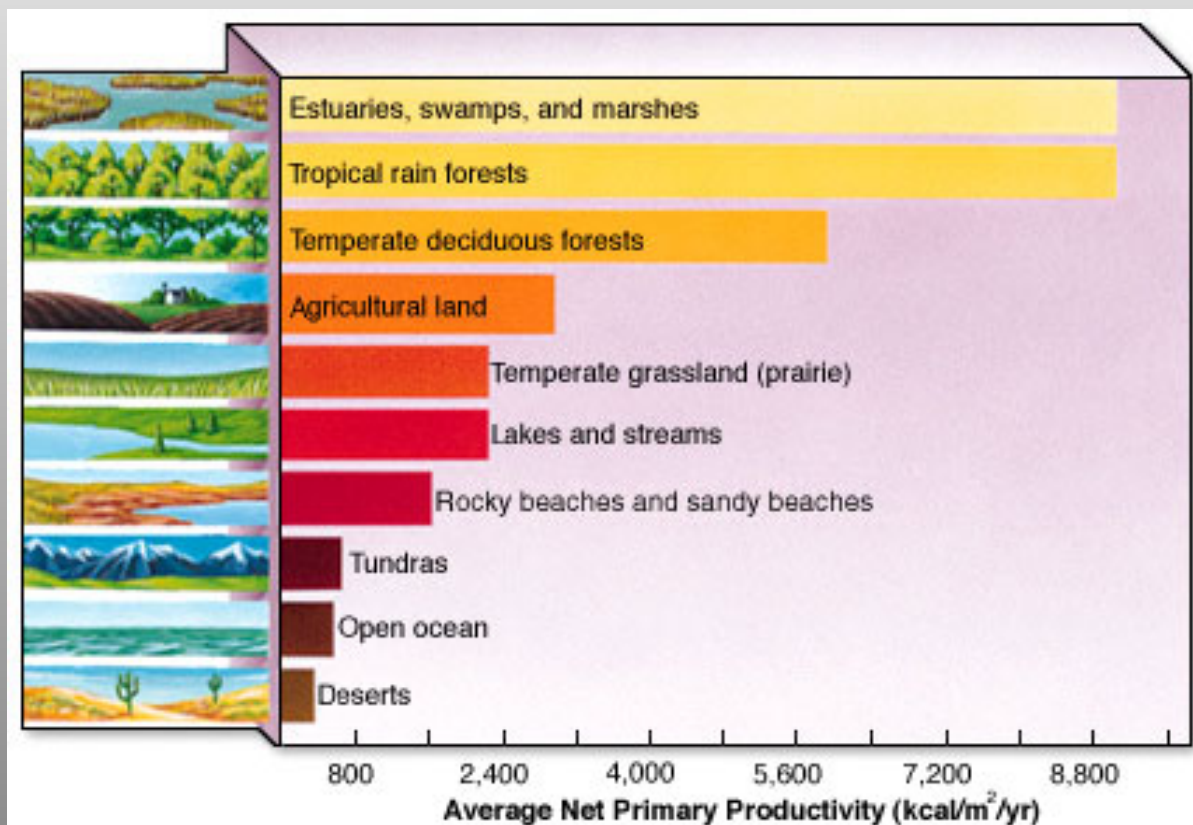
- Proizvodnja otvorenih oceana je usporediva s pustinjama na kopnu i iznosi 1/10 ili manje u odnosu na primarnu proizvodnju šuma umjerenih područja (plava boja oceana je boja siromaštva)
- Najproduktivnija morska staništa su estuarska područja, slane močvare i područja upwellinga, gdje j proizvodnja usporediva s najproduktivnijim kopnenim staništima (npr. tropske kišne šume)
- Primarna proizvodnja u slatkim vodama usporediva je s morskim staništima, a najveća je u rijekama, plitkim jezerima i barama, a najmanja u čistim potocima i dubokim jezerima

**TABLE 10-2** Average net primary production and related dimensions of the earth's major ecosystem types

Ecosystem	Net primary production (g m <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )	Biomass (kg m <sup>-2</sup> )	Chlorophyll (g m <sup>-2</sup> )	Leaf surface area (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	Biomass accumulation ratio (yr)
<b>Terrestrial</b>					
Tropical forest	1,800	42	2.8	7	23
Temperate forest	1,250	32	2.6	8	26
Boreal forest	800	20	3.0	12	25
Shrubland	600	6	1.6	4	10
Savanna	700	4	1.5	4	6
Temperate grassland	500	1.5	1.3	4	3
Tundra and alpine	140	0.6	0.5	2	4
Desert scrub	70	0.7	0.5	1	10
Cultivated land	650	1	1.5	4	1.5
Swamp and marsh	2,500	15	3.0	7	6
<b>Aquatic</b>					
Open ocean	125	0.003	0.03	—	0.02
Continental shelf	360	0.01	0.2	—	0.03
Algal beds and reefs	2,000	2	2.0	—	1.00
Estuaries	1,800	1	1.0	—	0.56
Lakes and streams	500	0.02	0.2	—	0.04

(From Whittaker and Likens 1973.)

## Proizvodnja nekih važnijih ekosistema na Zemlji



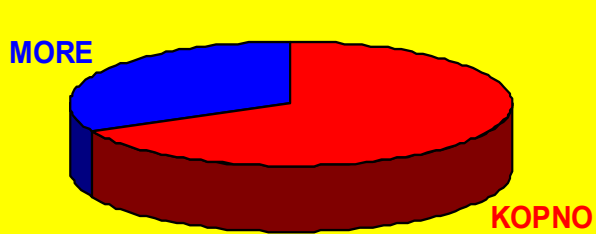


## **Sekundarna proizvodnja – Proizvodnja konzumenata (potrošača): herbivori, karnivori, detrivori**

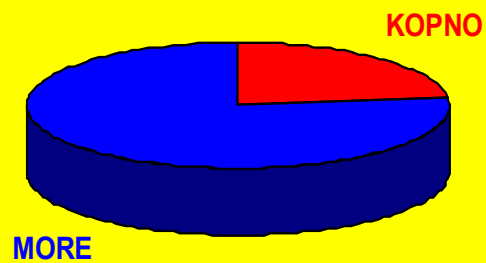
- Heterotrofni organizmi koriste organske molekule i kao izvor energije i kao izvor ugljika, te u potpunosti ovise o ugljiku i energiji koju su fiksirali autotrofi
- Heterotrofi uključuju tri glavne skupine organizama:
  - HERBIVORI – organizmi koji jedu biljke
  - KARNIVORI – organizmi koji jedu životinje
  - DETRIVORI – organizmi koji jedu neživu organsku tvar (većinom ostatke biljaka)
- Ove tri skupine heterotrofa imaju bitno različite trofičke (hranidbene) probleme

# Produktivnost mora i kopna: Usporedba

**Primarna proizvodnja (NPP)**  
1:2 (1:5)



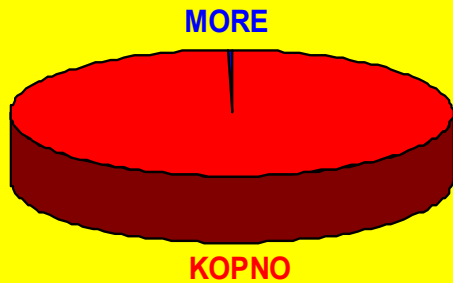
**Proizvodnja herbivora**  
3:1



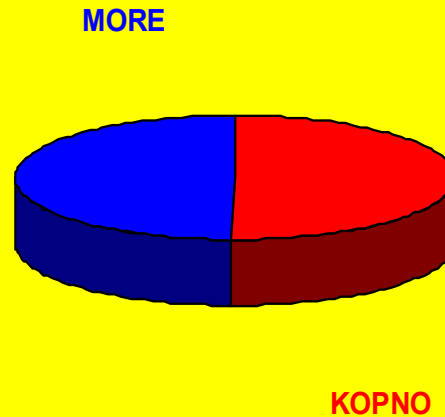
**Detrivorna proizvodnja (DP)**  
1:9



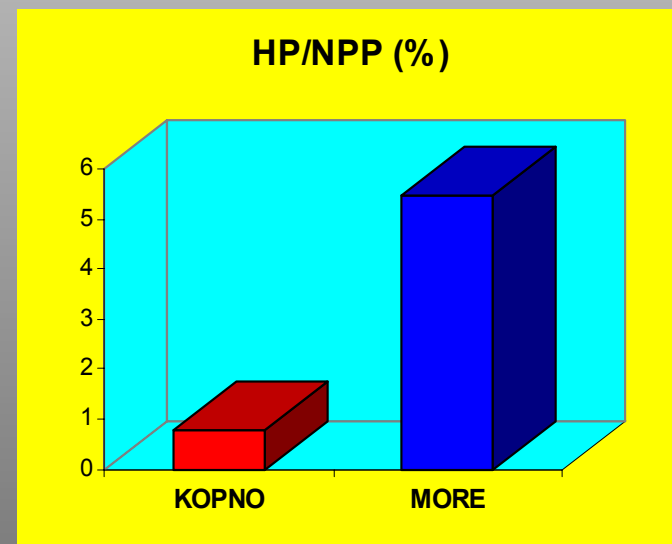
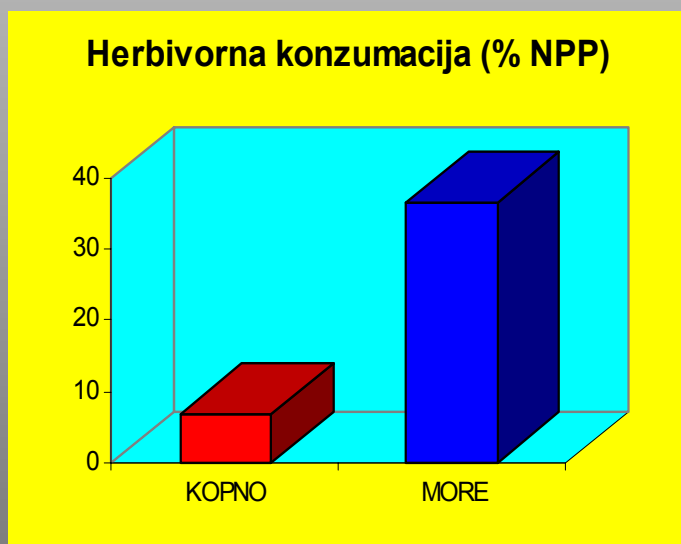
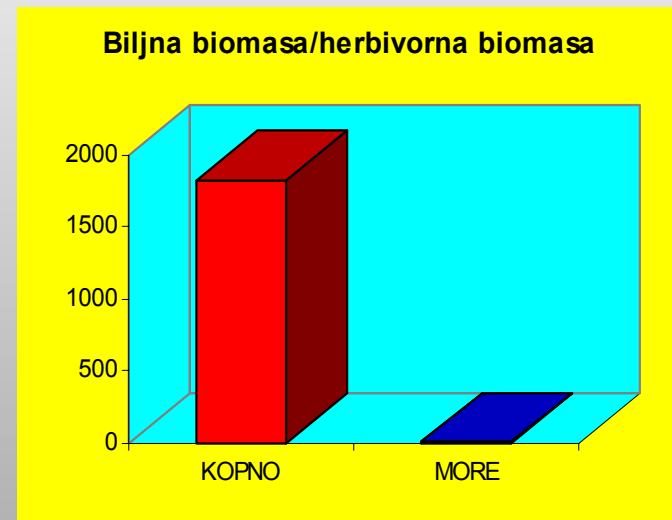
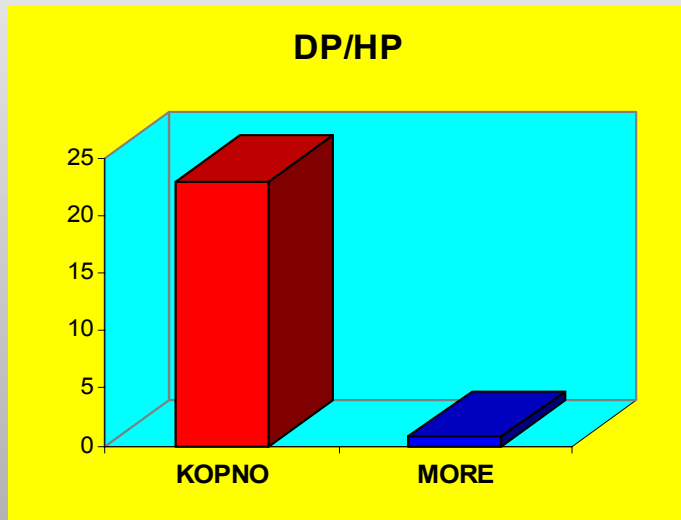
**Biljna biomasa**  
1:500 (1:1200)



**Biomasa herbivora**  
1:1



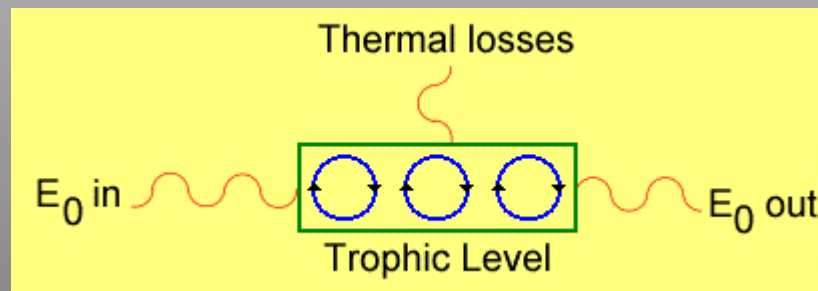
## Produktivnost mora i kopna: Usporedba



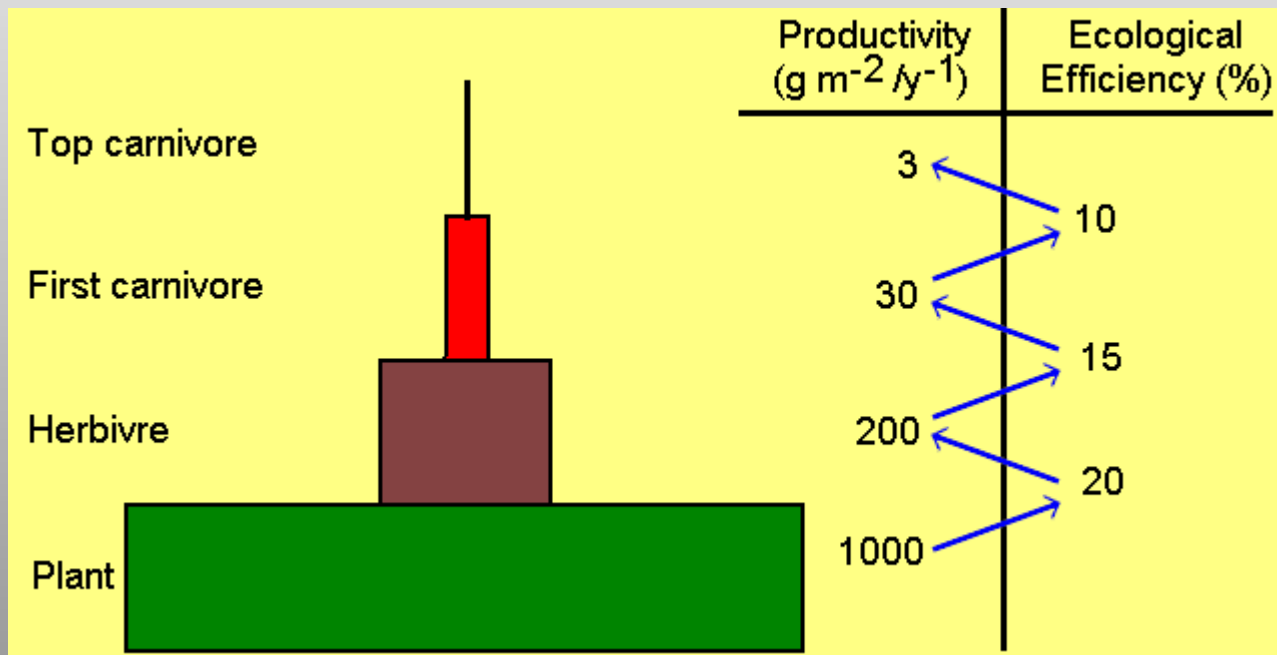
# DINAMIKA PROTOKA ENERGIJE KROZ EKOSISTEM

