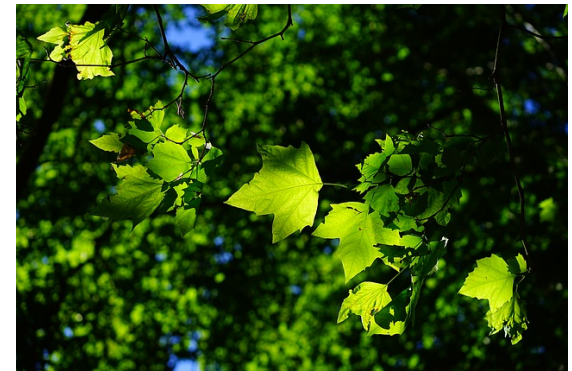


FOTOSYNTESE

Fotosyntese er biologiens udnyttelse af solens energi. Igennem fotosyntese får vi dannet potentiel kemisk energi i form af sukker, som andre organismer kan bruge til senere forbrænding og produktion af energi.

Fotosyntesen er afgørende for stofskiftet hos det første liv på Jorden, og gennem produktionen af oxygen ændrer det atmosfæren i sådan en grad, at andre større organismer har mulighed for at opstå.

Fotosyntese



- Gennem fotosyntese kan molekyler i levende organismer omdanne carbondioxid og vand til carbonhydroxider (sukker) og oxygen
- Denne proces kræver energi (endotermisk), som fotosyntetiske organismer får fra solens lys
- Fotosyntesen giver både organismen en energikilde og en carbonkilde til brug i dens stofskifte

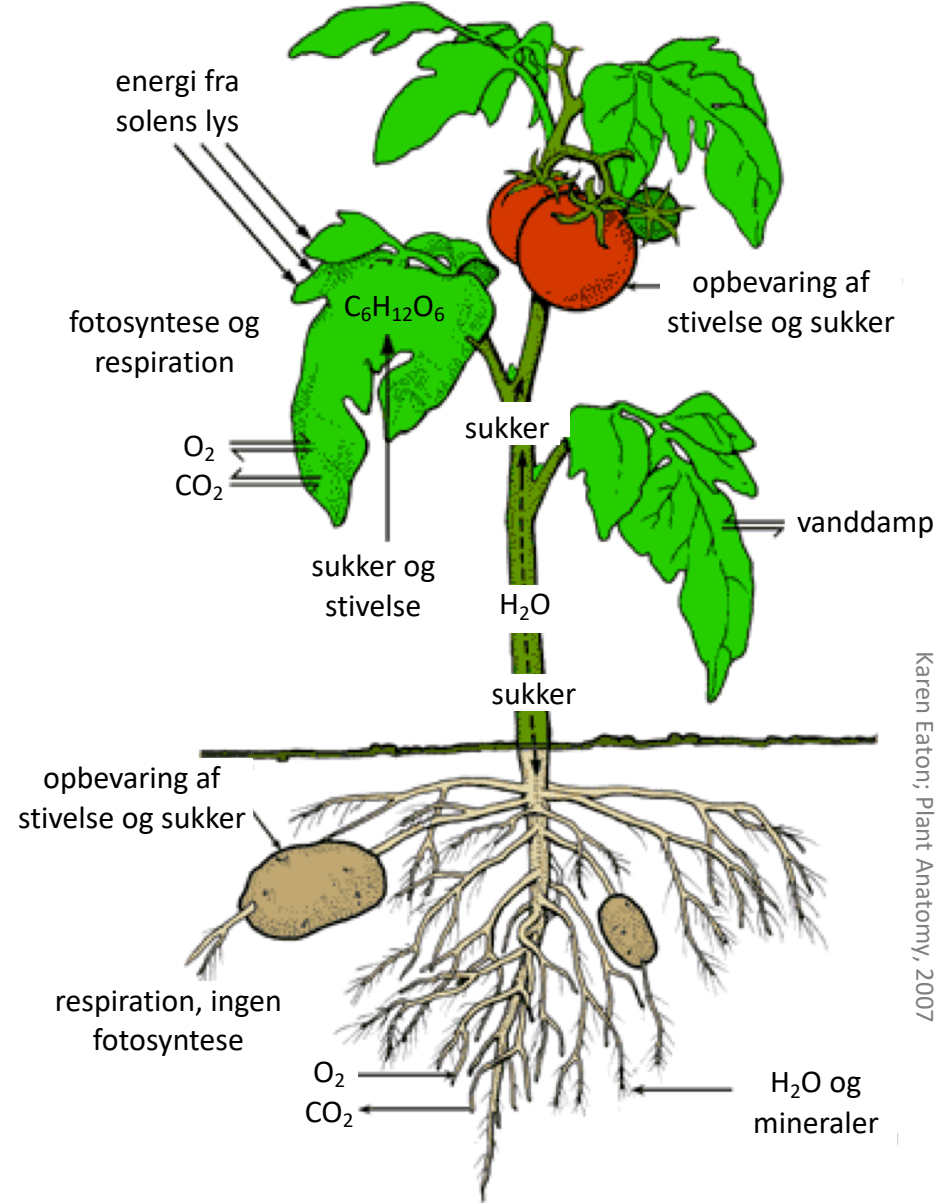


Den fulde proces for fotosyntese er en kompliceret række af kemiske forbindelser, hvoraf vi normalt kun beskæftiger os med ovenstående resulterende reaktion.

Med fotosyntese indfanger fotosyntetiske organismer fire fotoner med to forskellige fotosystemer og spalter vand. Energien kanaliserer de over til et andet enzym (rubisco), som spalter C'et fra CO₂ så O₂ falder fra og C'et kan sættes på et vandmolekyle.

Lagring af energi

- Fotosyntese sker i planters blade (og generelt alle grønne dele)
- Den dannede sukker og stivelse bliver brugt til opbygning af planten
- Overskuddet af sukker lagres i særlige dele af planten



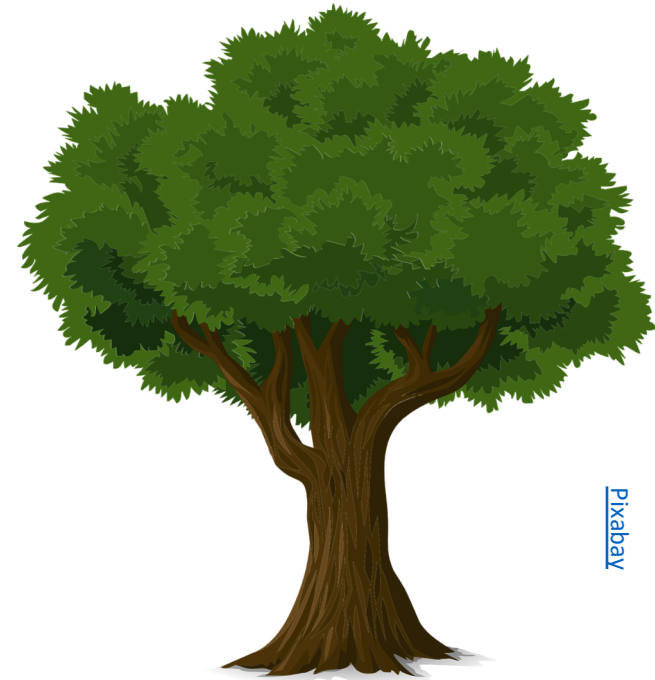
Planter lagrer energien på forskellige måder med forskelligt resultat. Nogle planter lagrer energien til senere brug, andre har en fordel af at producere bær og frugter som andre organismer (dyr) er interesserede i at spise og er dermed med til at sprede plantens afkom til fjernere egne

Udnyttelse af fotosyntese



Cyanobakterie, Wikimedia Commons

- Levende organismer har brug for energi til deres stofskifte
- Tilgængelige energikilder tidligt i Jordens udvikling:
 - Jordens indre (varme): 0.1 W/m^2
 - Solens stråler (lys): 340 W/m^2
- Da cyanobakterierne, som de første, udviklede muligheden for at udnytte fotosyntese, fik de lige pludselig meget bedre vilkår for at leve og formere sig og introducerede en stor mængde af oxygen til atmosfæren
- Med udviklingen af mere avanceret liv fulgte evnen til at udføre fotosyntese med, og er den primære energikilde for planter på Jorden

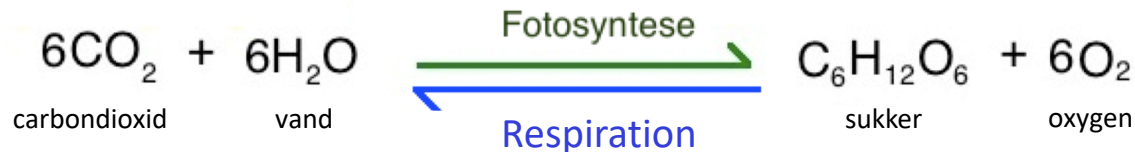


Pixabay

Vand indtages igennem planterers rødder og bruger carbondioxid fra luften omkring dem til at syntetisere glukose (sukker) og oxygen. Fordi omdannelsen af carbondioxid og vand til sukker og oxygen kræver energi, har planter brug for en energikilde - og her træder solen ind der er Jordens energikilde.

