BVJ

BIOLOGIE VOOR JOU

Bewaar dit boek! · Het bevat examenstof. ·

MAX

BIOLOGIE 5B

VWO

NAAM EN KLAS

MALMBERG

BVJ

BIOLOGIE VOOR JOU

Biologie voor de bovenbouw

5 VWO

deel B

EINDREDACTIE

Claud Biemans
Arthur Jansen

AUTEURS

Arthur Jansen
Anneke Kamstra
Mathijs Nieuwenhuis
Michelle Sparnaaij

MAX RELEASE 7.0

Malmberg 's-Hertogenbosch
www.biologievoorjou.nl

Deel A

Thema 7

REGELING

ORIËNTATIE

Sensatiezoekers 8
Voorkennistoets
Voorkennisfilmpje

BASISSTOF

1 Regeling en homeostase 10
2 Hormonale regulatie 18
3 Het zenuwstelstel 36
4 Reflexen en het autonome zenuwstelsel 50
5 Impulsgeleiding 57
6 Spieren en beweging (SE) 70

SAMENHANG

Alcohol is niet altijd gezellig 84

EXTRA STOF

Verliefdheid is chemie
De effecten van drugs

ONDERZOEK

Practica 86

AFSLUITING

Samenvatting 91
Examenopgaven 98

Thema 8

WAARNEMING EN GEDRAG (SE)

ORIËNTATIE

Daar zit geen luchtje aan 106
Voorkennistoets
Voorkennisfilmpje

BASISSTOF

1 Zintuigen 108
2 De werking van het oog 118
3 Gedrag 132
4 Vorming van gedrag 140
5 Sociaal gedrag bij dieren 152
6 Gedrag bij mensen 164

SAMENHANG

Prairiewoelmuizen zoeken troost 174

EXTRA STOF

Gedrag van pissebedden

ONDERZOEK

Practica 176

AFSLUITING

Samenvatting 180
Examenopgaven 186

Deel B

Thema 9

STOFWISSELING IN DE CEL

ORIËNTATIE

Snellere stofwisseling 8
Voorkennistoets
Voorkennisfilmpje

BASISSTOF

1 Chemie in cellen 10
2 Enzymen 17
3 Koolstofassimilatie 26
4 Voortgezette assimilatie 34
5 Dissimilatie 44

SAMENHANG

Pandabeer overleeft kou door bacteriën 54

EXTRA STOF

Eiwitturnover

ONDERZOEK

Practica 56

AFSLUITING

Samenvatting 62
Examenopgaven 66

Thema 10

DNA

ORIËNTATIE

Hoe uniek is jouw DNA? 74
Voorkennistoets
Voorkennisfilmpje

BASISSTOF

1 De bouw en functie van DNA 76
2 DNA-replicatie 85
3 Transcriptie 99
4 Translatie en eiwitsynthese 107
5 Genregulatie 117
6 Mutaties 127
7 Biotechnologie 137

SAMENHANG

Een designerbaby met CRISPR-Cas 146

EXTRA STOF

Erfelijke ziekten en afwijkingen bij de mens
Ideeën voor onderzoek

ONDERZOEK

Practica 150

AFSLUITING

Samenvatting 152
Examenopgaven 158

Thema 11

PLANTEN

ORIËNTATIE

Zijn planten intelligent? 166
Voorkennistoets
Voorkennisfilmpje

BASISSTOF

1 Bouw, groei en ontwikkeling 168
2 Transport in planten 177
3 Stofwisseling 188
4 Voortplanting 197
5 Reageren op de omgeving 206

SAMENHANG

Acacia 214

EXTRA STOF

Dubbele bevruchting bij zaadplanten
Het tropische regenwoud

ONDERZOEK

Practica 216

AFSLUITING

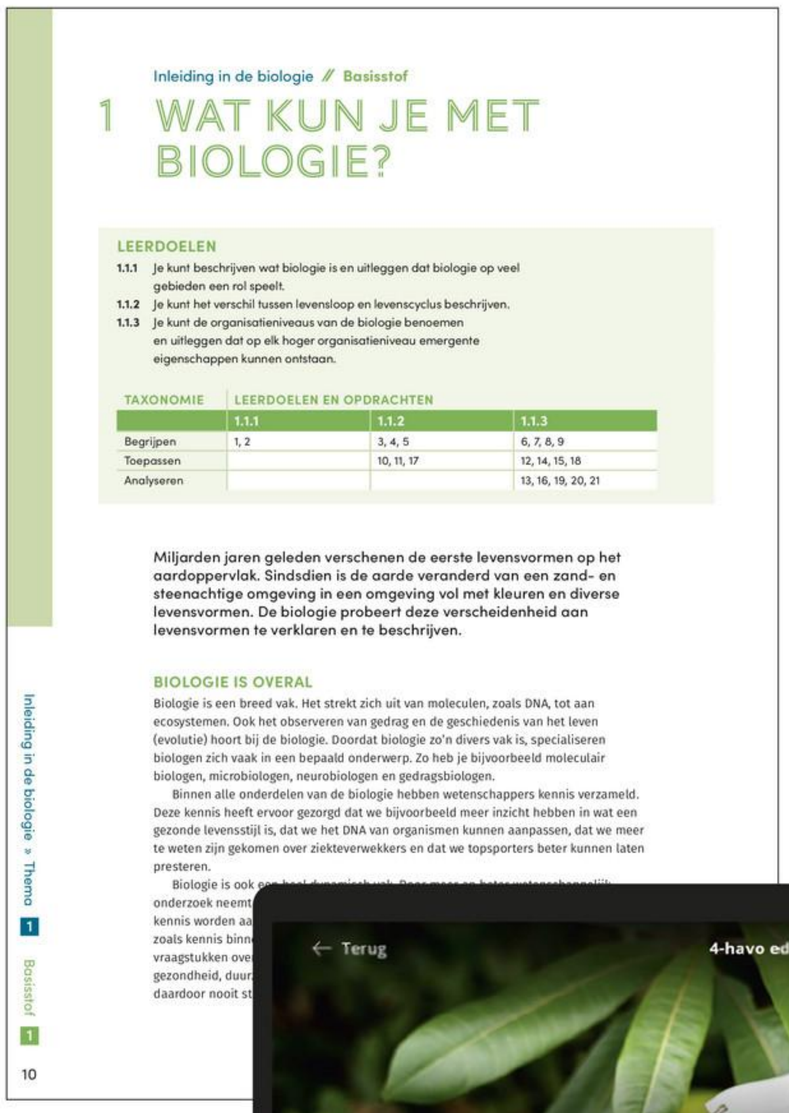
Samenvatting 221
Examenopgaven 224

Register 230
Colofon 232

EXAMENTRAINER

AAN DE SLAG MET BIOLOGIE VOOR JOU

Biologie is overal om je heen. Met *Biologie voor jou* heb je alles binnen handbereik om dit te ervaren, te beleven en te ontdekken! Je leert waar het vak om draait en welke rol biologie speelt in het dagelijkse leven.


Inleiding in de biologie // Basisstof

1 WAT KUN JE MET BIOLOGIE?

LEERDOELEN

1.1.1 Je kunt beschrijven wat biologie is en uitleggen dat biologie op veel gebieden een rol speelt.
1.1.2 Je kunt het verschil tussen levensloop en levenscyclus beschrijven.
1.1.3 Je kunt de organisatieniveaus van de biologie benoemen en uitleggen dat op elk hoger organisatieniveau emergente eigenschappen kunnen ontstaan.

TAXONOMIE	LEERDOELEN EN OPDRACHTEN		
	1.1.1	1.1.2	1.1.3
Begrijpen	1, 2	3, 4, 5	6, 7, 8, 9
Toepassen		10, 11, 17	12, 14, 15, 18
Analyseren			13, 16, 19, 20, 21

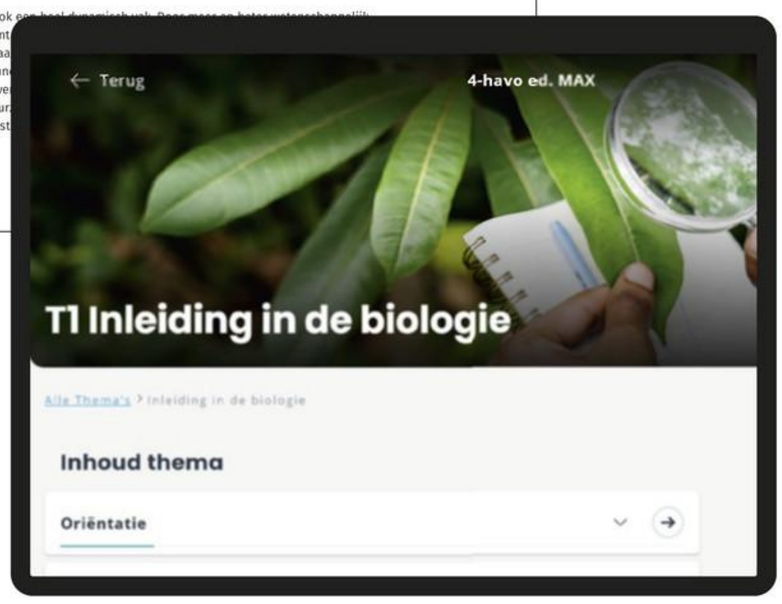
Miljarden jaren geleden verschenen de eerste levensvormen op het aardoppervlak. Sindsdien is de aarde veranderd van een zand- en steenachtige omgeving in een omgeving vol met kleuren en diverse levensvormen. De biologie probeert deze verscheidenheid aan levensvormen te verklaren en te beschrijven.

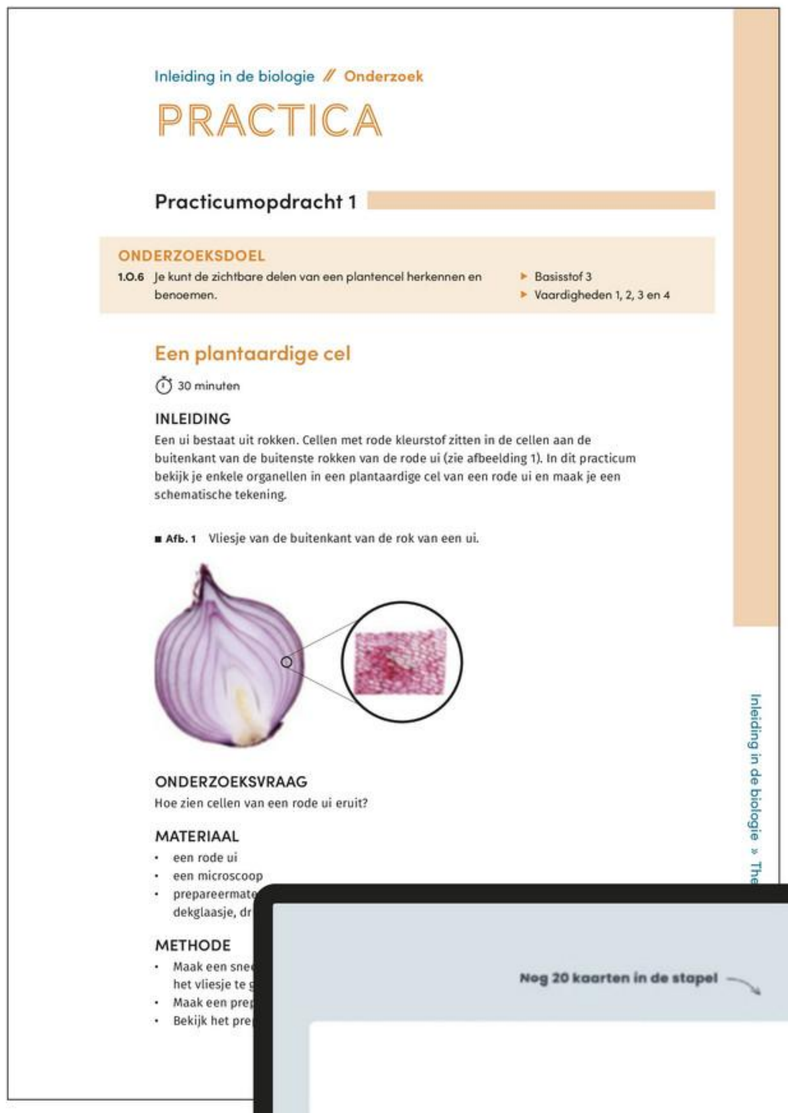
BIOLOGIE IS OVERAL

Biologie is een breed vak. Het strekt zich uit van moleculen, zoals DNA, tot aan ecosystemen. Ook het observeren van gedrag en de geschiedenis van het leven (evolutie) hoort bij de biologie. Doordat biologie zo'n divers vak is, specialiseren biologen zich vaak in een bepaald onderwerp. Zo heb je bijvoorbeeld moleculair biologen, microbiologen, neurobiologen en gedragsbiologen.

Binnen alle onderdelen van de biologie hebben wetenschappers kennis verzameld. Deze kennis heeft ervoor gezorgd dat we bijvoorbeeld meer inzicht hebben in wat een gezonde levensstijl is, dat we het DNA van organismen kunnen aanpassen, dat we meer te weten zijn gekomen over ziekteverwekkers en dat we topsporters beter kunnen laten presteren.

Biologie is ook een heel dynamisch vak. Door meer en beter wetenschappelijk onderzoek neemt de kennis over de biologie toe. Deze kennis kan worden aangewend voor allerlei zaken, zoals kennis binnen vraagstukken over gezondheid, duurzaamheid en daardoor nooit stilstaat.




Inleiding in de biologie // Onderzoek

PRACTICA

Practicumopdracht 1

ONDERZOEKSDOEL

1.O.6 Je kunt de zichtbare delen van een plantencel herkennen en benoemen.

- Basisstof 3
- Vaardigheden 1, 2, 3 en 4

Een plantaardige cel

30 minuten

INLEIDING

Een ui bestaat uit rokken. Cellen met rode kleurstof zitten in de cellen aan de buitenkant van de buitenste rokken van de rode ui (zie afbeelding 1). In dit practicum bekijk je enkele organellen in een plantaardige cel van een rode ui en maak je een schematische tekening.

■ Afb. 1 Vliesje van de buitenkant van de rok van een ui.

ONDERZOEKSVRAAG

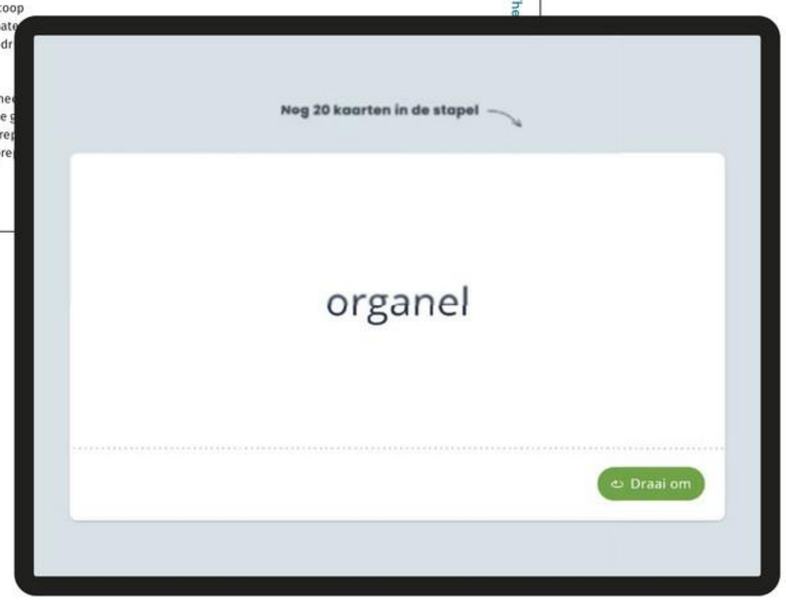
Hoe zien cellen van een rode ui eruit?

MATERIAAL

- een rode ui
- een microscoop
- prepareermate
  dekglaasje, dr

METHODE

- Maak een snee
  het vliesje te g
- Maak een preg
- Bekijk het pre



WERK IN JE BOEK ÉN ONLINE!

Er zijn twee boeken per leerjaar en er is een online leeromgeving. Je docent kiest wat je online doet (met laptop, tablet of telefoon) en wat in je boek. Elk thema start met de Oriëntatie (inclusief *Voorkennistoets* en *Voorkennisfilmpjes*), gevolgd door de *Basisstof*, *Samenhang*, *Extra stof*, *Onderzoek* en *Afsluiting*. Aan het begin van elke basisstof staat met leerdoelen aangegeven wat je gaat leren en op welk taxonomieniveau je het geleerde oefent bij de opdrachten. In het onderdeel *Onderzoek* vind je de vaardigheden en ga je met practica aan de slag. In de *Afsluiting* vind je de samenvatting en examenopgaven ter voorbereiding op het examen.

VOORDELEN VAN ONLINE

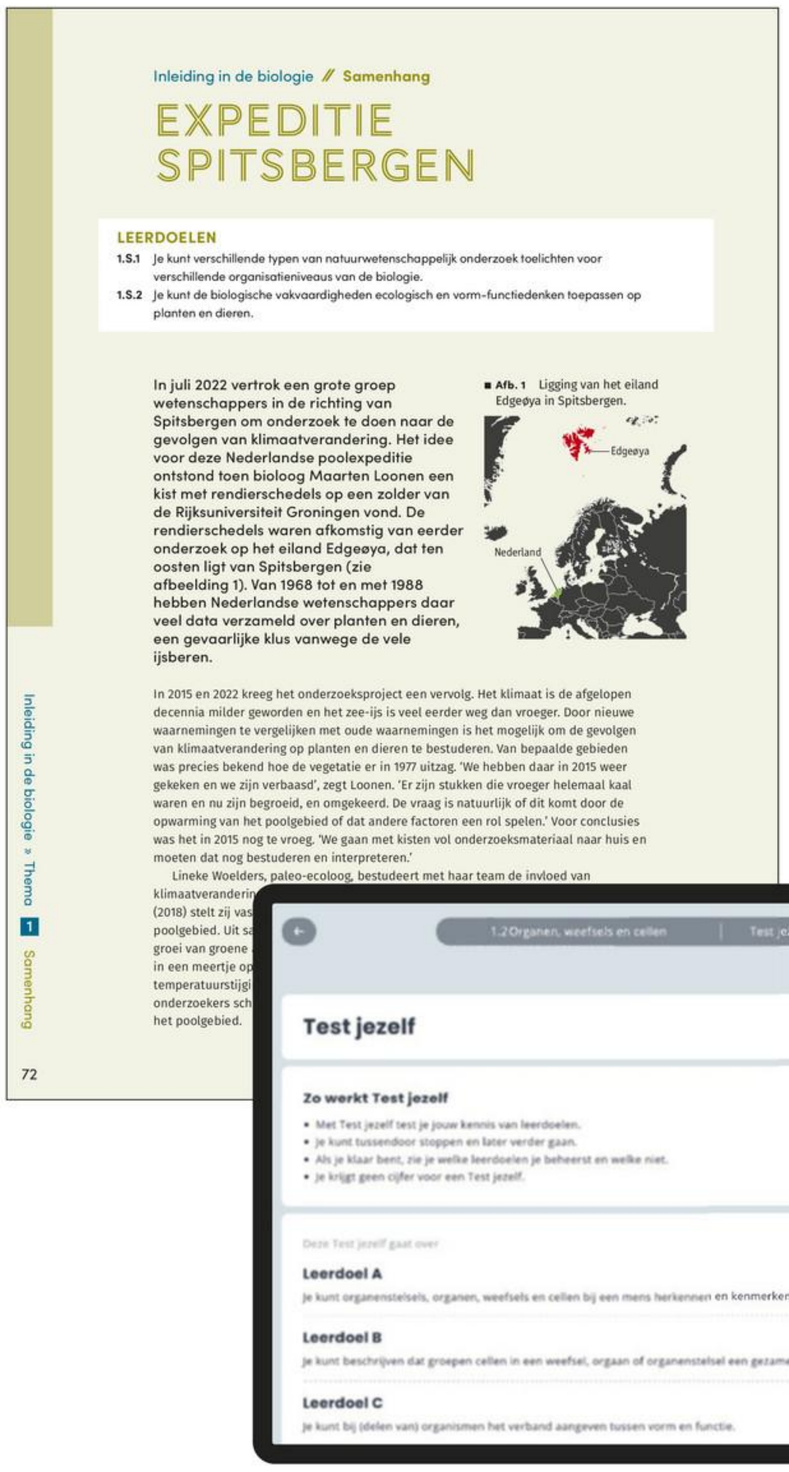
- Je ziet snel wat je goed of fout doet.
- Je leert de begrippen met de *Flitskaarten*.
- Je meet of je de stof beheerst met de *Test jezelf*, *Oefentoets* en *Examenopgaven*.
- Je kunt op een hoger of lager niveau en leerjaar werken.
- Je docent volgt hoe het met je gaat.

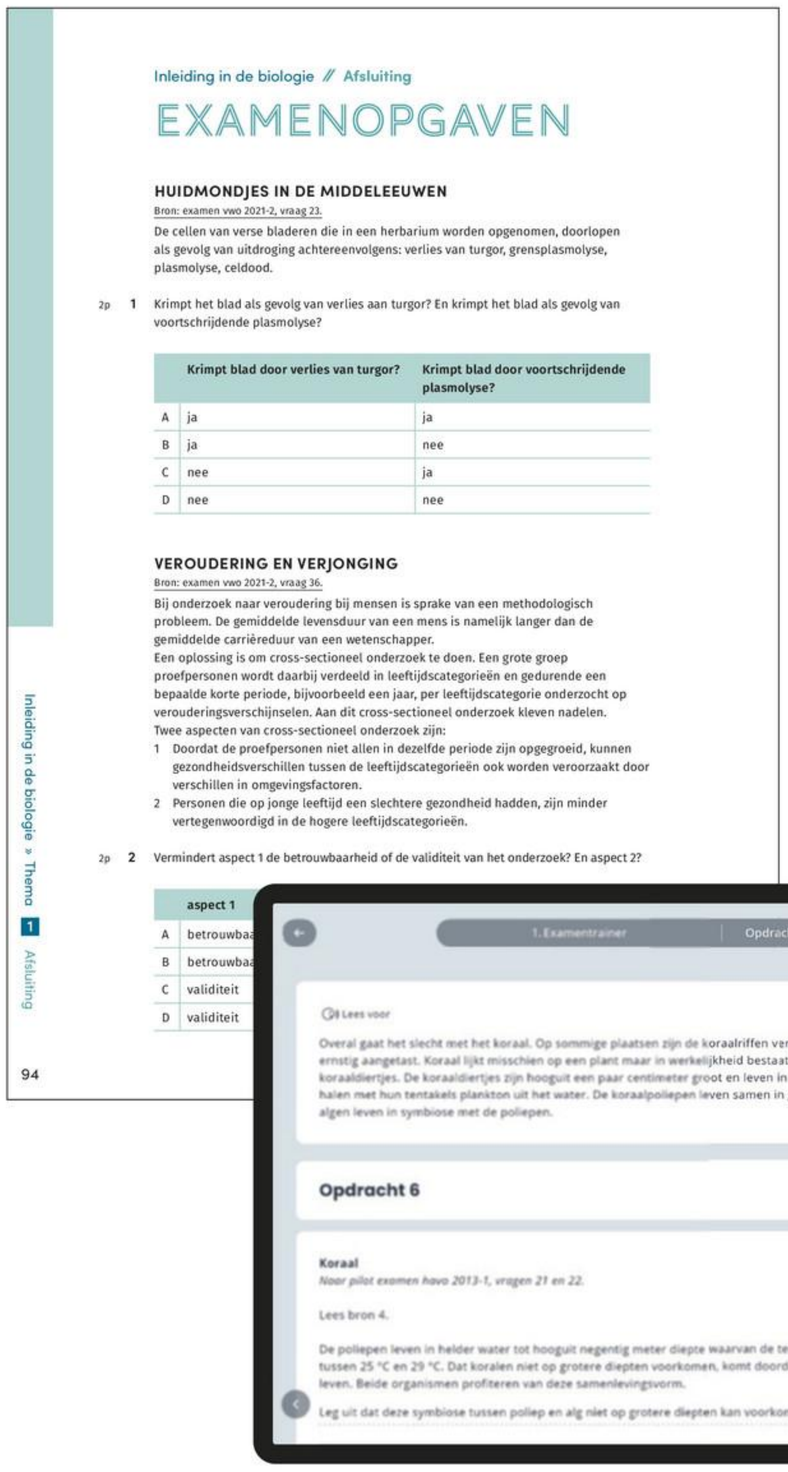
SAMENHANG

Aan het einde van elk thema is er een onderdeel *Samenhang*. Met de *Samenhang* ontdek je hoe de leerstof van belang is in de wereld om je heen. Ook leer je verbanden te zien tussen de verschillende basisstoffen van het thema en is er aandacht voor de interactie tussen de verschillende organisatie-niveaus. Een goede oefening voor het examen!

GOEDE VOORBEREIDING OP DE TOETS EN HET EXAMEN!

Een thema eindigt met een Afsluiting (*Samen-vatting* en *Examenopgaven*). In de online leeromgeving vind je ook *Flitskaarten*, *Test jezelf* en de *Examentrainer*.





VOORDELEN VAN HET BOEK

- Je hebt snel overzicht in wat je gaat leren.
- Je leest lange teksten op papier.
- Je markeert in de tekst en maakt aantekeningen.

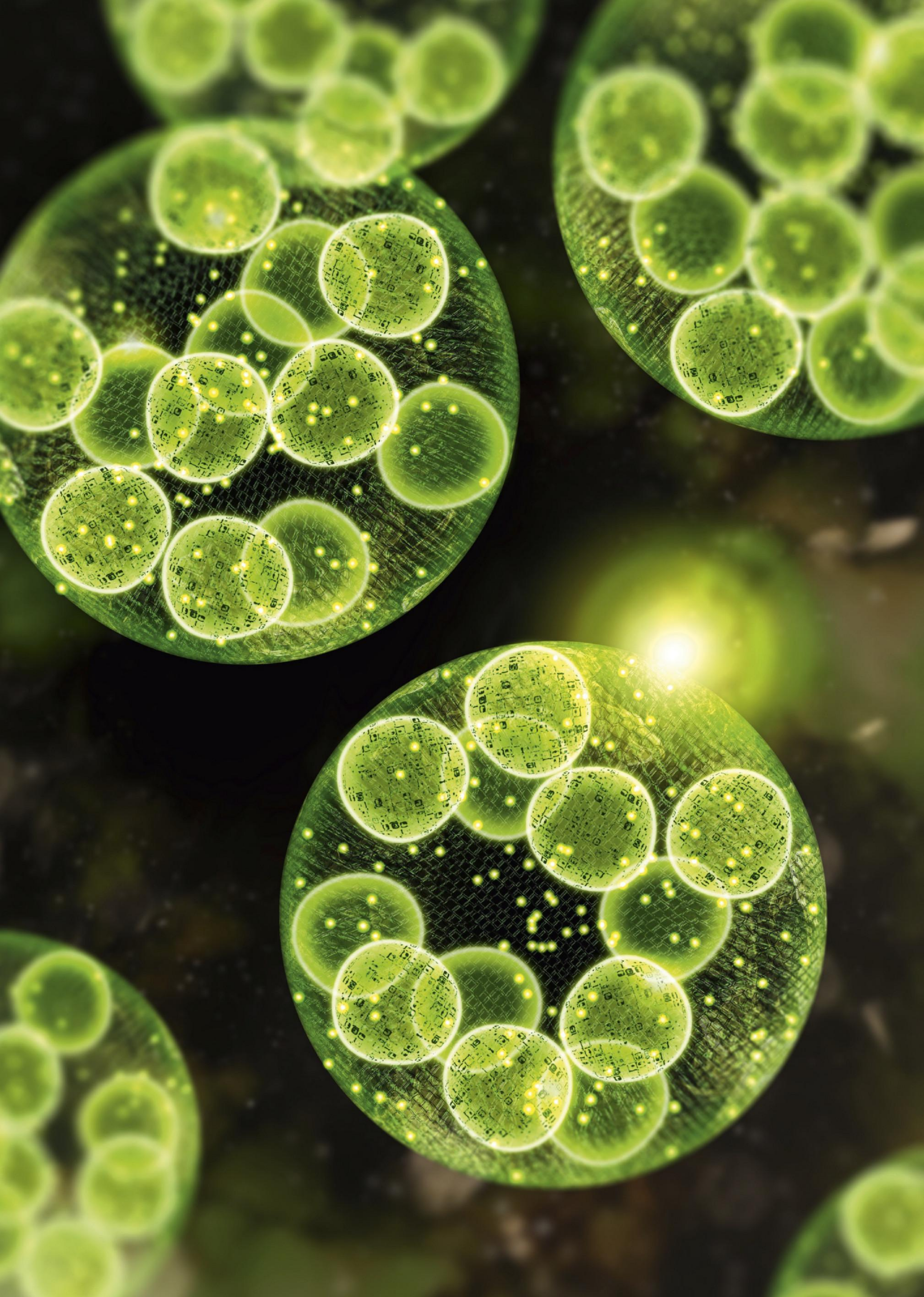
BETEKENIS SYMBOLEN

Deze opdracht maak je het best in je boek.

Ga naar de online leeromgeving voor handige extra's.

Een uitdagende opdracht uit de biologie-olympiade.

Met dit practicum ben je zó lang bezig.



Thema 9

STOFWISSELING IN DE CEL

Organismen hebben in alle levende cellen bouwstoffen en energie nodig. Daarvoor worden stoffen uit de omgeving opgenomen en omgezet in andere stoffen (stofwisseling). Via hun bladeren en wortels nemen planten water, koolstofdioxide en lichtenergie op en zetten deze om in glucose. Dieren eten andere organismen en breken die af tot bouwstoffen en energierijke stoffen. De afvalstoffen die bij de stofwisseling ontstaan, worden afgegeven aan de omgeving.

Inhoud

ORIËNTATIE

Snellere stofwisseling 8
Voorkennistoets
Voorkennisfilmpje

BASISSTOF

1 Chemie in cellen 10
2 Enzymen 17
3 Koolstofassimilatie 26
4 Voortgezette assimilatie 34
5 Dissimilatie 44

SAMENHANG

Pandabeer overleeft kou door bacteriën 54

EXTRA STOF

Eiwitturnover

ONDERZOEK

Practica 56

AFSLUITING

Samenvatting 62
Examenopgaven 66

SNELLERE STOFWISSELING

Sommige mensen willen afvallen, omdat ze overgewicht hebben. Anderen moeten op gewicht blijven vanwege een sport, zoals judo. Soms is je gezondheid een reden om met je lichaamsgewicht bezig te zijn. Wat de reden ook is om af te vallen, er zijn verschillende manieren om dit te bereiken. Niet alleen voeding speelt hierin een rol, ook beweging en zelfs slaap en koud douchen.

Dag en nacht breekt je lichaam voedingsstoffen af. Daarbij komt energie vrij. Dit proces is de stofwisseling. Bij een snelle stofwisseling komt veel energie vrij en sla je minder stoffen op, zoals vetten.

Een van de manieren om je stofwisseling te versnellen is door te bewegen. Als je beweegt, vindt er extra verbranding in je lichaam plaats. Je hartslag gaat omhoog en je ademt sneller. De energie die je nodig hebt om te bewegen ontstaat door het afbreken van brandstoffen in je lichaam. Je verbruikt dan reservebrandstoffen zoals bijvoorbeeld koolhydraten of vet, waardoor je lichaamsgewicht afneemt.

Niet alleen bewegen zorgt voor een snellere stofwisseling, het maakt ook uit wat je eet. Om je voedsel te verteren, is energie nodig. Sommige voedingsstoffen kosten meer energie om te verteren. In een kom yoghurt met noten zitten veel eiwitten. Eiwitten kosten relatief veel energie om te verteren. Als je veel eiwitten eet, gebruikt je lichaam veel energie om je maaltijd te verteren. Meer dan wanneer je een bruine boterham met jam eet. Je stofwisseling wordt daardoor sneller. Ook bepaalde voedingsmiddelen zoals broccoli, spinazie en groene thee versnellen je stofwisseling.

Daarnaast houden bepaalde kruiden en specerijen zoals chilipepers je stofwisseling actief (zie afbeelding 1). Door het eten van bijvoorbeeld sambal, waar veel chilipepers in zitten, kun je het warm krijgen. Dit komt door de stof capsaïcine. Deze stof zorgt ervoor dat je lichaamstemperatuur omhooggaat. Doordat er in je vetcellen meer verbranding plaatsvindt, komt er extra warmte vrij. De kans dat je voedingsstoffen opslaat, neemt hierdoor af.

Naast bepaalde voeding zorgt ook goed slapen voor een snellere stofwisseling (zie afbeelding 2). Uit onderzoek blijkt dat bij te weinig nachtrust de kans op overgewicht toeneemt, omdat je stofwisseling vertraagt. Je lichaam wordt dan minder gevoelig voor insuline. Hierdoor breek je suikers, zoals glucose, niet goed af, maar zet je die om in vetten. Door te weinig slaap krijg je minder snel het gevoel dat je vol zit als je hebt gegeten. Hierdoor eet je meer. Te weinig slaap zorgt er ook voor dat je minder actief wordt, waardoor je minder energie verbruikt.

Een andere manier om je stofwisseling te verhogen, is koud douchen. Je lichaam bevat twee soorten vetweefsel: wit vetweefsel en bruin vetweefsel. Bruin vetweefsel zet in koude omstandigheden energie uit vetten en glucose om in warmte. Wit vetweefsel zet geen energie om, maar slaat de vetten op die je eet. Als je koud doucht, moet je lichaam opwarmen en dat stimuleert de aanmaak van bruin vetweefsel. Ook een koude omgeving zorgt ervoor dat de aanmaak van bruin vetweefsel wordt gestimuleerd, waardoor je stofwisseling sneller verloopt.

■ **Afb. 1** Chilipepers versnellen de stofwisseling.

■ **Afb. 2** Goed slapen en gezond eten helpen de stofwisseling te versnellen.

Opdrachten

1 Je lichaam haalt energie uit voedingsmiddelen die je binnenkrijgt. Leg uit waar deze energie vandaan komt.

2 Verklaar waarom je lichaam meer zuurstof nodig heeft als je beweegt.

3 Welk weefsel bevat meer mitochondriën: wit of bruin vetweefsel? Leg uit waarom.

4 Uit onderzoek blijkt dat goed slapen belangrijk is voor je stofwisseling.
Welke onderzoeksvraag past bij dit onderzoek?

5 Bij te weinig slaap is de kans op diabetes (suikerziekte) groter. Leg uit hoe dit komt.

Ga naar de *Voorkennistoets* en het *Voorkennisfilmpje*.

3 TRANSCRIPTIE

LEERDOEL

10.3.1 Je kunt beschrijven hoe transcriptie plaatsvindt.

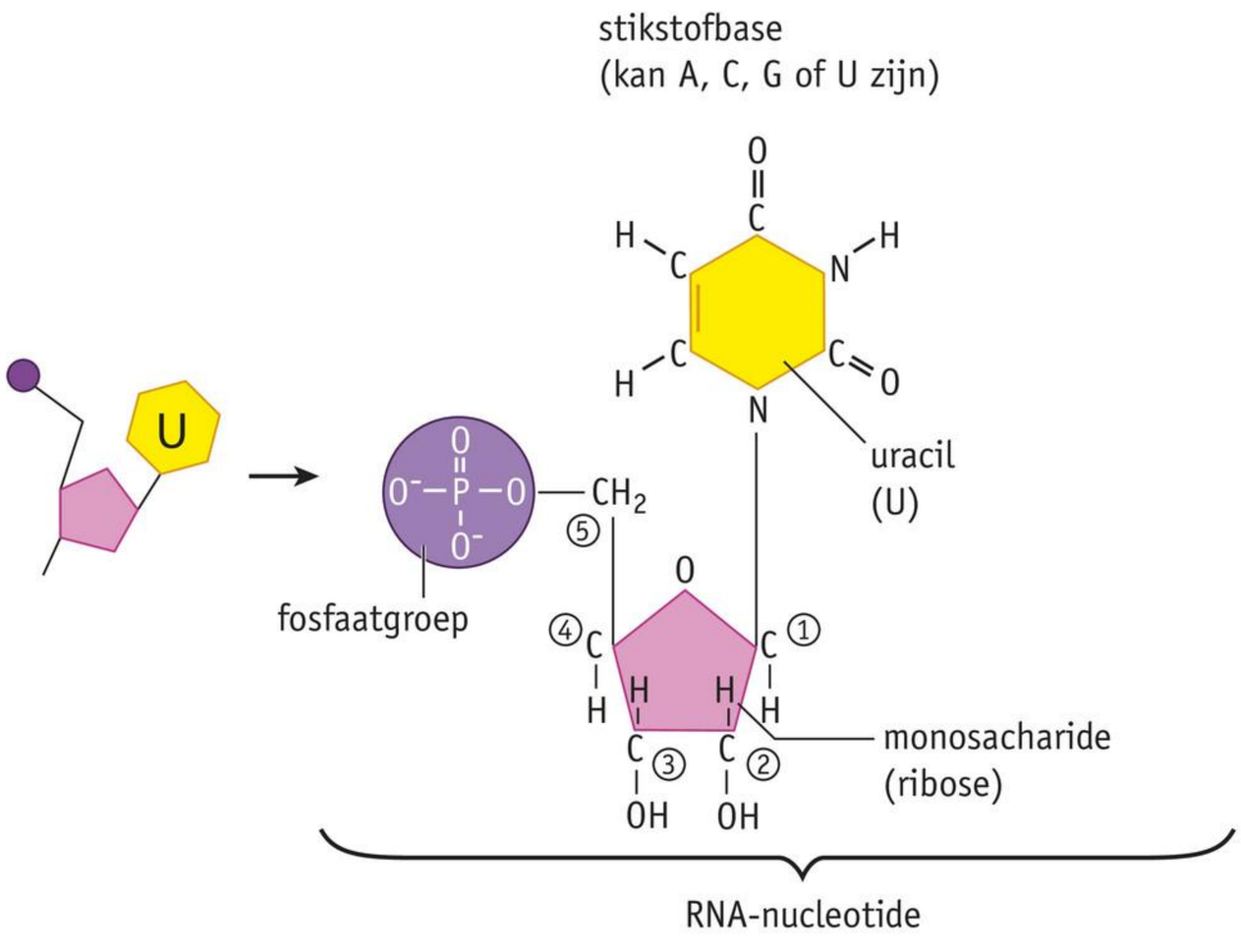
TAXONOMIE	LEERDOEL EN OPDRACHTEN
	10.3.1
Begrijpen	30, 31, 32, 33, 34, 35
Toepassen	37, 39ab, 42
Analyseren	36, 38, 39c, 40, 41, 43

Bij transcriptie wordt de nucleotidevolgorde van een gen in het DNA gekopieerd naar een ander nucleïnezuur: RNA. Met RNA kan een ribosoom een eiwit maken. Wat is RNA en waarin verschilt het van DNA?

DE BOUW VAN RNA

Door DNA-replicatie heeft elke cel in een organisme exact hetzelfde DNA. Met de informatie in de genen van het DNA kunnen ribosomen in de cel eiwitten synthetiseren. Hiervoor wordt de DNA-sequentie van een gen eerst 'overgeschreven' in een RNA-molecuul. **RNA** is een nucleïnezuur en is meestal enkelstrengs. RNA bestaat net als DNA uit nucleotiden, maar het heeft een andere moleculaire structuur. De nucleotiden bevatten ribose in plaats van desoxyribose, en uracil (U) in plaats van thymine (zie afbeelding 27 en *BiNaS* tabel 71A en C).

■ **Afb. 27** Een RNA-nucleotide.



DE FUNCTIE VAN RNA

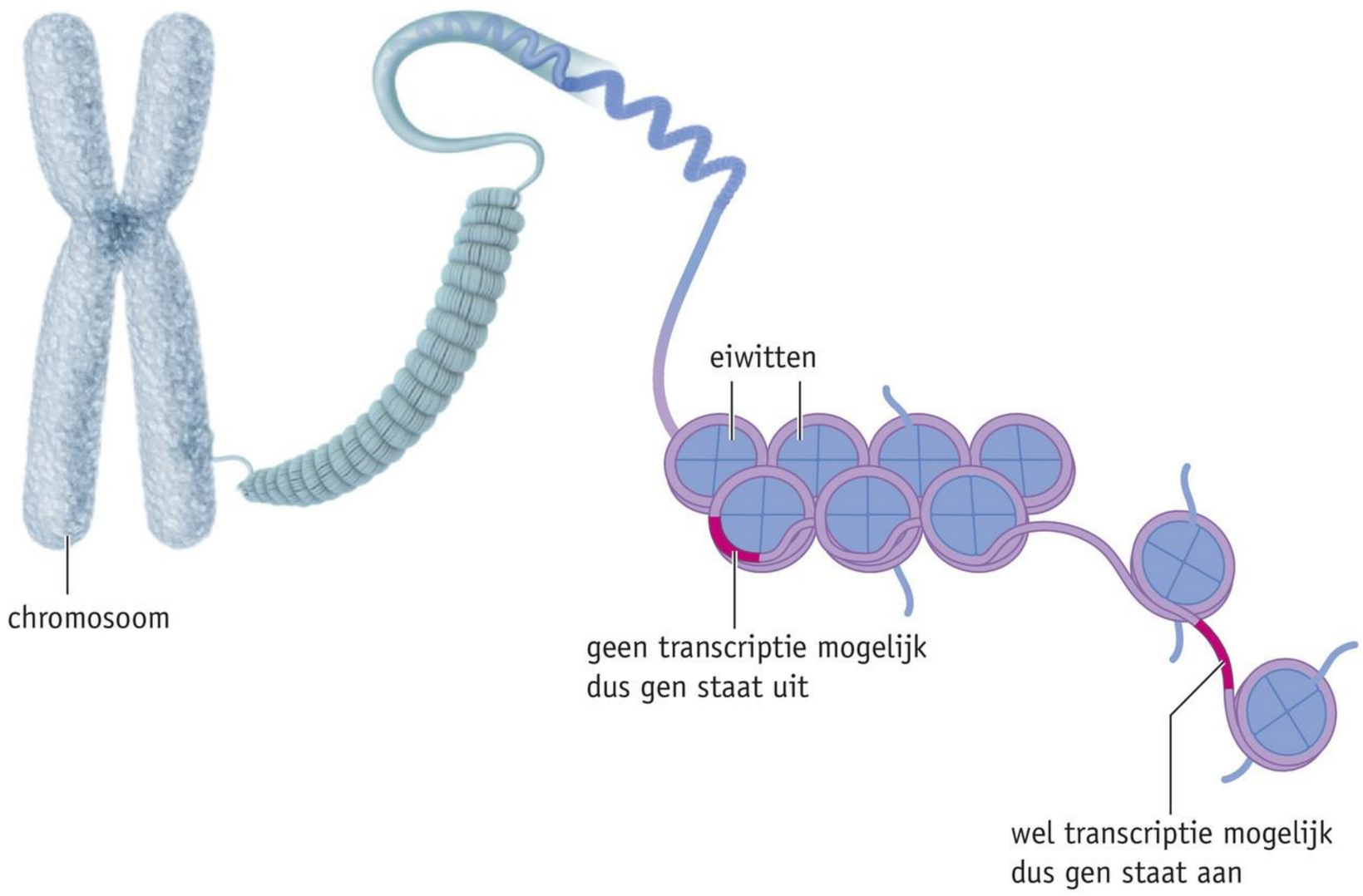
Het RNA dat langs de DNA-sequentie van een gen is gevormd, brengt de informatie voor de synthese van een eiwit over naar een ribosoom en heet daarom **mRNA** (messenger-RNA). Een ribosoom leest de nucleotidevolgorde van het mRNA af en synthetiseert hiermee een eiwit.

Er zijn ook andere typen RNA-moleculen. Deze worden gevormd in de celkern met behulp van genetische informatie in het DNA. Alle typen RNA spelen een rol bij de productie van eiwitten in een cel. **rRNA** (ribosomaal RNA) is een belangrijk bestanddeel van ribosomen. **tRNA** (transfer-RNA) bindt aminozuren (de bouwstenen van eiwitten) uit het cytoplasma en vervoert die naar een ribosoom voor de synthese van een eiwit.

TRANSCRIPTIE

De vorming van mRNA heet **transcriptie**. Bij eukaryote organismen moet het compacte DNA eerst worden ontvouwen om transcriptie mogelijk te maken (zie afbeelding 28).

■ **Afb. 28** DNA ontvouwt zich om transcriptie mogelijk te maken.



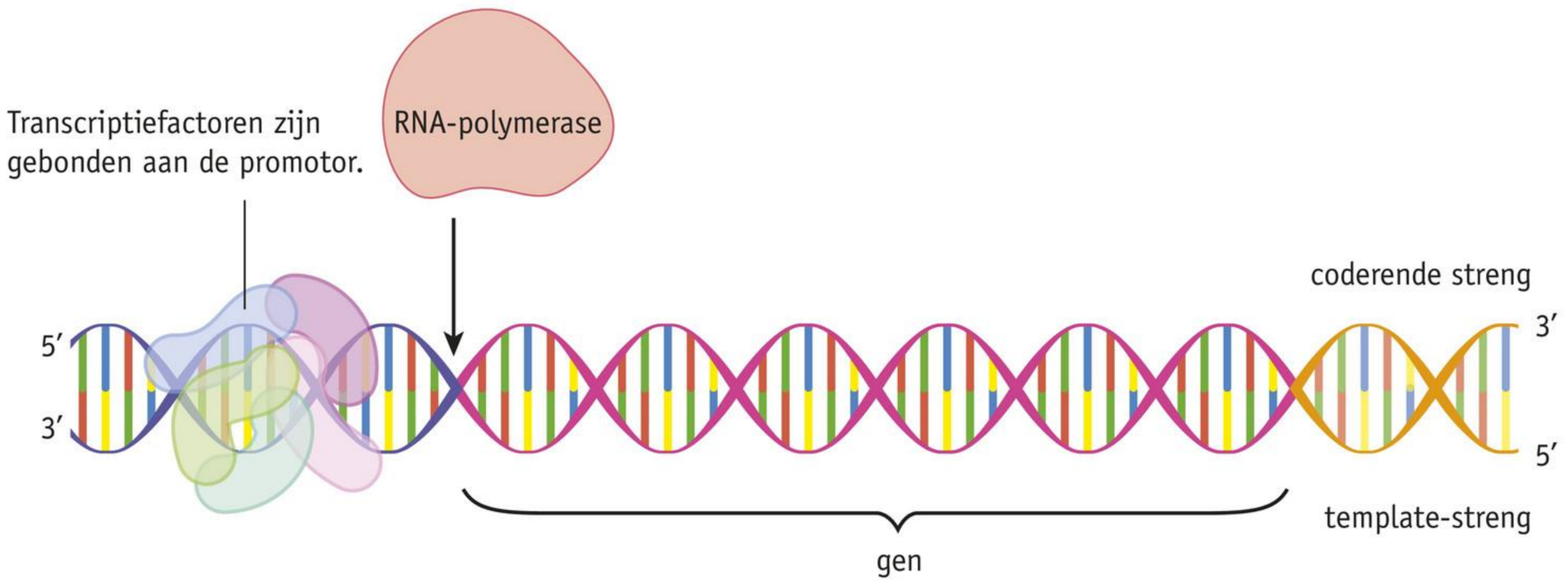
Transcriptie verloopt in de volgende drie stappen (zie afbeelding 29):

1 Transcriptie begint wanneer het enzym **RNA-polymerase** (zie *BiNaS* tabel 71E) bindt aan een specifieke volgorde van nucleotiden. De plaats in het DNA waaraan RNA-polymerase kan binden, noem je de **promotor**. Meestal bevindt de promotor zich aan het begin van een gen. Bij eukaryoten kan RNA-polymerase alleen aan de promotor binden als er ook bepaalde eiwitten aan de promotor zijn gebonden (zie afbeelding 29.1). Deze eiwitten heten **transcriptiefactoren**.

2 Als RNA-polymerase zich aan een promotor heeft gebonden, verbreekt ze vanaf die plaats de waterstofbruggen tussen de twee DNA-ketens. De ketens scheiden hierdoor en de helixstructuur verdwijnt (zie afbeelding 29.2). De keten met de promotor noem je de **template-streng** of **matrijsstreng**. De andere keten heet de **coderende streng**. Transcriptie vindt plaats langs de template-streng. Bij een ander gen kan de andere DNA-keten de template-streng zijn. RNA-polymerase bindt vrije RNA-nucleotiden uit het kernplasma door complementaire basenparing aan de DNA-nucleotiden van de template-streng in de richting van het 3'-uiteinde naar het 5'-uiteinde. De nieuwe RNA-streng wordt hierdoor in de 5'→3'-richting gesynthetiseerd. Als de RNA-streng ongeveer tien nucleotiden lang is, laten de eerste RNA-nucleotiden los van de template-streng.

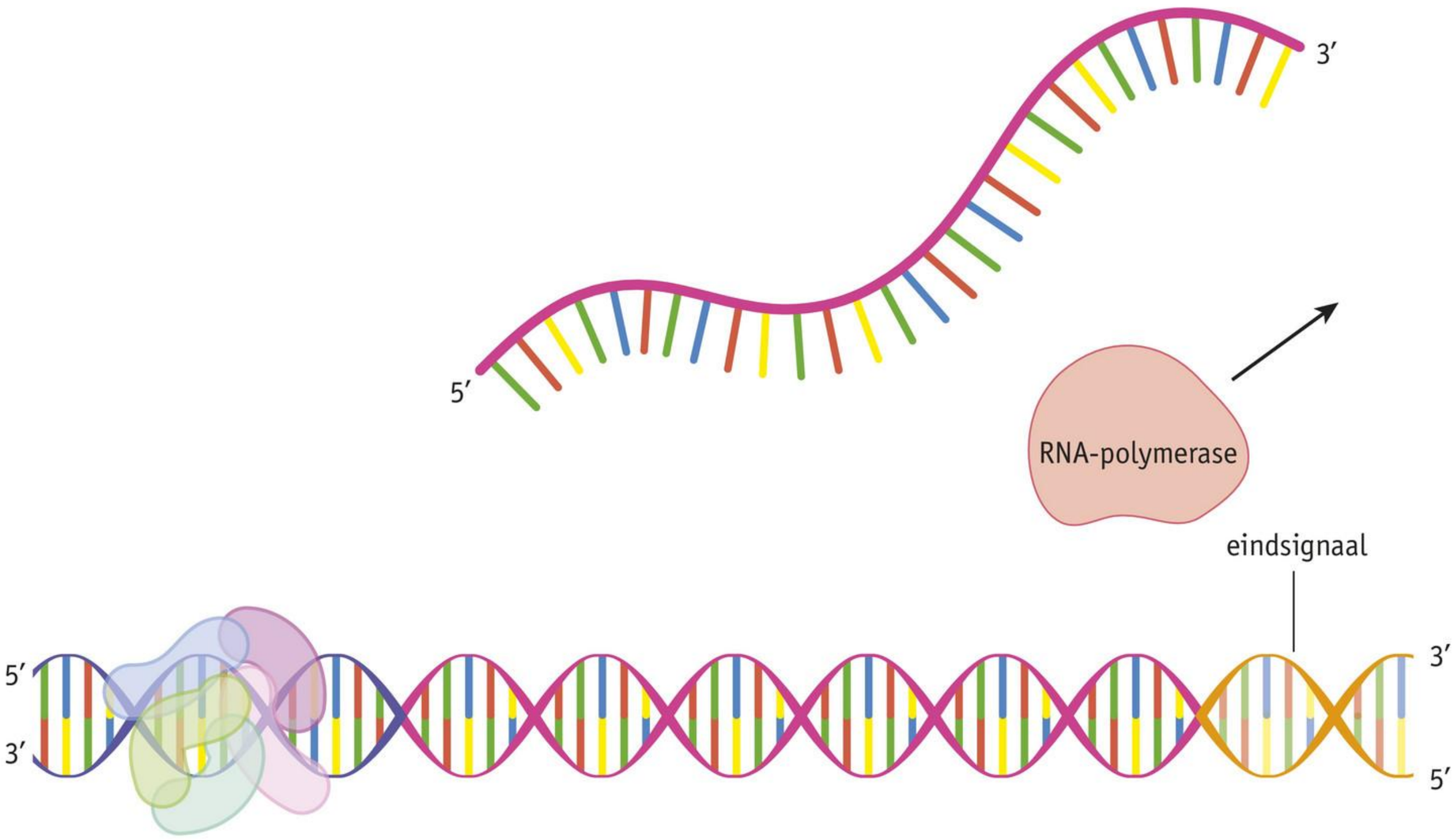
3 Ondertussen schuift RNA-polymerase steeds verder langs het DNA totdat het einde van het gen is bereikt (zie afbeelding 29.3). Doordat de RNA-polymerase hier opnieuw een specifieke volgorde van stikstofbasen in het DNA tegenkomt (het eindsignaal), stopt de transcriptie. RNA-polymerase laat dan los van het DNA en het RNA-molecuul laat los van de RNA-polymerase. Het DNA neemt weer zijn oorspronkelijke vorm aan.

■ **Afb. 29** Een overzicht van transcriptie.



1 Transcriptiefactoren binden zich aan een promotor in een DNA-molecuul. RNA-polymerase bindt vervolgens aan dit complex zodat de transcriptie kan beginnen.

2 RNA-polymerase verbreekt de waterstofbruggen tussen de DNA-nucleotiden en bindt vrije RNA-nucleotiden uit het kernplasma aan de DNA-nucleotiden in de template-streng. De RNA-streng laat vrij snel los van de template-streng.



3 Wanneer RNA-polymerase het eindsignaal heeft bereikt, stopt de transcriptie.
RNA-polymerase en de RNA-streng laten los van het DNA. De waterstofbruggen in het DNA herstellen zich weer.

Opdrachten KENNIS

30 Een deel van een template-streng van dubbelstrengs DNA heeft de nucleotidesequentie 3'-CGGATACGGTTA-5'.

a Wat is de sequentie van nucleotiden in het RNA-molecuul dat hierlangs wordt gesynthetiseerd?

b Als je kijkt naar de basenvolgorde, vertoont een RNA-molecuul dan de meeste gelijkenis met de template-streng waarlangs het is gevormd, of met de coderende streng? Leg je antwoord uit.

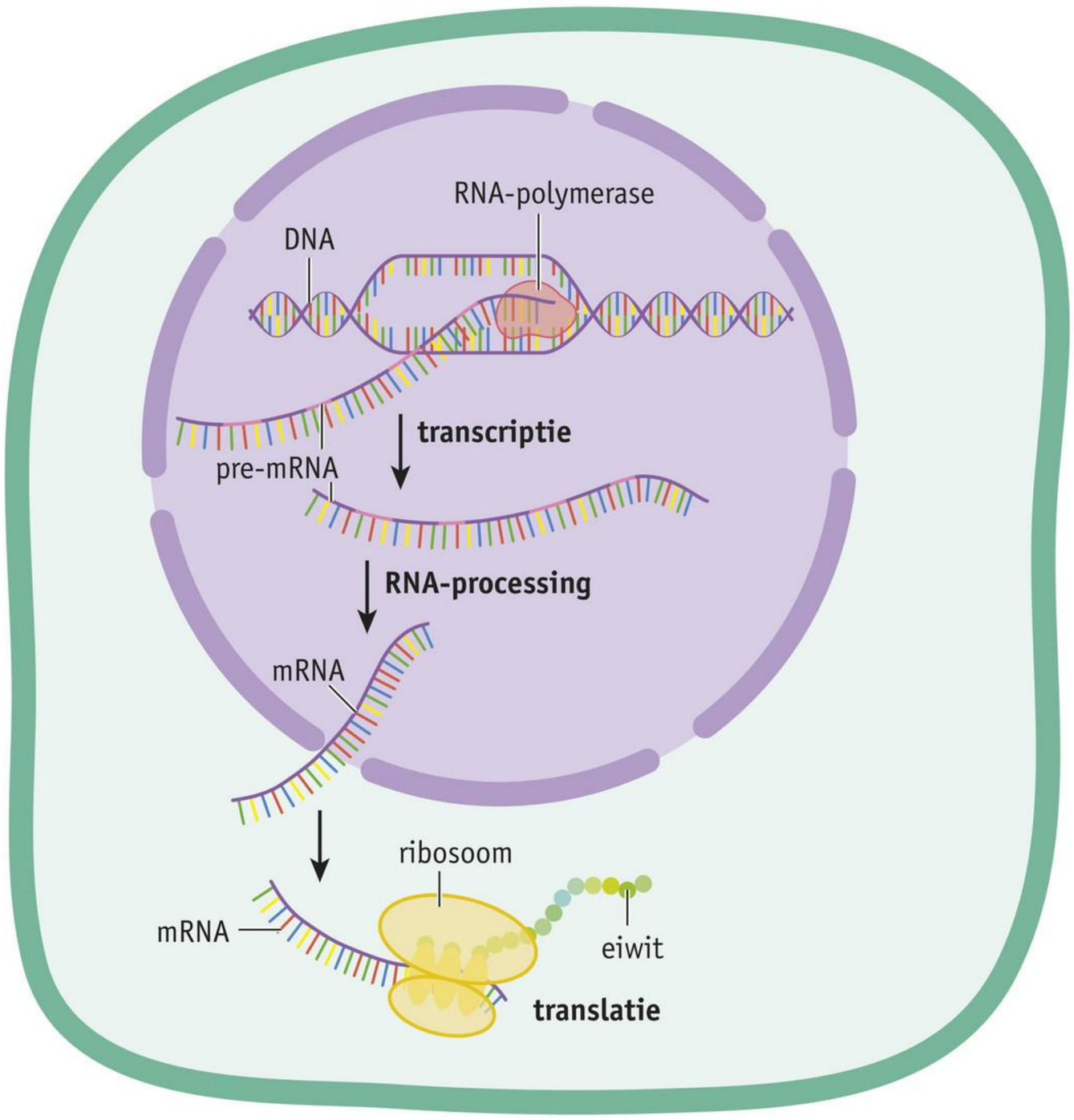
31 Welke voordelen heeft het dat de informatie van het DNA niet direct wordt afgelezen door ribosomen, maar eerst wordt omgezet in RNA-moleculen die worden afgelezen door ribosomen? Noem twee voordelen.

32 RNA-polymerase lijkt een veelzijdiger eiwit te zijn dan DNA-polymerase.
Waaruit blijkt dat?

mRNA EN PRE-mRNA

Er zijn verschillen in de transcriptie en de vorming van mRNA bij prokaryoten en eukaryoten. Bij eukaryoten bevinden de chromosomen zich in de celkern. Transcriptie vindt dus in de celkern plaats. Het RNA-molecuul dat daarbij wordt gesynthetiseerd, noem je pre-mRNA, omdat het nog wordt bewerkt voordat het de celkern kan verlaten. Het bewerken van het pre-mRNA heet ook wel RNA-processing. Door RNA-processing ontstaat een mRNA-molecuul dat via een kernporie de celkern verlaat, zodat zijn nucleotidevolgorde door een ribosoom kan worden afgelezen (zie afbeelding 30).

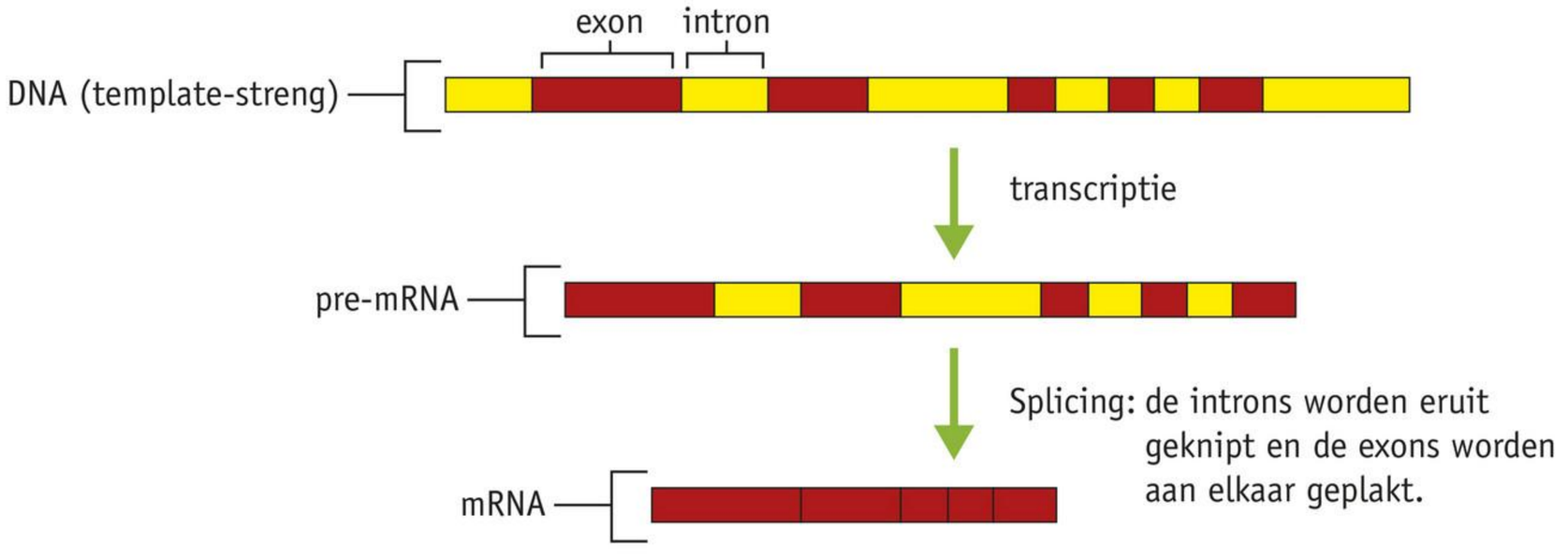
■ **Afb. 30** In een celkern van een eukaryoot wordt door transcriptie pre-mRNA gesynthetiseerd. Na RNA-processing ontstaat mRNA dat de celkern verlaat en in het cytoplasma wordt afgelezen door een ribosoom.



Pre-mRNA is langer dan mRNA (zie afbeelding 31). Bij veel eukaryoten bestaan de meeste genen namelijk uit lange, niet-coderende stukken DNA, die worden afgewisseld door korte, coderende stukken DNA. Niet-coderende stukken DNA in een gen noem je **introns**. De coderende stukken DNA in een gen heten **exons**. Alleen exons bezitten informatie voor de synthese van eiwitten.

Bij prokaryoten ontbreekt de celkern, waardoor het DNA los in het cytoplasma ligt. Hier vindt de transcriptie plaats. De genen van prokaryoten hebben geen introns. Ribosomen in het cytoplasma kunnen de nucleotidesequentie van het mRNA daardoor direct in een eiwit vertalen. Soms vinden er na de transcriptie nog kleine bewerkingen plaats, maar in veel mindere mate dan bij eukaryoten.

■ **Afb. 31** Transcriptie en splicing.

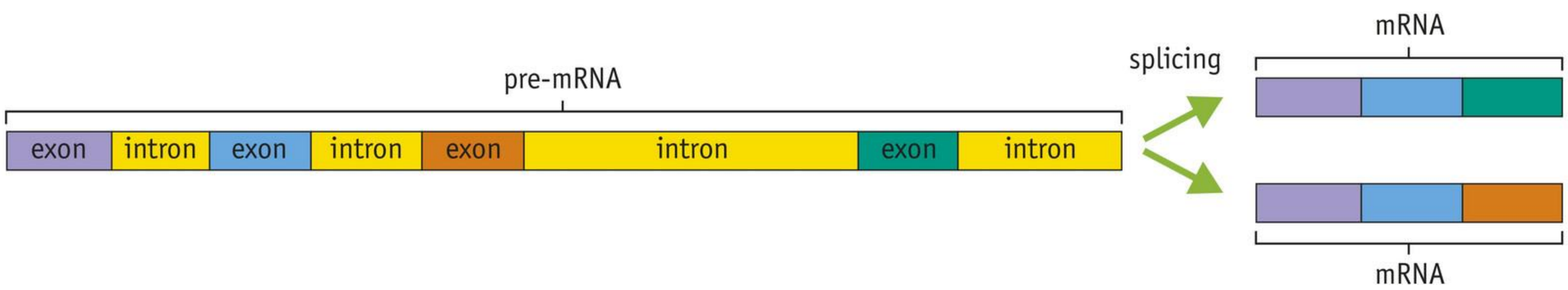


SPLICING

Bij transcriptie wordt de complete DNA-sequentie van een gen overgeschreven (zie afbeelding 31). Hierdoor ontstaat bij eukaryoten een pre-mRNA-molecuul dat zowel introns als exons bevat. De introns worden vervolgens uit het pre-mRNA geknipt en exons worden aan elkaar geplakt. Dit proces heet **splicing**. Door splicing wordt van een pre-mRNA-molecuul het uiteindelijke mRNA gemaakt. Dit mRNA gaat vanuit het kernplasma, via een kernporie, naar het cytoplasma. Hier vertaalt een ribosoom de nucleotidesequentie van het mRNA in een eiwit. De introns die uit het pre-mRNA zijn geknipt, worden afgebroken. Een deel daarvan wordt gebruikt om speciale typen RNA te vormen.

Doordat er verschillende mogelijkheden zijn voor splicing van een pre-mRNA-molecuul (alternatieve splicing), kunnen er verschillende mRNA-moleculen worden gevormd uit één pre-mRNA-molecuul. Hierdoor kan één gen coderen voor verschillende eiwitten. Het pre-mRNA kan bijvoorbeeld op verschillende plaatsen worden geknipt. En door de overgebleven exons op verschillende manieren samen te voegen, kunnen er ook verschillende mRNA's worden gevormd die voor meerdere eiwitten coderen (zie afbeelding 32).

■ **Afb. 32** Uit één pre-mRNA-molecuul kunnen verschillende mRNA's worden gevormd.



Opdrachten KENNIS

33 Een menselijk genoom bevat ongeveer 20 000 genen. Het totaal aantal verschillende eiwitten dat het menselijk lichaam kan aanmaken wordt geschat tussen de 80 000 en 400 000.

a Hoe kan het aantal soorten eiwit dat het menselijk lichaam kan aanmaken zoveel groter zijn dan het aantal genen in het menselijk genoom?

b Het menselijk lichaam is opgebouwd uit zo'n 250 verschillende celtypen. Sommige eiwitten worden door alle celtypen gebruikt, andere eiwitten komen slechts in één celtype voor.
Wat is het voordeel van alternatieve splicing voor een meercellig organisme?

34 Naast splicing wordt pre-mRNA nog op andere manieren bewerkt voor het als mRNA de celkern verlaat. Twee van deze aanpassingen zijn weergegeven in *BiNaS* tabel 71H.
Welke twee aanpassingen (naast splicing) van pre-mRNA zijn weergegeven in *BiNaS* tabel 71H en welk soort functie hebben ze?

35 Van een bepaald gen is de DNA-sequentie bekend. Om te bepalen waar de exons en introns van dit gen liggen, wordt uit een cel RNA geïsoleerd en gesequencet. Door de DNA- en RNA-sequenties te vergelijken, kun je vaststellen waar de exons en introns van het gen liggen.
Leg uit hoe je de locaties van de exons en introns zo kunt bepalen.

Opdrachten INZICHT

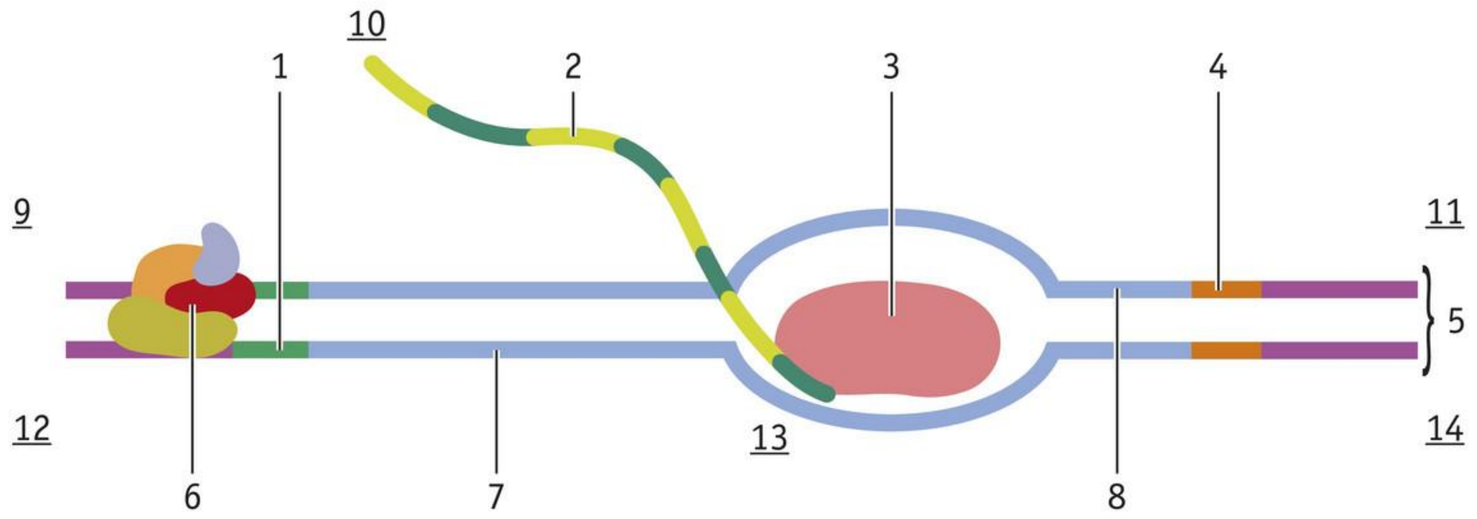
36 Een student doet onderzoek naar de nucleotidesamenstelling van een bepaald stuk dubbelstrengs DNA. Hij gebruikt hiervoor het mRNA dat is gevormd door transcriptie van dit bepaalde stuk DNA. Van de nucleotiden in dit mRNA bevat 45% de stikstofbase adenine, 15% bevat cytosine, 25% bevat guanine en 15% bevat uracil. Op grond van deze gegevens kan de student de nucleotidesamenstelling van het corresponderende DNA afleiden.
Wat is de procentuele verdeling van de verschillende stikstofbasen in de nucleotiden van het stuk DNA? Leg met een berekening uit hoe je aan je antwoord bent gekomen.

37 Afbeelding 33 is een schematische weergave van transcriptie in een eukaryote cel.

a Noteer de namen van onderdeel 1 tot en met 8.

b Noteer van nummer 9 tot en met 14 of het een '3'-uiteinde' of een '5'-uiteinde' is.

■ **Afb. 33** Transcriptie in een eukaryote cel.



38 Zowel DNA-polymerase als RNA-polymerase kan een verkeerde nucleotide inbouwen tijdens de synthese van respectievelijk DNA en RNA. Wanneer dit gebeurt tijdens het aflezen van een gen, kan dit gevolgen hebben voor de eiwitsynthese.
In welk geval zullen de gevolgen voor eiwitsynthese het grootst zijn: een fout van een DNA-polymerase of een fout van een RNA-polymerase? Verklaar je antwoord.

39 Retrovirussen zoals hiv hebben een genoom van RNA. Met behulp van het enzym reverse transcriptase kunnen deze virussen een deel van hun genoom inbouwen in het DNA van een gastheercel. Dit proces heet reverse transcriptie. In *BiNaS* tabel 77C zie je een schematisch overzicht van de levenscyclus van hiv. Gebruik dit overzicht om de volgende vragen te beantwoorden.

a Waarom is hier sprake van 'reverse' transcriptie?

b Het virus-RNA valt na reverse transcriptie uit elkaar. Toch neemt de concentratie virus-RNA in de geïnfecteerde cel na verloop van tijd toe.
Hoe komt dat?

c Om nieuw virus-RNA te maken zijn zowel een promotor als transcriptiefactoren nodig.
Welke van deze zal afkomstig zijn van de gastheercel en welke van het virus-RNA?
Verklaar je antwoord.

40 Introns hebben meestal specifieke basenvolgorden aan de uiteinden. Zo heeft het 5'-uiteinde van een intron vrijwel altijd de sequentie GU, en het 3'-uiteinde AG.
Wat zou de reden zijn dat introns dezelfde sequenties aan hun uiteinden hebben?

41 Transcriptiefactoren kunnen histon-eiwitten reguleren.
Hoe kunnen transcriptiefactoren via histon-eiwitten de transcriptie reguleren?

Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf.*

Context Wetenschap

mRNA-VACCINS

In de jaren 2020 en 2021 werd het openbare leven wereldwijd stilgelegd door de coronapandemie. Langdurige lockdowns om de verspreiding van het coronavirus te voorkomen zorgden voor gesloten scholen, winkels en andere openbare voorzieningen. Uiteindelijk zorgden snel ontwikkelde vaccins voor voldoende bescherming tegen het virus om de samenleving weer van het slot te halen.

Dat de vaccins zo snel konden worden ontwikkeld kwam door het gebruik van nieuwe mRNA-technieken. Traditionele vaccins bevatten vaak onschadelijk gemaakte viruseiwitten. Contact tussen deze eiwitten en het menselijk afweersysteem zorgt voor een immuunreactie die bescherming geeft tegen toekomstige infectie met het werkelijke virus.

De mRNA-vaccins bevatten geen viruseiwitten, maar kunstmatig nagebootst mRNA dat codeert voor deze eiwitten. Wanneer dit mRNA in het menselijk lichaam komt, kunnen de menselijke cellen het mRNA gebruiken om zelf tijdelijk de viruseiwitten te maken. Het mRNA wordt geproduceerd door plasmiden die in het lab zijn gemaakt.

mRNA-vaccins hebben meerdere voordelen ten opzichte van traditionele vaccins. Zo is er geen actief virus nodig om de viruseiwitten voor een vaccin te maken en is de productie van het vaccin dus veiliger en sneller. Daarnaast kun je de plasmiden gemakkelijk aanpassen om ander mRNA te maken dat nieuwe varianten van het virus kan bestrijden.

■ **Afb. 34** Een vaccinatiecentrum tijdens de coronapandemie.

Opdrachten

42 Voor de productie van een mRNA-vaccin is een plasmide nodig. Deze plasmide bestaat onder andere uit een stuk DNA dat codeert voor het virus-mRNA.

a Wat is nog meer nodig om met deze plasmide mRNA-transcriptie uit te voeren?

b Als een mRNA-vaccin minder effectief is voor een nieuwe variant van een virus, kun je de plasmide aanpassen om de nieuwe variant beter na te bootsen.
Hoe moet je de plasmide dan aanpassen?

43 Het mRNA in mRNA-vaccins is verpakt in een dragermolecuul, zodat het een celmembraan kan passeren.

a Waarom is dat belangrijk voor de werking van het vaccin?

b Elk mRNA-molecuul wordt na verloop van tijd afgebroken in het cytoplasma.
Waarom is dit gunstig voor de veiligheid van het mRNA-vaccin?

c Sommige mensen zijn tegen het gebruik van mRNA-vaccins, omdat ze het zien als 'gentherapie', waarbij het menselijk DNA in de cel wordt gewijzigd.
Leg uit waarom een mRNA-vaccin hier niet toe in staat is.

4 TRANSLATIE EN EIWITSYNTHESE

LEERDOELEN

10.4.1 Je kunt beschrijven hoe translatie plaatsvindt.
10.4.2 Je kunt beschrijven hoe eiwitsynthese plaatsvindt.

TAXONOMIE	LEERDOELEN EN OPDRACHTEN	
	10.4.1	**10.4.2**
Begrijpen	44, 45, 48	46, 47
Toepassen	51a, 52, 53ab, 54a	54b
Analyseren	49, 50, 53c, 57	51b, 55, 56

Eiwitten vervullen talloze functies in je lichaam. Zo zijn er signaaleiwitten, enzymen, transporteiwitten en beschermende eiwitten. DNA en RNA bevatten de instructies om al die eiwitten te synthetiseren. Hoe wordt die informatie vertaald naar een eiwit?

GENETISCHE CODE

De genetische informatie in het DNA wordt gebruikt voor de synthese van eiwitten (proteïnen). Door de werking van eiwitten komen erfelijke eigenschappen zoals oogkleur, lichaamsbouw en afweer tot uiting in het fenotype. Eiwitten zijn opgebouwd uit aminozuren. Het aantal en de volgorde van de aminozuren verschillen van eiwit tot eiwit, waardoor ook de eigenschappen van de eiwitten verschillen.

In het cytoplasma van een cel is altijd een voorraad van de verschillende aminozuren voor de eiwitsynthese aanwezig. Door aminozuren op te nemen uit de omgeving of door aminozuren zelf te maken, blijft deze voorraad op peil. Een ribosoom koppelt de aminozuren aan elkaar tot eiwitten, in een volgorde die wordt bepaald door een mRNA-molecuul. Dit noem je **translatie**.

mRNA bevat vier verschillende nucleotiden, maar er zijn twintig verschillende aminozuren. Om één aminozuur te coderen, zijn daarom drie opeenvolgende nucleotiden nodig. Die drie nucleotiden samen noem je een **codon**.

In tabel 1 is de **genetische code** weergegeven. De genetische code is de vertaling van de nucleotidevolgorde naar aminozuren. In de tabel is af te lezen welke **tripletcode** correspondeert met welk aminozuur. Voorbeeld: de tripletcode UUU codeert voor het aminozuur fenylalanine (Phe).

De synthese van een aminozuurketen start altijd met de tripletcode AUG. Dit noem je het **startcodon**. In de tabel is af te lezen dat dit codon codeert voor het aminozuur methionine (Met). Elke aminozuurketen begint dan ook met methionine. Bij de meeste eiwitten wordt dit aminozuur later weer van de keten afgesplitst.

Drie tripletcodes coderen niet voor een aminozuur. Dit zijn de **stopcodons**. Doordat geen aminozuur kan worden ingebouwd, stopt de eiwitsynthese bij een stopcodon.

Tabel 1 De genetische code.

1e base in codon	2e base in codon: U	2e base in codon: C	2e base in codon: A	2e base in codon: G	3e base in codon
U	Phe	Ser	Tyr	Cys	U
	Phe	Ser	Tyr	Cys	C
	Leu	Ser	**STOP**	**STOP**	A
	Leu	Ser	**STOP**	Trp	G
C	Leu	Pro	His	Arg	U
	Leu	Pro	His	Arg	C
	Leu	Pro	Gln	Arg	A
	Leu	Pro	Gln	Arg	G
A	Ile	Thr	Asn	Ser	U
	Ile	Thr	Asn	Ser	C
	Ile	Thr	Lys	Arg	A
	Met	Thr	Lys	Arg	G
G	Val	Ala	Asp	Gly	U
	Val	Ala	Asp	Gly	C
	Val	Ala	Glu	Gly	A
	Val	Ala	Glu	Gly	G

tRNA

Om de eiwitsynthese op gang te houden, hebben de ribosomen een constante toevoer van aminozuren nodig. Het cytoplasma bevat tRNA-moleculen (transfer-RNA; zie *BiNaS* tabel 71K), die aminozuren uit het cytoplasma binden en deze vervoeren naar een ribosoom.

Een tRNA-molecuul is een RNA-molecuul met een enigszins ‘opgevouwen’ ruimtelijke vorm. Dat komt doordat bepaalde delen zich door complementaire basenparing met waterstofbruggen aan andere delen van hetzelfde molecuul binden (zie afbeelding 35). Alle tRNA-moleculen hebben aan één uiteinde dezelfde drie ongepaarde nucleotiden: CCA. Hieraan kan een enzym een aminozuur binden. Elk aminozuur wordt door een specifiek enzym aan een specifiek tRNA-molecuul gebonden. Zo ontstaan er verschillende tRNA-aminozuurcomplexen.

1 CHEMIE IN CELLEN

LEERDOEL

9.1.1 Je kunt beschrijven wat stofwisseling, assimilatie en dissimilatie zijn en wat er bij deze reacties met de energie gebeurt.

- Vaardigheid 6 (thema 1)
- Practicum 1

TAXONOMIE	LEERDOEL EN OPDRACHTEN
	9.1.1
Begrijpen	1, 2, 3, 4, 5
Toepassen	6a, 7, 9a, 10ab, 11
Analyseren	6bc, 8, 9bc, 10c

Je lichaam bestaat uit miljarden cellen. In elke cel bruist het dag en nacht van de chemische activiteit. Stoffen worden gevormd en gebruikt om cellen op te bouwen. Andere stoffen worden afgebroken en zorgen voor de broodnodige energie. Hoe haalt een cel energie uit een stof?

STOFWISSELING

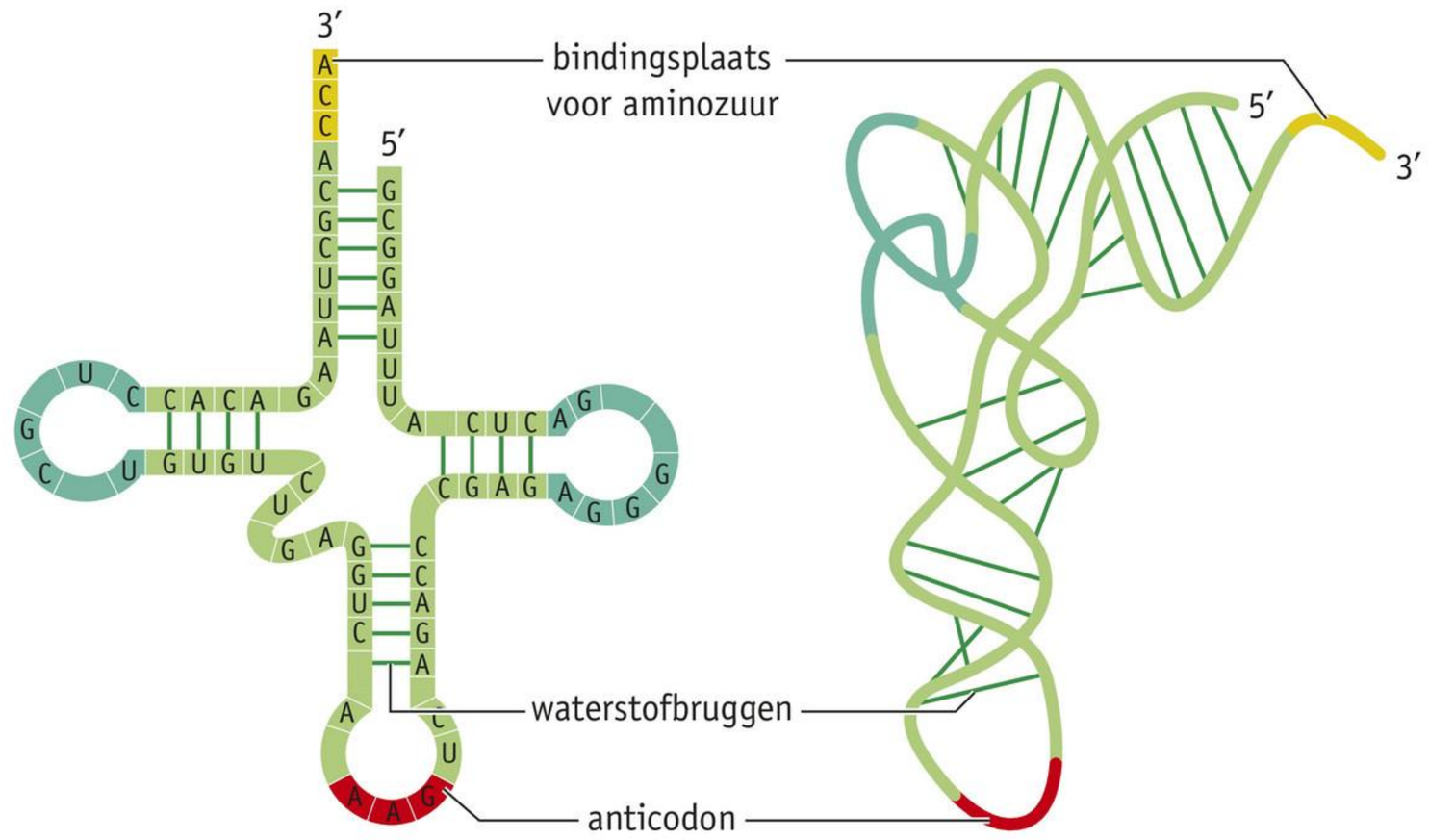
Het geheel van chemische omzettingsprocessen in een organisme is de **stofwisseling** (metabolisme). Een groot deel van de stofwisseling vindt plaats in cellen. Levende cellen nemen stoffen op uit hun omgeving en zetten die stoffen om in andere stoffen. Die omzettingen zijn nodig voor de opbouw en instandhouding van de cel en de energievoorziening.

Tot het basale metabolisme (de grondstofwisseling) behoren de processen die altijd plaatsvinden in je lichaam, zoals de hartslag, de ademhalingsbewegingen en de peristaltische bewegingen van het darmkanaal. Door de hoeveelheid zuurstof te meten die een individu in rust verbruikt, kun je de intensiteit van het basale metabolisme bepalen. Die blijkt onder andere afhankelijk te zijn van het geslacht, de leeftijd en het lichaamsgewicht.

ENERGIERIJKE ORGANISCHE STOFFEN

Cellen bestaan uit organische en anorganische stoffen. Anorganische stoffen die in organismen voorkomen, bestaan uit kleine, eenvoudig gebouwde moleculen. Ze bevatten weinig **chemische energie**. Dit is de energie die in de atoombindingen van stoffen is opgeslagen. De moleculen van organische stoffen bevatten een of meer koolstofketens die enkele tot duizenden koolstofatomen bevatten. Een organisch molecuul bevat naast het element koolstof (C) altijd het element waterstof (H) en meestal zuurstof (O). Om de bindingen tussen koolstof- en waterstofatomen tot stand te brengen, is energie nodig. Bij het verbreken van de C–H-bindingen komt de energie beschikbaar voor de cel. Organische stoffen bevatten veel chemische energie.

■ **Afb. 35** Een tRNA-molecuul.



1 tweedimensionale weergave **2** driedimensionale weergave

Op een van de lussen die naar buiten uitsteken, bevinden zich drie nucleotiden die een **anticodon** vormen. De stikstofbasen in dit anticodon kunnen zich door basenparing binden aan de stikstofbasen in een complementair codon van een mRNA-molecuul. Het codon UUU in mRNA dat codeert voor het aminozuur fenylalanine (Phe), heeft AAA als anticodon. Aan het tRNA-aminozuurcomplex met het anticodon AAA is dus het aminozuur fenylalanine gekoppeld.

Opdrachten KENNIS

44 Een mRNA-molecuul heeft de volgende structuur: 5'-AUGACGGAGCUUCGGAGCUAG-3'

a Hoe ziet de bijbehorende aminozuurketen eruit na translatie? Gebruik tabel 1 of *BiNaS* tabel 71G.

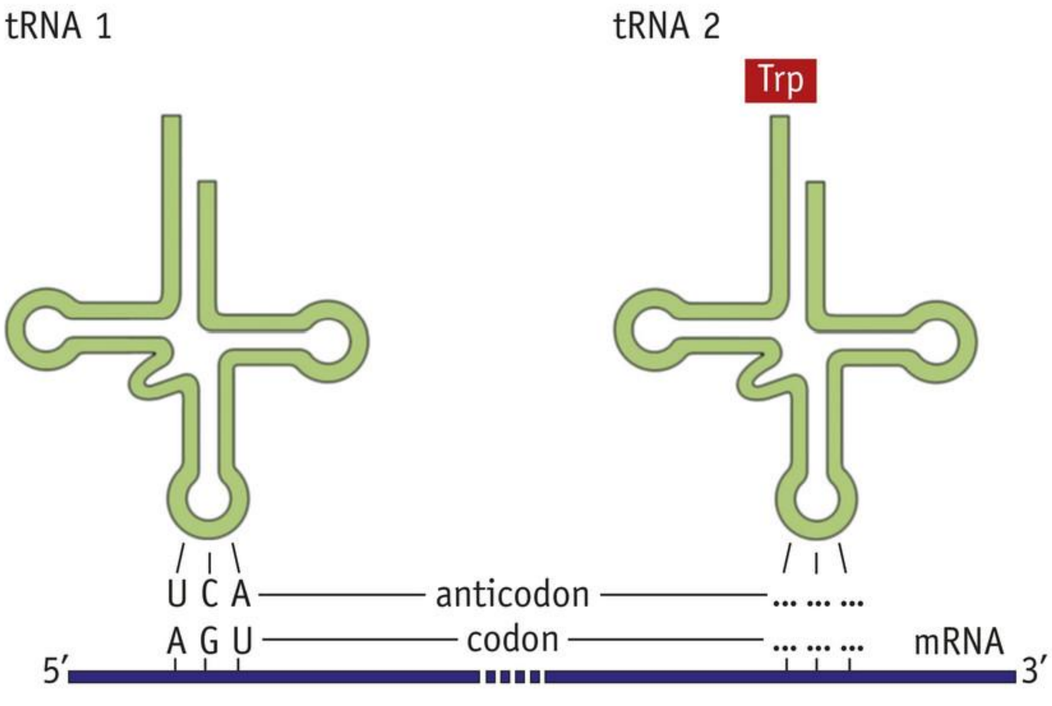
b Kun je andersom aan de hand van een aminozuurketen de mRNA-sequentie achterhalen? Verklaar je antwoord.

45 Bekijk afbeelding 36.

a Welk aminozuur wordt er door een enzym gebonden aan de bindingsplaats van tRNA 1 in de afbeelding? Gebruik hierbij tabel 1 of *BiNaS* tabel 71G.

b Aan de bindingsplaats van tRNA 2 in afbeelding 36 is tryptofaan (Trp) gebonden. Noteer de stikstofbasen in het codon van mRNA en in het anticodon van het tRNA.

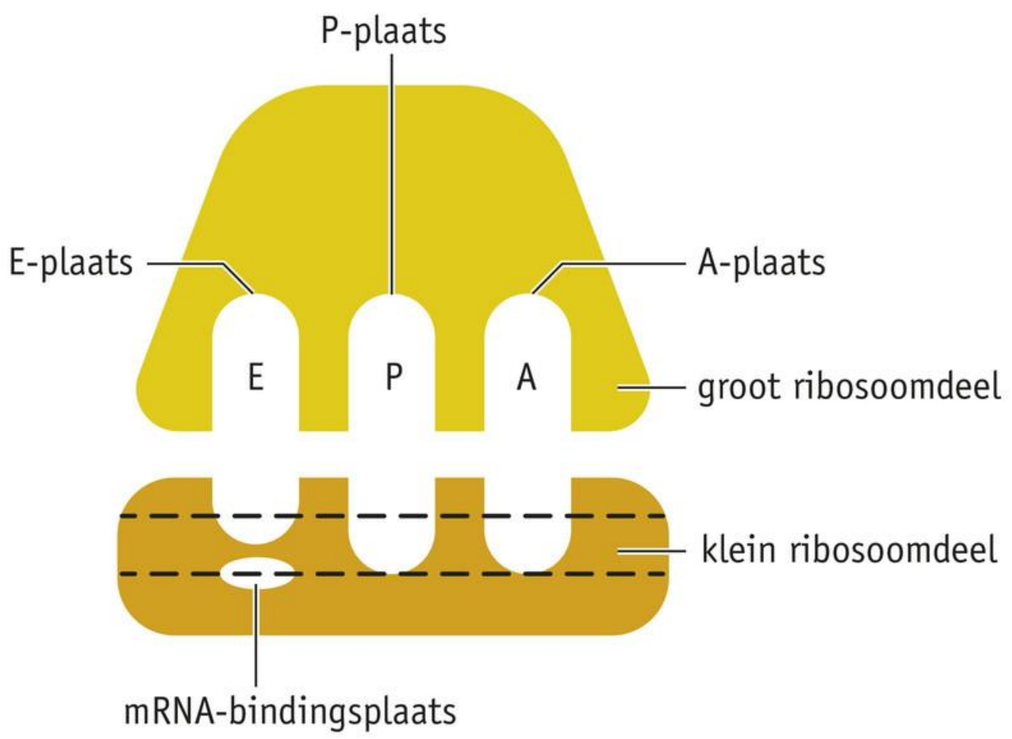
■ **Afb. 36** Twee tRNA-moleculen.



RIBOSOMEN

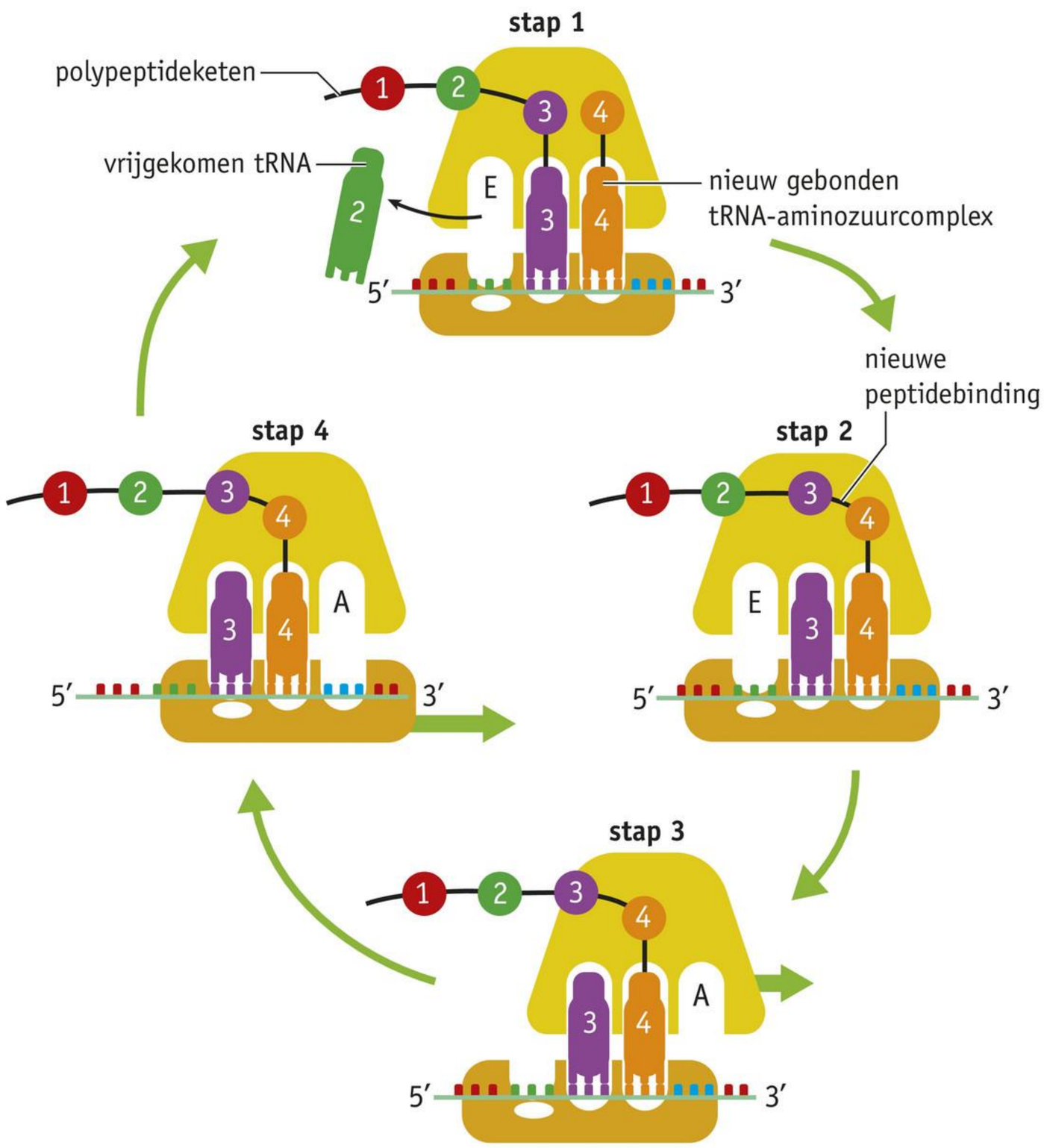
Ribosomen bestaan uit een klein deel en een groot deel. Beide delen zijn opgebouwd uit rRNA-moleculen en eiwitten (zie afbeelding 37). Ribosomen koppelen aminozuren aan elkaar tot eiwitten (polypeptideketens). Het kleine ribosoomdeel heeft daarvoor een mRNA-bindingsplaats en het grote ribosoomdeel heeft drie tRNA-bindingsplaatsen (E, P en A).

■ **Afb. 37** Een ribosoom met de bindingsplaatsen voor mRNA en tRNA.



Bij het begin van de translatie bindt het kleine ribosoomdeel aan het 5'-uiteinde van een mRNA-molecuul. Het ribosoom schuift door tot het kan binden aan het startcodon. Daarna bindt het anticodon van een tRNA-methioninecomplex aan het startcodon. Vervolgens bindt een groot ribosoomdeel en kan de translatie beginnen. Het ribosoom schuift langs het mRNA-molecuul, codon na codon, en elk codon passeert achtereenvolgens bindingsplaatsen A, P en E in het ribosoom (zie afbeelding 38).

■ **Afb. 38** Translatie.



Stap 1: Een tRNA-aminozuurcomplex met een anticodon dat complementair is aan het codon op de A-plaats in mRNA, wordt gebonden door waterstofbruggen.
Een tRNA-molecuul dat zijn aminozuur heeft afgeleverd, verlaat tegelijkertijd de E-plaats.

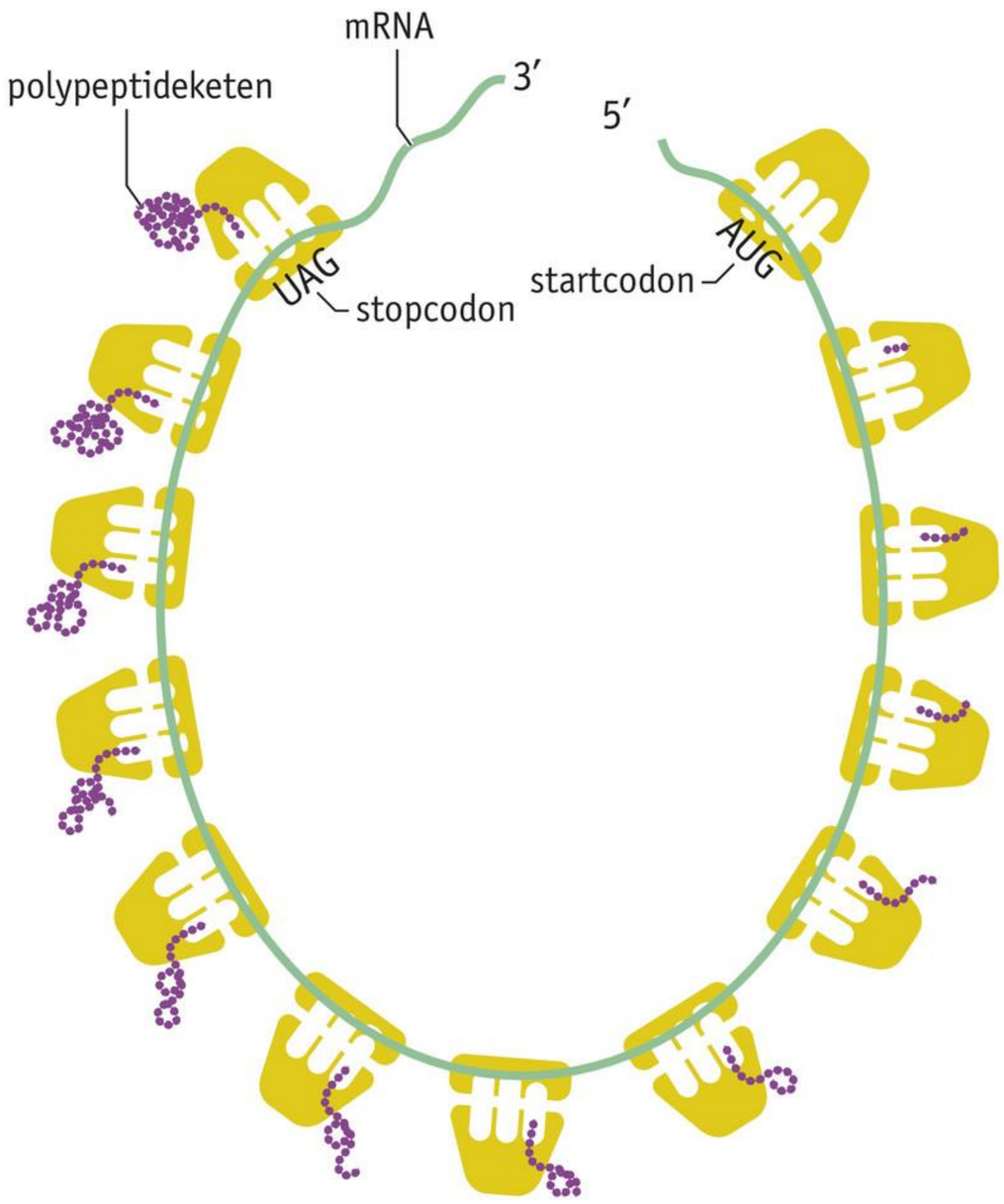
Stap 2: Op de P-plaats komt het aminozuur van het tRNA-aminozuurcomplex vrij.
Het aminozuur gaat een peptidebinding aan met het aminozuur op de A-plaats, waardoor de aminozuurketen groeit.

Stap 3: Het grote ribosoomdeel schuift nu drie nucleotiden door richting het 3'-uiteinde.
Het tRNA op plaats P schuift door naar plaats E.
Het tRNA-aminozuurcomplex op plaats A schuift door naar plaats P.

Stap 4: Hierna schuift het kleine ribosoomdeel met het gebonden mRNA ook drie nucleotiden verder op.
De A-plaats is vrij om een nieuw tRNA-aminozuurcomplex te binden.

Als een ribosoom een stuk voorbij het startcodon is, kan een ander ribosoom binden aan het startcodon. Zo kunnen er meerdere ribosomen tegelijkertijd zijn gebonden aan één mRNA-molecuul. De cel kan dan in een bepaalde tijd veel meer eiwitten maken. Met een elektronenmicroscoop zijn vaak clusters van ribosomen in de cel zichtbaar. Ze kunnen los voorkomen in het cytoplasma of zijn gebonden aan het endoplasmatisch reticulum. Doordat een mRNA-molecuul vaak in een cirkel ligt, kan een ribosoom dat klaar is met de translatie, zich meteen opnieuw binden aan het startcodon (zie afbeelding 39).

■ **Afb. 39** Een mRNA-molecuul met meerdere ribosomen.

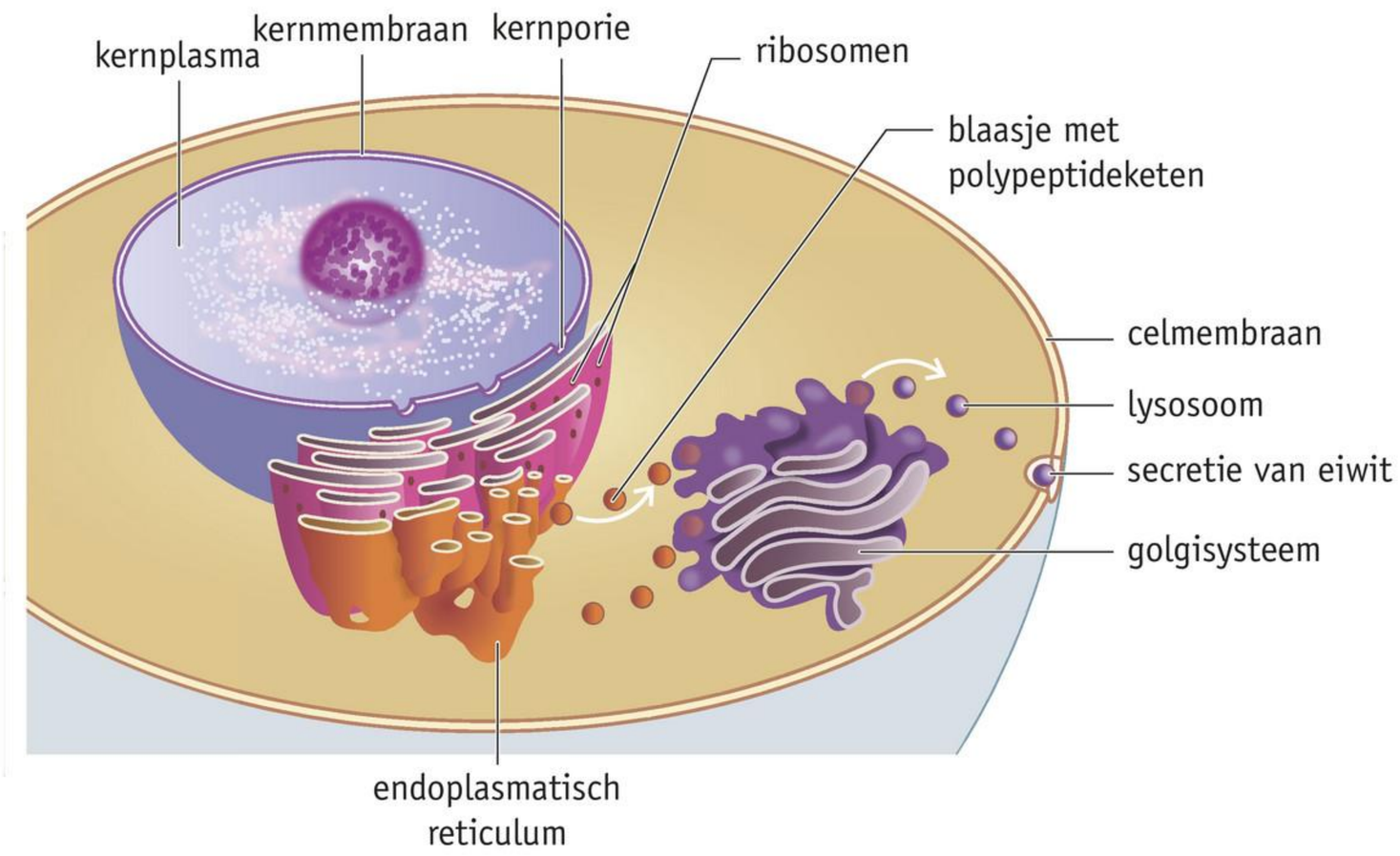


De translatie stopt wanneer een ribosoom een stopcodon bereikt. Er bestaat geen tRNA-aminozuurcomplex dat een stopcodon kan herkennen. In plaats daarvan bindt er een speciaal eiwitmolecuul (release-factor) aan het stopcodon in mRNA, waardoor de aminozuurketen loslaat en het kleine en grote ribosoomdeel uit elkaar gaan.

EIWITTEN

Nieuwe eiwitten die in een cel zijn gevormd door ribosomen die vrij in het cytoplasma liggen, komen in het cytoplasma terecht. Zijn de eiwitten gevormd door ribosomen op het endoplasmatisch reticulum, dan komen ze in het endoplasmatisch reticulum terecht. Door vouwing ontstaat dan de driedimensionale structuur. Een groot deel van de eiwitten gaat vervolgens naar het golgisysteem. Veel eiwitten worden daar nog verder bewerkt, maar sommige eiwitmoleculen worden pas functioneel als ze buiten de cel zijn afgescheiden (zie afbeelding 40). Wanneer een eiwit niet de juiste vorm heeft, kan het zijn functie niet uitvoeren en wordt het meestal vernietigd door bepaalde enzymen: de proteasen. Eiwitten met een verkeerde vorm kunnen ziekten veroorzaken als ze niet worden afgebroken en samenklonteren. Soms functioneren ze wel, maar voeren ze hun taak niet goed uit. Ook dat kan ziekten veroorzaken. Ziekten als diabetes, taaislijmziekte (cystische fibrose) of de ziekte van Alzheimer worden veroorzaakt door verkeerd gevouwen eiwitten.

■ **Afb. 40** De vorming en verwerking van eiwitten.



Opdrachten KENNIS

46 Een ribosoom heeft drie posities waar het een tRNA-aminozuur-complex kan binden: A, P en E.

a Op welke positie in het ribosoom gaat een aminozuur een peptidebinding aan met het aminozuur van het tRNA waardoor de aminozuurketen groeit?

b Cytoplasma bevat enzymen die mRNA afbreken.
Leg uit dat deze enzymen nodig zijn voor een goed functioneren van de cel.

47 Waarom is een eiwit nog niet meteen functioneel als het door een ribosoom is gesynthetiseerd?

48 Vul het onderstaande schema in. Daarbij worden de verschillen en overeenkomsten tussen DNA-replicatie, transcriptie en translatie duidelijk.

Processen	DNA-replicatie	Transcriptie	Translatie
Wat ontstaat er bij het proces?			
Waaruit is het opgebouwd?			
Waardoor wordt het opgebouwd?			
Waar begint het proces?			
Wat wordt er afgelezen?			
In welke richting vindt het aflezen plaats?			
Wanneer stopt het proces?			
Waar in de cel vindt het plaats?			