1. Ekološka efikasnost

2. Brzina prijenosa energije

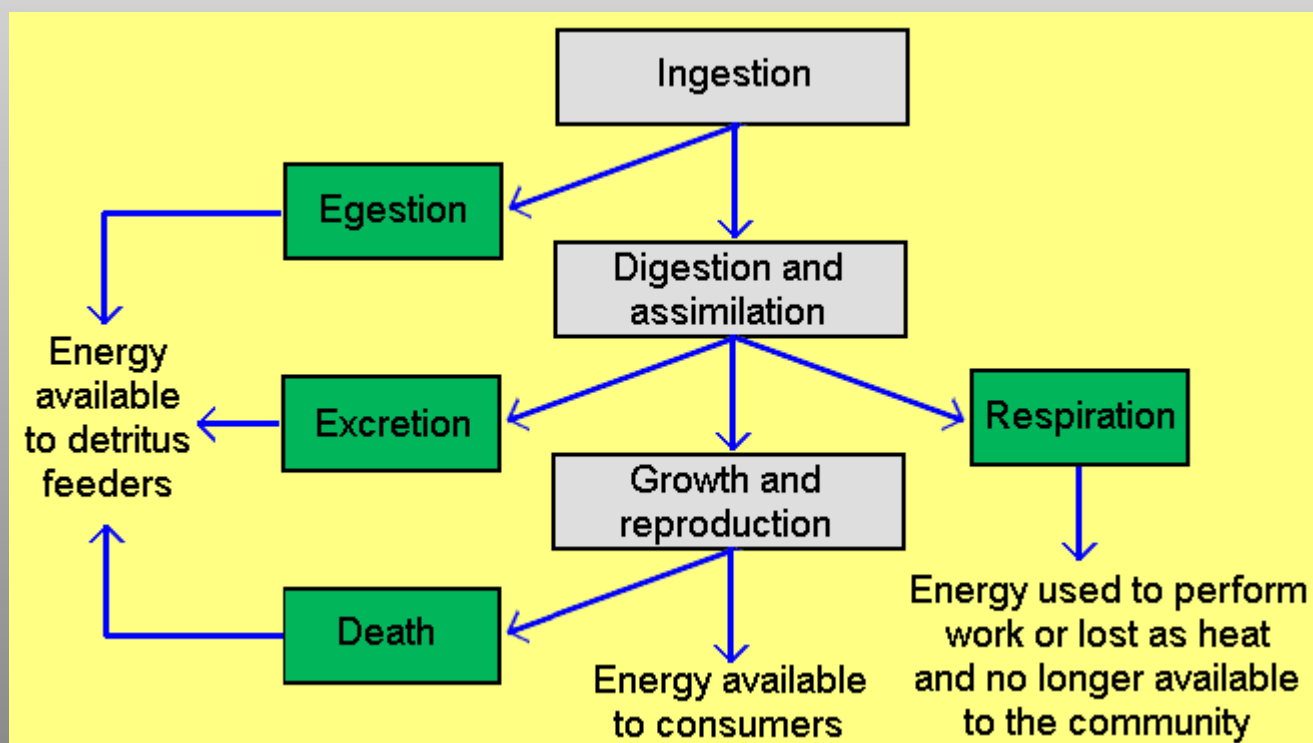


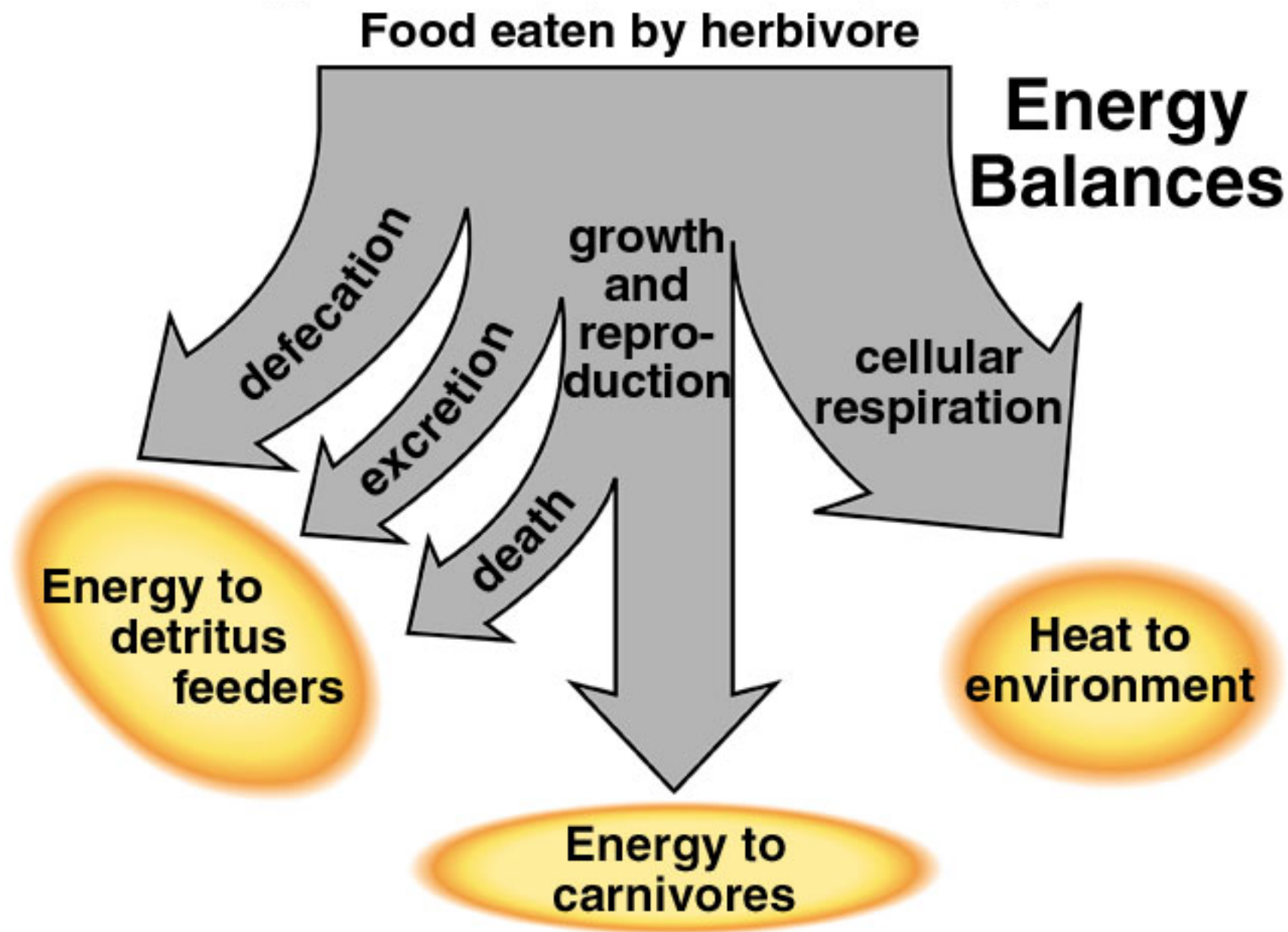
## Ekološka efikasnost određuje dinamiku gibanja energije duž hranidbenog lanca



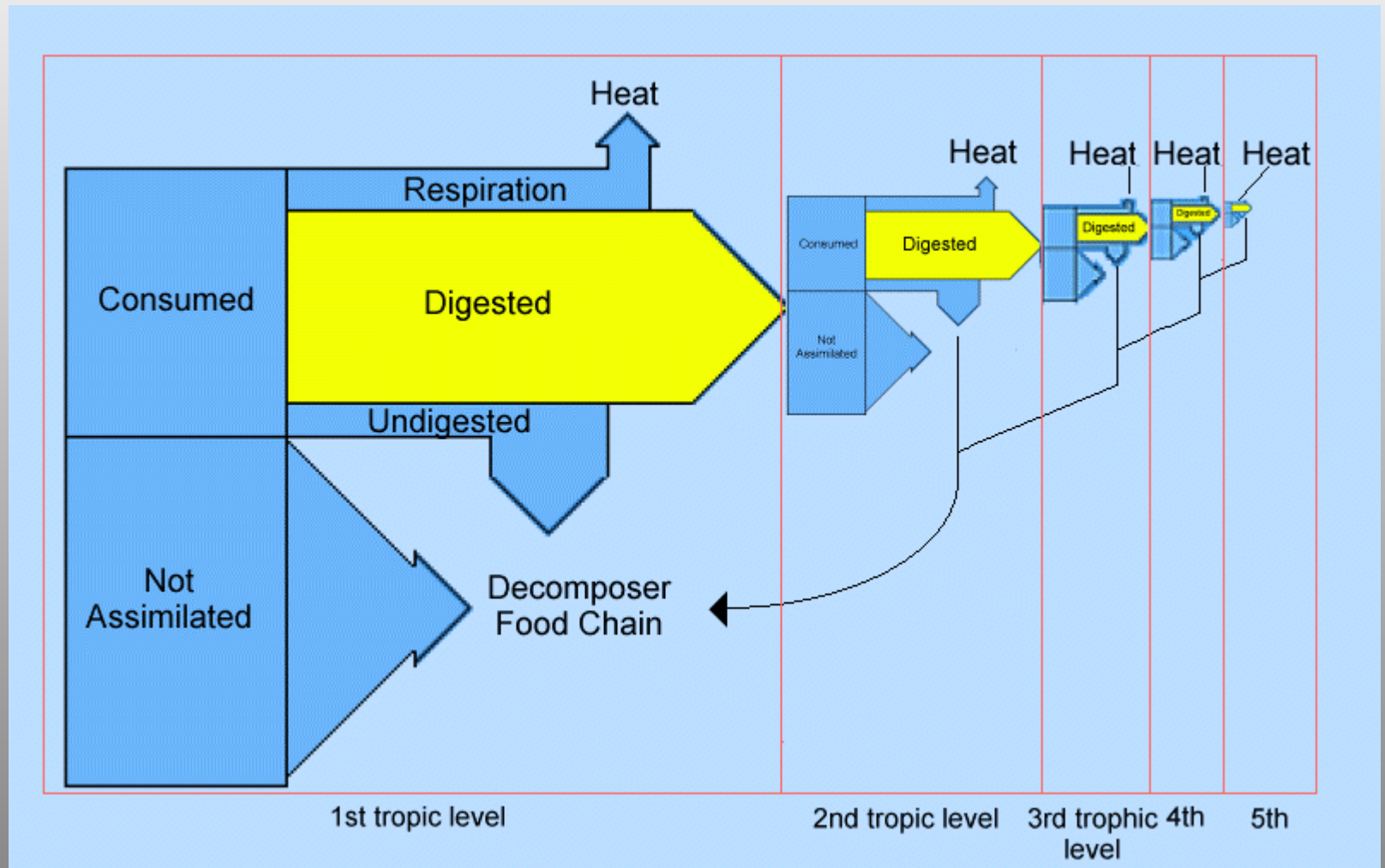
Ekološka efikasnost ili efikasnost hranidbenog lanca je postotak energije koji se prenese s jedne trofičke razine na drugu. Ta vrijednost se u pravilu kreće u rasponu od 5-20%

## Podjela energije unutar pojedine veze u hranidbenom lancu



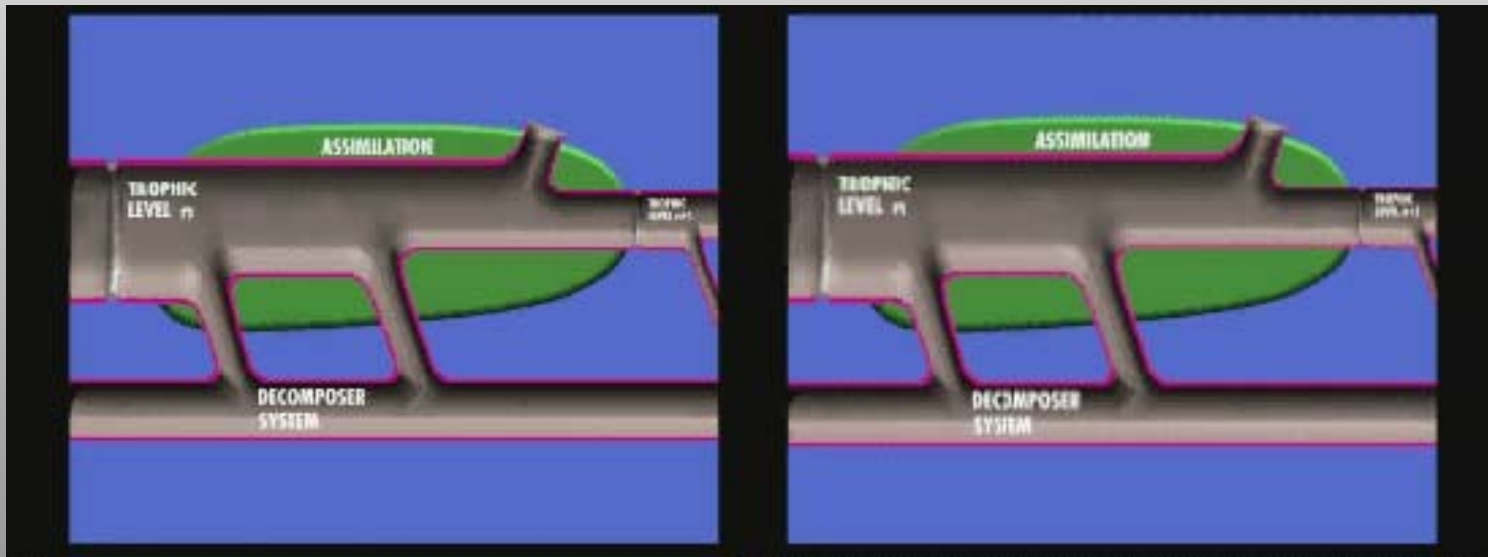


# M. Šolić: Ekologija mora





## Podjela energije unutar pojedine veze u hranidbenom lancu

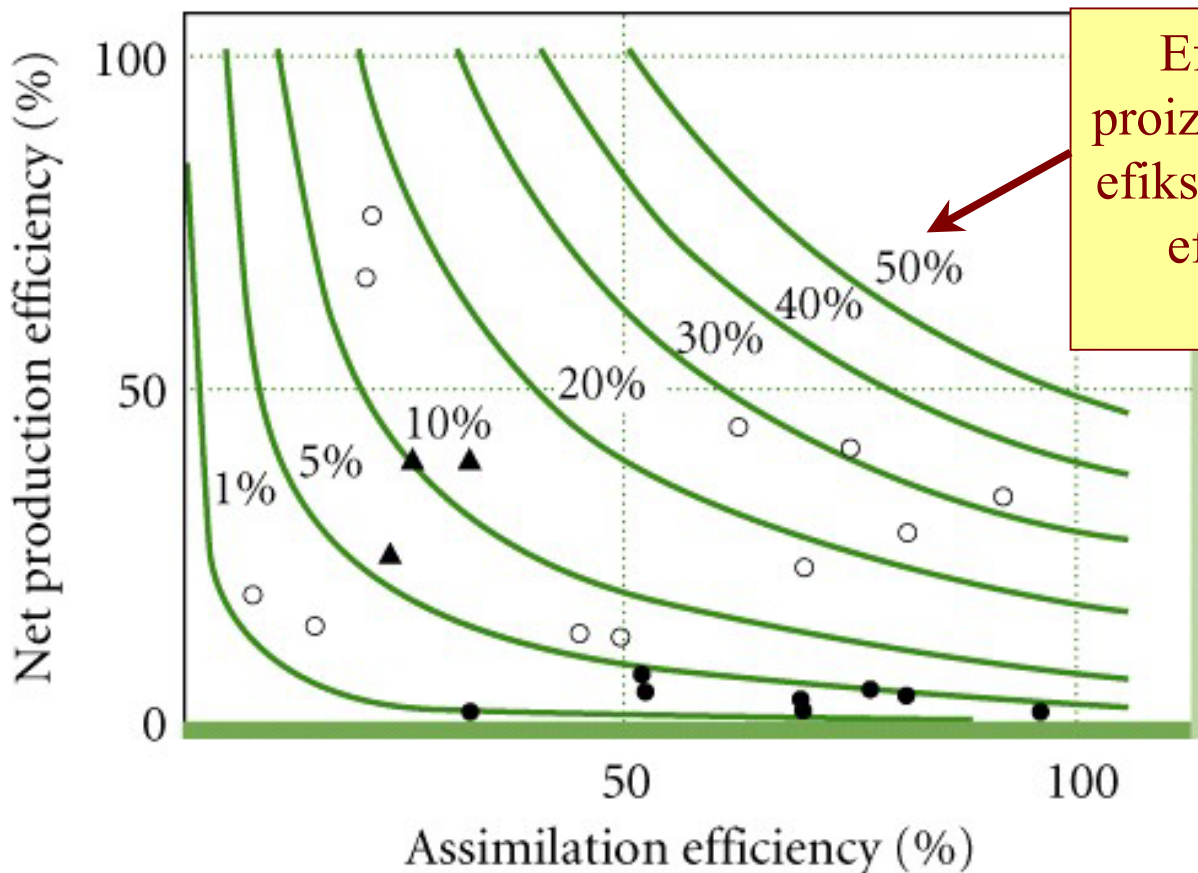


**Ekološka efikasnost određena je efikasnošću asimilacije hrane i efikasnošću proizvodnje vlastite biomase (rast + razmnožavanje)**

**Definicije nekoliko tipova efikasnosti u iskorištavanju energije.**

<b>EFIKASNOST</b>	<b>DEFINICIJA</b>
<b>(1) Efikasnost iskorištavanja</b>	<b>⇒ pojedena hrana/proizvodnja plijena</b>
<b>(2) Efikasnost asimilacije</b>	<b>⇒ asimilirano/pojedeno</b>
<b>(3) Efikasnost neto proizvod</b>	<b>⇒ proizvodnja/asimilacija</b>
<b>(4) Efikasnost bruto proizvodnje</b>	<b>⇒ proizvodnja/pojedeno [(2)x(3)]</b>
<b>(5) Ekološka efikasnost</b>	<b>⇒ proiz. konzumenta/proiz. plijena [(1)x(2)x(3)]</b>

## Odnos između efikasnosti asimilacije i efikasnosti neto proizvodnje za različite skupine organizama



Efikasnost bruto proizvodnje je produkt efikasnosti asimilacije i efikasnosti neto proizvodnje

- Poikilothermic aquatic animals
- ▲ Poikilothermic terrestrial animals

- Homeothermic terrestrial animals

## **Efikasnost asimilacije i proizvodnje**

	<b>Herbivori</b>	<b>Karnivori</b>	<b>Mikrobivori</b>	<b>Detrivori</b>
<b>Bez- kralježnjaci</b>	<b>A = 40%</b> <b>P = 40%</b>	<b>A = 80%</b> <b>P = 30%</b>	<b>A = 30%</b> <b>P = 40%</b>	<b>A = 20%</b> <b>P = 40%</b>
<b>Ektotermni kralježnjaci</b>	<b>A = 50%</b> <b>P = 10%</b>	<b>A = 80%</b> <b>P = 10%</b>		
<b>Endotermni kralježnjaci</b>	<b>A = 50%</b> <b>P = 2%</b>	<b>A = 80%</b> <b>P = 2%</b>		

