

FOTOSYNTHESE met DUPLO® EN LAMPJES

THYLAKOÏD THEATER in de CHLOROKLAS

Bij de door leerlingen minst begrepen onderwerpen horen de licht- en donkerreactie van de fotosynthese en de lokalisatie daarvan in de chloroplast. Door plaats en proces uit te beelden met een klaslokaal als chloroplast met daarbinnen een thylakoïd theater van bewegende leerlingen met Duplo-dingen als moleculen en fietslampjes als elektronen, wordt leerlingen duidelijk wat er nu echt gebeurt en ook waarom. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Ruthy Fraterman, Caspar Geraedts en Gee van Duin.

duur 30 à 45 minuten voor lichtreactie (in vier rondes)
20 minuten voor donkerreactie/Calvin-cyclus

doelgroep bovenbouw havo/vwo

doelen Leerlingen kunnen:

- uitleggen hoe (en waar) energie uit zonlicht in de chloroplast wordt opgevangen en geabsorbeerd door elektronen;
- uitleggen wat de functie is van de elektronendrager NADPH (foto hieronder);
- uitleggen hoe door de opbouw van een protongradiënt en het eiwit ATP-synthase ATP gevormd wordt;
- toelichten hoe de licht- en donkerreactie samenhangen.



nodig

per klas voor de lichtreactie:

- 1 Duplo-wagentje zonder cabine, in bijvoorbeeld rood maar niet geel [ADP-basis]
- 1 Duplo-wagentje met cabine, in een *andere* kleur [NADP-basis]
- 4 witte (of 4 rode maar i.i.g. gelijkgekleurde) fietslampjes met knipper- en continu stand
- 4 gele Duplo-blokken (2x4) [P_i]
- 2 witte Duplo-blokken (2x4) [O]
- 6 blauwe Duplo-blokken (2x2) [H]
- 2 mobiele telefoons met zaklampstand
- 2 (groene) veiligheidshesjes of hoedjes [voor de fotosystemen]
- (eventueel) 3 oranje hesjes of hoedjes of naambordjes [voor de andere eiwitcomplexen]
- 10 kopieën van Binas 69 B1+2 of Sciencedata blz 175 óf hun eigen boek [voor toeschouwers]

per groepje van (ongeveer) vier leerlingen voor de donkerreactie:

- 6 grijze (of lichtgroene) Lego-steentjes (2x3) [C]
- 15 zwarte (of donkergroene) Lego-steentjes (2x3) [C]
- 13 gele Lego-steentjes (2x4) [P_i]
- 1 kopie van de bewerkte Calvin-cyclus op A3-formaat (zie bijlagen)

Vorbereiding

Dit uitbeeldpracticum bestaat uit twee delen die na elkaar (eventueel in verschillende lessen) uitgevoerd worden: de lichtreactie (in vier rondes) en de donkerreactie. De lichtreactie wordt klassikaal gedaan, waarbij steeds een deel van de leerlingen uitbeeldt en de rest toeschouwer is. De donkerreactie wordt daarna in groepjes gedaan.

voor de lichtreactie:

1. Maak een thylakoïdmembraan door een aantal tafels vooraan in de klas in een boog neer te zetten. Deze tafels vormen het membraan. Plaats aan de rechterkant (gezien vanuit de klas) in een ruime afstand tussen twee tafels een draaistoel of draaikruk; hierop komt later de leerling die ATP-synthase uitbeeldt.
2. In de nabijheid van waar NADP-reductase gaat zitten staat een statief met hoog daarin NADP+ geklemd; rechts van de ATP-synthase-positie staat ook een statief maar dan met ADP en P_i apart erin geklemd. Die symboliseren de stoffen in het stroma.
3. Zet alles zó neer dat 11 leerlingen hier hun rol kunnen spelen en de overige leerlingen alles goed kunnen zien vanuit de rest van het lokaal; zij hebben de kopieën van de lichtreactie voor zich.
4. Projecteer met de beamer een schematische afbeelding van de lichtreactie in het thylakoïdmembraan (bijvoorbeeld BiNaS 69 B1+2 of ScienceData blz. 175).