Mere effektiv stofskifte

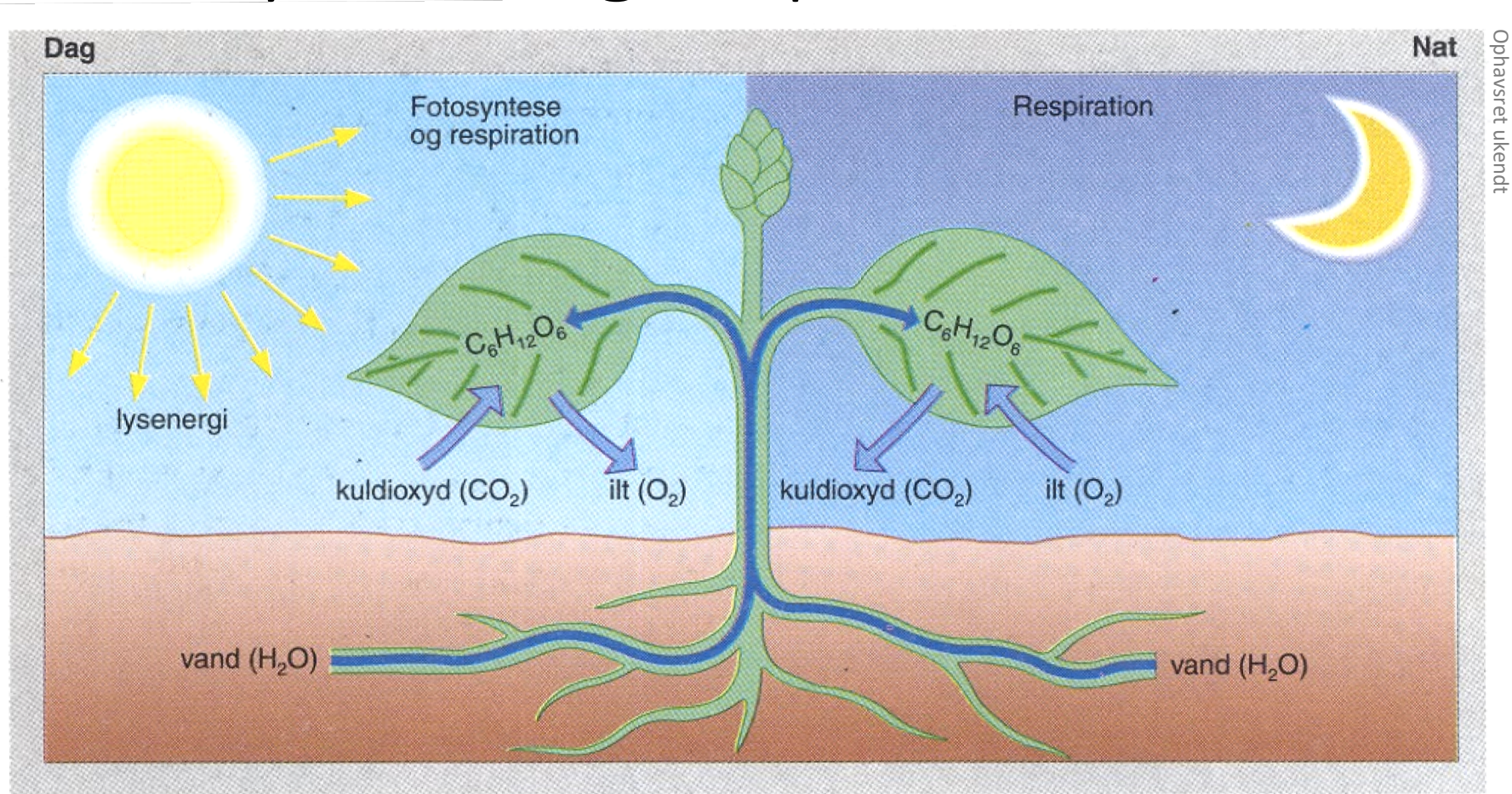
- Da mere komplekse organismer udviklede muligheden for at optage andre organismer, kunne de ved hjælp af oxygen i atmosfæren benytte sig af respiration
- Respiration udnytter den lagrede energi i sukkeret (og forløber som den omvendte proces)
- Respiration giver den mest effektive produktion af energi, hvilket gør det muligt for dyr at vokse sig til store organismer der har behov for en stor mængde energi



Energi kan komme i mange former; termisk, elektrisk, kinetisk, potentiel eller kemisk energi som er gemt i mad. Dyr kan spise planter for at få adgang til deres sukker og dermed energi som kan bruges i alle dele af organismens liv (fra stofskifte til bevægelses energi).

Læs mere om udviklingen af stofskifte i materialet om 'Det Tidligste Liv'.

Fotosyntese og respiration



Planter i dag benytter sig også af respiration, særligt til at holde stofskiftet kørende om natten, hvor der er for lidt lys til at fotosyntesen kan producere nok energi.

Planter gemmer altså solens energi i form af sukkerdepoter som de herefter nedbryder for at bruge den kemiske energi gemt i sukkeret. Planter trækker også vejret.

Respiration og forbrænding

- Respiration er bare en måde at forbrænde energien lagret i organisk materiale
- Hvis man brænder fx træ kræver det også O_2 og danner CO_2
- Ved nedbrydningen af carbonhydraterne udledes energi, da det er en exotermisk proces
- Dette kan vi se som flammer når gas eller træ brændes af