**LEGENDA:**

**A – efikasnost asimilacije**

**P – efikasnost proizvodnje**

**Duljina hranidbenih lanaca ograničena je ekološkom efikasnošću**

<b>EKOSUSTAV</b>	<b>NPP</b> (kcal m <sup>-2</sup> god <sup>-1</sup> )	<b>KP</b> (kcal m <sup>-2</sup> god <sup>-1</sup> )	<b>EE</b> (%)	<b>n</b>
<b>Oceani</b>	<b>500</b>	<b>0.1</b>	<b>25</b>	<b>7.1</b>
<b>Obalna mora</b>	<b>8000</b>	<b>10.0</b>	<b>20</b>	<b>5.1</b>
<b>Travnjaci u umjerenim podr.</b>	<b>2000</b>	<b>1.0</b>	<b>10</b>	<b>4.3</b>
<b>Tropske šume</b>	<b>8000</b>	<b>10.0</b>	<b>5</b>	<b>3.2</b>

NPP – neto primarna proizvodnja; KP – konzumacija predatora; EE – ekološka efikasnost; n – broj trofičkih razina

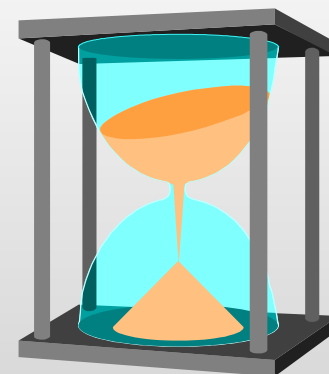
## Herbivorni i detrivorni lanac prehrane

U kopnenim ekosistemima dominira detrivorni lanac prehrane (u šumama preko 90% proizvedene biljne biomase postaje detritus, jer stabla smještaju značajan dio proizvodnje u strukture koje je teško pojesti i/ili probaviti), dok se razmjerno mali dio biljne biomase konzumira od strane herbivora

EKOSISTEM	% neto proizvodnje koju konzumiraju herbivori
Listopadne šume	1.5 – 2.5
Travnjaci	12
Planktonske zajednice	60 - 99

U vodenim sustavima, pogotovo otvorenim oceanima, dominira herbivorni lanac prehrane (preko 90% fitoplanktonske biomase konzumiraju herbivori)

# **Brzina prijenosa energije: Pokazatelj dinamike protoka energije kroz ekosistem**



- Drugi pokazatelj dinamike protoka energije kroz ekosistem, pored ekološke efikasnosti, je brzina protoka energije
- Brzina prijenosa energije se često izražava kroz njenu inverznu vrijednost: **vrijeme zadržavanja (residence time; transit time)**

# M. Šolić: Ekologija mora

EKOSUSTAV	Neto	Biomasa (g m <sup>-2</sup> )	Vrijeme
	primarna produkcija (g m <sup>-2</sup> god <sup>-1</sup> )		zadržavanja (godine)
<b>Tropske kišne šume</b>	<b>2000</b>	<b>45000</b>	<b>22.5</b>
<b>Umjerene listopadne šume</b>	<b>1200</b>	<b>30000</b>	<b>25.0</b>
<b>Borealne šume</b>	<b>800</b>	<b>20000</b>	<b>25.0</b>
<b>Umjereni travnjaci</b>	<b>500</b>	<b>1500</b>	<b>3.0</b>
<b>Pustinjsko grmlje</b>	<b>70</b>	<b>700</b>	<b>10.0</b>
<b>Močvare</b>	<b>2500</b>	<b>15000</b>	<b>6.0</b>
<b>Jezera i rijeke</b>	<b>500</b>	<b>20</b>	<b>0.04*</b>
<b>Naselja alga i grebeni</b>	<b>2000</b>	<b>2000</b>	<b>1.0</b>
<b>Otvoreni ocean</b>	<b>125</b>	<b>3</b>	<b>0.024**</b>

+15 dana; ++9 dana



## **Brzina prijenosa energije kroz hranidbene lance može se pratiti radioaktivnim obilježivačima (tracerima)**

**Praćenje prijenosa energije kroz trofičke razine riječnog ekosistema pomoću isotopa fosfora ( $^{32}\text{P}$ ) koji se dodaje u vodu kao otopina fosfata**

<b>TROFIČKA RAZINA</b>	<b>Maksimalna akumulacija <math>^{32}\text{P}</math></b>
Biljke	Nekoliko dana
Filtratori (filter-feedersi) i herbivori	1-2 tjedna
Omnivori	3-4 tjedna
Konzumenti detritusa	4-5 tjedana
Predatori	Preko 2 mjeseca

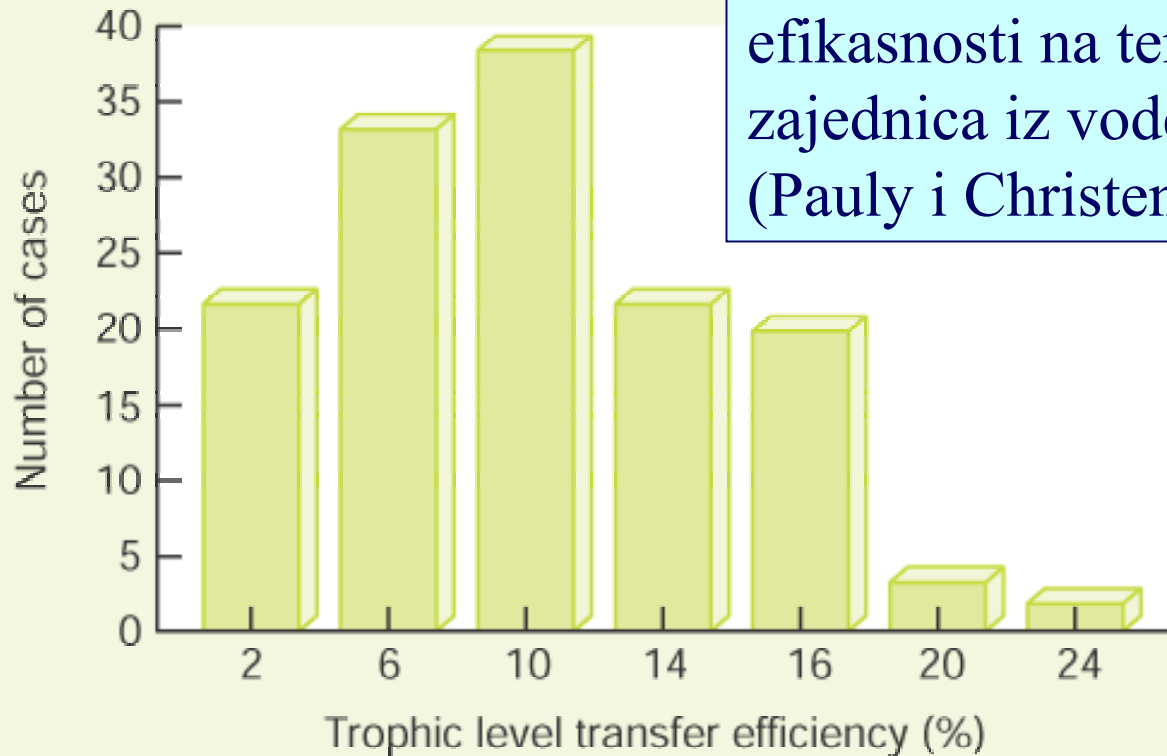
## **Autohtoni i alohtoni izvor energije**

- **Autohtoni izvor energije** – energije koja se stvara unutar sustava (fotosinteza)
  - U velikim rijekama, jezerima i većini morskih sustava dominira autohtona proizvodnja
- **Alohtoni izvor energije** – energija koja dolazi izvan sustava
  - U malim rijekama, potocima, estuarskim i nekim obalnim područjima dominira alohtona proizvodnja (proizvodnja koja se temelji na alohtonom inputu hranjiva)

**Analizom energetskeg buđeta velikog broja vodenih ekosistema Kozlovski (1968) je zaključio:**

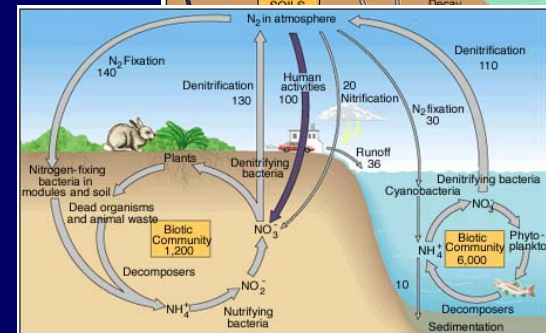
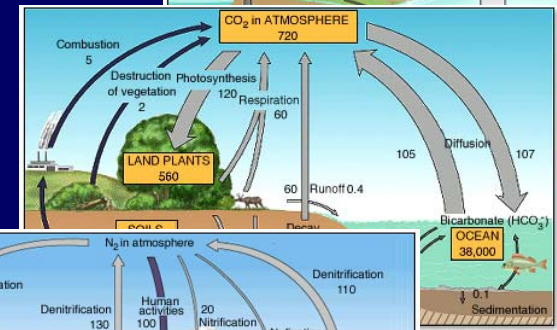
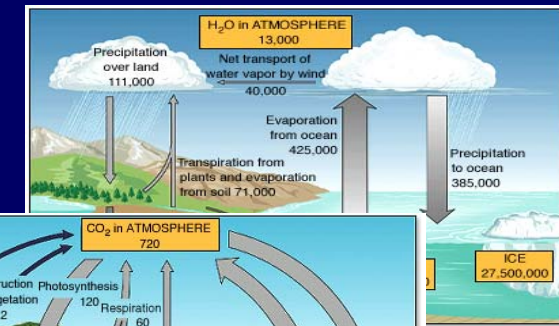
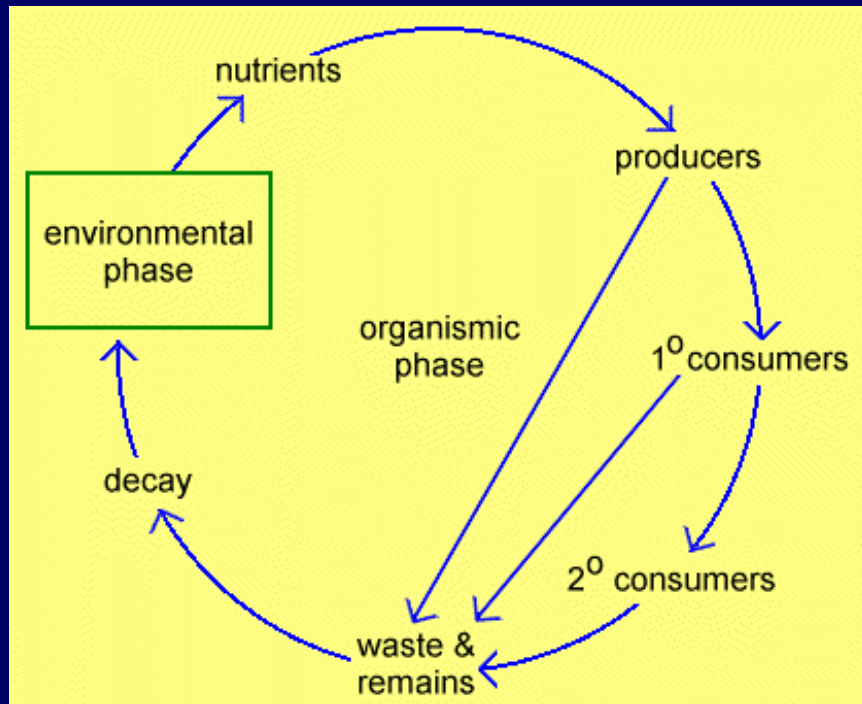
- 1. Efikasnost asimilacije raste prema višim trofičkim razinama**
- 2. Efikasnost neto i bruto proizvodnje opada prema višim trofičkim razinama**
- 3. Ekološka efikasnost ostaje konstantna duž hranidbenog lanca i iznosi u prosjeku oko 10%**

# Ekološka efikasnost

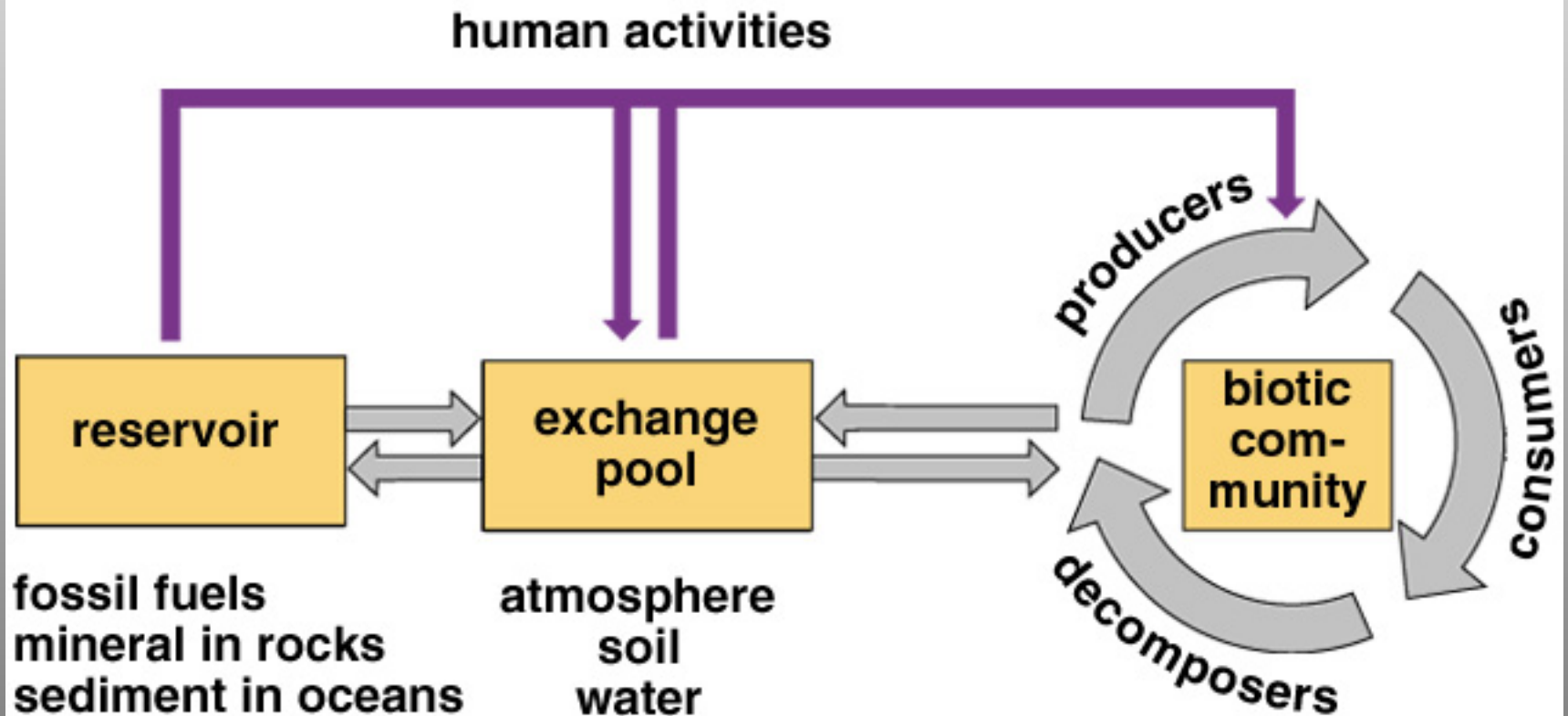


Raspodjela učestalosti ekološke efikasnosti na temelju analize 40 zajednica iz vodenih staništa (Pauly i Christensen, 1995)

