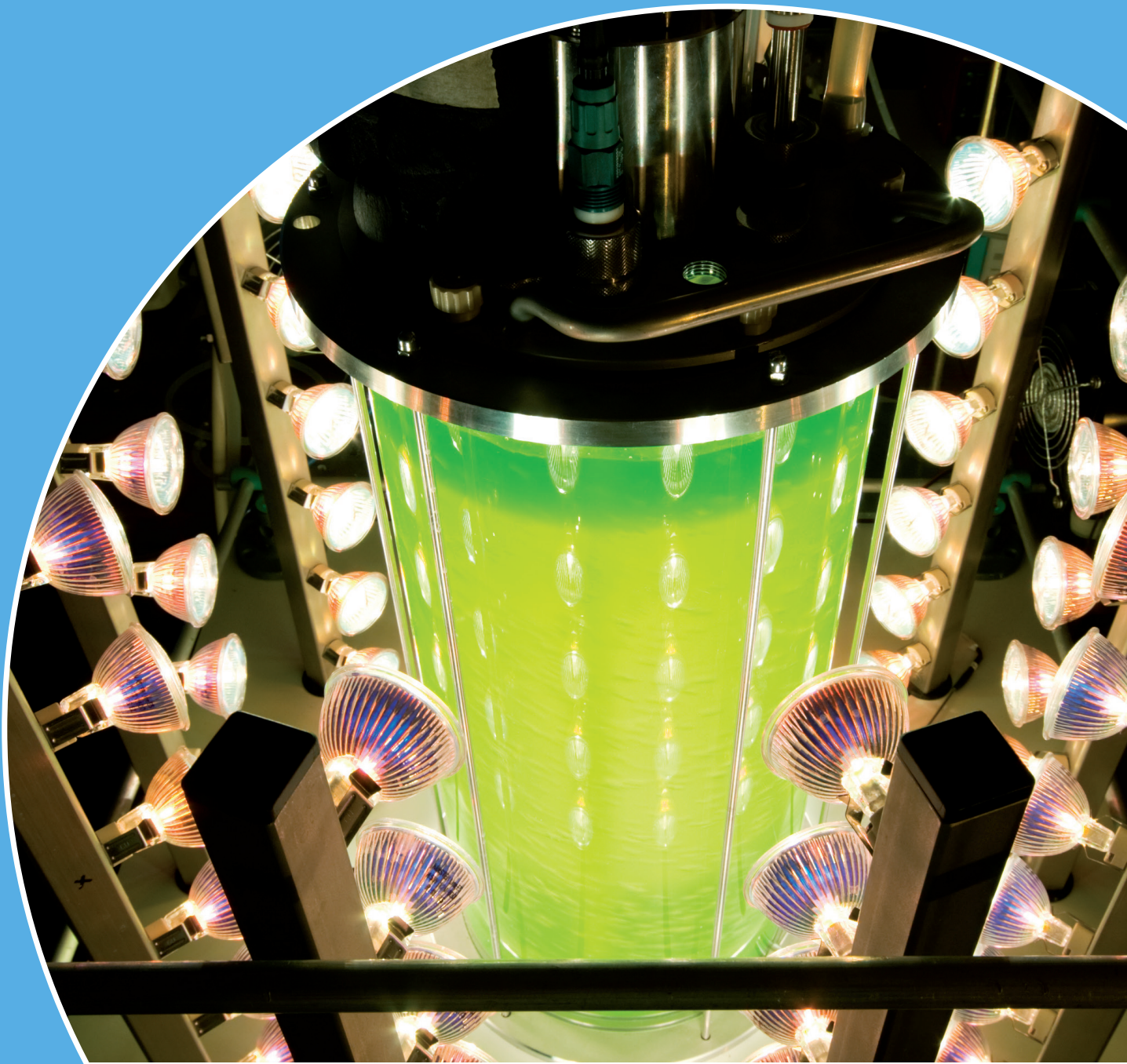


Algen voor het leven



WAGENINGEN UNIVERSITY
WAGENINGENUR

Colofon

Deze biologie module is ontwikkeld door:

- Wageningen Universiteit, M. Lemmers, A. Schots, O. van Kooten, J. van Seters, G. Linssen te Wageningen
- Pantarijn, H. Dozeman, W. Luiten, te Wageningen
- Rembrandt College, I. van Genderen, te Veenendaal
- Gymnasium Arnhem, T. van Kessel, te Arnhem

onder redactie van: Margriet van Vianen, Guido Linssen

vormgeving: Vincent Peters en Christiaan Smits

©2013. Versie 1.0

Het auteursrecht op de module berust bij Wageningen University. Wageningen University is derhalve de rechthebbende zoals bedoeld in de hieronder vermelde creative Commons licentie. De auteurs hebben bij de ontwikkeling van de module gebruik gemaakt van materiaal van derden en daarvoor toestemming verkregen. Bij het achterhalen en voldoen van de rechten op teksten, illustraties, enz. is de grootst mogelijke zorgvuldigheid betracht. Mochten er desondanks personen of instanties zijn die rechten menen te kunnen doen gelden op tekstgedeeltes, illustraties enz. van een module, dan worden zij verzocht contact op te nemen met Wageningen University. De module is met zorg samengesteld en getest. Wageningen University en Bètasteunpunt Wageningen aanvaarden geen enkele aansprakelijkheid voor onjuistheden en/of onvolledigheden in de module. Ook aanvaarden Wageningen University en Bètasteunpunt Wageningen geen enkele aansprakelijkheid voor enige schade, voortkomend uit (het gebruik van) deze module. Dit werk is gelicenseerd onder een Creative Commons Naamsvermelding-NietCommercieel-GelijkDelen 3.0 Nederland licentie.

Inhoudsopgave

Colofon	2
Voorwoord	5
Doel van de module	6
Studiewijzer	7
Leerdoelen en toetsing	9
1 Reis naar Amerika	11
2 CO₂-uitstoot compenseren	14
2.1 Groei en verval	15
2.2 Algen: de nieuwe biobrandstof	16
3 Biomassa produceren	20
3.1 Bioreactor: batch- of continueactor?	20
3.2 Een groeimodel	25
3.3 Exponentiële groei	25
3.4 Logistische groei	27
4 Experiment: de bioreactor	29
5 Fotosynthese: de productie van organische stoffen	33
5.1 Het blad	33
5.2 Plantencellen	34
5.3 Lichtenergie	37
5.4 De verwerking van lichtenergie	39
5.5 Fotosystemen	40
5.6 De rol van ATP	43
5.7 Het tweede deel van de fotosynthese: de synthese van koolhydraten	44
5.8 Samenvattend overzicht	46
6 De verbrandings-motor van de cel	49
6.1 Cellulaire verbranding of aërobe dissimilatie	49
6.2 De glycolyse	50
6.3 De oxidatieve fosforilering	52
6.4 Korte samenvatting cellulaire verbranding	53

7	Brandstoffen voor het leven	54
7.1	Hoe worden biobrandstoffen gemaakt?.....	55
7.2	Bio-ethanol.....	55
7.3	Biodiesel.....	55
8	De kringloop rond	57
8.1	Oliën en vetten in planten.....	57
8.2	Vetzuursynthese.....	58
9	Brandstoffen van de toekomst?	59
9.1	Food or Fuel?.....	59
9.2	De gevolgen van de grootschalige productie van biobrandstoffen voor het broeikaseffect.....	60
10	Experiment: eigenschappen van chlorofyl	62
10.1	Inleiding.....	62
10.2	Doel.....	62
10.3	Werkwijze.....	62
10.4	Proef: chlorofylmolecuul aanslaan.....	62
10.5	Proef: het scheiden van bladpigmenten met chromatografie.....	64
11	Experiment: Biodiesel	65
11.1	Biodiesel uit zonnebloemolie bereiden	65
	Bijlage: URL-lijst	66

Voorwoord

‘Voor niets gaat de zon op’: mensen gebruiken deze uitdrukking om zich te verontschuldigen dat ze ergens geld voor vragen. ‘Voor niets gaat de zon op, maar ik kan niet van niets leven, ik heb geld nodig.’ Het mooie is dat wij eigenlijk allemaal van de zon leven. Wat we kunnen kopen met het geld dat we voor ons werk krijgen, is gemaakt met zonne-energie. Alles wat we eten is met behulp van zonne-energie gemaakt door planten. Dit geldt ook als je geen vegetariër bent, want ook dieren eten planten. Maar ook je kleren, het huis waarin je woont en alle spullen die erin staan zouden zonder **fotosynthese** niet bestaan. Soms omdat er plantaardige materialen in verwerkt zijn -katoen, linnen of hout bijvoorbeeld- maar altijd ook omdat er brandstof voor nodig is. Die brandstof is nodig bij de productie, en om de vrachtwagens te laten rijden die er voor nodig zijn om producten in de winkels te krijgen. En ook voor de elektriciteit die nodig is om de winkels te verlichten en producten te koelen, en om thuis licht te hebben, om je computer en tv te laten werken en je mobieltje op te laden. Bijna altijd is dat fossiele brandstof: organische stof die honderden miljoenen jaren geleden gemaakt werd door planten die leefden van de zon. Aardolie is bovendien grondstof voor de productie van de kunststoffen (plastics) die vrijwel overal inzitten. Van je mobieltje blijft bijna niets over als je de kunststof weg zou denken.

De energie van de zon maakt leven op aarde mogelijk. Fotosynthese is het proces waarmee planten de zonne-energie omzetten in een vorm waar alle organismen, dus ook mensen, van profiteren. Dat klinkt simpel en probleemloos, maar dat is het helaas niet. Wij gebruiken zoveel brandstof, dat het einde van de olievoorraad in zicht komt. Bovendien zorgt het grote verbruik van fossiele brandstoffen voor vervuiling en de uitstoot van veel CO₂, het belangrijkste broeikasgas. Bij het zoeken naar oplossingen voor deze problemen roept men fotosynthese ook weer te hulp: meer biobrandstoffen en het aanplanten van bomen om CO₂ op te nemen. Dit levert echter vragen op. Zijn dit wel echte oplossingen? Hoe werkt dat dan? Kan het efficiënter? Komt de voedselproductie niet in gevaar?

Doel van de module

In deze module leer je wat het verband is tussen fotosynthese en energie op aarde. Nog steeds gebruiken we hoofdzakelijk fossiele brandstoffen als energiebron. In deze module gaan we in op alternatieven zoals biobrandstoffen, maar ook hoe je met uitsluitend zonne-energie voedselgewassen kunt produceren (dus zonder extra fossiele brandstoffen te gebruiken). Om dit alles goed met elkaar in verband te kunnen brengen gaan we in op energie: wat dat is, in welke vormen het voorkomt en hoe je energie transporteert. Omdat fotosynthese een sleutelproces is bij het vastleggen van zonne-energie wordt dit proces in detail behandeld.

Deze module bestaat uit twee delen: deel A en B. In de introductie komen twee problemen van wereldniveau naar voren: de hoge CO₂ uitstoot en het opraken van fossiele brandstoffen. In deel A kijken we naar mogelijke oplossingen voor de verlaging van CO₂ uitstoot. Deel B bespreekt de zoektocht naar alternatieve energiebronnen, waarbij de fotosynthese opnieuw een belangrijke rol speelt. Aan ieder deel zijn practica verbonden.

Introductie

Op vakantie naar Amerika.

Probleem: brandstoffen en CO₂-uitstoot

Deel A: CO₂-compensatie

- Hoe kunnen we in Nederland compenseren voor onze CO₂-uitstoot?

Bij deel A hoort een experiment

- In dit experiment bouw je een algenreactor waarin algen gekweekt worden. Je gaat onderzoeken wat de invloed is van verschillende variabelen op de groei van algen.

De toetsing van deel A gaat over het berekenen van de hoeveelheden CO₂ die bij energiegebruik worden uitgestoten en de hoeveelheden die bij fotosynthese worden opgeslagen.

Deel B: biobrandstof

- Hoe werkt de cellulaire verbranding?
- Hoe komen planten aan energie?
- Hoe werkt fotosynthese?
- Hoe vindt synthese van ATP plaats?
- Hoe vindt synthese van koolhydraten plaats?

Bij deel B horen twee experimenten

- Het eerste experiment gaat over hoeveel verschillende bladgroenpigmenten er zijn en over de eigenschappen van de bladgroenpigmenten.
- Het tweede experiment betreft biodiesel. Sommige soorten algen kunnen olie maken. Deze olie kan worden omgezet in biodiesel. In dit experiment gaan we zonnebloemolie omzetten in biodiesel.

De toetsing van deel B gaat over de fotosynthese.

Over de experimenten moeten jij en je practicumgenoten een meetrapport of een verslag schrijven, dus noteer al je waarnemingen en resultaten goed! Een meetrapport is minder uitgebreid dan een verslag, maar daarin moeten wel alle resultaten overzichtelijk weergegeven worden.

Jouw docent(en) en eventueel ook de TOA zullen je beoordelen op je praktische vaardigheden en op de kwaliteit van je meetrapporten en verslagen. Dit telt mee in je eindcijfer voor deze module.

Overzicht

De opzet van de hele module is nog eens samengevat in onderstaand schema. Je docent(en) is/zijn vrij om naar eigen inzicht dit schema aan te passen.

Een vliegreis naar Amerika draagt bij aan twee milieuproblemen Uitstoot van koolstofdioxide, waardoor versneld broeikaseffect. Opraken van fossiele brandstoffen. Nog maar voor 50 jaar brandstoffen.	
Deel A	Deel B
mogelijke oplossing A Compensatie koolstofdioxide-uitstoot door vastleggen CO ₂ in groeiende algenmassa.	mogelijke oplossing B Zoeken naar alternatieve brandstoffen. Fotosynthese kan daarbij een handje helpen.
uitwerking A Voor de oplossing is het nodig om een antwoord te vinden op de volgende vragen: - Hoe kun je algen zo goed mogelijk laten groeien? - Hoe kun je de groei van algen meten? - Hoe kun je de groei van algen beschrijven met behulp van een computermodel?	uitwerking B Voor de oplossing is het nodig het fotosyntheseproces goed te begrijpen om de volgende vragen te kunnen beantwoorden: - Hoe kan de fotosynthese ons nieuwe brandstoffen leveren? - Hoe komt een plant aan de bouwstoffen voor olie? - Olie uit algen voor biodiesel? Een oplossing? Hoe maakt een plant olie? Vetzuurcyclus. - Hoe verbrandt een plant? Dissimilatie uitleg. - Hoe kunnen we de fotosynthese gebruiken voor het oplossen van het brandstofprobleem?
Experiment A - Hoe kweek je algen? Hoe kun je de groeisnelheid maximaliseren? Dit is een modelsysteem waar met de computer aan te rekenen is.	Experimenten B - Van zonnebloemolie biodiesel maken. - Eigenschappen van chlorofyl.
Conclusies over de bijdrage van deze mogelijkheden voor het oplossen van het 'vliegreisprobleem'.	

Leerdoelen en toetsing

Aan het eind van deze module kun je beschrijven hoe de onderstaande processen koolstofdioxide-uitstoot en brandstofverbruik kunnen beperken:

- vastleggen koolstofdioxide in algen
- productie van biodiesel door algen

Daartoe is het nodig dat je leert:

- hoe je de CO₂-uitstoot kunt berekenen die hoort bij een activiteit als vliegen;
- hoe je de bijdrage kunt berekenen van CO₂-compensatie door middel van fotosynthese;
- welke deelprocessen in planten betrokken zijn bij het vastleggen van koolstofdioxide;
- hoe je groei van algen kunt beschrijven door middel van wiskundige modellen;
- hoe je diesel produceert met behulp van plantaardige olie.

Kennis van de basisstof wordt beoordeeld in twee toetsen over CO₂-compensatie en over fotosynthese. Verder worden je verslagen/meetrapporten beoordeeld van de experimenten over de groei van algen, de productie van algen en de productie van biodiesel. Bij de practica en verslagen werk je samen in een groepje en word je als groep beoordeeld.

Samengevat zijn er dus twee te beoordelen zaken:

- de twee deeltoetsen (individueel)
- de verslagen en meetrapporten (groep)

Inleiding Naar Amerika



1 Reis naar Amerika

Straks, na het eindexamen, hebben jullie de langste vakantie van je leven. Met een groepje vrienden ben je plannen aan het maken. Het moet echt bijzonder worden. Geen Terschelling of Lloret de Mar of zo. Het mag wat kosten, jullie zijn allemaal al flink aan het sparen. Als iemand oppert: Amerika, wordt het even stil. Iedereen begint te denken. En dan komen de ideeën op tafel: New York, Miami, rondreizen met een camper, route 66, Disney, Los Angeles, Hollywood, Las Vegas, de natuurparken moeten zo mooi zijn... Twee weken later heeft iedereen informatie over reizen in Amerika opgezocht. Omdat jullie zoveel tijd hebben, lijkt een rondreis het leukst. New York kan ook als korte reis. Heel Amerika door is teveel, zeker omdat hooguit twee mensen hun rijbewijs op tijd zullen hebben. Een rondreis door Florida gecombineerd met de Florida Keys? Door Miami rondrijden in een grote Amerikaanse slee, naar Disney World? Of naar Californië? San Francisco, Los Angeles en dan trekken door Yosemite Park, Las Vegas en misschien naar de Grand Canyon? Moeilijk kiezen. Florida valt uiteindelijk af. In de zomervakantie is er daar veel kans op orkanen. Californië dan? Iedereen is voor!

Als jullie de vliegreis nu al boeken zijn de tickets nog goedkoop. Jij hebt het op je genomen de goedkoopste optie te zoeken. Een speurtocht op het internet brengt je uiteindelijk bij tickets voor € 550,-. Iedereen is akkoord, alle gegevens worden ingetikt, je drukt op verzenden. We gaan naar Californië!!!

Er komen steeds leukere plannen, internet staat vol tips over reizen in dit gebied. Je hebt er verschrikkelijk veel zin in. Maar één ding knaagt aan je geweten: vliegen is niet bepaald milieuvriendelijk. Je houdt het lang voor je, maar na een les bij biologie over het broeikaseffect blijkt dat de anderen daar ook over hebben zitten dubben. Jullie besluiten te kijken of er een mogelijkheid is om voor de CO₂-uitstoot van jullie vlucht te compenseren, door bomen aan te planten of zo.

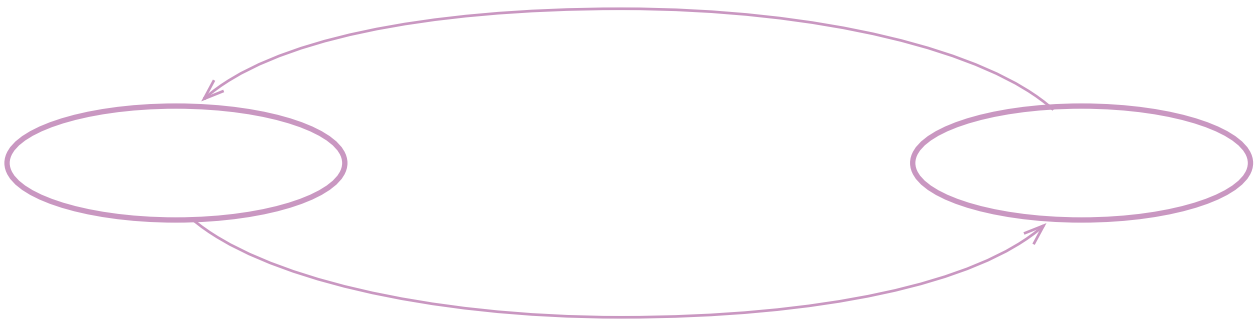
1. Broeikaseffect.

- Beschrijf in het kort wat het broeikaseffect is. Misschien heb je het al behandeld op school, anders kun je het opzoeken in een biologie of ANW boek. Of je zoekt op het internet, bijvoorbeeld: ► [URL1](#)
- Waarom moet je eigenlijk spreken van het versterkte broeikaseffect en waardoor wordt dit versterkte broeikaseffect veroorzaakt?

2. Kringlopen

Bij natuurlijke processen is sprake van een koolstofkringloop. Bij die kringloop verdwijnt en ontstaat CO_2 .

- Bij welke processen in de levende natuur ontstaat en verdwijnt CO_2 ?
- Leg uit waarom men spreekt van een kringloop.
- Geef aan welke rol levende wezens hierbij spelen.
- Teken de koolstofkringloop waarbij CO_2 ontstaat en verdwijnt. Maak daarbij gebruik van de volgende figuur:



3. Kringlopen, vervolg.

Tabel 93G van Binas geeft ook een afbeelding van de koolstofkringloop. De kringloop hier getekend, is veel ingewikkelder dan de kringloop die je bij vraag 2 hebt getekend.

- Leg uit wat bedoeld wordt met aërobe en anaërobe dissimilatie.
- Leg uit wat bedoeld wordt met chemotrofe, heterotrofe, autotrofe en fototrofe organismen.
- Leg uit wat bedoeld wordt met assimilatie.
- Ga weer uit van de eenvoudige kringloop en geef in dit schema aan waar assimilatie en dissimilatie een rol spelen.
- Geef ook aan waar heterotrofe en autotrofe organismen een rol spelen.

Tabel 93G laat zien dat er naast een organische koolstofkringloop ook sprake is van een anorganische kringloop.

- Leg uit om welke kringloop het hier gaat.
- Ga uit van je tekening uit opdracht 2 en teken de anorganische kringloop in.

4. CO_2 compensatie.

- Wat wordt bedoeld met CO_2 compensatie?
- Beschrijf een aantal manieren waarop je CO_2 compensatie kunt toepassen.

Q

Deel A

CO₂ compensatie



2 CO₂-uitstoot compenseren

Je bent net terug van je vakantie naar Californië. Een geweldige ervaring! Wat heb je veel gezien! Maar het is je ook opgevallen dat de Amerikanen veel meer fossiele brandstoffen gebruiken dan wij in Nederland. De vrienden waarmee je op vakantie was, hebben het ook gezien: enorme koelkasten, grote auto's en overal airco's. Met alle berichten over klimaatverandering en met het opraken van de aardolie in zicht, zet dat je aan het denken.

Met je vakantiegroep bespreek je de enorme hoeveelheden fossiele energie die er gebruikt worden in onze samenleving. Je wilt wat meer weten over de gevolgen daarvan. Jullie besluiten een aantal zaken uit te gaan zoeken.

Onderstaande opdrachten voer je uit als voorbereiding op de les.

5. Fossiele energie per hoofd van de bevolking

Ga na hoeveel fossiele energie er gemiddeld wordt gebruikt per hoofd van de bevolking in Nederland (of Europa), in de Verenigde Staten, in China en in een (willekeurig) Afrikaans land. Ga ook na wat voor fossiele energie dit is. Vermeld je bronnen.

6. Brandstofverbruik vliegtuig

Neem aan dat jij de vlucht naar de VS heen en terug hebt gemaakt in een Boeiing 747.

Voor een Boeiing 747 geldt een *fuel flow* van 10 ton per uur. Daarbij gaat het dan om kerosine. Voor de berekeningen gaan we uit van C₁₃H₂₈.

Bereken hoeveel brandstof jij hebt gebruikt voor je reis naar de VS en daarvan afgeleid hoeveel CO₂-uitstoot dit tot gevolg heeft gehad.

Ga eerst na welke gegevens je allemaal nodig hebt om deze vraag te beantwoorden. Zoek deze gegevens op. Vermeld ook welke extra aannames je voor deze berekening moet maken. Vermeld je bronnen.

7. CO₂-compensatie vliegtuig

Zoek op internet welke initiatieven er worden ondernomen om de CO₂-uitstoot van vliegtuigen te compenseren. Wat wordt er precies gedaan binnen zo'n initiatief? Vermeld je bronnen.

8. Gebruik fossiele energie

Waarvoor wordt de grootste hoeveelheid fossiele energie gebruikt? Is dat in alle delen van de wereld hetzelfde? Vermeld je bronnen.

9. Alternatieven

Er zijn tal van alternatieven mogelijk voor het gebruik van fossiele brandstoffen. In een brainstormsessie met je groep maak je een lijst met acht alternatieven.



Klassikaal worden alle lijstjes met alternatieven geïnventariseerd en er wordt één lijst met alternatieven voor fossiele energie gemaakt. De voor- en nadelen, mogelijkheden en onmogelijkheden van de verschillende alternatieven worden doorgesproken.

Je hebt net gezien dat vliegen dus niet echt milieuvriendelijk is, maar dat wist je waarschijnlijk wel. De CO₂-uitstoot van een vliegtuig is ongeveer even groot als de uitstoot die je zou krijgen als elke passagier in z'n eentje dezelfde afstand zou afleggen met een auto! Merkwaardig dat vliegen zo goedkoop is terwijl het zoveel brandstof kost. Dat komt omdat er geen belasting wordt geheven op vliegtuigbrandstof. Wel gek als je bedenkt dat de brandstoffen een keer op zullen raken...

10. Opdracht

Plantenwetenschappers hanteren als vuistregel dat in een klimaatgebied als het onze door de fotosynthese ongeveer 60 g glucose per m² per dag wordt geproduceerd gedurende een groeiseizoen van 100 dagen.

- Noteer de reactievergelijking van de fotosynthese en ga met behulp hiervan na hoeveel kg CO₂ nodig is voor de productie van 1 kg glucose. Neem aan dat de hoeveelheid gevormde biomassa net zo groot is als de hoeveelheid gevormde glucose
- Bereken met behulp van dit gegeven hoeveel ha bos er nodig is om net zoveel CO₂ op te nemen als overeenkomt met jouw aandeel in de uitstoot van je vliegreis. Gebruik daarbij je antwoord van opdracht 6.

