

5. Metabolizmus

Metabolizmus

- Každá živá buňka je otevřený systém, který je charakteristický výměnou s prostředím (hmoty, energie, informace)
- Živiny z prostředí do buňky → transformace – tvorba energie, syntéza biomolekul → exkrece metabolitů

Tok hmoty, energie a informace buňkou →

metabolizmus

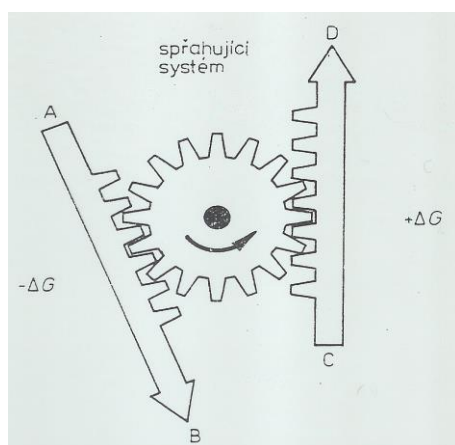
Metabolizmus

- Metabolická aktivita mikroorganismů je mimořádně různorodá
- Metabolizmus buňky (tok hmoty a energie buňkou) tvoří celek, který má dvě protichůdné kategorie

katabolizmus

anabolizmus

Metabolizmus



Spřažení
katabolizmu
(exergonické reakce)
a anabolizmu
(endergonické reakce)

Metabolizmus

- **Katabolizmus** – představuje degradativní procesy vedoucí ke tvorbě energie ($-\Delta G$)
- **Anabolizmus** – vede k syntéze jednotlivých složek buňky a je spojen se spotřebou energie ($+\Delta G$)
- **Katabolizmus a anabolizmus jsou dva protichůdné procesy, které vedle sebe existují v prostoru a čase a vzájemně se podmiňují**

Metabolizmus

- Proces metabolizmu je souhrn biochemických reakcí, které
 - a/ probíhají posloupně a jsou “seřazený” do řad – **metabolické dráhy**
 - b/ uzavřeny do kruhu – **cykly**
- Výsledný metabolit může vznikat více než jednou metabolickou drahou – **alternativní metabolické dráhy**

Makroergické vazby

- Energetický metabolismus probíhá při spřažení exergonických a endergonických reakcí
- **Pro uskutečnění syntézy je nutné, aby součet změn volné energie obou spřažených reakcí byl negativní nebo alespoň s nulovou hodnotou**
- Syntetické reakce probíhají většinou za účasti energeticky bohaté sloučeniny (ATP, látka schopná vytvářet makroergickou vazbu)
- Díky vysoké hladině ΔG makroergické vazby, se aktivuje substrát a umožní se tím vlastní reakce

Makroergické vazby

- Změny ΔG° při hydrolýze některých sloučenin

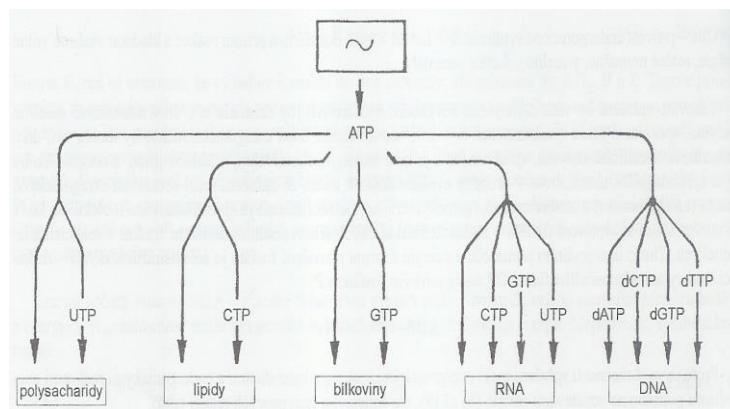
	- ΔG° (KJ.mol ⁻¹)
• $\text{ATP} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ADP} + \text{P}_{\text{an}}$	30,9
• $\text{ATP} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{AMP} + \text{pyrofosfát}$	31,8
• $\text{Glu-6P} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Glu} + \text{P}_{\text{an}}$	12,5
• $\text{Acetylfosfát} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HAc} + \text{P}_{\text{an}}$	43,9
• $\text{P-enolpyruvát} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{pyruvát} + \text{P}_{\text{an}}$	54,4
• $\text{Acyl-KoA} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HAc} + \text{KoASH}$	32,2

ATP

- ATP – univerzální přenašeč energie – univerzální donor fosfátu v anabolických reakcích
- **Soustava $ADP \leftrightarrow ATP$ je univerzálním “spřahovačem“ katabolizmu a anabolizmu**
- Kterákoli exergonická reakce může “pohánět“ jakoukoli endergonickou reakci
- Proto je metabolismus jako celek vysoce spolehlivý

ATP

Centrální úloha ATP při syntéze biologických makromolekul



ATP

- Tvorba ATP

- ☺ na úrovni substrátu

- ☺ na úrovni membrány

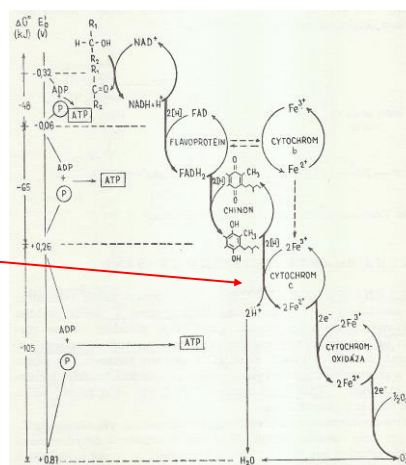
- * u prokaryot na cytoplazmatické membráně

- * u eukaryot na vnitřní membráně mitochondrií

Tvorba ATP na úrovni membrány

- **Respirační řetězec**

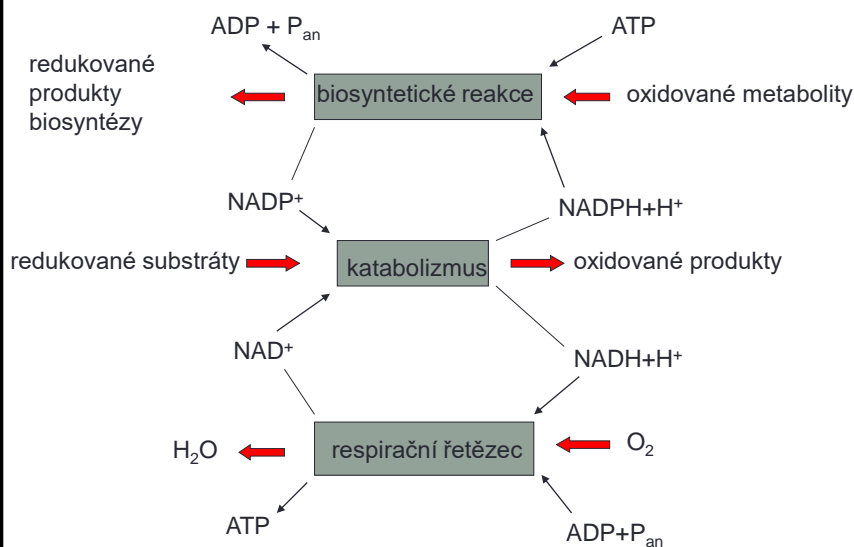
- ATP se generuje vytvářením potenciálu na membráně přechodem přes cytochromový řetězec



