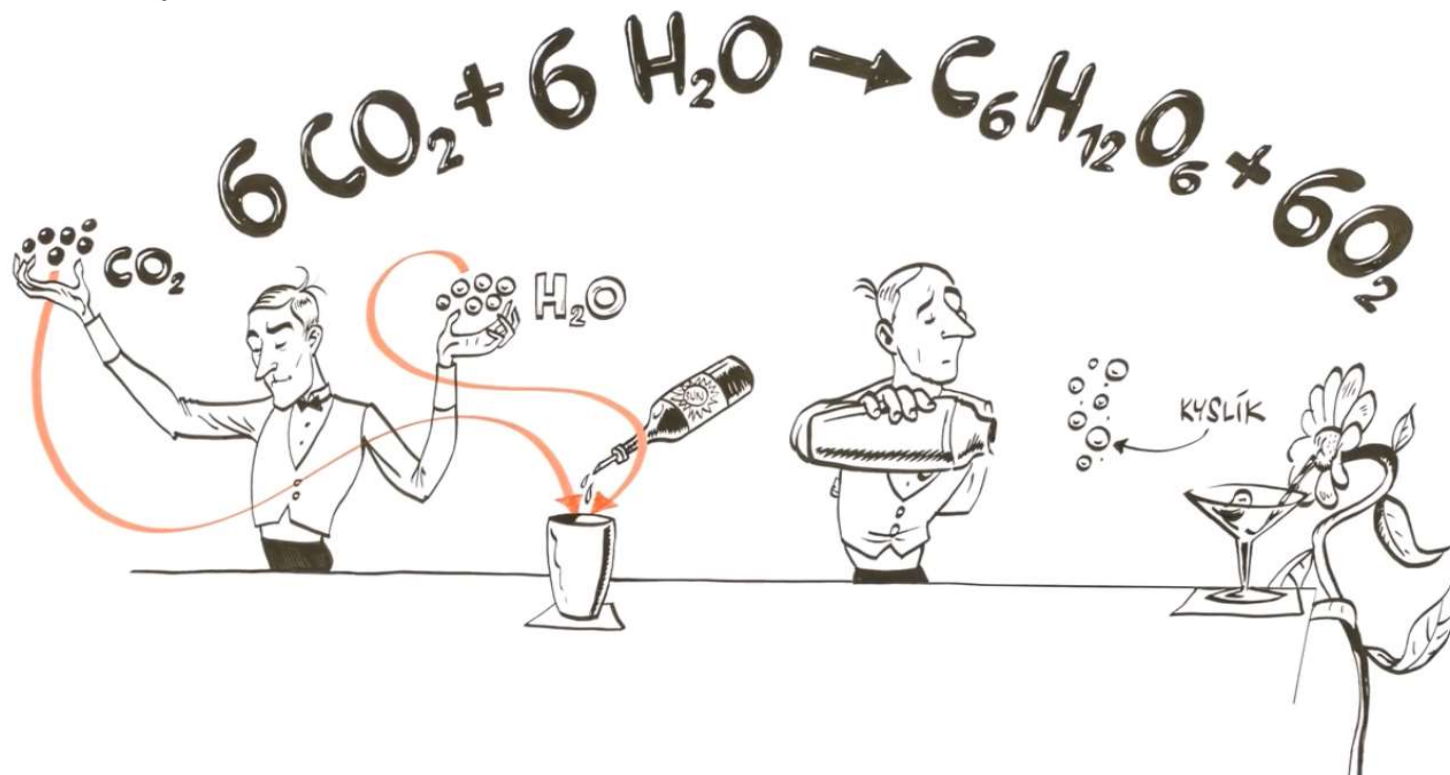


Fotosyntéza



František Škanta

Chloroplasty

Světlo absorbující pigmenty

Světelná reakce

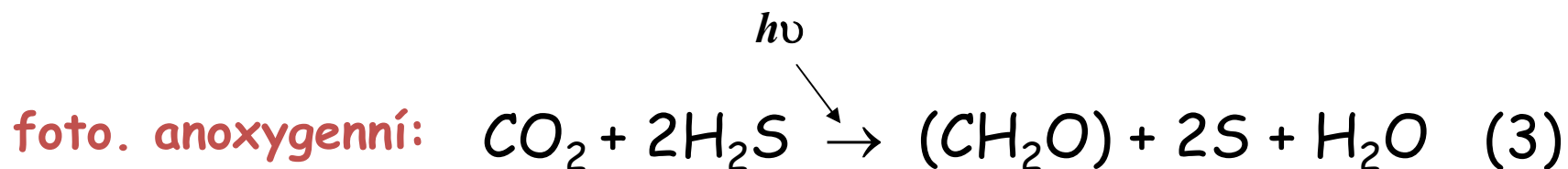
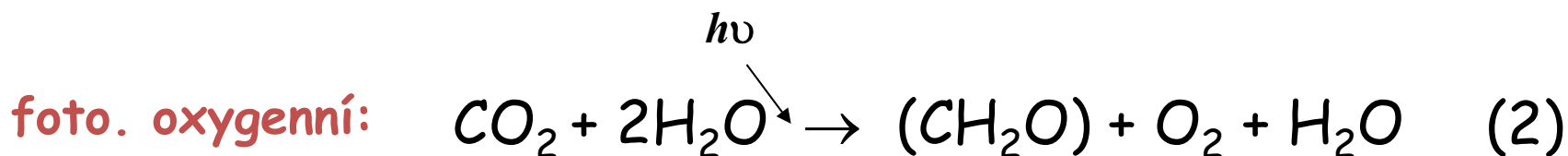
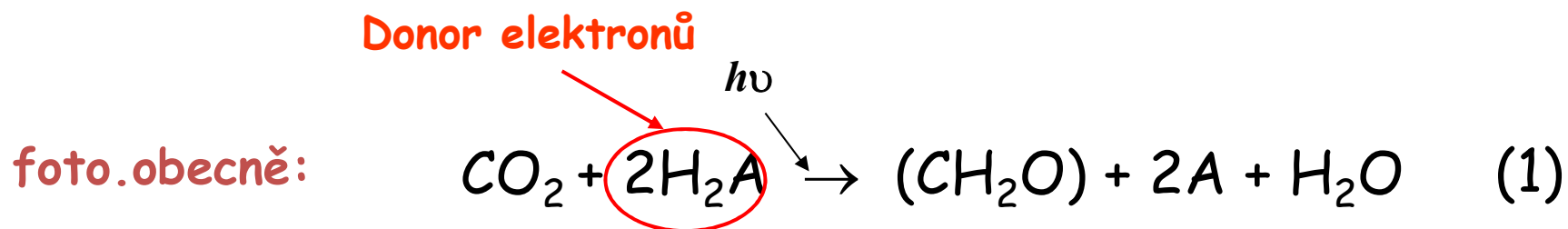
C_3 rostliny (Calvinův - Bensonův cyklus)

Fotorespirace

C_4 rostliny (Hatch-Slackův cyklus)