In de volgende URL's vind je aanwijzingen voor de snelheid van de fotosynthese in verschillende delen van de wereld:

► [URL2](#)

Dit is een link naar kaarten waarvan de netto primaire productie, een andere naam voor CO₂-fixatiesnelheid, kan worden afgelezen.

► [URL3](#)

Een overzicht van de jaarlijkse CO₂-accumulatie door verschillende ecosystemen.

11. Fotosynthese

Ga na in welk gebied op aarde de fotosynthese per m² het grootst is.

12. CO₂-fixatiesnelheid

Bereken hoeveel groter de CO₂-fixatiesnelheid is in een tropisch regenwoud vergeleken met die in Nederland (zie opdracht 6).



Als je opdracht 6 goed hebt gedaan zie je dat er enorm veel bosoppervlak nodig is voor CO₂-compensatie. Met zoveel vliegreisen van Nederlanders zou daar geen ruimte voor zijn in ons land.

Er is nog een ander probleem dat aan deze vorm van CO₂-compensatie kleef. Dit probleem is misschien nog wel ernstiger.

2.1 Groei en verval

In een bos vindt niet alleen fotosynthese plaats. Elk jaar vallen de blaadjes van de bomen. Het organisch materiaal op de bodem raakt in ontbinding. Daarbij komt weer CO₂ vrij. Hetzelfde geldt voor rottend hout dat niet wordt weggehaald.

De aanwezigheid van een bos garandeert dus niet dat er echte CO₂-compensatie plaats vindt.

Het leek zo voor de hand liggend. Je voelt je schuldig omdat je met een vliegreis extra hebt bijgedragen aan uitstoot van CO₂ en je wilt die hoeveelheid CO₂ weer uit de lucht halen. Dus je plant een boom. Want bomen halen CO₂ uit de lucht.

Maar als die boom na enkele decennia afsterft en het hout wegrot is alles voor niets geweest.

Echte CO₂-compensatie met behulp van de fotosynthese is slechts mogelijk onder twee voorwaarden:

- er moet nieuwe biomassa gevormd worden
- de nieuw gevormde biomassa moet ofwel blijvend worden opgeslagen ofwel gebruikt worden om toekomstige inzet van fossiele brandstof te verhinderen.

13. Houtopslag

In deze opdracht wordt eens nagegaan hoe groot een opslagruimte moet zijn om een hoeveelheid hout permanent op te slaan die compenseert voor jouw aandeel van de CO₂-uitstoot van de vliegreis.



- a. Bereken eerst hoeveel biomassa moet worden geproduceerd om 1 kg CO₂ vast te leggen. Gebruik daarbij de reactievergelijking van de fotosynthese en neem aan dat de hoeveelheid gevormde biomassa overeenkomt met de massa glucose die bij de fotosynthese is geproduceerd.
- b. Bereken vervolgens het volume van een vergelijkbare hoeveelheid hout. Kies daarbij voor een bekende houtsoort.

14. CO₂-compensatie bos

In het bos vinden verteringsprocessen plaats. Daarbij wordt de CO₂ weer teruggegeven aan de atmosfeer. Maar doorgaans wordt hout dat in een bos wordt gevormd wel gebruikt. Bijvoorbeeld om er meubels mee te maken.

Leg uit aan welke voorwaarden voldaan moet zijn opdat bij een dergelijk gebruik van een bos sprake is van echte CO₂-compensatie.

Q

Bosbouw lijkt al met al niet de meest voor de hand liggende manier om te zorgen voor CO₂-compensatie. Zeker niet in Nederland. Maar misschien kunnen we op een andere manier compenseren.

2.2 Algen: de nieuwe biobrandstof

Een veelbelovende biobrandstof wordt gevormd door algen. Algen blijken veel sneller te groeien dan planten en bomen.

Technieken om algen te produceren worden in steeds hoger tempo ontwikkeld en verbeterd. Lees het onderstaand persbericht.

Ook Exxon gaat met algen in de olie

Vorig jaar kondigde de KLM al aan te gaan samenwerken met het biobrandstofbedrijf Agripress om kerosine uit algen te gaan winnen. Nu gaat Exxon hetzelfde groots aanpakken. Als het inderdaad groot wordt, een win-win situatie. De algen moeten CO₂ om gaan zetten in olie middels fotosynthese.

Het lijkt een dubbele heilige graal. Het (waarschijnlijke) kooldioxide aangedreven opwarmingsprobleem in combinatie met het (zekere) slinken van de olievoorraden aanpakken. Genome-pionier Craig Venter meldt in een interview met de newscientist te gaan samenwerken met de oliegi-gant.

De bedoeling is om de olieproducerende algensoorten met genetische modificatie tot een hogere olieproductie te bewegen. Ook moeten de algen de olie niet opslaan als energiereserve voor eigen gebruik, maar het gaan uitscheiden. Exxon hoopt over vijf a tien jaar een serieuze algenolieproductie te kunnen realiseren.



Afbeelding 1: Algenpasta zoals gemaakt door de firma: Algae Food and Fuel

Ook het volgend artikel is interessant. Het komt van een website voor de agrarische sector: "Boerenbusiness".

Maïs en koolzaad krijgt concurrentie van algen

Wageningen UR opent vrijdag een onderzoekscentrum voor de grootschalige productie van algen. De productie moet worden opgeschroefd om de kostprijs te verlagen, zodat algen voor de productie van bijvoorbeeld biobrandstof kunnen concurreren met maïs en koolzaad.

In het zogeheten AlgaePARC proberen de onderzoekers de productie van algen in reactoren te verhogen en tegelijk de kostprijs drastisch te verlagen. Daartoe zijn er in AlgaePARC vier grote (24 m²) en drie kleine (2,4 m²) met water gevulde, doorschijnende installaties waarin de algen met zonlicht als energiebron groeien. Er zijn diverse typen kweeksystemen, zoals buisreactoren en de klassieke 'open vijver'.

De miljarden en miljarden algen in het water produceren met licht, koolzuurgas en mineralen biomassa die aan het eind van het tracé worden geoogst. De biomassa wordt na drogen gescheiden in componenten als oliën, eiwitten, zetmeel en pigmenten zoals caroteen. Deze bulkstoffen zijn de grondstof voor biodiesel, afbreekbare plastics, natuurlijke kleurstoffen, veevoer en voedingsproducten.

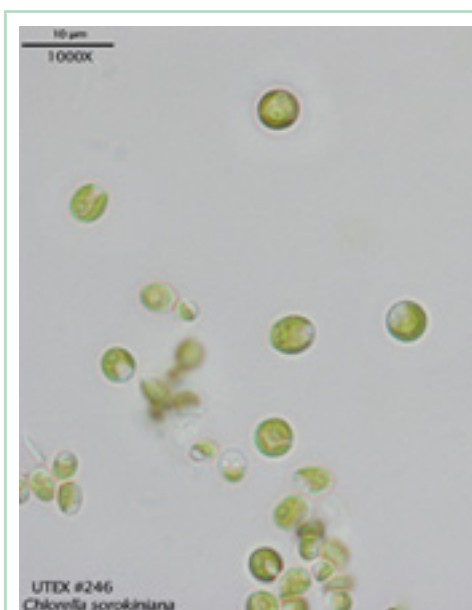
De voor de groei van de algen noodzakelijke voedingsstoffen komen uit agro-industriële reststromen en rookgassen (CO₂). 'Op die manier is de nutriëntenkringloop gesloten, met schoner water en zuurstofproductie als extra resultaat. De kweek van microalgen kan zo een belangrijke bijdrage leveren aan de verduurzaming van de economie', aldus Wageningen UR.

Microalgen zijn volgens de kennisgigant zeer intensief te kweken op plaatsen waar geen landbouw mogelijk is of de natuur niet wordt bedreigd, zoals woestijnachtige gebieden, drijvende systemen op zee, bermen, daken en vervuilde locaties. De algengroei kan geheel met zout water plaatsvinden. Om het wegtransport in Europa met algenbrandstof te laten verlopen is wel een groot oppervlak nodig (zo groot als Portugal), maar dat levert dan tevens 0,3 miljard ton eiwit op, veertig maal de hoeveelheid die Europa als soja-eiwit invoert.

De faciliteiten van AlgaePARC worden met 3,3 miljoen euro gefinancierd door het ministerie van EL&I, de provincie Gelderland en Wageningen UR.

Algen zijn één- en meercellige in het water levende organismen die geen bladeren, wortels, bloemen en stengels hebben. Toch kunnen sommige soorten, zoals zeewier, relatief complexe structuren aannemen. Algen zijn zogenaamde fototrofen. Dat wil zeggen dat ze alleen licht als energiebron nodig hebben. Evenals hogere planten bezitten algen bladgroenkorrels, waarmee ze zonlicht omzetten in chemische energie (suiker) door middel van fotosynthese. Als bijproduct van de fotosynthese ontstaat zuurstof. Naar schatting produceren algen 73 tot 87 procent van alle zuurstof die voor mensen en andere landdieren ter beschikking staat. Zonder algen zou het leven op aarde waarschijnlijk onmogelijk zijn. Bovendien zijn algen die in de zee voorkomen (het fytoplankton) belangrijk in de voedselketen: algen → kleine kreeftachtigen → kleine vissen → pijlinktvis → orka.

Er is op dit moment veel belangstelling voor algen als producenten van voedsel voor de mens of als bron van stoffen die aan voedsel kunnen worden toegevoegd. Je kunt dan denken



Afbeelding 2: de alg *Chlorella sorokiniana*

aan bijvoorbeeld β -caroteen, dat in het lichaam wordt omgezet in vitamine A en dat vaak als antioxidant aan voedsel wordt toegevoegd. Een ander voorbeeld zijn de omega-3-vetzuren, die van nature voorkomen in visolie en waarvan de consumptie geassocieerd wordt met een kleinere kans op hart- en vaatziekten. Weer een ander product is de stof astaxanthine, een pigment waar zalm rood mee gekleurd wordt.

Het is ook mogelijk om met algen biodiesel te produceren. Er bestaan algensoorten waarvan 30% van hun biomassa uit olie bestaat. Deze olie kan worden omgezet in biodiesel, via een chemische reactie.

Werken met algen is zelfs veel efficiënter dan wanneer je dit met hogere planten doet (zie afbeelding 3). Dat komt omdat je algen kunt kweken in een bioreactor en met de zon als gratis energiebron is zo'n bioreactor potentieel zeer efficiënt.

Het op aarde meest voorkomende fotosynthetisch pigment chlorofyl kan maximaal twintig procent van het ingevangen licht omzetten in biomassa. Hogere planten hebben als geheel echter maar een fotosynthetische efficiëntie van ongeveer één procent. Met algen zou dat in theorie een stuk meer in de richting van de twintig procent kunnen gaan. Daarvoor moet de bioreactor wel optimaal functioneren. In deze proef gaan we bekijken wat de effecten zijn van enkele omgevingsfactoren op de efficiëntie van de bioreactor.

Daartoe gaan we zelf een bioreactor bouwen met behulp van eenvoudige hulpmiddelen. In deze bioreactor brengen we algen in kweek en gaan we de effecten van omgevingsfactoren bepalen door de geproduceerde hoeveelheid biomassa te meten.

Eerst doen we een nulmeting door de biomassa te bepalen die de algen onder standaard omstandigheden produceren. Dit is de standaard waarmee je kunt gaan vergelijken. Vervolgens gaan we de omstandigheden variëren en bekijken we wat het effect is op de hoeveelheid geproduceerde biomassa. Het doel van deze proef is zo veel mogelijk biomassa (hoge concentratie algen) te produceren in een korte tijd. Ervan uitgaande dat algen 30% van hun biomassa kunnen omzetten in olie, kun je vervolgens uitrekenen hoeveel tijd het kost om voldoende olie te produceren om de vliegreis naar Amerika te compenseren. De biomassa

gewas	liter olie/ha
mais	172
katoen	325
sojaboon	446
zonnebloem	952
koolzaad	1190
oliepalm	5950
algen	95000

Afbeelding 3: de opbrengst van biodiesel uit verschillende gewassen en algen

is een afgeleide van de effectiviteit van het fotosyntheseproces in de algen. De algen zijn als fototrofe organismen volledig afhankelijk van licht als energiebron. Om licht efficiënt in energie om te kunnen zetten moeten de omgevingsfactoren zo optimaal mogelijk zijn.

In deze praktische opdracht werk je met de alg *Chlorella sorokiniana*. Als dit eencellige organisme eenmaal in kweek is gebracht kun je binnen 24 uur groei of groeiremming (negatieve groei) meten en daaruit de fotosynthetische activiteit afleiden.

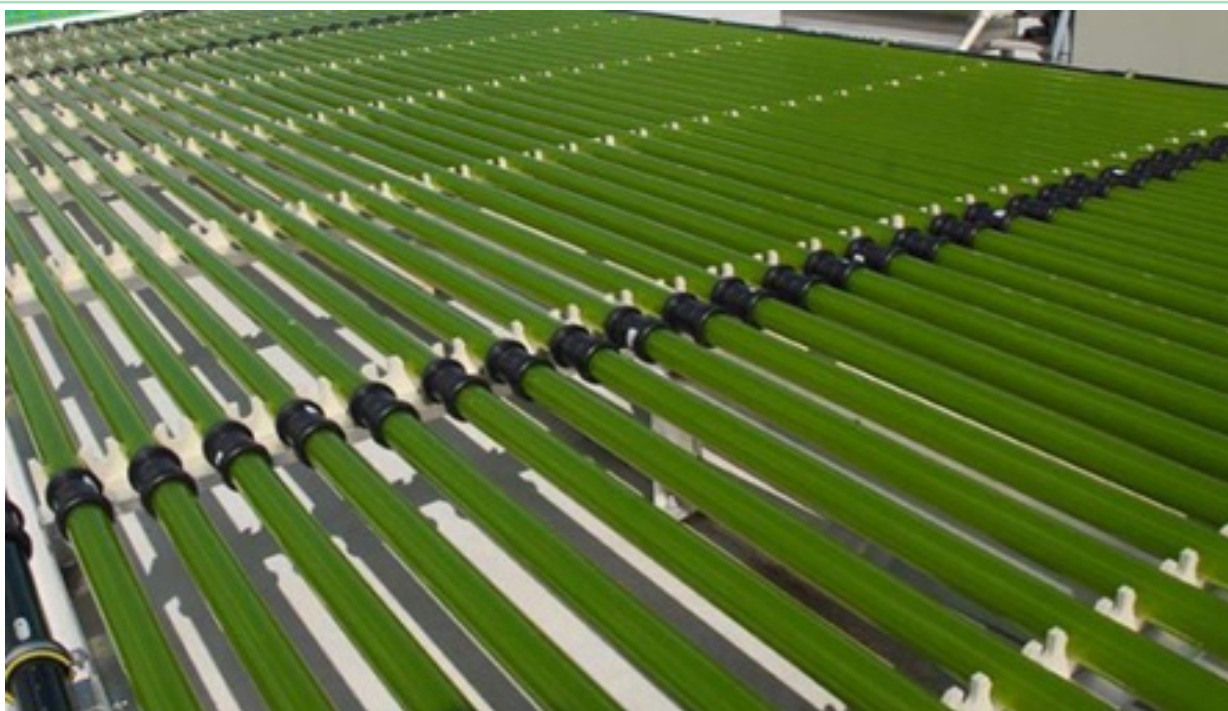
15. Opdracht

Algen kunnen olie produceren. Deze olie kan gebruikt worden om diesel of kerosine te produceren. De algen worden geproduceerd op een algenboerderij. Deze boerderij moet een zo hoog mogelijke algenproductie hebben tegen zo laag mogelijke energetische kosten.

- Leg uit waarom dit laatste nodig is.
- Leg uit hoe je algen kunt laten groeien en met welke factoren je rekening moet houden als je algen wilt produceren.
- Op welke manier zou je algen moeten oogsten?
- Ontwerp een algenboerderij die aan de bovengenoemde eis voldoet.
- Geef aan wat voor- en nadelen zijn van de productiefaciliteit in afbeelding 4 in vergelijking met een algenvijver.



Algenboeren staan voor de uitdaging om met behulp van de productiefactoren kapitaal, grond en arbeid algen te produceren. Om je een idee te geven voor welke keuzen een algenboer komt te staan, dient de volgende opdracht.



Afbeelding 4: Productiefaciliteit van AlgaePARC, het onderzoekscentrum van Wageningen Universiteit

16. Opdracht

Een algenvijver raakt door de groei van de alg steeds voller. Aanvankelijk worden de algen niet geremd in hun groei omdat er voldoende nutriënten en licht aanwezig zijn. Maar gaandeweg raakt de vijver voller. Het groeiseizoen is nog lang niet voorbij wanneer de algen nauwelijks meer toenemen. Maar ook dan zijn er op grotere diepte nauwelijks algen te vinden.

- Leg uit waarom de groei zo vroeg in het seizoen tot stilstand komt.
- Leg uit waarom de algen niet willen groeien op grotere diepte.
- Schets in een grafiek hoe de hoeveelheid biomassa in de loop van de tijd verandert.
- Leg aan de hand van de grafiek uit wat het beste moment is om te oogsten.



De meest optimale situatie bij een algenveld is die waarbij de productiesnelheid van het veld maximaal is. Het oogsten moet vervolgens in hetzelfde tempo gebeuren als er wordt geproduceerd met de fotosynthese. Om te achterhalen hoe groot een veld moet zijn om een bepaalde oogst binnen te halen moeten experimenten gedaan worden. Dat is de centrale vraag van het volgende hoofdstuk: hoe zet je een experiment op om fotosynthese bij algen te onderzoeken?

3 Biomassa produceren

In hoofdstuk 2 CO₂-uitstoot compenseren heb je geleerd dat de CO₂-uitstoot van je reis naar Californië gecompenseerd kan worden door dit broeikasgas vast te leggen in biomassa. Je weet nu ook dat de productie van biomassa nodig is om biobrandstoffen, zoals biodiesel en bioethanol, te kunnen produceren. De productie van biomassa is het vastleggen van koolstof in planten door middel van fotosynthese. Koolstof wordt vooral vastgelegd in suikers zoals glucose (C₆H₁₂O₆). Deze suikers zijn dan de basis waaruit allerlei andere stoffen zoals zetmeel en vetten worden gemaakt.

In dit hoofdstuk wordt een groepsopdracht voorbereid. De groepsopdracht bestaat uit het opzetten van een algenkweek. In dit practicum gaan we onderzoeken welke omgevingsfactoren van invloed zijn op de fotosynthese en wanneer deze omgevingsfactoren optimaal zijn om de productie zo groot mogelijk te maken.

Gecontroleerd gekweekte algen worden verkregen met behulp van een bioreactor. Een bioreactor is doorgaans een vat waarin levende wezens biomassa als gewenst eindproduct produceren onder gecontroleerde omstandigheden.

Bioreactors zijn er in alle soorten maar een onderscheid springt er uit: er moet een keuze gemaakt worden voor een batchreactor of een continueactor. Over die keuze gaat de volgende paragraaf.

3.1 Bioreactor: batch- of continueactor?

Bioreactoren komen voor in verschillende soorten. Een belangrijk onderscheid is dat tussen batch- en continueactoren. Bij een batchreactor voor algenproductie wordt een starthoeveelheid alg toegevoegd aan een kweekmedium (water + nutriënten). Onder invloed van licht en voldoende CO₂ zal de alg gaan groeien en zuurstof af gaan geven. Als de reactor 'vol' is, wordt er geoogst. De inhoud van de reactor met de algen moet worden afgetapt voor verdere bewerking. De reactor wordt schoongemaakt en opnieuw gevuld. Het proces begint vervolgens weer van voren af aan.

Kenmerkend voor de batchreactor is dat tijdens de batchjob de omstandigheden in het reactorvat wijzigen. De hoeveelheid nutriënten neemt af en de concentratie algen neemt toe.

Bij een continu-reactor is er sprake van een continue aanvoer van kweekmedium en een continue oogst van algen. De inhoud van de bioreactor zelf moet constant van samenstelling blijven. Het volume van de ingaande stroom stoffen moet gelijk zijn aan het volume van de uitgaande stroom stoffen. Zelfs moet gelden dat er voor elke atoomsoort een evenwicht moet zijn. De atomen die bij oogst van het product verdwijnen, moeten via nutriënten en CO₂ weer worden aangevuld.

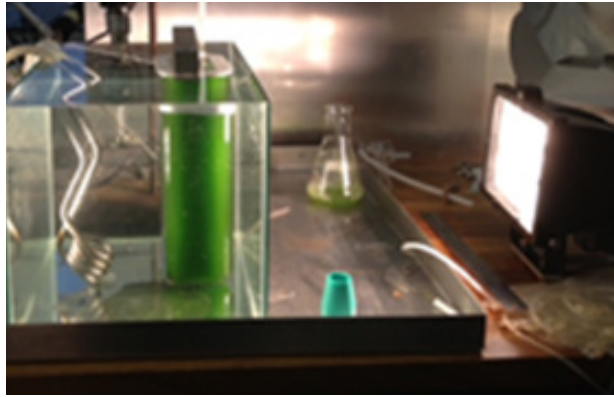
Om een stabiel en goed producerende continu-reactor te krijgen moet er heel wat worden bijgesteld.

Het voordeel van een batch-reactor is dat hij veel eenvoudiger te maken is. Een continu-reactor moet immers worden uitgerust met toe- en afvoersystemen. Bovendien is voor het operationeel maken van een batch-reactor minder kennis nodig. Een continu-processor is pas operationeel na een lange voorbereiding. Daar staat tegenover dat de continu-reactor, eenmaal goed afgesteld veel meer productie maakt. Het in bedrijf houden kost ook minder onderhoud terwijl de batchprocessor na elke job weer moet worden schoongemaakt en gevuld.

De batch-reactor

Een bioreactor is in dit geval een container, gevuld met water en algen, voorzien van voedingsmiddelen, die zijdelings wordt belicht door een sterke lamp.

Om de container op een constante temperatuur te houden kan een aquariumbak gebruikt worden, die met water gevuld is. De container is van boven afgesloten om de zuurstof op te kunnen vangen die door de algen wordt geproduceerd. De benodigde CO_2 wordt verkregen door natriumbicarbonaat in het medium op te lossen.



Afbeelding 5: Een zeer eenvoudige bioreactor. Algengroei wordt gemeten aan de hand van de geproduceerde zuurstof die met een slangetje wordt opgevangen in een maatcilinder.

Om de batchreactor operationeel te maken moet de reactor gevuld worden met water en een kleine hoeveelheid algen. Vervolgens moeten de startparameters gekozen worden:

- Lichtintensiteit: een stevige bouwlamp volstaat. De hele opstelling zou gewikkeld kunnen worden in aluminiumfolie om zoveel mogelijk licht op de algen te concentreren.
- De hoeveelheid natriumbicarbonaat per liter oplossing moet worden gekozen.
- Benodigde nutriënten: Pokon is makkelijk verkrijgbaar maar het is mogelijk te kiezen voor een samenstelling van de benodigde mineralen die speciaal geschikt is voor de groei van algen. Zowel voor pokon als voor de echte algenvoeding geldt dat de concentratie ervan een instrumentele parameter is, dat wil zeggen dat deze weloverwogen gekozen moet worden.

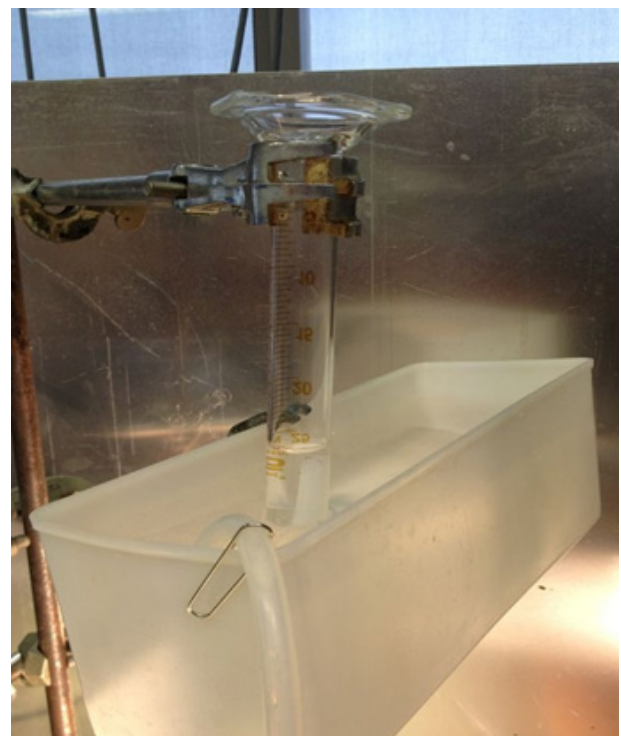
Dan zijn er nog twee omgevingsparameters:

- Temperatuur: deze kan worden geregeld m.b.v. een thermostaat die het water rond de container verwarmt.
- pH: de zuurgraad heeft invloed op de algengroei. Om de pH op een gekozen waarde te stabiliseren is toevoeging van een buffer nodig.

Als de batchreactor helemaal is ingesteld, kunnen de algen groeien. Als de groei er uit is, wordt geoogst. Of de algen groeien kan worden vastgesteld op twee manieren: een snelle manier en een langzame manier.

De langzame manier is om te kijken naar de verandering van de hoeveelheid algen. Dit kan op verschillende manieren:

- Meten van massa droge stof. Je kunt bijvoorbeeld de hoeveelheid droge stof per liter oplossing meten door een monster te nemen, de algen uit te filteren en het filter met algen te drogen.
- Bepalen van de algendichtheid (in algen per liter) in het medium: Dit kun je doen door algen in een klein volume te tellen. Hiervoor heb je een microscoop nodig met een telkamer.
- Bepalen van de troebelheid van het medium: dit is een indirecte manier om de toename van de algen vast te stellen. Je maakt gebruik van de transmissie van licht door de algenoplossing. Hoe meer algen er in de container zitten, hoe meer het licht wordt geabsorbeerd. De transmissie neemt dus af. Regelmatig kan de transmissie gemeten worden door m.b.v. een lichtsensoren te meten hoeveel licht er door de algenoplossing gaat.



