

# FOTOSYNTÉZA

Je tolik hodin, kolik právě je, a to znamená, že přišel čas na další biochemické povídání:

*„Když Lot vešel do Coaru, vycházelo nad zemí slunce. A Hospodin **dštil na Sodomu a Gomoru síru a oheň**; bylo to od Hospodina z nebe. Ona města s celou okolní rovinou, se všemi obyvateli i se vším, co roste ze země, propadla zkáze...“ [Genesis 19,23]*

Aha, to jako biochemie moc nevypadá, že? Ale aspoň jsme si tímto vyčerpali dnešní denní dávku pesimismu a můžeme věřit, že už bude jenom lépe. No a aby nám to čekání na lepší zítřky rychleji utíkalo, můžeme si vykládat třeba o tom, **kdo (a jak) síru dští v současném světě, o kterém už Genesis nepíše.**

Když se řekne fotosyntéza, většina z vás si ten pojem asi spojí se **vznikem kyslíku**. Na produkci kyslíku se dnes samozřejmě také podíváme a **možná přijde řeč i na evropské dotace.**

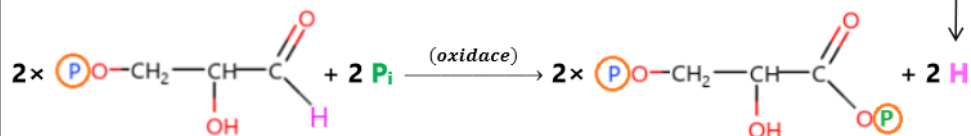
**O čem sní kopřiva, když náhodou spí? A může o něčem snít kaktus? Odpovědi si přiblížíme v dnešní chemii.** Jako vždycky ale začneme krátkým opakováním toho, co jsme se naučili minule. Opakovací otázky můžete řešit přímo zde v tomto materiálu nebo také online na [www.exp.er.cz](http://www.exp.er.cz), kde je vám k dispozici i správné řešení.

**Až všechny otázky správně zodpovíte, otočte list a pustíme se do díla! ☺**

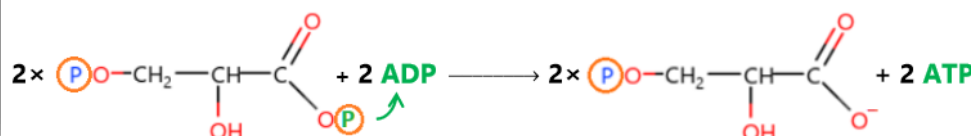
# Opakovací test:

1) Na kterém obrázku je zachycena fáze **substrátové fosforylace** při glykolýze?

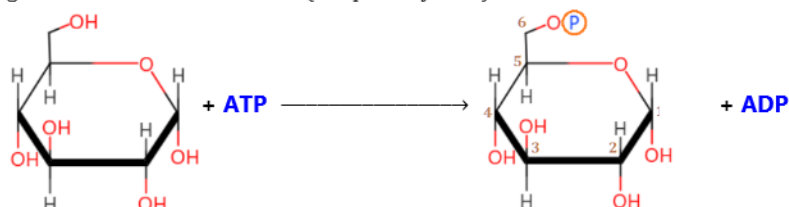
a) Dále se **připojí další dva fosfáty** (už ovšem **nepocházejí z ATP**) a současně se molekula **oxiduje** (reakcí se uvolní 2 H):



**Nově navázaný fosfát** se připojí k ADP, vzniká ATP:

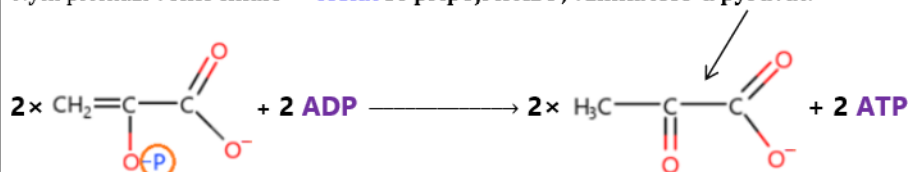


b) D-glukosa se **označí fosfátem**<sup>1</sup> (za spotřeby ATP):