voor de donkerreactie:

5. Zet tafels in het stroma uit elkaar zodat elk groepje leerlingen een eigen tafel heeft.
6. Leg op elke tafel een set Lego-stenen (zie hierboven) en een groot vel met een bewerkt schema van de Calvin-cyclus (zonder details: alleen de pijlen, CO_2 en andere koolstofverbindingen, ATP en NADPH). In de bijlage zijn zulke bewerkte versies uit BiNaS en ScienceData te vinden.
7. Projecteer met de beamer dat bewerkte schema van de donkerreacties; zorg dat het originele schema ook beschikbaar is voor projectie.

DE LICHTREACTIE

Kies 11 leerlingen die als eerste de lichtreactie in iets versimpelde versie gaan uitbeelden, aan de hand van de afbeelding in BiNaS/ScienceData. De docent leidt deze leerlingen stap voor stap door het proces. De overige leerlingen, die in ronde 1 t/m 3 toeschouwer zijn, hebben de opdracht om goed op te letten zodat ze in ronde 4 hetzelfde kunnen doen, maar dan zonder hulp van de docent. Aantekeningen maken is daarom gewenst.

de rolverdeling

De elf leerlingen die de lichtreactie uitvoeren hebben de volgende rollen:

fotosysteem II (met (groen) veiligheidshesje)	ATP-synthase
cytochrom bf	waterstof/proton (3x)
fotosysteem I (met (groen) veiligheidshesje)	zuurstof
NADP-reductase	lichtstraal/fotonen (2x)

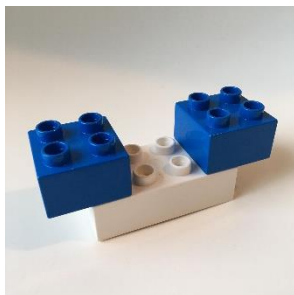
Instrueer de leerlingen wat ze zijn en waar ze moeten gaan zitten/staan (zie verderop). Laat ze dan één voor één opkomen in bovenstaande volgorde waarbij ze telkens aan de rest vertellen wat ze zijn én wat ze doen. Wat ze *zijn* kan ook geaccentueerd worden door een hoedje of hesje of bord om de nek; alleen de H en de O kunnen simpelweg hun blokje tonen. Wat ze *doen* kunnen ze zelf aflezen uit de afbeelding – dan wordt meteen duidelijk of ze dat goed zien (NB: cytochrom bf en ATP-synthase ‘doen’ twee dingen).

Fotosysteem II, cytochrom bf, fotosysteem I en NADP-reductase gaan van links naar rechts op de thylakoïd-membraan-tafels zitten, in de volgorde die ook op het scherm staat. ATP-synthase zit op de draaikruk of draaistoel naast fotosysteem I. Dit is ook het moment om te laten ontdekken welke eiwitten er niet ‘persoonlijk’ meedoen om het simpel te houden: Q en X zitten in de fotosystemen, Pq, Pc en Fd zijn echt weggelaten.

Links achter de tafelrij staat een leerling (op een verhoging) als een lichtstraal. Een tweede lichtstraal staat rechts (op een verhoging). Ieder gaan ze met hun telefoon één van de fotosystemen beschrijven.

Binnen het thylakoïd (in het lumen, dus tussen publiek en thylakoïd-membraan-tafels) zijn drie leerlingen (twee waterstoffen en de zuurstof) samen H_2O : ze houden het bijbehorende Duplo-molecuul vast. Daaraan hangen twee uitgeschakelde fietslampjes. In het stroma staat de derde H-leerling.

De foto's hieronder laten zien hoe de gebruikte moleculen in Duplo zijn vormgegeven; de gele blokken zijn fosfaatgroepen.