Role NAD(P) v metabolismu

- NAD(P) – univerzální přenašeč vodíku a elektronů
- Jeho redukovaná i oxidovaná forma volně cirkuluje v základní cytoplazmě
- Molekula NAD(P)⁺ je redoxním systémem
$$\text{NAD(P)}^+ + 2 \text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{NAD(P)H}^+ + \text{H}^+$$
- **NADH₂** je určeno především k redukci kyslíku a produkci ATP na úrovni membrány (exergonické reakce)
- **NADPH₂** je určeno především k redukcím v biosyntetických pochodech (endergonické reakce)

Role NAD(P) v metabolismu



Metabolizmus

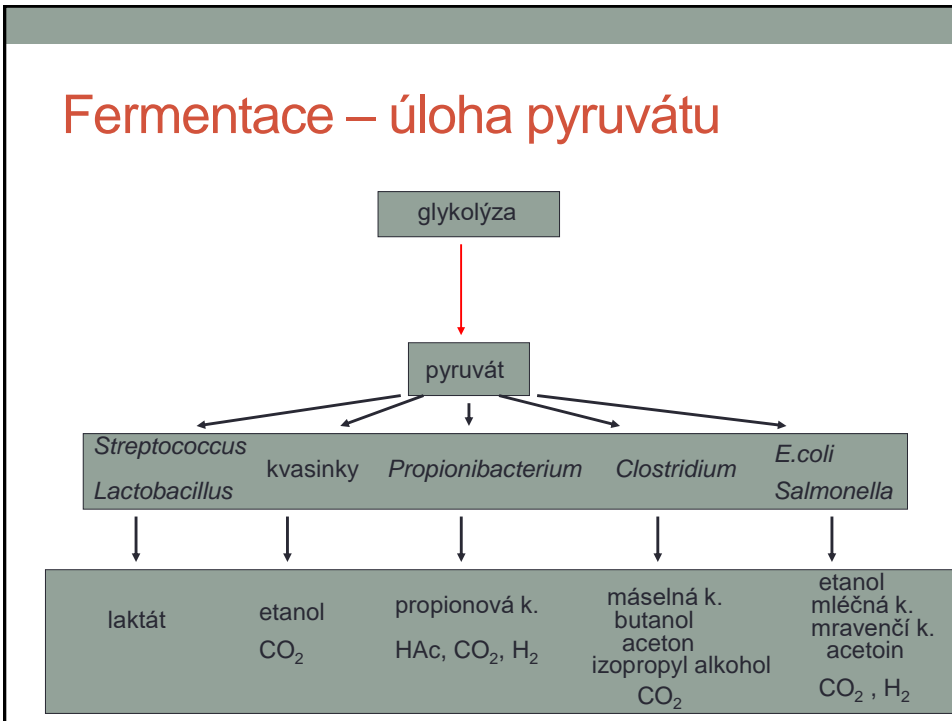
Rozdělení organismů ve vztahu ke zdrojům energie

- Chemotrofní
- Fototrofní

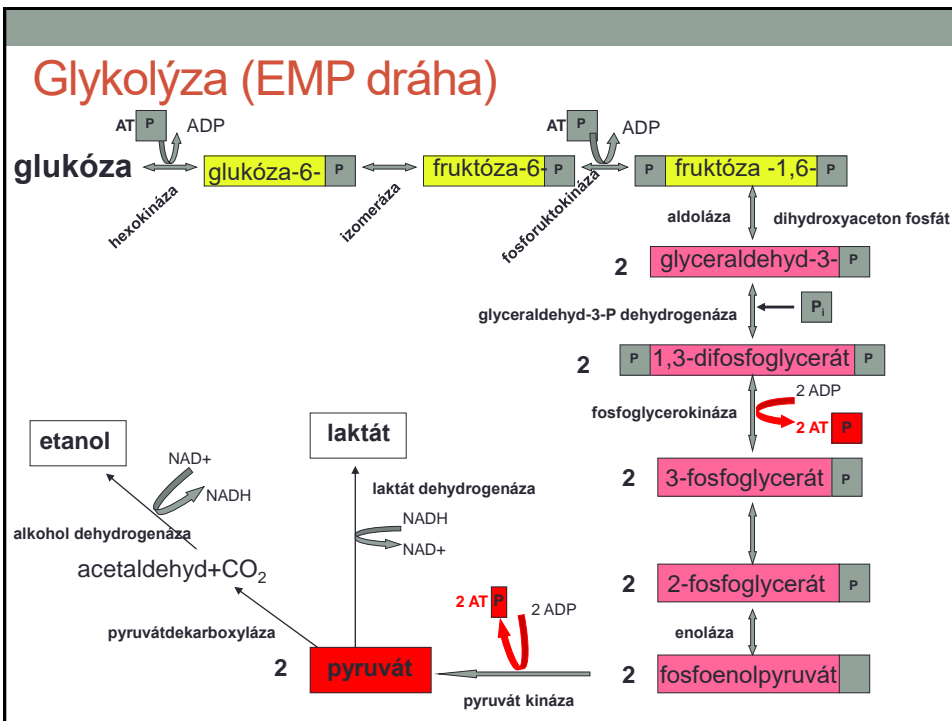
Vztah chemotrofů ke kyslíku

- Obligátně (striktně) aerobní
zisk energie → **aerobní respirace**
- Obligátně (striktně) anaerobní
zisk energie → **anaerobní respirace**
→ **fermentace**
- Fakultativně anaerobní
zisk energie → **aerobní respirace**
→ **anaerobní respirace**
→ **fermentace**
- Mikroaerofilní
- Aerotolerantní