Této reakci podléhá jak  $\alpha$ -D-glukosa, tak také  $\beta$ -D-glukosa — reakce totiž probíhá výhradně na kyslíku navázanému k C6. Je tedy jedno, s kterým anomerem se vaše tělo setká, zpracuje oba.

c) Nyní přichází **velké finále** — **fosfát** se připojí k ADP, vzniká ATP a pyruvát:



d) Ani jedna odpověď není správná

2) Mezi redukující cukry nepatří:

a) fruktofuranosa

b) laktosa

c) galaktosa

d) sacharosa

- 3)** Rozbor vzorku vody odebrané ze studny v chatové oblasti odhalil vysoké koncentrace iontů  $\text{As}^{3+}$ . Jaká opatření byste navrhovali jako rozhodčí orgán pro kvalitu vod při místní hygienické stanici?
- a) vodu ze studny v žádném případě nepít — sloučeniny arsenu jsou toxické
  - b) vodu ze studny pít pouze po převaření — soli  $\text{As}^{3+}$  se varem zoxidují na netoxické sloučeniny
  - c) ze studniční vody lze připravit např. čaj, který se pak ovšem musí hodně osladit — sloučeniny arsenu blokují glykolýzu a zvýšeným příjmem cukru je možné tento nepříznivý efekt kompenzovat
  - d) vodu ze studny lze pít prakticky bez omezení — toxické jsou pouze ionty  $\text{HAsO}_4^{2-}$ ; ionty  $\text{As}^{3+}$  nikoliv
- 4)** Základ vlákniny tvoří:
- a) chinin
  - b) balíček sušenek BEBE dobré ráno
  - c) celulóza
  - d) glykogen
- 5)** Zásobní polysacharid hvězdicovitých rostlin *Asteraceae* se nazývá:
- a) insulin
  - b) glykogen
  - c) glukagon
  - d) inulin
- 6)** Vysvětlete, proč není doporučeno požívat alkoholické nápoje na lačno.

# Úvod do fotosyntézy

Zopakujte si z biologie, kde v rámci buňky fotosyntéza probíhá (viz též [obrázek](#)):

Je-li řeč o fotosyntéze, dost často se setkáváme s pojmy jako např. **fotoautotrofní organismy** nebo **anabolický děj**. Pro zopakování této terminologie **pospojujte pojmy v tabulce**:

|                         |   |
|-------------------------|---|
| FOTOTROFNÍ ORGANISMUS   | = organismus získávající uhlík z organických látek  |
| CHEMOTROFNÍ ORGANISMUS  | = děj, kdy ze složitějších látek (např. polysacharidy) vznikají látky jednodušší povahy (např. monosacharidy) |
| AUTOTROFNÍ ORGANISMUS   | = organismus získávající energii oxidací živin  |
| HETEROTROFNÍ ORGANISMUS | = děj, kdy z jednodušších látek (např. monosacharidy) vznikají látky složitější povahy (např. polysacharidy)  |
| KATABOLICKÝ DĚJ         | = organismus získávající energii zejm. díky slunečnímu svitu  |
| ANABOLICKÝ DĚJ          | = organismus získávající uhlík z anorganických zdrojů (CO <sub>2</sub> )                                      |

## Světelná fáze fotosyntézy

O tom, že se fotosyntéza rostlin rozděluje na světelnou (=primární) a temnotní (=sekundární) fázi, jste už asi slyšeli. O světelné fázi fotosyntézy lze bezpochyby říci, že **probíhá výhradně za světla**. Jejím cílem je **především zisk energie** a pak také nějakých **elektronů** pro redukční děje v organismu. Při světelné fázi fotosyntézy hraje důležitou roli **CHLOROFYL** vázaný v tzv. **fotokomplexech**<sup>1</sup> (neboli fotosystémech).

**Když na fotokomplex s chlorofylem posvítíme, excituje se** (kvantová fyzika by řekli, že přijímá foton) **a tím získává silné redukční účinky** (jinými slovy schopnost uvolňovat elektrony). Tuto skutečnost můžeme schematicky zapsat:



Tím je zajištěn zdroj elektronů<sup>2</sup> pro redukční děje v organismu a tedy je naplněn jeden z cílů světelné fáze fotosyntézy.