CAM rostliny

Přehled fotosyntézy - souhrnná reakce



Místo činu

Chloroplast

Vnější
membrána

Lamela

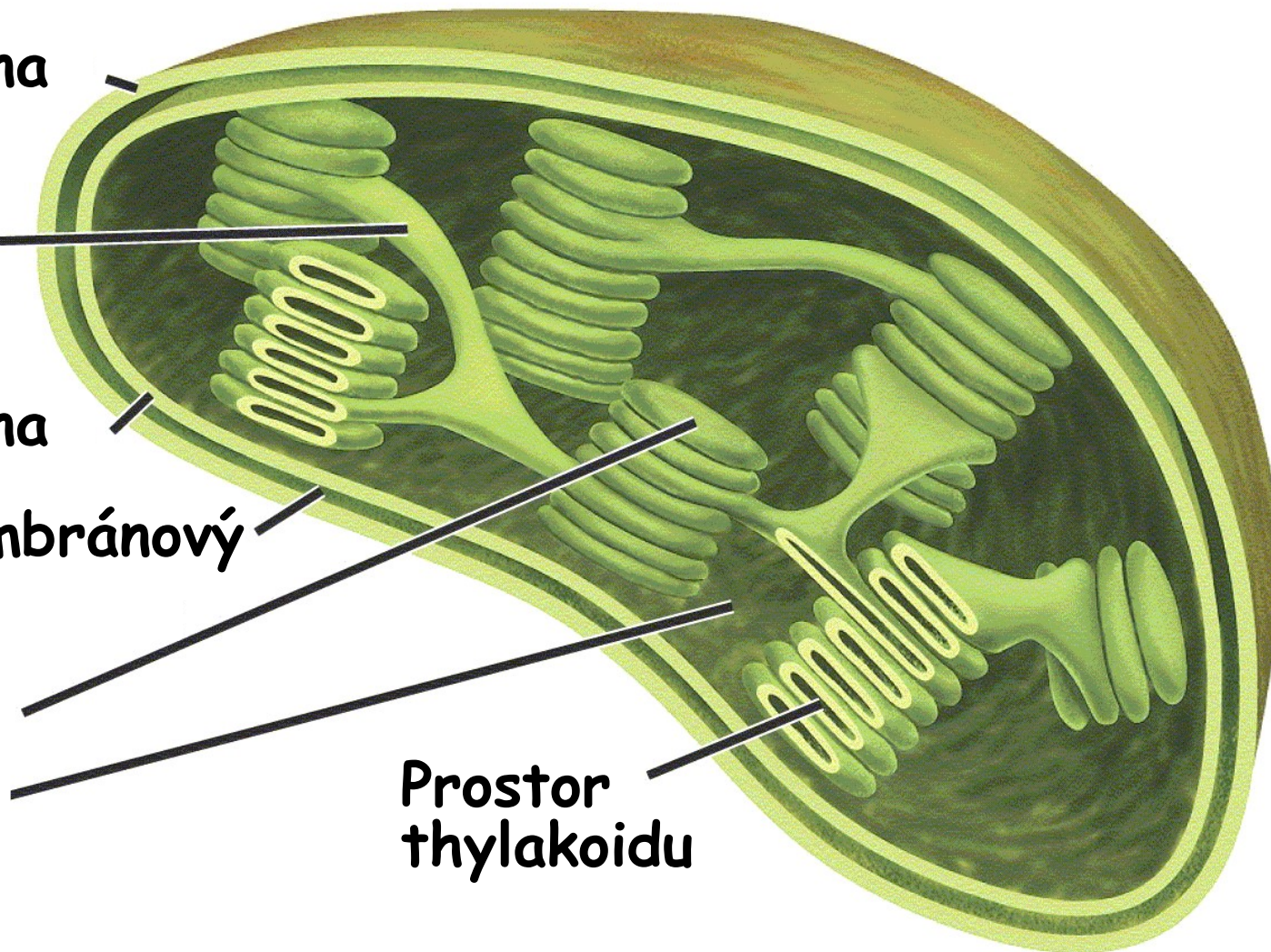
Vnitřní
membrána

Mezimembránový
prostor

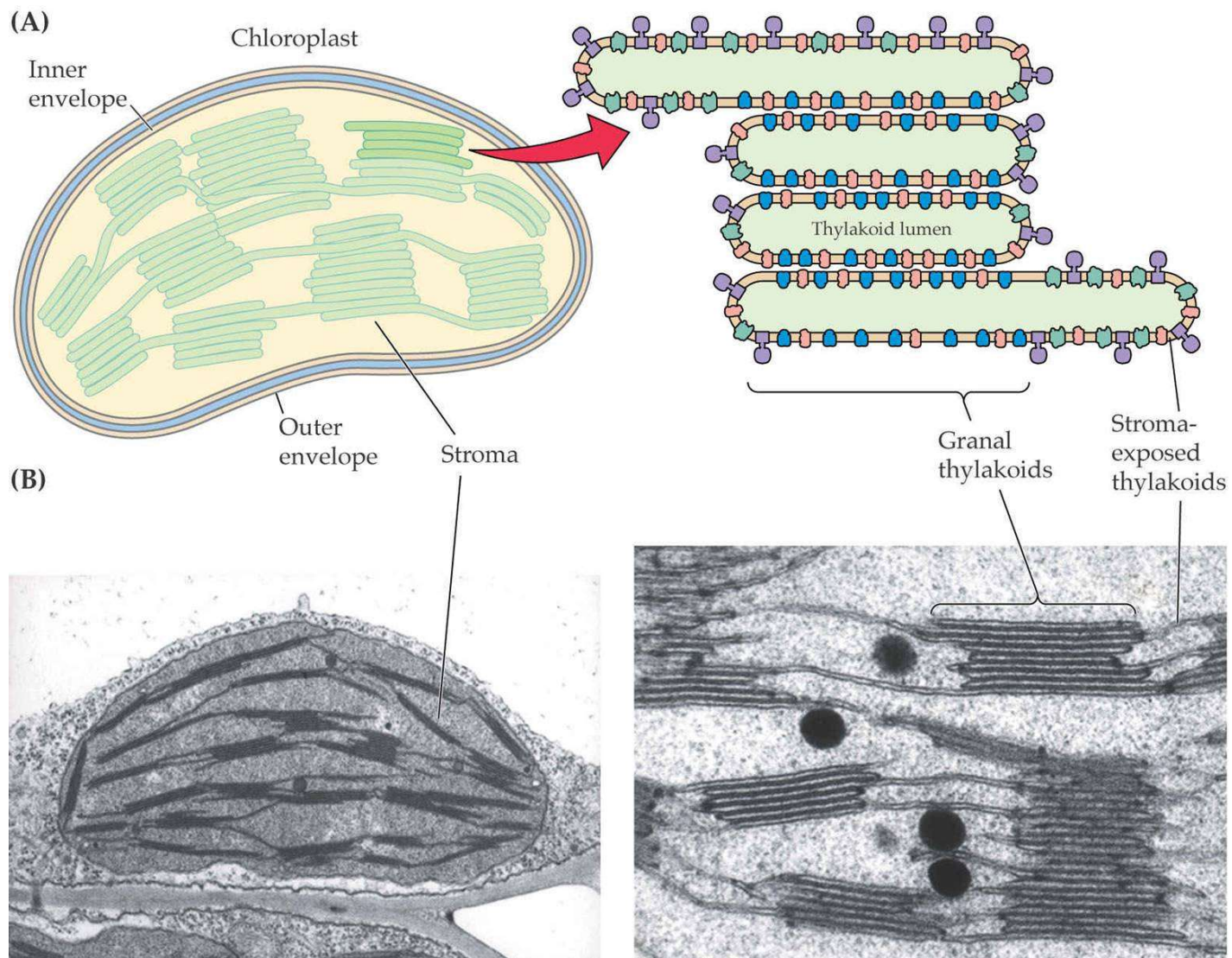
Grana

Stroma

Prostor
thylakoidu

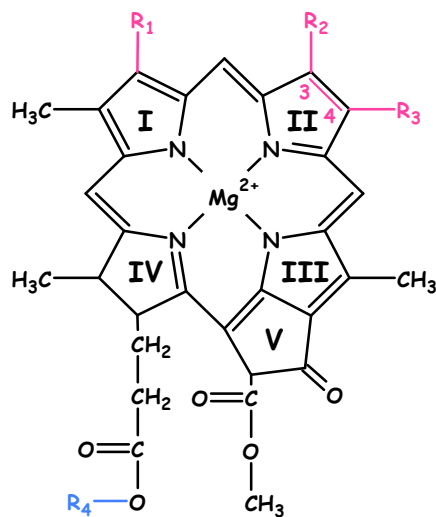


Chloroplast - fotosyntetická organela eukaryot

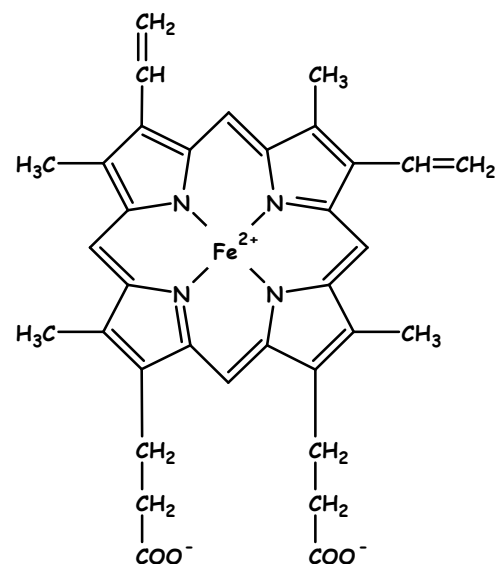


Pigmenty

Struktury chlorofylů



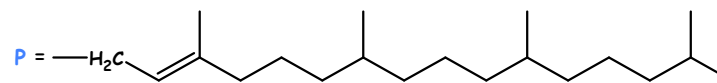
Chlorofyl



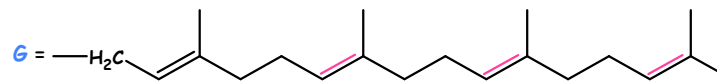
(Fe-protoporphyrin IX)

	R_1	R_2	R_3	R_4
Chlorofyl a	$-\text{CH}=\text{CH}_2$	$-\text{CH}_3$	$-\text{CH}_2-\text{CH}_3$	P
Chlorofyl b	$-\text{CH}=\text{CH}_2$	$-\text{C}(=\text{O})-\text{H}$	$-\text{CH}_2-\text{CH}_3$	P
Bakteriochlorofyl a	$-\text{C}(=\text{O})-\text{CH}_3$	$-\text{CH}_3^a$	$-\text{CH}_2-\text{CH}_3^a$	P nebo G
Bakteriochlorofyl b	$-\text{C}(=\text{O})-\text{CH}_3$	$-\text{CH}_3^a$	$=\text{CH}-\text{CH}_3^a$	P

^a značí, že mezi C3 a C4 se nevyskytuje dvojná vazba.

