

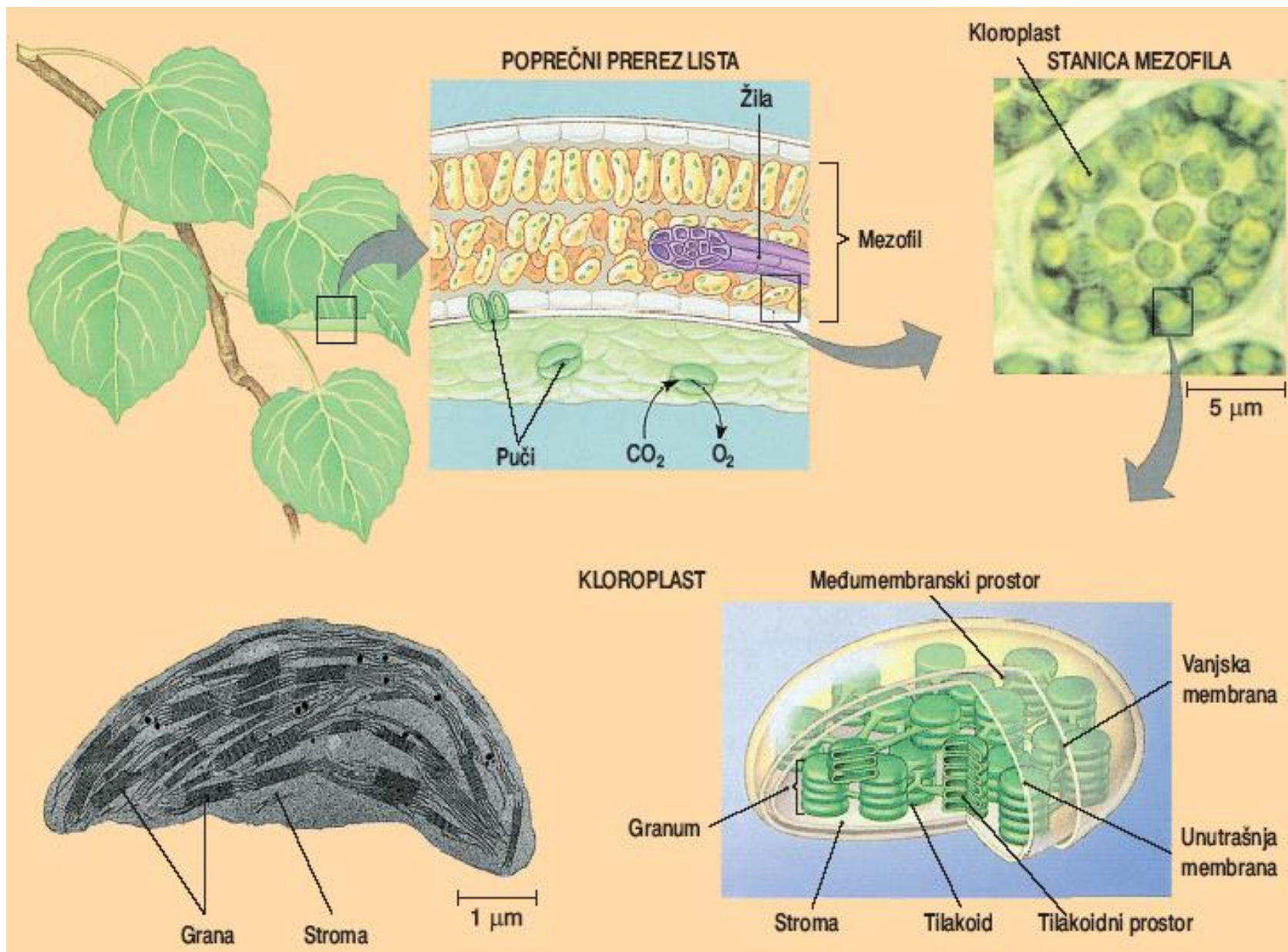
FOTOSINTEZA

A photograph of a pond in a forest. In the foreground, there are tall, green reeds and lily pads floating on the water. The background shows a dense forest with many trees and green foliage. The title 'FOTOSINTEZA' is written in large, bold, yellow letters across the top of the image.

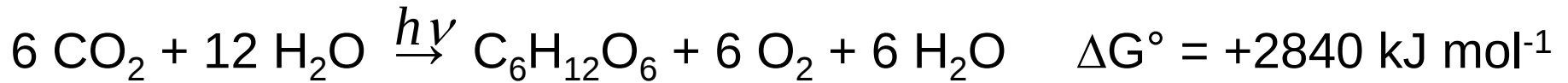
“sinteza pomoću
svjetlosti”

**-proces u kojem biljke, alge i prokarioti koriste
svjetlosnu energiju za sintezu organskih spojeva**

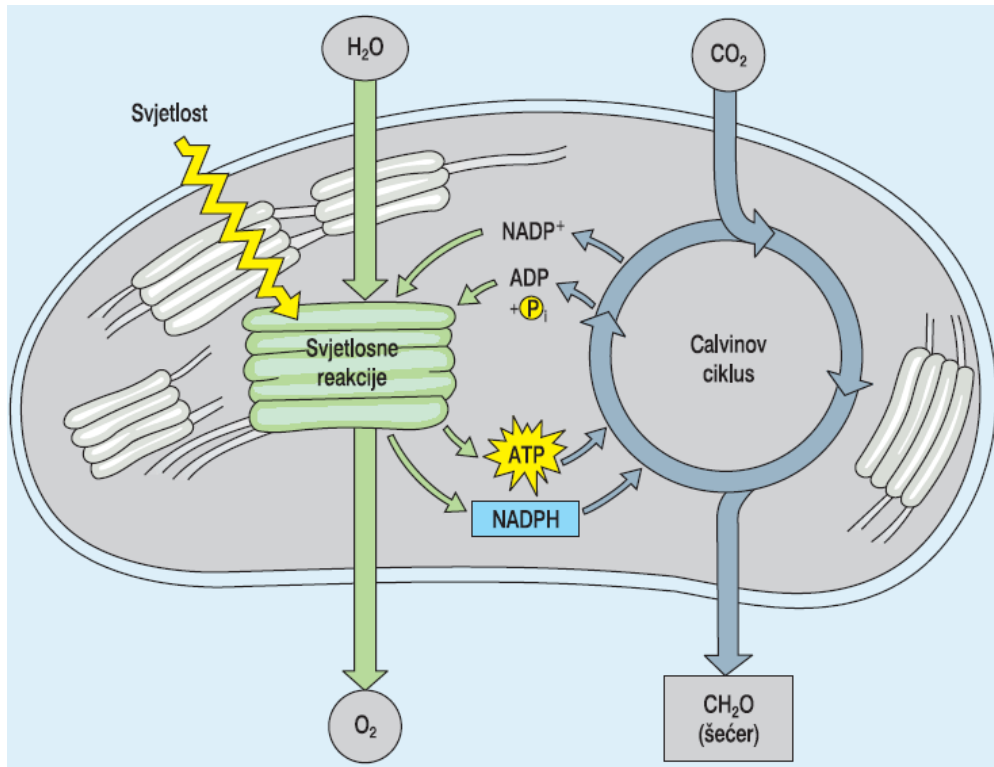
FOTOSINTEZA U BILJAKA



Sumarna reakcija fotosinteze



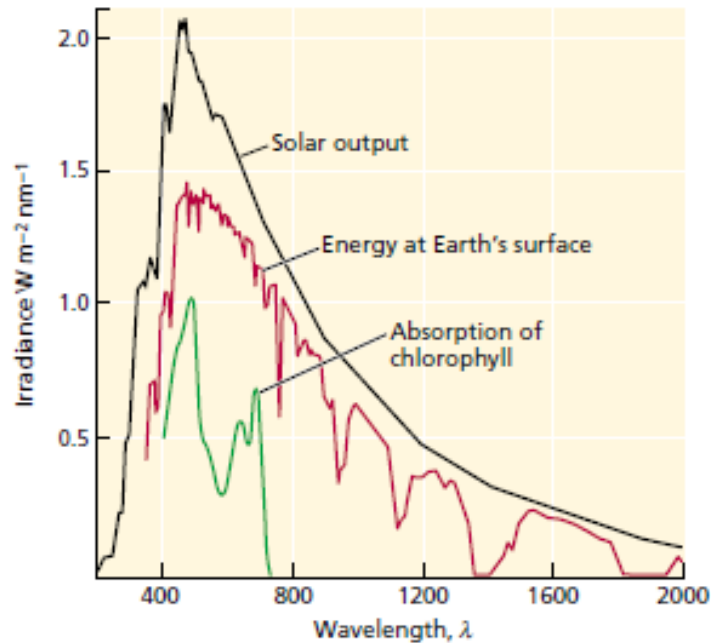
Shematski prikaz procesa fotosinteze



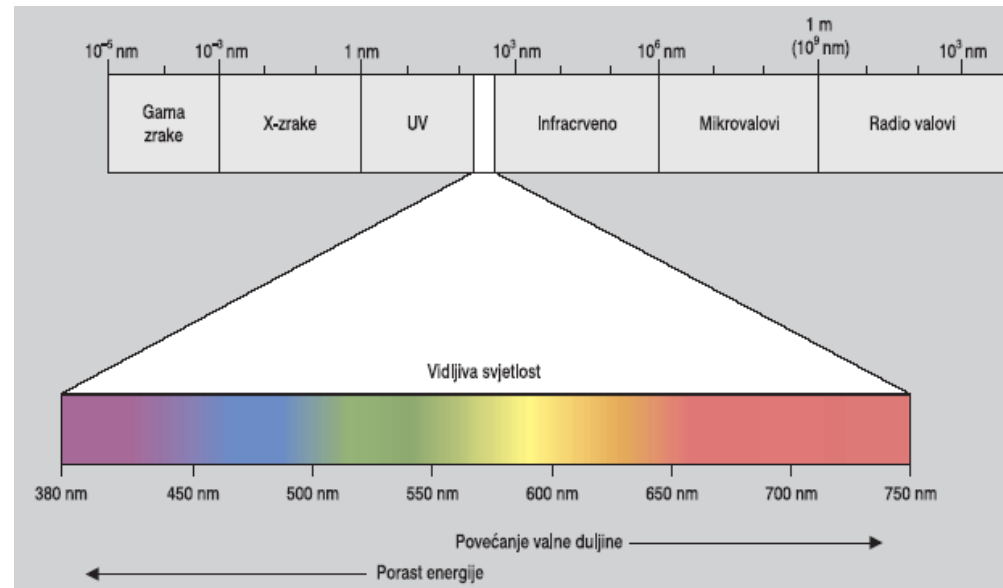
1. Svjetlosne reakcije;
Fotokemijske reakc.;
Primarne reakcije
fotosinteze;
Tilakoidne reakcije

2. Reakcije u tami;
Biokemijske reakcije
fotosinteze;
Sekundarni procesi;
Calvinov ciklus;
Reakcije fiksacije
ugljika;
Reakcije u stromi

APSORPCIJA SVJETLOSTI



Taiz, L., Zeiger, E. (2002).
Plant Physiology.



Elektromagnetski
spektar

Spektar Sunčeva zračenja
i apsorpcijski spektar klorofila

FOTOBIOLOŠKO PODRUČJE SPEKTRA

- FOTOSINTEZA
- FOTOTROPIZMI (zakrivljenja uzrokovana svjetlošću)
- FOTOTAKSIJE (slobodna lokomotorna gibanja uzrokovana svjetlošću)
- FOTOMORFOGENEZE (promjene oblika inducirane svjetlošću)

FOTOSINTETSKI PIGMENTI

pigmenti – molekule koje
mogu apsorbirati svjetlost

- u tilakoidnoj membrani

- uloga: posreduju u **pretvorbi svjetlosne energije u kemijsku**
(za razliku od fotoreceptora, npr. fitokroma, koji ima ulogu
primanja i prijenosa signala)

- klorofili

 - biljke – klorofili *a* i *b*

 - protisti - klorofili *c* i *d*

 - anaerobne fotosintetske bakterije - bakterioklorofili

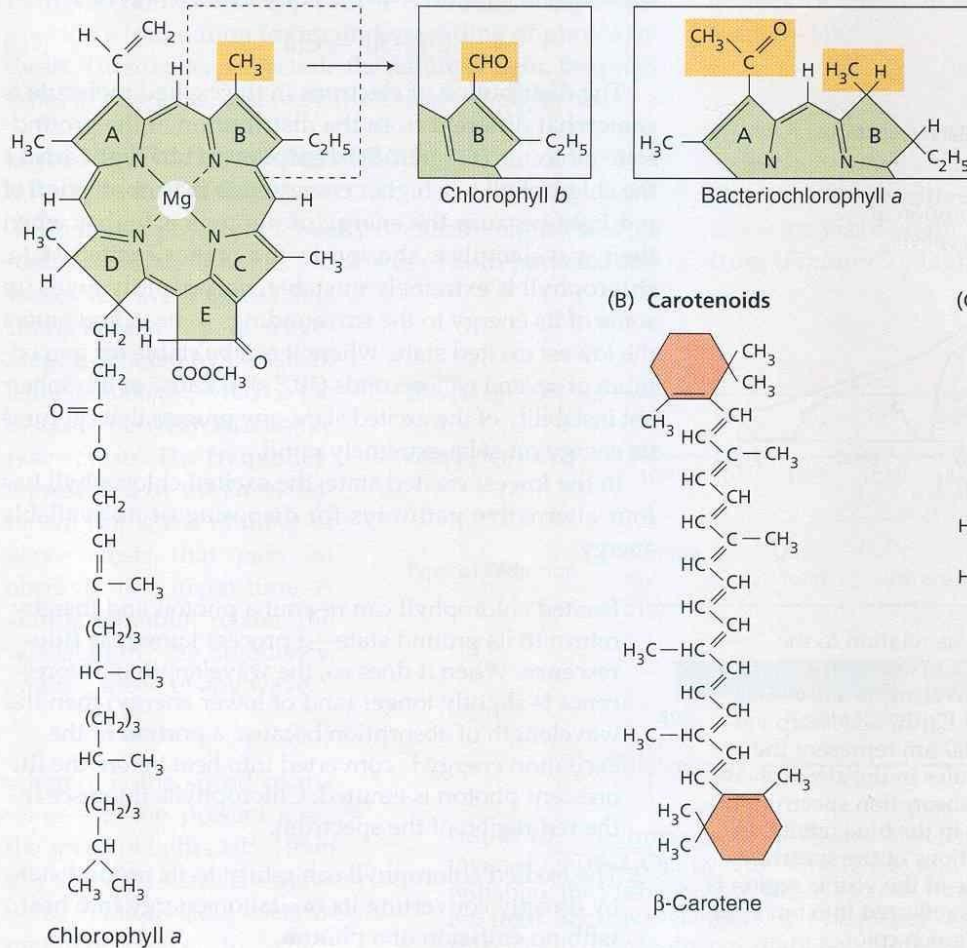
- karotenoidi

 - karoteni i ksantofili

 - u svim fotosintetskim organizmima

STRUKTURE FOTOSINTETSKIH PIGMENATA

(A) Chlorophylls



Klorofili - prstenasta struktura
porfirin (tetrapirolov prsten)