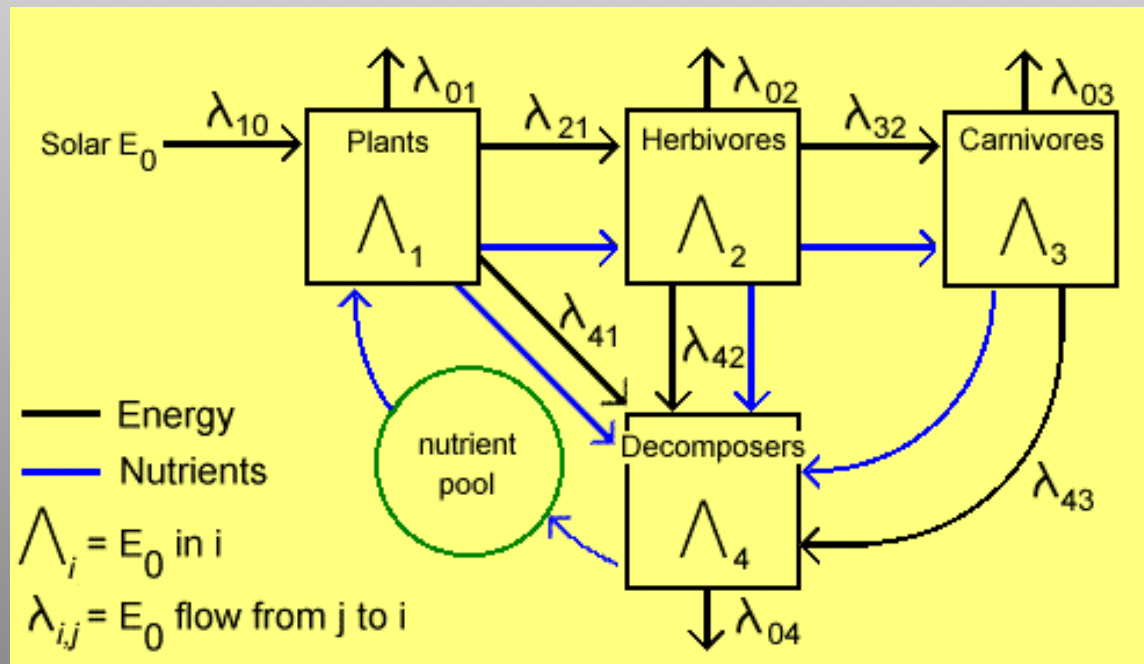
# KRUŽENJE ELEMENATA U EKOSISTEMU



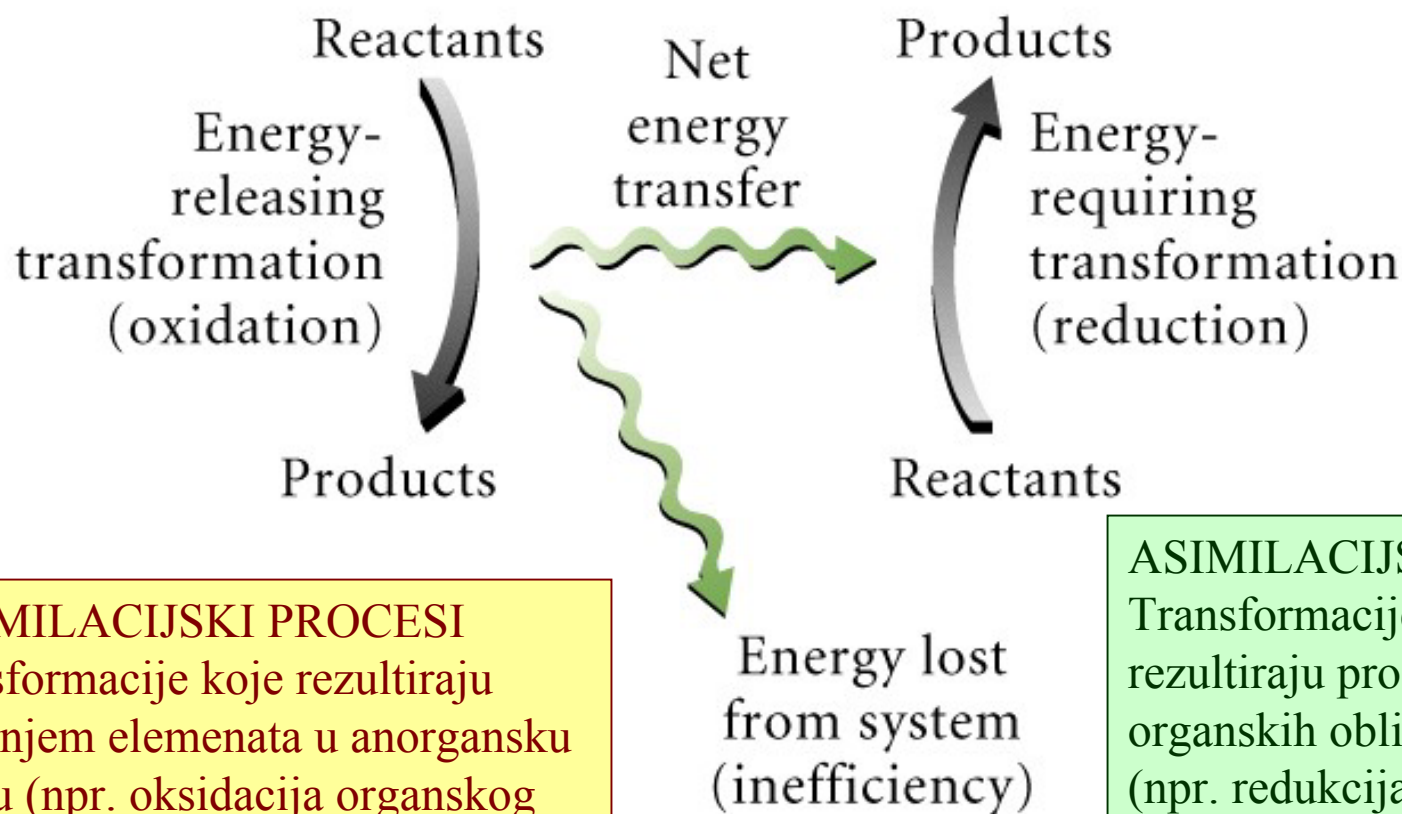
# Model for Chemical Cycling



# Gibanje mnogih elemenata kroz ekosistem paralelno je s protokom energije



Elementi u prirodi kruže između organizama i fizičkog okoliša i pri tome doživljavaju kemijske transformacije



### DISIMILACIJSKI PROCESI

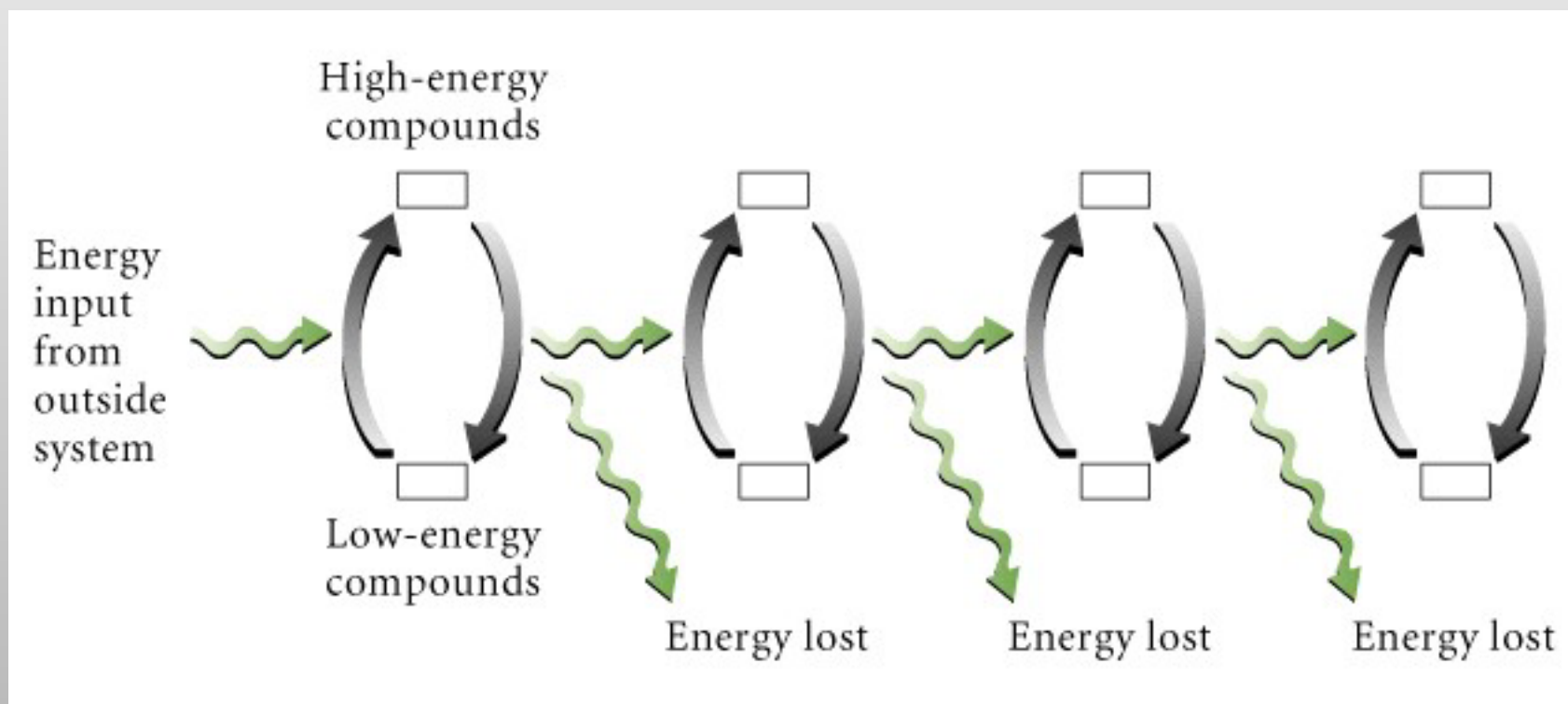
Transformacije koje rezultiraju vraćanjem elemenata u anorgansku formu (npr. oksidacija organskog ugljika u procesu respiracije) Ovi procesi oslobađaju energiju

### ASIMILACIJSKI PROCESI

Transformacije koje rezultiraju proizvodnjom organskih oblika elemenata (npr. redukcija  $\text{CO}_2$  u fotosintezi). Ovi procesi potražuju energiju



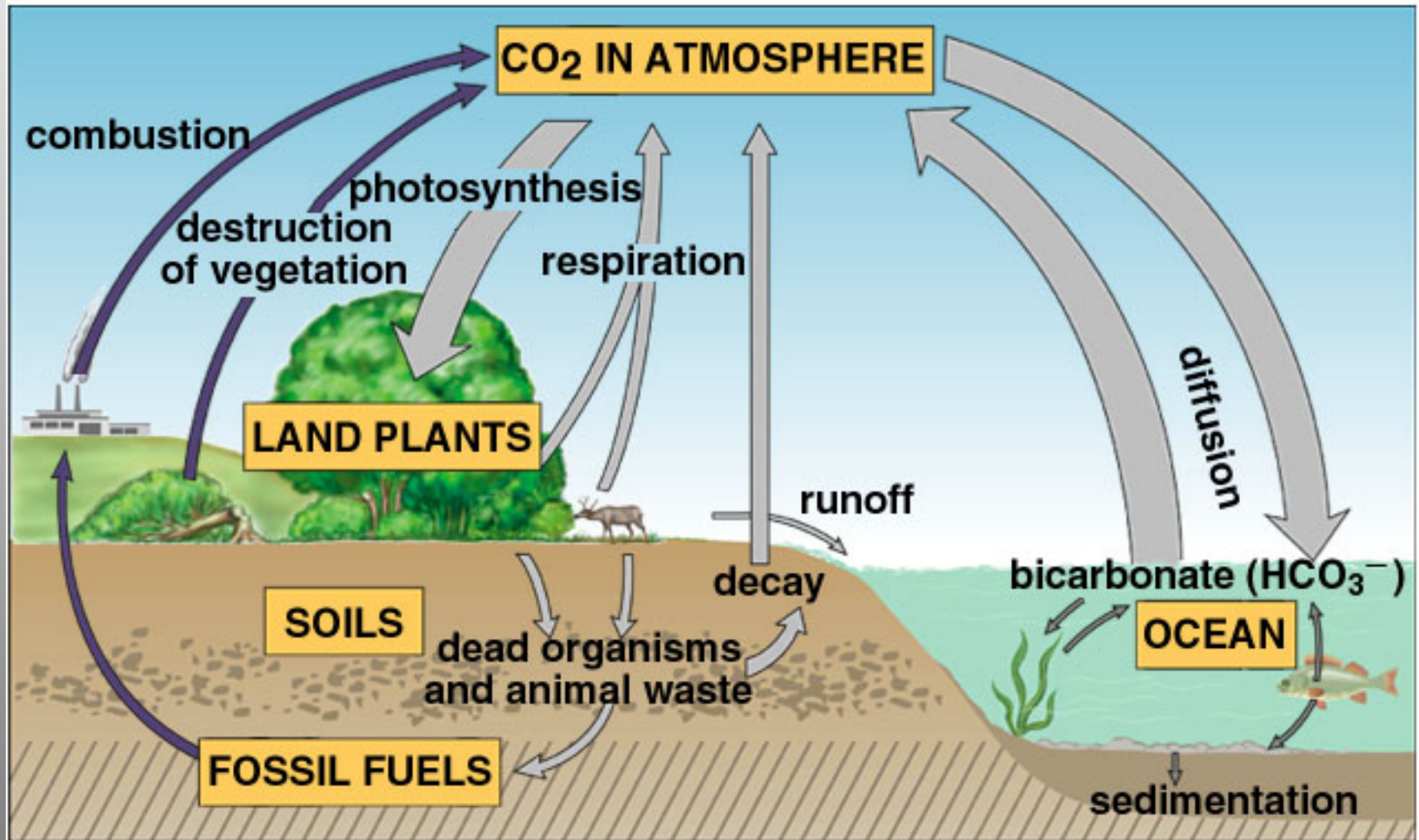
**Kako energija protiče kroz ekosistem, elementi kruže između asimilacijskih i disimilacijskih transformacija. Energija protiče preko veza koje postoje između disimilacijskog dijela jednog ciklusa (oslobađa energiju) i asimilacijskog dijela drugog ciklusa (potražuje energiju)**



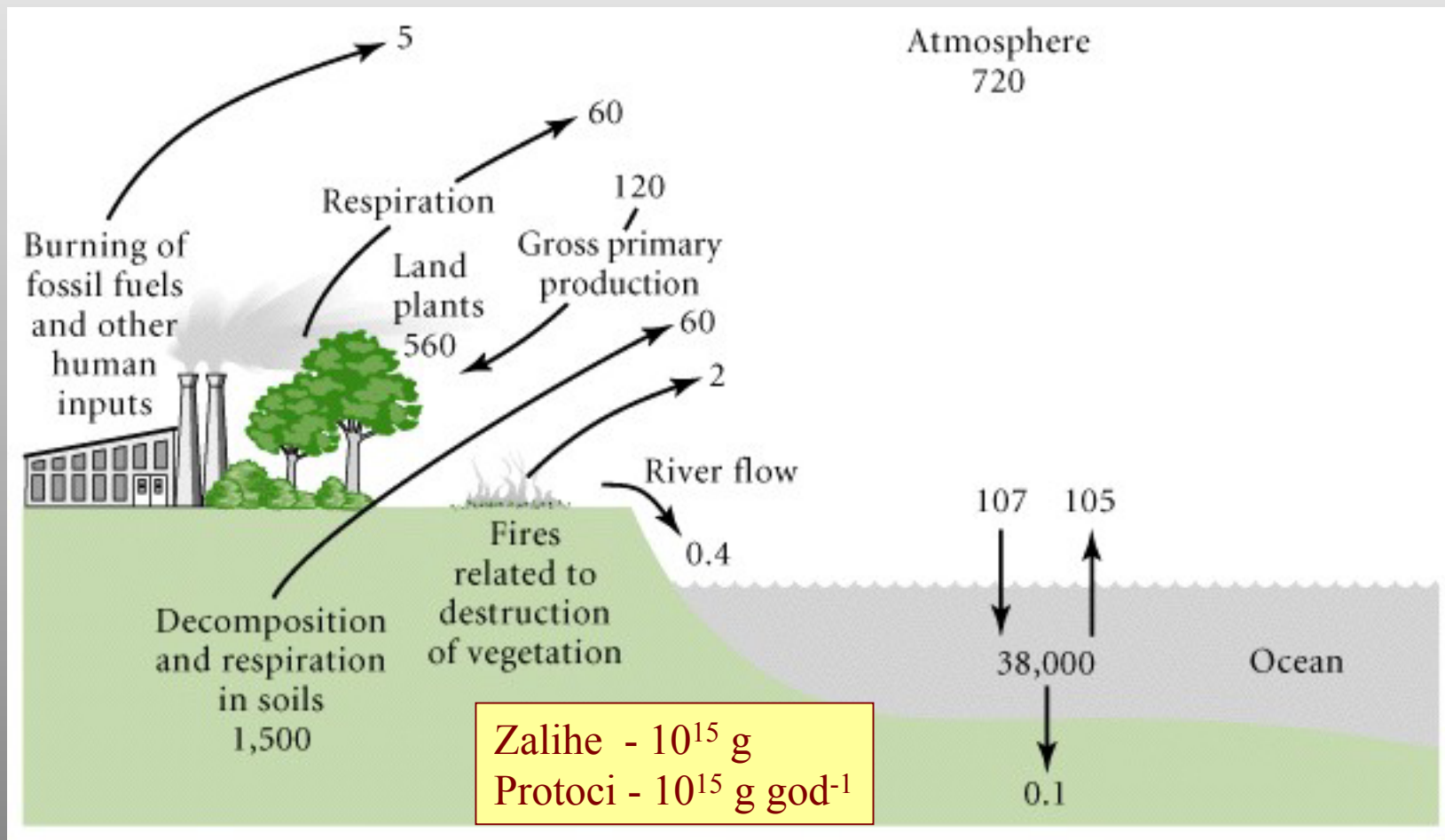
## **Ciklus ugljika je najbliže povezan s protokom energije u ekosistemu**

- **Kruženje ugljika u vodenim i kopnenim sustavima uključuje tri glavne grupe procesa:**
  - 1. **Asimilacijske i disimilacijske redoks reakcije ugljika u procesima fotosinteze i respiracije (svake godine na Zemlji u takve reakcije ulazi oko  $10^{17}$ g ( $10^{11}$  tona) ugljika**
  - 2. **Fizikalne izmjene CO<sub>2</sub> između atmosfere i hidrosfere (CO<sub>2</sub> se lako otapa u vodi pa oceani sadrže oko 50 puta veću koncentraciju CO<sub>2</sub> od atmosfere)**
  - 3. **Otapanje i precipitacija (taloženje) ugljikovih spojeva kao sedimenata (najznačajniji su vapnenac i dolomit). Najveći dio ugljika u ekosistemima je pohranjen u sedimentnim stijinama**