Fermentace – úloha pyruvátu



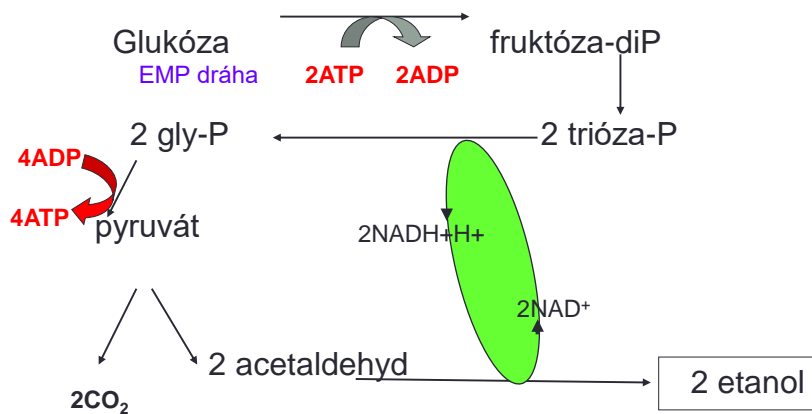
Glykolýza (EMP dráha)



Fermentace

- **Homofermentativní kvašení** – konečným produktem je jedna látka v převažujícím množství (obvykle více než 90 %) - homofermentativní mléčné kvašení – *Lactobacillus acidophilus* → kyselina mléčná (acidofilní mléko)
- **Heterofermentativní kvašení** – konečným produktem je několik metabolitů (některý může převažovat) – máselné kvašení - *Clostridium* → kyselina máselná, butanol, izopropylalkohol, aceton

Etanolové kvašení u kvasinek

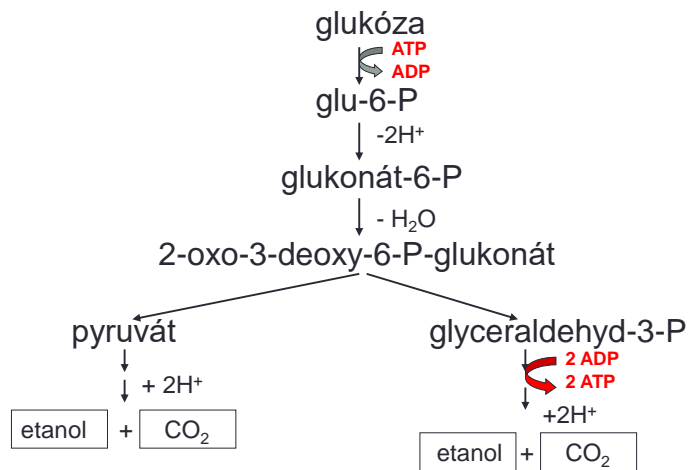


Čistý výtěžek : 2 ATP/mol glukózy

U bakterií pouze u *Sarcina ventriculi*

Etanolové kvašení u bakterií

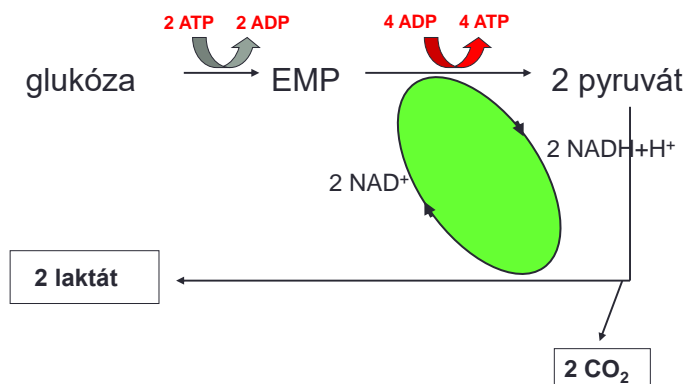
ketodeoxyglukonátová (Entner-Doudorofova) dráha