4 pirolova prstena

Mg

ciklopentanonski prsten na
pirolovom prstenu C
alkohol fitol (prsten D)

Prsten B

Chl a - metilna skupina

Chl b - aldehidna skupina

Karotenoidi

-konjugirane dvostruke veze

-karoteni

-ksantofili - kisikov atom
u terminalnim prstenovima

ULOGE FOTOSINTETSKIH PIGMENATA

klorofili

- apsorpcija svjetlosti
- prijenos energije
- prijenos elektrona

karotenoidi

- pomoćni pigmenti (apsorpcija svjetlosti i prijenos na klorofile)
- zaštita klorofila od fotooksidacije

Biljka tretirana
herbicidom koji blokira
biosintezu karotenoida

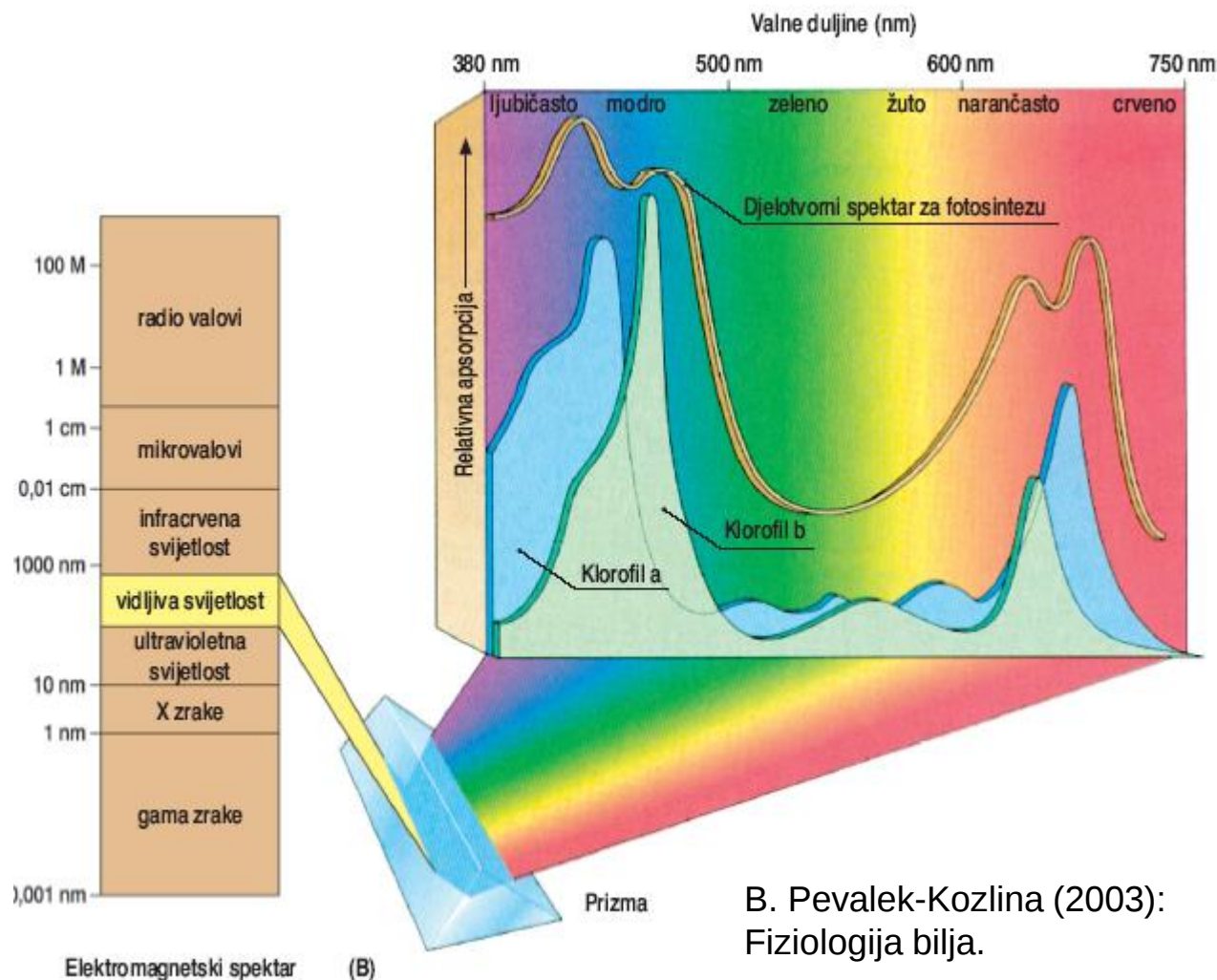


DJELOTVORNI (AKCIJSKI) SPEKTAR FOTOSINTEZE

-jačina odgovora biološkog sustava na svjetlost određenih valnih duljina

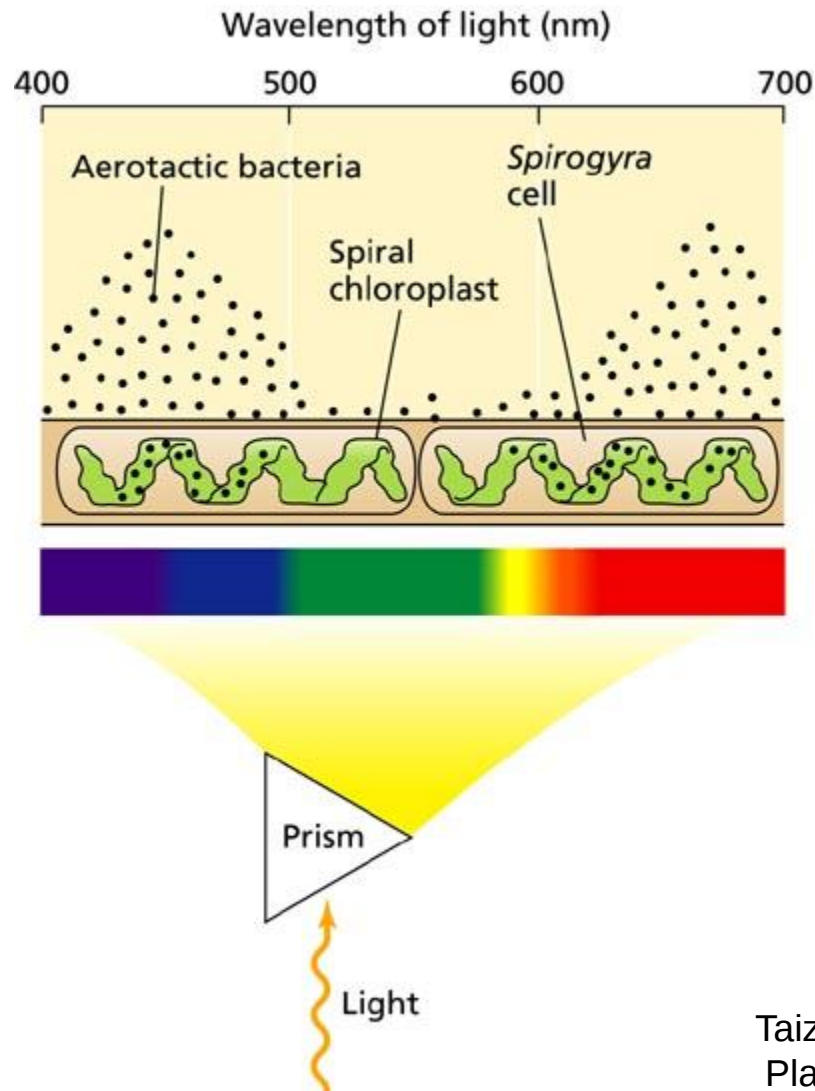
-dobiva se mjerenjem stope fotosinteze (npr. količine oslobođenog kisika) pri različitim valnim duljinama svjetlosti

-ne poklapa se u potpunosti s apsorpcijskim spektrom klorofila a



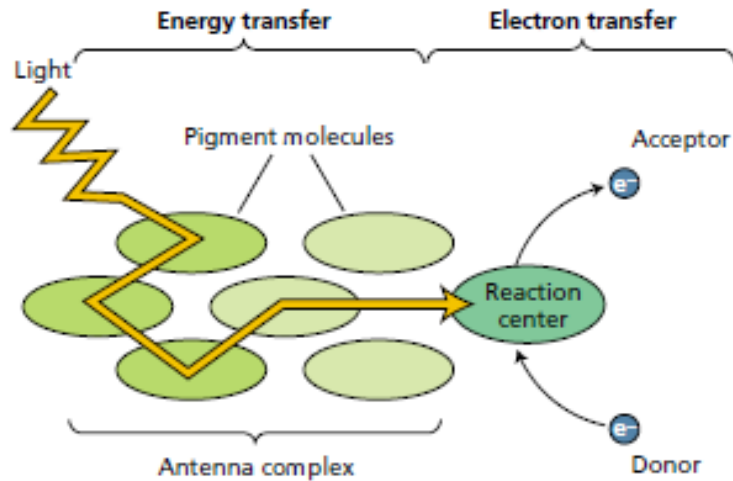
B. Pevalsek-Kozlina (2003):
Fiziologija bilja.

Određivanje akcijskog spektra (T. W. Engelmann, 19. st.)



Taiz, L., Zeiger, E. (2002).
Plant Physiology.

ANTENSKI KOMPLEKS I REAKCIJSKO SREDIŠTE U PSI I PSII

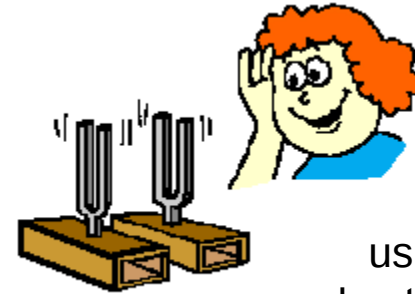


Taiz, L., Zeiger, E. (2002).
Plant Physiology.

Reakcijsko središte – skupina integralnih membranskih proteina i klorofil - primaju energiju s kompleksa antena i pretvaraju u kemijsku energiju (razdvajanje naboja, tj. fotokemijska reakcija)

-klorofil (dimer) i nekoliko akceptora elektrona

“**Antene**” - kompleksi pigmenata i proteina -apsorpcija svjetlosti i prijenos **energije** u reakcijsko središte (rezonantni prijenos)



usporedba s
akustičkom vilicom

Fotokemijska reakcija u
reakcijskom središtu
 $\text{Chl A} \rightarrow \text{Chl}^*\text{A} \rightarrow \text{Chl}^+\text{A}^-$

(A = akceptor)