Opdrachten INZICHT

49 De coderende streng van een gen heeft de volgende DNA-sequentie:
5'- GATGCGGAGACATGGTGTGACTACGTAA-3'
Hoe ziet de aminozuurketen eruit na transcriptie en translatie van dit gen?

50 De genetische code bestaat uit tripletcodes, omdat er minimaal drie nucleotiden nodig zijn om voor elk van de twintig aminozuren te kunnen coderen.

a Toon met een berekening aan dat codons van twee nucleotiden te klein zijn om voor twintig aminozuren te coderen.

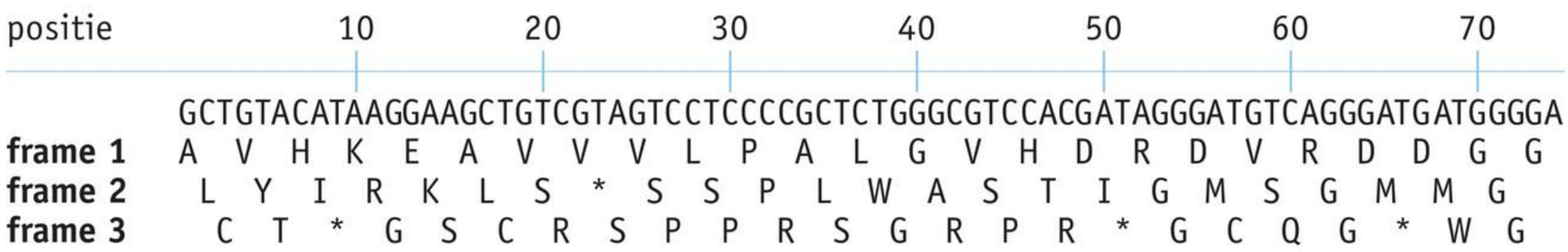
b Omdat er meer verschillende tripletcodes zijn dan aminozuren, coderen meestal meerdere tripletcodes voor hetzelfde aminozuur.
Welke basepositie in de tripletcode varieert meestal, zonder dat het bijbehorende aminozuur verandert? Gebruik afbeelding 38 of *BiNaS* tabel 71G.

51 Het gen galactokinase 1 (GALK1) is bij mensen van start- tot stopcodon 20 731 nucleotiden lang.

a Hoe kun je hieruit afleiden dat het gen minstens een intron heeft?

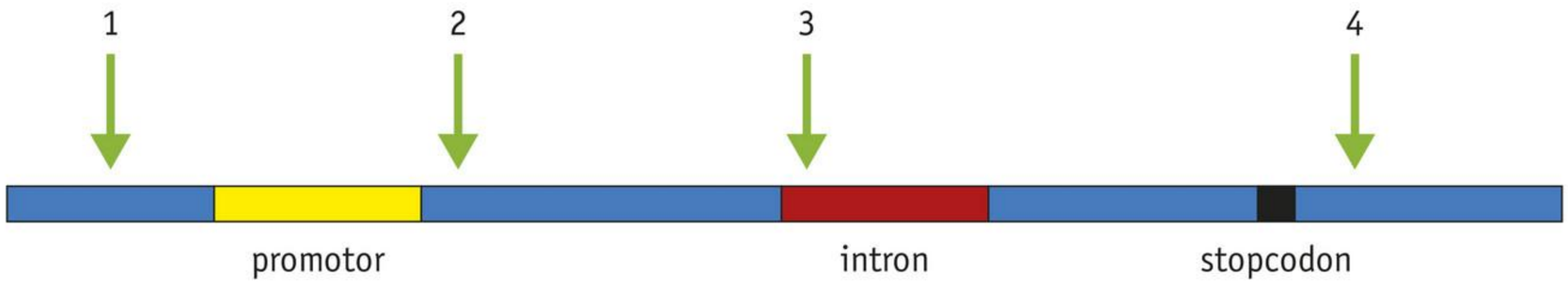
b Het GALK1-gen heeft acht exons. In afbeelding 41 is een deel van de DNA-sequentie van het tweede exon van GALK1 weergegeven. Afhankelijk van of je met translatie begint bij de eerste, tweede of derde nucleotide (het frame of venster), ontstaan verschillende aminozuursequenties. De drie mogelijke aminozuursequenties die na translatie van dit stukje DNA kunnen ontstaan, staan onder de nucleotidesequentie weergegeven.
Welk frame geeft de aminozuursequentie weer die onderdeel uitmaakt van het werkelijke eiwit?

■ **Afb. 41** Nucleotidesequentie en translatieframes van een deel van een exon van GALK1.



52 In afbeelding 42 is schematisch een stukje enkelstrengs DNA weergegeven. Te zien zijn de promotor, een intron en een stopcodon van een gen. De genummerde pijlen geven posities 1-4 in het DNA aan waar zich een tripletcode voor het aminozuur methionine bevindt.
Welk van deze posities zou het startcodon van dit gen kunnen zijn?

■ **Afb. 42** Schematische weergave van een stukje DNA met een gen.



53 De uitbreiding van het genetisch alfabet

Naar: Voorronde Biologie Olympiade Bovenbouw 2021.

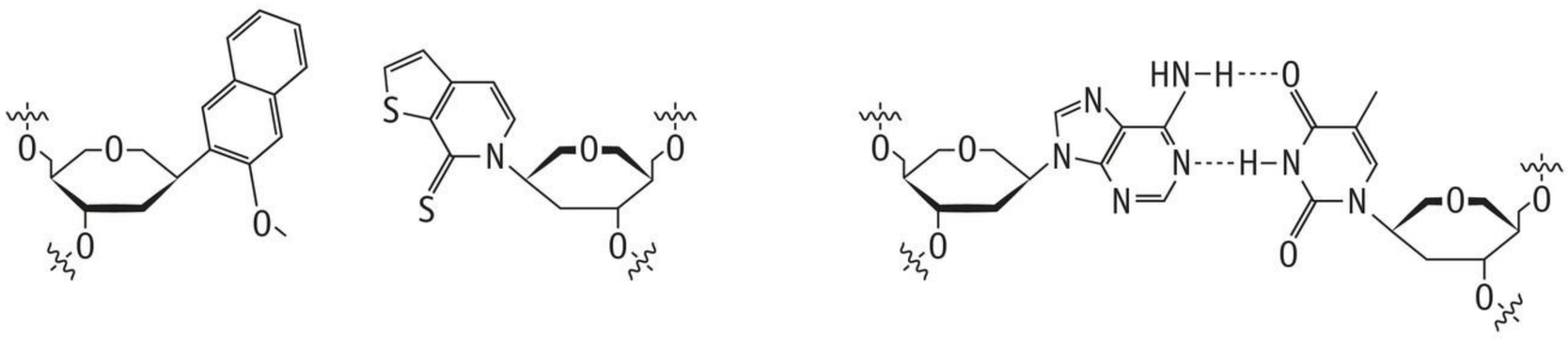
Het vakgebied synthetische biologie houdt zich bezig met het herontwerpen van een levend systeem, zodat dit iets gaat doen dat het van nature niet kan.
Wetenschappers van een onderzoeksinstituut in Californië zijn erin geslaagd om de bacterie *Escherichia coli* een nieuw basenpaar in te laten bouwen. Deze nieuwe genetische informatie werd gebruikt om twee nieuwe aminozuren in te bouwen in het groen fluorescerend eiwit GFP. De nieuwe basen werden aangeduid met X en Y. Tussen de basen X en Y kunnen geen waterstofbruggen ontstaan. De basen blijven toch aan elkaar zitten, doordat hun hydrofobe delen in elkaar passen. In afbeelding 43 zie je basenpaar XY en ter vergelijking basenpaar AT.

a Hoeveel verschillende codons zijn er in totaal theoretisch mogelijk nu het basenpaar XY is toegevoegd aan het DNA?

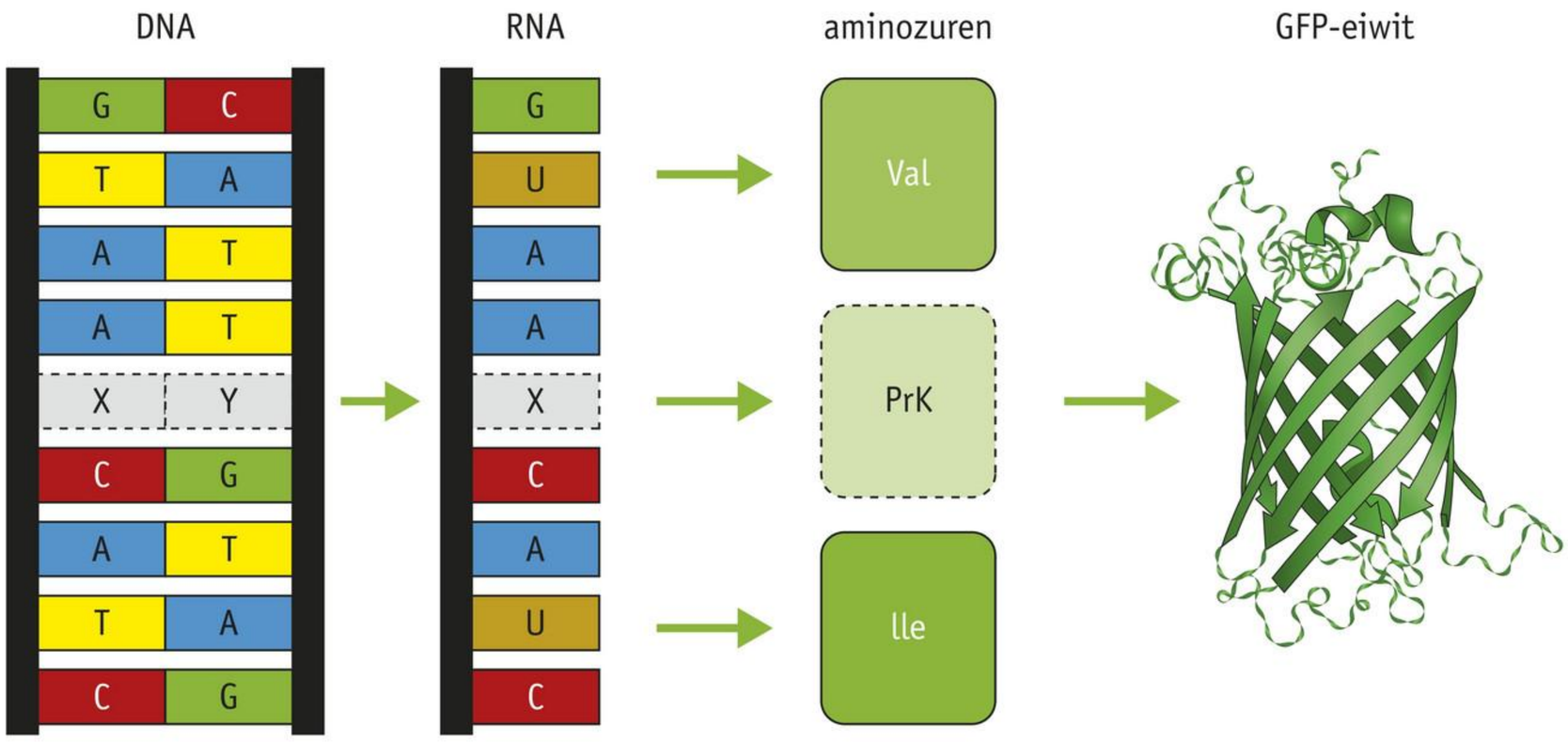
b De nieuwe aminozuren kregen de afkorting PrK en pAzF. In afbeelding 44 is een gedeelte van het gen voor GFP weergegeven waarin het nieuwe basenpaar XY aanwezig is. De nieuwe base werd ingebouwd in het triplet dat codeert voor aminozuur 151 van het GFP-eiwit. Het originele triplet TAC werd vervangen door het nieuwe triplet AXC. Ook werd een gen ingebracht voor aangepaste tRNA-moleculen. Het nieuwe GFP-eiwit dat hierdoor ontstaat, is functioneel niet veranderd ten opzichte van het normale GFP.
Bekijk afbeelding 44. Wat is de sequentie van het anticodon van het tRNA-molecuul dat PrK kan binden?

c Welk aminozuur of welke aminozuren zouden mogelijk het oorspronkelijke aminozuur 151 kunnen zijn geweest?

■ **Afb. 43** Basenpaar met base X en base Y (links), en basenpaar met adenine en thymine (rechts).



■ **Afb. 44** Transcriptie en translatie van het GFP-eiwit.



Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf.*

Context Leefwereld

ZIEKTE VAN ALZHEIMER

De ziekte van Alzheimer is een ongeneeslijke hersenaandoening en de meest voorkomende oorzaak van dementie. In Nederland lijden naar schatting zo'n 200 000 mensen aan de ziekte van Alzheimer, vooral ouderen. De precieze oorzaak van de ziekte is nog niet vastgesteld, maar heeft waarschijnlijk te maken met de ophoping van misvormde eiwitten in het hersenweefsel.

Een van de eiwitten die ophoopt bij Alzheimer is amyloid. Er zijn twee varianten van amyloid: amyloid-bèta 40 en amyloid-bèta 42. Deze getallen staan voor het aantal bouwstenen waaruit het eiwit is opgebouwd. Amyloid-bèta 42 is schadelijker dan amyloid-bèta 40, omdat het groter is en daardoor makkelijker samenklontert. Bij mensen met de ziekte van Alzheimer blijkt dat amyloid-bèta 42 vaker voorkomt in het hersenweefsel dan bij gezonde mensen. Bij een zeldzame, erfelijke vorm van Alzheimer komt dit door een genetische afwijking. In de meeste, niet-erfelijke gevallen heeft de oorzaak waarschijnlijk te maken met de levensstijl: roken, weinig bewegen en een hoge bloeddruk vergroten de kans op Alzheimer.

Door de klontering van eiwitten zoals amyloid kunnen de zenuwcellen in de hersenen minder goed met elkaar communiceren. Na verloop van tijd raken de zenuwcellen zodanig beschadigd dat ze afsterven. Dit veroorzaakt dementie; patiënten krijgen te maken met geleidelijk toenemend geheugenverlies, verstandelijke beperking en een veranderlijke gemoedstoestand. Uiteindelijk wordt de schade aan de hersenen te groot en sterft de patiënt.

■ **Afb. 45** Door het brein actief te houden kun je het ontstaan van symptomen van de ziekte van Alzheimer vertragen.

Opdrachten

54 Amyloid-bèta 42 is opgebouwd uit twee extra bouwstenen vergeleken met amyloid-bèta 40.

a Wat wordt hier bedoeld met 'bouwstenen'?

b De aanmaak van amyloid-bèta 42 kan verstoord raken door afwijkingen in DNA, mRNA of de ribosomen.
Verklaar voor elk van deze drie hoe een afwijking kan leiden tot een misvormd eiwit.

55 Ondanks dat de erfelijke vorm van Alzheimer al vanaf de geboorte aanwezig is, treden de eerste symptomen vaak pas op latere leeftijd op (meestal tussen de 30 en 60 jaar).
Geef hiervoor een mogelijke verklaring.

56 Het eiwit eIF2 bindt aan specifieke tRNA-moleculen om ze naar het juiste codon van een mRNA-molecuul te begeleiden. In zenuwcellen van patiënten met vergevorderde Alzheimer wordt de bindplaats van eIF2 gedeactiveerd. Hierdoor kan het niet binden aan het tRNA-molecuul, waardoor de translatie van mRNA in de cel niet op gang kan komen.
Voor welk aminozuur codeert het tRNA-molecuul dat bindt aan eIF2? Verklaar je antwoord.

57 Het gen voor amyloid-bèta bevindt zich op chromosoom 21. Mensen met het syndroom van Down hebben een extra kopie van dit chromosoom.
Verklaar waarom mensen met Down een verhoogd risico hebben op de ziekte van Alzheimer.

5 GENREGULATIE

LEERDOELEN

10.5.1 Je kunt verschillende manieren van genregulatie bij prokaryoten beschrijven.
10.5.2 Je kunt verschillende manieren van genregulatie bij eukaryoten beschrijven.
10.5.3 Je kunt uitleggen hoe genregulatie het functioneren van een organisme beïnvloedt.

TAXONOMIE	LEERDOELEN EN OPDRACHTEN		
	10.5.1	**10.5.2**	**10.5.3**
Begrijpen	59, 60, 61	62, 63, 71a	58, 64
Toepassen	65b	66ab, 68, 71bce	69
Analyseren	65ac	66c, 71d	67, 70

Alle cellen van een organisme hebben hetzelfde DNA in de celkern. Toch is de bouw en functie van bijvoorbeeld neuronen, kraakbeencellen en spiercellen heel verschillend. Hoe is dat mogelijk?

GENREGULATIE EN GENEXPRESSIE

Elke celkern in je lichaam bevat precies dezelfde genen. Maar niet alle genen zijn actief in alle cellen. Daarnaast kan de activiteit van verschillende genen in een cel veranderen. Genen kunnen worden aan- en uitgezet. Dit noem je **genregulatie**. Wanneer een gen aanstaat, wordt de informatie van het DNA door transcriptie omgezet in pre-mRNA en wordt mRNA door translatie omgezet in een eiwit. Dit noem je **genexpressie**. Het reguleren van de genexpressie maakt het voor cellen mogelijk om verschillende eiwitten te produceren op het moment dat de cel ze nodig heeft.

Zowel prokaryoten als eukaryoten passen hun genexpressie aan wanneer milieufactoren veranderen. Bij meercellige eukaryoten hangt de genexpressie in een cel niet alleen af van de milieufactoren, maar ook van de functie van de cel. Zowel bij prokaryoten als eukaryoten spelen **regulatorgenen** een rol bij de genregulatie. Een voorbeeld van een regulatorgen bij eukaryoten is een gen dat codeert voor een transcriptiefactor.

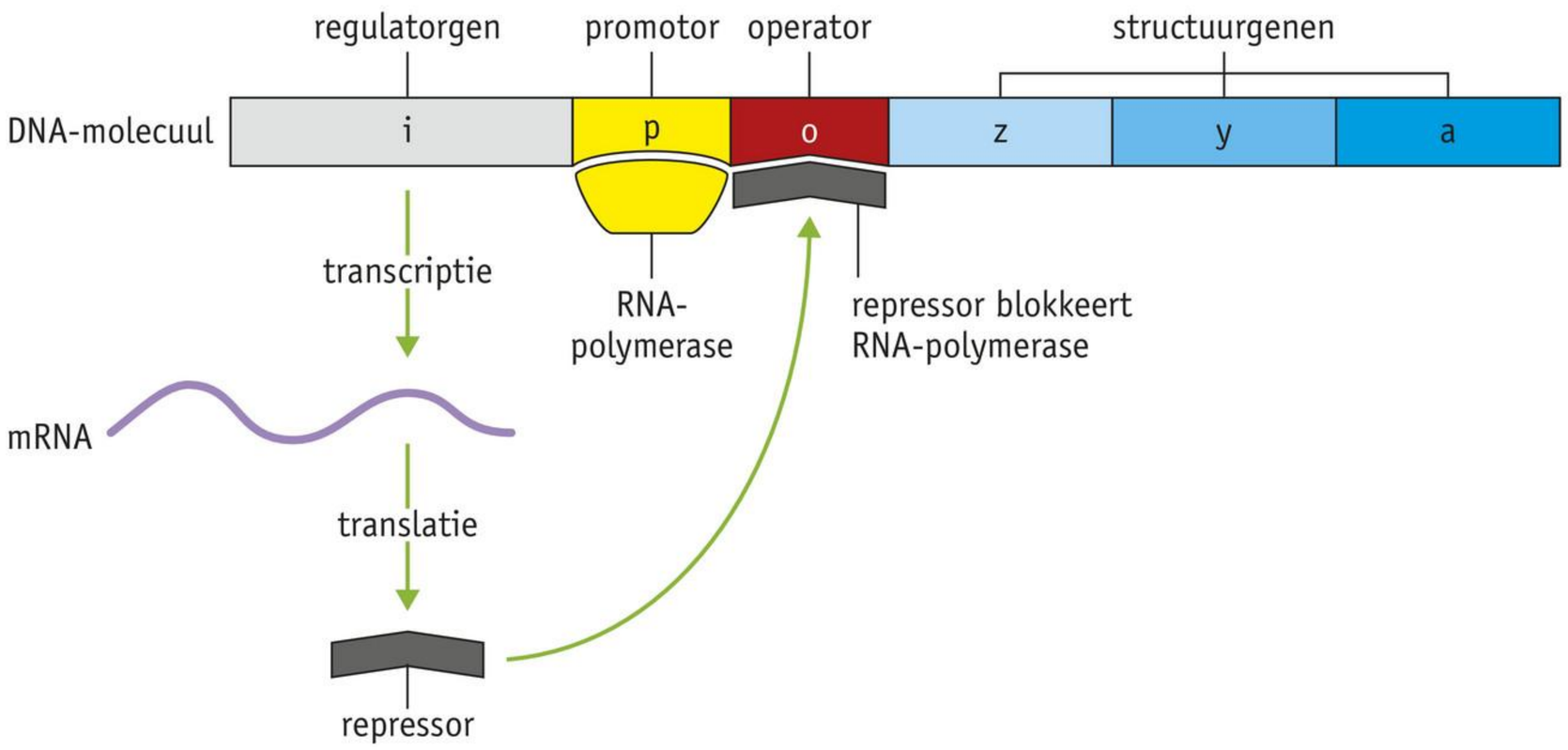
GENREGULATIE BIJ PROKARYOTEN

In prokaryoten bevatten **structuurgenen** de informatie voor het vormen van een RNA of eiwit. Langs structuurgenen kan transcriptie plaatsvinden. De structuurgenen die coderen voor producten die samen een functie uitvoeren, bijvoorbeeld genen die verschillende onderdelen van één eiwit maken, liggen bij prokaryoten vaak naast elkaar in het DNA-molecuul achter een gezamenlijke promotor (zie afbeelding 46). Daardoor kan de expressie van deze genen tegelijk worden beïnvloed. Zo'n rij van opeenvolgende genen met een gezamenlijke promotor heet een **operon**.

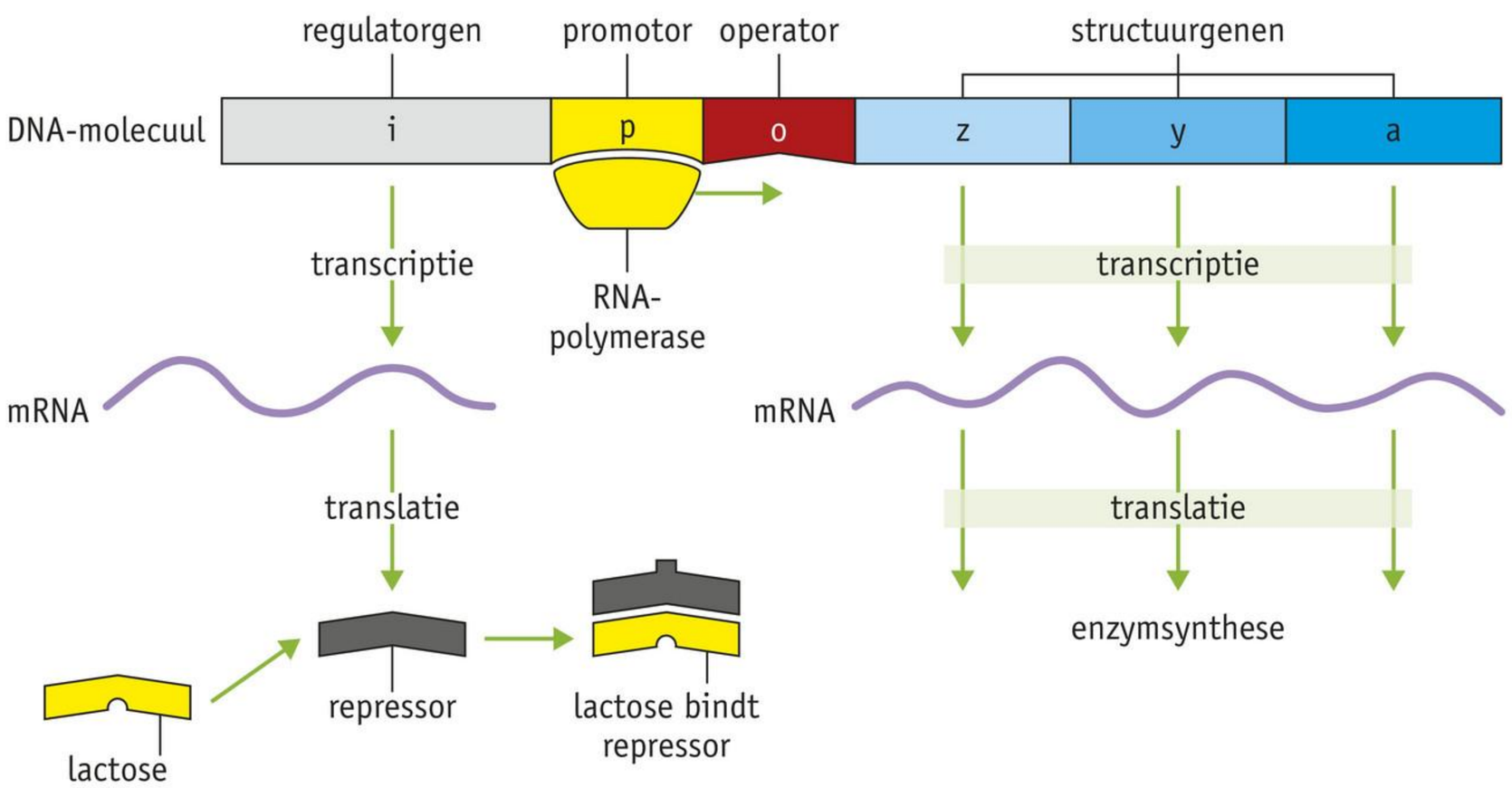
Hoe kan een prokaryoot de genexpressie van een operon reguleren? De regulatorgenen van prokaryoten coderen voor regulerende eiwitten: **repressors**. Zoals de naam suggereert kunnen repressors de genexpressie afremmen of geheel stopzetten. Dit doen ze door te binden aan een deel van het DNA (de **operator**) dat tussen de promotor en de structuurgenen in zit (zie afbeelding 46.1). Hierdoor werpen ze als het ware een blokkade op waar de RNA-polymerase niet langs kan.

Sommige repressors zijn alleen actief als ze zijn gebonden aan een specifiek molecuul. Andere repressors worden door zo'n binding juist geïnactiveerd. De repressor van een operon dat betrokken is bij de afbraak van lactose zal bijvoorbeeld worden gedeactiveerd door lactose (zie afbeelding 46.2).

■ **Afb. 46** De werking van een repressor.



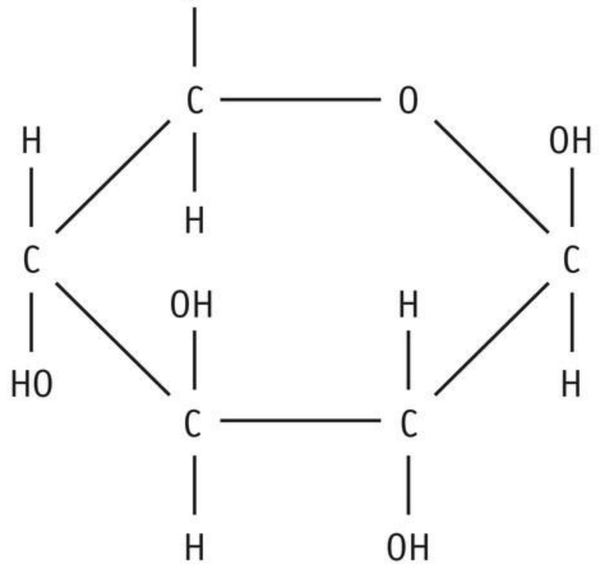
1 repressie van structuurgenen bij *E. coli*



2 opheffing van de repressie door lactose bij *E. coli*

De organische stof glucose is belangrijk voor de stofwisseling als brandstof en bouwstof. De molecuulformule van glucose is $C_6H_{12}O_6$. In afbeelding 1.1 is de structuurformule weergegeven (zie ook *BiNaS* tabel 67F). In een structuurformule is aangegeven welke atomen aan elkaar zijn gebonden. De anorganische stof koolstofdioxide is belangrijk voor de fotosynthese. De molecuulformule van koolstofdioxide is CO_2 (zie afbeelding 1.2). In koolstofdioxide komen dubbele bindingen voor. Het C- en O-atoom zijn door twee bindingen aan elkaar gebonden.

■ **Afb. 1** Structuurformule van een organisch en een anorganisch molecuul.



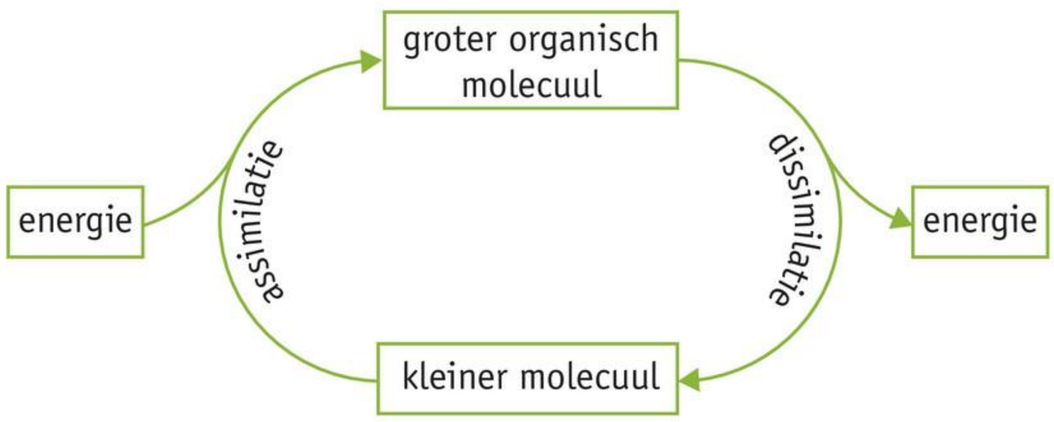
1 een organisch molecuul: glucose

2 een anorganisch molecuul: koolstofdioxide

ASSIMILATIE EN DISSIMILATIE

Stofwisselingsprocessen zijn in te delen in assimilatie- en dissimilatieprocessen. **Assimilatie** is de opbouw van organische moleculen uit kleinere moleculen. **Dissimilatie** is de afbraak van grote organische moleculen tot kleinere moleculen. Voor assimilatie is energie nodig, bij dissimilatie komt energie beschikbaar in de vorm van bijvoorbeeld **kinetische energie** (bewegingsenergie), **lichtenergie** of **warmte** (zie afbeelding 2).

■ **Afb. 2** Assimilatie en dissimilatie.



Opdrachten KENNIS

58 Waarom is voor zowel eukaryoten als prokaryoten genregulatie van belang?

59 Bij de genregulatie in prokaryoten zijn verschillende elementen betrokken: promotor, operator, regulatorgen, structuurgen, repressor.
Welke van deze elementen zijn DNA-sequenties en welke zijn eiwitten?

60 Waarom is het voordelig voor een prokaryoot dat specifieke structuurgenen in operons bij elkaar liggen?

61 Stel dat een structuurgen van een prokaryoot alleen actief moet zijn onder zuurstofarme condities. Zal zuurstof dan de repressor van dit gen activeren of deactiveren?

GENREGULATIE BIJ EUKARYOTEN IN ONTWIKKELING

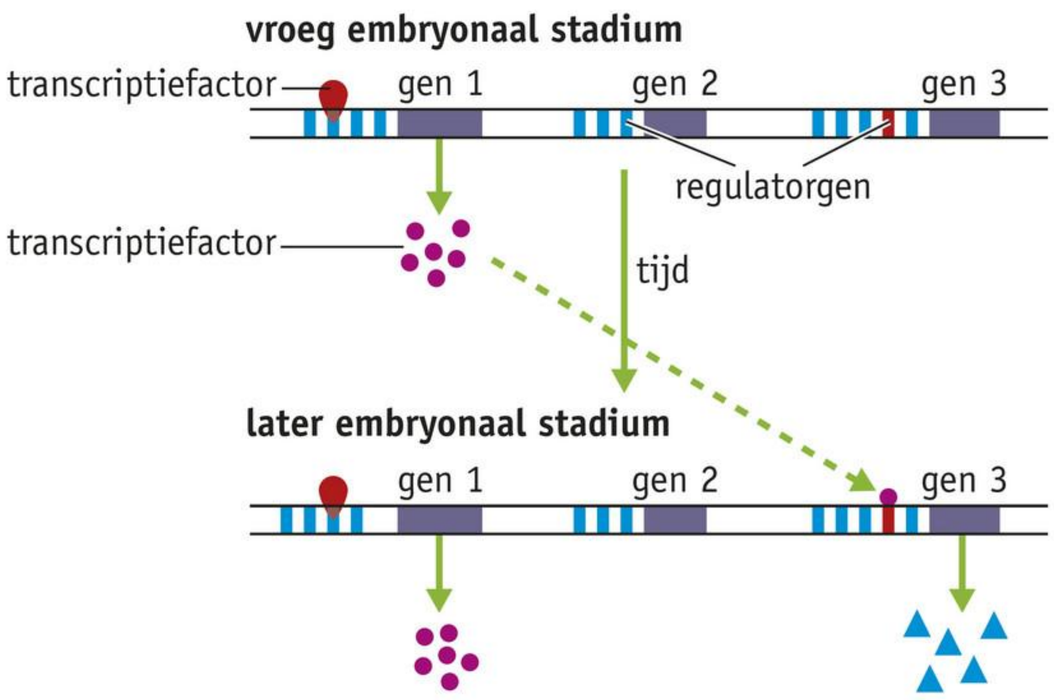
Veel eukaryoten zijn meercellig. Een meercellig organisme ontwikkelt zich van een eencellige zygote tot een volwassen individu met gespecialiseerde cellen die verschillende functies hebben. Mensen hebben bijvoorbeeld zo'n 220 verschillende **celtypen**, zoals bloedcellen en zenuwcellen. Deze cellen zijn ontstaan uit **stamcellen**. Dat zijn cellen die nog niet (volledig) zijn gespecialiseerd. Ze kunnen zich onbeperkt delen waarbij een van de dochtercellen een nieuwe stamcel wordt en de andere dochtercel zich specialiseert tot een specifiek celtype. De vorming van gespecialiseerde cellen uit ongespecialiseerde stamcellen heet **celdifferentiatie**.

Ook van stamcellen bestaan verschillende typen (zie *BiNaS* tabel 80A). De eerste generaties embryonale stamcellen kunnen zich differentiëren tot elk ander celtype. Latere generaties kunnen zich tot een beperkt aantal celtypen differentiëren. Ook volwassen eukaryoten hebben nog beperkte hoeveelheden stamcellen die zich tot een paar celtypen kunnen differentiëren, zoals bloedstamcellen voor de aanmaak van rode bloedcellen en bloedplaatjes.

Tijdens de embryonale ontwikkeling is de genexpressie in stamcellen afhankelijk van hun locatie in het embryo. De plaats in het embryo bepaalt welke regulatorgenen in de stamcel tot expressie komen. De eiwitten die na transcriptie en translatie van een regulatorgen zijn gevormd, regelen weer de genexpressie van andere genen in de stamcel of van genen in andere stamcellen. De genexpressie van de stamcel is ook afhankelijk van de ontwikkelingsfase van het embryo (zie afbeelding 47). Zo ontstaan er verschillende celtypen, weefsels en organen in een meercellig organisme (zie afbeelding 48).

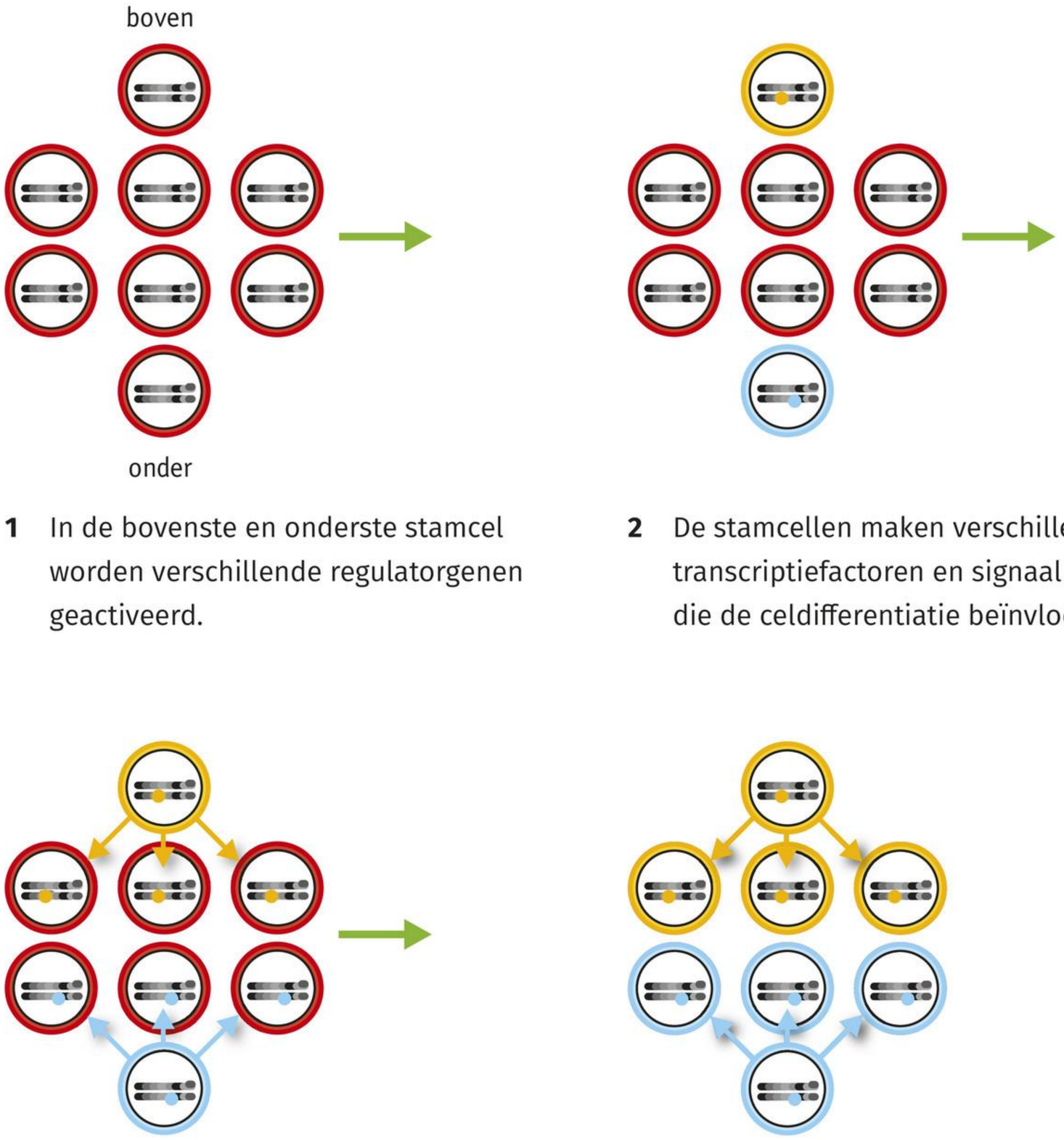
Door de mogelijkheid van stamcellen om zich te differentiëren tot andere cellen zijn ze zeer geschikt voor medische toepassingen. Deze toepassingen worden onderzocht bij **stamcelonderzoek**. Bij **stamceltransplantatie** worden stamcellen gebruikt om beschadigd weefsel te herstellen. De stamcellen kunnen afkomstig zijn van de patiënt zelf of van een stamceldonor. Eerst worden de stamcellen geoogst (bijvoorbeeld door een beenmergpunctie), waarna ze in het lab worden opgekweekt. Soms worden de cellen aangezet tot differentiatie in het lab voordat ze bij de patiënt worden ingebracht, om ongecontroleerde celgroei te voorkomen.

■ **Afb. 47** Het reguleren van de genexpressie tijdens verschillende fasen van de embryonale ontwikkeling.



In een vroeg embryonaal stadium activeert een transcriptiefactor de expressie van gen 1.
Dit gen codeert voor een andere transcriptiefactor die in een later embryonaal stadium de expressie van gen 3 activeert.

■ **Afb. 48** Genregulatie en celdifferentiatie in embryonale stamcellen.



1 In de bovenste en onderste stamcel worden verschillende regulatorgenen geactiveerd.

2 De stamcellen maken verschillende transcriptiefactoren en signaalmoleculen die de celdifferentiatie beïnvloeden.

3 De signaalmoleculen binden aan receptoren van een naburige cel. Deze cellen worden hierdoor aangezet om ook weer transcriptiefactoren en signaalmoleculen te maken.

4 Door genexpressie gaan ook deze cellen zich differentiëren.

APOPTOSE

Apoptose, of geprogrammeerde celdood, speelt een belangrijke rol in de embryonale ontwikkeling. Apoptose zorgt er bijvoorbeeld voor dat de handen en voeten bij de mens worden gevormd. De cellen van het weefsel dat aanvankelijk tussen de vingers en tenen aanwezig is, worden door apoptose afgebroken.

In de cellen van dieren zijn altijd enzymen aanwezig die de cel kunnen doden zodra ze worden geactiveerd. Dat gebeurt bijvoorbeeld wanneer een cel 'ongewenst' is. Enzymen zorgen ervoor dat het cytoskelet van de cel wordt afgebroken. Hierdoor zakt de cel ineen en verliest het contact met de omliggende cellen. Enzymen knippen vervolgens het DNA in de cel in stukjes. De cel valt uiteen en de resten worden opgeruimd, bijvoorbeeld door macrofagen of door enzymen in lysosomen.

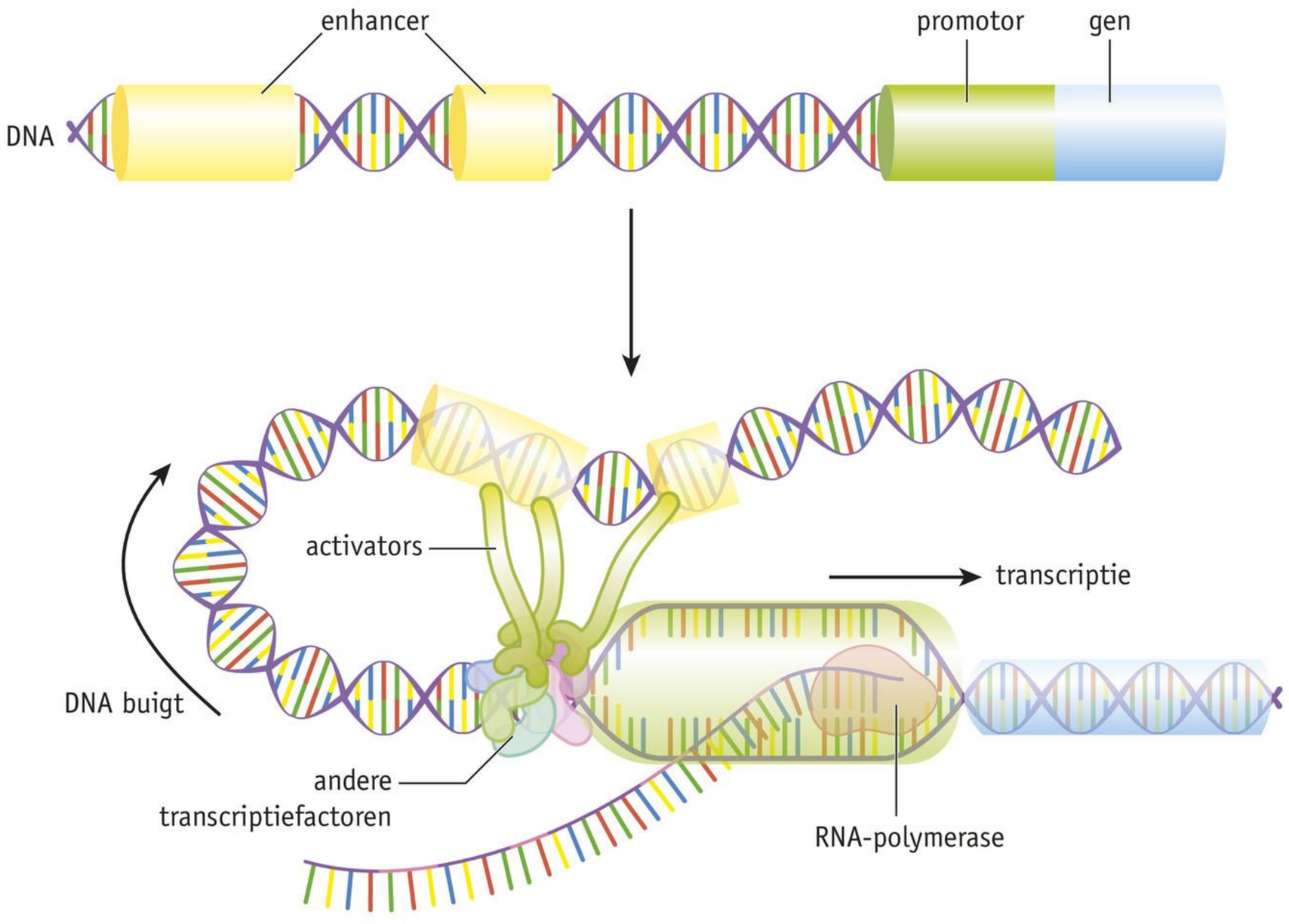
GENREGULATIE BIJ VOLWASSEN EUKARYOTEN

Ook bij volwassen eukaryoten is de genexpressie afhankelijk van de functie van de cel en van de omstandigheden. In een menselijke cel komen op een willekeurig moment gemiddeld 3 tot 5% van de genen tot expressie.

Er zijn verschillende mechanismen voor genregulatie in eukaryoten. Alle stappen in de genexpressie kunnen worden gereguleerd, maar het belangrijkste controlepunt is het wel of niet laten plaatsvinden van RNA-transcriptie.

Bij eukaryoten heeft RNA-polymerase de hulp van transcriptiefactoren nodig om de transcriptie te kunnen beginnen. Er bestaan veel soorten transcriptiefactoren. Sommige fungeren als repressors en remmen of blokkeren de transcriptie van een gen. Andere transcriptiefactoren kunnen juist de genexpressie verhogen. Deze transcriptiefactoren zijn **activators** (zie afbeelding 49).

■ **Afb. 49** Een voorbeeld van de aanvang van transcriptie bij eukaryoten. Activators binden aan speciale DNA-sequenties (enhancers).

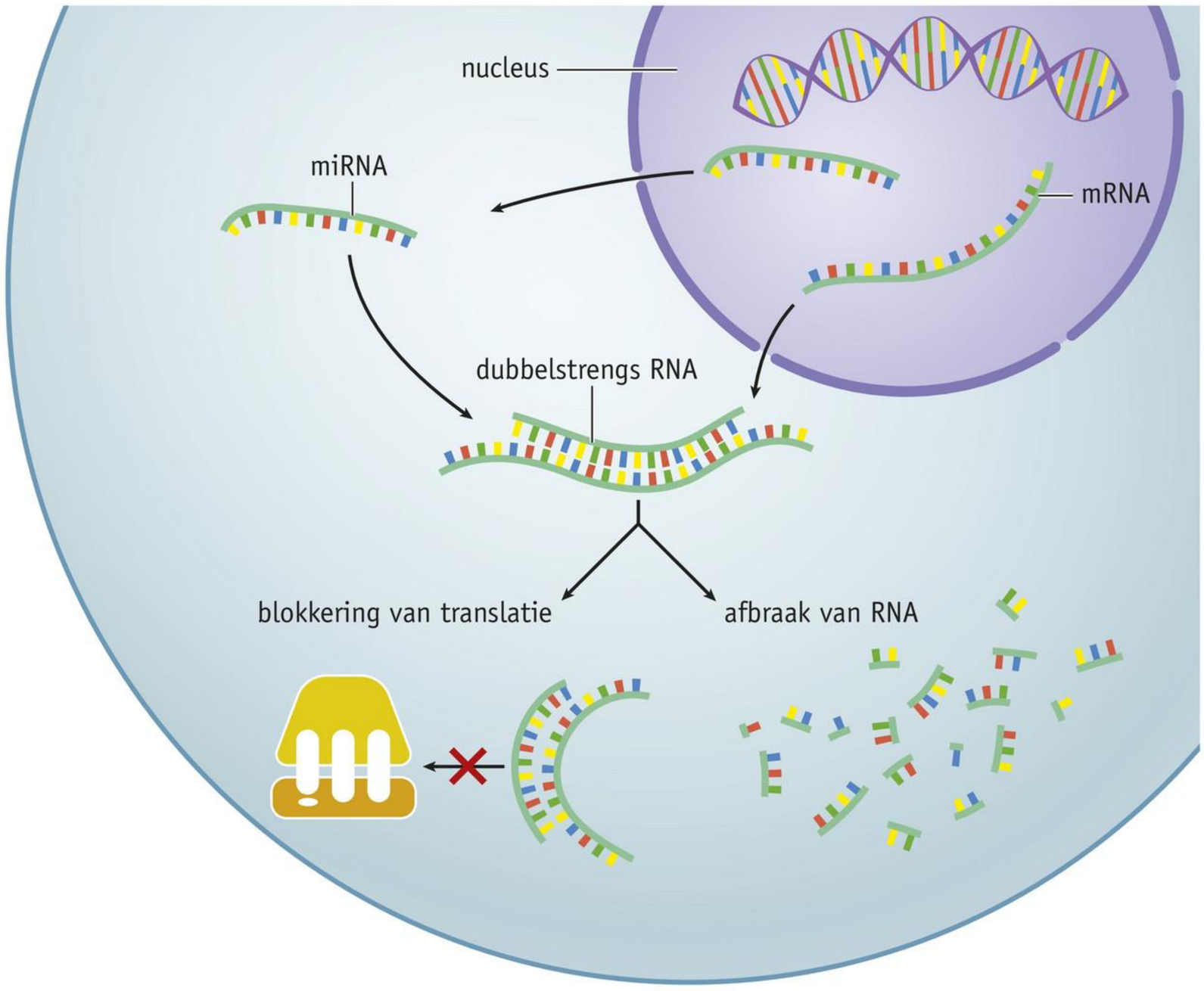


Naast de transcriptiefactoren hebben eukaryoten andere mechanismen om genexpressie te reguleren. Door DNA in de nucleosomen compact te maken, kunnen transcriptiefactoren en RNA-polymerase niet binden aan het DNA. Hierdoor wordt de genexpressie in dit deel van het chromosoom geblokkeerd. Bepaalde stoffen kunnen de nucleosomen ertoe aanzetten om het DNA steviger of juist losser te binden. Dat bepaalt de mate waarin het DNA is af te lezen.

RNA-INTERFERENTIE (RNAi)

Genregulatie kan ook plaatsvinden door translatie te voorkomen, zodat er geen eiwit kan worden gesynthetiseerd. Een kort type RNA, **micro-RNA (miRNA)**, remt de expressie van genen door het afbreken of blokkeren van mRNA-moleculen zodat geen translatie kan plaatsvinden. De miRNA-moleculen binden complementair aan mRNA en blokkeren hierdoor de binding van een ribosoom of breken het mRNA af (zie afbeelding 50). Dit proces heet **RNA-interferentie** of **RNAi**.

■ **Afb. 50** De werking van micro-RNA's en RNA-interferentie.



DNA-METHYLERING

Een veelvoorkomende vorm van genregulatie in eukaryoten is **methylering**. Hierbij binden methylgroepen (CH_3-) aan de stikstofbasen in het DNA (meestal aan cytosine, zie *BiNaS* tabel 71A), waardoor het niet meer kan worden afgelezen. De volgorde van de nucleotiden verandert hierdoor niet, maar genen kunnen hierdoor worden aan- of uitgezet. Wanneer bij een organisme bepaalde genen zijn gemethyleerd, wordt bij elke celdeling de nieuwe DNA-streng die na replicatie is ontstaan, ook gemethyleerd. Op deze manier kunnen methyleringspatronen zelfs worden doorgegeven aan het nageslacht. Zo is ontdekt dat zwangere vrouwen tijdens de Hongerwinter van 1944-45 bepaalde methyleringspatronen, die werden veroorzaakt door ondervoeding, overdroegen op hun ongeboren kinderen. Deze kinderen hadden hierdoor op latere leeftijd meer kans op overgewicht en diabetes.

EPIGENETICA

De wetenschap van de **epigenetica** houdt zich bezig met het bestuderen van omkeerbare veranderingen in de activiteit van genen, die niet het gevolg zijn van veranderingen in de nucleotidevolgorde van het DNA. Voorbeelden hiervan zijn het steviger of losser binden van DNA door histoneiwitten, RNAi en DNA-methylering. Deze eigenschappen kunnen erfelijk zijn, ondanks het feit dat ze niet als genetische informatie in het DNA zijn opgeslagen. Ze spelen dus ook een potentiële rol in de evolutie van organismen.

Opdrachten KENNIS

62 **a** Welke rol speelt genregulatie in de celdifferentiatie van stamcellen?
b Voor sommige vormen van stamceltransplantatie zijn alleen embryonale stamcellen geschikt.
Waarom bieden embryonale stamcellen meer mogelijkheden in medische toepassingen dan niet-embryonale stamcellen?

63 Bij de ontwikkeling van een kikkervisje tot volwassen kikker vindt apoptose plaats (zie afbeelding 51).
Wat is het doel van apoptose bij het kikkervisje?

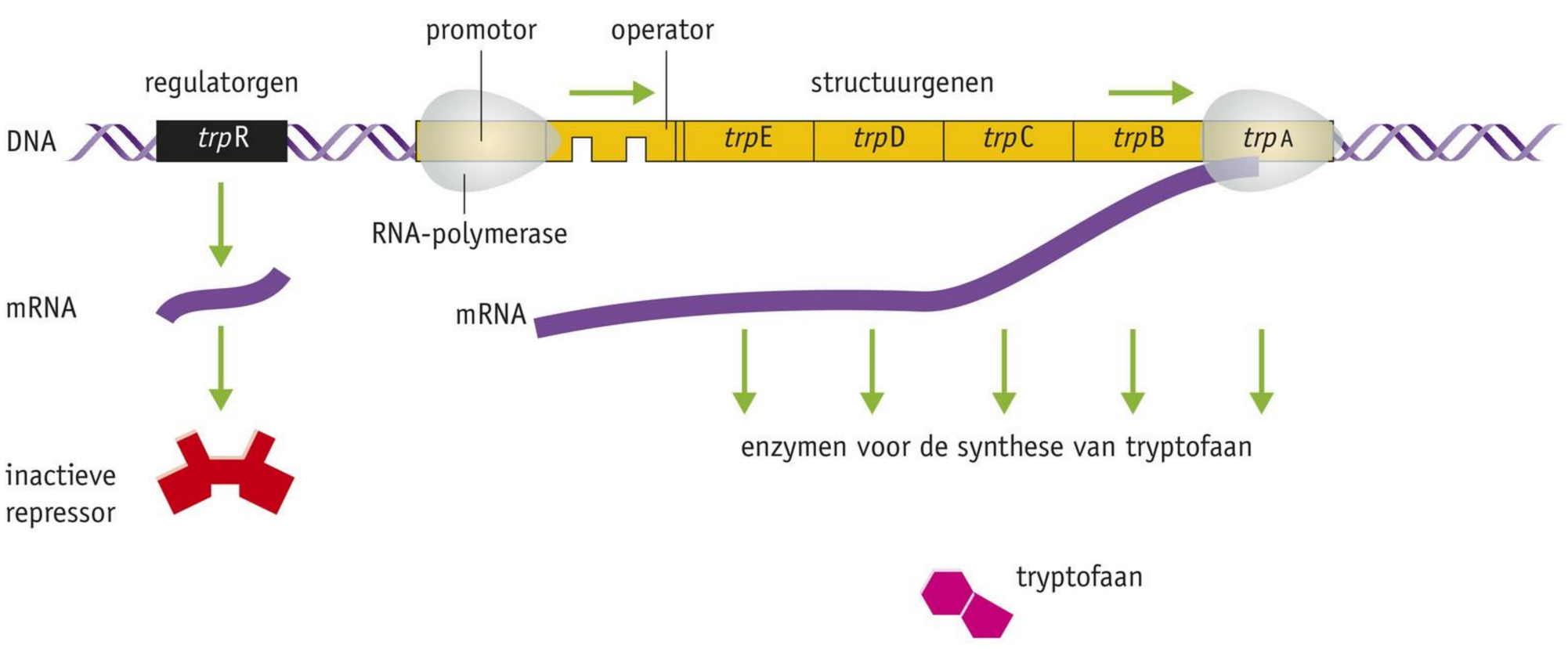
■ **Afb. 51** De ontwikkeling van kikkervisje tot volwassen kikker.

64 Op welke manier kunnen epigenetisch verworven eigenschappen een evolutionair voordeel opleveren?

Opdrachten INZICHT

65 *E. coli* heeft vijf structuurgenen die coderen voor enzymen die zijn betrokken bij de synthese van het aminozuur tryptofaan. Tryptofaan komt onder andere voor in banaan, chocolade en melk. Wanneer er voldoende tryptofaan in de dikke darm aanwezig is, worden de structuurgenen tegelijkertijd uitgezet. Als de gastheer van deze bacterie voedsel heeft gegeten dat weinig of geen tryptofaan bevat, worden de vijf genen actief en maakt de bacterie het aminozuur zelf.
a Stel dat afbeelding 52 de situatie weergeeft in een *E. coli*-bacterie in de dikke darm van een gastheer.
Heeft de gastheer dan voedsel gegeten met veel of weinig tryptofaan? Leg je antwoord uit.
b Onder welke omstandigheden zal de repressor binden aan de operator? Leg je antwoord uit.
c Welke moleculen zullen vaak als corepressors werken: substraatmoleculen of moleculen van reactieproducten? Leg je antwoord uit.

■ **Afb. 52** De productie van enzymen die zijn betrokken bij de synthese van tryptofaan in *E. coli*.



66 Bij fruitvliegjes produceert het regulatorgen Ey een transcriptiefactor die verantwoordelijk is voor de vorming van een oog.

a Brengt deze transcriptiefactor één gen of meer genen tot expressie? Leg je antwoord uit.

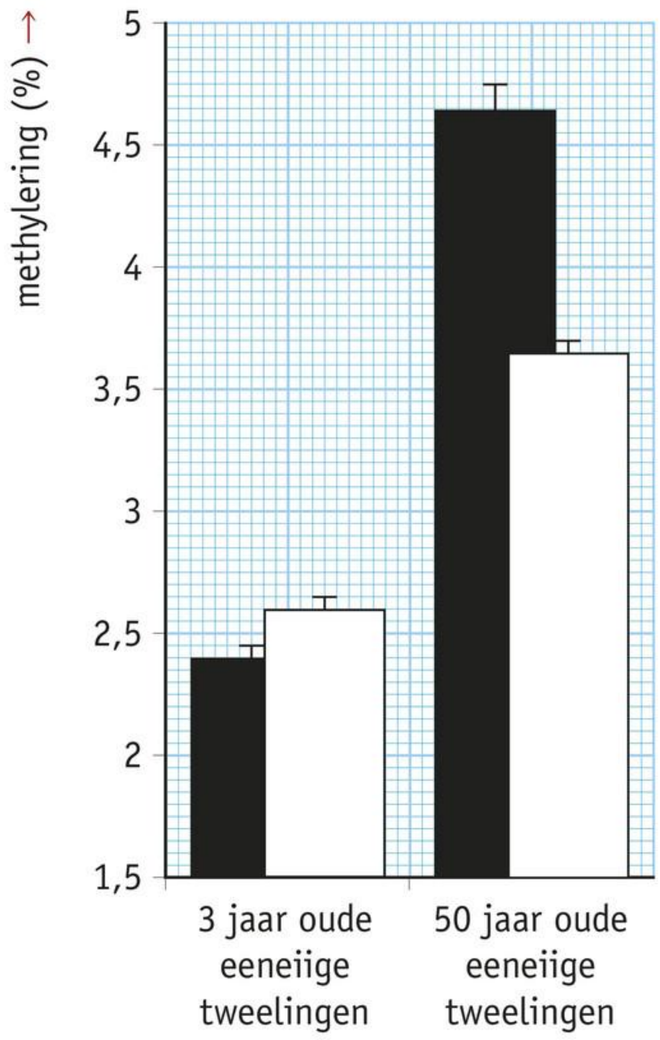
b Door kunstmatig ingrijpen van onderzoekers in een vroeg embryonaal stadium ontstaan fruitvliegjes met een oog op hun poot (zie afbeelding 53).
Beschrijf hoe de onderzoekers in de embryonale ontwikkeling hebben ingegrepen.

c Wat tonen de onderzoekers hiermee aan? Formuleer twee conclusies.

■ **Afb. 53** Een poot van een fruitvliegje met een oog.

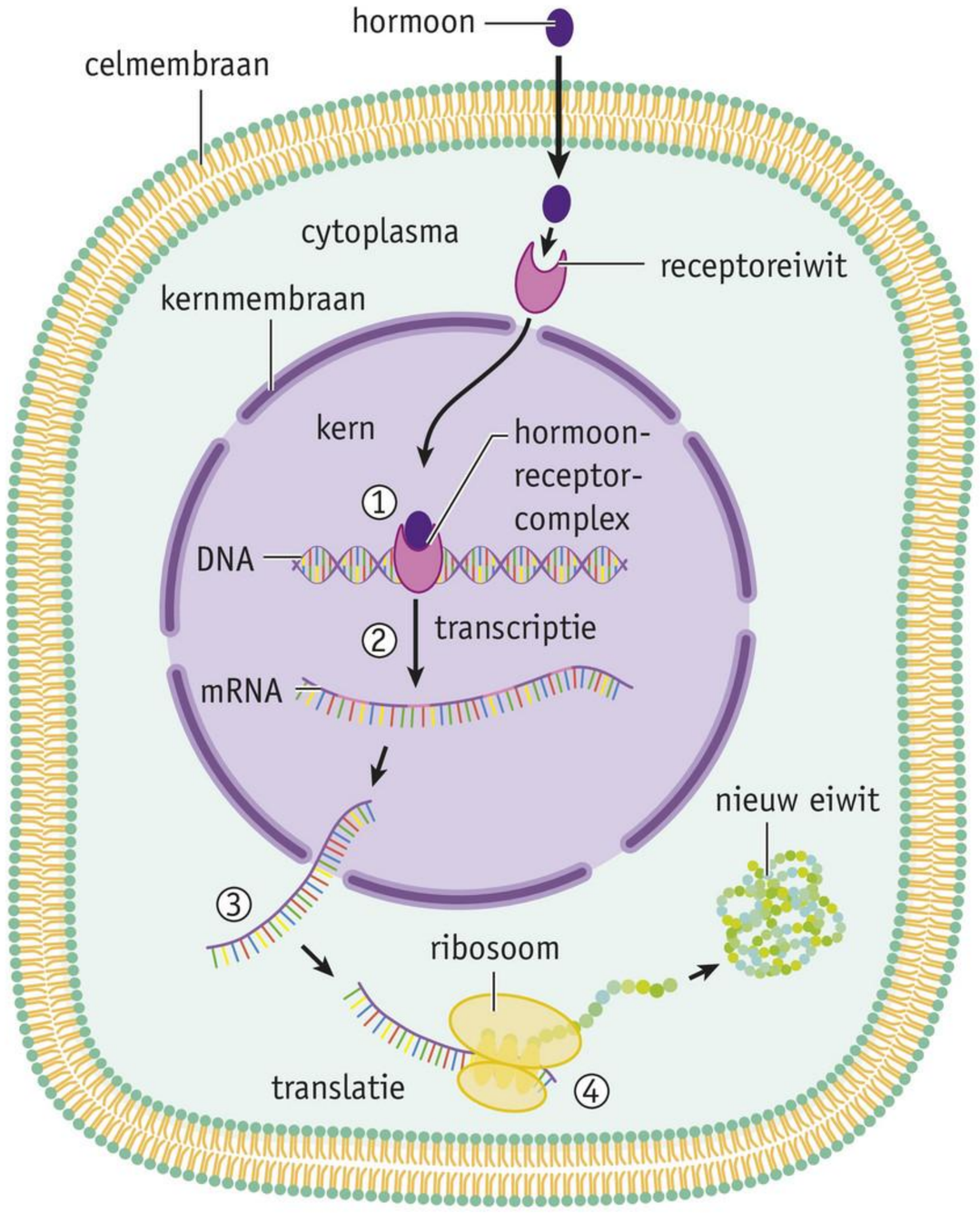
67 Eeneiige tweelingen zijn genetisch identiek.
Verklaar waarom één persoon van een eeneiige tweeling soms een bepaalde aandoening heeft, zoals schizofrenie en de andere niet. Maak gebruik van de informatie in afbeelding 54.

■ **Afb. 54** Het percentage DNA-methylering bij eeneiige tweelingen.



68 Sommige hormonen beïnvloeden cellen door genregulatie. In afbeelding 55 zie je de reeks van processen die volgen op de vorming van een hormoonreceptorcomplex. Geef een korte beschrijving of de naam van de vier processen.

■ **Afb. 55** Genregulatie door een hormoon in een eukaryotische cel.



69 In een experiment werden zwangere muizen tegelijkertijd blootgesteld aan een knoflookgeur en een lichte elektrische schok. Deze behandeling werd gedurende twee weken meerdere keren herhaald. Na twee weken werden de muizen alleen nog blootgesteld aan knoflookgeur zonder elektrische schok. De onderzoekers zagen dat de muizen als reactie op de knoflookgeur een verhoogd gehalte stresshormonen produceerden. Muizen uit een controlegroep die alleen werden blootgesteld aan knoflookgeur zonder elektrische schok vertoonden deze stressrespons niet.

a Verklaar het ontstaan van de stressrespons bij knoflookgeur in de muizen die een elektrische schok kregen toegediend.

b In de nakomelingen van de behandelde muizen bleek dat blootstelling aan knoflookgeur zonder elektrische schok ook een stressrespons veroorzaakte. Nakomelingen van de controlegroep vertoonden de stressrespons niet. Verklaar op genetisch niveau hoe de nakomelingen de stressrespons kunnen vertonen zonder zelf ooit een schok te hebben gekregen.

70 RNA-interferentie wordt veel gebruikt in onderzoek om doelgericht genen in een organisme uit te schakelen. Hiervoor worden specifieke miRNA-moleculen ontworpen. Waarom is RNAi geschikter om specifieke genen kunstmatig uit te schakelen dan DNA-methylatie?

Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf.*

Context Leefwereld

VERANDERING VAN VACHTKLEUR

Kleur is voor veel organismen een belangrijke eigenschap. Veel dieren gebruiken kleur om minder op te vallen. Maar dat is ingewikkeld als je in een omgeving leeft waar de kleuren in de omgeving sterk kunnen veranderen, zoals het poolgebied. IJsberen en sneeuwuilen hebben het hele jaar door een witte vacht, maar dat helpt alleen als er sneeuw ligt. Poolhazen (zie afbeelding 56), hermelijnen, lemmingen en poolvossen hebben een witte wintervacht en een bruine zomervacht. Deze pooldieren hebben genen die ervoor zorgen dat de vachtkleur wordt aangepast aan het seizoen en dat gebeurt onder invloed van de hoeveelheid licht.

Behalve staafjes en kegeltjes bevat het netvlies bij zoogdieren lichtreceptoren met het lichtgevoelige pigmenteiwit melanopsine. Door licht wordt melanopsine in de lichtreceptoren afgebroken en ontstaan impulsen die worden doorgegeven aan cellen in de hypothalamus. Deze cellen maken het hormoon melatonine aan dat de productie van het pigment melanine in huidcellen stimuleert. Afhankelijk van de genetische code van een organisme wordt dan een zwart pigment (eumelanine) of rood pigment (feomelanine) geproduceerd, waardoor de kleur van de vacht verandert. In het najaar worden de dagen weer korter en verandert de vachtkleur terug naar wit. Poolhazen die in het uiterste noorden van Canada leven blijven het hele jaar wit, zelfs wanneer in de zomer de zon niet ondergaat. Zo dicht bij de Noordpool blijft sneeuw het hele jaar door liggen en zou een bruine zomervacht alleen maar een nadeel zijn.

■ **Afb. 56** Een poolhaas in de rui.

Opdrachten

71 **a** Welke milieufactor beïnvloedt de genregulatie van vachtkleur bij poolhazen?

b De afbraak van melanopsine door zonlicht activeert de aanmaak van het hormoon melatonine. Wanneer melatonine aan een receptor in het membraan van een huidcel bindt, wordt een kettingreactie in gang gezet, waardoor het tyrosinase-gen tot expressie komt. Tyrosinase zet vervolgens het aminozuur tyrosine in het cytoplasma om in dopaquinone, een bouwsteen voor eumelanine of feomelanine.
Bij welke stappen in deze signaalketen speelt genregulatie zeker een rol?

c Leg uit hoe een witte vacht bij poolhazen in de winter ontstaat.

d Door genetische variatie hebben sommige poolhazen van nature een hogere expressie van het melanopsine-gen.
Welk effect zal dit hebben op de verandering van hun vachtkleur in de zomer?

e Voor een wetenschappelijk onderzoek werd de genexpressie van 14 568 genen in een witte vacht van de poolhaas vergeleken met de genexpressie van deze genen in een bruine vacht. In een witte vacht komen 480 genen meer tot expressie en 259 genen minder.
Hoe kun je meten of en hoe vaak er langs deze genen transcriptie heeft plaatsgevonden?

6 MUTATIES

LEERDOEL

10.6.1 Je kunt de verschillende vormen en gevolgen van mutaties beschrijven.

TAXONOMIE	LEERDOEL EN OPDRACHTEN
	10.6.1
Begrijpen	72, 73, 74, 75, 76, 81d
Toepassen	77, 79ab, 80a, 81abc
Analyseren	78, 79cde, 80b, 81e

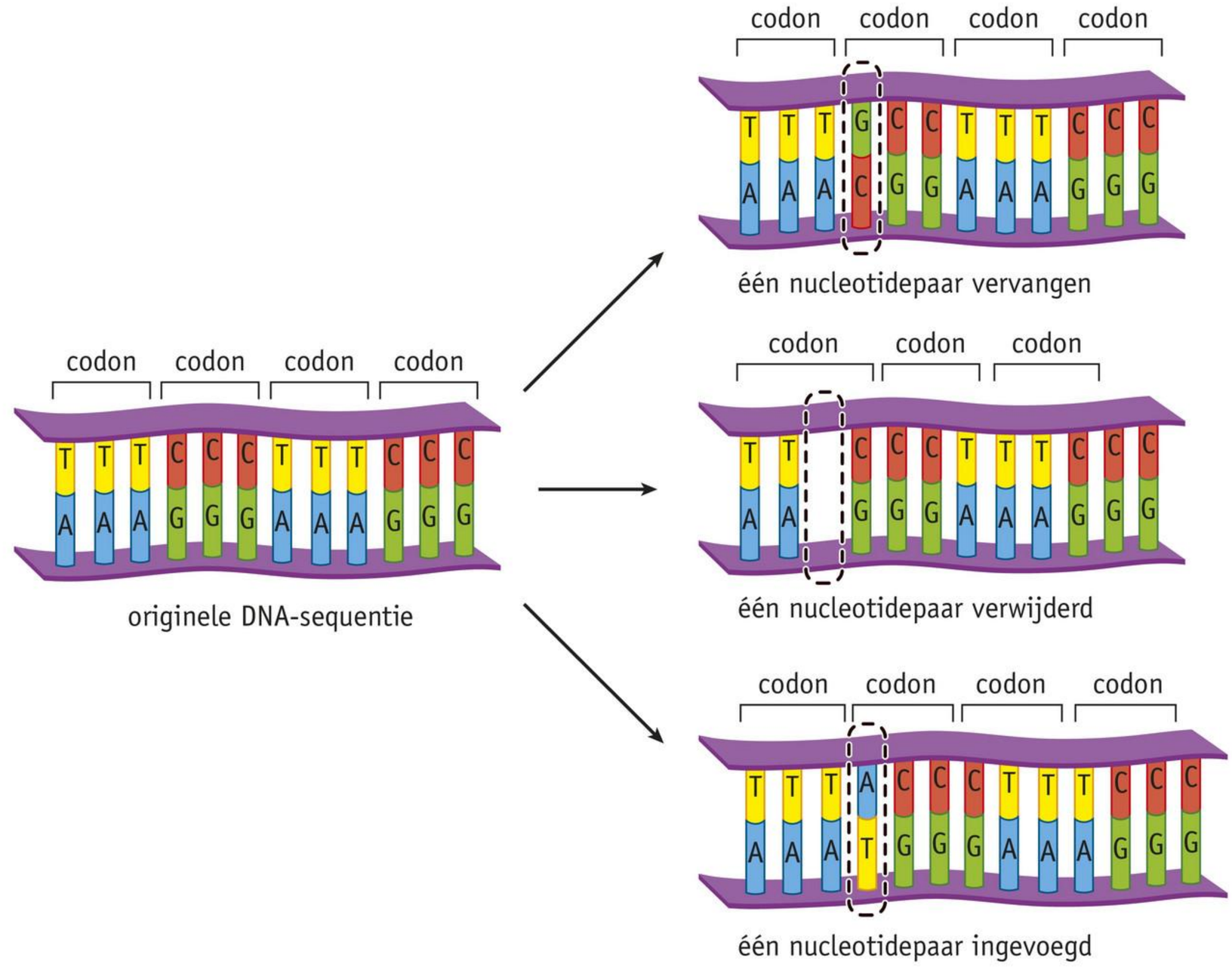
Tijdens het leven van een cel kunnen kleine veranderingen in het DNA ontstaan. Soms heeft dit geen gevolgen voor de cel, maar soms kunnen de gevolgen ook heel groot zijn. Een kleine verandering in de nucleotidevolgorde van een gen dat bij celdeling is betrokken kan bijvoorbeeld kanker veroorzaken.

MUTATIES

Tijdens de replicatie van DNA ontstaan regelmatig fouten, waardoor een verandering in de nucleotidevolgorde ontstaat. Dit soort veranderingen in het DNA van een cel noem je **mutaties**.

Er zijn verschillende typen mutaties (zie afbeelding 57). Bij sommige mutaties is er sprake van vervanging van nucleotiden door andere nucleotiden. Dit heet **substitutie**. Bij andere mutaties worden nucleotiden uit het DNA verwijderd (**deletie**) of worden nucleotiden aan het DNA toegevoegd (**insertie**). Het aantal nucleotiden dat is betrokken bij een mutatie kan verschillen. Het kan gaan om één nucleotidepaar, enkele nucleotideparen, een lange sequentie van DNA of een heel chromosoom. Mutaties treden willekeurig op in het DNA. Soms hebben ze geen effect op het fenotype van de cel. Als mutaties wel een effect op het fenotype hebben, is dat vaak nadelig voor het organisme; het is waarschijnlijker om met een willekeurige verandering iets stuk te maken dan om iets te verbeteren. Maar soms heeft een mutatie toevallig een positief effect. Zonder mutaties zou er geen genetische variatie tussen organismen zijn en zou evolutie niet kunnen plaatsvinden.

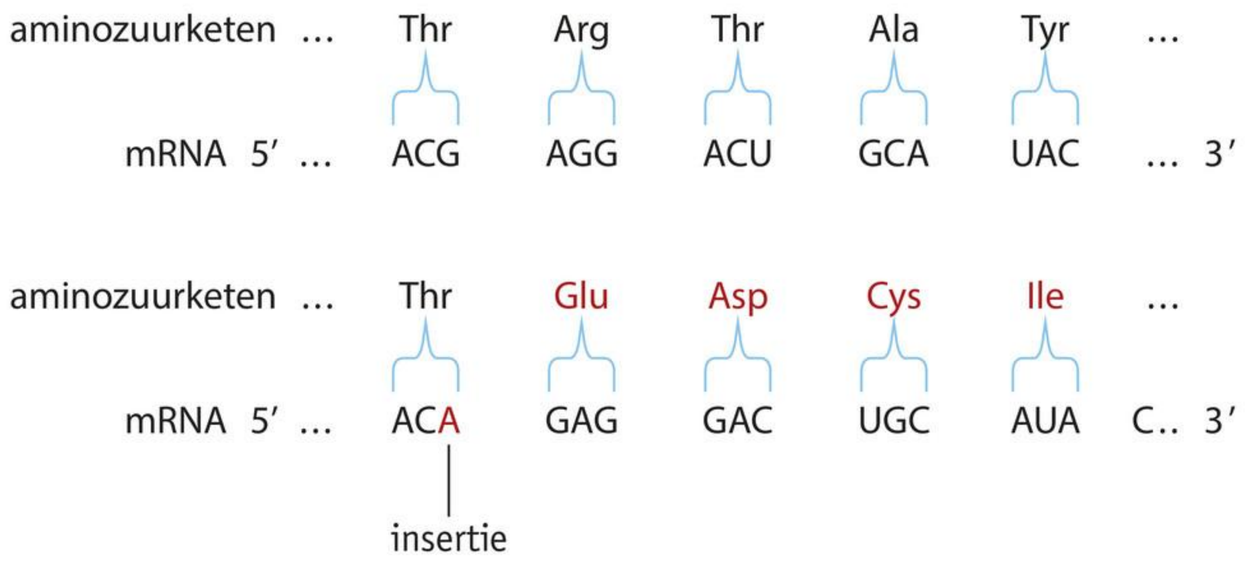
■ **Afb. 57** Verschillende typen mutaties.



PUNTMUTATIES

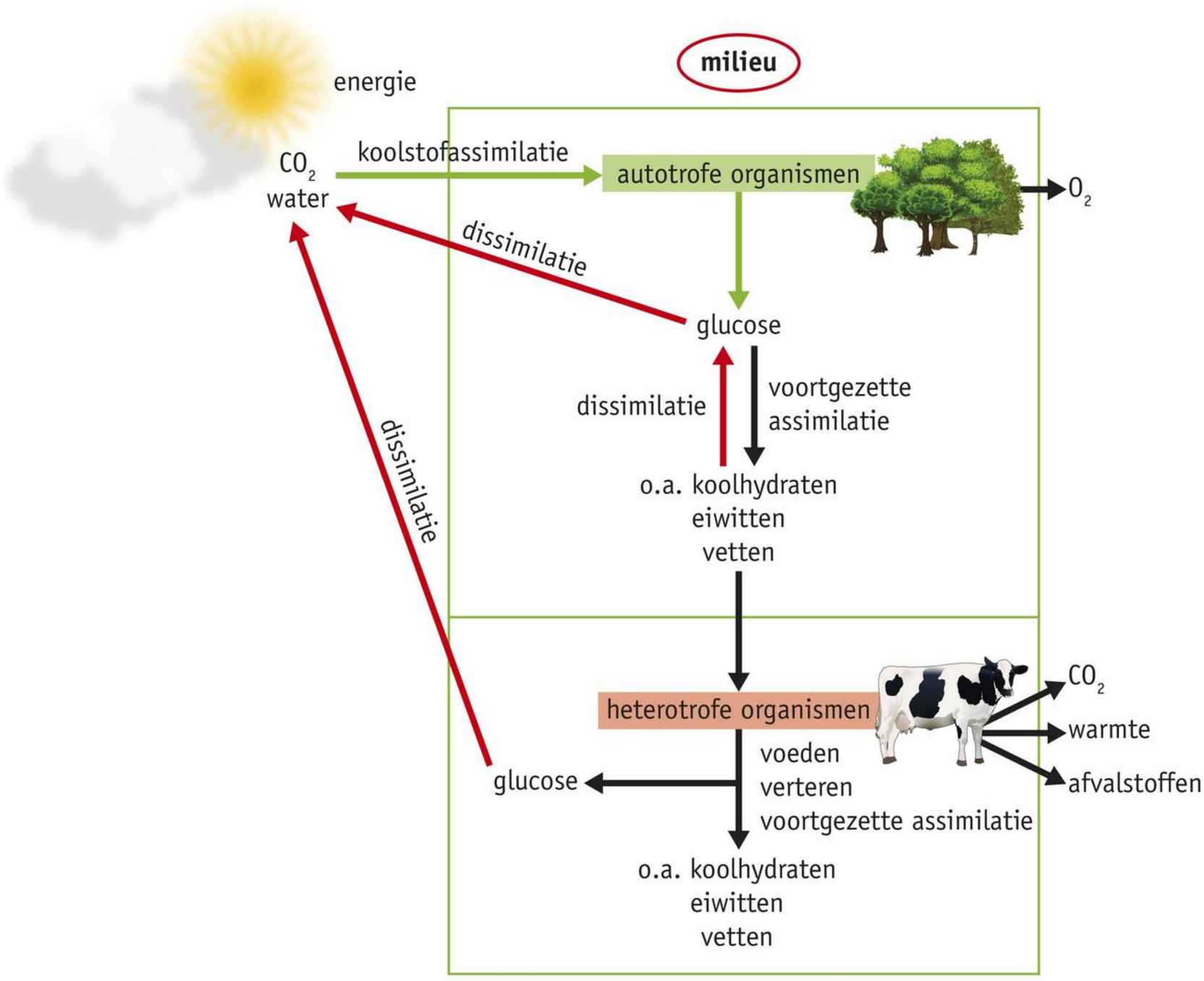
Een mutatie van één nucleotidepaar (bijvoorbeeld een substitutie van T naar G) is een **puntmutatie**. Het kan ook een insertie of een deletie van een nucleotidepaar zijn. De substitutie, insertie of deletie van een enkel nucleotidepaar lijkt misschien een kleine verandering, maar kan grote gevolgen hebben. Verschillende ernstige ziekten, zoals hemofilie en sikkelcelziekte worden veroorzaakt door puntmutaties. Door één substitutie kan midden in een gen een stopcodon ontstaan, waardoor het mRNA-transcript vroegtijdig wordt afgebroken. De insertie of deletie van één nucleotidepaar in een coderend stuk DNA kan de achterliggende codons volledig veranderen (zie afbeelding 58). Dit heet een **leesraamverschuiving** (in het Engels: **frame shift mutation**).

■ **Afb. 58** Het effect van een leesraamverschuiving.



Als een organisme **heterotroof** is, krijgt het energie uit de opname van organische stoffen. Alleen **autotrofe** organismen (zoals planten en cyanobacteriën) zijn in staat glucose te vormen uit koolstofdioxide en water. Dit heet **koolstofassimilatie**. De organische stof glucose is vervolgens de grondstof voor de vorming van andere koolhydraten, vetten, eiwitten en DNA. Dit is de **voortgezette assimilatie**, waarbij grote organische moleculen met energierijke bindingen ontstaan. Door dissimilatie van organische moleculen komt energie beschikbaar voor andere processen in de cel, zoals assimilatie of transport van stoffen. Voortgezette assimilatie en dissimilatie vinden plaats in zowel autotrofe als heterotrofe organismen (zie afbeelding 3).

■ **Afb. 3** Stofwisseling in de cel.



Opdrachten KENNIS

1 Vindt er tijdens het basale metabolisme minimale of maximale stofwisseling plaats? Leg je antwoord uit.

2 **a** In welke dieren vindt de meeste dissimilatie plaats tijdens een koude dag: warmbloedige dieren of koudbloedige dieren? Leg je antwoord uit.
b Vindt bij een koudbloedig dier meer assimilatie plaats bij lage of bij hoge temperaturen? Leg je antwoord uit.

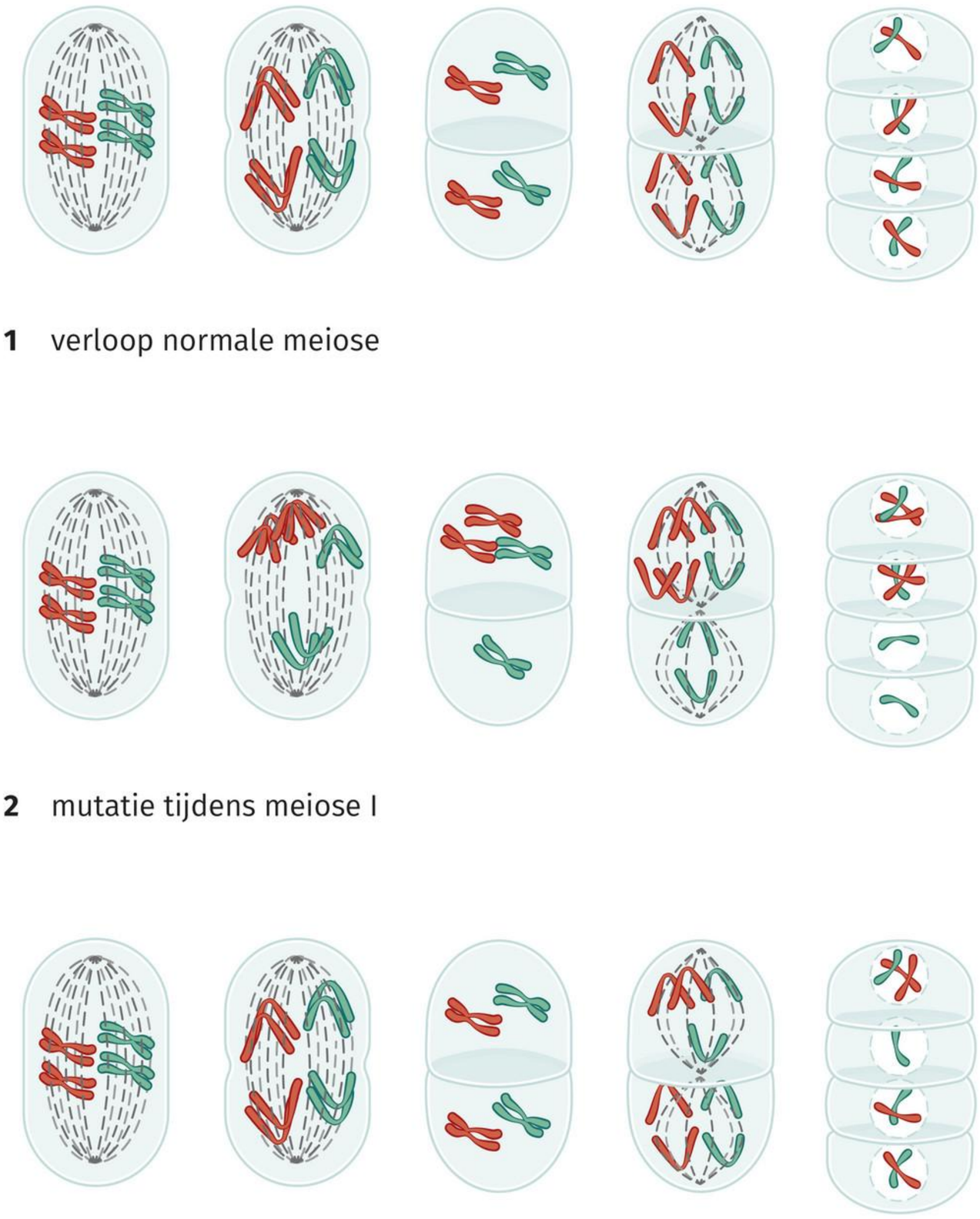
3 Bij de energieomzettingen in een organisme wordt een groot deel van de energie omgezet in chemische energie.
a In welke vormen wordt energie nog meer omgezet?
b Het omzetten van energie in andere vormen wordt soms gezien als 'energieverlies'. Is dit altijd 'energieverlies'? Leg je antwoord uit.

GENOOMMUTATIES

Bij **genoommutaties** verandert het aantal chromosomen in een cel. Bijvoorbeeld doordat homologe chromosomen tijdens meiose I niet worden gescheiden. Beide chromosomen van het chromosomenpaar komen samen in een dochtercel terecht (zie afbeelding 59.2). Genoommutaties kunnen ook optreden doordat tijdens meiose II twee chromatiden bij elkaar blijven (zie afbeelding 59.3).

In beide gevallen ontstaan er geslachtscellen die een chromosoom te veel hebben en geslachtscellen met een chromosoom te weinig.

■ **Afb 59** Meiose (er zijn slechts twee chromosomenparen getekend).



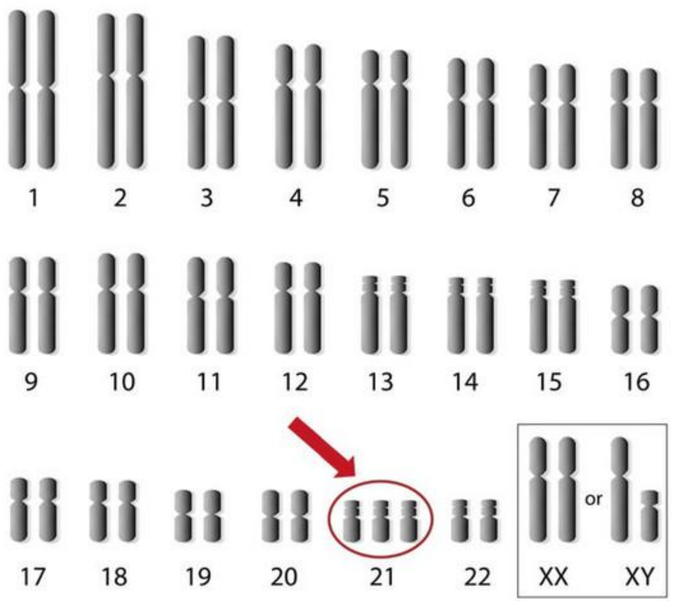
1 verloop normale meiose

2 mutatie tijdens meiose I

3 mutatie tijdens meiose II

Na bevruchting met een geslachtscel met een afwijkend chromosomenaantal ontstaat een zygote met één chromosoom te veel of één chromosoom te weinig. Meestal is de zygote dan niet levensvatbaar, maar soms wel. Een kind met het syndroom van Down is ontstaan uit een bevruchte eicel met een genoommutatie. Het eenentwintigste chromosoom komt in de celkern van iemand met Down in alle lichaamscellen in drievoud voor (zie afbeelding 60). Het afwijkende chromosomenaantal veroorzaakt naast diverse medische problemen vaak een achterstand in de geestelijke ontwikkeling en een kenmerkend uiterlijk (zie afbeelding 61).

■ **Afb. 60** Karyogram van een persoon met het syndroom van Down.



■ **Afb. 61** Man met syndroom van Down.

Opdrachten KENNIS

72 In afbeelding 62.1 is een coderend dubbelstrengs DNA-molecuul met bijbehorende transcriptie naar mRNA en translatie naar eiwit weergegeven. Daaronder (zie afbeelding 62.2 t/m 62.5) staan verschillende mutaties (geel gearceerd) van dit DNA-molecuul weergegeven.

■ **Afb. 62** Schematische weergave van een DNA-molecuul met vier verschillende mutaties.

3′ G–A–G–C–C –T–A–C–G–G–C–G–C–T–T–T–A – A–C–C–C–A–C–G–G–A–T–G–G–A–T–T –C–A–A –T–G–G 5′ **DNA**

5′ C–T–C–G–G –A–T–G –C–C–G–C–G–A–A–A–T– T–G–G–G–T–G–C–C–T–A–C–C–T–A–A –G–T–T –A–C–C 3′

5′ C–U–C–G–G –A–U–G –C–C–G –C–G–A–A–A–U– U–G–G–G–U–G–C–C–U – A–C–C–U–A–A–G–U–U–A–C–C 3′ **mRNA**

Met – Pro – Arg – Asn – Trp – Val – Pro – Thr – stop **eiwit**

1

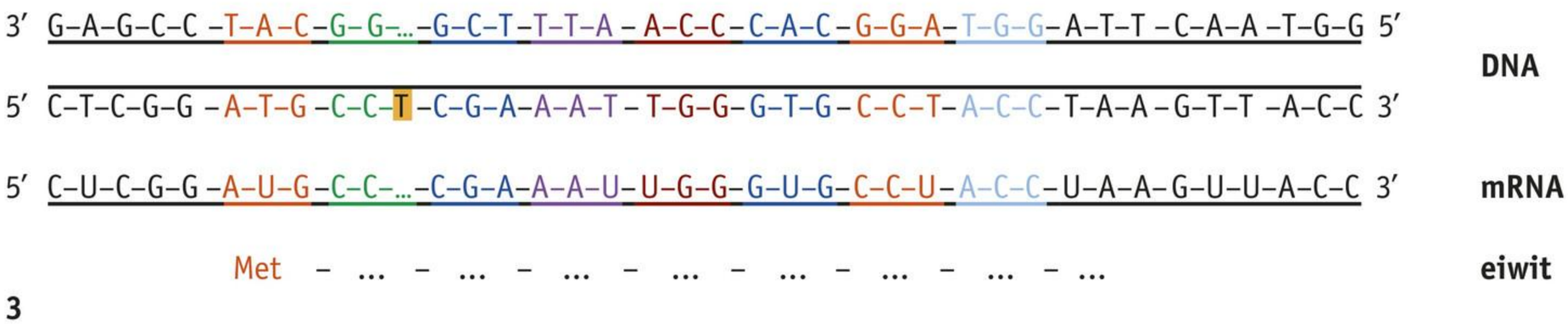
3′ G–A–G–C–C –T–A–C–G–A–C–G–C–T–T–T–A – A–C–C–C–A–C–G–G–A–T–G–G–A–T–T –C–A–A –T–G–G 5′ **DNA**

5′ C–T–C–G–G –A–T–G –C–…–G –C–G–A–A–A–T – T–G–G–G–T–G–C–C–T–A–C–C–T–A–A –G–T–T –A–C–C 3′

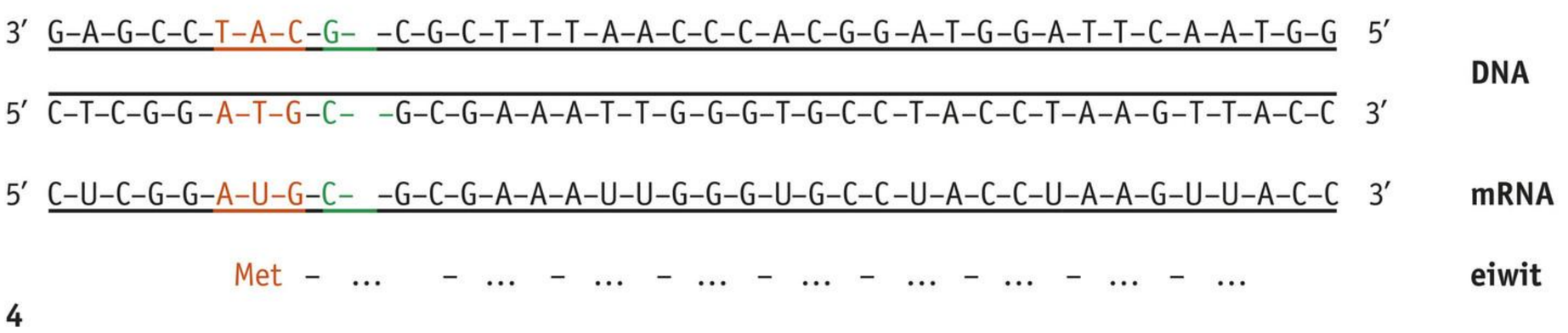
5′ C–U–C–G–G –A–U–G –C–…–G –C–G–A–A–A–U– U–G–G–G–U–G–C–C–U – A–C–C–U–A–A–G–U–U–A–C–C 3′ **mRNA**

Met – … – … – … – … – … – … – … – … **eiwit**

2



3



4

5

a Geef voor elk van de vier mutaties aan:
- welk type mutatie plaatsvindt (substitutie/insertie/deletie)
- wat de nieuwe nucleotidesequentie van het codon in het mRNA wordt en voor welk aminozuur het nu codeert
- of de mutatie een leesraamverschuiving veroorzaakt

b Soms kan een puntmutatie door substitutie de aminozuursequentie van een eiwit sterk veranderen.
Leg dat uit.

c Substituties van de derde nucleotide van een codon hebben meestal geen effect op het fenotype.
Waarom niet?

73 De overproductie van sommige eiwitten kan schadelijke gevolgen hebben voor cellen en weefsels.
Waarom hebben mensen met het syndroom van Down een hoger risico op gezondheidsproblemen?

OORZAKEN VAN MUTATIES

Mutaties ontstaan vaak door kopieerfouten tijdens DNA-replicatie. Daarnaast kunnen mutaties ontstaan als gevolg van blootstelling aan **mutagene straling** (zoals radioactieve straling, röntgenstraling of ultraviolette straling), **mutagene stoffen** (zoals alcohol en stoffen in sigarettenrook) of aan virussen (zoals HPV). Deze **mutagene factoren** kunnen DNA beschadigen, waardoor mutaties kunnen ontstaan.

HET DNA-REPAIRSYSTEEM

In een celkern zijn continu enzymen werkzaam die beschadigingen van het DNA opsporen en repareren. Ze zijn onderdeel van het **DNA-repairsysteem**. Tijdens de DNA-replicatie worden verkeerd ingebouwde of kapotte nucleotiden in een DNA-streng opgemerkt door het enzym DNA-polymerase. Deze nucleotiden worden uit de DNA-streng geknipt. Vervolgens zorgt DNA-polymerase ervoor dat de juiste nucleotiden worden ingebouwd. Dit proces heet proofreading. Het uiteinde van het nieuwe stukje DNA wordt door ligase vastgeplakt aan het oude DNA.

Doordat wijzigingen in het DNA vaak onmiddellijk worden gecorrigeerd, zijn de meeste mutaties tijdelijk. Maar als DNA-replicatie plaatsvindt voordat de reparerende enzymen hun werk hebben voltooid, zullen de dochtercellen dezelfde DNA-schade hebben. Daarom zorgt een **tumorsuppressorgen** ervoor dat de celcyclus voor de celdeling stil komt te liggen. Door expressie van het tumorsuppressorgen worden eiwitten gemaakt die voorkomen dat een cel zich deelt. Zo kan de DNA-reparatie worden afgerond en kan eerst de schade worden hersteld. De eiwitten zorgen er ook voor dat een cel met te veel of onherstelbare DNA-schade overgaat tot apoptose.

DE EFFECTEN VAN MUTATIES

Afhankelijk van het effect dat mutaties hebben, kunnen ze neutraal, negatief of positief zijn. Neutrale mutaties veranderen het genotype, maar hebben geen invloed op het fenotype. Negatieve en positieve mutaties hebben wel invloed op het fenotype. Een mutatie treedt op in één van de twee homologe chromosomen. Het andere chromosoom bevat dus nog een intact allel en codeert nog voor een ongewijzigd, werkzaam eiwit. De meeste allelen met een mutatie zijn daardoor recessief.

Sommige mutaties hebben tot gevolg dat het eiwit waarvoor het gemuteerde gen codeert, een ander aminozuur bevat dan het oorspronkelijke eiwit. Dit hoeft nog geen merkbare gevolgen te hebben, bijvoorbeeld doordat de werking van het eiwit niet verandert.

Het effect van mutaties hangt af van het type cel waarin de mutatie plaatsvindt en van de aard van de mutatie. Wanneer een mutatie optreedt in een cel waaruit een nakomeling ontstaat, bijvoorbeeld een geslachtscel of zygote, kan dat grote gevolgen hebben. Alle cellen van de nakomeling bevatten dan deze mutatie.

Het effect van mutaties in lichaamscellen is vaak gering en deze mutaties zijn bovendien niet erfelijk. Mutaties in lichaamscellen kunnen soms wel leiden tot kanker.

HET ONTSTAAN VAN KANKER

Kanker is een aandoening waarbij cellen ongecontroleerd blijven delen. Mutaties die kanker veroorzaken, beïnvloeden meestal de functie van genen die de celdeling reguleren, zoals tumorsuppressorgenen en proto-oncogenen.

Door een mutatie in een tumorsuppressorgen is er geen rem meer op de celcyclus, waardoor schade aan het DNA niet meer wordt hersteld voordat de cel zich deelt. De dochtercellen hebben dan dezelfde DNA-schade. Ook zullen cellen met te veel of onherstelbare DNA-schade niet meer overgaan tot apoptose. Zo komen er steeds meer cellen met DNA-schade bij en het DNA in deze cellen zal bovendien steeds verder beschadigd raken.

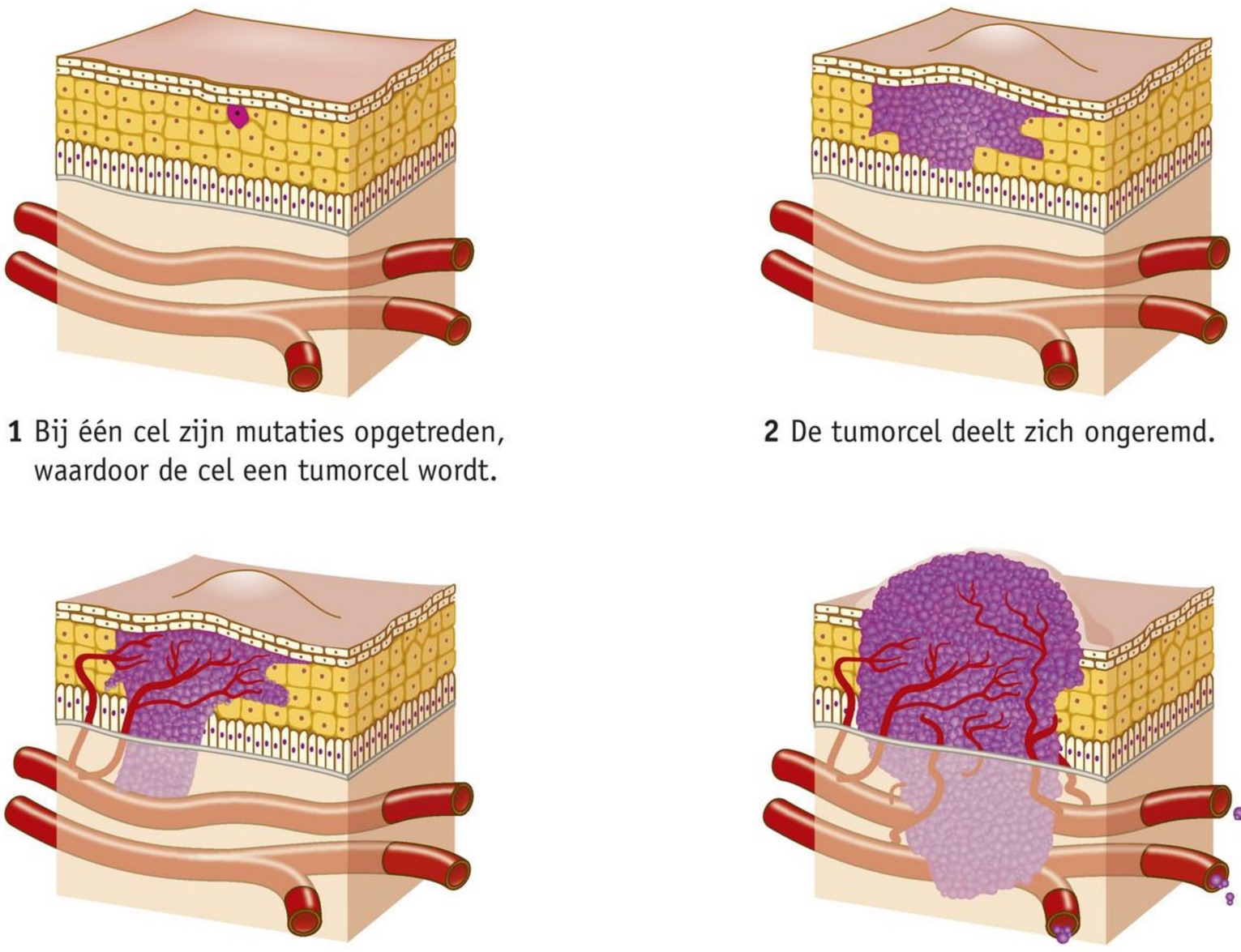
Proto-oncogenen coderen voor eiwitten die de celgroei en de celdifferentiatie stimuleren. Ze zijn vooral actief tijdens de embryonale ontwikkeling. Door een mutatie of door toename van de genexpressie kan een proto-oncogen veranderen in een **oncogen**. De extra genactiviteit van het oncogen leidt tot het abnormaal snel groeien en delen van de cel. Wanneer een tumorsuppressorgen er niet voor zorgt dat de cel overgaat tot apoptose, kan een gezwel (**tumor**) ontstaan.

Sommige tumoren groeien langzaam. Wanneer zo'n tumor de bouw van het weefsel niet verstoort en er geen cellen loslaten die elders uitzaaiingen veroorzaken, noem je een tumor **goedaardig**. Als een goedaardige tumor klachten veroorzaakt, kan hij operatief worden verwijderd. Gewoonlijk komt de tumor daarna niet meer terug en is de patiënt genezen.

Bij kanker ontstaan **kwaadaardige tumoren**. Door mutaties is de cel ongevoelig geworden voor stoffen die de celdeling remmen. De delingssnelheid van de cellen is hierdoor bij een kwaadaardige tumor veel hoger dan bij een goedaardige tumor. De cellen hebben een afwijkende vorm en kunnen niet goed functioneren. Ook verstoren ze de bouw van de weefsels en worden er bloedvaten aangelegd naar de tumor om deze te voorzien van zuurstof en voedingsstoffen (zie afbeelding 63). Het eerste gezwel dat bij kanker ontstaat, noem je een primaire tumor. Wanneer cellen van de primaire tumor loslaten, komen ze via het bloed of de lymfe in andere organen terecht. Hier kunnen ze uitgroeien tot secundaire tumoren. De uitzaaiing van tumoren naar andere lichaamsdelen heet **metastase**.

Iedereen kan kanker krijgen, maar de kans op kanker neemt aanzienlijk toe door de volgende factoren: roken, alcohol, overgewicht, huidverbranding door zonlicht en contact met andere mutagene factoren zoals asbest of radioactieve straling.

■ **Afb. 63** Het ontstaan van kanker.



1 Bij één cel zijn mutaties opgetreden, waardoor de cel een tumorcel wordt.

2 De tumorcel deelt zich ongeremd.

3 Er is een primaire tumor ontstaan, waar bloedvaten naartoe zijn gegroeid.

4 Er vindt metastase plaats.

Opdrachten KENNIS

74 DNA-polymerase maakt tijdens het inbouwen van nieuwe nucleotiden gemiddeld één fout per 100 000 nucleotiden.

a Waarom is een DNA-repairsysteem belangrijk voor het overleven van een organisme?

b Dankzij proofreading kan DNA-polymerase 99% van de mutaties die ontstaan door replicatiefouten zelf repareren. De overgebleven mutaties worden (meestal) door andere enzymen van het DNA-repairsysteem hersteld.
Bereken hoeveel mutaties gemiddeld overblijven na replicatie en proofreading van het DNA in een menselijke cel. Ga uit van een genoomgrootte van 3 miljard nucleotiden.

75 Voor het ontstaan van een kwaadaardige tumor zijn vaak minstens twee mutaties nodig: één die een tumorsuppressorgen beïnvloedt en één die een proto-oncogen beïnvloedt.
Leg uit waarom een mutatie in slechts één van deze genen alleen meestal niet voldoende is om kanker te veroorzaken.

76 Substituties van A naar G en van C naar T komen gemiddeld vaker voor dan andere substituties.
Verklaar waarom deze mutaties vaker voorkomen dan andere substituties. Gebruik *BiNaS* tabel 71A.

Opdrachten INZICHT

77 Roken is de belangrijkste oorzaak van longkanker bij mensen. Maar roken kan ook andere vormen van kanker veroorzaken, zoals maag-, darm- en leverkanker.
Verklaar hoe roken deze andere vormen van kanker kan veroorzaken.

78 Bij het gebruik van röntgenapparatuur (zie afbeelding 64) komt mutagene straling vrij. Hoewel deze straling minder schadelijk is dan radioactieve straling, worden er bij een patiënt niet meer röntgenfoto's gemaakt dan strikt noodzakelijk is. Elke keer dat je aan röntgenstralen wordt blootgesteld, kan het DNA in lichaamscellen worden beschadigd, waardoor mutaties kunnen ontstaan. Bestraling van de voortplantingsorganen wordt meestal vermeden.
Waarom wordt bestraling van de voortplantingsorganen vermeden?

■ **Afb. 64** Meisje draagt een beschermend hesje bij het maken van een röntgenfoto door de tandarts.