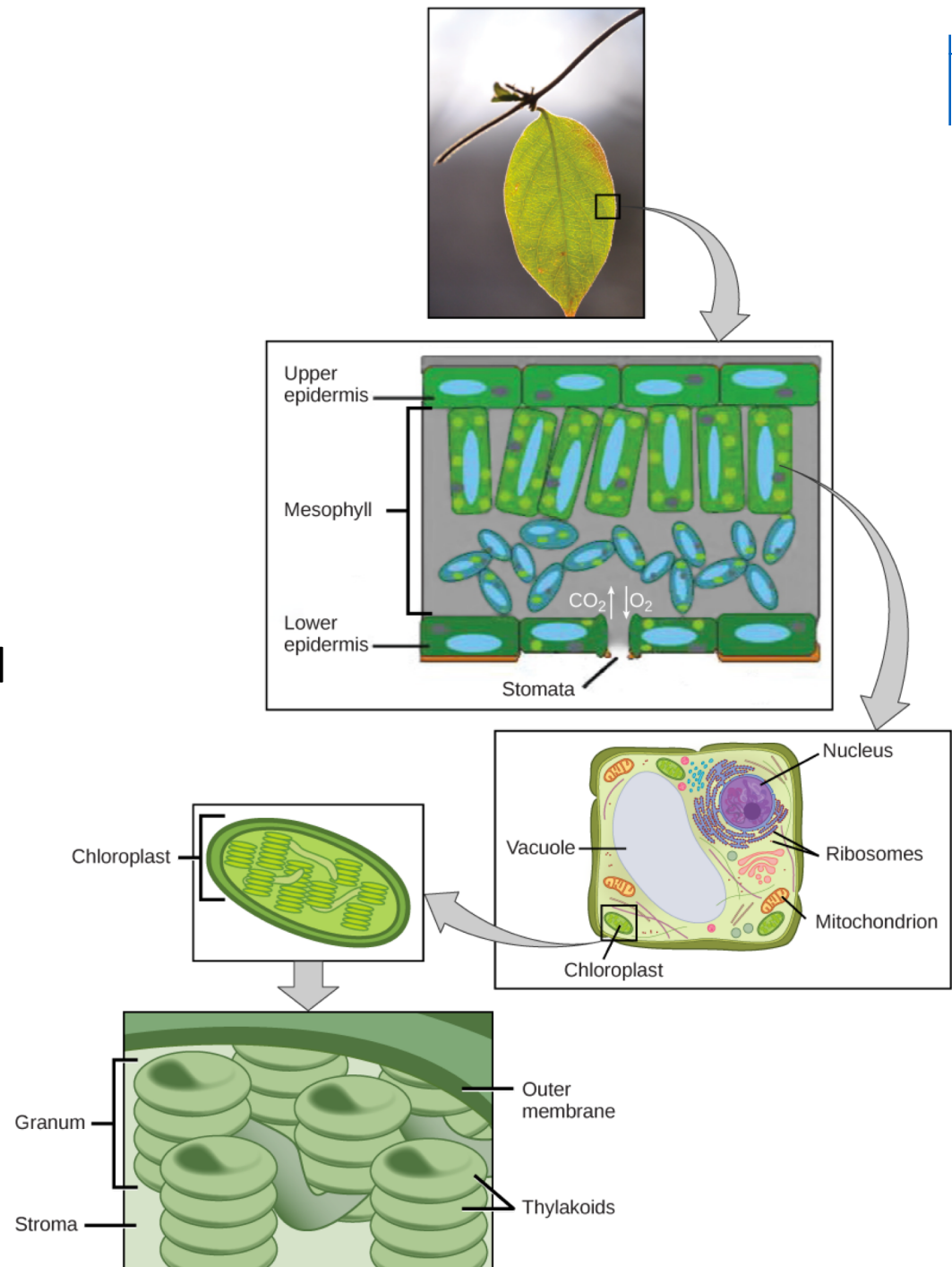
pixabay

Det ser godt nok sejt ud når en person spyer ild, men der kan kun opstå flammer hvis der er overskud af energi. Og det illustrerer på smukkeste vis at der er energi lagret i carbonhydrider (plantemateriale), som bliver frigivet når det går i forbindelse med oxygen.

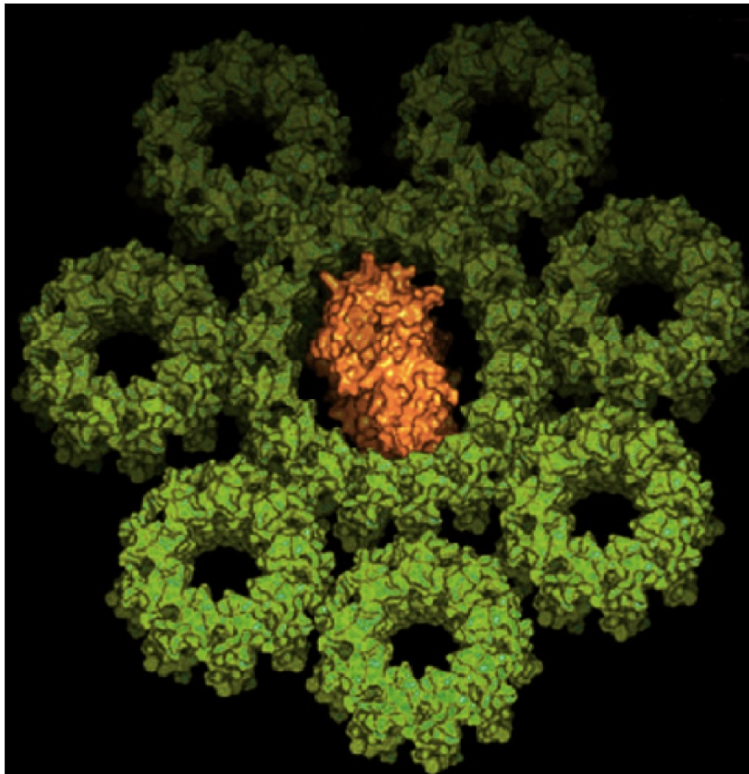
For mennesker sker dette oxygenoptag i lungerne, hvorfra det sendes til fx musklerne hvor nedbrydningen af lagrede carbonhydrider gør at man kan bevæge sig. Restproduktet af carbondioxid og vand tages tilbage igennem lungesystemet og udåndes igen. Planter har ikke et åndetrætsorgan, men optager i stedet oxygen diffusivt.

Kloroplast

- Planter består som alt andet liv af celler
- Planteceller har også specialiseret sig og det er særligt inde i bladene at fotosyntese foregår
- I plantecellerne er det ved hjælp af organellen kloroplast (grønkorn) at fotosyntese bliver muligt
- Fotosyntesen foregår i dele af kloroplasten, kaldet stroma
- Udvinning af energi fra lyset sker i lyshøstende komplekser i thylakoiderne



Lyshøstende kompleks



lyshøstende kompleks

10 nm

Figure 18.25b *Physical Biology of the Cell, 2ed.* (© Garland Science 2013)

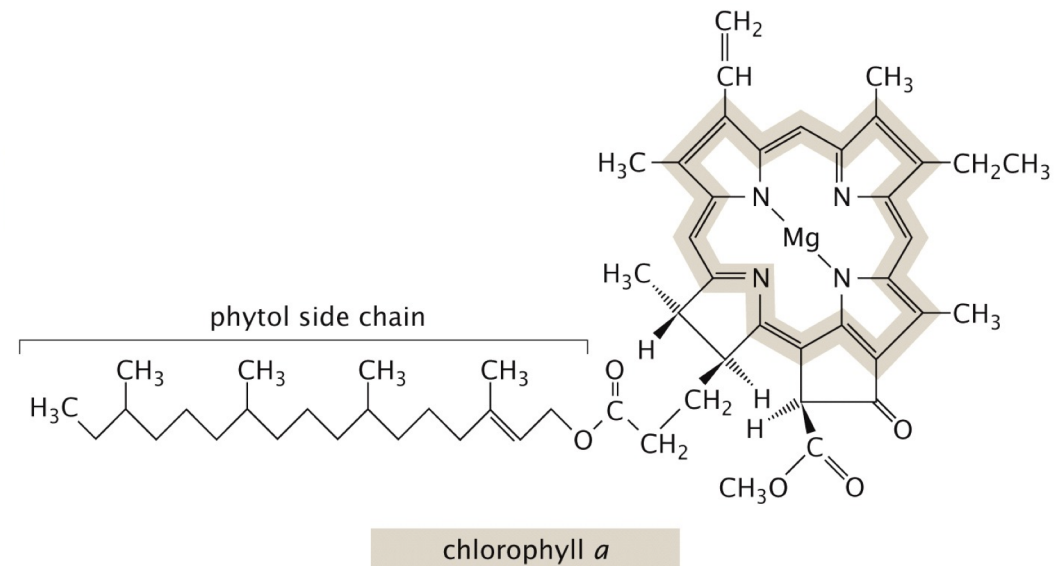


Figure 18.13a *Physical Biology of the Cell, 2ed.* (© Garland Science 2013)

Billedet til venstre er et eksempel på et lyshøstende kompleks (denne udgave fundet i fotosyntetisk bakterie). Billedet er dannet ved at kombinere viden om proteinstrukturene i komplekset med et billede af kompleksetsstruktur ved hjælp af et atomart tryk mikroskop.

Det orange er reaktionscentret hvor energiomdannelsen finder sted. Den grønne del består af en masse klorofyl-molekyler. Den kemiske beskrivelse af klorofyl *a* er vist til højre. Komplekset er ikke mere end 20 nm i diameter og illustrerer at disse energicentre i planter er gevaldigt små, og alligevel er de anledningen til de carbonhydrater vi spiser.

Klorofyl og andre molekyler

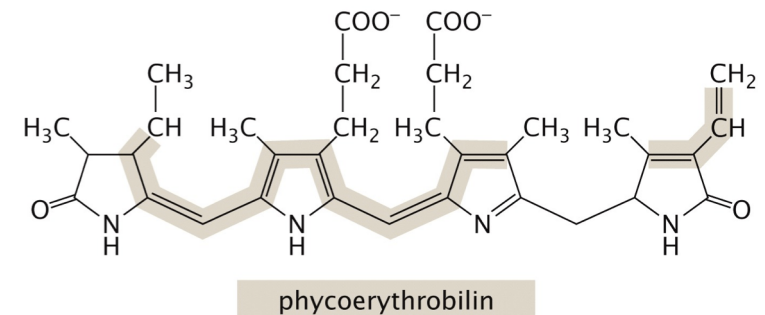
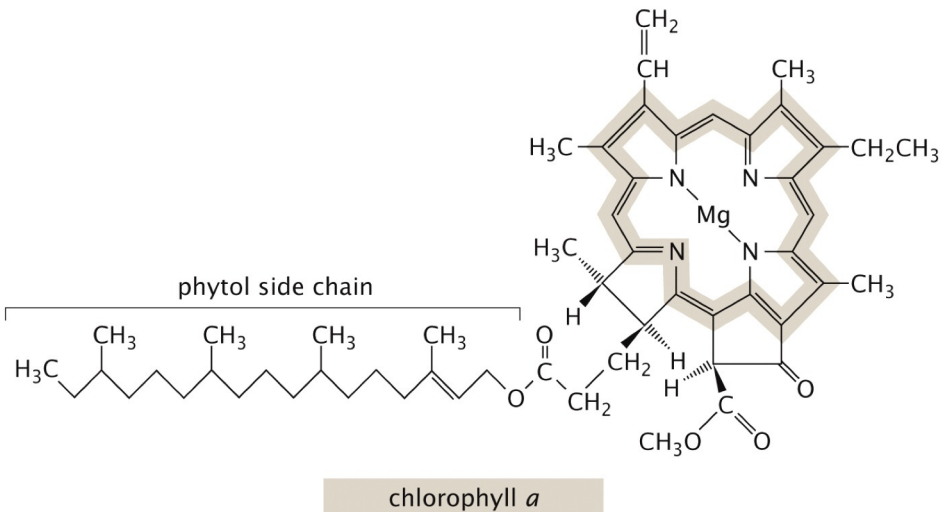