H₂O



ADP + P_i



NADP⁺

ronde 1 – excitatie van elektronen en vorming van NADPH

1. Benoem of laat door het publiek bedenken dat het lokaal een chloroplast is, en waar stroma, membraan en thylakoïd zich bevinden. De toeschouwers zitten dus IN het thylakoïd. Pas daarna begint het uitbeelden van het proces.
2. Leg nu aan de hand van de afbeelding op het scherm stap voor stap uit wat er in de lichtreactie gebeurt, waarbij je de focus in deze ronde legt op de 'reis' van de elektronen van water naar NADPH. Tijdens je uitleg beelden de leerlingen uit wat er gebeurt:
 - a. Fotosysteem II wordt beschenen door een lichtstraal.
 - b. Fotosysteem II splitst nu het H₂O Duplo-molecuul en schakelt de lampjes aan (als symbool voor energie-opname). De O- en H-leerlingen blijven staan, met nu elk een eigen Duplo-blok.
 - c. Fotosysteem II geeft de lampjes door aan cytochroom bf.
 - d. Cytochroom bf geeft de lampjes door aan fotosysteem I.
 - e. Fotosysteem I wordt beschenen door een lichtstraal.
 - f. Fotosysteem I schakelt nu de lampjes op knipperstand (als symbool voor extra energie-opname) en geeft ze aan NADP-reductase.
 - g. NADP-reductase doet lampjes in de cabine van het NADP⁺-wagentje, neemt een blauw Duplo-blokje over van de H-leerling in het stroma en zet dat op de cabine (zie foto).



ronde 2 – de vorming van een protongradiënt en ATP

3. Nu worden de rollen van cytochroom bf en ATP-synthase verder toegelicht. De leerling die in het stroma H⁺ uitbeeldt krijgt hiervoor een nieuw blauw H-blokje. Ook wordt er een nieuw H₂O met lampjes klaargelegd bij fotosysteem II.
4. Tijdens je uitleg beelden de leerlingen weer uit wat er gebeurt:
 - a. Fotosysteem II wordt beschenen en splitst dat molecuul water. De elektronen (brandende lampjes) worden doorgegeven aan cytochroom bf.
 - b. Cytochroom bf laat daarop de H⁺-leerling vanuit het stroma door, die onder de tafel doorkruipt (of over de tafel heen) naar de binnenkant van het thylakoïd.
 - c. Er zijn nu 3 H⁺-leerlingen binnen het thylakoïd; ze bewegen (tegen elkaar botsend) naar ATP-synthase.

Zodra een H⁺-leerling ATP-synthase raakt, draait ATP-synthase die H⁺-leerling door naar het stroma en koppelt op het statief een geel Duplo-blokje aan het ADP-wagentje.

ronde 3 – de hele lichtreactie, maar nu door de uitbeelders verteld

5. Breng alle materialen (lampjes, Duplo-moleculen) weer in de 'begintoestand'.
6. Laat nu de leerlingen de complete lichtreactie achter elkaar uitvoeren. Leerlingen vertellen steeds wat ze doen, de docent helpt indien nodig.

ronde 4 – en nu de toeschouwers

7. Breng alle materialen (lampjes, Duplo-moleculen) weer in de 'begintoestand'.
8. Laat nu de leerlingen die eerder toekeken de rollen van de uitvoerende leerlingen overnemen. Zij spelen nu de lichtreactie na en vertellen daarbij wat ze doen. De leerlingen uit ronde 1 t/m 3 krijgen de opdracht goed op te letten of de nieuwe acteurs het goed doen; ze mogen ingrijpen als ze een fout zien.

opmerkingen

De kans is groot dat leerlingen tijdens het uitbeelden vragen willen stellen. Daar kan je natuurlijk prima op ingaan. Eventueel kunnen ronde 1 of 2 een keer herhaald worden als dat gewenst is. Let goed op of iedereen het kan volgen en dat het niet chaotisch wordt; bouw je uitleg langzaam op. Laat leerlingen in ronde 3 echt één voor één handelen en vertellen wat ze op dat moment doen en waarom; dan is het makkelijker voor de toeschouwers om te controleren of iedereen het juist uitvoert en kan er ingegrepen worden om verbeteringen aan te brengen.