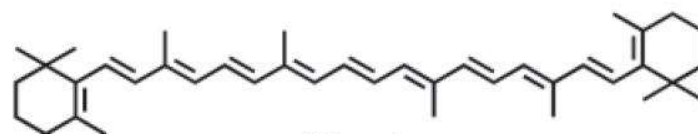


Fytylový postranní řetězec

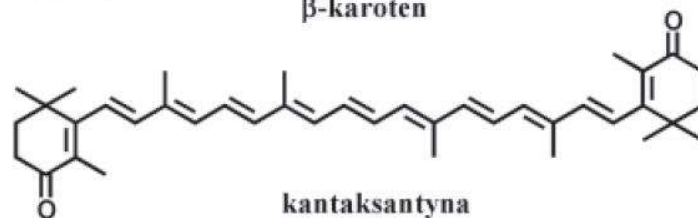


Geranylový postranní řetězec

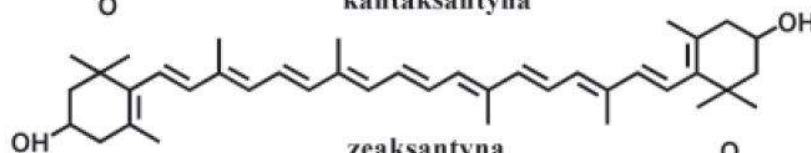
Struktury karotenoidů a xanthofilů



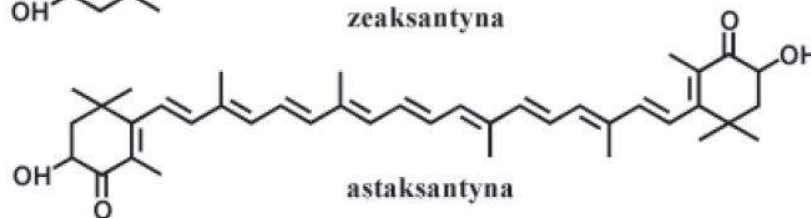
β -karoten



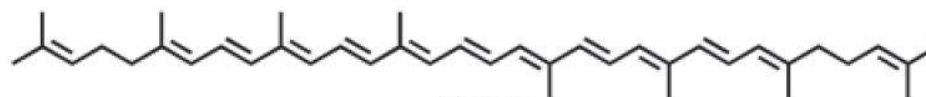
kantaksantyna



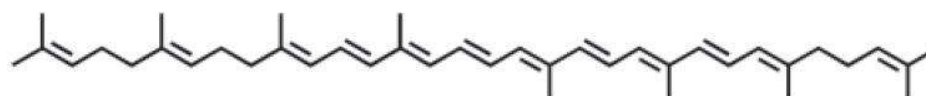
zeaksantyna



astaksantyna

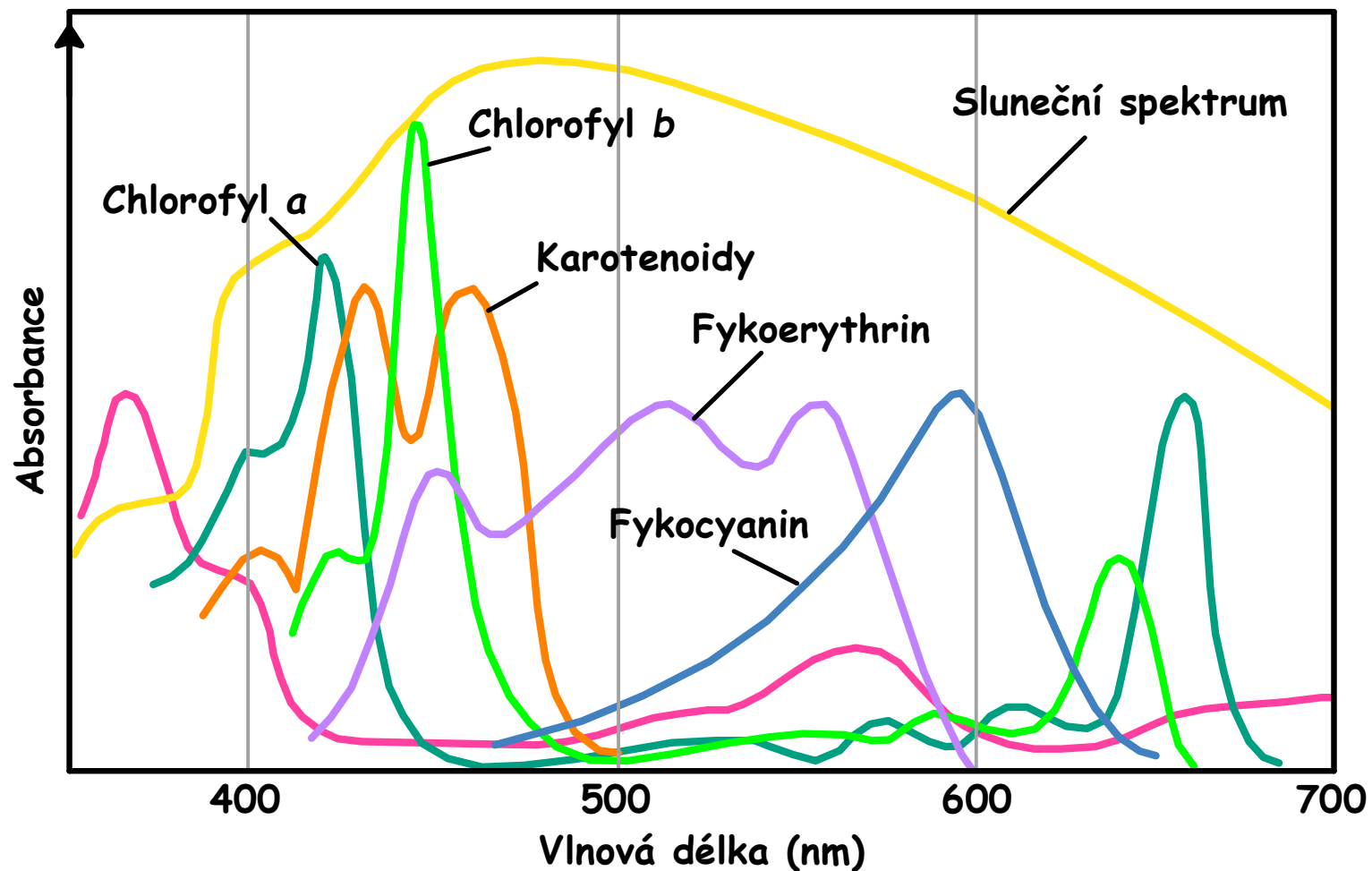


likopen



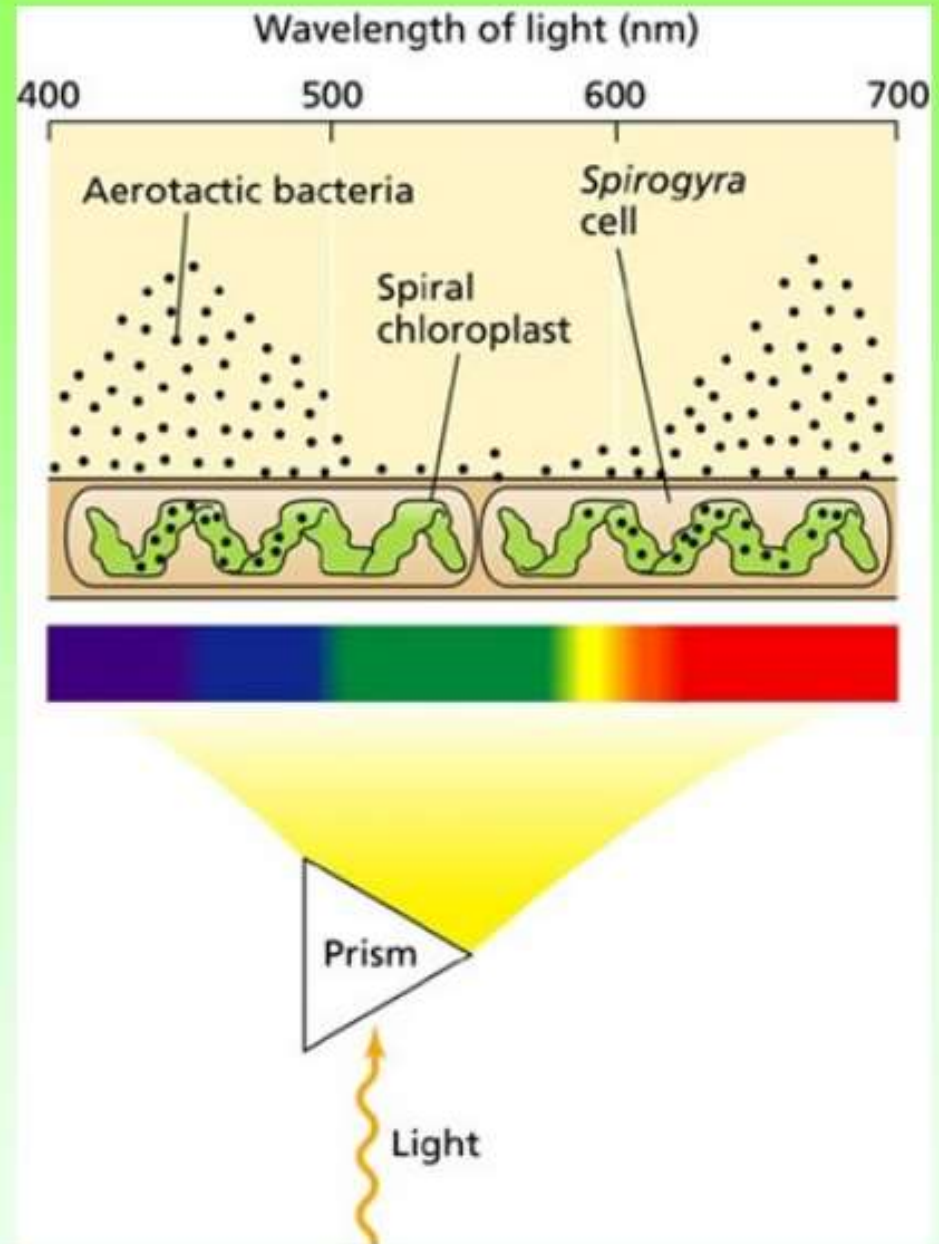
neurosporen

Absorpční spektra různých fotosyntetických pigmentů.

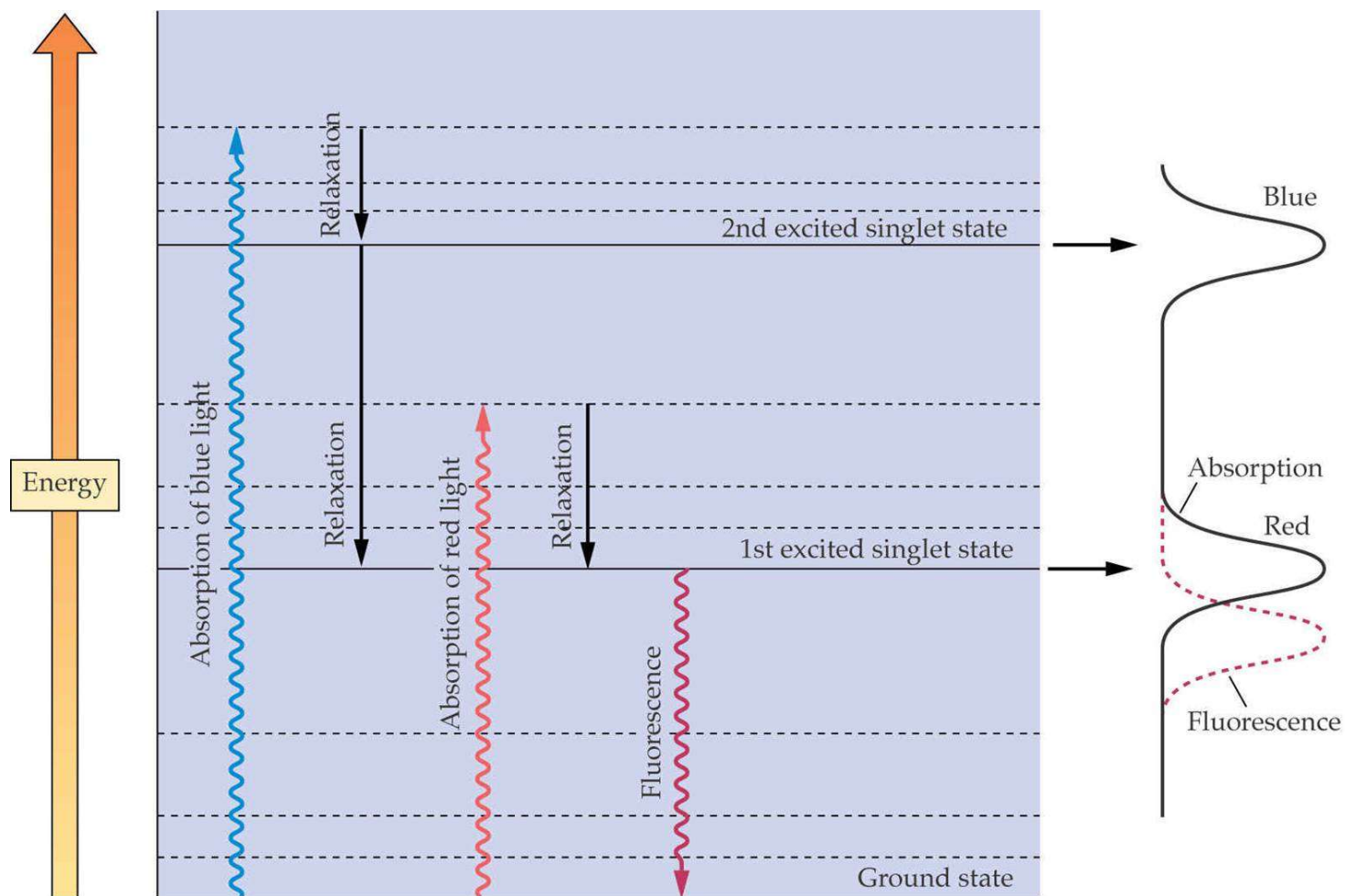


Akční spektrum:
závislost fotosyntézy
(produkce kyslíku,
rychlosti fixace CO_2)
na kvalitě světla.

Engelmannův pokus
konec 19 století



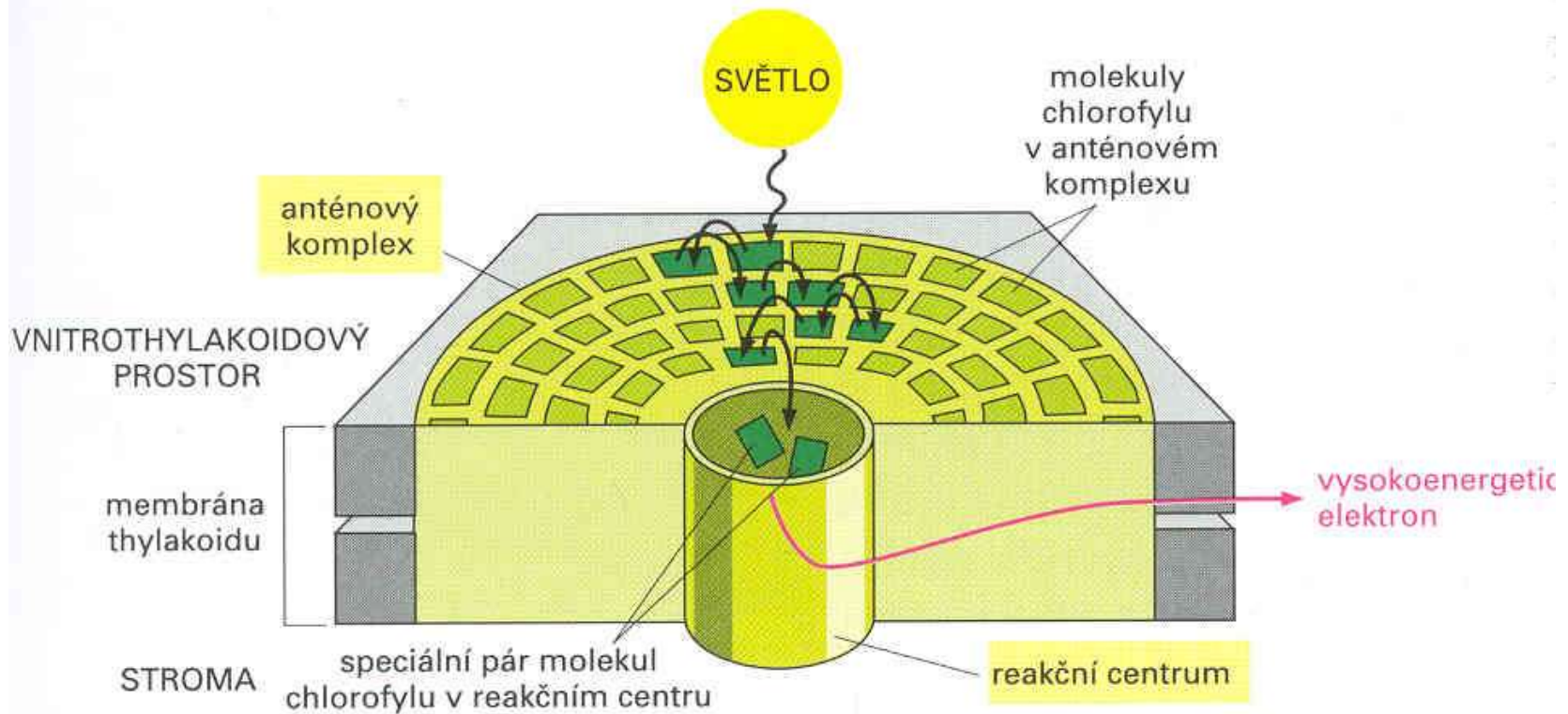
Přeměny světelného záření po dopadu na povrch listu



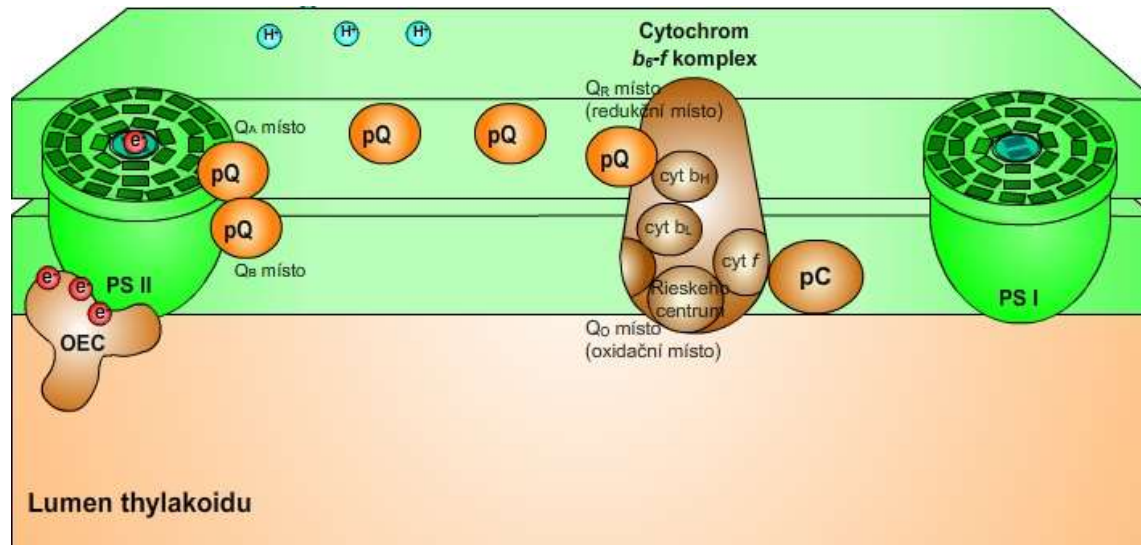
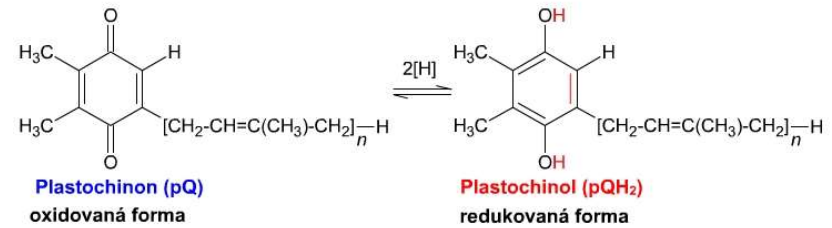
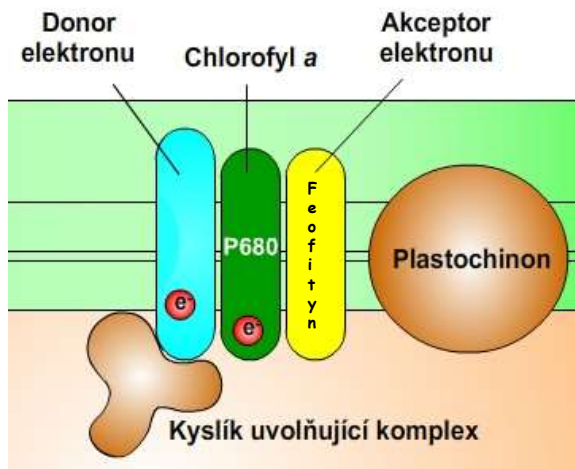
Rostlina je zelená díky chlorofylu.