<sup>1</sup> to jsou stabilní komplexy mnoha proteinů s enzymovou aktivitou, kde chlorofyl funguje jako kofaktor.

<sup>2</sup> Elektrony ve skutečnosti „nepoletují“ buňkami jen tak volně, jak by mohlo z rovnice vyplývat, ale **ukládají se ve formě redukovaných kofaktorů (NADPH)**, kam **jsou přenášeny pomocí speciálních biomolekul zabudovaných v membránách chloroplastů**. Mezi takovéto biomolekuly patří např. ferredoxin, plastochinon nebo plastocyanin.

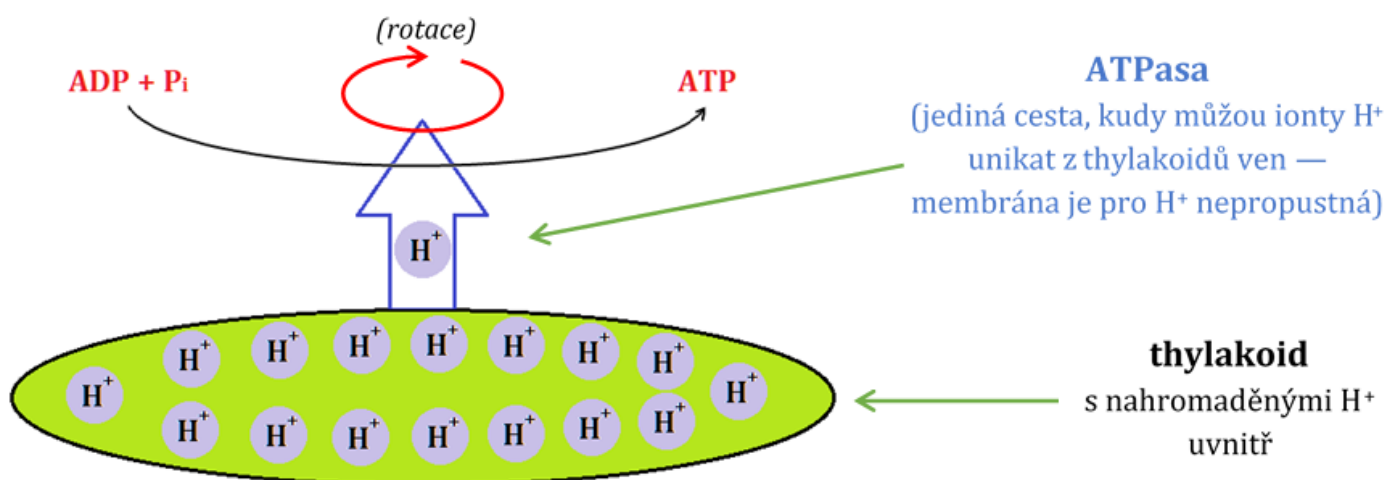
Povšimněte si ale, že po uvolnění elektronu získává chlorofyl kladný náboj. Aby uvedená reakce mohla probíhat opakovaně, je zapotřebí chlorofyl<sup>(+)</sup> regenerovat. To se zajistí fotolýzou vody:



Zregenerovaný chlorofyl nám tedy může znovu přijímat další fotony a kromě toho jsme **získali plynný kyslík**. Ten ovšem organismy provádějící fotosyntézu k ničemu nepotřebují, a tak jej uvolňují ven.

Z rovnice (2) je nicméně zřejmé, že **při fotosyntéze vznikají také vodíkové kationty (H<sup>+</sup>), které nejsou nijak dále spotřebovávány, a tak se hromadí uvnitř thylakoidů**, kde je celá primární fáze fotosyntézy lokalizovaná.

Vzniká tak **koncentrační gradient<sup>3</sup> iontů H<sup>+</sup>**, který se stává **hybnou silou pro tvorbu ATP**. Ve formě ATP získáváme **uchovatelnou energii** (ATP je makroergická sloučenina — více na str. 78), čímž je zcela naplněn i druhý cíl, kvůli němuž světelná fáze fotosyntézy probíhá.