Čistý výtěžek: 1 ATP/mol glukózy

Organismus: *Zymomonas*

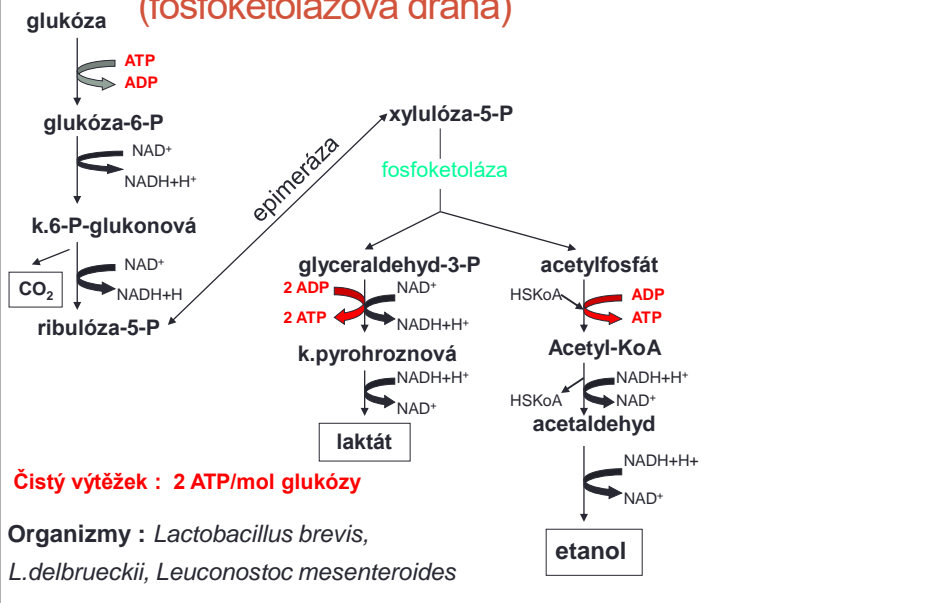
Homofermentativní mléčné kvašení



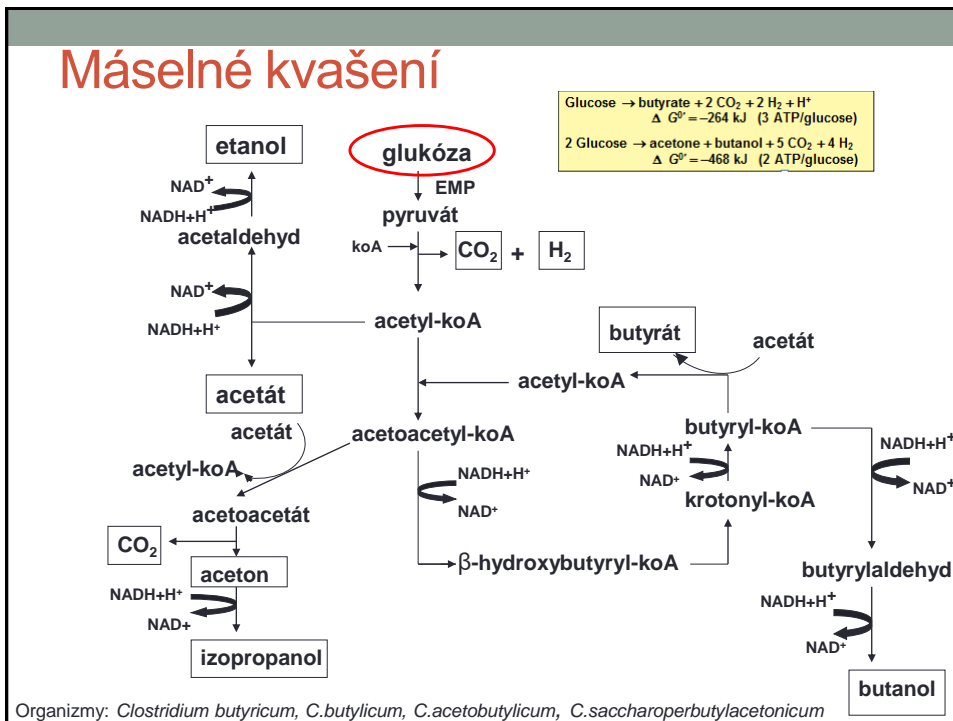
Čistý výtěžek : 2 ATP/mol glukózy

Organizmy : *Lactobacillus acidophilus*, *L.bulgaricus*, *L.casei*,
L. leichmannii, *Streptococcus lactis*

Heterofermentativní mléčné kvašení (fosfoketolázová dráha)



Máselné kvašení



Tvorba energie na úrovni membrány

- **Aerobní respirace**
- Anaerobní respirace
- Fototrofie

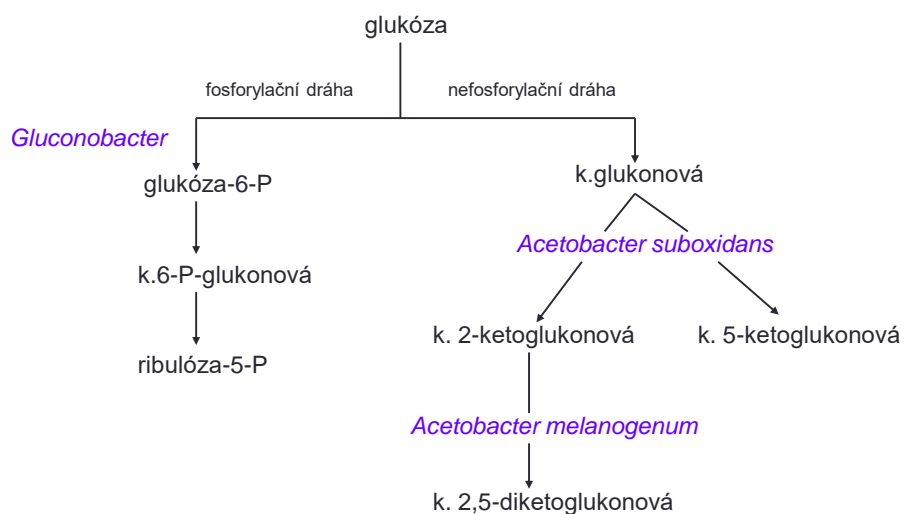
Tvorba energie na úrovni membrány

- **Aerobní respirace**
 - neúplná oxidace substrátu
 - primárních alkoholů
 - glukózy
 - úplná oxidace substrátu
 - Krebsův cyklus
 - Cyklus dikarbonových kyselin
 - Cyklus kyseliny glyoxalové
 - Pentózový cyklus
(hexózomonofosfátová dráha)

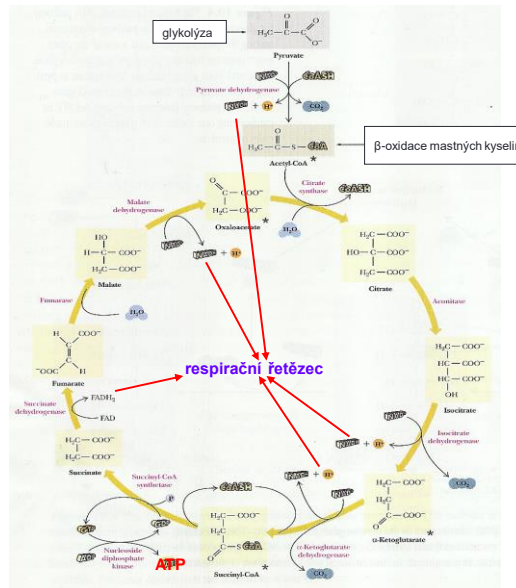
Neúplná oxidace alkoholů

- Oxidace primárních alkoholů → kyseliny
- Oxidace sekundárních alkoholů → ketony

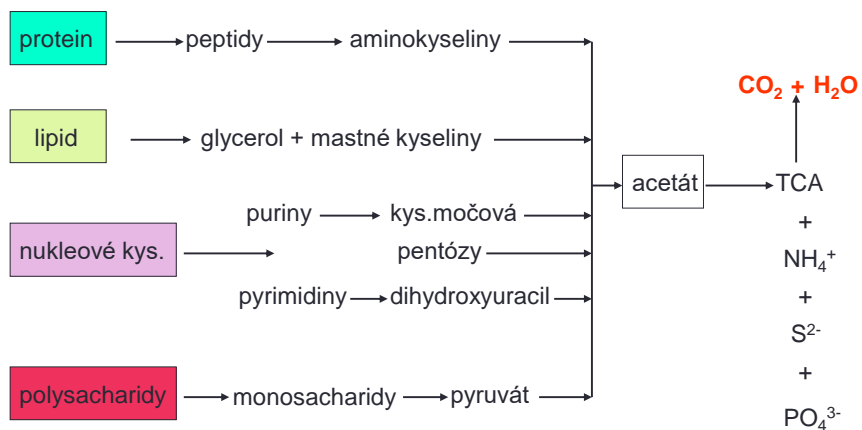
Neúplná oxidace glukózy



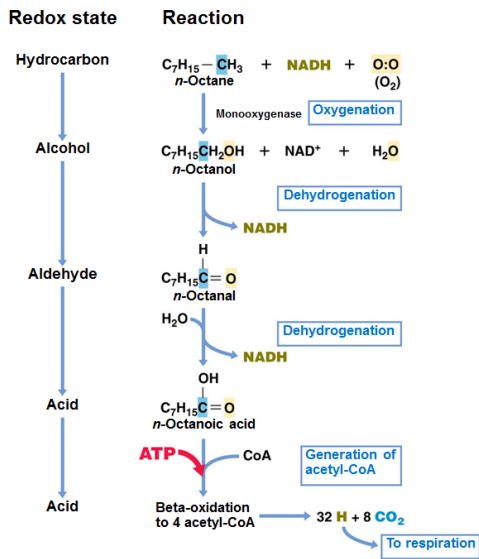
Úplná oxidace substrátu Krebsův cyklus



Oxidace biomolekul



Oxidace n-alkanů



- Monoterminální oxidace – první uhlík → alkohol kyselina → β-oxidace
- Diterminální oxidace – jsou oxidovány oba terminální uhlíky za vzniku směsi kyselin