Ale proč je chlorofyl zelený?

Model antény a reakčního centra



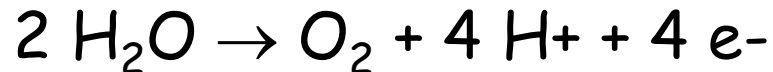
Fotosystém II



pQ = plastochinon; pQH₂ = plastochinol; pQH = semichinon, radikálová forma
 cyt = cytochrom; OEC = Kyslík uvolňující komplex; pC = plastocyanin; PS = fotosystém

Fotosystém II

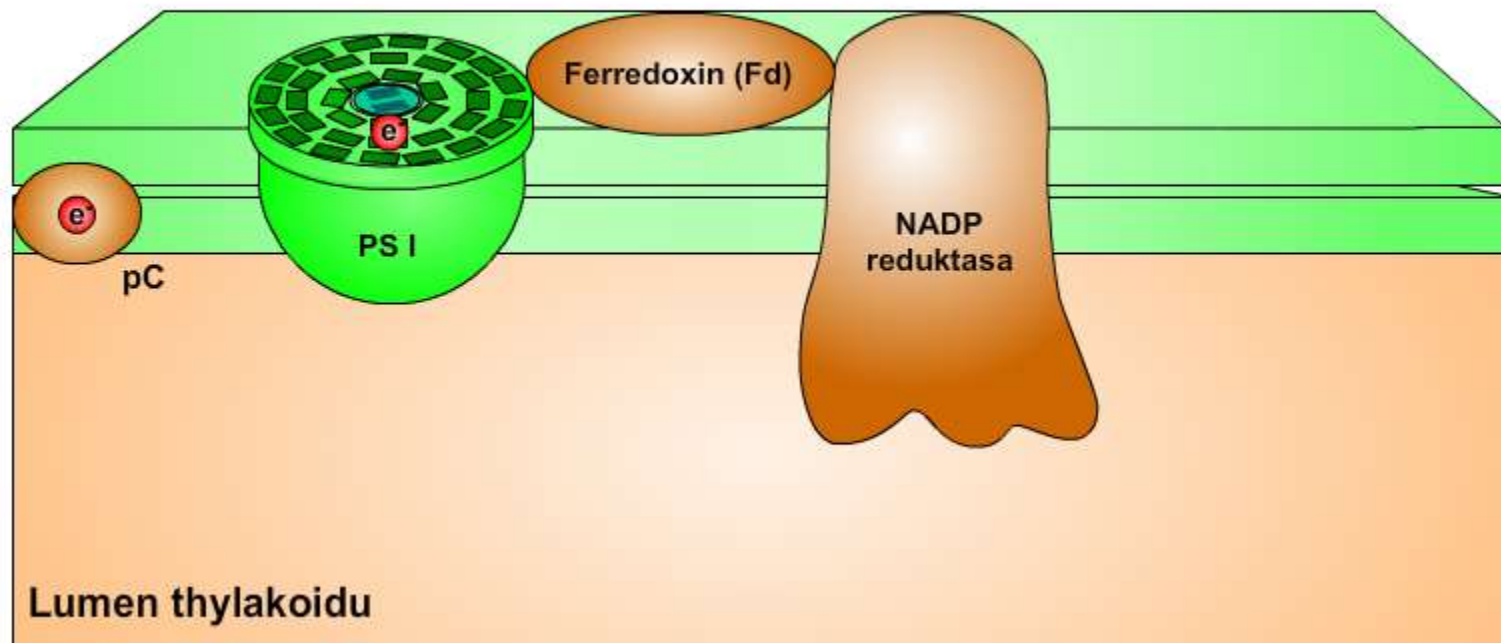
- PS II (P680, fotosystém II) obsahuje centrum uvolňující kyslík (oxygen evolving center-OEC).
- Působením světelných kvant (fotonů) zde dochází k rozkladu molekul vody



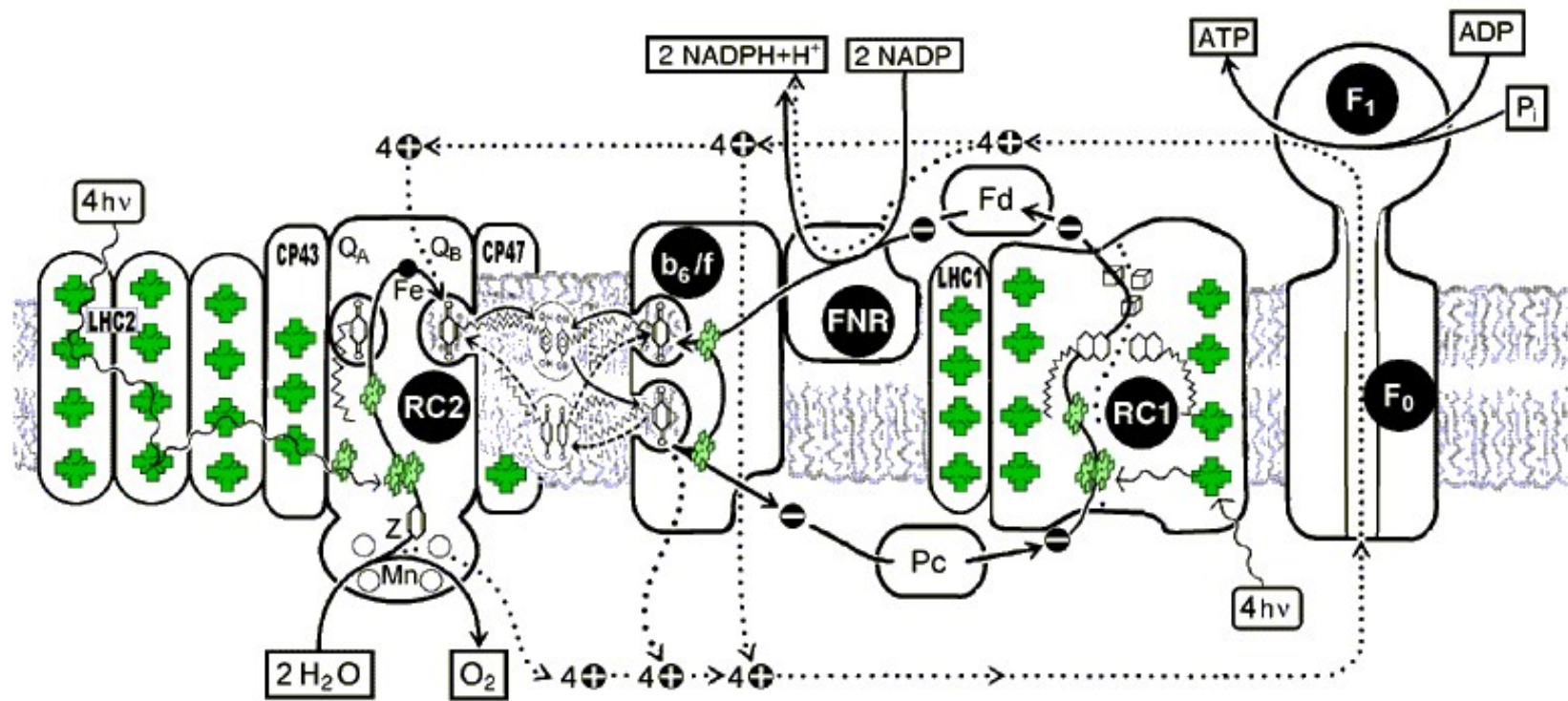
- Elektrony uvolněné z vody vstupují do PSII, kde jsou světelnými kvanty uvedeny excitací do vyšších energetických hladin označených jako P680* a posléze putují řetězcem přes QH2.

Fotosystém I

- PS I (P700, fotosystém I) působením světelných kvant (fotonů) zde dochází k excitaci elektronů, které aktivují NADP reduktázu, generující produkci NADPH.