Afbeelding 6: De zuurstof die de algen produceren wordt opgevangen in een maatcilinder. De snelheid waarmee de vloeistofspiegel in de maatcilinder zakt is een maat voor de fotosynthetische activiteit van de algen

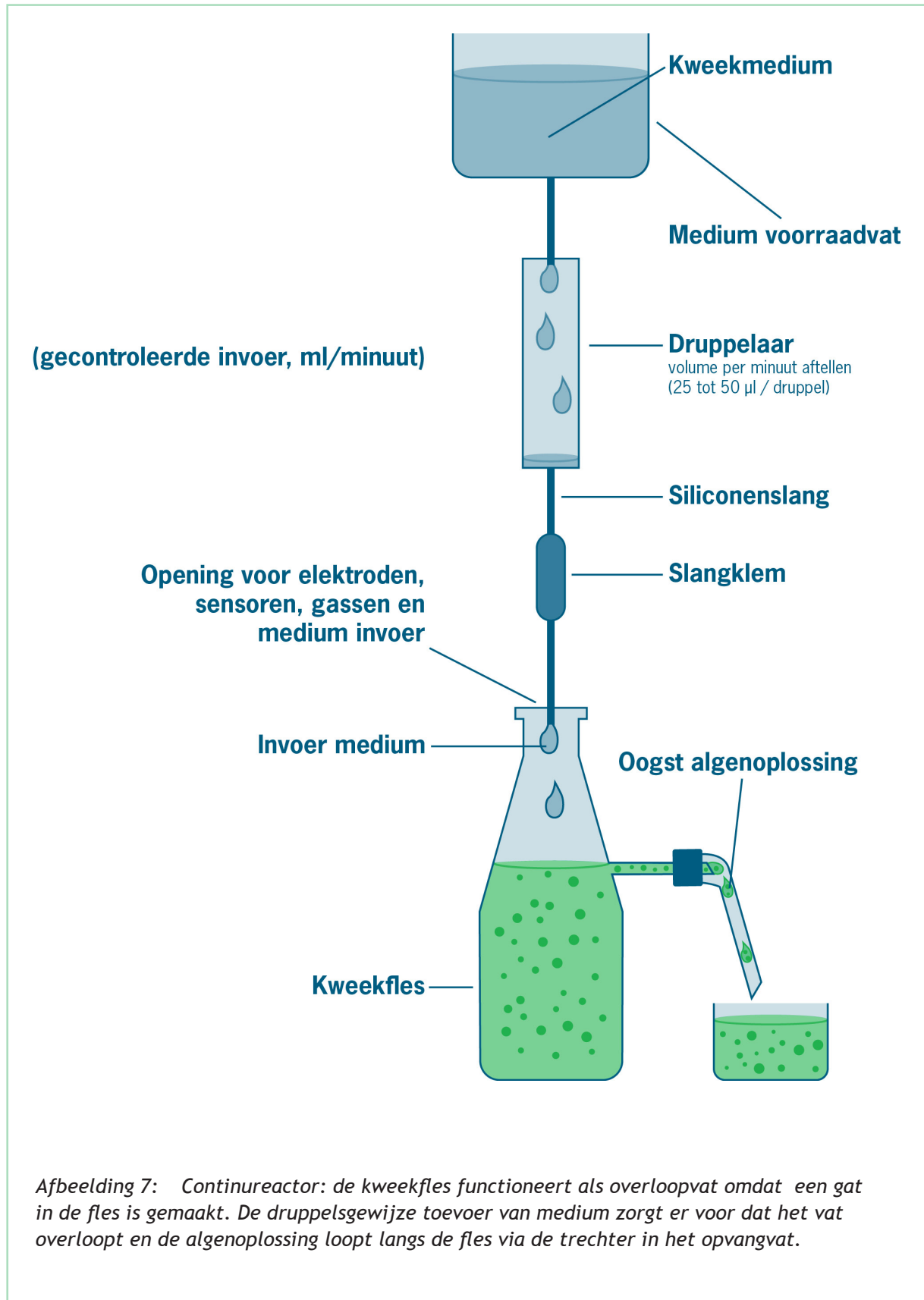
De hoeveelheid algen groeit niet zo snel. Pas na verloop van dagen zal de hoeveelheid merkbaar wijzigen. Een snellere manier om vast te stellen of de algen goed groeien is om niet naar de algen zelf te kijken maar op hun activiteit te letten.

De snelle manier is om te kijken naar de productie van zuurstof. Door middel van een maatcilinder (zie figuur 6) wordt zuurstof opgevangen die door de algen wordt geproduceerd. Op de trechter is een reageerbuis of slang bevestigd die helemaal vol met water zit. De zuurstoftoevoer zorgt er voor dat het wateroppervlak daalt. De snelheid waarmee dit gebeurt, is een maat voor de groeisnelheid van de algen. Als de trechter breed is ten opzichte van de diameter van de slang kan al binnen een uur de productie van zuurstof worden aangetoond. Wijziging van bijvoorbeeld de lighthoeveelheid heeft invloed op de fotosynthese en dus op de zuurstofproductie.

De continu-reactor.

Bij een continu-reactor is er sprake van een constante toevoer van medium en afvoer van algen in oplossing. Als de reactor in evenwicht verkeert is het toegevoerde volume precies gelijk aan het afgevoerde volume.

De natriumbicarbonaat die nodig is voor de benodigde CO_2 moet nu worden toegevoerd via het medium.



Afbeelding 7 toont een zelfgemaakte continuëactor. Het volume van de toevoer is precies gelijk aan het volume van de afvoer omdat gebruik wordt gemaakt van een overloopvat. De vloeistofspiegel zal bij toevoer stijgen tot het gat en blijft daar staan. Wat er nu bij komt aan vloeistof via de druppelaar wordt gecompenseerd door een even grote algenstroom die langs het vat weer naar beneden stroomt. Maar hoe zit het met de eigenschap van de continuëactor dat er evenwicht moet bestaan tussen ingaande en uitgaande stroom voor elke atoomsoort apart? Is dat niet een onmogelijke eis?

Hoe kun je die stromen zo precies regelen?

Het antwoord is dat dat niet hoeft. Ook daar ontstaat vanzelf evenwicht. Dit valt te begrijpen aan de hand van de volgende opgave.

17. Opgave

Een badkuip is gevuld met water. De stop wordt losgehaald en het water begint weg te lopen. Dit is de uitgaande stroom: neem aan dat er 7 liter per minuut wegloopt. Tegelijkertijd wordt de kraan aangezet. Deze levert 5 liter per minuut. Dit is de ingaande stroom. Er is nu geen evenwicht: het niveau van het water in de kuip gaat veranderen.

- a. Leg uit wat er met het niveau gebeurt.

Na enige tijd blijkt het niveau van het waterpeil niet meer te veranderen. Er is nu sprake van een dynamisch evenwicht.

- b. Waarin onderscheidt deze situatie zich van een statisch evenwicht?
- c. Leg uit hoe groot de ingaande stroom en de uitgaande stroom nu is.
- d. Hoe komt het dat dit dynamische evenwicht zich heeft ingesteld?

Q

Ook bij de bioreactor van afbeelding 7 zal zich altijd een dynamisch evenwicht instellen. Maar dat kan best een situatie zijn waarin nauwelijks of geen algen worden geproduceerd.

Ter illustratie volgt hieronder een eenvoudig voorbeeld waarbij begonnen wordt met een totaal onevenwichtige beginsituatie.

Bekijk afbeelding 7: in het kweekmedium is natriumbicarbonaat gedaan om te voorzien in de behoefte van de algen aan CO_2 . Maar stel dat er te veel natriumbicarbonaat in het medium wordt gedaan: kan er zich nu wel een evenwicht instellen? Het antwoord is bevestigend. De concentratie bicarbonaat in de fles gaat nu toenemen want het wordt niet verbruikt door de algen. Maar als de concentratie in de fles toeneemt neemt ook de hoeveelheid natriumbicarbonaat toe in de uitgaande stroom. Uiteindelijk ontstaat evenwicht want de concentratie in de uitgaande stroom kan nooit groter worden dan de concentratie van de ingaande stroom. Wat gebeurt er als de hoeveelheid natriumbicarbonaat te klein is? Hierover gaat de volgende opdracht.

18. Opdracht

Bekijk de continuëactor in afbeelding 7. Van bovenaf druppelt kweekmedium in de reactor. De vloeistof die uit de fles loopt vanwege de overloopfunctie bevat algen. Er is sprake van dynamisch evenwicht. Het aantal koolstofatomen in de kweekreactor verandert dan ook niet.

- a. Leg uit hoe dit mogelijk is.

Men vermindert de hoeveelheid licht.

- b. Leg uit wat dit voor gevolg heeft voor de uitgaande stroom koolstofatomen.
- c. Leg uit hoe uiteindelijk weer dynamisch evenwicht kan ontstaan.

Vervolgens wordt de hoeveelheid natriumbicarbonaat in het kweekmedium verminderd. Hierdoor wordt het evenwicht verstoord.

- d. Leg uit hoe een nieuw dynamisch evenwicht zich weer zal instellen.

Q

3.2 Een groeimodel

Zonder theorie is experimenteel onderzoek niet mogelijk. Blind verzamelen van data kan nooit antwoord geven op de vragen die worden gesteld.

Het kan nuttig zijn om een model te maken. Een model is een vereenvoudigde voorstelling van de werkelijkheid.

Het model en het experiment moeten antwoorden geven op twee belangrijke vragen: hoe snel groeien algen en van welke factoren hangt de groeisnelheid af?

Om antwoord op die vragen te vinden zijn verschillende werkwijzen mogelijk.

We zouden natuurlijk ervaringsdeskundigen kunnen raadplegen. Boeren weten in het algemeen vrij goed hoe snel gewassen groeien en in welke tijd van het jaar.

Maar algenboeren zijn er niet veel. Bovendien zijn er zoveel factoren die invloed hebben op de groeisnelheid dat het heel moeilijk is om al die ervaringen zo in kaart te brengen dat een leek voorspellingen zou kunnen doen over de algenopbrengst bij een gegeven productiecapaciteit.

3.3 Exponentiële groei

Algen zijn eencellige plantjes. Het plantje kan zich onder gunstige omstandigheden binnen een etmaal (met 8-16 uur licht) ongeslachtelijk vermenigvuldigen. Hoe meer plantjes er zijn, hoe meer er bij komen. Dat is het recept voor een verschijnsel dat bekend staat als exponentiële groei.

Noemen we het aantal algen N dan komt er in een periode Δt een aantal algen ΔN bij.

Voor berekeningen is het lastig dat N toeneemt in de periode Δt . Daarom wordt de periode zo klein genomen dat N (en ook de andere grootheden die invloed hebben op de toename) niet merkbaar veranderen. In dat geval spreken we van een toename dN in een periode dt .

Die toename dN hangt dus af van de omvang (N) van de populatie, de lengte van de periode (dt) en verder van alle factoren waar de groei van algen van af hangt.

Er geldt:

$dN \sim dt$ (Hoe meer tijd, hoe meer algen er bij)

$dN \sim N$ (2x zoveel algen, dan ook 2x zoveel nakomelingen)

dus: $dN = c \cdot N \cdot dt$

Hierin is de evenredigheidsfactor c een constante die iets zegt over de groeisnelheid. Deze groeifactor hangt af van temperatuur, voedingsstoffen en etc., maar niet van de omvang van de populatie (N) of de duur van de periode (dt). De groeifactor is dus echt een constante die iets zegt over de algen.

Om een idee te krijgen van de grootte van c kun je bijvoorbeeld de vraag stellen: Na hoeveel tijd zou de populatie met 10% zijn toegenomen? Neem eens aan dat dat 2 uur is.

Invullen leert dan dat c in dat geval gelijk moet zijn aan 0,05 (de eenheid van c is uur^{-1})

Met deze regel hebben we een recept om de groei van een populatie te modeleren. Dit kan met behulp van coach of Excel.

Kies een startwaarde van t , meestal:

Kies een startwaarde van N

Kies een tijdstap

Kies een factor c :

t wordt 0 of $t := 0$

bijvoorbeeld $N := 100$

bijvoorbeeld $dt := 2$ (uur)

Stel $c := 0,05$ (uur^{-1})

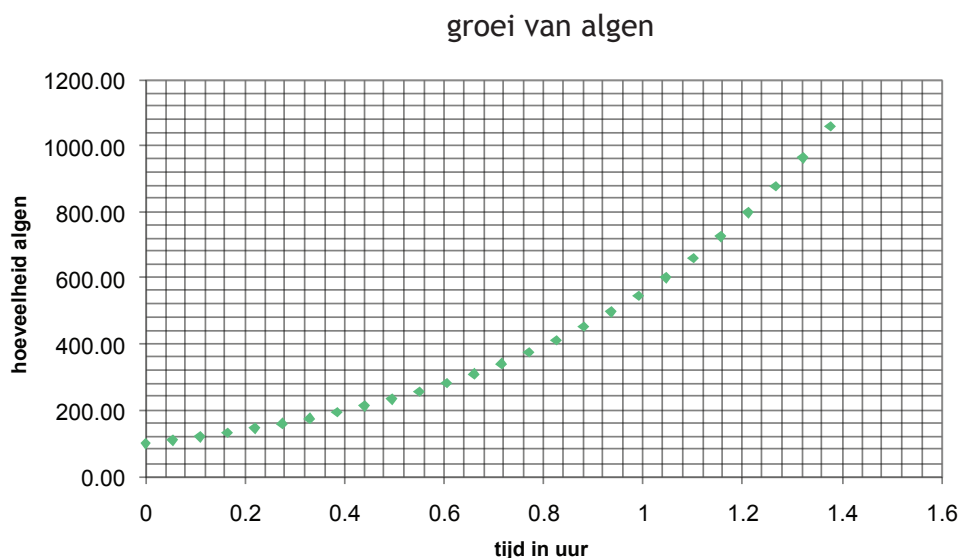
Nu start het berekenen

Stap 1:	Bereken nu dN	$dN = 0,05 \cdot 100 \cdot 2 = 10$
Stap 2:	Bereken de nieuwe waarde van N	$N := N + dN = 100 + 10 = 110$
Stap 3:	Bereken de nieuwe waarde van t	$t := t + dt = 0 + 2 = 2 \text{ uur}$
Stap 4:	Ga weer naar stap 1	
Etc.		

Bovenstaande procedure biedt de mogelijkheid het groeiproces te simuleren. Met Excel is het mogelijk om simulatiemodellen te maken. Daarbij is ook een grafiek te maken van N tegen t. Hieronder is een plaatje van een Excelbestand weergegeven. De getoonde waarden zijn berekend op de wijze zoals boven geschetst. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de mogelijkheid die Excel biedt om de inhoud van een bepaalde cel te berekenen met de inhoud van een andere cel. In een cel wordt de waarde van de groeifactor c gestopt en die wordt dan gebruikt om de waarde van N te berekenen op een bepaald tijdstip. Op de volgende pagina staat een voorbeeld.

t	N	dN
0	100,00	9,90
0,055	109,90	10,88
0,11	120,78	11,96
0,165	132,74	13,14
0,22	145,88	14,44
0,275	160,32	15,87
0,33	176,19	17,44
0,385	193,63	19,17
0,44	212,80	21,07
0,495	233,87	23,15
0,55	257,03	25,45
0,605	282,47	27,96
0,66	310,44	30,73
0,715	341,17	33,78
0,77	374,95	37,12
0,825	412,06	40,79
0,88	452,86	44,83
0,935	497,69	49,27
0,99	546,96	54,15
1,045	601,11	59,51
1,1	660,62	65,40
1,155	726,02	71,88
1,21	797,90	78,99
1,265	876,89	86,81
1,32	963,71	95,41
1,375	1059,11	104,85

dt =	1,8
c =	0,055



Afbeelding 8: in Excel kan de inhoud van een cel worden berekend met de inhoud van een andere cel. Bij stap 1 in de figuur hierboven is de inhoud van cel C2 berekend met: $C2 = F\$2 \cdot B2 \cdot F\1 . Door de cel C2 te kopiëren naar C3 ontstaat daar $C3 = F\$2 \cdot B3 \cdot F\1 . De dollartekens zorgen ervoor dat bij kopiëren hier naar de cellen wordt verwezen waar de waarde voor dt en c staan. Die blijven namelijk constant.

Het voordeel van het werken met dit soort modellen is dat je door middel van “trial and error” de waarde van c kunt vinden die past bij de ervaringsgegevens. Stel bijvoorbeeld dat binnen 12 uur de populatie verdubbelt. Bij $c = 0,055$ vinden we een verdubbelingstijd van rond de 14 uur. Dus c moet waarschijnlijk iets groter zijn.

3.4 Logistische groei

Exponentiële groei kan niet voortduren. Op zeker moment zit de batchreactor zo vol dat de algen in het midden van de reactor geen licht meer krijgen. Dan sterven ze af.

Om deze situatie te kunnen beschrijven moet het model worden aangepast.

N zal naderen tot een zekere maximale waarde. Deze noemen we E. De waarde van E wordt bepaald door de afmetingen van de reactor.

Een model dat aan deze eis voldoet is het zogenaamde logistische model:

$$dN = c \cdot N \cdot (1 - N/E) \cdot dt \quad (2)$$

Als N veel kleiner is dan E is er nog sprake van onbegrensde groei. Het getal N/E is dan veel kleiner dan 1 en dus verwaarloosbaar: Vergelijking (2) gaat over in vergelijking (1). Als N echter in de buurt van E komt, wordt het getal tussen de haakjes erg klein en gaat naar 0 toe. Dan geldt dus $dN = 0$ en dat betekent geen groei meer.

Het model in Excel is heel eenvoudig te veranderen met een kleine aanpassing. Eerst weer even de werkstappen:

Startwaarden:

t:=0
dt:=5
c:=0,055
E:=1000

Herhaal:
dN:= c*N*(1-N/E)*dt
N:=N+dN
t:=t+dt

Inderdaad gaat de groei er nu uit. Ook dit model is weer met behulp van ‘trial en error’ uit te proberen.

De groeisnelheid van de algen kan dus worden bepaald met behulp van een getal: c. Door nu te kijken hoe c afhangt van omgevingsfactoren als lighthoeveelheid, temperatuur, CO₂-concentratie in het water etc., kan de invloed van deze factoren op de groeisnelheid in kaart worden gebracht.

Behalve met Excel kun je ook modellen maken met een grafische modelleromgeving van bijvoorbeeld Coach. Dan zal je wel eerst enige oefening moeten opdoen.

19. Opdracht

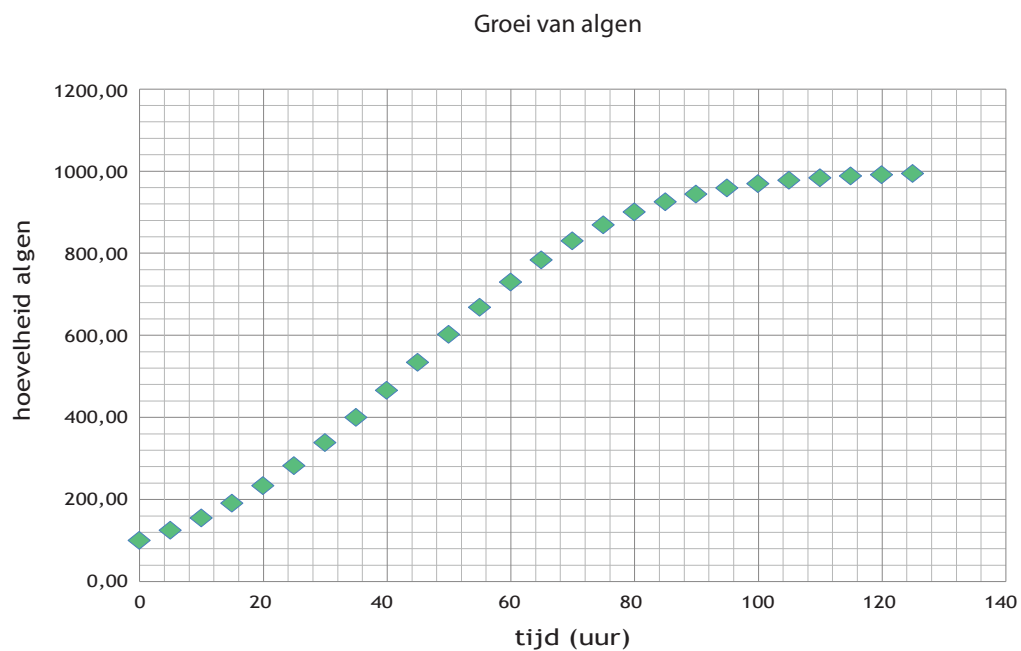
In deze opdracht ga je met Excel groeimodellen maken.

- Maak m.b.v. Excel een exponentieel groeimodel. Druk de tijd uit in uur. Kies 100 voor de beginhoeveelheid alg. Ga met behulp van trial en error na wat de groeifactor moet zijn om een verdubbelingstijd van 4,0 uur te krijgen.
- Pas het gevonden model aan en maak er een logistisch model van. Neem voor het maximum $E = 1000000$. Bepaal met behulp van de uitkomsten op welk moment de algenhoeveelheid het snelste toeneemt.



t	N	dN
0	100,00	24,75
5	124,75	30,03
10	154,78	35,98
15	190,75	42,45
20	233,20	49,18
25	282,38	55,73
30	338,10	61,54
35	399,65	65,98
40	465,63	68,43
45	534,05	68,43
50	602,48	65,86
55	668,35	60,96
60	729,30	54,29
65	783,59	46,63
70	830,23	38,76
75	868,99	31,31
80	900,30	24,68
85	924,98	19,08
90	944,06	14,52
95	958,59	10,92
100	969,50	8,13
105	977,63	6,01
110	983,65	4,42
115	988,07	3,24
120	991,31	2,37
125	993,68	1,73

c =	0,055
dt =	5
E =	1000



Afbeelding 9: Het logistische model. Als N in de buurt komt van $E = 1000$ gaat de groei er uit. Voor kleine waarden van N is er sprake van ongeremde groei

4 Experiment: de bioreactor

Je gaat algen kweken met als doel de groei van de algen in een batchreactor of in een continuë reactor te onderzoeken. Het zal hier gaan om een groot experiment dat een periode van meerdere dagen gaat beslaan. Dergelijke experimenten verlopen in verschillende fasen waarbij elke fase gekenmerkt wordt door een bepaalde output.

Deze vier fasen zijn:

- **Theoretische voorbereiding:** wat ga je onderzoeken en hoe? Hoe gaat het experiment er uit zien? Wat wordt de planning?
- **Proefopzet:** Hier vindt de opbouw van de opstelling plaats. Ook wordt het experiment voorbereid. Er worden ook afspraken gemaakt voor het onderzoeksteam.
- **Uitvoering:** Je start het experiment, voert de metingen uit en ruimt na afloop van het experiment alles op. De output bestaat uit tabellen met meetresultaten
- **Verslaglegging:** Je verwerkt de meetresultaten. Van de meetgegevens worden grafieken gemaakt. Er worden berekeningen uitgevoerd, conclusies getrokken en het experiment wordt geëvalueerd: wat ging goed, wat ging fout. Het verslag wordt gemaakt. Eventueel wordt er een wetenschappelijk artikel geschreven.

Theoretische voorbereiding

De theoretische voorbereiding is voor een goed experiment van groot belang. Al je handelingen verricht je om iets te weten te komen. Als het je niet duidelijk is wat je wilt weten, kan het je ook niet duidelijk zijn wat je aan het doen bent. De theoretische voorbereiding verloopt in een aantal stappen:

- Je kiest je onderzoeksvraag, d.w.z. je stelt vast van welke variabele je de invloed op de fotosynthese wilt onderzoeken en wat de controlevariabelen zijn. (Dit zijn de variabelen die tijdens de proef constant moeten worden gehouden.) Als voorbeeld stellen we de onderzoeksvraag: hoe hangt de fotosynthese af van de intensiteit van het opvallende licht? Je laat plantjes groeien onder omstandigheden waarbij een factor varieert. Je hebt dus meerdere bakjes nodig.
- Je stelt een hypothese of verwachting op, bijvoorbeeld: hoe meer licht, hoe sneller de groei. Maar op een gegeven moment zal meer licht geen invloed meer hebben. Andere factoren gaan dan als bottle-neck functioneren. Dit is de wet van de afnemende meeropbrengsten. Maar misschien kan heel veel licht zelfs schadelijk zijn. In dat geval is er niet alleen sprake van afnemende meeropbrengsten maar gewoon van afnemende opbrengsten. Belangrijker dan de hypothese op zich is het feit dat je van tevoren bezig bent met de vraag wat jouw experiment waarschijnlijk gaat opleveren. Hoe ga je de metingen straks verwerken om tot conclusies te komen? Daarbij hoort doorgaans een schets van de grafiek die het te onderzoeken verband weergeeft met een toelichting.
- Je gaat bepalen hoe je de verschillende variabelen gaat meten. Je hebt te maken met drie soorten variabelen:
 - De te onderzoeken variabele: in dit geval de fotosynthese. Hoe meet je of er een sterke fotosynthese plaats vindt of niet? Deze variabele kun je niet rechtstreeks waarnemen. Het is mogelijk te kijken naar de hoeveelheid biomassa die ontstaat door mbv een telkamer de algen te tellen in proefmonsters die regelmatig genomen worden. Of je meet niet het product zelf maar het bijproduct: de hoeveelheid geproduceerde zuurstof. Je kunt ook de transmissie van het licht door de algen meten: hoe meer algen, hoe moeilijker het licht er door komt.
 - De instrumentele variabele: van welke variabele wil je de invloed op de synthese onderzoeken? In dit geval is dat de intensiteit van het opvallende licht. Maar hoe meet je die en met welk instrument? Een mogelijkheid is bijvoorbeeld dat je met een lichtsensor de lichtintensiteit van het licht meet voordat het de reactor in gaat. Je zou diezelfde sensor kunnen gebruiken om de lichtintensiteit te meten nadat het licht door de reactor is gegaan. Je meet dan met een instrument.
 - De controlevariabelen: je onderzoekt de invloed van het licht. Maar dat betekent dat andere variabelen zoals temperatuur, zuurgraad, etc. constant moeten worden gehouden. Je moet dus eerst een lijstje maken van overige factoren die invloed hebben op de fotosynthese.