79 Bij geringe celschade komt bij eukaryoten het suppressorgen p53 tot expressie. Het p53-eiwit dat daardoor wordt gemaakt, regelt de transcriptie en translatie van het p21-gen. Dit gen is verantwoordelijk voor de aanmaak van het p21-eiwit dat een binding aangaat met een eiwit dat aanzet tot mitose. Dit eiwit wordt daardoor inactief. Hierdoor stopt de celdeling in de G1-fase, zodat het DNA eerst kan worden hersteld. Wanneer de schade te groot is, zet het p53-eiwit de cel aan tot apoptose.
Het p53-eiwit regelt de expressie van het p21-gen.

a Wat voor soort eiwit is p53?

b Gewoonlijk veroorzaakt een mutatie in een proto-oncogen geen kanker.
Leg dit uit en geef aan welke rol het p53-eiwit hierbij heeft.

c Kanker kan alleen ontstaan als er mutaties in meerdere genen hebben plaatsgevonden, vooral in de genen die zijn betrokken bij de regulering van de celdeling. Het blijkt dat bij 80% van alle vormen van kanker een mutatie in het p53-gen voorkomt. Het p53-eiwit wordt daarom het meest met tumorvorming in verband gebracht.
Hoe kan een mutatie in het p53-gen leiden tot tumorvorming?

d Door mutatie wordt een p53-eiwit gesynthetiseerd dat zich verkeerd vouwt en daardoor zijn werk niet kan doen. Wetenschappers hebben een stof gevonden die ervoor zorgt dat het eiwit weer de juiste vorm aanneemt. Ze hopen hiermee een nieuwe therapie tegen kanker te kunnen ontwikkelen.
Waarop is deze therapie gebaseerd?

e Baarmoederhalskanker is een van de weinige vormen van kanker die bijna altijd door een virus wordt veroorzaakt. Dit virus heet het humaan papillomavirus (HPV) en beïnvloedt vooral de tumorsuppressorgenen p53 en pRb. Beide genen kunnen de celdeling onderdrukken.
Vrouwen die alcohol drinken hebben een grotere kans om baarmoederhalskanker te ontwikkelen. Leg dat uit.

80 Een primaire tumor kun je operatief verwijderen of de tumorcellen kunnen (door radiotherapie) worden gedood. Na zo'n behandeling krijgt een patiënt vaak chemotherapie. Er worden dan stoffen aan de patiënt gegeven die de celdeling remmen.

a Leg uit met welke reden dit gebeurt.

b Het hormoon oestrogeen kan de celdeling van borstcellen stimuleren. Bij sommige typen borstkanker bezitten de tumorcellen oestrogeenreceptoren.
Leg uit waarom borstkankerpatiënten met dit type borstkanker medicijnen krijgen die aan de oestrogeenreceptoren binden.

Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf.*

Context Leefwereld

PROGERIA

Het leven is een feest, maar je moet zelf de slingers ophangen is een boek van Bjorn Nabuurs en Sjaak van Moorsel. Het boek gaat over Bjorn (zie afbeelding 65). Bjorn (2002) is een optimistische jongen die alles wil meemaken in het leven en het uiterste wil bereiken. Bjorn heeft de zeldzame verouderingsziekte progeria. Doordat hij weet dat zijn leven waarschijnlijk korter is dan het leven van zijn leeftijdgenoten, wil hij er alles uithalen.

De klassieke vorm van progeria wordt veroorzaakt door een puntmutatie in het LMNA-gen in een van de homologe chromosomen van paar 1. Normaal codeert het LMNA-gen voor het eiwit prelamine A dat zorgt voor een netwerk van draden dat stevigheid geeft aan het celkernmembraan en nodig is bij de celdeling. Het kortere, afwijkende eiwit dat bij progeria ontstaat, heet progerin. Door dit eiwit is het kernmembraan minder stevig en heeft het niet zijn normale vorm.

Elk kalenderjaar wordt Bjorn ongeveer acht tot tien levensjaren ouder. Hij heeft verouderingssymptomen die meestal alleen voorkomen bij ouderen. Kinderen met progeria worden gemiddeld 13 jaar oud. Doordat ze bijvoorbeeld slechte bloedvaten hebben, kunnen ze al vroeg een hartinfarct of een beroerte krijgen. Ze hebben een normale intelligentie en er treedt geen dementie op. Bjorn heeft een zeldzame, erfelijke vorm van progeria. Het proces van veroudering gaat bij deze variant minder snel dan bij klassieke progeria. In 2023 vierde Bjorn zijn 21e verjaardag.

■ **Afb. 65** Bjorn.

Opdrachten

81 Alle cellen van een kind met klassieke progeria bevatten het gemuteerde allel.

- **a** Op welk moment is de mutatie van deze vorm van progeria waarschijnlijk ontstaan?
- **b** Klassieke progeria wordt veroorzaakt door een puntmutatie.
  Is deze mutatie dominant of recessief? Leg je antwoord uit.
- **c** Het afwijkende eiwit dat bij klassieke progeria ontstaat, is korter.
  Leg uit waarom het afwijkende eiwit door de puntmutatie korter is.
- **d** Waardoor wordt klassieke progeria niet doorgegeven aan nakomelingen?
- **e** Bjorn heeft een niet-klassieke vorm van progeria. Hij heeft een erfelijke vorm die niet door een puntmutatie wordt veroorzaakt.
  Leg uit op welke manier Bjorn een erfelijke vorm van progeria heeft opgelopen.

7 BIOTECHNOLOGIE

LEERDOEL

10.7.1 Je kunt verschillende technieken en toepassingen van biotechnologie beschrijven.

TAXONOMIE	LEERDOEL EN OPDRACHTEN
	10.7.1
Begrijpen	82, 83, 84, 85, 86
Toepassen	87b, 88a, 90a, 91a, 92ab
Analyseren	87a, 88b, 89, 90b, 91bc, 92cd

Wetenschappers kunnen de eigenschappen van organismen aanpassen door het DNA rechtstreeks te veranderen. Door bijvoorbeeld een stukje van het DNA van een maisplant te vervangen door DNA van een bacterie die giftig is voor sommige insecten, kun je een vraatresistente maisplant maken die geen pesticiden nodig heeft.

BIOTECHNOLOGIE

Biotechnologie is een verzamelnaam voor technieken waarbij organismen worden gebruikt om producten voor de mens te maken. Sommige technieken worden al eeuwenlang gebruikt. Zo wordt voor de productie van wijn, bier en brood gist gebruikt. Bij de productie van kaas worden enzymen (chymosine) uit de lebmaag van pasgeboren kalveren gebruikt. Melkzuurbacteriën spelen een rol bij de productie van zuurkool en yoghurt.

In de landbouw worden al eeuwen planten veredeld en dieren gefokt, door middel van kruising en selectie, om ze aan te passen aan onze behoeften. Bij dit veredelingsproces worden organismen met gewenste erfelijke eigenschappen met elkaar gekruist om nakomelingen met dezelfde eigenschappen te verkrijgen. Deze kunstmatige vorm van selectie heeft in een periode van zo'n tienduizend jaar een grote variatie aan rassen van een beperkt aantal wilde dier- en plantensoorten opgeleverd. Zo zijn heel veel varianten van kool, waaronder broccoli, boerenkool, bloemkool en spruitjes, allemaal ontstaan door verschillende veredelingsprocessen van de wilde plant *Brassica oleracea*.

GENETISCHE MODIFICATIE

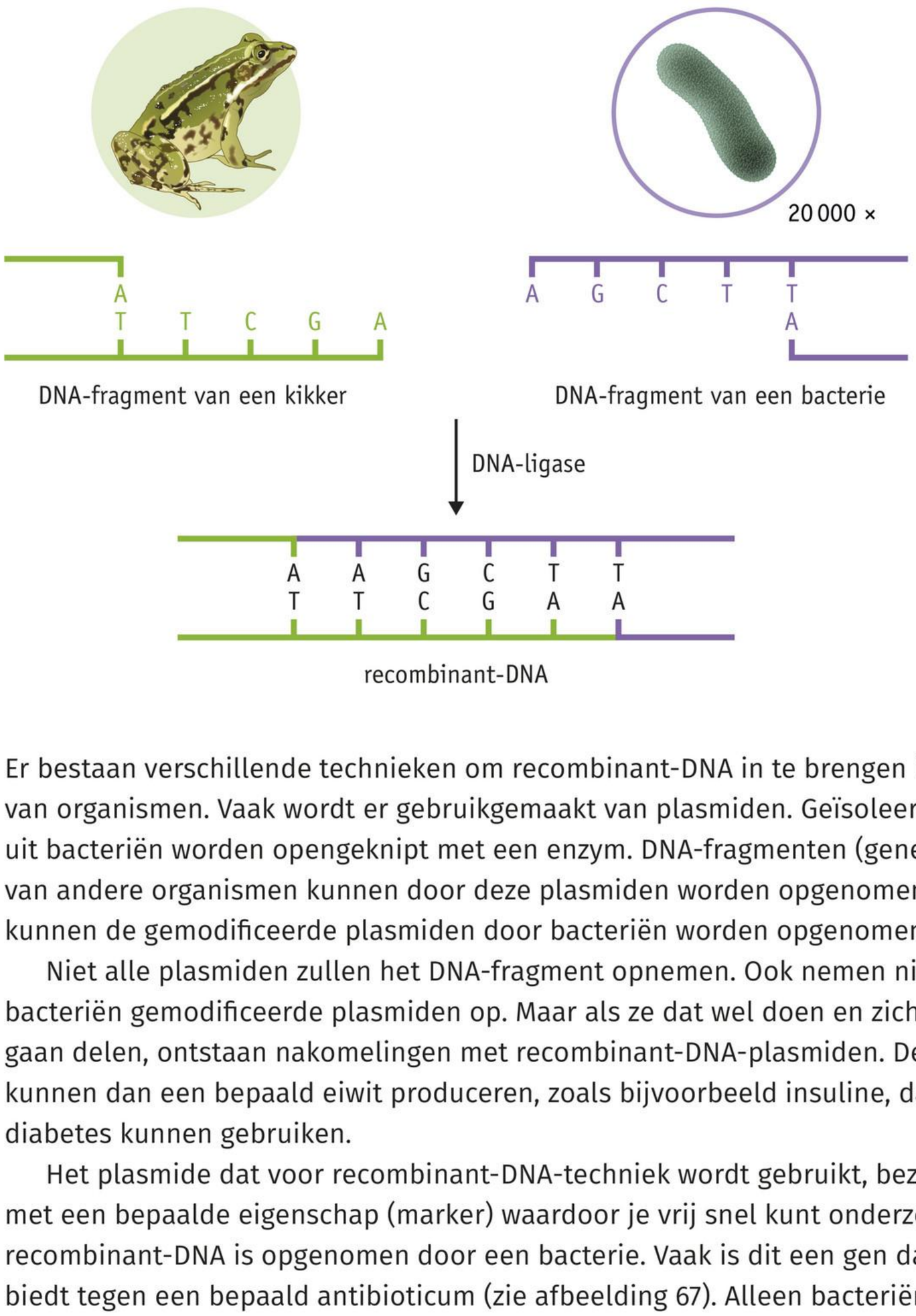
Onderzoekers weten door de toegenomen kennis over DNA en genexpressie steeds beter welke genen verantwoordelijk zijn voor bepaalde eigenschappen. Met deze kennis kun je de eigenschappen van bacteriën, schimmels, planten en dieren wijzigen. Dit heet **genetische modificatie**. Een gen uit het DNA van een bepaald organisme kun je overbrengen naar het DNA van een ander organisme. Organismen waarbij het DNA is veranderd, noem je een ggo (genetisch gemodificeerd organisme, Engels: GMO). Het kan dan gaan om een **transgeen** of **cisgeen** organisme. Als het gen afkomstig is van een organisme van een andere soort, noem je het organisme transgeen. Als het gen afkomstig is van een ander organisme van de dezelfde soort, noem je het organisme cisgeen. Transgene bacteriën kun je bijvoorbeeld inzetten bij het minder schadelijk maken van vervuilde grond. Ingebouwde genen zorgen ervoor dat kwik in een vervuilde bodem wordt omgezet in een niet-giftige kwikverbinding.

RECOMBINANT-DNA-TECHNIEK

Een voorbeeld van genetische modificatie is de **recombinant-DNA-techniek**. Bij deze techniek wijzig je de nucleotidevolgorde van het DNA in een organisme door DNA in te brengen dat afkomstig is van een ander individu. De betrokken organismen hoeven hiervoor niet tot dezelfde soort te behoren.

De recombinant-DNA-techniek werd mogelijk door de ontdekking van speciale enzymen die een geselecteerd DNA-fragment (bijvoorbeeld een gen) uit een DNA-streng kunnen knippen. Dat fragment kun je toevoegen aan het DNA van een ander organisme. Een ander enzym, DNA-ligase, plakt dan de verschillende DNA-fragmenten aan elkaar. Zo kun je bijvoorbeeld recombinant-DNA maken door een stukje DNA van een kikker toe te voegen aan het DNA van een bacterie (zie afbeelding 66).

■ **Afb. 66** De werking van DNA-ligase.



Er bestaan verschillende technieken om recombinant-DNA in te brengen in het DNA van organismen. Vaak wordt er gebruikgemaakt van plasmiden. Geïsoleerde plasmiden uit bacteriën worden opengeknipt met een enzym. DNA-fragmenten (genen) afkomstig van andere organismen kunnen door deze plasmiden worden opgenomen. Vervolgens kunnen de gemodificeerde plasmiden door bacteriën worden opgenomen.

Niet alle plasmiden zullen het DNA-fragment opnemen. Ook nemen niet alle bacteriën gemodificeerde plasmiden op. Maar als ze dat wel doen en zich daarna gaan delen, ontstaan nakomelingen met recombinant-DNA-plasmiden. Deze bacteriën kunnen dan een bepaald eiwit produceren, zoals bijvoorbeeld insuline, dat mensen met diabetes kunnen gebruiken.

Het plasmide dat voor recombinant-DNA-techniek wordt gebruikt, bezit vaak een gen met een bepaalde eigenschap (marker) waardoor je vrij snel kunt onderzoeken of het recombinant-DNA is opgenomen door een bacterie. Vaak is dit een gen dat resistentie biedt tegen een bepaald antibioticum (zie afbeelding 67). Alleen bacteriën die het gemodificeerde plasmide met het gen voor antibioticaresistentie hebben opgenomen, overleven wanneer ze op een voedingsbodem met het antibioticum worden gekweekt. Wanneer deze bacteriën zich delen, ontstaat een kloon van bacteriën met het recombinant-DNA-plasmide. Deze bacteriën produceren een bepaald enzym dat ze vóór de recombinant-DNA-techniek niet produceerden.

Door bacteriën zich te laten delen, kun je een gen vermenigvuldigen om het later in te brengen in het DNA van andere organismen. Zo kan een gen dat in de ene plant weerstand geeft tegen een bepaalde schimmel, worden overgeplaatst naar een andere plant.

ENERGIETRANSPORT

Cellen delen zich, groeien en zorgen voor levensprocessen zoals beweging en transport en afscheiding van stoffen. Daarvoor hebben cellen energie nodig. Bij de fotosynthese in chloroplasten en bij verbranding in mitochondriën wordt **ATP** (adenosinetrifosfaat) gevormd. ATP bestaat uit adenosine (dat is opgebouwd uit adenine en ribose) en drie fosfaatgroepen. In de bindingen tussen de fosfaatgroepen is veel chemische energie vastgelegd. Lichtenergie en chemische energie uit glucose worden omgezet in de chemische energie van ATP, die bruikbaar is voor de cel. Wanneer de derde fosfaatgroep van ATP wordt afgesplitst, komt de vastgelegde energie weer vrij en ontstaat **ADP** (adenosinedifosfaat). De energie die door deze afsplitsing beschikbaar komt, is nodig voor stofwisselingsreacties en processen in de cel, bijvoorbeeld eiwitsynthese of actief transport over membranen (zie afbeelding 4).

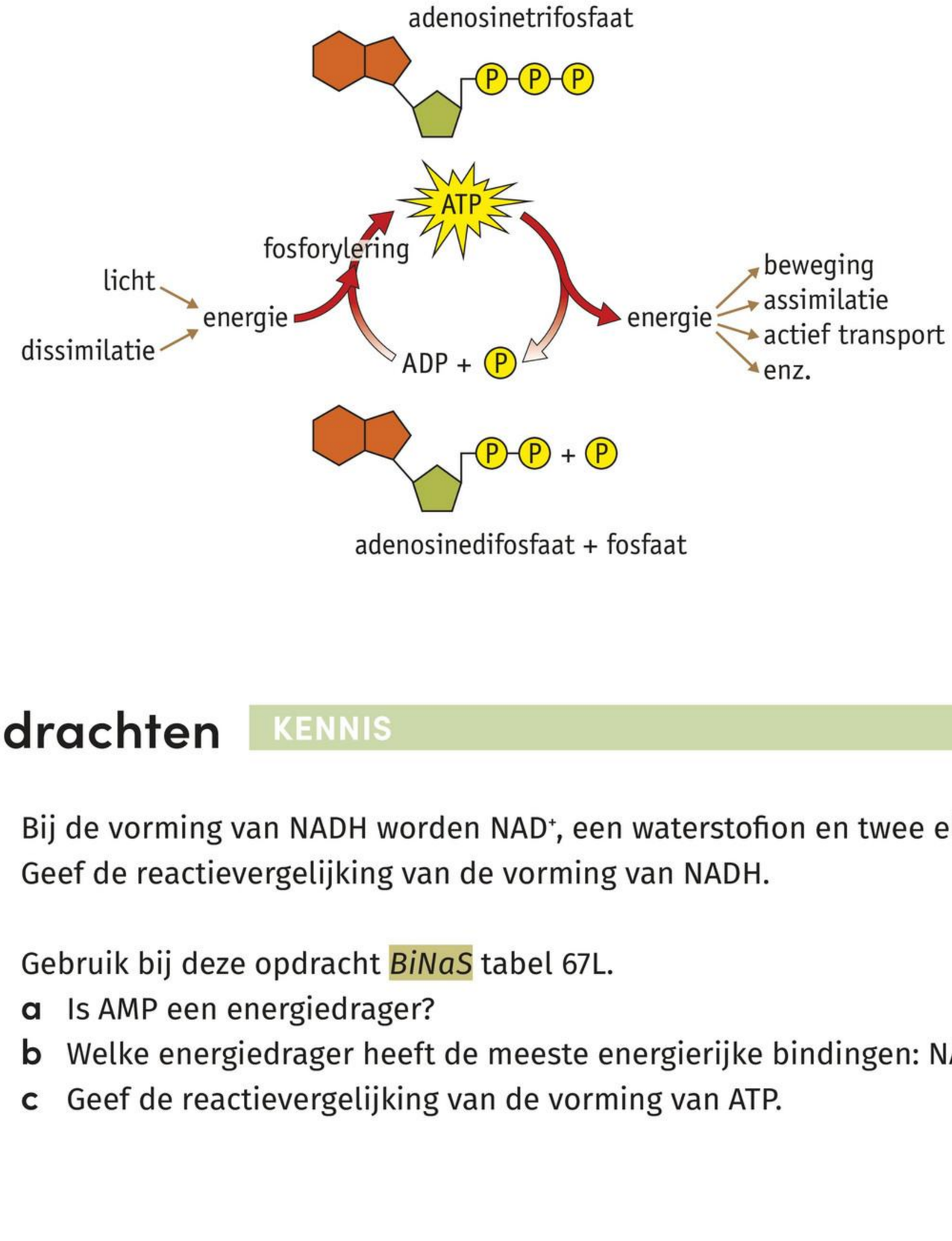
Met behulp van de energie van licht of dissimilatie kan een fosfaatgroep binden aan ADP en ontstaat er opnieuw energierijk ATP. Deze reactie noem je fosforylering. In reactievergelijkingen wordt een vrije fosfaatgroep vaak weergegeven door P_i (*inorganic phosphate,* Engels voor anorganisch fosfaat).

Bij afsplitsing van de tweede fosfaatgroep van ADP ontstaat AMP (adenosinemonofosfaat).

Andere moleculen die energie vastleggen (energiedrager of dragermoleculen) zijn de chemisch op ATP lijkende moleculen **NAD^+** (nicotinamide-adenine-dinucleotide), **NADH**, **$NADP^+$** (nicotinamide-adenine-dinucleotide-fosfaat) en **NADPH**. NADH bevat twee elektronen en een waterstofion meer dan NAD^+. NADPH bevat twee elektronen en een waterstofion meer dan $NADP^+$.

NADH wordt soms genoteerd als $NADH,H^+$ en NADPH als $NADPH,H^+$.

■ **Afb. 4** Energietransport met behulp van ATP.



Opdrachten KENNIS

4 Bij de vorming van NADH worden NAD^+, een waterstofion en twee elektronen gebruikt. Geef de reactievergelijking van de vorming van NADH.

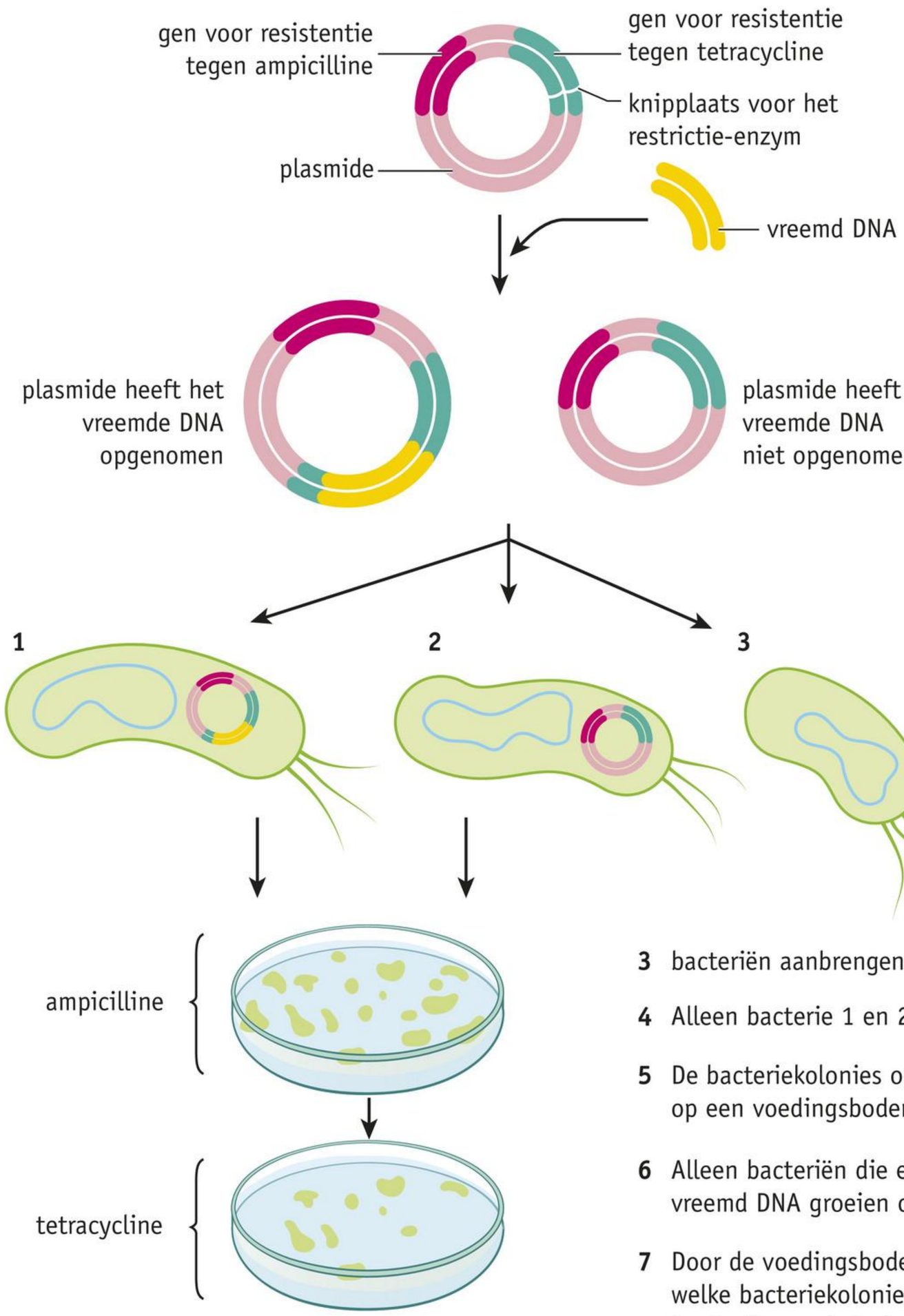
5 Gebruik bij deze opdracht *BiNaS* tabel 67L.

a Is AMP een energiedrager?

b Welke energiedrager heeft de meeste energierijke bindingen: NAD^+ of ATP?

c Geef de reactievergelijking van de vorming van ATP.

■ **Afb. 67** De selectie van genetisch gemodificeerde bacteriën met behulp van een plasmide met twee genen voor resistentie tegen antibiotica.



1 Het vreemde DNA en het plasmide worden geknipt met hetzelfde restrictie-enzym.

2 mogelijke opnamen door bacteriën

3 bacteriën aanbrengen op voedingsbodem met ampicilline

4 Alleen bacterie 1 en 2 groeien op een voedingsbodem met ampicilline.

5 De bacteriekolonies op de eerste voedingsbodem worden overgebracht op een voedingsbodem met tetracycline.

6 Alleen bacteriën die een plasmide hebben opgenomen zonder vreemd DNA groeien op een voedingsbodem met tetracycline.

7 Door de voedingsbodems met elkaar te vergelijken, kun je ontdekken welke bacteriekolonies op de voedingsbodem met ampicilline in het bezit zijn van het plasmide met vreemd DNA.

Opdrachten KENNIS

82 **a** Noem een voordeel van genetische modificatie ten opzichte van klassieke veredelingstechnieken (kruisen).

b Sommige mensen hebben bezwaren tegen genetische modificatie van transgene organismen, omdat ze vinden dat het tegen de natuur in gaat.
Waarom wordt genetische modificatie van transgene organismen als minder natuurlijk gezien dan genetische modificatie van cisgene organismen?

83 De recombinant-DNA-techniek wordt veel toegepast op bacteriën om ze een bepaald eiwit te laten maken, zoals insuline voor medicatie.

a Noem twee eigenschappen van bacteriën die hen zeer geschikt maken voor dit doeleinde.

b Bij genetische modificatie kunnen markers worden gebruikt. Deze kleine stukjes DNA bezitten een bepaalde eigenschap, zoals fluorescentie of resistentie tegen een antibioticum.
Welke functie hebben deze markers?

GENETISCHE MODIFICATIE MET VIRUSSEN

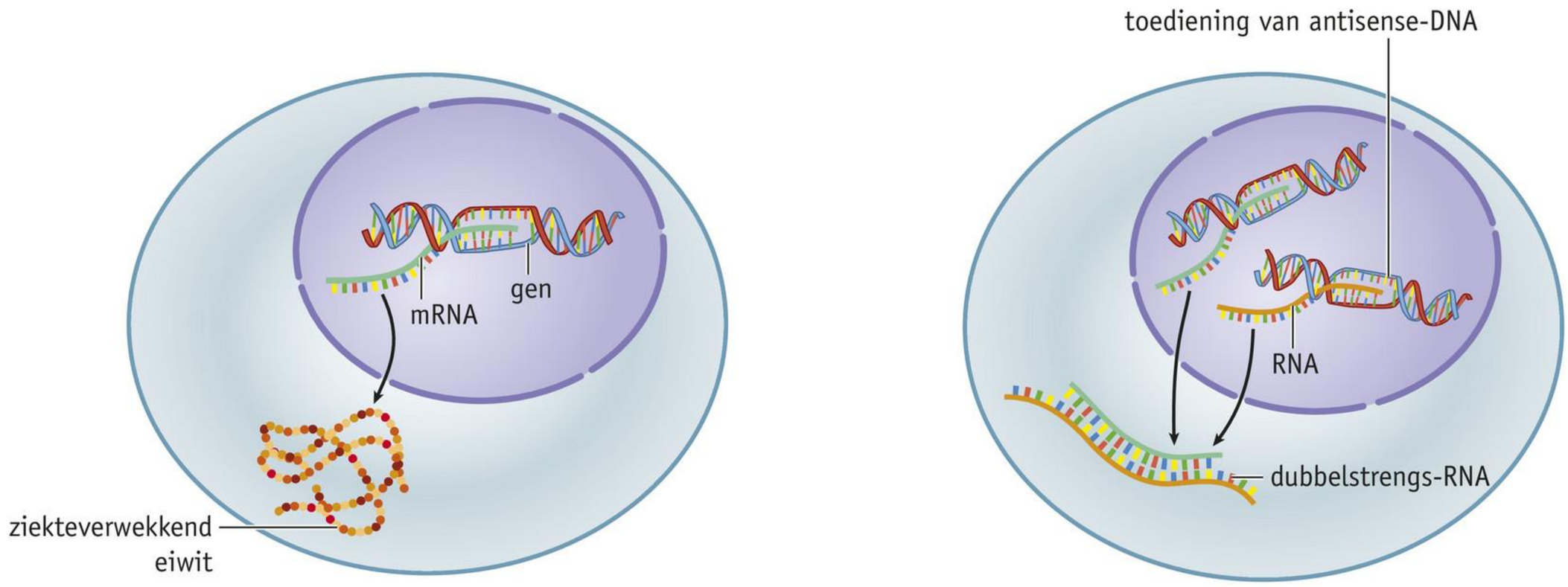
Ook virussen kun je gebruiken om genen in een ander organisme in te bouwen. Met behulp van een enzym uit bepaalde virussen is het mogelijk een gen te isoleren uit het genoom van een eukaryoot organisme.

Om een bepaald gen te isoleren uit het DNA van een organisme wordt een kopie gemaakt van het mRNA. Dit bevat geen introns of andere overbodige informatie. Het mRNA wordt uit cellen geïsoleerd die veel van het gewenste eiwit maken. Met behulp van het enzym reverse-transcriptase kan langs een mRNA-keten een enkelstrengs DNA-keten worden gevormd. Het enzym DNA-polymerase maakt langs de enkelstrengs keten een complementaire DNA-keten, zodat het DNA dubbelstrengs wordt. Het DNA dat is ontstaan, noem je **complementair DNA** of **copyDNA** (**cDNA**) en bevat alleen het gewenste gen. cDNA kun je in een plasmide van een bacterie of in een virus inbrengen.

ANDERE TECHNIEKEN VAN GENETISCHE MODIFICATIE

Sommige ziekten worden veroorzaakt doordat in bepaalde organen genen tot expressie komen die coderen voor ziekteverwekkende eiwitten. In dat geval kan de expressie van zo'n gen worden uitgeschakeld (geninactivatie). Dat kan door het toevoegen van **antisense-DNA**. Hiervoor wordt een kopie gemaakt van het DNA met het gen dat de code bevat voor het ziekteverwekkende eiwit. De kopie is identiek aan het origineel, alleen liggen de stikstofbasen in beide strengen precies in de omgekeerde positie (van 3' naar 5' wordt van 5' naar 3'). Dit gekopieerde DNA wordt ingebracht in het orgaan dat de ziekteverwekkende eiwitten produceert. Zowel langs het originele gen als langs de kopie vindt transcriptie plaats. Het RNA dat langs beide genen ontstaat, is complementair. Als dit RNA op weg naar de ribosomen met elkaar in aanraking komt, ontstaat door basenparing dubbelstrengs RNA (zie afbeelding 68). Langs dit RNA kan geen translatie plaatsvinden. Het functionerende gen is dan in feite uitgeschakeld. Deze methode is vergelijkbaar met RNA-interferentie.

■ **Afb. 68** De werking van antisense-DNA.



1 transcriptie en translatie in een zieke cel

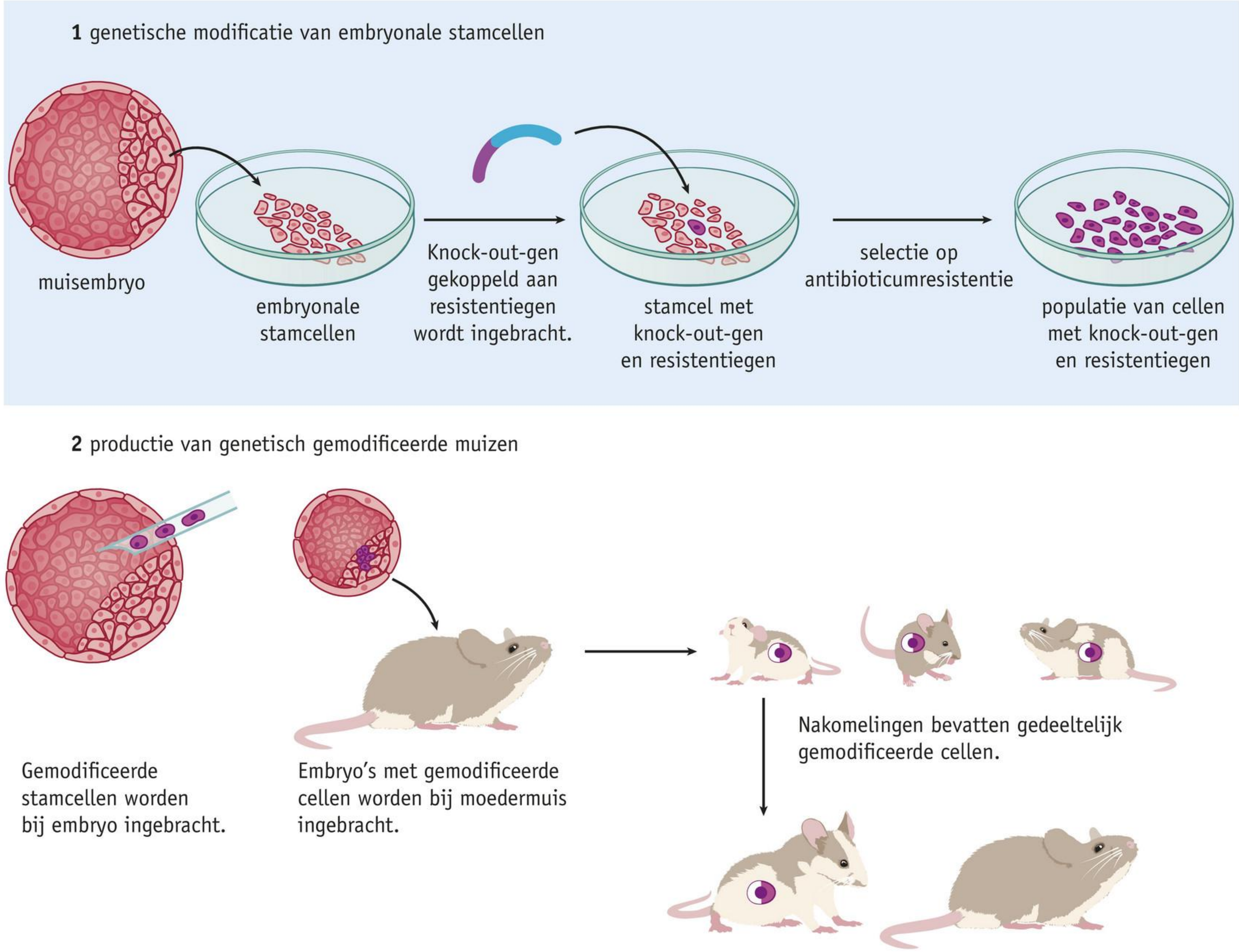
2 Na toediening van antisense-DNA vindt geen translatie plaats door vorming van dubbelstrengs RNA.

KNOCK-OUT-GENEN

Om te onderzoeken wat de functie van een gen is, kun je er een **knock-out-gen** van maken. Een knock-out-gen is een gen dat is uitgeschakeld door genetische modificatie.

Meestal wordt een knock-out-gen permanent uitgeschakeld. Hiervoor worden embryonale stamcellen gebruikt. Uit een volgroeid organisme van dezelfde soort wordt een gen gehaald waarvan wetenschappers de functie willen weten. Dit gen wordt uitgeschakeld door er een stukje tussenuit te knippen. Op de vrijgekomen plaats wordt een nieuw gen ingebouwd dat resistentie biedt tegen een bepaald antibioticum. Deze knock-out-genen breng je in bij een embryonale stamcel.

■ **Afb. 69** Genetische modificatie van muizen met knock-out-genen.



Door de cellen na deze behandeling over te brengen naar een petrischaal met een voedingsbodem met een antibioticum, overleven alleen de cellen die het knock-out-gen (met het resistentiegen) hebben ingebouwd (zie afbeelding 69.1). Deze stamcellen worden ingebracht in een embryo. Een gedeelte van de cellen van het embryo bevat dan het knock-out-gen. Het organisme dat wordt geboren, heeft cellen met het knock-out-gen en cellen met het originele gen. Door onderling kruisen van deze organismen ontstaan nakomelingen waarin alle genen knock-out-genen zijn (zie afbeelding 69.2). Wanneer deze organismen andere eigenschappen hebben dan normale organismen, dan moet dit zijn te wijten aan het knock-out-gen. Op deze manier wordt duidelijk wat de functie van het gen is. Door onderzoek met knock-out-genen (bijvoorbeeld bij muizen) kun je onder andere meer te weten komen over erfelijke ziekten en kanker.

Opdrachten KENNIS

84 Om een gen in het genoom van een ander organisme in te bouwen kun je met een virus cDNA van dit gen maken. Dit cDNA is meestal korter dan het oorspronkelijke gen. Hoe verklaar je dat?

85 Waarom wordt de nucleotidesequentie bij antisense-DNA omgekeerd ten opzichte van het ziekmakende gen?

86 Bij experimenten met knock-out-genen wordt vaak gebruikgemaakt van organismen die vrijwel genetisch identiek aan elkaar zijn, bijvoorbeeld door inteelt.

a Waarom is dat belangrijk voor onderzoek met knock-out-genen?

b Waarom produceert de moedermuis in afbeelding 69.2 nog geen nakomelingen die volledig bestaan uit genetisch gemodificeerde cellen?

Opdrachten INZICHT

87 Genetische modificatie kent inmiddels veel biotechnologische toepassingen in de geneeskunde, de industrie, de landbouw en de voedingsmiddelenindustrie en wordt ook gebruikt voor wetenschappelijk onderzoek.

a Zoek op internet vijf voorbeelden van genetische modificatie waardoor transgene micro-organismen stoffen voor mensen kunnen produceren.

b Geef van de voorbeelden die je op internet hebt gevonden aan of je het resultaat van de genetische modificatie zinvol vindt of niet. Onderbouw je antwoorden met argumenten.

88 Afbeelding 70 is een foto van een gloeivis. Deze genetisch gemodificeerde vissen hebben in hun DNA een gen dat afkomstig is van kwallen. Hierdoor maken zij een fluorescerend eiwit dat bij wit of ultraviolet licht ervoor zorgt dat de vis in een bepaalde kleur oplicht.

a Waarom kun je een gloeivis niet door klassieke veredeling maken?

b Waarom kan een gloeivis het DNA van de kwal net zo gemakkelijk lezen als het eigen DNA?

■ **Afb. 70** Een genetisch gemodificeerde gloeivis.

89 Het is mogelijk om met een recombinant-DNA-techniek cDNA te maken op basis van het pre-mRNA van een eukaryoot gen. Dit cDNA kun je vervolgens gebruiken voor het maken van een cisgeen organisme of een transgene prokaryoot.

a Waarom zou de transgene prokaryoot van dit cDNA waarschijnlijk geen goed eiwit kunnen maken?

b Waarom kan het voor een cisgeen organisme belangrijk zijn om pre-mRNA in plaats van mRNA te gebruiken voor het cDNA?

90 Rijst is een semi-aquatische plantensoort, maar blijkt bijna even gevoelig voor onderdompeling als veel landplantensoorten. Het Sub1-gen zorgt ervoor dat rijst langdurige overstromingen kan doorstaan. Dit gen komt voor in een rijstras met een lage opbrengst. Door genetische modificatie wordt het ingebracht in een commercieel rijstras.

a Beschrijf in drie stappen hoe je door genetische modificatie weefselkweken kunt verkrijgen waaruit rijstplanten groeien die langdurige overstromingen weerstaan.

b Waarom zou het met klassieke veredeling veel moeilijker zijn om de gewenste eigenschappen in hetzelfde ras te verkrijgen?

91 Bij een onderzoek bij muizen is een knock-out-gen gekoppeld aan het gen voor vachtkleur.

a Leg uit wat hiervan het voordeel is.

b Voor het maken van een knock-out-gen is meestal maar een kleine aanpassing aan het DNA nodig.
Geef een voorbeeld van een kleine aanpassing aan een gen die het uitschakelt.

c Knock-out-muizen kunnen een bijdrage leveren aan het onderzoek naar de oorzaak en behandeling van bepaalde vormen van kanker bij de mens.
Zijn muizen waarbij een tumorsuppressorgen is uitgeschakeld, geschikt voor een dergelijk onderzoek? Leg je antwoord uit.

Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf.*

Context Beroep

BIO-INFORMATICUS

Aan een toepassing zoals genetische modificatie gaat veel DNA-onderzoek vooraf. Dit levert vaak grote hoeveelheden data op die je alleen met behulp van een computer kunt bestuderen. De sequentie van één menselijk genoom bestaat uit zo'n drie miljard basen, genoeg om 150 dikke boeken mee te vullen. Een mens zou jaren nodig hebben om een specifieke mutatie in zo'n document te vinden, maar een computer kan dit in seconden. De tak van wetenschap die zich bezighoudt met het verwerken en analyseren van biologische data op computers is de bio-informatica. Bio-informatici maken en testen nieuwe applicaties voor onderzoek, programmeren code voor bijvoorbeeld data-analyse, beheren databases en visualiseren onderzoeksresultaten.

Het werk van een bio-informaticus begint meestal met het verwerken en bewerken van de ruwe data van een experiment, zoals de DNA-sequenties van een sequencingonderzoek. Soms zijn niet alle geproduceerde DNA-sequenties van de gewenste kwaliteit of zijn er per ongeluk DNA-sequenties van andere organismen aanwezig die moeten worden verwijderd. Na deze voorbereidende stappen kan de data worden geanalyseerd. Voorbeelden van analyses zijn het samenvoegen van korte DNA-sequenties tot complete genomen, het opsporen van mutaties of het maken van een stamboom. Er zijn veel verschillende methoden om deze analyses uit te voeren en de bio-informaticus bepaalt welke methode het meest geschikt is. Vaak programmeert een bio-informaticus ook zelf code in een programmeertaal zoals Python of R.

Als bio-informaticus zijn er veel plekken waar je kunt werken. Denk bijvoorbeeld aan een ziekenhuis, een forensisch instituut, een universiteit, bij de overheid, natuurorganisaties en voedingsproducenten.

■ **Afb. 71** Veel biologisch onderzoek maakt gebruik van bio-informatica.

Opdrachten

92 Loes doet een bio-informatisch onderzoek om te bepalen welke genen zijn betrokken bij droogtetolerantie van de plant *Arabidopsis thaliana* (de in Nederland veelvoorkomende zandraket). Voor dit onderzoek zijn meerdere planten genetisch gemodificeerd waarbij van verschillende genen voor transcriptiefactoren knock-out-genen zijn gemaakt. Per plant is één gen uitgeschakeld. Van deze planten worden onder andere de groeisnelheid en fotosyntheseactiviteit bij verschillende vochtigheidsgraden gemeten.

a Noem een aantal stappen van dit onderzoek waarvoor bio-informatische analyses nodig zijn.

b Van een plant met een knock-out-gen worden zaadjes getest op genexpressie. De data worden op de computer geanalyseerd. Waar bestaan de ruwe data uit?

c De verwachting is dat de expressie van meerdere genen zal afwijken tussen de verschillende gemodificeerde planten als gevolg van de knock-out-genen. Waarom wordt dat verwacht?

d Uit het experiment blijkt dat vijf genen de droogtetolerantie van *Arabidopsis thaliana* verhogen wanneer ze zijn uitgeschakeld. Nu wil Loes graag weten hoe deze genen de droogtetolerantie beïnvloeden. Hoe kunnen de genexpressiedata helpen om deze vraag te beantwoorden?

NOTITIES

EEN DESIGNERBABY MET CRISPR-CAS

LEERDOELEN

10.S.1 Je kunt het nut van recombinatie door CRISPR-Cas toelichten voor verschillende organisatieniveaus van de biologie.

10.S.2 Je kunt de biologische vakvaardigheden evolutionair en ecologisch denken toepassen op de genetische modificatie van prokaryoten en eukaryoten.

Erfelijke ziekten en kanker genezen, veroudering stoppen en misschien zelfs terugdraaien, een designerbaby ontwerpen (zie afbeelding 1) of uitgestorven diersoorten weer nabouwen? Dit alles is mogelijk door te sleutelen aan de software van organismen: het DNA.

Tot voor kort was het bewerken van genen (DNA-editing) ingewikkeld en inefficiënt. Dit is veranderd door een nieuwe techniek van genetische modificatie: CRISPR. CRISPR-Cas is een afweersysteem in sommige bacteriën die worden geïnfecteerd door bepaalde virussen: de bacteriofagen (letterlijk: bacterie-eters). Het CRISPR-Cas-afweersysteem kan het DNA van deze bacteriofagen tot in detail herkennen en vervolgens kapot knippen.

CRISPR is DNA dat bestaat uit korte herhalingen met daartussen stukjes DNA die dezelfde basenvolgorde hebben als het DNA van de bacteriofagen. Vóór het CRISPR liggen in het DNA van de bacterie genen die coderen voor het synthetiseren van zogeheten Cas-eiwitten, die in het DNA kunnen knippen. Wanneer DNA van een bacteriofaag de bacterie binnendringt, worden deze Cas-eiwitten gesynthetiseerd en wordt RNA langs het CRISPR-DNA gevormd. Een Cas-eiwit gebruikt dit RNA als gids en gaat ermee op zoek naar het complementaire DNA van de bacteriofaag. Wanneer er een match is, knipt het Cas-eiwit het virus-DNA kapot en stopt de infectie.

Wetenschappers ontdekten dat ze het CRISPR-systeem konden aanpassen zodat het ook werkt in cellen van dieren en planten. Door aanpassing van het gids-RNA kun je elke willekeurige basenvolgorde van DNA opsporen. Een Cas-eiwit maakt vervolgens op een specifieke plek in het DNA een knip in beide strengen. Hierna kun je op de plaats van het losgeknipte DNA doen wat je wilt. Je kunt het DNA door de cel laten repareren, extra DNA toevoegen, een stukje DNA veranderen of er juist een deel uitknippen.

Met deze revolutionaire techniek zijn de kosten van genetische modificatie met 99% gedaald. CRISPR-Cas werkt ook efficiënt; in plaats van een jaar duurt het maar een paar weken om experimenten uit te voeren. De mogelijkheden van CRISPR-Cas zijn zo ingrijpend, dat wetenschappers in veel landen zijn gestopt met het modificeren van menselijk DNA in embryo's. CRISPR-Cas kan de mensheid voor altijd veranderen en wetenschappers willen eerst dat de samenleving bepaalt wat de grenzen mogen zijn.

Toch zien veel mensen CRISPR-Cas wel zitten. Bij een Nederlandse enquête in 2016 zei 85% van de deelnemers dat ze hun DNA wel wilden laten aanpassen in het geval van een erfelijke ziekte. En 65% zou hun eigen kind voor de geboorte laten modificeren als daardoor een ziekte kan worden voorkomen.

■ **Afb. 1** Een designerbaby.

Opdrachten

1 Vul in de tabel de volgende begrippen in bij het juiste organisatieniveau.
Kies uit: *bacterie – Cas-eiwit – cellen van planten en dieren – mensheid – RNA – virus – wetenschapper.*

Organisatieniveau	Begrip
Systeem aarde	
Ecosysteem	
Populatie	
Organisme	
Orgaan	
Cel	
Molecuul	

2 Met CRISPR-Cas kun je een gen snel, goedkoop en nauwkeurig uitschakelen.

a Wat is voor een wetenschapper het doel van het uitschakelen van een gen?

b In prokaryoten gaat het virus-DNA kapot als een Cas-eiwit erin knipt.
In het DNA van mensen wordt zo'n breuk hersteld. Hoe kan dit?

c Hemofilie (bloederziekte) is een erfelijke ziekte waarbij bloedingen optreden door een tekort aan stollingsfactoren. Met CRISPR-Cas kan deze ziekte bij een patiënt in de toekomst worden genezen.
Leg uit dat de verandering in de genen door CRISPR-Cas niet wordt doorgegeven aan de nakomelingen van de patiënt.

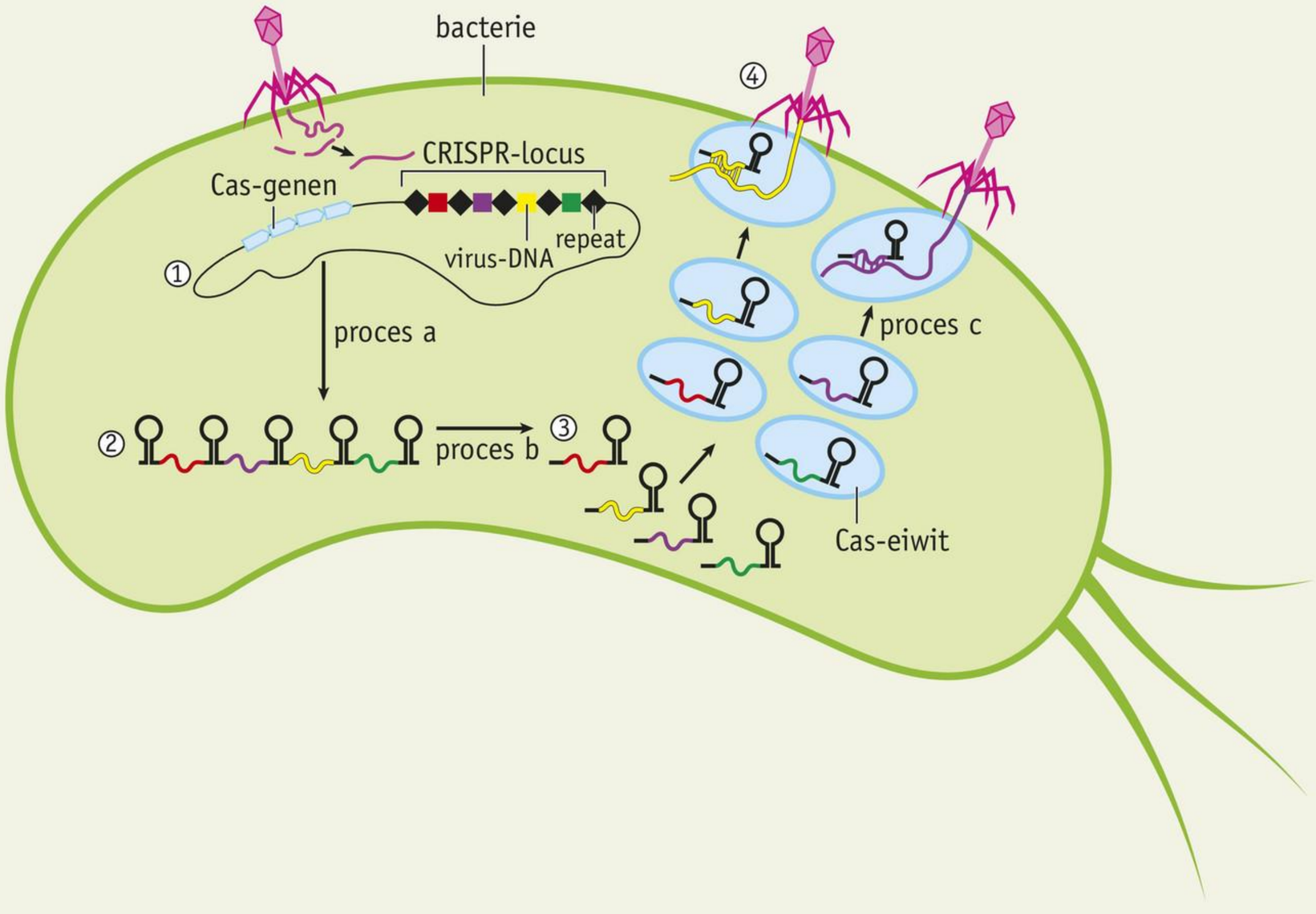
3 In afbeelding 2 is de werking van CRISPR-Cas in een bacterie samengevat.

a Benoem of beschrijf nummer 1 tot en met 4 en proces a, b, c.

b Wanneer een bepaalde soort bacteriofaag een prokaryoot voor het eerst infecteert, wordt het virale DNA toegevoegd aan het CRISPR-DNA.
Waarom gebeurt dat?

c Beschrijf in drie stappen wat er gebeurt als het DNA van een bacteriofaag niet kapot wordt geknipt door een Cas-eiwit.

■ **Afb. 2** De werking van CRISPR-Cas in een bacterie.



4 Veel mensen zijn bang dat door genetische modificatie een wereld wordt gecreëerd waarin alleen perfecte mensen worden getolereerd en er op kenmerken en kwaliteiten zal worden geselecteerd. Nu wordt dat ook al gedaan. Testen op genetische afwijkingen zoals het syndroom van Down zijn voor veel zwangere vrouwen standaard geworden. Het constateren van een genetisch defect kan leiden tot het einde van een zwangerschap.
Geef jouw mening over het voorselecteren van mensen op medische condities. Leg met een biologisch argument uit waarom je dit wel of niet verantwoord vindt.

Opdrachten INZICHT

6 Alihan zit in 5 vwo en verbruikt naar schatting 8800 kJ energie per dag.

a Een mol ATP weegt 507 gram. Zoek op in *BiNaS* tabel 67L hoeveel kilojoule energie een mol ATP in de cel maximaal oplevert bij omzetting in ADP + P_i.
Bereken met deze gegevens hoeveel kilogram ATP Alihan op een dag naar schatting omzet in ADP.

b Het rendement van ATP wordt omschreven als de verhouding tussen de geleverde arbeid (spierkracht) en de totale hoeveelheid energie die wordt omgezet. Hoe meer arbeid er wordt geleverd ten opzichte van de totale hoeveelheid omgezette energie, hoe hoger het rendement is.
Beredeneer of Alihan tijdens het sporten of in rust meer rendement heeft van de hoeveelheid ATP die wordt omgezet.

c Naast ATP als energiedrager zijn er ook andere dragermoleculen. Deze lijken veel op elkaar qua chemie (bouw) en functie.
Waarop kan deze chemische en functionele verwantschap van de dragermoleculen duiden?

7 **a** Welke energieomzettingen vinden achtereenvolgens plaats als zonne-energie wordt gebruikt voor de vorming van een eiwit in een plant?

b De energie van het zonlicht wordt eerst omgezet in glucose.
In welke drie organellen vinden deze energieomzettingen achtereenvolgens plaats?

8 Je zet twee potten met planten van dezelfde soort en met dezelfde hoeveelheid zaden weg. Bij de ene pot scarificeer je de zaden. Dit betekent dat je de zaadhuid van de zaden beschadigt. Bij de andere pot laat je de zaadhuiden intact.
Leg uit in welke pot als eerste fosforylering in de mitochondriën plaatsvindt.

■ **Afb. 5** Zaden die worden gescarificeerd, kunnen eerder ontkiemen.

NOTITIES

PRACTICA

Practicumopdracht 1

ONDERZOEKSDOEL

10.O.1 Je kunt een DNA-isolatie uitvoeren.

- Basisstof 2

DNA isoleren uit een tomaat

50 minuten

INLEIDING

Om de sequentie van DNA te kunnen bepalen, isoleer je eerst DNA uit cellen. In deze practicumopdracht onderzoek je hoe je DNA kunt isoleren uit de cellen van een tomaat.

MATERIAAL

- een tomaat
- NaCl (keukenzout)
- afwasmiddel
- warm water (50 °C)
- ijskoud ethanol
- theelepel
- twee bekerglazen van 200 mL
- aardappelschilmesje
- snijplank
- blender of staafmixer
- maatbeker
- pipet van 2 mL
- reageerbuis
- keukenpapier
- trechter
- lang satéstokje
- camera, mobiele telefoon of tablet
- roerstaafje

METHODE

- Snijd ongeveer een derde van de tomaat in kleine blokjes en doe die in de maatbeker.
- Maak in een bekerglas een oplossing van:
  - 1 theelepel zout
  - 45 mL water
- Giet deze oplossing bij de tomaatblokjes.
- Pureer de inhoud 10 tot 15 seconden met een blender of staafmixer.
- Voeg 5 mL afwasmiddel toe en roer rustig door deze oplossing zodat een homogeen mengsel ontstaat. Doe dit niet te hard, want er mag geen schuimvorming ontstaan (het ontstaan van bellen is niet erg). Laat dit 2 minuten staan zodat het kan bezinken.
- Vouw een filter van keukenpapier en plaats deze in de trechter. Filtreer de tomaatoplossing. Hierdoor verwijder je celfragmenten. Vang het filtraat op in het tweede bekerglas. Het filtraat bevat het DNA.
- Pipetteer 0,5 mL filtraat in een reageerbuis.
- Houd de reageerbuis schuin en schenk heel langzaam 1 mL ijskoud ethanol langs de kant.
- Draai de reageerbuis voorzichtig rond. Niet schudden! DNA lost moeilijk op in alcohol en zal daardoor samenklonteren. Het DNA is nu zichtbaar.
- Doop een lang satéstokje in de reageerbuis, met de punt tussen de alcohollaag en het tomaatfiltraat in. Haal het satéstokje weer omhoog. Het rode propje dat je nu omhoogtrekt, is DNA. De rode kleur wordt veroorzaakt door het tomatenpigment dat aan het DNA kleeft.
- Maak een foto van het DNA-propje.

1 Hoe maak je de celwanden van tomatencellen kapot?

2 Zout is onder andere nodig om de vrijgekomen eiwitten te laten samenklonteren. Waarvoor voeg je afwasmiddel toe?

RESULTAAT

Een foto van het DNA-propje.

SAMENVATTING

10.1.1 BASISSTOF 1

Je kunt de bouw en functie van DNA beschrijven.

- DNA bevat de genetische informatie voor de erfelijke eigenschappen van een levende cel.
- Genoom: het geheel aan genetische informatie in een cel van een organisme.
  - Bij eukaryoten: al het kern-DNA en het DNA in celorganellen: mitochondriaal DNA en chloroplast-DNA.
  - Bij prokaryoten: al het DNA dat los in het cytoplasma van de cel voorkomt: een circulaire DNA-streng en soms plasmide(n): kort stukje (vaak cirkelvormig) DNA.
- DNA is een nucleïnezuur en is opgebouwd uit nucleotiden (zie *BiNaS* tabel 71C).
  - Een nucleotide bestaat uit desoxyribose, een fosfaatgroep en een stikstofbase.
  - In DNA komen vier stikstofbasen voor: adenine (A), cytosine (C), guanine (G) en thymine (T) (zie *BiNaS* tabel 71A).
- Enkelstrengs DNA bestaat uit een streng van nucleotiden.
  - In een nucleotidestreng wisselen monosachariden en fosfaatgroepen elkaar af. De stikstofbasen steken er aan de zijkant uit.
  - De uiteinden van een nucleotidestreng worden aangegeven met 3’ en 5’.
    Aan het 3’-uiteinde bevindt zich een OH-groep aan het derde C-atoom van desoxyribose.
    Aan het 5’-uiteinde bevindt zich een fosfaatgroep aan het vijfde C-atoom van desoxyribose.
- Een DNA-molecuul bestaat uit twee nucleotidestrengen, die in een helixstructuur (dubbele spiraal) om elkaar heen gewonden liggen (zie *BiNaS* tabel 71C).
  - De stikstofbasen in dubbelstrengs DNA vormen vaste basenparen (zie *BiNaS* tabel 71B):
    - adenine (A) met thymine (T);
    - cytosine (C) met guanine (G).
- Bij eukaryoten bestaat een chromosoom uit één dubbelstrengs DNA-molecuul met histonen (eiwitten).
  - Dubbelstrengs DNA is rond histonen gewikkeld.
  - Een aantal histonen met DNA vormt een nucleosoom.
- Sequentie: de volgorde waarin stikstofbasen in een DNA-molecuul zijn gerangschikt.
- Gen: een deel van een DNA-molecuul dat codeert voor een of meer eiwitten of een gedeelte van een eiwit.
- Niet-coderend DNA: grote delen van het DNA coderen niet voor eiwitten. Een deel daarvan:
  - reguleert de activiteit van genen of de productie van eiwitten, of heeft een beschermende functie;
  - bestaat uit herhalingen van korte nucleotidesequenties;
  - bestaat uit genen die hun functie hebben verloren.

10.2.1 BASISSTOF 2

Je kunt uitleggen hoe DNA-replicatie plaatsvindt.

- DNA-replicatie vindt plaats in de S-fase van de celcyclus.
  - DNA-replicatie begint bij replicatiestartpunten. Het enzym helicase verbreekt de waterstofbruggen tussen de basenparen, waardoor een replicatiebel ontstaat.
  - Primer: een kort stukje van het nucleïnezuur RNA dat complementair is aan een deel van de DNA-sequentie.
  - DNA-polymerase: enzym dat vanaf een primer langs een enkelstrengs DNA-keten schuift en vrije DNA-nucleotiden uit het kernplasma met waterstofbruggen aan het 3’-uiteinde van een al ingebouwde nucleotide bindt.
  - Aan elke originele nucleotideketen ontstaat een nieuwe complementaire nucleotideketen.
- DNA-replicatie vindt langs beide strengen plaats in de richting van het 3’-uiteinde naar het 5’-uiteinde (afleesrichting) (zie *BiNaS* tabel 71D).
  - Langs de leidende streng (leading streng) volgt DNA-polymerase het uiteenwijken van de strengen.
  - Langs de volgende streng (lagging streng) vindt replicatie in de omgekeerde richting plaats. Hierbij ontstaan korte okazaki-fragmenten die door DNA-ligase aan elkaar worden geplakt.

- DNA-polymerase kan het einde van de volgende streng niet repliceren doordat er geen 3'-uiteinde beschikbaar is. Hierdoor wordt het DNA-molecuul bij elke celdeling korter.
- Telomeren: niet-coderend, repetitief DNA aan de uiteinden van een DNA-molecuul dat is ingekapseld in beschermende eiwitten en moet voorkomen dat de genen in het DNA worden beschadigd.
  - Bij elke celdeling wordt een telomeer korter.
  - Bij de mens kan een cel zich na ongeveer vijftig celdelingen niet meer delen en ondergaat dan apoptose (geprogrammeerde celdood).
  - De levensduur van de cellen van een organisme hangt af van de lengte van de telomeren en de snelheid waarmee ze korter worden.

10.2.2

Je kunt uitleggen hoe de basenvolgorde van DNA kan worden bepaald.

- Met PCR, gelelektroforese en sequencen kan de basenvolgorde van DNA worden bepaald.
  - PCR (*polymerase chain reaction*): het kopiëren van een of meer specifieke gedeelten uit het DNA in een PCR-machine (zie *BiNaS* tabel 71M3).
  - Gelelektroforese: het scheiden van DNA-fragmenten op grond van hun grootte.
  - Sequencen: een speciale PCR-techniek waarmee je de basenvolgorde van een stukje DNA kunt bepalen.

10.2.3

Je kunt uitleggen hoe DNA-analyse kan worden toegepast om verwantschap tussen organismen vast te stellen.

- Hoe nauwer verwant twee organismen zijn, hoe meer overeenkomsten hun DNA vertoont.
- Een DNA-fingerprint is het unieke DNA-profiel van een individu.
  - Repetitief DNA: herhalingen van korte DNA-sequenties. Het aantal herhalingen verschilt per persoon.
  - Met restrictie-enzymen worden de loci met herhalingen uit het DNA geknipt. Hoe groter het aantal herhalingen, hoe groter het DNA-fragment dat ontstaat.
  - De DNA-fragmenten worden gescheiden door gelelektroforese. Er ontstaat een uniek bandenpatroon.

10.3.1 BASISSTOF 3

Je kunt beschrijven hoe transcriptie plaatsvindt.

- Bij transcriptie wordt langs een deel van een nucleotideketen van een DNA-molecuul (een gen) een RNA-molecuul gevormd door het enzym RNA-polymerase (zie *BiNaS* tabel 71E).
  - RNA is een nucleïnezuur dat bestaat uit een enkele streng nucleotiden. RNA bevat ribose in plaats van desoxyribose en uracil (U) in plaats van thymine (T).
- Transcriptie:
  - RNA-polymerase bindt aan een promotor (een specifieke volgorde van stikstofbasen).
  - Template- of matrijsstreng: de nucleotideketen waarlangs het mRNA ontstaat.
  - Coderende streng: de nucleotideketen die niet wordt gebruikt. Deze heeft dezelfde nucleotidevolgorde als het RNA dat ontstaat.
  - Transcriptiefactoren: eiwitten die nodig zijn om RNA-polymerase te laten binden aan de promotor.
  - Vanaf de promotor worden de waterstofbruggen in het DNA-molecuul tussen beide nucleotideketens verbroken in de richting van het 3'-uiteinde naar het 5'-uiteinde.
  - Er ontstaat een RNA-keten in de 5'→3'-richting langs de DNA-keten.
  - De transcriptie stopt wanneer een specifieke volgorde van stikstofbasen wordt bereikt.
- Verschillende typen RNA spelen een rol bij de eiwitsynthese in een cel:
  - Messenger-RNA (mRNA) brengt informatie van het DNA voor het coderen van eiwitten naar de ribosomen.
  - Ribosomaal RNA (rRNA) is een bestanddeel van ribosomen.
  - Transfer-RNA (tRNA) bindt een aminozuur uit het cytoplasma en vervoert dat naar een ribosoom.
- Bij eukaryoten wordt het mRNA van de kern naar de ribosomen in het cytoplasma vervoerd.
  - Bij prokaryoten bevindt het DNA zich in het cytoplasma.
- RNA-processing (zie *BiNaS* tabel 71H):
  - Een gen in het DNA van eukaryoten bestaat uit introns en exons.
  - Het pre-mRNA bevat ook introns en exons.
  - Splicing: introns worden uit het pre-mRNA geknipt en de exons worden aan elkaar gekoppeld. Hierdoor ontstaat mRNA dat de informatie bevat voor de synthese van een eiwit.
  - Doordat er verschillende mogelijkheden zijn voor splicing, kunnen er uit één pre-mRNA-molecuul verschillende mRNA-moleculen worden gevormd (alternatieve splicing).

10.4.1 BASISSTOF 4

Je kunt beschrijven hoe translatie plaatsvindt.

- Erfelijke eigenschappen komen tot uiting in het fenotype door de aanwezigheid van bepaalde eiwitten.
- Genetische code: de volgorde van nucleotiden in een mRNA-molecuul bepaalt (codeert) welke aminozuren in een eiwitmolecuul worden ingebouwd.
  - Een codon (triplet) bestaat uit drie opeenvolgende nucleotiden in mRNA die coderen voor een bepaald aminozuur (tripletcode).
  - Er zijn 64 verschillende codons, waaronder één startcodon (AUG) en drie stopcodons (zie *BiNaS* tabel 71G).
  - Stopcodons coderen niet voor een aminozuur, maar signaleren het eindpunt van translatie.
- Het cytoplasma bevat tRNA-moleculen (zie *BiNaS* tabel 71K) die aminozuren uit het cytoplasma binden.
  - Drie nucleotiden op een van de lussen van het tRNA-molecuul vormen een anticodon dat kan binden aan de stikstofbasen van een complementair codon van een mRNA-molecuul.
- Translatie: in ribosomen wordt aan de hand van de codons in mRNA een eiwit gevormd.

10.4.2

Je kunt beschrijven hoe eiwitsynthese plaatsvindt.

- Eiwitsynthese: een ribosoom en een tRNA-methioninecomplex binden aan het startcodon.
  - Een tRNA-aminozuurcomplex passeert in een ribosoom achtereenvolgens de A-, P- en E-plaats. Op de A- en P-plaats wordt de aminozuurketen gevormd, op de E-plaats verlaat het tRNA zonder aminozuur het ribosoom.
- Eiwitten die in ribosomen zijn ontstaan, worden verder bewerkt.
  - Bewerking kan in het celplasma, het endoplasmatisch reticulum of het golgisysteem plaatsvinden.
  - Sommige eiwitten worden pas functioneel als ze buiten de cel zijn afgescheiden.

10.5.1 BASISSTOF 5

Je kunt verschillende manieren van genregulatie bij prokaryoten beschrijven.

- Genregulatie is het aan- of uitzetten van een gen.
- Genexpressie: wanneer een gen aanstaat, kan door transcriptie mRNA ontstaan en door translatie een eiwit.
- Operon: deel van het DNA bij prokaryoten dat alle genen bevat die de vorming van een eiwit reguleren.
  - Structuurgenen: bevatten informatie voor het vormen van RNA of eiwitmoleculen.
  - Promotor: de plaats waar RNA-polymerase kan starten met de transcriptie langs de structuurgenen.
  - Operator: sequentie tussen de promotor en de bijbehorende structuurgenen. Een repressor kan een binding aangaan met een operator, waardoor RNA-polymerase niet kan binden.
  - Regulatorgenen: zorgen voor de synthese van repressors. Repressors kunnen actief of inactief zijn.

10.5.2

Je kunt verschillende manieren van genregulatie bij eukaryoten beschrijven.

- Stamcellen: zijn nog niet (volledig) gespecialiseerd en kunnen zich onbeperkt delen.
  - Embryonale stamcellen van de eerste generaties differentiëren tot elk celtype.
  - Embryonale stamcellen van latere generaties en niet-embryonale stamcellen differentiëren tot een beperkt aantal celtypen.
- Genregulatie tijdens de embryonale ontwikkeling bij eukaryoten:
  - Regulatorgenen coderen in eukaryoten voor transcriptiefactoren.
  - De omgeving van een cel bepaalt de celdifferentiatie (welk type cel ontstaat).
- Bij stamcelonderzoek worden de medische toepassingen van stamcellen onderzocht.
  - Een voorbeeld van een medische toepassing van stamcellen is stamceltransplantatie, waarbij (donor-)stamcellen worden gebruikt om beschadigd weefsel te herstellen.
- Apoptose is het proces waarin een cel zichzelf doodt.
  - In de cel ontstaan enzymen die de cel zelf afbreken.

- Genregulatie bij volwassen eukaryoten:
  - Activator: bindt aan een specifieke sequentie in het DNA, waardoor het DNA buigt en andere transcriptiefactoren en RNA-polymerase kunnen binden aan de promotor.
  - Repressors: blokkeren de transcriptie door te binden aan een bepaalde sequentie in het DNA.
  - Doordat DNA in nucleosomen steviger kan binden of door DNA-methylering compact kan worden gemaakt, wordt genexpressie geblokkeerd. Het gen staat uit.
  - Bij RNA-interferentie (RNAi) bindt een micro-RNA (miRNA) complementair met een mRNA-molecuul. Hierdoor wordt translatie van het mRNA geblokkeerd en/of het mRNA wordt afgebroken.

10.5.3

Je kunt uitleggen hoe genregulatie het functioneren van een organisme beïnvloedt.

- Door genregulatie en genexpressie:
  - kunnen uit stamcellen verschillende gespecialiseerde cellen, weefsels en organen ontstaan;
  - kunnen cellen verschillende eiwitten produceren op het moment dat de cel ze nodig heeft, afhankelijk van de functie van de cel en van de omstandigheden.
- Epigenetica is de wetenschap die zich bezighoudt met het bestuderen van omkeerbare veranderingen in de activiteit van genen, die niet het gevolg zijn van veranderingen in de nucleotidevolgorde van het DNA.
  - Voorbeelden van epigenetische eigenschappen zijn DNA-methylering en RNAi.
  - Epigenetische eigenschappen kunnen worden doorgegeven aan het nageslacht.

10.6.1 BASISSTOF 6

Je kunt de verschillende vormen en gevolgen van mutaties beschrijven.

- Mutatie: een verandering in de nucleotidevolgorde van het DNA of RNA van een cel.
- Puntmutatie: een verandering in één nucleotidepaar.
  - Substitutie: een of meer nucleotideparen in het chromosoom worden vervangen.
  - Deletie: een of meer nucleotideparen worden uit het chromosoom verwijderd.
  - Insertie: een of meer nucleotideparen worden aan het chromosoom toegevoegd.
- Bij een leesraamverschuiving (*frame shift mutation*) verschuiven de codons door een insertie of deletie.
- Genoommutatie: het aantal chromosomen in een cel is veranderd.
  - Als bij mitose of meiose een genoommutatie optreedt, heeft een van de dochtercellen één chromosoom te veel en de andere dochtercel één te weinig.
- De frequentie waarmee mutaties plaatsvinden, wordt verhoogd door mutagene factoren:
  - mutagene straling (bijv. radioactieve straling, röntgenstraling, ultraviolette straling);
  - mutagene stoffen (bijv. stoffen in sigarettenrook, alcohol);
  - virussen.
- Het aantal mutaties in een cel blijft beperkt door het DNA-repairsysteem: enzymen in een celkern die continu beschadigingen in het DNA opsporen en repareren.
  - Een tumorsuppressorgen produceert eiwitten die de celcyclus stilleggen voor herstel van het DNA of voor apoptose wanneer een cel te veel of onherstelbare DNA-schade heeft.
- Mutaties kunnen neutraal, positief of negatief zijn voor het organisme.
  - Neutrale mutaties veranderen het genotype, maar hebben geen invloed op het fenotype.
  - Mutaties kunnen een grote uitwerking hebben als ze optreden tijdens het ontstaan van geslachtscellen of in cellen van een embryo.
- Mutaties in een tumorsuppressorgen en in een proto-oncogen kunnen leiden tot kanker.
  - Proto-oncogenen coderen voor eiwitten die de celgroei en de celdifferentiatie stimuleren.
  - Door een mutatie kan een proto-oncogen veranderen in een oncogen waardoor de cel abnormaal snel groeit en deelt.
  - Een tumor bestaat uit cellen die zich ongecontroleerd delen.
  - Een goedaardige tumor verstoort het omliggende weefsel niet.
  - Een kwaadaardige tumor verstoort omliggend weefsel en deelt zich sneller dan een goedaardige tumor. Ook kunnen cellen van een kwaadaardige tumor loslaten en uitzaaien naar andere plekken in het lichaam (metastase).

10.7.1 BASISSTOF 7

Je kunt verschillende technieken en toepassingen van biotechnologie beschrijven.

- Biotechnologie: een verzamelnaam voor technieken waarbij organismen worden gebruikt om producten voor de mens te maken.
- De productie en opbrengst worden verhoogd en goedkoper door gunstige eigenschappen te combineren in één individu door kruisingen en selectie.
- Genetische modificatie is het veranderen van het DNA van een organisme.
  - Ggo's zijn genetisch gemodificeerde organismen.
- Recombinant-DNA-techniek is het DNA wijzigen door DNA in te brengen dat afkomstig is van een ander organisme.
  - Een cisgeen organisme is genetisch gemodificeerd met DNA dat afkomstig is van een organisme van dezelfde soort.
  - Een transgeen organisme is genetisch gemodificeerd met DNA dat afkomstig is van een organisme van een andere soort.
  - Recombinant-DNA kan worden ingebracht door middel van een plasmide of virus.
- Complementair DNA of copyDNA (cDNA):
  - Reverse-transcriptase: enzym dat DNA vormt langs een mRNA-molecuul. Het DNA-fragment bevat alleen het gen voor de synthese van een eiwit. Met DNA-polymerase wordt een complementaire DNA-keten gevormd. Dit cDNA kan worden ingebouwd in een plasmide of virus.
- Antisense-DNA: een kopie van een gen, maar dan met de stikstofbasen in de omgekeerde positie.
  - Het mRNA dat door transcriptie langs antisense-DNA wordt gevormd, vormt dubbelstrengs RNA met het mRNA van het oorspronkelijke gen. Er kan dan geen translatie plaatsvinden.
- Knock-out-gen: een gen uitschakelen om te onderzoeken wat de functie ervan is.

SAMENHANG

10.S.1 **Je kunt het nut van recombinatie door CRISPR-Cas toelichten voor verschillende organisatieniveaus van de biologie.**

10.S.2 **Je kunt de biologische vakvaardigheden evolutionair en ecologisch denken toepassen op de genetische modificatie van prokaryoten en eukaryoten.**

ONDERZOEK - PRACTICA

10.O.1 **Je kunt een DNA-isolatie uitvoeren.**

Ga naar de *Flitskaarten* en de *Oefentoets.*

NOTITIES

EXAMENOPGAVEN

GEVAARLIJK AFSLANKMIDDEL

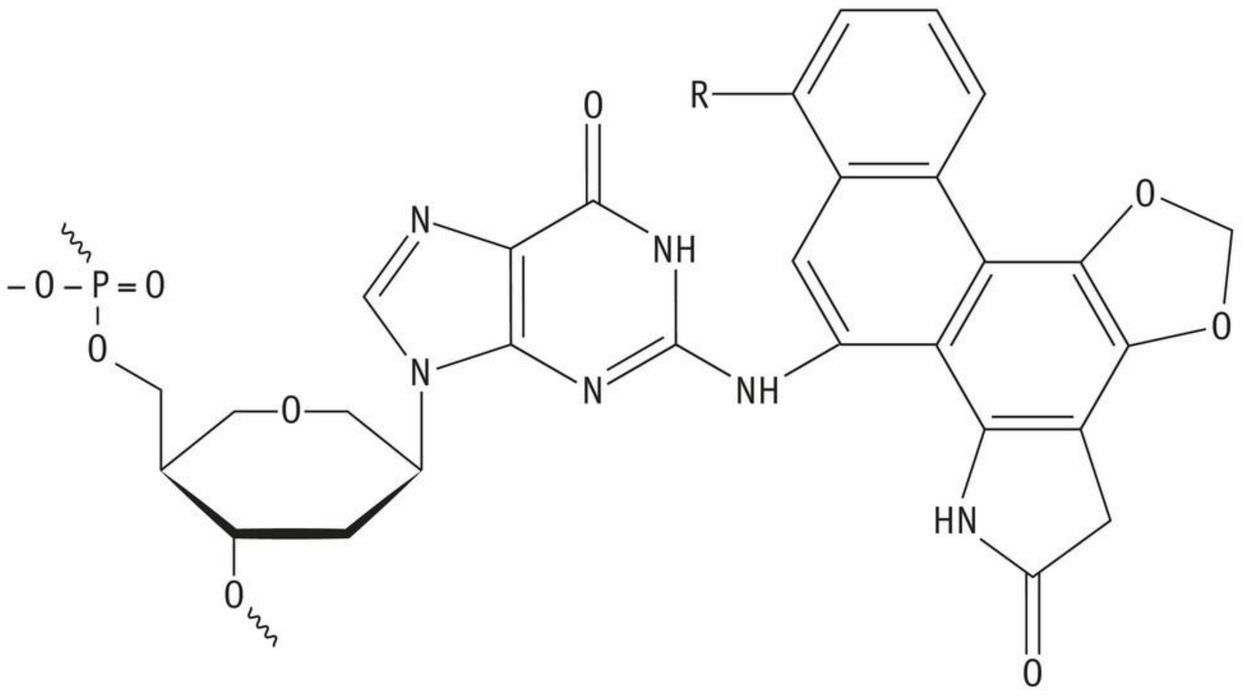
Naar: examen vwo 2022-1, vraag 5 t/m 8.

In tegenstelling tot wat veel mensen denken, zijn natuurgeneesmiddelen niet altijd veilig.

Ruim honderd Belgische vrouwen die in de jaren 90 een bepaald afslankmiddel op basis van kruiden hadden gebruikt, ontwikkelden ernstig nierfalen en tumoren. De oorzaak was aristolochiazuur, afkomstig van de *Aristolochia*-plant, dat in het middel was verwerkt.
Aristolochiazuur wordt door cellen van de nier, maar ook door levercellen, omgezet in de stof aristolactam, dat bindt aan bepaalde basen van het DNA. Zo'n stof die is gebonden aan het DNA wordt een DNA-adduct genoemd. Op de plaats van zo'n adduct kan bij replicatie een verkeerde base worden ingebouwd in de nieuwe DNA-streng.

In afbeelding 1 is een DNA-nucleotide afgebeeld met daaraan gebonden een DNA-adduct dat ontstaat door gebruik van aristolochiazuur.

■ **Afb. 1** DNA-nucleotide met gebonden DNA-adduct.



1p **1** Noteer de naam van de stikstofbase waaraan dit adduct is gebonden.

Wanneer DNA-adducten aan basen van proto-oncogenen of tumorsuppressorgenen binden, kan kanker ontstaan. Een van de genen die werd onderzocht bij de Belgische vrouwen is het TP53-gen, dat codeert voor tumorsuppressoreiwit p53. Dit eiwit is betrokken bij de controle van het DNA tijdens de celcyclus. Indien er grote schade aan het DNA ontstaat, zet p53 aan tot apoptose.

2p **2** Leg uit dat het risico op kanker sterk toeneemt in een cellijn waarin het TP53-gen defect is.

9 Er zijn verschillende vormen van suikers (sachariden). Ze verschillen in energiewaarde en in GI-index (zie tabel 1). GI-index betekent glycemische index. Het is een maat om aan te geven hoe snel een suiker wordt opgenomen. Een hogere waarde betekent een snellere opname.

a Fructose wordt eerst omgezet (in onder andere glucose) voordat het lichaam het gebruikt.
Is de GI-index van fructose hoger of lager dan 100?

b Sacharose heeft bijna dezelfde energiewaarde als glucose en fructose. Leg uit waarom. Gebruik hierbij *BiNaS* tabel 67F.

c Diabetespatiënten kunnen minder of geen glucose uit het bloed opnemen. Moeten mensen met diabetes voedingsmiddelen eten met een lage of hoge GI-waarde?

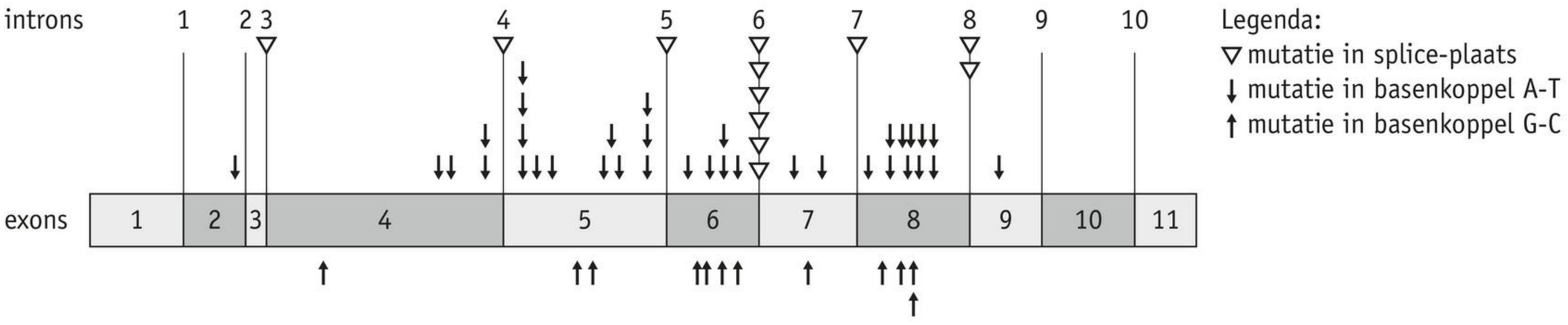
Tabel 1 Energiewaarde en GI-index suikers.

Suiker	GI-index	Energiewaarde (kJ/100gr)
Glucose (druivensuiker)	100	1683
Fructose	?	1716
Sacharose	65	1675

Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf.*

Het TP53-gen omvat 11 exons en 10 introns. Afbeelding 2 geeft de locaties weer van alle mutaties die zijn gevonden in het TP53-gen in niertumoren van 42 patiënten die kruidenpreparaten met *Aristolochia* hebben gebruikt. Er werden 47 mutaties gevonden in de exons, vooral in basenkoppel A-T, maar ook in het koppel G-C. Deze mutaties zijn weergegeven met gesloten pijlen. De plaats van de introns is in de afbeelding alleen met een nummer aangegeven, met daarbij als driehoekjes de 12 mutaties die werden gevonden in de splice-plaatsen van introns. Splice-plaatsen markeren het begin en eind van een intron. Mutaties binnen de introns zelf zijn niet onderzocht.

■ **Afb. 2** Mutaties van het TP53-gen in niertumoren van 42 patienten.



2p **3** • Verklaar waarom mutaties binnen de introns zelf niet zijn onderzocht.
• Verklaar waarom mutaties op de splice-plaatsen van de introns wel zijn onderzocht.

Over de resultaten in afbeelding 2 worden drie beweringen gedaan:
1 De mutaties in de exons zijn allemaal puntmutaties.
2 De mutaties in de exons zijn allemaal het gevolg van aristolochiazuur.
3 De introns zijn korter dan de exons.

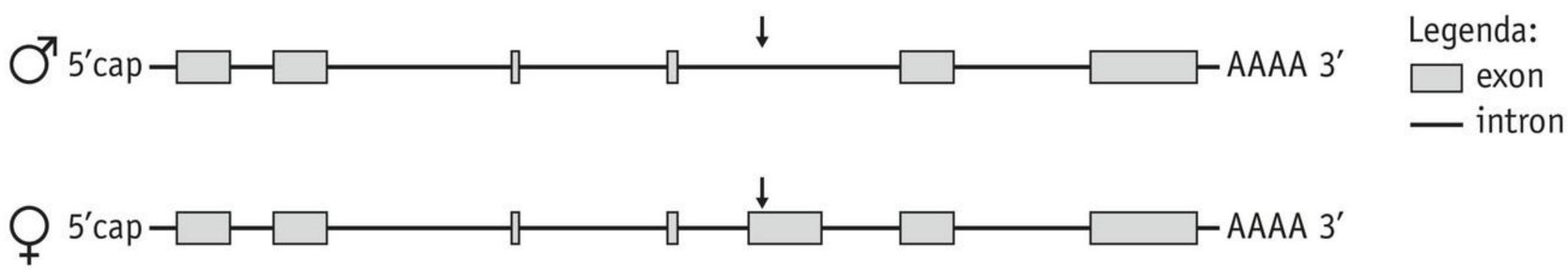
2p **4** Schrijf de nummers 1, 2 en 3 onder elkaar en noteer erachter of de betreffende bewering wel of niet kan worden afgeleid uit afbeelding 2.

GENETISCHE STERILISATIE VOOR MALARIABESTRIJDING

Bron: examen vwo 2022-2, vraag 35, 36 en 37.

Wetenschappers van het Imperial College in Londen wilden met behulp van genetische modificatie vrouwtjesmuggen (*Anopheles gambiae*) onvruchtbaar maken door het DSX-gen uit te schakelen. Het autosomale DSX-gen bepaalt samen met de geslachtschromosomen het geslacht bij malariamuggen.
De wetenschappers construeerden een genconstruct en brachten dit in bij muggenembryo's in het DSX-gen. In afbeelding 3 is het pre-mRNA van het DSX-gen bij mannetjes en bij vrouwtjes weergegeven. Met een pijl is de plaats aangegeven waar het genconstruct is ingebracht.

■ **Afb. 3** Pre-mRNA van DSX-gen bij mannetjes- en vrouwtjesmuggen (schematisch).



Het DSX-gen bepaalt de geslachtelijke ontwikkeling van de mug tot mannetje of tot vrouwtje. Het DSX-eiwit bij mannetjes is anders dan het DSX-eiwit bij vrouwtjes.

1p **5** Waardoor ontstaat het verschil tussen het DSX-eiwit bij mannetjes en vrouwtjes?

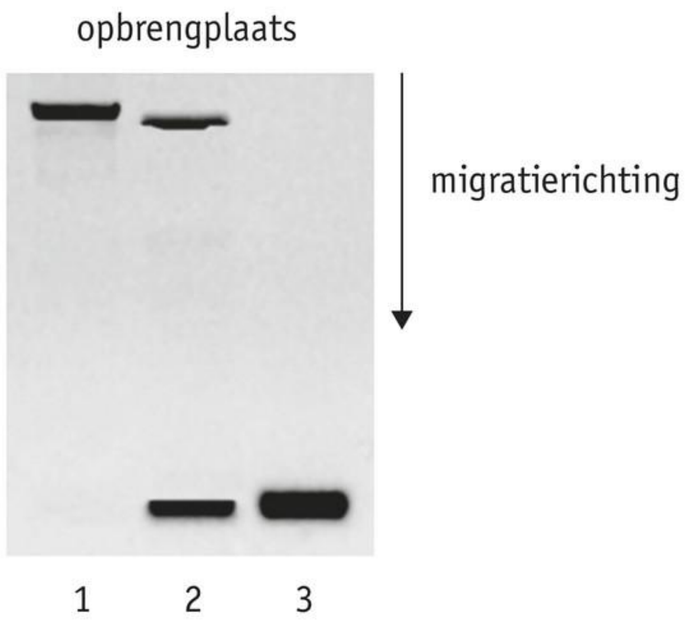
A door een verschil in promotor
B door een verschil in splicing
C door een verschil in transcriptiefactoren

Het ingebouwde genconstruct bevat onder andere het GFP-gen. Dit codeert voor een eiwit (*green fluorescent protein*) dat in uv-licht groen oplicht.

1p **6** Verklaar waarom de onderzoekers een GFP-gen in het construct hebben ingebouwd.

Toen de gemodificeerde muggen volwassen waren, werden ze onderling gekruist om homozygote en heterozygote nakomelingen te verkrijgen. De vrouwtjes die homozygoot waren voor het gemodificeerde DSX-gen hadden veranderde monddelen en geslachtsdelen zodat zij niet meer konden steken en geen eitjes meer konden leggen. De heterozygote vrouwtjes waren nog wel vruchtbaar. Van de nakomelingen werd het genotype voor dit gen vastgesteld met behulp van gelelektroforese. Hiervoor werd een stuk DNA van het DSX-gen gebruikt waarbinnen de insertieplaats van het genconstruct ligt. Voorafgaand aan de gelelektroforese werd dit stuk DNA vermeerderd. Bij gelelektroforese migreren kleine fragmenten sneller door een gel dan grote. In afbeelding 4 is het resultaat van de gelelektroforese weergegeven.

■ **Afb. 4** Resultaat van de gelelektroforese.



In afbeelding 4 zijn DNA-monsters van drie vrouwtjes aangegeven met de nummers 1, 2 en 3.

1p **7** Noteer het nummer van het monster dat DNA van een onvruchtbaar vrouwtje bevat.

ANTIVRIESGEN

Bron: examen vwo 2021-3, vraag 13.

Antivrieseiwitten (AFGP's, van 'antifreeze glycoprotein') komen veel voor in poolvissen. AFGP's worden gemaakt door de alvleesklier en worden afgegeven aan de darminhoud, waarna het ongebruikte deel van deze AFGP's vanuit de darm wordt opgenomen in het bloed. Biologen vermoeden dat het gen voor het antivrieseiwit stapsgewijs is ontstaan uit het trypsinogeen-gen. Een kopie van het trypsinogeen-gen heeft eerst een aantal exonen verloren en vervolgens zijn de basen die coderen voor het aminozuurstukje Thr-Ala-Ala vele malen ingevoegd. Door deze veranderingen is in het nieuw gevormde AFGP-gen op een nieuwe plek een stopcodon ontstaan.

Een klein deel van de coderende streng van het AFGP-gen met daarin het stopcodon is weergegeven in afbeelding 5. Daaronder is het homologe (overeenkomstige) deel van het trypsinogeen-gen afgebeeld.

■ **Afb. 5** Deel van de coderende streng van het AFGP-gen en het homologe deel van het trypsinogeen-gen (schematisch).

AFGP-gen: 5'-....GGTGACACTGGCAGCCCTCTGGTGT....-3'

trypsinogeen-gen: 5'-....GGTGACTCCGGCAGCCCTCTGGTGT....-3'

2p **8** Noteer de drie nucleotiden die coderen voor het stopcodon in het AFGP-gen en verklaar dat diezelfde drie nucleotiden in het trypsinogeen-gen geen stopcodon zijn.

MAMBAGIF ALS PIJNSTILLER

Naar: examen vwo 2019-I, vraag 15.

De zwarte mamba (*Dendroaspis polylepis*) is de giftigste slang van Afrika. In het gif van de mamba zit het slangengifeiwit mambalgine, dat pijn bij muizen onderdrukt. Als mambalgine een nieuw medicijn bij pijnbestrijding wordt, is het nodig om het grootschalig te produceren. Dit kan door het mambalgine-gen in te brengen in het genoom van een bacterie. Vervolgens zou deze bacterie onder gecontroleerde omstandigheden mambalgine kunnen produceren. Het DNA dat daartoe moet worden ingebouwd is een genconstruct dat onder andere cDNA (copy-DNA) van het mambalgine-gen omvat.

Voor het maken van het recombinant-DNA zijn levende cellen uit de gifklier van een slang nodig.

1p **9** Waardoor zijn alleen cellen uit de gifklier bruikbaar?

Ga naar de *Examentrainer*.

NOTITIES

Thema 11

PLANTEN

Planten spelen een belangrijke rol in je leven. Ze zijn onmisbaar voor de voedselproductie, vormen een grote bron van duurzame energie en worden gebruikt als grondstof voor diverse producten. Dit thema gaat over de bouw van planten, over hoe ze functioneren en zich voortplanten, en over hoe ze communiceren met hun omgeving.

Inhoud

ORIËNTATIE

Zijn planten intelligent? 166
Voorkennistoets
Voorkennisfilmpje

BASISSTOF

1 Bouw, groei en ontwikkeling 168
2 Transport in planten 177
3 Stofwisseling 188
4 Voortplanting 197
5 Reageren op de omgeving 206

SAMENHANG

Acacia 214

EXTRA STOF

Dubbele bevruchting bij zaadplanten
Het tropische regenwoud

ONDERZOEK

Practica 216

AFSLUITING

Samenvatting 221
Examenopgaven 224

ZIJN PLANTEN INTELLIGENT?

De wereld van de planten is minstens zo bijzonder als die van de dieren. De meeste planten hebben wortels, dus kunnen ze niet weglopen voor gevaar. Wel bezitten ze zintuigen waarmee ze hun omgeving in de gaten houden, waarna ze kunnen reageren op veranderingen in hun omgeving.

Zonder planten zou het voor mensen en dieren onmogelijk zijn om op aarde te leven. Planten leveren bijvoorbeeld organische stoffen (voedsel), zuurstof, bouwmaterialen (nestmateriaal, hout, riet), kleding (linnen) en medicijnen. Ze zuiveren de lucht, zorgen voor een schone bodem en schoon water en verlagen de omgevingstemperatuur.

Planten kunnen zich verweren tegen ziekteverwekkers en herbivoren. Bijvoorbeeld door stoffen aan te maken die bacteriën of schimmels doden. Of door gifstoffen of smaakstoffen aan te maken die voorkomen dat ze worden aangevreten. Via signaalstoffen en elektrische signalen kunnen planten intern en onderling communiceren, bijvoorbeeld elkaar waarschuwen voor vraat.

Signaalstoffen gebruiken ze ook om insecten te lokken voor bestuiving, zodat een plant zich geslachtelijk kan voortplanten. Een samenwerking met micro-organismen aangaan gaat ook via signaalstoffen. In ruil voor sachariden maken sommige schimmels anorganische stoffen uit de bodem opneembaar voor de wortels van planten.

■ **Afb. 1** Kruidje-roer-me-niet.

Planten reageren dus op hun omgeving. Volgens sommige wetenschappers vertonen planten dan ook intelligentie en kunnen ze zelfs gevoelens hebben. Maar is die conclusie juist?

Volgens evolutiebioloog Vincent Merckx zijn mensen geneigd hun eigen gedragingen en emoties in andere organismen terug te zien. Zo suggereren onderzoekers dat kruidje-roer-me-niet (*Mimosa pudica*, zie afbeelding 1) in staat is om te leren, maar deze conclusie is niet onomstreden. Tijdens experimenten lieten onderzoekers deze plantensoort tientallen keren vallen. Bij een val vouwt de plant zijn bladeren samen om zich te beschermen tegen mogelijk gevaar. De val tijdens de experimenten kon echter geen kwaad. Nadat ze nog enkele keren waren gevallen, vouwden de planten hun bladeren niet meer samen. Volgens de onderzoekers zouden de planten hebben geleerd dat de val in het experiment niet gevaarlijk was.

Nadat de plantjes een maand met rust waren gelaten, herhaalden de onderzoekers de valproef. Ook nu vouwden de planten hun bladeren niet samen. Om te controleren of de planten hier nog wel toe in staat waren, schudden de onderzoekers ze flink heen en weer. Op dit mogelijke gevaar reageerden de planten wel met het samenvouwen van hun bladeren. De onderzoekers concludeerden vervolgens dat de planten een geheugen hebben.

De venusvliegenval (*Dionaea muscipula*, zie afbeelding 2) kan insecten vangen en verteren. Daarbij klappen de bladeren van de plant alleen dicht als een insect de haartjes binnen een bepaalde tijd twee keer aanraakt. Hoe onthoudt de plant dat de haartjes al een keer zijn aangeraakt? De conclusie van een omstreden onderzoek is dat de plant kan tellen.

Dergelijke conclusies wekken al snel de indruk dat planten nadenken en emoties hebben. Dat is volgens Merckx te kort door de bocht. Hij zoekt de verklaring eerder in de evolutie. Een plant die ‘kan tellen’ en niet bij elke aanraking automatisch de bladeren dichtklapt, bespaart energie en heeft daardoor een grotere kans om te overleven en zich voort te planten. Hetzelfde geldt volgens Merckx ook voor het kruidje-roer-me-niet. Door natuurlijke selectie zijn de planten overgebleven die niet bij elke onschuldige val de bladeren sluiten. Een plant denkt er volgens hem dus niet over na. Maar het ontbreken van intelligentie maakt planten niet minder indrukwekkend.

■ **Afb. 2** Deze vlieg heeft de haartjes van de venusvliegenval een keer te vaak aangeraakt.

Opdrachten

1 Planten als zonnedauw (*Drosera*) en blaasjeskruid (*Utricularia*) kunnen insecten vangen en verteren.
Leg uit waarom je deze planten niet volledig autotroof kunt noemen.

2 Vergelijk de regeling bij planten met de regeling bij mensen.
Wat zijn de overeenkomsten?

3 Welke symbiotische relatie wordt beschreven in de zin: ‘in ruil voor sachariden maken sommige schimmels anorganische stoffen uit de bodem opneembaar voor de wortels van planten’.

4 Waarom speelt evolutie bij planten waarschijnlijk een grotere rol dan bij mensen?

5 Planten hebben volgens Vincent Merckx geen gevoel zoals mensen en ook geen geheugen. Het kruidje-roer-me-niet reageert wel anders op een onschuldige val en het heftig heen en weer schudden tijdens het onderzoek.
Wat wordt hiermee aangetoond?

Ga naar de *Voorkennistoets* en het *Voorkennisfilmpje*.

1 BOUW, GROEI EN ONTWIKKELING

LEERDOEL

11.1.1 Je kunt beschrijven hoe lengte- en diktegroei bij kruid- en houtachtige planten plaatsvindt en dat stamcellen hiervoor verantwoordelijk zijn.

- Vaardigheden 1, 2, 4, 6 en 7 (thema 1)
- Practica 1, 2 en 3

TAXONOMIE	LEERDOEL EN OPDRACHTEN
	11.1.1
Begrijpen	1, 2
Toepassen	4, 8bc, 9, 10, 11
Analyseren	3, 5, 6, 7, 8a, 12

Planten zijn fascinerende organismen. Zo is de oudste boom op aarde 80 000 jaar oud, heeft de dikste boom een omtrek van 36 meter en is de hoogste boom net zo hoog als de Dom in Utrecht: 115 meter.

INDELING

Het plantenrijk kun je indelen in vijf grote groepen: wieren (of meercellige algen), mossen, paardenstaarten, varens en zaadplanten. Wieren en mossen zijn eenvoudige planten. Ze hebben geen wortels, stengels en bladeren en ze hebben geen vaatstelsel waarmee water en voedingsstoffen worden vervoerd. De meeste wieren leven in het water. Op het land komen ze voor in vochtige omgevingen. Dat geldt ook voor mossen. Deze landplanten nemen water en voedingsstoffen op via alle delen. Paardenstaarten, varens en zaadplanten bezitten wortels, stengels en bladeren en hebben een vaatstelsel. In dit thema komen vooral de vaatplanten aan de orde.

BOUW

De belangrijkste organen van vaatplanten zijn de wortel, de stengel en het blad. Ze bestaan uit drie verschillende weefsels: dekweefsel (epidermis), vaatweefsel en vulweefsel (zie afbeelding 1).

Context Wetenschap

ZEEOTTER BLIJFT WARM DOOR 'LEK'

Veel zeeotters leven in ijskoud water (zie afbeelding 6), bijvoorbeeld in de buurt van Alaska. Om de kou te weerstaan, hebben zeeotters een dikke vacht met een grotere dichtheid dan de vacht van alle andere zoogdieren. Maar in verhouding tot andere zoogdieren die in de kou leven zijn zeeotters kleiner en ze hebben minder vet. Hoe blijven ze dan toch warm?

Onderzoekers zijn erachter gekomen dat zeeotters een groot deel van het voedsel dat ze binnenkrijgen, meteen gebruiken om warmte te produceren. Ze hebben een stofwisseling die ongeveer drie keer sneller gaat dan bij zoogdieren van vergelijkbare grootte. Als het dier in rust is, heeft het een snelle basale stofwisseling. Dit duidt volgens de onderzoekers op een flinke warmteproductie, vermoedelijk in de spieren. Om dit na te gaan, verzamelden de wetenschappers monsters van spierweefsel van zeeotters van verschillende leeftijden. De weefsels werden in een vloeistof bij 4 °C bewaard. Het uiteindelijke onderzoek van de weefsels gebeurde in een ruimte van 37 °C en er werd voldoende zuurstof aan het weefsel toegevoegd. Uit de resultaten blijkt dat de mitochondriën in het spierweefsel relatief weinig ATP maken. De rest van de energie wordt omgezet in warmte voor de spieren. De mitochondriën 'lekken' dus warmte naar de skeletspieren.

Daarnaast zagen onderzoekers dat de stofwisseling van pasgeboren zeeotters al op het niveau was van volwassenen, in tegenstelling tot die bij andere zoogdieren. Ook maakten de grote en actieve zeeotters in verhouding juist meer ATP aan.

■ **Afb. 6** Een zeeotter houdt zich warm in ijskoud water.

Opdrachten

10 **a** De onderzoekers hebben onder andere gemeten hoeveel zuurstof de zeeotters gebruikten in rust.
Waarom hebben ze dit gemeten?

b Hoe kan een snelle basale stofwisseling zorgen voor een grote warmteproductie?

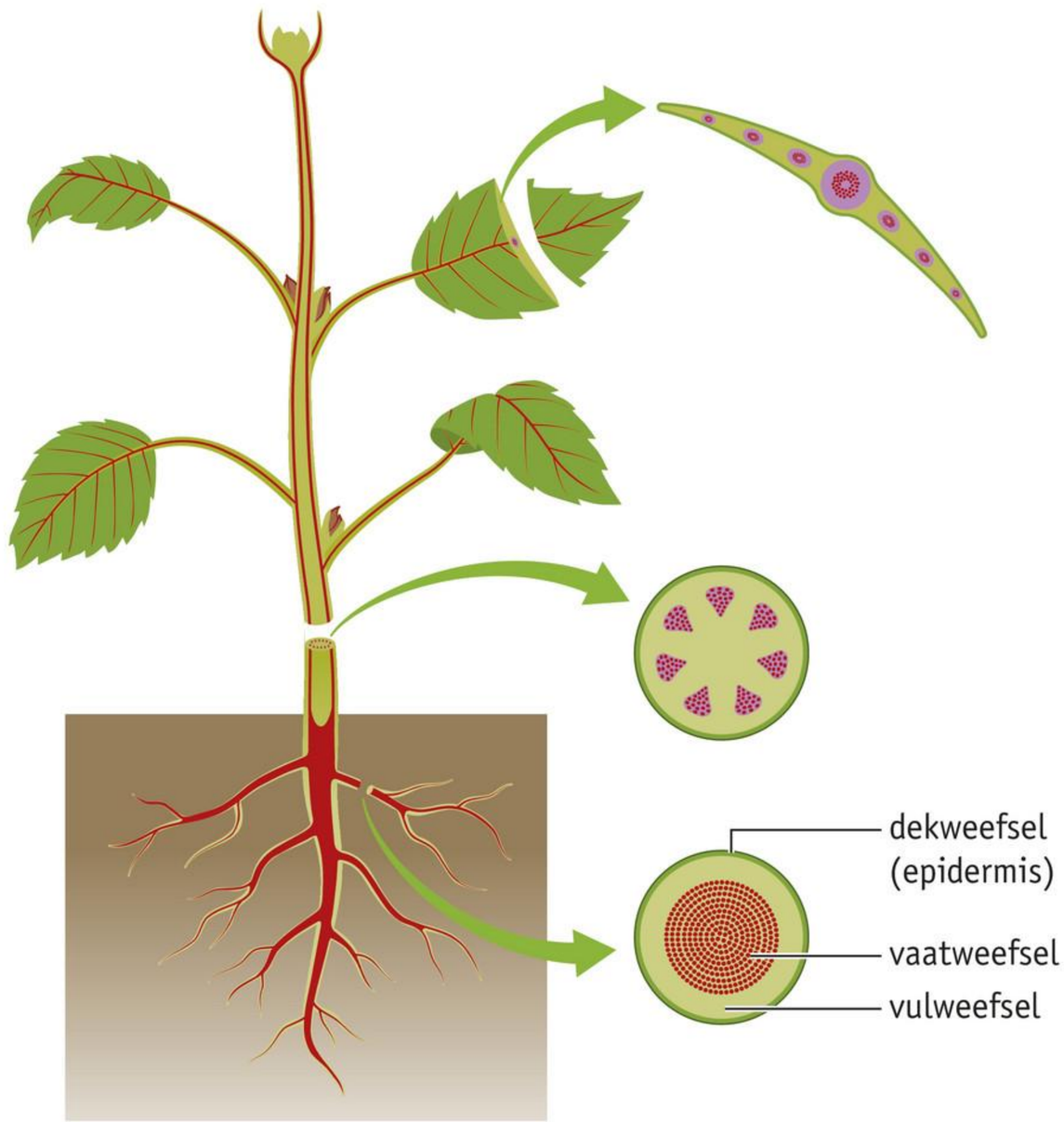
c Waarom werd het weefsel tijdens het onderzoek in een ruimte van 37 °C bekeken?

11 De dikke vacht van de zeeotter houdt tijdens het zwemmen een luchtlaag vast. De lucht werkt als isolatie en zorgt dat het koude water niet met de huid van de zeeotter in aanraking komt. Hierdoor verliest het dier minder lichaamswarmte. Toch is deze vacht alleen niet voldoende om de zeeotter warm te houden. Daarom verbrandt een zeeotter in verhouding meer vet dan andere dieren, maar op een minder efficiënte manier.

a Waarom is de vetverbranding bij een zeeotter minder efficiënt dan bij andere dieren?

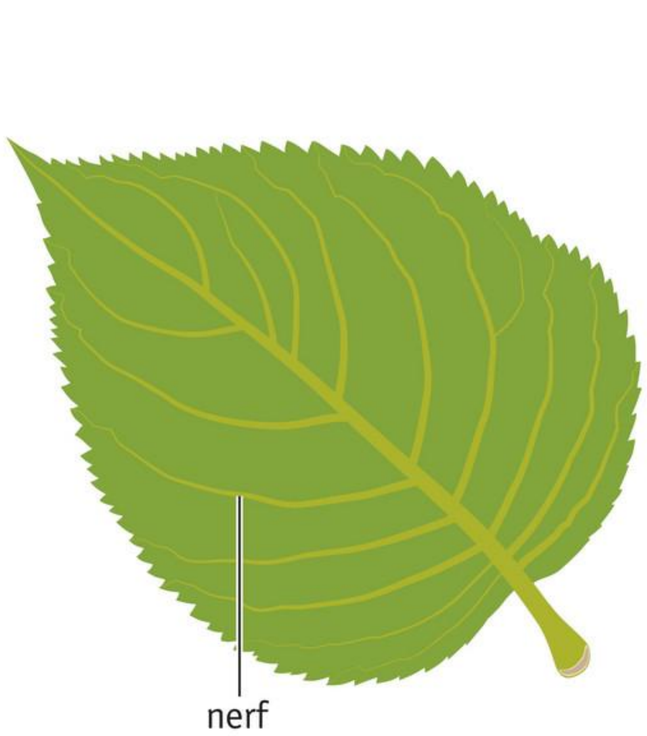
b Uit het onderzoek bleek dat de actieve zeeotters efficiënter vet verbranden. Leg uit hoe dit komt.

■ **Afb. 1** Bouw van een plant.