Figure 18.13c Physical Biology of the Cell, 2ed. (© Garland Science 2013)

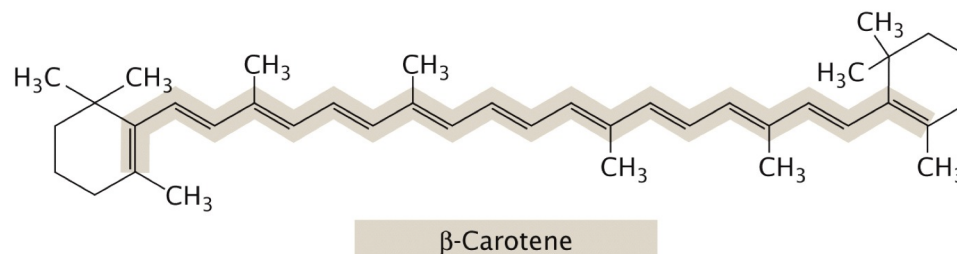


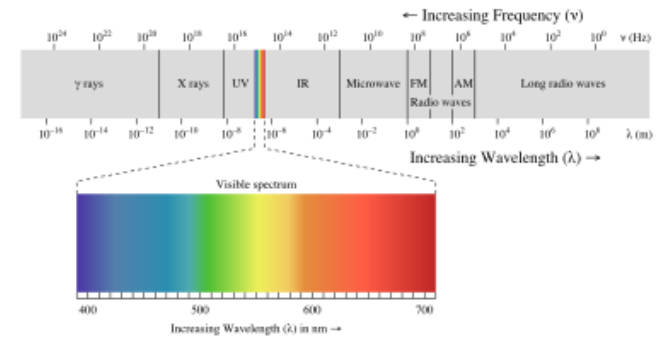
Figure 18.13b Physical Biology of the Cell, 2ed. (© Garland Science 2013)

Der eksisterer et væld af lysabsorberende molekyler, der hver fanger en del af solens spektrum. Her vises tre eksempler, hvor klorofyl a (og b) er mest almindelig og giver planter deres grønne farve.

Beta-carotene finder man også i nogle planter og giver den orange røde farve til frugt og grønt.

Det sidste molekyle kommer fra den (formodede) første fotosyntetiske organisme; cyanobakterien.

Fotosyntese og sollys



- De forskellige lysabsorberende molekyler udnytter hver en bid af solens spektrum
- Den mørke rød linje angiver solens spektrum efter absorption i atmosfæren
- Alle de lysabsorberende molekyler optager alle sammen elektromagnetisk stråling svarende til synligt lys, da det er den del af solens spektrum som der er mest af ved Jordens overflade
- De bølgelængder der ikke absorberes bliver reflekteret og er med til at give planten farve efter hvilke molekyler der er flest af

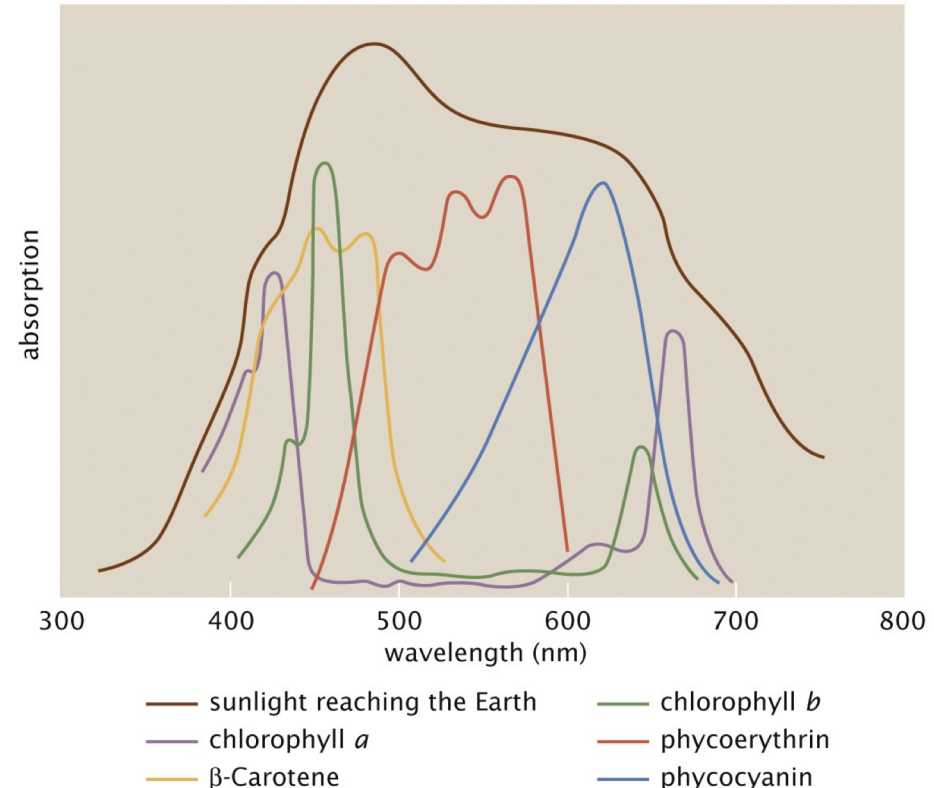


Figure 18.13d Physical Biology of the Cell, 2ed. (© Garland Science 2013)

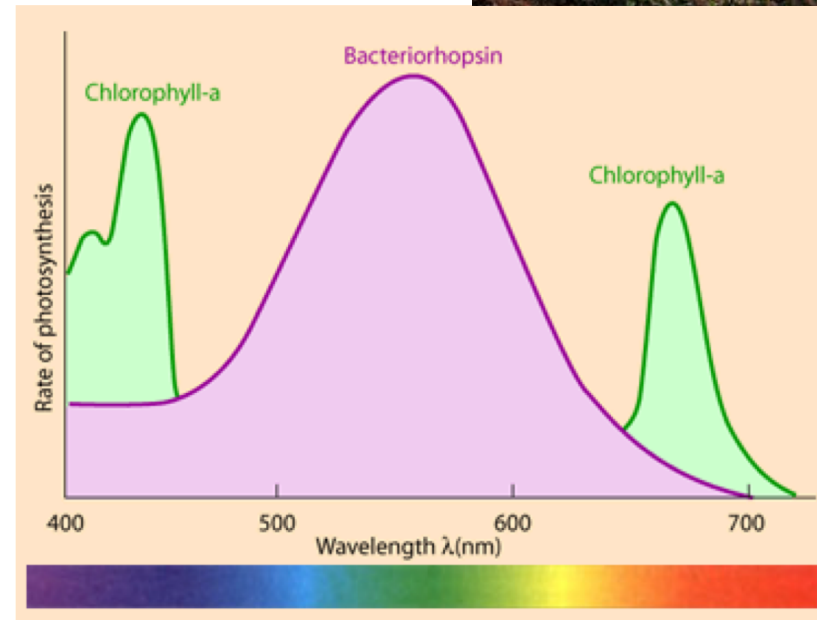
Klorofyl a og b ligger tæt ovenpå hinanden, og lyset det opfanger strækker sig over rød og blå. Beta-carotene kan optage bølgelængder omkring den blå-grønne del og ser herved orange rød ud, da det er den del af spektret der bliver reflekteret. Dette er grunden til farven på f.eks.. gulerødder.

Phycoerythrobilin går sammen til komplekset phycoerythrin som ses hos rødalge familien og hos cyanobakterier. Man kan se at deres absorption ligger over cyan, grøn til orange og tager herved det midterste spektrum. Alt i alt dækker de til sammen spektret fra solen godt.



Hvorfor grønne planter?