# Carbon Cycle



# CIKLUS UGLJIKA



# Izmjene CO<sub>2</sub> između atmosfere i hidrosfere

## 1. MORE

- Dinamika protoka CO<sub>2</sub> na granici između zraka i vode kontrolirana je fizikalnim i biološkim procesima
- Vjetrovi iznad oceanske površine stvaraju situaciju u kojoj je parcijalni tlak CO<sub>2</sub> u zraku u ravnoteži s tlakom neposredno ispod površine
- Primarna proizvodnja koja troši CO<sub>2</sub> smanjuje njegovu koncentraciju u površinskom sloju i omogućava protok CO<sub>2</sub> iz zraka u vodu (fenomen poznat kao **biološka pumpa**)
- Visoke geografske širine karakterizira hladna voda (topljivost CO<sub>2</sub> je dva puta veća na 0°C nego na 20°C), te poniranje hladne i guste vode (downwelling) koja brzo odnosi CO<sub>2</sub> iz površinskih slojeva

## Otapanje i precipitacija ugljikovih spojeva

- U vodenim sustavima se otapanje i taloženje događa za oko dva reda veličine sporije od asimilacije i disimilacije, pa su ovi procesi relativno beznačajni za kratkoročno kruženje ugljika u ekosistemu

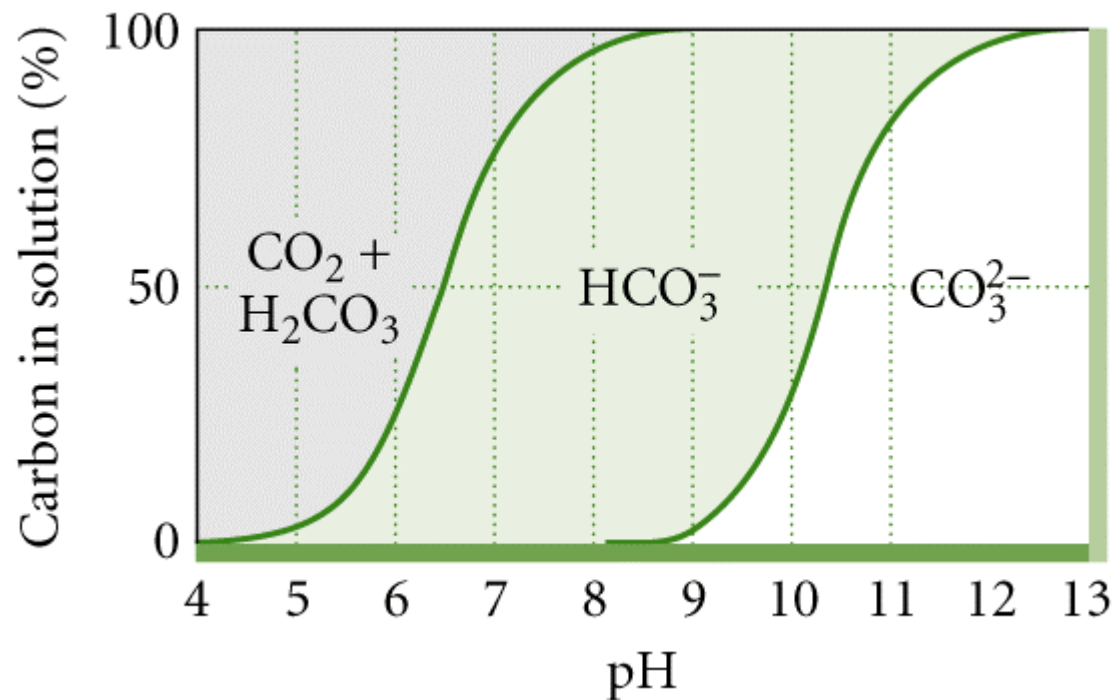
- Kada se CO<sub>2</sub> otopi u vodi on formira ugljičnu kiselinu:



- Ugljična kiselina vrlo lako disocira u bikarbonatne i karbonatne ione:



## Ravnoteža ovih reakcija ovisi o pH



Udio različitih formi ugljika u otopini u ovisnosti o pH

pH u moru je blago lužnat (oko 8), pa u moru dominiraju bikarbonati ( $\text{HCO}_3^-$ )

## Otapanje i precipitacija ugljikovih spojeva

- Kada je prisutan kalcij on također održava ravnotežu s karbonatnim i bikarbonatnim ionima:



- U morskom okolišu (gdje je pH blizu neutralnog) karbonatni sustav ima ukupnu ravnotežu:





## “Višak” CO<sub>2</sub>

**TABLE 11-2** Fate of anthropogenic CO<sub>2</sub> in the global carbon budget

Compartment or process	Rate × 10 <sup>15</sup> g C yr <sup>-1</sup>
Source of anthropogenic CO <sub>2</sub>	
Fossil fuel combustion	5.0
Deforestation and changing land use patterns	2.0
Uptake of anthropogenic CO <sub>2</sub>	
Atmospheric accumulation	3.2
Uptake by oceans	2.0
Net balance (sources – uptake)	-1.8

(Data from Schlesinger 1991, Siegenthaler and Sarmiento 1993.)

Zbog antropogenog utjecaja postoji “višak” CO<sub>2</sub> čija sudbina nije do kraja poznata!

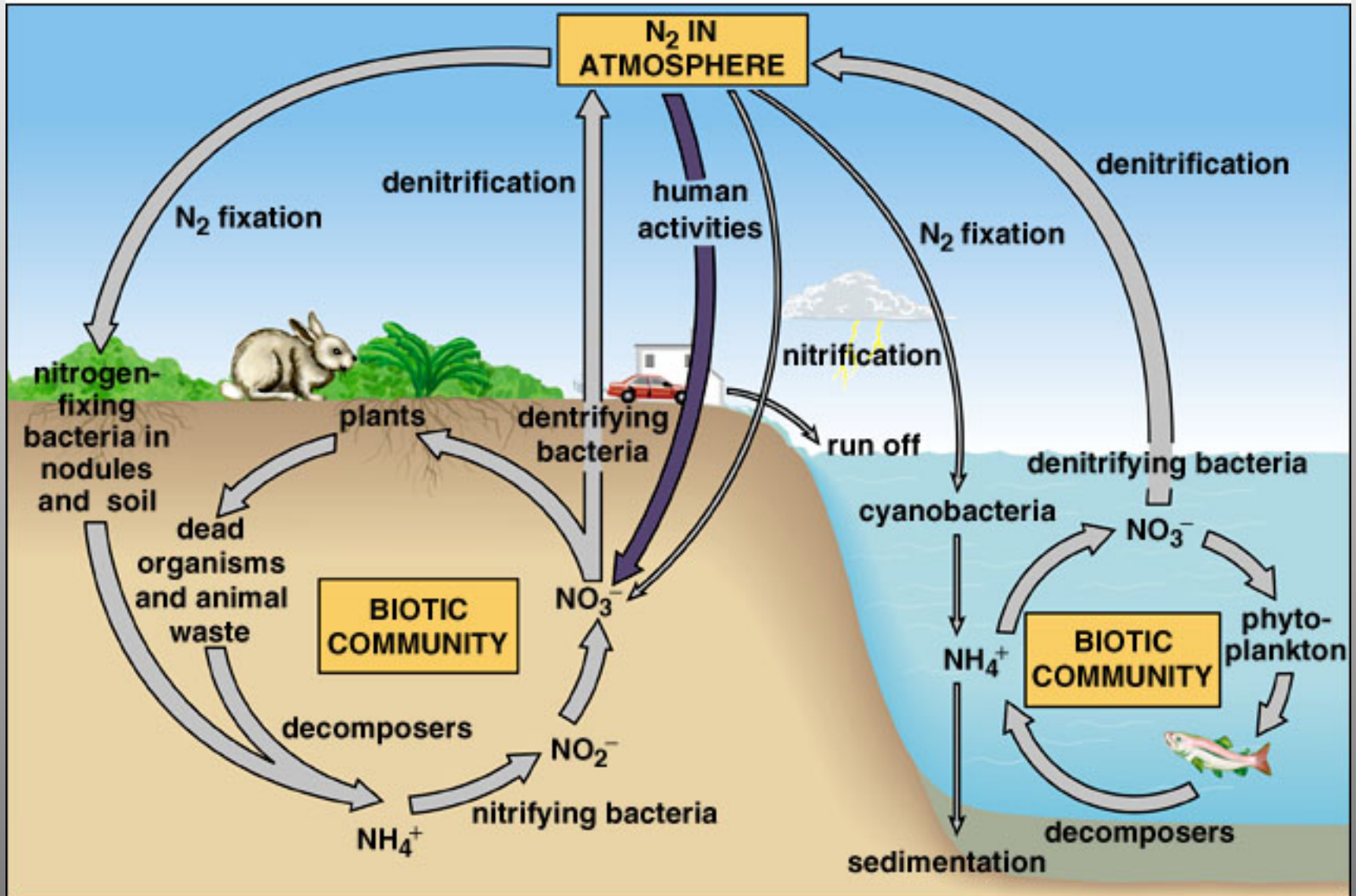
More uzima dio “viška” CO<sub>2</sub>, ali to nije dovoljno za ravnotežu

# Ciklus dušika

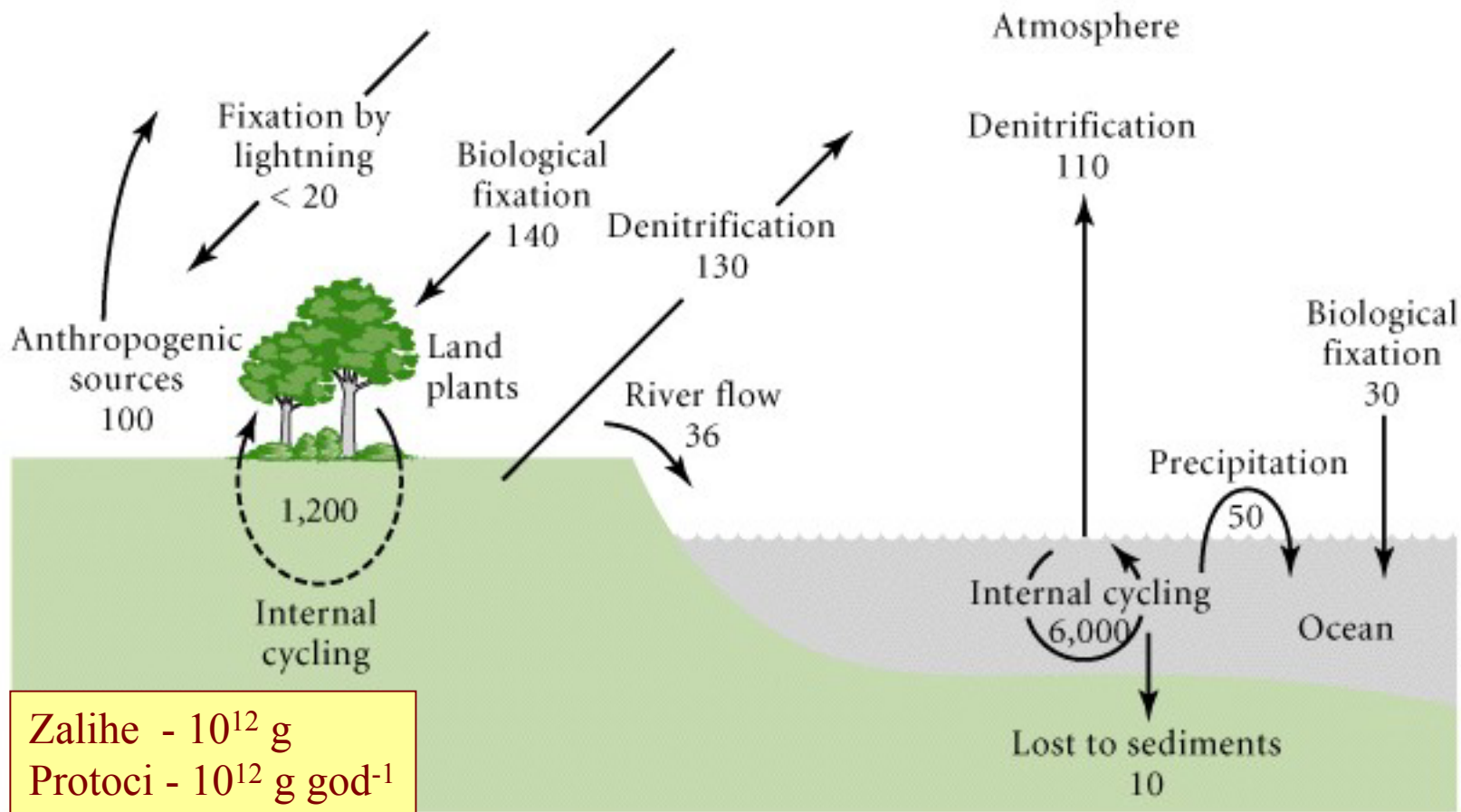
- Ciklus dušika se sastoji od 5 odvojenih reakcija transformacije dušika koje su povezane u ciklus:
  - **1. ASIMILACIJA DUŠIKA** – konverzija  $\text{NH}_3$  u organski dušik i biomasu
  - **2. AMONIFIKACIJA** – proces u kojem se organski spojevi dušika transformiraju do  $\text{NH}_3$  ili  $\text{NH}_4^+$
  - **3. NITRIFIKACIJA** – oksidacija  $\text{NH}_4^+$  u  $\text{NO}_2^-$  (nitrit) i  $\text{NO}_3^-$  (nitrat)
  - **4. DENITRIFIKACIJA** – redukcija  $\text{NO}_3^-$  u  $\text{N}_2\text{O}$  ili  $\text{N}_2$  s  $\text{NO}_2^-$  ili  $\text{NO}$  kao međuproduktima. Ova se redukcija obično događa u anaerobnim uvjetima
  - **5. FIKSACIJA DUŠIKA**
- Kvantitativno najzančajniji put protoka dušika slijedi ovaj ciklus:

**nitrat → organski-N → amonijak → nitrit → nitrat**

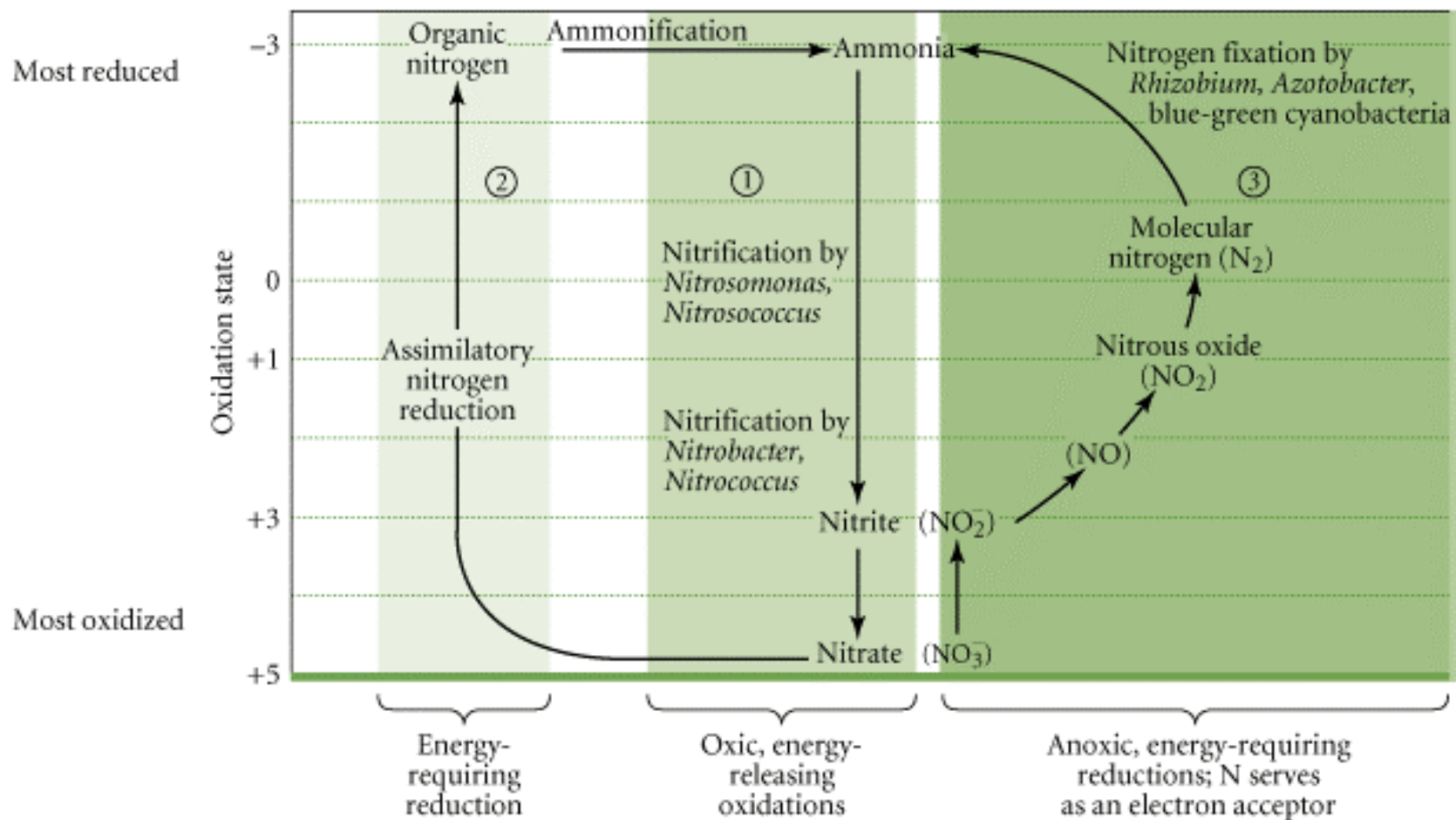
# Nitrogen Cycle



# CIKLUS DUŠIKA



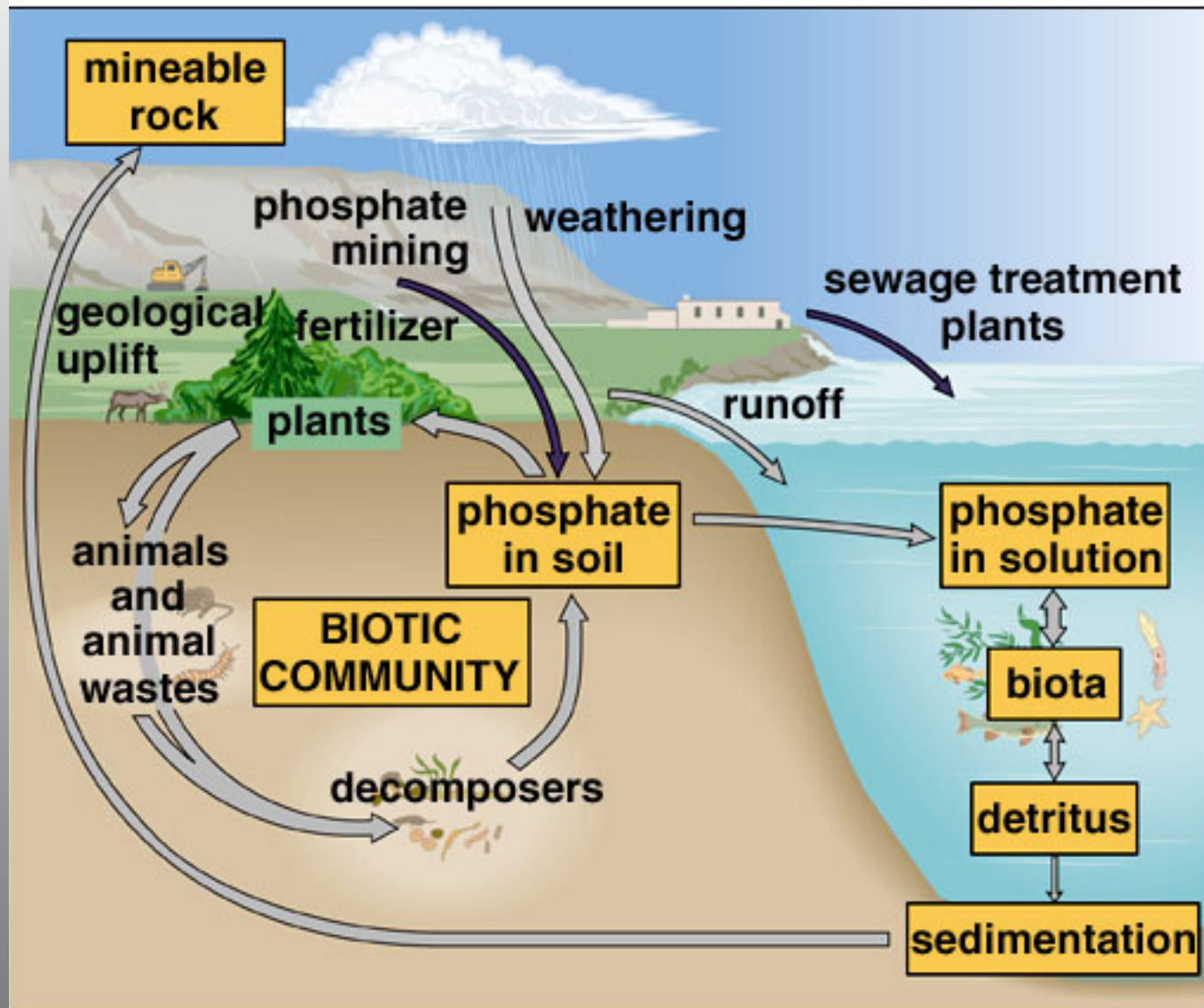
## Oksido-redukcijske transformacije dušika



# Ciklus fosfora

- Fosfor je glavni konstitutivni element u nukleinskim kiselinama i staničnoj membrani, a važan je element u kostima
- Jedan je od ograničavajućih faktora za primarnu proizvodnju u vodenim ekosistemima
- Biljke ga asimiliraju u formi fosfata ( $\text{PO}_4^{3-}$ )
- Ciklus fosfora je manje složen od ciklusa dušika
- Mikroorganizmi imaju sposobnost oslobađanja fosfata:
  - **1. FOSFOMINERALIZATORI** – oslobađaju fosfate iz organskih spojeva fosfora
  - **2. FOSFOMOBILIZATORI** – oslobađaju fosfor iz anorganskih spojeva (npr. iz kalcijevog fosfata)

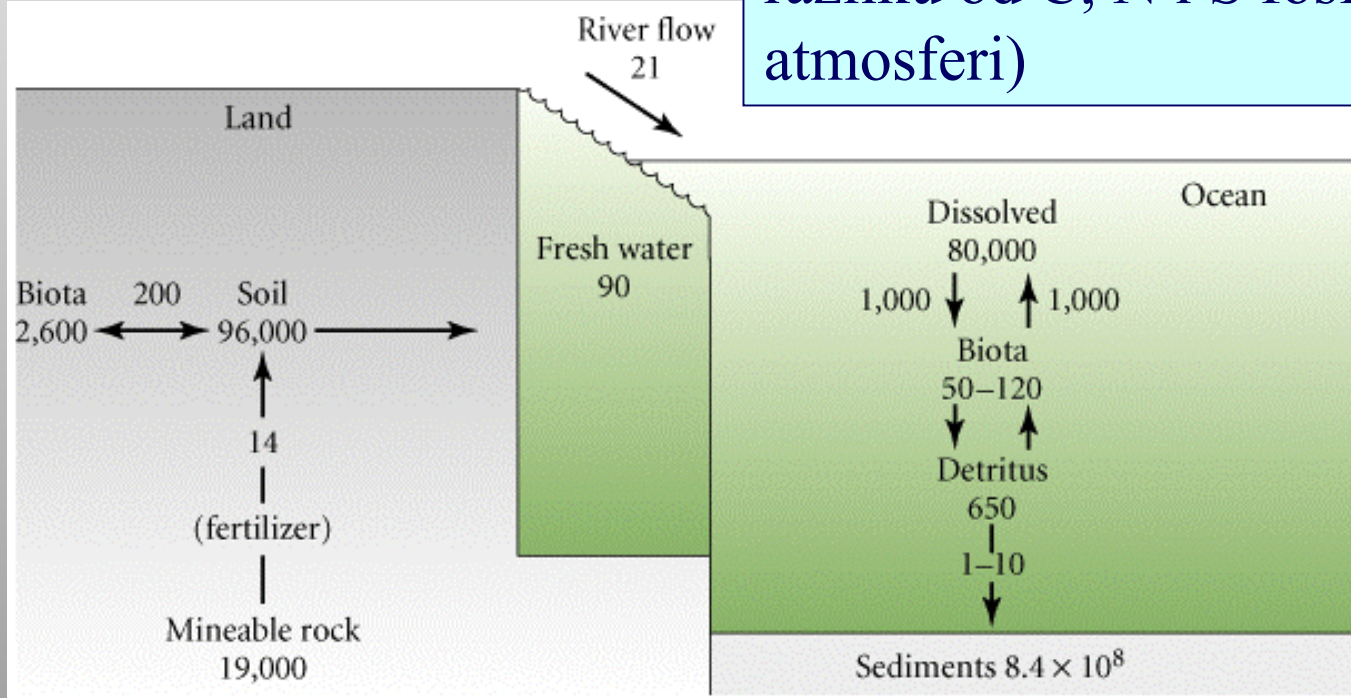
# Phosphorus Cycle



## CIKLUS FOSFORA

Zalihe -  $10^{12}$  g  
Protoci -  $10^{12}$  g god<sup>-1</sup>

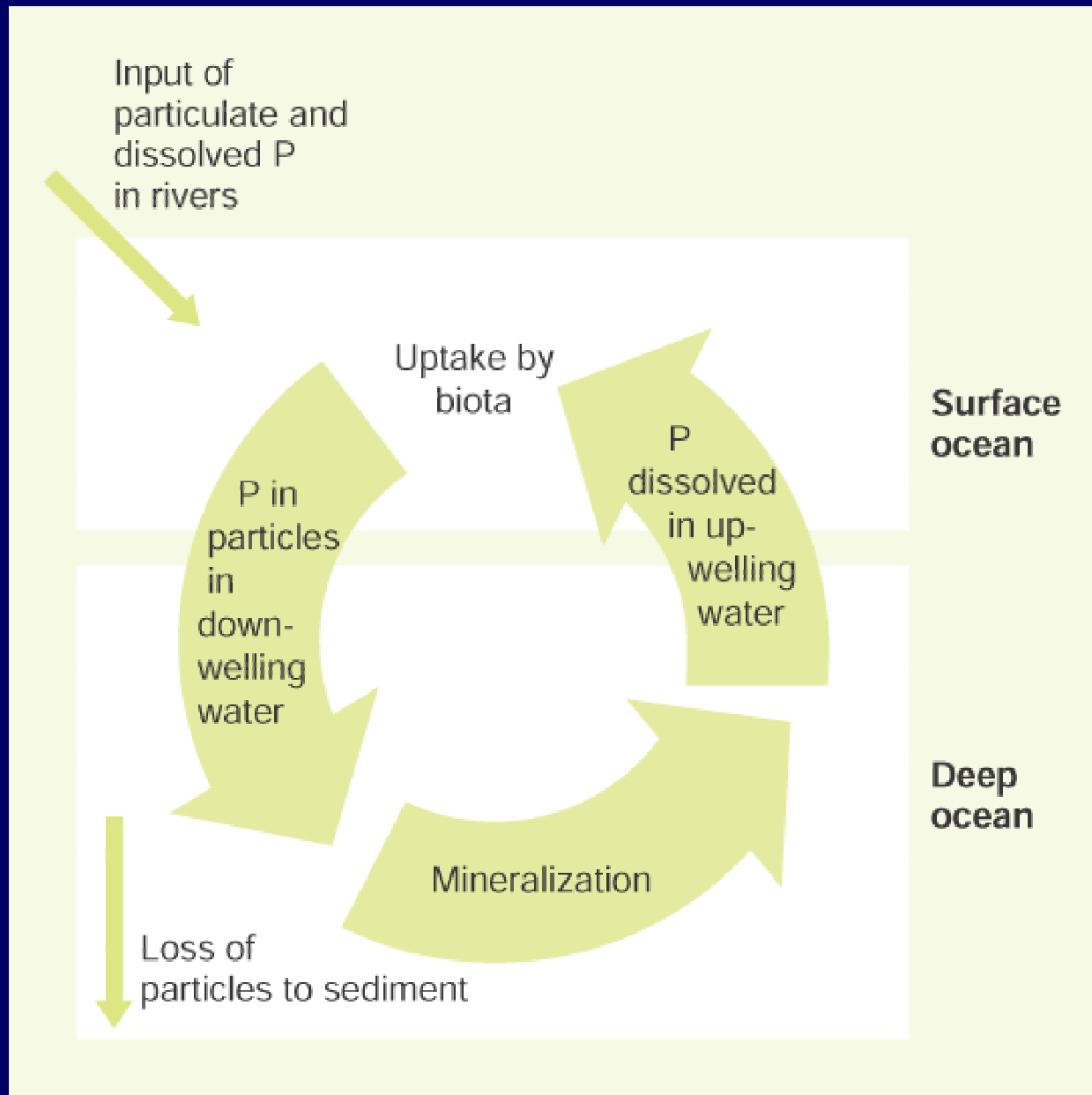
Najznačajniji protok fosfora događa se u smjeru od kopna prema moru (za razliku od C, N i S fosfora nema u atmosferi)



Količina fosfora je u odjeljcima ekosistema velika, ali je količina fosfora koja je na raspolaganju organizmima ekstremno niska



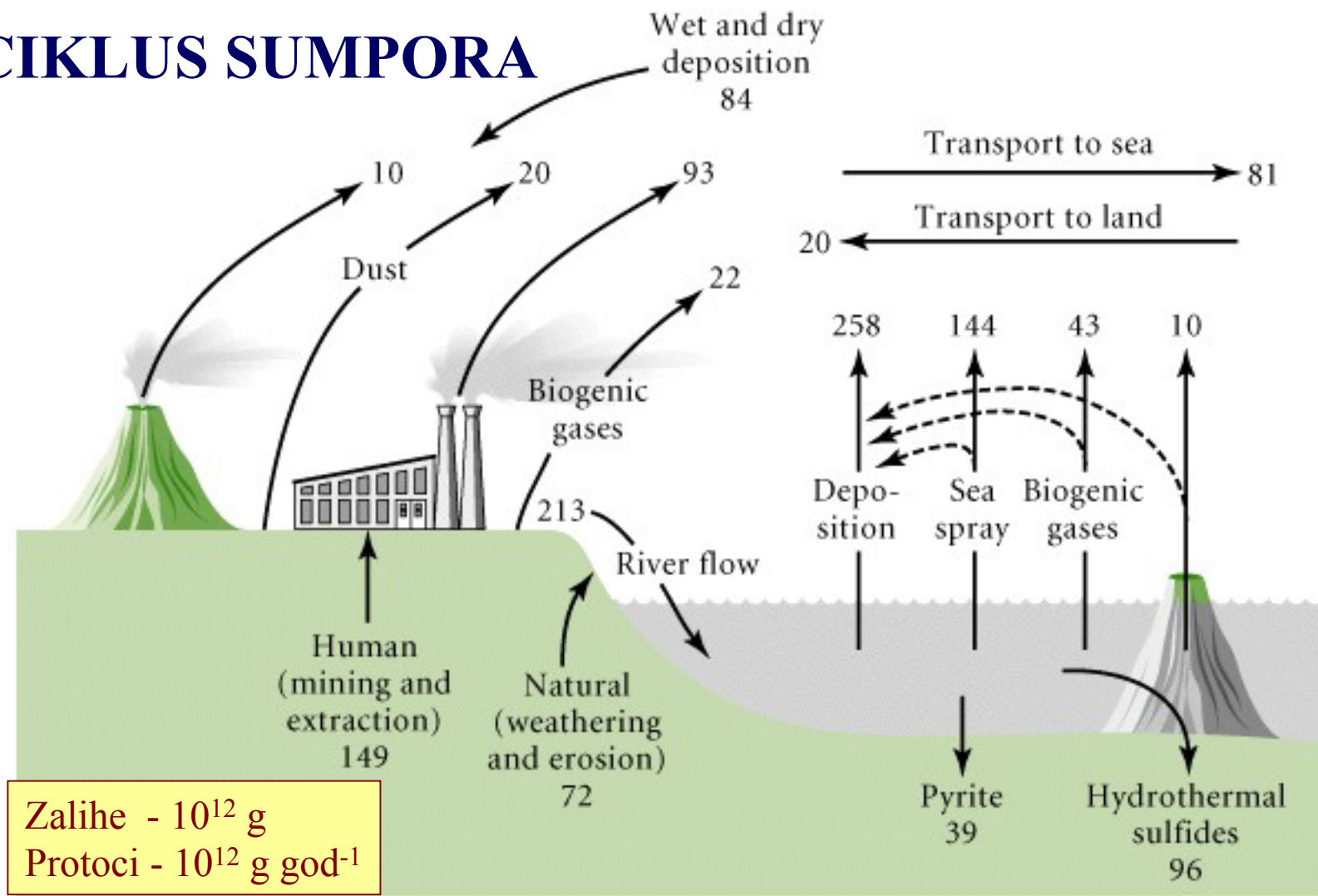
# Ciklus fosfora u oceanima



# Ciklus sumpora

- Sumpor je važna komponenta aminokiselina *cistein* i *metionin*
- Ima brojna oksidacijska stanja i složen ciklus
- Sulfatni ion ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) je najznačajniji anion u kišnici, a također je i jedan od najznačajnijih aniona u moru
- Mnoge bakterije mogu osloboditi sumporovodik ( $\text{H}_2\text{S}$ ) iz aminokiselina, što je također važan izvor sumpora za organizme
- Morski sedimenti mogu sadržavati značajne koncentracije reduciranih organskih spojeva sumpora (npr. sulfidi,  $\text{S}^{2-}$ )