Anaerobní respirace

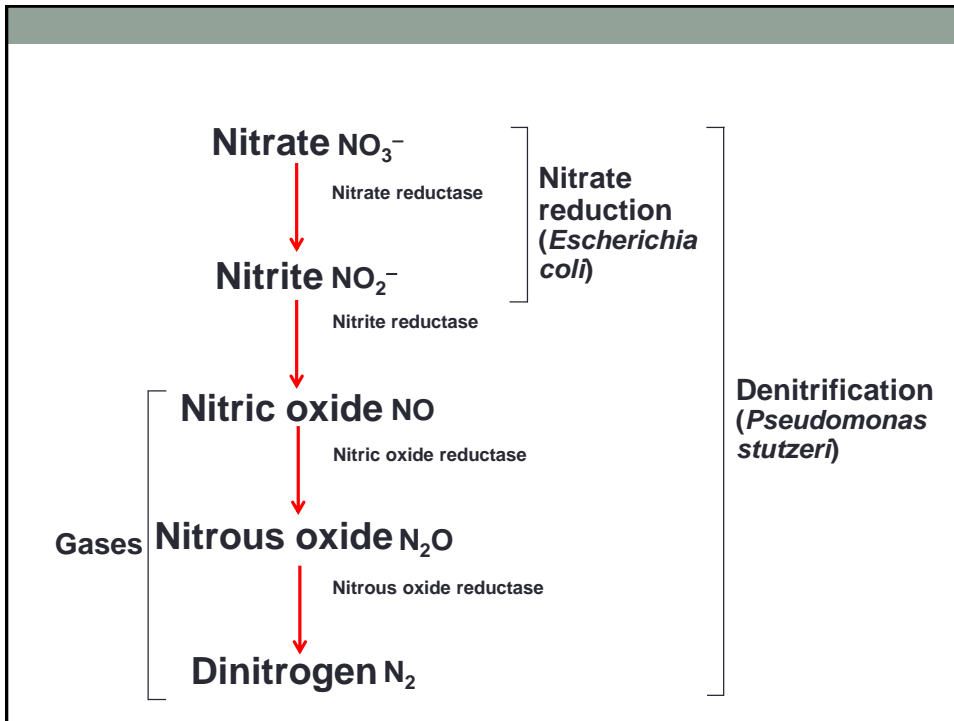
Anaerobní respirace

- Při anaerobní respiraci je organický substrát oxidován přenosem protonů a elektronů na kyslík vázaný v anorganické látce
- Elektrony a protony přenáší příslušné **cytochromreduktázy**
- Tímto způsobem získávají energii chemoorganotrofní bakterie, výjimečně chemolitotrofní
- U chemoorganotrofních bakterií je organická látka současně zdrojem energie i uhlíku

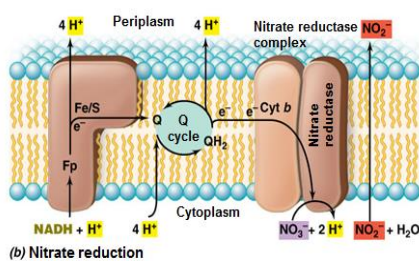
Anaerobní respirace

Procesy anaerobní respirace

- * redukce dusičnanů na dusitany
- * denitrifikace
- * desulfurikace
- * redukce CO_2 (metanové kvašení)



Redukce dusičnanů na dusitany



- Nitrát reductáza je membránově vázaný enzym obsahující molybden
- Syntéza nitrát reductázy je striktně blokována molekulovým kyslíkem
- Na 1 mol NO_3^- - 2 ATP
- Hromadění vytvořeného dusitanu potlačuje růst bakterií
- Organismy: *E. coli*, *Proteus vulgaris*, *Staphylococcus aureus* a další fakultativně anaerobní bakterie

Fp - flavoprotein

FeS – bílkovina s nehemově vázaným Fe-S

Redukce dusičnanů na dusitany

- Zdrojem vodíku a elektronů může být jakákoli organická látka

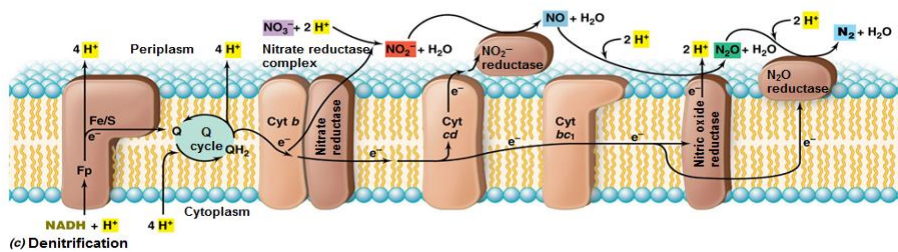


nebo



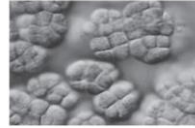
Denitrifikace

- **Denitrifikace** – proces redukce dusičnanů na N_2 nebo N_2O nebo směs obou plynů

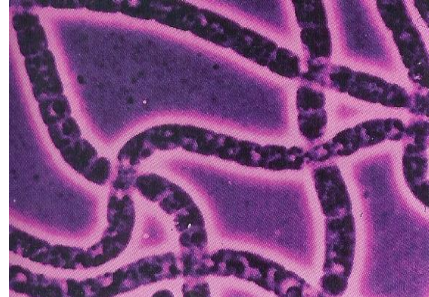


Desulfurikace

- Donorem elektronů a protonů je organická látka nebo plynný vodík
- Jako akceptor vystupuje síran, siřičitan, thiosíran, tetrathionát,
- Redukci těchto látek uskutečňují především anaerobní bakterie – zástupci rodů *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum*, *Desulfosarcina*, *Desulfonema* a některé *Archaea*



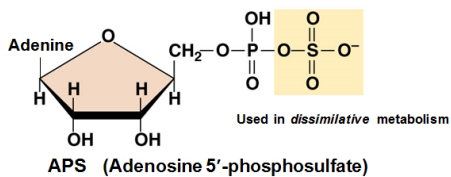
Fritz Widdel



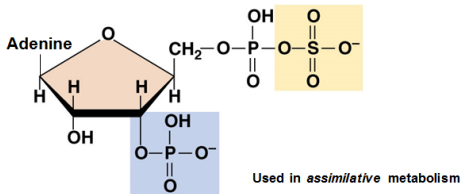
Desulfonema sp.