PRIJENOS ENERGIJE NA REAKCIJSKO SREDIŠTE

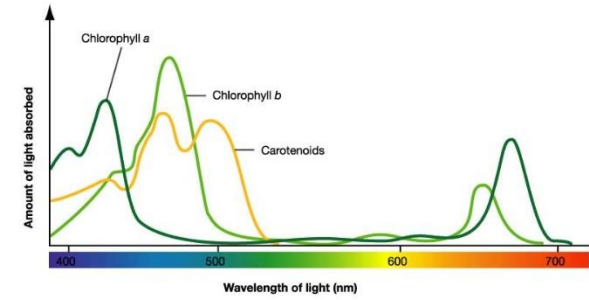
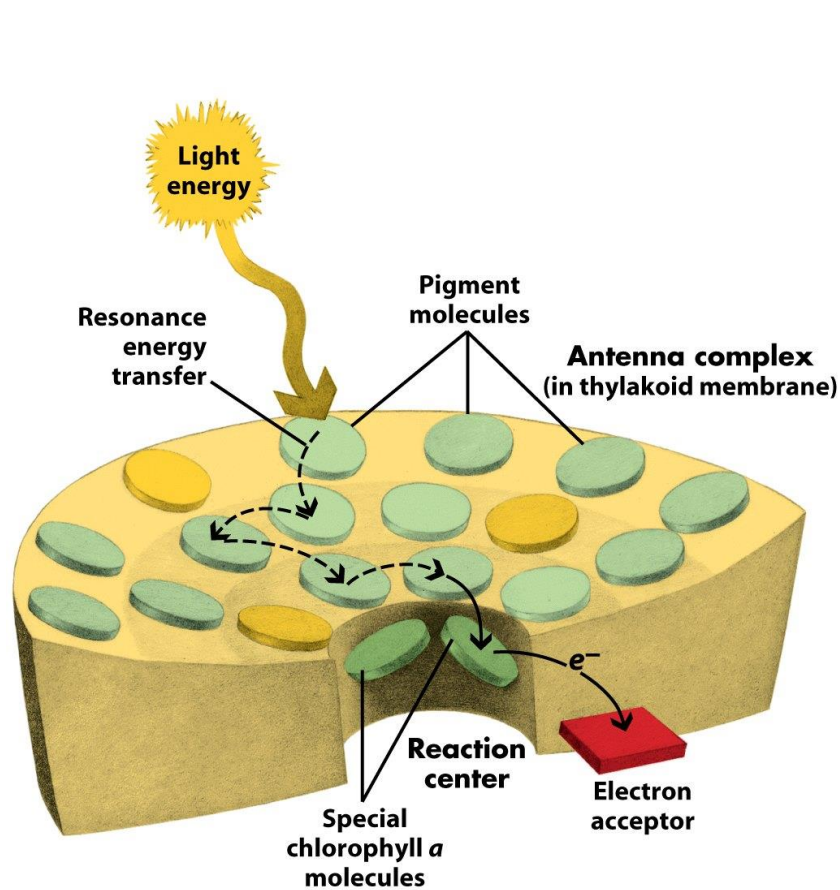
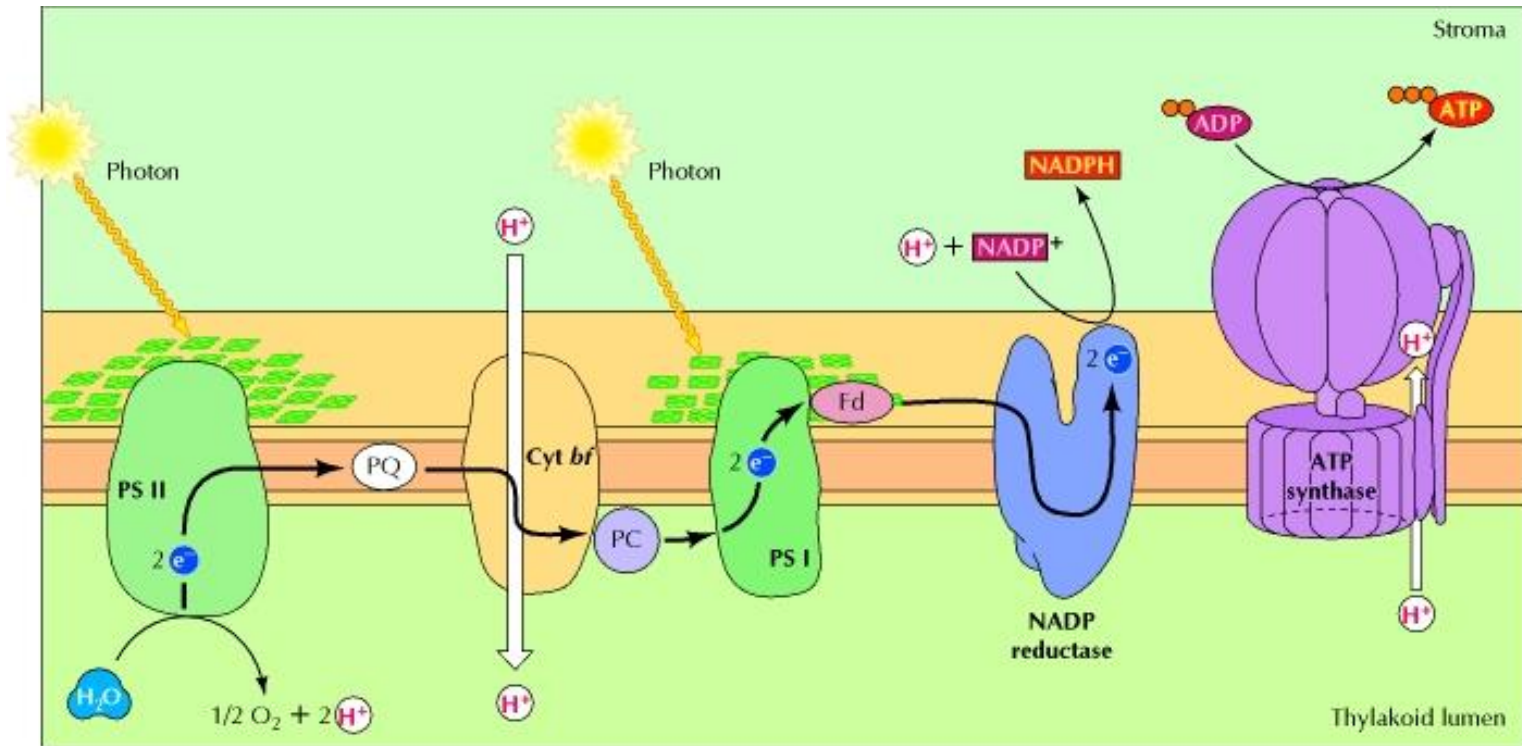


Figure 7-10
Biology of Plants, Seventh Edition
© 2005 W. H. Freeman and Company

PRIJENOS ELEKTRONA U TILAKOIDNOJ MEMBRANI

- provodi se na proteinskim kompleksima:
 - fotosistem II, citokrom b_6f , fotosistem I

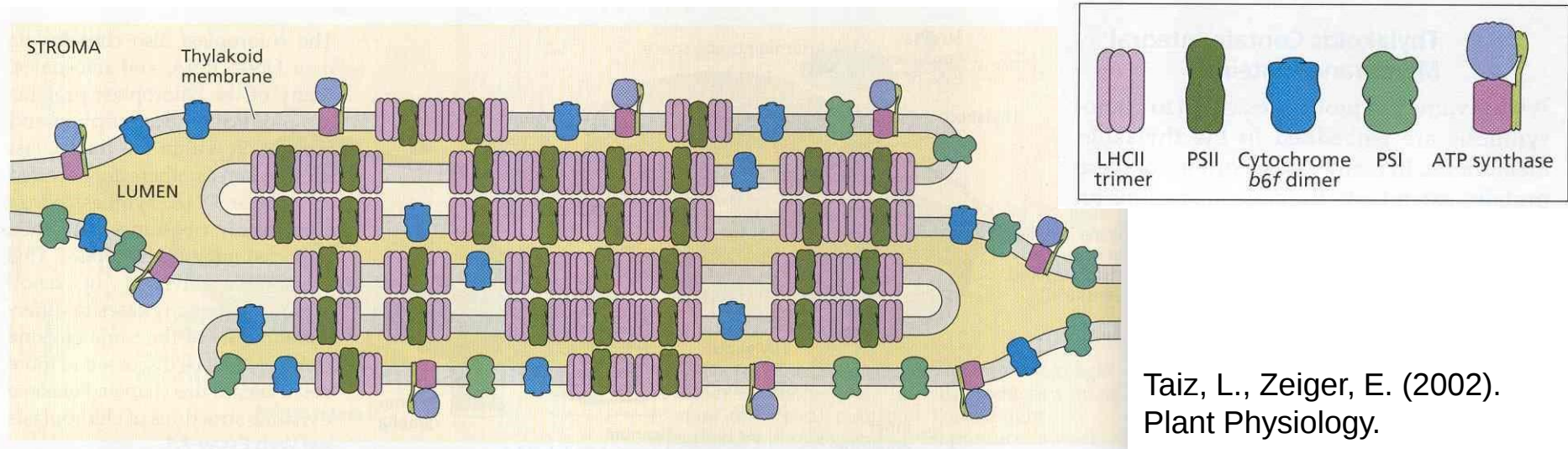


Taiz L., Zeiger E. (2010). Plant Physiology

Fd – feredoksin

-produkti puta prijenosa elektrona: ATP i NADPH, O_2

ORGANIZACIJA PROTEINSKIH KOMPLEKSA NA TILAKOIDNOJ MEMBRANI



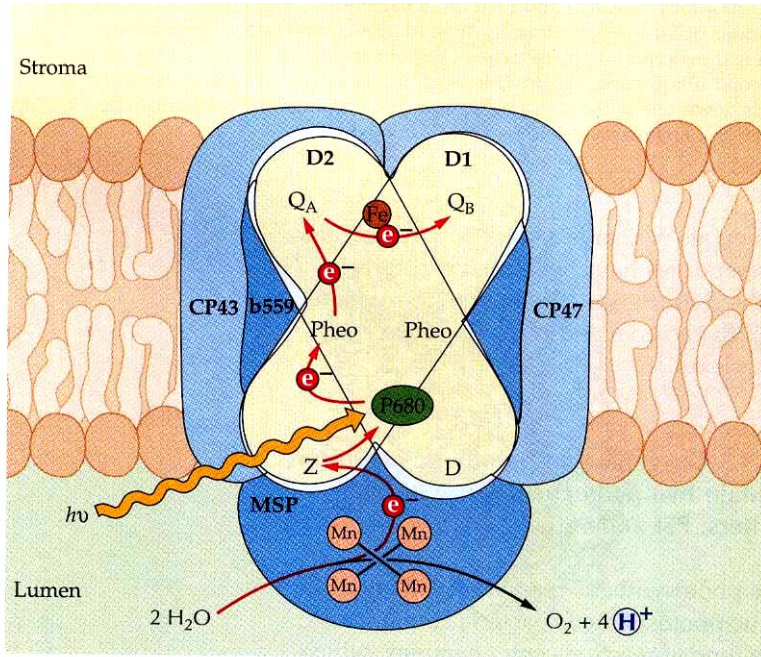
PSII – u grana tilakoidima

PSI, ATP-sintaza – na stroma-tilakoidima i krajnjim dijelovima grana-tilakoida

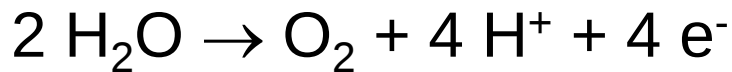
citokrom b_6f kompleks u lancu prijenosa elektrona – jednolika raspodjela između stroma i grana-tilakoida

Građa reakcijskih središta fotosistema I i fotosistema II

PSII

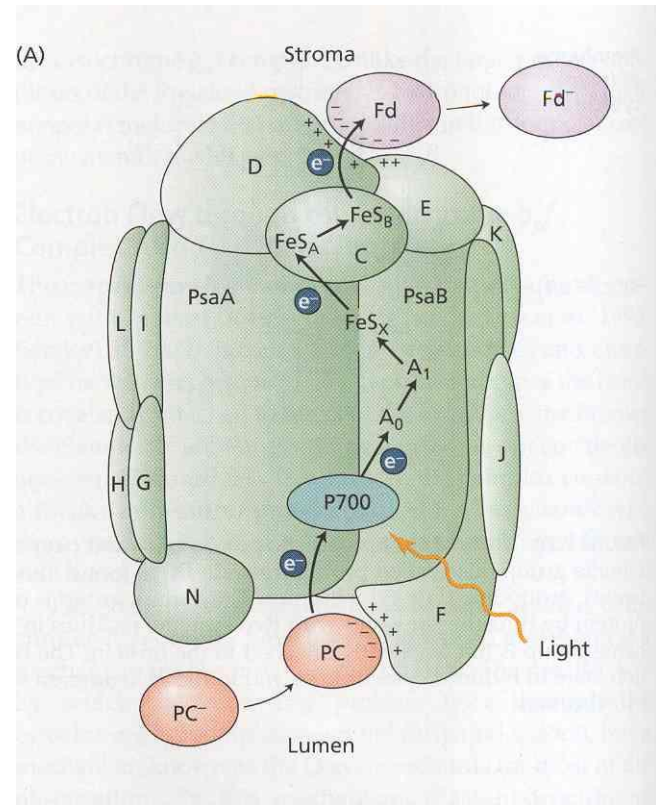


Oksidacija vode:



Buchanan, B., Gruissem, W.,
Jones, R. L. (2002). Biochemistry
and Molecular Biology of Plants.

PSI



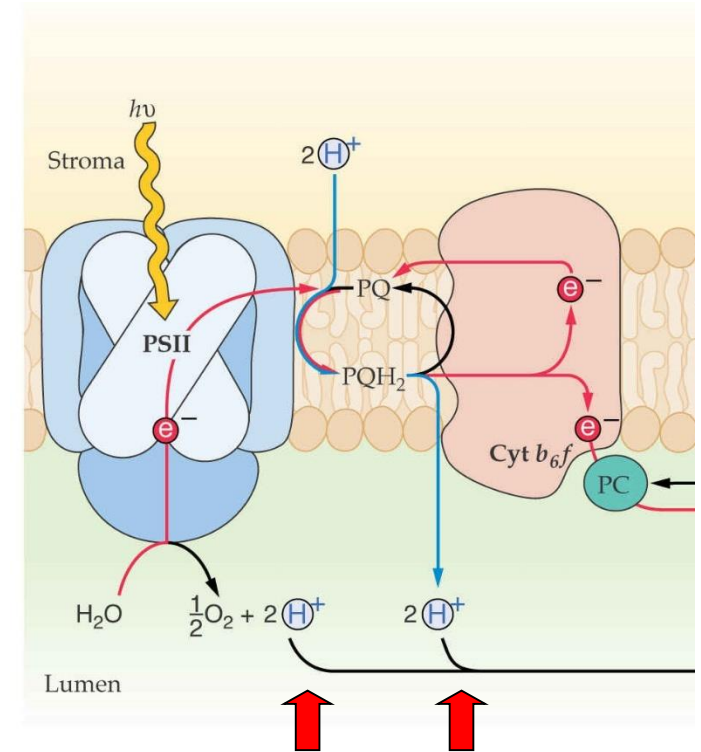
Taiz, L., Zeiger, E. (2002). Plant Physiology.

NASTAJANJE ELEKTRO- KEMIJSKOG GRADIJENTA H^+ IONA NA TILAKOIDNOJ MEMBRANI

Mjesta akumulacije protona
u lumen tilakoida

1. Sustav za oksidaciju vode

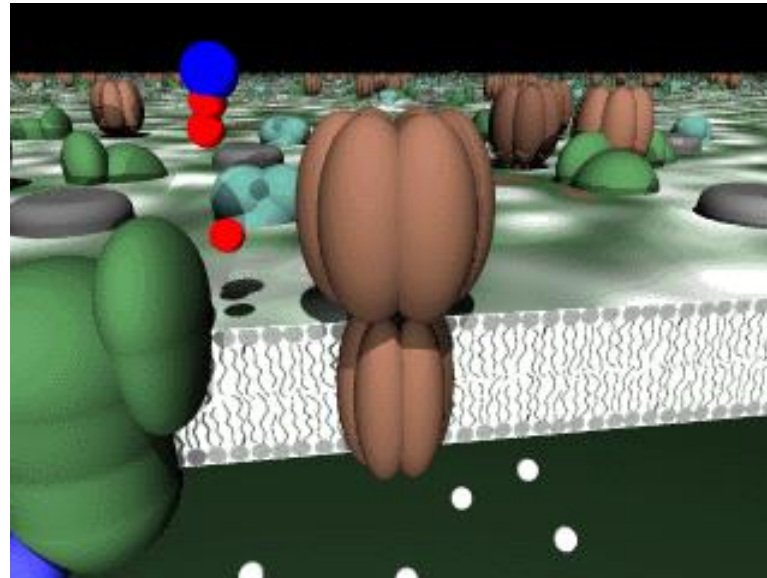
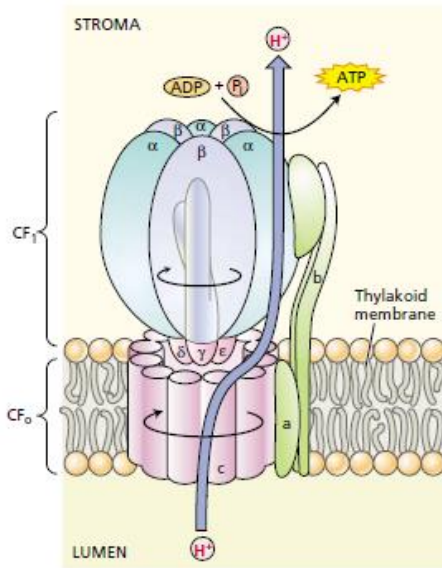
2. Protoni oslobođeni pri oksidaciji plastokinola na kompleksu $cyt\ b_6f$



KEMIOSMOTSKI MEHANIZAM (Mitchell, 1960.)