# CIKLUS SUMPORA



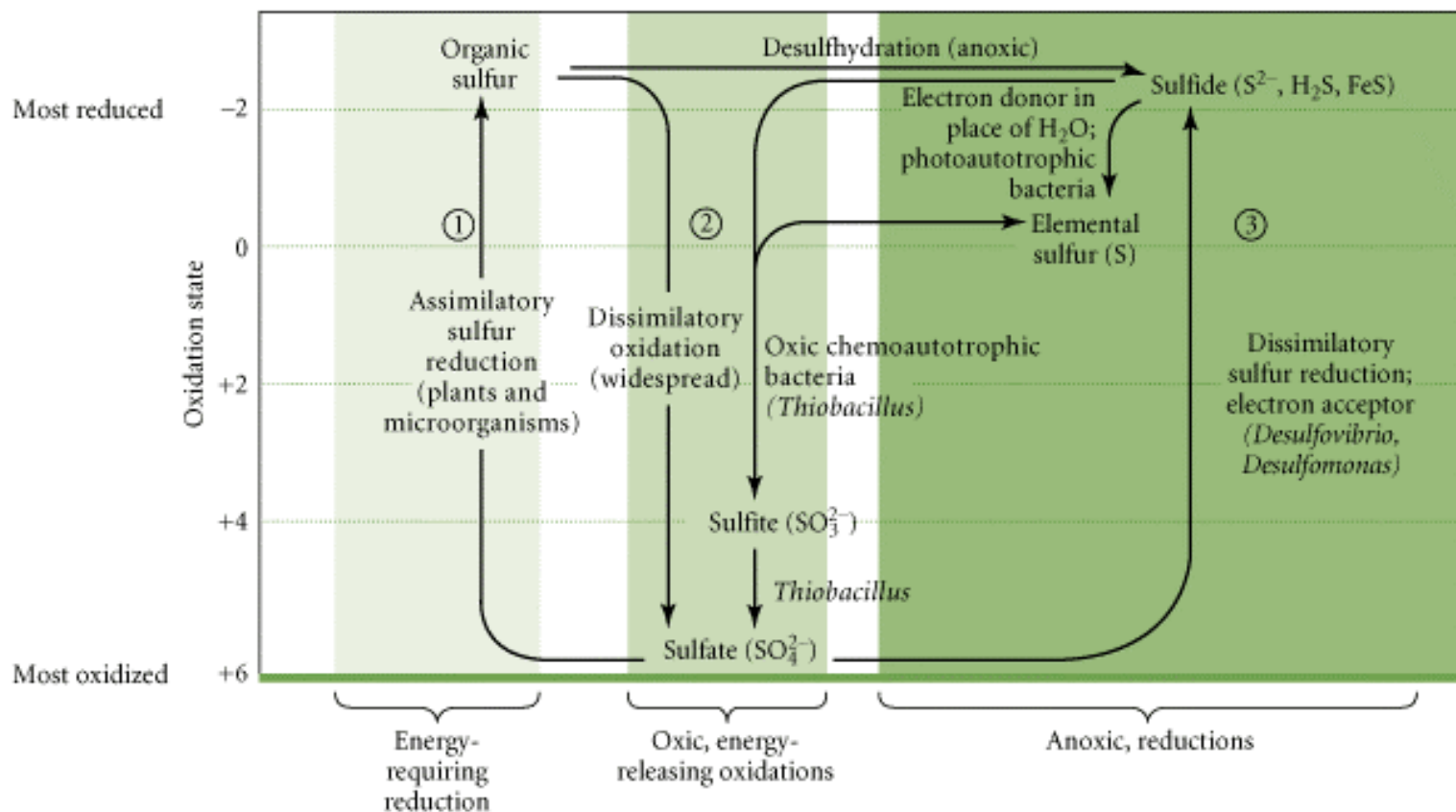
Zalihe -  $10^{12}$  g  
Protoci -  $10^{12}$  g god<sup>-1</sup>

# Oksido-redukcijske transformacije sumpora

OKSIDACIJA SUMPORA

$\text{SH}^-$  (sulfid) –  $\text{S}^0$  –  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$  (tiosulfat) –  $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$  (tetracionat) –  $\text{SO}_4^{2-}$  (sulfat)

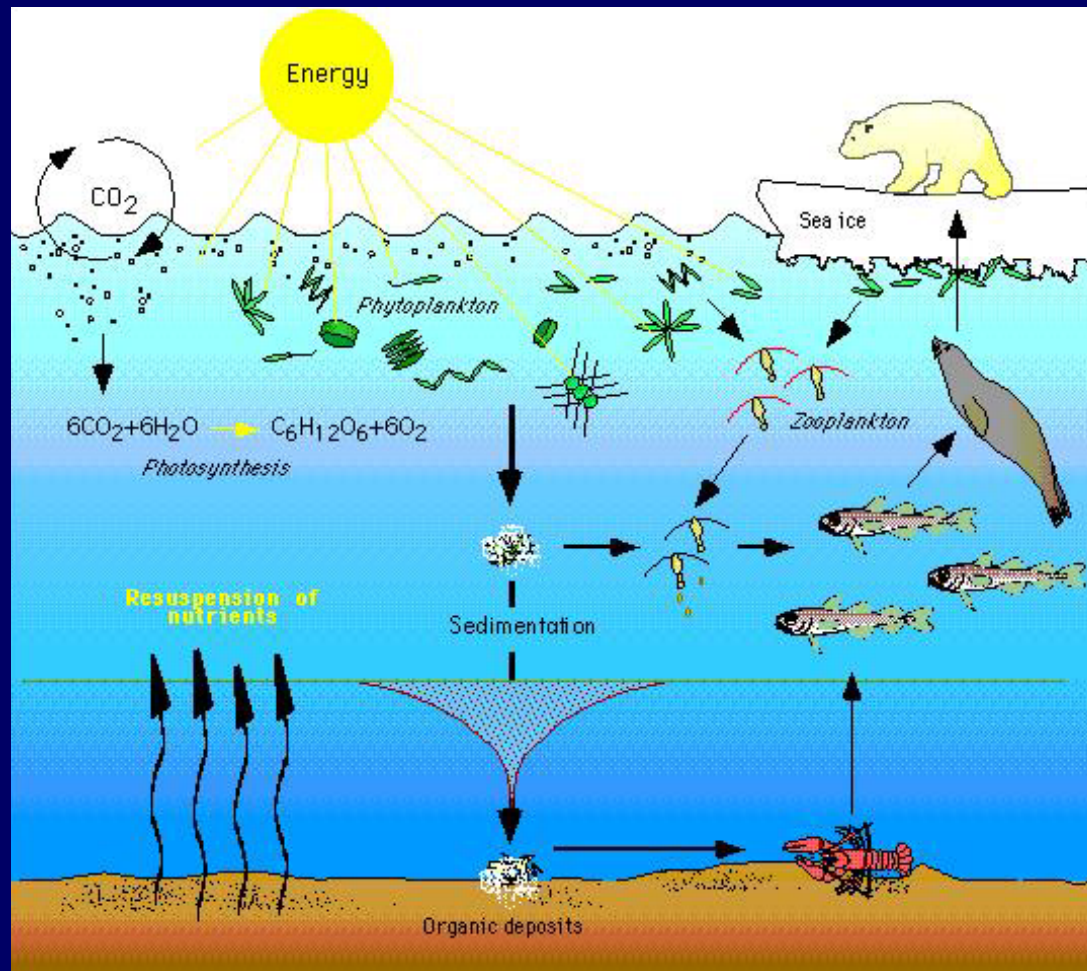
REDUKCIJA SUMPORA



## Redukcija sumpora

- **ASIMILACIJSKA REDUKCIJA** – ima za cilj unošenje sumpora u stanicu
- **DISIMILACIJSKA REDUKCIJA** – ima za cilj dobivanje energije (sumpor nije potreban)
- Neke bakterije sudjeluju u redukciji sulfata u **anoksičnim** uvjetima ( $\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{S}^{2-}$ ) (npr. *Desulfovibrio*, *Desulfomonas*)
- Reducirane forme sumpora koriste **kemotrofne** bakterije (npr. *Thiobacillus*)
- Neke fotoautotrofne bakterije (npr. purpurne i zelene sumporne bakterije) koriste reducirani sumpor kao redukcijski agens ( $\text{S}^{2-} \rightarrow \text{S}^0 + 2\text{e}^-$ ); sumpor ima ulogu atoma kisika u  $\text{H}_2\text{O}$  kao elektron donora

# REGENERACIJA HRANJIVA U EKOSISTEMIMA



## **Regeneracija hranjiva u kopnenim i morskim ekosistemima**

- Da bi se mogla održati proizvodnja kakvu nalazimo u pojedinim ekosistemima, hranjiva moraju biti regenerirana unutar sustava (stopa dotoka hranjiva izvan sustava u pravilu nije dovoljna za danu proizvodnju)
- Regeneracija hranjiva u forme prikladne za njihovu ponovnu asimilaciju predstavlja ključ razumijevanja regulacije funkcioniranja ekosistema
- Iako su kemijske i biokemijske transformacije koje su uključene u proces regeneracije u osnovi iste, procesi razgradnje se razlikuju između kopnenih i vodenih sustava:
  - U kopnenim sustavima većina hranjiva kruži kroz detritus u površinskom dijelu tla
  - U većini vodenih sustava sediment je isključivi izvor regeneriranih hranjiva

# Regeneracija hranjiva u vodenim ekosistemima

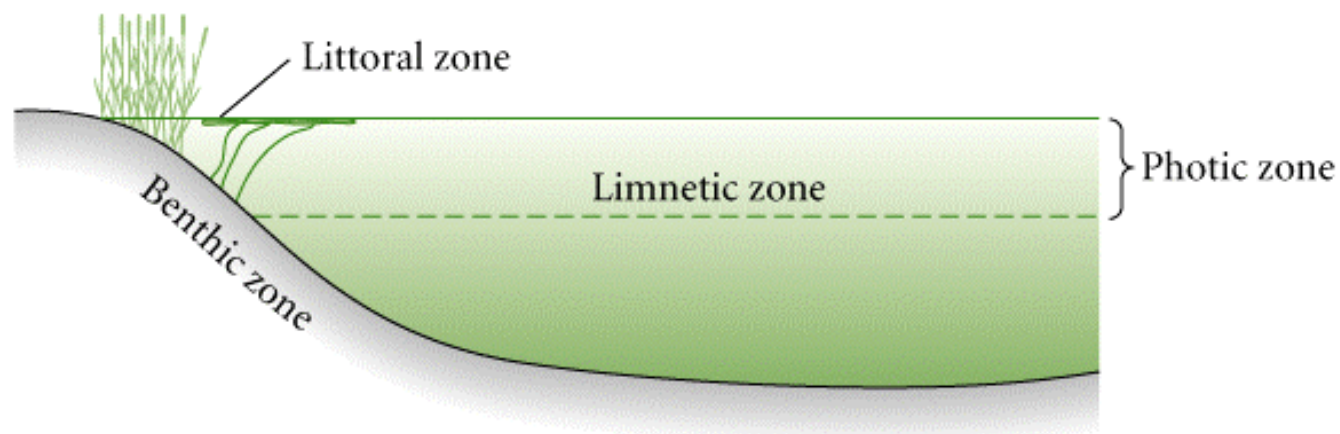
- Sedimenti u vodenim ekosistemima se mogu usporediti sa slojem detritusa u tlu u kopnenim ekosistemima. Ipak, između njih postoje dvije značajne razlike:
  - 1. Regeneracija hranjiva iz detritusa u tlu se događa u blizini biljnog korjenja, dok vodene biljke asimiliraju hranjiva iz vode i to u fotičkoj zoni koja je često vrlo udaljena od sedimenta
  - 2. Razgradnja kopnenog detritusa se odvija aerobno (dakle brzo), dok su vodeni sedimenti često anoksični, što usporava većinu biokemijskih transformacija



# Regeneracija hranjiva u vodenim ekosistemima

- U vodenim ekosistemima proizvodnja ovisi o brzini asimilacije regeneriranih hranjiva unutar fotičke zone (biljke asimiliraju regenerirani dušik vrlo brzo, pogotovo u hranjivima siromašnim vodama)
- Održavanje visoke proizvodnje ovisi o blizini sedimenta fotičkoj zoni, ili o jakoj izmjeni između pridnenih i površinskih slojeva, ako ne stalnoj onda barem povremenoj

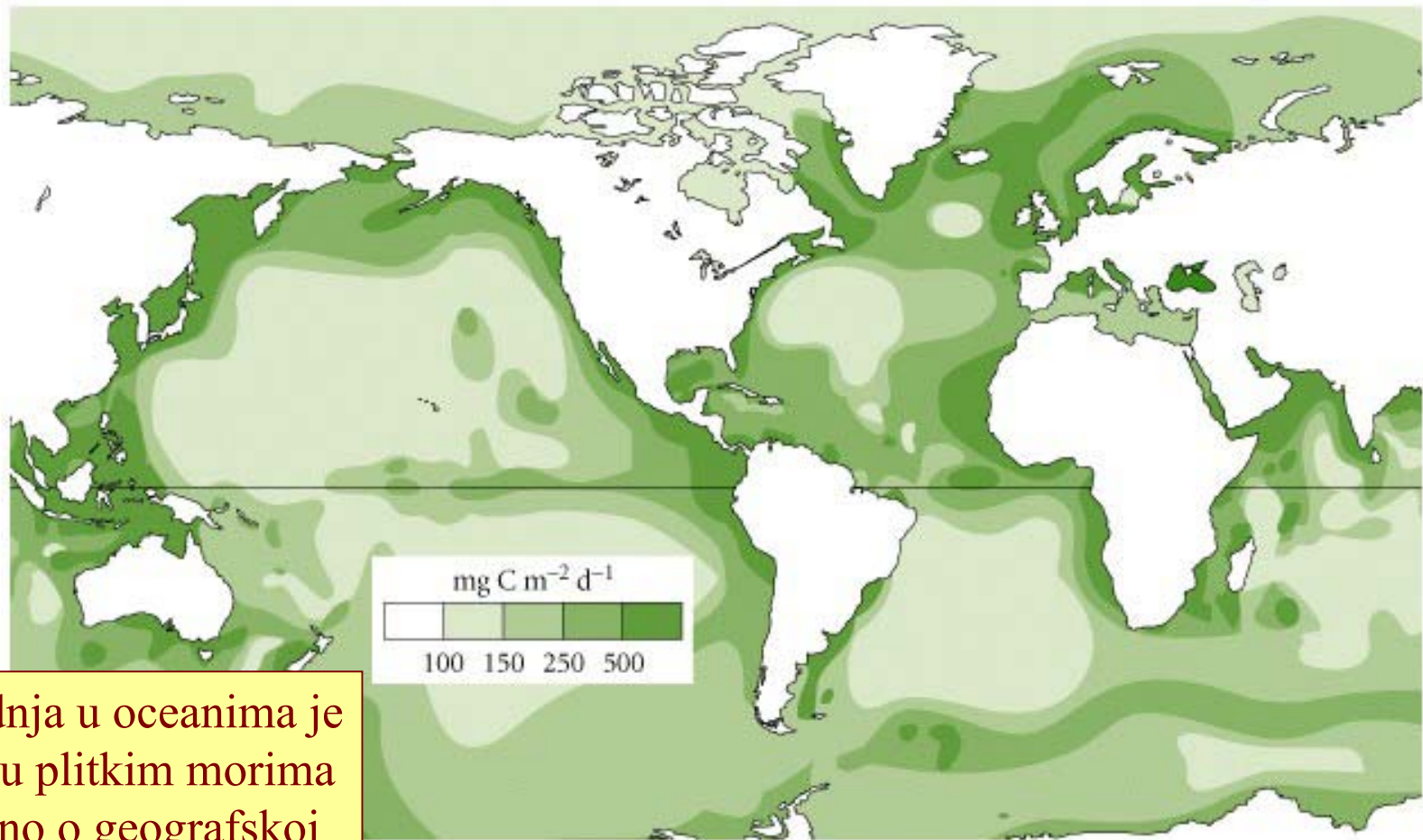
## U plitkim vodama sediment igra značajnu ulogu u regeneraciji hranjiva



Većina je svjetskih jezera relativno plitka i recirkulacija hranjiva kroz detritus je dominantan proces u regeneraciji hranjiva (to pogotovo vrijedi za produktivna (eutrofna) jezera s vrlo izraženom litoralnom vegetacijom)

## M. Šolić: Ekologija mora

U dubokim neproduktivnim (oligotrofnim) jezerima i otvorenim oceanima, gdje je sediment udaljen od fotičke zone, mineralizacija sedimenta ima manju ulogu u regeneraciji hranjiva



Proizvodnja u oceanima je najveća u plitkim morima (neovisno o geografskoj širini), te u područjima upwellinga

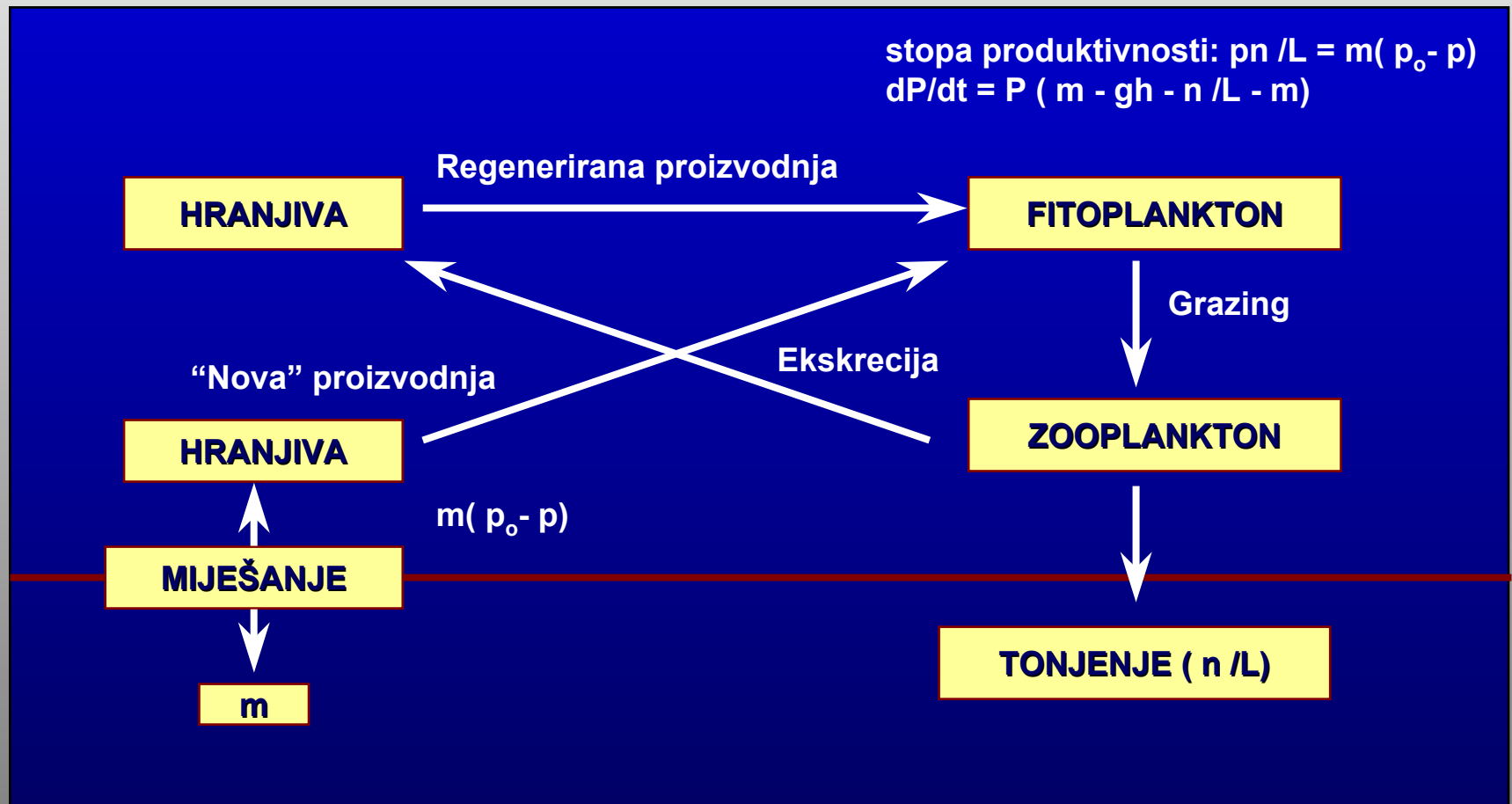
# **Temperaturna stratifikacija sprječava vertikalno miješanje vode u vodenim ekosistemima**