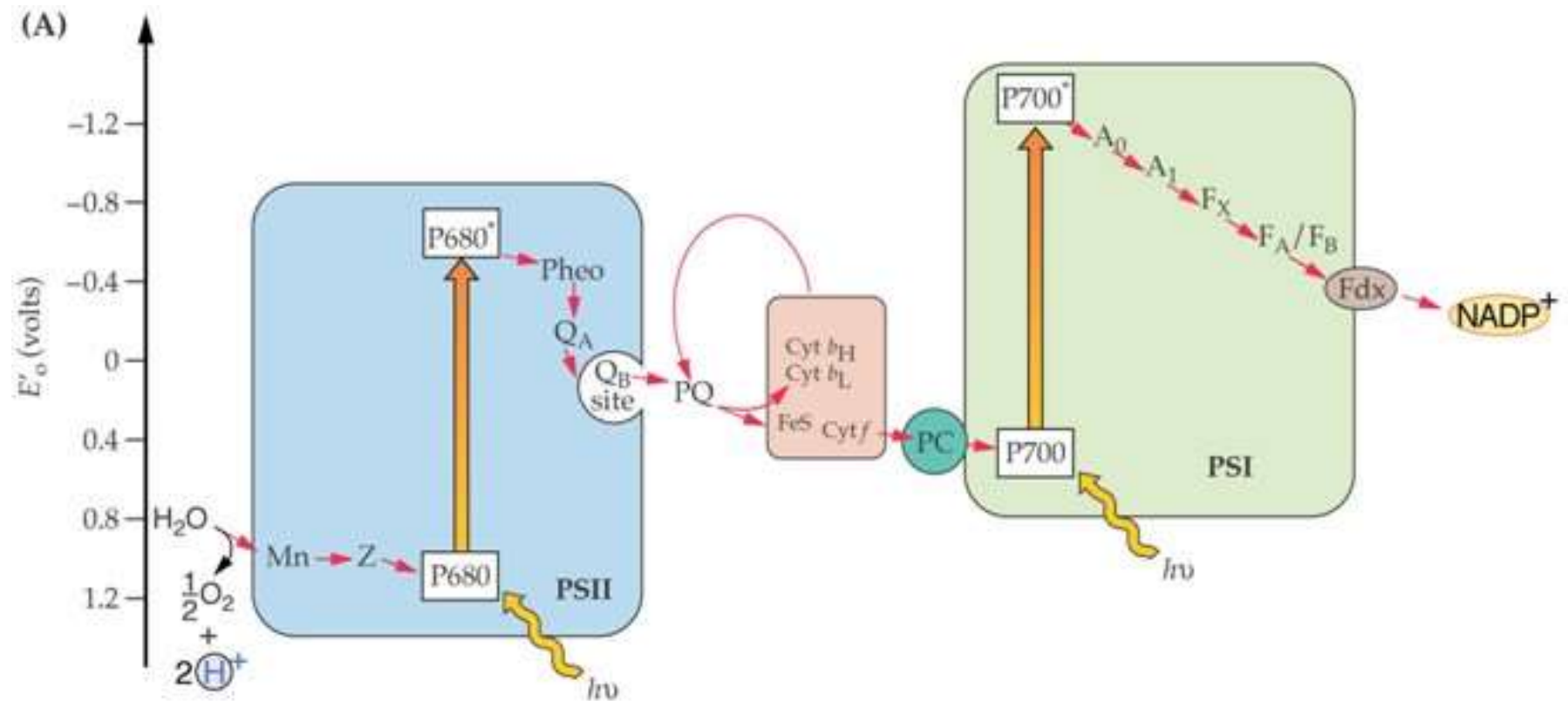


Stroma



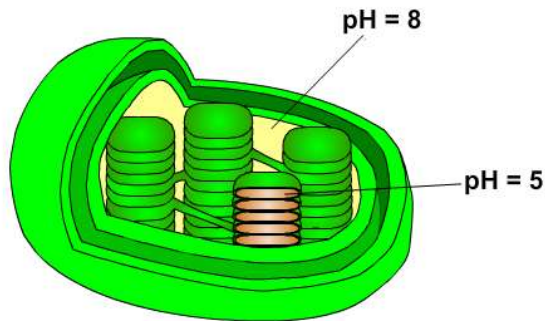
Lumen Thylakoidu

Schéma přenosu elektronů v thylakoidní membráně



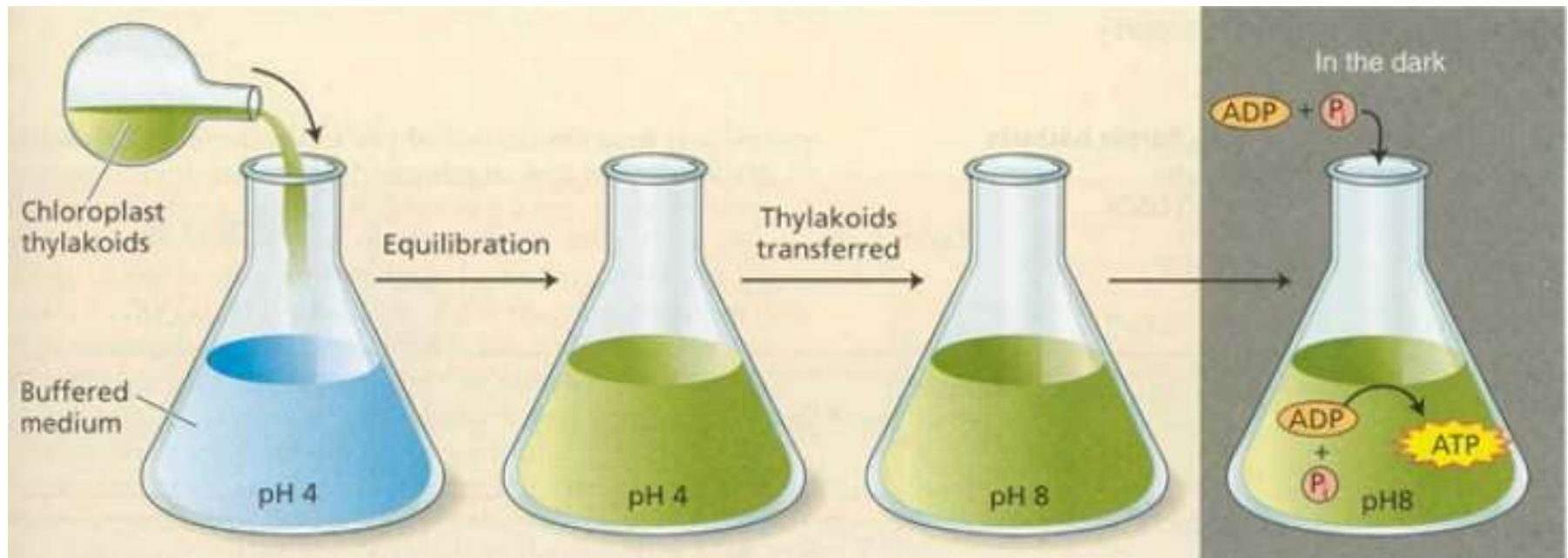
Z schéma

Elektrochemický gradient

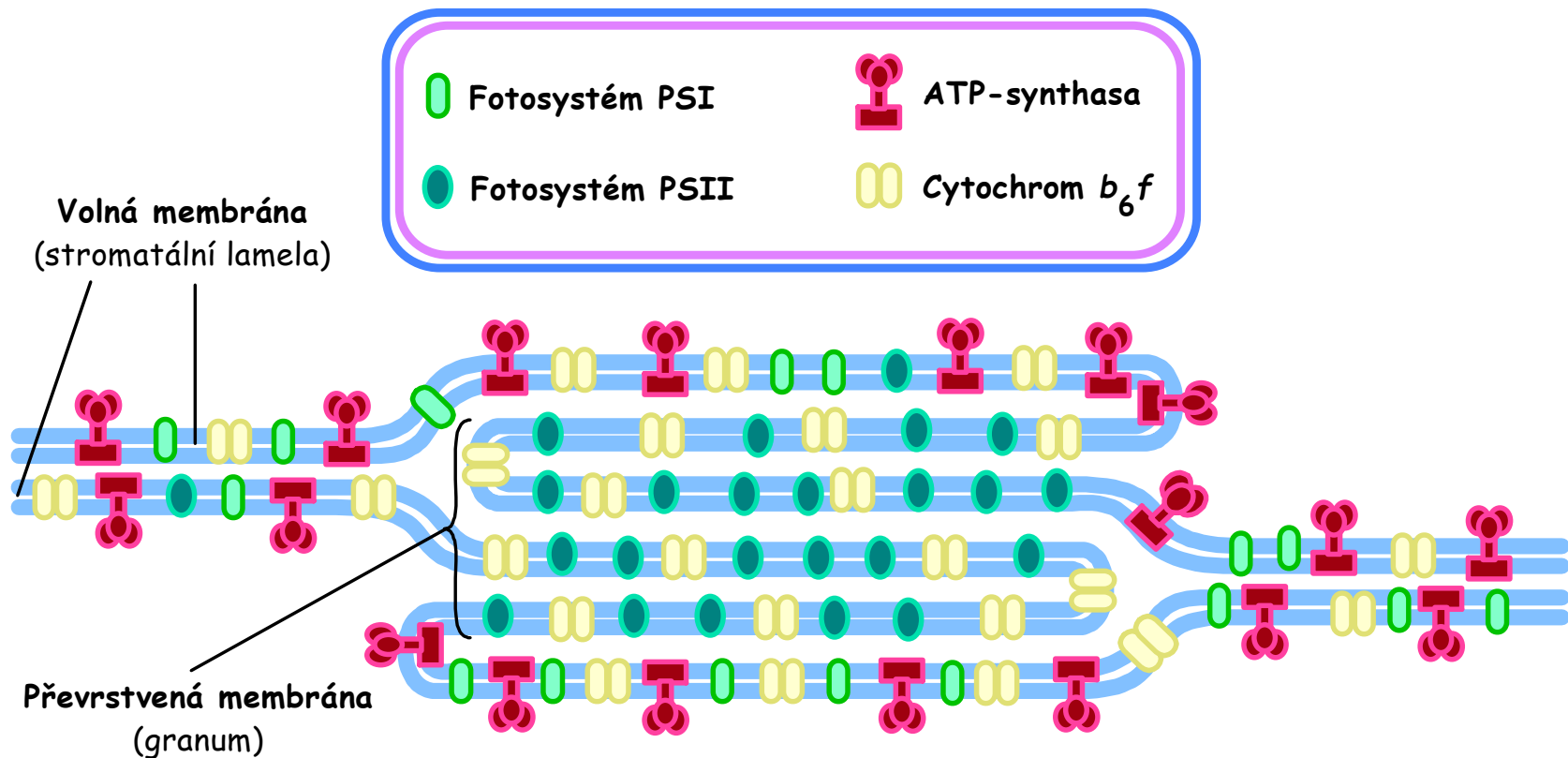


$$\text{pH} = -\log_{10}(\text{c}_{\text{H}_3\text{O}^+})$$

- Fotolýza vody
- Transport e^- membránou
- Syntéza NADPH

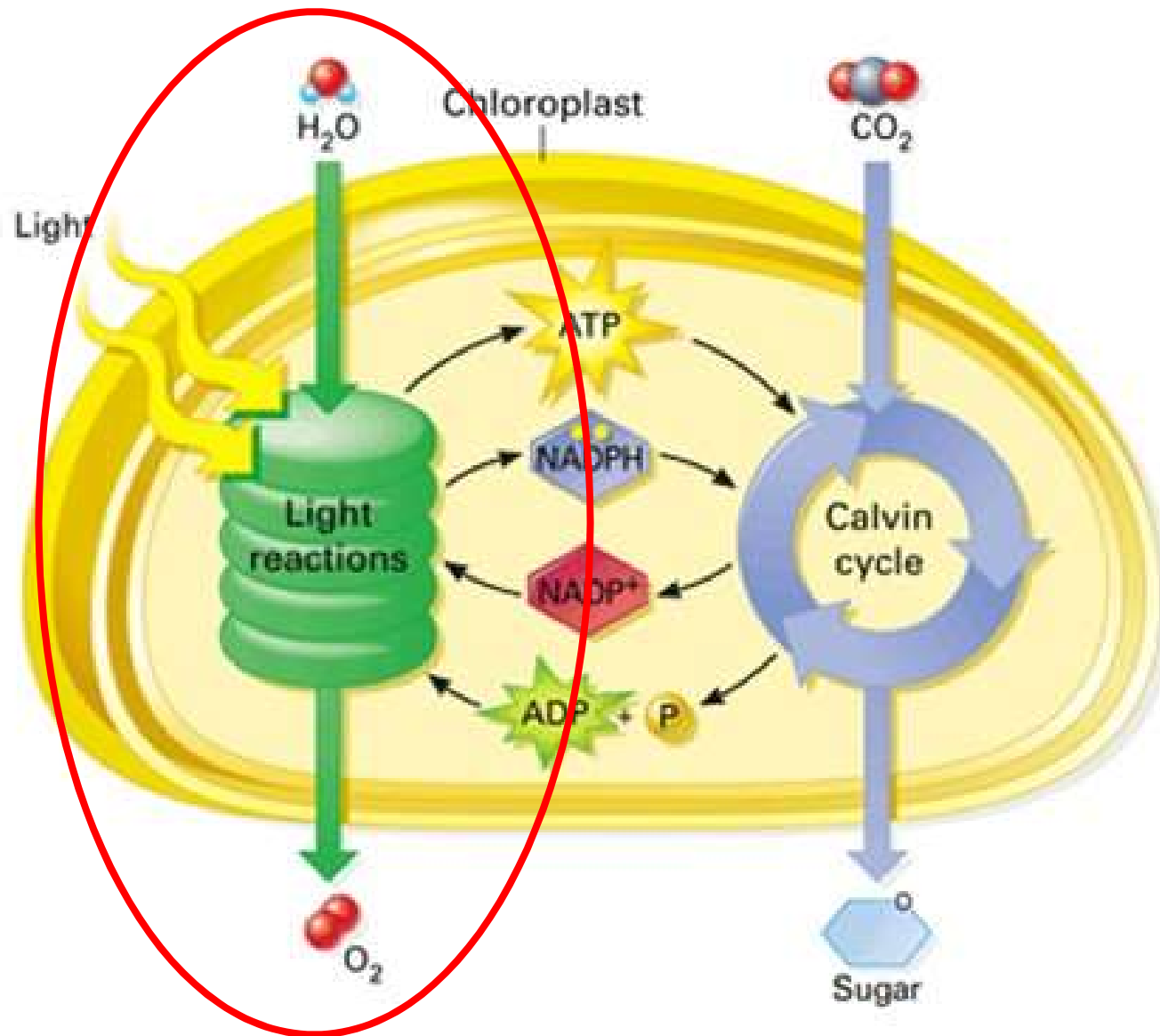


Lokalizace systémů PSII, PSI, cytochromu b_6f a ATP-synthasy na thylakoidech



Z-schéma světelné fáze fotosyntézy

- Elektrony mohou dosáhnout na ferredoxin-NADP⁺ reduktasu (FNR), která katalyzuje redukci NADP⁺.
- Oxidace vody a tok elektronů přes Q cyklus generuje transmembránový protonový gradient s vyšší koncentrací protonů na straně thylakoidní dutiny (lumen - uvnitř). Energie gradientu se uplatňuje při tvorbě ATP.
- Různé prosthetické skupiny fotosyntetického aparátu rostlin mohou být seřazeny podle redukčního potenciálu v diagramu zvaném **Z-schéma**.
- Elektrony uvolněné z P680 po absorpci fotonů jsou nahrazovány elektrony z fotolýzy vody. Každý elektron prochází řetězcem přenašečů do hotovosti plastochinonových molekul. Vytvořený redukovaný plastochinol redukuje cytochrom b_6f komplex, za současného transportu protonů do thylakoidů. Cytochrom b_6f přenáší elektrony na plastocyanin (PC) a ten regeneruje fotooxidovaný P700 v PSI. Elektrony emitované z PSI redukují přes řetězec přenašečů NADP⁺ na NADPH. Necyklický proces (produkce ATP, O₂ a NADPH). V cyklickém procesu se elektrony vrací zpět na cytochrom b_6f a přitom se přenášejí další protony do thylakoidu (produkuje se ATP a neprodukuje se O₂ a NADPH).