Vervolgens ga je na of die factoren tijdens de proef wel eens zouden kunnen gaan veranderen. Tenslotte moet je per factor nagaan wat je kunt doen om die verandering tegen te gaan. Temperatuur is hier een goed voorbeeld. Een experiment dat zich over langere tijd uitstrekt krijgt te maken met de temperatuurwisselingen van dag en nacht. Wil je die invloeden uitsluiten dan is een waterbad nodig dat functioneert als warmtebuffer.

- Je maakt een schets van de opstelling en een lijst van benodigdheden. Soms moet er echt iets gemaakt worden. In dat geval is een nauwkeurige bouwtekening nodig waarvoor gestandaardiseerde voorschriften bestaan.
- Planning: Je moet een globale planning maken waarin wordt aangegeven wanneer het experiment wordt opgezet, wanneer het experiment wordt uitgevoerd, wanneer de verslaglegging plaats vindt. Als er sprake is van een onderzoeksteam moeten taken verdeeld worden.

Proefopzet

Dit is waarschijnlijk het moeilijkste gedeelte van een experiment. Je moet nu het experiment gaan opbouwen aan de hand van de tekening van de opstelling.

Het is verstandig al in een vroeg stadium na te denken over veiligheid. Sommige onveilige situaties zijn van te voren voorspelbaar en daarmee houd je rekening bij de bouw van de opstelling.

Dan ga je proefdraaien. Groeien de algen echt? Is er inderdaad sprake van invloed van de lichtintensiteit?

Als de opstelling eenmaal draait moet nogmaals worden nagedacht over de veiligheid van de opstelling. Het is tenslotte de bedoeling dat de opstelling ook 's nachts blijft draaien.

Dan ga je nadenken over de metingen.

Soms moeten de meetinstrumenten geijkt worden.

Stel dat je bijvoorbeeld de lichttransmissie door de algen wilt gebruiken als maat voor de hoeveelheid algen.

Je hebt dan een ijkking nodig. Je neemt een reageerbuis of een ander klein transparant vat. Je doet daarin een hoeveelheid medium zonder algen. Je zet de reageerbuis voor de lichtbron en meet de intensiteit van het licht voor en achter de reageerbuis. Dit levert de transmissie op: het gedeelte van het licht dat niet is geabsorbeerd. Dit wordt vervolgens herhaald met een hoeveelheid medium met algen. Vervolgens wordt met een telkamer de algendichtheid bepaald. Dit wordt herhaald voor verschillende algendichtheden. Het resultaat is een ijkgrafiek waarin de algendichtheid is uitgezet tegen de transmissie. Als je later opnieuw een transmissie meet van een proefmonster kun je met je ijkgrafiek nagaan wat de algendichtheid van het proefmonster was.

Als de opstelling werkt en alle meetinstrumenten functioneren kunnen de meetrapporten worden

voorbereid. Deze rapporten bevatten tabellen met kolommen waarin de meetwaarden worden vermeld.

Ook moeten daarop relevante meetwaarden van controlevariabelen worden vermeld. Dit is nodig omdat het experiment moet kunnen worden gereproduceerd.

Uitvoering van het experiment

Voldoende voorbereiding zal er toe leiden dat dit onderdeel zonder verrassingen zal verlopen. Routine moet al zijn opgedaan tijdens het proefdraaien. Een meetreeks moet worden binnengehaald zonder dat er duidelijke veranderingen in de omstandigheden plaatsvinden. Mochten dergelijke verstoringen toch plaatsvinden (de elektriciteit valt tien minuten uit) en men besluit toch door te gaan met het experiment dan moeten aantekeningen van dit voorval worden gemaakt in het meetrapport.

Verslaglegging

Bij de verslaglegging moeten de metingen worden verwerkt om de benodigde conclusies te kunnen trekken. Zeer vaak moeten meetwaarden worden weergegeven in grafieken om tot zinvolle conclusies te kunnen komen. De wijze van verwerking moet al duidelijk zijn geworden tijdens de voorbereidingsfase.

Een wetenschappelijk artikel heeft altijd een duidelijke opbouw:

- **Samenvatting:** Een weergave van de onderzoeksvraag, de verwachtingen die men had en een samenvatting van de conclusies uit het experiment en een vaststelling van de waarde van dit onderzoek.
- **Inleiding:** een vraagstelling wordt opgeworpen en er wordt aandacht besteed aan de theoretische achtergronden en eerder onderzoek rond deze vraagstelling.
- **Doel van het onderzoek:** hierin wordt een onderzoeksvraag geformuleerd.

- **Methode, theorie en opstelling:** een schets van de opstelling wordt gepresenteerd, ingegaan wordt op de wijze waarop relevante variabelen worden gemeten. Verwachtingen/hypothesen met betrekking tot het te onderzoeken verband worden gepresenteerd samen met de theoretische onderbouwing. Problemen die van tevoren kunnen worden gesignaleerd worden beschreven.
- **Conclusies en evaluatie :** Bij de conclusies wordt antwoord gegeven op de onderzoeksvraag. noodzakelijke berekeningen aan de hand van de meetresultaten worden toegevoegd. Bij de evaluatie wordt nagegaan hoe betrouwbaar de conclusies zijn die getrokken zijn uit de meetresultaten. Verder worden er suggesties gedaan voor verder onderzoek.



Deel B

Biobrandstof



5 Fotosynthese: de productie van organische stoffen

Biobrandstoffen kunnen worden gemaakt uit organische stoffen. Ook mensen, dieren en planten komen aan de benodigde energie door chemische energie uit organische stoffen vrij te maken. Jij krijgt bijvoorbeeld energie binnen als je suiker eet die van suikerbieten afkomstig is, zetmeel van aardappelen, of olie van zonnebloemen.

De opbouw van die organische stoffen met chemische energie start altijd bij een plantaardig organisme. Maar hoe is een plantaardig organisme in staat deze hoog energetische verbindingen te maken, waaruit wij weer energie voor voedsel en brandstoffen halen?

Al deze energie is afkomstig van de zon. Planten zijn in staat om energie uit zonlicht op te vangen en nuttig te gebruiken. Ze gebruiken de energie voor chemische reacties. Planten kunnen zo organische stoffen maken, de grotere moleculen om van te leven en te groeien. Dit proces wordt **fotosynthese** genoemd. 'Foto' geeft aan dat het proces met licht te maken heeft en 'synthese' geeft aan dat er moleculen gemaakt worden. Niet alleen de planten zelf, maar alle andere organismen gebruiken deze stoffen als bouwstof en brandstof. Omdat de fotosynthese zo belangrijk is, gaan we daar in dit hoofdstuk uitgebreid op in.

In de onderbouw heb je bij biologie al geleerd wat fotosynthese is: groene planten maken, met behulp van zonlicht, glucose en zuurstof. Ze gebruiken daarvoor, naast water, koolstofdioxide, CO₂. Fotosynthese wordt ook beschreven als het vastleggen van CO₂ in koolwaterstoffen of koolstoffixatie (ook wel: koolstofassimilatie). Daarom kon je ook CO₂-uitstoot van de vliegreis compenseren door bomen te laten groeien.

20. Opdracht

Bekijk de aflevering 'Boom' en daarna de aflevering 'Fotosynthese' op de klokhuisite: ► [URL5](#)
of bekijk fotosynthese op: ► [URL6](#)

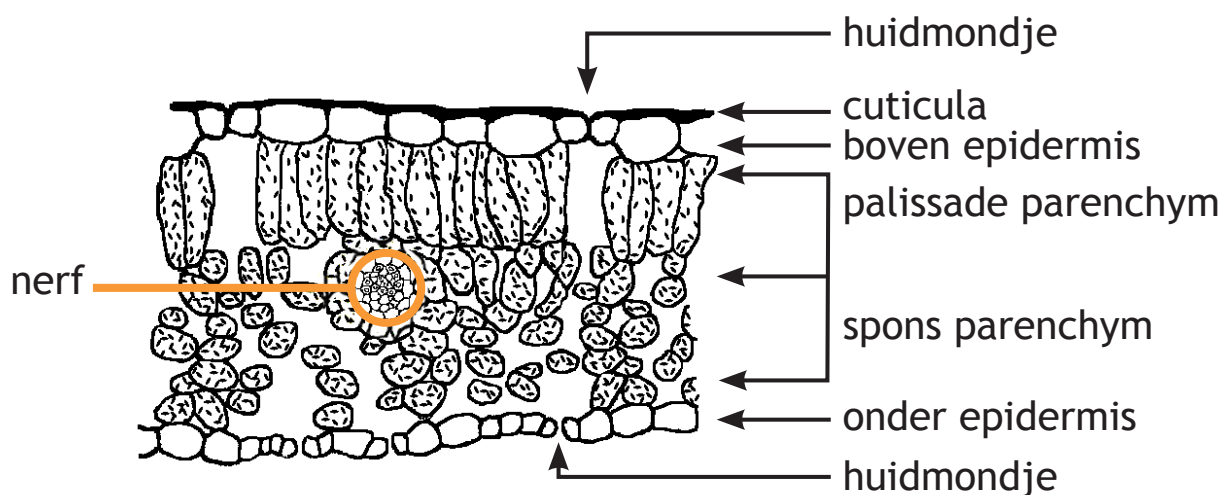
Q

5.1 Het blad

Voor het fotosynthese proces zijn de bladeren van planten van groot belang. Aan een plant groeien bladeren om een zo groot mogelijk oppervlak te creëren waar zonlicht op kan vallen. Bladeren hebben over het algemeen een structuur zoals is weergegeven in afbeelding 11. (zie ook BINAS tabel 91A). Het blad wordt aan beide kanten beschermd door een waslaag, de cuticula, gevolgd door een laag van epidermis (opperhuid) cellen. Binnen in het blad zitten aan de bovenkant cellen dicht opeen gepakt: palissadenparenchym, met daaronder het losse sponsparenchym. Het palissadenparenchym dat aan de zonzijde van het blad zit, bevat heel veel bladgroenkorrels en hier vindt veel fotosynthese plaats. In het sponsparenchym zitten minder bladgroenkorrels. De cellen van het sponsparenchym hebben dunnere celwanden en er is veel ruimte tussen de cellen. Dat maakt dat hier gemakkelijk gassen getransporteerd kunnen worden. Denk hierbij aan gassen als zuurstof en koolstofdioxide, maar ook waterdamp. Water en verschillende opgeloste stoffen worden aan- en afgevoerd via de vaten in de bladnerven.



Afbeelding 10: een huidmondje omgeven door de sluitcellen (die twee 'opgeblazen' cellen). De afbeelding is gemaakt met een elektronenmicroscop. (Bron: Wikipedia)



Afbeelding 11: de opbouw van een blad. De verschillende typen cellen zijn in de figuur aangegeven.

Aan de onderkant van het blad zitten openingen. Deze openingen worden **huidmondjes** genoemd. Stoma (enkelvoud) of stomata (meervoud) zijn de wetenschappelijke namen voor huidmondjes. Deze huidmondjes zijn van groot belang voor de fotosynthese omdat deze openingen in het blad gastransport van en naar het blad mogelijk maken. De huidmondjes worden omgeven door zogenaamde sluitcellen die het mogelijk maken om de huidmondjes te openen of te sluiten, zie afbeelding 10. Later in het hoofdstuk wordt er nog verder ingegaan op de belangrijke rol van huidmondjes.

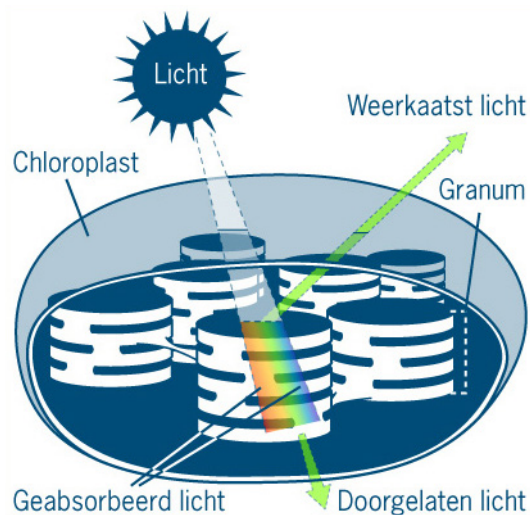
5.2 Plantencellen

Een plant is opgebouwd uit verschillende gespecialiseerde cellen. Toch hebben veel van die cellen grote overeenkomsten. Een typische plantencel is schematisch afgebeeld in afbeelding 13. Te zien zijn de verschillende organellen waaruit een plantencel opgebouwd is. Deze zijn in de figuur aangegeven. De fotosynthese vindt plaats in de bladgroenkorrels (chloroplasten).

Chloroplasten

Een chloroplast heeft de vorm van een afgeronde schijf en wordt omgeven door (minstens) twee membranen, afbeelding 12. Deze hoeveelheid membranen is te verklaren vanuit de endosymbiose theorie (zie informatieblok achtergrondinformatie: endosymbiose theorie).

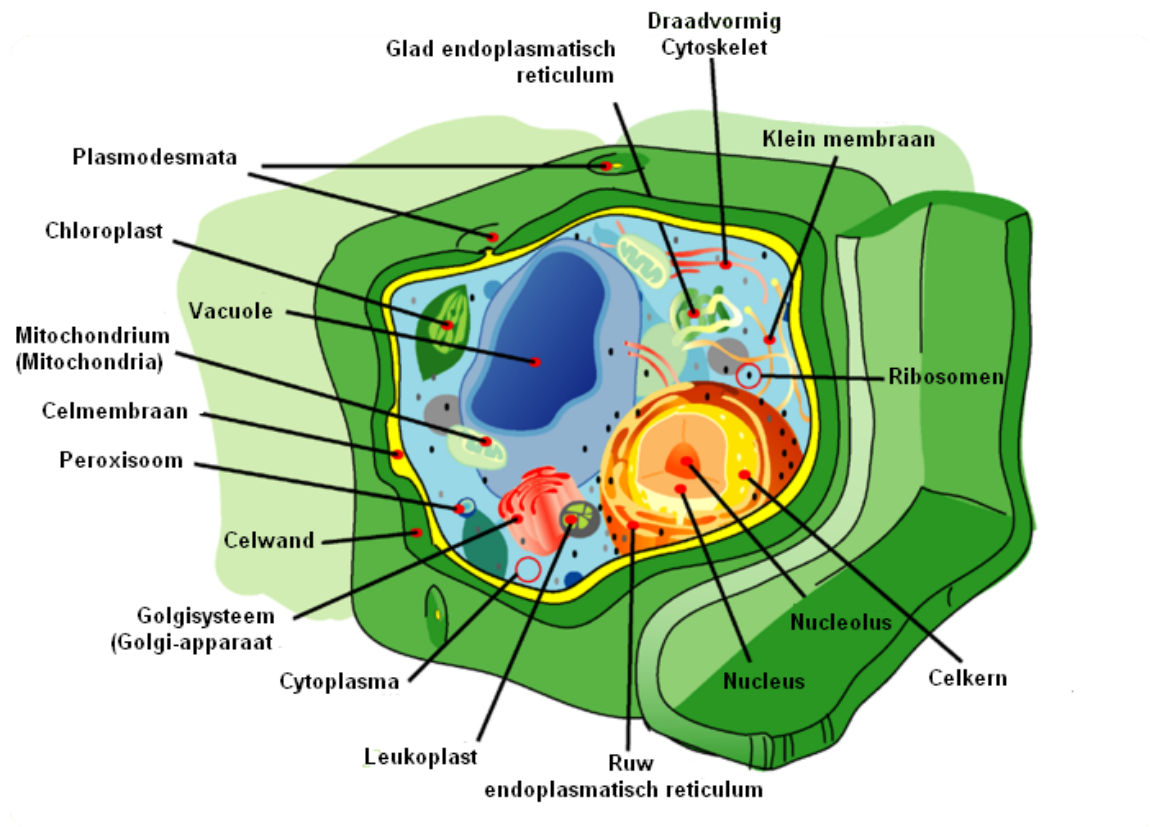
De ruimte binnen de binnenste membraan van de chloroplast wordt stroma genoemd. Hier bevinden zich heel veel eiwitten, het stroma is daardoor een geleachtige substantie. In het stroma liggen aparte compartimenten: de thylakoïden. Deze thylakoïden zijn meestal als vrij platte schijven op elkaar gestapeld. Eén zo'n stapel wordt granum genoemd (meervoud: grana). Overigens wordt gedacht dat de thylakoïden één geheel vormen, maar dat is moeilijk te zien.



Afbeelding 12: schematische weergave van een chloroplast (links) en een opname gemaakt met een elektronenmicroscop (rechts)

De thylakoïdmembranen bevatten de ingewikkelde fotosystemen waar we later dieper op ingaan. De ruimte binnenin de thylakoïdmembranen wordt lumen genoemd. Dat er op deze manier verschillende compartimenten ontstaan (stroma en lumen), met daartussen het thylakoïdmembraan, is essentieel voor het fotosyntheseproces. Ook dit zal later duidelijk worden. Voor we verder ingaan op de fotosynthese is het van belang te begrijpen wat licht is en hoe de energie in licht verpakt is. Dit komt aan bod in §5.3 en §5.4.

Plantencel structuur



Afbeelding 13: schematische weergave van een plantencel (Bron: Wikipedia)

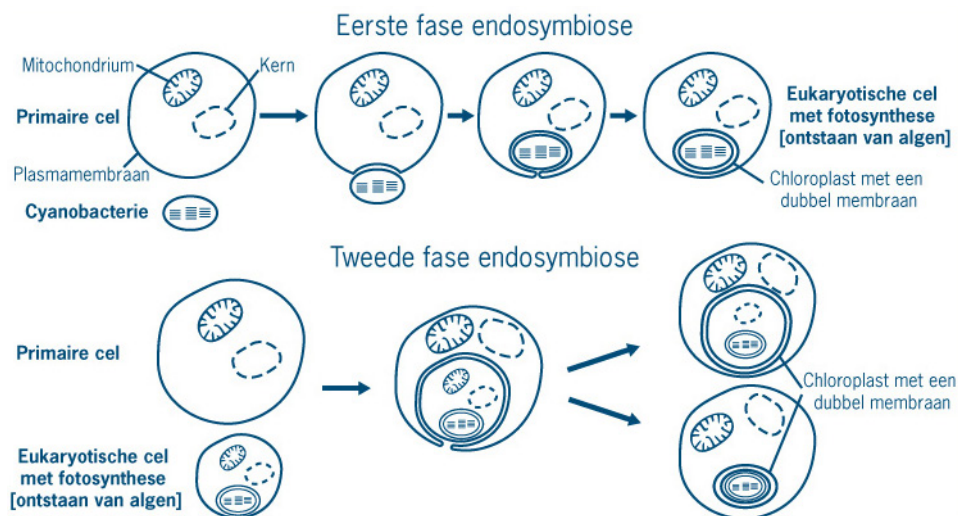
Achtergrondinformatie: endosymbiose theorie

(endo = erinnen, symbiose = samenleven)

Chloroplasten zouden zijn ontstaan doordat vroeg in de evolutie een bacterie die aan fotosynthese deed (een cyanobacterie), is opgenomen in een eencellige eukaryoot (eukaryoot = met een echte kern). Dit proces is schematisch weergegeven in afbeelding 14. De cyanobacterie kon door fotosynthese nuttige stofwisselingsproducten leveren aan de eukaryoot, en omgekeerd zal de eukaryoot nuttige stoffen aan de cyanobacterie hebben geleverd. Beide organismen konden profiteren. In de loop van de evolutie is de bacterie steeds minder zelfstandig geworden, en steeds meer een gewoon organel, onder bestuur van de celkern.

Een aanwijzing voor endosymbiose is dat er in een chloroplast nog apart DNA aanwezig is, dat kenmerken heeft van bacterie-DNA: het is een cirkelvormig, gesloten molecuul. Ook is er nog een systeem voor eiwitsynthese in de chloroplast, dat meer lijkt op een bacterieel dan op een eukaryoten-systeem. Overigens wordt een groot deel van de eiwitten van de chloroplast genen in de celkern gebruikt, en het eiwit-synthese systeem in het cytoplasma. In de loop van de evolutie zijn veel genen blijikbaar 'verhuisd' naar de kern, en dubbel aanwezige genen verdwenen.

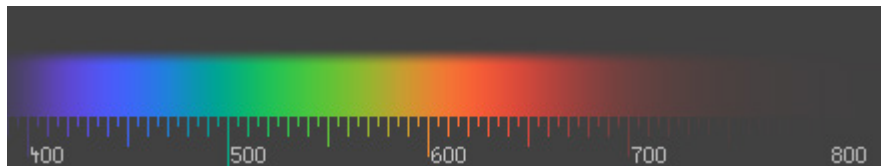
Een andere aanwijzing is de dubbele membraan om de chloroplast. De binnenste is de oorspronkelijke bacterie-membraan, de buitenste de celmembraan van de eukaryoot (zie afbeelding 12). Op dezelfde manier zouden mitochondriën ontstaan zijn door endosymbiose van een aerobe (zuurstof-verbruikende) bacterie en een eukaryoot. Zie ook BINAS tabel 79^D



Afbeelding 14: primaire en secundaire endosymbiose

5.3 Lichtenergie

Een deel van de energie van de zon bereikt de aarde in de vorm van licht. Christiaan Huygens beschreef in 1690 licht als een golfverschijnsel. Isaac Newton schreef in 1704 juist dat de eigenschappen van licht zich beter laten verklaren als je licht als een stroom deeltjes (de zogenaamde **fotonen**) ziet. Na lange discussie bleek dat licht zowel een golfkarakter als een deeltjeskarakter heeft. De golflengte bepaalt de kleur: de golflengte van zichtbaar licht varieert van ongeveer 380 nanometer (violet) tot 750 nanometer (rood).

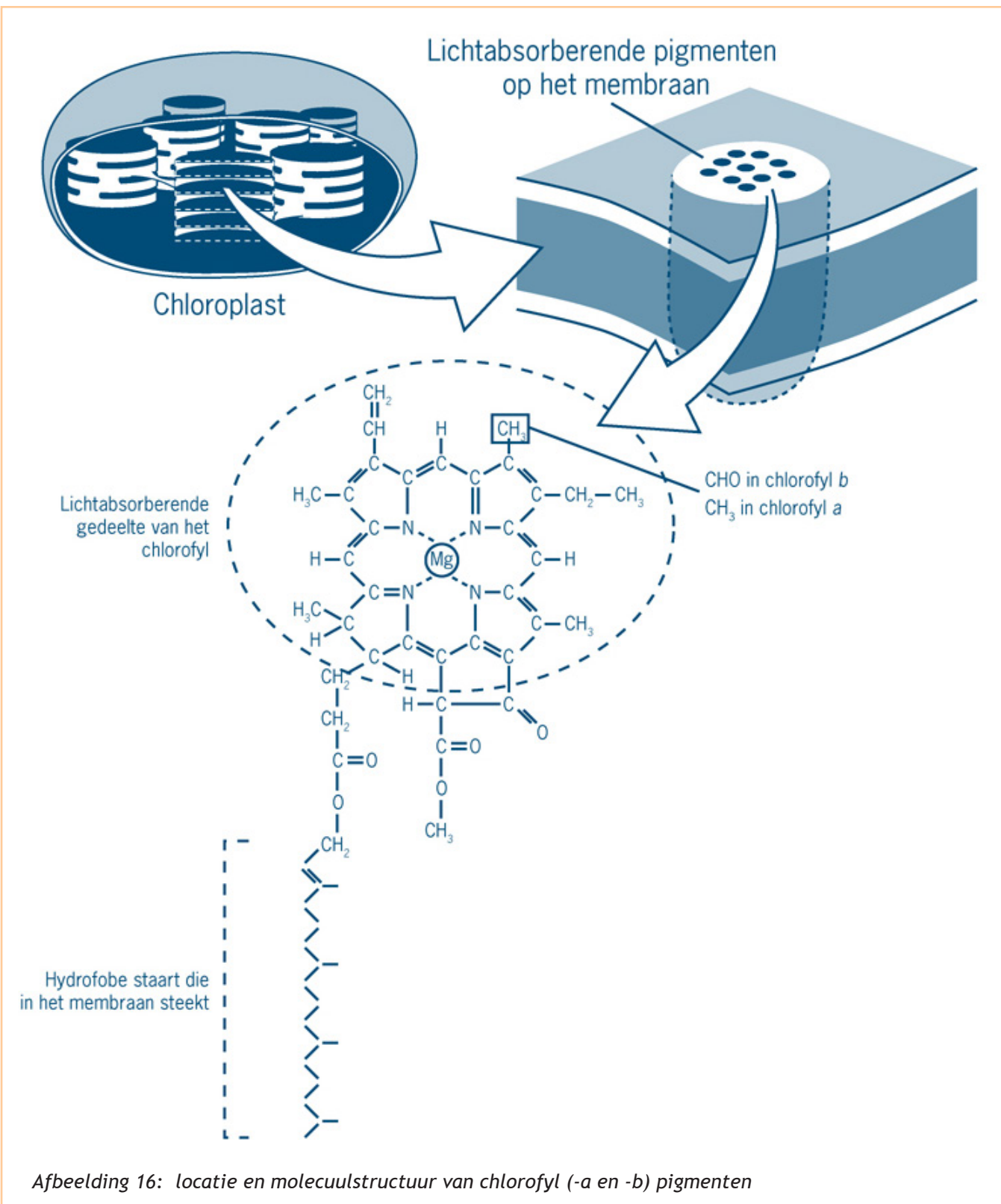


Afbeelding 15: het lichtspectrum. Zichtbaar licht heeft een golflengte van ongeveer 380-750 nanometer.