Desulfurikace

Při procesu desulfurikace vznikají energeticky bohaté sloučeniny **APS**
 - adenzin 5'-fosfosulfát a **PAPS** – fosfoadenozin-5'-fosfosulfát

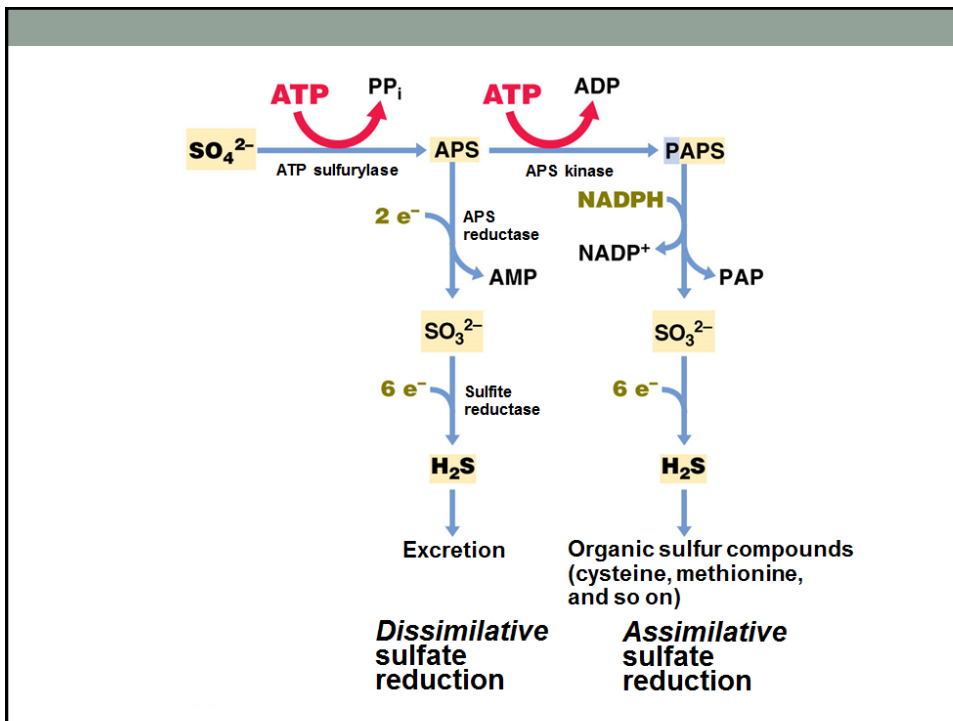


Využíván v disimilačním metabolismu



Využíván v asimilačním metabolismu

(a)



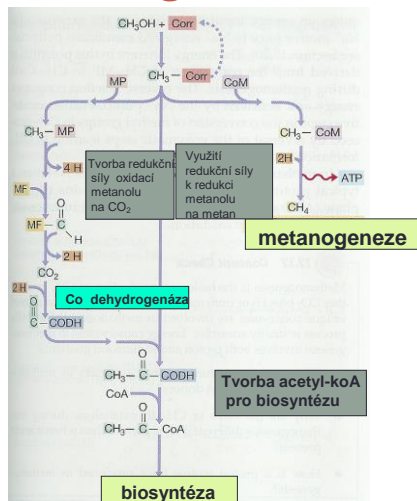
Redukce CO_2 a CO

- Konečným produktem je metan
- Organismy jsou **striktní** anaerobové (jsou podstatně citlivější ke kyslíku než denitrifikační nebo desulfurikační bakterie)
- Jsou dvě skupiny organismů využívajících jako akceptor protonů a elektronů CO_2

metanogenní
homoacetogenní

- Jako zdroj vodíku a elektronů **nikdy** nevyužívají cukry a aminokyseliny
- Jako substrát slouží H_2 , nižší mastné kyseliny, primární alkoholy, izoalkoholy.

Redukce CO₂ - donor metanol *metanogeneze*



Corr – protein obsahující korrinoid
CODH – karbonmonoxid dehydrogenáza

Redukce CO

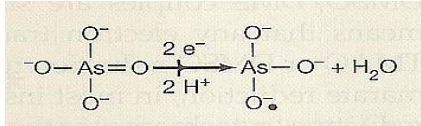


Sumárně

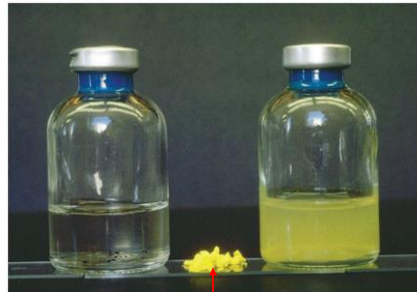


Organismus: *Methanobacterium formicum*

Některé alternativní akceptory elektronů v anaerobní respiraci



- *Desulfotomaculum auripigmentum* redukuje arsenát po redukcí síranů – As_2S_3 – je vytvářen intracelulárně i extracelulárně. Produkce “minerálů” se označuje jako **biomineralizace**.



As_2S_3

Tvorba As_2S_3 v prostředí je součástí detoxifikačních procesů v prostředí

Dianne K. Newman
and Stephen Tay

Chemolitotrofní bakterie

Energetický metabolismus chemolitotrofních bakterií

- Chemolitotrofní bakterie získávají energii procesy aerobní respirace
- Zdrojem energie je redukovaná anorganická látka
- Konečným akceptorem vodíku a elektronů je molekulový kyslík
- Zdrojem uhlíku je CO_2
- Bakterie jsou striktně aerobní

Energetický metabolismus chemolitotrofních bakterií

Podle povahy substrátu

- Oxidace amoniaku (nitrifikace)
- Oxidace sloučenin síry (sulfurikace)
- Oxidace sloučenin železa
- Oxidace vodíku
- Oxidace metanu

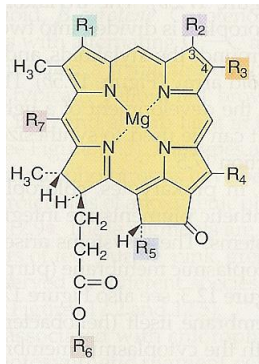
Fototrofní bakterie

Energetický metabolismus

fototrofních bakterií

- Fotofosforylace - proces transformace energie světelného kvanta do energie makroergické vazby
- Fototrofní mikroorganizmy
 - purpurové nesírné bakterie
 - heliobakterie
 - zelené sírné bakterie
 - purpurové sírné bakterie
 - cyanobakterie
 - halobakterie (bez bakteriochlorofylu)