- razlika koncentracije iona na suprotnim stranama membrane (elektrokemijski gradijent) služi kao izvor slobodne energije koju stanica može koristiti za sintezu ATP-a
- isti mehanizam prisutan je u mitohondriju, u procesu aerobnog disanja

ATP-sintaza



stroma

lumen

Nije u lancu prijenosa elektrona!

-enzimski kompleks, 400 kDa

-CF₀ – hidrofobni, membranski dio, formira kanal za prolaz H⁺-iona

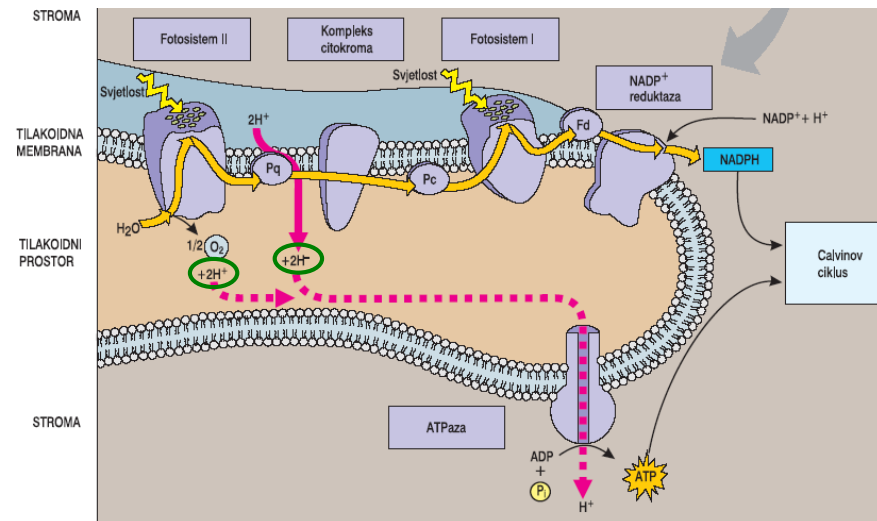
-CF₁ – proteže se u stromu, sastoji se od nekoliko peptida
(3 kopije α i 3 kopije β, naizmjenično poredanih)

Mehanizam sinteze ATP-a uključuje konformacijsku promjenu
tijekom prolaska H⁺-iona

Povezanost lanca prijenosa elektrona i sinteze ATP-a

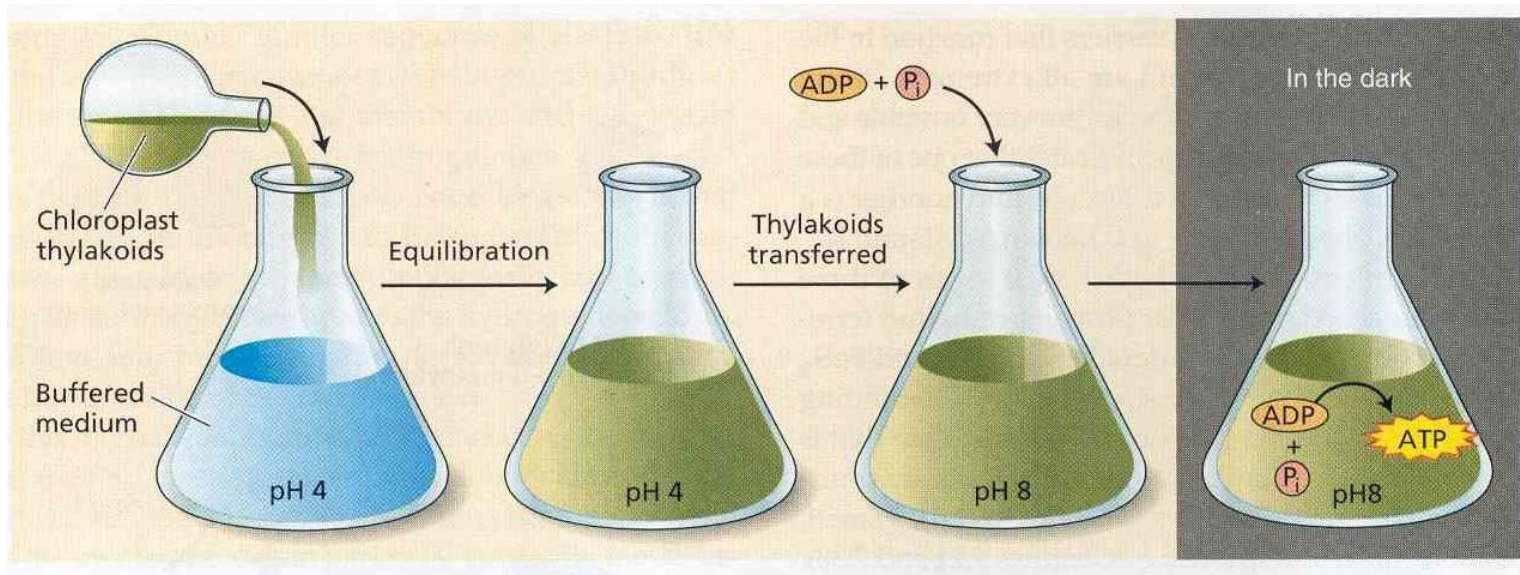
FOTOFOSFORILACIJA - sinteza ATP-a ovisna o svjetlosti

-sinteza ATP-a je energetski povezana s prijenosom elektrona
→ stvaranje protonskog gradijenta



Pevalek-Kozlina, B. (2003). Fiziologija bilja.

Pokus A. Jagendorfa i sur.



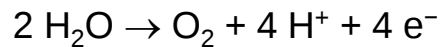
Taiz, L., Zeiger, E. (2002). Plant Physiology.

Z-SHEMA PRIJENOSA ELEKTRONA

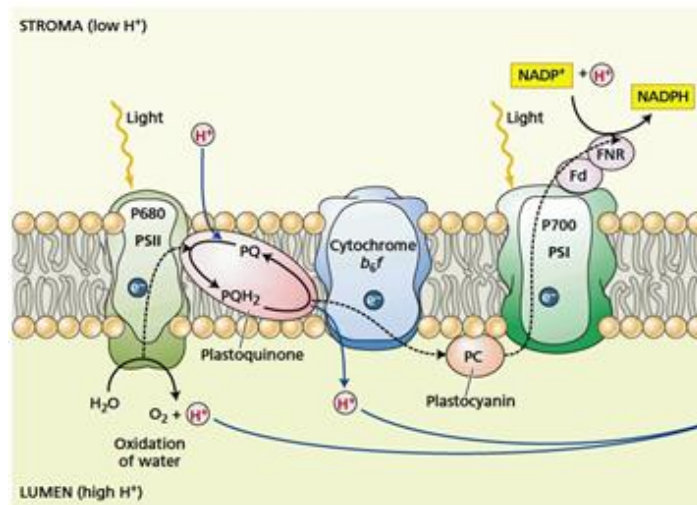
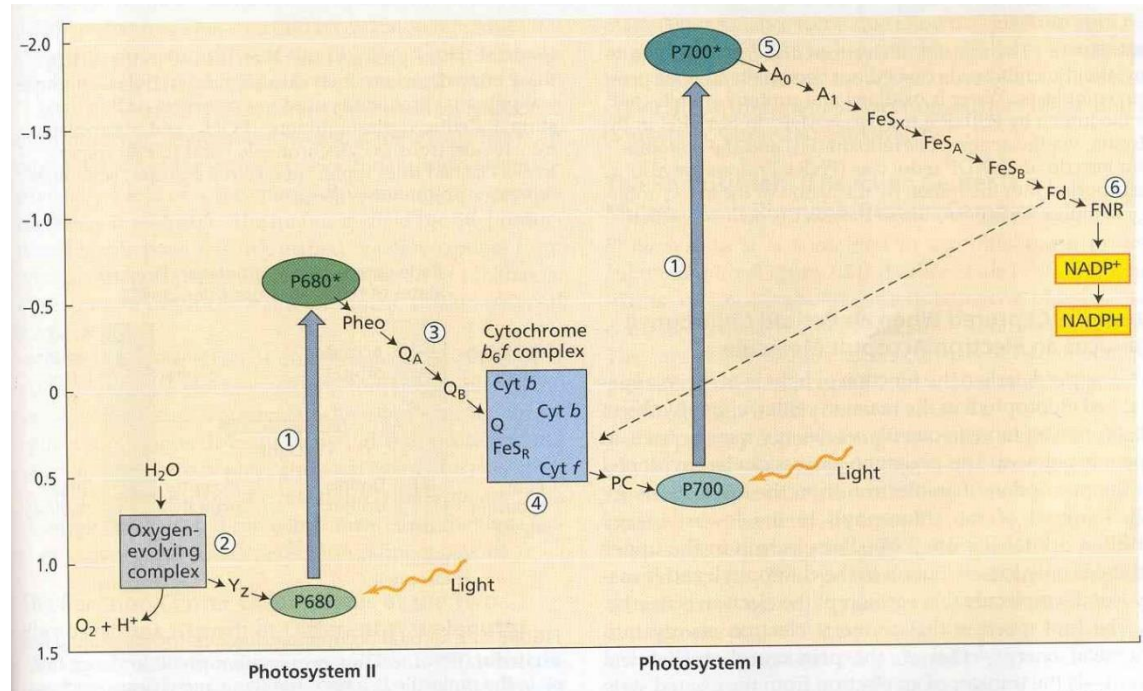
-svi prenosioci elektrona
u lancu prijenosa el.
prikazani na mjestu
koje odgovara njihovom
redoks-potencijalu

Oksidacija vode

-na fotosistemu II

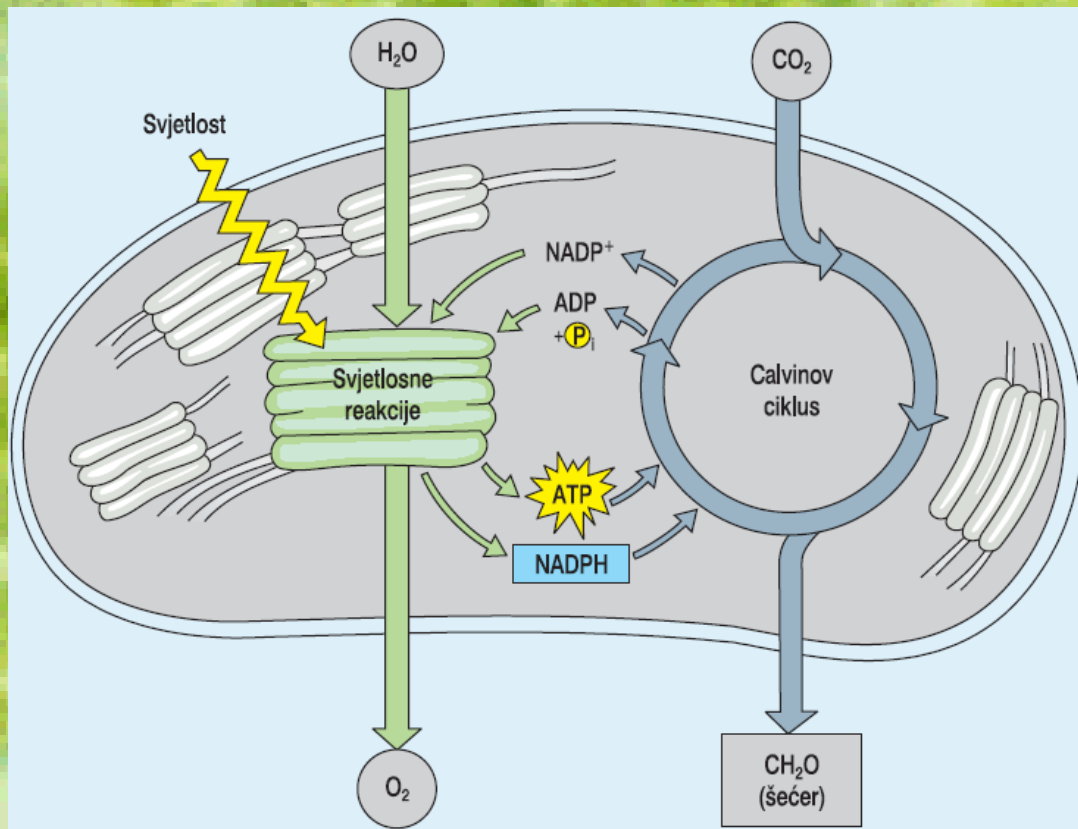


Taiz, L., Zeiger, E. (2002).
Plant Physiology.