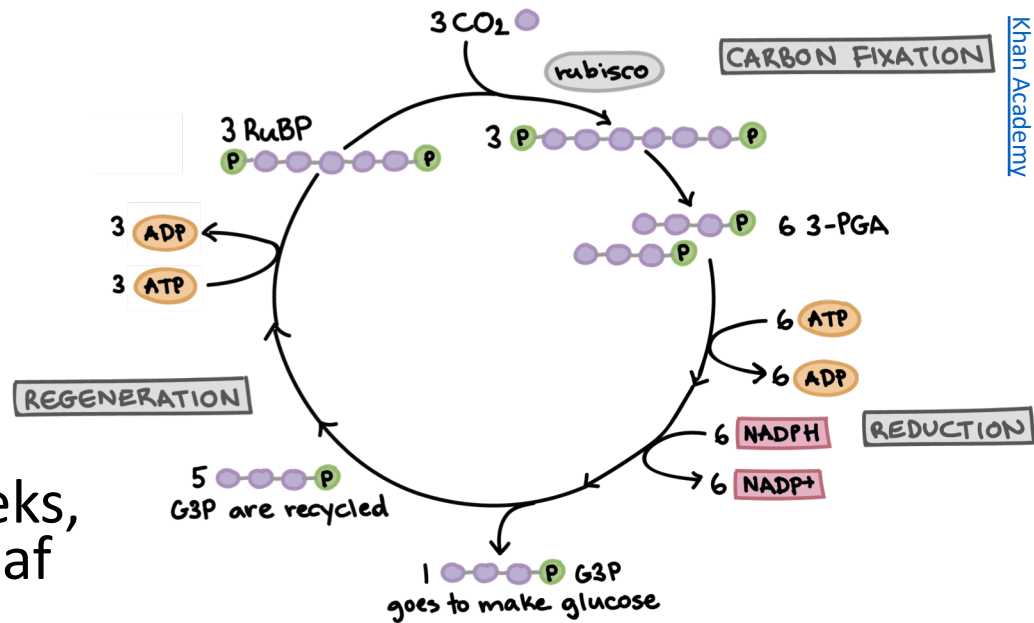
- Det grønne lys fra solen har den kraftigste intensitet ved Jordens overflade
- Men langt de fleste planter er grønne, hvilket betyder at de netop IKKE absorberer grønt lys
- Det er endnu ikke afklaret hvorfor de grønne planter har klaret sig bedre, på trods af de ikke udnytter solens lys fuldt ud



En teori fra Moore (1970'erne) går på at bestemte arter af arkæer, der indeholdt bacteriorhodopsin, har levet højere i vandlagene dengang fotosyntese kom til og da bacteriorhodopsin ligesom phycoerythrin opfanger den midterste del af spektret, var der kun det røde og blå til overs til organismene nedeunder, som derfor måtte benytte sig af klorofyl.

En anden teori går på at udviklingen af fotosyntese skete langt under havoverfladen, hvor hovedsageligt blå lys når ned, og derfor var denne bølgelængde specielt vigtig.

Calvin cyklus



- Med energi udvundet fra solens lys ved hjælp af det lyshøstende kompleks, kan den kemiske reaktion af CO₂ og vand finde sted
- Dette sker gennem Calvin cyklussen som foregår i tre stadier:
 - **Carbonfæstning:** CO₂ fæstnes på RuBP (molekyle med 5 carbon atomer) ved hjælp af enzymet rubisco, og det skabte molekyle splittes i to molekyler med 3 carbon atomer (3-PGA)
 - **Reduktion:** Energi i form af ATP og NADPH bruges til at omdanne 3-PGA til sukkerkæden G3P. Nogle af disse bruges til at danne glukose, mens resten genbruges i cyklussen
 - **Regeneration:** Energi i form af ATP bruges til at gendanne RuBP så cyklussen kan starte forfra

ATP og NADPH molekylerne der giver mulighed for at transportere den energi der er produceret fra solens lys i de lyshøstende komplekser i thylakoiderne til stroma i kloroplast hvor Calvin cyklussen finder sted (men yderligere detaljer om energimolekylerne skal ikke gives her)

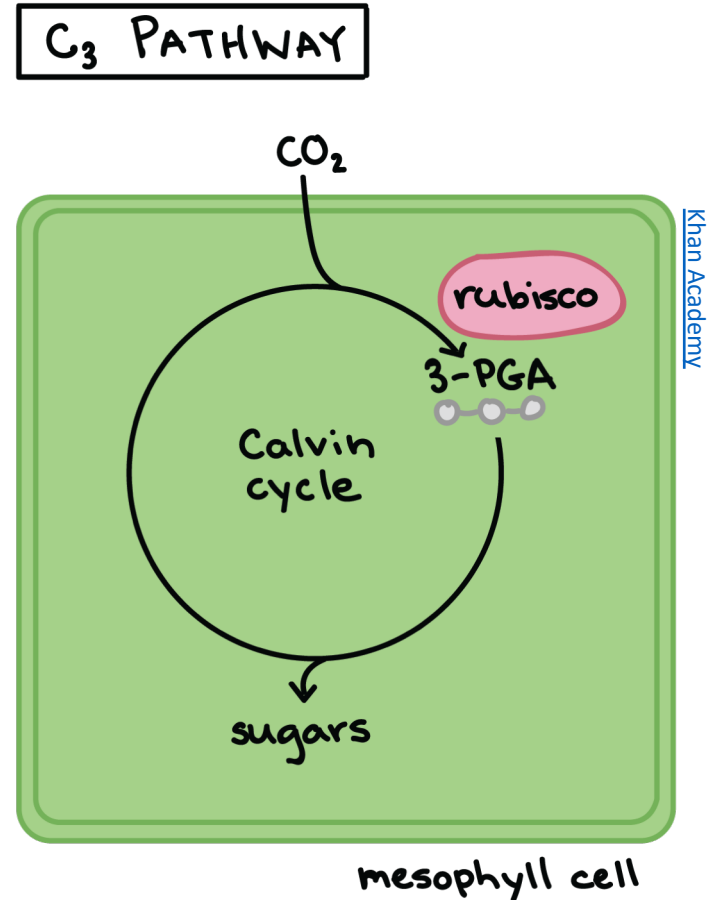
Fotorespiration

- Calvin-cyklussen og dermed fotosyntese er muligt på grund af enzymet rubisco som fæstner CO_2 til RuBR
- Rubisco kan dog også fæstne O_2 til RuBR i stedet for CO_2 , men det bryder Calvin cyklussen, dette kaldes fotorespiration
- Resultatet er i sidste ende at energi bliver brugt og et carbon-atom bliver tabt fra cyklussen for hver to fæstnede O_2 (i stedet for at vinde et carbon atom for hvert fæstnet CO_2)

I forhold til opbygning af lageret af glukose er dette selvfølgelig et problem, men det lader til at fotorespiration har andre beskyttende effekter for planten.

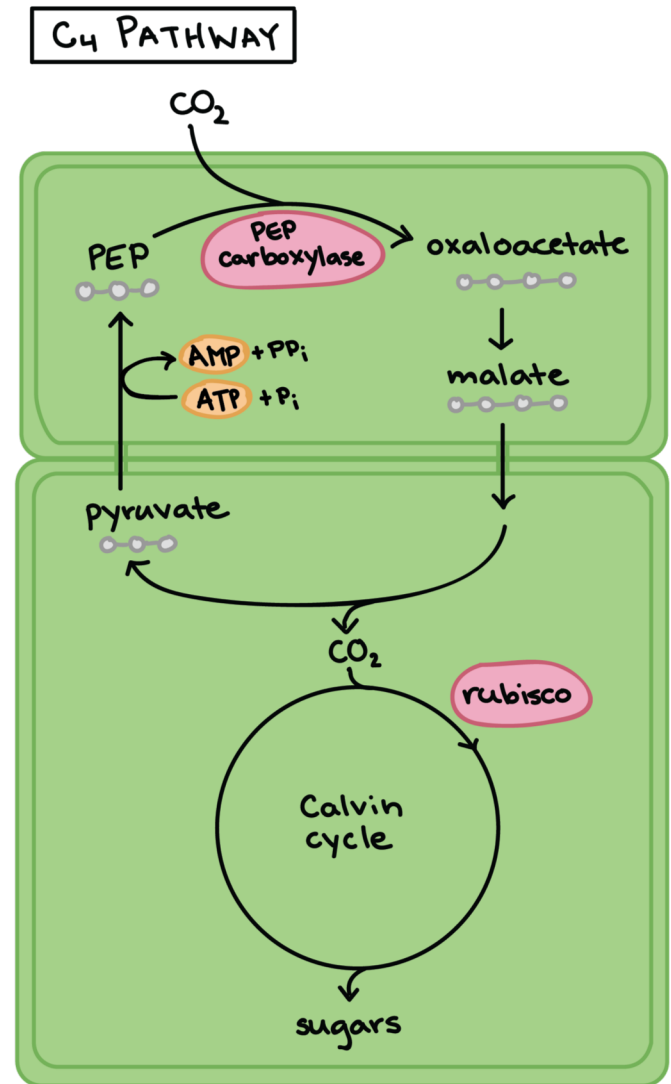
C₃-planter

- For at bekæmpe tabet af carbon ved fotorespiration har nogle planter udviklet ændringer til Calvin cyklussen
- Planter der ikke har nogle tilpasninger refereres til som C₃-planter da der hovedsageligt transporteres kæder med 3 carbon atomer
- Omkring 85% af alle plantearter er C₃-planter (fx ris, hvede og alle træer)