- Vertikalno miješanje vode je neophodno za dovođenje regeneriranih hranjiva iz sedimanta u površinske vode (fotičku zonu) u kojima se događa primarna proizvodnja
- Vertikalno miješanje vodenog stupca može biti posljedica:
  - 1. Vjetrova koji uzrokuje turbulentno miješanje plitkih voda
  - 2. Hlađenja površinskog sloja vode (termalna konvekcija)
  - 3. Evaporacije u morskim ekosistemima koja nadilazi dotok slatke vode (halina konvekcija)

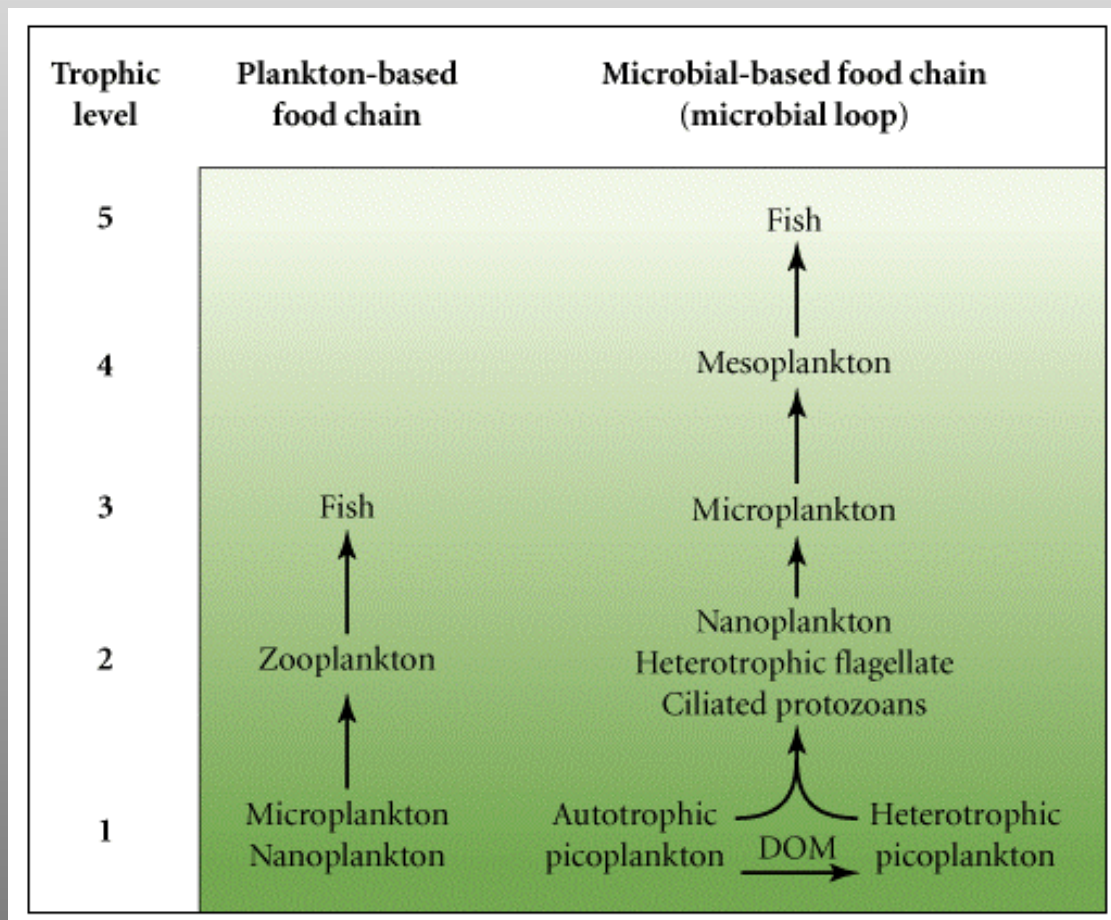
**Sezonski ciklus stratifikacije vodenog stupca utječe na proizvodnju fitoplanktona u jezerima i morima na srednjim geografskim širinama (termalna stratifikacija je slabo ili nikako izražena na visokim i niskim geografskim širinama)**

<b>SEZONA</b>	<b>PROCES</b>	<b>PROIZVODNJA</b>
<b>Ljeto</b>	<b>Stratifikacija izražena, hranjiva potrošena</b>	<b>Niska</b>
<b>Jesen</b>	<b>Vertikalno miješanje vode dovodi hranjiva u fotičku zonu</b>	<b>Visoka (jesenska cvatnja)</b>
<b>Zima</b>	<b>Homogen vodeni stupac, malo svjetla, česte oluje</b>	<b>Niska</b>
<b>Proljeće</b>	<b>Stratifikacija se uspostavlja, hranjivima bogata voda ostaje uhvaćena u fotičkoj zoni</b>	<b>Visoka (proljetna cvatnja)</b>

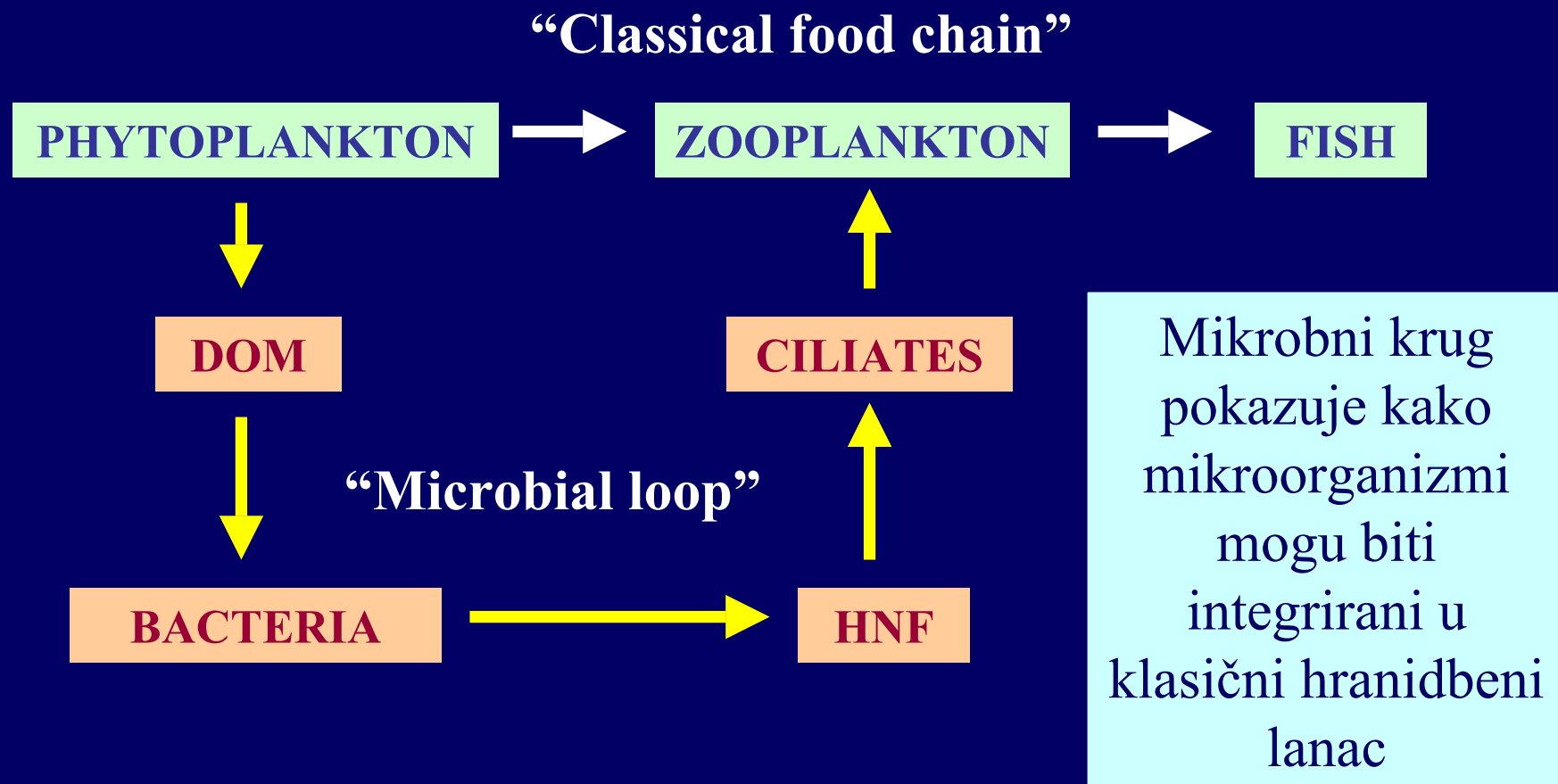
# Proizvodnja u stratificiranim oceanskim vodama



# U neproduktivnim otvorenim vodama (mora i jezera) mikroorganizmi dominiraju u hranidbenoj mreži i kruženju hranjiva



# Mikrobni krug

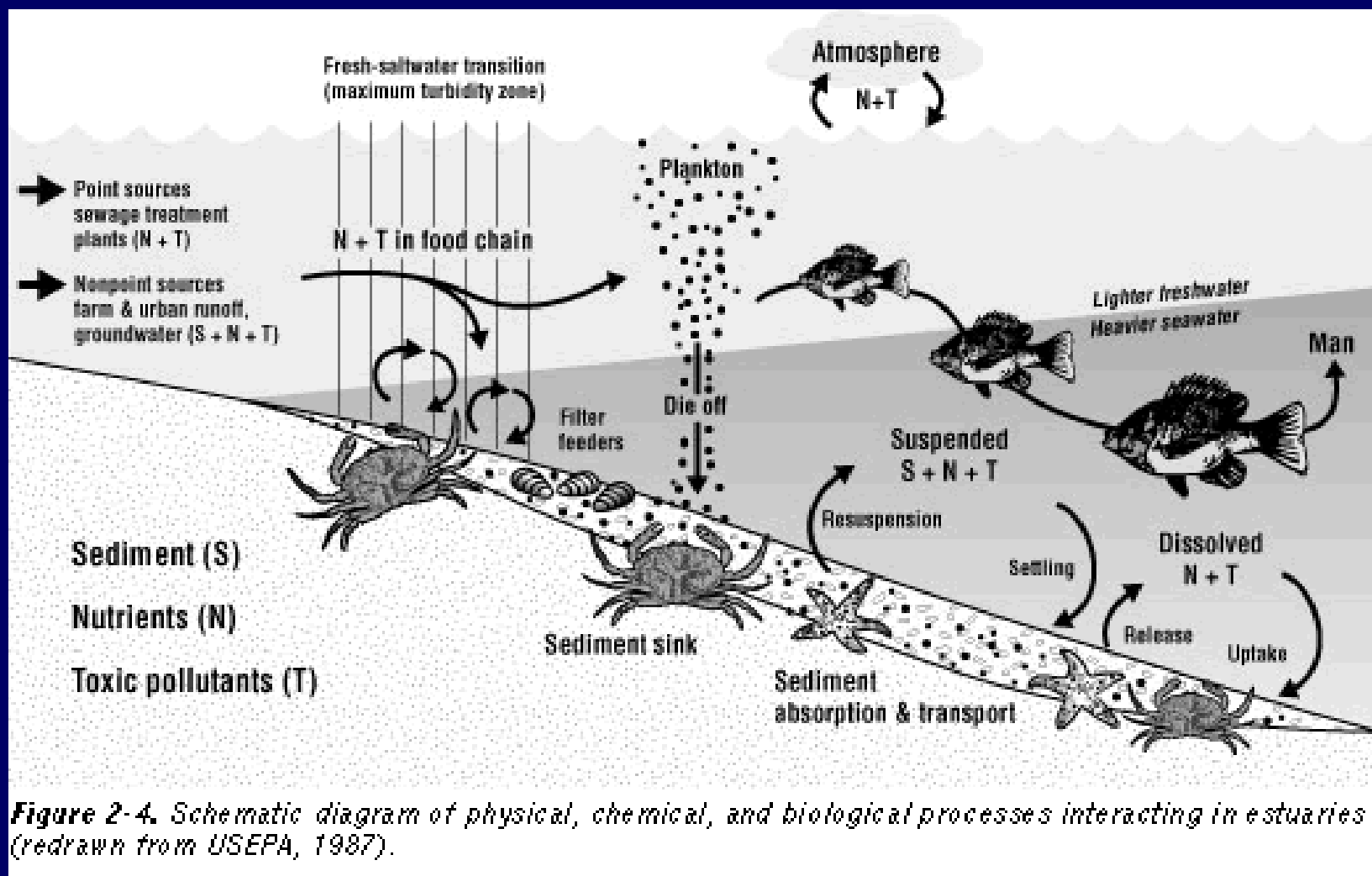




## **Estuariji i slane močvare mogu biti regeneratori hranjiva za morske ekosisteme**

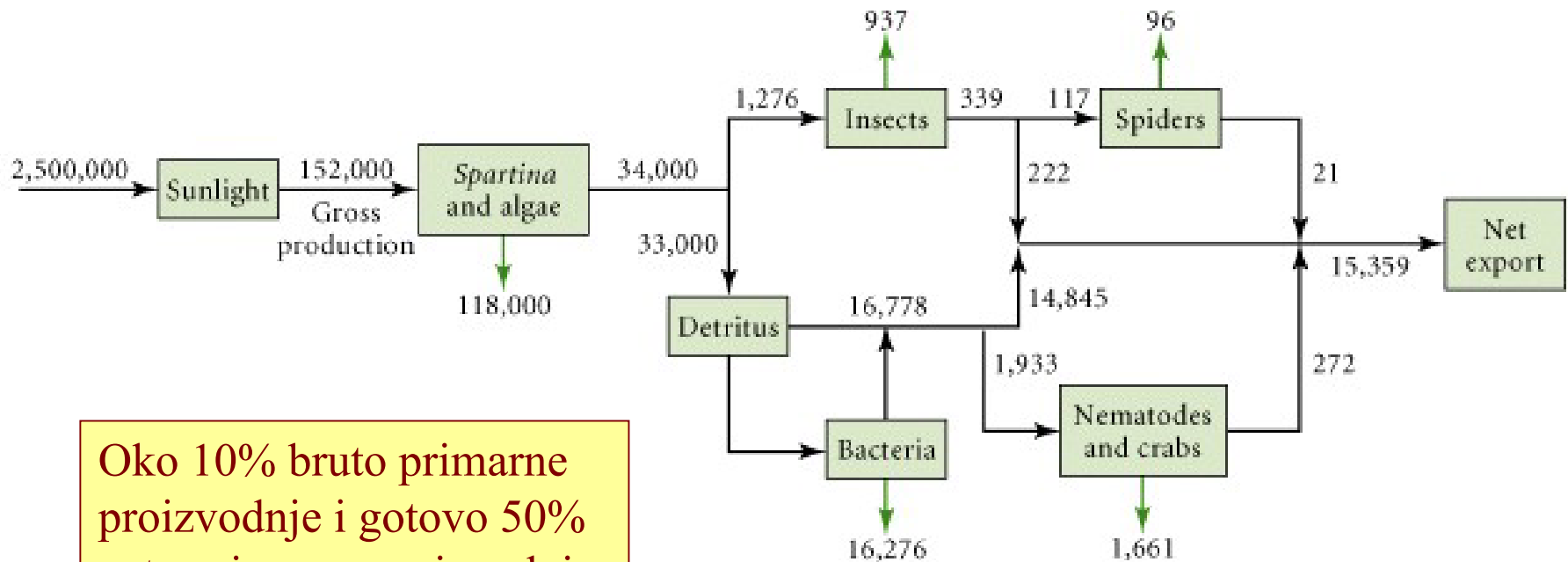


Plitki estuariji i slane močvare (ekosistemi koji se nalaze u zoni plime i oseke s uronutom vegetacijom) spadaju među najproduktivnije ekosisteme na Zemlji, i njihov se utjecaj širi u smjeru mora kroz neto-eksport proizvodnje



# M. Šolić: Ekologija mora

Dijagram protoka energije za slanu močvaru Georgia (protoci su izraženi u  $\text{kJ m}^{-2} \text{god}^{-1}$ )



Oko 10% bruto primarne proizvodnje i gotovo 50% neto primarne proizvodnje slana močvara preda morskom ekosistemu

→ Respiracija