CALVINOV CIKLUS

FOTOSINTETSKI C_3 REDUKTIVNI CIKLUS
REDUKTIVNI CIKLUS PENTOZA-FOSFATA



-cikličke reakcije
fotosinteze

-u stromi kloroplasta

Tri stupnja:

1. Karboksilacija

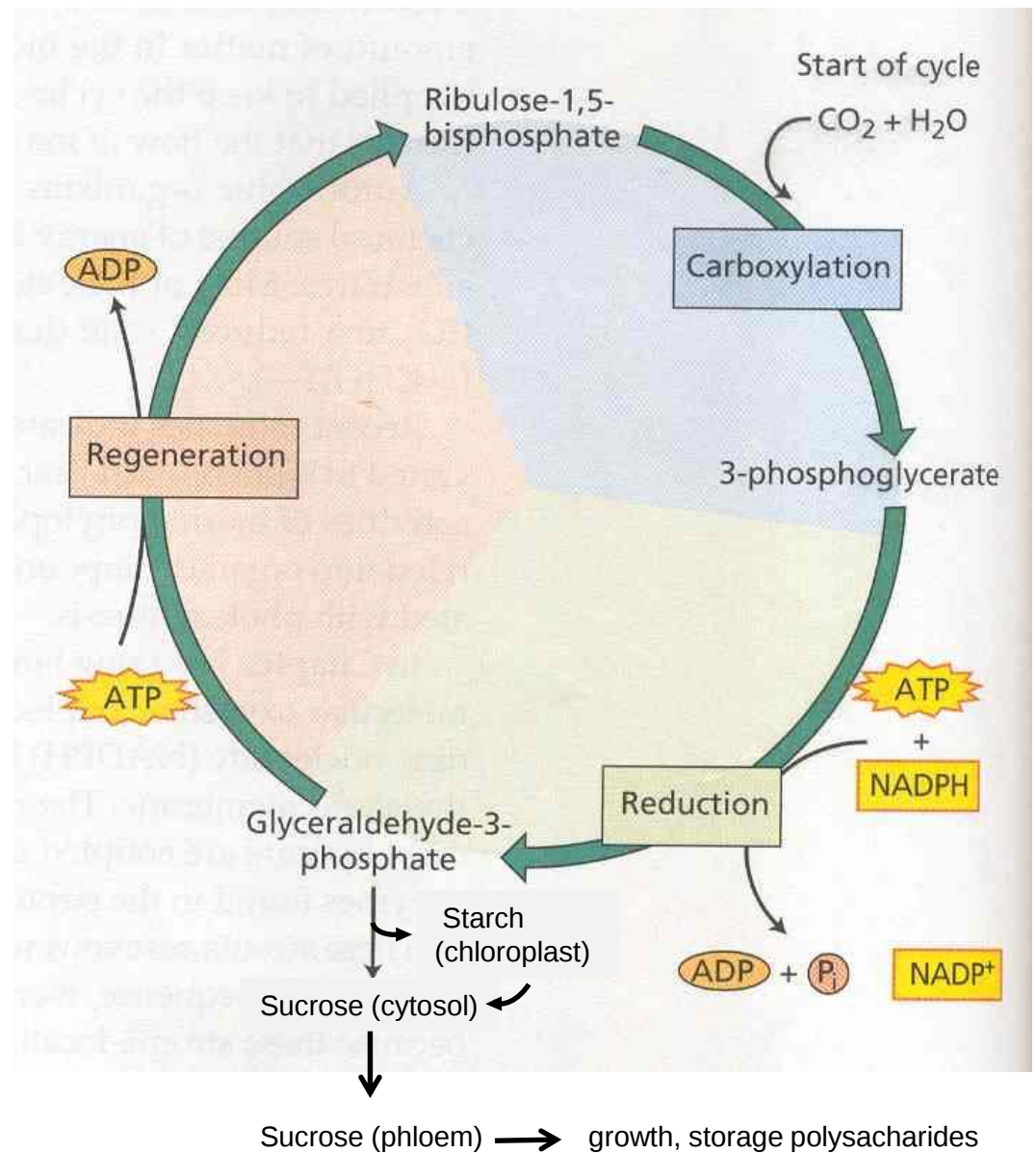
-ugradnja CO_2 u akceptorsku molekulu **ribulozu-1,5-difosfat (RuBP)**; nastaju dvije molekule **3-fosfoglicerata**

2. Redukcija

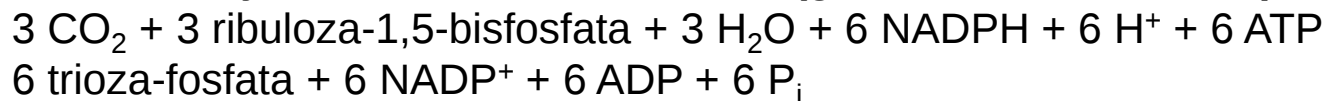
-karboksilna kis. se uz NADPH i ATP reducira u **gliceraldehid-3-fosfat**

3. Regeneracija

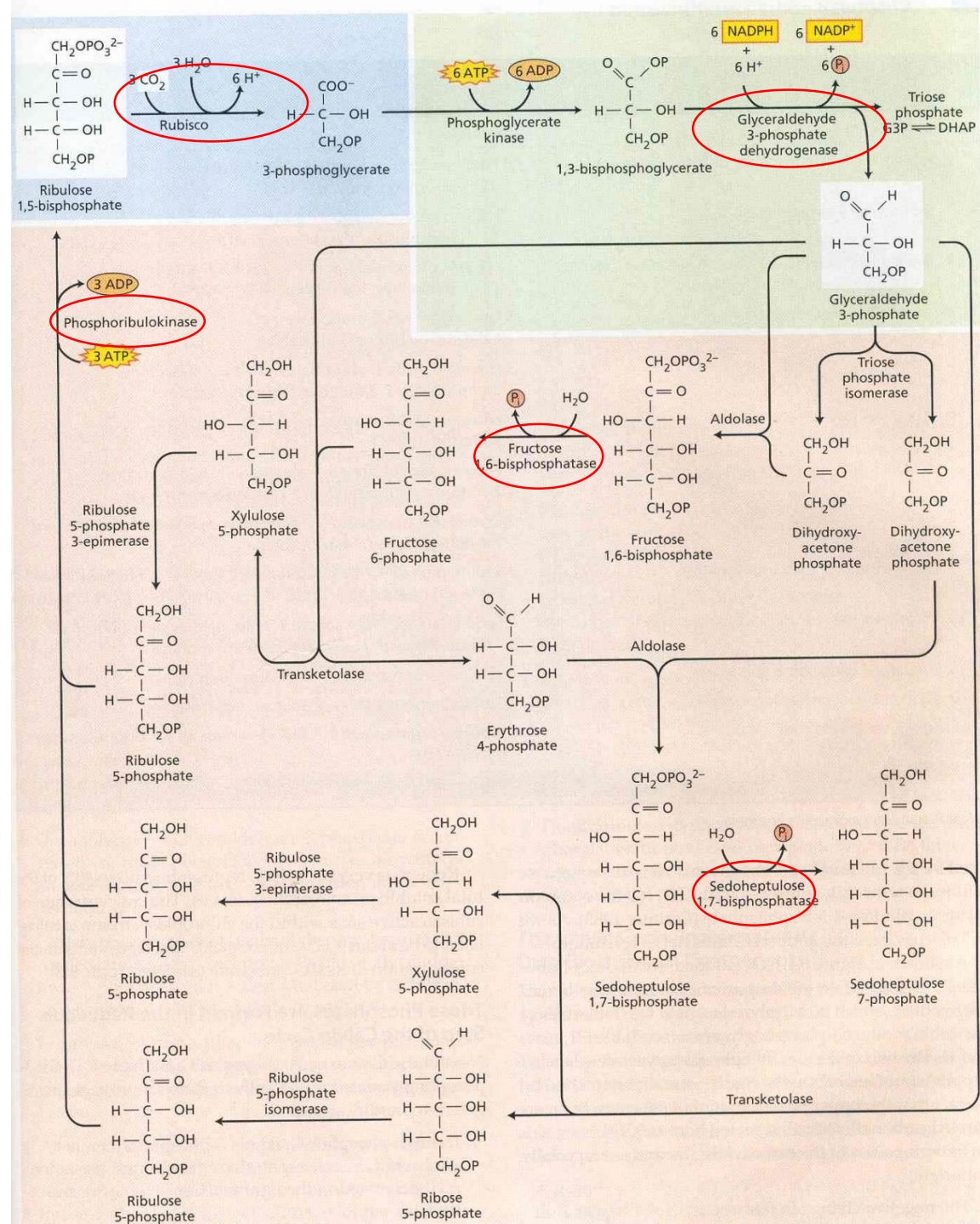
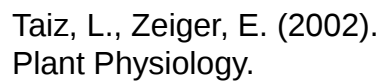
-akceptor CO_2 , tj. **RuBP**, se regenerira iz gliceraldehid-3-fosfata



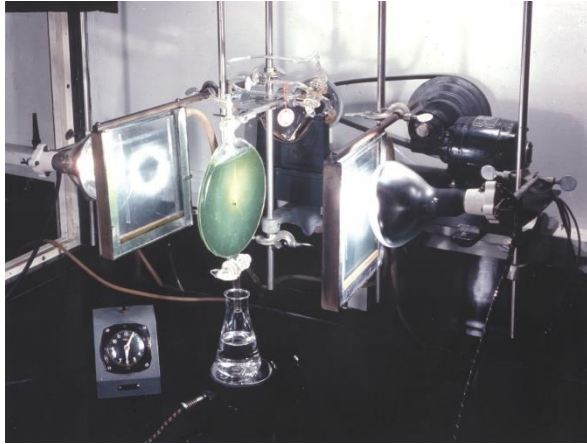
Neto-reakcija biosinteze trioza-fosfata (gliceraldehid-3-fosfata) u Calvinovom ciklusu:



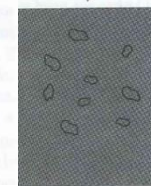
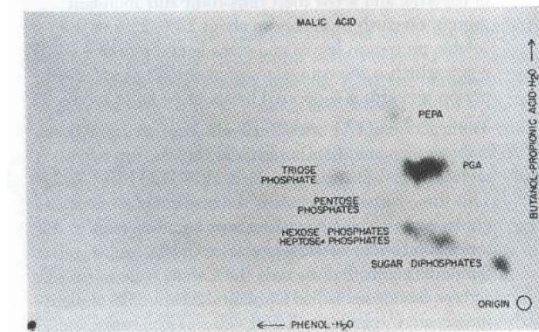
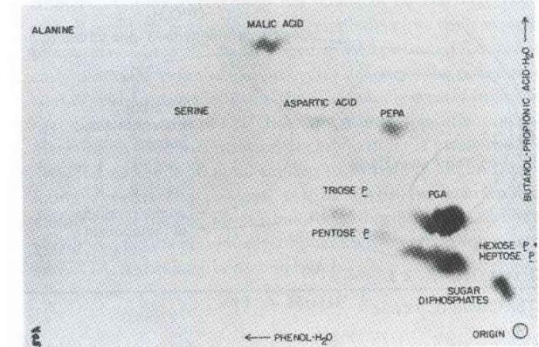
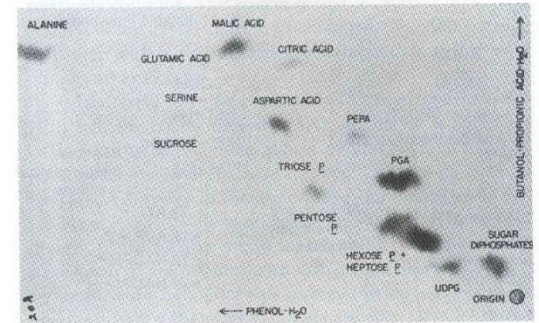
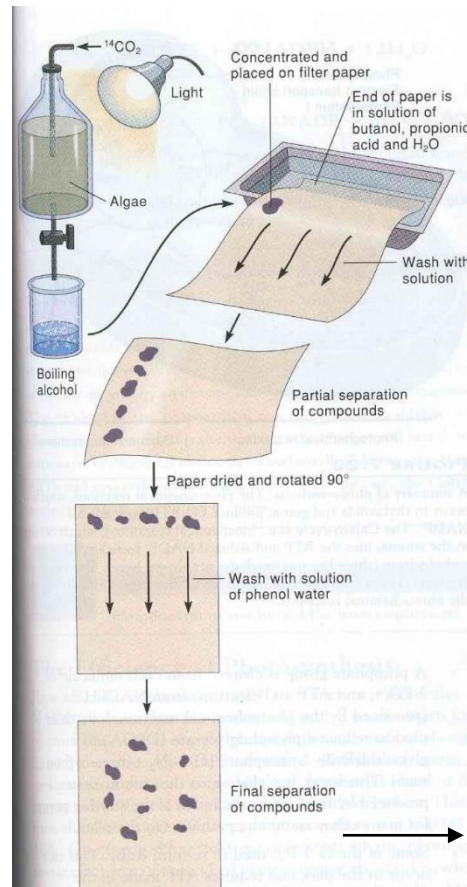
Taiz, L., Zeiger, E. (2002).
Plant Physiology.



Melvin Calvin i sur. 1950. g. (Nobelova nagrada 1961. g.)