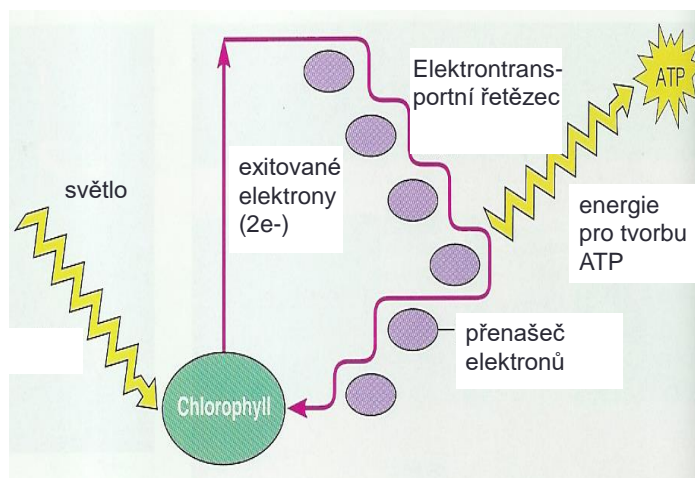
Bakteriochlorofyl



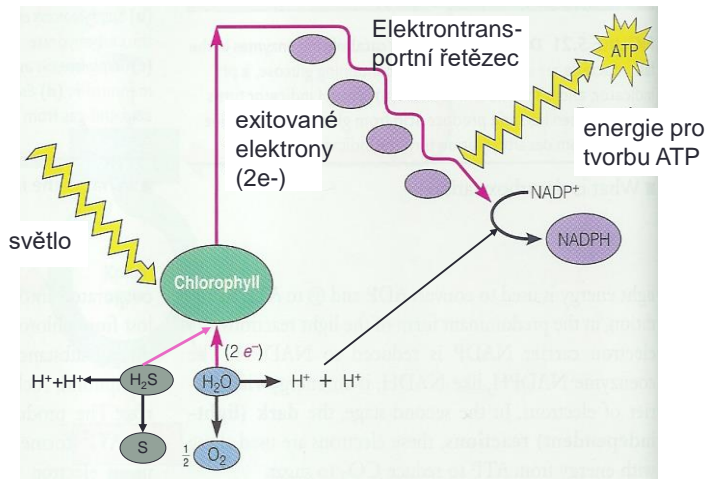
Bakteriochlorofyl

- a – purpurové (805, 830-890nm)
- b – purpurové (835-850, 1020-1040nm)
- c – zelené sirmé (745-755nm)
- c_s – zelené nesirmé (740nm)
- d – zelené sirmé (705-740nm)
- e – zelené sirmé (719-726nm)
- g – halobakterie (670, 788nm)

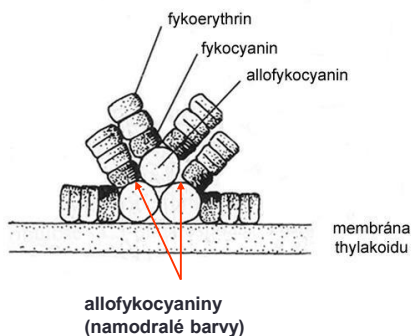
Cyklická fosforylace



Necyklická fosforylace



Fotosyntéza u sinic

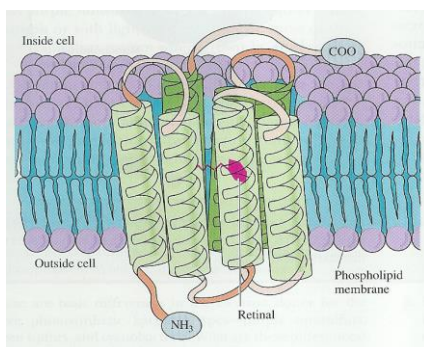


- na povrchu thylakoidálního váčku se nachází tzv. **fykobilizómy**
- jsou to drobné útvary (které obsahují specifická barviva, zvaná fykobiliny (fykobiliproteiny))
- v membráně thylakoidu jsou obsaženy chlorofyl a, α - i β -karoten a xantofyly (echinenon, myxoxanthofyl, zeaxantin)

Fotosyntéza bez chlorofylu halobakterie

- Pokud halobakterie rostou při nízké tenzi kyslíku, mohou syntetizovat "červené" skvrny v cytoplazmatické membráně - **bakteriorodopsin**
- Skvrny obsahují 7 bílkovinných molekul (α helix). Na jednu molekulu je připojen retinal
- Bakteriorodopsin (aldehyd vitamínu A) maximálně absorbuje při 570 nm

Fotosyntéza bez chlorofylu halobakterie



- Bakteriorodopsin absorbuje maximální množství energie ze záření
- Mimo bakteriorodopsinu halobakterie neobsahují další "foto" pigment
- **Tvorba energie není doprovázena tokem elektronů, ale tokem protonů**

ANABOLIZMUS

BIOSYNTÉZA

ANABOLIZMUS - BIOSYNTÉZA

- Při anabolizmu je ke tvorbě molekulových komplexů a struktur z malých molekul využívána volná energie získaná v procesech katabolizmu
- Procesy biosyntézy jsou regulovány tak, aby byla co nejefektivněji využívána energie a stavebního materiálu
- Katabolické a anabolické dráhy mají odlišné enzymy, kofaktory, donory vodíku a elektronů, regulaci, lokalizaci v buňce, ...
- Avšak řada enzymů se podílí na průběhu katabolických i biosyntetických drah

ANABOLIZMUS - BIOSYNTÉZA

- Fosfor ve formě fosfátu může být asimilován přímo
- Anorganický dusík a síra musí být většinou před inkorporací do buněčného materiálu redukován
- Autotrofové využívají v biosyntetických pochodech ATP a NADPH z fototrofie nebo oxidace anorganických látek pro redukci a inkorporaci CO_2 do organického materiálu