C₄-planter

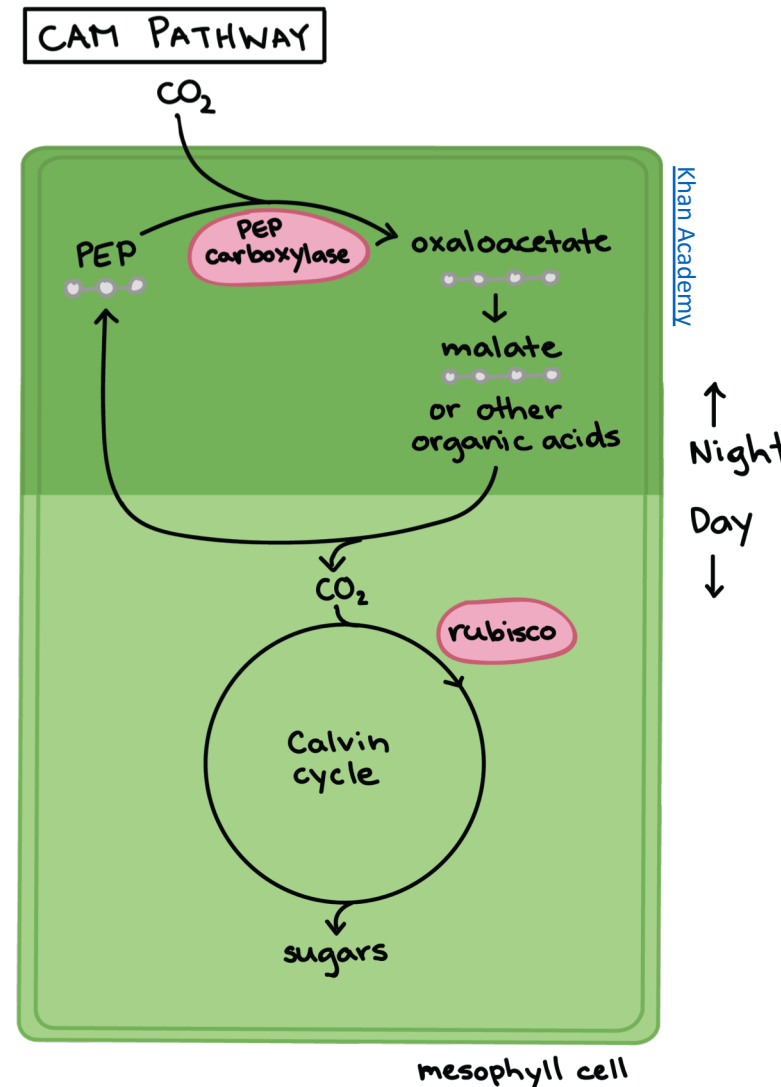
- C₄-planter har udviklet en separation mellem stedet hvor atmosfærisk CO₂ fikseres og hvor Calvin-cyklussen finder sted
- Den atmosfæriske CO₂ fæstnes af PEP carboxylase som nærmest ikke fæstner O₂
- Det producerede molekyle med 4 carbon atomer sendes til Calvin cyklussen hvor CO₂ indgår i Calvin cyklussen som normalt
- Denne proces opbygger et ekstra højt niveau af CO₂ i den del af kloroplast hvor Calvin-cyklussen finder sted, og dermed sker der relativt mindre fotorespiration
- Omkring 3% af alle plantearter er C₄-planter (fx majs og sukkerrør)



Det kræver ekstra energi at flytte molekylerne rundt mellem det enkelte dele af cellen, men det kan være en fordel i varme og fugtige klimaer hvor rubisco hyppigere fæstner O₂

CAM-planter

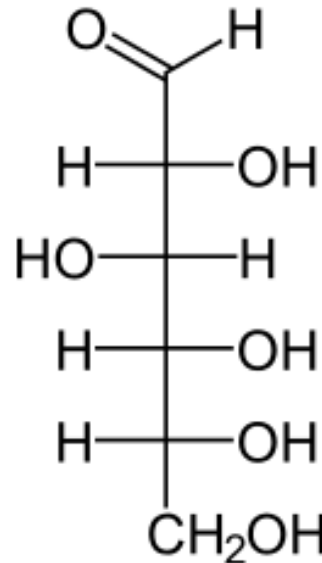
- Planter der benytter sig af CAM (crassulacean acid metabolism) separerer carbonfæstningen og Calvin cyklussen i tid
- Carbon fæstningen sker om natten hvor plantens porer er åbne for atmosfærisk CO_2 , som fæstnes som i C_4 -planter
- Molekylet med 4 carbon atomer bliver dog ikke transporteret med det samme, men gemmes til det bliver dag hvor det igen frigiver CO_2 som kan indgå i Calvin cyklussen
- Om dagen har planten sine porer lukket og opnår derved også et højere niveau af CO_2



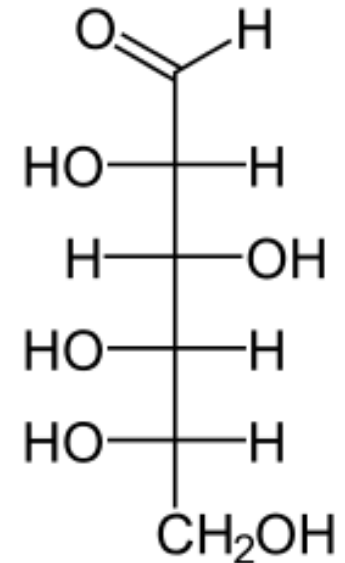
Det kræver endnu mere energi for CAM-planter at lagre molekylerne til dagen efter, men teknikken med at lukke porerne gør også planterne bedre til at holde på vandet. CAM-planter er altså bedre rustet til ekstremt varme og tørre områder, og udgøres af eksempelvis kaktusser.

Fotosyntese - produkt

- Foruden oxygen, dannes der også carbonhydrater (kulhydrat), med den kemiske sammensætning $(CH_2O)_n$
- Det simpleste kulhydrat er glukose
- Glukose er det mest basale molekyle som dannes ved fotosyntese



D-Glucose

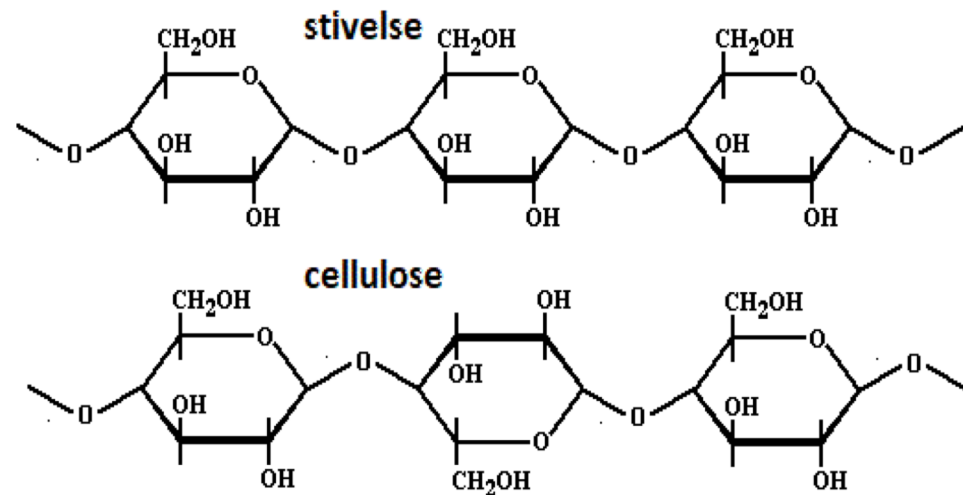
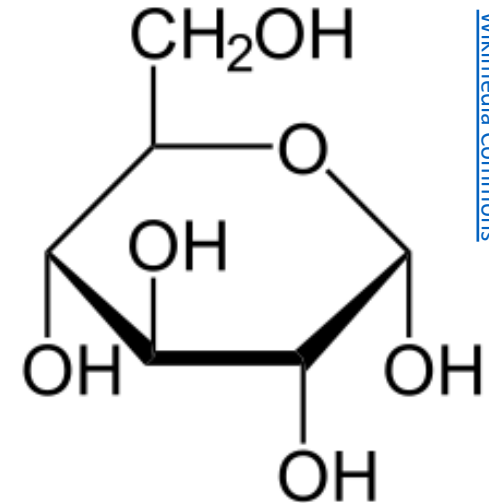


L-Glucose

To forskellige Fisher projektioner af glukose. Glukose optræder i to udgaver, en D og L struktur, der er hinandens spejlede versioner. Det asymmetriske center roterer polariseret lys den ene eller den anden vej alt efter om det er L eller D konfigurationen. Denne 'stereokemi' spiller også en rolle i polysakarider.