(na)denkwerk

Belangrijke (begrips)vragen die tijdens of na het uitbeelden aan bod kunnen komen:

- Waarom zijn NADP⁺/NADPH en ADP/ATP uitgebeeld als wagentjes?
- Wat gebeurt er met de zuurstof die ontstaat? Laat leerlingen niet alleen bedenken wat er gebeurt maar laat de leerling die zuurstof speelt het ook uitvoeren! Deze leerling zal het lokaal moeten verlaten, maar wanneer gebeurt dat eigenlijk? Hij/zij is aanvankelijk maar in zijn eentje in de vorm van $\frac{1}{2} \text{O}_2$.
- Wat gebeurt er als halverwege het proces het licht (de twee lichtstralen) uitgaat? Bespreek de gevolgen voor de concentraties van afzonderlijke moleculen en de licht- en donkerreacties als geheel.
- Wat verandert er als je de cyclische fotofosforylering wilt uitbeelden?
- Liggen de betrokken membraaneiwitten altijd zo in deze volgorde in het membraan? Leg uit dat de ATP-synthases verspreid in het membraan liggen, maar dat de andere membraaneiwitten heel precies moeten samenwerken en dicht bij elkaar in deze vaste volgorde in het membraan voorkomen.

DE DONKERREACTIE

Dit onderdeel kan ook klassikaal met Duplo uitgevoerd worden. Het voordeel daarvan is dezelfde schaal als de lichtreactie, en dan worden de Duplo-wagentjes (ATP en NADPH) ook echt gebruikt. Maar de Calvin-cyclus is lastiger in theatervorm voor de hele groep in beeld te brengen. We geven er de voorkeur aan (ook voor de afwisseling in de les en de activering van de leerlingen) om in kleinere groepen en met Lego-stenen te werken.

1. Leerlingen krijgen per groepje een kopie van de (bewerkte) Calvin-cyclus en deze Lego-steentjes:
 - 3 x ribulose-1,5-difosfaat (bestaand uit 5 zwarte blokjes met aan elk uiteinde een geel blokje)
 - 6 x losse C uit CO₂ (grijs)
 - 13 x P_i (geel 2x4 blokje, overeenkomstig met de lichtreactie)
2. De docent legt uit wat de steentjes voorstellen (zie hierboven) en doet eventueel voor hoe de eerste omzetting verloopt - waar CO₂ vastgelegd wordt.
3. Leerlingen moeten door losmaken, vastklikken, schuiven én discussiëren de cyclus doorlopen en zo antwoord vinden op de volgende drie vragen:
 - a. Waarom kun je niet één glucosemolecuul maken door de Calvin-cyclus één keer te doorlopen – en hoe kan het dan wel?
 - b. Glucose is een energierijk molecuul; hoe en waar in de donkerreactie wordt die energie toegevoerd, en waar in het glucosemolecuul blijft die?
 - c. Hoeveel fietslampjes heb je 'nodig' voor één glucosemolecuul?
4. Bespreek de opdracht na. Hiervoor is de afbeelding uit 10voorBiologie (zie bijlage) nuttig, omdat daarin dezelfde aantallen C staan als de leerlingen in deze opdracht hebben gekregen.