Fixace CO_2 při metabolismu mikroorganismů

Fixace redukcí

NADPH₂-dependentní

izocitrát
malát

Feredoxin-dependentní

pyruvát
2-oxoglutarát

ATP

karbamyl-P

Fixace aktivní

Komplex enzym+biotin+ CO_2

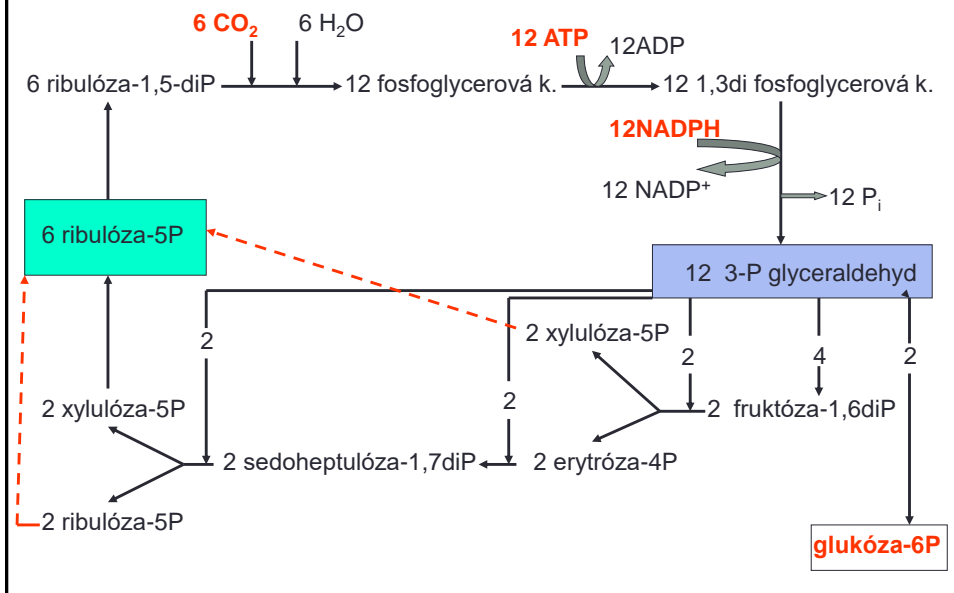
methylmalonyl-koA
malonyl-koA
oxalacetát

PEP

oxalacetát

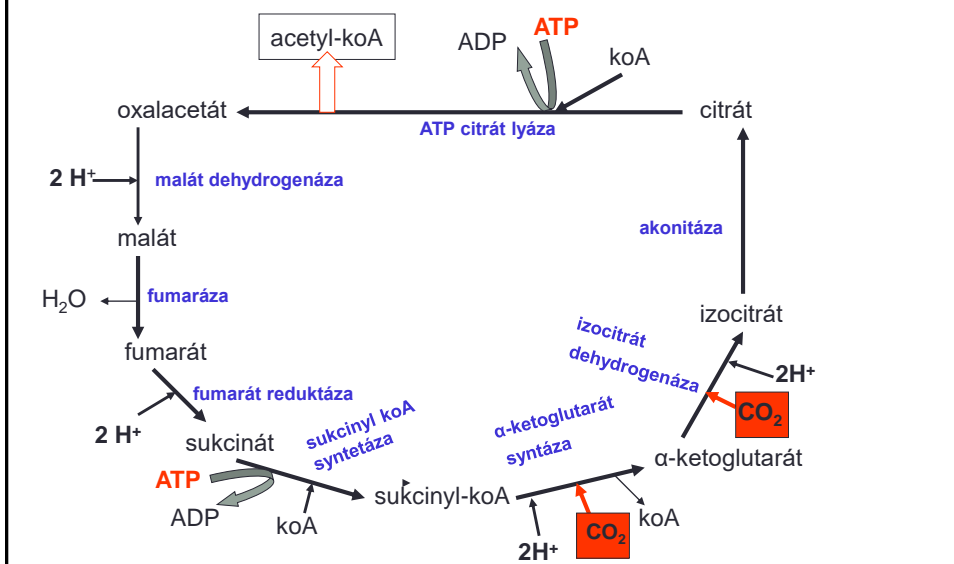
CO_2

Calvinův cyklus



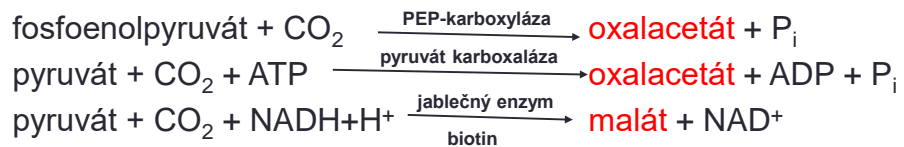
Nová dráha autotrofní fixace CO_2

Chlorobium limicola, Hydrogenobacter thermophilus, Desulfobacter hydrogenophilus

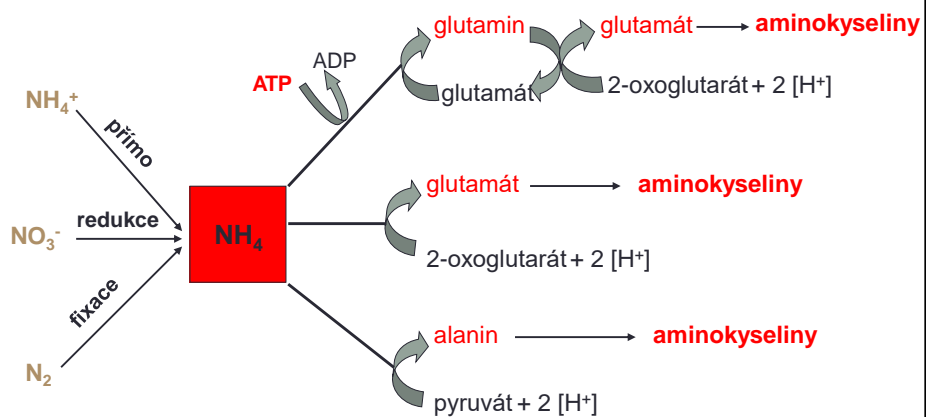


Fixace CO₂ heterotrofy

- Doplnování intermediátů Krebsova cyklu (anaplerotické reakce)

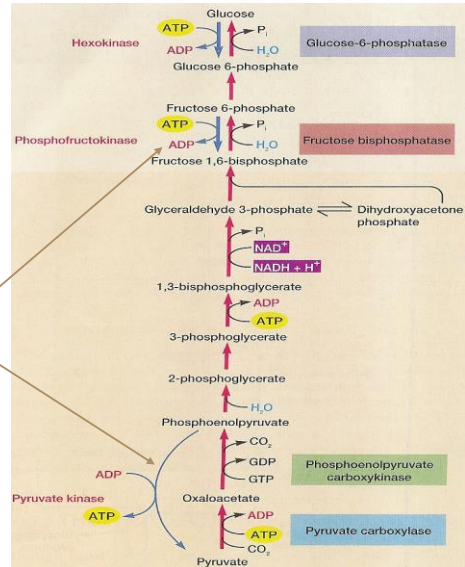


Asimilace dusíku



Syntéza monosacharidů

- **Glukoneogeneze** je využívána většinou mikroorganismů
- Jde o obrácenou glykolýzu (modré šipky naznačují průběh glykolýzy)



Syntéza monosacharidů

- **Reduktivní cyklus trikarbonových kyselin**