Glukose og videre

- Langt det meste glukose laver dog en **ringslutning**, (formen øverst)
- Flere glukosemolekyler vil derefter gå sammen og **polymeriserer**
- To meget almindelige polymerer af glukose er hhv. **cellulose** og **stivelse**
- De adskiller kun lidt i måden hvorpå glucosemolekylerne binder til hindanden, men har vidt forskellige egenskaber

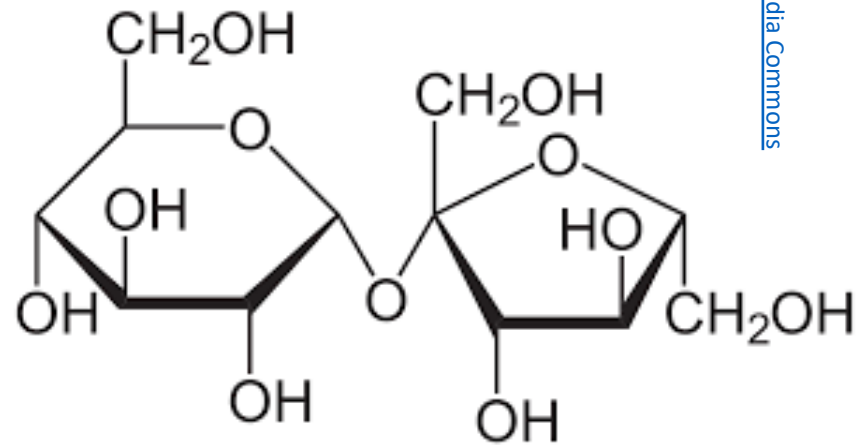


Når mange monomere går sammen til dannelse af lange kæder af monosakkarider kaldes det polysakkarider (poly = mange).

Cellulose ofte optræder i cellevæge og giver en hård struktur fx træ. Stivelse optræder i store mængder i korn, majs og kartofler og virker som opmagasinering af energi. Forskellen er lille (ringslutning af alfa eller beta-form), men har eksempelvis den effekt at det ene polysakkarid er vandopløseligt (stivelse) og det andet ikke er.

Sakkarose

- Bordsukker (sakkarose) er en simpel disakkarid med en smag af sukker
- Det dannes fra sukkerroer eller sukkerrør ved raffinering
- Det har den fordel at det kombinerer billig fremstilling med en smag af sukker

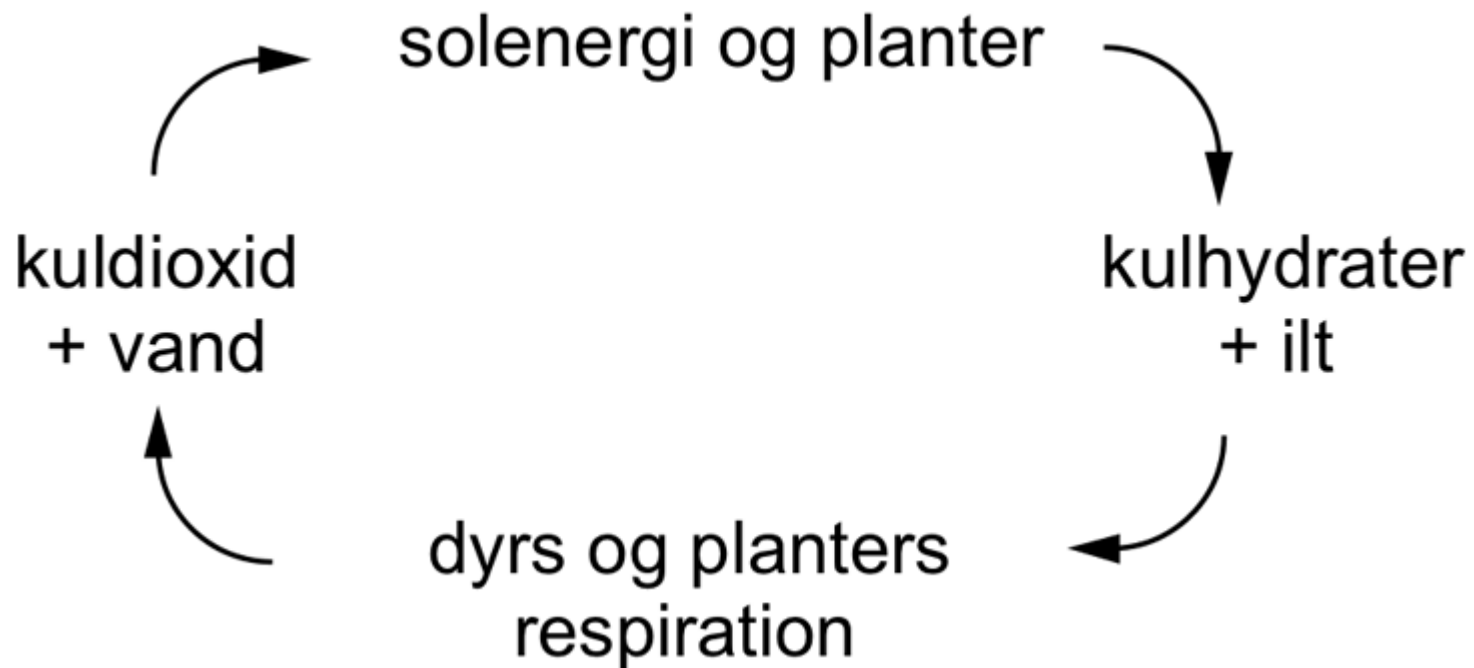


[Wikimedia Commons](#)

Sakkarose (normalt sukker), består af glucose (druesukker) og fructose (frugtsukker)

Sukkerroen er en C₃-plante og sukkerrør er C₄-planter dette giver en forskel i mængden af carbon-13 of carbon-12 isotoper, hvilket kan bruges til at teste om raffineret sukker kommer fra roer eller rør.