Licht maakt deel uit van het veel uitgebreidere elektromagnetische spectrum. Behalve zichtbaar licht zijn ook gammastraling, röntgenstraling, ultraviolet, infrarood, microgolven, en radiogolven voorbeelden van straling met elektromagnetische energie. Ze verschillen enorm in golflengte: van 10^{-14} m tot kilometers. Voor elektromagnetische straling geldt: hoe korter de golflengte, hoe hoger de energie-inhoud.

Om de energie van zonlicht te kunnen gebruiken, moet een plant het licht kunnen absorberen. Stoffen die licht absorberen noemt men **pigmenten**. Verschillende pigmenten absorberen licht met verschillende golflengten. De pigmenten in de bladgroenkorrels zijn chlorofyl a, chlorofyl b en carotenoiden. Deze pigmenten zitten vast in het thylakoïdmembraan.

Het spectrum van zonlicht bestaat uit licht van verschillende kleuren met verschillende golflengten. Dat bladeren groen zijn, betekent dat ze het meeste groene licht terugkaatsen en niet absorberen. In hoofdstuk 10.5 Proef: het scheiden van bladpigmenten met chromatografie is een proef beschreven waarmee je kunt aantonen welke pigmenten in een groen blad aanwezig zijn.



21. Chlorofyl

Bekijk BINAS tabel 67 I.

- Op welk molecuul lijkt chlorofyl?
- Wat zijn twee duidelijke verschillen?
- Wat zul je zien als een plant een tekort heeft aan magnesium?

Q

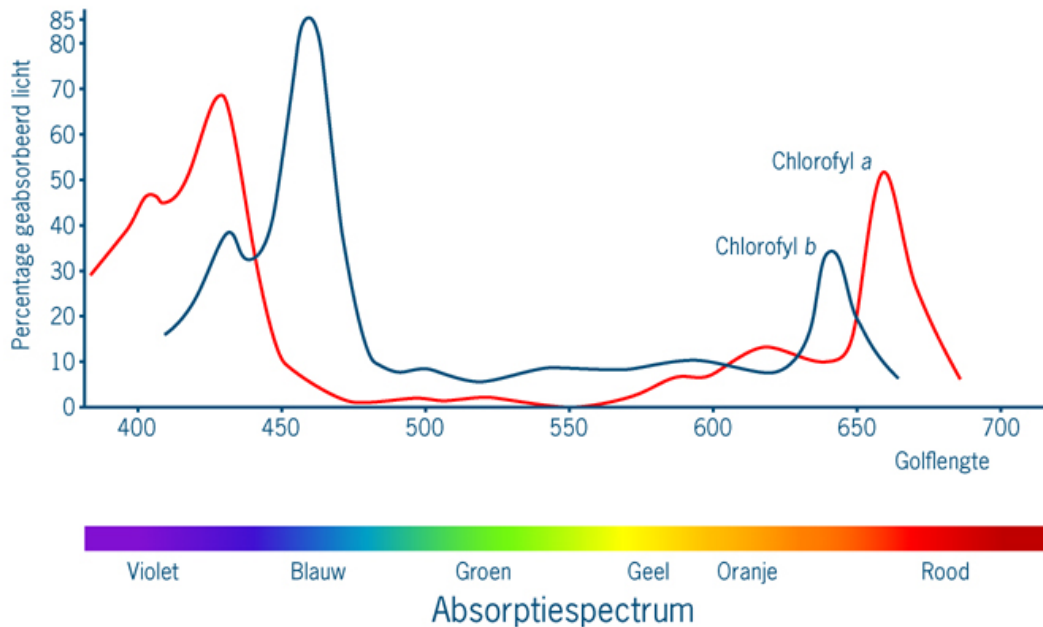
22. Golflengten

Zie afbeelding 17.

Welke golflengten worden vooral geabsorbeerd door:

- a. Chlorofyl-a
- b. Chlorofyl-b
- c. Carotenoiden

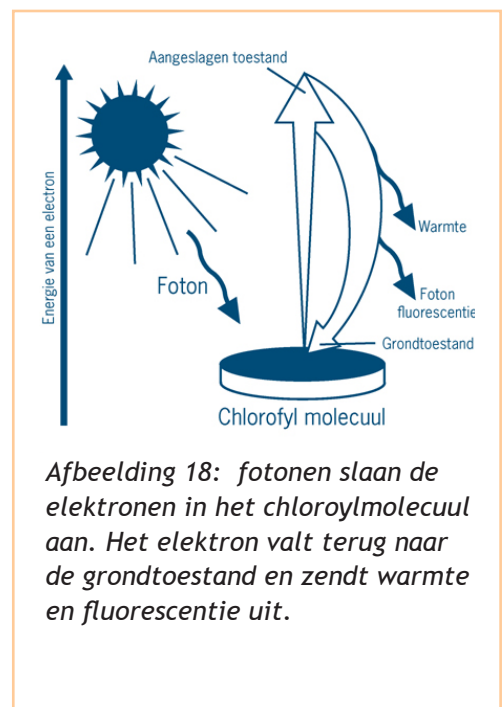
Q



Afbeelding 17: absorptiespectra van chlorofyl-a en chlorofyl-b

5.4 De verwerking van lichtenergie

Wat gebeurt er met licht als het wordt geabsorbeerd? Dat is makkelijker te begrijpen als je licht als fotonen ziet. Elk foton kan je zien als een pakketje energie. De fotonen van licht met een kortere golflengte bevatten meer energie per foton. Als een foton geabsorbeerd wordt, verdwijnt het licht, maar de energie niet. Die energie wordt overgedragen op het pigmentmolecuul en veroorzaakt daar een verandering. De verandering betreft een **elektron** uit het molecuul. Elektronen bewegen in een baan om de atoomkern. Als de elektronen in hun normale baan bewegen spreekt men van de **grondtoestand**. Door het absorberen van energie kan een elektron naar een energetisch hogere baan verhuizen, verder van de kern af. Dit noemt men de 'aangeslagen' toestand. Om dit mogelijk te maken moet een foton worden geabsorbeerd dat precies de juiste energiehoeveelheid meebrengt. De energie die een foton moet leveren om een elektron in een hogere baan te krijgen, is voor elk pigment verschillend. Omdat de energie van een foton afhangt van de golflengte absorberen verschillende pigmenten licht van verschillende golflengten. Fotonen afkomstig van het rode licht bevatten bijvoorbeeld minder energie dan fotonen van het blauwe licht.



Afbeelding 18: fotonen slaan de elektronen in het chloroylmolecuul aan. Het elektron valt terug naar de grondtoestand en zendt warmte en fluorescentie uit.

23. Vraag

Bekijk de structuur van chlorofyl in afbeelding 16. Welk verschil in molecuulstructuur bepaalt dat het absorptiespectrum van chlorofyl a en b verschilt?

Q

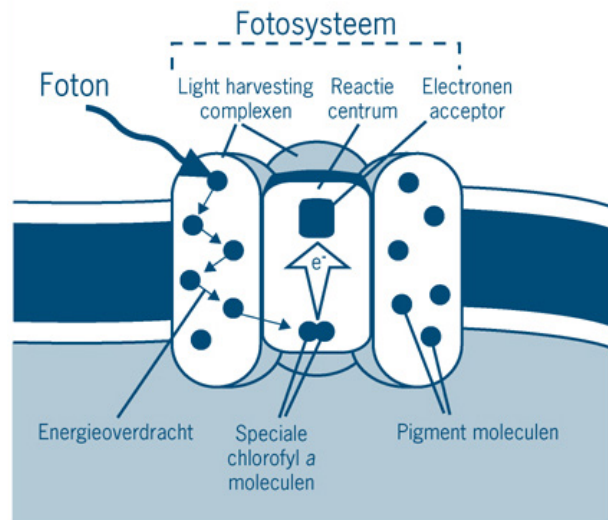
5.5 Fotosystemen

Een elektron in de aangeslagen toestand is niet stabiel. Gewoonlijk valt het binnen zeer korte tijd (10^{-8} seconde) weer terug in zijn normale baan of grondtoestand. Daarbij komt de energie weer vrij in de vorm van warmte en/of licht. Wanneer de energie als licht vrijkomt, heeft dit een lagere energie-inhoud, dus een langere golflengte. Dit noem je **fluorescentie**. Maar het produceren van warmte en het uitzenden van licht levert de plant niets op.

In de chloroplasten gaat het anders. De pigmenten zitten in ingewikkelde complexen, **fotosystemen** genoemd (zie afbeelding 19). De fotosystemen bevinden zich in de thylakoïdmembranen.

Een fotosysteem bestaat uit een paar honderd chlorofylmoleculen die gebonden zijn aan eiwitten. Ze omringen een reactiecentrum.

De chlorofylmoleculen met de eiwitten rond het reactiecentrum worden **antennecomplex** of 'light harvesting complex' genoemd (to harvest = oogsten). Chlorofylmoleculen in het antennecomplex absorberen licht en geven de energie door, van het ene molecuul aan het andere, totdat de energie aan het reactiecentrum kan worden doorgegeven. In het reactiecentrum bevinden zich twee speciale moleculen chlorofyl a. Als deze aangeslagen worden, begint de fotosynthese pas echt (zie afbeelding 20).



Afbeelding 19: een schematische voorstelling van het 'Light Harvesting Complex'. Het laat de weg zien die een elektron aflegt om naar het reactiecentrum te komen.

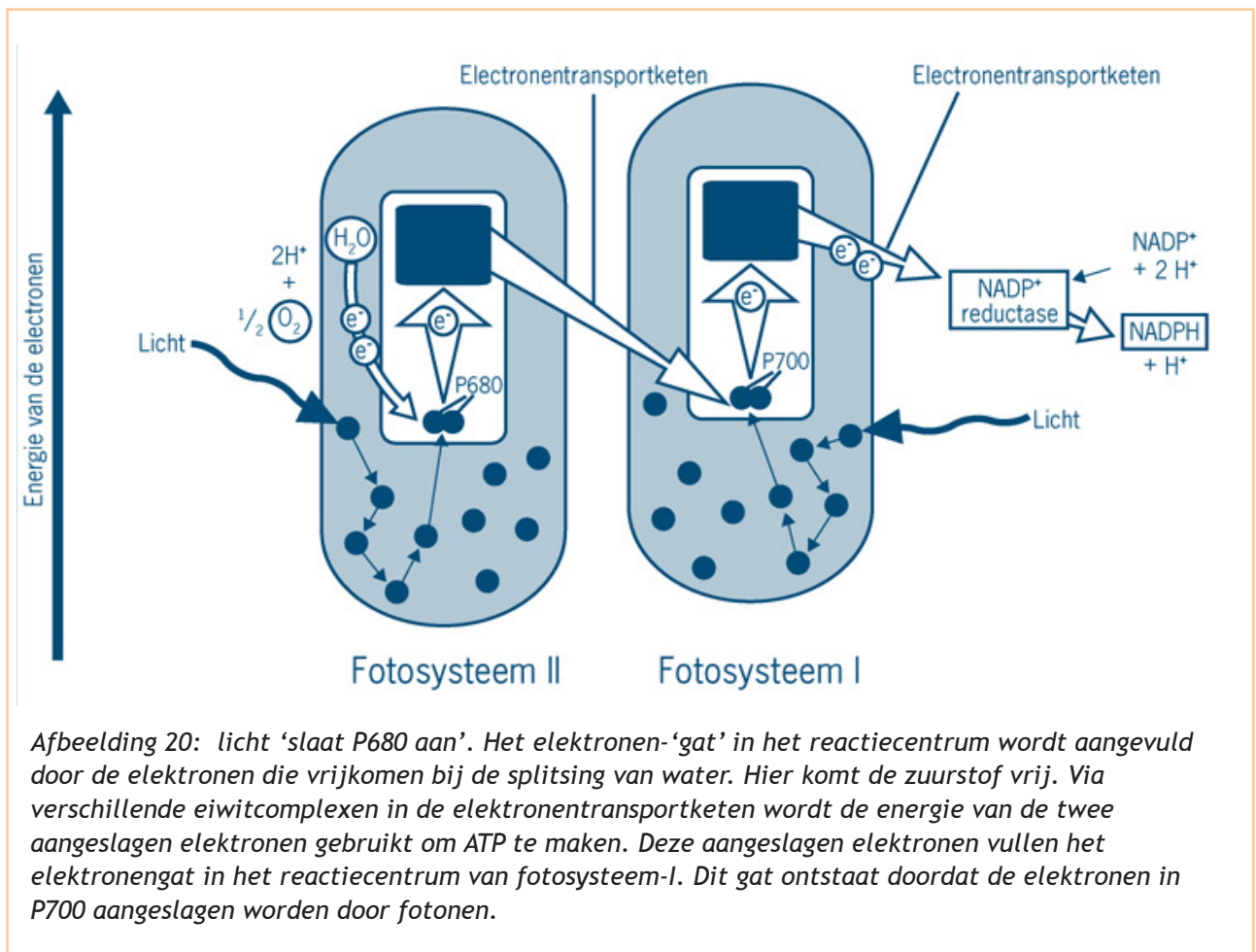
Achtergrondinformatie: toepassing 'fluorescentie verraadt oude sla'

Bij groente en bloemenbeurzen maken ze ook gebruik van fluorescentie, alleen dan voor kwaliteitscontrole. Een plant die aan het sterven is, zendt ander licht uit (fluoresceert anders) dan een gezonde plant. In de gezonde situatie worden de elektronen in het reactiecentrum goed doorgegeven, waarbij ze stapje voor stapje energie verliezen. Deze energie wordt omgezet in energierijke verbindingen die nodig zijn voor het maken van glucose. Op een zonnige dag worden er meer elektronen aangeslagen dan dat er kunnen worden doorgegeven in het reactiecentrum van een gezonde plant. Met een deel van de aangeslagen elektronen gebeurt dus niets en dit deel valt terug naar de 'grondtoestand', waarbij ze licht uitzenden. In een zieke plant loopt het reactiecentrum niet meer zo 'gesmeerd', de elektronen worden niet goed doorgegeven en een groot deel van de elektronen valt weer terug in zijn grondtoestand. Een zieke plant zendt dus meer licht uit dan een gezonde plant. En dit licht kun je meten met een fluorescentiemeter, ook wel PAM meters genoemd.

Een PAM-meter meet dit door een 'verzadigde puls' uit te zenden. Deze puls geeft een maximale hoeveelheid fotonen, waardoor alle reactiecentra in de bladgroenkorrels worden aangeslagen. Een deel valt terug en een deel gaat het reactiecentrum in, voor het maken van glucose. Het deel dat terugvalt, zendt licht uit en dit licht wordt weer gemeten door een PAM-meter. In een zieke plant is de hoeveelheid teruggezonden licht groter dan in een gezonde plant.

En zo kunnen ze op een bloemenbeurs meten hoe snel de rozen zullen verwelken.

Het opmerkelijke is dat dit 'invangen' van fotonen door antennecomplexen op twee plaatsen tegelijk gebeurt. Een plant heeft namelijk twee fotosystemen die net verschillend werken. Deze twee fotosystemen heten simpelweg fotosysteem I (PS I) en fotosysteem II (PS II). Deze nummering komt overigens niet overeen met de volgorde waarin ze werken: fotosysteem II is het eerst aan de beurt. (PS II werd later ontdekt, vandaar de naamgeving).



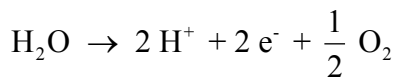
In het reactiecentrum van fotosysteem II zitten twee chlorofyl-a moleculen gebonden aan eiwitten. Dit complex wordt P680 genoemd, naar de golflengte van licht die het best geabsorbeerd wordt. Als de chlorofylmoleculen vanuit de antennecomplexen genoeg energie ontvangen, komen ook hun elektronen op een hoger energieniveau. Daarna worden deze elektronen razendsnel overgedragen aan een elektronenacceptor. Dit is de eerste stap in een reactieketen waarin telkens elektronen worden overgedragen. Deze elektronen transportketen zorgt ervoor dat de energie van het aangeslagen elektron niet in één keer vrij komt, maar gedoseerd in een aantal stappen. De energie kan daardoor nuttig gebruikt worden.

24. Vraag

- Welke kleur licht wordt vooral geabsorbeerd door PS I en II?
- In welk fotosysteem wordt voor het aanslaan van de elektronen de meeste energie geabsorbeerd? Leg je antwoord uit.

Q

De twee moleculen chlorofyl-a staan dus een elektron af aan een elektronenacceptor. Ze komen daardoor elektronen tekort. Dit 'elektronen-gat' kan niet blijven bestaan en wordt gevuld met elektronen die vrijkomen bij de splitsing van water:



De zuurstofatomen die bij deze reactie vrijkomen, combineren onmiddellijk tot O_2 . Het zuurstofgas is wat de fotosynthese betreft maar een bijproduct. Het verlaat het blad via huidmondjes.

De protonen (H^+ -ionen) komen binnen de thylakoïdmembranen terecht. Daar loopt de concentratie H^+ -ionen sterk op. Het transport van de protonen gaat van een plek met een lage concentratie naar een plek met hogere concentratie. Dat kan niet spontaan gebeuren.

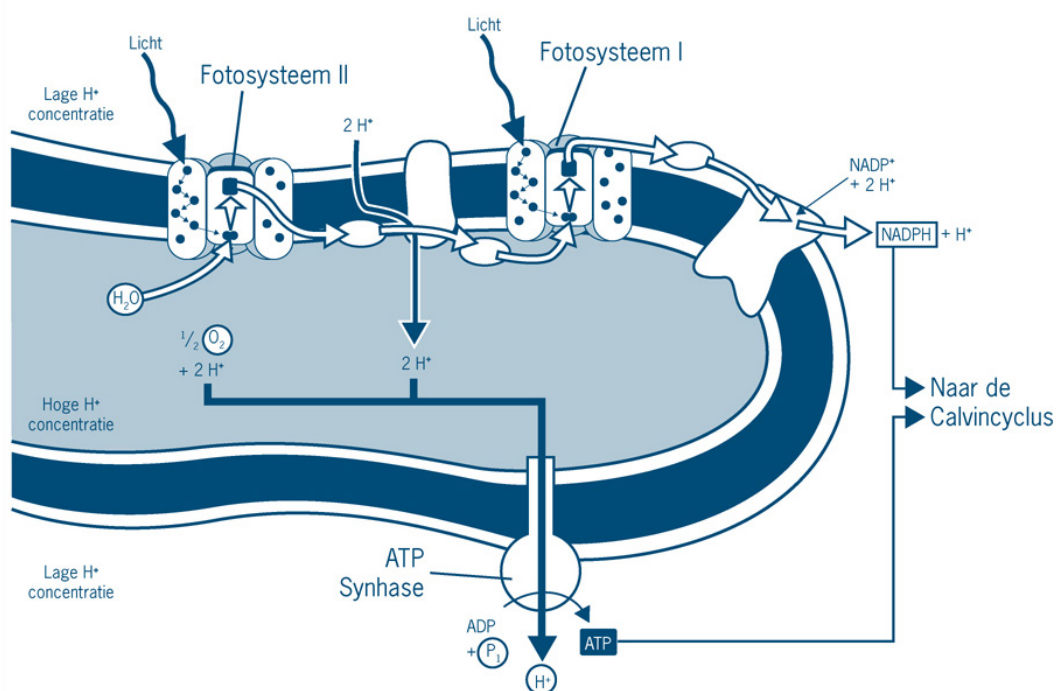
Het is hier wel mogelijk, doordat het gekoppeld is aan de **elektronentransportketen**. In de elektronentransportketen kwam immers de energie van de aangeslagen elektronen langzaam vrij. De ophoping van protonen binnen de thylakoïdmembranen kan je beschouwen als een stuwmeer aan protonen. Protonen uit dat stuwmeer kunnen 'naar beneden vallen': terug naar de andere kant van het thylakoïdmembran. Dat levert energie op, in de vorm van **ATP**. ATP is het 'energiemolecuul' van levende cellen, zie afbeelding 22.

In fotosysteem I vinden vergelijkbare processen plaats als fotosysteem II. Ook in fotosysteem I zijn antennecomplexen die licht oogsten. Ook daar worden in het reactiecentrum elektronen losgemaakt van chlorofylmoleculen (ditmaal P700). Ook deze elektronen worden overgedragen op een elektronenacceptor. De missende elektronen uit fotosysteem I worden nu aangevuld door de elektronen die via de elektronen transportketen geleverd worden door fotosysteem II. De elektronen uit fotosysteem I komen uiteindelijk bij **NADP-reductase**. Dit levert, in combinatie met H^+ , **NADPH** (ook wel: NADPH_2 of NADPH/H^+), dat gebruikt wordt in het tweede gedeelte van de fotosynthese.

25. Vraag

Bekijk BINAS tabel 69B. In afbeelding 20 staan de reacties in PS II en PS I. Waar is het lumen van de thylakoïde in deze tekening, onder of boven de thylakoïdmembran? Waarom?

Q



Afbeelding 21: een schematische weergave van de fotosynthese op de chloroplast. In dit figuur kun je goed zien hoe alle protonen naar binnen worden gepompt, in fotosysteem I en II en hoe deze gebruikt worden door de ATP synthase voor het produceren van ATP. De ATP wordt vervolgens gebruikt in de Calvin cyclus voor het maken van glucose.

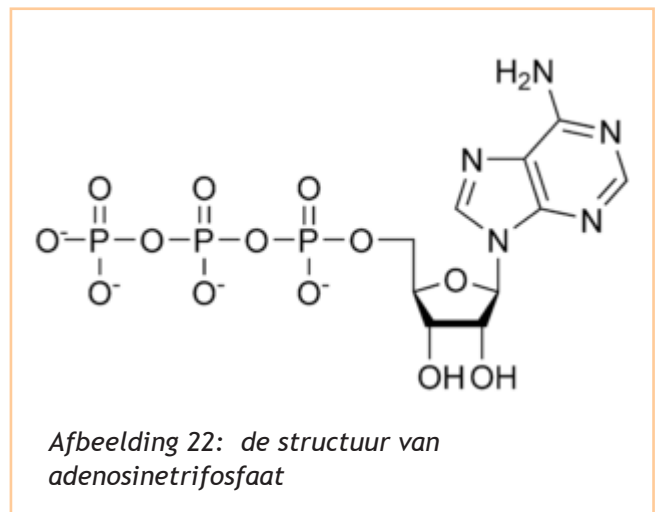
5.6 De rol van ATP

ATP staat voor Adenosine Tri Fosfaat (Phosphate in het Engels). Het is een nucleotide-molecuul bestaande uit een adenine groep, een ribose groep en drie fosfaat groepen (zie afbeelding 22). Nucleotiden zijn ook de bouwstenen van DNA en RNA.

ATP gevormd uit ADP (Adenosine Di Phosphate) en een fosfaatgroep. Er is heel wat energie nodig om die groepen aan elkaar te verbinden want zowel ADP als de fosfaatgroep zijn negatief geladen. Maar die energie komt ook weer vrij als de binding verbroken wordt.

ATP wordt in alle cellen gemaakt in mitochondriën, en in plantencellen ook in chloroplasten. In mitochondriën vindt de cellulaire verbranding plaats, waarbij energie vrijkomt die gebruikt wordt om ATP te maken. In chloroplasten wordt de energie uit zonlicht gebruikt.

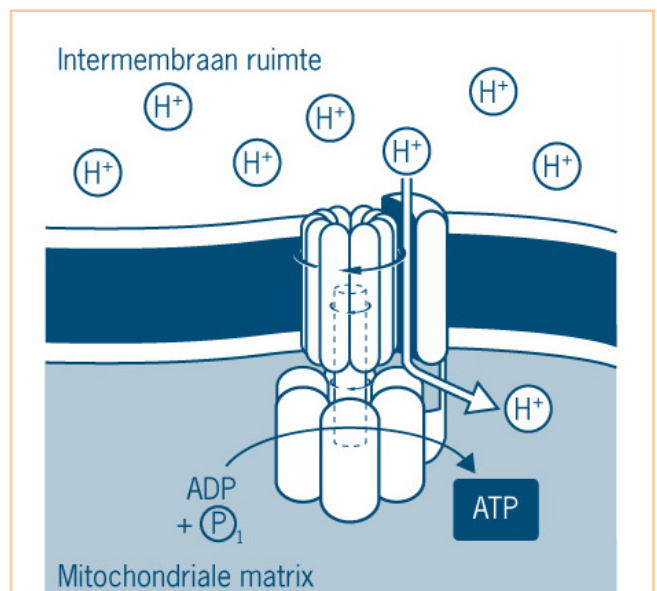
ATP werkt zo in cellen als een soort oplaadbare batterij. Het kan overal in het organisme gebruikt worden als energie nodig is. Daarbij verliest het één fosfaatgroep en wordt het weer ADP.