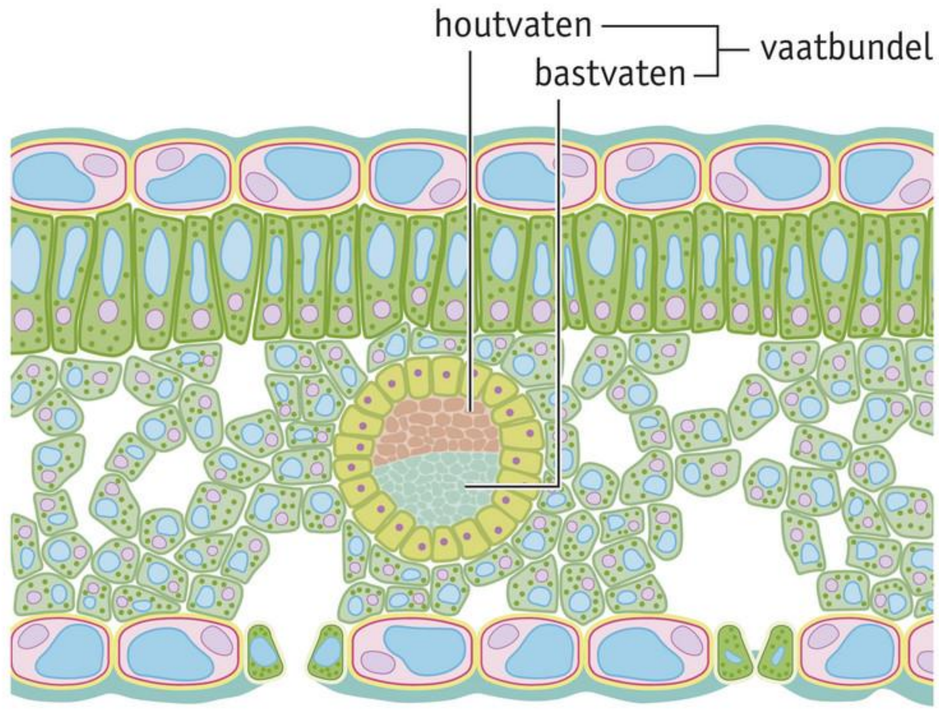


Het dekweefsel vormt de buitenzijde van een plant en beschermt tegen waterverlies en infecties (zie *BiNaS* tabel 81A). Het vaatweefsel bestaat voornamelijk uit transportvaten (**houtvaten** en **bastvaten**; zie *BiNaS* tabel 81E). In houtachtige stengels liggen de houtvaten in jaarringen. De bastvaten liggen eromheen. In kruidachtige stengels liggen de vaten bij elkaar in vaatbundels. In bladeren liggen de vaten in nerven (zie afbeelding 2). Het vulweefsel (ook wel grondweefsel genoemd) zit tussen het dekweefsel en het vaatweefsel en speelt een rol bij fotosynthese, opslag en stevigheid.

■ **Afb. 2** Hout- en bastvaten.



1 blad



2 deel van een blad (dwarsdoorsnede)

GROEI EN ONTWIKKELING

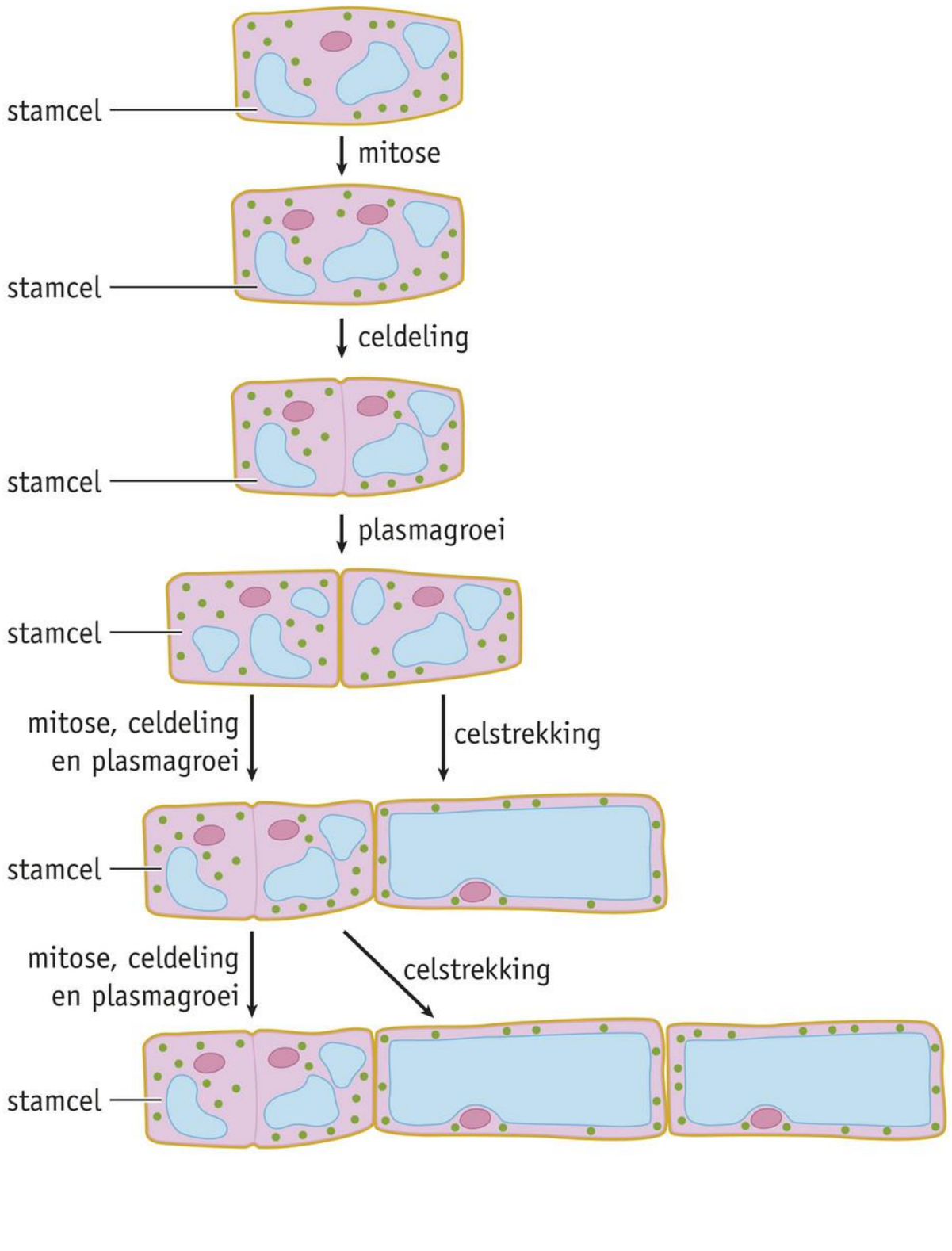
Planten groeien bij gunstige omstandigheden hun hele leven door. Dat kan alleen als er voldoende water en voedingszouten beschikbaar zijn. Verder hebben ze voor groei zuurstof, koolstofdioxide, licht en een geschikte temperatuur nodig.

Tijdens de groei vinden er in een plant allerlei veranderingen plaats. Cellen kunnen zich specialiseren, waarbij ze van vorm veranderen. Organen kunnen veranderen en er kunnen nieuwe organen ontstaan. Al deze veranderingen noem je ontwikkeling.

Celdelingen vinden bij planten plaats in deelweefsel (meristeem). Deelweefsel bevindt zich bij volgroeide planten in de toppen van wortels en stengels, in knoppen en in jonge bladeren. De toppen van stengels en wortels heten groeipunten en ze zorgen voor lengtegroei.

Deelweefsel van een plant bestaat uit stamcellen. Als een cel in het deelweefsel zich deelt en er heeft plasmagroei plaatsgevonden, ontstaan twee dochtercellen. Een van beide cellen blijft een cel in het deelweefsel en deelt zich na verloop van tijd opnieuw. De andere cel ondergaat celstrekking, waarbij de cel groeit door opname van water (zie afbeelding 3 en *BiNaS* tabel 81B). Daarbij kan de cel van vorm veranderen (celdifferentiatie) en een speciale functie krijgen (celspecialisatie).

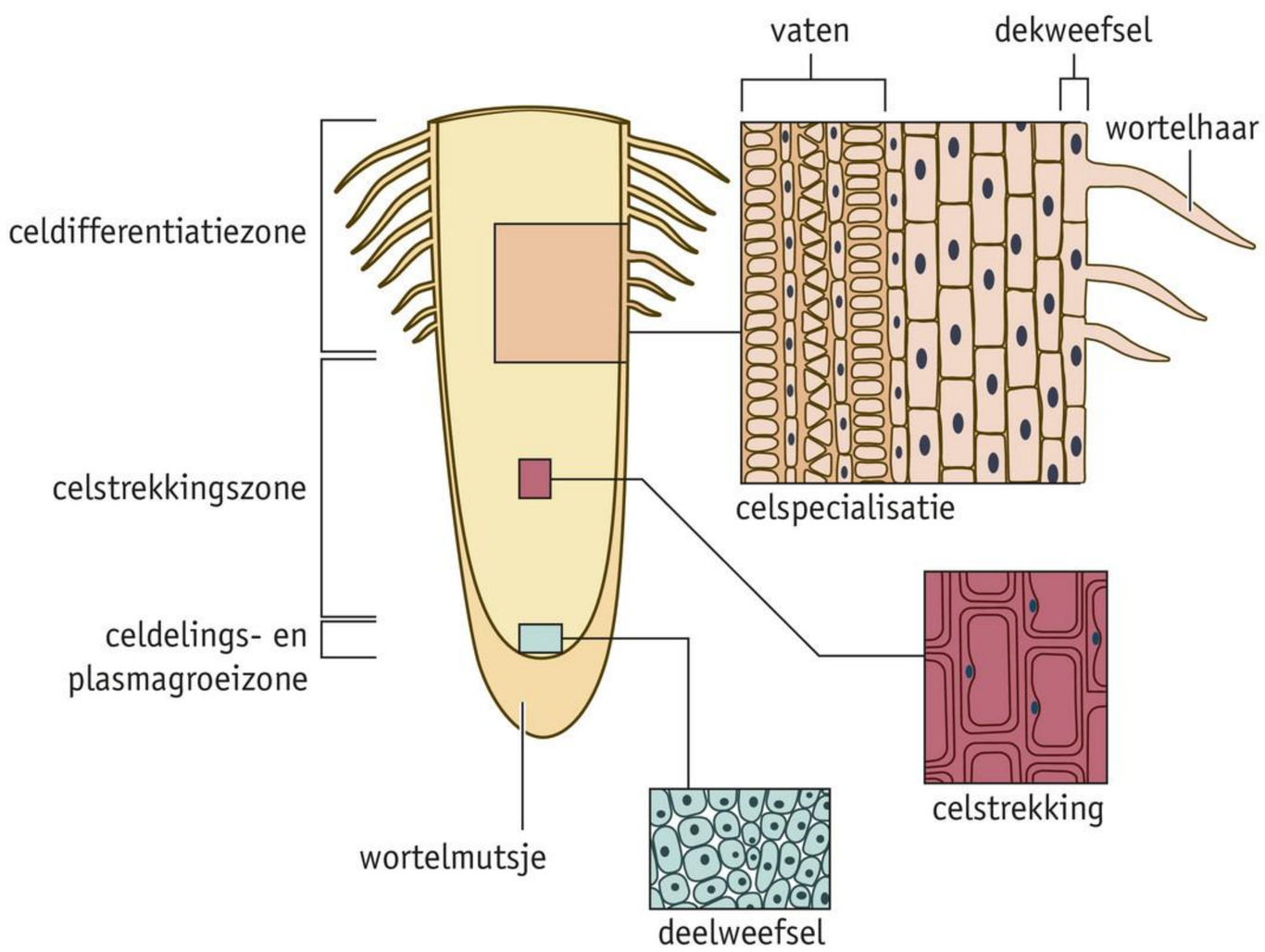
■ **Afb. 3** Mitose, celdeling, plasmagroei en celstrekking.



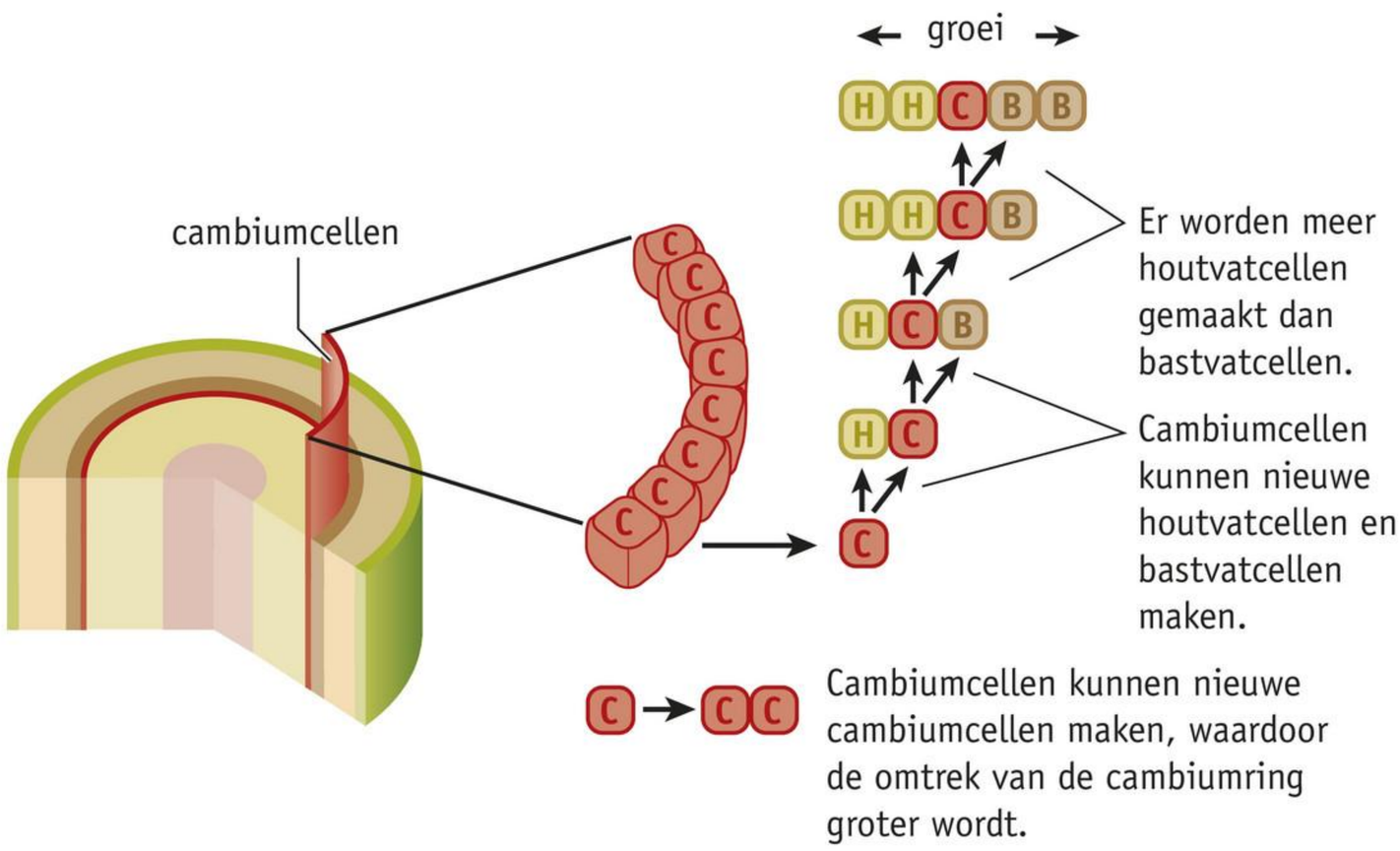
LENGTE- EN DIKTEGROEI

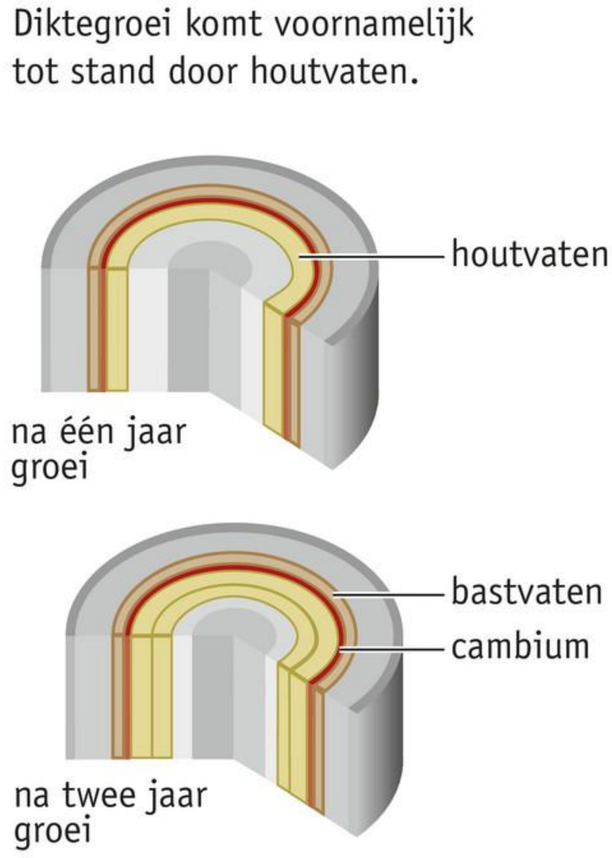
In houtachtige planten vindt zowel lengte- als diktegroei plaats. Lengtegroei vindt plaats in de jongste delen: de stengeltop en de worteltop (zie afbeelding 4 en *BiNaS* tabel 91B). Diktegroei vindt vooral plaats in een ringvormig deelweefsel dat cambium heet (zie afbeelding 5 en *BiNaS* tabel 91C). Planten groeien in de dikte doordat cellen in het cambium zich delen. Na elke deling blijft een van de twee dochtercellen in het cambium liggen; de andere komt erbuiten te liggen. Naar binnen toe vormt het cambium houtcellen en naar buiten toe bastcellen.

■ **Afb 4** Lengtegroei en celspecialisatie in een worteltop.



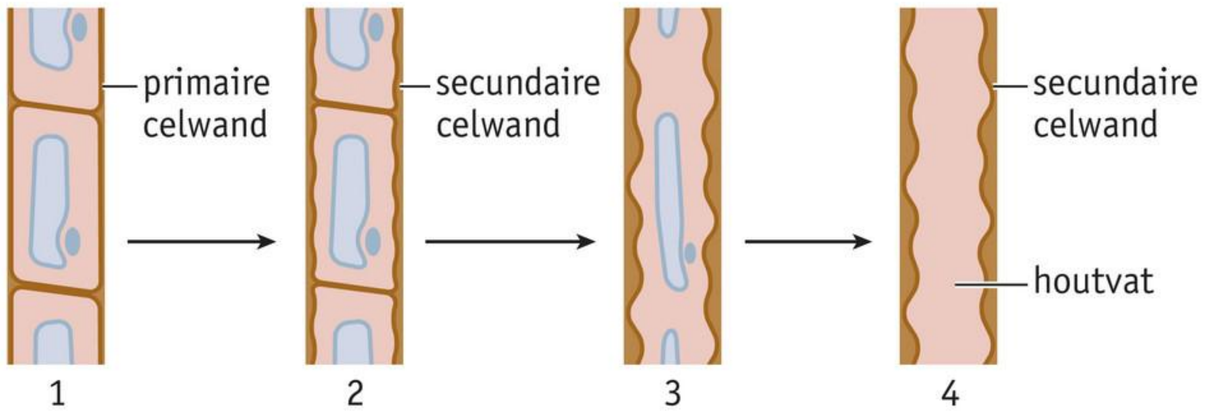
■ **Afb. 5** Diktegroei: het ontstaan van houtcellen en bastcellen.



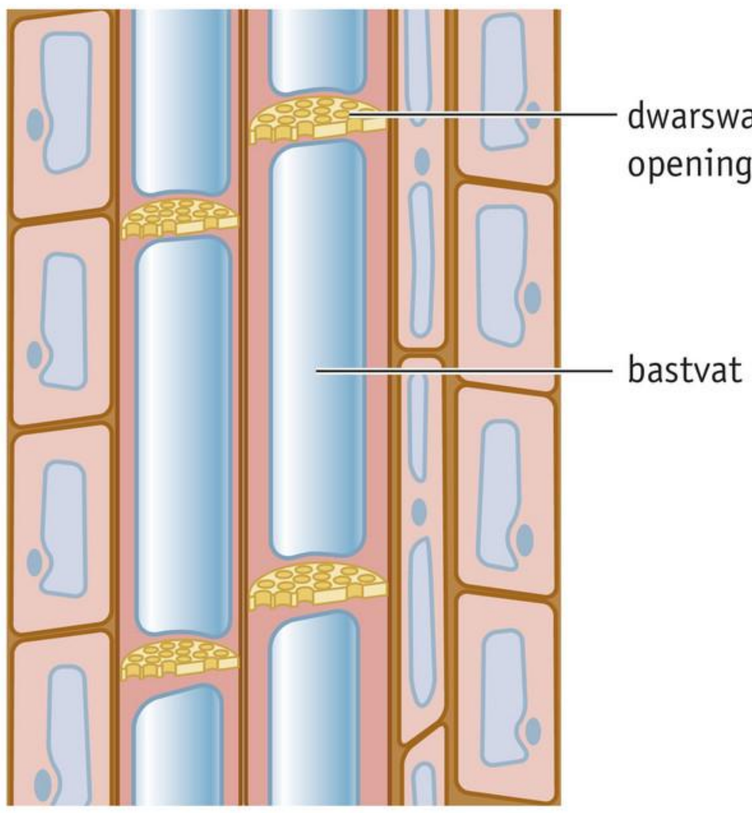


Houtvaten ontstaan uit boven elkaar gelegen houtcellen. De houtcellen zetten tegen de verticale primaire celwanden dikke secundaire celwanden af van cellulose en houtstof (lignine). Onder invloed van enzymen verdwijnen daarna de dwarswanden tussen boven elkaar liggende houtcellen en ten slotte verdwijnen ook de cellen zelf (zie afbeelding 6). Bij bastvaten komen er openingen in de dwarswanden tussen de cellen (zeefplaat; zie afbeelding 7). De cellen verdwijnen niet, wel de celkernen. Daardoor leven bastvatcellen betrekkelijk kort. Dode bastvaten worden dichtgedrukt.

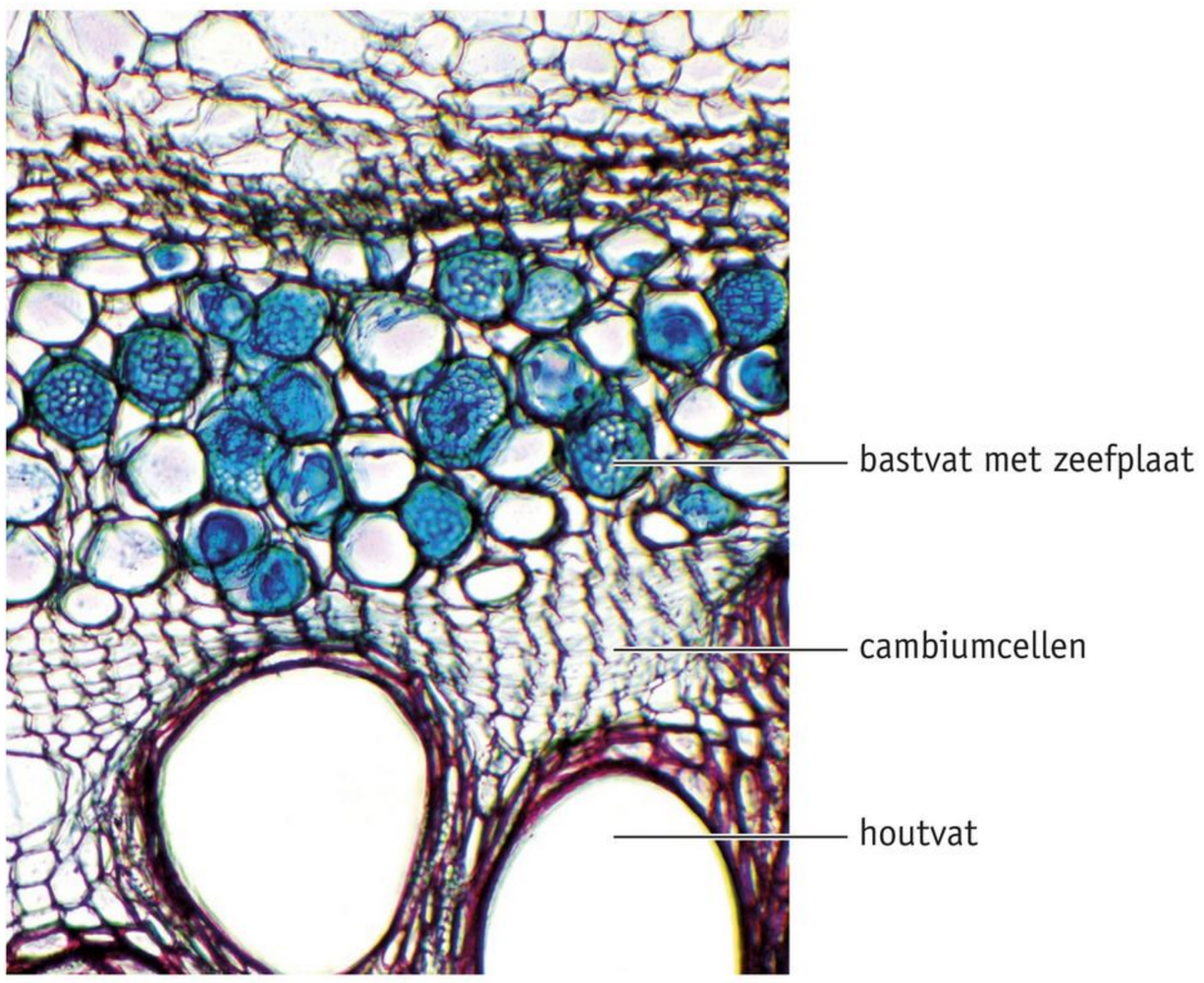
■ **Afb. 6** Het ontstaan van een houtvat (lengtedoorsnede).



■ **Afb. 7** Bastvaten.



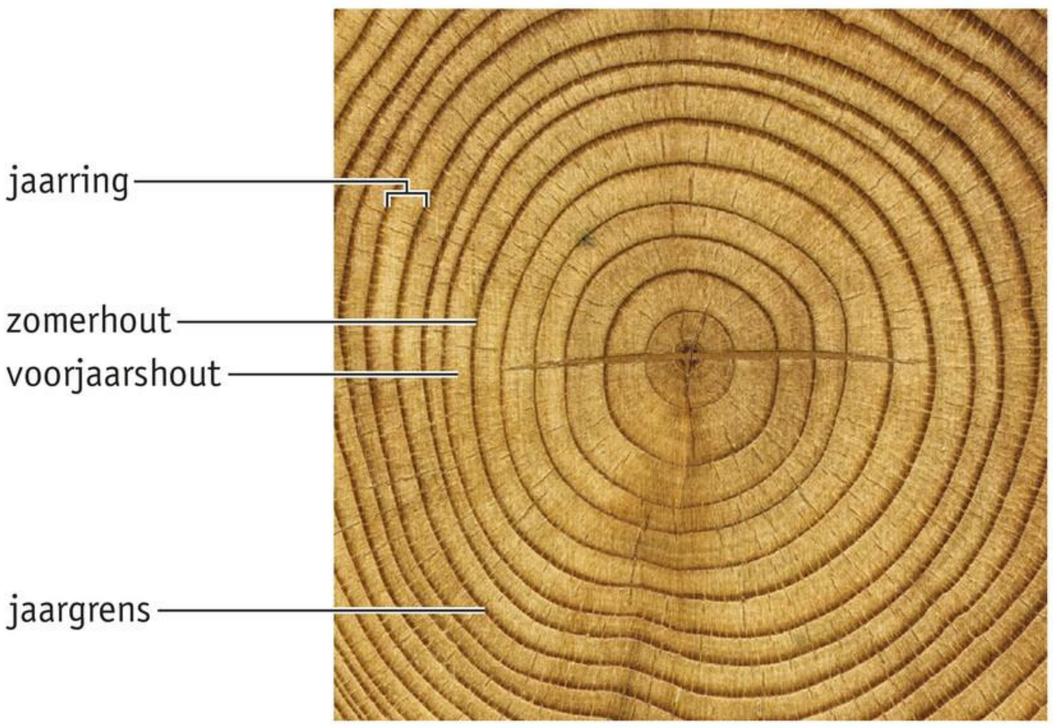
1 lengtedoorsnede



2 dwarsdoorsnede (microscopische foto)

Uit het cambium ontstaan veel meer houtcellen dan bastcellen. Elk jaar ontstaat zo een laag hout en een dun laagje bast. Al het hout dat gedurende één jaar is gevormd, heet een jaarring. Jaarringen zijn zichtbaar doordat bomen en struiken in het voorjaar groeien en in de winter niet (zie afbeelding 8). In het voorjaar ontstaan wijde houtvaten met dunne wanden (voorjaarshout) die veel water en opgeloste stoffen kunnen vervoeren. In de zomer ontstaan steeds nauwere houtvaten met steeds dikkere wanden (zomerhout). De scherpe overgang tussen het donkere zomerhout en het lichte voorjaarshout is de jaargrens. In de bast zijn geen jaarringen te onderscheiden, doordat de bastvaten snel worden samengedrukt.

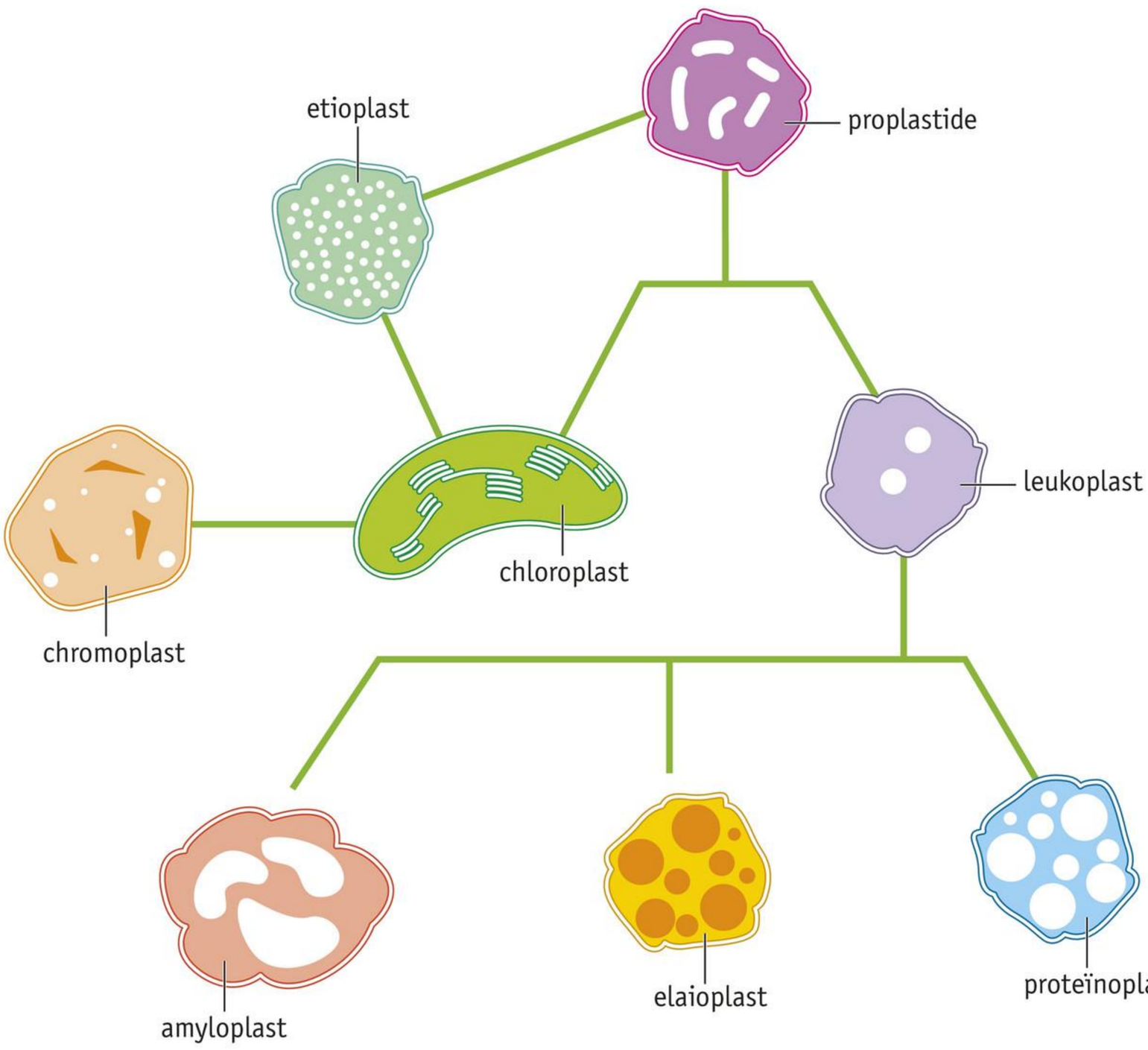
■ **Afb. 8** Jaarringen.



PLASTIDEN

In cellen van planten en algen kunnen **plastiden** voorkomen: celorganellen die een functie hebben bij de fotosynthese, het lokken van insecten en het opslaan van reservestoffen. Plastiden worden gevormd uit proplastiden die zich bevinden in het deelweefsel (zie afbeelding 9).

■ **Afb. 9** De vorming van plastiden.



In het donker worden etioplasten gevormd. Dit zijn bladgroenkorrels die nog niet aan licht zijn blootgesteld. In het licht ontstaan hieruit chloroplasten (bladgroenkorrels) die zorgen voor de groene kleur en belangrijk zijn voor de fotosynthese. Chromoplasten (kleurstofkorrels) hebben zich ontwikkeld uit chloroplasten. Een leukoplast is kleurloos en is gespecialiseerd in het opslaan van zetmeel (amyloplasten), olie (elaioplasten) of eiwitten (proteïnoplasten).

Plastiden kunnen, afhankelijk van de omstandigheden, in een ander type overgaan. Bij een aardappel die aan licht wordt blootgesteld, veranderen de amyloplasten in chloroplasten. Chloroplasten kunnen veranderen in leukoplasten of andersom. Bij een rijpende tomaat worden chloroplasten omgezet in rode chromoplasten.

Opdrachten KENNIS

1 Jotte heeft tien jaar geleden op 1 m hoogte haar naam in de stam van een boom gekerfd. Deze boom groeit in de lengte met een snelheid van 12 cm per jaar.

a Hoe hoog verwacht je dat haar naam nu in de stam van de boom staat? Leg je antwoord uit.

b De jaarringen in een boomstam zijn niet alle even dik (zie afbeelding 8).
Wat bepaalt de dikte van een jaarring?

c Een takje had een jaar geleden een diameter van 5 mm. Afgelopen jaar is er een laagje houtweefsel van 1,1 mm dikte gevormd.
Wat is nu de diameter van het takje?

d In een boomstam wordt de diameter van de cambiumring net boven het wortelstelsel vergeleken met de diameter van de cambiumring 3 m boven het wortelstelsel.
Zijn de diameters gelijk of verschillend? Leg je antwoord uit.

2 **a** Chloroplasten en mitochondria zijn beide betrokken bij de omzetting van energie.
Beschrijf het verschil in energieomzetting tussen beide organellen.

b Welke plastide speelt een belangrijke rol bij het lokken van dieren? Leg je antwoord uit.

Opdrachten INZICHT

3 Hoe komt het dat het cambium bij de diktegroei niet scheurt?

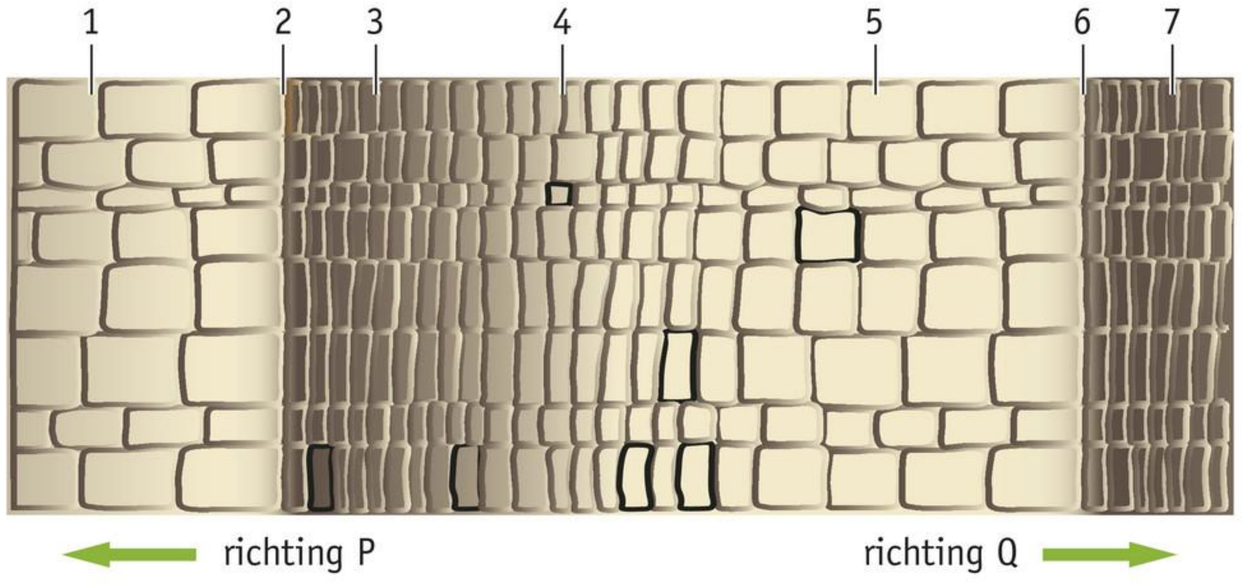
4 Met behulp van een houtboor werd een kern geboord uit een nog levende boom. Van deze kern is een schematische tekening gemaakt (zie afbeelding 10).

a Bij welke nummers bevinden zich jaargrenzen?

b De jaarring tussen deze jaargrenzen is in 2024 gevormd.
Bij welk nummer bevindt zich de jaarring die in 2023 is gevormd?

c In welke richting bevindt zich het midden van de stam? En in welke richting bevindt zich het cambium?

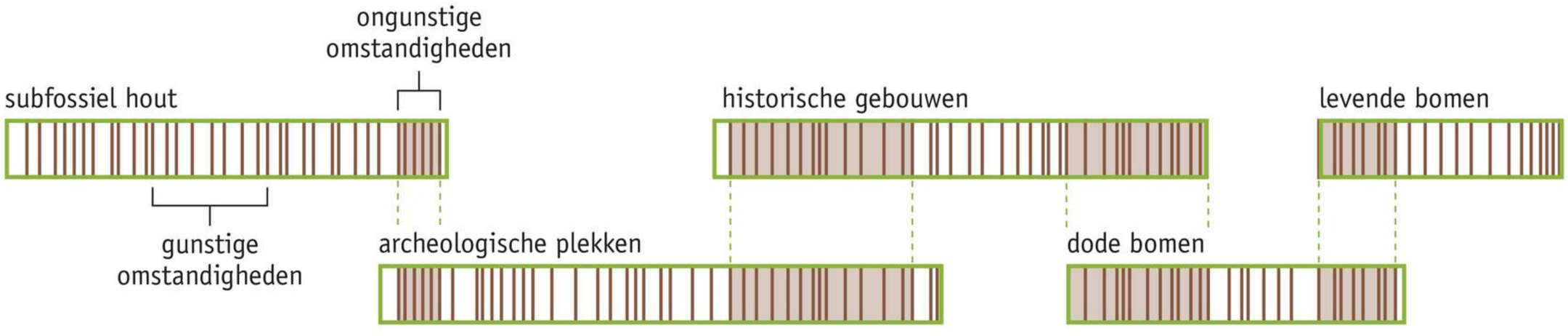
■ **Afb. 10** Schematische tekening van een deel van een uitgeboorde kern.



5 Dendrochronologen zijn wetenschappers die hout dateren aan de hand van jaarringen. Leg uit dat het voor dendrochronologen belangrijk is dat voor het bepalen van de leeftijd van een boom het wortelstelsel nog aan de stam zit.

6 Aan de breedte van een jaarring kun je zien onder welke omstandigheden hij is gevormd. Dikke en dunne groeilagen, vertaald naar goede en minder goede milieuomstandigheden, vormen samen een soort streepjescode. De omstandigheden zijn ieder jaar anders, waardoor er een uniek jaarringpatroon ontstaat. Door de jaarringen van hout van levende bomen, dode bomen, hout dat aanwezig is in historische gebouwen, enzovoort, allemaal bij elkaar te zetten, kun je een groeikalender maken die duizenden jaren kan teruggaan (zie afbeelding 11).
Vroeger werd er op houten panelen geschilderd. Soms is het moeilijk te achterhalen of het geschilderde werk origineel is of na de dood van de kunstenaar is vervalst.
Leg uit hoe een dendrochronoloog dit soms wel kan bepalen.

■ **Afb. 11** Een groeikalender maak je uit verschillende houtbronnen.



7 Bomen en struiken groeien sneller als de temperatuur hoger is.
Hoe kan dendrochronologie een bijdrage leveren aan klimaatonderzoek?

8 Door groei van een plant neemt het gewicht toe. Daarbij wordt een onderscheid gemaakt in de toename van drooggewicht en versgewicht. Het drooggewicht van een plant is het gewicht nadat water is onttrokken aan de plant. Het versgewicht van een plant is het gewicht inclusief water.

a Etioleren is een vorm van tuinbouw waarbij planten zoals witlof en asperge (zie afbeelding 12) zich in het donker ontwikkelen.
Neemt bij tuinbouw in het donker het versgewicht van de planten toe? En het drooggewicht? Leg je antwoord uit.

b In het donker vindt er bij witlof en aspergeplantjes meer celstrekking plaats dan in het licht.
Bij welke planten neemt het versgewicht het snelst toe: bij witlofplanten die in het licht groeien of bij witlofplanten die in het donker groeien? Leg je antwoord uit.

c Wanneer witlof boven de grond komt, wordt het groen. Leg dat uit.

■ **Afb. 12** Geëtioleerde planten.

1 witlof

2 asperge

Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf.*

Context Beroep

DENDROCHRONOLOOG

‘Houtonderzoek geeft me een idioot gevoel van zekerheid. Ik kan zeggen: deze boom is omgehakt in de winter van 124 op 125 na Christus.’

Aan het woord is Esther Jansma (zie afbeelding 13). Ze was onderzoeker bij de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, wetenschappelijk directeur van de Stichting Nederlands Centrum voor Dendrochronologie en bijzonder hoogleraar dendrochronologie aan de Universiteit Utrecht. Ze ontwikkelde een internationaal digitaal archief voor dendrochronologie.

Dendrochronologen dateren hout. Hiermee kun je de ouderdom van houten voorwerpen vaststellen. Aan de hand van een antiek kastje in haar huis legt Esther uit hoe het werkt. ‘Met een scheermes maak je poeder van wat krijt en dat klop je in de achterkant van het kastje. Zo zie je duidelijk de jaarringen in het hout. Aan de breedte van die ring kun je zien onder wat voor omstandigheden hij is gevormd.’ Ze gaat langs de houtnerf met haar vinger. ‘De patronen van ringbreedten in bomen noemen we jaarringpatronen. En die kun je allemaal bij elkaar zetten: zo maak je een groeikalender die duizenden jaren kan teruggaan.’

Dendrochronologisch onderzoek speelt een belangrijke rol bij onderzoek naar klimaatverandering. Door het analyseren van jaarringpatronen bij veel verschillende bomen kun je informatie over de reactie van bomen op stressfactoren zoals droogte of overstroming tot op het jaar precies terugvinden. Ook kun je aan de hand van een groeikalender duizenden jaar terug het weer in een bepaald gebied afleiden.

■ **Afb. 13** Esther Jansma.

Opdrachten

9 Esther Jansma is naast dendrochronoloog ook bijzonder hoogleraar in de paleo-ecologie. Zoek op wat paleo-ecologie inhoudt.

10 In 2014 werd er voor de kust van Nederland een scheepswrak gevonden, met aan boord een jurk uit de zeventiende eeuw. Doordat dit een van de weinig overgebleven jurken van die tijd was, werd het wrak door veel verschillende wetenschappers onderzocht, waaronder dendrochronologen.
Leg uit hoe dendrochronologisch onderzoek een bijdrage kan leveren aan informatie over dit wrak.

11 Esther Jansma kan uit de jaarringen van hout uit archeologische vindplaatsen afleiden wanneer er gunstige en ongunstige tijden voor bomen in Nederland waren.
Leg uit dat ze daarmee indirect ook kan afleiden of boeren een goede of slechte oogst hadden.

12 **a** Geef twee argumenten waarom het beroep van dendrochronoloog een geschikt beroep voor je zou kunnen zijn. Denk daarbij aan jouw capaciteiten en je interesses.
b Geef twee argumenten waarom het beroep van dendrochronoloog geen geschikt beroep voor je zou kunnen zijn. Denk daarbij aan jouw capaciteiten en je interesses.

2 TRANSPORT IN PLANTEN

LEERDOELEN

11.2.1 Je kunt beschrijven hoe planten water met voedingszouten opnemen, transporteren en afgeven.

11.2.2 Je kunt beschrijven hoe huidmondjes de gaswisseling van planten reguleren en hoe de opname van koolstofdioxide in relatie staat met de afgifte van water.

- Vaardigheden 1, 2, 3 en 4 (thema 1)
- Practica 4 en 5

TAXONOMIE	LEERDOELEN EN OPDRACHTEN	
	11.2.1	**11.2.2**
Begrijpen	13, 14, 15, 16	17, 18
Toepassen	19, 20, 21a, 22b, 24	25ab, 26a
Analyseren	21b, 22acd	23, 25c, 26b

Een populier kan wel 1500 liter water per dag verbruiken. Dat water wordt allemaal door een natuurlijk transportsysteem omhooggewerkt. Het systeem kent wel grenzen, waardoor bomen niet hoger kunnen worden dan 130 meter.

OPNAME VAN WATER EN VOEDINGSZOUTEN

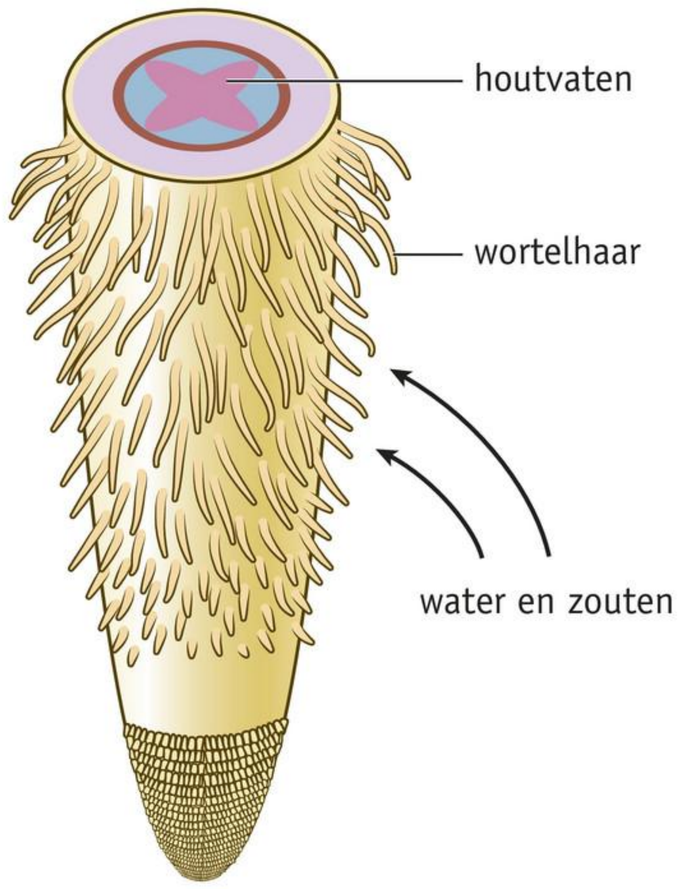
Bij eenvoudige planten zoals wieren en mossen vindt transport van stoffen onder andere plaats door diffusie. Vaatplanten hebben voor het transport van stoffen een vatenstelsel dat bestaat uit een netwerk van houtvaten en bastvaten. Het transport bij vaatplanten vindt plaats in twee richtingen. De houtvaten vervoeren water en zouten vanaf de wortels via de stengels naar de bladeren. Dit is de **anorganische sapstroom**. De anorganische sapstroom wordt aangedreven door een combinatie van worteldruk, capillaire werking en verdamping. Bastvaten vervoeren water en **assimilatieproducten** van de bladeren naar alle delen van de plant. Dit is de **organische sapstroom**.

De houtvaten bevinden zich in de vaatbundels in wortels en stengels aan de binnenkant (zie *BiNaS* tabel 91B en C). In de bladeren liggen de houtvaten aan de bovenkant van de nerven. De bastvaten bevinden zich in de vaatbundels aan de buitenkant en in de nerven aan de onderkant (zie *BiNaS* tabel 91A).

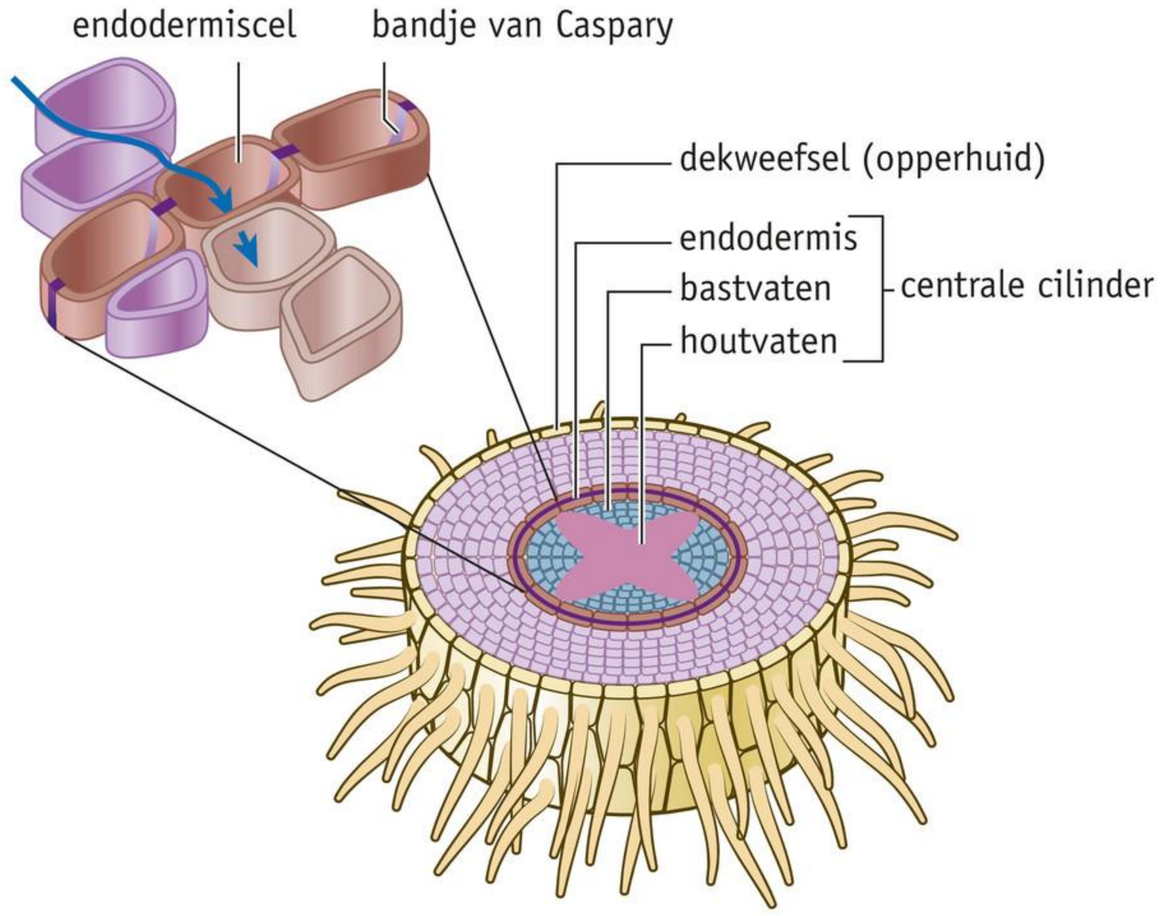
WORTELDRUK

Planten nemen via de wortels water en voedingszouten op. Dat gebeurt vooral via de worteluiteinden, waar cellen van het dekweefsel (opperhuid) zijn uitgegroeid tot **wortelharen**. Deze wortelharen zorgen voor fijne vertakkingen die het wortelоppervlak sterk vergroten (zie afbeelding 14).

■ **Afb. 14** Een jonge wortel.



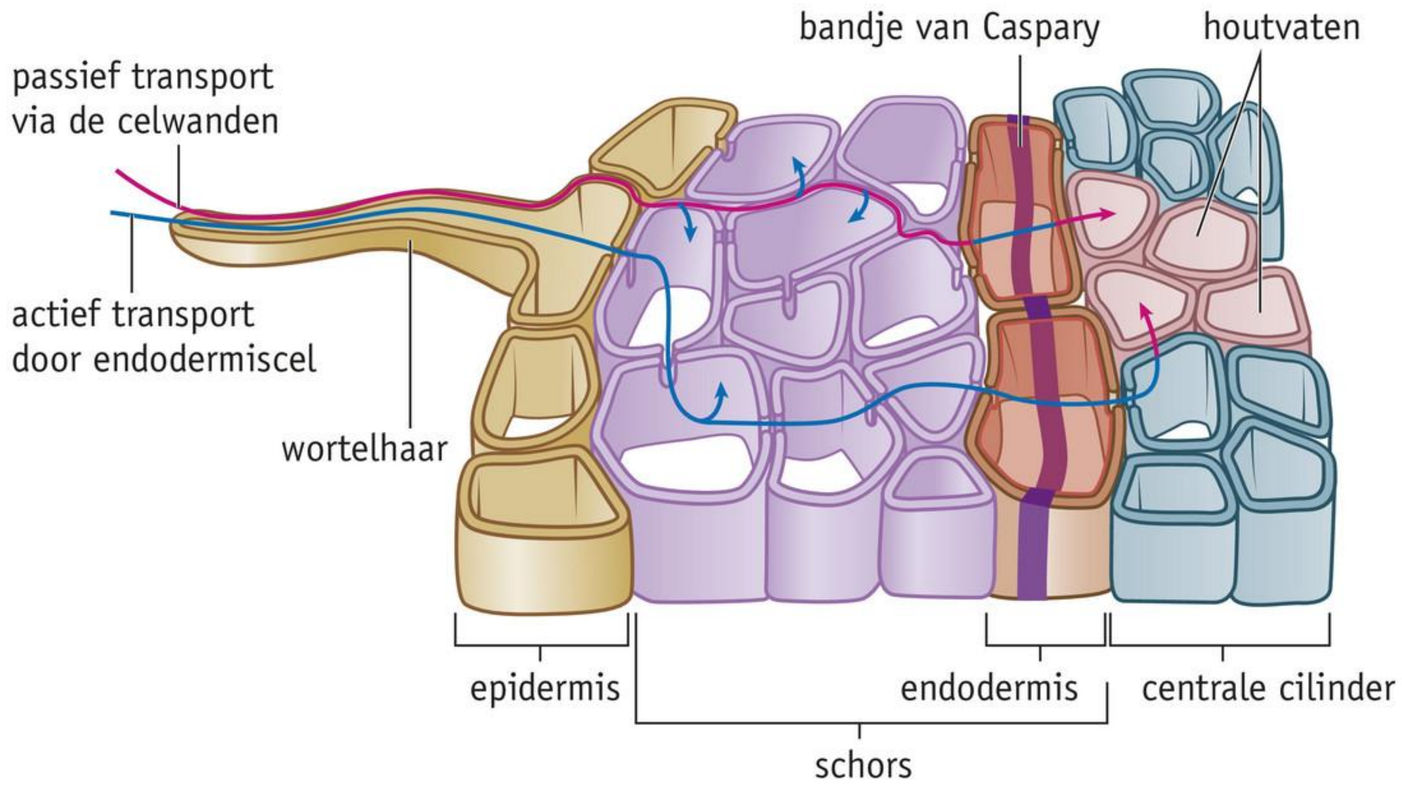
1 buitenaanzicht



2 doorsnede

De houtvaten en bastvaten liggen in de centrale cilinder. De buitenste laag cellen van de centrale cilinder heet de **endodermis**. Deze zorgt voor de selectieve opname van voedingszouten. Water met opgeloste voedingszouten wordt via de wortelharen opgenomen uit de bodem en gaat door middel van diffusie via de schors naar de endodermis. Dit gebeurt voornamelijk via de celwanden (zie afbeelding 15).

■ **Afb. 15** Opname van water en zouten.



Deze celwanden zijn permeabel (doorlaatbaar) voor water en voedingszouten. In de celwanden van endodermiscellen bevinden zich de bandjes van Caspary, die impermeabel (niet doorlaatbaar) zijn voor water en voedingszouten (zie *BiNaS* tabel 91B). Deze bandjes liggen in de zijkanten, onderkant en bovenkant van de celwand, zoals het cement van een gemetselde muur. De enige manier om deze barrière tussen schors en centrale cilinder te passeren, is dwars door de endodermiscellen.

Het celmembraan van de endodermiscellen transporteert actief voedingszouten van de wortelschors naar de centrale cilinder. Daardoor wordt de osmotische waarde in de centrale cilinder hoger dan die in de schors. Door osmose diffundeert er vervolgens water naar de centrale cilinder. De druk die hierdoor ontstaat wordt **worteldruk** genoemd. Het water met de opgeloste voedingszouten stijgt daardoor in de houtvaten. De bandjes van Caspary verhinderen dat het water met opgeloste voedingszouten vanuit de centrale cilinder kan terugstromen naar de schors.

2 ENZYMEN

LEERDOELEN

9.2.1 Je kunt de bouw en werking van enzymen beschrijven.
9.2.2 Je kunt de invloed van milieufactoren op de enzymactiviteit beschrijven.

- Vaardigheden 6 en 7 (thema 1)
- Practica 2 en 3

TAXONOMIE	LEERDOELEN EN OPDRACHTEN	
	9.2.1	**9.2.2**
Begrijpen	12, 13	14, 15
Toepassen	17a	16, 18a, 21, 22ab
Analyseren	17bc	18bc, 19, 20, 22c

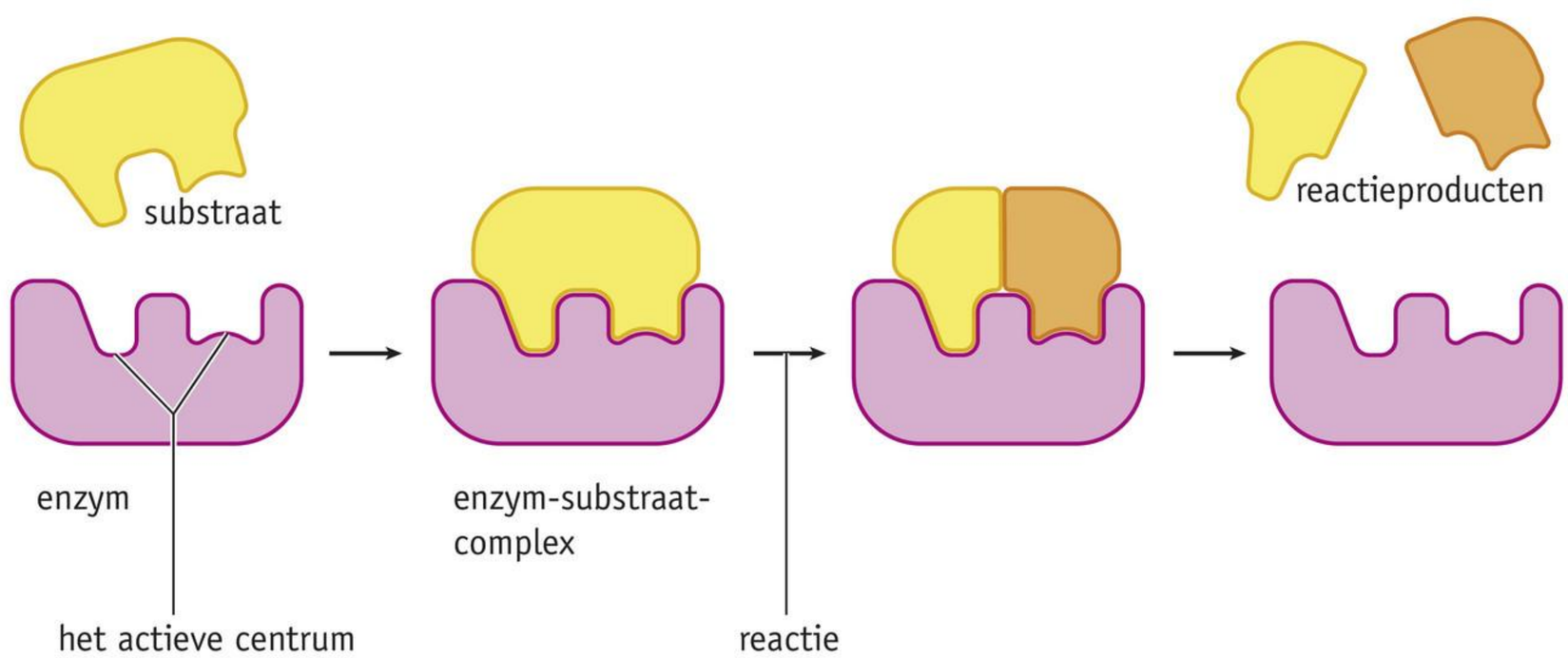
In cellen worden stoffen en energie omgezet. Voor elke reactie is een speciaal eiwit nodig, een enzym, dat ervoor zorgt dat de reactie mogelijk wordt of sneller verloopt.

BOUW EN WERKING

Bij de stofwisseling in cellen worden voortdurend stoffen opgebouwd en afgebroken. Deze stofwisselingsprocessen verlopen meestal niet vanzelf of zeer traag. Met behulp van enzymen kunnen deze processen toch goed verlopen. **Enzymen** zijn eiwitten die chemische omzettingsprocessen **katalyseren** (mogelijk maken of versnellen) zonder zelf te worden verbruikt.

Een enzymmolecuul heeft een ruimtelijke vorm met veel knikken en lussen. De stof waarop een enzym inwerkt, noem je het **substraat**. Elk enzym kan maar op één type substraat inwerken. De **enzymwerking** is substraatspecifiek. Het substraatmolecuul past precies in het actieve centrum waar de reactie plaatsvindt. Bij deze binding ontstaat een **enzym-substraatcomplex** (E-S-complex). In het substraatmolecuul worden bindingen tussen atomen verbroken en komen bindingen tussen andere atomen tot stand. Het substraat wordt omgezet in het reactieproduct (zie afbeelding 7).

■ **Afb. 7** De werking van een enzym.



WATERPOTENTIAAL

Water in een cel met een lage osmotische waarde verplaatst zich via een celmembraan naar een aanliggende cel met een hogere osmotische waarde. Waterverplaatsing in een cel hangt ook af van de druk die de celwand uitoefent op de celinhoud. Bij gelijke osmotische waarde verplaatst water zich in een cel met hoge druk naar een cel met een lagere druk. De verplaatsing van water in planten en dieren wordt verklaard door en bepaald met het verschil tussen de **waterpotentiaal** in en buiten een cel. Deze is onder andere afhankelijk van de osmotische druk (osmotische potentiaal) en de druk van de celwand (drukpotentiaal) en wordt weergegeven met de formule:

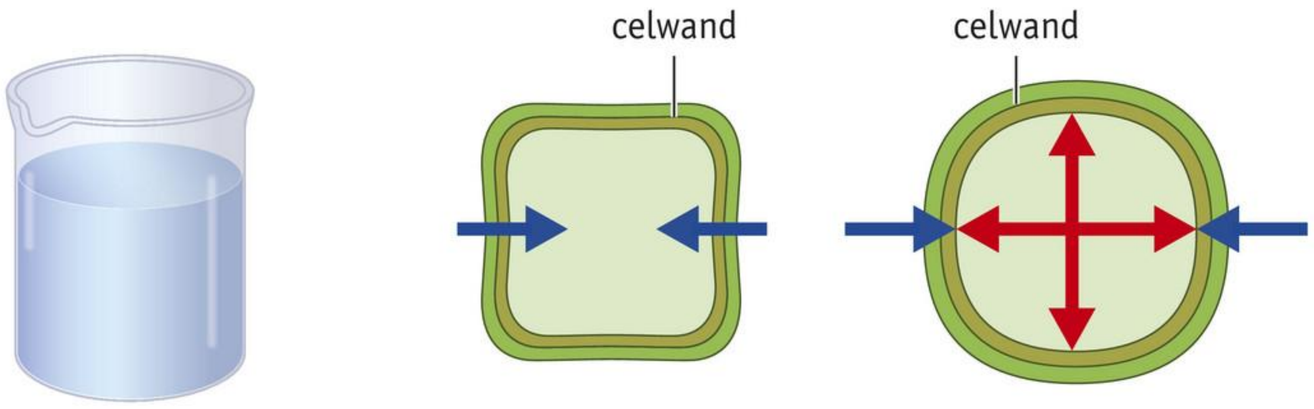
$$\psi_w = \psi_s + \psi_p$$

Hierin is:
ψ_w = waterpotentiaal
ψ_s = osmotische potentiaal
ψ_p = drukpotentiaal

De waterpotentiaal geeft aan of water de cel in- of uitgaat en wordt uitgedrukt in de eenheid megapascal (MPa). De waterstroom gaat van een hoge naar een lage waterpotentiaal. De waterpotentiaal van zuiver water is 0 MPa. Het oplossen van stoffen in dit water maakt ψ_s negatief en verlaagt de waterpotentiaal, terwijl de toename van de druk ψ_p positief maakt en de waterpotentiaal verhoogt. Naarmate de concentratie opgeloste stoffen lager is en de drukpotentiaal in de oplossing hoger, is de waterpotentiaal van die oplossing hoger. Uit de formule blijkt verder dat twee oplossingen met verschillende concentraties dezelfde waterpotentiaal kunnen hebben. De druk van de celwand op de celinhoud is dan verschillend.

Oplossingen in levende cellen hebben een negatieve waterpotentiaal ten opzichte van zuiver (gedestilleerd) water. Watermoleculen stromen dan van zuiver water naar de cel. Doordat meer water de cel binnenstroomt, zal de osmotische waarde in de cel afnemen en de druk van de celwand toenemen. Dit gaat net zolang door totdat de waterpotentiaal binnen en buiten de cel gelijk is geworden (zie afbeelding 16).

■ **Afb. 16** Waterpotentiaal.



Opdrachten KENNIS

13 Een afgesneden stengel van een witte anjer wordt in een bakje met water gezet waaraan een rode kleurstof is toegevoegd. Na een uur heeft de bloem roodachtige stippen gekregen.
Via welk transportvat is de rode kleurstof in de bloembladeren terechtgekomen?

14 Een tuinder snijdt in de vroege ochtenduren bloemen af, die op de markt worden verkocht. Bij het snijden ziet hij dat een klein druppeltje vocht aan het oppervlak van de achtergebleven stengel verschijnt.
Leg uit waarom dit druppeltje vocht verschijnt.

15 **a** Een plantencel met een osmotische potentiaal van −0,6 MPa en een waterpotentiaal van 0 MPa wordt ondergedompeld in gedestilleerd water.
Wat is de drukpotentiaal van de cel?
b Als je de cel in een bekerglas met een oplossing van −0,2 MPa waterpotentiaal legt, wat is dan de drukpotentiaal bij evenwicht?

16 In de winter wordt zout op de wegen gestrooid.
Leg uit hoe dit de waterpotentiaal van de berm beïnvloedt.

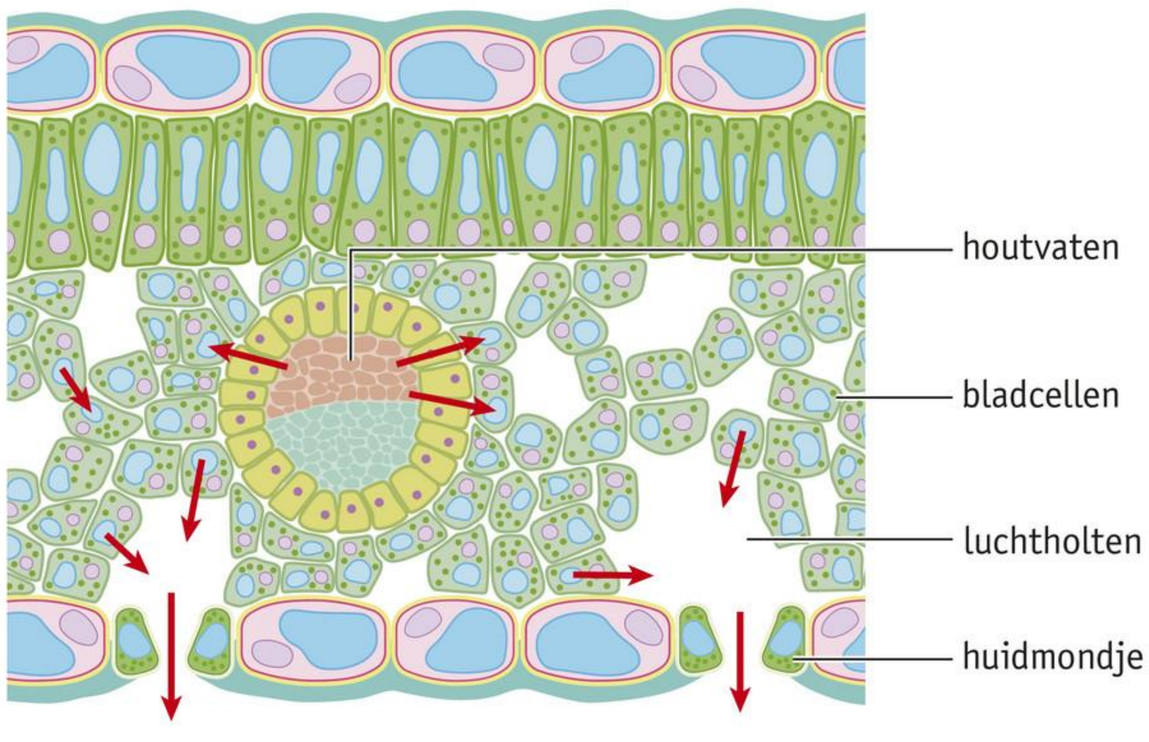
CAPILLAIRE WERKING

Naast worteldruk speelt de capillaire werking een belangrijke rol in de anorganische sapstroom. Bij **capillaire werking** stijgt een vloeistof in een smal buisje. De capillaire werking is mogelijk doordat de houtvaten nauw zijn. Watermoleculen trekken elkaar aan met **cohesiekrachten** en de watermoleculen 'plakken' door **adhesiekrachten** aan de celwanden. De cohesie- en adhesiekrachten zijn samen groter dan de zwaartekracht, waardoor het water omhoog wordt getransporteerd.

VERDAMPING

Het watertransport wordt ook beïnvloed door **verdamping** van water uit de bladeren. Hierbij diffundeert waterdamp uit de luchtholten en intercellulaire ruimten van bladeren naar buiten via de **huidmondjes**, kleine openingen in het dekweefsel van blad of stengel die voornamelijk aan de onderkant van bladeren zitten (zie *BiNaS* tabel 91A). Daardoor verdampt water in de celwanden die grenzen aan de luchtholten (zie afbeelding 17). Dit water wordt door capillaire werking aangevuld vanuit de houtvaten in het blad en uiteindelijk vanuit de houtvaten in de stengel(s) en wortels.

■ **Afb. 17** Verdamping uit een blad.



Door verdamping ontstaat boven in de houtvaten een onderdruk, waardoor water door de houtvaten omhoog wordt gezogen. Je kunt dit vergelijken met het zuigen door een rietje. Deze stroming van water noem je de verdampingsstroom.

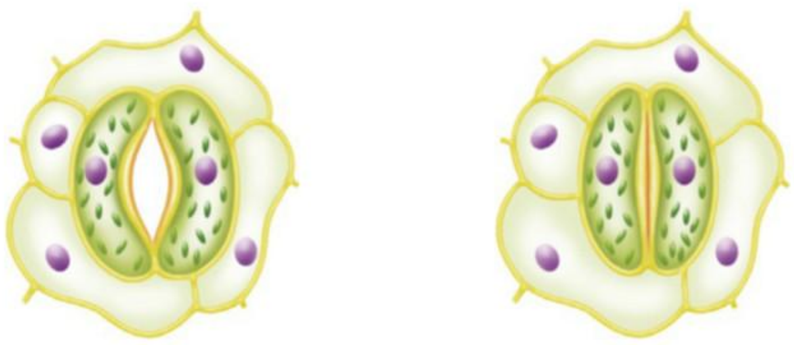
Uiteindelijk gaat het water met opgeloste voedingszouten van de houtvaten in de centrale cilinder en de stengel naar de nerven van bladeren. De houtvaten vertakken zich door het gehele blad, waardoor dicht bij elke cel een houtvat ligt.

REGELING VAN DE VERDAMPING

Bij planten wordt de mate van verdamping geregeld door het openen of sluiten van de huidmondjes. 's Nachts zijn vrijwel alle huidmondjes gesloten. Bij droge omstandigheden kunnen de huidmondjes zich ook overdag sluiten.

Het openen en sluiten van de huidmondjes gebeurt door een vormverandering van de sluitcellen (zie afbeelding 18). Als de turgor van de sluitcellen door watertekort afneemt, veranderen de sluitcellen zodanig van vorm dat de opening tussen de sluitcellen kleiner wordt en het huidmondje ten slotte dichtgaat. De plant verliest daardoor minder vocht. Als de turgor van de sluitcellen door voldoende water toeneemt, wordt de opening tussen de sluitcellen groter, waardoor het huidmondje opengaat. De turgor van de sluitcellen is afhankelijk van de osmotische waarde van het vacuolevocht. De turgorveranderingen treden niet alleen op door verdamping, maar ook onder invloed van licht en door een verandering in het CO_2-gehalte van de sluitcellen.

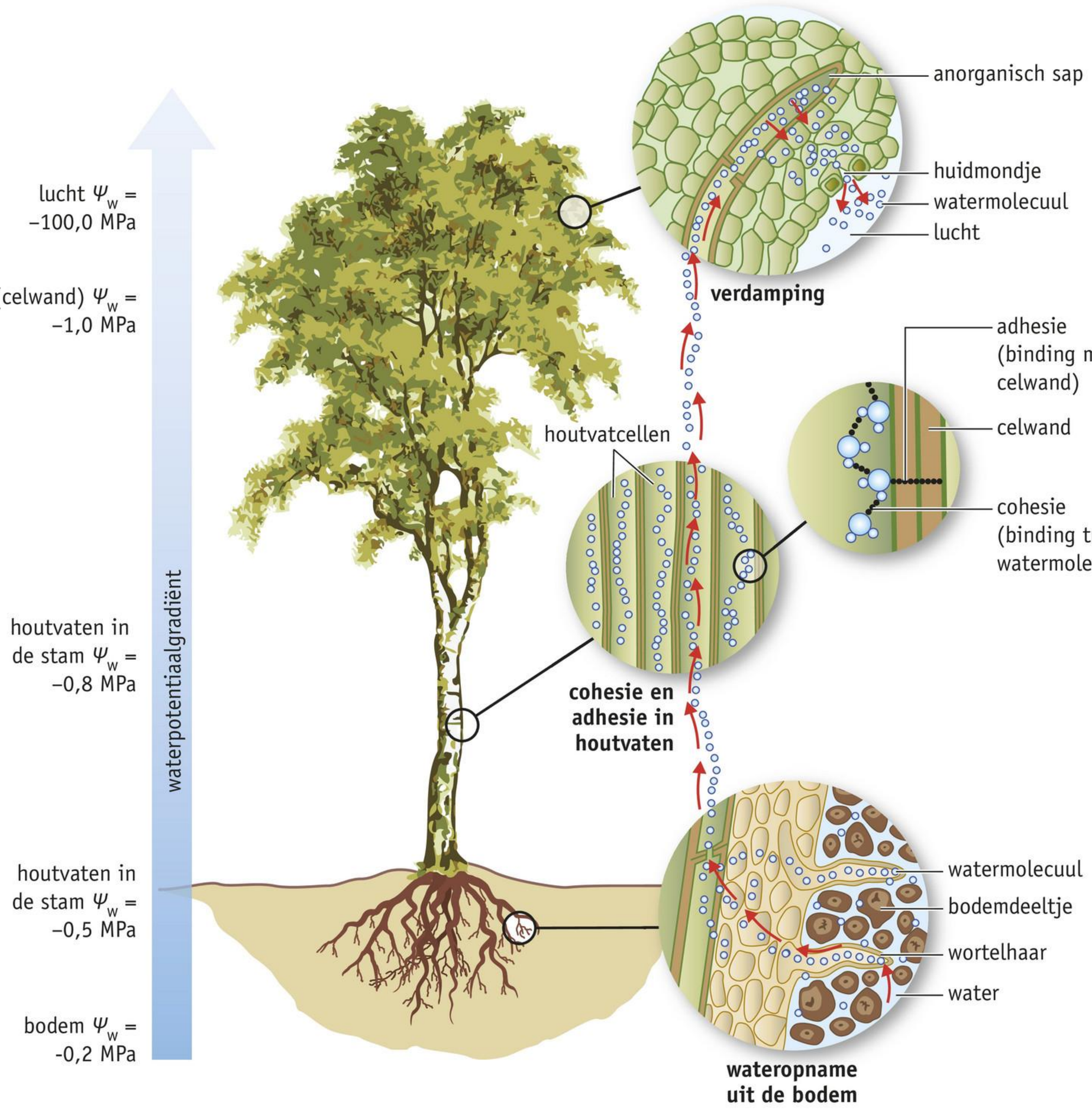
■ **Afb. 18** Huidmondjes.



1 open **2** dicht

Doordat de opwaartse sapstroom door de worteldruk maar enkele meters kan stijgen, speelt deze bij naaldbomen en bij loofbomen in de zomer een geringe rol. Het opwaartse transport van water en voedingszouten komt dan vooral tot stand door verdamping van water door de bladeren (zie afbeelding 19). In het voorjaar is de worteldruk voor loofbomen belangrijker. Er zijn dan nog geen bladeren die de opwaartse sapstroom in stand kunnen houden.

■ **Afb. 19** Anorganische sapstroom in een boom.



ORGANISCHE SAPSTROOM

Bastvaten transporteren organische producten van de fotosynthese door de gehele plant. Sap in de bastvaten bevat vooral sacharose (een disacharide). De concentratie sacharose kan soms wel 30% zijn. Daarnaast bevat bastsap ook andere stoffen, zoals voedingszouten, aminozuren en hormonen.

De sapstroom in de bastvaten kan in alle richtingen verlopen. In bladeren, maar ook in stengels wordt sacharose gemaakt uit glucose door fotosynthese en voortgezette assimilatie. Van daaruit wordt sacharose via de bastvaten vervoerd naar plaatsen waar deze stof nodig is voor de dissimilatie of voortgezette assimilatie of waar de sacharose kan worden opgeslagen. Sacharose kan bijvoorbeeld in de vorm van zetmeel worden opgeslagen in vruchten en in wortels en stengels. In het voorjaar kan zetmeel in de wortels weer worden omgezet in sacharose en worden vervoerd naar groeiende delen, zoals knoppen.

Opdrachten KENNIS

17 Een maisplant wordt na ongeveer vier maanden geoogst. Gedurende deze maanden heeft de plant minstens 60 L water opgenomen. Toch weegt de maisplant veel minder dan 60 kg.

a Wat is er met het grootste deel van het opgenomen water gebeurd?

b Geef twee andere processen waarvoor water in de maisplant is gebruikt.

c Bij mais wordt het watertransport 's nachts voornamelijk veroorzaakt door worteldruk. Leg uit hoe dat komt.

18 De grote bonte specht maakt in sommige bomen met een gladde schors kleine gaatjes van enkele millimeters diep (zie afbeelding 20). Daaruit drinkt de specht het boomsap.

a Welke twee groepen stoffen naast water bevat dit boomsap?

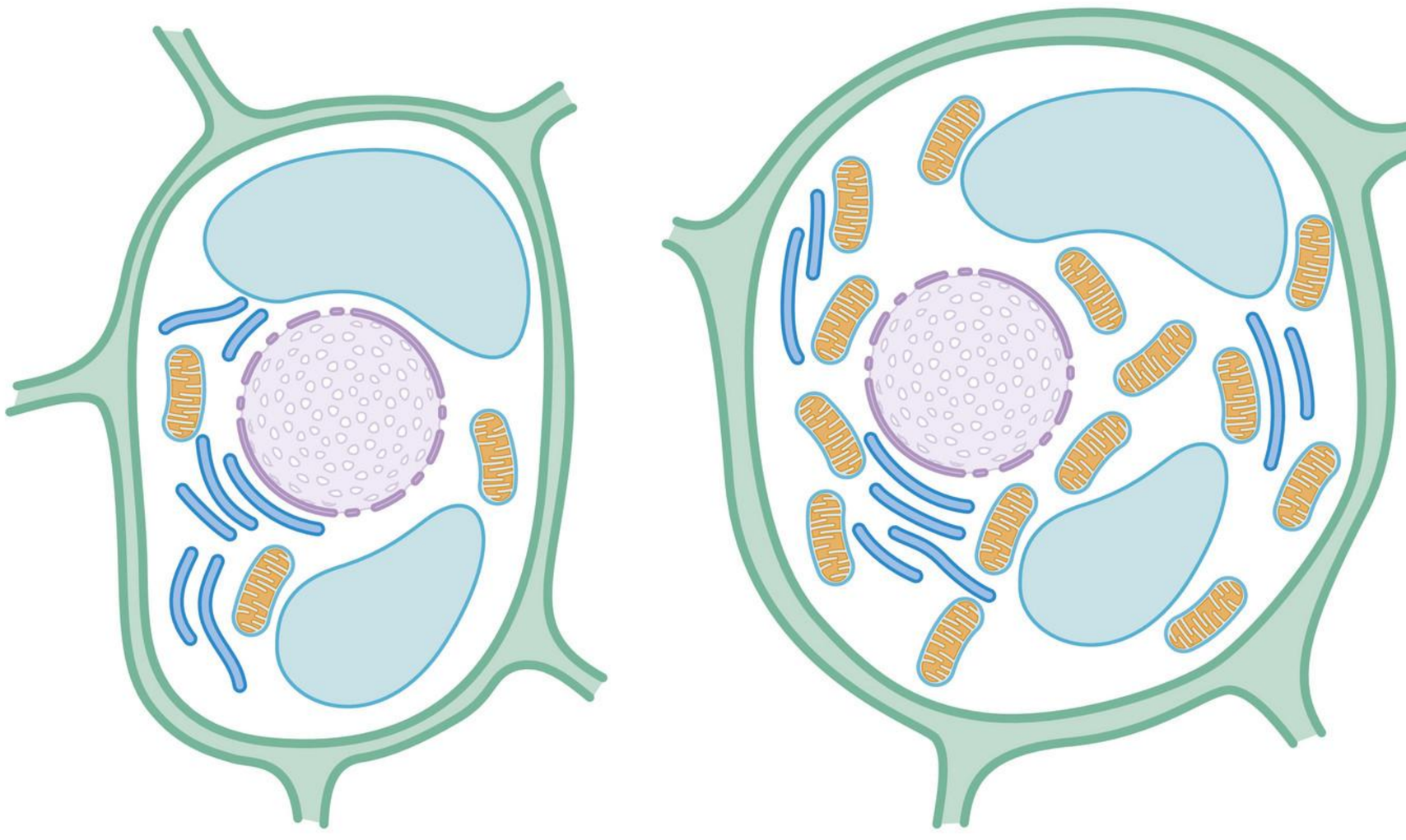
b Uit welk delen van de stam is dit vocht afkomstig?

■ **Afb. 20** Door specht gemaakte gaatjes.

Opdrachten INZICHT

19 Afbeelding 21 is een schematische tekening van twee cellen van een wortel. Welke cel is een endodermiscel? Leg uit waaraan je dit kunt zien.

■ **Afb. 21** Cellen in de wortel.



1

2

20 Een plantencel wordt in zuiver (gedestilleerd) water gelegd. De turgor in de cel is 0,3 MPa en de osmotische druk van de opgeloste deeltjes in de cel is −0,163 MPa. Leg met behulp van een berekening uit hoe het water zich verplaatst.

21 Een analist gebruikt bladluizen bij een onderzoek naar de samenstelling van bastvatsap. Bladluizen zuigen bastvatsap uit planten. Wanneer het lichaam van de bladluis wordt gescheiden van de zuigbuis (die in het blad achterblijft), wordt via de zuigbuis bastvatsap naar buiten geperst.

a Bladluizen zitten vooral aan de onderzijde van bladeren tegen de nerven en op stengels (zie afbeelding 22).
Leg uit waarom ze vooral op deze plaatsen zitten. Gebruik hiervoor *BiNaS* tabel 81E en 91A.

b Bladluizen zuigen meer bastvatsap op dan ze nodig hebben voor hun suikervoorziening. Ze persen via de anale opening overtollig suikervocht weg. Dit verschijnsel hangt samen met hun eiwitvoorziening. Leg dat uit met behulp van tabel 1.

■ **Afb. 22** Bladluizen aan de onderzijde van een blad.

Tabel 1 Samenstelling van sap uit een bastvat (gemiddeld).

Stof	Concentratie (g/L)
Sacharose	93,0
Aminozuren	5,2
Voedingszouten	4,49
Eiwitten	1,8
ATP	0,3
Plantenhormoon	0,00002
Overig	5,20998
Totaal aan droge stof	110,0

22 Onderzoeker Marcello Malpighi voerde in de zeventiende eeuw een ringwondproef uit, waarbij hij in de zomer een stuk bast rondom een takje van een boom wegsneed (zie afbeelding 23). Als gevolg hiervan verdikte het weefsel boven de ring zich.

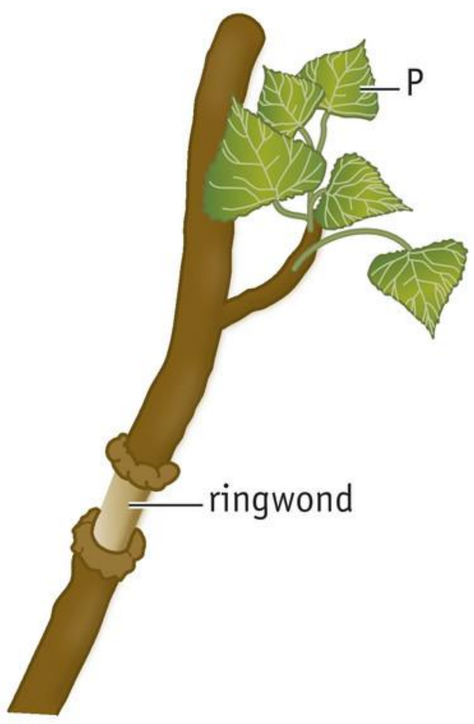
a Malpighi voerde de ringwondproef ook uit in de winter.
Vond er wel of geen verdikking boven de ring plaats? Leg je antwoord uit.

b Kunnen water en zouten uit de bodem blad P bereiken? Leg je antwoord uit.

c Leg uit waardoor het weefsel boven de ring zich verdikt en onder de ring niet.

d Fruittelers maken soms ringwonden in takken van fruitbomen. Ze krijgen daardoor grotere vruchten. Leg dat uit.

■ **Afb. 23** Ringwondproef.

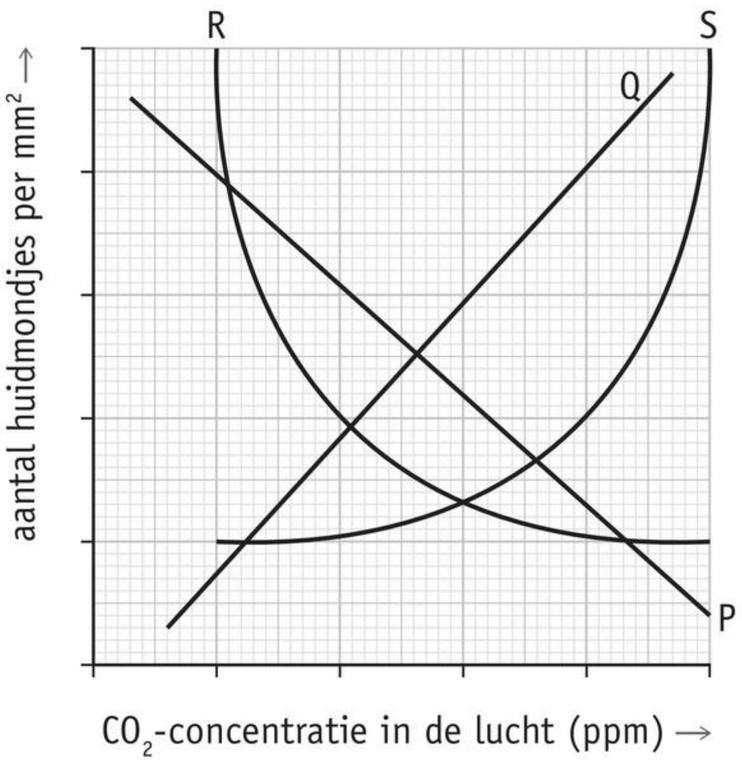


23 Friederike Wagner onderzoekt al jaren de relatie tussen het aantal huidmondjes in een blad en de CO_2-concentratie in de lucht. Het is bekend dat het aantal huidmondjes per oppervlakte-eenheid omgekeerd evenredig is met de CO_2-concentratie in de lucht.

a Geef hiervoor een verklaring.

b In afbeelding 24 is het theoretisch verband tussen de CO_2-concentratie in de lucht en het aantal huidmondjes per mm^2 weergegeven.
Welke grafieklijn geeft dit verband correct weer?

■ **Afb. 24** Verband tussen de CO_2-concentratie in de lucht en het aantal huidmondjes per mm^2.



24 Bloeding bij planten

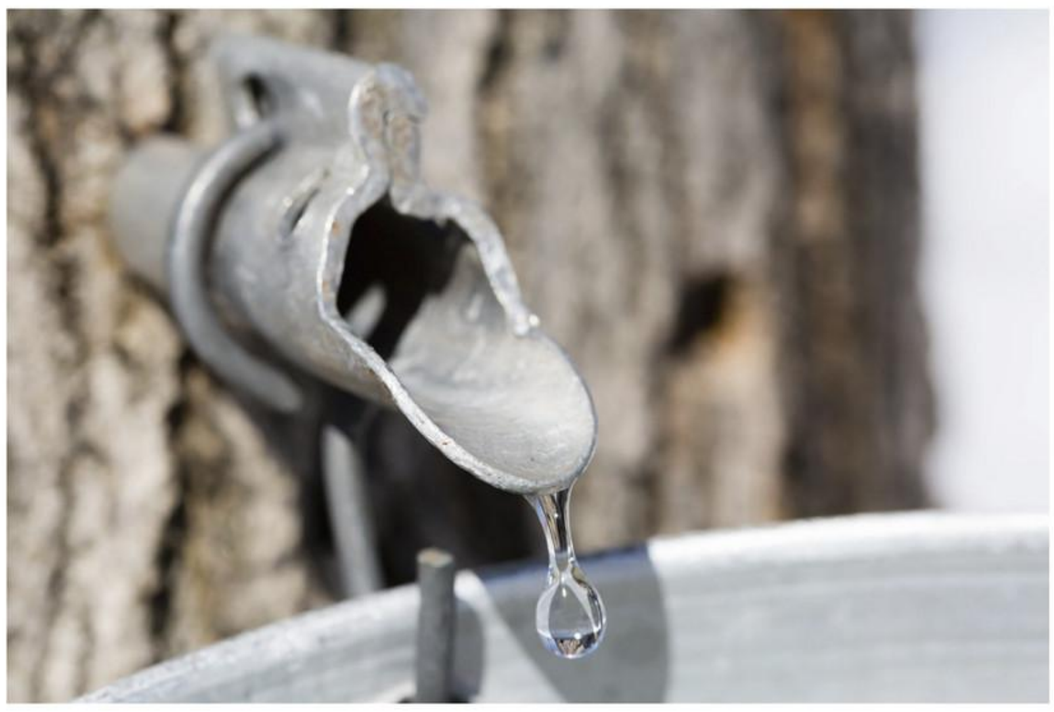
Naar: Nederlandse Biologie Olympiade 2013, vraag 7.

In de Verenigde Staten en in Canada wordt in het voorjaar, als de knoppen uitlopen, sap van de suikeresdoorn (*Acer saccharum*) gewonnen. Het suikerrijke vocht wordt verwerkt tot esdoornsiroop (zie afbeelding 25).
Een toerist koopt in de zomer van 2024 esdoornsiroop die is gemaakt van sap dat in het voorjaar van 2024 is gewonnen.

a Wanneer is de koolstof voor de suikermoleculen in deze siroop door fotosynthese vastgelegd?

b Via welke vaten is het vocht met de suikermoleculen naar buiten gestroomd?

■ **Afb. 25** Esdoornsap wordt afgetapt.



Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf.*

Context Wetenschap

MODIFICATIE VAN RIJST VOOR VOEDSELZEKERHEID

Opwarming van de aarde en een toenemende wereldbevolking leveren problemen op voor de voedselzekerheid. Genetisch gemodificeerde huidmondjes kunnen ervoor zorgen dat verschillende rijstrassen onder verschillende klimatologische omstandigheden voldoende produceren.

Door klimaatverandering worden sommige gebieden heter en droger, andere gebieden juist vochtiger. Door de stijgende zeespiegel overstromen meer landbouwgronden en dringt zout water verder het land binnen. Landbouwgewassen groeien minder goed, omdat ze niet bestand zijn tegen de verhoogde zoutconcentratie in de bodem. Onder deze veranderende omstandigheden moet er toch voldoende voedsel worden verbouwd.

Rijst is een belangrijk voedingsgewas dat meer dan de helft van de wereldbevolking dagelijks eet. Vandaar dat wetenschappers hebben geprobeerd om verschillende rijstrassen weerbaarder te maken tegen de veranderende omstandigheden door middel van genetische manipulatie. Op die manier konden ze het aantal en de grootte van de huidmondjes aanpassen.

Eerder toonden deze onderzoekers al aan dat er tot 60% minder water nodig is voor het telen van rijstrassen met minder en kleinere huidmondjes. In 2023 meldden ze dat sommige genetisch gemodificeerde planten ook beter bestand zijn tegen zout water, terwijl de opbrengst in vergelijking met andere rijstrassen even groot of hoger is.

Verschillende rassen rijst kun je genetisch zo aanpassen dat ze in allerlei verschillende klimaten goed kunnen groeien. Zo hebben de onderzoekers rijstrassen geproduceerd met minder huidmondjes die kunnen overleven op droge plekken (zie afbeelding 26) en bodems met een hoge zoutconcentratie. Rijstrassen met weinig, maar grotere huidmondjes zijn dan weer beter geschikt voor gebieden waar het extreem warm is.

■ **Afb. 26** Rijst groeit op een droge akker.

Opdrachten

25 **a** Bij veel planten liggen de huidmondjes voornamelijk aan de onderzijde van de bladeren.
Wat is hiervan het voordeel?

b Als de turgor in sluitcellen afneemt, sluit het huidmondje.
Leg uit dat dit functioneel is voor de plant.

c Planten kunnen bij hoge temperaturen last krijgen van hittestress. Ze kunnen dan moeilijk hun warmte kwijt, waardoor celprocessen minder goed verlopen. Via water kunnen planten warmte afvoeren.
Welke planten hebben bij langdurige droogte meer last van hittestress: planten met een hoge of lage huidmondjesdichtheid? Leg je antwoord uit.

26 **a** Waarom zijn de resultaten van dit onderzoek ook belangrijk voor andere voedingsgewassen?

b Welk aanvullend onderzoek moet nog worden gedaan, voordat je de genetisch gemanipuleerde rijst mag verkopen aan consumenten?

3 STOFWISSELING

LEERDOELEN

11.3.1 Je kunt uit de opname en afgifte van zuurstof en koolstofdioxide door een plant de intensiteit van de fotosynthese (koolstofassimilatie) afleiden.

11.3.2 Je kunt beschrijven hoe opslag van assimilatieproducten (organische stoffen) in planten plaatsvindt.

- Vaardigheden 6 en 7 (thema 1)
- Practicum 6

TAXONOMIE	LEERDOELEN EN OPDRACHTEN	
	11.3.1	**11.3.2**
Begrijpen	27, 28, 29a	29b, 30, 31
Toepassen	32, 35ac, 37b, 38	
Analyseren	33, 34, 35b, 37a, 39	36

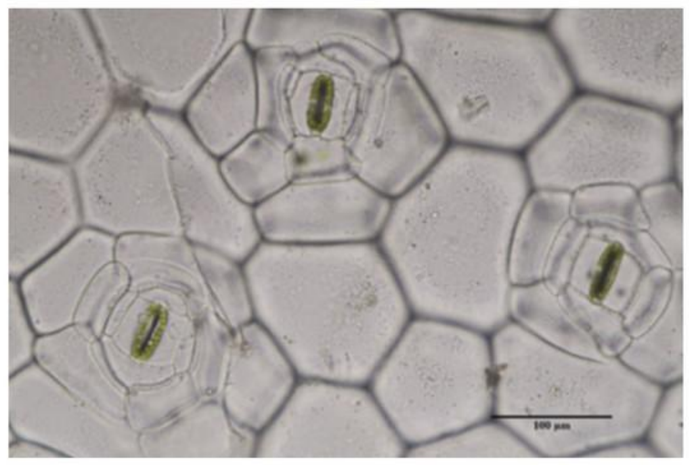
Bij droogte sluiten de huidmondjes van planten zich om water te besparen. Ze kunnen dan geen koolstofdioxide opnemen voor de fotosynthese en groeien daardoor minder hard. Bij langdurige droogte maken planten ook minder bloemen, vruchten en zaden aan.

GASWISSELING

Planten zijn autotroof. De opname en afgifte van koolstofdioxide en zuurstof door planten noem je **gaswisseling**. Planten hebben zuurstof nodig voor de verbranding (dissimilatie) en gebruiken koolstofdioxide voor de fotosynthese (koolstofassimilatie). Bij verbranding komt koolstofdioxide vrij, bij de fotosynthese produceert een plant zuurstof.

Zuurstof en koolstofdioxide worden door diffusie uitgewisseld tussen de bladcellen en de lucht via luchtholten en huidmondjes. Dat zijn kleine openingen in de opperhuid (zie afbeelding 27). Bij de meeste planten zitten de huidmondjes vooral aan de onderkant van de bladeren.

■ **Afb. 27** Huidmondjes onder de microscoop (vergroting 100×).



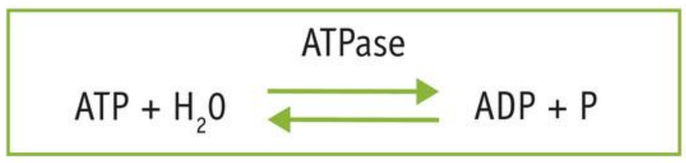
Naast koolstofdioxide hebben planten veel water nodig voor hun groei. Voor het maken van één kilogram plant is in de landbouw gemiddeld zeshonderd liter water nodig. Slechts een klein deel van het opgenomen water gebruikt een plant voor fotosynthese en celstrekking. De rest verdampt via de huidmondjes. Als tijdens zulke omstandigheden de huidmondjes zijn gesloten, beperkt de plant het waterverlies, maar ook de koolstofassimilatie.

Na de reactie laat het reactieproduct los van het actieve centrum en kan een volgende reactie plaatsvinden.

Het enzymmolecuul is na de reactie niet veranderd en kan zich weer binden aan een volgend substraatmolecuul. Enzymen zijn al in kleine hoeveelheden werkzaam. Eén molecuul van het enzym urease bijvoorbeeld kan bij kamertemperatuur per seconde tienduizend ureummoleculen omzetten.

De naam van een enzym is vaak samengesteld uit de naam van het substraat en het achtervoegsel -*ase*. Het enzym ATPase bijvoorbeeld bewerkt het substraat ATP tot de reactieproducten ADP en fosfaat (zie afbeelding 8). Bij veel enzymatische reacties kan deze reactie in twee richtingen verlopen. In de **reactievergelijking** is dit weergegeven met een dubbele pijl. De naam van het enzym staat boven de pijl(en).

■ **Afb. 8** Enzymatische evenwichtsreactie met ATPase.

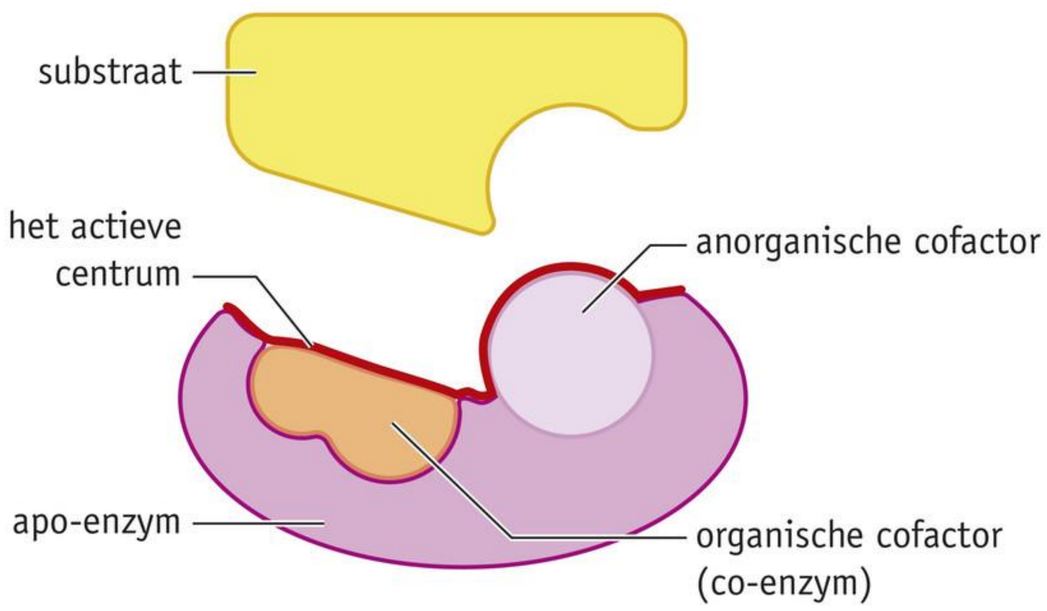


Veel enzymen hebben een organische of anorganische cofactor (hulpstof) nodig om goed te kunnen werken. Deze enzymen noem je apo-enzymen. Een organische cofactor noem je een co-enzym. Veel vitaminen en ATP zijn co-enzymen (zie afbeelding 9).

Bij het enzym ATPase is ATP zowel substraat als co-enzym. Een van de functies van ATPase is de werking als transporteiwit in de membranen van cellen en celorganellen. Het enzym transporteert actief ionen met behulp van de energie uit de omzetting van ATP in ADP en fosfaat (P_i).

Als waterstofionen via ATPase naar buiten stromen, komt juist energie beschikbaar. Deze energie wordt gebruikt voor de synthese van ATP uit ADP + P_i (fosforylering). In deze functie wordt ATPase ook wel ATP-synthase genoemd.

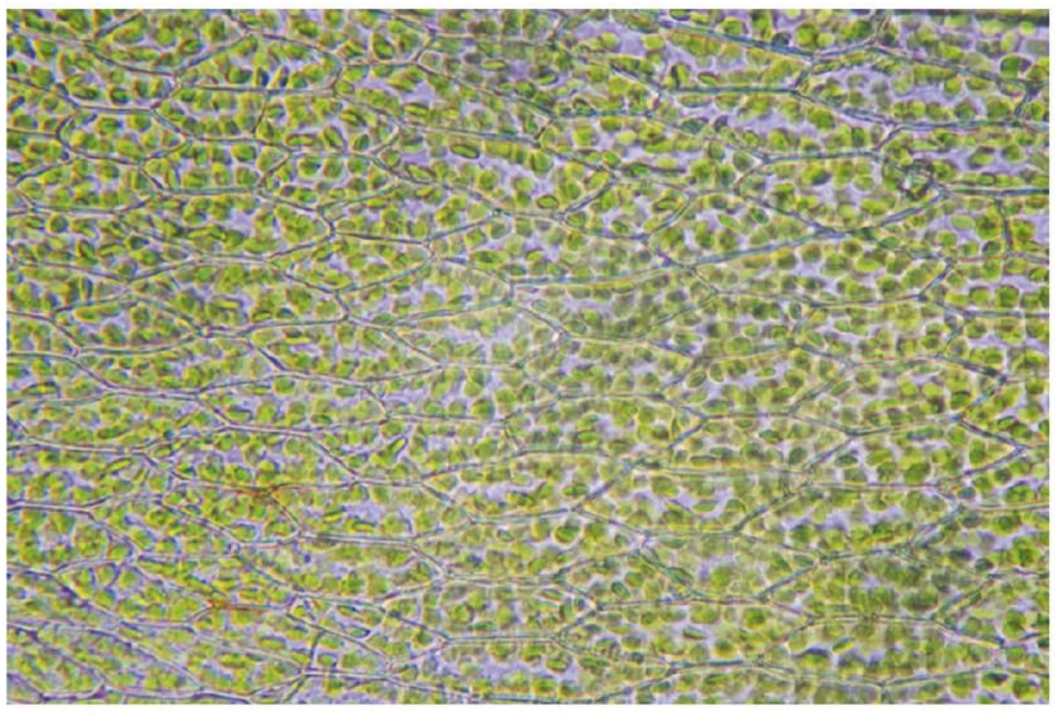
■ **Afb. 9** Een apo-enzym met twee cofactoren.



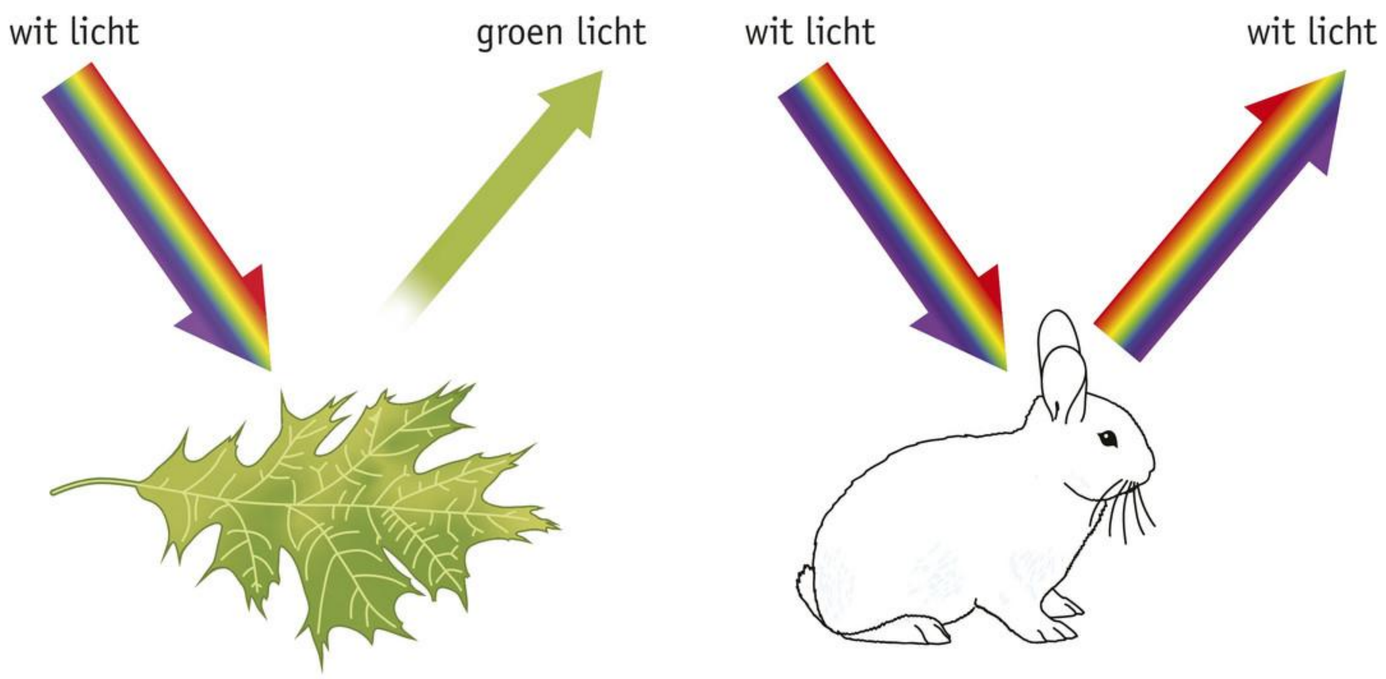
CHLOROFYL

De groene delen van planten bevatten chloroplasten (zie afbeelding 28). Deze plastiden bevatten het pigment chlorofyl. Chlorofyl absorbeert verschillende golflengten uit het zichtbare licht. Zichtbaar licht is het gedeelte van het **elektromagnetisch spectrum** dat je met het menselijk oog kunt waarnemen. Onze ogen nemen de verschillende golflengten waar als verschillende kleuren. Chlorofyl reflecteert de golflengten die je waarneemt als de kleur groen. Daarom hebben planten voor ons een groene kleur (zie afbeelding 29.1). Voorwerpen die alle kleuren reflecteren, zie je als wit (zie afbeelding 29.2).