**Schéma tvorby ATP při primární fázi fotosyntézy.** Pro vznik vazby mezi ADP a anorganickým fosfátem (P<sub>i</sub>) je zapotřebí dodat odpovídající energii. Tuto energii nám dodají ionty H<sup>+</sup> unikající skrze enzym ATPasu ven z thylakoidů (důsledek koncentračního gradientu).

**ATPasa má totiž unikátní strukturu**, která trochu připomíná mlýnské kolo ([ukázka struktury zde](#)). Při fotosyntéze tak uvádějí H<sup>+</sup> ionty ATPasu do rotačního pohybu podobně, jako když voda v potoce pohání mlýnské kolo nebo voda z přehrady turbínu. Kinetická **energie takto způsobené rotace je pak využita k propojení ADP a P<sub>i</sub> => vzniká ATP**.

**Jak se popsaný proces tvorby ATP nazývá?**

<sup>3</sup> zkrátka je nahromaděných iontů H<sup>+</sup> ve vnitřních prostorách thylakoidů mnohem víc než na druhé straně membrány, a tak se snaží uniknout ven (je to jako když máme přehradu plnou vody a vytáhneme stavidlo...).

*\*Otázka k zamyšlení: Jaké pH očekáváte uvnitř thylakoidu ve srovnání se stromatem<sup>4</sup> chloroplastu?\**

Závěrem dodejme, že v průběhu evoluce vznikly také fotosyntetizující bakterie, které namísto fotolýzy vody (H<sub>2</sub>O) rozkládají sulfan (H<sub>2</sub>S). Doplňte produkty do rovnice popisující tento proces (inspirujte se rovnicí fotolýzy vody):



Tyto bakterie zpravidla žijí v okolí sirných pramenů a pokud jste správně doplnili rovnici, jsou pro nás rovněž odpovědí na otázku, kdo (a jak) **chrlí síru v současném světě.** 😊



*Kolonie sirných bakterií v přírodní rezervaci Husrygg na švédském ostrově Gotland. Staženo z [www.alarmy.com](http://www.alarmy.com).*

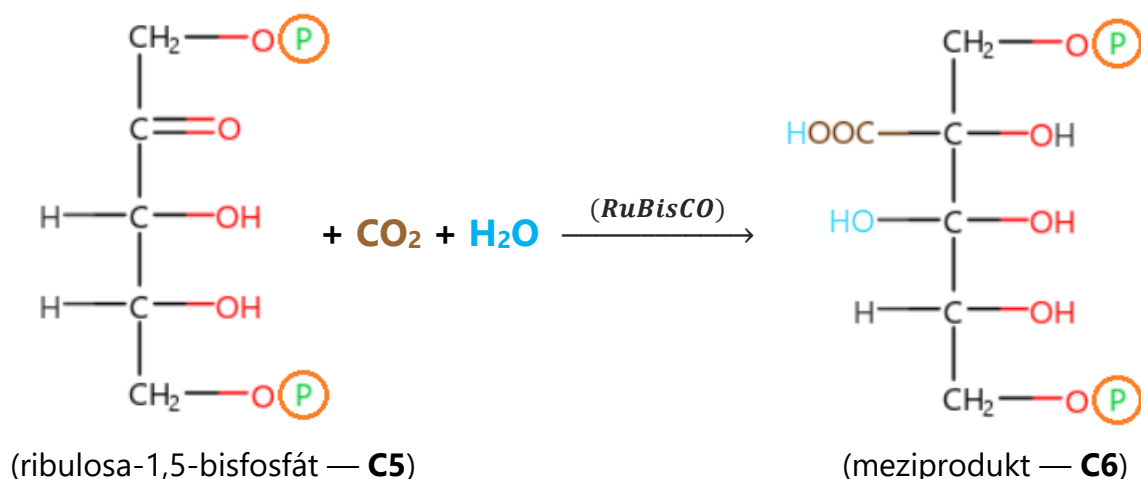
<sup>4</sup> jestliže vám je termín *stroma* cizí, zopakujte si [stavbu chloroplastu](#) z biologie.