Je kunt de reacties vereenvoudigd weergeven als:



De fotosystemen zorgen niet alleen voor het transport van elektronen, maar ook voor het transport van protonen. Als het plastochinon elektronen accepteert, moet het tegelijkertijd ook H^+ opnemen. Dit gebeurt aan de buitenkant van de thylakoïden, in het stroma. Als het plastochinon de elektronen vervolgens overdraagt, laat het de protonen weer los, maar nu in het lumen van de thylakoïde. De concentratie H^+ in het lumen wordt hoger dan in het stroma. Men spreekt van een **protonengradiënt** over het thylakoïdemembraan. Deze gradiënt levert de energie voor de productie van ATP via het **ATP-synthase complex**. Dit complex vormt een soort poort in het membraan, zie afbeelding 23. De protonen, die van hoge concentratie naar lage concentratie door de poort bewegen, draaien het buitenste gedeelte van het complex telkens een stukje. Het heeft iets weg van de poortjes die je soms in zwembaden of in de metro ziet: telkens als er iemand passeert draait een stang een slag verder, waarbij de bezoekers geteld kunnen worden. In het ATP-synthase wordt deze draaiing gebruikt om ATP te maken uit ADP en fosfaat.



Zoals je gezien hebt is het directe product van de fotosynthese dus niet het maken van suikers, of het binden van CO_2 , maar het produceren van ATP en NADPH. De energie van de fotonen in licht wordt uiteindelijk in deze twee verbindingen vastgelegd. De plant gebruikt deze verbindingen vervolgens om suikers van te maken om te groeien en om andere stofwisselingsprocessen in de plant te reguleren.

26. Opdracht

Animaties kunnen verhelderend zijn bij ingewikkelde processen. Bekijk daarom een aantal van de onderstaande animaties over fotosynthese:

► [URL7](#)

► [URL8](#)

(bovenste link op die website)

► [URL9](#)

Bekijk eerst de 'first look' en 'advanced look' om aan de Engelse termen te wennen en bekijk vervolgens de animatie.

► [URL10](#)

en onderstaande links tonen ATP Synthase:

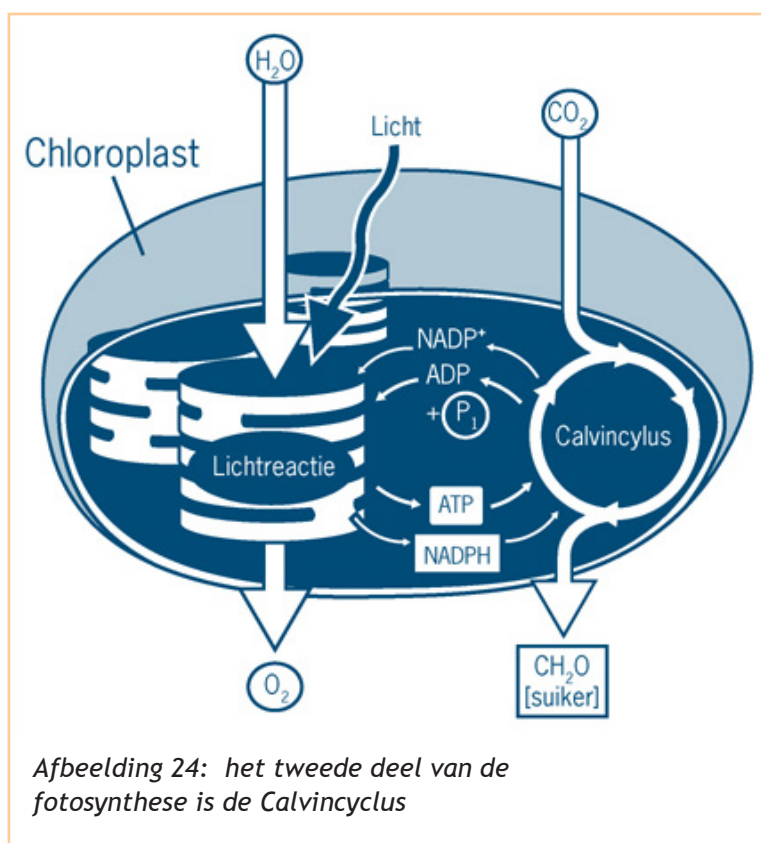
► [URL11](#) en ► [URL12](#)

Een meer uitgebreide animatie is te zien op: ► [URL13](#)

Q

5.7 Het tweede deel van de fotosynthese: de synthese van koolhydraten

De fotosystemen gebruiken lichtenergie en leveren ATP en NADPH. Dit wordt gebruikt om suikers te maken. Hierbij is geen licht meer nodig, de energie zit immers in ATP en NADPH. Daarom wordt dit gedeelte wel de 'donkerreactie' genoemd, en het eerste deel (maken van ATP en NADPH) de 'lichtreactie'. Dit zijn misleidende termen. Het is met een truc wel mogelijk om de donkerreactie even in het donker te laten verlopen, maar de reactie heeft ATP en NADPH nodig. En dat wordt alleen in het licht gemaakt. Als een plant in het donker staat, stopt dus ook de donkerreactie.

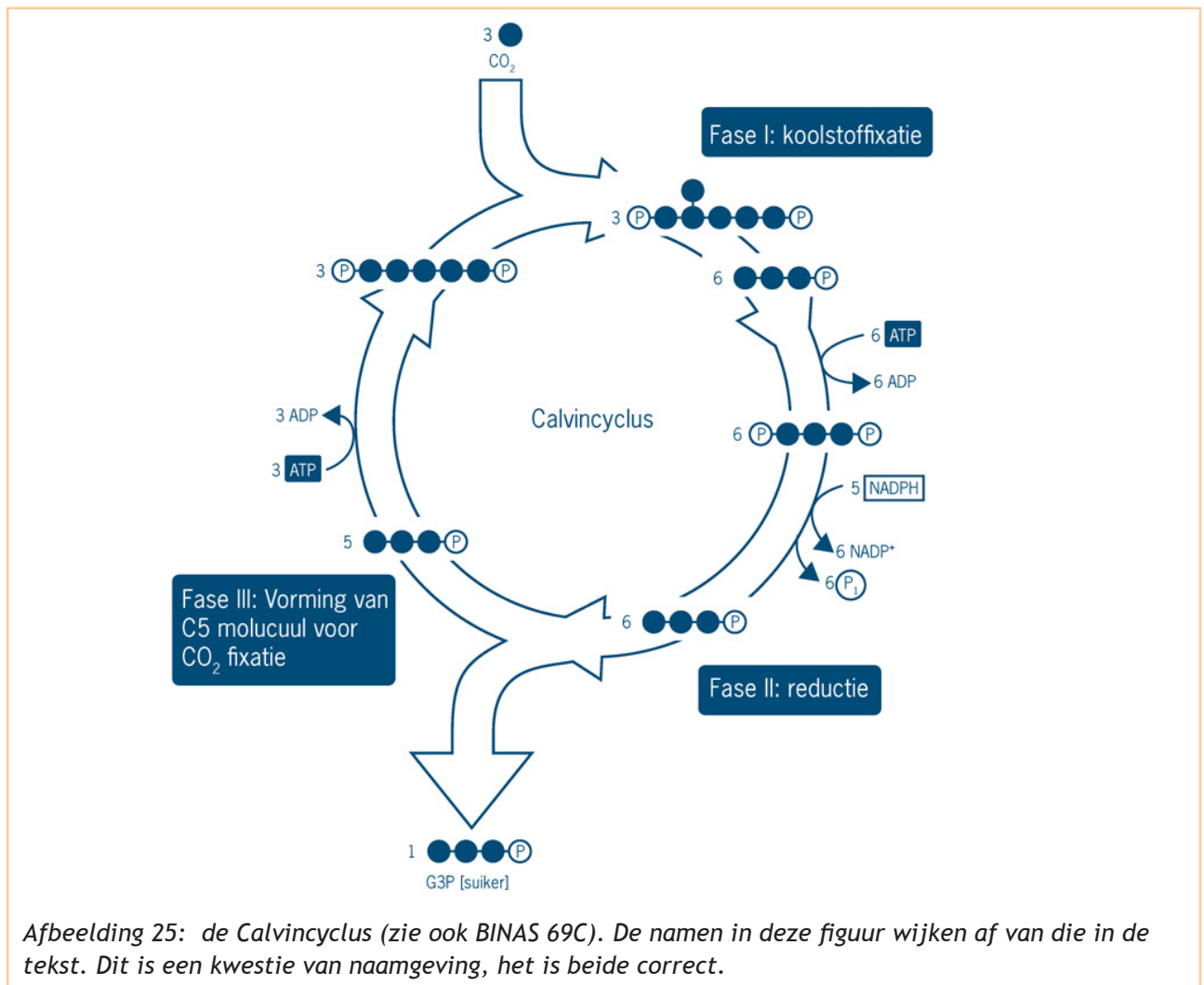


Calvincyclus

In schoolboeken staat als product van de fotosynthese altijd glucose: $C_6H_{12}O_6$. In feite wordt er een kleiner molecuul gemaakt met drie C-atomen: glyceraldehyde-3-fosfaat.

Dit gebeurt in de zogenaamde **Calvincyclus**, zie afbeelding 25 en BINAS tabel 69C. In deze cyclus wordt elke keer één molecuul CO_2 toegevoegd aan een verbinding met vijf C-atomen (C5-verbinding), het ribulose-1,5-difosfaat. Dat levert een C6-verbinding die onmiddellijk splitst in twee moleculen glycerinezuur-3-fosfaat. Elk molecuul krijgt een fosfaatgroep van ATP en wordt glycerinezuur-1,3-difosfaat. Deze twee worden daarna gereduceerd door NADPH tot glyceraldehyde-3-fosfaat.

Eén van de twee moleculen glyceraldehyde-3-fosfaat kan omgezet worden in zetmeel in de chloroplast, of de chloroplast verlaten en wordt dan in het cytoplasma omgezet in andere koolhydraten zoals glucose en sucrose. Sucrose kan vervoerd worden naar andere cellen van de plant, als daar behoefte aan is. Het andere molecuul blijft in de cyclus om voor nieuw ribulose-1,5-difosfaat te zorgen.



Afbeelding 25: de Calvincyclus (zie ook BINAS 69C). De namen in deze figuur wijken af van die in de tekst. Dit is een kwestie van naamgeving, het is beide correct.

27. Vraag

- In opdracht 6 heb je uitgezocht wat de CO_2 uitstoot was van jullie vlucht naar Amerika. Als je uitgaat van de Calvincyclus, hoeveel keer moet deze dan doorlopen worden wil je al de uitgestoten CO_2 gecompenseerd hebben?
- En hoeveel ATP is daar dan voor nodig?
- En hoeveel NADPH is daar dan voor nodig?
- En hoeveel fotonen zijn daar dan voor nodig?
- Als er uitsluitend fotonen van 680 nm geabsorbeerd worden, hoe lang moet de zon dan schijnen om de energie te leveren die jouw CO_2 uitstoot kan compenseren?



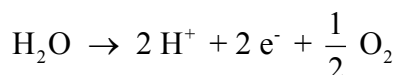
5.8 Samenvattend overzicht

Fotosynthese vindt plaats in de chloroplasten (bladgroenkorrels) van de plant.

Chloroplasten hebben verschillende membranen. Deze membranen zijn nodig om een protongradiënt mogelijk te maken.

In de membranen zitten Fotosysteem II en Fotosysteem I. Deze fotosystemen bestaan uit een reactie centrum omgeven door antenne complexen die licht opvangen. De twee fotosystemen werken samen in de elektronentransportketen om ATP en NADPH te maken.

Eerst wordt er een licht ingevangen bij fotosysteem II. Dat resulteert in het aanslaan van elektronen die worden doorgegeven aan een elektronenacceptor. De missende elektronen worden aangevuld door het splitsen van twee watermoleculen:



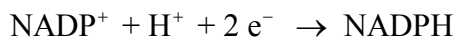
Intussen zijn ook in het reactiecentrum van fotosysteem I elektronen aangeslagen door invallende fotonen. Ook deze elektronen worden doorgegeven. De elektronen van fotosysteem II vervangen de geëxciteerde elektronen in fotosysteem I. De elektronen die vrijkomen bij fotosysteem I worden gebruikt om NADPH te maken.

Bij de verschillende stappen in de elektronentransportketen worden steeds protonen naar één kant van het membraan getransporteerd, zodat er een protonen overschot ontstaat aan één kant van het membraan. Zo'n 'stuwmeer' van protonen bevat genoeg potentiële energie om ATP te maken.

ATP wordt gemaakt door het ATP-synthase complex. Dit complex gebruikt de energie die vrijkomt bij protontransport om ATP te maken uit ADP en P_i .



NADPH wordt gemaakt door het NADP-reductase complex. Dit complex gebruikt de bij fotosysteem I vrijgekomen elektronen om NADP^+ te reduceren tot NADPH.



Dit hele proces heet de 'licht reactie', omdat er licht nodig is om ATP en NADPH te maken.

De vastgelegde energie in ATP en NADPH wordt vervolgens gebruikt in de Calvinicyclus om CO_2 te binden aan ribulose 1,5-difosfaat, en dit verder om te zetten in twee moleculen glyceraldehyde 3-fosfaat.

De Calvinicyclus wordt ook wel de 'donkerreactie' genoemd, omdat er geen licht voor nodig is. Echter, de reactie verloopt enkel in het licht, omdat er anders geen ATP en NADPH gevormd worden.

Achtergrondinformatie: het vastleggen van koolstofdioxide, waterverlies en rubisco

Je hebt in hoofdstuk 5 kunnen lezen dat bij het fotosynthese proces CO_2 wordt vastgelegd. De term die hier vaak voor wordt gebruikt is CO_2 fixatie. Het gaat daarbij om de reactie van ribulose-1,5-difosfaat en koolstofdioxide. Het gas koolstofdioxide wordt daarbij aan een organisch molecuul gekoppeld. Dit proces vindt in alle plantencellen plaats, speciaal in de chloroplasten. Bij eencellige algen kan CO_2 gewoon door diffusie in de cel en vervolgens in de chloroplast komen. Bij echte bladeren gaat het echter heel anders. Bladeren bevatten veel water, maar staan meestal in een droge omgeving. Ze kunnen dus uitdrogen. Dit wordt tegengegaan door een waslaag of cuticula op de buitenkant van het blad. Die laag is heel effectief tegen verlies van waterdamp, maar verhindert even effectief dat CO_2 het blad in komt. Hier is weer een oplossing voor in de vorm van huidmondjes of stomata (enkelvoud: stoma). Dat zijn kleine poriën in de opperhuid van een blad, meestal aan de onderkant. Als ze open staan kan CO_2 het blad in komen. Maar helaas kan er dan ook weer water uit.

Dus het vastleggen van CO_2 gaat steeds gepaard met het verlies van water. En een flink verlies ook: een tarweplant verliest zo'n 0,3 tot 1 kg water voor elke gram CO_2 die wordt vastgelegd. Dat betekent dat akkers flink wat water nodig hebben. Speciaal in warme klimaten zijn kassen een middel om dat verlies van water te beperken.

Waarom gaat er zoveel water verloren per eenheid vastgelegde koolstof? Dit probleem heeft zijn oorsprong in de evolutie van fotosynthese, dat een heel oud proces is. Fotosynthese begon al zo'n 3,5 miljard jaar geleden en ook toen al was het enzym ribulose-1,5-difosfaat carboxylase/oxygenase (=rubisco) nodig. Zo vroeg in de geschiedenis van de aarde was er bijna geen zuurstof in de atmosfeer (100 miljoen maal minder dan vandaag). Fotosynthese moest nog voor die zuurstof gaan zorgen. Er was ook meer CO_2 , ongeveer 2500 keer het tegenwoordige gehalte. Het probleem is dat rubisco veel beter geschikt is voor de omstandigheden van 3 miljard jaar terug. Het werkt niet goed bij de lage CO_2 en hoge O_2 concentraties van tegenwoordig. Vanwege de lage efficiëntie van rubisco moet de plant veel CO_2 in het blad krijgen, door veel huidmondjes open te zetten. Dat betekent verlies van waterdamp. Voor planten in een vochtige, koele omgeving is dat nog niet zo'n probleem. Maar in droge warme klimaten zijn er planten die bepaalde trucs hebben ontwikkeld om het waterprobleem dat door rubisco wordt veroorzaakt te beperken. Dat doen ze door een afwijkende manier om CO_2 vast te leggen. Twee van deze afwijkende manieren zijn het CAM en het C4-metabolisme.

CAM planten

Op foto's van woestijnen zie je vaak cactussen en andere vetplanten. Deze en andere planten van droge omgevingen houden overdag, als de zon schijnt, hun huidmondjes gesloten. Ze kunnen zich weinig waterverlies permitteren. Maar ze hebben wel CO_2 nodig voor hun fotosynthese, die juist in het zonlicht moet plaatsvinden. Hoe lukt hen dit? De oplossing voor deze planten is dat ze 's nachts hun huidmondjes open doen en CO_2 opnemen. Het is dan veel koeler en ook vochtiger, waardoor er dan niet zoveel waterdamp door de open huidmondjes verdwijnt. 's Nachts, zonder licht, is er geen fotosynthese mogelijk; het CO_2 wordt opgeslagen in het blad en het komt overdag, bij gesloten huidmondjes, weer vrij. Dan zit het al in het blad en is het beschikbaar voor rubisco. De manier waarop CO_2 's nachts wordt opgenomen en overdag wordt afgegeven wordt 'crassulacean acid metabolism' of CAM genoemd. De naam komt van de familie van de Crassulaceae, waarin het systeem voor het eerst ontdekt werd. Veel vetplanten behoren bij deze familie, onder andere de geslachten Kalanchoë en Sedum. Acid staat voor het appelzuur dat de opslagplaats voor CO_2 is. Dit appelzuur zit in de vacuoles van de bladcellen, die aan het eind van de nacht sterk zuur worden. CAM planten zijn wel tien keer efficiënter in hun watergebruik dan normale planten, maar er is ook een nadeel. Er is een maximum aan de hoeveelheid CO_2 die opgeslagen kan worden. Daardoor groeien CAM planten langzamer. Sommige planten gebruiken beide systemen: CAM als er weinig water is, maar als het kan de normale fotosynthese met open huidmondjes.

De ontdekking van het C4-metabolisme

Toen men ongeveer 60 jaar geleden het fotosyntheseproces aan het ontrafelen was, gebruikte men het radioactieve ^{14}C als merker. Groene plantencellen kregen $^{14}\text{CO}_2$. Na enige tijd in het licht werden de cellen in kokende methanol gedoopt waardoor de cellen doodgaan en de stofwisseling stopt. Als de tijd tussen opname van $^{14}\text{CO}_2$ en het stoppen kort was, waren er nog maar weinig moleculen waarin ^{14}C was ingebouwd. Door maar heel weinig tijd te geven vond men het eerste molecuul waarin de radioactieve stof was ingebouwd. In normale planten is dat de C3-verbinding: glycerinezuur-3-fosfaat. Dat ontstaat door de reactie van ribulose-1,5-difosfaat en CO_2 , de reactie die door rubisco mogelijk wordt gemaakt. Er ontstaan twee moleculen glycerine-3-fosfaat. Als men dezelfde proeven deed met maïs, vond men als eerste gemerkte molecuul niet deze C3-verbinding, maar een C4-verbinding: appelzuur.

Hoe werkt het C4-metabolisme en waarom is het niet perfect?

In C4-planten vindt ook normale 'C3-fotosynthese' plaats. Het efficiënte extra vastleggen van CO_2 door C4 planten gebeurt in een bepaald type bladcellen, de mesofylcellen. Eerst worden C4 zuren gevormd en die worden getransporteerd naar de cellen van de vaatbundelschede. Daar wordt het zuur afgebroken en komt de CO_2 vrij. Plaatselijk is dan de concentratie hoog genoeg om rubisco efficiënt te laten werken. Als deze planten het alleen van hun C3-metabolisme zouden moeten hebben, zou de CO_2 -concentratie onder droge omstandigheden te laag zijn, doordat de huidmondjes dan grotendeels dichtgaan. De extra C4-stap werkt dus als een turbo voor de fotosynthese. De extra stap kost wel wat energie. Maar in droge, warme gebieden weegt dat zeker op tegen het verminderde waterverlies. Dat is in C4 planten de helft minder.



6 De verbrandings-motor van de cel

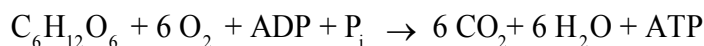
In het vorige hoofdstuk is besproken hoe licht, water en koolstofdioxide worden gebruikt om glucose te maken, de energiebron van het leven. Glucose wordt onder andere verder verwerkt tot koolhydraten en vetten. Uiteindelijk krijg jij via bijvoorbeeld een bruine boterham met pindakaas je energie. “Maar hoe krijg ik uit een boterham energie?” zul je je nu afvragen. Allereerst wordt je eten in het spijsverteringsstelsel opgedeeld in kleine moleculen. Deze kleine moleculen hebben het voordeel dat ze door je lichaam getransporteerd kunnen worden in je bloed. Weer andere mechanismen zorgen ervoor dat de juiste moleculen op de juiste plaats terecht komen in je eigen lichaamscellen. De moleculen waaruit energie gehaald kan worden (suikers, vetten en eventueel ook eiwitten) komen in de mitochondriën van de cellen van je lichaam terecht (zie afbeelding 28). In de mitochondriën worden deze moleculen verbrand. Het verbranden van deze moleculen levert energie op. Let op dat verbranden betekent ‘chemisch reageren met zuurstof’.

6.1 Cellulaire verbranding of aërobe dissimilatie

Zoals al eerder besproken is het molecuul ATP de ‘brandstof’ voor iedere cel. Geen ATP betekent geen energie. ATP moet dus steeds worden bijgevuld, zoals je moet gaan tanken bij een auto om niet stil te komen staan langs de kant van de weg.

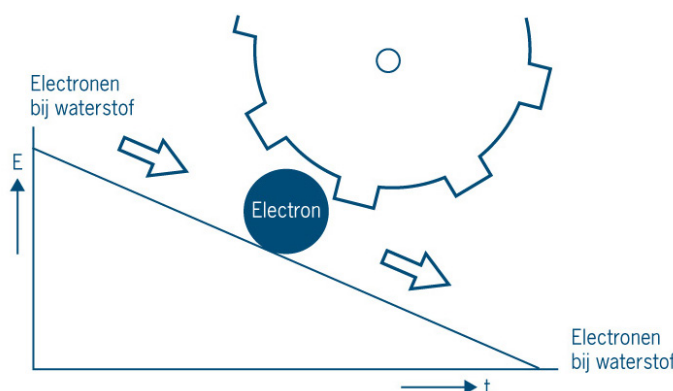
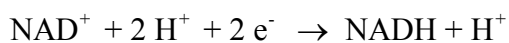
De energie die nodig is voor het ‘opladen’ van ATP wordt geleverd door de cellulaire verbranding of aërobe dissimilatie (aëroob = met zuurstof, dissimilatie: afbraak van organische moleculen).

De standaard brandstof voor cellen is glucose: $C_6H_{12}O_6$. De volgende reactie is de samenvatting van de aërobe dissimilatie:



Dit is eigenlijk een omgekeerde fotosynthese. Glucose wordt weer afgebroken in koolstofdioxide en water. Voor de fotosynthese was er energie nodig, afkomstig van het licht en er kwam zuurstof vrij. Bij de verbranding van glucose is zuurstof nodig en er komt energie vrij. De energieoverdracht vindt plaats door ‘energierijke elektronen’ over te dragen, waarbij de vrijgekomen energie wordt opgeslagen in energierijke verbindingen.

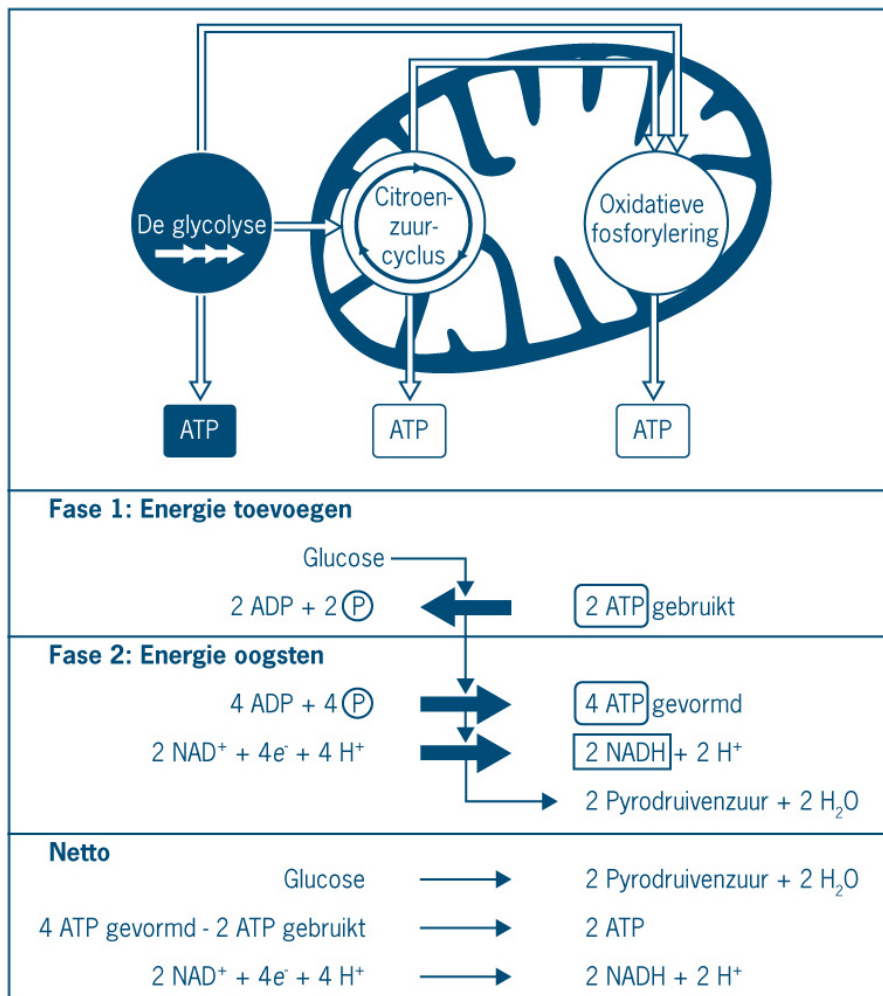
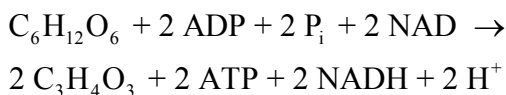
De glucose draagt zijn energierijke elektronen over aan de zuurstof. Het transport van elektronen naar zuurstof kun je zien als een ‘bergaf’ beweging, waarbij energie vrijkomt (zie afbeelding 26). De elektronen reizen niet alleen, het transport van elektronen gaat als waterstofaatom, samen met protonen. Hun vervoermiddel is het molecuul NAD: Nicotinamide Adenine Dinucleotide. Twee elektronen en één proton worden aan één molecuul NAD^+ gekoppeld. Eén proton reist steeds los mee in de oplossing:



Afbeelding 26: de overdracht van energierijke elektronen in relatie tot de tijd. Door de overdracht worden energierijke verbindingen gemaakt (schematisch weergegeven als het molentje dat gaat draaien)

6.2 De glycolyse

De cellulaire verbranding van glucose begint met een proces dat **glycolyse** genoemd wordt en dat zich in het cytoplasma afspeelt:



Afbeelding 27: schematische weergave van de glycolyse, het eerste gedeelte van de verbranding, waarbij geen zuurstof nodig is. Bij de glycolyse wordt glucose omgezet in pyrodruivenzuur (nog steeds een erg energierijke verbinding), 2 ATP en 2 NADH.