■ **Afb. 28** Chloroplasten in cellen van een blad van een mos.



■ **Afb. 29** Absorptie en reflectie van licht.

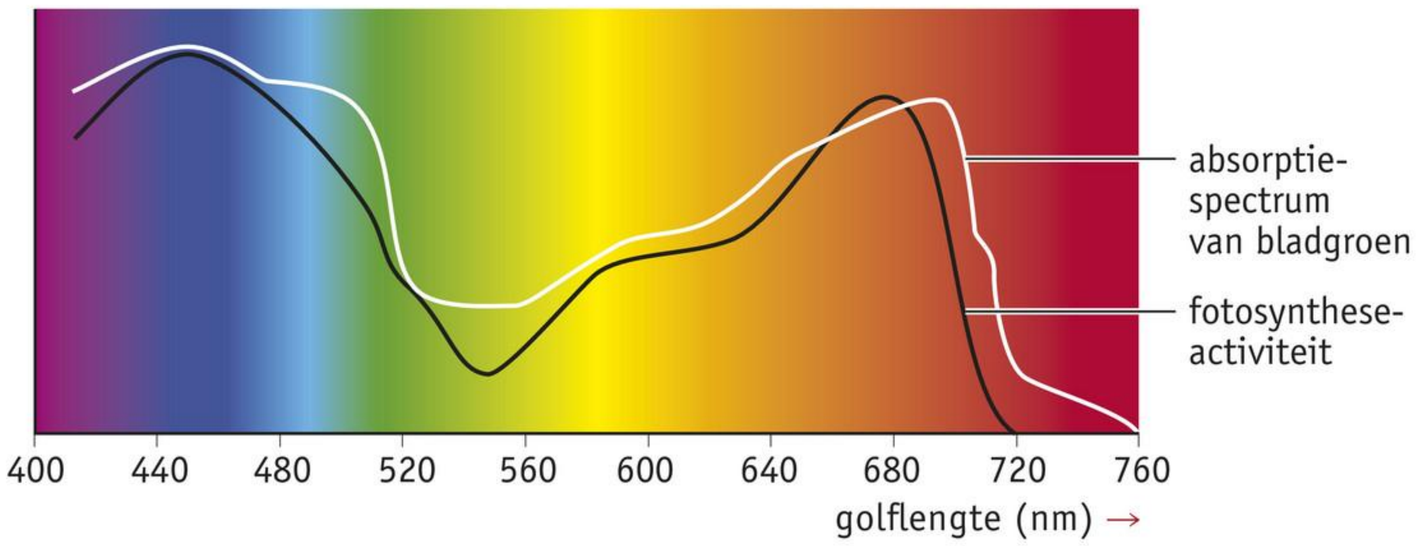


1 Alleen groen licht wordt gereflecteerd, de andere golflengten worden geabsorbeerd.

2 Alle golflengten worden gereflecteerd.

Als je licht met alle golflengten door een oplossing van chlorofyl leidt, kun je bepalen welke golflengten worden geabsorbeerd door het pigment. Met een speciaal apparaat kun je het absorptiespectrum van chlorofyl bepalen (zie afbeelding 30). Het absorptiespectrum laat zien dat chlorofyl bijna geen groen licht absorbeert (zie *BiNaS* tabel 72).

■ **Afb. 30** Absorptiespectrum van chlorofyl en de fotosyntheseactiviteit bij verschillende golflengten.



Opdrachten KENNIS

27 In afbeelding 31 zie je de doorsnede van een blad.

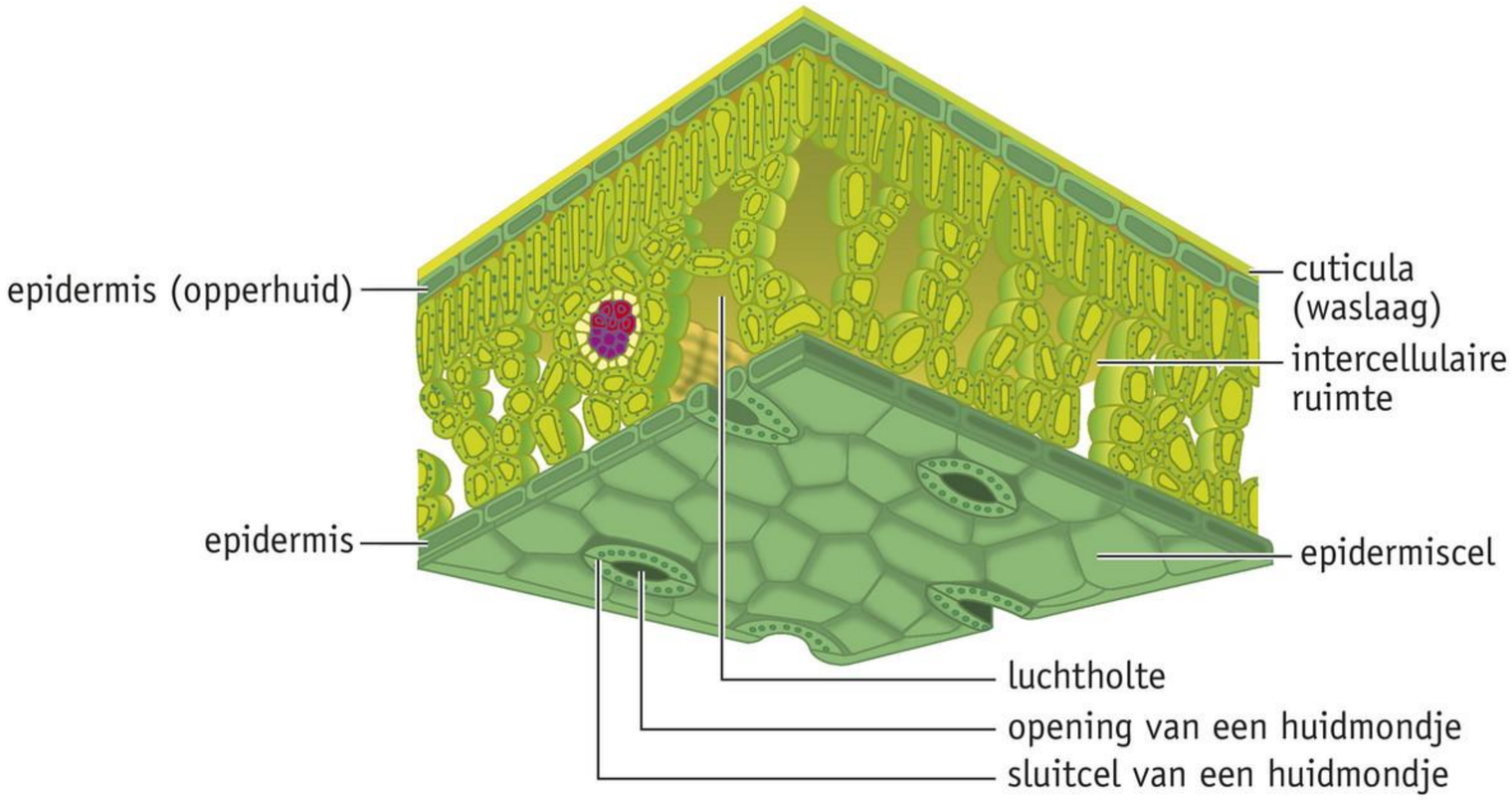
a De meeste bladeren hebben een groot gaswisselingsoppervlak. Leg dat uit met behulp van afbeelding 31.

b Leg uit dat een groot gaswisselingsoppervlak gunstig is voor de fotosynthese.

c Welke stoffen geeft een plant overdag onder normale omstandigheden af aan de lucht via de huidmondjes?

d Leg uit dat het overdag sluiten van de huidmondjes de groei van planten beperkt.

■ **Afb. 31** Doorsnede van een blad.



28 In afbeelding 30 zie je het absorptiespectrum van chlorofyl en de fotosyntheseactiviteit bij verschillende golflengten.

a Bij welke twee golflengten liggen de pieken in het absorptiespectrum van chlorofyl?

b Chlorofyl wordt ook wel ‘bladgroen’ genoemd. Leg het verband uit tussen het absorptiespectrum van chlorofyl en de naam ‘bladgroen’.

FOTOSYNTHESE VERSUS DISSIMILATIE

De intensiteit van de fotosynthese is de snelheid waarmee bij de fotosynthese glucose en zuurstof worden gevormd. Deze intensiteit wordt vaak uitgedrukt in geproduceerde milliliter O_2 per tijdseenheid of verbruikte milliliter CO_2 per tijdseenheid. Voor elke verbruikte milliliter CO_2 ontstaat precies 1 milliliter O_2. De intensiteit is afhankelijk van verschillende factoren, zoals de hoeveelheid licht en het kleurenspectrum, de beschikbare hoeveelheid koolstofdioxide en water, de temperatuur en de hoeveelheid chlorofyl.

De intensiteit van de fotosynthese wordt bepaald door de factor die het minst gunstig is: de **beperkende factor**. Als bijvoorbeeld de fotosynthese nog kan toenemen als de hoeveelheid licht toeneemt, dan is licht de beperkende factor voor de fotosynthese. Er is dan niet voldoende licht om de fotosynthese maximaal te laten verlopen.

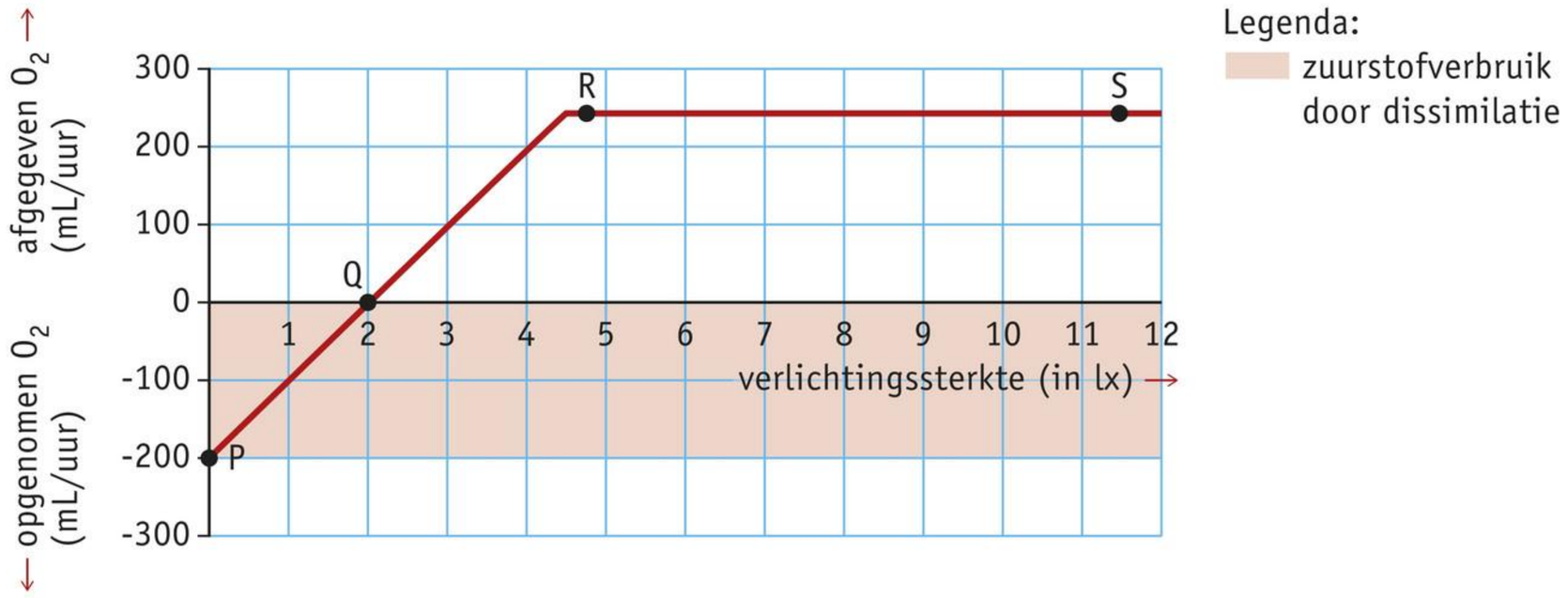
Ook de aerobe dissimilatie (verbranding) wordt beïnvloed door milieufactoren, zoals de temperatuur en de hoeveelheid zuurstof. Meestal wordt de invloed van het licht op de intensiteit van de aerobe dissimilatie buiten beschouwing gelaten. De intensiteit van de dissimilatie wordt meestal uitgedrukt in geproduceerde milliliter CO_2 per tijdseenheid of verbruikte milliliter O_2 per tijdseenheid.

In afbeelding 32 zijn in een diagram de resultaten van zuurstofmetingen weergegeven. Ze zijn gedaan bij een plant die in een afgesloten ruimte stond. Alleen de verlichtingssterkte varieerde gedurende het experiment. Met behulp van de resultaten kunnen onderzoekers de intensiteit van de fotosynthese bepalen bij de verschillende verlichtingssterkten. Je kunt de intensiteit van de fotosynthese niet rechtstreeks bepalen, doordat een deel van de zuurstof die vrijkomt bij de fotosynthese weer wordt verbruikt bij de aerobe dissimilatie. Alleen de zuurstof die de plant zelf niet nodig heeft wordt afgegeven. De gemeten zuurstofproductie is dus kleiner dan de werkelijk geproduceerde hoeveelheid zuurstof. ’s Nachts, in het donker, vindt geen fotosynthese plaats. Als je bepaalt hoeveel zuurstof de plant ’s nachts bij de aerobe dissimilatie verbruikt, kun je de zuurstofproductie door de fotosynthese afleiden. Je gaat er daarbij van uit dat de dissimilatie overdag en ’s nachts gelijk is. Het gemeten zuurstofverbruik door dissimilatie tel je op bij de zuurstofafgifte tijdens fotosynthese. Deze waarde is de maat voor de intensiteit van de fotosynthese.

intensiteit fotosynthese = opname O_2 (nodig voor dissimilatie, te bepalen in het donker)
+ afgifte O_2 (in het licht)

Als er netto geen zuurstof wordt afgegeven, betekent dit dat de intensiteit van de fotosynthese gelijk is aan de intensiteit van de dissimilatie (compensatiepunt). Er wordt evenveel zuurstof geproduceerd als verbruikt. In plaats van de zuurstofopname en -afgifte, kun je ook de opgenomen of afgegeven hoeveelheid koolstofdioxide van de plant bepalen.

■ **Afb. 32** Invloed van de verlichtingssterkte op de fotosynthese.

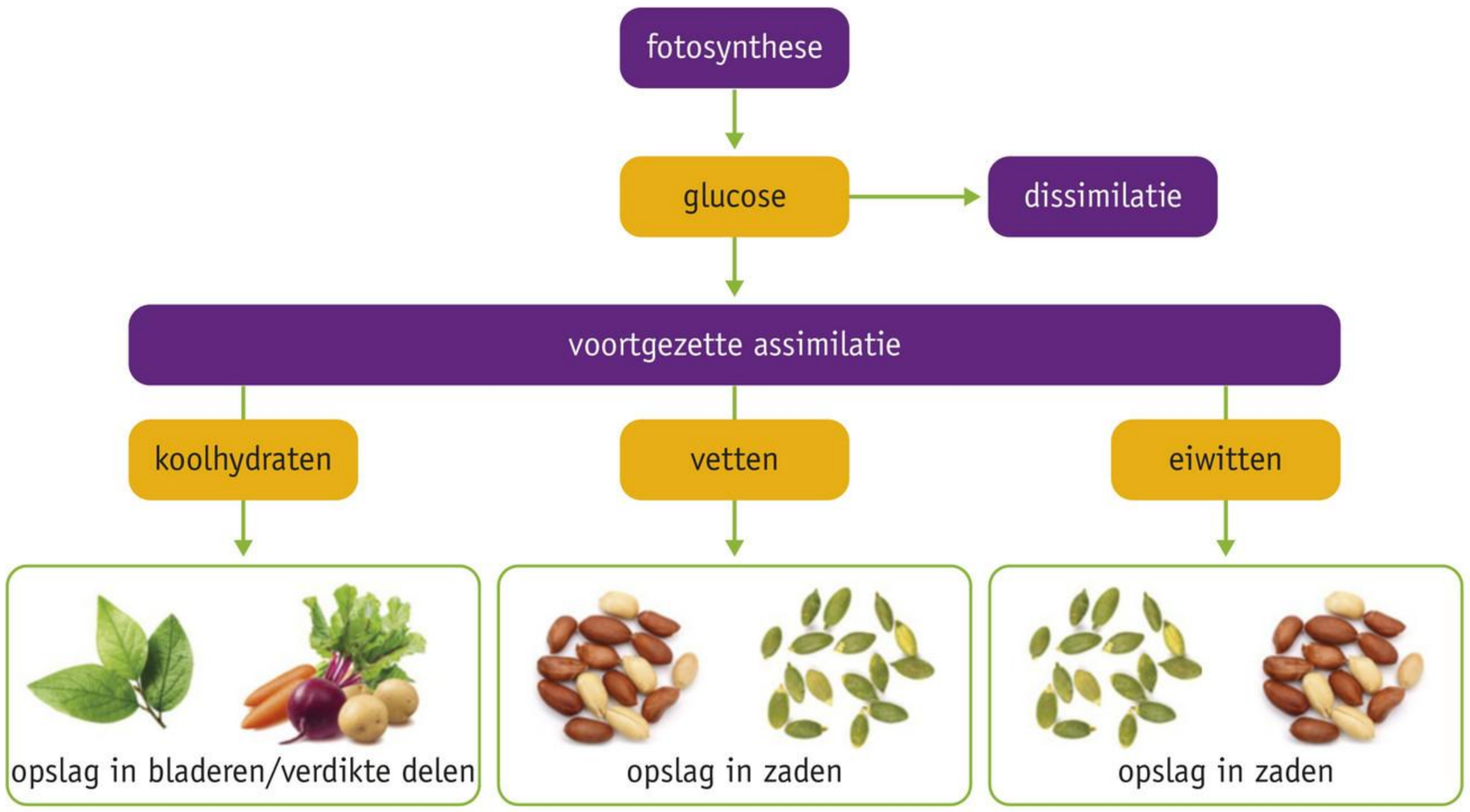


OPSLAG VAN ASSIMILATIEPRODUCTEN

Overdag vormt een plant meestal meer glucose dan hij bij dissimilatie verbruikt. Het overschot aan glucose zet de plant om in koolhydraten, eiwitten en vetten en gebruikt hij voor opbouw, herstel en vorming van reservestoffen. Planten slaan reservestoffen vooral op in verdikte, ondergrondse delen (zoals wortels, knollen, bollen) en zaden. In de verdikte delen slaan ze vooral koolhydraten op. In de zaden vooral eiwitten en vetten (zie afbeelding 33).

Een groot deel van de gevormde glucose wordt omgezet in zetmeel en tijdelijk opgeslagen in bladcellen. Door de omzetting in de polysacharide zetmeel wordt voorkomen dat de osmotische waarde van de bladcellen te veel stijgt (zetmeel is slecht oplosbaar in water). Vooral 's nachts wordt het tijdelijk opgeslagen zetmeel omgezet in sacharose (biet- of rietsuiker) en via bastvaten afgevoerd naar andere delen van de plant, waar het wordt verbruikt bij de dissimilatie of wordt opgeslagen als reservestof.

■ **Afb. 33** Stofwisseling en opslag van assimilatieproducten in planten.



Opdrachten KENNIS

29 **a** Bekijk het diagram in afbeelding 32.
Bij welke verlichtingssterkte ligt in dit experiment het compensatiepunt bij de plant?
Leg je antwoord uit.

b In het diagram van afbeelding 32 zijn vier punten weergegeven met P, Q, R en S.
Tussen welke punten is de lichtsterkte de beperkende factor voor fotosynthese?

30 Ook dieren slaan overtollige glucose op in de vorm van een polysacharide.
Met welke polysacharide bij dieren is zetmeel te vergelijken?

31 Fruittelers van appels, peren en pruimen passen in de maanden mei en juni vruchtdunning toe. Hierbij wordt een deel van de vruchten vroegtijdig verwijderd van de fruitboom (zie afbeelding 34). Dit wordt gedaan om grotere vruchten te oogsten, zonder dat de totale productie te veel daalt. Grotere vruchten leveren de teler meer geld op.

a Leg uit waardoor vruchten aan een fruitboom na vruchtdunning groter worden.

b Niet alle beschikbare koolhydraten gaan naar het fruit. Leg dat uit.

c Bij vruchtdunning worden twintig tot dertig bladeren per vrucht aan dezelfde tak aangehouden. Als er bijvoorbeeld vijftig bladeren aan een tak zitten, laat de fruitteler twee vruchten groeien. Eventuele overige vruchten worden verwijderd.
Leg uit waarom wordt gekeken naar het aantal bladeren per vrucht aan dezelfde tak.

■ **Afb 34** Vruchtdunning bij appels.

Opdrachten INZICHT

32 Klimaatverandering heeft naast alle negatieve effecten ook positieve effecten op planten.

a Leg uit hoe de toename van een bepaald broeikasgas voordelig kan zijn voor een plant.

b Wetenschappers waarschuwen dat een verdere stijging van broeikasgassen geen onbeperkte toename van plantengroei betekent.
Leg uit waarom de groei op een bepaald moment niet verder toeneemt.

c Onder invloed van milieuomstandigheden kunnen fenotypen van planten verschillen, dat geldt bijvoorbeeld voor de hoeveelheid huidmondjes per oppervlakte-eenheid. Dat aantal is omgekeerd evenredig met de CO_2-concentratie in de lucht.
Is de dichtheid van huidmondjes in bladeren per oppervlakte-eenheid de laatste tweehonderd jaar over het algemeen toe- of afgenomen? Leg je antwoord uit.

33 In een experiment wordt de invloed van de temperatuur op de intensiteit van de fotosynthese onderzocht. De resultaten zijn weergegeven in afbeelding 35.

a Geef in een diagram het verband weer tussen de hoeveelheid opgenomen CO_2 in het licht en de temperatuur. Geef in hetzelfde assenstelsel ook het verband weer tussen de hoeveelheid afgegeven CO_2 in het donker en de temperatuur.

b Geef in een diagram het verband weer tussen de hoeveelheid CO_2 die bij de fotosynthese wordt verbruikt en de temperatuur.

c De conclusie van het experiment ontbreekt. Geef aan wat de conclusie is en of je de hypothese moet aannemen of verwerpen.

Afb. 35 De invloed van de temperatuur op de intensiteit van de fotosynthese.

Onderzoek	**Opname en afgifte van CO_2 bij verschillende temperaturen**
Inleiding	De intensiteit van de fotosynthese is afhankelijk van verschillende factoren. In dit experiment wordt de invloed van de temperatuur op de intensiteit van de fotosynthese onderzocht.
Onderzoeksvraag	Wat is het verband tussen de temperatuur en de intensiteit van de fotosynthese?
Hypothese	Hoe hoger de temperatuur, hoe groter de intensiteit van de fotosynthese.
Experiment	De hoeveelheid opgenomen koolstofdioxide wordt gemeten in het licht en de hoeveelheid afgegeven koolstofdioxide wordt gemeten in het donker.
Resultaat	
Conclusie	

mg CO_2/uur	**Temperatuur (°C)**						
	7,0	10,0	15,0	19,0	22,0	28,0	31,0
Opname in licht	1,3	2,3	2,8	3,1	2,8	2,5	1,8
Afgifte in donker	0,3	0,6	0,7	1,2	1,8	2,1	2,7

34 In de winter is de luchtkwaliteit in een schoollokaal vaak niet al te best. Niet verwonderlijk met soms dertig personen in een relatief kleine en sterk verwarmde ruimte. Een docent biologie heeft daarom veel planten in zijn lokaal staan, volgens hem verbeteren die de luchtkwaliteit.
Geef twee mogelijke manieren waarop planten de luchtkwaliteit in het lokaal kunnen verbeteren.

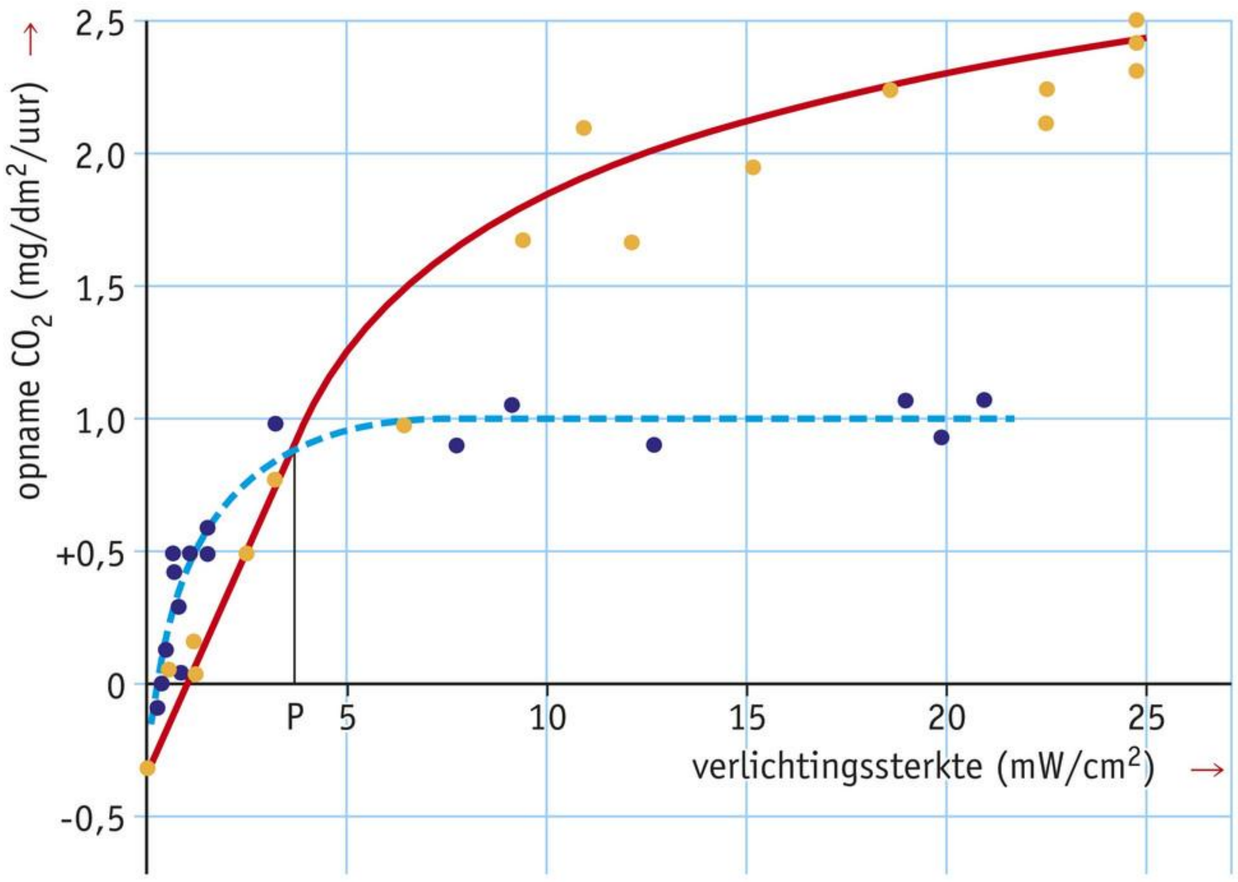
35 Bepaalde bomen hebben zonnebladeren en schaduwbladeren. Zonnebladeren hebben zich ontwikkeld uit knoppen waarop veel licht viel en schaduwbladeren uit knoppen in de schaduw. In een experiment wordt bij een beuk bij beide typen bladeren het verband bepaald tussen de verlichtingssterkte en de opname of afgifte van koolstofdioxide. De resultaten zijn weergegeven in het diagram van afbeelding 36.

a Welke grafieklijn in afbeelding 36 hoort bij het zonneblad: de rode of de gestippelde blauwe? Leg je antwoord uit.

b Is bij verlichtingssterkte P de zuurstofproductie in de twee typen bladeren gelijk? Leg je antwoord uit.

c Is een verlichtingssterkte van 10 mW/cm^2 een beperkende factor voor de fotosynthese in zonnebladeren? En in schaduwbladeren?

■ **Afb. 36** Invloed van de verlichtingssterkte op de fotosynthese.



Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf*.

Context Leefwereld

FOTOSYNTHESE VERBETEREN VOOR VOEDSEL EN BRANDSTOF

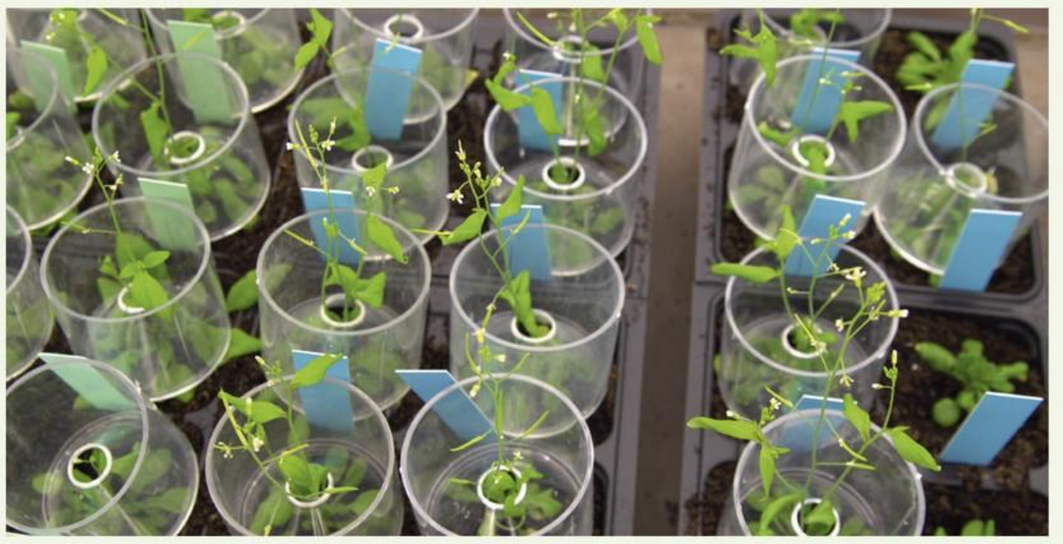
Fotosynthese is essentieel voor het leven op aarde. De chloroplasten in plantencellen die glucose en zuurstof maken, worden dan ook al decennialang onderzocht. Door de sterk toenemende wereldbevolking ontstaan problemen als voedseltekort, uitputting van de aarde en klimaatverandering. Onderzoek naar fotosynthese is daardoor relevanter dan ooit.

De fotosynthese van gewassen is niet erg efficiënt, slechts een fractie van het zonlicht wordt gebruikt. Een verdubbeling van de efficiëntie kan voedselzekerheid bieden. Onderzoekers proberen een efficiënter proces te bereiken door middel van veredeling en genetische manipulatie, en door vervanging van organellen. Een hierbij veelgebruikte plant is de zandraket (*Arabidopsis thaliana*, zie afbeelding 37).

Er wordt ook onderzoek gedaan naar kunstmatige fotosynthese voor de productie van duurzame brandstoffen. Wereldwijd zijn er diverse experimenten om water en koolstofdioxide met behulp van zonlicht om te zetten in brandstoffen, maar vooralsnog blijft het bij het nabootsen van bepaalde elementen van de fotosynthese. Diverse wetenschappers zijn erin geslaagd om water te splitsen in waterstof en zuurstof op een zogenaamd fotokatalytisch paneel dat wordt belicht door de zon. Momenteel is dit nog niet efficiënter dan de productie van waterstof met behulp van elektrolyseapparaten en groene stroom.

De volgende stap in de fotosynthese is het maken van een organisch molecuul met behulp van koolstofdioxide. Ook deze stap wisten onderzoekers succesvol te zetten. Op uiteenlopende manieren werd koolstofdioxide uit de lucht gehaald en uiteindelijk werd er vooral methanol geproduceerd.

■ **Afb. 37** De zandraket wordt gebruikt bij onderzoek naar het vervangen van chloroplasten.



Opdrachten

36 Hoe kan optimalisatie van het fotosynthese-proces bijdragen aan vermindering van het voedseltekort, zonder het milieu extra te belasten?

37 Voor optimalisatie van het fotosyntheseproces wordt onder andere gebruikgemaakt van veredeling en genetische manipulatie.

a Leg uit hoe onderzoekers met behulp van veredeling gewassen met een meer optimale fotosynthese kunnen verkrijgen.

b Noteer een voorbeeld van een gen dat onderzoekers genetisch zouden kunnen manipuleren om de fotosynthese te optimaliseren.

38 Er wordt onderzoek gedaan naar de intensiteit van de fotosynthese per gewassoort. Gewassen met een hogere fotosynthese-activiteit zou je meer kunnen inzetten voor de voedselproductie.
Welke factoren moeten in ieder geval gelijk zijn om de intensiteit van de fotosynthese tussen verschillende soorten gewassen te kunnen vergelijken?

39 Leg uit dat zowel kunstmatige fotosynthese als optimalisatie van de natuurlijke fotosynthese direct kan bijdragen aan een vermindering van het versterkte broeikaseffect.

4 VOORTPLANTING (SE)

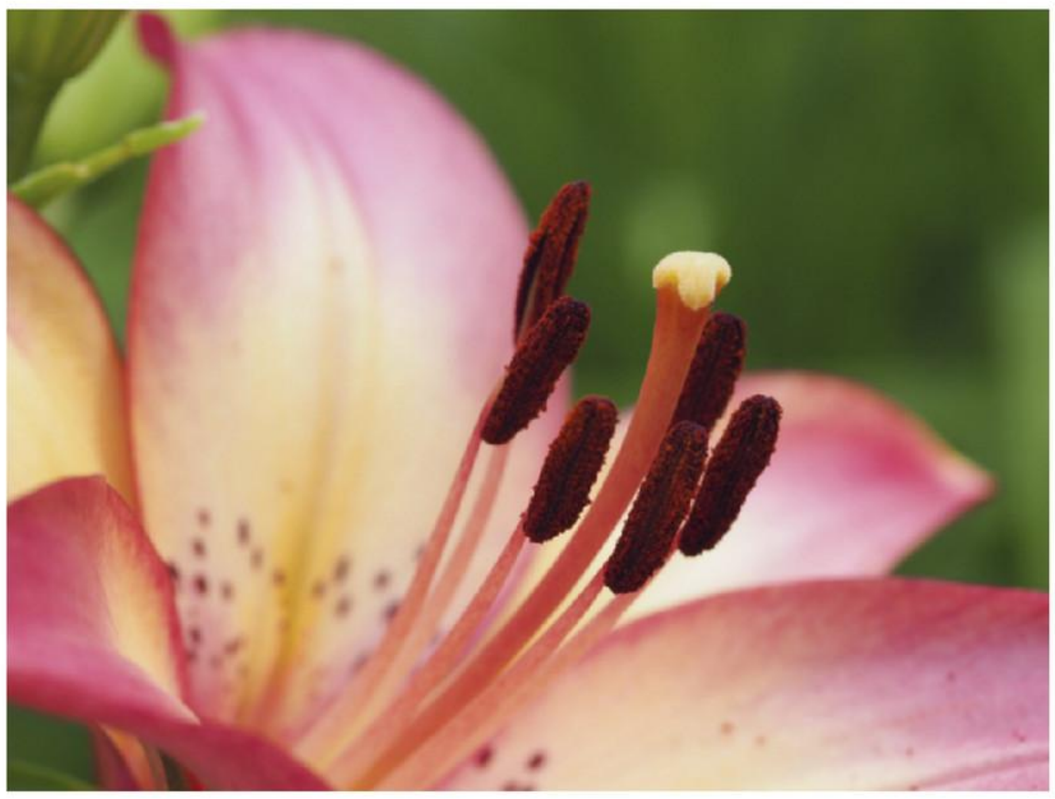
LEERDOEL

11.4.1 Je kunt verschillende manieren van voortplanting bij planten beschrijven.

TAXONOMIE	LEERDOEL EN OPDRACHTEN
	11.4.1
Begrijpen	40, 41, 42, 43
Toepassen	44b, 47, 48, 51, 54
Analyseren	44a, 45, 46, 49, 50, 52, 53

Geslachtelijke voortplanting kost planten veel meer energie dan ongeslachtelijke voortplanting, maar de eerste vorm levert nakomelingen op met een grotere genetische variatie. Omdat planten op één plek zijn geworteld en niet op pad kunnen om een partner te vinden, hebben ze slimme manieren ontwikkeld om hun voortplantingssucces te verzekeren. De meerderheid van de zaadplanten heeft bijvoorbeeld bloemen met mannelijke én vrouwelijke geslachtscellen.

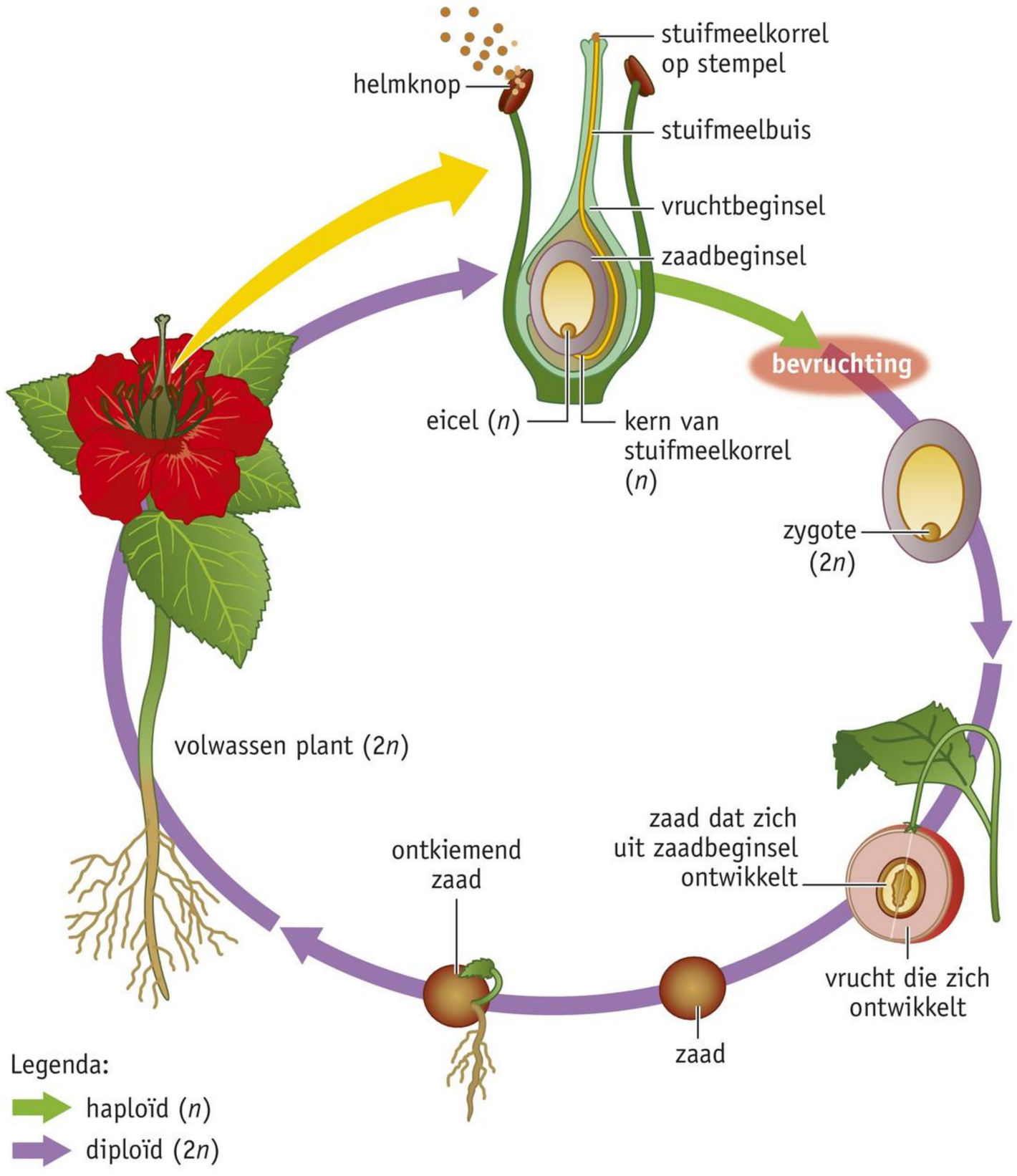
■ **Afb. 38** Meeldraden (mannelijke geslachtsorgaan) en stamper (vrouwelijke geslachtsorgaan) in dezelfde bloem.



GESLACHTELIJKE VOORTPLANTING (SE)

Bij geslachtelijke voortplanting van zaadplanten hebben bloemen een belangrijke functie. De levenscyclus van een zaadplant na geslachtelijke voortplanting zie je in afbeelding 39.

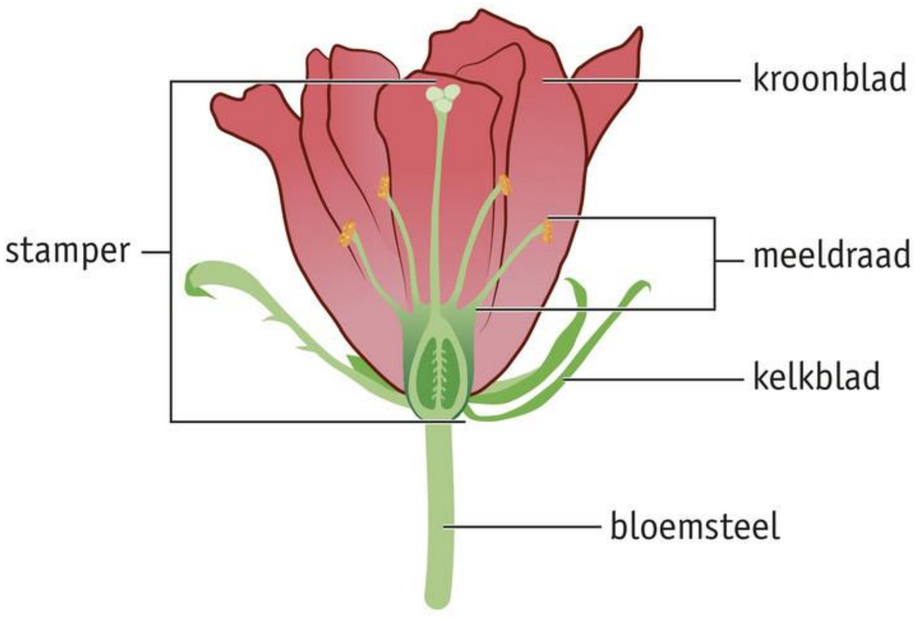
■ **Afb. 39** Levenscyclus van een zaadplant.



De **meeldraden** en **stamper**(s) zijn respectievelijk de mannelijke en vrouwelijke voortplantingsorganen (zie afbeelding 40). De meeste bloemen bezitten meeldraden en een stamper. Zo'n bloem noem je tweeslachtig. Er zijn ook bloemen die alleen meeldraden of alleen een stamper hebben. Zo'n bloem noem je eenslachtig.

Er is veel variatie in de vorm, afmeting en kleur van bloemen. De verschillen hebben vaak te maken met de manier waarop bloemen worden bestoven.

■ **Afb. 40** Model van een bloem.



ACTIVERINGSENERGIE

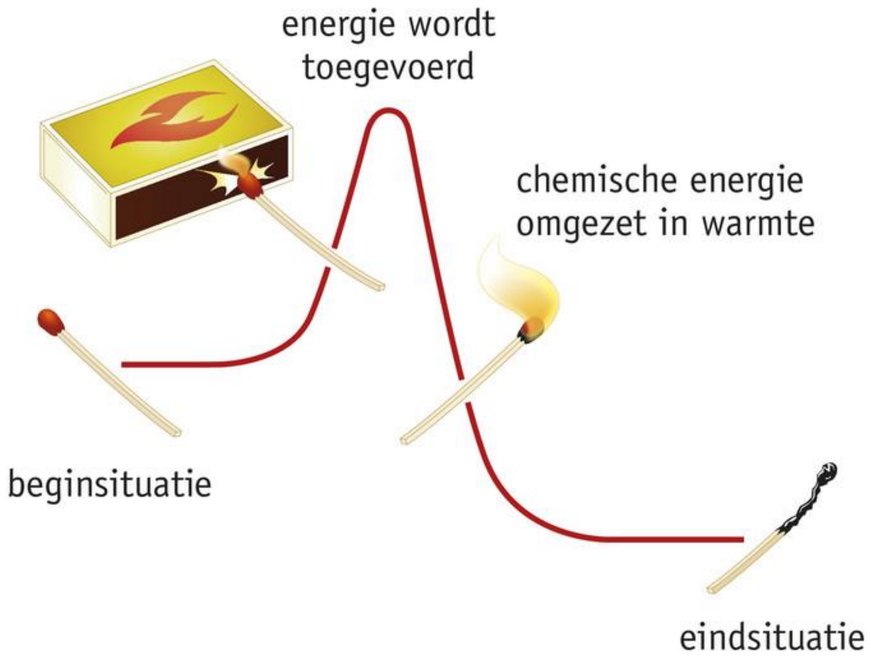
Om een **chemische reactie** op gang te brengen, is er activeringsenergie nodig. Deze hoeveelheid energie is groter dan de energiedrempel van de reactie. De energie die bij een reactie vrijkomt, noem je de reactie-energie.

Bij een lage temperatuur bewegen moleculen traag, dus de kinetische energie is laag. Bij botsingen tussen moleculen kan kinetische energie worden omgezet in chemische energie en vindt een reactie plaats. Bij lage temperaturen kan de energie van de moleculen lager zijn dan de energiedrempel, en dus te laag om een reactie op gang te brengen.

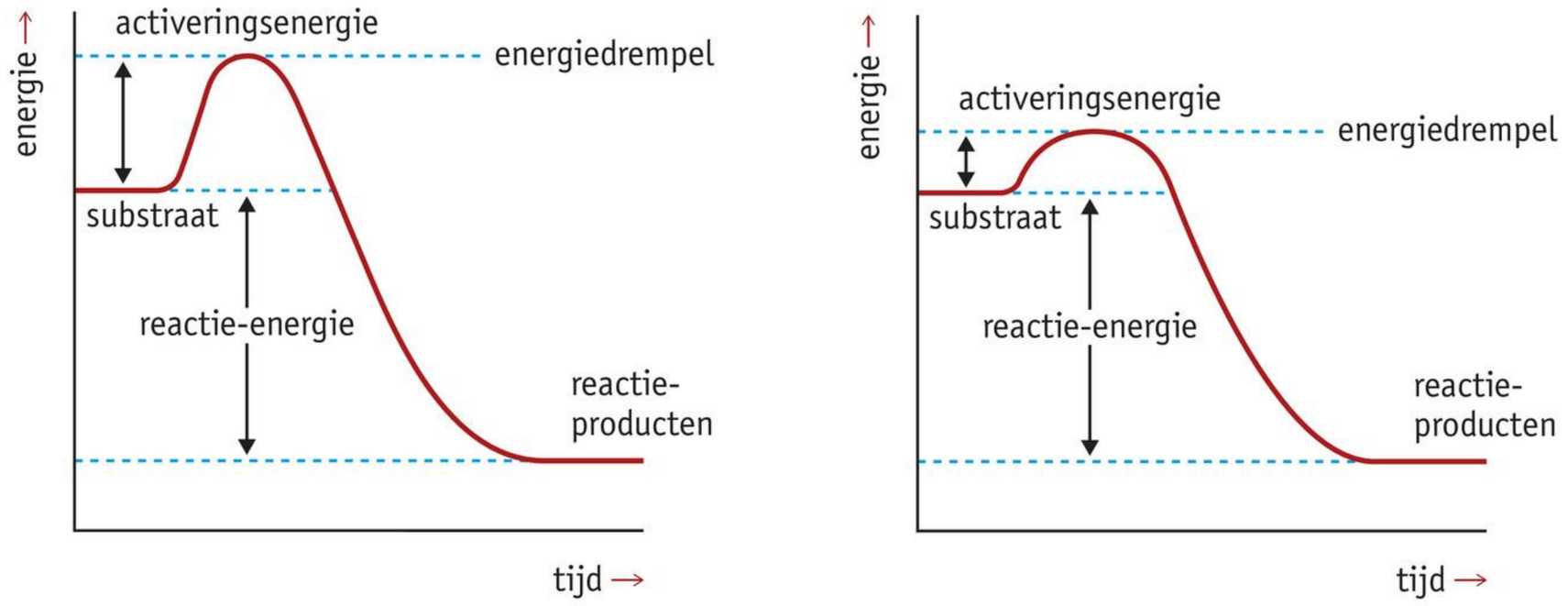
Om een lucifer te ontsteken, strijk je de lucifer langs de ruwe strip van het doosje. De energiedrempel wordt overschreden en er ontstaat warmte. Er is genoeg activeringsenergie en de lucifer gaat branden (zie afbeelding 10).

Bij veel stofwisselingsprocessen is de temperatuur in de cel te laag om voldoende activeringsenergie te leveren om de energiedrempel te halen (zie afbeelding 11.1). Door enzymen wordt de energiedrempel van de reactie verlaagd, zodat er minder activeringsenergie nodig is (zie afbeelding 11.2). De reactie kan nu wel bij de temperatuur in de cel plaatsvinden. In afbeelding 11 komt niet alle energie van de verbroken bindingen van het substraat in de reactieproducten terecht. Er komt dus energie vrij. De werking van het enzym heeft geen invloed op de hoeveelheid vrijkomende reactie-energie.

■ **Afb. 10** Activeringsenergie en reactie-energie bij het ontsteken van een lucifer.



■ **Afb. 11** Een enzym verlaagt de energiedrempel.

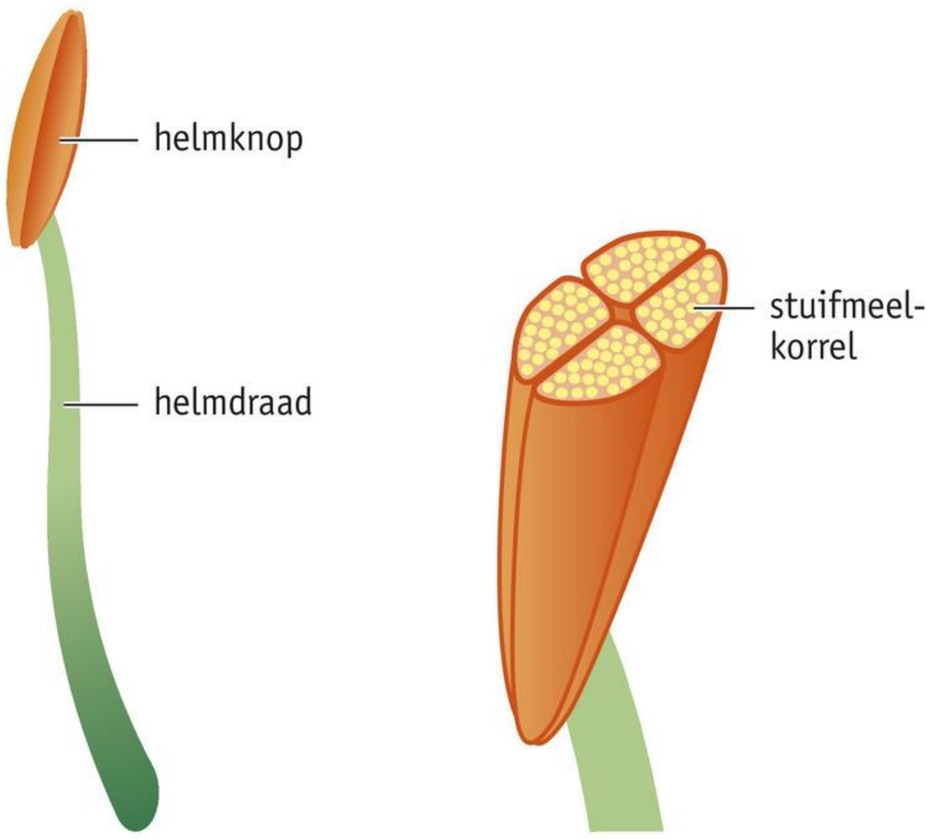


1 zonder enzym

2 met enzym

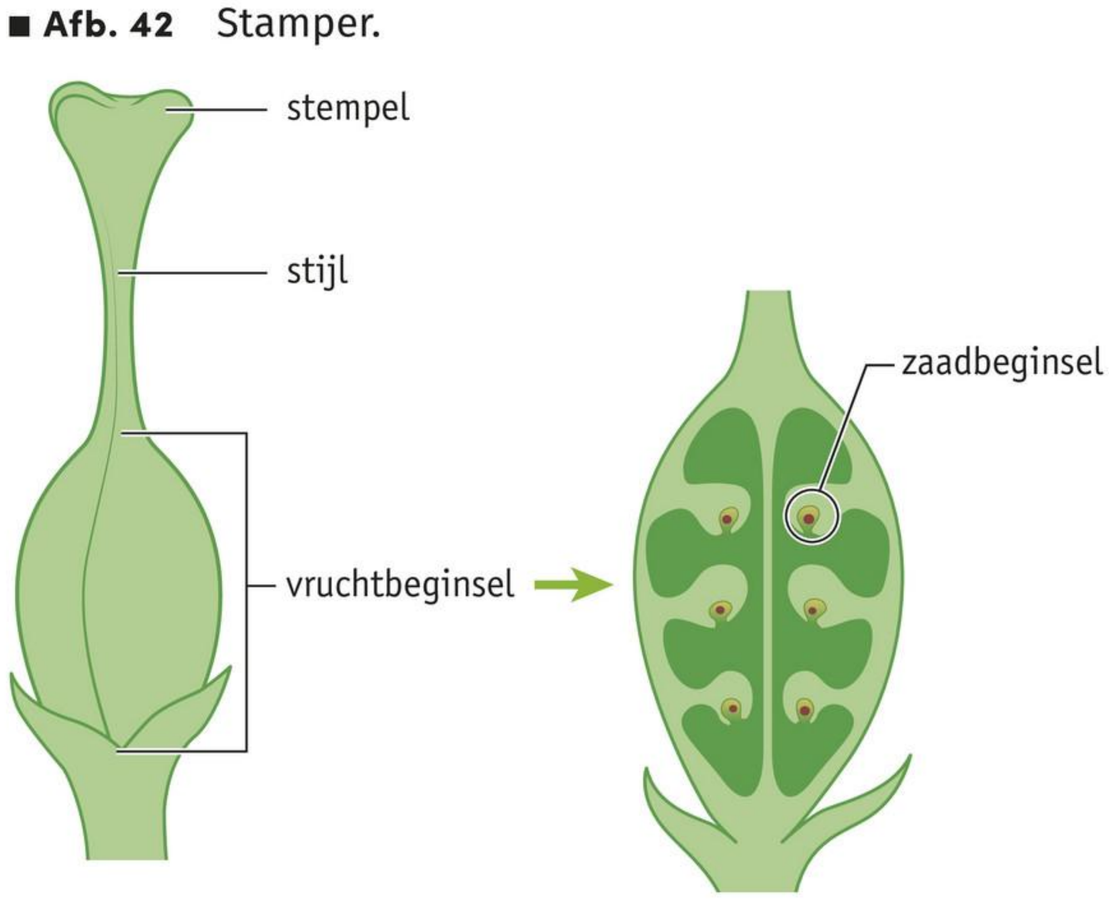
In de helmknoppen aan het uiteinde van meeldraden vindt **meiose** plaats. De haploïde cellen die hierbij ontstaan, ontwikkelen zich tot **geslachtscellen**: de stuifmeelkorrels (pollen, zie afbeelding 41). In het vruchtbeginsel van een stamper bevinden zich een of meer zaadbeginsels (zie afbeelding 42). In elk zaadbeginsel ontstaat na meiose één haploïde eicel.

■ **Afb. 41** Meeldraad.



1 buitenaanzicht **2** doorgesneden helmknop

■ **Afb. 42** Stamper.

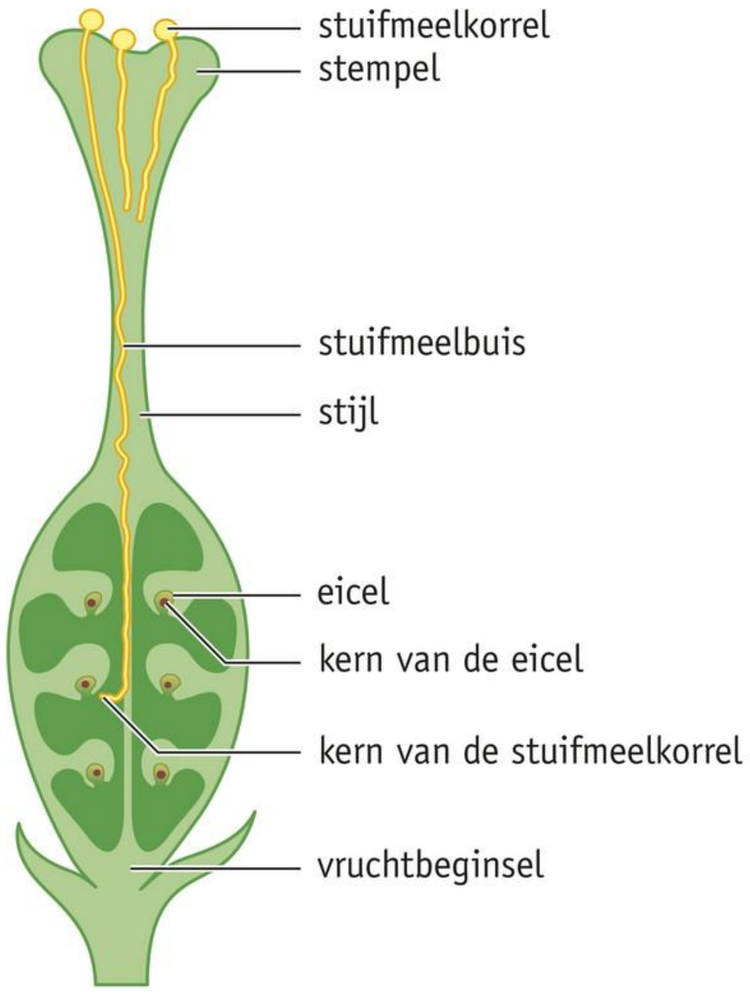


1 buitenaanzicht **2** vruchtbeginsel (doorsnede)

Bij de bestuiving komen stuifmeelkorrels op de stempel terecht. Daarna groeit er uit de stuifmeelkorrel een stuifmeelbuis door de stijl naar een zaadbeginsel (zie afbeelding 43). Bij de bevruchting versmelt de kern van de stuifmeelkorrel met de kern van de eicel waardoor een diploïde cel ontstaat: een zygote. Na de bevruchting ontwikkelen zich zaden uit de zaadbeginsels en een vrucht uit het vruchtbeginsel. Een vrucht kan dus meerdere zaden bevatten. Een **zaad** bestaat uit een **kiem** (het embryo) en reservevoedsel. Uit de kiem kan een nieuw plantje groeien als het zaad op een geschikte plek in de bodem terechtkomt.

Zowel abiotische factoren (wind of water) als biotische factoren (dieren) zorgen voor de verspreiding van stuifmeelkorrels. Bij zelfbestuiving komt stuifmeel terecht op een stempel van een bloem aan dezelfde plant, terwijl bij kruisbestuiving het stuifmeel terechtkomt op een stempel van een bloem aan een andere plant van dezelfde soort.

■ **Afb. 43** Stamper met stuifmeelbuizen.

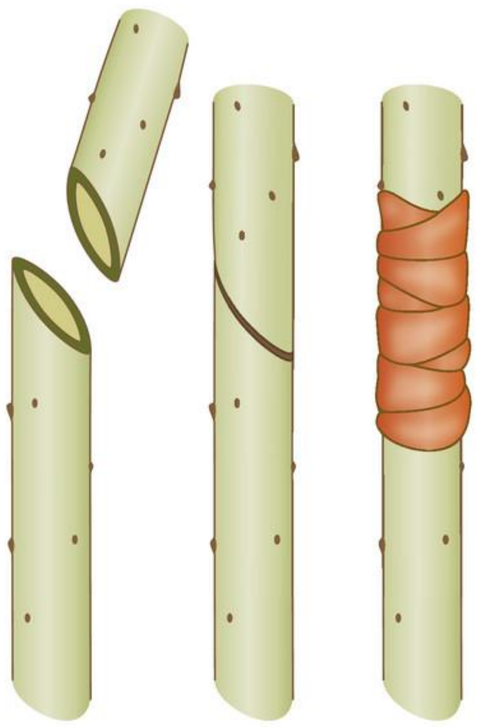


ONGESLACHTELIJKE VOORTPLANTING

Ongeslachtelijke voortplanting kan bij planten plaatsvinden door mitose en celdeling. Hierbij ontstaan uit een moedercel twee dochtercellen met hetzelfde genotype als de moedercel. De nakomelingen zijn daardoor klonen. Natuurlijke ongeslachtelijke voortplanting bij planten kan op verschillende manieren gebeuren. Bijvoorbeeld door de vorming van uitlopers, bollen of knollen. Bollen zijn verdikte bladeren en knollen zijn verdikte stengels. Beide bevatten reservevoedsel.

Stekken, weefselkweek en enten zijn kunstmatige manieren van ongeslachtelijke voortplanting. Bij stekken groeit een nieuwe plant uit een afgesneden blad of stengel. Bij weefselkweek wordt een stukje weefsel van een plant op een voedingsbodem met groeihormonen geplaatst. Door deling van de cellen ontstaat ongedifferentieerd weefsel waaruit nieuwe planten kunnen groeien. Bij fruitbomen vindt kunstmatige ongeslachtelijke voortplanting vaak plaats door enten (zie afbeelding 44). Takken worden vastgezet op een afgeknipte onderstam. Aan de boom die hieruit ontstaat, komen dezelfde vruchten als aan de boom waarvan de enttakken afkomstig zijn.

■ **Afb. 44** Enten.



Opdrachten KENNIS

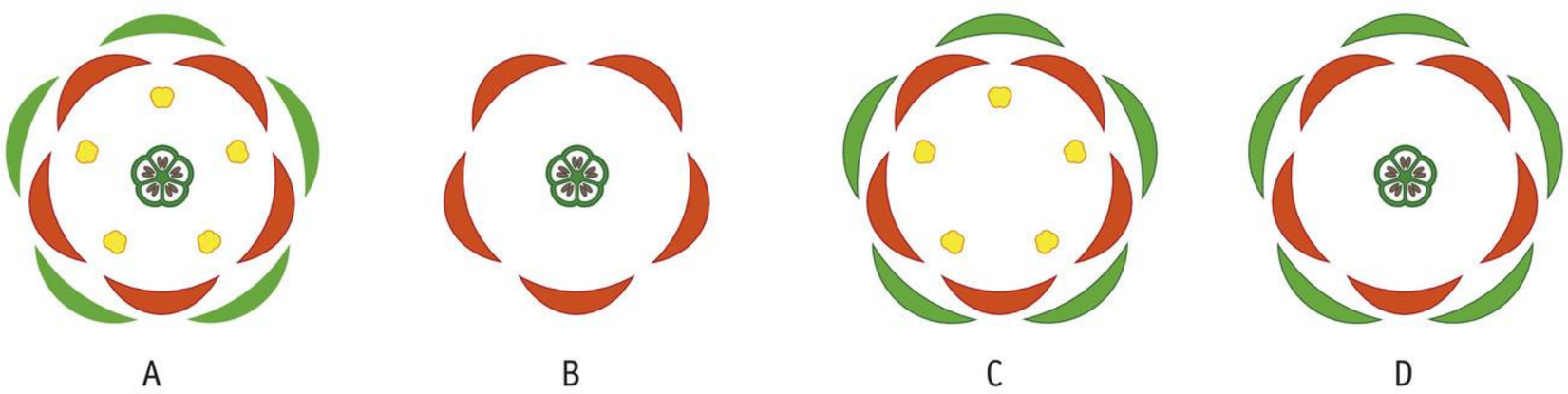
40 Welk stadium van de levenscyclus duurt bij een zaadplant het langst: het haploïde of diploïde stadium?

41 De delen van een bloem kun je schematisch weergeven in de vorm van een bloemdiagram. Een leerling heeft van een bepaalde bloemsoort vier verschillende bloemdiagrammen getekend (zie afbeelding 45). Haar medeleerlingen doen hierover de volgende uitspraken:

- Medeleerling 1: 'De bloemen B, C en D zijn eenslachtige bloemen.'
- Medeleerling 2: 'Bloem C is een mannelijke bloem.'
- Medeleerling 3: 'Alleen bloem C kan stuifmeelkorrels produceren.'

a Geef per leerling aan of de gedane uitspraak juist of onjuist is.
b Sommige bloemen kunnen zichzelf bestuiven.
Welke bloem uit afbeelding 45 kan dit? Licht je antwoord toe.
c Is de dochterplant die ontstaat door zelfbestuiving genetisch identiek aan de moederplant? Leg je antwoord uit.

■ **Afb 45** Bloemdiagrammen.



42 Twee veelvoorkomende manieren van verspreiding van stuifmeelkorrels zijn verspreiding door de wind en verspreiding door dieren. De bouw van bloemen is aangepast aan de manier van verspreiding.
Kruis in de tabel op de volgende pagina aan of een kenmerk hoort bij een bloem die zich door de wind laat bestuiven (zie afbeelding 46.1) of bij een bloem die zich door insecten laat bestuiven (zie afbeelding 46.2).

■ **Afb. 46** Verspreiding van stuifmeel door wind en insecten.

1 bestuiving door de wind: Engels raaigras

2 bestuiving door insecten: krokus

Bloemen	Windbestuiving	Insectenbestuiving
Bevatten nectarkliertjes		
Hebben grote meeldraden en stempels die vaak buiten de bloem hangen		
Hebben stempel en meeldraden in de bloem zitten		
Hebben vaak felgekleurde kroonbladeren		
Hebben vaak groene, kleine kroonbladeren		
Produceren licht stuifmeel		
Produceren ruw en kleverig stuifmeel		
Produceren veel stuifmeel		
Zijn vaak geurend		

43 Als een tulpenkweker een bepaald ras met de gewenste eigenschappen heeft gekweekt (zie afbeelding 47), gebruikt hij de tulpenbollen van deze tulpen en niet de zaden voor de verdere teelt.
Noem een voordeel en een nadeel van het gebruik van tulpenbollen.

■ **Afb. 47** De Apeldoornse tulp.

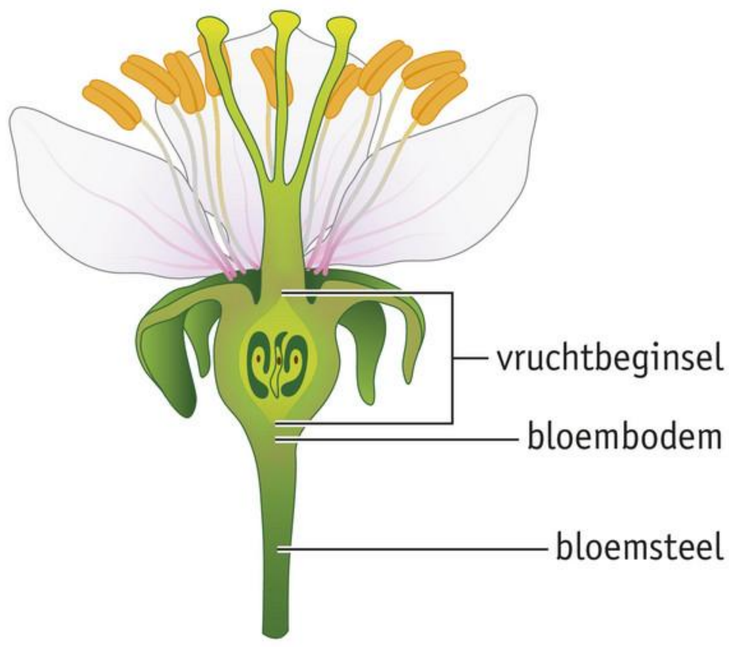
Opdrachten INZICHT

44 Bij appels ontstaat het vruchtvlees uit de bloembodem (zie afbeelding 48). Een kweker wil de kwaliteit van de appels van ras R verbeteren. Hij bestuift daartoe appelbomen van ras R met stuifmeel van appelbomen van ras S. Door deze kruising ontstaan er appels aan de appelbomen van ras R.

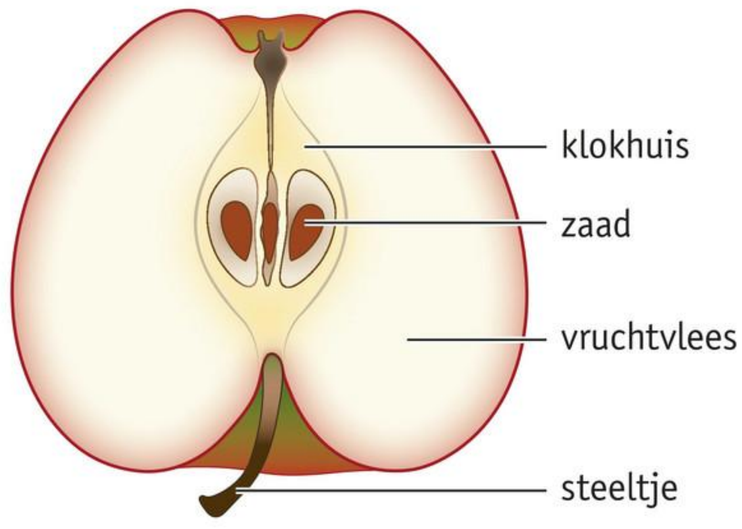
a Hebben cellen in het vruchtvlees van deze appels door de kruising een ander genotype dan cellen in het vruchtvlees van appels van voorgaande jaren? Leg je antwoord uit.

b Wat moet de kweker doen om appels van een verbeterde kwaliteit te kunnen oogsten?

■ **Afb. 48** Appel.



1 bloem



2 vrucht

45 Weefselkweek is een vorm van klonen.
Leg uit waarom planten die zijn verkregen uit weefselkweek aantrekkelijk zijn voor wetenschappelijk onderzoek.

46 Planten hebben diverse evolutionaire aanpassingen voor een zo optimaal mogelijke bestuiving. Windbloemen en insectenbloemen verschillen daardoor veel van elkaar.
Leg uit waardoor windbloemen over het algemeen veel meer stuifmeelkorrels produceren dan insectenbloemen.

47 Zaden kunnen door zowel biotische als abiotische factoren worden verspreid. De verspreiding is essentieel voor het voortplantingssucces van een plant.
Geef een voorbeeld van aanpassingen bij zaden waardoor de zaadverspreiding door dieren wordt bevorderd. Licht je antwoord toe.

48 De paardenbloem heeft een goudgele bloem die na rijping van de vruchten verandert in een witte pluizenbol (zie afbeelding 49).

a Leg met behulp van afbeelding 49 uit dat deze transformatie van de bloem functioneel is voor de plant.

b Sommige mensen hebben last van hooikoorts, een allergie die wordt veroorzaakt door stuifmeelkorrels van bomen, grassen of kruiden. Uit een onderzoek blijkt dat veel mensen denken dat de witte pluisjes van de paardenbloem hooikoorts veroorzaken.
Leg uit of deze veronderstelling juist of onjuist is.

■ **Afb. 49** Paardenbloem.

49 Lees de volgende twee hypothesen:

1 Bestuiving door dieren is voorbehouden aan landplanten; bestuiving in water gebeurt door middel van waterstromen.

2 Dierlijke bestuiving is bij landplanten ongeveer 140 miljoen jaar geleden ontstaan.

Door de ontdekking van een zeepissebed (zie afbeelding 50) die de zeewiersoort *Gracilaria gracilis* helpt bij de voortplanting, zijn beide hypothesen mogelijk onjuist. Onderzoekers brachten in beeld dat de zeepissebedden spermatia (niet-beweeglijke, mannelijke voortplantingscellen) oppakken van het zeewieroppervlak van mannelijke planten en deze vervolgens afleveren bij de reproductieve delen van vrouwelijke planten. *Gracilaria gracilis* bestaat al meer dan 800 miljoen jaar.
Beargumenteer of je de hypothesen op grond van bovenstaande informatie kunt verwerpen.

■ **Afb. 50** De gewone zeepissebed.

50 Plantenwetenschappers hebben een gen geïdentificeerd waarmee een plant vruchtbare zaden kan maken zonder eerst te worden bestoven door de wind of insecten. Deze 'maagdelijke' vorm van zaadproductie heet apoximis en komt in de natuur zelden voor: van de geschatte driehonderdduizend verschillende plantensoorten op de wereld is slechts 0,1% hiertoe in staat. Voorbeelden van planten die hiertoe soms overgaan zijn paardenbloemen, bramen en verschillende grassoorten.
Dat deze vorm van zaadproductie in de plantenwereld zo zeldzaam is, komt waarschijnlijk doordat het proces ingewikkeld is. Ondanks de onbevruchte eicel dient er toch een zaad tot ontwikkeling te komen, mét reservevoedsel en een kiem met diploïde cellen. Het ontdekte gen lijkt hiervoor te zorgen.

a Activatie van het betreffende gen voorkomt een bepaald proces in een van de voortplantingsorganen van een plant.
Wat wordt er precies geremd? Leg je antwoord uit.

b Als je dit ontdekte gen succesvol in landbouwgewassen kunt inbouwen, kan dit volgens de onderzoekers een revolutie in de plantenveredeling betekenen.
Geef hiervoor een argument.

Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf.*

Context Leefwereld

DE BESTUIVERS VAN DE NACHT

Ongeveer 80% van de Nederlandse plantensoorten wordt bestoven door dieren. Vogels en vleermuizen kunnen bijvoorbeeld voor bestuiving zorgen, maar insecten vormen de belangrijkste groep bestuivers. Doordat het aantal insecten en het aantal soorten insecten de laatste jaren sterk is afgenomen, heeft dat ook consequenties voor de bestuiving van planten. Er wordt dan ook veel onderzoek gedaan naar de afname van insectenpopulaties. Honingbijen, wilde bijen en zweefvliegen zijn de belangrijkste bestuivers en zijn uitvoerig bestudeerd. Ook vlinders zijn aandacht van studie, hoewel dit vaak alleen geldt voor de gekleurde dagvlinders. Minder aandacht is er voor nachtvlinders, die ook wel motten worden genoemd. Veel mensen hebben zelfs een hekel aan deze nachtvlinders, omdat de larven van sommige soorten kleding eten.

In Nederland leven meer dan 2350 soorten nachtvlinders. Veel soorten spelen een rol bij de bestuiving (zie afbeelding 51). Britse onderzoekers hebben aangetoond dat nachtvlinders verantwoordelijk zijn voor 33% van de bestuiving van de vegetatie in stedelijke gebieden. Nachtvlinders blijken voor de bestuiving net zo belangrijk te zijn als bijen. Ook blijkt uit het onderzoek dat nachtvlinders en bijen meestal andere plantensoorten bestuiven. De onderzoekers pleiten voor meer onderzoek naar de belangrijke rol van nachtvlinders en meer bescherming voor deze soorten. Dit is belangrijk, want ook nachtvlinderpopulaties zijn de afgelopen vijftig jaar drastisch afgenomen.

■ **Afb. 51** Een nachtvlinder, de gamma-uil, bestuift een bloem.

Opdrachten

51 Bloemen die overdag worden bestoven, hebben vaak felle kleuren en een sterke geur. Nachtbloemen zijn vaak bleek van kleur, maar ruiken vaak nog sterker.
Leg dit uit.

52 Voor de bestuiving van de avondkoekoeksbloem (*Silene latifolia*) is vooral één soort nachtvlinder, de silene-uil (*Hadena bicruris*), verantwoordelijk. Maar het bezoek van de silene-uil kan ook nadelig uitpakken voor de bloem. De vrouwtjes kunnen tijdens hun bezoek eitjes in de bloem leggen. De rupsen die uit de eitjes komen eten de zaden van de plant op.
De avondkoekoeksbloem beschikt over een afweermechanisme tegen de rups, maar dat gebruikt hij niet als er geen andere soorten bestuivers zijn.
Geef hiervoor een verklaring.

53 Plantensoorten kunnen zijn aangepast aan verschillende bestuivende insecten, en andersom. Zo hebben planten die door pijlstaarten (*Sphingidae*, nachtvlinderfamilie) met een zeer lange roltong worden bestoven, vaak een lange bloembuis. De pijlstaart kan met zijn lange roltong goed bij de nectar komen.

a Welk ander voordeel heeft het voor de pijlstaart dat deze plantensoorten zo'n lange bloembuis hebben?

b Sommige planten en insecten zijn zo aan elkaar aangepast dat een bepaalde insectensoort nog maar één soort plant bestuift.
Welk voordeel kan dit voor een plant opleveren?

54 Leg uit dat het voor de biodiversiteit van planten belangrijk is dat nachtvlinders beter beschermd worden.

5 REAGEREN OP DE OMGEVING

LEERDOEL

11.5.1 Je kunt beschrijven hoe planten met behulp van signaalstoffen reageren op interne en externe signalen.

TAXONOMIE	LEERDOEL EN OPDRACHTEN
	5.5.1
Begrijpen	55, 56, 57, 58, 59, 60, 61
Toepassen	63abd, 64b, 67, 69, 70
Analyseren	62, 63ce, 64ac, 65, 66, 68

Planten communiceren met elkaar, met planteneters en met bestuivers om te kunnen overleven. Dat doen ze vooral met behulp van signaalstoffen. In stresssituaties kunnen planten zelfs ultrasonische geluiden produceren: geluid waarvan de frequentie zo hoog is dat een mens het niet kan horen.

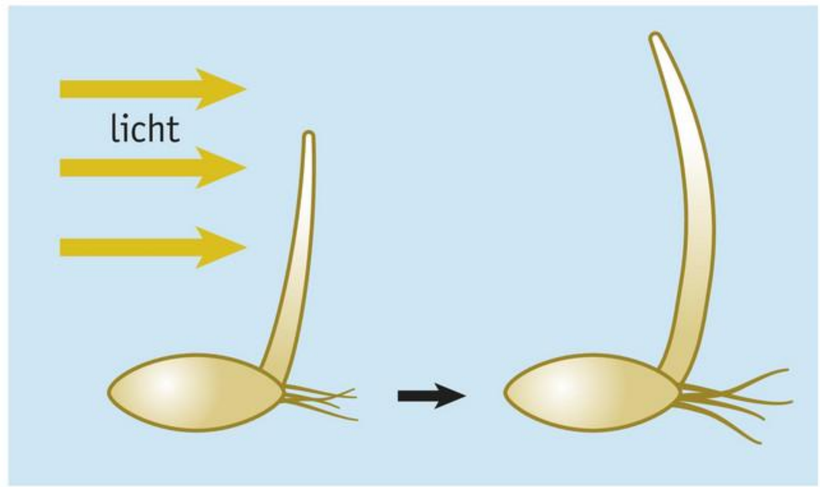
SIGNAALSTOFFEN

Planten reageren op prikkels uit hun omgeving. Dat doen ze onder andere met behulp van signaalstoffen. **Signaalstoffen** in planten zijn plantenhormonen die zijn betrokken bij onder meer het bepalen van de groeirichting, rijping of bescherming van de plant. Twee voorbeelden van signaalstoffen zijn auxine en etheen.

AUXINE

In de uiterste top van de stengel van planten wordt de signaalstof auxine (indolazijnzuur, IAA) gemaakt. Auxine is een stof die de groei van de plant beïnvloedt. Auxine maakt onder andere de rekbaarheid van celwanden in de bovengrondse delen van de plant groter en bevordert op die manier de lengtegroei van cellen door celstrekking.

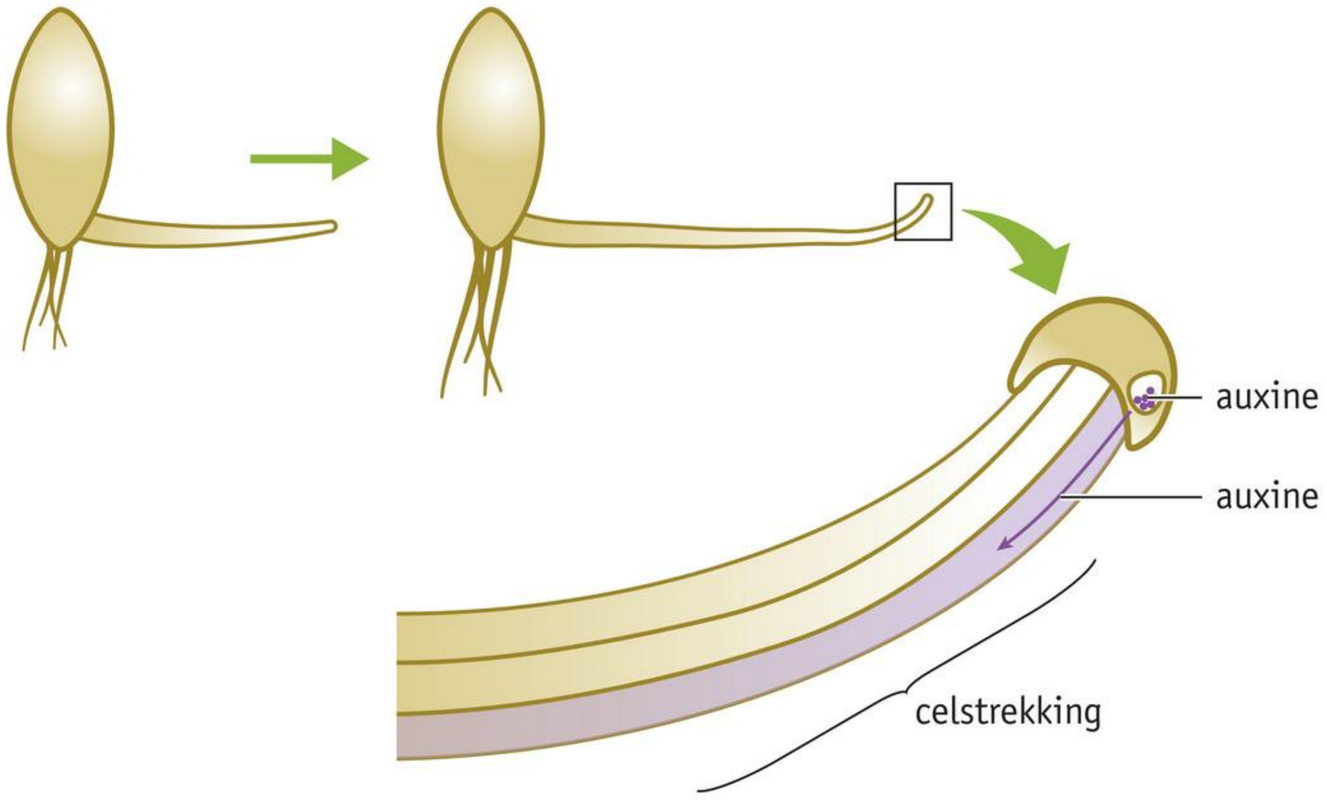
■ **Afb. 52** Positieve fototropie: de stengel groeit naar het licht toe.



Planten groeien in de richting van het licht, doordat licht de aanmaak van auxine remt. De concentratie auxine aan de belichte zijde van een stengel is daardoor lager dan aan de schaduwzijde. Aan de belichte zijde zal de plant daardoor minder snel groeien dan aan de schaduwzijde. Het gevolg is dat de stengeltop in de richting van het licht groeit (zie afbeelding 52).
Dit verschijnsel heet fototropie (Grieks: *tropein* = wenden, draaien). Als een stengeltop in de richting van het licht groeit, noem je dit positieve fototropie. Groeit een plantenstengel van het licht af, dan heet dit negatieve fototropie.

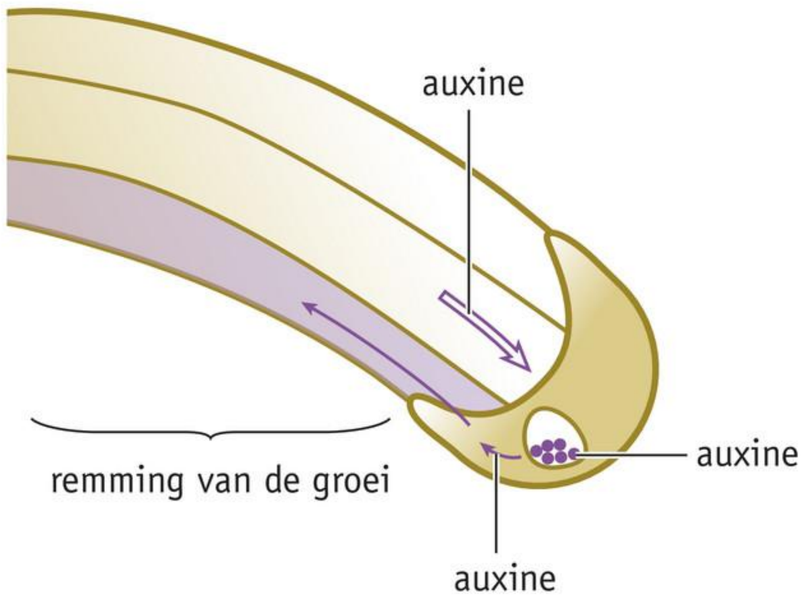
De groeirichting van de verschillende delen van een plant wordt ook beïnvloed door de zwaartekracht. Dit verschijnsel heet geotropie. De cellen in de stengel en de cellen in de wortel reageren bij geotropie anders op de concentratie auxine. Bij een ontkiemend zaad in de bodem groeit de stengeltop daardoor tegen de zwaartekracht in (negatieve geotropie), terwijl een worteltop met de richting van de zwaartekracht mee naar beneden groeit (positieve geotropie). In een stengel die horizontaal ligt, beweegt auxine onder invloed van de zwaartekracht naar de onderkant. Door celstrekking zal de onderkant van de stengel sneller groeien dan de bovenkant, waardoor de stengel naar boven groeit (zie afbeelding 53).

■ **Afb. 53** Negatieve geotropie bij een stengeltop.



Een wortel reageert tegenovergesteld op de auxineconcentratie: een verhoogde concentratie auxine aan de onderkant leidt juist tot een remming van de celstrekking. Het gevolg hiervan is dat de wortel naar beneden groeit (zie afbeelding 54).

■ **Afb. 54** Positieve geotropie bij een wortel.



ETHEEN

Het gas etheen (of ethyleen) stimuleert de rijping van verschillende soorten fruit. Onrijp fruit bevat pectine, een polysacharide die werkt als een soort lijmstof die plantencellen dicht bij elkaar houdt. Onrijp fruit is daardoor hard, zodat de ontwikkeling van zaden wordt beschermd. Wanneer de zaden voldoende zijn ontwikkeld, geeft het fruit etheen af en begint het rijpingsproces. Etheen stimuleert de vorming van enzymen die zorgen voor geur- en kleurverandering, de omzetting van zetmeel en zuren in suikers en het zachter worden van het vruchtvlees. Dit laatste gebeurt door pectinase, die de stof pectine afbreekt.

Opdrachten KENNIS

55 Denise is dol op kamerplanten, haar vensterbanken staan er vol mee (zie afbeelding 55).
Ze draait haar kamerplanten af en toe om te voorkomen dat ze scheefgroeien. Leg uit waarom ze dat doet.

■ **Afb. 55** Kamerplanten op de vensterbank.

56 Leg uit dat het in de natuur functioneel is dat planten naar het licht toe groeien.

57 In de klas wordt een experiment uitgevoerd met een horizontaal geplaatste wortel en een horizontaal geplaatste stengel.
Drie leerlingen doen de volgende uitspraken:

- leerling 1: 'De auxineconcentratie is bij de horizontaal geplaatste wortel het hoogst aan de onderzijde.'
- leerling 2: 'De auxineconcentratie is bij de horizontaal geplaatste stengel het hoogst aan de onderzijde.'
- leerling 3: 'Er vindt negatieve geotropie in de wortel plaats.'

Geef per leerling aan of de gedane uitspraak juist of onjuist is.

58 Bananen die je in Nederland koopt, zijn in het land van herkomst groen geplukt (zie afbeelding 56). Voordat ze in de supermarkt liggen, worden bananen in een zogenaamde rijpkamer gerijpt.
Aan welk gas worden de bananen in de rijpkamer blootgesteld?

■ **Afb. 56** Verschillende stadia van rijping bij een banaan.

Opdrachten KENNIS

12 **a** Een enzym is substraatspecifiek. Dat noem je ook wel het sleutel-slotprincipe. Wat wordt hiermee bedoeld?

b Een enzym katalyseert een reactie. Op welke manier zorgt een enzym hiervoor?

c Waarom is een kleine hoeveelheid van een enzym voldoende in een cel?

13 Bij het actief transport van ionen heeft ATPase de energie nodig die beschikbaar komt bij de dissimilatie van het substraat ATP.

a In samenwerking met ATPase werkt ATP onder andere als co-enzym. Leg uit hoe dit werkt.

b Welke rol heeft ATPase in de samenwerking met ATP?

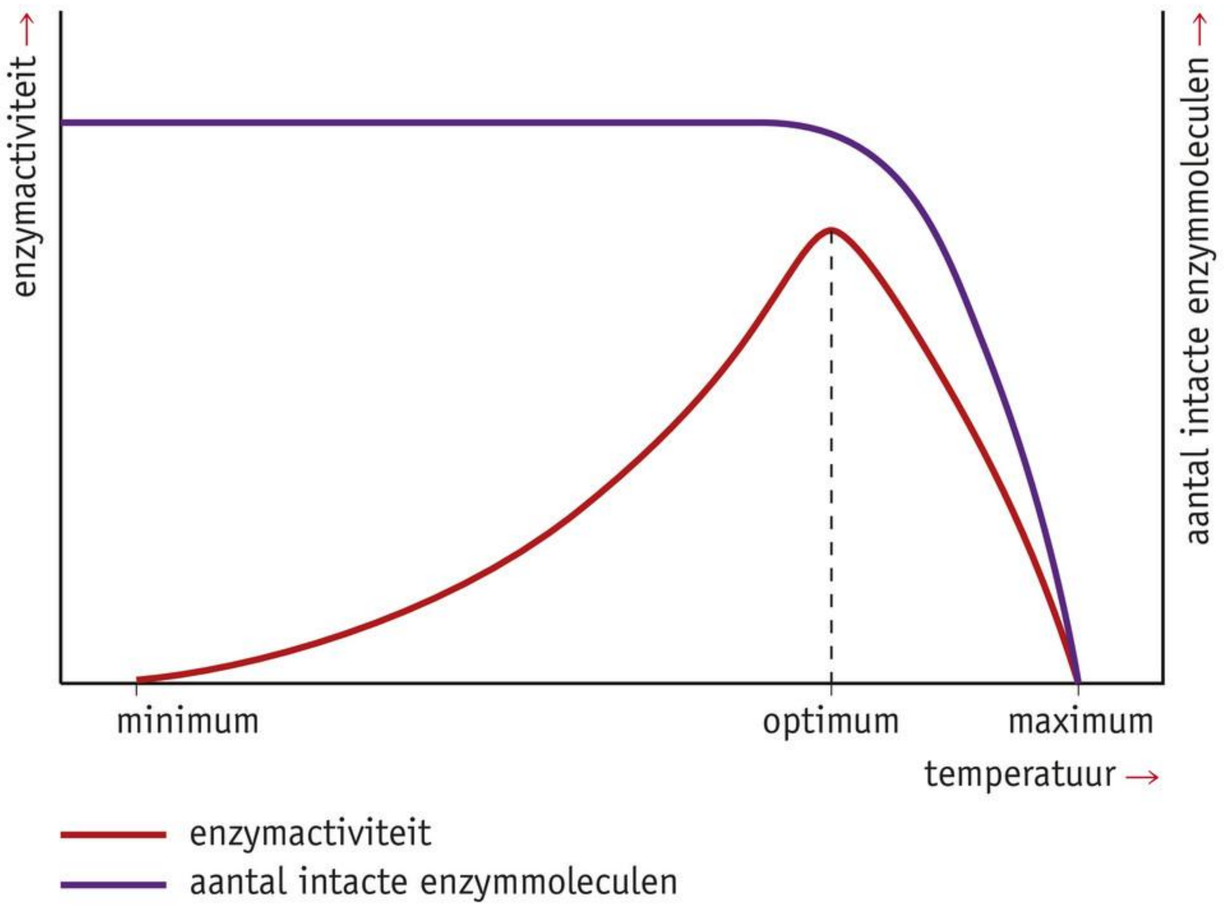
INVLOED VAN DE TEMPERATUUR

De enzymactiviteit is de mate waarin een enzym een reactie versnelt. Deze activiteit kun je bepalen door te meten hoeveel substraat per tijdseenheid wordt omgezet, of hoeveel reactieproduct er ontstaat. Deze omzetting kun je aantonen met een indicator. Dat is een stof waarmee je een andere stof aantoont. Zo toon je zetmeel aan met jood, waarbij jood in aanwezigheid van zetmeel verandert van kleur.

De enzymactiviteit wordt beïnvloed door de temperatuur, de zuurgraad, de concentratie van de aanwezige stoffen en door bindingen van enzymen met stoffen die de activiteit kunnen verhogen of remmen.

In afbeelding 12 is het verband tussen de temperatuur en de enzymactiviteit weergegeven in een **optimumkromme**. Onder de minimumtemperatuur is er geen enzymactiviteit. De bewegingen van de moleculen zijn te traag. Bij stijging van de temperatuur zijn er meer botsingen tussen enzym en substraat. Bij het optimum worden de meeste enzym-substraatcomplexen gevormd. Bij een nog hogere temperatuur neemt het aantal intacte enzymmoleculen af. De moleculen bewegen zó heftig dat de ruimtelijke structuur van de enzymmoleculen verandert. Het substraat past niet meer in het actieve centrum. Boven de maximumtemperatuur vindt **denaturatie** plaats: alle enzymmoleculen verliezen hun specifieke ruimtelijke structuur. Ook na afkoeling komt deze vorm niet meer terug. Het is irreversibel (onomkeerbaar). Bij warmbloedige dieren verliezen de meeste enzymen boven 40 °C hun werkzaamheid.

■ **Afb. 12** Het verband tussen de temperatuur en de enzymactiviteit.



59 **a** Als je onrijpe appels en peren in een fruitschaal legt waar al een rijpe banaan in ligt, zullen ze sneller rijpen (zie afbeelding 57). Leg uit hoe dit komt.

b Als de rijping van het fruit in de fruitschaal eenmaal is begonnen, kan het heel snel gaan, doordat de etheenproductie alleen maar verder wordt gestimuleerd. Voor je het weet heb je een schaal met overrijp fruit.
Hoe noem je een dergelijk terugkoppelingsproces?

■ **Afb. 57** Fruit in een fruitschaal.

BESCHERMING

Planten staan aan het begin van de voedselketen en worden dus voortdurend gegeten door dieren. Om zich te beschermen tegen vraat of infecties hebben planten afweermechanismen ontwikkeld. Deze afweermechanismen kun je onderverdelen in drie groepen: mechanische afweer, chemische afweer en indirecte afweer.

Onder **mechanische afweer** vallen uiterlijke aanpassingen zoals haren, stekels en doorns om vraat tegen te gaan. Bij **chemische afweer** maken planten stoffen aan die niet lekker of zelfs dodelijk zijn voor herbivoren. Cafeïne bijvoorbeeld verlamt bepaalde insecten en nicotine is dodelijk. Bij indirecte afweer maakt een plant een lokstof aan die de natuurlijke vijand van zijn belager aantrekt. Een voorbeeld van zo'n belager is de rups van het koolwitje, met als natuurlijke vijand de sluipwesp. Als reactie op vraat door rupsen maakt de plant een lokstof aan die sluipwespen aantrekt (zie afbeelding 58). De eitjes die de sluipwesp in de rups legt, ontwikkelen zich in de rups en eten deze van binnenuit op.

Veel wilde planten zijn door natuurlijke selectie **resistent** tegen een of meerdere ziekteverwekkers, zoals virussen, schimmels, bacteriën en parasieten.

■ **Afb. 58** Een plant verdedigt zich tegen een rups met behulp van een sluipwesp.

Planten beschermen zich tegen uitdroging door bij hitte hun huidmondjes te sluiten. Daarnaast helpen fysieke aanpassingen tegen waterverlies, zoals een dik vettig laagje was op de epidermis (cuticula), verzonken huidmondjes en beharing. Sommige planten zijn aangepast aan droogte, doordat hun stofwisseling anders werkt. Er zijn bijvoorbeeld planten die 's nachts koolstofdioxide kunnen vastleggen. Overdag gebruiken ze het koolstofdioxide bij de fotosynthese.

Opdrachten KENNIS

60 Cactussen zijn woestijnplanten. Om te kunnen overleven, heeft de cactus verschillende aanpassingen. De bladeren van cactussen zijn tot naalden of stekels geëvolueerd (zie afbeelding 59).

a Geef twee voorbeelden van bescherming die de naalden bieden.

b Andere aanpassingen bij cactussen zijn de lange wortels waarmee ze water opnemen als het regent en de dikke stengels waarin ze water kunnen opslaan.
Sommige mensen denken dat je om te kunnen overleven in de woestijn heel goed cactussap zou kunnen drinken. Maar dit is geen goed idee, want de cactus heeft zich hier vaak al tegen gewapend met naalden.
Hoe kan een cactus zich hier nog meer tegen wapenen?

c Onder welke vorm van afweer valt deze vorm van bescherming?

■ **Afb. 59** Naalden van een cactus.

61 Er zijn veel planten die stoffen aanmaken die niet lekker, ziekteverwekkend of dodelijk zijn voor herbivoren. De taxus bijvoorbeeld, beschermt zich tegen vraat door een middel dat de celdeling stillegt. Het gif, ook wel bekend als taxine, is sterk genoeg om grote grazers te doden. Alle delen van de taxus zijn giftig, op het vruchtvlees van de vrucht na. De zaden zijn het meest giftig.
Leg dit uit.

Opdrachten INZICHT

62 De bananenteelt wordt bedreigd door twee verwoestende schimmelziekten die zowel in Azië, Afrika als in Zuid-Amerika voorkomen. Het overgrote deel van de geteelde bananen bestaat uit Cavendish-bananen (zie afbeelding 60.1). Dit bananenras kan zich alleen ongeslachtelijk voortplanten en is gevoelig voor de schimmels. Daardoor kunnen de schimmels zich gemakkelijk verspreiden. De schimmels worden ook steeds ongevoeliger voor chemische bestrijdingsmiddelen. Complete plantages worden aangetast, dus onderzoekers werken hard aan de ontwikkeling van resistente bananenrassen.
Leg uit waarom onderzoekers hierbij gebruikmaken van wilde bananenrassen die zich wel geslachtelijk kunnen voortplanten (zie afbeelding 60.2).

■ **Afb. 60** Twee bananenrassen.

1 Cavendish-banaan zonder zaden

2 wilde banaan met zaden

63 Charles Darwin toonde aan dat de lengtegroei van stengels en wortels vanuit de stengeltoppen wordt geregeld. Toch duurde het nog tot 1928 voordat de Nederlandse bioloog Went ontdekte waaruit deze beïnvloeding bestaat. In afbeelding 61 staan vier experimenten beschreven.

a Formuleer de onderzoeksvraag en de conclusie voor experiment 1.

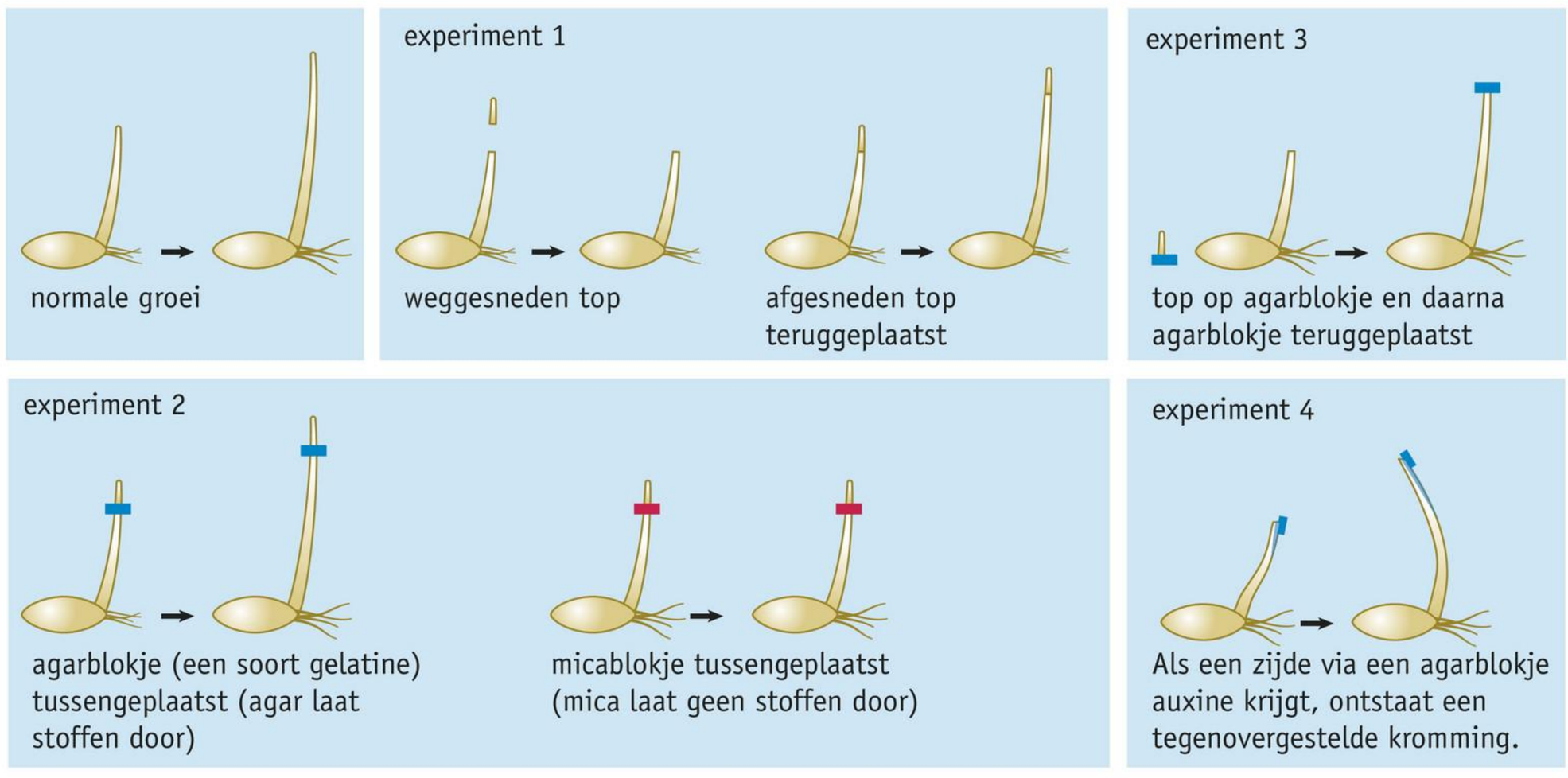
b Went veronderstelde dat in de uiterste top van een stengel een stof wordt geproduceerd die de lengtegroei regelt.
Ondersteunen de resultaten van experiment 2 deze veronderstelling? Leg je antwoord uit.

c Waarom voerde Went experiment 3 uit?

d Beschrijf de controleproef die bij experiment 3 hoort.

e Waarom voerde Went experiment 4 uit?

■ **Afb. 61** Proeven van Went met kiemplanten van haver.



64 Bij CAM-planten (CAM = *Crassulacean Acid Metabolism*) gaan de huidmondjes 's nachts open en overdag dicht. Bekende CAM-planten zijn cactussen, vetplanten, bromeliasoorten en dikbladige orchideeën (zie afbeelding 62). In deze planten wordt in het donker CO_2 vastgelegd in de vorm van appelzuur. In het licht wordt CO_2 weer uit dit appelzuur vrijgemaakt en gedeeltelijk verbruikt bij de fotosynthese.

a Wordt bij CAM-planten het openen van de huidmondjes bevorderd door een lage of een hoge CO_2-druk in de bladeren? Leg je antwoord uit.

b Wat zijn kenmerken van het milieu waarin je CAM-planten vooral aantreft? Leg je antwoord uit.

c Het gevormde appelzuur wordt opgeslagen in de vacuolen van de bladcellen en heeft daardoor invloed op de turgor van deze cellen.
Is de turgor van bladcellen van een CAM-plant aan het eind van een dag in het licht lager dan, gelijk aan of hoger dan aan het eind van de nacht?

■ **Afb. 62** Een dikbladige orchidee.

65 Veel mensen hebben een voorkeur voor minder rijpe bananen. Op internet circuleren filmpjes waarin mensen tips geven om te voorkomen dat bananen snel rijp worden. Een van die tips is om de bovenkant van de banaan in een stuk plasticfolie te wikkelen (zie afbeelding 63).
Zet een experiment op waarmee je kunt controleren of deze tip klopt en geef aan bij welk resultaat je dit kunt concluderen.

■ **Afb. 63** De bovenkant van een tros bananen in een stuk plasticfolie.

Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf.*

Context Wetenschap

KOORTSIGE PLANTEN

Dominique Van Der Straeten (zie afbeelding 64) is hoogleraar plantenfysiologie aan de Universiteit Gent. Recent kreeg zij internationale toperkenning als fellow van de American Association for the Advancement of Science (AAAS). Haar combinatie van verschillende onderzoeksdomeinen was de reden voor haar benoeming. Ze doet onder andere onderzoek naar het tegengaan van honger door verhoging van de voedingswaarde van gewassen met behulp van genetische modificatie. Daarbij is ook aandacht voor de invloed van globale klimaatverandering op de voedingswaarde van gewasproducten. Ook onderzoekt ze de rol van het hormoon etheen bij overstromingen. Andere onderzoekers toonden eerder aan dat etheen bij een overstroming razendsnel een overlevingsrespons activeert, waardoor een plant het onder water langer kan uithouden. Het onderzoek naar etheen en overstromingen is dus belangrijk voor de productie van toekomstbestendige landbouwgewassen.

De maatschappelijke relevantie straalt bij Van Der Straeten van al haar onderzoeken af. Dit was ook al zo toen ze tijdens de studie voor haar proefschrift met een klein experiment aantoonde dat ook planten koorts kunnen hebben. Dominique Van Der Straeten werd getriggerd door onderzoek uit de jaren tachtig waarbij met een thermografische camera een stijging van de temperatuur in bloeiende planten was aangetoond, die was geïnduceerd door salicylzuur. Planten maken deze op aspirine lijkende signaalstof als reactie op stress door bijvoorbeeld droogte. Van Der Straeten wist dat salicylzuur ook was aangetoond in zieke planten. Daarom besloot ze te onderzoeken of je een infectie kunt opsporen met behulp van een thermografische camera. Het resultaat was spectaculair: de camera toonde een ziekte al dagen aan voordat je de symptomen met het blote oog kon zien.

■ **Afb. 64** Dominique Van Der Straeten.

Opdrachten

66 Waarom is onderzoek naar de rol van etheen bij overstromingen maatschappelijk relevant? Leg je antwoord uit.

67 Waarom is een snelle overlevingsrespons in planten bij een overstroming noodzakelijk voor de overleving?

68 Een aardappelveld dat onder water loopt is binnen 24 uur verwoest.
Bedenk een voorbeeld van een snelle overlevingsstrategie die een landplant bij een overstroming zou kunnen toepassen.

69 De onderzoekers bepaalden het salicylzuurgehalte in donkere plekjes op planten.
Beredeneer of ze een verhoging of verlaging van het salicylzuurgehalte vonden.

70 Volgens Dominique Van Der Straeten is de ontdekking van koorts bij planten belangrijk voor de landbouw. Doordat je vroegtijdig kunt zien dat een plant is geïnfecteerd, hoef je minder chemische bestrijdingsmiddelen te gebruiken en komt de productie niet in gevaar.
Leg uit dat dit inderdaad het geval is.

ACACIA

LEERDOELEN

11.S.1 Je kunt het afweermechanisme van planten toelichten voor verschillende organisatieniveaus van de biologie.

11.S.2 Je kunt de biologische vakvaardigheden evolutionair en ecologisch denken toepassen op de symbiose van planten en dieren.

Er bestaat een plant die minder goed groeit als grote grazers er niet meer van eten. Dat klinkt tegenstrijdig, maar het is de realiteit voor de acacia.

Acacia is een geslacht van struikachtige planten, waartoe veel soorten behoren. Het zijn bijzondere planten, die zich op verschillende manieren verdedigen tegen vraat.