Chlorella
Scenedesmus

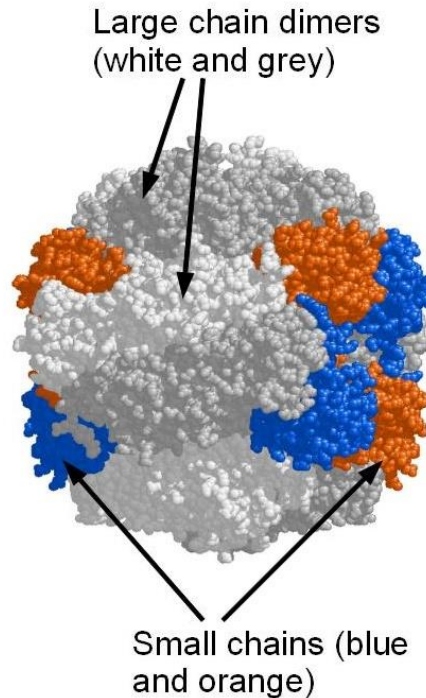


Rubisco

~40% ukupnih topljivih proteina u listovima

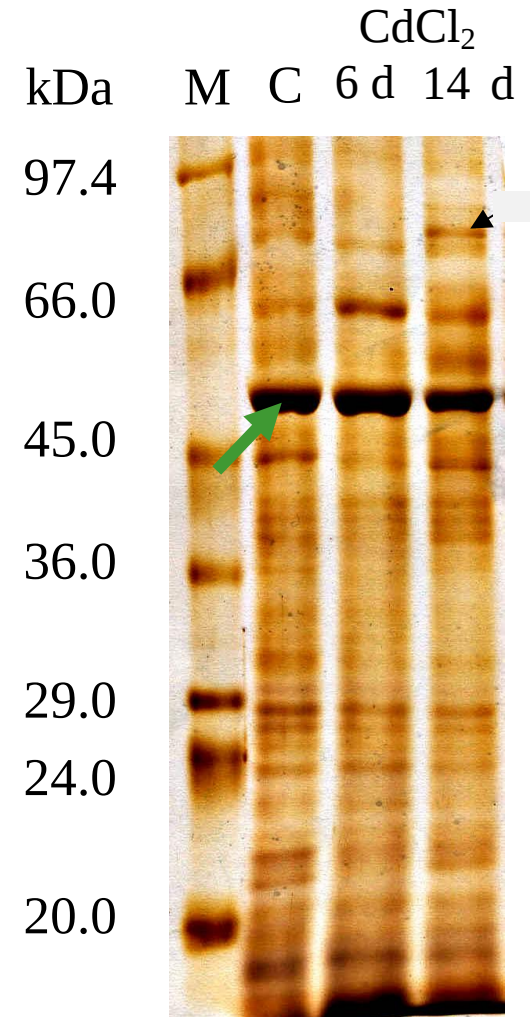
$M_r = 560$ kDa

-8 velikih katalitičkih podjedinica (55 kDa) – 4 dimera
-8 malih podjed. (14 kDa) – 4 dimera



- gen za malu podjedinicu (*rbcS*) - u jezgri
 - produkt je polipeptid sintetiziran na ribosomima citosola
- gen za veliku podjedinicu (*rbcL*) – u kloroplastu
- sastavljanje Rubisco – u kloroplastu

SDS-PAGE



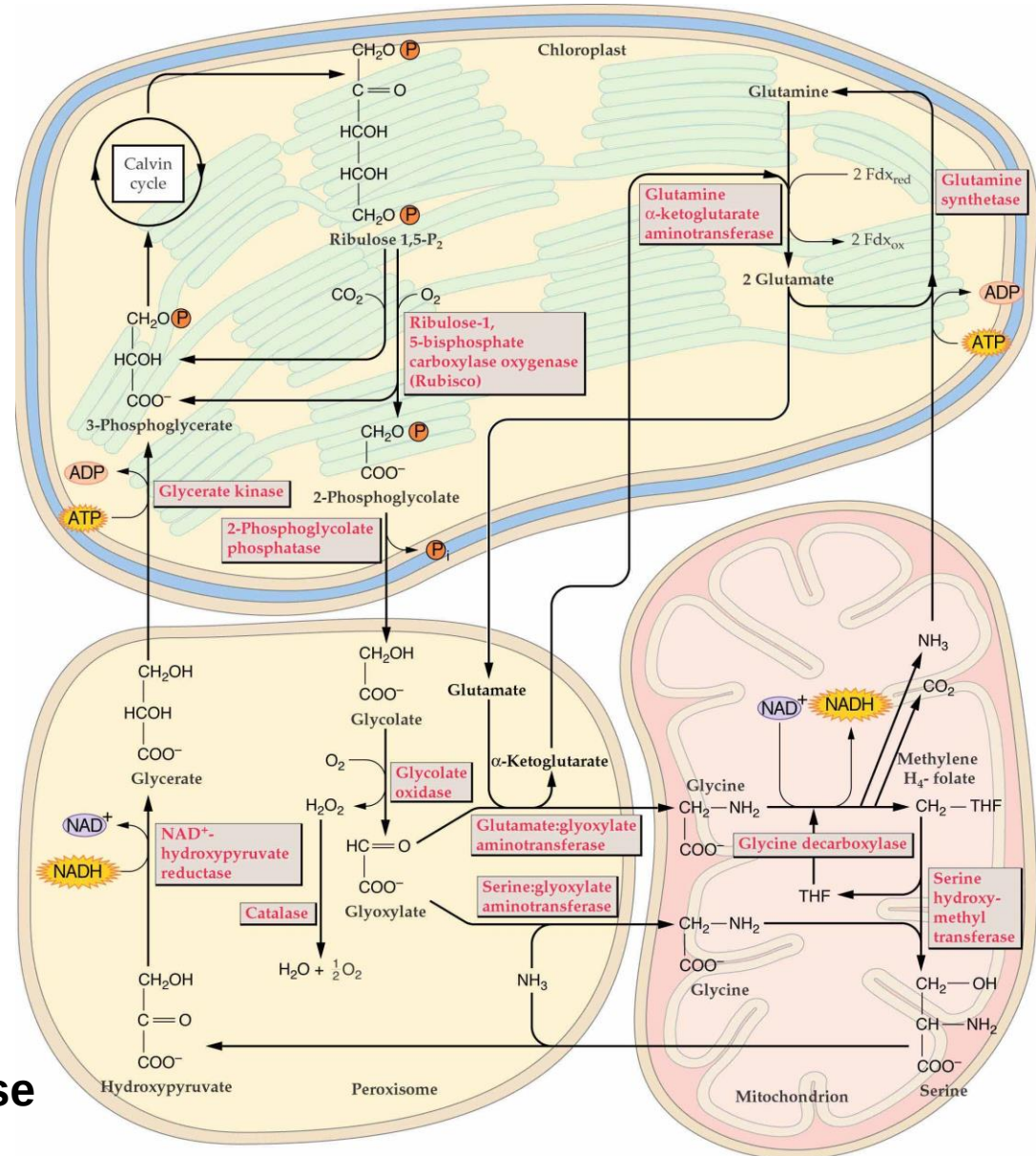
C₂-oksidativni fotosintetski ciklus ugljika (fotorespiracija)

-odvija se u kloroplastu, peroksisomu i mitohondriju

-"spašava" 75% ugljikovih atoma koji bi bili izgubljeni zbog oksigenazne reakcije Rubisco (2-fosfoglikolat se ne može koristiti u Calvinovom ciklusu)



U ciklusu fotorespiracije dvije molekule 2-fosfoglikolata se pretvaraju u jednu molekulu 3-fosfoglicerata, oslobađa se jedna molekula CO₂.



Buchanan, B., Gruissem, W., Jones, R. L. (2002). Biochemistry and Molecular Biology of Plants.

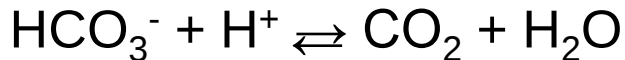
CRPKE ZA CO₂

-vodene biljke, jednostanične alge, cijanobakterije

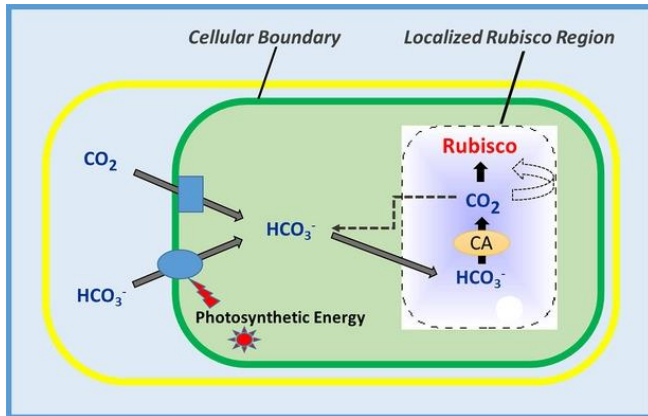
→ provode fotosintezu C₃ mehanizmom

-alge, cijanobakterije - niska stopa fotorespiracije, imaju **aktivni** mehanizam za primanje CO₂ i HCO₃⁻ koji koristi energiju ATP-a

-oslobađanje CO₂ djelovanjem karboanhidraze



→ povećanje koncentracije CO₂ u blizini enzima Rubisco

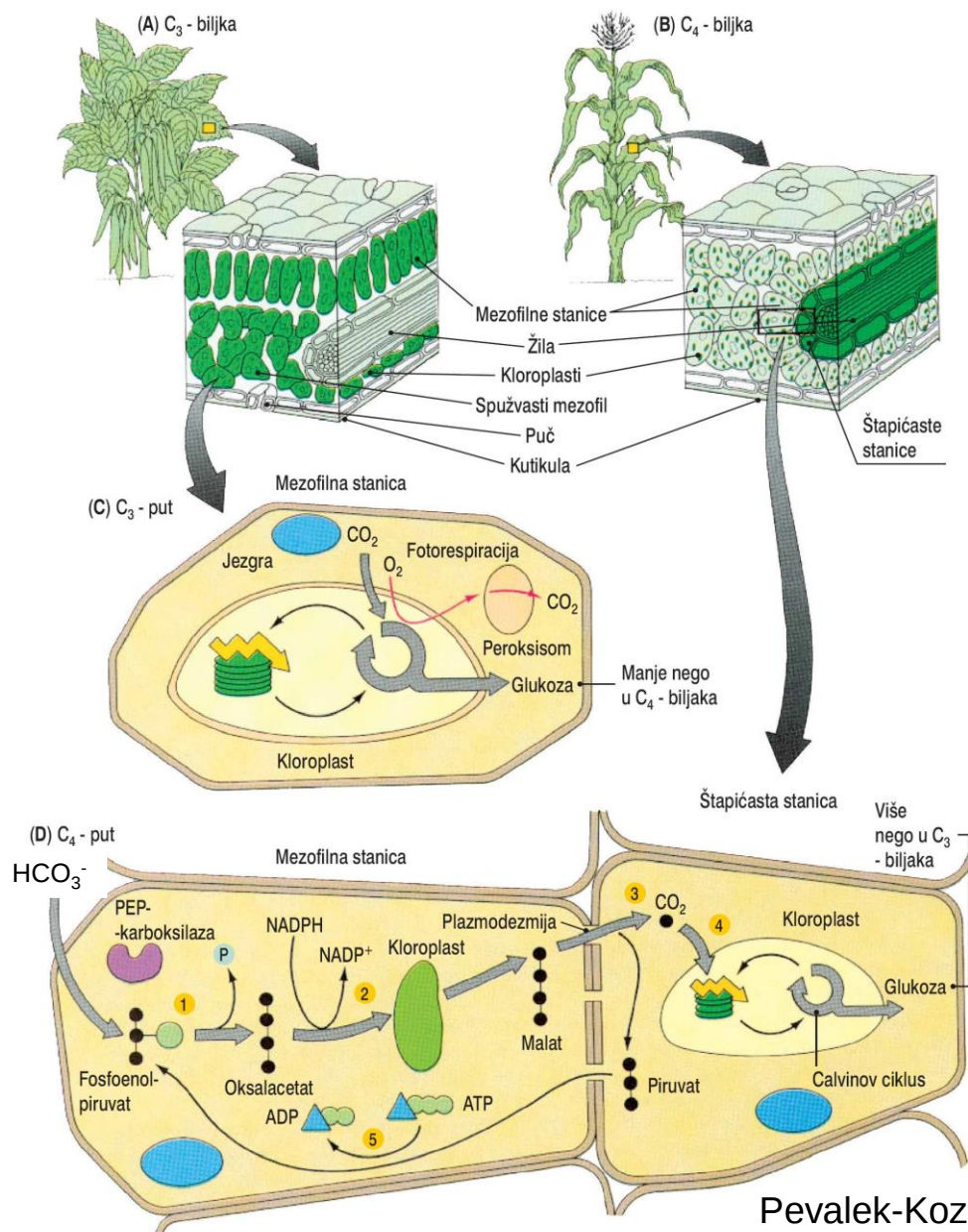


-aktivno primanje CO₂ i HCO₃⁻ u stanicu

-oslobađanje CO₂ uz karboanhidrazu (CA)

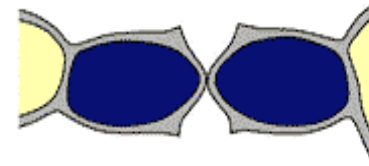
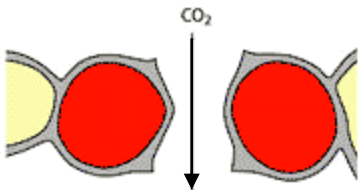
Wang Y, Stessman DJ, Spalding MH (2015). The CO₂ concentrating mechanism and photosynthetic carbon assimilation in limiting CO₂: how *Chlamydomonas* works against the gradient. *The Plant Journal* 82(3), 429-448.