De gevormde C3-verbinding is pyrodruivenzuur. Er wordt bij de glycolyse al ATP gevormd, maar er zit nog veel potentiële energie in de elektronen die aan NAD⁺ gekoppeld zijn. Die potentiële energie kan alleen verzilverd worden als er zuurstof aanwezig is. Anders is er voor de elektronen geen weg 'bergafwaarts'. Vergelijk het met een afgesloten bergmeer: het water heeft wel potentiële energie, maar kan geen energie leveren omdat het nergens naar beneden kan vallen.

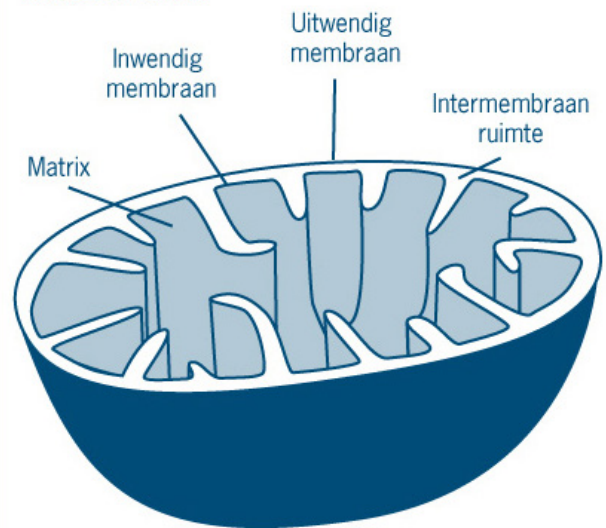
Voor de reactie met zuurstof moeten de elektronen naar het mitochondrium (zie afbeelding 27). Ook uit pyrodruivenzuur kan nog meer energie geoogst worden en ook dat gebeurt in het mitochondrium. Het pyrodruivenzuur verliest bij binnenkomst in het mitochondrium nog 2 waterstofatomen en een molecuul CO₂ aan NAD⁺. De resulterende azijnzuurgroep (= acetyl) wordt gekoppeld aan het zogenaamde co-enzym A, wat resulteert in acetylCoA. De acetylgroep wordt vervolgens aan een C4 verbinding gekoppeld, waardoor citroenzuur (C6) gevormd wordt. In een cyclus van reacties die de citroenzuurcyclus genoemd wordt, wordt het azijnzuur helemaal afgebroken tot CO₂ + H₂O (zie afbeelding 27).

Per molecuul pyrodruivenzuur worden 4 NADH.H⁺, 1 FADH₂ (een alternatief voor NADH.H⁺) en één molecuul GTP (een alternatief voor ATP) gevormd, zie afbeelding 29.

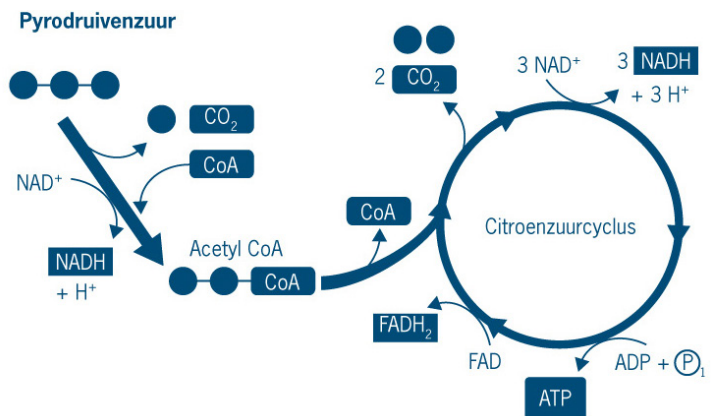
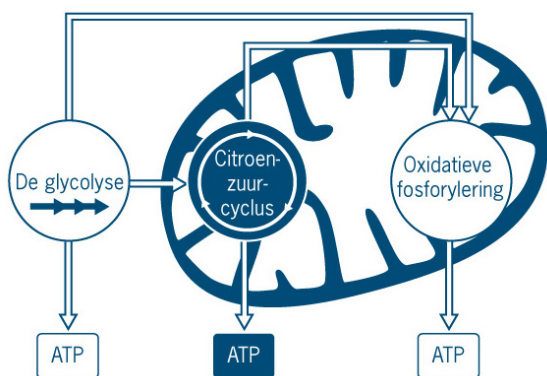
28. Vraag: pyrodruivenzuur en NADH.H^+ uit glucose
- Hoeveel moleculen pyrodruivenzuur worden er gevormd uit één molecuul glucose?
 - Hoeveel NADH.H^+ wordt er gevormd vanuit één molecuul glucose?

29. Vraag: vergisting
- Als er geen zuurstof aanwezig is, wordt pyrodruivenzuur vergist. Dat gebeurt bijvoorbeeld bij de vergisting van druiven, en levert alcohol op. Als er in jouw spieren niet genoeg zuurstof is voor de inspanning die je levert, wordt pyrodruivenzuur ook vergist, maar nu niet tot alcohol maar tot melkzuur. Zoek deze gistingsprocessen op in BINAS tabel 68B.
 - De vergistingstap levert geen energie meer op. Wat leveren deze reacties wel op? Waarom gebeurt deze reactie?

Mitochondrium



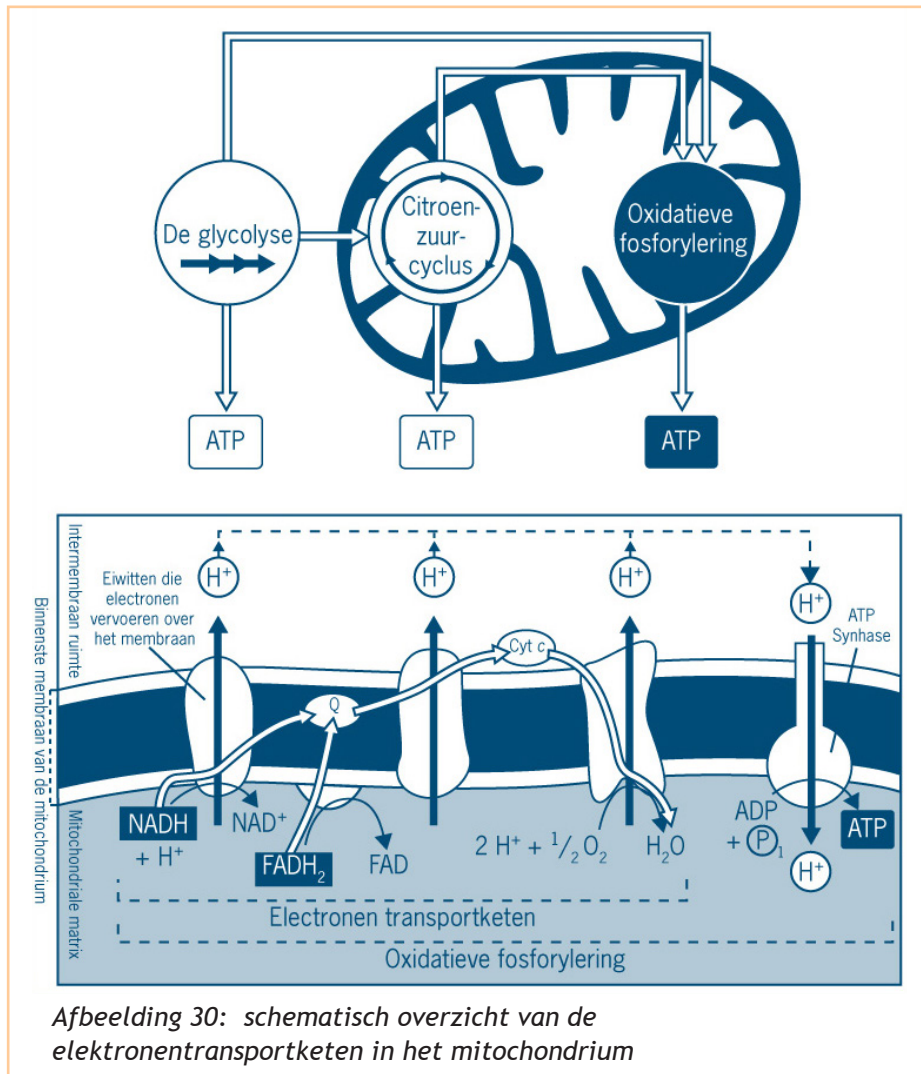
Afbeelding 28: schematische weergave van een mitochondrium



Afbeelding 29: de citroenzuurcyclus schematisch weergegeven

6.3 De oxidatieve fosforylering

De energie van de geïoogste elektronen moet nu nog verzilverd worden. Dat gebeurt in een proces dat **oxidatieve fosforylering** wordt genoemd: met de energie uit de oxidatiereacties wordt ADP gefosforyleerd (d.w.z. krijgt een extra fosfaatgroep) tot ATP. Dit gebeurt door een serie eiwitcomplexen in de binnenmembraan van het mitochondrium (afbeelding 30). Samen worden deze de ademhalingsketen of de elektronentransportketen genoemd. De citroenzuurcyclus vindt plaats in de matrix van het mitochondrium (= de binnenste ruimte in afbeelding 28), en ook NADH.H^+ bevindt zich daar. De elektronen worden van NADH.H^+ via de diverse complexen overgedragen naar zuurstof, dat gereduceerd wordt tot water. Bij verschillende overstappen van de elektronen (redoxreacties!) komt genoeg energie vrij om de bijbehorende protonen door de binnenmembraan naar de intermembraan ruimte (afbeelding 30) te pompen.



De elektronen en de protonen van NADH.H^+ worden afgegeven aan het NADH dehydrogenase complex. Dit complex geeft de elektronen door aan de elektronenacceptor ubiquinon, ook wel co-enzym Q genoemd. De bijbehorende protonen worden naar de intermembraanruimte gepompt. Na ubiquinon worden de elektronen doorgegeven aan de volgende complexen.

In de elektronentransportketen lopen de elektronen wat energie betreft 'bergafwaarts'. Bij drie stappen is de afdaling in energieniveau groot genoeg om protonen over de membraan te kunnen pompen. Dit geeft een stuwmeer aan protonen in de intermembraanruimte, die daar weer veel potentiële energie vertegenwoordigen. Als deze H^+ ionen 'terugvallen' naar de matrix, waar de concentratie veel lager is, komt energie vrij. Dit 'terugvallen' gaat via het ATPsynthase complex (zie afbeelding 31) waar de energie wordt

gebruikt om ADP te fosforileren tot ATP. Dit ATPsynthase complex heeft overeenkomsten met een rad van een ouderwetse watermolen: bij het langsstromen van protonen draait één van de onderdelen een stuk. Een aantal draaistappen zijn nodig om één molecuul ATP te leveren.

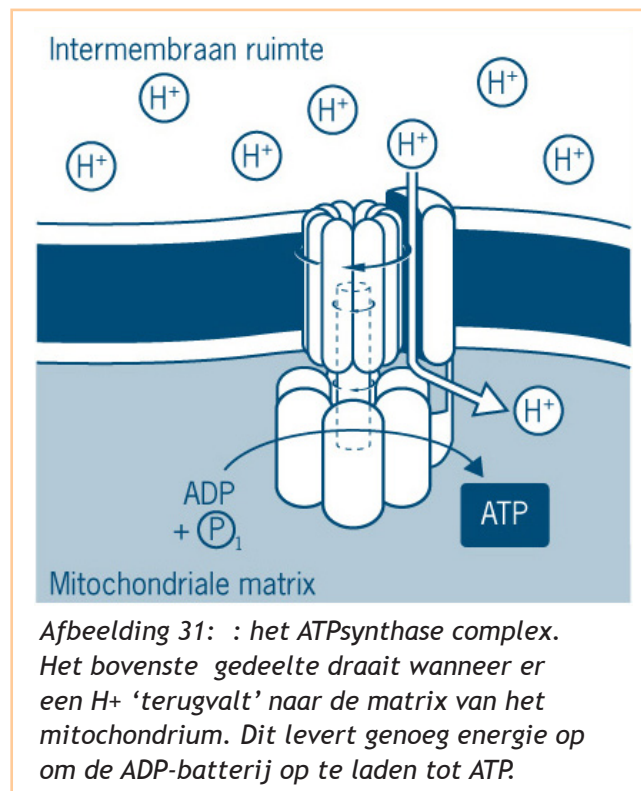
Zo is in feite de grote knal van de redoxreactie tussen H_2 en O_2 opgesplitst in kleinere stappen, waarbij minder sterke oxidatoren de elektronen overnemen en ook weer afgeven. Dit levert geen knal op, maar energie in afgemeten hoeveelheden waarmee telkens H^+ over de membraan wordt gepompt. Deze opbouw van potentiële energie levert uiteindelijk de ‘stroom’ om de ATP-batterij op te laden.

Achtergrondinformatie: handig!

Zie voor een fraaie animatie van de elektrontransportketen de website: ► [URL14](#)

Een animatie over hoe het ATPsynthase werkt kun je hier bekijken: ► [URL13](#)

Beide animaties zijn wel in het Engels. Bekijk de filmpjes thuis, als je ze niet in de klas te zien krijgt. Ze zijn erg verduidelijkend.



6.4 Korte samenvatting cellulaire verbranding

Om te leven en te bewegen heb je energie nodig. Je lichaam werkt voornamelijk met energie in de vorm van ATP. In ATP zit energie opgeslagen in de chemische binding van de buitenste fosfaatgroep. ATP kun je maken door het voedsel dat je eet af te breken tot moleculaire propoities en deze moleculen vervolgens te oxideren (verbranden). Dit laatste gebeurt in het mitochondrium. Tijdens de oxidatie worden hoog energetische elektronen ‘bergafwaarts’ geleid naar een energetisch lagere positie. Tijdens dit transport worden protonen (H^+) naar de andere kant van de mitochondrische binnenmembraan gepompt. Dit overschot aan protonen wordt vervolgens weer gebruikt om ATP te maken van ADP en P_i in het ATPsynthase complex.

7 Brandstoffen voor het leven

De meeste energie op aarde wordt geleverd door verbranding van fossiele brandstoffen. Fossiele brandstoffen zijn koolstofverbindingen die zijn ontstaan uit resten van dode organismen. Die organismen hebben ruwweg 300 miljoen jaar geleden energie afkomstig van de fotosynthese van planten opgeslagen in organische stoffen. Door verschillende oorzaken zijn de organische resten gedeeltelijk verteerd gebleven. De biomassa bevat dus nog energierijke verbindingen.

De organische resten zijn voor langere tijd uit de koolstofkringloop verdwenen. De lagen met organische resten werden in de loop van de tijd onder het gewicht van nieuwe lagen samengedrukt, waarbij onder hoge temperaturen omzetting in steenkool, aardolie of aardgas plaatsvond. Deze brandstoffen worden nu door mijnbouw of boortekniken uit die diepere aardlagen gehaald. In feite zijn fossiele brandstoffen hiermee een vorm van zonne-energie, miljoenen jaren geleden opgeslagen in plantaardige en dierlijke koolstofverbindingen.

Je hebt in de onderbouw al kennis gemaakt met diverse soorten verbrandingen. Niet alleen van gewone brandstoffen, maar ook de verbranding in jouw lichaamscellen.

30. Vraag

Het belangrijkste bestanddeel van aardgas is methaan.

- Wat is de reactievergelijking van de verbranding van koolstof?
- Diesel is geen zuivere stof maar een mengsel van moleculen van ongeveer gelijke grootte.
- Een belangrijk deel van diesel is $C_{14}H_{30}$. Wat is de reactievergelijking van de verbranding in een dieselmotor?



Een verbrandingsreactie is een reactie met zuurstof, en wordt ook wel oxidatie genoemd. Bij oxidatie-reacties komt energie vrij. Brandstoffen zijn over het algemeen stoffen die goed met zuurstof kunnen reageren. De beste brandstoffen zijn stoffen die het sterkst met zuurstof kunnen reageren.

31. Vraag

Bij de verbranding in cellen van organismen wordt uitgegaan van glucose.

- Schrijf de reactievergelijking van deze verbranding op.

Benzine bestaat voornamelijk uit het heptaan: C_7H_{16} , een alkaan. Een bijna vergelijkbaar alkaan is hexaan: C_6H_{14} .

- Schrijf ook hiervan de verbrandingsreactie op.

Een verbrandingsmotor kan niet lopen op glucose.

- Waarom is glucose niet zo'n goede brandstof als benzine?



De productie van fossiele brandstoffen was afhankelijk van organische stof die toevallig uit de koolstofkringloop weglekte, en niet in organismen werd verbrand. Helaas is er geen evenwicht tussen het tempo van aanmaak van fossiele brandstoffen en het verbruik daarvan.

32. Vraag

Aardolie is de belangrijkste fossiele brandstof. Op dit moment wordt er jaarlijks $4,4 \times 10^9 \text{ m}^3$ olie per jaar gebruikt. De aanmaak van aardolie gebeurde met ongeveer 15.000 m^3 per jaar.

Hoeveel jaren productie waren er ongeveer nodig om de olie te leveren voor één hedendaags gebruiksjaar?



Om meer brandstof te krijgen, zou je doelbewust organische stof kunnen oogsten om brandstof van te maken: **biobrandstof**. Biobrandstoffen dragen niet bij aan het broeikaseffect: er wordt namelijk nooit meer CO₂ uitgestoten dan er bij de fotosynthese door planten is opgenomen. De toename van CO₂ in de atmosfeer wordt nul wanneer we geheel overschakelen op biobrandstoffen. Hierdoor zal het broeikaseffect niet verder toenemen. Het lijkt een simpel antwoord voor de problemen met CO₂ en brandstoftekort. Of is het niet zo eenvoudig?

Er zijn in elk geval nog meer vragen: is het wel mogelijk om geheel op biobrandstof over te schakelen? Hoe kan van organische stoffen brandstof worden gemaakt? Welke planten leveren de grootste hoeveelheid geschikte organische stof? Zal dat genoeg zijn om in de behoefte aan brandstoffen te voorzien? Om antwoord te vinden op deze vragen kijken we eerst hoe biobrandstoffen worden gemaakt en hoe planten de grondstoffen voor die biobrandstoffen maken.

7.1 Hoe worden biobrandstoffen gemaakt?

Voor het maken van biobrandstoffen moeten we het proces van ruwweg 300 miljoen jaar versnellen tot een aantal jaar. We kunnen de glucose, die gemaakt wordt tijdens de fotosynthese, helaas niet in de brandstoftank gieten.

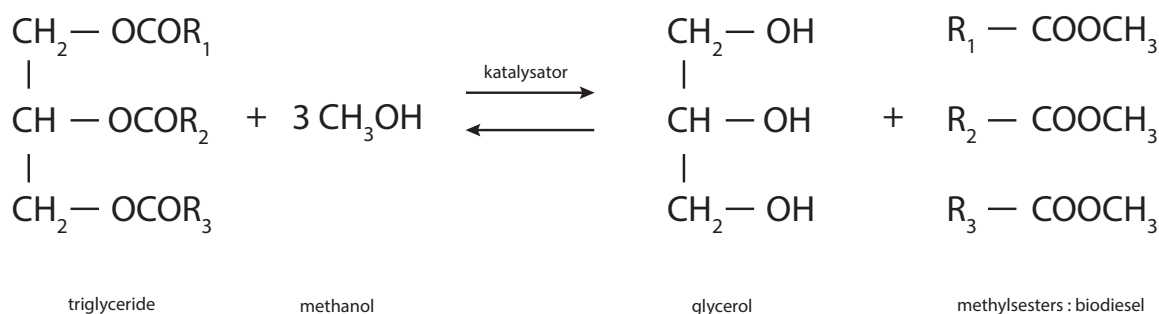
Voor het maken van biobrandstoffen uit organische resten moet het dus anders. Hoe?

7.2 Bio-ethanol

Bio-ethanol is de vervanger voor benzine. Het is niets anders dan gewone alcohol en wordt gemaakt door koolhydraten te laten vergisten. Als grondstof wordt bijvoorbeeld maïs gebruikt. Maïs slaat organische stof op in de vorm van zetmeel. Zetmeel bestaat uit aan elkaar gekoppelde glucose-moleculen. Dat levert, net als glucose, niet genoeg energie om motoren op te laten lopen. Ethanol levert per gram veel meer energie en is daarmee wel geschikt voor verbrandingsmotoren. Henry Ford liet er in 1896 al zijn eerste auto op lopen.

7.3 Biodiesel

Voor de productie van **biodiesel** gaat men uit van een olie of vet. Dit zijn triglyceriden: een glycerol met daaraan drie vetzuurketens (zie BINAS tabel 67G). Die triglyceriden zijn veel stroperiger dan gewone diesel, dat bestaat uit losse ketens. Om biodiesel te maken die zonder aanpassingen in een normale dieselmotor gebruikt kan worden, wordt de olie nog chemisch bewerkt: “omgeësterd”. Dit gebeurt met een alcohol, bijvoorbeeld methanol. Daarbij worden de drie esterverbindingen tussen de vetzuren en glycerol verbroken, en wordt elk vetzuur met één methanol veresterd, zodat losse ketens ontstaan.



Afbeelding 32: methylestervorming

Voor het omesteren is dus 3 mol alcohol per mol triglyceride nodig. In de industrie gebruikt men vaak 6 mol methanol per mol triglyceride om de evenwichtsreactie in de richting van de methylestervorming te sturen. Om de reactie te versnellen wordt een katalysator toegevoegd, zoals NaOH (loog). Alkoxiden zoals natrium methoxide (Na(CH₃O)) zijn nog betere katalysatoren en worden daarom in toenemende mate gebruikt. Het

omesteren wordt meestal bij 60 °C en atmosferische druk gedaan (methanol kookt bij 65 °C) en duurt dan zo'n 90 minuten. De biodiesel wordt gezuiverd door herhaald wassen met water om glycerol en methanol te verwijderen

Een ongewenste reactie die kan optreden is **verzeping**. (zeep: zout van Na⁺ en vetzuur). Om dat te voorkomen moeten de vetten/oliën en alcohol heel droog zijn en moeten er geen of heel weinig vrij vetzuren zijn.

33. Opdracht

Bekijk de videofilm op de volgende website: ► [URL4](#).

Waar dient de 'Lye' voor waarvan sprake is in de film?

Q

8 De kringloop rond

Planten kunnen CO_2 opnemen om van te groeien, met behulp van ATP en NADPH. Dit doen ze met behulp van het licht van de zon en de fotosystemen in de chloroplasten. Ze bouwen daarbij energierijke organische stoffen op. Daarom kunnen alle organismen op aarde weer leven van planten. Wij kunnen immers de door de planten opgebouwde moleculen weer afbreken om ATP voor onszelf te maken. Voor het maken van biodiesel van motoren hebben we echter olie of vet nodig.

8.1 Oliën en vetten in planten

Planten slaan de energie die ze maken niet alleen op in zetmeel en suiker maar ook in oliën en vetten. Veel zaden bevatten oliën en vetten die tijdens de kieming kunnen worden omgezet in suikers. Niet alleen zaden bevatten oliën en vetten, ook allerlei vruchten zoals olijven en avocado's.