Vrijwel alle acacia's bezitten lange doorns, waardoor het voor planteneters lastig is om van de bladeren te eten. Daarnaast beschermen sommige soorten zich tegen vraat door middel van de gifstof tannine die voor planteneters dodelijk kan zijn. Als planteneters zoals antilopen bladeren van een acacia eten, maakt deze acacia extra tannine in het blad, waardoor antilopen de bladeren niet meer lusten. Daarnaast maakt de acacia etheen. Dit plantenhormoon werkt als signaalstof en wordt aan de lucht afgegeven. Etheen waarschuwt andere acacia's voor gevaar. Via de wind kan de etheen acacia's bereiken die vijftig meter verderop staan. Gewaarschuwde acacia's maken binnen tien minuten extra tannine aan in hun bladeren.

■ **Afb 1** De fluitende doornboom. De boom fluit wanneer de wind door zo'n gaatje blaast.

Een andere fascinerende vorm van bescherming komt voor bij de fluitende doornboom (*Acacia drepanolobium*) die groeit op de Afrikaanse savannes. Deze acacia's hebben dikke hoorns (zie afbeelding 1), waarmee ze zich zo goed mogelijk proberen te beschermen tegen vraat. Kennelijk is dit niet afdoende, want in de holle hoorns huist ook nog eens een leger van meer dan honderdduizend bijtende mieren die de plant beschermen. Op het moment dat de plant wordt aangevreten door een grote grazer, zoals een olifant of giraffe, groeperen deze mieren (*Crematogaster mimosae*) zich. De mieren bijten dan massaal de aanvaller, waardoor deze wordt verjaagd. In ruil voor het heldhaftig verdedigen van de acacia, krijgen de mieren nectar van de plant.

Wanneer grote grazers niet van de acacia's kunnen eten, gaan de planten er minder goed uitzien. Om hiervoor een verklaring te vinden heeft een groep onderzoekers gedurende tien jaar veldproeven uitgevoerd. Ze vergeleken met hekken afgeschermde acacia's met acacia's die wel door grazers werden aangevreten. Uit de resultaten bleek dat de beschermde acacia's minder grote holle doorns hebben en minder nectar produceren dan de aangevreten acacia's. Bij de planten die geen last hadden van vraat, werden de mieren niet beloond met nectar. Het gevolg hiervan was dat de

beschermende mieren deels wegtrokken. Voor de mieren die wegtrokken kwam een ander miersoort in de plaats: eentje die leeft van hout en plantenvezels. Het gevolg hiervan was dat de acacia's uiteindelijk minder goed groeiden.

Opdrachten

1 Vul in de tabel de volgende begrippen in bij het juiste organisatieniveau.
Kies uit: *Afrikaanse savanne – antilopen – blad – ethyleen – giraffe – mieren – olifant – tannine*.

Organisatieniveau	Begrip
Systeem aarde	
Ecosysteem	
Populatie	
Organisme	
Orgaanstelsel	
Orgaan	
Cel	
Molecuul	

2 Leg uit waarom planten signaalstoffen gebruiken om informatie over te brengen.

3 Sommige acacia's produceren gom. Dat is een plakkerige stof die vrijkomt wanneer de bast wordt beschadigd.
Wat kan de functie van gom zijn?

4 Een giraffe die bladeren van acacia's eet, loopt tegen de wind in naar de volgende acacia. Leg uit waarom de giraffe dit doet.

5 De bescherming door mieren kan ook problemen opleveren voor de acacia. Wanneer acacia's door bijen worden bestoven, moeten de mieren op afstand worden gehouden om te voorkomen dat bijen niet bij het stuifmeel kunnen komen. Er zijn sterke aanwijzingen dat alleen de jonge bloemen van acacia's een geurstof afgeven waarmee ze de mieren op afstand houden. Jonge bloemen bevatten over het algemeen veel stuifmeelkorrels.

a Beschrijf een onderzoeksplan waarmee je deze hypothese zou kunnen toetsen. Gebruik hierbij twee groepen van acacia's met oude bloemen.

b Welk resultaat ondersteunt de hypothese?

6 Met minder voedsel en huisvesting stopt de mier (*Crematogaster mimosae*) met het aanvallen van indringers en begint hij met het verzorgen van sapzuigende insecten. Leg uit waardoor het ten koste gaat van de acaciaplant als de mieren sapzuigende insecten verzorgen.

PRACTICA

Practicumopdracht 1

ONDERZOEKSDOEL

11.O.1 Je kunt een preparaat van een dwarsdoorsnede van een stengel van een kruidachtige plant bekijken en de delen herkennen en benoemen.

- Basisstof 1
- Vaardigheden 1, 2 en 4 (thema 1)

Dwarsdoorsnede stengel

20 minuten

INLEIDING

In deze practicumopdracht bekijk en teken je een dwarsdoorsnede van een stengel van een kruidachtige plant. Je gebruikt hiervoor een klaargemaakt preparaat van een boterbloem of een andere kruidachtige plant.

MATERIAAL

- klaargemaakt preparaat van een dwarsdoorsnede van de stengel van een boterbloem of andere kruidachtige plant
- microscoop
- tekenmateriaal

METHODE

- Bekijk het preparaat bij een vergroting van 100×.
- Maak een schematische tekening van een deel van de dwarsdoorsnede, waarin dekweefsel (epidermis of opperhuid), vaatweefsel en vulweefsel zijn te zien. Benoem de delen van de stengel.
- Bekijk de vaatbundels bij een vergroting van 400× en maak hier een tekening van. Geef in je tekening bastvaten, houtvaten en vulweefsel aan.

RESULTAAT

Een tekening waarin de opperhuid, vaatbundels en vulweefsel zijn aangegeven en een tekening waarin de bastvaten, houtvaten en vulweefsel zijn aangegeven.

Practicumopdracht 2

ONDERZOEKSDOEL

11.O.2 Je kunt een preparaat van een worteltop bekijken en de weefsels herkennen en benoemen.

- Basisstof 1
- Vaardigheden 1, 2 en 4 (thema 1)

Worteltop

20 minuten

INLEIDING

In deze practicumopdracht bekijk en teken je een klaargemaakt preparaat van een worteltop. Het doel is dat je de weefsels in een worteltop kunt herkennen.

MATERIAAL

- klaargemaakt preparaat van een lengtedoorsnede van een worteltop
- loep
- microscoop

METHODE

- Bekijk het preparaat met de loep. Maak een schematische overzichtstekening van de gehele worteltop.
- Bekijk het preparaat bij een vergroting van 100× en zoek de verschillende zones op. Geef in je overzichtstekening aan waar de verschillende zones zich bevinden.
- Maak detailtekeningen van enkele cellen uit elke zone.

RESULTAAT

Overzichtstekeningen en detailtekeningen van enkele cellen uit elke zone van de worteltop.

Practicumopdracht 3

ONDERZOEKSDOEL

11.O.3 Je kunt een onderzoek opstellen en uitvoeren waarbij je beschrijft wat de invloed van licht is op geëtioleerde tuinkers.

- Basisstof 1
- Vaardigheden 6 en 7 (thema 1)

Etioleren van tuinkers

2 × 50 minuten

INLEIDING

Tuinkers is gemakkelijk te kweken. Misschien heb je dit in de onderbouw al weleens gedaan (zie afbeelding 1). Ook tuinkers kun je in het donker kweken. Je kunt je vervolgens afvragen wat er gebeurt als je de plantjes daarna in het licht zet. Je voert dit onderzoek uit en je maakt er een verslag van.

Beschrijf hoe je het experiment wilt uitvoeren. Werk dit onderzoek uit met een inleiding, onderzoeksvraag, hypothese, experiment / materiaal en methode. Voer het experiment uit en noteer de resultaten en conclusie. Verklaar in de discussie je gevonden resultaten en beschrijf wat er eventueel fout is gegaan en doe voorstellen om het onderzoek te verbeteren.

■ **Afb. 1** Tuinkers.

Practicumopdracht 4

ONDERZOEKSDOEL

11.O.4 Je kunt een preparaat van een dwarsdoorsnede van een wortel van een kruidachtige plant bekijken en de delen herkennen en benoemen.

- Basisstof 2
- Vaardigheden 1, 2 en 4 (thema 1)

Bouw van een wortel

20 minuten

INLEIDING

In deze practicumopdracht bekijk en teken je de dwarsdoorsnede van een wortel. Hiervoor gebruik je een klaargemaakt preparaat van een kruidachtige plant. Het doel van deze opdracht is dat je in een preparaat van een wortel de volgende delen kunt herkennen: bastvaten, cambium, centrale cilinder, dekweefsel, endodermis en houtvaten.

MATERIAAL

- klaargemaakt preparaat van een dwarsdoorsnede van een jonge wortel (bijvoorbeeld van een boterbloem)
- microscoop

METHODE

- Bekijk het preparaat bij een vergroting van 40×. Maak een schematische overzichtstekening en zet de volgende namen bij de delen: centrale cilinder, dekweefsel en endodermis.
- Bekijk de centrale cilinder bij een vergroting van 100× en maak er een tekening van. Zet de volgende namen bij de delen: bastvaten, cambium, centrale cilinder, endodermis en houtvaten.

RESULTAAT

Een overzichtstekening van de wortel en een detailtekening van de centrale cilinder.

INVLOED VAN DE pH

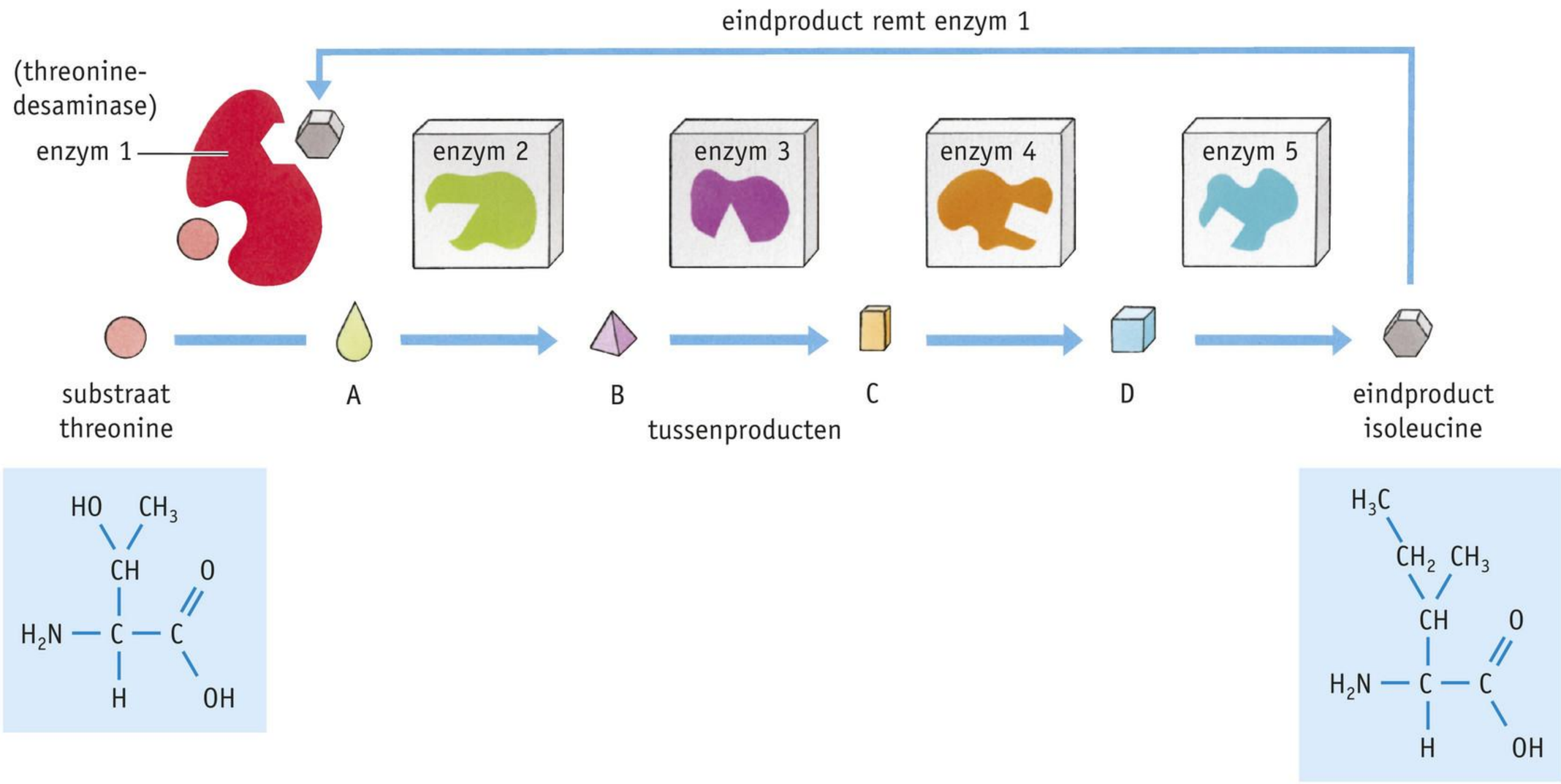
Een oplossing die veel waterstofionen (H^+, protonen) bevat, is zuur. De **pH** (zuurgraad) is dan lager dan 7. Een oplossing met weinig waterstofionen is basisch. De pH is dan hoger dan 7. De activiteit van een enzym is afhankelijk van de pH van de oplossing waarin de omzetting plaatsvindt. De ruimtelijke structuur van een enzymmolecuul blijft intact bij een bepaalde zuurgraad: het optimum. Bij verhoging of verlaging van de pH verandert bij steeds meer enzymmoleculen de vorm van het actieve centrum, waardoor het enzym zijn werking verliest. Ook deze verandering is vaak irreversibel. Alleen bij kleine pH-verschillen krijgt het enzym de ruimtelijke structuur weer terug.

REGULERING VAN DE STOFWISSELING

Binding van bepaalde stoffen aan een enzym beïnvloedt de enzymactiviteit. De ruimtelijke structuur en de chemische eigenschappen van het enzymmolecuul veranderen. Een activator zorgt voor een hogere enzymactiviteit, zoals sommige hormonen en geneesmiddelen. Remstoffen verlagen de enzymactiviteit, zoals lood en cadmium. Deze metalen zijn giftig. Hierdoor kunnen het enzym en substraat geen E-S-complex meer vormen.

Bij een reactieketen vindt een reeks van opeenvolgende stofwisselingsreacties plaats die leidt tot een eindproduct. Enzymen hebben hier vaak een rol in. Het eindproduct kan de enzymactiviteit weer remmen. In afbeelding 13 is weergegeven hoe in cellen van planten, gisten en bacteriën het aminozuur threonine wordt omgezet in het aminozuur isoleucine via een keten van reacties. Enzym 1 zet threonine om in tussenproduct A. Het eindproduct (isoleucine) remt de activiteit van enzym 1. Er ontstaat een evenwicht tussen de concentraties threonine en isoleucine in een cel.

■ **Afb. 13** Reactieketen bij de vorming van isoleucine.



Practicumopdracht 5

ONDERZOEKSDOEL

11.O.5 Je kunt een preparaat van een blad met huidmondjes maken en bekijken en de delen herkennen en benoemen.

- Basisstof 2
- Vaardigheden 1, 2, 3 en 4 (thema 1)

Huidmondjes

30 minuten

INLEIDING

In deze practicumopdracht bekijk en teken je huidmondjes. Hiervoor gebruik je een blad van een tulp, liguster of Chinese roos. Het doel van deze opdracht is dat je in een preparaat van een huidmondje de volgende delen kunt herkennen: opperhuid (epidermis) en sluitcel.

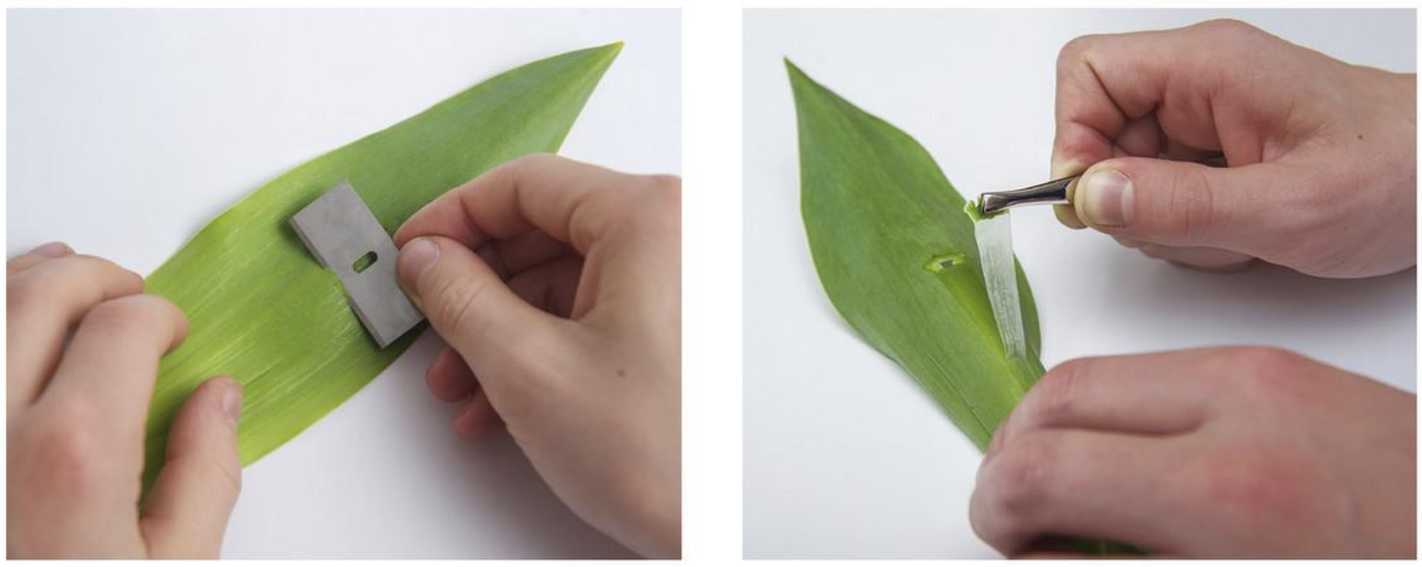
MATERIAAL

- een blad, bijvoorbeeld van een tulp, liguster of Chinese roos, of de stengel van een boonplant
- microscoop
- prepareermateriaal

METHODE

- Maak een preparaat van een vliesje van een blad (zie afbeelding 2). Dit gaat ook goed met plakband.
- Bekijk het preparaat bij een vergroting van 100× en zoek een huidmondje op.
- Bekijk het huidmondje bij een vergroting van 400×. Maak een tekening van het huidmondje met sluitcellen en omringende opperhuidcellen.

■ **Afb. 2** Een bladvliesje prepareren.



1 **2**

RESULTAAT

Een tekening van een huidmondje met sluitcellen en omringende opperhuidcellen.

Practicumopdracht 6

ONDERZOEKSDOEL

11.O 6 Je kunt een eigen onderzoek opzetten en uitvoeren en daarmee de invloed van verschillende factoren op de intensiteit van de fotosynthese bepalen.

- Basisstof 3
- Vaardigheden 6 en 7 (thema 1)

De intensiteit van de fotosynthese

50 minuten

INLEIDING

In afbeelding 3 is een proefopstelling weergegeven waarmee je fotosynthese kunt onderzoeken. Als je de opstelling in het licht plaatst, ontstaan er gasbelletjes. Deze worden in de reageerbuis opgevangen. In deze practicumopdracht onderzoek je de invloed van verschillende factoren op de intensiteit van de fotosynthese.

■ **Afb. 3** Proefopstelling voor fotosyntheseonderzoek.

Kies in overleg met je docent een factor die je wilt onderzoeken. Dit kan bijvoorbeeld de zuurgraad of de temperatuur zijn. Beschrijf hoe je het experiment wilt uitvoeren. Werk dit onderzoek uit met een inleiding, onderzoeksvraag, hypothese, experiment / materiaal en methode. Beschrijf in de methode waarom in dit onderzoek het aantal gasbelletjes per minuut wordt genoteerd. Voer het experiment uit en noteer je resultaten en conclusie. Verklaar in de discussie de gevonden resultaten en beschrijf een aanvullend onderzoek waarin je in meer detail de invloed van de temperatuur op de fotosynthese kunt aantonen.

SAMENVATTING

11.1.1 BASISSTOF 1

Je kunt beschrijven hoe lengte- en diktegroei bij kruid- en houtachtige planten plaatsvindt en dat stamcellen hiervoor verantwoordelijk zijn.

- De belangrijkste organen van een zaadplant zijn de wortel, de stengel en het blad. Ze bestaan uit drie verschillende weefsels:
  - dekweefsel, vormt de buitenzijde van een plant en beschermt tegen waterverlies en infecties (zie *BiNaS* tabel 81A);
  - vaatweefsel, bestaat voornamelijk uit transportvaten (houtvaten en bastvaten; zie *BiNaS* tabel 81E);
  - vulweefsel, (grondweefsel) zit tussen het dekweefsel en het vaatweefsel en speelt een rol bij fotosynthese, opslag en stevigheid.
- Deelweefsel (zie *BiNaS* tabel 81B) bevindt zich in de toppen van wortels en stengels (groeipunten, zie *BiNaS* tabel 91B), in knoppen, in jonge bladeren en in het cambium.
  - Stamcellen in deelweefsel (meristeem) zijn verantwoordelijk voor de groei van planten.
  - Na celdeling blijft één dochtercel in het deelweefsel liggen; de andere dochtercel ondergaat celstrekking, celdifferentiatie en celspecialisatie.
  - Groeipunten zorgen voor lengtegroei.
- Lengtegroei leidt tot verlenging van een plant (bij zowel kruidachtige als houtachtige planten).
- Diktegroei leidt tot verdikking van wortel en stengel (alleen bij houtachtige planten).
  - Naar binnen toe ontstaan houtcellen.
  - Naar buiten toe ontstaan bastcellen.
- Jaarring: al het hout dat in één jaar is gevormd.
  - Voorjaarshout: wijde houtvaten met dunne wanden (lichtgekleurd).
  - Zomerhout: nauwe houtvaten met dikke wanden (donkergekleurd).
  - Jaargrens: scherpe overgang tussen zomerhout en voorjaarshout (in herfst en winter geen cambiumactiviteit).
- In cellen van planten kunnen plastiden voorkomen. Deze celorganellen hebben een functie bij:
  - de fotosynthese (chloroplasten);
  - het lokken van insecten (chromoplasten);
  - het opslaan van reservestoffen (leukoplasten).

11.2.1 BASISSTOF 2

Je kunt beschrijven hoe planten water met voedingszouten opnemen, transporteren en afgeven.

- Transport bij eenvoudige planten vindt plaats door diffusie.
- Transport over grote afstanden bij grotere planten door vaten (zie *BiNaS* tabel 91A, B en C):
  - anorganische (opwaartse) sapstroom door houtvaten (voedingszouten opgelost in water);
  - organische sapstroom door bastvaten (assimilatieproducten opgelost in water).
- Waterpotentiaal: bepaalt en verklaart de verplaatsing van water in planten en dieren.
  - De waterpotentiaal is afhankelijk van de osmotische potentiaal en de druk van de wand op de celinhoud ($\psi_w = \psi_s + \psi_p$).
  - Water gaat van een hoge naar een lage waterpotentiaal.
  - De waterpotentiaal van zuiver water is 0 MPa. Het oplossen van stoffen in water maakt ψ_s negatief en verlaagt de waterpotentiaal. De toename van de druk maakt ψ_p positief en verhoogt de waterpotentiaal.
- Transport door houtvaten dankzij drie krachten:
  - Worteldruk ontstaat door actief transport van voedingszouten door endodermiscellen en osmotische werking van deze zouten in de houtvaten.
  - Door capillaire werking van de houtvaten (adhesie en cohesie) wordt het water omhooggetrokken.
  - Door verdamping van water uit de huidmondjes van de bladeren wordt water aangezogen uit de houtvaten.
  - In de vaatbundels in stengels liggen houtvaten aan de binnenkant, in de nerven in bladeren aan de bovenkant.
- Transport door bastvaten.
  - Bastvaten vervoeren water en assimilatieproducten (bijv. sacharose):
    - In het late voorjaar en in de zomer: van bladeren naar alle delen van de plant.
    - In het vroege voorjaar: van wortel naar bladknoppen.
  - In de vaatbundels in stengels liggen bastvaten aan de buitenkant, in de nerven in bladeren aan de onderkant.

11.2.2

Je kunt beschrijven hoe huidmondjes de gaswisseling van planten reguleren en hoe de opname van koolstofdioxide in relatie staat met de afgifte van water.

- Via huidmondjes gaat koolstofdioxide naar binnen en gaan waterdamp en zuurstof naar buiten.
  - Huidmondjes bevinden zich vooral aan de onderkant van de bladeren (zie *BiNaS* tabel 91A).
  - Huidmondjes kunnen open (hoge turgor in de sluitcellen) of dicht (lage turgor in de sluitcellen) zijn.
  - Waterverlies kan worden beperkt door de huidmondjes te sluiten.
    Dit belemmert de opname van CO_2 en daarmee de fotosynthese.

11.3.1 BASISSTOF 3

Je kunt uit de opname en afgifte van zuurstof en koolstofdioxide door een plant de intensiteit van de fotosynthese (koolstofassimilatie) afleiden.

- Gaswisseling in planten: de opname en afgifte van koolstofdioxide en zuurstof.
  - Zuurstof en koolstofdioxide worden door diffusie uitgewisseld tussen de bladcellen en de lucht via luchtholten en huidmondjes (kleine openingen aan de opperhuid van het blad).
- Koolstofassimilatie: een plant zet koolstofdioxide en water om in glucose en zuurstof. Dit gebeurt met behulp van lichtenergie (fotosynthese).
  - Fotosynthese vindt plaats in chloroplasten, plastiden die het pigment chlorofyl bevatten.
  - Chlorofyl absorbeert verschillende golflengten van het zichtbare licht (zie *BiNaS* tabel 72).
  - Zichtbaar licht is het gedeelte van het elektromagnetisch spectrum dat je met het menselijk oog kunt waarnemen.
- Voor de bepaling van de intensiteit van de fotosynthese zijn twee gegevens nodig:
  - in het licht: de hoeveelheid O_2 die een plant afgeeft (of de hoeveelheid CO_2 die een plant opneemt);
  - in het donker: de hoeveelheid O_2 die een plant opneemt (of de hoeveelheid CO_2 die een plant afgeeft);
  - Uit het verschil kun je de intensiteit van de dissimilatie afleiden.
- De intensiteit van de fotosynthese wordt bepaald door de beperkende factor.

11.3.2

Je kunt beschrijven hoe opslag van assimilatie-producten (organische stoffen) in planten plaatsvindt.

- Glucose wordt omgezet in andere koolhydraten en in eiwitten en vetten.
  - Zetmeel wordt overdag tijdelijk in de bladeren opgeslagen.
  - Vooral 's nachts: transport van sacharose via bastvaten naar andere delen van de plant.
  - Reservestoffen worden opgeslagen in verdikte delen (vooral koolhydraten) en in zaden (vooral eiwitten en vetten).

11.4.1 BASISSTOF 4

Je kunt verschillende manieren van voortplanting bij planten beschrijven.

- Geslachtelijke voortplanting vindt bij zaadplanten plaats in bloemen. Bloemen bevatten de mannelijke en/of vrouwelijke voortplantingsorganen:
  - Meeldraad (mannelijk voortplantingsorgaan): vormt stuifmeelkorrels (*n*) in de helmknoppen.
  - Stamper (vrouwelijk voortplantingsorgaan): bevat vruchtbeginsel met een of meer zaadbeginsels. Elk zaadbeginsel bevat één eicel (*n*).
  - De haploïde geslachtscellen ontstaan door meiose.
- Bij bestuiving komen stuifmeelkorrels terecht op de stempel van de stamper. Uit een stuifmeelkorrel kan een stuifmeelbuis groeien naar een zaadbeginsel.
- Bevruchting: de kern van een stuifmeelkorrel fuseert met de eicelkern: er ontstaat een zygote (2*n*).
  - Uit het zaadbeginsel ontstaat een zaad. Een zaad bestaat uit een kiem (het embryo) en reservevoedsel.
  - Uit het vruchtbeginsel ontstaat een vrucht. Een vrucht kan meerdere zaden bevatten.
- Ongeslachtelijke voortplanting: een deel van een individu groeit uit tot een nieuw individu.
  - Door mitose en celdeling.
  - Nakomelingen hebben hetzelfde genotype als de ouder (kloon).
  - Op natuurlijke wijze: bijv. bollen, knollen en uitlopers.
  - Op kunstmatige wijze: bijv. stekken, enten en weefselkweek.

11.5.1 BASISSTOF 5

Je kunt beschrijven hoe planten met behulp van signaalstoffen reageren op interne en externe signalen.

- Signaalstoffen in planten zijn plantenhormonen die betrokken zijn bij o.a. groeirichting, rijping en bescherming.
  - Auxine wordt gevormd in de uiterste toppen van stengels en bevordert de lengtegroei en celstrekking.
  - Etheen stimuleert de rijping van fruit.
- Fototropie: de groeirichting wordt beïnvloed door licht.
  - De productie van auxine wordt geremd door licht, waardoor de belichte kant minder auxine heeft dan de schaduwzijde.
  - Hierdoor groeien planten naar het zonlicht toe (positieve fototropie).
- Geotropie: de groeirichting wordt beïnvloed door zwaartekracht.
  - Een wortel is positief geotroop, doordat bij wortels een verhoogde auxineconcentratie leidt tot een remming van lengtegroei en celstrekking.
  - Stengels zijn negatief geotroop.
- Planten beschermen zich tegen vraat of infecties door:
  - mechanische afweer: bijv. haren, stekels en doorns;
  - chemische afweer: aanmaak van stoffen die onsmakelijk of dodelijk zijn;
  - indirecte afweer: aanmaak van stoffen die de natuurlijke vijand van de belager aantrekken;
  - Sommige planten zijn door natuurlijke selectie resistent tegen bepaalde ziekteverwekkers en/of plaaginsecten.
- Planten bezitten aanpassingen om uitdroging te voorkomen.
  - Fysiek: het sluiten van huidmondjes bij droogte, verzonken huidmondjes, een dikke cuticula.
  - Chemisch: aangepaste stofwisseling, bijv. CO_2 's nachts opnemen en vastleggen.

SAMENHANG

11.S.1 **Je kunt het afweermechanisme van planten toelichten voor verschillende organisatieniveaus van de biologie.**

11.S.2 **Je kunt de biologische vakvaardigheden evolutionair en ecologisch denken toepassen op de symbiose van planten en dieren.**

ONDERZOEK - PRACTICA

11.O.1 **Je kunt een preparaat van een dwarsdoorsnede van een stengel van een kruidachtige plant bekijken en de delen herkennen en benoemen.**

11.O.2 **Je kunt een preparaat van een worteltop bekijken en de weefsels herkennen en benoemen.**

11.O.3 **Je kunt een onderzoek opstellen en uitvoeren waarbij je beschrijft wat de invloed van licht is op geëtioleerde tuinkers.**

11.O.4 **Je kunt een preparaat van een dwarsdoorsnede van een wortel van een kruidachtige plant bekijken en de delen herkennen en benoemen.**

11.O.5 **Je kunt een preparaat van een blad met huidmondjes maken en bekijken en de delen herkennen en benoemen.**

11.O.6 **Je kunt een eigen onderzoek opzetten en uitvoeren en daarmee de invloed van verschillende factoren op de intensiteit van de fotosynthese bepalen.**

Ga naar de *Flitskaarten* en de *Oefentoets.*

EXAMENOPGAVEN

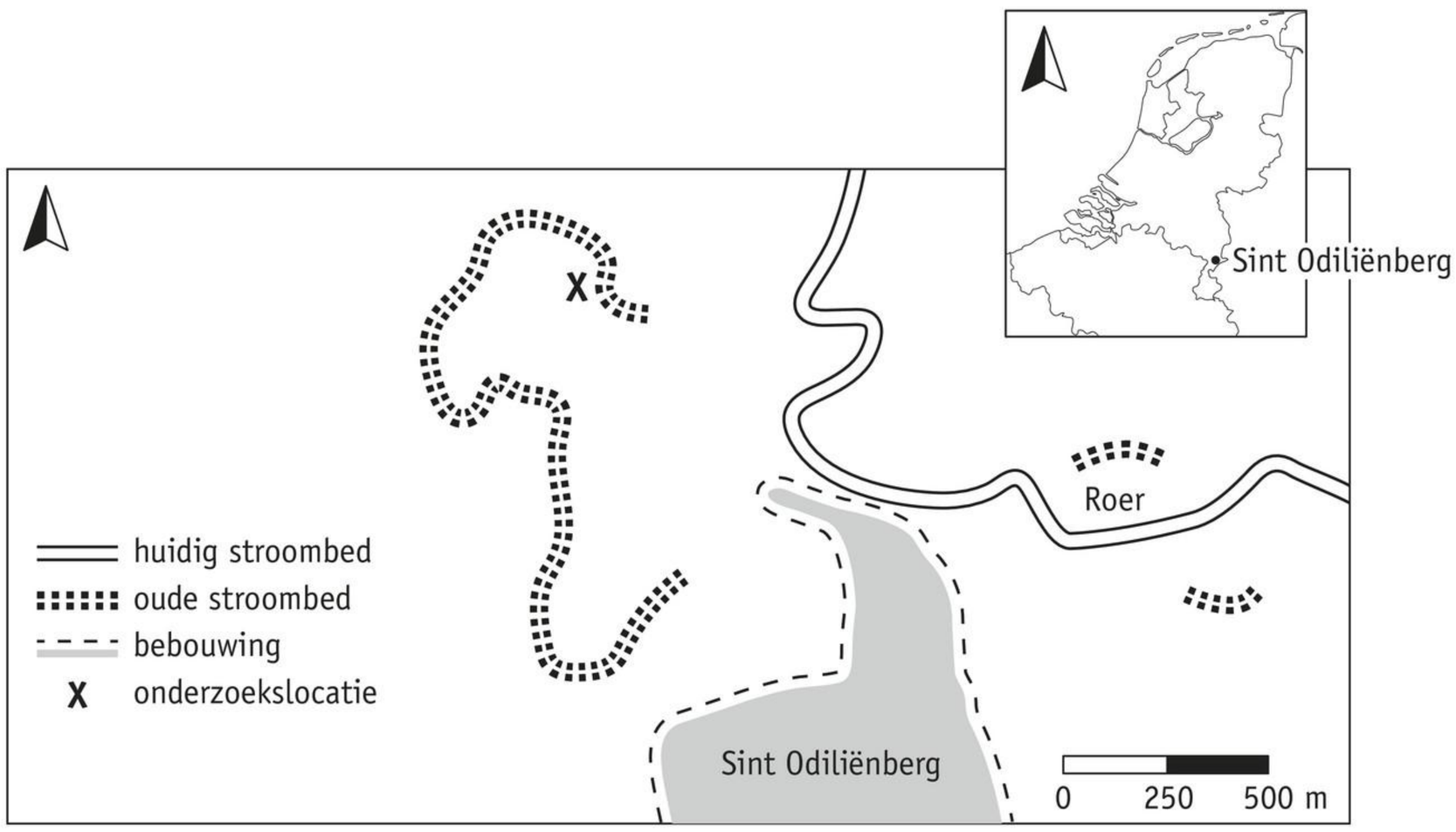
HUIDMONDJES IN DE MIDDELEEUWEN

Bron: examen vwo 2021-2, vraag 23, 24 en 25.

Paleo-ecoloog Thomas van Hoof van Universiteit Utrecht vermoedt dat er een link is tussen de pestepidemie die heerste in de veertiende eeuw en de tijdelijke verlaging van de CO_2-concentratie in de atmosfeer in die tijd. Plantaardige resten uit een oude riviertak geven hiervoor aanwijzingen.

Van Hoof onderzocht de bodem van een verlande riviertak van de Roer (zie afbeelding 1). Met behulp van een grondboor nam hij bodemmonsters tot een diepte van vier meter. De bodem bleek voor een groot deel te bestaan uit organische resten uit de periode 1000-1500 na Chr.

■ **Afb. 1** Een verlande riviertak van de Roer.



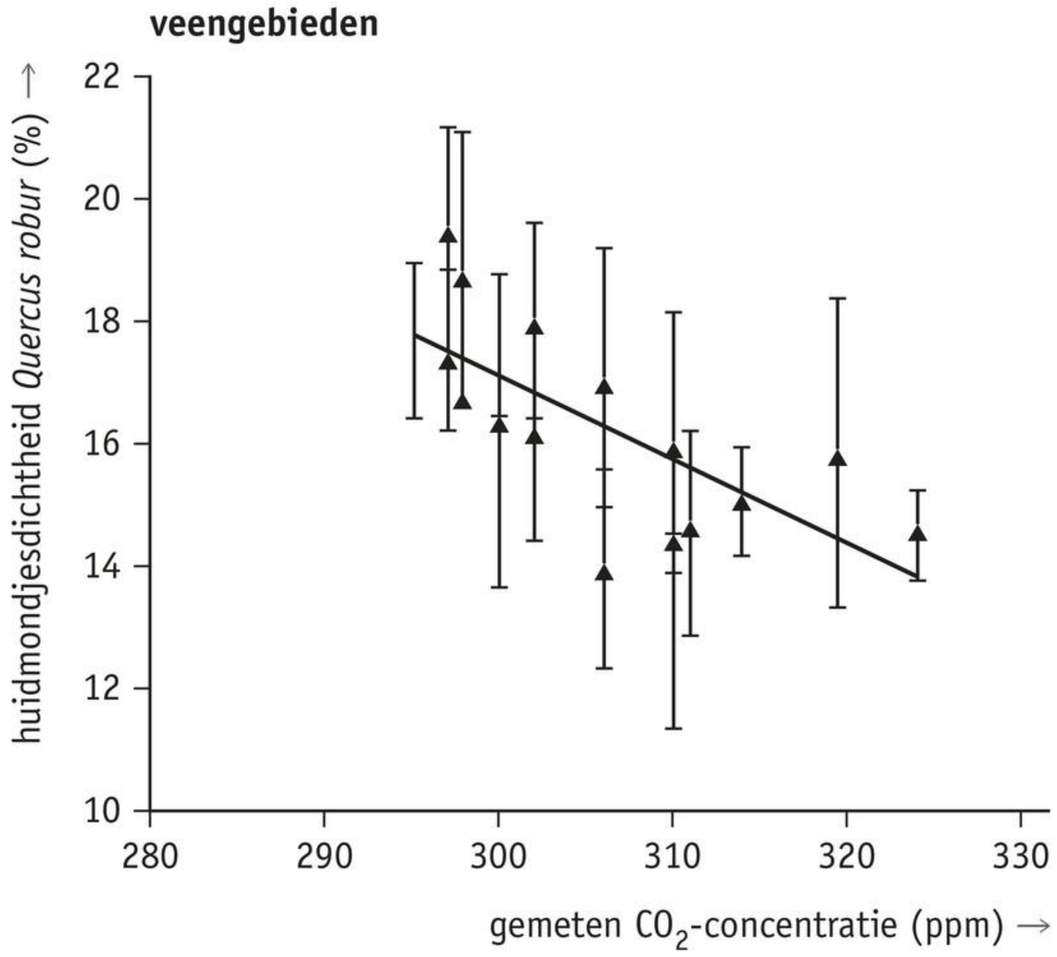
Het aangetroffen organisch materiaal is zo goed bewaard gebleven, dat aan de hand van bladvormen en pollen (stuifmeelkorrels) de samenstelling van de vegetatie vastgesteld kon worden. Daarmee geven de bodemmonsters inzicht in de verandering van de vegetatie in de loop van de geschiedenis.

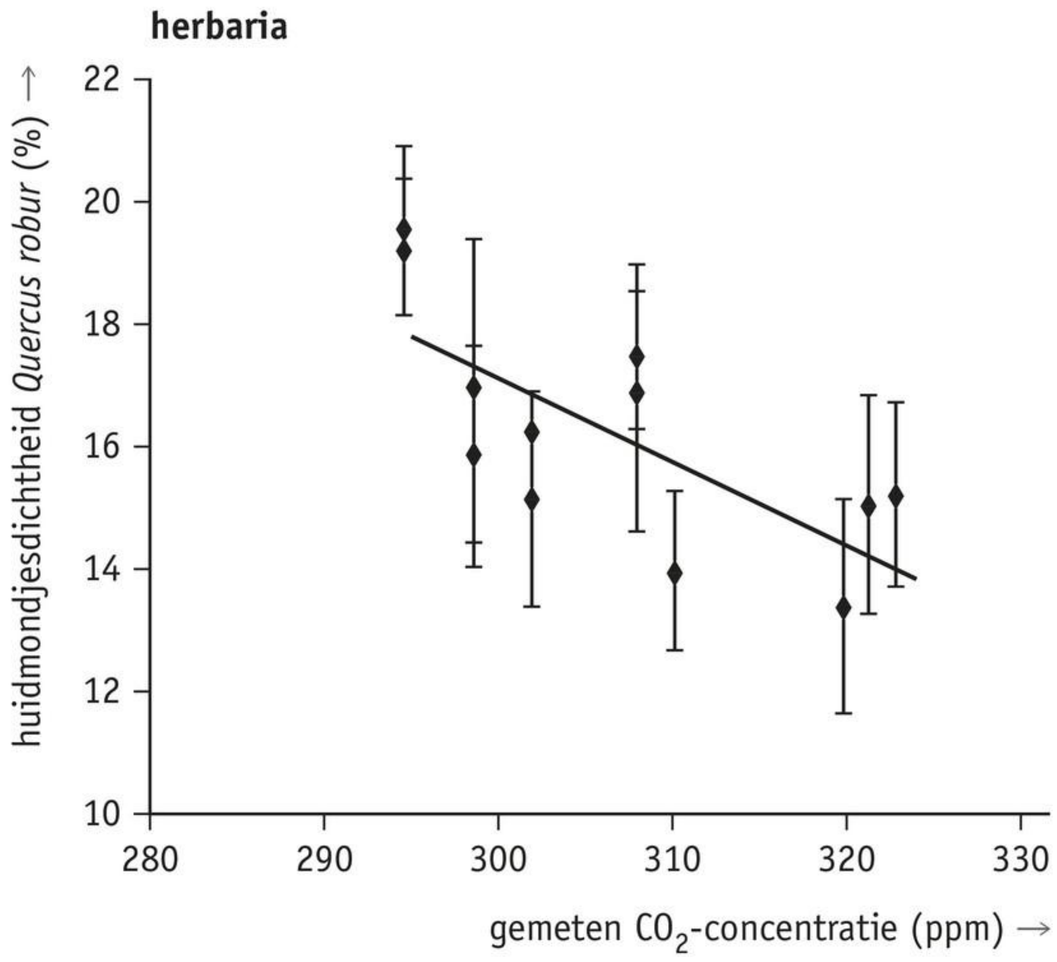
Van de bladresten van de zomereik (*Quercus robur*) kon Van Hoof de dichtheid van de huidmondjes bepalen. De huidmondjesdichtheid is gerelateerd aan de CO_2-concentratie in de atmosfeer.

Een afname van de CO_2-concentratie in de atmosfeer leidt tot een toename van de huidmondjesdichtheid. Dit kan een epigenetische of een evolutionaire oorzaak hebben.

Van Hoof wilde met de gegevens over de huidmondjesdichtheid van de middeleeuwse bladresten de CO_2-concentratie in de atmosfeer in die periode afleiden. Daarom heeft hij een 'huidmondjesindex' vastgesteld met materiaal van recentere zomereiken uit de twintigste eeuw. Hiervoor heeft hij gebruikgemaakt van bladresten uit veengebieden en van bladeren uit herbaria (verzamelingen van gedroogde planten). De precieze ouderdom van dit bladmateriaal is bekend, zodat de huidmondjesdichtheid vergeleken kon worden met metingen van de CO_2-concentratie in de atmosfeer in die jaren (zie afbeelding 2).

■ **Afb. 2** Huidmondjesdichtheid veengebieden en herbaria.





Van elk geanalyseerd blad is op verschillende plaatsen van een bepaalde oppervlakte het aantal huidmondjes en het aantal epidermiscellen geteld. Om de gemeten huidmondjesdichtheid van het herbariummateriaal te vergelijken met die van de 'verse' bladeren van de zomereik, moet gecorrigeerd worden vanwege krimp van de gedroogde herbariumbladeren.

De cellen van verse bladeren die in een herbarium worden opgenomen, doorlopen als gevolg van uitdroging achtereenvolgens: verlies van turgor, grensplasmolyse, plasmolyse, celdood.

2p **1** Zal de gemeten huidmondjesdichtheid bij het herbariummateriaal hoger of lager zijn dan toen de bladeren vers waren? En op welke wijze wordt de huidmondjesdichtheid uitgedrukt zodat hiervoor wordt gecorrigeerd?

	Huidmondjesdichtheid herbariummateriaal	**Correctie door uitdrukken huidmondjesdichtheid als**
A	hoger	$\frac{\text{aantal huidmondjes}}{\text{aantal epidermiscellen + aantal huidmondjes}}$
B	hoger	$\frac{\text{aantal huidmondjes}}{\text{aantal epidermiscellen – aantal huidmondjes}}$
C	lager	$\frac{\text{aantal huidmondjes}}{\text{aantal epidermiscellen + aantal huidmondjes}}$
D	lager	$\frac{\text{aantal huidmondjes}}{\text{aantal epidermiscellen – aantal huidmondjes}}$

De resultaten in afbeelding 2 tonen een lineair verband tussen de huidmondjesdichtheid en de CO_2-concentratie. Het is onmogelijk dat hetzelfde lineaire verband ook zou gelden bij de huidige CO_2-concentratie van 400 ppm. Er blijft immers een minimumaantal huidmondjes nodig.

2p **2** Geef twee redenen waarom het aantal huidmondjes niet nul kan zijn.

KAS VOL KOOLSTOFDIOXIDE

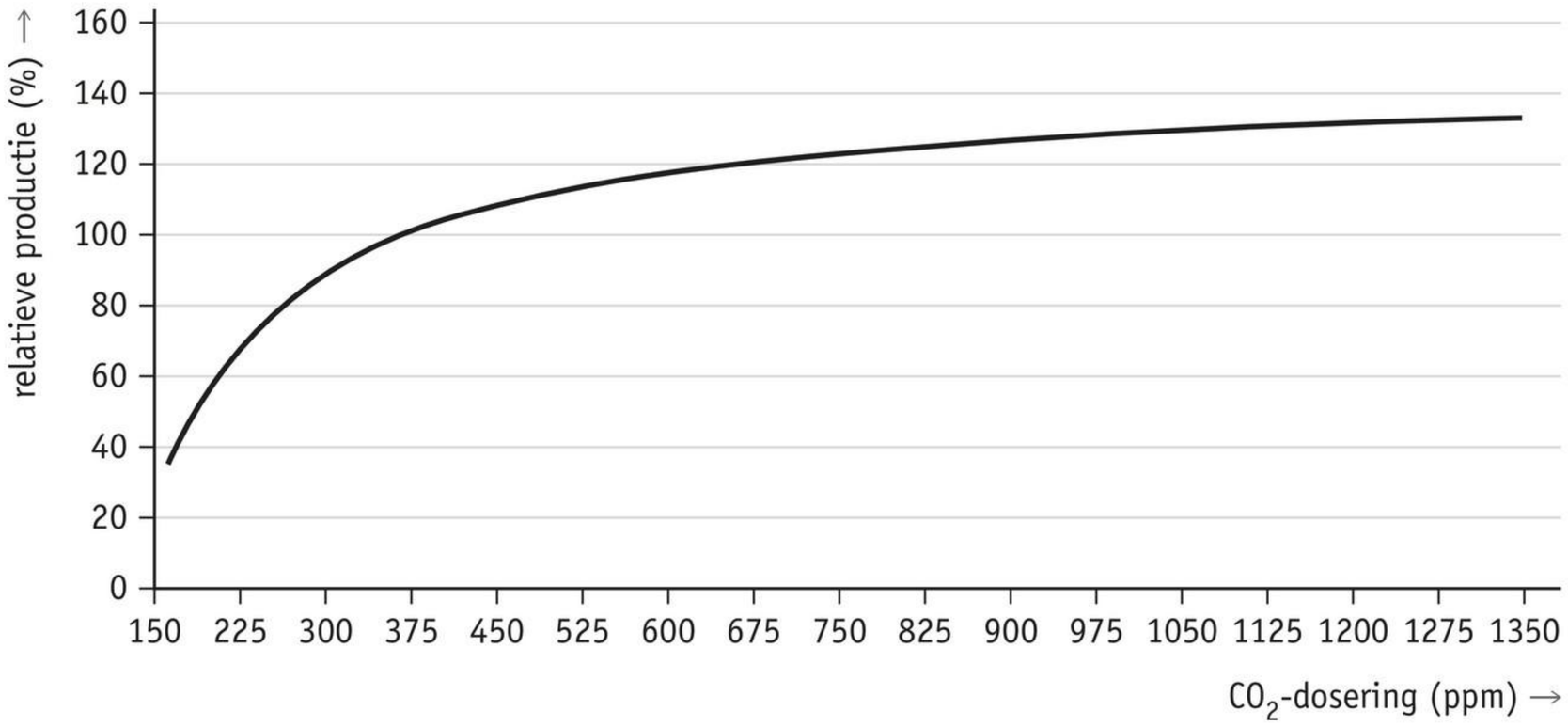
Bron: examen vwo 2019-1, vraag 35, 36, 38 en 39.

Moderne tomatenteeltbedrijven maken gebruik van complexe regelsystemen die alle factoren voor de plantengroei optimaal houden. Wat optimaal is, wordt bepaald door wetenschappelijk onderzoek en de praktijkervaring van telers.

Een teler probeert in zijn kassen de productie van tomaten zo hoog mogelijk te maken door onder meer de temperatuur en de CO_2-concentratie te reguleren. In een gesloten kas kan de CO_2-concentratie dalen en daarmee de productie. Door in de zomer te ventileren wordt het niet te warm en blijft het CO_2-gehalte op peil. In de winter wordt aardgas verstookt voor verwarming en het daarbij gevormde CO_2 naar de kas geleid.

De invloed van de CO_2-concentratie op de productie van tomatenplanten in experimenteerkassen is weergegeven in afbeelding 3. De productie bij de CO_2-concentratie van de buitenlucht is op 100% gesteld.

■ **Afb. 3** De invloed van de CO_2-concentratie op de productie van tomatenplanten.



In de experimenteerkassen blijkt een verhoging van de CO_2-dosering boven de 1000 ppm nauwelijks te leiden tot een verdere verhoging van de opbrengst aan tomaten.

3p **3**

- Noteer twee andere abiotische factoren die dan beperkend kunnen zijn voor de opbrengst van de planten.
- Beschrijf hoe een onderzoeker die beschikt over een aantal experimenteerkassen kan onderzoeken welke van de twee genoteerde factoren beperkend is.

In de tomatenteelt betekent 'productie' het aantal kilogram tomaten per oppervlakte in een bepaalde tijd. Dat is heel wat anders dan de in de ecologie gebruikte term netto primaire productie (NPP).

2p **4** Waarin verschilt de door de telers gebruikte term productie van tomaten in een kas van het begrip NPP in dezelfde kas? Noteer twee aspecten.

Uitrolbare schermen kunnen warmteverlies in de kas verminderen als het buiten koud is. Deze schermen worden ook gebruikt om op zomerse dagen de felle zonnestraling te temperen.
Bij te veel zonnestraling op zomerse dagen is er kans op opbrengstverlies als gevolg van een beperkte CO_2-opname van de planten.

2p **5** Leg uit waardoor de CO_2-opname van de planten op een warme zomerse dag wordt beperkt.

Gewoonlijk doseren tomatentelers de CO_2-concentratie in de kas tussen 800 en 1000 ppm. Onderzoekers van Wageningen University & Research hebben in twee experimenteerkassen de CO_2-dosering in de loop van de teeltperiode gehalveerd en het effect op de productie van tomaten onderzocht. Tegen de verwachting in bleek de productie vrijwel gelijk te blijven.
Bij nader onderzoek bleek dat bij de gehalveerde CO_2-dosering het aantal huidmondjes per cm^2 bladoppervlak in de loop van het groeiseizoen groter was geworden.

2p **6** Leg uit hoe de plant hierdoor de lagere CO_2-dosering kan compenseren.
Gebruik in je antwoord een van de factoren: diffusieoppervlak, concentratieverschil of diffusieafstand.

Ga naar de *Examentrainer*.

NOTITIES

Opdrachten KENNIS

14 Biologische wasmiddelen bevatten enzymen.

a Leg uit waarom bij het gebruik van deze wasmiddelen de temperatuur niet te hoog mag zijn.

b Waardoor kan een kikker in Nederland 's winters buiten niet actief zijn en een merel wel?

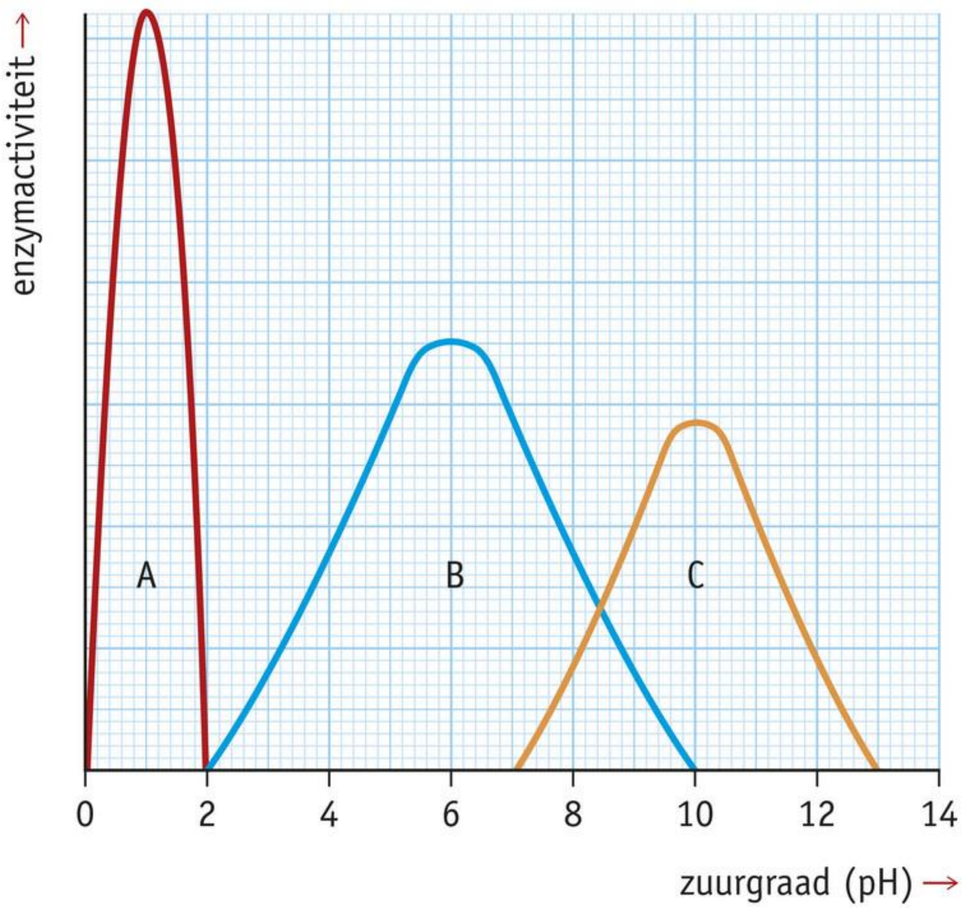
c Waarom is koorts boven 40 °C zo gevaarlijk voor mensen?

15 In afbeelding 14 is het verband tussen de pH en de enzymactiviteit van drie verschillende enzymen weergegeven.

a Welk enzym is het best werkzaam in een omgeving met veel waterstofionen?

b Een vloeistof varieert in zuurgraad van pH 8-10. Alle drie de enzymen zitten in deze vloeistof.
Welk enzym zal het best werkzaam zijn?

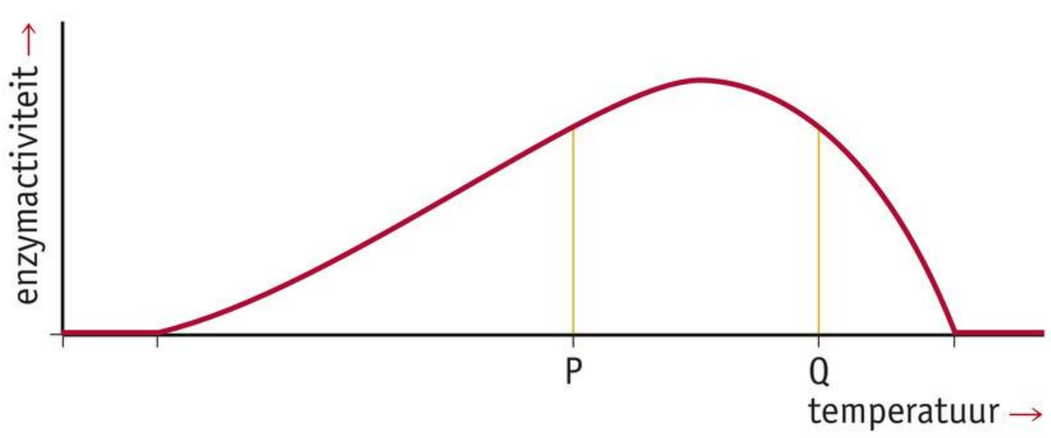
■ **Afb. 14** Enzymactiviteit.



Opdrachten INZICHT

16 In afbeelding 15 is de optimumkromme van een bepaald enzym voor de temperatuur weergegeven.
Senna wil een hoeveelheid van dit enzym bewaren. Ze beschikt over een ruimte met temperatuur P, een ruimte met temperatuur Q en een ruimte met de voor dit enzym optimale temperatuur.
In welke van deze drie ruimten kan ze het enzym het best bewaren om zoveel mogelijk intacte enzymmoleculen over te houden? Leg je antwoord uit.

■ **Afb. 15** Optimumkromme van een bepaald enzym voor de temperatuur.



REGISTER

3'-uiteinde 78
5'-uiteinde 78

A
activators 121
adhesiekrachten 180
ADP 13
aerobe dissimilatie 44
afleesrichting 78
alcohol 48
aminozuur 37
anaerobe dissimilatie 48
anorganische sapstroom 177
anticodon 109
antisense-DNA 140
apoptose 121
assimilatie 11
assimilatieproducten 177
ATP 13
autotroof 12

B
basenparing 78
basenvolgorde 91
bastvaten 169
beperkende factor 191
biotechnologie 137
bouwstof 34
brandstof 34

C
capillaire werking 180
cDNA 140
celdifferentiatie 119
cellulose 35
celtypen 119
chemische afweer 209
chemische energie 10
chemische reactie 19
chemosynthese 29
chlorofyl 26
chloroplast-DNA 77
chloroplasten 26
chromosomen 77
cisgeen 137
citroenzuurcyclus 44
coderende streng 100
codon 107
cohesiekrachten 180
complementair DNA 140
copyDNA 140

D
deletie 127
denaturatie 20
disacharide 34
dissimilatie 11
DNA 76
DNA-fingerprint 93
DNA-polymerase 86
DNA-repairsysteem 132
DNA-replicatie 85
donkerreacties 27
dubbelstrengs DNA 79

E
eiwitten 37
elektromagnetisch spectrum 189
endodermis 178
enkelstrengs DNA-molecuul 78
enzymen 17
enzym-substraatcomplex 17
enzymwerking 17
epigenetica 122
essentiële aminozuren 37
exons 103

F
FAD 46
fermentatie 48
fosfolipiden 40
fotosynthese 26
frame shift mutation 128

G
gaswisseling 188
gelelektroforese 91
gen 80
genetische code 107
genetische informatie 76
genetische modificatie 137
genexpressie 117
genoom 77
genoommutaties 129
genregulatie 117
geslachtscellen 199
gisting 48
glycerol 38
glycogeen 35
glycolyse 44
goedaardig 133

H
helixstructuur 79
heterotroof 12
histonen 80
houtvaten 169
huidmondjes 180

I
insertie 127
introns 103

K
kanker 132
katalyseren 17
kern-DNA 77
kiem 199
kinetische energie 11
knock-out-gen 141
koolhydraten 34
koolstofassimilatie 12
kwaadaardige tumoren 133

L
lagging streng 87
leading streng 87
leesraamverschuiving 128
lichtenergie 11
lichtreacties 27

M
matrijsstreng 100
mechanische afweer 209
meeldraden 198
meiose 199
melkzuur 48
metastase 133
methaan 49
methylering 122
micro-RNA (miRNA) 122
mitochondriaal DNA 77
mitose 85
monosacharide 34
mRNA 100
mutagene factoren 131
mutagene stoffen 131
mutagene straling 131
mutaties 127

N

NAD 13
NAD⁺ 13
NADP⁺ 13
NADPH 13
niet-coderend DNA 81
niet-essentiële aminozuren 37
nucleïnezuur 77
nucleosoom 80
nucleotiden 77

O

okazaki-fragmenten 87
oncogen 132
operator 118
operon 117
optimumkromme 20
organische sapstroom 177
oxidatieve fosforylering 44

P

PCR 90
pH 21
plasmiden 77
plastiden 173
polysacharide 35
primaire structuur 37
primer 86
promotor 100
proteïnen 37
proto-oncogenen 132
puntmutatie 128

Q

quaternaire structuur 37

R

reactievergelijking 18
recombinant-DNA-techniek 138
regulatorgenen 117
repressors 118
reservestof 34
resistent 209
restrictie-enzymen 94
RNA 99
RNAi 122
RNA-interferentie 122
RNA-polymerase 100
rRNA 100

S

secundaire structuur 37
sequencen 91
sequentie 80
S-fase 85
signaalstoffen 206
splicing 104
stamcellen 119
stamcelonderzoek 119
stamceltransplantatie 119
stamper 198
startcodon 108
stofwisseling 10
stopcodon 108
structuurgenen 117
substitutie 127
substraat 17

T

telomeer 89
template-streng 100
tertiaire structuur 37
transcriptie 100
transcriptiefactoren 100
transgeen 137
translatie 107
tripletcode 107
tRNA 100
tumor 132
tumorsuppressorgen 132
tussencelstof 40

V

verbranding 44
verdamping 180
vetten 38
vetzuren 38
voortgezette assimilatie 12
vrije DNA-nucleotiden 86

W

warmte 11
waterpotentiaal 179
worteldruk 178
wortelharen 177

Z

zaad 199
zetmeel 35

COLOFON

ONTWERP BINNENWERK
Bianca Enthoven

ONTWERP OMSLAG
Michael Brugmans (Kimmic concept & design)
Bianca Enthoven

UITVOERING BINNENWERK
Crius Group

EINDREDACTIE
Claud Biemans
Arthur Jansen

AUTEURS
Arthur Jansen
Anneke Kamstra
Mathijs Nieuwenhuis
Michelle Sparnaaij

BUREAUREDACTIE
Grada Hooijer
Maurice Breugelmans

BEELDRESEARCH
BenU International Picture Service, Amsterdam

FOTO'S EN ILLUSTRATIES
123RF, alila: blz. 130 (60); 123RF, oksun70: blz. 147; ANP / Science Photo Library, A. Barrington Brown: blz. 85; ANP / Science Photo Library, Dr. Keith Wheeler: blz. 172 (7.2); ANP / Science Photo Library, Sinclair Stammers: blz. 72; ANP / Science Photo Library, Steve Gschmeissner: blz. 33; ANP, Sander Koning: blz. 106; ANP, Wiebe Kiestra: blz. 176; Bewerkt naar: Kyrou, K., Hammond, A., Galizi, R. et al. A CRISPR–Cas9 gene drive targeting doublesex causes complete population suppression in caged Anopheles gambiae mosquitoes. Nat Biotechnol 36, 1062–1066 (2018). https://doi.org/10.1038/nbt.4245, Figure 1D: blz. 160; Buiten-beeld, Michel Geven: blz. 205; CDC / Daniel Drapeau: blz. 144; Claud Biemans: blz. 43; Damon De Backer / damondebacker.com: blz. 213; Edwin Verbaal / Verbaal Visuele Communicatie, Nijmegen: blz. 11 (1), 12, 13, 18 (8), 20, 22 (15); Erik Eshuis Infographics (aanpassing Jeannette Steenmeijer, Zwolle): blz. 192 (32); Erik Eshuis Infographics, Groningen: blz. 11 (2), 21, 26, 27, 28, 32, 39 (32.2), 40 (34.1, 35), 45, 77 (2), 86, 91, 95 (22), 103 (31), 104, 109 (36), 112, 120 (47, 48), 123 (52), 130 (62), 131, 133, 179, 182, 185 (23), 190 (31), 195, 198 (39), 200 (44); Getty Images, Patrick van Katwijk: blz. 75; Henk van der Vrande: blz. 181; Imageselect / Alamy Stock Photo, David Dennis: blz. 164; Imageselect / Science Source, Francesco Tomasinelli: blz. 167; Jan Daanen / Medilan, Maastricht: blz. 174, 201 (45), 203 (48), 209 (58), 220; Jeannette Steenmeijer, Zwolle (naar: Coupling between atmospheric CO2 and temperature during the onset of the Little Ice Age, Tom van Hoof, Laboratory of Palaeobotany and Palynology, Utrecht University, 2004, figure 3.1): blz. 224; Jeannette Steenmeijer, Zwolle (Naar: Coupling between atmospheric CO2 and temperature during the onset of the Little Ice Age, Tom van Hoof, Laboratory of Palaeobotany and Palynology, Utrecht University, 2004, figure 5.1): blz. 225; Jeannette Steenmeijer, Zwolle (naar: Vermeulen, PMC & van der Lans, CJM. (2010). CO2 dosering in de biologische glastuinbouw. Wageningen: Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek. Figuur 1): blz. 227; Jeannette Steenmeijer, Zwolle: blz. 19 (10, 11), 22 (14), 23, 29, 35, 42 (36), 68 (4), 95 (21), 114 (41, 42), 115 (43, 44), 128 (58), 138, 158, 159 (2, 3), 161, 175 (11), 192 (33); Leen Moraal / WUR: blz. 183 (20); Medical Visuals / Maartje Kunen, Arnhem: blz. 17, 18 (9), 31 (24), 36, 37 (29), 38, 42 (37), 46 (40, 41), 47, 49, 50, 66, 67, 68 (3), 69, 76, 77 (3), 78, 79, 80 (6, 7), 83, 87, 88, 89, 90, 92 (17, 18), 93, 97, 99, 100, 102, 103 (30), 105, 109 (35), 110 (37, 38), 111, 121, 122, 125, 128 (57), 129, 139, 141, 148, 169 (1, 2.1, 2.2), 170, 171 (4, 5), 172 (6, 7.1), 173 (9), 178 (14, 15), 180, 183 (21), 198 (40), 199 (41, 42), 200 (43), 206, 207 (53, 54), 211 (61); Nabuurs, 2023: blz. 136; Nature in Stock / Minden Pictures, Mark Moffett: blz. 214; Paul Veenvliet, Ljubljana: blz. 189 (29); Prof. Walter Gehring, Biozentrum, University of Basel: blz. 124 (53); Shutterstock, A_M_Radul: blz. 14; Shutterstock, AjayTvm: blz. 166; Shutterstock, Albertix: blz. 193; Shutterstock, Anwarul Kabir Photo: blz. 211 (60.2); Shutterstock, barmalini: blz. 175 (12.2); Shutterstock, BBstockimage: blz. 175 (12.1); Shutterstock, Brian A Jackson: blz. 203 (49); Shutterstock, Dew_gdragon: blz. 188, 189 (28); Shutterstock, DimaBerlin: blz. 208 (55); Shutterstock, Elena Zajchikova: blz. 218; Shutterstock, Evgeny Tomeev: blz. 209 (57); Shutterstock, Ezume Images: blz. 6; Shutterstock, Halfpoint: blz. 130 (61); Shutterstock, HHelene: blz. 204; Shutterstock, Hong Vo: blz. 192 (33); Shutterstock, Irina Boldina: blz. 201 (46.1); Shutterstock, Jukka Jantunen: blz. 126; Shutterstock, Kovaleva_Ka: blz. 192 (33); Shutterstock, Kurit afshen: blz. 123 (51); Shutterstock, LifeCollectionPhotography: blz. 197; Shutterstock, Maks Narodenko: blz. 8; Shutterstock, Martin Cloutier: blz. 186; Shutterstock, Monning27: blz. 211 (60.1); Shutterstock, Narek87: blz. 82; Shutterstock, neenawat khenyothaa: blz. 187; Shutterstock, New Africa: blz. 9; Shutterstock, Ortis: blz. 192 (33); Shutterstock, PHOTO BY LOLA: blz. 54; Shutterstock, Photoongraphy: blz. 208 (56); Shutterstock, PosiNote: blz. 212 (63); Shutterstock, Rawpixel.com: blz. 74; Shutterstock, Real Window Creative: blz. 16; Shutterstock, Robert Kneschke: blz. 116; Shutterstock, Roman Bjuty: blz. 212 (62); Shutterstock, RossHelen: blz. 134; Shutterstock, Saran_Poroong: blz. 210; Shutterstock, Sergey V Kalyakin: blz. 202; Shut-

terstock, Serhii Shcherbyna: blz. 142; Shutterstock, SeventyFour: blz. 25; Shutterstock, SOMMAI: blz. 192 (33); Shutterstock, Stock-Asso: blz. 52; Shutterstock, thatmacroguy: blz. 201 (46.2); Shutterstock, Tomas Vynikal: blz. 196; Shutterstock, Vera Larina: blz. 184; Shutterstock, Zastolskiy Victor: blz. 173 (8); Voermans Van Bree Fotografie: blz. 219.

Omslag: Adobe Stock / chris2766

MALMBERG

ISBN 978 94 020 8072 8
Release 7.0, vijfde oplage

MIX
Papier | Ondersteunt verantwoord bosbeheer
FSC® C172387
FSC www.fsc.org

Alle rechten voorbehouden. Geen tekst- en datamining toegestaan. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. Voor zover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16b Auteurswet 1912 j° het Besluit van 20 juni 1974, St.b. 351, zoals gewijzigd bij het Besluit van 23 augustus 1985, St.b. 471, en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 3051, 2130 KB Hoofddorp).

Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient men zich tot de uitgever te wenden.
©2025 Malmberg 's-Hertogenbosch.

Ondanks vele inspanningen is het de uitgever misschien niet gelukt alle rechthebbenden te achterhalen. Wie denkt rechthebbende te zijn, kan zich wenden tot de uitgever.

Eindredactie
Claud Biemans
Arthur Jansen

Auteurs
Arthur Jansen
Anneke Kamstra
Mathijs Nieuwenhuis
Michelle Sparnaaij

Biologie voor jou voor de bovenbouw van het vwo bestaat uit vijf boeken. Je leert in klas 4, 5 en 6 onder andere over de ontwikkeling van organismen. Ook jij maakt een ontwikkeling door: van een beginneling tot iemand met een goede kennis van de biologie.

Jonge mannetjesmerels verkleuren in de herfst van bruin naar zwart. Net als alle vogels, zijn merels een beschermde diersoort. Tussen 2016 en 2019 nam het aantal merels sterk af, waarschijnlijk door het usutuvirus, een vogelvirus dat muggen kunnen overdragen. Ook de kwaliteit van de omgeving verandert. Bomen en struiken verdwijnen en tuinen liggen vol tegels. Verschillende organisaties in Nederland doen onderzoek en geven advies over het vogelvriendelijk maken van stad en land.

MAX

Je mag dit boek houden.
Handig als naslagwerk.

Je mag in dit boek schrijven
en aantekeningen maken.

Je hebt ook toegang tot
de online leeromgeving.

Release 7.0

MIX
Papier | Ondersteunt verantwoord bosbeheer
FSC® C172387
www.fsc.org

ISBN 978 94 020 8072 8

9 789402 080728

604427-05

MALMBERG

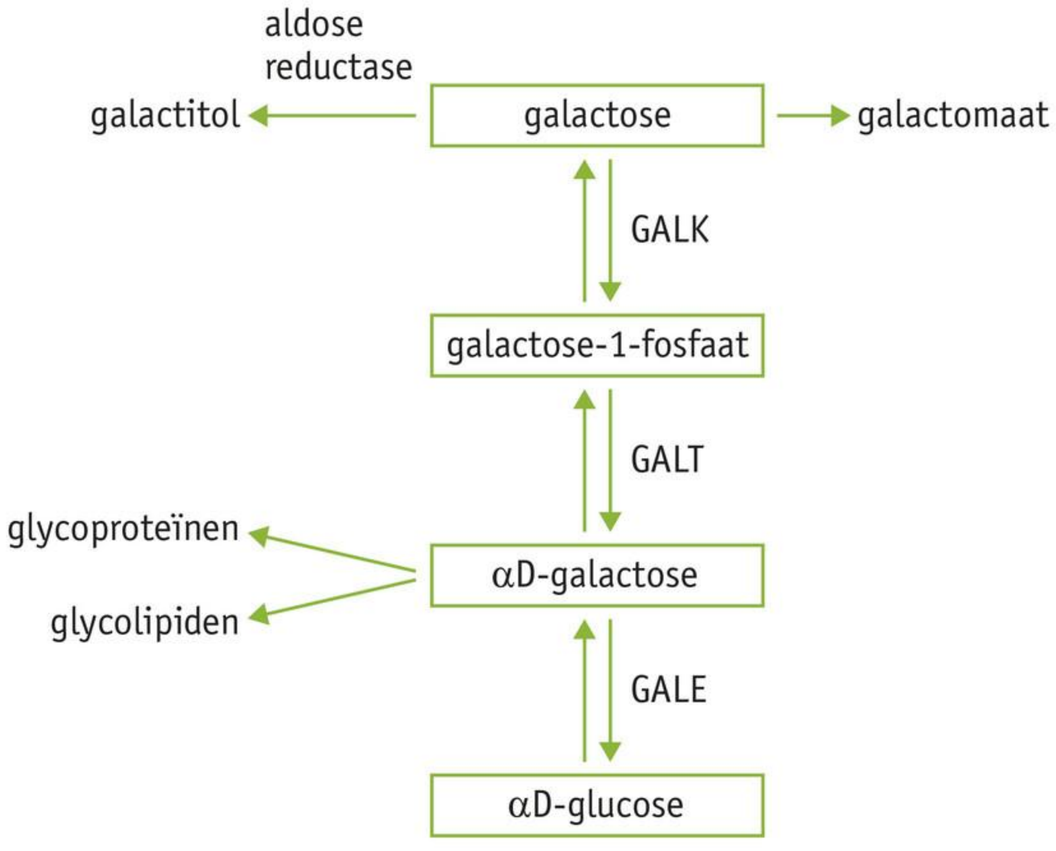
17 Bij een stofwisselingsstoornis worden stoffen wel opgenomen in de cel, maar niet goed verwerkt.

a Waardoor kan een tekort aan vitaminen leiden tot een stoornis in de stofwisseling?

b Galactosemie is een voorbeeld van een stofwisselingsstoornis. Iemand met galactosemie kan de stof galactose (voornamelijk afkomstig uit lactose) niet goed omzetten in glucose. De meest bekende oorzaak is het niet goed werken van het GALT-enzym. In afbeelding 16 staat de omzetting van galactose in glucose.
Welke stoffen hopen op bij iemand met galactosemie waarbij het enzym GALT niet werkt?

c Bij galactokinase-deficiëntie werkt het GALK-enzym niet goed. Deze patiënten hebben veel minder klachten dan patiënten met galactosemie. Leg uit hoe dit kan.

■ **Afb. 16** Omzetting van galactose in glucose.



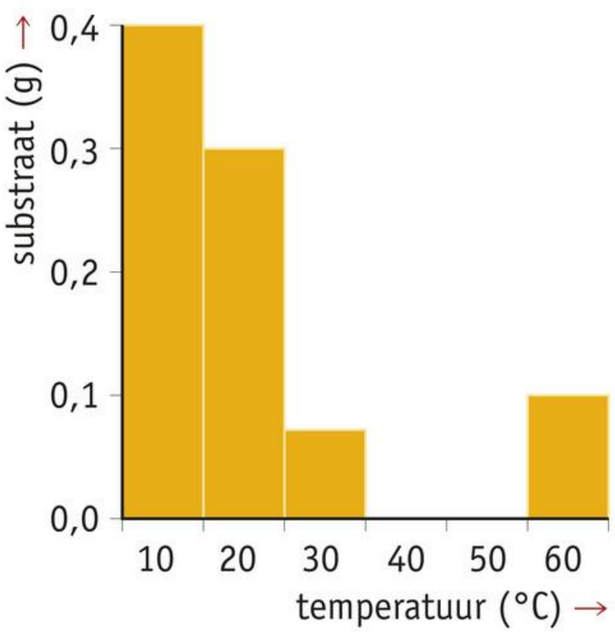
18 **a** Is er bij de vorming van isoleucine (zie afbeelding 13) sprake van positieve of negatieve terugkoppeling? Licht je antwoord toe.

b Wat is het gevolg voor de threonineconcentratie in een cel als op een bepaald moment alle isoleucine uit deze cel wordt verwijderd?

c Is er bij positieve terugkoppeling sprake van een evenwichtsreactie?

19 Enzym E zet substraat S om in product P. Een oplossing van enzym E wordt in gelijke hoeveelheden over zes reageerbuizen verdeeld. Elke buis wordt daarna op een bepaalde temperatuur gebracht en gehouden, waarna aan elke buis 0,4 g substraat S wordt toegevoegd. Een halfuur later wordt gemeten hoeveel substraat er nog in elk van de buizen over is (zie afbeelding 17).
Uit het diagram kun je niet afleiden of de hoeveelheid substraat die door een bepaalde hoeveelheid van het enzym E per minuut wordt omgezet bij 40 °C even groot is als bij 50 °C.
Op welke manier kun je dit wel onderzoeken?

■ **Afb. 17** Hoeveelheid substraat.



20 Alzheimer door ontregelde stofwisseling

Naar: Voorronde Biologie Olympiade Bovenbouw 2011, vraag 44.

APP (amyloïde precursor proteïne) is een enzym in het celmembraan van hersencellen dat schadelijke Fe^{2+}-ionen opneemt uit de cel, ze omzet in Fe^{3+}-ionen en buiten de cel overdraagt op andere eiwitten die voor afvoer zorgen. Als zink-ionen koppelen aan APP, blokkeren ze de werking ervan. Fe^{2+}-ionen worden dan niet meer omgezet in Fe^{3+}-ionen en het geblokkeerde APP wordt afgezet als plaques op de cellen. Patiënten met de ziekte van Alzheimer hebben veel van deze plaques in hun hersenen, evenals een hoog Fe^{2+}-gehalte in de aangetaste hersendelen.
Zink-ionen hopen zich op in de groeiende plaques. Door de aanwezigheid van zinkionen maken de hersencellen steeds nieuw APP aan.
Is dit een voorbeeld van positieve of van negatieve terugkoppeling? En waaruit blijkt dat?

Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf.*

Context Leefwereld

BIERBROUWEN

Bierbrouwen kan een leuke hobby zijn, maar er komt heel wat bij kijken. Bij het brouwproces spelen enzymen een grote rol. Het is daarom belangrijk om de temperatuur goed in de gaten te houden.

Het begint met de gerstkorrels. Die moet je op een bepaalde temperatuur bewaren. Tijdens het kiemen worden er enzymen aangemaakt, zoals amylases en proteases. Na een tijdje wordt er hete lucht over de kiemende gerstkorrels geblazen. Door te variëren in temperatuur en duur van verhitten, ontstaan er verschillende kleuren gerst, die je 'mout' noemt.

De mout wordt met water gemengd en verwarmd. Dit gebeurt stap voor stap, zodat verschillende enzymen hun werk kunnen doen. Proteases knippen bij een temperatuur van 35 tot 60 °C lange eiwitketens in korte eiwitketens en vrije aminozuren. De aminozuren dragen bij aan de groei van de gist. De lange eiwitten die overblijven zorgen voor de stevige schuimkraag op het bier.

Bij een hogere temperatuur zetten de amylases (alfa- en bèta-amylases) zetmeel om tot vergistbare suikers. Ze werken op verschillende temperaturen. In de richting van het kookpunt denatureren de enzymen en stopt het gisten.

Het brouwsel wordt gefilterd en de vloeistof, het wort, wordt gekookt. Na het afkoelen wordt de vloeistof een week weggezet. Toegevoegde gisten zetten de suikers onder anaerobe omstandigheden om in alcohol en CO_2. Na een week gaat het product in de flesjes (bottelen) en is het wachten tot het bier op smaak is.

■ **Afb. 18** Bierbrouwer aan het werk.

Opdrachten

21 **a** Waarom gaat er hete lucht langs de gerstkorrels?

b Een brouwer heeft bier gemaakt dat goed smaakt, maar geen mooie schuimkraag heeft. De volgende keer past hij het proces aan. Hij kan drie kwartier verwarmen bij 35 °C of 25 minuten verwarmen bij 55 °C. Leg uit wat een brouwer het best kan doen om een mooiere schuimkraag te krijgen.

c Om een hoger alcoholpercentage te krijgen, kan een brouwer meer suiker toevoegen tijdens het bottelen. Hij kan ook het bier langer en meer verwarmen.
Leg uit hoe langer en meer verwarmen van het bier zorgt voor een iets hoger alcoholpercentage.

22 **a** De alfa-amylases knippen de lange zetmeelketens in kleinere stukken. Daarna knippen de bèta-amylases ze in mono-, di- en trisachariden. De optimumtemperatuur van alfa-amylase is tussen de 70-75 °C, van bèta-amylase tussen de 60-65 °C.
Leg uit op welke temperatuur je het bier het best kunt koken.

b In hop, een belangrijk ingrediënt van bier, zitten alfazuren of humulonen. Ze zorgen voor een goede schuimkraag en hebben een antibacteriële werking.
Zullen de bacteriën die hierdoor doodgaan meer bij een lage of hoge zuurgraad voorkomen?

c Door de schuimkraag op bier gaan aerobe bacteriën dood. Leg uit hoe dit komt.

3 KOOLSTOFASSIMILATIE

LEERDOEL

9.3.1 Je kunt de fotosynthese en de chemosynthese beschrijven.

- Vaardigheid 6 (thema 1)
- Practicum 4

TAXONOMIE	LEERDOEL EN OPDRACHTEN
	9.3.1
Begrijpen	23, 24, 25, 26, 31ab
Toepassen	27b, 28ab, 31c
Analyseren	27ac, 28c, 29, 30, 31de

Planten hebben chloroplasten met enzymen waarmee ze lichtenergie kunnen vastleggen in glucosemoleculen. Uit glucose maken planten allerlei andere stoffen, waardoor ze bijvoorbeeld kunnen groeien. Jij kunt planten eten en gebruikt dan de vastgelegde energie voor je stofwisselingsprocessen.

ENERGIE

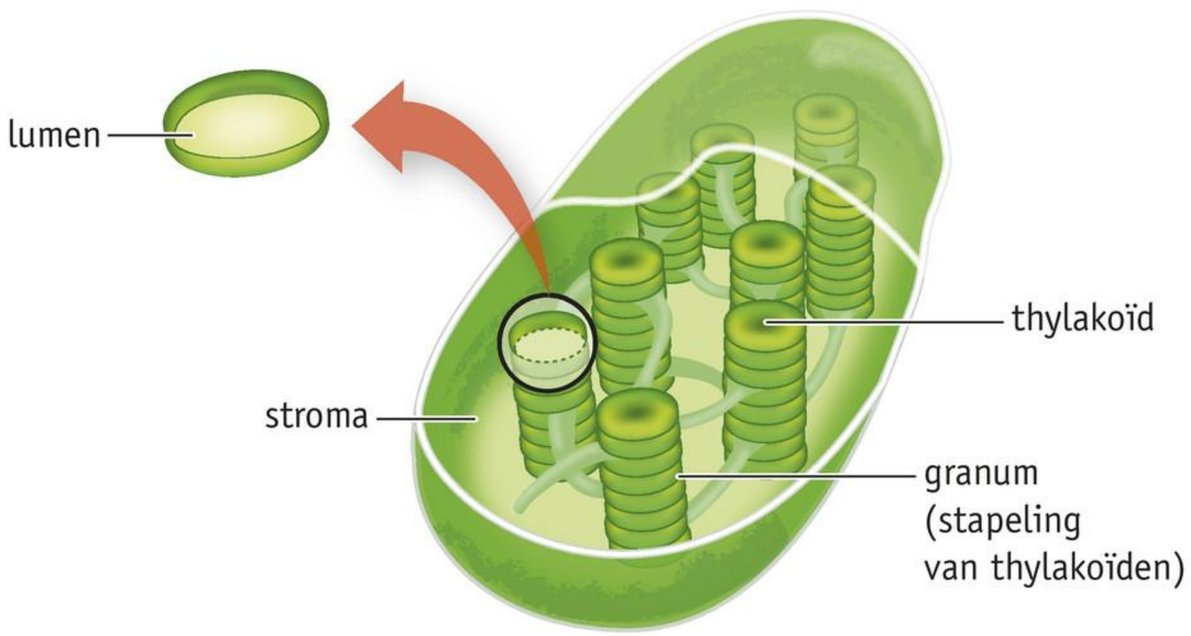
Planten, algen en cyanobacteriën hebben het pigment **chlorofyl** (bladgroen) in de cellen. Dit pigment absorbeert licht. De energie uit het licht wordt omgezet in de chemische energie van glucose. Deze vorm van koolstofassimilatie heet **fotosynthese**.

De reactievergelijking voor de fotosynthese is:

$$6\ CO_2 + 6\ H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$$

Bij planten bevindt het chlorofyl zich in de **chloroplasten** (bladgroenkorrels) in speciale membranen: de thylakoïden. Deze membranen liggen als stapels munten op elkaar (zie afbeelding 19). De binnenruimte van een thylakoïde noem je het lumen. Rondom de thylakoïden bevindt zich een dikke vloeistof, het stroma.

■ **Afb. 19** Een chloroplast met thylakoïden.

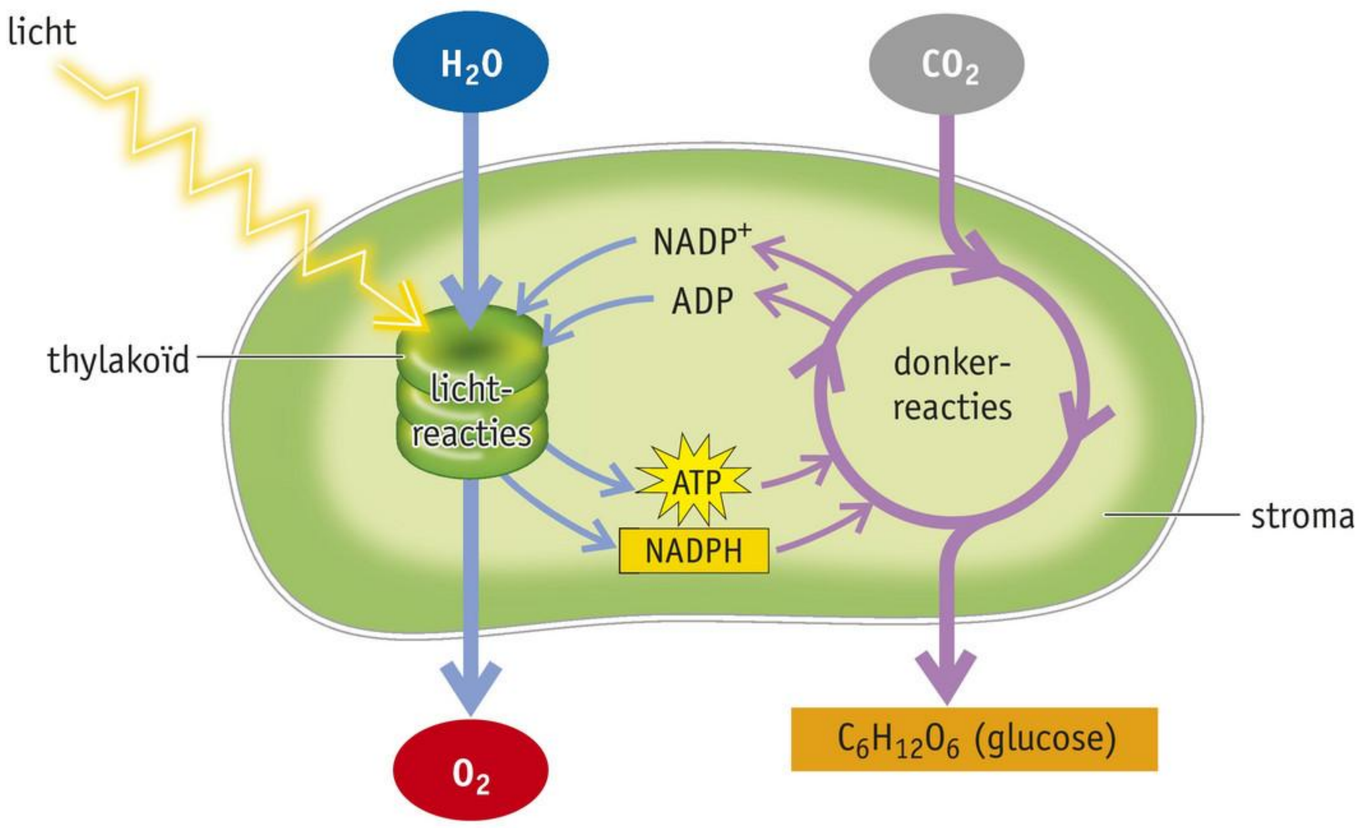


TWEE REACTIEKETENS

De fotosynthese bestaat uit twee samenhangende reactieketens (zie afbeelding 20). De reactieketen waarvoor licht nodig is, de **lichtreacties**, vindt plaats op de membranen van de thylakoïden. De **donkerreacties** hebben geen licht nodig en vinden plaats in het stroma van de chloroplast.

In de lichtreacties wordt lichtenergie van de zon gebruikt om water (H_2O) te splitsen in zuurstof- en waterstofionen en om energie over te dragen aan elektronen. De transportmoleculen ATP en NADPH transporteren de energierijke elektronen en waterstofionen naar de donkerreacties. Daar wordt glucose gevormd uit koolstofdioxide met behulp van ATP, elektronen en waterstofionen. De donkerreacties vinden meteen na de lichtreacties plaats.

■ **Afb. 20** Schema van de lichtreacties en de donkerreacties in een chloroplast.



LICHTREACTIES

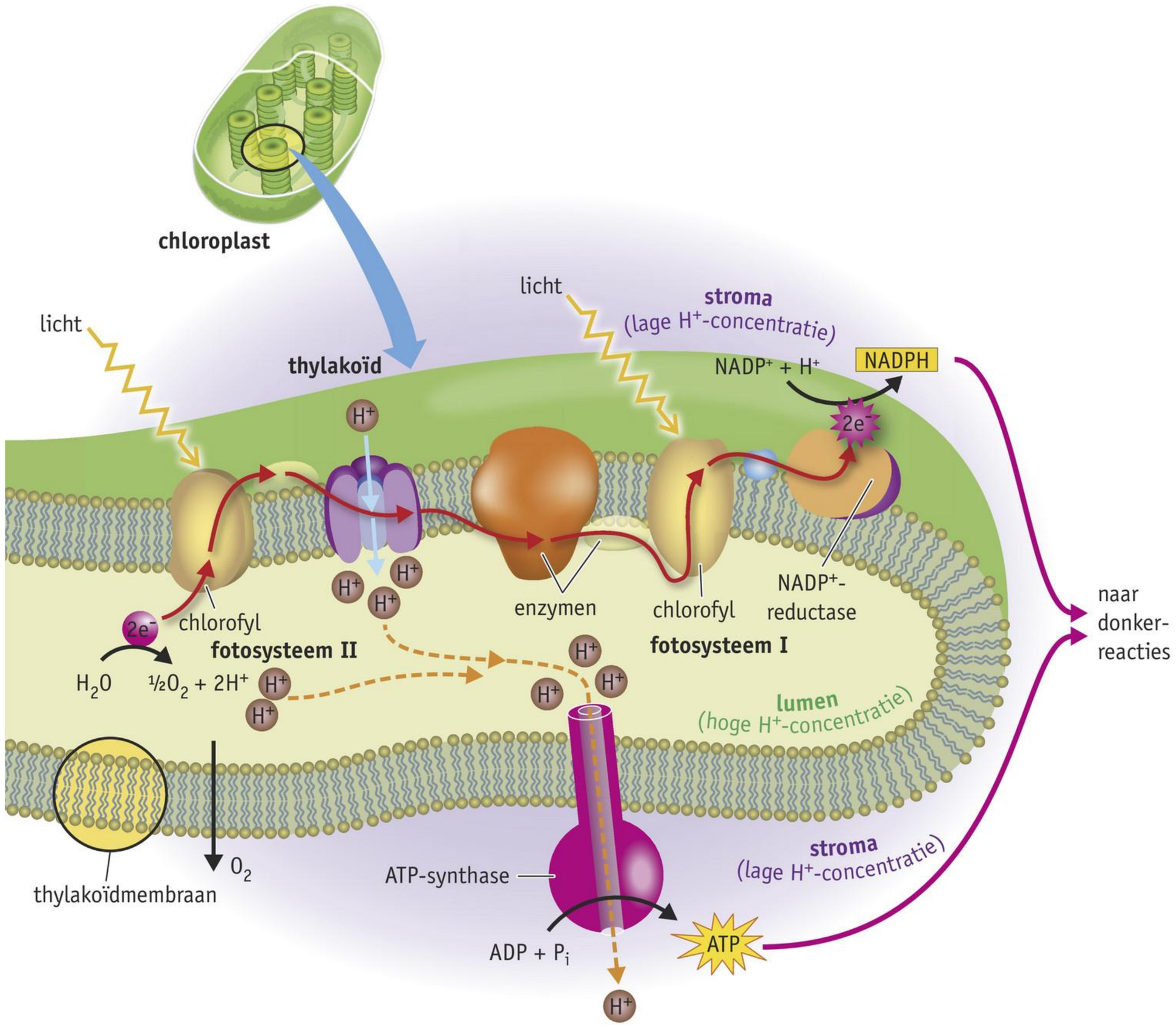
In de membranen van de thylakoïden liggen twee fotosystemen. Deze zetten lichtenergie om in chemische energie. De fotosystemen bestaan uit twee typen chlorofyl en een elektronentransportketen met elektronenacceptoren en enzymen (zie afbeelding 21 en *BiNaS* tabel 69B1). Een elektronenacceptor is een stof die elektronen opneemt en heet ook wel een oxidator. Een reductor is een stof die juist elektronen afstaat. Fotosysteem I (PSI, van *photo system I*) is eerder ontdekt dan fotosysteem II (PSII).

De lichtreacties beginnen in PSII met de splitsing van water. Daarbij ontstaan waterstofionen (H^+) die in het lumen terechtkomen. De zuurstof (O_2) die ontstaat diffundeert naar het stroma. De huidmondjes scheiden een deel van de zuurstof uit, de rest wordt gebruikt bij de verbranding in de mitochondriën. Tegelijkertijd zorgen de reacties in PSII voor energierijke elektronen. Enzymen in de elektronentransportketen gebruiken deze energie om extra waterstofionen vanuit het stroma naar het lumen te transporteren. Daarna worden de elektronen via de elektronentransportketen doorgegeven naar PSI.

PSI maakt de elektronen opnieuw energierijk met behulp van lichtenergie. Het transportmolecuul $NADP^+$ neemt per molecuul twee energierijke elektronen van het enzym $NADP^+$-reductase op en een waterstofion (uit het stroma). Daarbij ontstaat NADPH die de elektronen en het waterstofion naar de donkerreacties transporteert:

$NADP^+ + H^+ + 2e^- \rightarrow NADPH$

■ **Afb. 21** Fotosysteem I en II in het thylakoïdmembraan (lichtreacties).



Door de lichtreacties ontstaat in het lumen een ophoping van waterstofionen. Dat veroorzaakt een elektrische spanning over het membraan. De waterstofionen diffunderen via ATP-synthase naar het stroma. ATP-synthase gebruikt de energie van de waterstofionen om ADP om te zetten in energierijk ATP.

Dit proces heet fotofosforylering. De energie die nu is vastgelegd in ATP is hierna nodig voor de vorming van glucose in de donkerreacties en voor andere processen in de cel.

Opdrachten KENNIS

23 **a** Wat zijn de eindproducten van de lichtreacties?

b Door het afstaan van elektronen aan $NADP^+$ ontstaat in het thylakoïdmembraan een elektronentekort.
Hoe wordt dit tekort aangevuld?

c Het enzym $NADP^+$-reductase reduceert $NADP^+$ tot NADPH.
Welke rol heeft $NADP^+$ bij deze enzymreactie?

24 **a** Gebruik *BiNaS* tabel 69B.
Wanneer hebben de elektronen in de lichtreactie meer energie: na PSII of PSI?

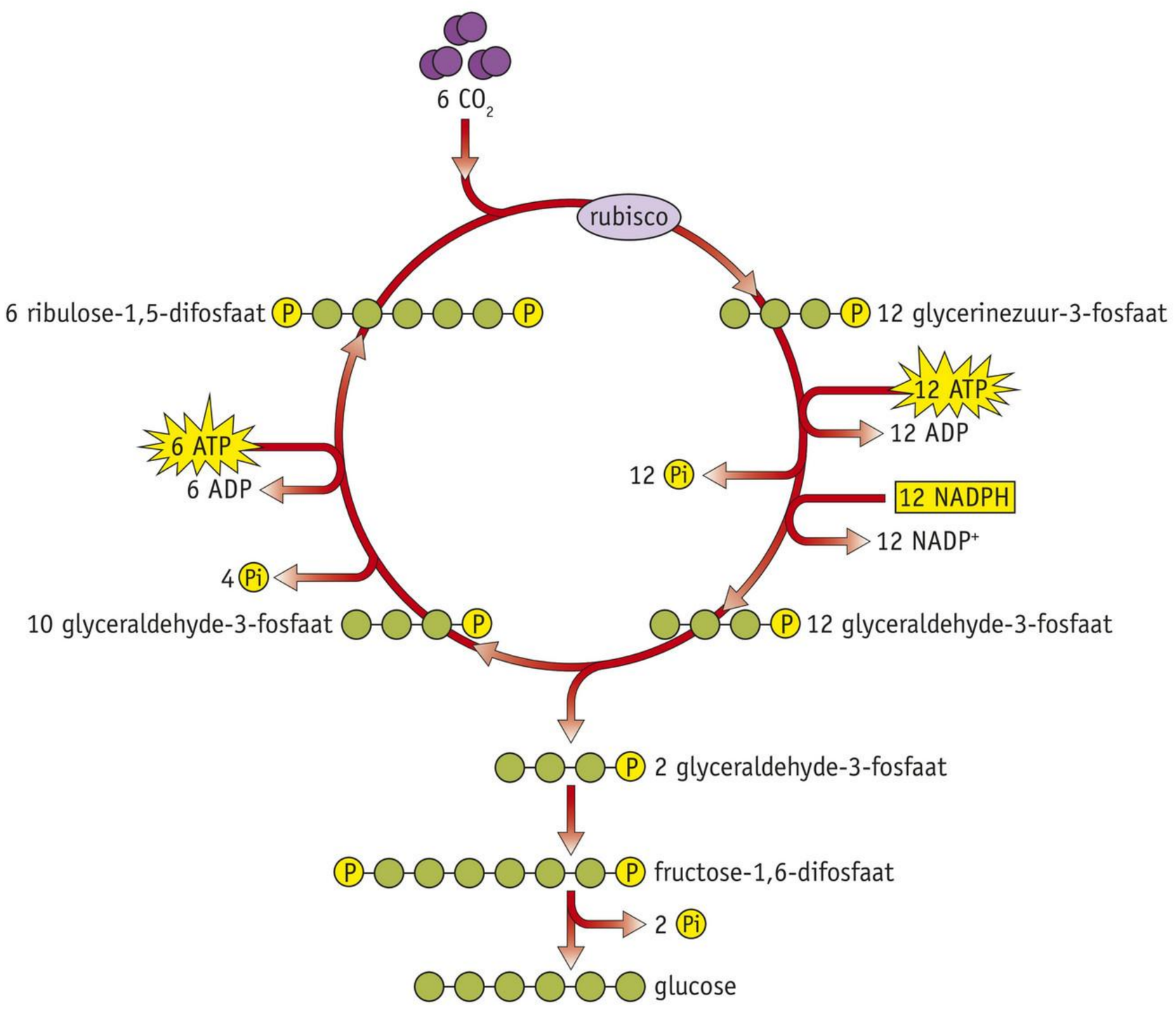
b Waarom is er energie van elektronen nodig om waterstofionen uit het stroma naar het lumen te vervoeren?

c Welke waterstofionen zijn vooral nodig voor de lichtreacties, die uit het lumen of uit het stroma?

DONKERREACTIES (CALVINCYCLUS)

De donkerreacties van de fotosynthese vinden plaats in het stroma van de chloroplasten. Ze vormen glucose uit koolstofdioxide, NADPH, en H^+ met behulp van energie uit ATP. De donkerreactie of calvincyclus is vernoemd naar een van de ontdekkers van deze cyclische keten, Melvin Calvin. In afbeelding 22 is de calvincyclus weergegeven (zie ook *BiNaS* tabel 69C). De getallen voor de molecuulformules geven aan hoeveel moleculen nodig zijn voor de vorming van één glucosemolecuul.

■ **Afb. 22** Donkerreactie (calvincyclus).



De netto-fotosynthesereactie is uiteindelijk:

$6\ CO_2 + 6\ H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$

CHEMOSYNTHESE

Sommige organismen gebruiken de energie die beschikbaar komt bij de oxidatie (onttrekking van elektronen) van een anorganische stof. Deze vorm van koolstofassimilatie heet **chemosynthese** en komt voor bij chemoautotrofe bacteriën, zoals nitriet- en nitraatbacteriën. Deze bacteriën verkrijgen energie door de oxidatie van anorganische stoffen. De energie uit de oxidatie wordt tijdelijk opgeslagen in ATP. Met behulp van de energie in ATP en een waterstofdonor (een stof die waterstofionen levert) kan uit koolstofdioxide glucose worden gevormd.

Zwavelbacteriën zijn chemoautotrofe bacteriën die leven bij zwavelbronnen op de bodem van oceanen. Ze vormen de basis van diepzee-ecosystemen. Zwavelbacteriën oxideren waterstofsulfide (H_2S) tot zwavel (S). Zwavel kan verder worden geoxideerd tot zwavelzuur (H_2SO_4) (zie ook *BiNaS* tabel 69D):

$2\ H_2S + O_2 \rightarrow 2\ H_2O + 2\ S$ + energie
$2\ S + 2\ H_2O + 3\ O_2 \rightarrow 2\ H_2SO_4$ + energie

Nitriet- en nitraatbacteriën zijn chemoautotrofe bacteriën die in de bodem voorkomen. Ze zetten onder andere ammonium om tot nitriet. Dit proces heet nitrificatie. Deze bacteriën spelen een rol in de stikstofkringloop. Als ammoniak (NH_3) in water oplost, worden ammoniumionen (NH_4^+) gevormd. Nitrietbacteriën oxideren ammoniak (of ammoniumionen):

$2\ NH_3 + 3\ O_2 \rightarrow 2\ HNO_2 + 2\ H_2O$ + energie

HNO_2 wordt gesplitst in H^+-ionen en NO_2^--ionen (nitrietionen). Nitraatbacteriën oxideren de nitrietionen verder tot nitraationen (NO_3^-):

$2\ NO_2^- + O_2 \rightarrow 2\ NO_3^-$ + energie

Opdrachten KENNIS

25 Zwavelbacteriën gebruiken waterstofsulfide (H_2S) als elektronendonor in plaats van water (H_2O).
Ontstaat bij de koolstofassimilatie van zwavelbacteriën zuurstof? Leg je antwoord uit.

26 Gebruik *BiNaS* tabel 69C.
- **a** Hoeveel moleculen CO_2 en hoeveel ATP-moleculen worden er in de calvincyclus gebruikt bij de vorming van één glucosemolecuul?
- **b** Bij het ontstaan van de zes moleculen ADP ontstaan ook zes fosfaatgroepen (P_i). Waar gaan deze fosfaatgroepen naartoe?
- **c** Vinden de donkerreacties overdag en/of 's nachts plaats? Leg je antwoord uit.

Opdrachten INZICHT

27 Microbiologen hebben in een zuiveringsinstallatie twee bacteriën gevonden die samen ammonium uit afvalwater omzetten in het onschadelijke stikstofgas. De nitrificerende nitrosomonas-bacterie zet ammonium met behulp van een beetje zuurstof om in nitriet. De dieprode anammox-bacterie (*Brocadia anammoxidans*) zet vervolgens dit nitriet om in stikstofgas met ammonium als energiebron. Anammox staat voor *ANaerobe AMMonium OXidatie*.
- **a** Waarom is het voor het milieu belangrijk om ammonium uit afvalwater te verwijderen?
- **b** Geef de nettoreactievergelijking van de omzetting van ammonium en nitriet in stikstof en water.
- **c** Verklaar dat onder procesomstandigheden met een lage concentratie zuurstof en hoge concentratie ammonium de samenwerking tussen nitrosomonas en anammox het best verloopt.

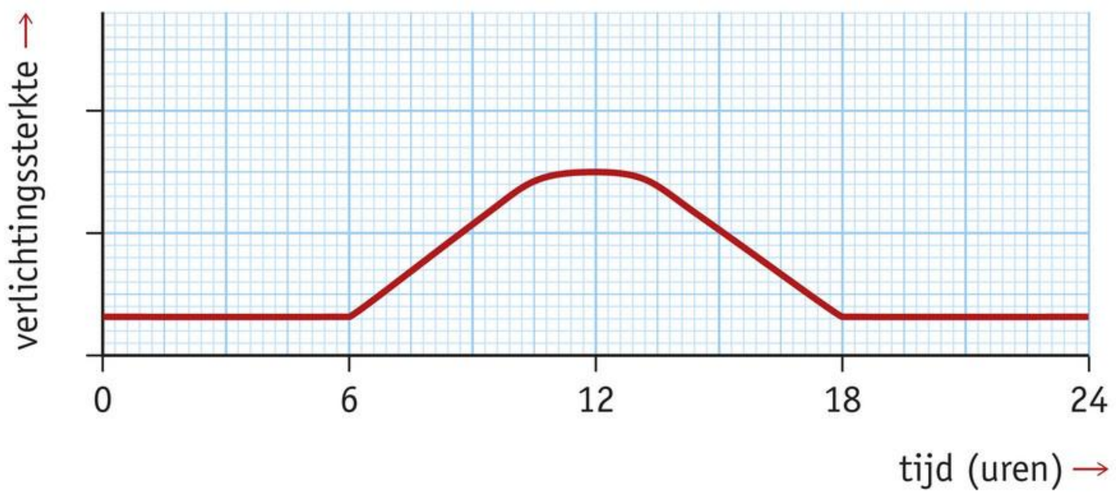
28 In een mengsel van CO_2, ATP NADPH en H^+ vinden de donkerreacties niet plaats. Als aan dit mengsel geïsoleerde chloroplasten worden toegevoegd, wordt er wél glucose gevormd.

a Leg uit waardoor er met de geïsoleerde chloroplasten wel glucose wordt gevormd.

b Een boom staat in een weiland. Gedurende een etmaal wordt de verlichtingssterkte gemeten. De resultaten staan in afbeelding 23.
Leg aan de hand van de resultaten uit welke invloed de verlichtingssterkte heeft op de donkerreactie.

c Als in een experiment de donkerreacties worden geremd, wordt de niet-cyclische fotofosforylering ook snel geremd (zie *BiNaS* tabel 69B).
Leg uit dat $NADP^+$ hier een rol in speelt.

■ **Afb. 23** Verlichtingssterkte gedurende een etmaal.