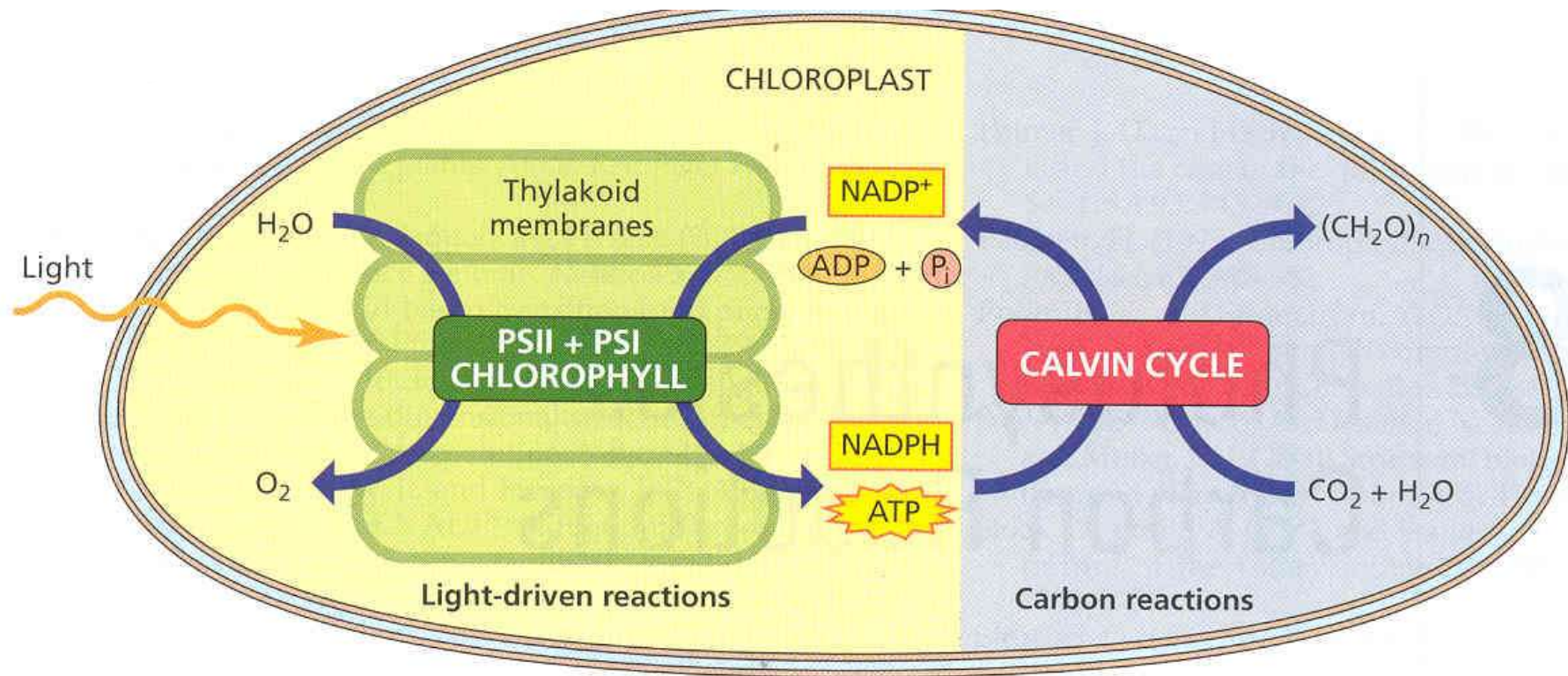


Calvin-Bensonův cyklus (cyklus PRC)

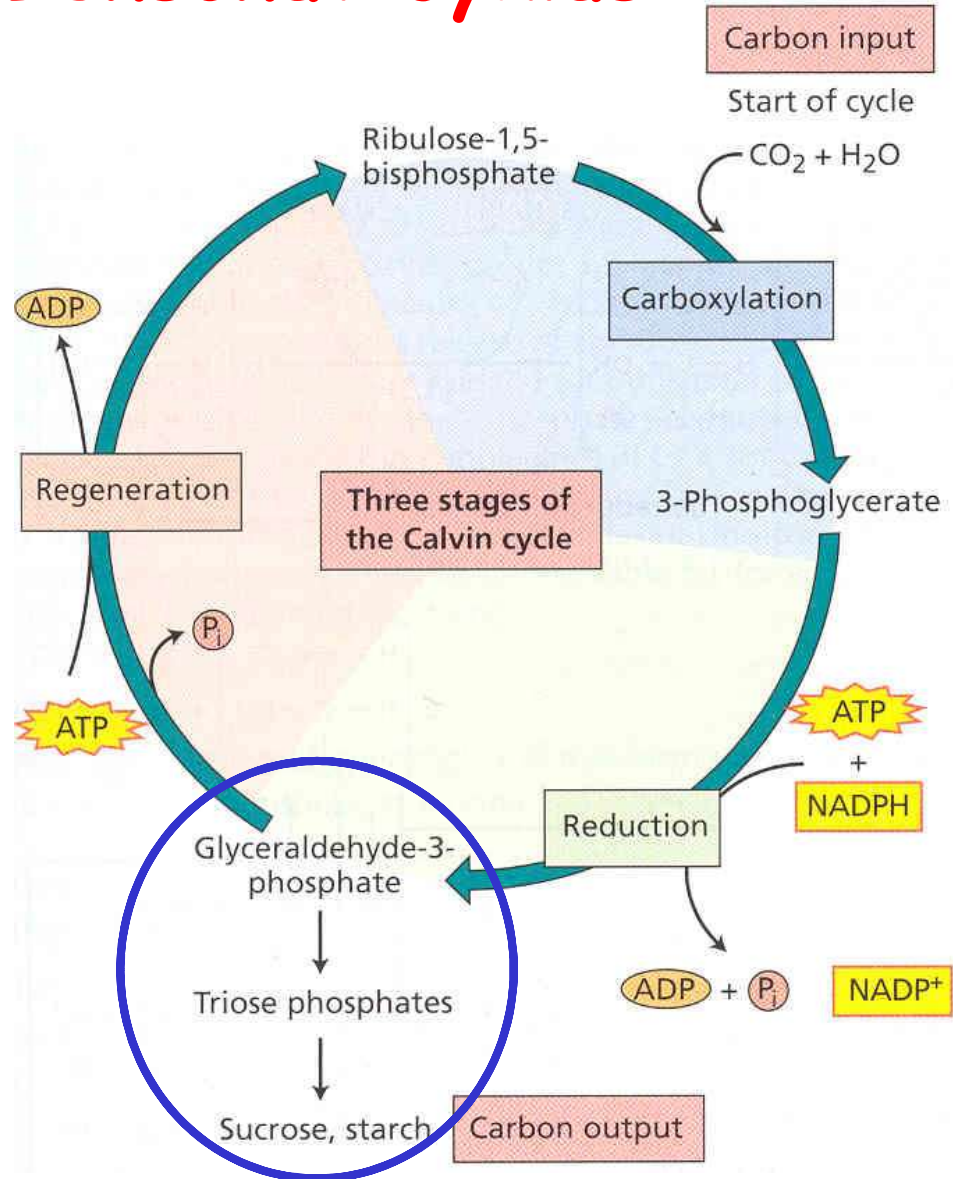
Calvin-Bensonův cyklus



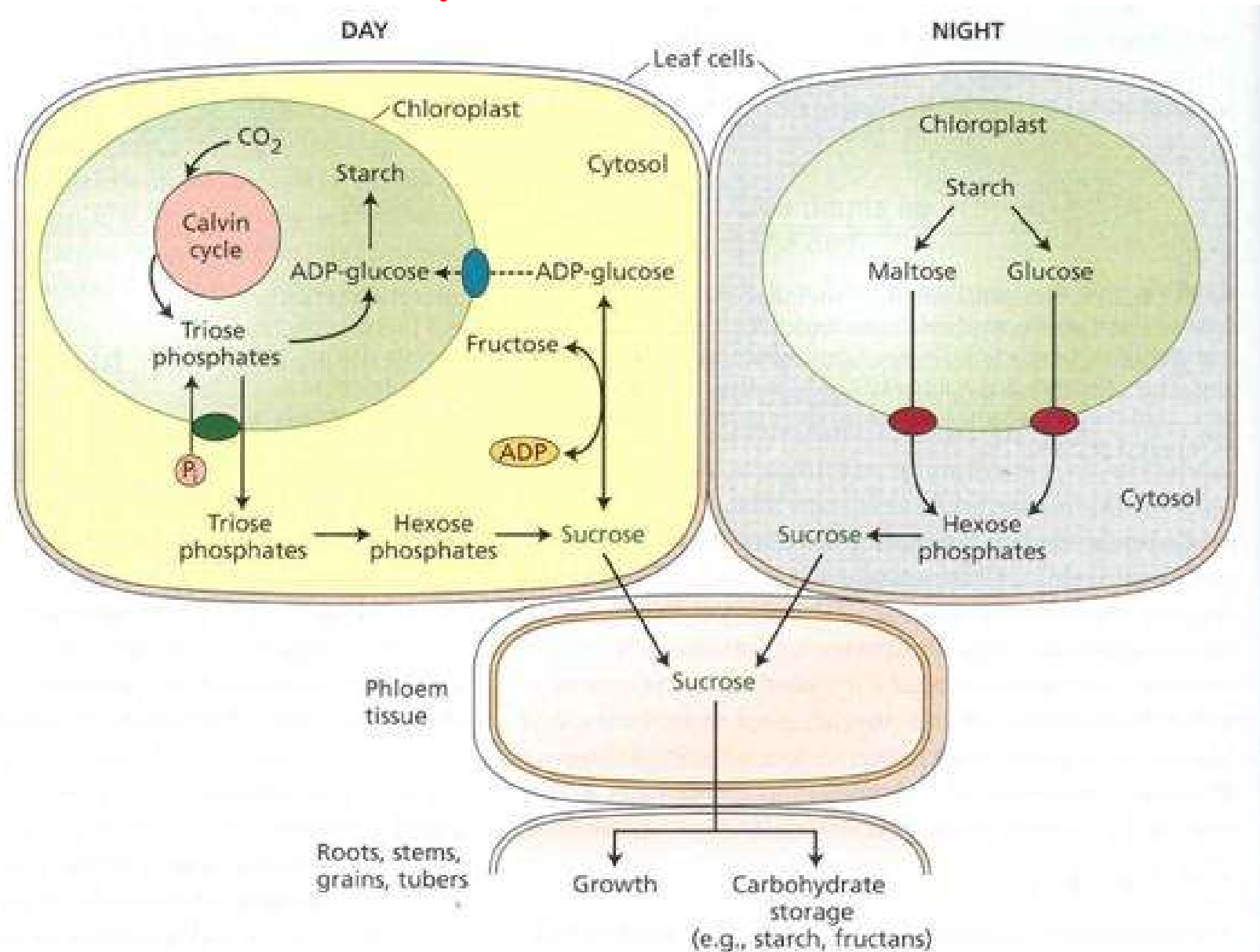
Fotosyntetické procesy v chloroplastech - souhrn



Calvin-Bensonův cyklus



Biosyntéza sacharidů



Škrobový sluneční list (pelargonie), negativ obrazu

Škrobový sluneční tisk
list *Pelargonium*,
negativ obrazu ...

Julius von Sachs 1864:
Škrob se akumuluje v
listech výlučně v těch
částech, které jsou
osvětleny.