C₄ FOTOSINTEZA

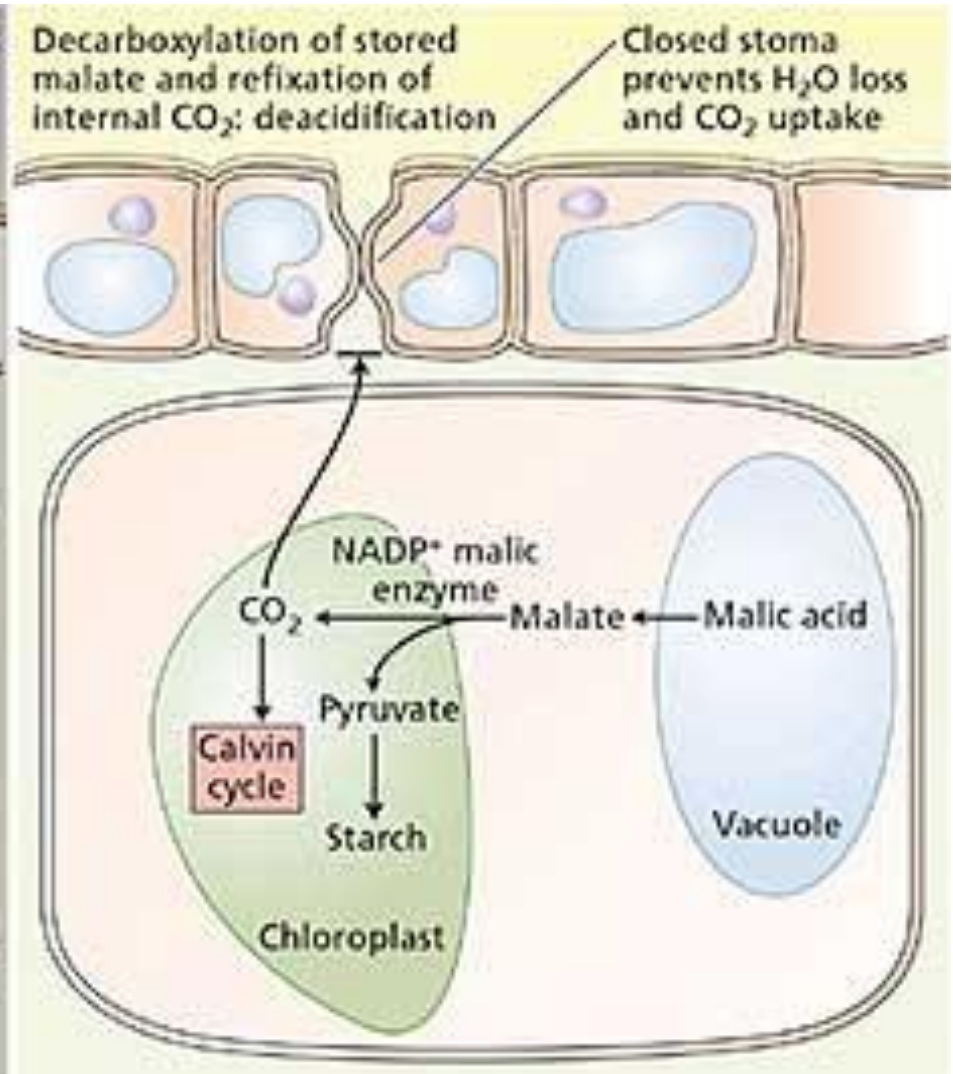
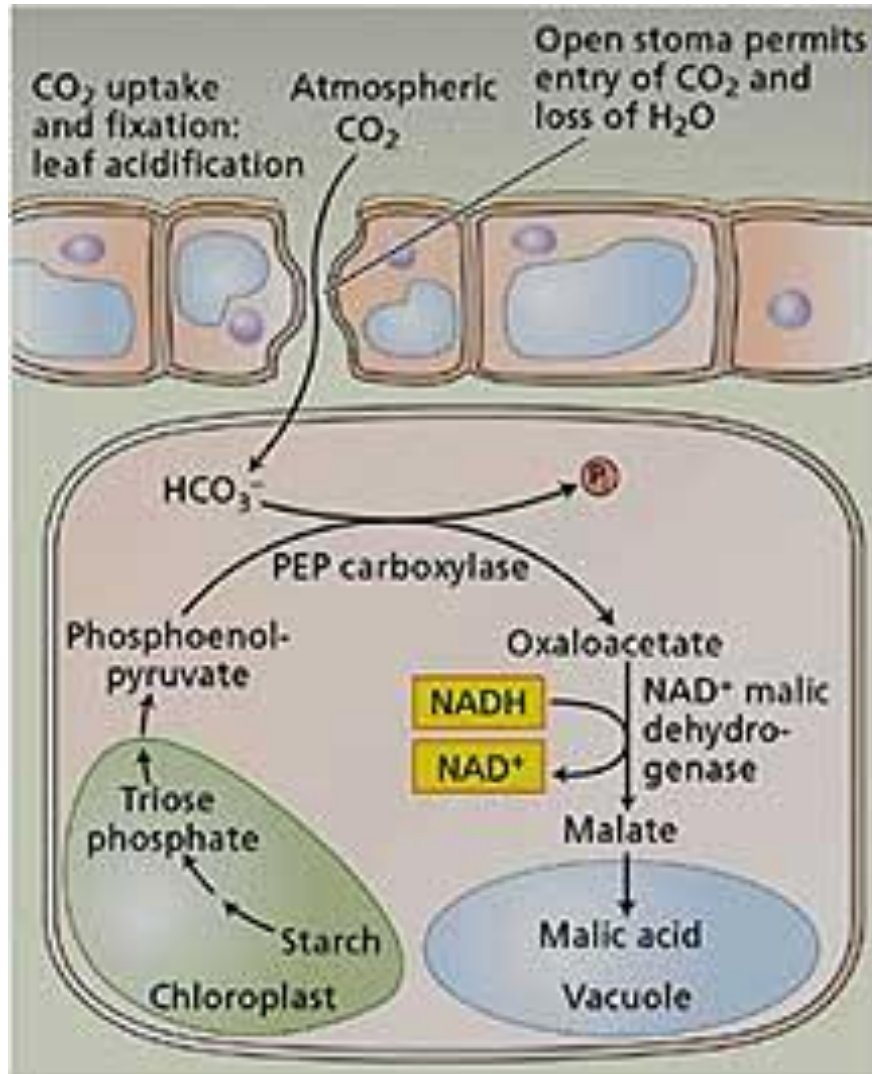


CAM-fotosinteza

noć

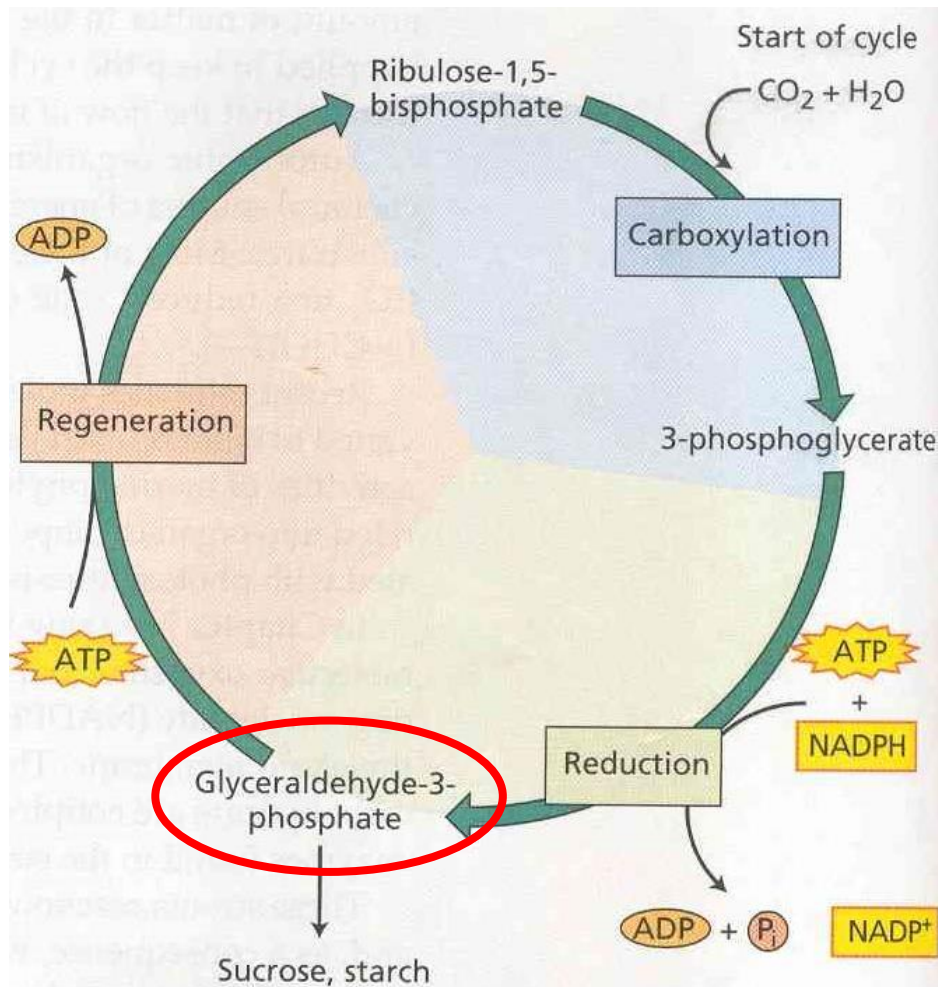


dan



BIOSINTEZA ŠKROBA I SAHAROZE

-saharoza i škrob – sintetiziraju se iz trioza-fosfata koji nastaju u Calvinovu ciklusu



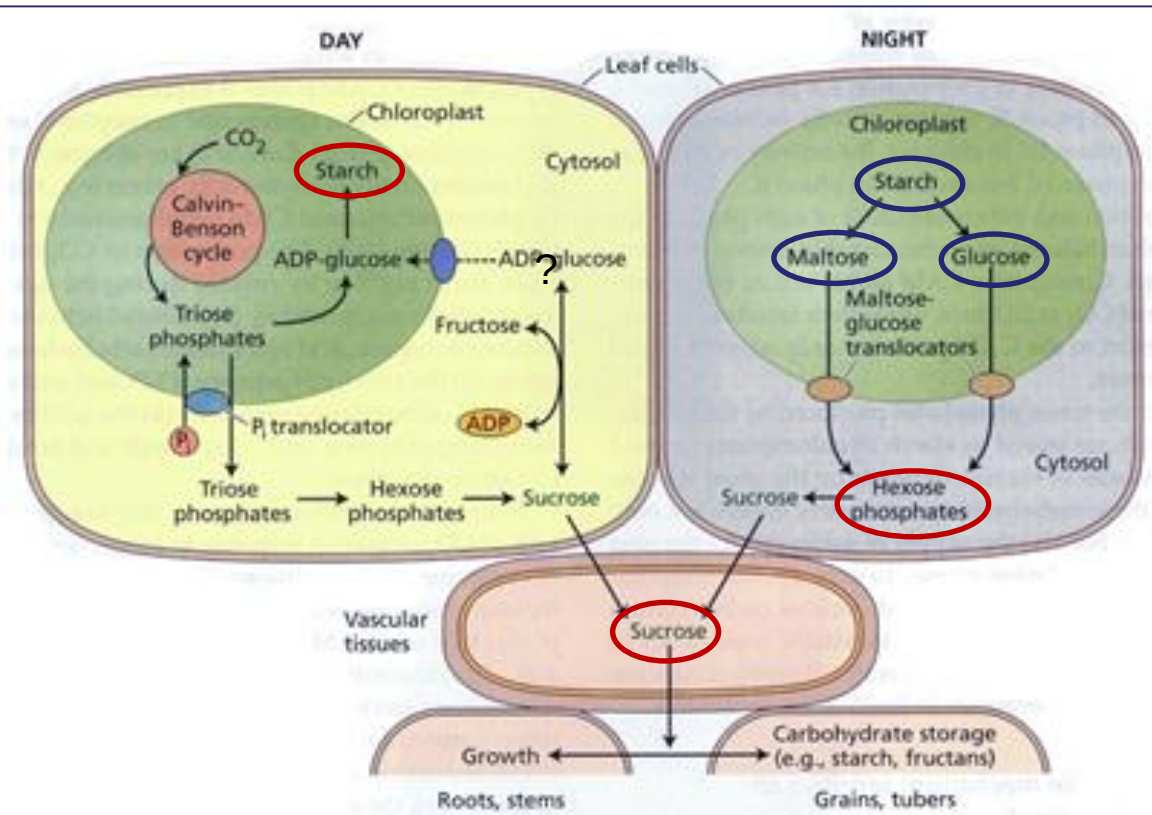
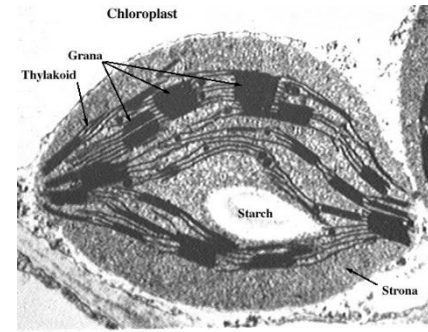
Saharoza

- izvor energije za stanične procese
- početna molekula za biosintezu staničnih strukturnih elemenata (npr. celuloze) i metabolita za stanične procese
- prijenos na velike udaljenosti
- ponekad spremišna tvar (u vakuolama spremišnih stanica manjeg broja biljaka, npr. šećerna repa, šećerna trska, mrkva)
- signalna uloga

Škrob

- spremišna tvar (kloroplasti, amiloplasti)

Biosinteza i raspodjela konačnih produkata fotosinteze (škroba i saharoze) tijekom dana i noći



Tijekom dana:

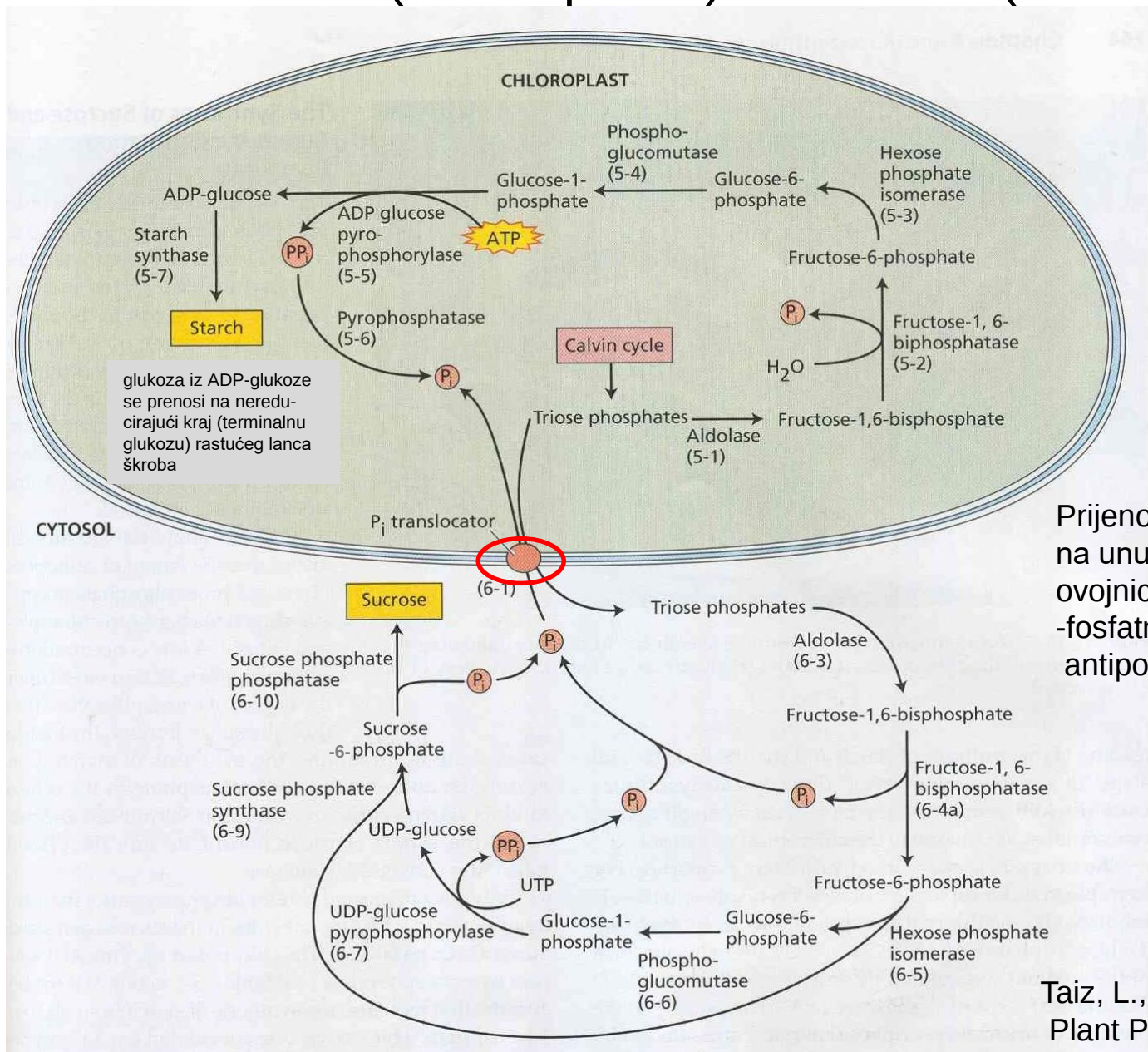
- biosinteza škroba u kloroplastu
- biosinteza saharoze u citosolu