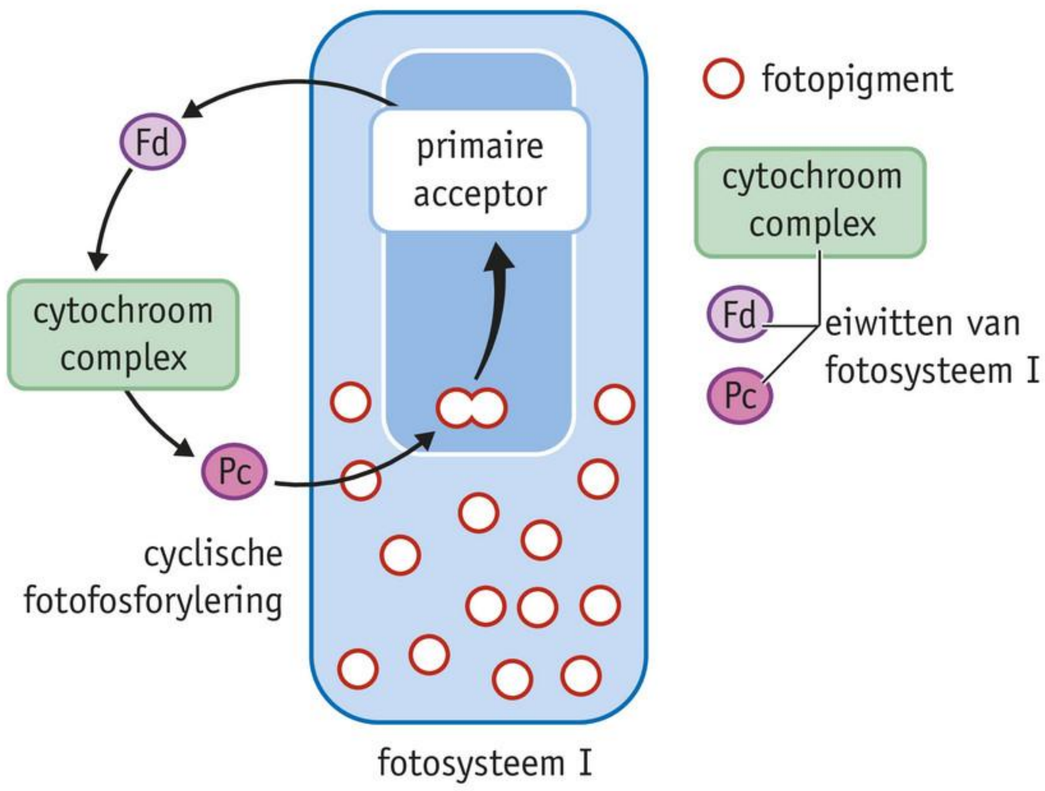


29 Fotosynthese

Naar: Voorronde Biologie Olympiade Bovenbouw 2014, vraag 14.

Bij de fotosynthese is sprake van een lichtreactie en een donkerreactie. Bij de lichtreactie van de fotosynthese komen elektronen uit de fotopigmenten vrij. Eiwitten vervoeren de door het licht aangeslagen elektronen. Bij veel planten zijn hierbij fotosysteem I en II betrokken.
Sommige fotosynthetiserende bacteriën hebben geen fotosysteem II. De aangeslagen elektronen doorlopen een cyclus door het fotosysteem I en enkele andere eiwitten (zie afbeelding 24).
Welke van de volgende stoffen worden gevormd: *ATP – NADPH – zuurstof*?

■ **Afb. 24** De weg van de aangeslagen elektronen.



30 In afbeelding 25 is een onderzoek weergegeven naar de zuurstof die ontstaat bij de fotosynthese. Bij een deel van het experiment bleek radioactief zuurstof uit de planten vrij te komen.

a Wat is de onderzoeksvraag?

b Hoe zijn de radioactieve zuurstofatomen aan de planten toegediend?

c Welke conclusie kun je trekken uit dit experiment?

Afb. 25

Onderzoek	Experiment met zuurstofisotopen
Inleiding	Bij fotosynthese wordt koolstofdioxide opgenomen en zuurstof uitgescheiden. Op grond van dit gegeven hebben wetenschappers lange tijd verondersteld dat de gevormde zuurstof afkomstig is van koolstofdioxide.
Onderzoeksvraag	
Hypothese	De zuurstof die bij fotosynthese ontstaat, is afkomstig van koolstofdioxide.
Experiment	Met behulp van twee verschillende zuurstofisotopen (^{16}O en ^{18}O) is bij planten de herkomst van de uitgescheiden zuurstof onderzocht. De twee verschillende isotopen zijn afzonderlijk in de reactieproducten aan te tonen. Hierdoor kan de herkomst van de vrijkomende zuurstof worden bepaald.
Resultaat	$H_2{}^{16}O$ + $C^{18}O_2$ → $^{16}O_2$ $H_2{}^{18}O$ + $C^{16}O_2$ → $^{18}O_2$
Conclusie	

Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf.*

Context Leefwereld

ALG JAAGT IN HET DONKER

Miljoenen jaren geleden verdween veel leven op onze planeet. Er was weinig zonlicht door een meteorietinslag, waarna grote stofwolken ontstonden. Ook verdween een groot deel van de eencellige algen die lichtenergie gebruiken voor fotosynthese, het fytoplankton.

Fytoplankton is onmisbaar voor leven op aarde. Maar liefst 70% van de zuurstof op aarde wordt door fytoplankton gemaakt. Daarnaast heeft fytoplankton een belangrijke rol in de koolstofkringloop op aarde. Dit plankton neemt koolstofdioxide uit de lucht op. Veel soorten, de coccolithoforen, maken met een deel van het opgenomen koolstofdioxide een schild om zich heen, dat bestaat uit plaatjes van calciumcarbonaat. Als ze doodgaan belanden deze plaatjes, inclusief de hierin vastgelegde koolstofdioxide op de oceaanbodem.

Coccolithoforen zijn bolvormige, eencellige algen van 0,002 tot 0,063 mm groot (zie afbeelding 26). Veel coccolithoforen overleefden de donkere tijd na de meteorietinslag niet. Maar niet alle coccolithoforen stierven uit. Wetenschappers ontdekten dat deze soorten ook diep in het water kunnen overleven, zonder zonlicht.

Voor de grote meteorietinslag gebruikten de coccolithoforen koolstofdioxide en zonlicht om glucose aan te maken. De soorten die na de meteorietinslag overleefden, hebben een andere manier gevonden om aan koolhydraten te komen. Ze kregen gaatjes in hun schild, waaruit een soort zweepstaartjes kwamen. Hiermee namen ze waarschijnlijk stoffen op uit de omgeving en maakten er koolhydraten van. De organische verbindingen gebruikten ze als koolstofbron. Door deze evolutionaire aanpassing konden ze bijvoorbeeld op bacteriën jagen.

Er bestaat nog steeds jagend plankton, maar de meeste soorten maken weer hun eigen koolhydraten met behulp van fotosynthese.

■ **Afb. 26** SEM-afbeelding van een coccolithofoor met een schild van calciumcarbonaat (vergroting 1800×).

Opdrachten

31 **a** Een groot deel van de coccolithoforen stierf miljoenen jaren geleden uit. Tegenwoordig komen er door de stijgende hoeveelheid koolstofdioxide steeds meer coccolithoforen bij. Leg uit hoe dit komt.

b Hoe kunnen de gaatjes in het calciumschild zorgen voor een andere leefwijze?

c Als er veel minder coccolithoforen zouden zijn, zou dit slecht zijn voor het klimaat. Leg uit hoe dit komt.

d Wat is het voordeel voor coccolithoforen om na verloop van tijd weer over te gaan op fotosynthese?

e Leg uit wat er is veranderd aan de koolstofbron die coccolithoforen zijn gaan gebruiken na de meteorietinslag.

4 VOORTGEZETTE ASSIMILATIE

LEERDOEL

9.4.1 Je kunt de voortgezette assimilatie beschrijven.

TAXONOMIE	LEERDOEL EN OPDRACHTEN
	9.4.1
Begrijpen	32, 33, 34, 35, 36, 37, 38
Toepassen	39, 40ac, 41, 43c
Analyseren	40bde, 42, 43abde

Cellen van planten gebruiken glucose die is gevormd bij de koolstofassimilatie voor de vorming van andere stoffen. Bij de voortgezette assimilatie vormen ze bijvoorbeeld reservevoorraden zetmeel, de vetten van membranen, vele eiwitten (zoals enzymen) en informatiedragers (DNA).

GLUCOSE ALS GRONDSTOF EN BRANDSTOF

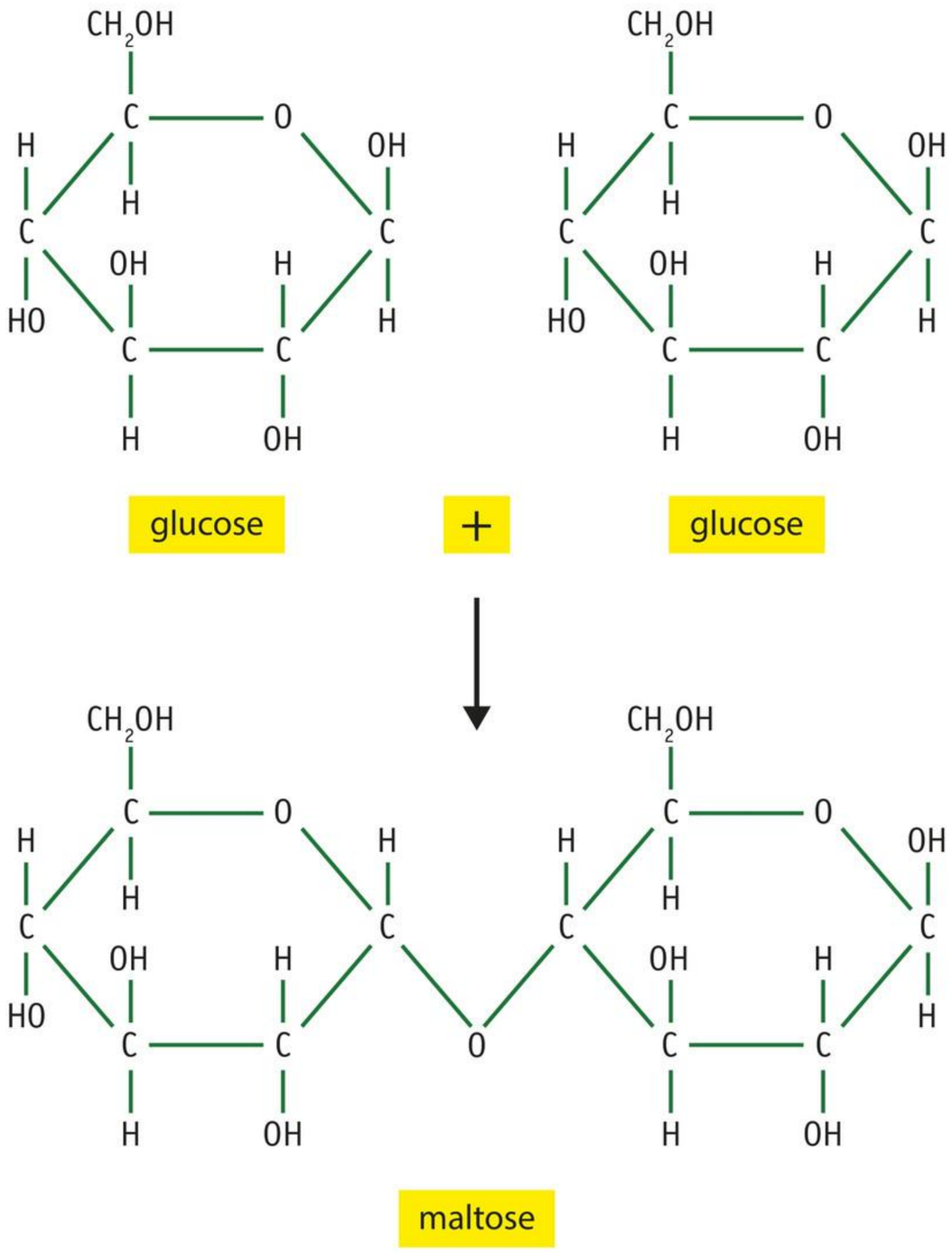
Tijdens de koolstofassimilatie zetten autotrofe organismen water en koolstofdioxide om in zuurstof en glucose. De glucose wordt gebruikt als grondstof voor het maken van andere organische stoffen zoals koolhydraten, vetten en eiwitten. Dit noem je de voortgezette assimilatie. Ook is glucose de belangrijkste brandstof. Bij de verbranding van glucose wordt ATP gevormd. ATP levert de energie voor de voortgezette assimilatie.

KOOLHYDRATEN

De moleculen van **koolhydraten** (sachariden) zijn opgebouwd uit een koolstofketen, waterstof en zuurstof (zie *BiNaS* tabel 67F). Koolhydraten hebben in de cel vooral een functie als **bouwstof**, **brandstof** en **reservestof**.

Koolhydraten zijn in te delen in mono-, di- en polysachariden. **Monosachariden** (enkelvoudige suikers) bevatten vijf of zes C-atomen. Glucose, galactose en fructose zijn voorbeelden van monosachariden. Door de OH-groepen aan de koolstofketen is glucose goed oplosbaar in water. In opgeloste toestand kunnen glucosemoleculen voorkomen als ketens of als ringen van C-atomen. Twee ringvormige moleculen van monosachariden kunnen zich met elkaar verbinden tot een **disacharide** (een molecuul dat is opgebouwd uit twee monosachariden) en een watermolecuul. Twee glucosemoleculen bijvoorbeeld kunnen samen één molecuul maltose vormen (zie afbeelding 27). Andere disachariden zijn lactose (melksuiker) en sacharose (riet- of bietsuiker).

■ **Afb. 27** De vorming van maltose uit twee glucosemoleculen.

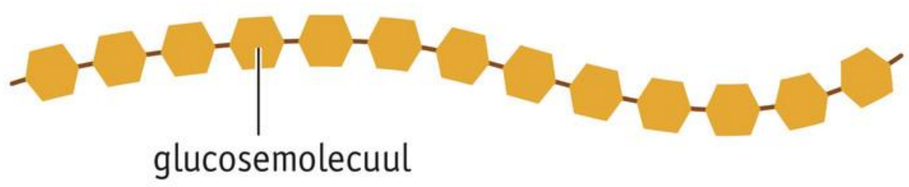


Door polymerisatie kan een **polysacharide** worden gevormd. Dat is een keten van vele monosachariden (zie afbeelding 28.1). Een voorbeeld van een polysacharide is **zetmeel**. Dit molecuul wordt in de chloroplasten en amyloplasten (zetmeelkorrels) van plantaardige cellen opgebouwd uit ongeveer zesduizend glucosemoleculen. Een zetmeelmolecuul is spiraalvormig, omdat de losse glucosemoleculen met een kleine hoek aan elkaar vastzitten (zie afbeelding 28.2). Door de grootte van de moleculen is zetmeel slecht oplosbaar in water.

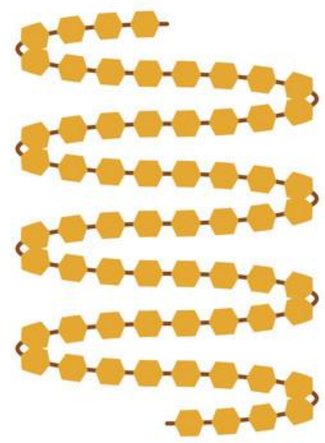
Bij dieren wordt in de lever en in spieren **glycogeen** gevormd. Een glycogeenmolecuul bestaat uit meer dan twintigduizend glucosemoleculen en is sterk vertakt (zie afbeelding 28.3). Zetmeel en glycogeen zijn reservestoffen.

Een ander polysacharide is **cellulose**, het hoofdbestanddeel van de celwanden van planten (zie afbeelding 28.4). Door de binding tussen de glucosemoleculen vormen enkele tientallen cellulosemoleculen samen een stevige structuur.

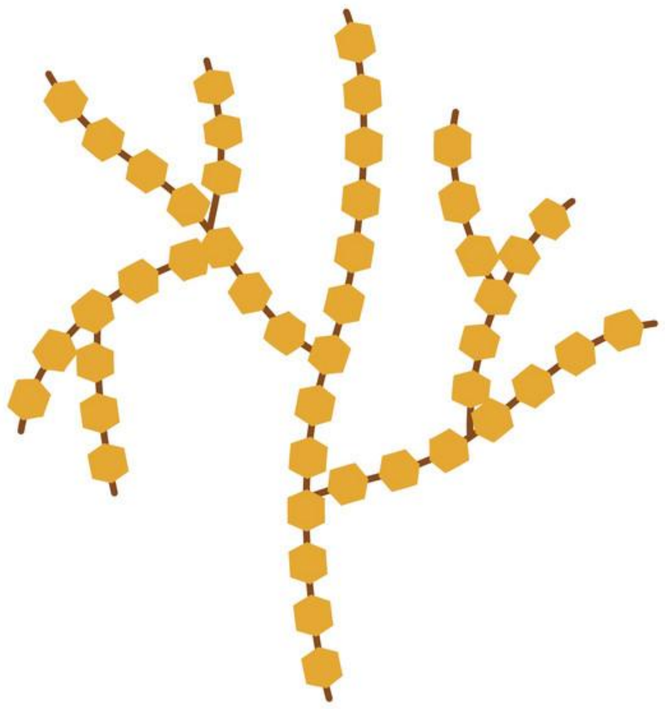
■ **Afb. 28** Polysachariden.



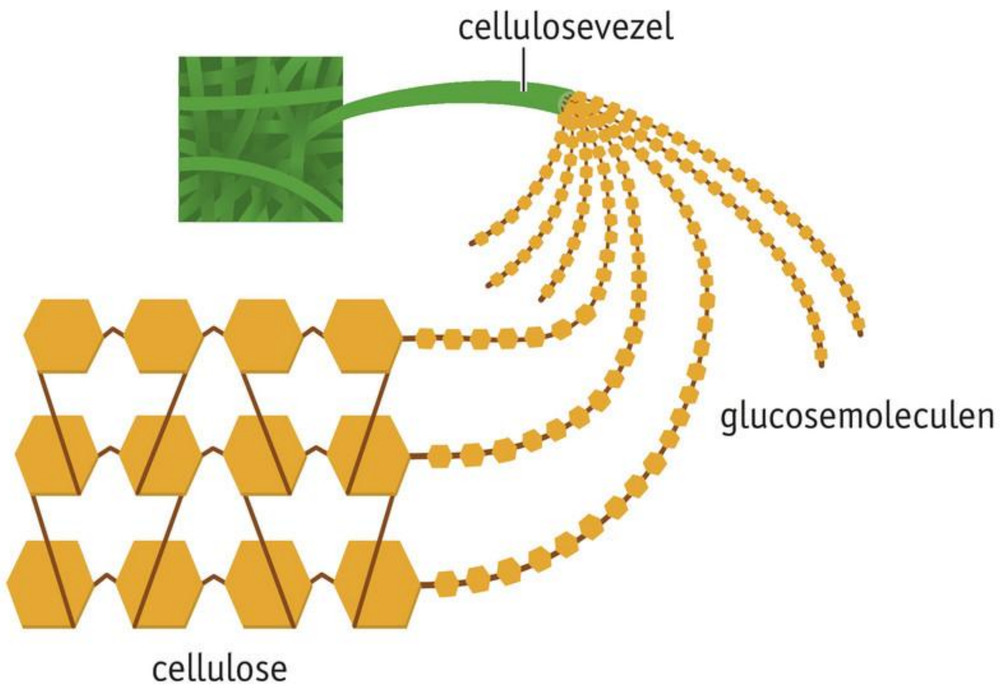
1 deel van een zetmeelmolecuul



2 vorm van een zetmeelmolecuul



3 vorm van een glycogeenmolecuul



4 vorm van een cellulosemolecuul

Opdrachten KENNIS

32 Gebruik *BiNaS* tabel 67F.

a Tot welke groep koolhydraten behoort maltose? Leg uit waarom.

b In afbeelding 27 is de vorming van maltose schematisch weergegeven.
Geef de reactievergelijking van de vorming van maltose in woorden en in molecuulformules.

33 Gebruik *BiNaS* tabel 67F. Bij de vertering van voedsel worden koolhydraten afgebroken tot kleinere moleculen.
Bij welke voedingsstof ontstaan bij de vertering de meeste kleine moleculen: bij zetmeel of rietsuiker? Leg je antwoord uit.

34 **a** Iedere polysacharide heeft andere eigenschappen. Leg uit dat dit onder andere komt door de bouw van een polysacharide.

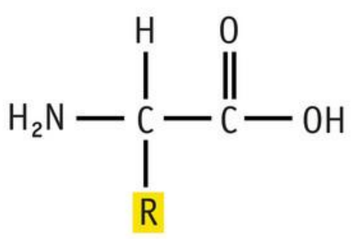
b De celwand van een plant is heel stevig.
Hoe komt dit?

EIWITTEN

Eiwitten (**proteïnen**) zijn polymeren van enkele tientallen tot meer dan duizend aminozuren (zie *BiNaS* tabel 67H). Een **aminozuur** bevat een centraal C-atoom met daaraan gebonden een aminogroep ($-NH_2$), een carboxygroep (–COOH), een H-atoom en een restgroep (R) die typerend is voor het aminozuur (zie afbeelding 29). In de restgroep kunnen onder andere stikstof en zwavel voorkomen.

Aminozuren zijn goed oplosbaar in water door de polaire amino- en carboxygroepen. In menselijke eiwitten komen twintig verschillende typen aminozuren voor.

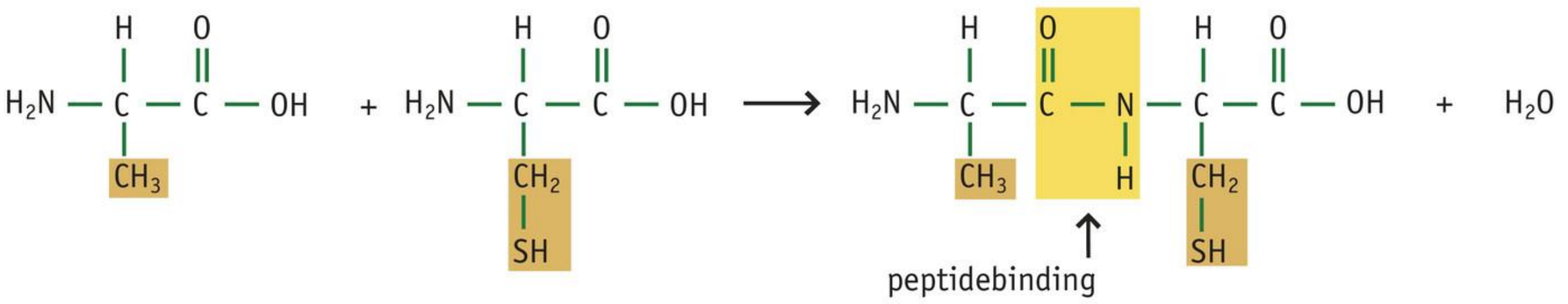
■ **Afb. 29** De algemene structuur van aminozuren.



Planten zijn in staat aminozuren op te bouwen uit glucose en stikstofhoudende ionen, vooral nitraat (NO_3^-). Bij de opbouw van sommige aminozuren wordt ook sulfaat (SO_4^{2-}) gebruikt. De energie voor de opbouw van aminozuurmoleculen wordt geleverd door ATP. Dieren kunnen uit glucose geen aminozuren opbouwen. Ze zijn wel in staat een aantal aminozuren te vormen uit de aminozuren die ze met hun voedsel binnenkrijgen. De aminozuren die dieren niet zelf kunnen maken, noem je **essentiële aminozuren**. Deze moeten in het voedsel zitten. **Niet-essentiële aminozuren** kunnen dieren zelf aanmaken en deze hoeven niet of minder in het voedsel aanwezig te zijn.

Door aminozuren aan elkaar te koppelen, kunnen alle organismen eiwitmoleculen maken. Door de carboxygroep van het ene aminozuur en de aminogroep van het andere aminozuur te binden, ontstaat een peptidebinding (zie afbeelding 30). Een dipeptide bestaat uit twee aan elkaar gekoppelde aminozuren. Een polypeptide bestaat uit meerdere aminozuren.

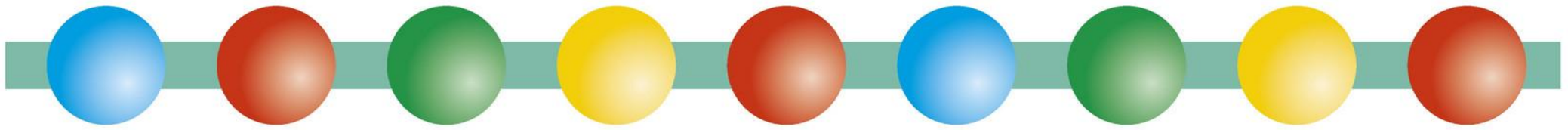
■ **Afb. 30** De vorming van een dipeptide.



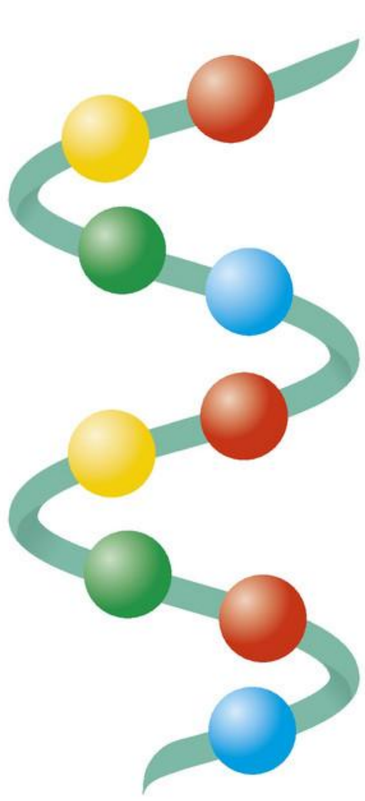
De ruimtelijke bouw van een eiwitmolecuul wordt op meerdere niveaus bepaald (zie afbeelding 31). De **primaire structuur** van een eiwitmolecuul wordt bepaald door de typen aminozuren die erin voorkomen en de volgorde waarin deze aminozuren voorkomen (zie afbeelding 31.1).

De meeste aminozuren maken bij hun binding een bepaalde hoek ten opzichte van elkaar, waardoor een stabiele spiraalvorm (α-helix) ontstaat. De spiraalvorm van een eiwit noem je de **secundaire structuur** (zie afbeelding 31.2). Door de vorming van waterstofbruggen en zwavelbruggen wordt de spiraalstructuur op een bepaalde manier 'opgevouwen'. Hierdoor krijgt het eiwit zijn specifieke vorm, de **tertiaire structuur** (zie afbeelding 31.3). Ook de aantrekking en afstoting tussen hydrofiele en hydrofobe restgroepen kan bijdragen aan de tertiaire structuur. Sommige eiwitten hebben nog een **quaternaire structuur**. Dat is de manier waarop meerdere polypeptideketens samen één eiwit vormen (zie afbeelding 31.4). De uiteindelijke vorm is bepalend voor de functie van een eiwit.

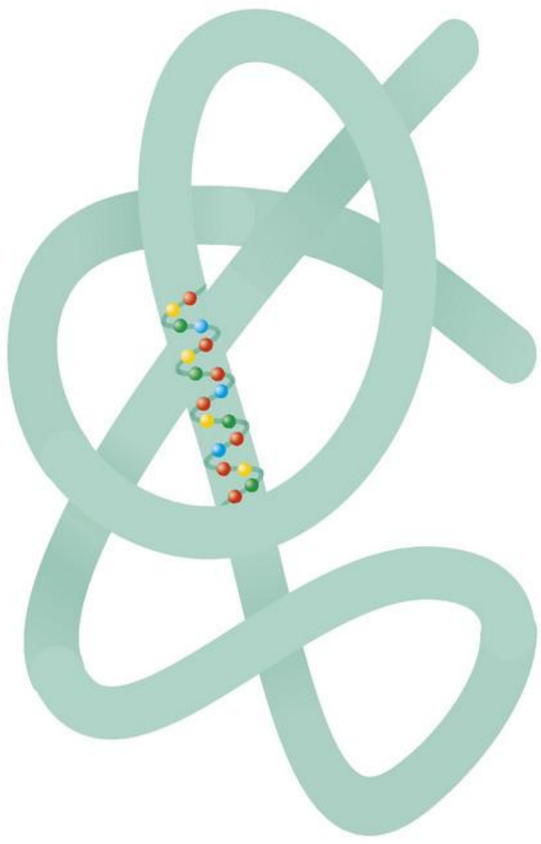
■ **Afb. 31** De ruimtelijke bouw van een eiwitmolecuul.



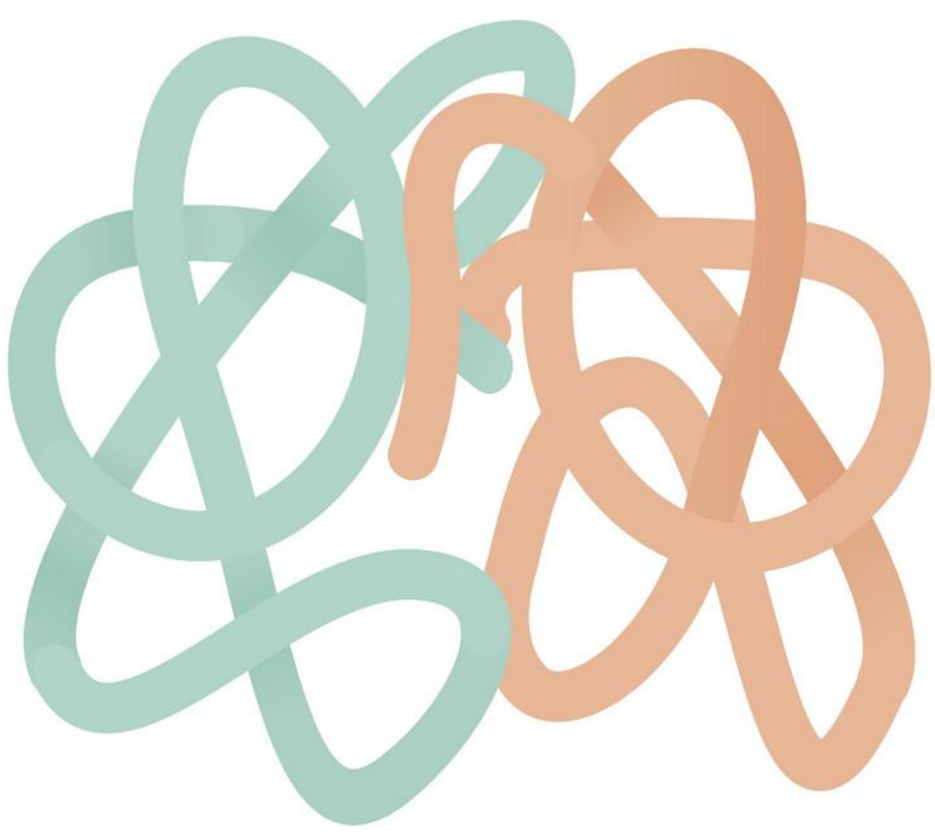
1 primaire structuur: de aminozuurvolgorde



2 secundaire structuur: de α-helix



3 tertiaire structuur: ruimtelijke vorm



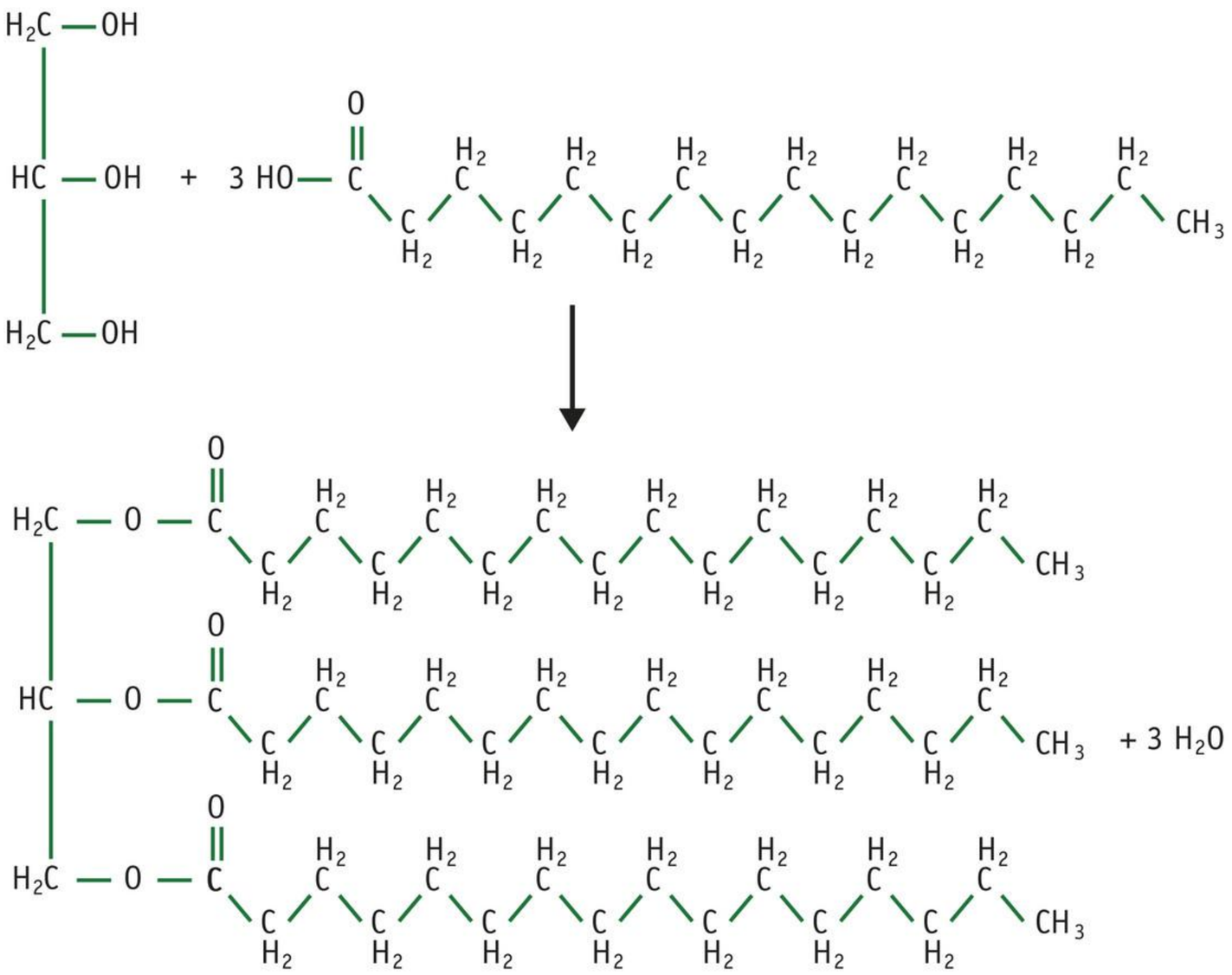
4 quaternaire structuur: meerdere polypeptideketens

VETTEN

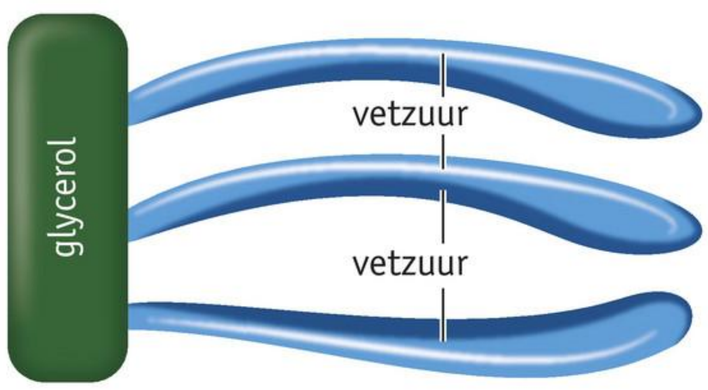
Vetten (lipiden) (zie *BiNaS* tabel 67G) bevatten dezelfde elementen als glucosemoleculen (C, H en O). Vetten dienen als bouwstof in membranen, als brandstof en als reservestof. Ze hebben daarnaast een warmte-isolerende functie. In warmbloedige dieren vindt opslag onder andere plaats in het onderhuidse bindweefsel. Een teveel aan eiwitten en koolhydraten in de voeding kan worden omgezet in vetten. In vetten is per gram meer energie opgeslagen dan in koolhydraten en eiwitten. Vetten maken deel uit van sommige vitaminen, hormonen en cholesterol.

Veel vetten zijn triglyceriden. Die ontstaan als drie vetzuren zich binden aan een glycerolmolecuul (zie afbeelding 32). Daarbij ontstaat ook water. **Glycerol** bestaat uit drie C-atomen waaraan drie OH-groepen zijn gebonden. **Vetzuren** bestaan uit lange ketens van CH_2-groepen met aan het eind daarvan een carboxygroep (COOH). Deze vetzuurketens zijn hydrofoob (waterafstotend) en daardoor lost vet niet op in water. Vetzuren zijn daarnaast apolair. De positieve en negatieve ladingen van de losse atomen vallen tegen elkaar weg. Water is een polaire stof. De positieve lading van de waterstofionen valt ruimtelijk niet samen met de negatieve lading van het zuurstofatoom. Water heeft daardoor een positieve en een negatieve kant. Ook door dit verschil lost vet niet op in water.

■ **Afb. 32** De vorming van een vetmolecuul uit glycerol en vetzuren.



1 opbouw van een vetzuurmolecuul (structuurformules)

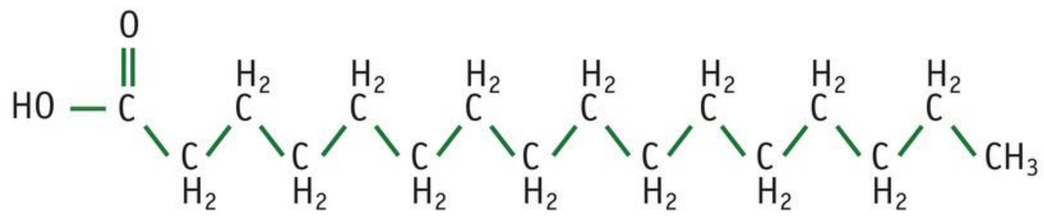


2 opbouw van een vetzuurmolecuul

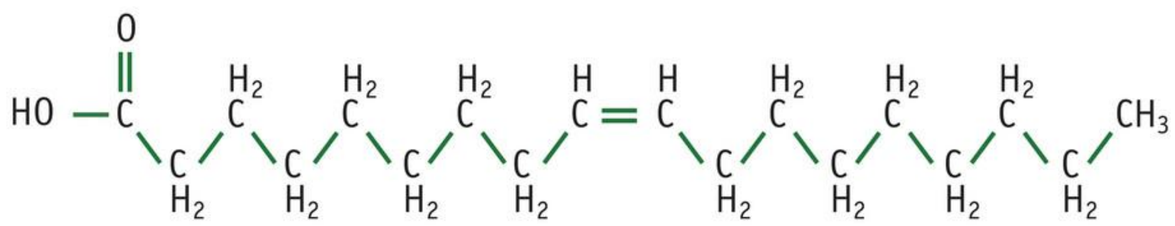
Een vetzuur is verzadigd als de koolstofatomen in het vetzuurmolecuul onderling uitsluitend zijn verbonden door enkelvoudige bindingen. De koolstofketen bevat dan het maximale aantal H-atomen (zie afbeelding 33.1). Deze lipiden hebben bij kamertemperatuur meestal een vaste vorm.

Onverzadigde vetzuren bevatten dubbele bindingen tussen de C-atomen. Dit veroorzaakt een knik in de ruimtelijke vorm van het molecuul (zie afbeelding 33.2). Meervoudig onverzadigde vetzuren hebben meerdere dubbele bindingen in de koolstofketen. Deze vetzuren zijn bij kamertemperatuur meestal vloeibaar. Vooral plantaardige oliën bevatten veel meervoudig onverzadigde vetzuren.

■ **Afb. 33** Verzadigde en onverzadigde vetzuren.



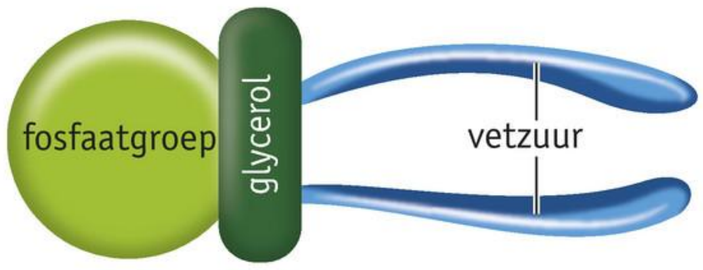
1 verzadigd vetzuur



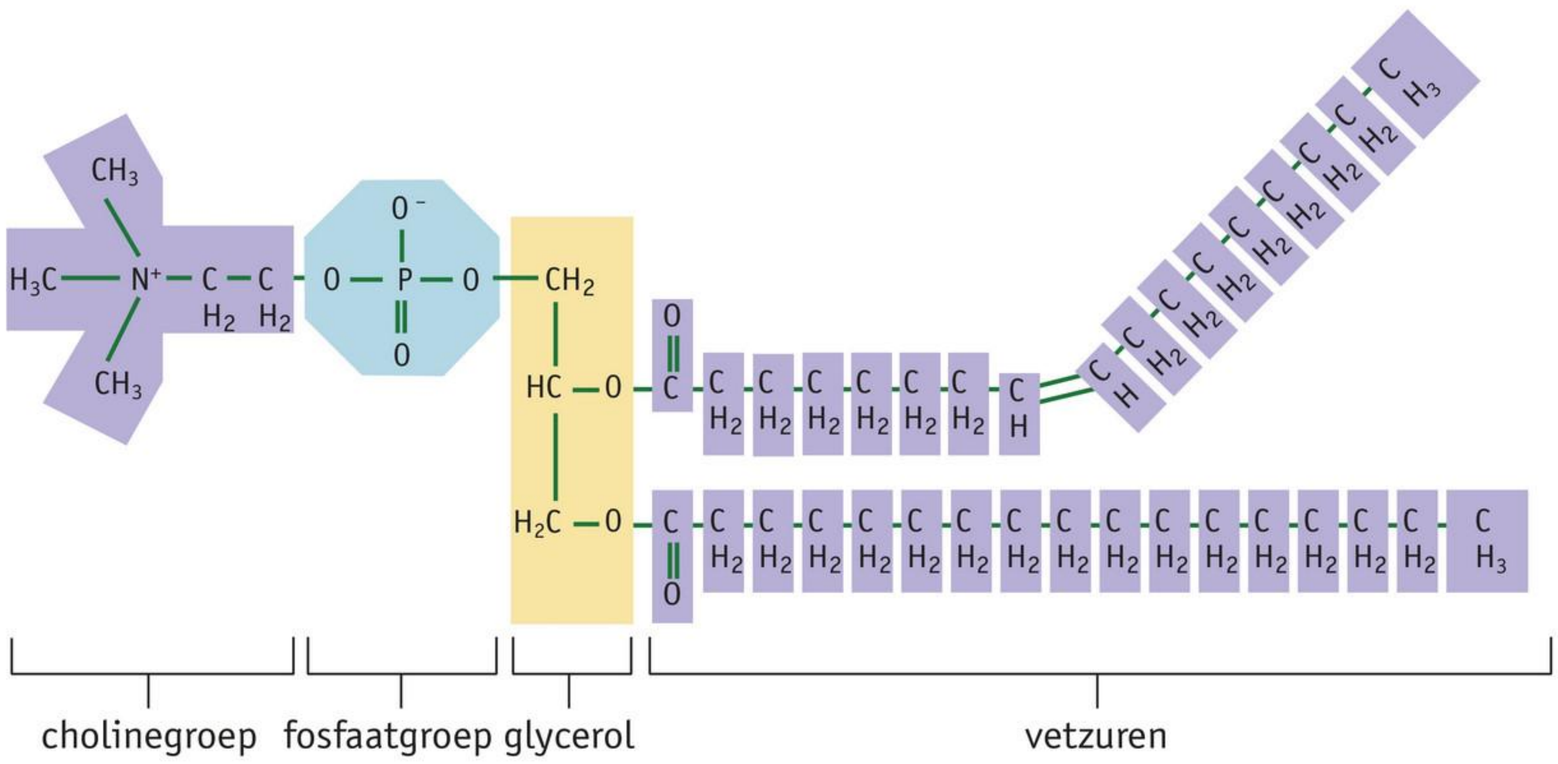
2 onverzadigd vetzuur

Celmembranen bestaan grotendeels uit **fosfolipiden**. Bij een fosfolipide is één vetzuur van het triglyceride vervangen door een fosfaatgroep (zie afbeelding 34). Fosfolipiden hebben twee hydrofobe vetzuurstaarten en een hydrofiele fosfaatgroep. Hierdoor vormen de fosfolipiden een dubbele laag moleculen, met de hydrofiele fosfaatgroepen aan de buitenzijde en de hydrofobe vetzuurstaarten naar elkaar toe aan de binnenzijde (zie afbeelding 35). Door de knikken in de onverzadigde vetzuren is een membraan erg plooibaar. Aan de buitenzijde van het membraan bevindt zich de **tussencelstof**. Die zit tussen de verschillende cellen in.

■ **Afb. 34** Structuur van een fosfolipide.

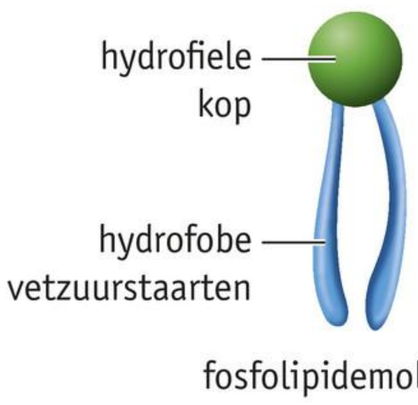


1 fosfolipide

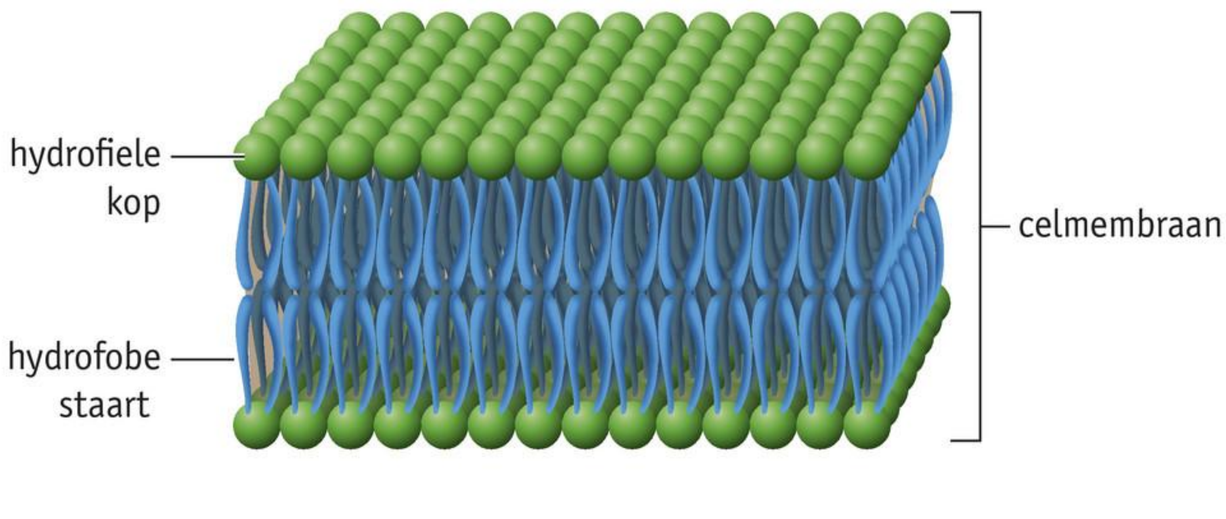


2 fosfolipide (structuurformule)

■ **Afb. 35** Opbouw van een membraan uit fosfolipiden.



fosfolipidemolecuul



Opdrachten KENNIS

35 **a** Welke twee elementen komen wel voor in eiwitten, maar niet in koolhydraten?
b Bij een peptidebinding in eiwitten ontstaat water.
Waar komen de watermoleculen vandaan?

36 Waarom zijn zwavelbruggen belangrijk voor de werking van enzymen?

37 **a** Gebruik *BiNaS* tabel 67G. Linolzuur heeft een meer gebogen structuur dan oliezuur.
Leg uit hoe dit komt.
b Frituurvet bestaat onder andere uit palmolie en is hard bij kamertemperatuur. Leg uit hoe dit komt.

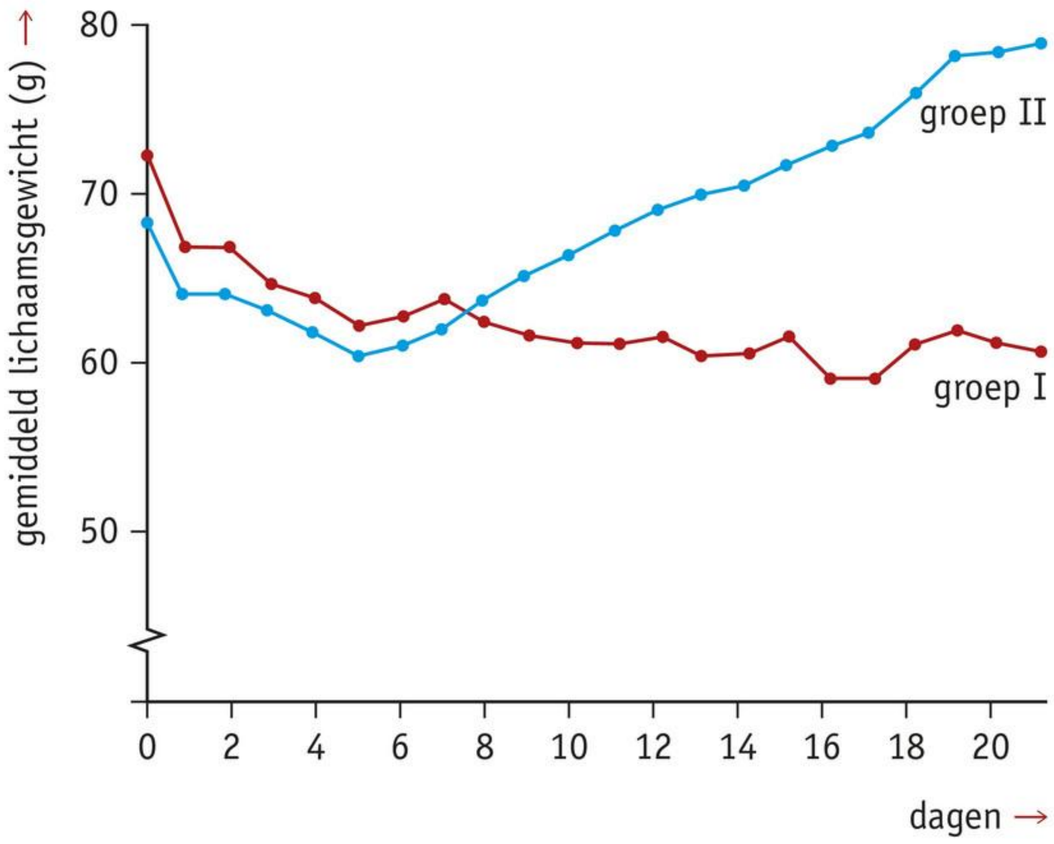
38 Als in een triglyceride het derde vetzuur wordt vervangen door een fosfaatgroep, veranderen de fysische eigenschappen van het lipide ingrijpend. Leg dat uit.

Opdrachten INZICHT

39 In de bladcellen van een plant wordt glucose, die is gevormd bij de fotosynthese, vrijwel direct omgezet in zetmeel. De in de bladeren gevormde koolhydraten worden door de bastvaten naar andere plantendelen vervoerd. Zetmeel wordt daarvoor weer omgezet in sacharose. Leg uit waarom dat noodzakelijk is.

40 In afbeelding 36 zijn de resultaten weergegeven van een voedingsexperiment met jonge ratten. De gezonde ratten in groep I en II werden gevoerd met een dieet bestaande uit alle benodigde vitaminen, koolhydraten, mineralen, water en plantaardige vezels. Als enige eiwit werd zeïne toegediend. Zeïne is een eiwit afkomstig uit mais. Na zeven dagen werden aan het dieet van groep II de aminozuren lysine en tryptofaan toegevoegd.
a Waarom werden na zeven dagen juist deze aminozuren toegevoegd?
b Verklaar de gewichtsafname van beide groepen ratten in de eerste week van het experiment.
c Leg uit dat vetten uiteindelijk wel nodig zullen zijn voor de ratten als het onderzoek langere tijd duurt.
d Kan uit het resultaat van het experiment de conclusie worden getrokken dat lysine en tryptofaan voor ratten essentiële aminozuren zijn?
e Beschrijf een proefopzet waarmee je kunt onderzoeken of lysine een essentieel aminozuur is.

■ **Afb. 36** Resultaten van een voedingsexperiment met jonge ratten.



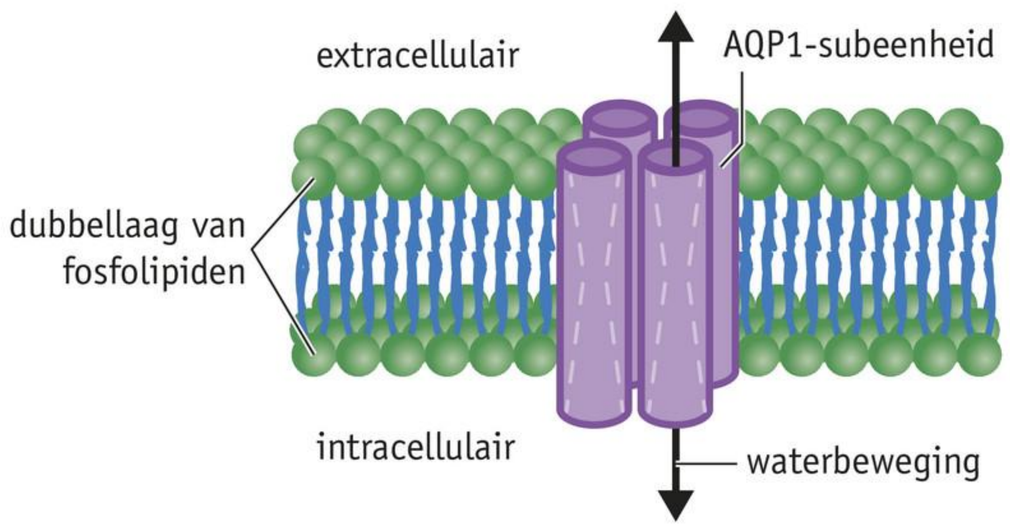
Bron: J.J. Head, *Discovering Biology*, Oxford University Press, 1972.

41 Een mengsel van olie en water wordt geschud, waardoor de olie druppels in het water vormt. Vervolgens wordt een vetzuur toegevoegd, waarna het mengsel opnieuw wordt geschud.
Waar zullen de vetzuurmoleculen zich in dit mengsel bevinden? Leg je antwoord uit.

42 **Aquaporines**
Naar: Voorronde Biologie Olympiade Bovenbouw 2013, vraag 8.

In 1992 werd het membraaneiwit aquaporine-1 (AQP1) ontdekt. Dit eiwit functioneert exclusief als transportkanaal voor watermoleculen. Het AQP1-molecuul ligt ingebed in de dubbellaag van fosfolipiden en het bestaat uit vier sub-eenheden die ieder een apart waterkanaal vormen (zie afbeelding 37).
Een eiwit heeft vier structuren: een primaire, secundaire, tertiaire en een quaternaire structuur.
Welke van deze structuren zijn essentieel voor het functioneren van aquaporine-1 (AQP1)?

■ **Afb. 37** Membraan met aquaporine-1 (AQP1).



Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf.*

Context Wetenschap

DUURZAME EIWITTEN

Eiwitten zijn een belangrijke voedingsbron voor je lichaam. Veel eiwitten krijg je binnen door dierlijk voedsel, een ander deel door plantaardig voedsel. Vooral dierlijke eiwitten worden niet duurzaam geproduceerd. De productie van plantaardige eiwitten kost minder energie, maar het kan nog veel efficiënter.

Eiwitten kun je ook maken door bacteriën. Het product noem je dan ook wel *single cell protein*. De bacteriën worden hiervoor in een groot vat gekweekt met toevoeging van waterstof, zuurstof, CO_2 en kunstmest. Na het oogsten worden de bacteriën gedroogd, waarna er een fijn poeder van wordt gemaakt. De productie van dit eiwitrijke poeder is veel duurzamer in vergelijking met dierlijke of plantaardige eiwitten.

In het Centrum voor microbiële ecologie en technologie (CMET) van de faculteit Bio-ingenieurswetenschappen van de Universiteit Gent wordt gekeken of je eiwitten uit bacteriën nog duurzamer kunt produceren door gebruik te maken van stikstofgas in plaats van kunstmest. Bij het onderzoek wordt een gasmengsel gebruikt met daarin 2% O_2, 10% H_2, 10% CO_2 en 78% N_2. Dit gas wordt continu geleid door een reactor met daarin de bacteriën. Uit de resultaten blijkt dat de bacteriestammen stikstofgas ook kunnen gebruiken voor het maken van eiwitten met de juiste aminozuursamenstelling. Deze bacteriën hebben een hoog eiwitgehalte (62,0 ± 6,3%) en bevatten tot 70% meer eiwit dan sojabonen. In vergelijking met plantaardige eiwitten zijn de bacteriële eiwitten duurzamer geproduceerd. Ook zetten de bacteriën in vergelijking met planten tot drie keer efficiënter zonlicht om in chemische energie.

Er zijn ook onderzoeken gaande om op eenzelfde manier koolhydraten te produceren.

■ **Afb. 38** Cyanobacteriën van het geslacht *Nostoc* produceren alle essentiële aminozuren.

Opdrachten

43 **a** In de kunstmest die in het onderzoek wordt gebruikt, zitten stikstofverbindingen. Voor de productie van deze kunstmest wordt gebruikgemaakt van fossiele brandstoffen. Hoe zorgt kunstmest voor een hogere CO_2-uitstoot dan stikstofgas?

b Waarom is het belangrijk dat de gekweekte bacteriestammen eiwitten maken met de goede aminozuursamenstelling?

c Bij het onderzoek werd een gasmengsel constant door de reactor heen geleid. Wat zou er gebeuren als je dit gasmengsel niet continu toevoert, maar een paar keer per dag?

d Hoeveel procent eiwitten bevatten sojabonen ongeveer? Rond af op een heel getal.

e Wetenschappers zijn ook bezig om op eenzelfde manier koolhydraten te produceren. Zijn voor deze productie dezelfde gassen nodig? Leg je antwoord uit.

5 DISSIMILATIE

LEERDOELEN

9.5.1 Je kunt de aerobe en anaerobe dissimilatie van glucose toelichten.
9.5.2 Je kunt de dissimilatie van eiwitten en vetten beschrijven.

- Vaardigheid 6 (thema 1)
- Practica 5 en 6

TAXONOMIE	LEERDOELEN EN OPDRACHTEN	
	9.5.1	**9.5.2**
Begrijpen	44, 45, 46	47, 48, 49
Toepassen	50, 53b	52, 56
Analyseren	51, 53a, 57	54, 55

Geen enkel levend wezen kan zonder energie, want in elke levende cel vinden voortdurend chemische reacties plaats. Bij sommige reacties komt energie vrij, andere reacties kosten energie. Er is bijvoorbeeld energie nodig om stoffen door membranen te transporteren en om te groeien. Die energie is vaak afkomstig van opgenomen of opgeslagen energierijke stoffen.

AEROBE DISSIMILATIE VAN GLUCOSE

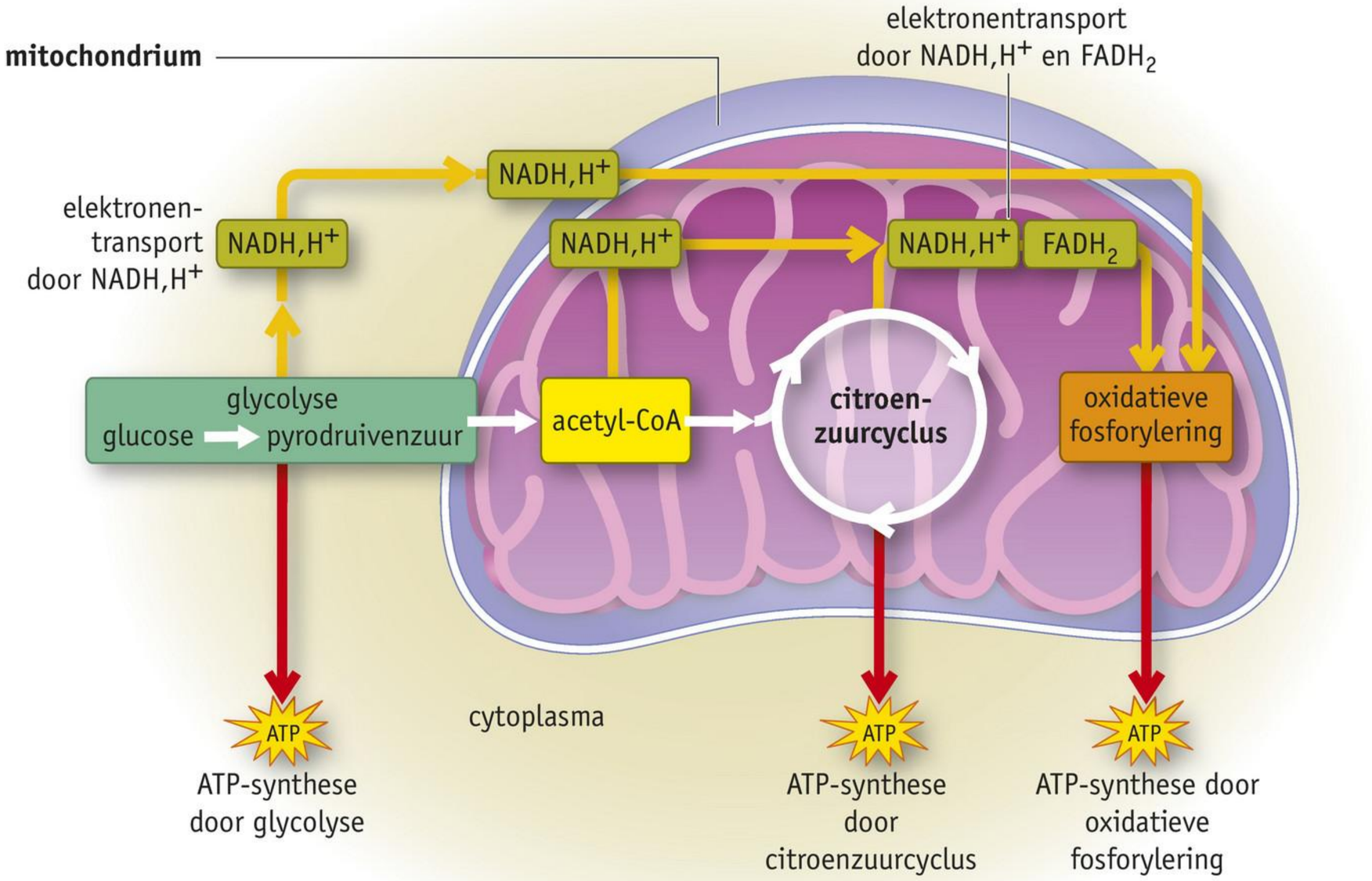
Bij dissimilatie (afbraak) van organische stoffen komt de energie die bij de fotosynthese is vastgelegd weer beschikbaar. De belangrijkste brandstof in de cellen is glucose. Dissimilatie van glucose met zuurstof noem je **aerobe dissimilatie** of **verbranding**. Bij de omzetting van één glucosemolecuul ontstaan maximaal 38 ATP-moleculen. De brutoreactievergelijking van de aerobe dissimilatie is:

$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 + 2\ ATP \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O + 38\ ATP$

De aerobe dissimilatie van glucose (zie *BiNaS* tabel 68A) vindt plaats in het cytoplasma en de mitochondriën en gebeurt in vier stappen (zie afbeelding 39):

1 De **glycolyse**. Hierbij wordt in het cytoplasma een glucosemolecuul gesplitst in twee moleculen pyrodruivenzuur ($C_3H_4O_3$). Dit proces verloopt anaeroob.
2 De anaerobe vorming van acetyl-co-enzym A (acetyl-CoA) door binding van een molecuul pyrodruivenzuur aan co-enzym A.
3 De **citroenzuurcyclus** of krebscyclus. De citroenzuurmoleculen die ontstaan worden verder afgebroken tot CO_2-moleculen en energierijke elektronen, die worden opgenomen door energiedragermoleculen. De citroenzuurcyclus verloopt anaeroob.
4 De aerobe **oxidatieve fosforylering**. De energiedragermoleculen NADH en $FADH_2$ staan de energierijke elektronen geleidelijk af aan de binnenmembranen van de mitochondriën voor de synthese van ATP. Energiearme elektronen en waterstofionen worden uiteindelijk gebonden aan zuurstof.

■ **Afb. 39** Overzichtsschema van de aerobe dissimilatie van glucose.



GLYCOLYSE

De aerobe dissimilatie van glucose start met het binden van twee fosfaatgroepen (fosforylering) waarbij fructose-1,6-difosfaat ontstaat (zie *BiNaS* tabel 68B). Twee ATP-moleculen leveren hiervoor de fosfaatgroepen (P_i) en de benodigde energie. Het glucosemolecuul wordt vervolgens gesplitst in twee moleculen pyrodruivenzuur, die elk drie koolstofatomen lang zijn. Hierbij ontstaan vier ATP-moleculen, vier energierijke elektronen en vier waterstofionen. Om het pyrodruivenzuur naar de binnenmembranen van de mitochondriën te transporteren, is energie nodig. Twee energiedragermoleculen NAD^+ nemen de elektronen en twee waterstofionen op en transporteren deze als NADH naar de binnenmembranen van de mitochondriën om zo de benodigde energie te leveren.

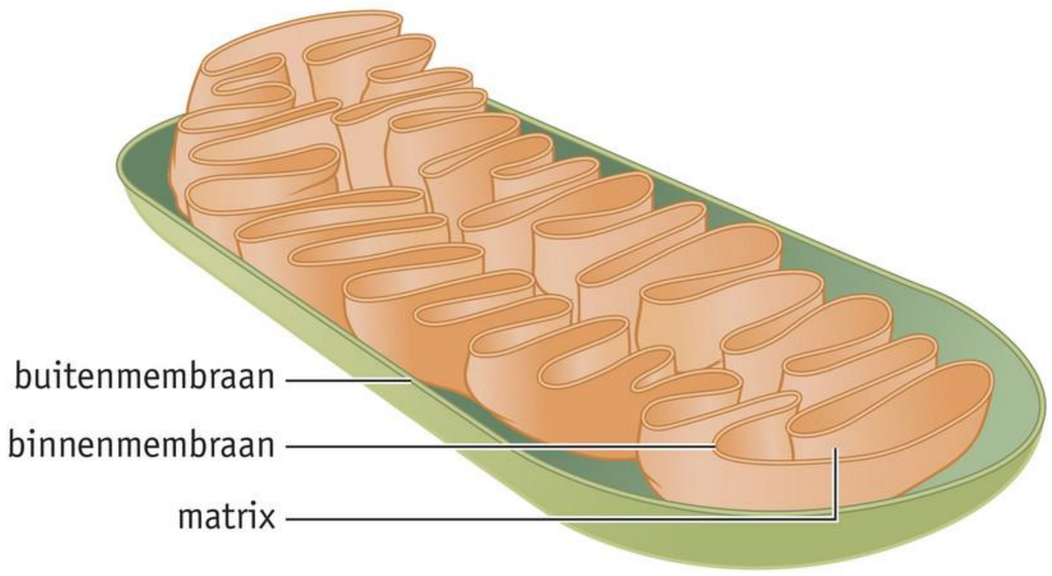
$2\ NAD^+ + 4\ e^- + 4\ H^+ \rightarrow 2\ NADH + 2\ H^+$

In de oxidatieve fosforylering worden de energierijke bindingen van $NADH^+$ gebruikt voor de vorming van ATP.

ACETYL-CO-ENZYM A EN CITROENZUURCYCLUS

De vorming van acetyl-co-enzym A (acetyl-CoA) en de citroenzuurcyclus (zie *BiNaS* tabel 68C) vinden plaats in de vloeistof binnen in de mitochondriën, de matrix (zie afbeelding 40). Voor de dissimilatie van één glucosemolecuul vinden alle reacties twee keer plaats.

■ **Afb. 40** Een mitochondrium.

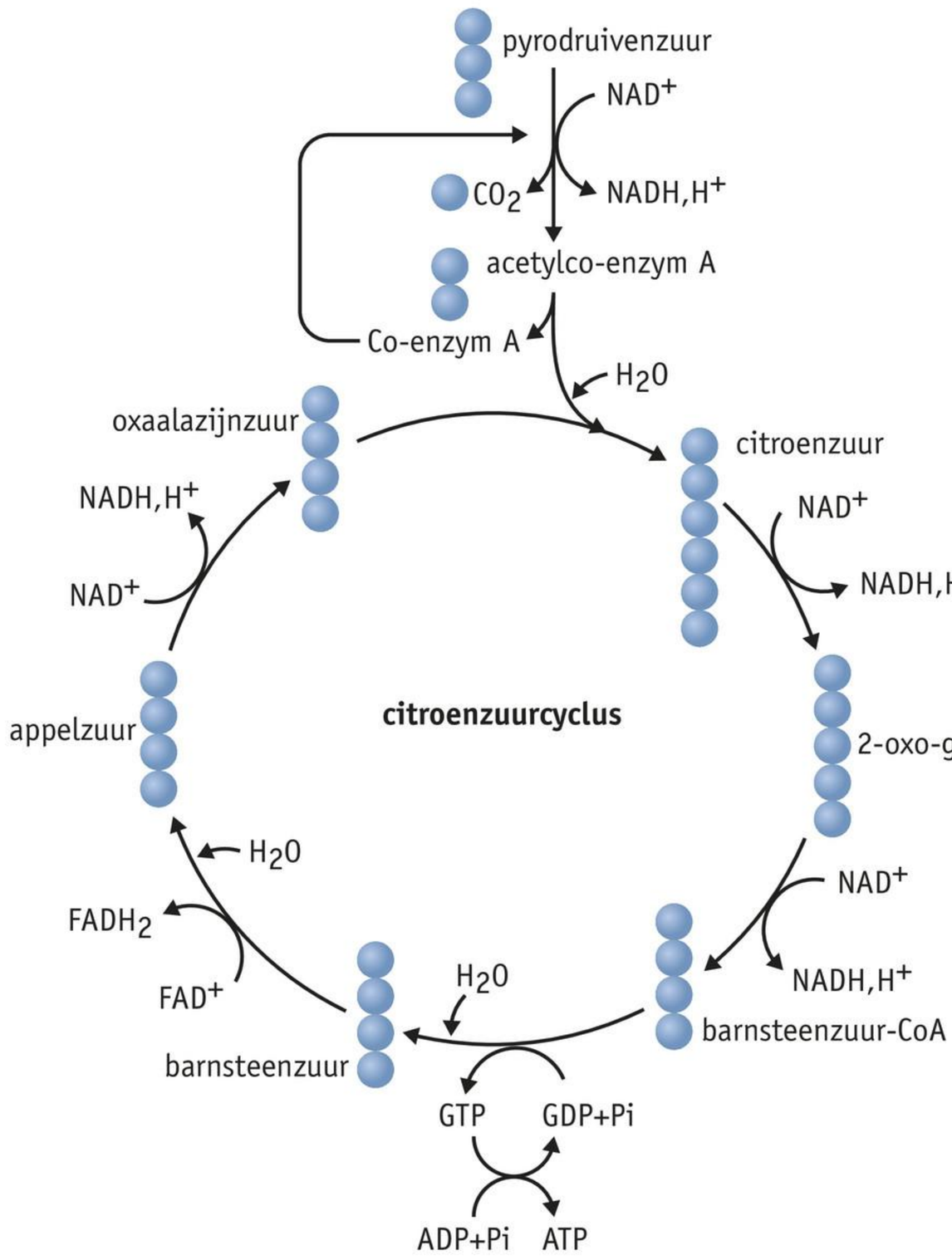


Pyrodruivenzuur bindt aan co-enzym A en vormt acetyl-CoA. Daarbij ontstaat een molecuul CO_2 (decarboxylering) en een molecuul NADH.

Er blijft een acetylgroep met twee C-atomen over die in de citroenzuurcyclus bindt aan oxaalazijnzuur en citroenzuur vormt (zie afbeelding 41). Co-enzym A komt weer beschikbaar om het volgende molecuul pyrodruivenzuur te binden.

De energiedragers NAD^+, **FAD** (flavine adenine dinucleotide) en GTP (guanosinetrifosfaat) leggen chemische energie vast die ontstaat uit de afbraak van citroenzuur. GTP ontstaat uit GDP en P_i, op dezelfde manier als een ATP-molecuul wordt gevormd uit ADP en P_i. De energie van een GTP-molecuul kan ook worden overgedragen op een ATP-molecuul. In de citroenzuurcyclus worden watermoleculen opgenomen.

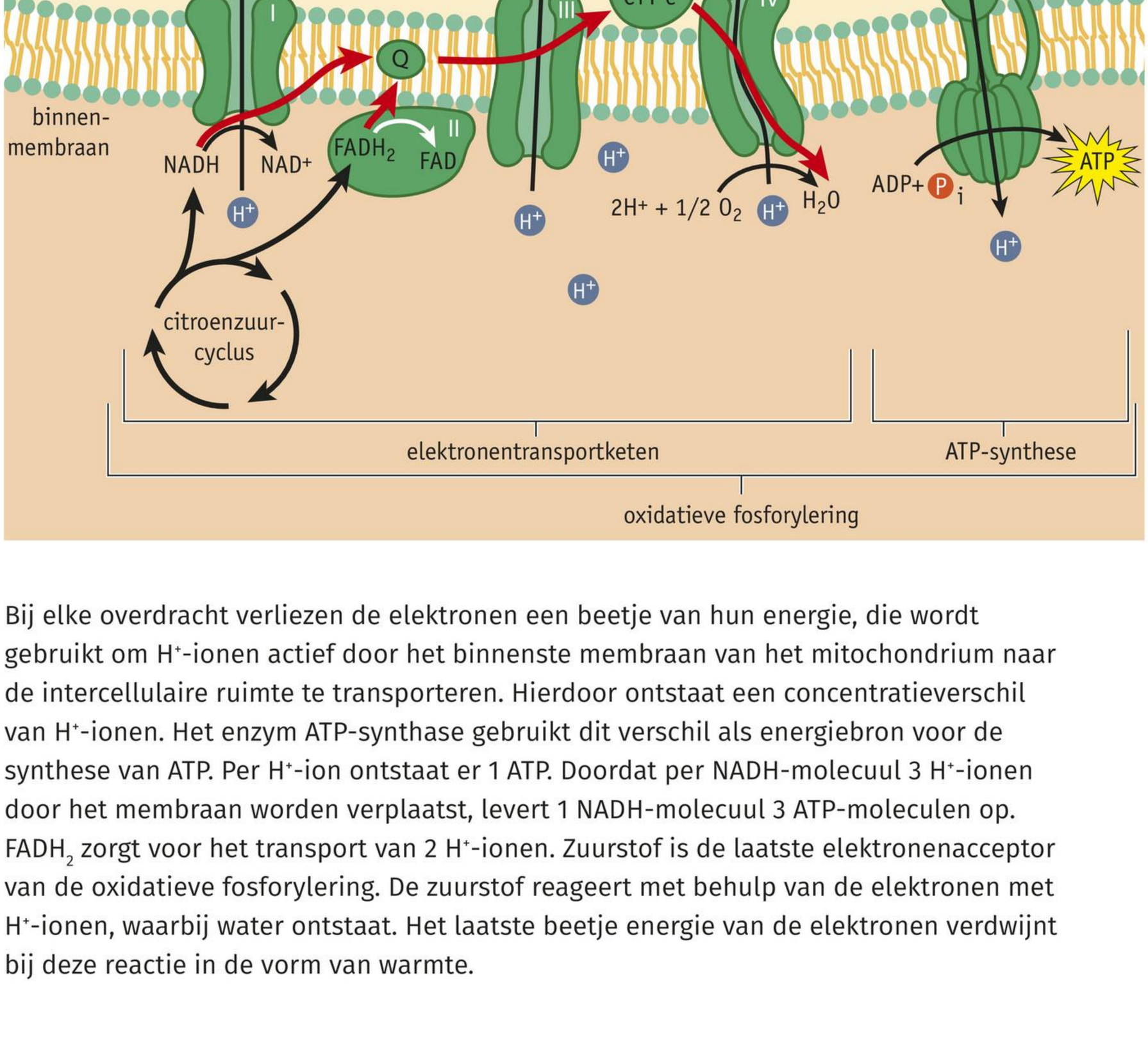
■ **Afb. 41** Schema van de vorming van acetyl-CoA en de citroenzuurcyclus.



OXIDATIEVE FOSFORYLERING

De energierijke elektronen in de moleculen NADH en $FADH_2$ die zijn ontstaan bij de glycolyse en citroenzuurcyclus worden in een elektronentransportketen doorgegeven aan verschillende elektronenacceptoren (zie *BiNaS* tabel 68D). Deze elektronentransportketen ligt in het binnenmembraan van de mitochondriën (zie afbeelding 42).

■ **Afb. 42** De oxidatieve fosforylering.



Bij elke overdracht verliezen de elektronen een beetje van hun energie, die wordt gebruikt om H^+-ionen actief door het binnenste membraan van het mitochondrium naar de intercellulaire ruimte te transporteren. Hierdoor ontstaat een concentratieverschil van H^+-ionen. Het enzym ATP-synthase gebruikt dit verschil als energiebron voor de synthese van ATP. Per H^+-ion ontstaat er 1 ATP. Doordat per NADH-molecuul 3 H^+-ionen door het membraan worden verplaatst, levert 1 NADH-molecuul 3 ATP-moleculen op. $FADH_2$ zorgt voor het transport van 2 H^+-ionen. Zuurstof is de laatste elektronenacceptor van de oxidatieve fosforylering. De zuurstof reageert met behulp van de elektronen met H^+-ionen, waarbij water ontstaat. Het laatste beetje energie van de elektronen verdwijnt bij deze reactie in de vorm van warmte.

ENERGIEOPBRENGST

Per glucosemolecuul ontstaan 10 NADH-moleculen en 2 $FADH_2$-moleculen. Bij de oxidatieve fosforylering ontstaan per NADH-molecuul 3 ATP-moleculen en per $FADH_2$-molecuul 2 ATP-moleculen. In totaal ontstaan 34 ATP-moleculen. Samen met de 4 ATP-moleculen uit de glycolyse en de citroenzuurcyclus ontstaan er bij de aerobe dissimilatie maximaal 38 ATP-moleculen.

In werkelijkheid worden 30 tot 32 ATP-moleculen per molecuul glucose gevormd. Er is energie nodig voor de glycolyse en energie nodig voor het transport van pyrodruivenzuur, van elektronen vanuit het cytoplasma naar de matrix van het mitochondrium en voor het transport van ATP vanuit de mitochondriën naar het cytoplasma. Daardoor is de opbrengst van de aerobe dissimilatie lager.

Opdrachten KENNIS

44 **a** Gebruik *BiNaS* tabel 68B.
Wat is bij de glycolyse de netto-opbrengst aan ATP-moleculen per glucosemolecuul?
b Leg uit dat NAD^+ pas na de vorming van fructose-1,6-difosfaat in de glycolyse kan worden gebruikt en niet daarvoor.

45 Welk verschil in functie bestaat er tussen een NAD^+-molecuul en een $NADP^+$-molecuul?

46 Gebruik *BiNaS* tabel 68C.
Bij de vorming van acetyl-CoA en in de citroenzuurcyclus ontstaat koolstofdioxide.
a Hoeveel koolstofdioxidemoleculen ontstaan er in totaal bij de dissimilatie van één molecuul pyrodruivenzuur?
b Hoeveel watermoleculen worden er netto opgenomen in één cyclus?

ANAEROBE DISSIMILATIE VAN GLUCOSE

Bij **anaerobe dissimilatie** vindt omzetting van glucose plaats zonder gebruik te maken van zuurstof. Dit noem je ook wel **gisting** of **fermentatie**. Hierbij ontstaat veel minder ATP dan bij aerobe dissimilatie. Er ontstaat namelijk alleen ATP uit de glycolyse. Voorbeelden van gisting of fermentatie zijn alcoholgisting en melkzuurgisting.

Bij alcoholgisting (zie *BiNaS* tabel 68B) ontstaat er bij de gisting ethanol, een **alcohol**. Eerst splitst een van de drie koolstofatomen van pyrodruivenzuur af, waarbij CO_2 en ethanal ontstaan. De volgende reactie zet ethanal en NADH om in ethanol en NAD^+. Dit gebeurt bijvoorbeeld in gistcellen.

De reactievergelijking van alcoholgisting is:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ C_2H_6O + 2\ CO_2 + 2\ ATP$$

Bij de bereiding van bier, wijn en brood vindt alcoholgisting plaats. De gasbelletjes in bier en in mousserende wijn (bijvoorbeeld champagne) bevatten koolstofdioxide dat is ontstaan bij de alcoholgisting.

Bij melkzuurgisting ontstaat melkzuur (zie *BiNaS* tabel 68B). Melkzuurbacteriën zetten in een anaerobe omgeving pyrodruivenzuur om in **melkzuur** ($C_3H_6O_3$). Bij deze reactie wordt NADH omgezet in NAD^+. Melkzuurbacteriën worden onder andere gebruikt bij de productie van kaas, yoghurt en zuurkool. Melkzuurgisting leidt tot het zuur worden van voedingsproducten.

De reactievergelijking van melkzuurgisting is:

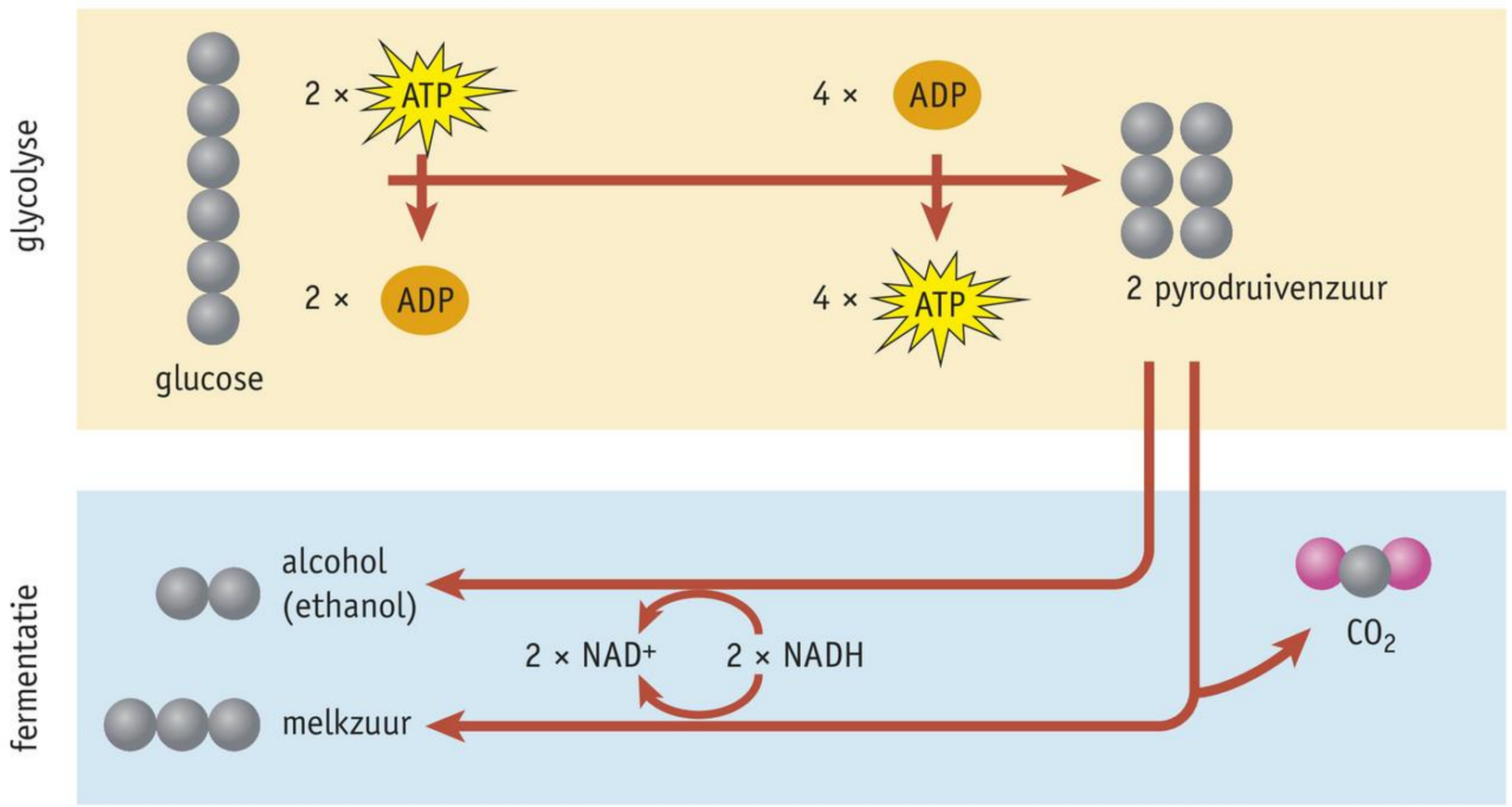
$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ C_3H_6O_3 + 2\ ATP$$

Bij veel dieren (en mensen) kan door melkzuurgisting verzuring ontstaan, vooral in de spieren. Dit gebeurt als er meer energie nodig is dan de aerobe dissimilatie kan leveren, bijvoorbeeld bij sporters die een sprint inzetten. Door zuurstoftekort in de spieren stagneert dan de oxidatieve fosforylering.

Omdat er weinig ATP vrijkomt bij melkzuurgisting, moet er in korte tijd veel glucose anaeroob worden gedissimileerd om genoeg energie te leveren. De glycolyse levert twee ATP op per glucosemolecuul, waarbij pyrodruivenzuur ontstaat. NAD^+ neemt de H^+ en twee elektronen op. Pyrodruivenzuur en NADH hopen zich op in het cytoplasma en vormen melkzuur en NAD^+. NAD^+ neemt weer waterstofatomen op (zie afbeelding 43). Melkzuur wordt afgevoerd naar de lever en daar met behulp van zuurstof en ATP weer omgezet in glucose. Spieren kunnen ook verzuren door de omzetting van ATP in ADP. Daarbij ontstaat fosforzuur (H_3PO_4).

Ook in de maag van koeien vindt fermentatie plaats. Daarbij ontstaat waterstof. Bepaalde bacteriën zetten het waterstofgas met koolstofdioxide om in **methaan** (CH_4). Dit methaan komt terecht in de lucht en zorgt voor een versterkt broeikaseffect.

■ **Afb. 43** Anaerobe dissimilatie.



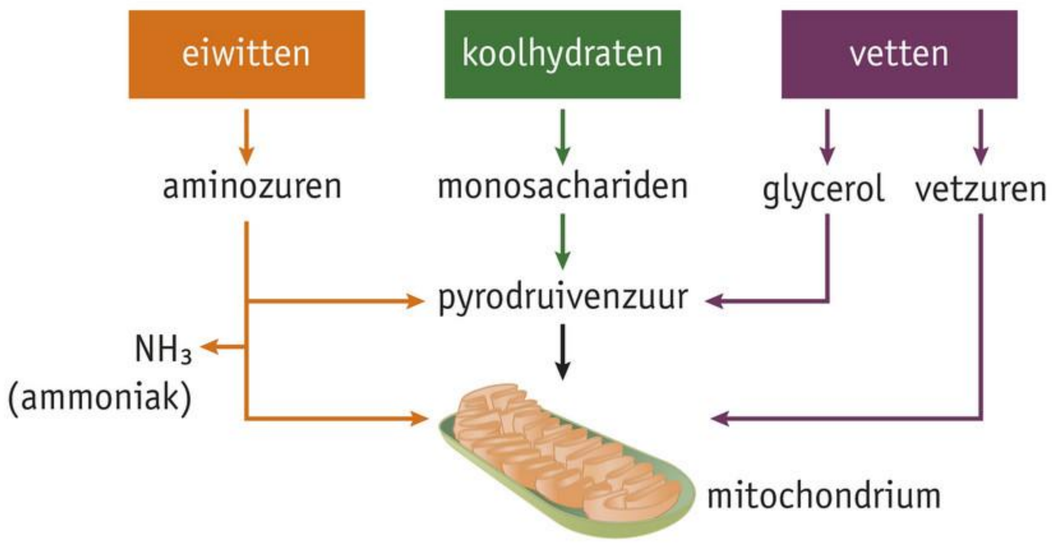
AEROBE DISSIMILATIE VAN KOOLHYDRATEN, EIWITTEN EN VETTEN

Behalve glucose kunnen ook andere koolhydraten, vetten en eiwitten als brandstof dienen (zie afbeelding 44 en *BiNaS* tabel 68E). De volgorde waarin de stoffen als brandstof worden gebruikt is onder andere afhankelijk van de beschikbaarheid.

- Koolhydraten worden eerst omgezet in monosachariden, vooral glucose.
- Eiwitten worden eerst gesplitst in aminozuren. Van de aminozuren wordt de aminogroep afgesplitst en omgezet in ammoniak (NH_3). Ammoniak wordt bij dieren omgezet in urinezuur of ureum en uitgescheiden. Bij de dissimilatie van aminozuren kan ook zwavel ontstaan. De overgebleven koolstofketen kan worden omgezet in pyrodruivenzuur, acetyl-CoA, of andere stoffen die in de citroenzuurcyclus verder worden gedissimileerd.

- Vetten worden eerst gesplitst in glycerol en vetzuren. Glycerol kan in cellen worden omgezet in pyrodruivenzuur, dat aeroob kan worden gedissimileerd. Glycerol kan ook worden omgezet in glucose en vervolgens in glycogeen. Dit wordt opgeslagen als energiereserve. Van de vetzuren worden telkens delen afgesplitst in de vorm van C_2-moleculen. Deze moleculen worden omgezet in acetyl-CoA, dat bij de citroenzuurcyclus kan worden gebruikt. Bij de verbranding van vetten komt veel meer energie vrij dan bij de verbranding van koolhydraten of eiwitten. Dit wordt veroorzaakt door het relatief grote aantal C-H-bindingen (energierijk) per gram vet. C=C-bindingen leveren nog meer energie op, maar zijn minder of niet aanwezig in vetzuren.

■ **Afb. 44** Dissimilatie van eiwitten, koolhydraten en vetten.



Opdrachten KENNIS

47 **a** Gebruik *BiNaS* tabel 68E.
Bij welke stoffen speelt glycolyse een rol in de dissimilatie?
b Gebruik *BiNaS* tabel 67G.
Welk vetzuur levert per gram meer ATP op bij aerobe dissimilatie: linolzuur of arachidonzuur?

48 Gebruik *BiNaS* (tabel 68B en D).
Waarom kunnen organismen die hun energie door gisting verkrijgen, NADH niet op dezelfde manier omzetten in NAD^+ als bij de aerobe dissimilatie?

49 **a** Door gisting wordt kool omgezet in zuurkool.
Hoe kun je weten of dit door alcoholgisting of door melkzuurgisting plaatsvindt?
b Bij het vergisten van voedingsmiddelen wordt vaak extra suiker toegevoegd. Leg uit waarom dat gebeurt.

Opdrachten INZICHT

50 Bij een experiment wordt glucose gebruikt, waarvan de zuurstofatomen radioactief zijn.
a In welke stof kun je na de aerobe dissimilatie radioactiviteit aantonen?
Leg je antwoord uit.
b In welke stof kun je radioactiviteit aantonen als je glucose gebruikt waarvan de waterstofatomen radioactief zijn? Leg je antwoord uit.

51 De verbrandingswarmte van 1 mol glucose bedraagt 2816 kJ. Voor de vorming van een mol ATP is (afgerond) 31 kJ nodig. Bij aerobe dissimilatie wordt maximaal 38 mol ATP gevormd (bruto).

a Bereken hoeveel procent van de energie die bij de aerobe dissimilatie van glucose beschikbaar komt, maximaal in ATP wordt vastgelegd.

b Een blikje energiedrank van 300 mL bevat ongeveer 30 g glucose.
Bereken hoeveel gram ATP in je lichaam kan worden gevormd uit een blikje energiedrank. Ga ervan uit dat alle glucose uit de energiedrank in je cellen wordt gebruikt voor de aanmaak van ATP. De massa van 1 mol glucose is 180 g en de massa van 1 mol ATP is 507 g.

52 Gewone bakkersgist kun je gebruiken om glucose en sacharose te vergisten tot de biobrandstof ethanol. Voor die eenvoudige omzetting zijn in de gistcel zo'n twaalf tot vijftien eiwitten nodig. Door het inbouwen van genen uit een schimmel en een melkzuurbacterie maakten onderzoekers aan de TU Delft gistvarianten die ook monosachariden zoals xylose en arabinose uit restafval kunnen omzetten in ethanol. Een fabriek in Iowa in de Verenigde Staten vervaardigt met deze genetisch gemodificeerde gistvariant jaarlijks tachtig miljoen liter ethanol uit maisafval.
Het gebruik van gewone bakkersgist kan leiden tot concurrentie tussen voedsel- en brandstofproductie. Bij gebruik van de genetisch gemodificeerde gist is de geproduceerde brandstof wel volledig duurzaam. Leg dat uit.

53 Vitamine B is een belangrijke voedingsstof. Er bestaan verschillende varianten, waaronder vitamine B3. In beperkte mate kan je lichaam zelf vitamine B3 uit tryptofaan maken. Vitamine B3 heeft een belangrijke rol in de energievoorziening van je lichaam. Als vitamine B3 wordt toegediend, gebeurt dit in de vorm van niacine. Niacine wordt in de dunne darm omgezet in NAD^+ en $NADP^+$.

a Een gebrek aan vitamine B3 komt niet vaak voor. Een tekort aan eiwitten kan wel voor een tekort aan vitamine B3 zorgen. Leg uit hoe dat kan.

b Hoe kan een tekort aan vitamine B3 zorgen voor energietekort? Leg dit duidelijk uit aan de hand van het aerobe dissimilatieproces.

54 Arachidinezuur ($C_{19}H_{39}COOH$) is een verzadigd vetzuur dat bestaat uit in totaal 20 C-atomen. Bij de aerobe dissimilatie van vetzuren wordt elk vetzuur gesplitst in C_2-moleculen die als acetyl-CoA de citroenzuurcyclus binnenkomen.
Bereken hoeveel ATP-moleculen ontstaan bij de dissimilatie van 1 molecuul arachidinezuur.

55 **Hardlopen en stofwisseling**
Naar: Voorronde Biologie Olympiade Bovenbouw 2017, vraag 23.

Usain Bolt liep de 100 meter in Rio in 9,81 seconden. Na ongeveer 8 seconden was de voorraad ATP en creatinefosfaat in zijn beenspieren op. Zijn snelheid bleef daarna erg hoog.
Enkele moleculen zijn: creatine, creatinefosfaat, CO_2, glucose, H_2O, melkzuur en pyrodruivenzuur.
Welke omzetting van de hierboven genoemde moleculen leverde nieuw ATP tijdens de laatste twee seconden van de race?

Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf.*

Context Beroep

GEZONDE DARMEN

Na haar opleiding biomedische wetenschappen heeft Iris de opleiding klinische chemie gevolgd. Ze werkt nu als klinisch chemicus op een laboratorium in een ziekenhuis. Ze onderzoekt en analyseert daar onder andere bloed-, feces - en urinemonsters van patiënten. Iris is verantwoordelijk voor de onderbouwing van de gevonden meetresultaten. Aan de hand van deze resultaten wordt in samenspraak met de behandelend arts voor een patiënt een diagnose en een gerichte behandelmethode opgesteld. Ook wordt nagegaan of behandelingen het beoogde effect hebben.

Door bijvoorbeeld feces te onderzoeken, komt Iris te weten wat de samenstelling van bacteriestammen in de darmen is. Dat zegt weer iets over de gezondheid van een patiënt. ‘In grote lijnen is bij ieder mens de darmflora hetzelfde, maar individueel zijn er grote verschillen. In de darmen zitten meer dan 100 biljoen bacteriën die samen 1 tot 1,5 kilo wegen. Ongeveer 99% van de darmbacteriën is anaeroob. Aerobe bacteriën vangen zuurstof weg, zodat er een beter milieu in de darmen voor de anaerobe bacteriën is. Darmbacteriën zijn belangrijk om ziekteverwekkers in het lichaam te remmen. Ze maken goede vetzuren aan, zetten koolhydraten en eiwitten om en produceren slijm dat voor een goede weerstand zorgt. Voeding heeft veel invloed op de darmflora. Bijvoorbeeld veel koolhydraten en toegevoegde smaakstoffen zorgen voor een slechtere darmflora. Ook de zuurgraad in de darm zegt iets over de gezondheid van de darmflora. En dit zegt weer iets over de gezondheid van een patiënt.’

Naast onderzoek en diagnosen stellen, heeft Iris vaak overleg met andere medische disciplines en heeft ze wetenschappelijke taken op het laboratorium.

■ **Afb. 45** Als klinisch analist werk je in een laboratorium.

Opdrachten

56 **a** In de darmflora zitten anaerobe en aerobe bacteriën. Anaerobe bacteriën zijn moeilijker in een laboratorium te kweken. Waarom is dat zo?

b De meeste bacteriën zorgen ervoor dat de pH in de darmen omlaaggaat. Leg uit hoe dit komt.

57 Iris heeft eerst biomedische wetenschappen gestudeerd. Er zijn nog andere opleidingen die je kunt volgen voordat je klinische chemie kunt studeren.

a Zoek op internet nog twee universitaire opleidingen die je kunt volgen voordat je klinisch chemicus wordt.

b Noem minstens twee vaardigheden die je bij biologie leert die je nodig hebt als klinisch chemicus.

c Noem drie verschillende capaciteiten die je nodig hebt als klinisch chemicus.

NOTITIES

PANDABEER OVERLEEFT KOU DOOR BACTERIËN

LEERDOEL

9.S.1 Je kunt de biologische vakvaardigheden evolutionair, ecologisch en vorm-functiedenken toepassen op de stofwisseling van een pandabeer.

Pandaberen voeden zich het hele jaar door met bamboe (zie afbeelding 1). Gewoonlijk hebben planteneters een lang darmstelsel. Plantaardig voedsel is moeilijker om te verteren dan dierlijk voedsel en het blijft daardoor langer in de darmen aanwezig. Pandaberen (*Ailuropoda melanoleuca*) hebben een relatief kort darmstelsel dat bacteriën bevat die vooral bij vleeseters voorkomen, zoals *Escherichia*- en *Streptococcus*-soorten. De voorouders van de panda waren dan ook vleeseters.

In de loop van de tijd zijn pandaberen planteneters geworden. Maar omdat de bamboe niet goed wordt verteerd door het korte darmstelsel, moeten ze wel twaalf tot veertien uur per dag eten om genoeg voedingsstoffen binnen te krijgen. Gelukkig heeft de panda krachtige kaken die hem daarbij helpen, maar zijn darmen staan hem in de weg. Zeker in de herfst en winter als de bamboe weinig voedingsstoffen bevat, is het voor de panda lastig om genoeg binnen te krijgen.

■ **Afb. 1** Een pandabeer eet bamboe.

Daarom verandert de samenstelling van de micro-organismen in de darmen van de panda met het wisselend voedselaanbod. In het voorjaar en zomer (meestal van april tot augustus) zijn er veel bamboescheuten te vinden waar veel voedingsstoffen in zitten, vooral eiwitten en koolhydraten. De rest van het jaar zijn er alleen voedselarme bamboebladeren waar de pandabeer van leeft. Onderzoekers kwamen erachter dat er meer van de bacterie *Clostridium butyricum* in de darmen voorkomt als de panda bamboescheuten eet. Deze bacteriën produceren veel boterzuur (butyraat). Hierdoor wordt de genexpressie van het gen Per2 bij de panda gestimuleerd. Dit gen zorgt onder andere voor een verhoging van vetaanmaak. Dit vet wordt opgeslagen voor later gebruik. De rest van het jaar is de bacterie *Clostridium butyricum* minder aanwezig.

De onderzoekers ontdekten dit toen ze pandapoep transplanteerden in muizen. De poep kwam van pandaberen in het Qinling-gebergte in China, de enige plek waar pandaberen nog in het wild leven. Een deel van de poep werd verzameld in het bamboescheutenseizoen. Een ander deel van de poep werd verzameld terwijl de pandaberen alleen bamboebladeren aten. Alle muizen kregen drie weken lang een vergelijkbaar dieet als de pandaberen. De muizen waarbij poep uit het bamboescheutenseizoen was getransplanteerd in de darmen, hadden een hoger vetgehalte en wogen uiteindelijk meer. De conclusie was snel getrokken dat de bacterie *Clostridium butyricum* hiervoor heeft gezorgd.

Panda's zijn niet de enige dieren waarbij de samenstelling van de darmflora gedurende het jaar wisselt. Bepaalde apensoorten eten in de zomer blaadjes en vers fruit en moeten het in de winter met boomschors doen. Ook bij hen verandert de bacteriesamenstelling in de darmen gedurende het jaar.

Opdrachten

1 Vul in de tabel de volgende begrippen in bij het juiste organisatieniveau.
Kies uit: *Ailuropoda melanoleuca – bamboe – bamboeblad – boterzuur – Clostridium butyricum – darmbacterie – darmen – micro-organismen in darmstelsel panda – muizen – pandabeer – Qinling-gebergte in China – vet.*

Organisatieniveau	Begrip
Systeem aarde	
Ecosysteem	
Populatie	
Organisme	
Orgaan	
Cel	
Molecuul	

2 Leg uit hoe bacteriën de pandabeer 'helpen kou te overleven'.

3 Pandaberen hebben een 'valse duim', een soort zesde vinger aan de poten die ze gebruiken bij het eten. Er zijn fossielen van ongeveer zes miljoen jaar oud gevonden. Die bevatten een vergroot polsbeen. Voor onderzoekers is dat een teken dat de panda ongeveer vanaf die tijd is overgegaan op plantaardig voedsel.
Leg uit hoe de 'valse duim' kan verklaren dat de panda is overgegaan op ander voedsel.

4 In het bamboescheutseizoen krijgen de pandaberen met hun voedsel meer fosfor binnen. Hierdoor worden meer fosfolipiden gemaakt. Leg uit hoe dat kan.

5 De bacterie *Clostridium butyricum* produceert boterzuur bij het afbreken van voedingsvezels. Boterzuur (of butyraat) komt van nature maar heel weinig voor in voedingsmiddelen, het grootste deel wordt gemaakt in de darmen. Voedingsmiddelen waar boterzuur in voorkomt, zijn bijvoorbeeld bepaalde soorten melk en Parmezaanse kaas.
Is boterzuur een onverzadigd of verzadigd vetzuur? Leg je antwoord uit.

6 Bamboescheuten zijn jonge uitlopers van de bamboeplant. Ze groeien van april tot augustus en bevatten meer voedingsstoffen dan de bamboebladeren die er vervolgens aangroeien en die de panda de rest van het jaar eet.
Leg uit waarom de bamboescheuten meer voedingsstoffen bevatten dan de bamboebladeren.

7 De pandabeer wordt met uitsterven bedreigd. Dit komt onder andere door stropers die panda's doden. Een andere reden is dat de mens de bamboebossen heeft versnipperd in kleine gebieden door het bouwen van bijvoorbeeld wegen en dammen.
Leg uit hoe dit kan zorgen voor uitsterven van de panda's.

PRACTICA

Practicumopdracht 1

ONDERZOEKSDOEL

9.O.1 Je kunt de basale stofwisseling bepalen met behulp van een spirometer.

- Basisstof 1
- Vaardigheid 6 (thema 1)

De intensiteit van de basale stofwisseling bepalen

15 minuten

INLEIDING

Bij elk organisme vindt voortdurend stofwisseling plaats. Bij dieren en mensen is het zuurstofverbruik een maat voor de intensiteit van de dissimilatie. In deze practicumopdracht onderzoek je de intensiteit van de dissimilatie in rust bij jongens en meisjes.

ONDERZOEKSVRAAG

Formuleer een passende onderzoeksvraag die het verband aangeeft tussen de basale stofwisseling en de personen bij wie je dit wilt meten.

HYPOTHESE

Formuleer een bondige en duidelijke hypothese die past bij je onderzoeksvraag.

MATERIAAL

- spirometer
- personenweegschaal
- rekenmachine

METHODE

Ontwerp een experiment om de basale stofwisseling bij een jongen en een meisje te meten. Zorg ervoor dat je meetmethode valide en betrouwbaar is, maar ook uitvoerbaar binnen de beschikbare tijd. Bedenk een goede manier om de verbruikte zuurstof te meten.

RESULTATEN

- Noteer de uitslag van de spirometer bij een meisje en bij een jongen.
- Bereken de intensiteit van de stofwisseling in $L(O_2) \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ bij een jongen en bij een meisje. Ingeademde lucht bevat afgerond 20% zuurstof. Ga ervan uit dat een kwart van de zuurstof in de ingeademde lucht wordt verbruikt.

CONCLUSIE

1 Welke conclusie kun je trekken uit de vergelijking van de hypothese met de resultaten?

DISCUSSIE

2 Op welke manieren kun je het resultaat van de bepaling betrouwbaarder maken? Noem er twee.

Practicumopdracht 2

ONDERZOEKSDOEL

9.O.2 Je kunt de werking van katalase op waterstofperoxide beschrijven.

- Basisstof 2
- Vaardigheid 6 (thema 1)

Waterstofperoxide en katalase

25 minuten

INLEIDING

Waterstofperoxide (H_2O_2) ontstaat als bijproduct van verschillende reacties in cellen. Waterstofperoxide kan schade in cellen veroorzaken. Het is dan ook belangrijk dat het snel uit de cellen verdwijnt. Alle cellen bezitten het enzym katalase, dat waterstofperoxide omzet in water en zuurstof: $2\ H_2O_2 \rightarrow 2\ H_2O + O_2$. In deze practicumopdracht onderzoek je wat de werking van katalase is.

ONDERZOEKSVRAAG

Formuleer een passende onderzoeksvraag die het verband aangeeft tussen katalase en de werking ervan op waterstofperoxide.

HYPOTHESE

Formuleer een bondige en duidelijke hypothese die past bij je onderzoeksvraag.

MATERIAAL

- aardappel
- mes
- 2 erlenmeyers van 100 mL
- waterstofperoxideoplossing van 3% (pas op met morsen!)
- maatcilinder van 10 mL
- houtspaander
- lucifer

METHODE

Ontwerp een experiment om de werking van katalase op waterstofperoxide te onderzoeken. Zorg ervoor dat je meetmethode valide en betrouwbaar is, maar ook uitvoerbaar binnen de beschikbare tijd.
Bedenk een goede manier om de ontstane zuurstof aan te tonen.

RESULTATEN

1 Wat is de conclusie van je onderzoek?

2 Waaraan kun je zien dat waterstofperoxide onder invloed van de stukjes aardappel wordt gesplitst in water en zuurstof?

Practicumopdracht 3

ONDERZOEKSDOEL

9.O.3 Je kunt de invloed van de pH op de enzymwerking onderzoeken en beschrijven.

- Basisstof 2
- Vaardigheden 6 en 7 (thema 1)

De invloed van de pH op de activiteit van katalase

30 minuten

INLEIDING

De werking van katalase is afhankelijk van de temperatuur en van de pH. In deze practicumopdracht onderzoek je de activiteit van katalase bij verschillende pH's. Voer het onderzoek uit met twee personen. Maak een verslag van het onderzoek.

ONDERZOEKSVRAAG

Formuleer een passende onderzoeksvraag die het verband aangeeft tussen de pH en het effect dat je wilt meten.

HYPOTHESE

Formuleer een bondige en duidelijke hypothese die past bij je onderzoeksvraag.

MATERIAAL

- afhankelijk van de methode

METHODE

Ontwerp een experiment om de activiteit van katalase bij verschillende pH's te meten. Zorg ervoor dat je meetmethode valide en betrouwbaar is, maar ook uitvoerbaar binnen de beschikbare tijd. Bedenk een goede manier om de activiteit van het enzym te meten. Zorg ervoor dat de behandelingen vergelijkbaar zijn.

RESULTATEN

Verwerk de gemeten resultaten overzichtelijk in een tabel en/of in een grafiek.

CONCLUSIE

1 Wordt de hypothese bevestigd, verworpen of kun je geen conclusie trekken?

DISCUSSIE

2 Leg het verband uit tussen de activiteit van katalase en de verschillende pH-waarden.

3 Op welke onderdelen is de proef anders verlopen dan gepland?

4 Hoe zou je de validiteit en de betrouwbaarheid van je onderzoek (nog verder) kunnen verbeteren?

Practicumopdracht 4

ONDERZOEKSDOEL

9.O.4 Je kunt aantonen dat bij planten in het licht zetmeel wordt gevormd.

- Basisstof 3
- Vaardigheid 6 (thema 1)

De vorming van zetmeel in een blad

45 minuten

INLEIDING

De glucose die bij fotosynthese ontstaat, wordt in bladeren van planten vrijwel onmiddellijk omgezet in zetmeel. Zetmeel kun je aantonen met een joodoplossing. Er treedt dan blauwkleuring op. In deze practicumopdracht onderzoek je de invloed van licht op de vorming van zetmeel in een blad.

ONDERZOEKSVRAAG

Formuleer een passende onderzoeksvraag die het verband aangeeft tussen de belichting en de vorming van zetmeel.