# Temnostní fáze fotosyntézy

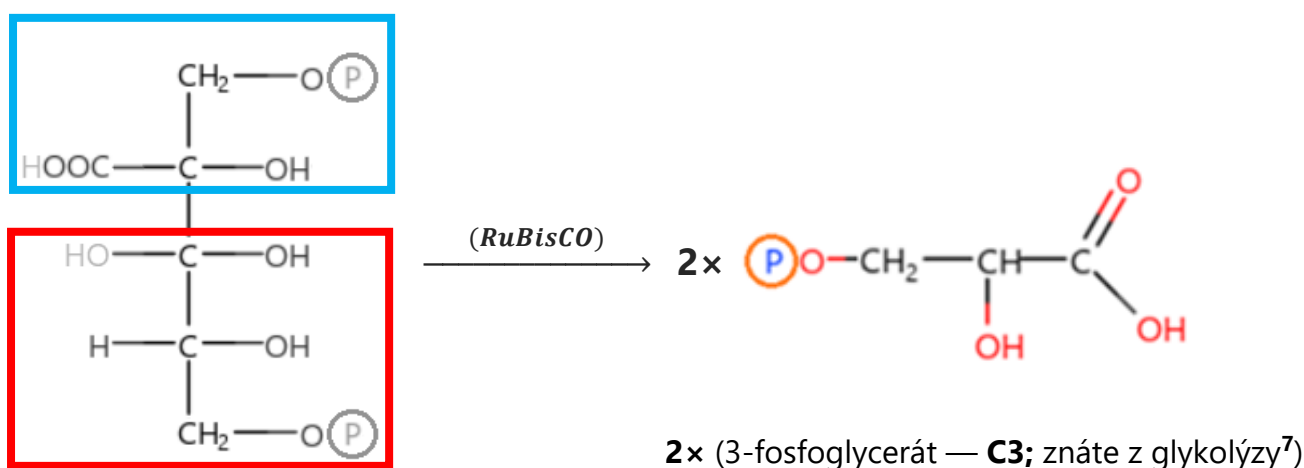
Důležitým sdělením je, že **temnostní fáze může navzdory svému názvu probíhat i za světla**. Jejím cílem pak je **fixace CO<sub>2</sub>** — tedy zabudovávání CO<sub>2</sub> do organických molekul.

Zcela klíčovým činitelem tohoto děje je enzym RuBisCO<sup>5</sup> umožňující navázání CO<sub>2</sub> na molekulu ribulosa-1,5-bisfosfátu, který vychází z pentosofosfátové dráhy<sup>6</sup>:

## krok 1 — navázání CO<sub>2</sub>:



## krok 2 — rozštěpení vzniklého meziproduktu:

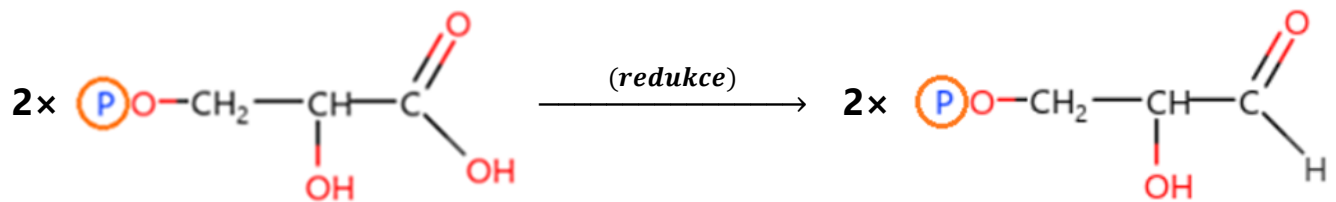


<sup>5</sup> vlastním jménem *Ribulosa-1,5-bisfosfátkarboxylasa-oxygenasa* (celý název se nazpaměť učit nemusíte 😊).

<sup>6</sup> pokud se ztrácíte, připomeňte si kapitolu **REAKCE MONOSACHARIDŮ — změna počtu atomů uhlíku v molekule** (str. 47)

<sup>7</sup> v materiálu *Glykolýza* je 3-fosfoglycerát uveden jako produkt reakce č. 6, koukněte na to (str. 54).