Biosyntéza sacharidů:

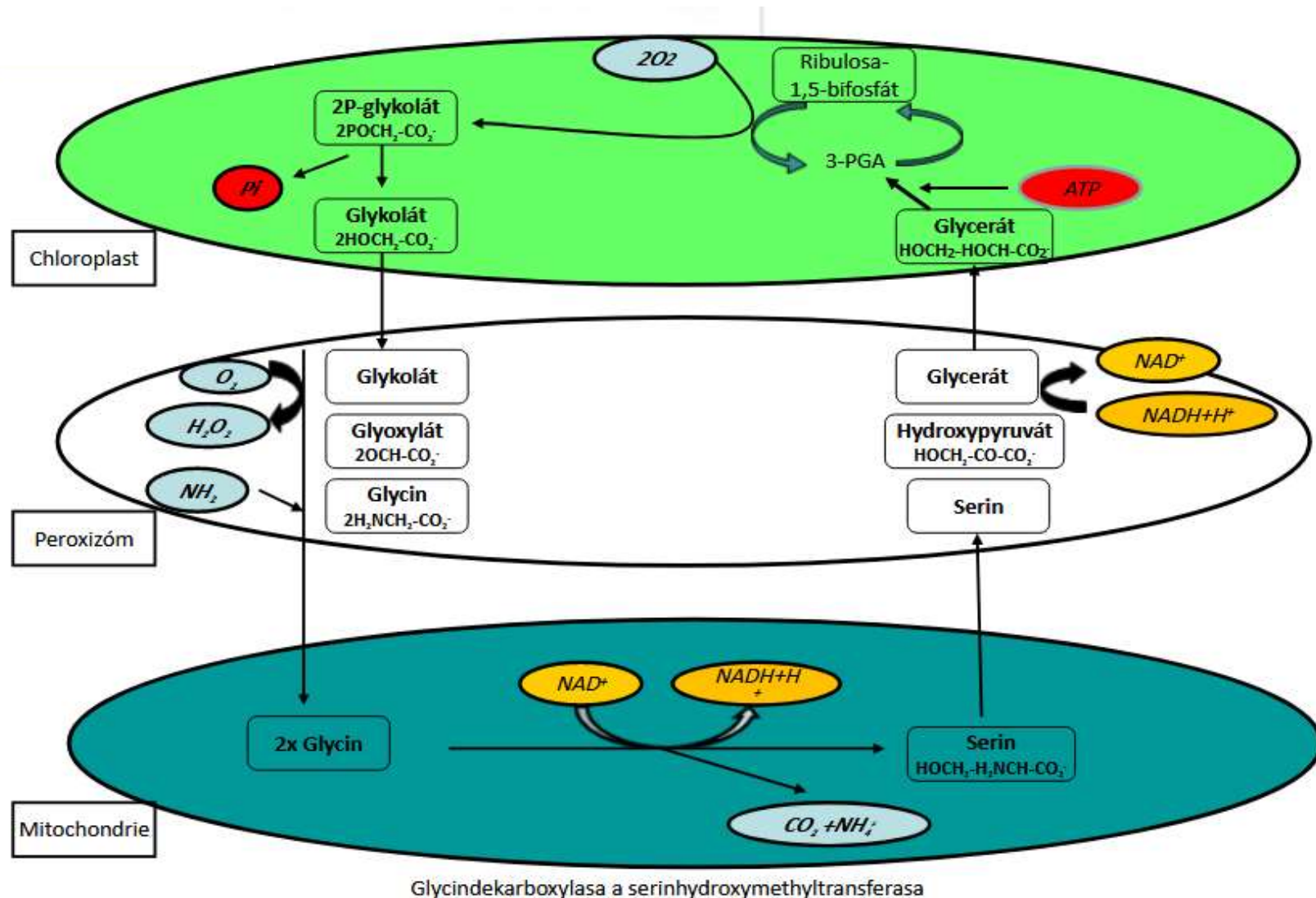
- Celková stechiometrie Calvin-Bensonova cyklu:
- $3 \text{ CO}_2 + 9 \text{ ATP} + 6 \text{ NADPH} \rightarrow \text{GAP} + 9 \text{ ADP} + 8 \text{ Pi} + 6 \text{ NADP}^+$
- Vytvořený **GAP** může být využit k řadě biosyntéz, buď vně nebo uvnitř chloroplastu. Může být převeden na **fruktosa-6-fosfát** dalším postupem cyklu a poté na **glukosa-1-fosfát (G1P)**.
- G1P je prekurzor všech dalších sacharidů rostlin.
- Hlavní složka škrobu, α -amylosa, je syntetizována v stromatu chloroplastu jako dočasná skladovatelná forma glukosy.
- **α -Amylosa** je také syntetizována jako dlouhodobá skladovatelná forma v jiných částech rostlin jako jsou listy, semena a kořeny.
- **Celulosa** tvořena dlouhými řetězci $\beta(1 \rightarrow 4)$ -vázanými glukosovými jednotkami je hlavním polysacharidem rostlin. Je syntetizována z UDP-glukos v rostlinné plasmové membráně a vylučována do extracelulárního prostoru.

Fotorespirace

CO_2 soutěží s O_2 o vazbu na Rubisco
(Karboxylace nebo Oxygenace)

Podmínky pro fotorespiraci: uzavřené průduchy
vysoká teplota
nízká hladina vody

Fotorespirace



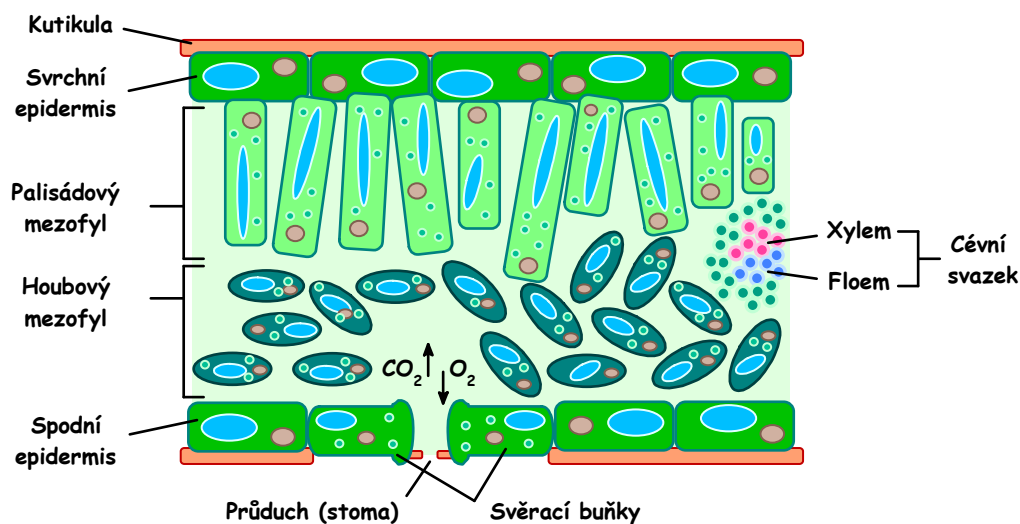
Oxygenasová reakce RUBISCA

- Od roku 1960 je známo, že osvětlené rostliny spotřebovávají kyslík a uvolňují CO_2 drahou odlišnou od oxidativní fosforylace.
- Při nízkých hladinách CO_2 a vysokých O_2 může proces fotorespirace převládnout nad fixací CO_2 .
- Překvapení: Kyslík kompetuje s CO_2 jako substrát ribulosakarboxylasy.
- Přesnější název: ribulosabisfosfátkarboxylasa-oxygenasa (**RUBISCO**).
- Při oxygenasové reakci se vytváří z RuBP 3-fosfoglycerát a 2-fosfoglykolát. 2-Fosfoglykolát je hydrolyzován na glykolát a ten je oxidován za tvorby CO_2 v sérii enzymových reakcí v peroxisomech a mitochondrii.
- Role v dusíkovém metabolismu (serin, glycin). Ztráta nadbytečné energie (NADPH a ATP), zhruba 50%.

**CO_2 koncentrační
mechanismy
rostlin C_4**

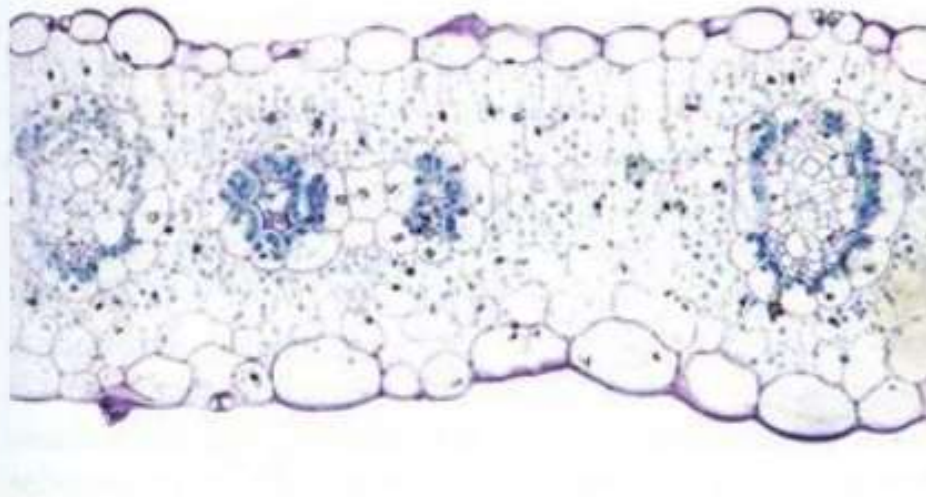
Rostliny C_4 koncentrují na povrchu listu CO_2 .

- Řada rostlin se evolučně přizpůsobila kolísání koncentrace O_2 a CO_2 tak, že koncentrují ve fotosyntetických buňkách CO_2 a zabraňují fotorespiraci. Např. cukrovka, cukrová třtina, kukuřice a mnoho plevelných rostlin. Typické pro tropické oblasti.
- List má charakteristickou anatomii - pod vrstvou buněk tzv. mesofylu jsou soustředěny pochvy cévních svazků. V mesofylových buňkách není ribulosabifosfátkarboxylasa !!

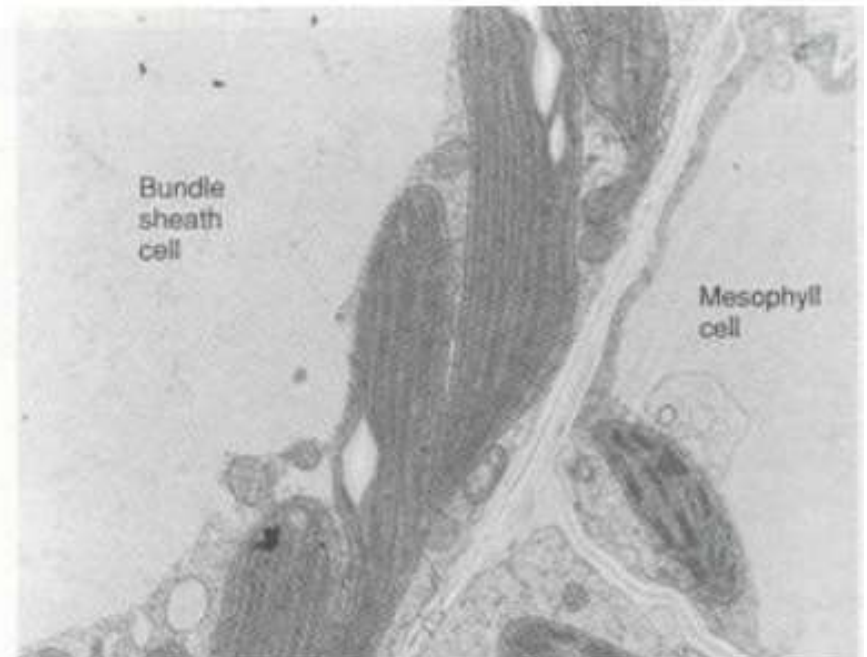
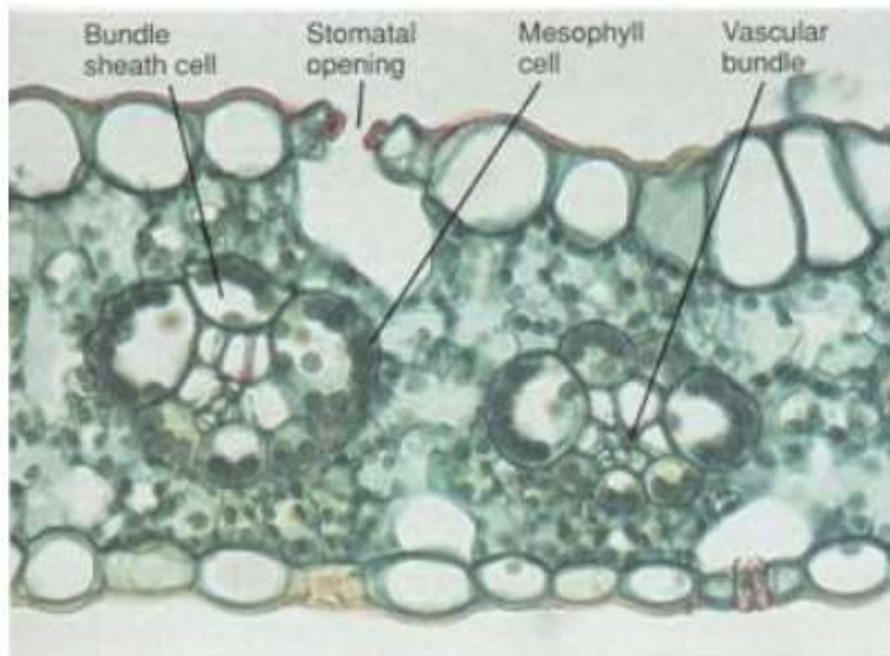