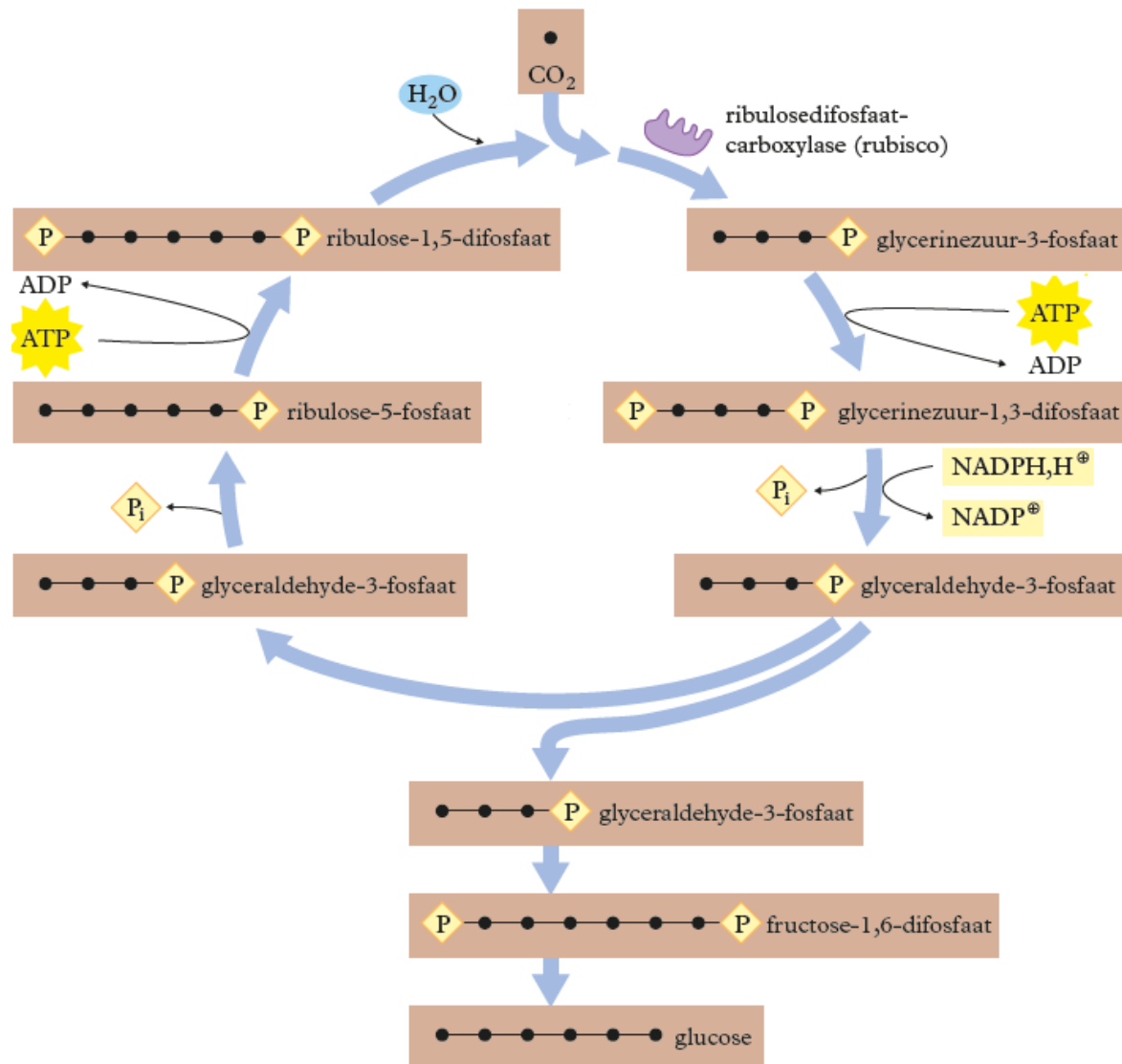
(na)denkwerk

- Tijdens het uitbeelden van de donkerreactie en het beantwoorden van de vragen kan je goed controleren of leerlingen het belang van de lichtreacties begrepen hebben. Benadruk de rol van ATP en NADPH en pak zo nodig de Duplo-wagentjes er nog even bij.
- Benadruk dat er (net als bij de citroenzuurcyclus) niet werkelijk sprake is van een fysieke cyclus of cirkel. Alle betrokken stoffen bevinden zich door elkaar in het stroma. Als de citroenzuurcyclus al behandeld is, loont het de moeite de verschillen met de Calvin-cyclus te benoemen wat betreft de input en output van C, wat ook het antwoord op vraag a verklaart.
- Benadruk ook dat alle reacties door enzymen worden gekatalyseerd.