### krok 3 — redukce<sup>8</sup> vzniklého 3-fosfoglycerátu:



(3-fosfoglycerát — **C3**)

(glyceraldehyd-3-fosfát — znáte z glykolýzy<sup>9</sup>)

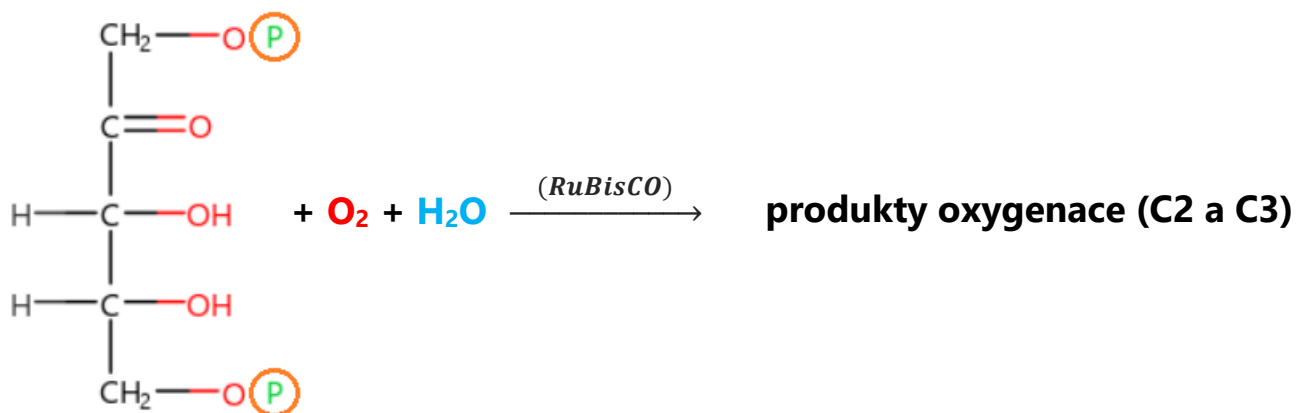
### krok 4 — další osud vzniklého glyceraldehyd-3-fosfátu:

Glyceraldehyd-3-fosfát je substituovaný **monosacharid**, proto může:

- a) odejít do pentosofosfátové dráhy → tam se regeneruje ribulosa-1,5-bisfosfát a celý děj se může opakovat (CALVINŮV CYKLUS)
- b) zahájit tvorbu glukosy (případně až polysacharidů) — analogickými reakcemi jako při glykolýze/glukoneogenezi (viz str. 55-56).

Enzym RuBisCO může ovšem vzít za vděk také „obyčejným“ kyslíkem, a to zejména v situacích, kdy se rostlině nedostává uspokojivého množství CO<sub>2</sub> (kyslík a CO<sub>2</sub> spolu kompetují / „soutěží“).

Tato reakce však vede pouze k rozštěpení ribulosa-1,5-bisfosfátu na dvě části (C2 a C3), z čehož rostlina **nemá žádný užitek** (naopak potom ještě musí vynakládat energii, aby ribulosa-1,5-bisfosfát znovu složila):



(ribulosa-1,5-bisfosfát — **C5**)

<sup>8</sup> jako redukční činidlo zde působí elektrony uvolněné v průběhu světelné fáze.

<sup>9</sup> v materiálu *Glykolýza* je glyceraldehyd-3-fosfát uveden pro změnu jako produkt reakce č. 4 (na str. 54). 😊



**Jak se tento jev, kdy rostlina spotřebovává O<sub>2</sub> namísto fixace CO<sub>2</sub>, nazývá?**

**Nepříznivě na fixaci CO<sub>2</sub> působí rovněž oxid siřičitý (SO<sub>2</sub>), který celý proces inhibuje.**

I proto jsou stromy v oblastech se silně znečištěným ovzduším zakrslé, nažloutlé nebo jinak poškozené (svoji roli zde hraje ještě další fakt: SO<sub>2</sub> je kyselino-  
tvorný).



**Co je v současnosti největším zdrojem SO<sub>2</sub> v atmosféře?**

Aby rostliny dokázaly fixaci CO<sub>2</sub> zefektivnit (tj. minimalizovat reakce enzymu RuBisCO s kyslíkem), vyvinula se u některých z nich alternativní cesta, jak CO<sub>2</sub> vázat — nejprve si jej přemění na aniont HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> a ten pak pomocí speciálního enzymu naváží na fosfoenolpyruvát za vzniku oxalacetátu.