(iz trioza-fosfata)

Tijekom noći:

- razgradnja škroba u kloroplastu do maltoze i glukoze
- biosinteza saharoze u citosolu (iz hek-soza-fosfata)

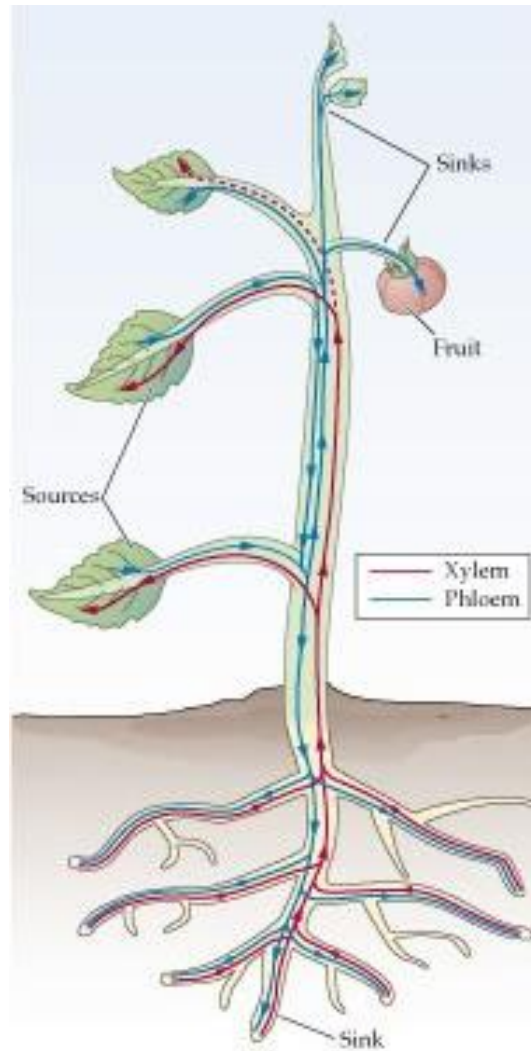
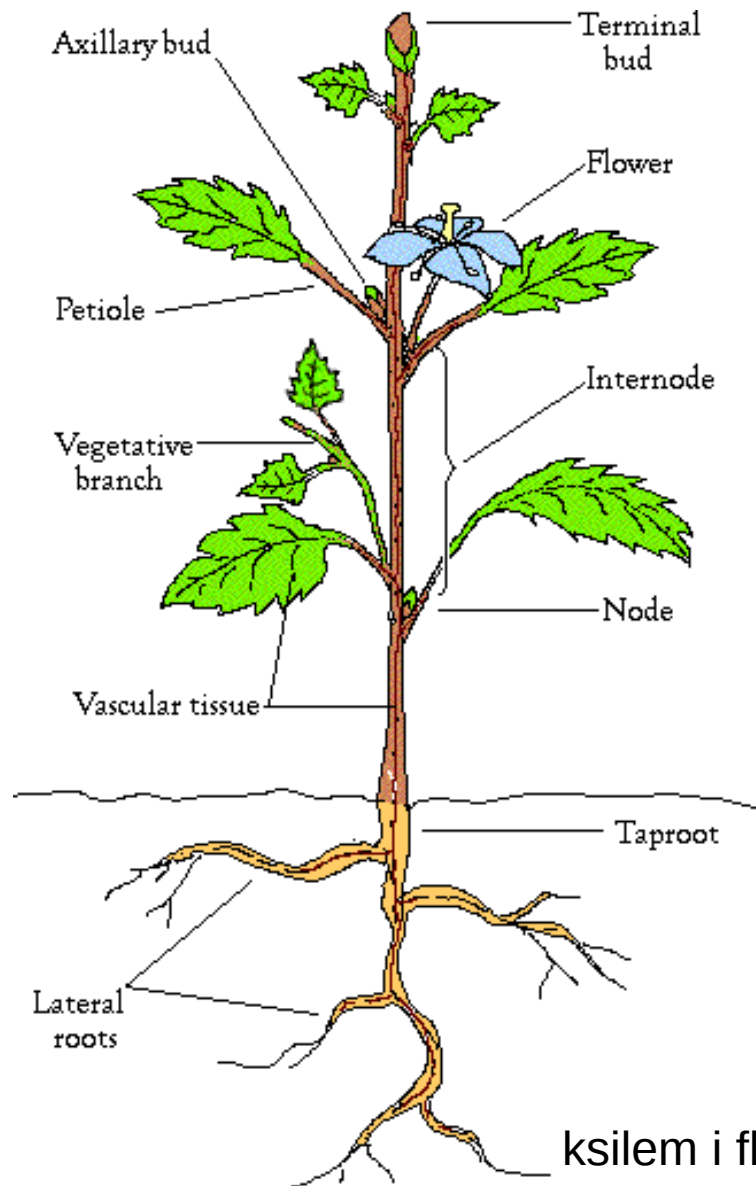
Biosinteza škroba (u kloroplastu) i saharoze (u citosolu)



Prijenosnik trioza-fosfata – na unutrašnjoj membrani ovojnice kloroplasta -fosfatni/trioza fosfatni antiporter

Taiz, L., Zeiger, E. (2002). Plant Physiology.

PRIJENOS ASIMILATA U BILJCI

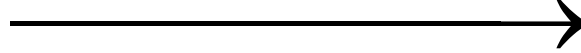


Buchanan, B., Gruissem, W., Jones, R. L. (2002). Biochemistry and Molecular Biology of Plants.

ksilem i floem – razlike u strukturi i funkciji

SMJER FLOEMSKOG PRIJENOSA

“IZVOR”



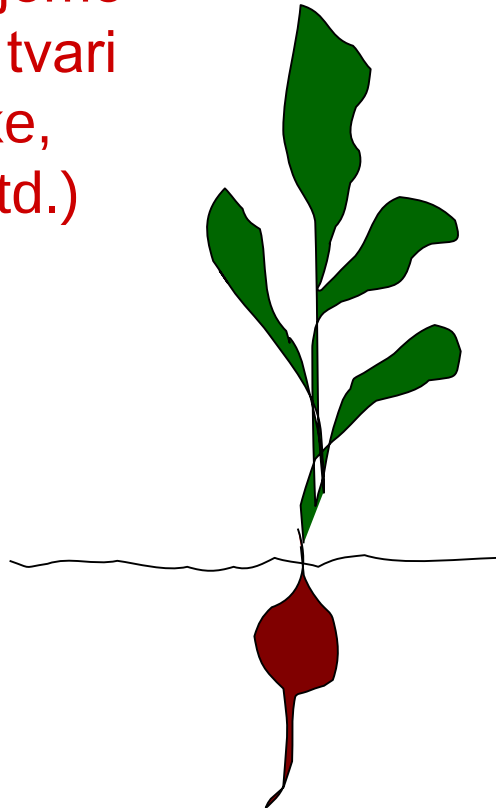
“IZLJEV”

područje snabdijevanja

područje metabolizma
i/ili skladištenja

- fotosintetizirajući listovi
- spremišni organi u vrijeme mobilizacije pričuvnih tvari (stabla, korijenje, supke, endosperm, gomolji, itd.)

- svi biljni dijelovi koji rastu (vršni meristemi, kambij), spremišni organi u vrijeme punjenja (korijen, gomolj, stabljika), plodovi u razvoju, sjemenke



Izvor?

Izljev?

TVARI KOJE SE PRENOSE FLOEMOM

-**saharoza** (0,3-0,9 M)

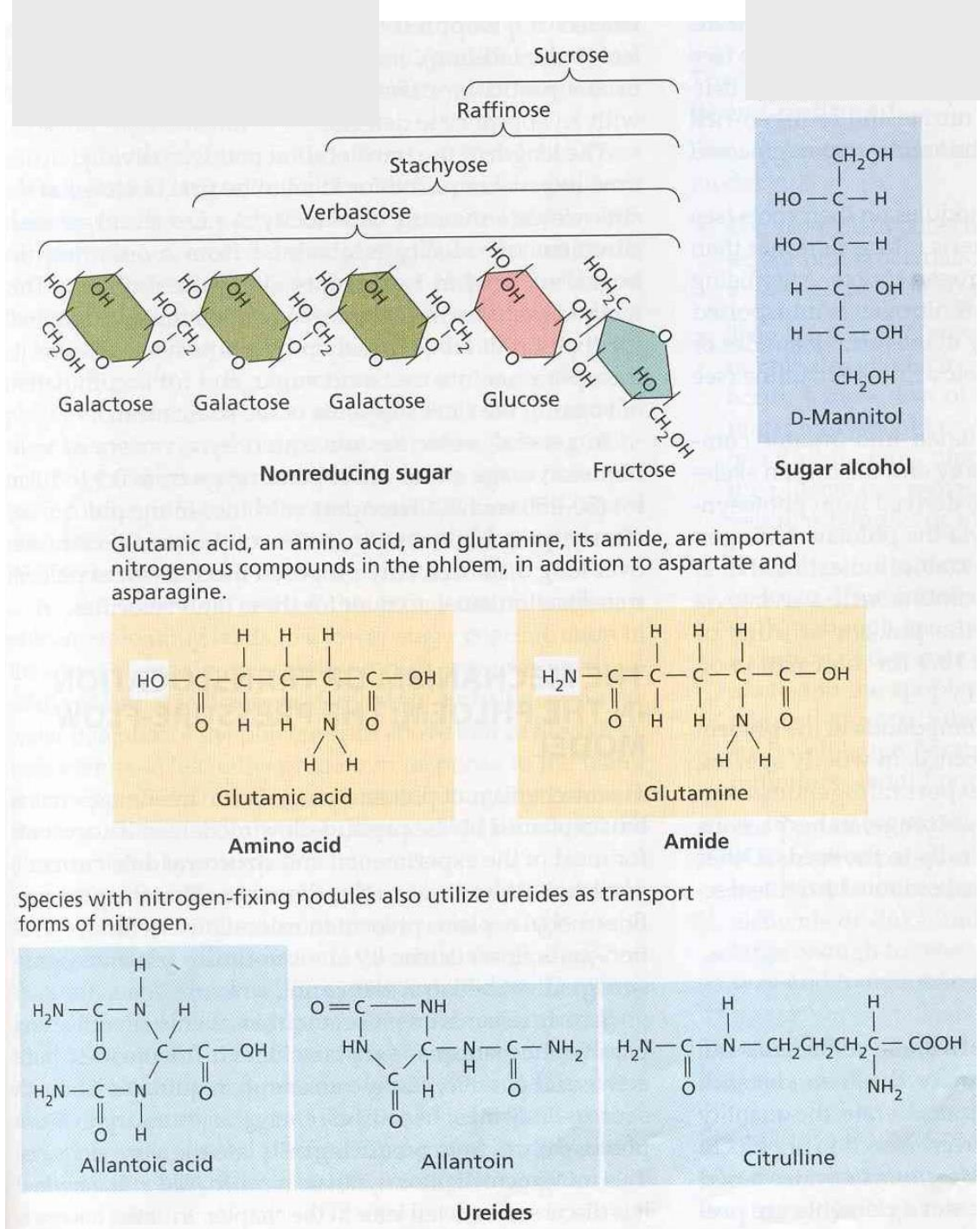
-**aminokiseline**

-**proteini** (P-protein, proteinske kinaze, tioredoksin, i inhibitori proteaza)

-**hormoni**

-neki **anorganski**

ioni (K^+ , Mg^{2+} , PO_4^{3-} , Cl^-)
-slabije mobilni su NO_3^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} i Fe^{2+}



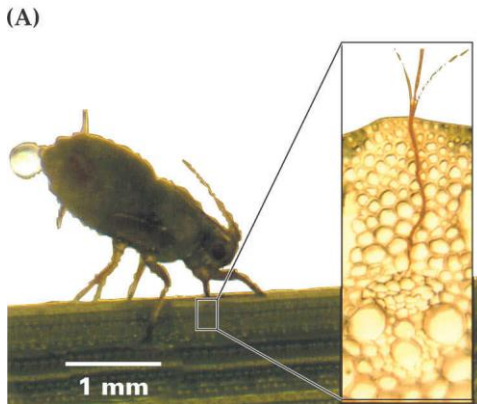
ISTRAŽIVANJA FLOEMSKOG PRIJENOSA I SASTAVA FLOEMSKOG SOKA

Istraživanje kretanja floemskog sadržaja po biljci:

-praćenje kretanja šećera obilježenog radioaktivnim ugljikom

Prikupljanje floemskog sadržaja u svrhu analize sastava

-pomoću rilca biljnih uši



Buchanan, B., Gruissem, W., Jones, R. L. (2002). Biochemistry and Molecular Biology of Plants.

MODEL TLAČNE STRUJE

Ernst Münch 1930. god. – strujanje otopine u sitastim elementima se ostvaruje uslijed gradijenta tlaka ($\Delta\Psi_p$) između izvora i izljeva

-kritosjemenjače

$$\Psi = \Psi_{\pi} + \Psi_p$$

razlika tlaka između izvora i izljeva:
0,12-0,46 MPa