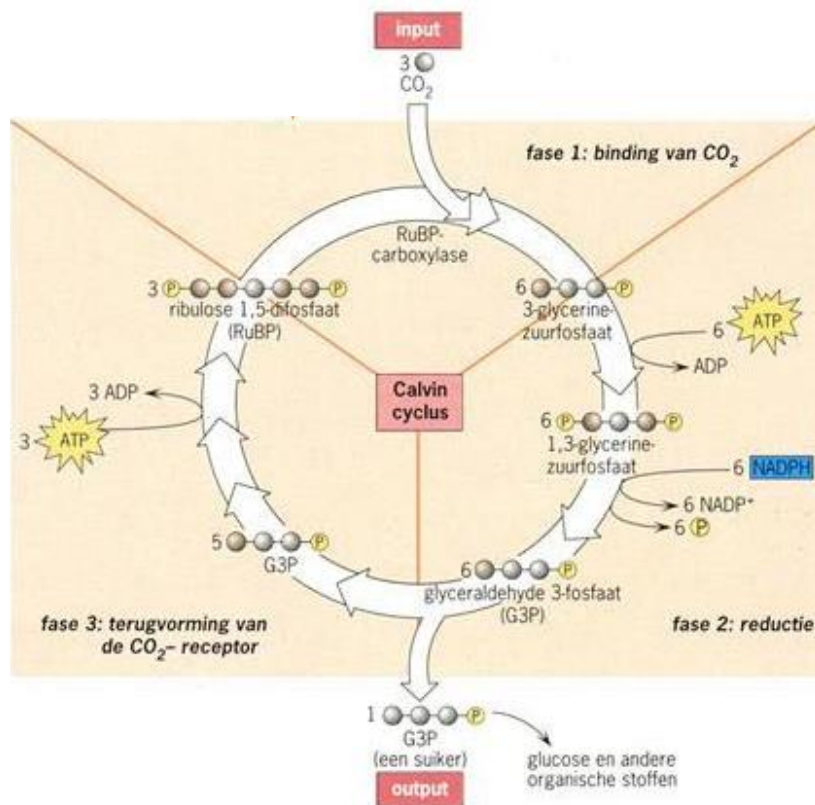
aanpassen/uitbreiden

- Er is een (qua tijd en aantal steentjes) snellere versie mogelijk. Daarbij wordt de cyclus maar één keer doorlopen, waarna door denken en discussiëren duidelijk moet worden wat het antwoord is op de vragen hierboven. Bij deze versie volstaan 6 zwarte steentjes voor C en 4 gele voor P. De stap van glyceraldehyde-3-fosfaat naar ribulose-5-fosfaat blijft dan een (uitdagend) mysterie.
- De Duplo-wagentjes (ATP en NADPH) kunnen ook goed van pas komen als je dissimilatie behandelt of herhaalt. Verander dan NADPH in NADH door het gele blokje eraf te halen. Leerlingen leren zo meteen dat verschil tussen deze twee moleculen.