**Zakreslete si zde racionální vzorce následujících sloučenin<sup>10</sup>:**

— [pyruvát](#)

— [fosfoenolpyruvát](#)

— [oxalacetát](#)

— [3-fosfoglycerát](#)

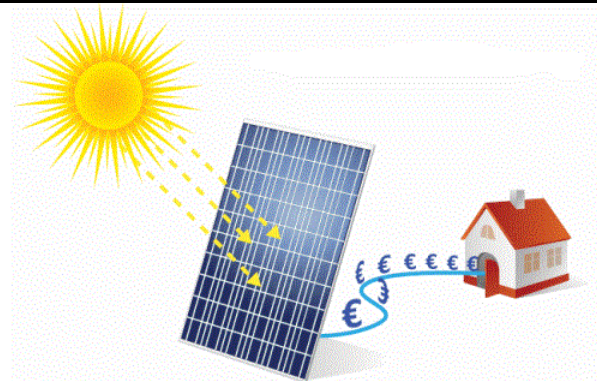
<sup>10</sup> Svě řešení si můžete zkontrolovat kliknutím na názvy uvedených sloučenin.

## Na základě schopnosti rostlin fixovat CO<sub>2</sub> různými způsoby pak rozlišujeme:

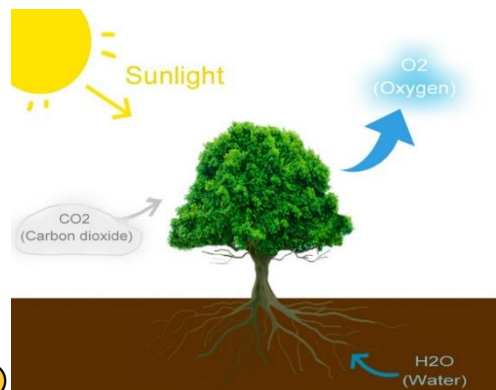
- a) **C3 rostliny** — nedokážou CO<sub>2</sub> akumulovat, rovnou je fixují pomocí enzymu RuBisCO; označeny **podle 3-fosfoglycerátu**, který vzniká Calvinovým cyklem a má 3 uhlíky => **C3** (*příklady: kopřiva, \_\_\_\_\_*)
- b) **C4 rostliny** — akumulují CO<sub>2</sub>; označeny **podle oxalacetátu**, který během akumulace tvoří; oxalacetát má 4 uhlíky => **C4** (*příklady: pšenice, \_\_\_\_\_*)
- c) **CAM rostliny** — speciální případ C4 rostlin, jednotlivé děje mají rozdělené podle denní doby: v noci CO<sub>2</sub> akumulují, přes den zpracovávají v Calvinově cyklu (jde o součást adaptace na sucho — rostlina tak ve dne nemusí otevírat průduchy a díky tomu neztrácí tolik vody); označeny podle čeledi tlusticovitých rostlin *Crassulaceae* (přesněji: *Crassulaceae Acid Metabolism* — **příklad: kaktus**).

K prvním dvěma kategoriím si doplňte několik dalších příkladů.

Tím bychom se teoreticky mohli pokusit zodpovědět otázku, o čem kopřiva sní, když náhodou spí — určitě chce být kaktusem, aby zvládala lépe potlačovat fotorespiraci. 😊 No a kaktus? Ten nesní nikdy, protože v noci musí akumulovat CO<sub>2</sub> a to ho stojí docela dost energie, takže na nějaké snění už mu žádná další energie nezbyvá. Kdyby totiž chtěl příjem CO<sub>2</sub> nechat až na den, musel by své průduchy ponechat přes den otevřené a zbytečně by tak přišel o značné množství vody...



Výroba kyslíku s evropskými dotacemi — postavit fotovoltaickou elektrárnu a vzniklou elektrickou energii využít třeba pro elektrolýzu vody...



...zatímco přírodě stačí pár stromů, a to i bez evropských dotací. 😊