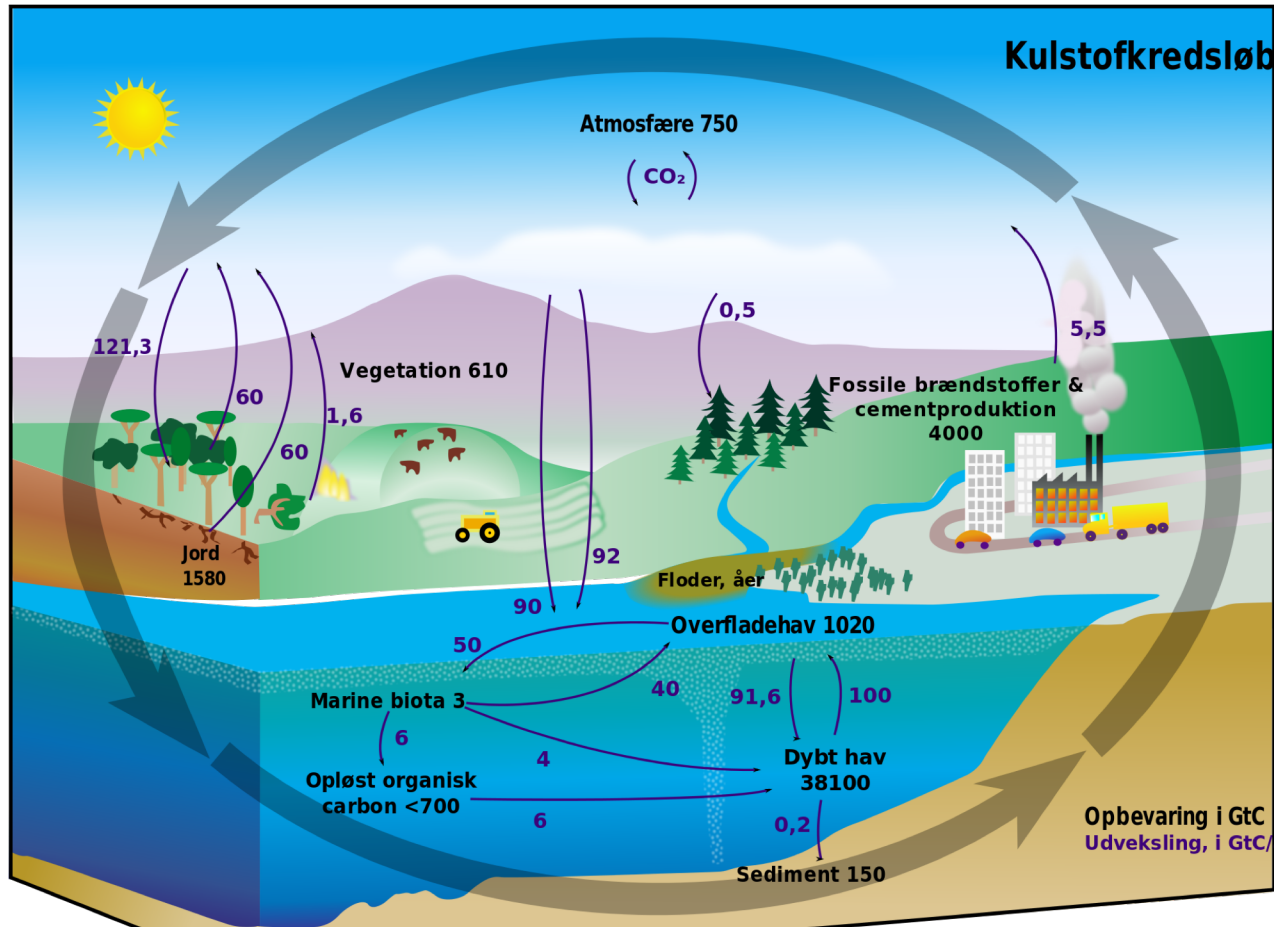
Fotosyntese indgår i et kredsløb



Kredsløbet af carbon i planter og dyr 'starter' med fotosynese hvor planter omdanner energien i elektromagnetisk stråling til carbonhydrater og oxygen. Dette kan planteædere og alle andre oxygenforbrugende organismer nyde godt af, da de kan lave respiration samt spise carbonhydraterne. Dette danner carbondioxid, planterne igen kan bruge til at lave fotosyntese med.

For dette forsimplede kredsløb opstår der en balance mellem mængden af oxygen og carbondioxid i atmosfæren.

Carbonkredsløbet



Wikimedia Commons

I virkeligheden indgår carbon i mange kredsløb på Jorden, og fotosyntesen er blot en af de relevante processer. Carbon løber igennem fire hovedreservoarer; Atmosfæren (luft) – hydrosfæren (oceaner) – geosfæren (sedimenter) – biosfæren (dyr og planter).

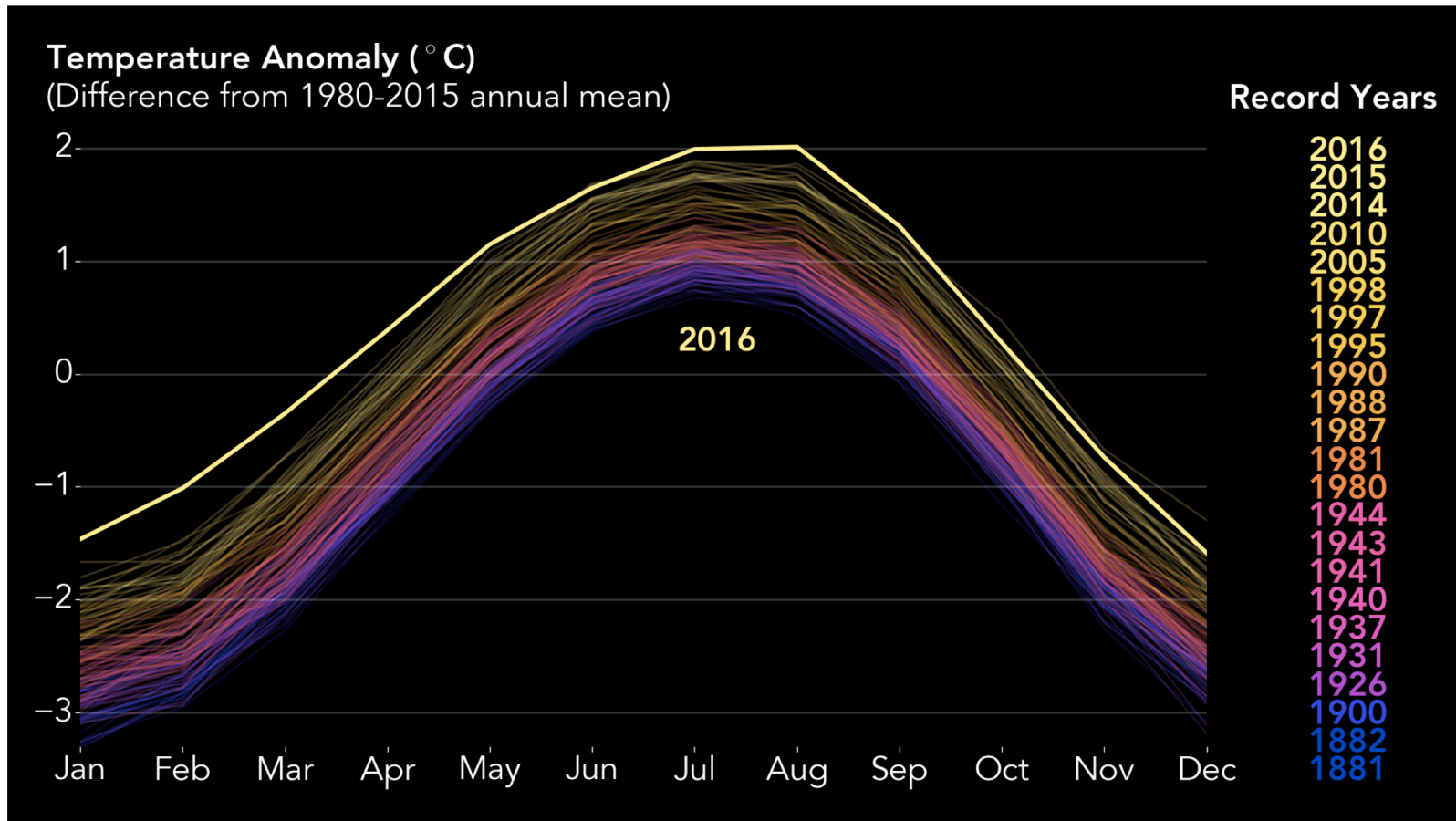
Det danner et netværk der er afhængigt af hinandens niveauer. Hvis der sker en ændring et sted, har det kolossale konsekvenser for de andre sfærer. Læs noterne for dyb forklaring.

Ændringer i carbonkredsløbet

- Carbondioxid er en drivhusgas og dermed med til at varme Jorden ved at reflekterer varmestråling fra Jorden tilbage
- De sidste ca. 200 år har mennesket øget afbrændingen af skove og forbrændt mange former for carbonhydrider og dermed udledt ekstra meget CO₂
- Den udledte CO₂ kan ikke længere balances af fotosyntesen – slet ikke når der kommer mindre skov!

Jordens carbonkredsløb er normalt i balance, en balance hvor ændringer over få hundrede år gør at kredsløbet ikke kan følge med. Bl.a. sker der en forsuring af havene der påvirker marinelivet og en forøgelse af drivhuseffekten, og dermed en større opvarmning af kloden.

Relation til global opvarmning



NASA/Joshua Stevens, Earth Observations

Den større mængde af CO₂ i atmosfæren, og på grafen ovenfor kan man nemt se tendensen mod global opvarmning. Det varmeste år nogensinde målt var 2016.

Gode videoer: <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-data-show-2016-warmest-year-on-record-globally>

Her er der en masse spændende diskussioner om fremtidens klima, men det skal vi ikke komme yderligere ind på her. Fotosyntesen har haft en afgørende rolle mod det liv vi har på Jorden i dag, og det kommer til at spille en rolle for livet i fremtiden.

Om materialet

Big Bang til naturfag

- Materialet er udarbejdet af projektet 'Big Bang til Naturfag' (et samarbejde mellem Københavns Universitet og Aarhus Universitet)
- Big Bang til Naturfag er støttet af A.P. Møller Fonden

KØBENHAVNS
UNIVERSITET



AARHUS UNIVERSITET

A.P. MØLLER FONDEN