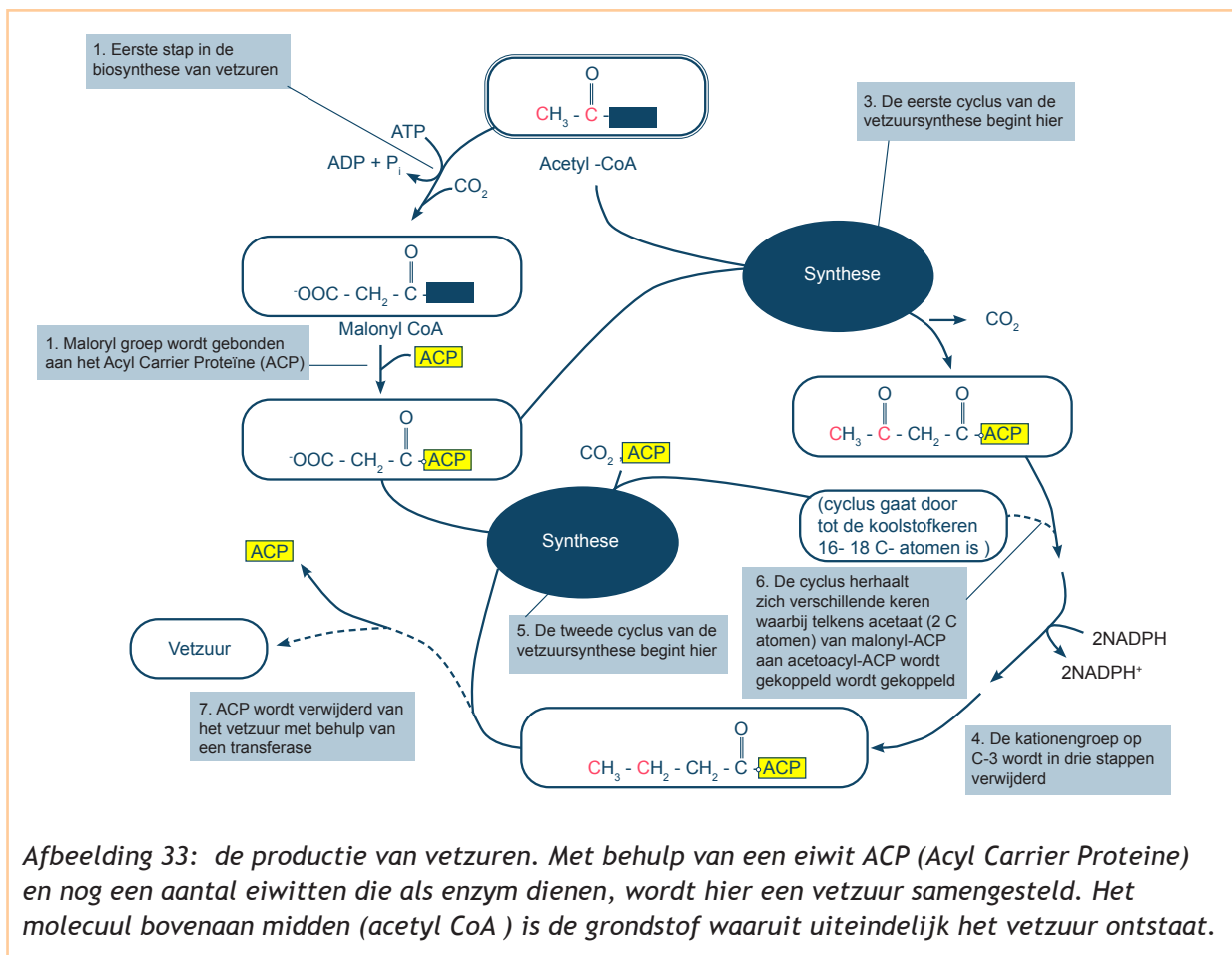
Vetten en oliën behoren tot de **lipiden**, een, vanuit chemisch oogpunt, zeer diverse groep van verbindingen die slecht in water en goed in organische oplosmiddelen oplossen. In vergelijking met koolhydraten zijn oliën en vetten meer gereduceerd en bevatten daardoor meer energie die bij oxidatie vrijkomt. Ter vergelijking, 1 g vet of olie levert 40 kJ energie en 1 g zetmeel 15.9 kJ. Oliën en vetten leveren dus aanzienlijk meer ATP in de cellulaire verbranding dan suikers. Omgekeerd betekent dit dat de productie van oliën en vetten een grote investering van metabole energie vragen.

De meeste vetten en oliën komen voor in de vorm van triaculglyceriden of triglyceriden waarin vetzuurmoleculen door een esterbinding gekoppeld zijn aan de drie hydroxylgroepen van glycerol.

34. Vraag

Schrijf de algemene reactie uit voor de vorming van triglyceriden uit glycerol en vetzuren.

Q



Behalve voor energieopslag worden vetten ook gevonden in membranen in de cel en zijn daarvan de belangrijkste bouwstenen. In membranen vinden we vooral fosfolipiden waarin aan het derde C-atoom van glycerol geen vetzuur maar een fosfaatgroep is gebonden.

8.2 Vetzuursynthese

De vetzuursynthese bestaat uit een cyclisch condensatieproces. Dit is een chemische reactie waarin een vetzuurketen steeds met twee C-atomen wordt verlengd. Acetyl CoA is de precursor. In planten worden vetzuren in de chloroplasten gesynthetiseerd, in dieren voornamelijk in het cytoplasma.

Van oliën en vetten die in planten worden gemaakt kan biodiesel gemaakt worden zoals beschreven in hoofdstuk 7 Brandstoffen voor het leven. Bedenk daarbij dat oliën en vetten zowel in hogere als in lagere planten (o.a. algen en wieren) gemaakt worden en gebruikt kunnen worden voor de productie.

9 Brandstoffen van de toekomst?

9.1 Food or Fuel?

Bij het ontwikkelen van alternatieven komen de termen ‘duurzaamheid’ en ‘hernieuwbaar’ steeds weer naar voren. Dat heeft betrekking op biobrandstof die gewonnen wordt uit biomassa van planten. Er kunnen verschillende soorten biobrandstof geproduceerd worden. Twee mogelijkheden zijn het meest nadrukkelijk in beeld, de vergisting van koolhydraten uit planten tot alcohol en de productie van biodiesel uit plantaardige oliën.

Op wereldschaal is de behoefte aan brandstof voor mobiliteit en elektriciteit $5 \cdot 10^9$ ton/jaar aan (droge!) biomassa.

35. Vraag

- a. Een industriële plantage (bv. een palmolie- of een suikerrietplantage) levert gemiddeld 10 ton/ha per jaar aan droge biomassa. Hoeveel hectare landbouwgrond zou nodig zijn om aan de wereldwijde behoefte aan brandstof te voldoen?
- b. De oppervlakte van Nederland is ongeveer 4×10^6 ha. De totale huidige oppervlakte aan tropisch regenwoud op aarde ongeveer 1000×10^6 ha. Vergelijk dat met je antwoord bij a.

Het is niet eenvoudig om op genoemde schaal biomassa voor brandstof duurzaam te produceren. Het zal immers gaan om het op grote schaal telen van dezelfde gewassen (monoculturen) waarvoor een enorm oppervlak aan extra landbouwgronden in cultuur moet worden gebracht. Dat zal leiden tot een verandering van ecosystemen. De kringloop van mineralen in een landbouwecosysteem is heel anders dan in een natuurlijk ecosysteem zoals het tropisch regenwoud. De bodem van bijvoorbeeld een tropisch regenwoud is doorgaans arm aan voedingsstoffen zoals N, P, K, Ca, Mg en S. Toch komen in een tropisch regenwoud zelden symptomen van mineralengebrek voor. Het zijn duurzame ‘steady-state’ ecosystemen waarin de meeste biomassa bovengronds gerecycled wordt. Als er op dezelfde gronden landbouw bedreven wordt heeft men echter regelmatig te maken met mineralendeficiëntie, opbrengstvermindering of vatbaarheid voor ziekten en plagen. Dat is veelal een gevolg van (een combinatie van):

- verminderde hoeveelheden organische stof in de bodem
- slechte bodemstructuur
- erosie
- arm bodemleven (lage bodembiodiversiteit)
- mineralendeficiëntie (bemestingsniveau).

Een ander aspect van duurzaamheid is de biomassa-input die nodig is om biomassa te kunnen produceren. Het bewerken van landbouwgronden, het produceren van meststoffen, het verwerken van de geoogste (ruwe) biomassa, het vervoeren van de biomassa etc. kost energie en daarmee biomassa. Op dit moment kost het produceren van biodiesel uit gewassen als soja, koolzaad en zonnebloem meer energie dan het oplevert! Voor de productie van ethanol uit suiker (5500 liter alcohol/ha suikerriet) of biodiesel uit palmolie ligt deze verhouding gunstiger. Er zal dus steeds kritisch gekeken moeten worden naar de kosten en baten van biomassaproductie. Dat de productie van biobrandstoffen energie kost is natuurlijk niet raar. Bedenk dat het winnen van olie of gas uit de ondergrond, het raffineren van olie, het transport etc. ook energie kost. Een tekort aan olie kan leiden tot een ‘landbouwcrisis’ waarin de productie van biomassa voor brandstof in conflict komt met de voedselproductie. In 2007 liepen de gemoederen in Mexico al hoog op omdat de prijs van maïsmeel (waar de Mexicanen tortilla's van bakken) omhoog ging. Er werd gesuggereerd dat dit een gevolg was van de enorme vraag naar maïs in de Verenigde Staten voor vergisting tot bioethanol.

36. Duurzaam en hernieuwbaar

Wat wordt er bedoeld met de termen ‘duurzaam’ en ‘hernieuwbaar’? Geef voorbeelden van duurzame energiebronnen en hernieuwbare energiebronnen.

‘Europa zet rem op biobrandstof’

Lees het krantenartikel ‘Europa zet rem op biobrandstof – belandt te veel voedsel in de tank’ uit de NRC van 11-09-2013 (zie ► [URL15](#)). De volgende opdrachten gaan over dit artikel.

37. Europese commissie

Waarom wil de Europese commissie een rem op biobrandstoffen?

38. Prijsstijgingen

- Van welke gewassen kan biodiesel gemaakt worden?
- Welke voedingsstoffen zijn duurder geworden?
- Wat kan, behalve de prijs, een probleem zijn voor de voedingsmiddelenindustrie?
- Welke andere oorzaken worden genoemd voor de gestegen prijzen?

39. Bioethanol

- Waarom wordt in Amerika vooral bioethanol gemaakt?
- Waarmee concurreert de productie van bioethanol?

40. ‘Nieuwe’ grond

Het verbouwen van gewassen voor biobrandstof gaat ten koste van het verbouwen van voedingsgewassen. Of er moet nieuwe grond voor landbouw in gebruik genomen worden.

- Waar gebeurt dat bijvoorbeeld?
- Waar komt die ‘nieuwe’ grond vandaan, denk je?

41. Productie plantaardige oliën

Als alle landen de doelstelling van de Europese commissie overnemen, wat betekent dat dan voor de productie van plantaardige oliën als je het vergelijkt met de productie nu?

42. Productie biobrandstoffen

Vind jij dat Nederland moet kiezen voor het stimuleren van de productie en het gebruik van biobrandstoffen? Welk argument is voor jou daarbij het belangrijkste?

Q

9.2 De gevolgen van de grootschalige productie van biobrandstoffen voor het broeikaseffect

In het NRC-artikel heb je kunnen lezen wat het gevolg is van het verbouwen van landbouwgewassen voor de productie van biobrandstoffen in plaats van het telen van voedselgewassen. De prijs van grondstoffen voor de productie van voedingsmiddelen verdubbelde en dat leidde al verschillende keren tot protesten van consumenten. De grote vraag is dan ook, is het telen van landbouwgewassen om biobrandstoffen te produceren wel verstandig? Dragen biobrandstoffen wel bij aan het terugdringen van het broeikaseffect?

Je hebt hierboven kunnen lezen dat het in cultuur brengen van extra landbouwgronden een groot effect zal hebben op bestaande ecosystemen. De kringloop van mineralen in een landbouwecosysteem is anders dan in een natuurlijk ecosysteem. Er bestaan rekenmodellen waaruit het effect blijkt van het in cultuur brengen van regenwouden, savannen, tropische veengebieden en prairies. Wat blijkt is dat als gevolg van het in cultuur brengen van een natuurlijk ecosysteem in eerste instantie een enorme hoeveelheid extra CO₂ vrijkomt. De koolstofvoorraad die in honderden jaren is opgebouwd komt door het bewerken van de nieuwe akkers (ploegen en eggen) vrij als CO₂ in de atmosfeer. In de rekenmodellen wordt hiervoor veelal een periode van 50 jaar gekozen. Dat is echter willekeurig, het kan in werkelijkheid korter of langer zijn dan 50 jaar. De volgende vraag is dus hoe lang het duurt voor deze extra uitstoot van CO₂ gecompenseerd

wordt door de teelt van energiegewassen. Dat hangt af van het energiegewas en het 'opgeofferde' natuurlijk ecosysteem en varieert. Dit kan 17 jaar zijn zoals voor suikerriet geteeld in opgeofferde Braziliaanse savanne tot meer dan 400 jaar voor oliepalmen geteeld in ontgonnen tropische veengebieden in Maleisië.

Er zal dus nadrukkelijk gezocht moeten worden naar alternatieven.

10 Experiment: eigenschappen van chlorofyl

10.1 Inleiding

Chlorofyl is het meest voorkomende fotosynthetisch pigment. In hoofdstuk 7 Brandstoffen voor het leven van het theorie-deel heb je kennisgemaakt met de achtergronden van fotosynthese.

10.2 Doel

Het doel van de proeven in de hoofdstuk is: aanwezigheid en energiebindende eigenschappen van fotosynthetische pigmenten aantonen. Dit hoofddoel is in de volgende subdoelen verwoord:

- aanslaan chlorofyl (zie proefbeschrijving in ‘chlorofylmolecuul aanslaan’)
- elektronen van een chlorofylmolecuul zichtbaar in een hogere energietoestand brengen (‘aanslaan’)
- lichtabsorptie door bladgroen(extract) kwalitatief bepalen
- absorptiespectrum van bladgroen kwantitatief bepalen
- aantonen van verschillende bladgroenpigmenten met behulp van chromatografie (zie proefbeschrijving in §10.5 ‘Het scheiden van bladpigmenten met chromatografie’).

10.3 Werkwijze

Lees eerst de te volgen handelingen goed door, beschrijf het principe van de proef en stel een hypothese op met betrekking tot de te verwachten resultaten.

Bladgroenextract

Voor alle proeven uit dit hoofdstuk is bladgroenextract nodig. Dat maak je als volgt:

- Neem 400 gram (gehakte, diepgevroren) spinazie en vermaal deze in een mengkom met blender of staafmixer tot extra fijne pulp.
- Verdeel de bladpulp in 4 gelijke porties. (Drie porties geblenderte spinazie kunnen worden ingevroren om later weer te worden gebruikt.)
- Vermeng één portie (ongeveer 100 gram) 1:1 met aceton in een afsluitbare glazen pot van 200 ml.
- Laat het geheel 48 tot 72 uur bij kamertemperatuur staan.
- Filtreer met een theezeef het organische materiaal uit het verkregen aceton-chlorofyl extract. Het overgebleven organisch materiaal wordt verzameld in een glazen pot (100 ml) en gebruikt om bladgroenpigment door chromatografie aan te tonen. Het materiaal is ingevroren een jaar houdbaar. Etiketteer, beschrijf en dateer het verkregen pulpmateriaal. Zie verder proef ‘Het scheiden van bladpigmenten met chromatografie’.
- Het verkregen extract wordt gefiltreerd over een papierfilter om de laatste grove organische deeltjes te verwijderen. Het filtraat is in de koelkast ongeveer een week bruikbaar om lichtabsorptie door fotosynthetische pigmenten aan te tonen. Etiketteer, beschrijf en dateer het verkregen extractmateriaal. Zie verder proef ‘Chlorofylmolecuul aanslaan’.

10.4 Proef: chlorofylmolecuul aanslaan

Chlorofyl ‘aanslaan’

- Bekijk de pot met het aceton/bladgroenextract bij daglicht. Noteer de waarnemingen.
- Richt een krachtige lichtbron (diaprojector of sterke lamp) op de pot met het aceton/bladgroenextract. Observeer en noteer nu de veranderingen in intensiteit en kleur van het aceton/bladgroenextract.

Stel de pot niet (lang) bloot aan (lamp)warmte. De pot is voor een groot deel gevuld met aceton. Let daarom goed op de veiligheidsregels rondom het gebruik van aceton.

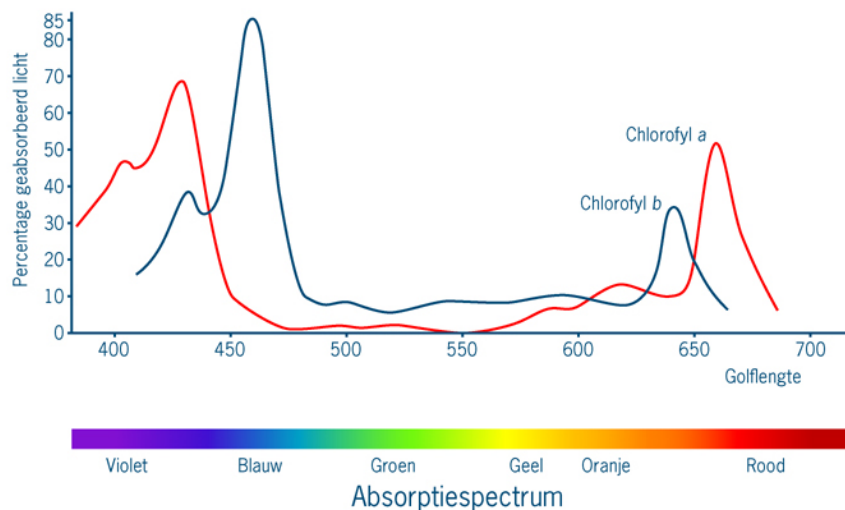
43. Vraag

- Verklaar het waargenomen fenomeen. Gebruik in de verklaring de woorden molecuul, energie en golflengte.
- Is er verschil in reactie op het licht tussen het door de lamp direct aangelichte deel van de pot en het niet direct aangelichte deel (de achterzijde) van de pot?
- Kun je bovenstaande waarneming verklaren als je denkt aan caroteen en xanthofiel?

Q

Lichtabsorptie door bladgroen(extract)

- Neem een extra grote cuvet van glas. Volumemaat van ongeveer 5x5x1 cm. Mocht je deze niet hebben dan kan je er één 'plakken' uit 5 objectglaasjes (4 wanden en een bodem) en siliconenkit.
- Maak een opstelling (optische balk) bestaande uit: een sterke lichtbron met spleetdia en loodrecht op de lichtbron achtereenvolgens de glascuvet, een prisma en een wit projectiescherm/witte muur.
- Laat het licht door het prisma uiteenvallen in het te verwachten lightspectrum. Controleer of alle kleuren aanwezig zijn.
- Breng nu aceton in de glascuvet. Observeer en noteer het effect van aceton op het spectrum. (Kunststof cuvetten etsen o.i.v. aceton, vandaar het gebruik van de glascuvet.)
- Vervang de aceton in de glascuvet door het aceton/bladgroenextract. Observeer en noteer het effect van het bladgroenextract op het spectrum.



Afbeelding 34: absorptiespectrum van bladgroen

44. Vraag

- Wat is het verschil tussen het spectrum van aceton en dat van het aceton/bladgroenextract?
- Welke kleuren worden (het sterkst) geabsorbeerd door het aceton/bladgroenextract? Verklaar je waarnemingen.

Q

Absorptiespectrum van bladgroen

- Bepaal m.b.v. een (spectro)fotometer bij zoveel mogelijk golflengtes (λ 430, 470, 565 en 635 nm) de transmissie (0 - 100%). Gebruik glazen cuvetten 1x1x4 i.v.m. de agressieve werking van aceton op kunststofcuvetten. Werkwijze volgens de aanwijzingen bij en/of handleiding van de (spectro)fotometer.
- Noteer de resultaten overzichtelijk in een tabel en teken een grafiek.
- (Extra: Maak een transmissiespectrum van andere soorten bladeren, vergelijk de resultaten en probeer eventuele verschillen te verklaren.)

10.5 Proef: het scheiden van bladpigmenten met chromatografie

Bladgroenpigmenten chromatografie (kwalitatief)

- Breng onderaan de strook chromatografiepapier een ruime hoeveelheid aceton/bladgroenpulp aan. Laat deze pulp volledig indrogen op het papier.
- Breng in een reageerbuis 2 ml loopvloeistof.
- Laat de strook chromatografiepapier met ingedroogde bladgroenpulp tot net in de loopvloeistof zakken.
- Plaats de reageerbuisdop zodanig dat het chromatografiepapier vaststaat zet (en in de loopvloeistof staat)
- Na 30 minuten zijn de aanwezige pigmenten gescheiden.
- Noteer en verklaar je waarnemingen en bevindingen (vergelijk eventueel met controle-chromatogram van bekende bladgroenpigmenten).

45. Vraag

Uit hoeveel en uit welke bladgroenpigmenten bestaat het chromatogram?

Q

11 Experiment: Biodiesel

11.1 Biodiesel uit zonnebloemolie bereiden

Algen zijn in staat om 30% van hun biomassa in olie om te zetten. Wil je echter 1 liter olie produceren met de hele klas, dan heb je minimaal 3.3 liter aan biomassa nodig. Het duurt eventjes voordat je dat in een petflesje hebt opgekweekt. Daarom gebruiken we voor dit experiment zonnebloemolie i.p.v. olie uit algen, voor het maken van biodiesel.

Uitvoering

Voer het experiment in de zuurkast uit. Droog de vaste NaOH voor 24 uur in een oventje op 100 °C (misschien dat de TOA/leraar dit al voor je heeft gedaan). Al het water in de vaste stof moet verdampt zijn, anders reageert het mee in de reactie.

Zet de opstelling klaar. Voeg de 100 ml zonnebloemolie, de 0.35g NaOH en de 20 ml methanol langzaam aan de kolf toe. Roer het mengsel bij constante temperatuur, 65 °C, voor één uur.

Koel het mengsel na één uur. Er zullen twee lagen ontstaan. Scheid de twee lagen met behulp van een scheidtrechter. Laat de bovenste laag in de scheidtrechter zitten en was het mengsel drie keer met 0.15M azijnzuur. Giet het mengsel af en voeg magnesium sulfaat toe. Laat het mengsel overnacht staan, zodat al het water uit de ontstane biodiesel wordt getrokken door het magnesium sulfaat. Filter de volgende dag het mengsel af en weeg de hoeveelheid biodiesel die je uit deze reactie verkregen hebt.

Maak een verslag van je experiment.

Vraag aan je leraar of je de biodiesel kunt verbranden. Doe dit onder toezicht van je leraar en vraag naar de veiligheidsvoorschriften.

46. Vraag

- a. Geef het reactieschema van de omzetting van zonnebloemolie in biodiesel
- b. Hoe wordt deze reactie ook wel genoemd?
- c. Welke rol spelen NaOH en methanol in deze reactie
- d. Waarom voeg je magnesium sulfaat toe?
- e. Hoeveel biodiesel kun je maken uit een liter zonnebloemolie?
- f. Stel dat je evenveel biodiesel uit algenolie zou verkrijgen. Hoeveel algenolie heb je nodig om je reis naar Amerika te kunnen vergoeden?
- g. Hoeveel biomassa is dat?

Q

Bijlage: URL-lijst

- **URL1 Kennislink**

<http://www.kennislink.nl/web/show?id=118424>

Dossier: Broeikaseffect - vriezen of smoren

- **URL2 NASA Earth Observatory**

http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=51289&eoan=image&eoic=related_image

Dit is een link naar kaarten waarvan de netto primaire productie, een andere naam voor CO₂-fixatiesnelheid, kan worden afgelezen.

- **URL3 The Global Carbon Cycle**

<http://www.scopenvironment.org/downloadpubs/scope13/chapter05.html>

Een overzicht van de jaarlijkse CO₂-accumulatie door verschillende ecosystemen.

- **URL4 Trucks episode - making biodiesel**

<http://www.youtube.com/watch?v=LR1M7ThM-tE>

>bekijk de videofilm

- **URL5 Het Klokhuis**

<http://www.hetklokhuis.nl/onderwerp/fotosynthese>

>bekijk de aflevering 'Fotosynthese'

- **URL6 Biologiesite voor het voortgezet (secundair) onderwijs**

<http://www.bioplek.org/animaties%20onderbouw/fotosyntheseonderb/fotosynthese.html>

>bekijk fotosynthese

- **URL7 Biologiesite voor het voortgezet (secundair) onderwijs**

<http://www.bioplek.org/animaties/fotosynthese/lichtreactie.html>

- **URL8 Biology, Online Learning Center**

http://highered.mcgraw-hill.com/sites/0072437316/student_view0/chapter10/animations.html#

> bovenste link op die website

- **URL9 Virtual Cell Animation Collection, Molecular and Cellular Biology Learning Center.**

<http://vcell.ndsu.nodak.edu/animations/photosystemII/index.htm>

>bekijk eerst de 'first look' en de 'advanced look' om aan de Engelse termen te wennen en bekijk vervolgens de animatie.

- **URL10 Virtual Cell Animation Collection, Molecular and Cellular Biology Learning Center.**

<http://vcell.ndsu.nodak.edu/animations/photosynthesis/movie.htm>

Photosynthesis: the movie

- **URL11 ATP Synthase**

<http://www.stolaf.edu/people/giannini/flashanimat/metabolism/atpsyn1.swf>

- **URL12 ATP Synthase**

<http://www.stolaf.edu/people/giannini/flashanimat/metabolism/atpsyn2.swf>

- **URL13 Virtual Cell Animation Collection, Molecular and Cellular Biology Learning Center.**

<http://vcell.ndsu.nodak.edu/animations/atpgradient/movie.htm>

ATP Synthase Gradient: the movie

- **URL14 Virtual Cell Animation Collection, Molecular and Cellular Biology Learning Center.**

<http://vcell.ndsu.nodak.edu/animations/etc/movie.htm>

Electron Transport Chain: The Movie

- **URL15 NRC.nl**

<http://www.nrc.nl/nieuws/2013/09/11/europees-parlement-zet-rem-op-biobrandstof-belandt-te-veel-voedsel-in-de-tank/>