Objev C4 mechanismu fotosyntetické asimilace CO₂

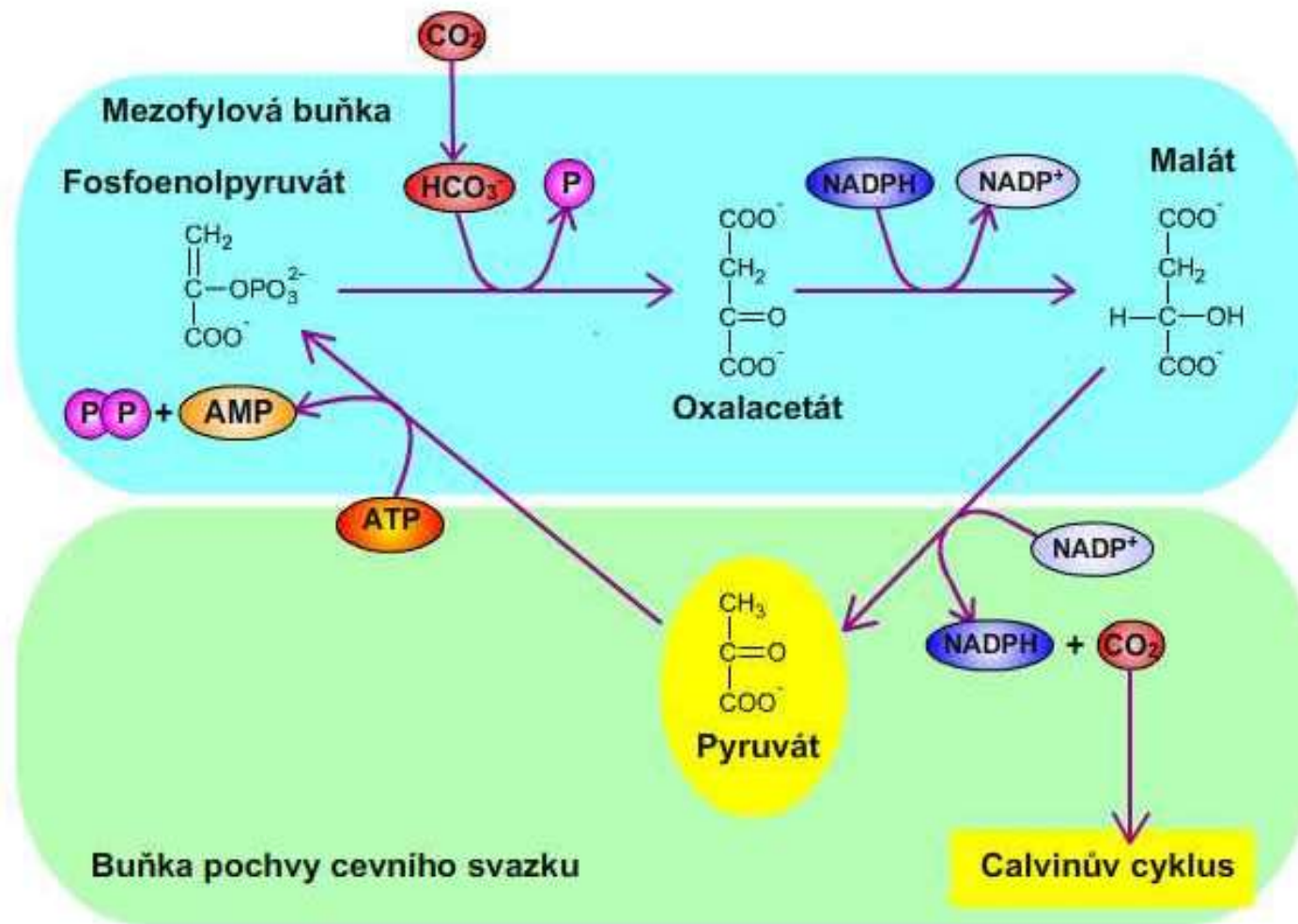
(C) C₄ dicot



věňčitá anatomie (1905)
Kortschak (1950)
Hatch, Slack (1955-70)



Hatch-Slackův cyklus C_4

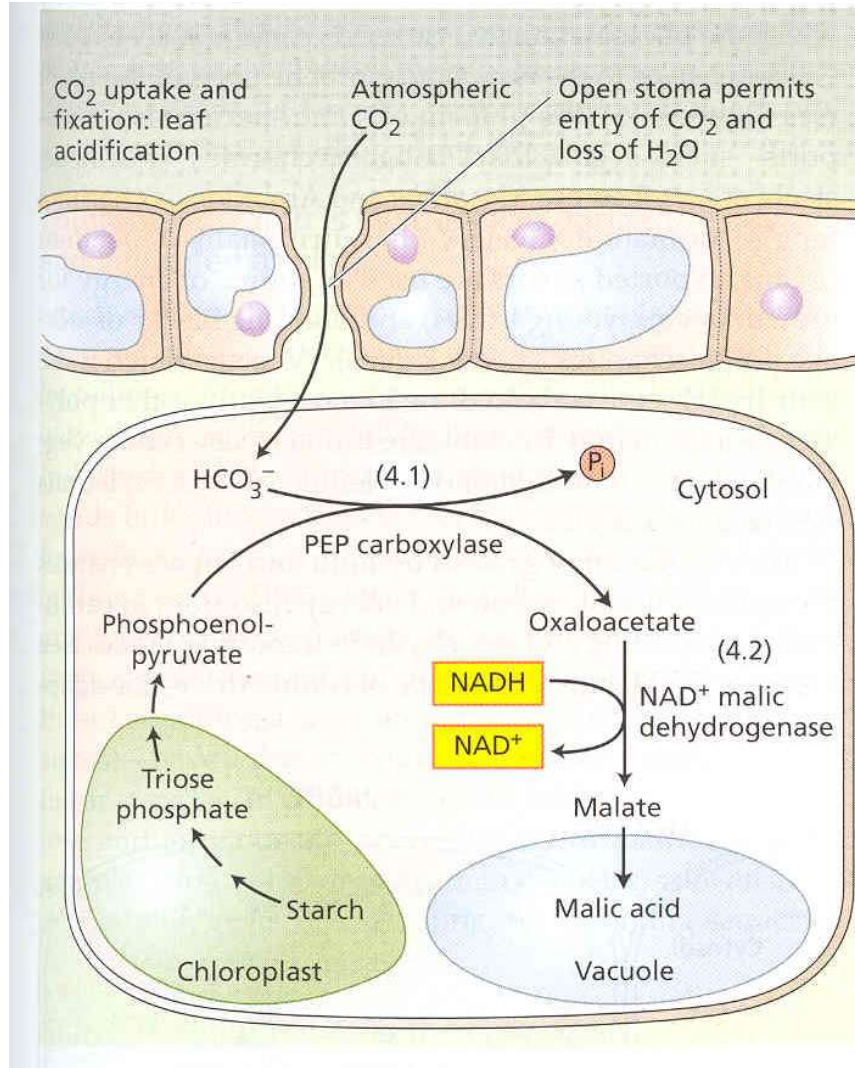


Cyklus C_4 - M. Hatch a R. Slack (1960)

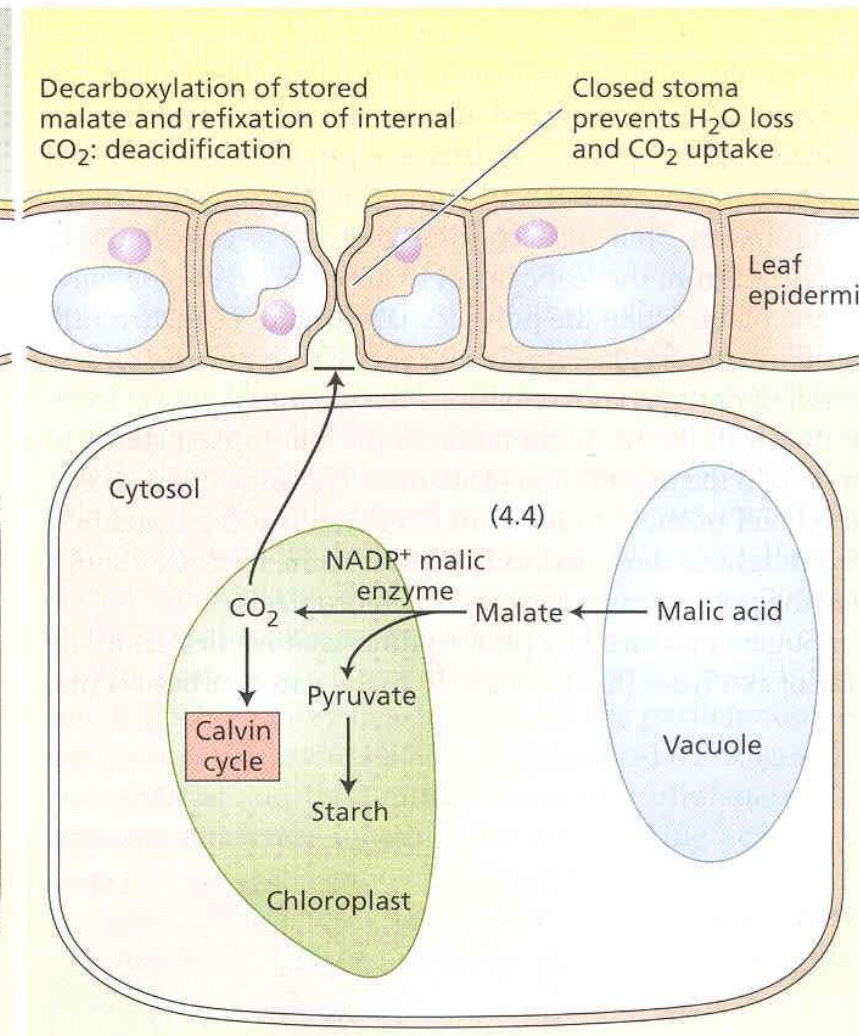
- V mesofylu reaguje vstupující CO_2 ve formě HCO_3^- s fosfoenolpyruvátem za tvorby oxaloacetátu (čtyři uhlíky, proto C_4). Oxaloacetát je redukován NADPH na malát, který je transportován do buněk cévních svazků, kde je oxidativně dekarboxylován na CO_2 , pyruvát a NADPH. Takto koncentrovaný CO_2 vstupuje do Calvinova cyklu.
- Pyruvát je transportován zpět do mesofylu, kde je fosforylován za katalýzy **pyruvát-fosfátdikinasy** za tvorby fosfoeneolpyruvátu. Při aktivaci přechází ATP na AMP + PP_i . PP_i je posléze hydrolyzován všudepřítomnou pyrofosfatasou na $2 \times P_i$.
- Oxid uhličitý je koncentrován v buňkách cévních svazků na úkor spotřeby 2 ATP / CO_2 .
- Fotosyntéza C_4 rostlin spotřebovává celkem 5 ATP na rozdíl od C_3 rostlin, které spotřebují 3 ATP.

Rostliny CAM

NOC – stomata otevřená



DEN – stomata uzavřená



CAM rostliny jako varianta rostlin C_4 .

- Dráha byl poprvé popsána u tučnolistých rostlin a odtud název **CAM** - **crassulacean acid metabolism**.
- U CAM rostlin je časově oddělen záchyt CO_2 a Calvin-Bensonův cyklus.
- CAM rostliny otevírají stomata (póry v listech) v noci a zachycují CO_2 drahou C_4 ve formě malátu.
- Pro zachycení CO_2 je nutné velké množství fosfoenolpyruvátu. To se získává štěpením škrobu a glykolýzou.
- Během dne je malát štěpen za tvorby CO_2 vstupujícího do Calvin - Bensonova cyklu a pyruvátu použitého na resyntézu škrobu.
- Celý tento proces je veden také z důvodu zabránění ztrátě vody !!!
- Stejnou drahou probíhá fotosyntéza u sukulentů.

- Některé důležité rozdíly mezi rostlinami typu C3, C4 a CAM.

	C3	C4	CAM
Anatomická stavba listu	Mezofyl rozlišený na houbový a palisádový parenchym	Parenchym. pochvy kolem svazků cévních	Mezof. buňky s velkými vakuolami
Struktura chloroplastů	Chloroplasty s grany	Chloroplasty s grany i bez gran	Chlor. s menším počtem gran
Primární produkt fixace CO ₂	fosfoglycerát	oxaloacetát	oxaloacetát
Transpirační koeficient	450-900g H ₂ O na 1g sušiny	250-350g H ₂ O /g sušiny	45-55g H ₂ O /g sušiny
Optimální teplota	15-25°C	25-35°C	35-40°C
Fotorespirace	1/3 z celkové fotosyntézy	Nízká nebo není	Velmi malá-žádná.
Maxim. hodnoty int. fotosyntézy	15-30 μmol m ⁻² s ⁻¹	35-40 μmol m ⁻² s ⁻¹	1-5 μmol m ⁻² s ⁻¹
Maxim. rychlost růstu	0,5 – 2g sušiny na 1 dm ²	4-5g sušiny na 1 dm ²	0,012 – 0,020g sušiny na 1 dm ²