Fotosynthese	69
Donkerreactie, calvincyclus	C

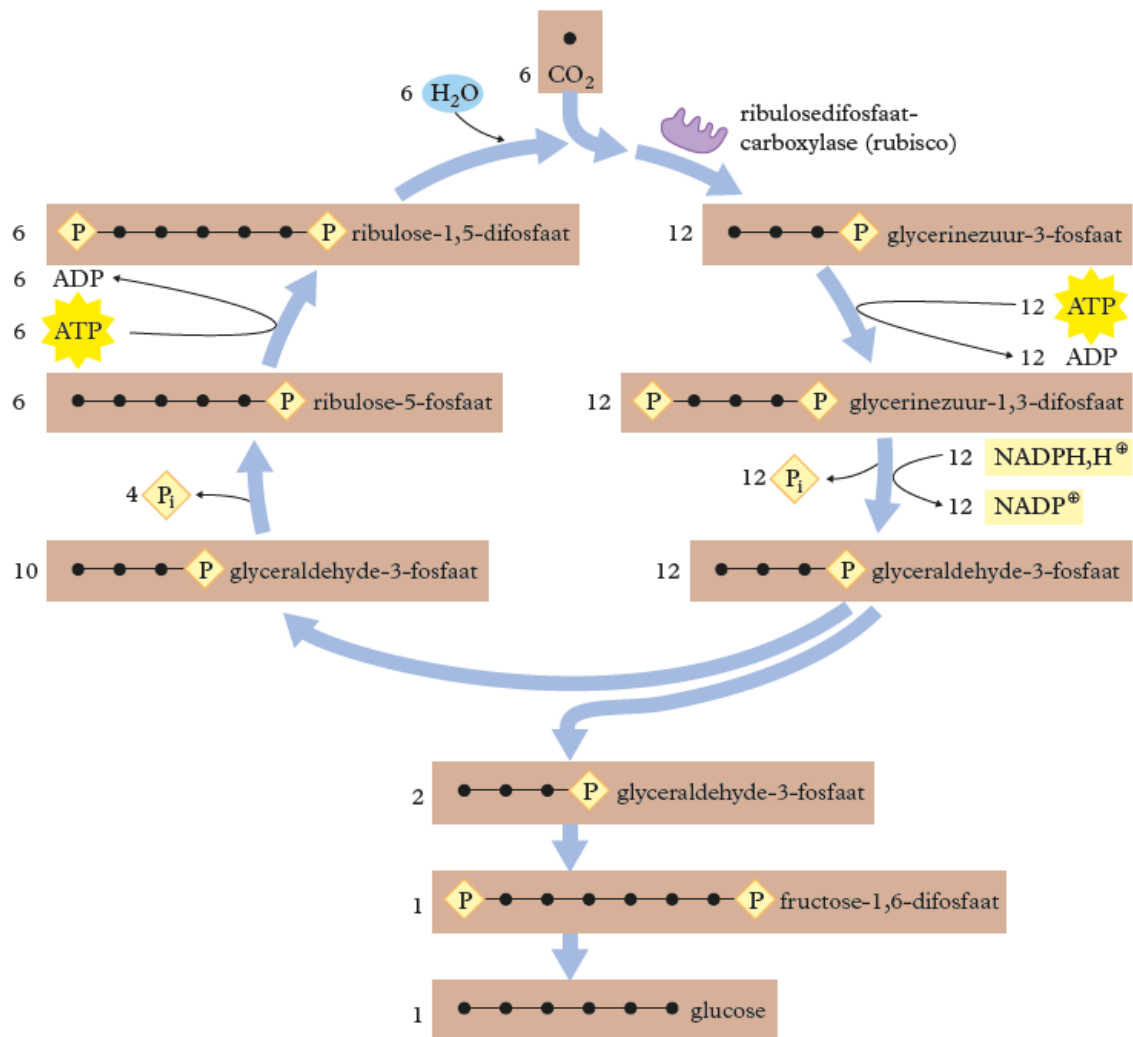


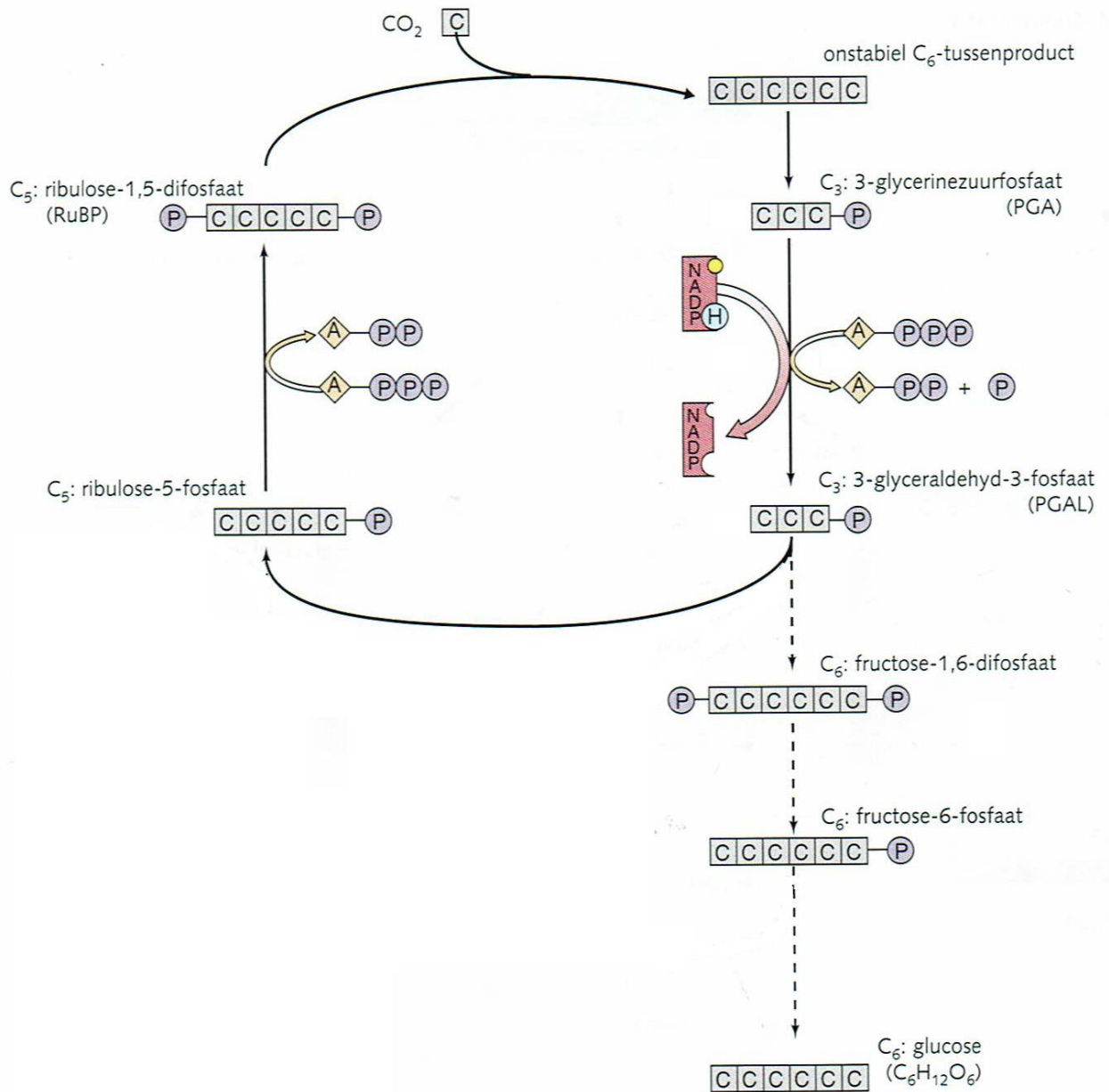
- Waarom kun je niet één glucosemolecuul maken door de Calvin-cyclus één keer te doorlopen – en hoe kan het dan wel?
- Glucose is een energierijk molecuul; hoe en waar in de donkerreactie wordt die energie toegevoerd, en waar in het glucosemolecuul blijft die?
- Hoeveel fietslampjes heb je 'nodig' voor één glucosemolecuul?



- Waarom kun je niet één glucosemolecuul maken door de Calvin-cyclus één keer te doorlopen – en hoe kan het dan wel?
- Glucose is een energierijk molecuul; hoe en waar in de donkerreactie wordt die energie toegevoerd, en waar in het glucosemolecuul blijft die?
- Hoeveel fietslampjes heb je 'nodig' voor één glucosemolecuul?

Fotosynthese	69
Donkerreactie, calvincyclus	C





- Waarom kun je niet één glucosemolecuul maken door de Calvin-cyclus één keer te doorlopen – en hoe kan het dan wel?
- Glucose is een energierijk molecuul; hoe en waar in de donkerreactie wordt die energie toegevoerd, en waar in het glucosemolecuul blijft die?
- Hoeveel fietslampjes heb je 'nodig' voor één glucosemolecuul?

voor nabespreking; vooral het schemaatje linksonder

donkerreactie (Calvin-cyclus)