HYPOTHESE

Formuleer een bondige en duidelijke hypothese die past bij je onderzoeksvraag.

MATERIAAL

- plant (bijvoorbeeld basilicum) waarvan de bladeren gedeeltelijk zijn afgedekt met aluminiumfolie en die achtereenvolgens 24 uur in het donker en 24 uur in het licht heeft gestaan
- bekerglazen van 500 mL en van 100 mL
- ethanol of spiritus
- pincet
- kookplaatje of heetwaterbad (100 °C)
- petrischaaltjes
- joodoplossing
- tekenpapier, tekenmateriaal
- timer

METHODE

- Pluk een gedeeltelijk afgedekt blad van de plant. Maak een tekening van dit blad. Breng intussen 250 mL water in het bekerglas van 500 mL aan de kook.
- Verwijder het aluminiumfolie van het blad. Dompel het blad een halve minuut in het kokend water. Het blad verliest dan zijn stevigheid. Zet het kookplaatje uit (veiligheid).
- Vul het bekerglas van 100 mL met 25 mL ethanol of spiritus.
- Haal met het pincet het blad uit het water. Doe het blad in het bekerglas met ethanol.
- Plaats het kleine bekerglas in het grote bekerglas. Het water in het grote bekerglas is nog heet genoeg om het ethanol of de spiritus aan de kook te brengen. Houd je hoofd niet boven het ethanol!
- Haal na enkele minuten het blad uit het ethanol. Het blad moet nu ontkleurd zijn.
- Spreid het blad uit op de petrischaal. Druppel voorzichtig joodoplossing over het hele blad.

RESULTATEN

1 Hoe ziet het blad eruit na de behandeling? Maak een tekening van het blad.

CONCLUSIE

2 Vergelijk de delen van het blad die wel en niet zijn belicht.
Welke conclusie kun je trekken?

Practicumopdracht 5

ONDERZOEKSDOEL

9.O.5 Je kunt aantonen dat bladgroen uit verschillende kleurpigmenten bestaat.

- Basisstof 5
- Vaardigheid 6 (thema 1)

Pigmenten in bladeren

45 minuten

INLEIDING

Bladgroen bestaat uit verschillende fotosynthetische pigmenten. Deze kun je scheiden door chromatografie. Een variant daarvan is de papierchromatografie. Deze techniek berust op het feit dat sommige stoffen zich langzaam en andere snel door filtreerpapier verplaatsen die in een vloeistof wordt gebracht. Er ontstaat een patroon op het papier dat aangeeft welke stoffen de vloeistof bevat. In deze practicumopdracht onderzoek je welke kleurstoffen in een blad zitten.

ONDERZOEKSVRAAG

Formuleer een passende onderzoeksvraag bij het onderzoek.

HYPOTHESE

Formuleer een bondige en duidelijke hypothese die past bij je onderzoeksvraag.

MATERIAAL

- enkele bladeren
- mortier met stamper
- wat (zilver)zand
- aceton
- liniaal of geodriehoek
- loopvloeistof: petroleumether 92% en aceton 8%
- chromatografiepapier
- capillair
- potlood
- cilinder met kurk

METHODE

- Stamp de bladeren samen met een beetje (zilver)zand fijn met een mortier.
- Voeg vier druppels aceton toe en meng goed door elkaar.
- Teken op 2 cm van de onderkant van een strook chromatografiepapier met potlood een streep (raak alleen de randen van de strook aan).
- Zet met het capillair een streep bladgroen op de potloodstreep. Laat het even drogen en zet er nog ongeveer vijf keer een streep op.

- Giet in een cilinder ongeveer 1,5 cm loopvloeistof en hang het chromatografiepapier hierin. Zorg ervoor dat het bladgroen de vloeistof niet raakt. Zet het papier vast met de kurk.
- Laat de loopvloeistof door het papier heen trekken (ongeveer 20 minuten). Verwijder dan het papier.
- Omcirkel op het chromatografiepapier waar de gekleurde vlekken zijn ontstaan.

RESULTATEN

Bereken de loopafstand (*R*f-waarden) van de verschillende bladpigmenten door de afgelegde afstand te delen door de afstand tussen de beginstreep en het eind waar de vloeistof is gekomen. Noteer de waarden in een tabel.

CONCLUSIE

1 Gebruik *BiNaS* tabel 73.
Welke conclusie kun je uit deze proef trekken?

Practicumopdracht 6

ONDERZOEKSDOEL

9.O.6 Je kunt het verschil in zuurstofverbruik tussen droge en kiemende erwten onderzoeken en aantonen.

- Basisstof 5
- Vaardigheid 6 (thema 1)

Zuurstofverbruik door erwten

45 minuten

INLEIDING

In deze practicumopdracht onderzoek je de invloed van droge en kiemende erwten op de zuurstofconcentratie.

ONDERZOEKSVRAAG

Formuleer een passende onderzoeksvraag die het verband aangeeft tussen de verschillende erwten en het zuurstofverbruik.

HYPOTHESE

Formuleer een passende hypothese bij de onderzoeksvraag.

MATERIAAL

- afhankelijk van de methode

METHODE

Ontwerp een experiment om de zuurstofconcentratie van droge en kiemende erwten te onderzoeken. Zorg ervoor dat je meetmethode valide en betrouwbaar is, maar ook uitvoerbaar binnen de beschikbare tijd. Bedenk een goede manier om het zuurstofverbruik van de erwten aan te tonen. Zorg ervoor dat de behandelingen vergelijkbaar zijn.

RESULTATEN

Verwerk de gemeten resultaten overzichtelijk in een tabel en/of in een grafiek.

CONCLUSIE

1 Welke conclusie kun je uit deze proef trekken?

SAMENVATTING

9.1.1 BASISSTOF 1

Je kunt beschrijven wat stofwisseling, assimilatie en dissimilatie zijn en wat er bij deze reacties met de energie gebeurt.

- Stofwisseling: het geheel van chemische processen in een cel.
- Chemische energie: energie die in de atoombindingen van stoffen is opgeslagen.
- Assimilatie: de opbouw van organische moleculen uit kleinere moleculen.
  - Resultaat: vorming van de organische stoffen waaruit cellen bestaan.
  - Bij assimilatiereacties wordt energie vastgelegd in de chemische bindingen van grotere moleculen.
  - De binding tussen koolstof en waterstof is energierijk.
  - Autotrofe organismen kunnen anorganische stoffen omzetten in organische stoffen.
  - Via koolstofassimilatie wordt glucose gevormd uit koolstofdioxide en water.
  - Via voortgezette assimilatie wordt glucose omgezet in andere koolhydraten, vetten, eiwitten en DNA.
  - Heterotrofe organismen moeten organische stoffen opnemen uit de omgeving.
- Dissimilatie: de afbraak van organische moleculen tot kleinere moleculen.
  - Bij dissimilatie kan energie vrijkomen in de vorm van kinetische energie (bewegingsenergie), warmte en lichtenergie (energie in de vorm van elektromagnetische straling).
  - Bij dissimilatie komt chemische energie uit stoffen beschikbaar voor processen in cellen.
- In cellen wordt chemische energie getransporteerd door ATP (adenosinetrifosfaat).
  - Opbouw van ATP: ADP + P_i + energie → ATP
  - Afbraak van ATP: ATP → ADP + P_i + energie
  - Chemisch aan ATP verwante energiedragermoleculen zijn AMP (adenosinemonofosfaat), $NADP^+$ (nicotinamide-adenine-dinucleotidefosfaat) en NAD^+ (nicotinamide-adenine-dinucleotide).

9.2.1 BASISSTOF 2

Je kunt de bouw en werking van enzymen beschrijven.

- Enzymen katalyseren stofwisselingsreacties zonder daarbij zelf te worden verbruikt.
  - Enzymen verlagen de energiedrempel, de hoeveelheid activeringsenergie die nodig is om een reactie op gang te brengen.
- Enzymatische reacties zijn vaak evenwichtsreacties en kunnen in twee richtingen verlopen.
  - De enzymwerking is substraatspecifiek: elk enzym kan slechts één evenwichtsreactie beïnvloeden.
- Een enzym wordt genoemd naar het substraat (de stof waarop het enzym inwerkt).
  - De naam van het enzym krijgt het achtervoegsel -ase.
- Enzymen zijn eiwitmoleculen met een specifieke ruimtelijke structuur.
  - Een enzymmolecuul heeft een actief centrum, dat tijdelijk een binding aangaat met een substraatmolecuul. Er ontstaat dan een enzym-substraatcomplex (E-S-complex).
- Sommige enzymen hebben een cofactor nodig om werkzaam te zijn. Als de cofactor een organische stof is, wordt deze een co-enzym genoemd.
  - Cofactor, bijv. een metaalion of een vitamine.
  - Co-enzym, bijv. een vitamine of een hormoon.
  - Apo-enzym: enzymmolecuul met een organische of anorganische cofactor.
  - ATP fungeert als co-enzym bij het enzym ATPase.

9.2.2

Je kunt de invloed van milieufactoren op de enzymactiviteit beschrijven.

- De enzymactiviteit kan worden bepaald door de hoeveelheid substraat te meten die per tijdseenheid wordt omgezet.
- Temperatuur: beïnvloedt de enzymactiviteit volgens een optimumkromme.
  - Bij toenemende temperatuur zetten intacte enzymmoleculen sneller substraatmoleculen om.

  - Boven de optimumtemperatuur verliezen steeds meer enzymmoleculen hun specifieke ruimtelijke structuur (denatureren). Deze verandering is irreversibel (onomkeerbaar).
- Zuurgraad (pH): beïnvloedt de enzymactiviteit volgens een optimumkromme.
  - Een oplossing die veel H^+-ionen bevat, is zuur. De pH is dan lager dan 7.
  - Een oplossing die weinig H^+-ionen bevat, is basisch. De pH is dan hoger dan 7.
  - De ruimtelijke structuur van enzymmoleculen blijft alleen bij een bepaalde pH in stand.
  - De invloed van de pH op de enzymactiviteit is irreversibel (niet omkeerbaar).
- Bepaalde stoffen kunnen de enzymactiviteit beïnvloeden.
  - Activering: de ruimtelijke structuur van een enzymmolecuul wordt zodanig veranderd, dat sneller E-S-complexen kunnen worden gevormd (bijv. sommige hormonen, vitaminen, geneesmiddelen).
  - Remming: remstoffen veranderen de ruimtelijke structuur van enzymmoleculen, waardoor geen E-S-complexen meer kunnen worden gevormd (bijv. zware metalen). Deze verandering is irreversibel.

9.3.1 BASISSTOF 3

Je kunt de fotosynthese en de chemosynthese beschrijven.

- Fotosynthese is koolstofassimilatie met behulp van lichtenergie.
  - Nettoreactievergelijking:
    $6\ CO_2 + 6\ H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$
- Fotosynthese vindt plaats in cellen van planten en in sommige bacteriën.
  - Het fotosynthetisch pigment chlorofyl (bladgroen) bevindt zich in chloroplasten (bladgroenkorrels) en absorbeert lichtenergie.
  - De glucose die bij de fotosynthese ontstaat, wordt meestal direct omgezet in zetmeel.
- De fotosynthese bestaat uit twee samenhangende reactieketens: lichtreacties en donkerreacties.
- Lichtreacties: lichtenergie wordt vastgelegd in energiedragers (zie *BiNaS* tabel 69B).
  - In fotosysteem II (PSII) wordt water gesplitst, waarbij waterstofionen (H^+), elektronen (e^-) en zuurstof (O_2) ontstaan.
  - Chlorofyl kan de energierijke elektronen en waterstofionen overdragen aan energiedragers (ADP en $NADP^+$).
  - De elektronen worden aangevuld vanuit watermoleculen, die in PSII worden gesplitst.
  - De zuurstof die bij de fotosynthese ontstaat, is afkomstig van de gesplitste watermoleculen van de lichtreacties.
  - Fotosysteem I (PSI) is eerder ontdekt dan fotosysteem II (PSII).
  - Als de elektronen in PSI aankomen, worden zij met behulp van lichtenergie opnieuw energierijk gemaakt. Deze energierijke elektronen worden samen met een waterstofion afgestaan aan het transportmolecuul $NADP^+$ en als NADPH vervoerd naar de donkerreacties.
- Donkerreacties: uit CO_2-moleculen worden glucosemoleculen opgebouwd (zie *BiNaS* tabel 69C).
  - De energie en waterstof die hiervoor nodig zijn, worden geleverd door de energierijke producten van de lichtreacties (ATP en NADPH).
  - Voor de donkerreacties is geen licht nodig.
  - De donkerreacties vinden aansluitend op de lichtreacties plaats.
- Chemosynthese: koolstofassimilatie met behulp van energie, verkregen uit de oxidatie van een anorganische stof (zie *BiNaS* tabel 69D).
  - Oxidatie: onttrekking van elektronen, vaak door zuurstof.
  - Zwavelbacteriën oxideren waterstofsulfide (H_2S) tot zwavel (S) en vervolgens tot zwavelzuur (H_2SO_4).
  - Nitrietbacteriën oxideren ammoniak (NH_3) of ammoniumionen (NH_4^+) tot nitrietionen (NO_2^-).
  - Nitraatbacteriën oxideren nitrietionen tot nitraationen (NO_3^-).

9.4.1 BASISSTOF 4

Je kunt de voortgezette assimilatie beschrijven.

- Voortgezette assimilatie: de vorming van andere koolhydraten, vetten, eiwitten en DNA uit glucose, stikstof (N) en fosfor (P).
  - Hierbij is ATP de energiebron.
  - Stoffen kunnen dienen als bouwstof (zorgt voor groei, ontwikkeling en herstel van cellen), brandstof (wordt gebruikt bij de verbranding in cellen) of reservestof (wordt opgeslagen in de cellen in het lichaam).
- Assimilatie van koolhydraten.
  - Koolhydraten zijn verbindingen die bestaan uit koolstof-, waterstof- en zuurstofatomen (zie *BiNaS* tabel 67F).
  - Uit monosachariden (bijv. glucose, fructose) kunnen disachariden (bijv. sacharose) worden gevormd.

- Door polymerisatie kunnen polysachariden worden gevormd (bijv. zetmeel, glycogeen, cellulose).
- Bij planten dient zetmeel als koolhydraatreserve en bij dieren glycogeen.

• Assimilatie van eiwitten (proteïnen).
- Eiwitten zijn polymeren van aminozuren (zie *BiNaS* tabel 67H). Er zijn twintig verschillende aminozuren.
- Aminozuren bestaan uit een C-atoom, een aminogroep ($-NH_2$), een carboxygroep (–COOH), een H-atoom en een restgroep.
- Planten kunnen aminozuren assimileren uit glucose en nitraationen. Dieren kunnen alleen aminozuren assimileren uit andere aminozuren.
- Essentiële aminozuren zijn aminozuren die dieren niet zelf kunnen maken.
- Niet-essentiële aminozuren zijn aminozuren die dieren wel zelf kunnen maken.
- Bij polymerisatie van sachariden en aminozuren ontstaat water.

• De ruimtelijke bouw van een eiwitmolecuul wordt op meerdere niveaus bepaald:
- primaire structuur: wordt bepaald door typen aminozuren en de volgorde waarin deze voorkomen;
- secundaire structuur: spiraalstructuur wordt bepaald door de vorming van waterstof- en zwavelbruggen;
- tertiaire structuur: wordt bepaald door de aantrekking en afstoting tussen hydrofiele en hydrofobe restgroepen;
- quaternaire structuur: wordt bepaald door de manier waarop meerdere polypeptideketens samen één eiwit vormen.

• Assimilatie van vetten (lipiden).
- Een vetmolecuul is vaak opgebouwd uit glycerol en drie vetzuren (bij fosfolipiden is één vetzuur vervangen door fosforzuur (zie *BiNaS* tabel 67G)).
- Glycerol is een verbinding die bestaat uit drie C-atomen waaraan drie OH-groepen zijn gebonden.
- Een vetzuur is een verbinding die bestaat uit lange ketens van CH_2-groepen met aan het eind daarvan een carboxygroep (COOH).
- Vetten worden opgeslagen als reservebrandstof.
- Celmembranen zijn opgebouwd uit fosfolipiden. Bij een fosfolipide is één vetzuur van het triglyceride vervangen door een fosfaatgroep.
- Vetzuurstaarten zijn hydrofoob (waterafstotend).
- Tussen de verschillende cellen zit tussencelstof.

9.5.1 BASISSTOF 5

Je kunt de aerobe en anaerobe dissimilatie van glucose toelichten.

• In organische moleculen bevindt de chemische energie zich vooral in energierijke bindingen.
- Bij dissimilatiereacties worden energierijke elektronen, meestal samen met waterstofionen, overgedragen aan energiedragers zoals NAD^+ en FAD.

• De aerobe dissimilatie van glucose wordt vaak verbranding genoemd.
- Brutoreactievergelijking:
  $C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 + 6\ H_2O \rightarrow 6\ CO_2 + 12\ H_2O + 38$ ATP
- Nettoreactievergelijking:
  $C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O + 36$ ATP

• De aerobe dissimilatie bestaat uit de glycolyse, de vorming van acetyl-co-enzym A (acetyl-CoA), de citroenzuurcyclus en de oxidatieve fosforylering (zie *BiNaS* tabel 68A, 68B, 68C, 68D).

• Glycolyse: een glucosemolecuul wordt gesplitst in twee pyrodruivenzuurmoleculen.
- De glycolyse vindt plaats in het cytoplasma. Voor de glycolyse is geen zuurstof nodig.
- Het eindproduct van de glycolyse is pyrodruivenzuur.

• Pyrodruivenzuur wordt met behulp van co-enzym A in de citroenzuurcyclus opgenomen. Daarbij ontstaat citroenzuur.

• Citroenzuurcyclus (krebscyclus): citroenzuur wordt afgebroken.
- Energierijke elektronen en waterstofionen worden overgedragen aan energiedragers (NAD^+ en FAD).
- De citroenzuurcyclus vindt plaats in de vloeistof (matrix) in de mitochondriën.

• Bij de vorming van acetyl-co-enzym A en bij de citroenzuurcyclus ontstaat CO_2 (decarboxylering).

• Oxidatieve fosforylering (elektronentransportketen): energierijke elektronen staan hun energie geleidelijk af voor de vorming van ATP uit ADP en een fosfaatgroep (P_i).
- Uiteindelijk worden de elektronen (samen met waterstofionen) gebonden aan zuurstof. Hierbij ontstaan watermoleculen.
- De oxidatieve fosforylering vindt plaats in het binnenmembraan van de mitochondriën.

• De dissimilatie van een glucosemolecuul levert de energie voor de vorming van ATP-moleculen.
- Bij de glycolyse worden netto 2 ATP-moleculen gevormd per molecuul glucose.
- Bij de citroenzuurcyclus worden 2 ATP-moleculen gevormd per molecuul glucose.

  - Bij de oxidatieve fosforylering kunnen theoretisch 34 ATP-moleculen worden gevormd per molecuul glucose.
  - Door energiegebruik voor transport en door warmteproductie bij energieomzettingen valt de ATP-opbrengst van de aerobe dissimilatie meestal lager uit dan het maximum van 38 (circa 30 tot 32 ATP-moleculen per molecuul glucose).
- Anaerobe dissimilatie van glucose (gisting of fermentatie): hierbij vindt alleen glycolyse plaats (zie *BiNaS* tabel 68B).
  - Per glucosemolecuul worden slechts 2 ATP-moleculen gevormd.
  - Er blijven energierijke eindproducten over: alcohol of melkzuur.
- Alcoholgisting: het eindproduct van de glycolyse (pyrodruivenzuur) wordt omgezet in ethanol.
  - Bij deze omzetting ontstaat CO_2 en wordt NAD^+ gevormd.
  - Alcoholgisting wordt toegepast bij de bereiding van bier, wijn en brood.
- Melkzuurgisting: pyrodruivenzuur wordt omgezet in melkzuur.
  - Bij deze omzetting wordt NAD^+ gevormd.
  - Melkzuurgisting wordt toegepast bij de bereiding van kaas, yoghurt en zuurkool.
  - Melkzuurgisting vindt ook plaats in spieren, wanneer er in korte tijd veel energie moet worden geleverd.
- Fermentatie in de maag van koeien leidt tot de vorming van het broeikasgas methaan (CH_4).

9.5.2

Je kunt de dissimilatie van eiwitten en vetten beschrijven.

- Dissimilatie van eiwitten (zie *BiNaS* tabel 68E).
  - Eiwitten worden gesplitst in aminozuren.
  - Van de aminozuren wordt de aminogroep afgesplitst en omgezet in ammoniak.
  - De overblijvende koolstofketen wordt omgezet in pyrodruivenzuur, in acetyl-CoA of in een andere stof en verder gedissimileerd in de citroenzuurcyclus.
- Dissimilatie van vetten (zie *BiNaS* tabel 68E).
  - Vetten worden gesplitst in glycerol en vetzuren.
  - Glycerol wordt omgezet in pyrodruivenzuur.
  - Van de vetzuren worden C_2-moleculen afgesplitst, die worden omgezet in acetyl-CoA dat verder wordt afgebroken in de citroenzuurcyclus.

SAMENHANG

9.S.1 **Je kunt de biologische vakvaardigheden evolutionair, ecologisch en vorm-functiedenken toepassen op de stofwisseling van een pandabeer.**

ONDERZOEK - PRACTICA

9.0.1 **Je kunt de basale stofwisseling bepalen met behulp van een spirometer.**

9.0.2 **Je kunt de werking van katalase op waterstofperoxide beschrijven.**

9.0.3 **Je kunt de invloed van de pH op de enzymwerking onderzoeken en beschrijven.**

9.0.4 **Je kunt aantonen dat bij planten in het licht zetmeel wordt gevormd.**

9.0.5 **Je kunt aantonen dat bladgroen uit verschillende kleurpigmenten bestaat.**

9.0.6 **Je kunt het verschil in zuurstofverbruik tussen droge en kiemende erwten onderzoeken en aantonen.**

Ga naar de *Flitskaarten* en de *Oefentoets*.

EXAMENOPGAVEN

YOGHURT ZONDER KLONTEN

Bron: examen vwo 2021-1, vraag 16.

Zuivelbedrijven die yoghurt bereiden, krijgen soms een opbrengst van waterige melk met klonten, veroorzaakt door bacteriofagen in de yoghurtcultuur. Dankzij CRISPR-Cas kan dit voorkomen worden.

Yoghurt wordt gemaakt door melk te enten met de melkzuurbacteriën *Streptococcus thermophilus* en *Lactobacillus bulgaricus*. Deze bacteriën zetten melkeiwitten om en verbruiken lactose (melksuiker) uit de melk voor hun energievoorziening. Hierdoor verzuurt de melk snel en krijgt die een andere smaak, structuur en voedingswaarde: het wordt yoghurt. Doordat yoghurt veel minder lactose bevat dan melk, is het een geschikt zuivelproduct voor mensen met lactose-intolerantie.
Na het eten van yoghurt hebben de yoghurtbacteriën die levend de darm bereiken een gunstig effect op de darmflora, de stoelgang en het immuunsysteem van de darm.

De twee bacteriesoorten zijn samen efficiënter in het veranderen van de melk in yoghurt dan ieder apart. Zo produceert *L. bulgaricus* voornamelijk endopeptidasen, enzymen die peptidebindingen binnen een peptideketen verbreken, en produceert *S. thermophilus* voornamelijk exopeptidasen, enzymen die peptide-bindingen aan de uiteinden van een peptideketen verbreken.
De enzymactiviteit van *S. thermophilus* is hoger als deze bacterie samen met *L. bulgaricus* aan melk wordt toegevoegd dan als alleen *S. thermophilus* wordt toegevoegd.

1p **1** Verklaar deze hogere enzymactiviteit van *S. thermophilus* op moleculair niveau.

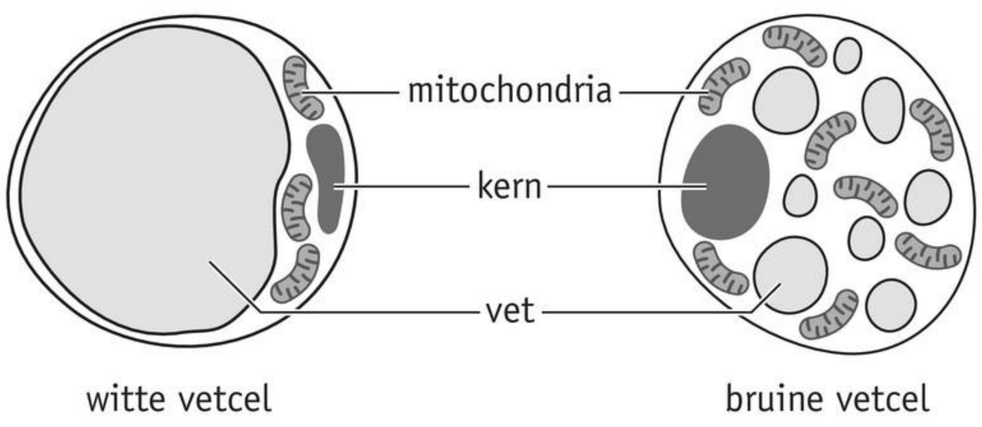
BRUIN VET

Naar: examen vwo 2018-1, vraag 20 en 21.

In de winter kun je een minder warme trui aantrekken en de thermostaat een graadje lager zetten. Bruin vet zorgt er dan voor dat je extra vet verbrandt om warmte op te wekken. Maar lukt het ook om zo af te vallen?

Wij hebben twee soorten vetweefsel. Wit vetweefsel met witte vetcellen dient vooral voor het aanleggen van een reservevoorraad brandstof die bij schaarste weer wordt afgegeven. Bruin vetweefsel met bruine vetcellen slaat ook vet op, maar dat is bedoeld om actief te verbranden en zo extra warmte op te wekken.
De bouw van witte en bruine vetcellen is schematisch weergegeven in afbeelding 1.

■ **Afb. 1** Bouw witte en bruine vetcel.



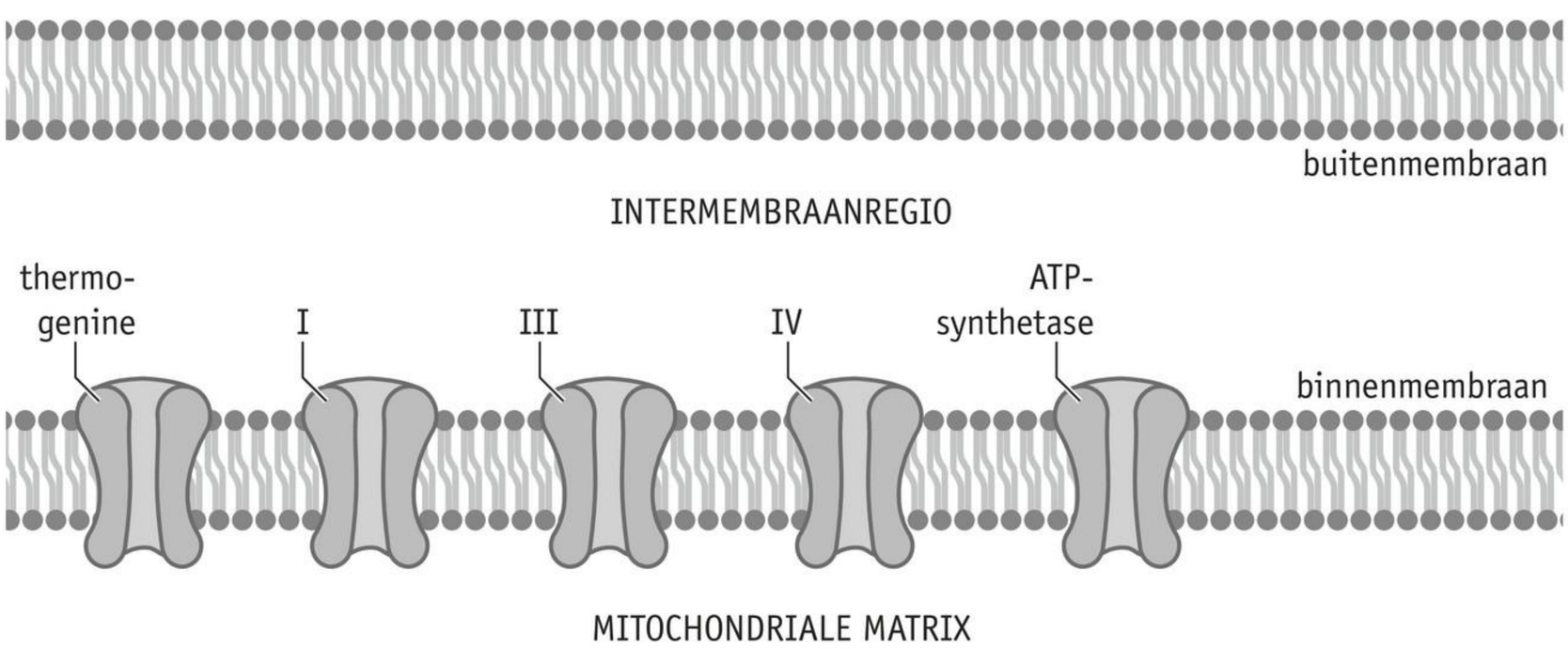
Het verschil in functie van witte en bruine vetcellen komt tot uiting in de verschillen in bouw van beide celtypen.

2p **2** Leg uit, aan de hand van twee typische kenmerken van de bruine vetcel (afbeelding 1), hoe deze is aangepast aan de beschreven functie.

Warmte komt vrij bij het transport van energierijke elektronen in mitochondria. De mitochondria in de bruine vetcellen kunnen meer warmte opwekken, doordat ze een speciaal membraaneiwit bezitten: thermogenine. Thermogenine is een protonkanaal dat zich, net als de membraancomplexen van de ademhalingsketen, bevindt in het mitochondriale binnenmembraan. Via thermogenine diffunderen protonen (H^+) terug naar de matrix, waardoor alleen warmte ontstaat.

In afbeelding 2 is schematisch het dubbele membraan van een mitochondrium weergeven, met een aantal eiwitcomplexen van de ademhalingsketen, ATP-synthase en het thermogenine.
Bij de versnelde aerobe dissimilatie waarbij zowel extra warmte als ATP wordt opgewekt, passeren grote hoeveelheden protonen het mitochondriale binnenmembraan.

■ **Afb. 2** Dubbel membraan van een mitochondrium.



2p **3** Geef met vijf pijlen aan in welke richting de protonenstromen zich dan door de vijf eiwitcomplexen verplaatsen.

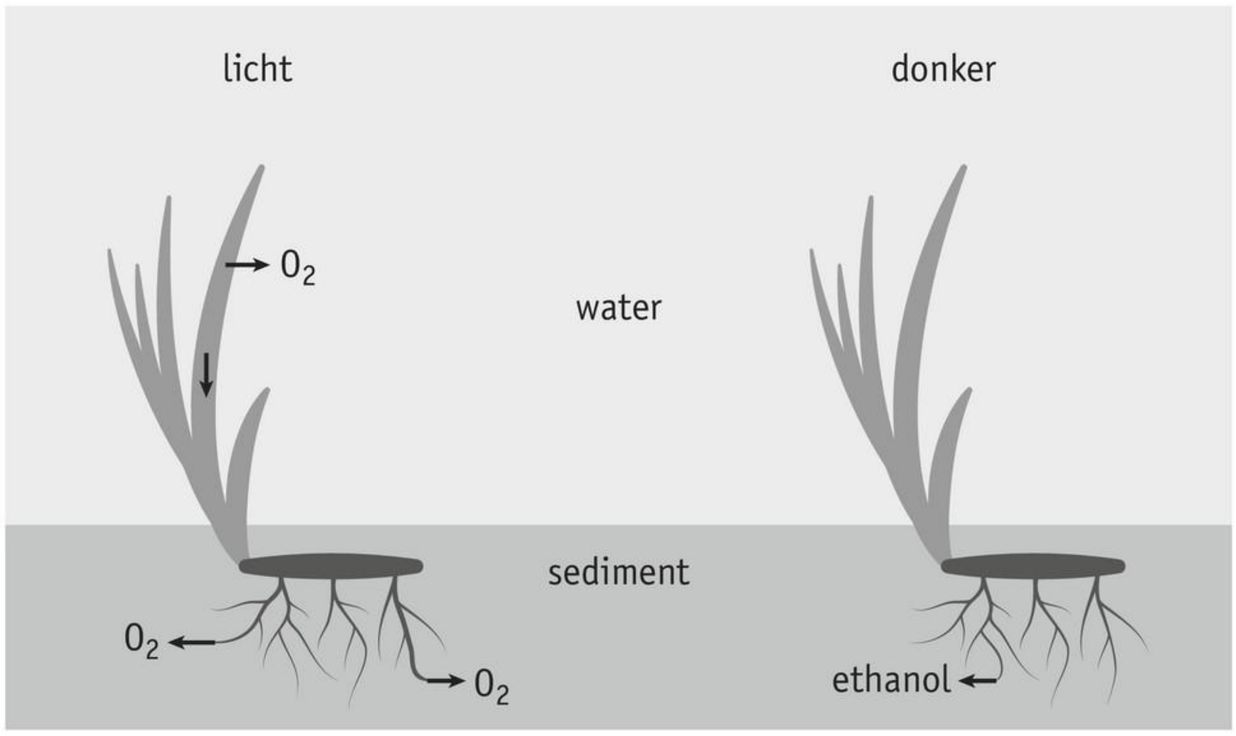
ZEEGRASHERSTEL IN DE WADDENZEE

Bron: examen vwo 2022-1, vraag 13.

Zeegrasvelden zijn ecosystemen die bijdragen aan een grote biodiversiteit in kustgebieden. Van de 15 000 hectare zeegras die oorspronkelijk in de Nederlandse Waddenzee aanwezig was, is nu nog maar zo'n 5 hectare over. De Waddenvereniging, Rijkswaterstaat en Natuurmonumenten proberen nu de zeegrasvelden weer te herstellen.

Zowel de bladeren als de wortels van zeegras hebben luchtruimtes. Overdag wordt de geproduceerde zuurstof naar de wortels en wortelstokken getransporteerd en wordt een deel van deze zuurstof aan het sediment afgegeven (zie afbeelding 3). ’s Nachts raakt de zuurstof in het sediment snel op.

■ **Afb. 3** Wortels en wortelstokken van zeegras.



In de cellen van de wortel leidt het zuurstoftekort ’s nachts tot de productie van ethanol. Enkele deelprocessen van de dissimilatie zijn:

1 oxidatieve fosforylering
2 omzetting van NADH in NAD^+
3 omzetting van NAD^+ in NADH
4 vorming van ATP

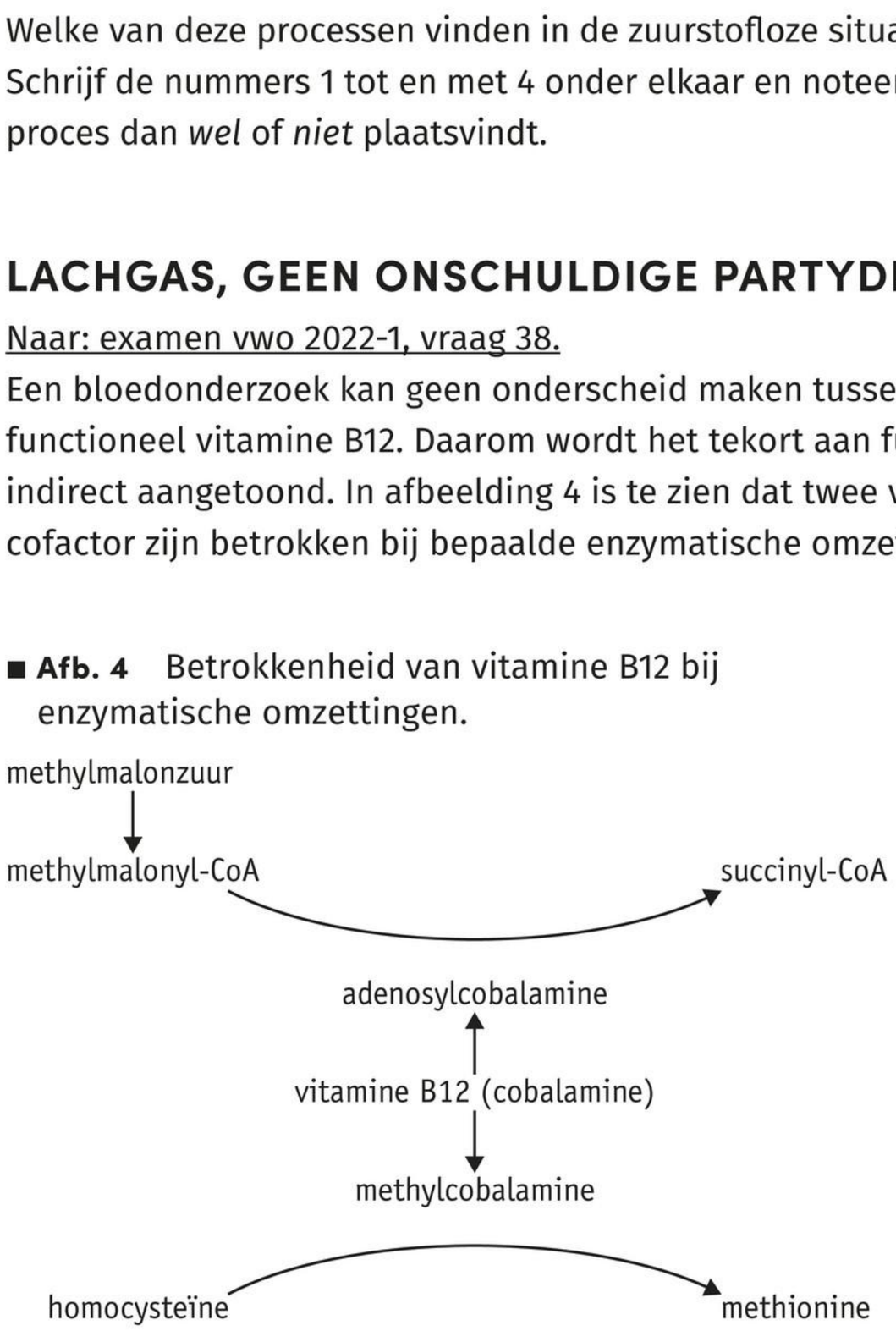
2p **4** Welke van deze processen vinden in de zuurstofloze situatie in de wortelcellen plaats? Schrijf de nummers 1 tot en met 4 onder elkaar en noteer erachter of het betreffende proces dan *wel* of *niet* plaatsvindt.

LACHGAS, GEEN ONSCHULDIGE PARTYDRUG

Naar: examen vwo 2022-1, vraag 38.

Een bloedonderzoek kan geen onderscheid maken tussen functioneel en niet-functioneel vitamine B12. Daarom wordt het tekort aan functioneel vitamine B12 indirect aangetoond. In afbeelding 4 is te zien dat twee vormen van vitamine B12 als cofactor zijn betrokken bij bepaalde enzymatische omzettingen.

■ **Afb. 4** Betrokkenheid van vitamine B12 bij enzymatische omzettingen.



Bloedonderzoek toont aan dat er bij een persoon een tekort is aan functioneel vitamine B12.

2p **5** Welke bloedwaarden van methylmalonzuur en homocysteïne wijzen op een tekort aan functioneel vitamine B12?

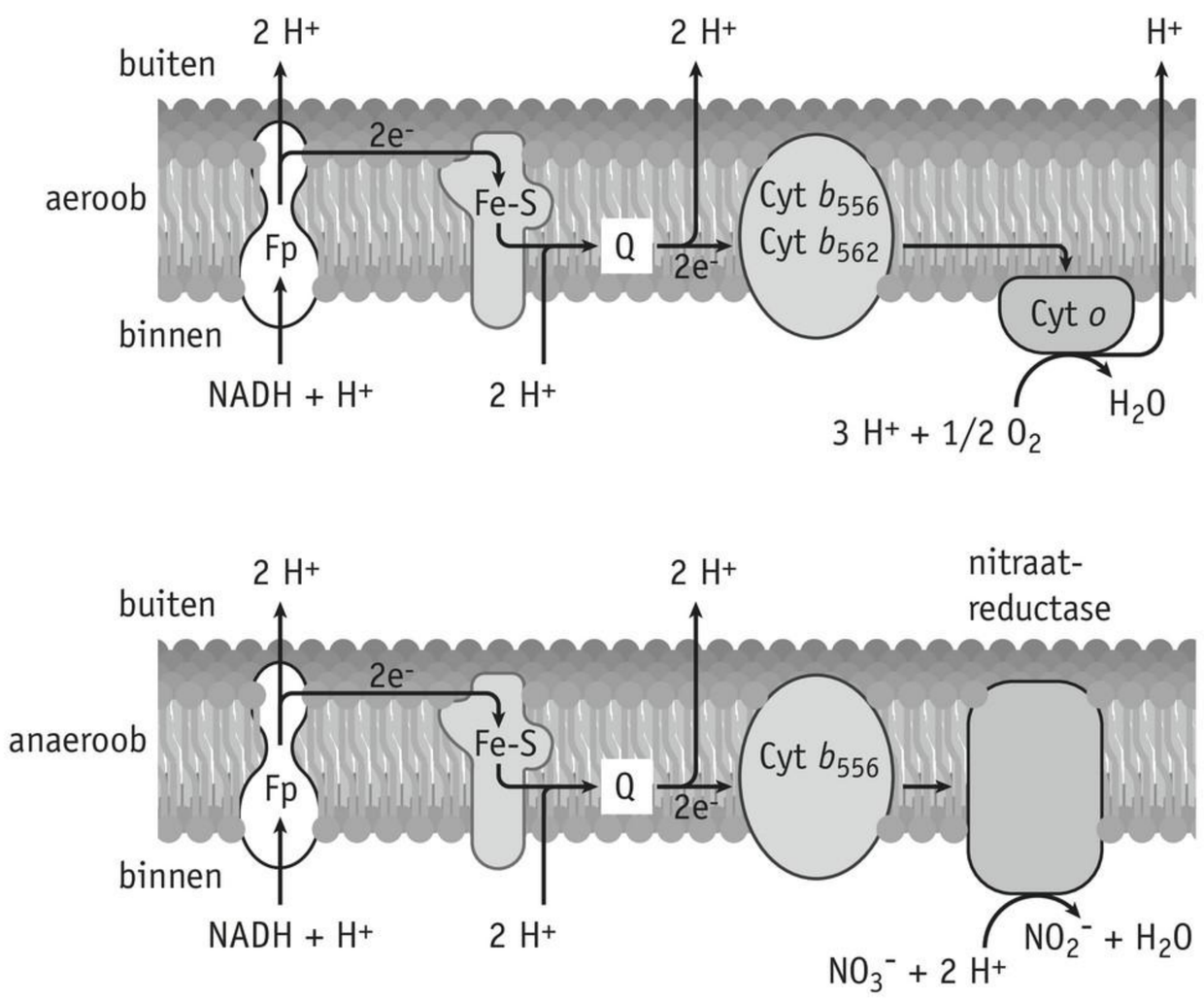
	Concentratie methylmalonzuur	Concentratie homocysteïne
A	verhoogd	verhoogd
B	verhoogd	verlaagd
C	verlaagd	verhoogd
D	verlaagd	verlaagd

BLAASONTSTEKING

Naar: examen vwo 2017-1, vraag 4.

Bij een blaasontsteking wordt soms de aanwezigheid van nitriet en van leukocytenesterase (een enzym aanwezig in witte bloedcellen) in de urine onderzocht. Het nitriet in het urinemonster is een product van de dissimilatie van *E. coli*. Deze bacterie is facultatief aeroob. Onder zuurstofrijke omstandigheden is zuurstof de elektronenacceptor bij de dissimilatie.
Bij gebrek aan zuurstof, zoals in de blaas, gebruikt de bacterie nitraat als elektronenacceptor. In afbeelding 5 zijn de twee elektronentransportketens van *E. coli* weergegeven.

■ **Afb. 5** Elektronentransportketens van *E. Coli*.



E. coli kan in het anaerobe milieu van de blaas per NADH-molecuul minder energie vrijmaken dan onder aerobe omstandigheden.

2p **6** Leg dit uit aan de hand van een gegeven in afbeelding 5.

Ga naar de *Examentrainer*.

NOTITIES

Thema 10

DNA

Een DNA-molecuul bevat de code voor de erfelijke informatie van een organisme. De code levert de instructies voor de zelforganisatie, zelfregulatie en reproductie van een organisme. Bij celdeling wordt de erfelijke informatie doorgegeven aan dochtercellen. De erfelijke informatie in het DNA bepaalt hoe de eigenschappen in een organisme tot uiting komen. Door wijzigingen in het DNA kunnen erfelijke eigenschappen veranderen.

Inhoud

ORIËNTATIE

Hoe uniek is jouw DNA? 74
Voorkennistoets
Voorkennisfilmpje

BASISSTOF

1 De bouw en functie van DNA 76
2 DNA-replicatie 85
3 Transcriptie 99
4 Translatie en eiwitsynthese 107
5 Genregulatie 117
6 Mutaties 127
7 Biotechnologie 137

SAMENHANG

Een designerbaby met CRISPR-Cas 146

EXTRA STOF

Erfelijke ziekten en afwijkingen bij de mens
Ideeën voor onderzoek

ONDERZOEK

Practica 150

AFSLUITING

Samenvatting 152
Examenopgaven 158

HOE UNIEK IS JOUW DNA?

In 2003 publiceerde een groep wetenschappers het eerste, vrijwel volledige DNA-profiel van de mens; het menselijk genoom. Het Human Genome Project, zoals de groep zich noemde, had dertien jaar nodig om in stukjes en beetjes de complete genetische code van 24 menselijke chromosomen (inclusief een X- en een Y-chromosoom) te ontcijferen.

De code werd gepubliceerd in een document met meer dan drie miljard letters, genoeg om 150 dikke boeken mee te vullen of een grote kamer mee te behangen (zie afbeelding 2). Elke letter staat voor een van de vier basen waaruit de genetische code is opgebouwd: A (adenine), T (thymine), C (cytosine) en G (guanine). Door de volgorde van deze basen in elk chromosoom te bepalen konden wetenschappers de volledige genetische informatie van het menselijk genoom reconstrueren.

Maar van wie is dat genoom eigenlijk? Het genoom dat het Human Genome Project publiceerde was voor 70% gebaseerd op het DNA van één man. De rest van de code kwam van vier andere donoren: twee mannen en twee vrouwen.

Het genoom van ieder mens is uniek, maar 99,9% van de genetische code is voor ieder mens hetzelfde (zie afbeelding 1). Voor het overgrote deel van ons DNA maakt het dus niet uit van welke persoon je het bekijkt. De 0,1% die per persoon anders is, veroorzaakt de enorme variatie aan erfelijke eigenschappen tussen mensen: van de vorm van je gezicht, tot de kleur van je haren en de vatbaarheid van ieder individu voor allerlei ziekten en aandoeningen. De genetische informatie van deze eigenschappen kun je dus waarschijnlijk niet terugvinden in de publicatie van één menselijk genoom.

De informatie die is vastgelegd in je genoom is vooral belangrijk voor medisch onderzoek. Veel aandoeningen worden veroorzaakt door afwijkingen in het DNA, zoals kanker, diabetes, de ziekten van Parkinson en Alzheimer, het downsyndroom en sikkelcelziekte. Door het DNA van een patiënt te vergelijken met dat van andere (gezonde) individuen, kun je zulke ziekten snel herkennen en misschien zelfs voorkomen. Daarvoor is het nodig om de genomen van veel verschillende mensen vast te leggen in een database: een zogeheten pangenoom (*pan* is Grieks voor *alles*). Op die manier kun je de grote variatie in erfelijke eigenschappen tussen mensen in kaart brengen.

In 2023 heeft een groep wetenschappers zo'n pangenoom in het gerenommeerde wetenschappelijke tijdschrift *Nature* gepubliceerd. Dit pangenoom omvat de genomen van 47 verschillende mensen, afkomstig uit de hele wereld. Hierdoor werd de genetische variatie tussen mensen wereldwijd beter bekend. Het is nu ook makkelijker om het DNA van mensen van dezelfde etniciteit met elkaar te vergelijken. Een zeldzame, erfelijke aandoening herkennen in het DNA van een persoon uit Zuidoost-Azië lukt beter als er genomen beschikbaar zijn van mensen met dezelfde etnische afkomst. De genetische variatie is dan kleiner en verschillen vallen sneller op. De publicatie van het pangenoom is dus een belangrijke stap vooruit naar een goede gezondheidszorg voor ieder mens, wereldwijd.

■ **Afb. 1** Het grootste deel van het genoom van al deze mensen is gelijk.

■ **Afb. 2** Het genoom van koning Willem-Alexander is deels afgebeeld op de muren van een kamer in Paleis Huis ten Bosch.

Opdrachten

1 Het Human Genome Project gebruikte witte bloedcellen van de donors om DNA uit te isoleren.
Waar in de cel bevindt zich het DNA?

2 Een menselijke witte bloedcel bevat 46 chromosomen.
Waarom heeft het Human Genome Project de genetische informatie van 24 chromosomen gepubliceerd en niet van 46?

3 Het DNA van twee willekeurige mensen komt voor ongeveer 99,9% overeen.
Wat is een verklaring voor deze hoge mate van overeenkomst?

4 De 0,1% verschil in DNA tussen mensen is verantwoordelijk voor een groot deel van de variatie in uiterlijke kenmerken (oogkleur, haarkleur, lichaamsbouw) tussen mensen.
Waar in het DNA ligt de informatie voor zo'n kenmerk opgeslagen?

5 Sommige genetische aandoeningen komen vaker voor in bepaalde delen van de wereld. Sikkelcelziekte is bijvoorbeeld een veelvoorkomende erfelijke ziekte in Afrika en landen waar veel mensen van Afrikaanse afkomst leven, zoals Suriname.
Leg uit waarom het pangenoom voor de behandeling van dit soort ziekten een beter hulpmiddel is dan het genoom van het Human Genome Project.

Ga naar de *Voorkennistoets* en het *Voorkennisfilmpje*.

1 DE BOUW EN FUNCTIE VAN DNA

LEERDOEL

10.1.1 Je kunt de bouw en functie van DNA beschrijven.

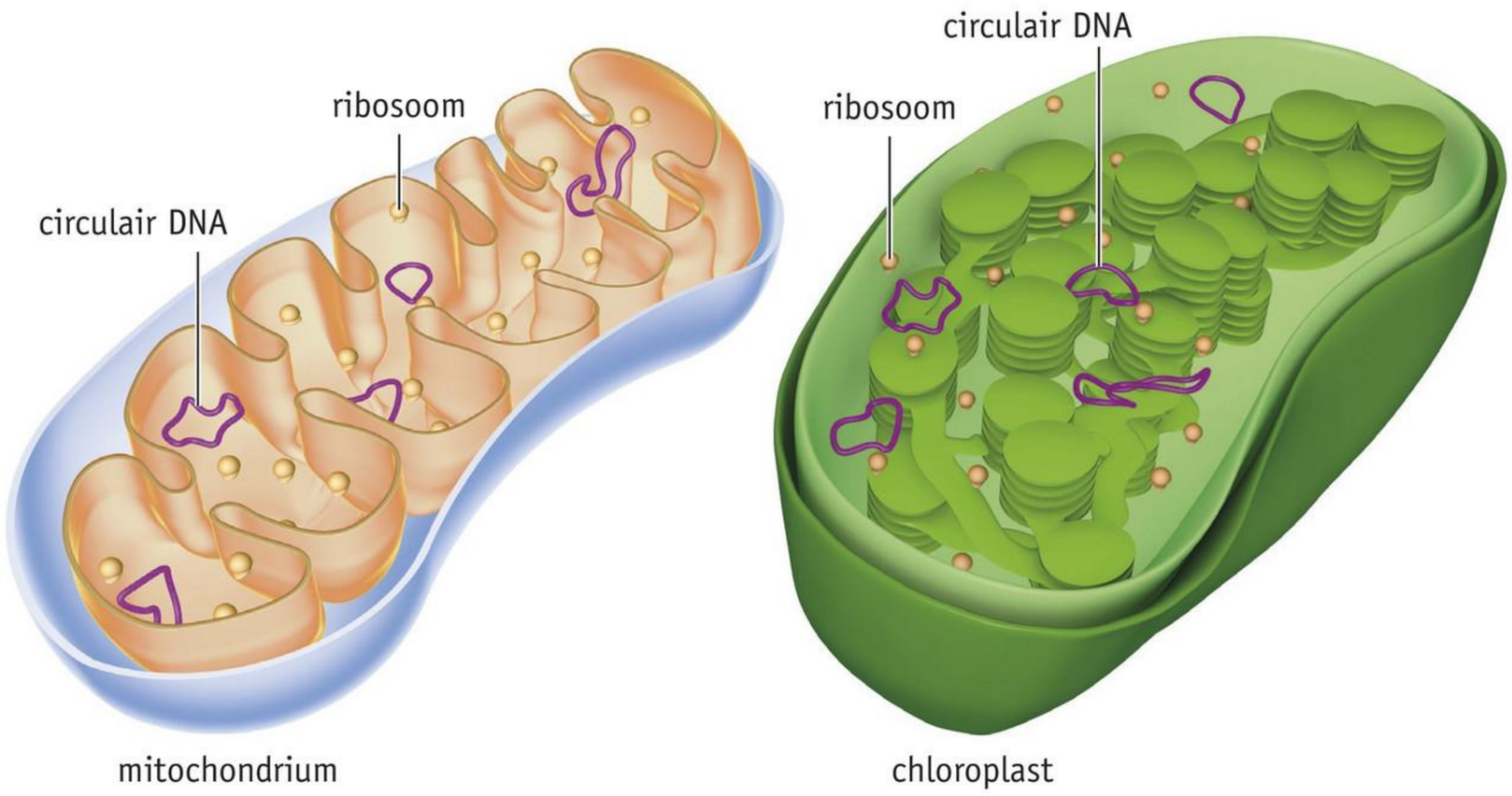
TAXONOMIE	LEERDOEL EN OPDRACHTEN
	10.1.1
Begrijpen	1, 2, 3, 4, 5, 6
Toepassen	8a, 9a, 10, 11a, 12ab
Analyseren	7, 8b, 9bc, 11b, 12cd, 13

Iedere dag voeren de cellen in je lichaam duizenden taken uit om je in leven te houden. Je hoeft je cellen niet te vertellen wat ze moeten doen, want dat weten ze zelf. De informatie daarvoor ligt opgeslagen in je DNA. Maar hoe kan een DNA-molecuul al die informatie bevatten?

HET GENOOM

Je lichaam is opgebouwd uit veel verschillende cellen die verschillende functies hebben. Bijna elke cel heeft een celkern met daarin **DNA** (desoxyribonucleïnezuur). Deze stof bevat **genetische informatie**, de informatie voor je erfelijke eigenschappen. Met behulp van deze informatie kan een cel de eiwitten maken die nodig zijn om zijn functies uit te voeren. Alle organismen op aarde gebruiken DNA voor het opslaan en doorgeven van genetische informatie.

■ **Afb. 1** Mitochondriën en chloroplasten bezitten hun eigen DNA.



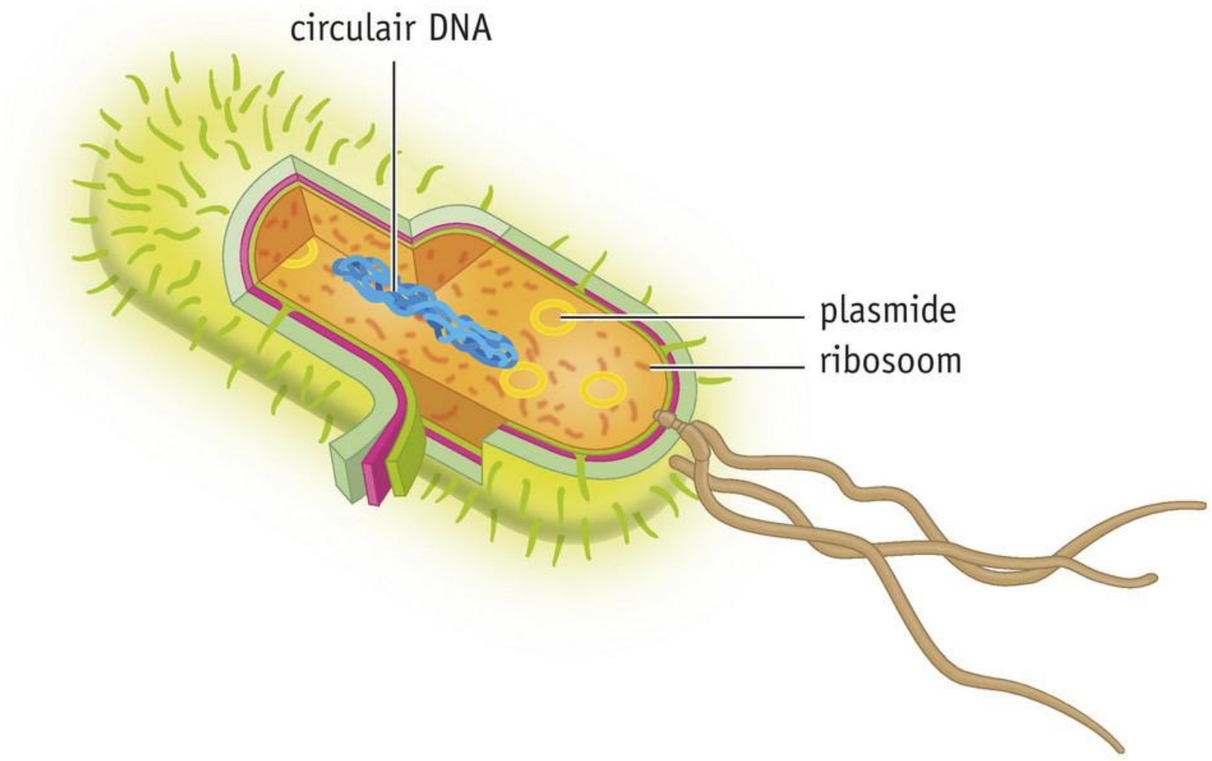
mitochondrium chloroplast

Het geheel aan genetische informatie in een cel van een organisme noem je het **genoom**. Op de geslachtscellen na hebben alle cellen van een organisme hetzelfde genoom. Het genoom van ieder organisme is uniek, maar hoe meer twee organismen aan elkaar verwant zijn, hoe meer overeenkomstige informatie de genomen bevatten.

Bij eukaryoten bestaat het genoom uit het DNA van alle **chromosomen** in de celkern (**kern-DNA**), plus het DNA in mitochondriën en chloroplasten (**mitochondriaal DNA** en **chloroplast-DNA**, zie afbeelding 1). Het DNA van mitochondriën en chloroplasten is een overblijfsel uit de tijd dat de voorouders van deze organellen nog zelfstandig levende prokaryoten waren. Het heeft nog steeds belangrijke functies.

Bij prokaryoten vormt al het DNA dat los in het cytoplasma van de cel voorkomt het genoom. Prokaryoten hebben meestal een circulair DNA-molecuul als genoom. Sommige prokaryoten bezitten **plasmiden**: korte, vaak circulaire stukjes DNA (zie afbeelding 2).

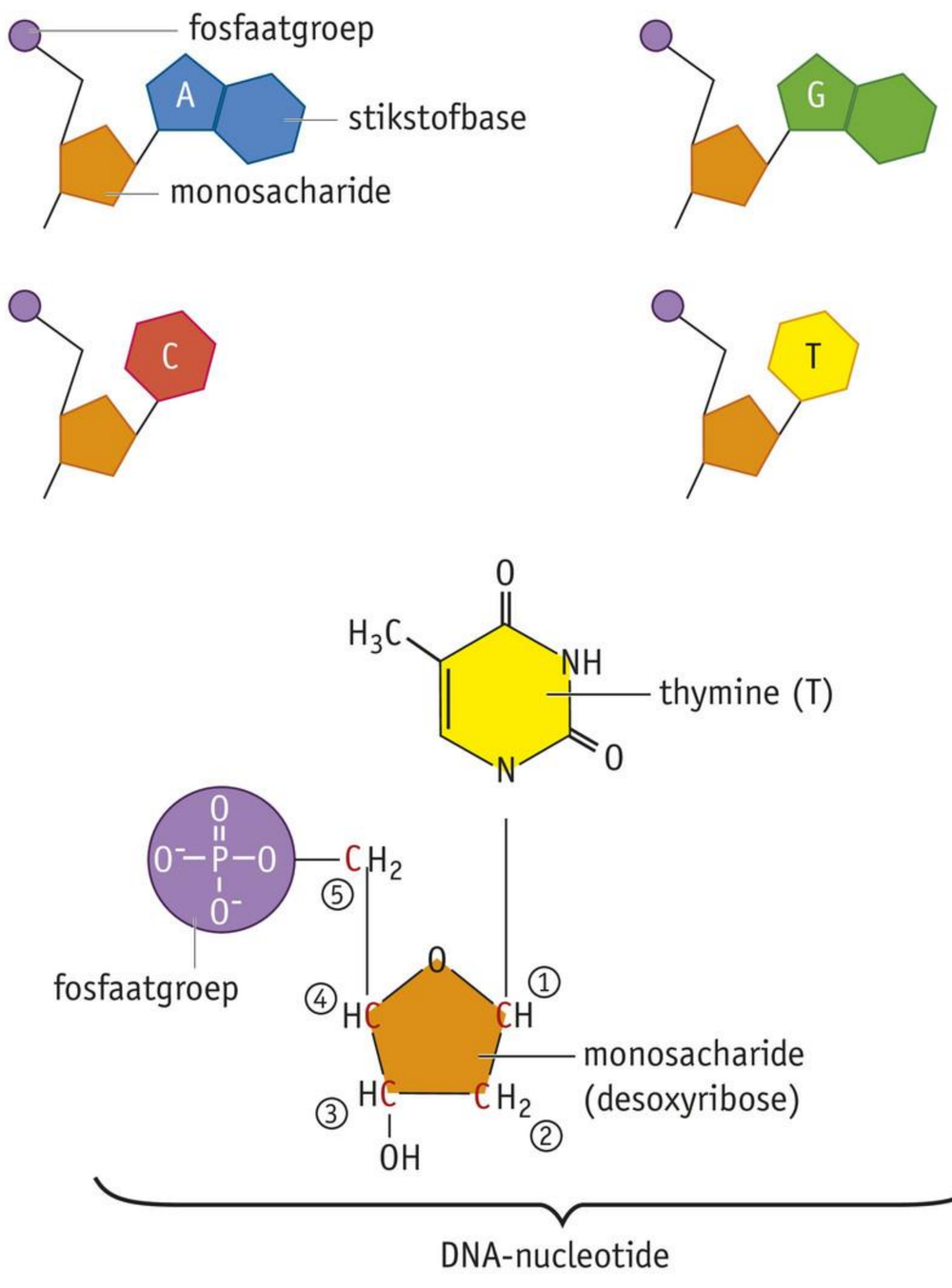
■ **Afb. 2** Een bacterie met een circulair genoom en plasmiden.



DE BOUW VAN DNA

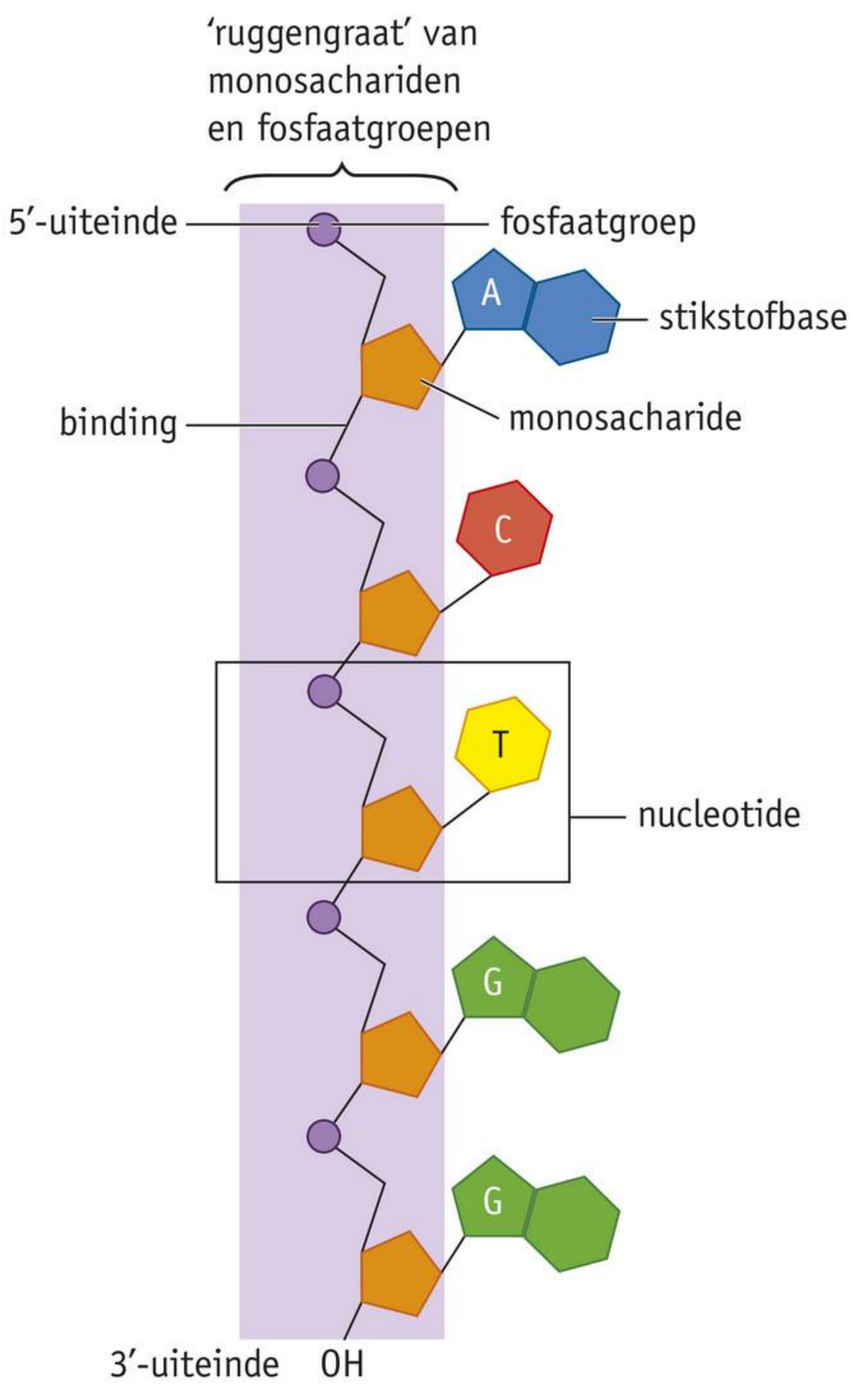
Om te begrijpen hoe DNA informatie kan opslaan, moet je weten hoe het is opgebouwd. Een DNA-molecuul is een **nucleïnezuur**. Nucleïnezuren werden voor het eerst ontdekt in een celkern (nucleus), vandaar de naam. Later bleek dat ook in het cytoplasma nucleïnezuren voorkomen. DNA bestaat uit een of twee strengen (ook wel ketens genoemd) van aan elkaar gekoppelde **nucleotiden**. Een nucleotide is opgebouwd uit de monosacharide desoxyribose, een fosfaatgroep en een stikstofbase (zie afbeelding 3). De stikstofbasen die voorkomen in DNA-moleculen zijn adenine (A), thymine (T), cytosine (C) en guanine (G).

■ **Afb. 3** Opbouw van nucleotiden.



Desoxyribose heeft vijf C-atomen. Aan het eerste C-atoom is de stikstofbase van de nucleotide gebonden, de fosfaatgroep zit aan het vijfde C-atoom. Het derde C-atoom kan binden aan de fosfaatgroep van een ander nucleotide, waardoor een streng van nucleotiden ontstaat (zie *BiNaS* tabel 71C). Deze streng van afwisselend aan elkaar gekoppelde desoxyribosen en fosfaatgroepen vormt een **enkelstrengs DNA-molecuul**. In afbeelding 4 kun je zien dat de beide uiteinden van dit enkelstrengs DNA-molecuul verschillend zijn. Aan het ene uiteinde bevindt zich een fosfaatgroep (het **5'-uiteinde**). Aan het andere uiteinde bevindt zich een OH-groep die aan het derde C-atoom van desoxyribose vastzit (het **3'-uiteinde**). Dit onderscheid is belangrijk, omdat DNA altijd in de richting van het 3'-uiteinde naar het 5'-uiteinde wordt afgelezen en gekopieerd. Dit noemen we de **afleesrichting**.

■ **Afb. 4** Aan elkaar gekoppelde nucleotiden in enkelstrengs DNA.

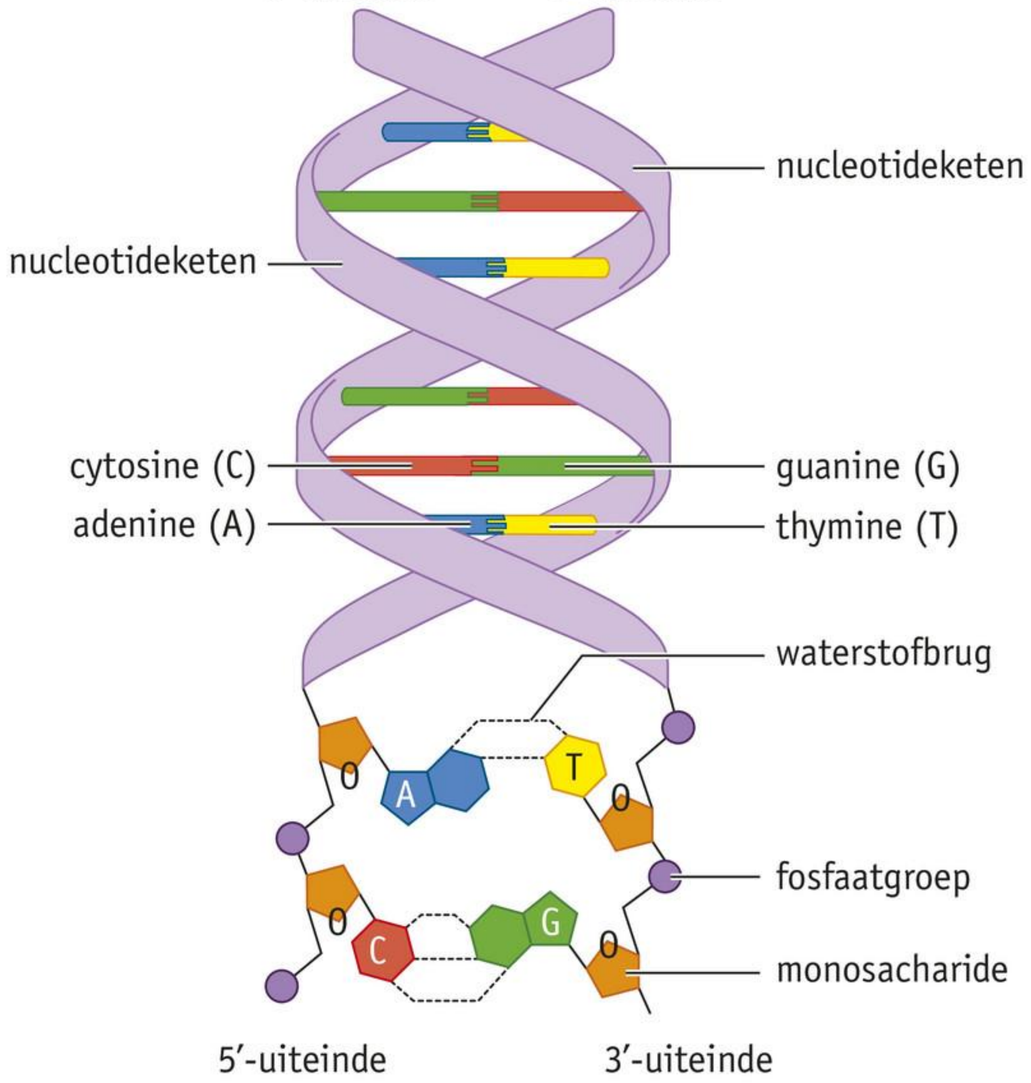


De stikstofbasen steken aan de zijkant van het enkelstrengs DNA uit en kunnen twee strengen DNA met elkaar verbinden. Dat gebeurt door **basenparing**, waarbij de stikstofbasen door waterstofbruggen aan elkaar binden. Elke stikstofbase bindt met een vaste andere stikstofbase en vormt zo een basenpaar (zie ook *BiNaS* tabel 71B):

- Adenine bindt altijd aan thymine (A – T).
- Guanine bindt altijd aan cytosine (G – C).

Hierdoor ontstaat **dubbelstrengs DNA** waarin de strengen een **helixstructuur** (spiraalvorm) hebben (zie afbeelding 5). De twee strengen lopen altijd in tegengestelde richting (antiparallel): de ene streng van 3’ naar 5’ en de andere van 5’ naar 3’ (zie *BiNaS* tabel 71C). De basen die samen een basenpaar vormen en de strengen DNA die met elkaar zijn verbonden door basenparing, worden ook wel complementair genoemd.

■ **Afb. 5** In een dubbelstrengs DNA-molecuul liggen twee nucleotidestrengen in een helixstructuur om elkaar heen.



Opdrachten KENNIS

1 Waarom verschilt het genoom van geslachtscellen van dat van andere cellen in het lichaam?

2 Mitochondriën en chloroplasten stammen af van prokaryoten, niet van eukaryoten. Aan welke twee eigenschappen van mitochondriaal DNA en chloroplast-DNA kun je dit afleiden? Gebruik afbeeldingen 1 en 2.

3 Een nucleotide bestaat uit een monosacharide, een fosfaatgroep en een stikstofbase.

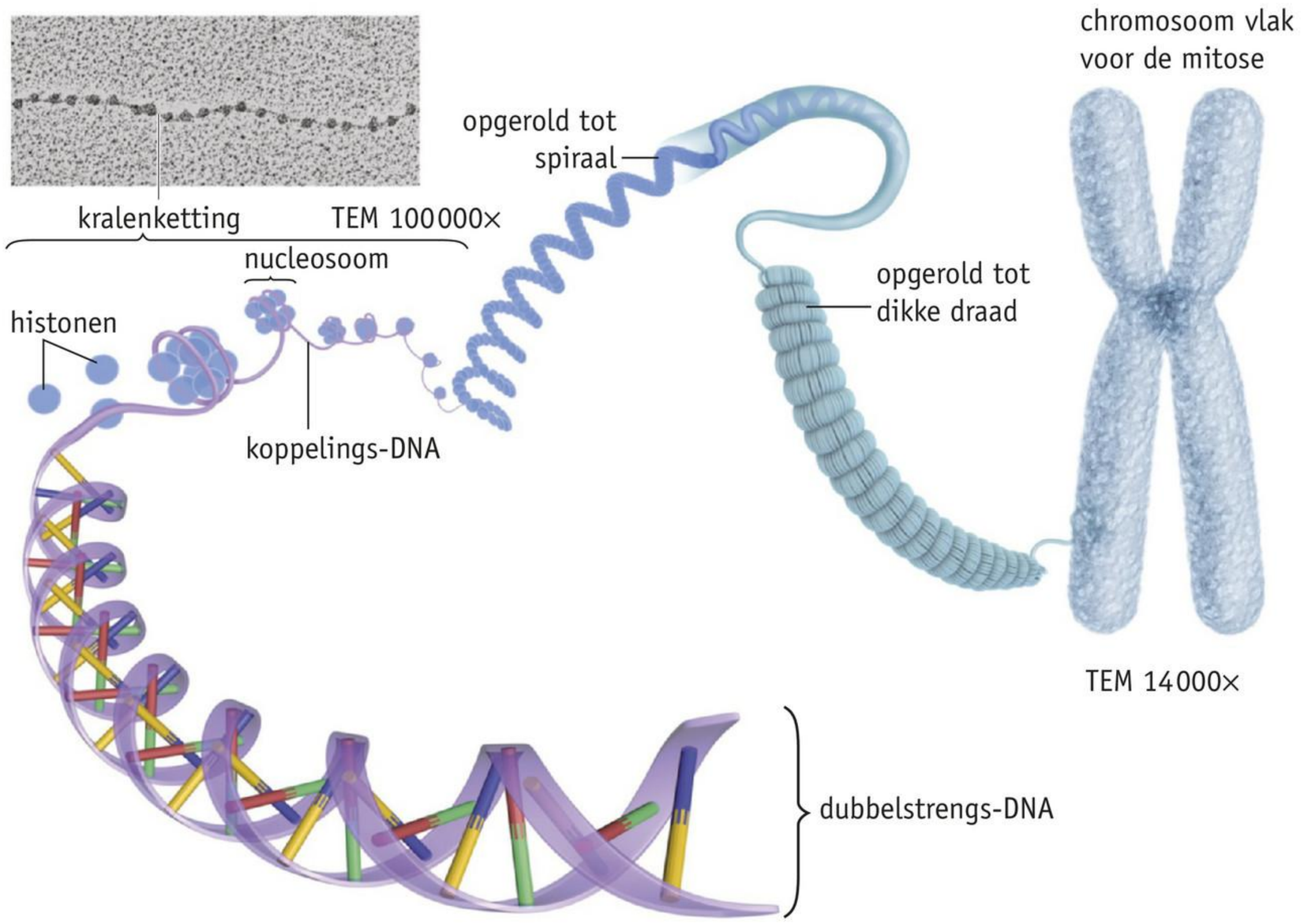
a Welke van deze drie verbindingen kan variëren in structuur tussen verschillende nucleotiden?

b Een enkelstrengs DNA-molecuul kun je als volgt weergeven: 3’-ACCAGTGACT-5’ Noteer op dezelfde manier de streng die aan deze streng kan binden.

CHROMOSOMEN

Bij eukaryoten is het DNA in de celkern verdeeld over verschillende chromosomen. Elk chromosoom bestaat uit een dubbelstrengs DNA-molecuul. Het langste chromosoom van de mens is een DNA-molecuul van ongeveer vijf centimeter. Zo'n groot DNA-molecuul past in een celkern, doordat het rond een aantal eiwitten (**histonen)** is gewikkeld. Het krijgt daardoor een compacte vorm (zie afbeelding 6). Een aantal histonen vormt samen met het eromheen gewikkelde DNA een **nucleosoom**. Zolang een stukje DNA in een nucleosoom ligt opgerold, kan de cel het niet aflezen. Wanneer de cel dat deel van het DNA nodig heeft, kan het nucleosoom verschuiven, waardoor het DNA beschikbaar komt voor de cel. Het DNA tussen twee opeenvolgende nucleosomen noem je koppelings-DNA. Door de afwisseling van koppelings-DNA en nucleosomen krijgt het DNA-molecuul het uiterlijk van een kralenketting (zie afbeelding 6).

■ **Afb. 6** Een DNA-molecuul van een eukaryoot wordt compacter gemaakt.



DNA-SEQUENTIE

De volgorde waarin stikstofbasen in een DNA-molecuul zijn gerangschikt, noem je een **sequentie** (zie afbeelding 7). Deze volgorde bepaalt de genetische informatie die het DNA bevat. Een **gen** is een deel van een chromosoom dat de genetische informatie bevat voor een of meer erfelijke eigenschappen, of voor een deel van een erfelijke eigenschap. Met de DNA-sequentie van een gen kunnen ribosomen in de cel een of meer typen eiwitten maken. Genen bevatten dus een code voor eiwitten.

■ **Afb. 7** Een sequentie van stikstofbasen van een gen.

```
ATCTCTTGGCTCCAGCATCGATGAAGAACGCA
TCATTTAGAGGAAGTAAAAGTCGTAACAAGGT
GAACTGTCAAAACTTTTAACA CGGATCTCTT
TGTTGCTTCGGCGGCGCCCGCAAGGGTGCCCG
GGCCTGCCGTGGCAGATCCCCAACGCCGGGCC
TCTCTTGGCTCCAGCATCGATGAAGAACGCAG
CAGCATCGATGAAGAACGCAGCGAAACGCGAT
CGATACTTCTGAGTGTTCTTAGCGAACTGTCA
CGGATCTCTTGGCTCCAGCATCGATGAAGAAC
ACAACGGATCTCTTGGCTCCAGCATCGATGAA
CGGATCTCTTGGCTCCAGCATCGATGAAGAAC
GATGAAGAACGCAGCGAAACGCGATATGTAAT
```

NIET-CODEREND DNA

Bij sommige eukaryoten bestaat maar een klein deel van het DNA in een cel uit genen. Het overige DNA codeert niet voor eiwitten en wordt daarom **niet-coderend DNA** genoemd. Bij de mens bestaat ongeveer 98,5% van het genoom uit niet-coderend DNA. Ook binnen genen worden stukken coderend DNA afgewisseld met stukken niet-coderend DNA. Na de ontdekking van niet-coderend DNA dachten wetenschappers dat het geen functie had. Later bleek dat delen van het niet-coderend DNA andere functies hebben dan genen. Sommige delen hebben een regulerende functie en beïnvloeden de activiteit van genen of de productie van eiwitten. Andere delen beschermen bijvoorbeeld de uiteinden van chromosomen. Een deel van het niet-coderend DNA bestaat uit repetitief DNA. Dat zijn herhalingen van korte DNA-sequenties. Een ander deel bestaat uit genen die hun functie hebben verloren, zoals bijvoorbeeld een gen voor de aanmaak van eigeel bij zoogdieren.

Opdrachten KENNIS

4 Een levercel en een spiercel in je lichaam hebben verschillende functies.
Geef van elk van de volgende eigenschappen aan of ze verschillen tussen beide cellen of hetzelfde zijn.
1 de DNA-sequenties van het genoom
2 de eiwitten die worden geproduceerd in de cel
3 de posities van de nucleosomen op de chromosomen

5 Het genoom van een menselijke eicel is ongeveer 3 miljard nucleotiden lang.
a Uit hoeveel nucleotiden bestaat het coderende gedeelte van dit genoom ongeveer?
b Het coderende gedeelte van een menselijk gen is gemiddeld 2250 nucleotiden lang.
Hoeveel genen bevat het menselijk genoom van een eicel ongeveer?

6 Waarom behoort het gen voor eigeel bij zoogdieren tot niet-coderend DNA?

Opdrachten INZICHT

7 Een stukje dubbelstrengs DNA bestaat voor 23% uit adenine.
Voor hoeveel procent bestaat dit stukje DNA uit guanine?

8 Bekijk de structuurformule van DNA in *BiNaS* tabel 71C.
a Waarom kan in dubbelstrengs DNA adenine goed binden met thymine, maar niet met cytosine of guanine?
b Voor de stabiliteit van dubbelstrengs DNA is het belangrijk dat de structuur van het molecuul gelijkmatig is.
Waarom kan een binding van adenine met guanine leiden tot instabiliteit van de *structuur* van een DNA-molecuul?

9 Om het genoom van een organisme in kaart te brengen, kun je gebruikmaken van DNA-sequencing. Hierbij wordt de basenvolgorde van het DNA bepaald. Meestal knip je hiervoor meerdere kopieën van het DNA in kleine stukjes, omdat de nauwkeurigheid van DNA-sequencing afneemt bij langere DNA-sequenties. De kleine stukjes DNA-sequentie plak je vervolgens weer aan elkaar door te kijken waar ze (gedeeltelijk) overlappen.
Een resultaat van DNA-sequencing levert de volgende DNA-sequenties van zeven nucleotiden lang op. Het oorspronkelijke DNA-molecuul was zestien nucleotiden lang.
3'-CCGATAC-5'
3'-CCGGGAT-5'
3'-AATCCGA-5'
3'-CGATACC-5'

a Wat was de oorspronkelijke DNA-sequentie?

b Een ander DNA-molecuul ziet er als volgt uit:
3'-CGAAAAAAAAAATGTCACGGCAAAAAAAAATGTACCATAAAAAAAAAAGTG-5'
Je knipt meerdere kopieën van dit molecuul in kleine stukjes van zeven nucleotiden lang. Vervolgens bepaal je de sequentie van de kleine stukjes.
Waarom is het onmogelijk om op basis van de DNA-sequenties van deze stukjes de oorspronkelijke DNA-sequentie vast te stellen?

c Verklaar waarom het meestal moeilijker is om een genoom met DNA-sequencing in kaart te brengen als het genoom veel niet-coderend DNA bevat.

10 De axolotl (zie afbeelding 8) is een salamander die voorkomt in Mexico. Veel genen van axolotls en mensen hebben dezelfde functies. Bij deze genen is er meestal een sterke overeenkomst in DNA-sequenties tussen het gen van de axolotl en het gen van de mens.

a Geef hiervoor een verklaring.

b Het genoom van de axolotl is meer dan tien keer zo groot als het genoom van de mens.
Welk deel van het DNA is met name toegenomen bij de axolotl ten opzichte van de mens: het coderende deel of het niet-coderende deel? Leg je antwoord uit.

■ **Afb. 8** Een axolotl.

11 Zoek op internet naar informatie om de volgende opdrachten uit te voeren.

a Noem minstens drie personen die hebben bijgedragen aan de ontdekking van de dubbele helixstructuur van DNA.

b Waarom was de ontdekking van de dubbele helixstructuur van DNA zo belangrijk?

Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf.*

DRIE BIOLOGISCHE OUDERS

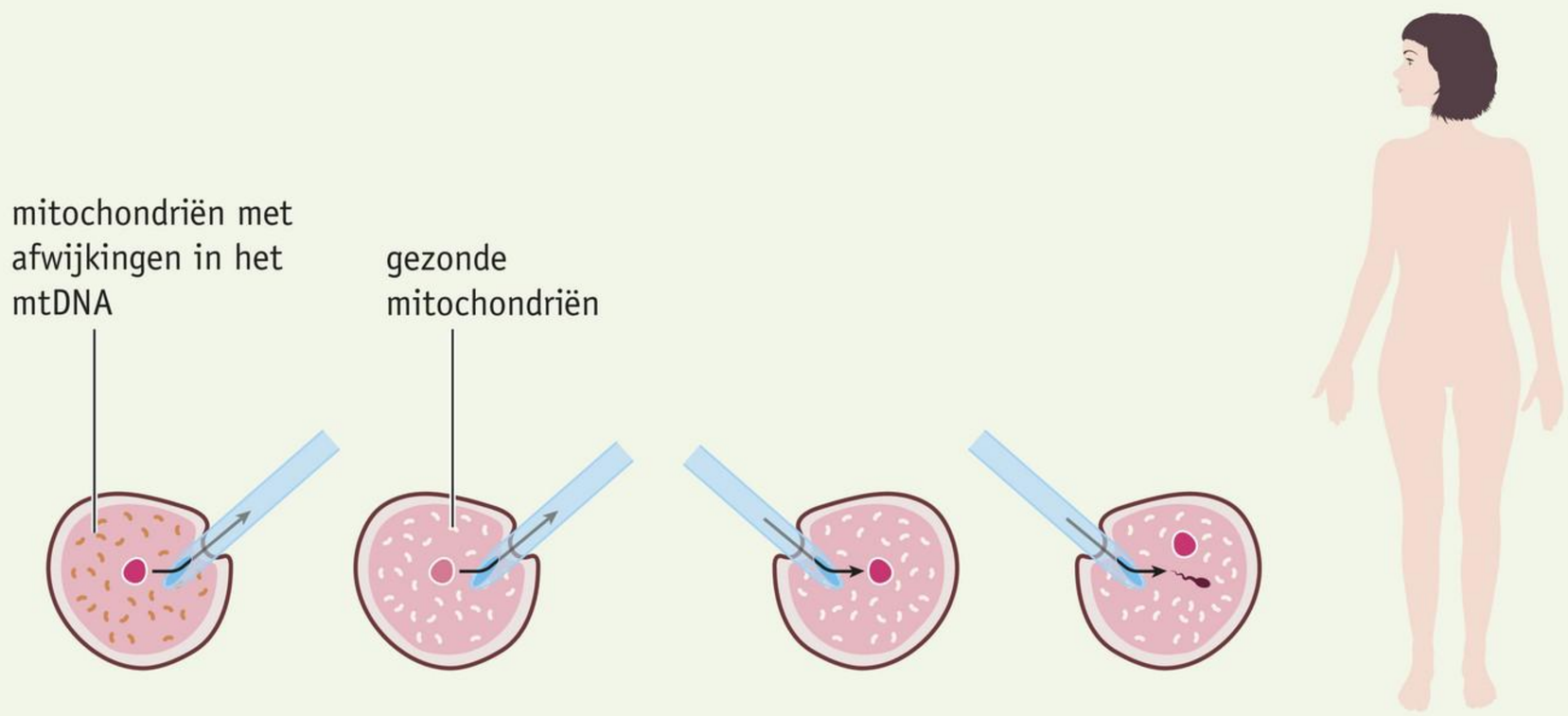
Sommige mensen hebben drie biologische ouders: een vader en twee moeders. Hun kern-DNA is afkomstig van hun vader en een van de moeders. Hun mitochondriaal DNA is afkomstig van de andere moeder. Deze mensen zijn verwekt met een speciale vorm van kunstmatige bevruchting: drie-ouder-ivf.

Drie-ouder-ivf wordt soms toegepast als de moeder van de baby een erfelijke DNA-afwijking (een mutatie) in haar mitochondriën heeft, waardoor ze geen gezonde kinderen kan krijgen. Een tweede vrouw doneert daarom een eicel met gezonde mitochondriën. Laboranten transplanteren vervolgens de kern uit de eicel van de moeder naar de donoreicel. Na bevruchting met een zaadcel wordt de eicel bij de moeder ingebracht (zie afbeelding 9). De bevruchte eicel kan zich dan verder op natuurlijke wijze ontwikkelen.

Mitochondriën bevatten maar een honderdste procent van het erfelijk materiaal van een mens. Het mitochondriaal DNA van een baby is altijd afkomstig van mitochondriën uit de eicel, want de mitochondriën van een zaadcel worden bij de bevruchting meestal niet in een eicel overgebracht. In vrijwel alle organismen met mitochondriën wordt het mitochondriaal DNA door slechts één van de ouders doorgegeven aan het nageslacht (meestal via de eicel). Waarschijnlijk voorkomt dit competitie tussen mitochondriën met verschillend DNA, maar wetenschappers weten nog niet precies waarom dat ongewenst is.

Tegenwoordig wordt de drie-oudertechniek vaker toegepast, maar nog niet in Nederland. Er is nog veel onduidelijkheid over de gevolgen op de lange termijn voor de gezondheid van de baby. Ook zijn er ethische bezwaren tegen het bewerken van het genetisch materiaal van mensen.

■ **Afb. 9** Procedure van drie-ouder-ivf.



Opdrachten

12 **a** Leg uit waarom mitochondriale aandoeningen vaak vermoeidheid veroorzaken.

b Verklaar dat bij het voorkomen van de overerving van mitochondriale aandoeningen alleen de mitochondriën van de moeder worden vervangen en niet die van de vader.

c Volgens artsen gaat een kind dat is verwekt via drie-ouder-ivf niet op alle drie de ouders lijken. Leg dat uit.

d Stel dat er geen schadelijke effecten zijn voor de baby van een drie-ouderschap. Vind jij het verantwoord om de techniek op mensen toe te passen? Onderbouw je mening met een argument.

13 Mitochondriën stammen af van zelfstandig levende prokaryoten. In de loop van de evolutie zijn de voorouderlijke mitochondriën opgenomen door een eencellige voorouder van alle eukaryoten. De eukaryote cel gaf bescherming en voedingsstoffen aan de voorouderlijke mitochondriën, die op hun beurt de eukaryote cel van energie konden voorzien. De symbiose die hieruit ontstond heet endosymbiose.
Verklaar dat het mitochondriaal DNA van een eukaryoot meestal veel minder genen bevat dan een genoom van zelfstandig levende prokaryoten.

2 DNA-REPLICATIE

LEERDOELEN

10.2.1 Je kunt uitleggen hoe DNA-replicatie plaatsvindt.
10.2.2 Je kunt uitleggen hoe de basenvolgorde van DNA kan worden bepaald.
10.2.3 Je kunt uitleggen hoe DNA-analyse kan worden toegepast om verwantschap tussen organismen vast te stellen.

▶ Practicum 1

TAXONOMIE	LEERDOELEN EN OPDRACHTEN		
	10.2.1	**10.2.2**	**10.2.3**
Begrijpen	14, 15, 16, 17, 18	19, 20	21
Toepassen	22, 23	25a, 27a	26ab, 29
Analyseren	24	25b, 27b, 28	26cd

Voordat een cel zich deelt, wordt het DNA in de kern gekopieerd. Het verdubbelde DNA wordt tijdens de celdeling gelijk over de dochtercellen verdeeld. Hoe gaat het kopiëren van een DNA-molecuul in zijn werk?

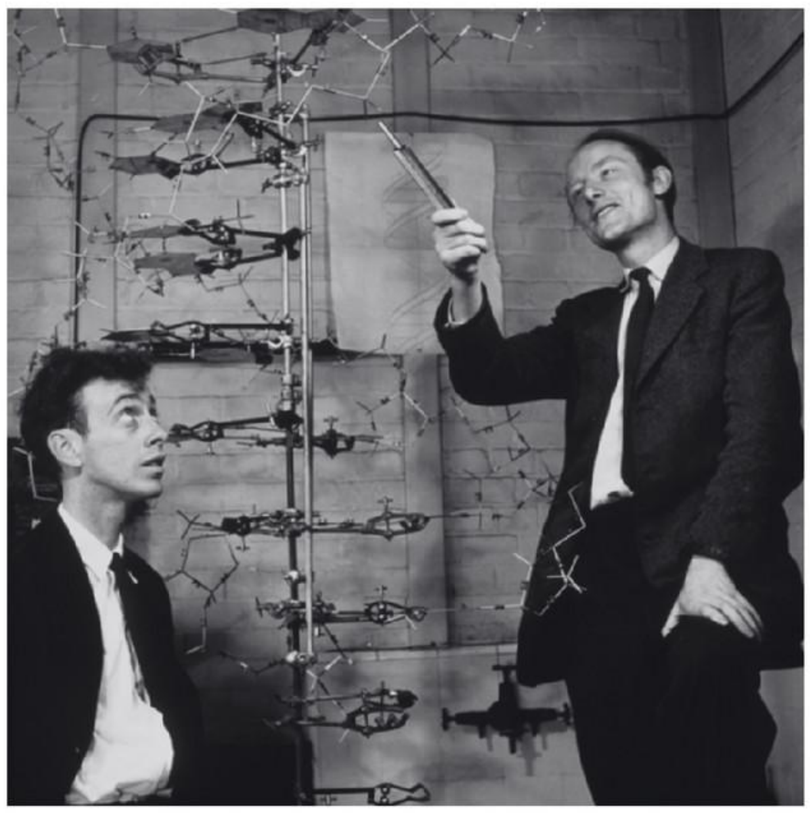
CELCYCLUS (SE)

Cellen doorlopen een cyclus waarbij ze zich delen, groeien, hun DNA kopiëren en zich opnieuw delen. De fase tussen twee celdelingen heet de interfase. Ongeveer halverwege de interfase wordt tijdens de **S-fase** (synthesefase) het DNA in de chromosomen gekopieerd. Dit noem je **DNA-replicatie**. Tijdens de **mitose** (M-fase) vindt de celdeling plaats en worden de kopieën van de chromosomen verdeeld over de dochtercellen. Hierdoor is het genoom in beide dochtercellen gelijk (zie *BiNaS* tabel 76).

DNA-REPLICATIE (SE)

In 1953 ontdekten James Watson en Francis Crick de dubbele helixstructuur van DNA (zie afbeelding 10). Deze ontdekking verklaarde hoe de sequentie van nucleotiden in dubbelstrengs DNA door de basenparing gemakkelijk kan worden gerepliceerd.

■ **Afb. 10** Watson en Crick met het dubbelstrengs DNA-model.



DNA-replicatie is een proces dat uit meerdere stappen bestaat. In het kort verloopt DNA-replicatie als volgt:

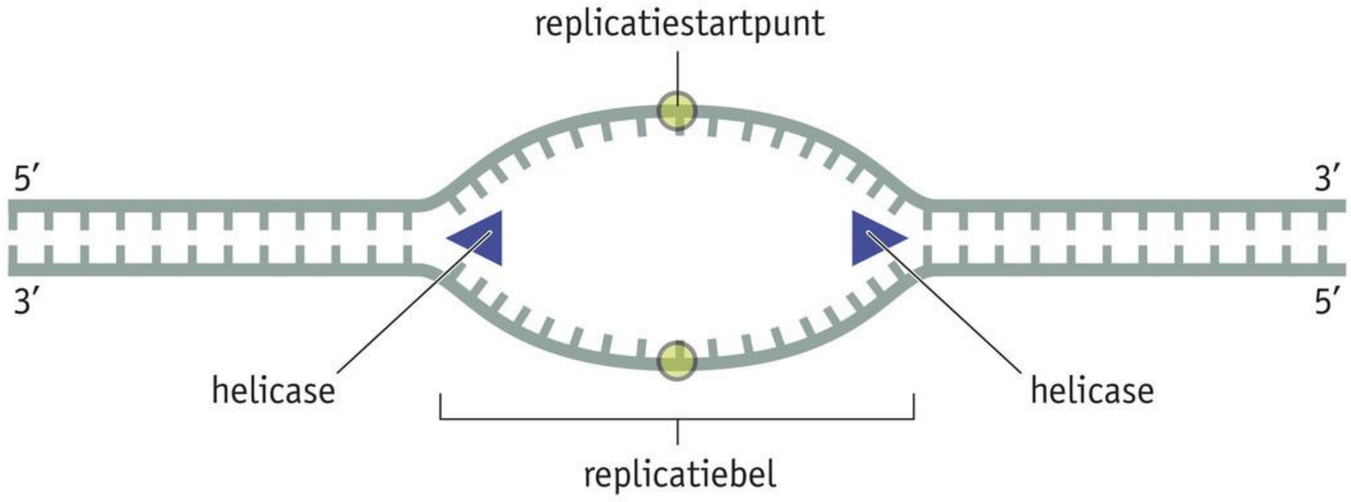
1 De twee DNA-strengen worden van elkaar gescheiden door het enzym helicase.
2 Een **primer** bindt op de plek van het enkelstrengs DNA waar de nieuwe streng moet worden gemaakt.
3 Het enzym **DNA-polymerase** bindt aan de primer en synthetiseert (maakt) een nieuwe streng DNA, waardoor het enkelstrengs DNA weer dubbelstrengs DNA wordt.

Dit proces gebeurt langs beide strengen van het dubbelstrengs DNA-molecuul, dus er ontstaan twee identieke kopieën van het oorspronkelijke DNA-molecuul. Hieronder staan de verschillende stappen van de DNA-replicatie in wat meer detail.

HELICASE VORMT REPLICATIEBEL (SE)

DNA-replicatie begint bij een replicatiestartpunt. In twee richtingen worden de waterstofbruggen tussen de basenparen verbroken door het enzym helicase. De verbroken strengen gaan uit elkaar, waardoor een replicatiebel ontstaat (zie afbeelding 11). Bij eukaryote organismen bevat een DNA-molecuul meerdere replicatiestartpunten. Een DNA-molecuul kan daarmee op meerdere plaatsen tegelijkertijd worden gekopieerd. Een DNA-molecuul van een prokaryoot organisme heeft één replicatiestartpunt.

■ **Afb. 11** Een replicatiebel in een DNA-molecuul.



PRIMER BINDT AAN DNA (SE)

Het maken van de nieuwe streng DNA begint met een primer. Dat is een kort stukje van het nucleïnezuur RNA (zie *BiNaS* tabel 71C). RNA bestaat net als DNA uit nucleotiden, waardoor enkelstrengs RNA via basenparing aan enkelstrengs DNA kan binden. De primer wordt gesynthetiseerd door het enzym primase. De primer is noodzakelijk omdat DNA-polymerase alleen nucleotiden kan vastplakken aan het 3'-uiteinde van een al bestaande streng. De primer is dus een aanhechtingspunt voor DNA-polymerase. De primers worden uiteindelijk verwijderd uit de streng en vervangen door DNA-nucleotiden.

DNA-POLYMERASE MAAKT NIEUW DNA (SE)

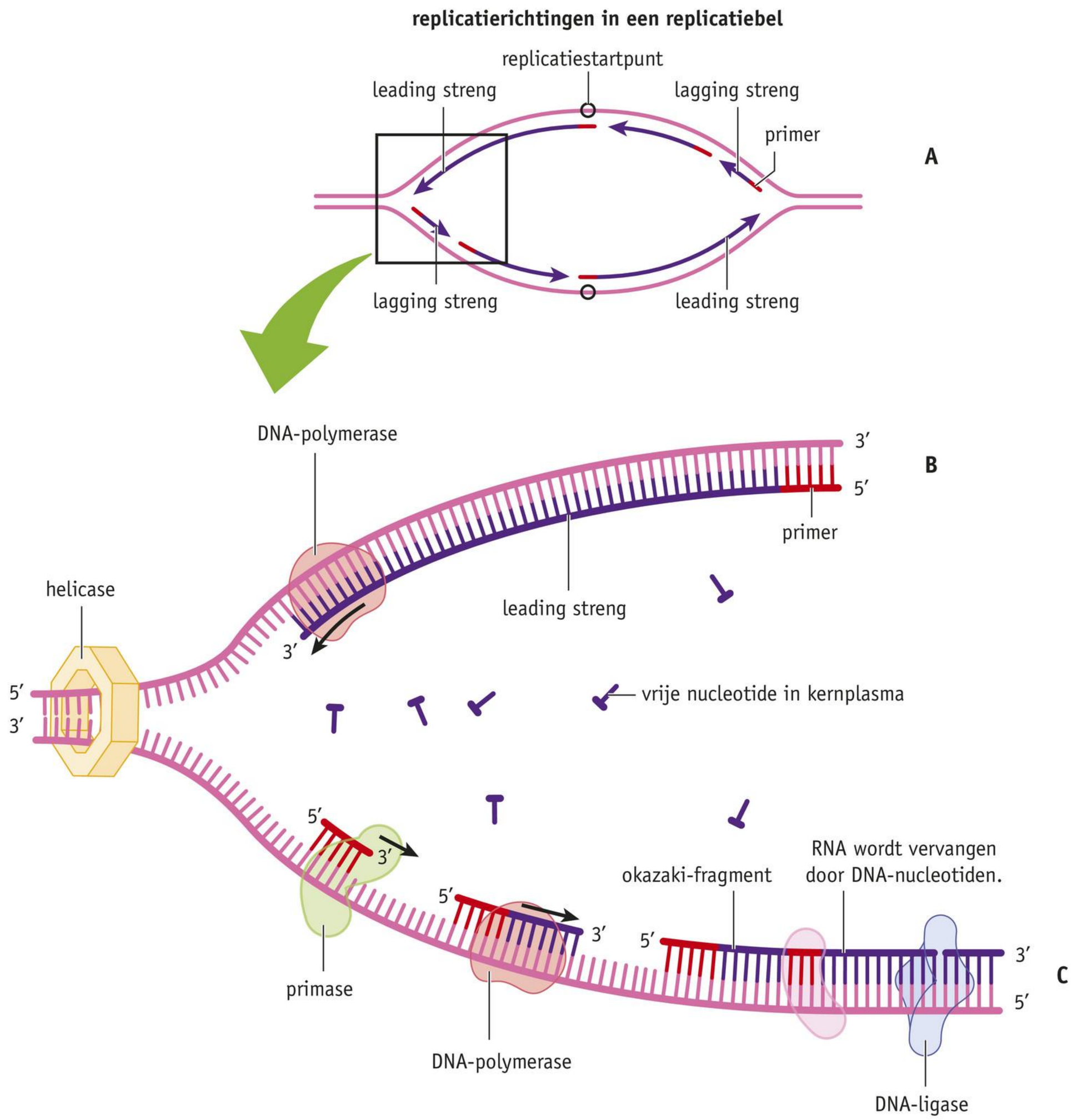
Het enzym DNA-polymerase bindt aan het 3'-uiteinde van de primer en schuift dan langs een gedeelte van het enkelstrengs DNA. In het kernplasma komen **vrije DNA-nucleotiden** voor. DNA-polymerase verbindt deze vrije nucleotiden met de basen in het DNA-molecuul. Steeds bindt adenine (A) met thymine (T), en cytosine (C) met guanine (G). Door de vaste basenparing ontstaat een kopie van het oorspronkelijke, dubbelstrengs DNA-molecuul, opgebouwd uit een oude en een nieuwe streng DNA.

CONSTANTE EN ONDERBROKEN REPLICATIE (SE)

DNA-polymerase leest het enkelstrengs DNA altijd af van het 3'-uiteinde naar het 5'-uiteinde (de afleesrichting). Een nieuwe DNA-streng wordt dus altijd gesynthetiseerd in de richting van het 5'-uiteinde naar het 3'-uiteinde, want de twee strengen in dubbelstrengs DNA lopen in tegenovergestelde richting (zie afbeelding 12).

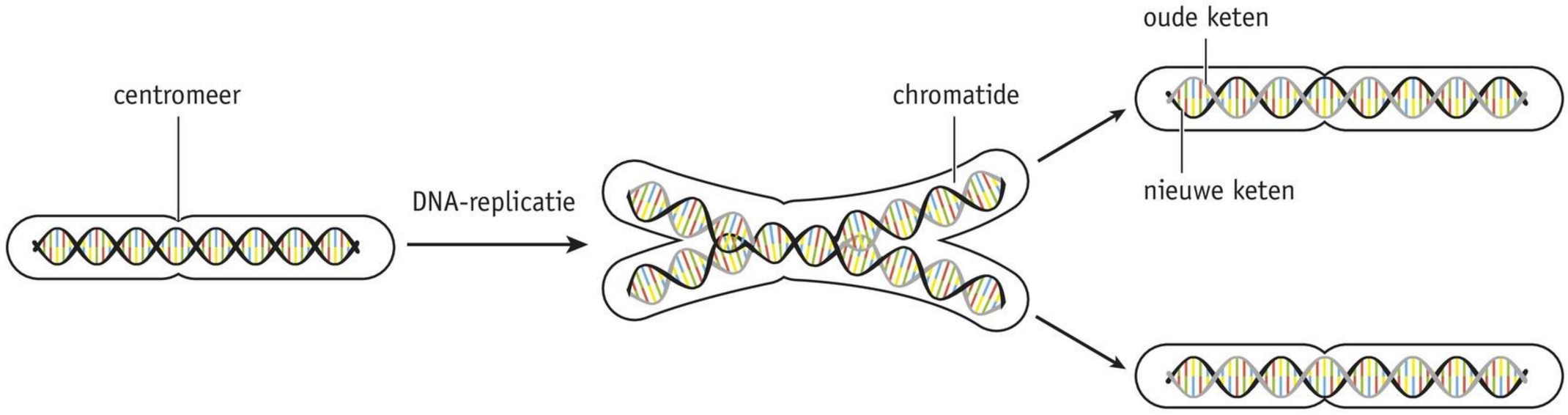
In een replicatiebel wordt het dubbelstrengs DNA in twee richtingen opengeritst (A). In beide richtingen verloopt de DNA-replicatie verschillend langs de twee strengen. Langs de ene streng kan DNA-polymerase vanaf het replicatiestartpunt de beweegrichting van de helicase volgen om de **leading streng** (leidende streng) te synthetiseren (B). Langs de andere streng kan DNA-polymerase steeds maar korte stukjes DNA (**okazaki-fragmenten**) synthetiseren vanaf een primer, doordat dit achterwaarts gebeurt (C). Ten slotte koppelt het enzym DNA-ligase de okazaki-fragmenten aan elkaar, waardoor de **lagging streng** (volgende streng) wordt gevormd (zie ook *BiNaS* tabel 71D).

■ **Afb. 12** DNA-replicatie.



Op plaatsen waar een nieuwe nucleotideketen langs de oude streng is gevormd, neemt het DNA weer de helixstructuur aan. Bij de replicatie van een chromosoom ontstaan zo twee chromatiden. Op de plaats van de centromeer worden de beide chromatiden nog door waterstofbruggen bij elkaar gehouden. Tijdens de mitose gaan de chromatiden uit elkaar en worden ze elk een chromosoom in een dochtercel. Elk DNA-molecuul bestaat dan uit een oude en een nieuwe streng (zie afbeelding 13).

■ **Afb. 13** Na DNA-replicatie bestaat een DNA-molecuul in een dochtercel uit een oude en een nieuwe streng.



Opdrachten KENNIS

14 Bij DNA-replicatie zijn de volgende enzymen betrokken: helicase, primase, DNA-polymerase en DNA-ligase. De functie van een enzym kun je vaak afleiden uit de naam. DNA-polymerase bijvoorbeeld vormt een lange keten (polymeer) van DNA.
Verklaar de namen van helicase en primase aan de hand van hun functie.

15 Waarom is DNA-replicatie afhankelijk van de vaste basenparing (A-T, C-G)?

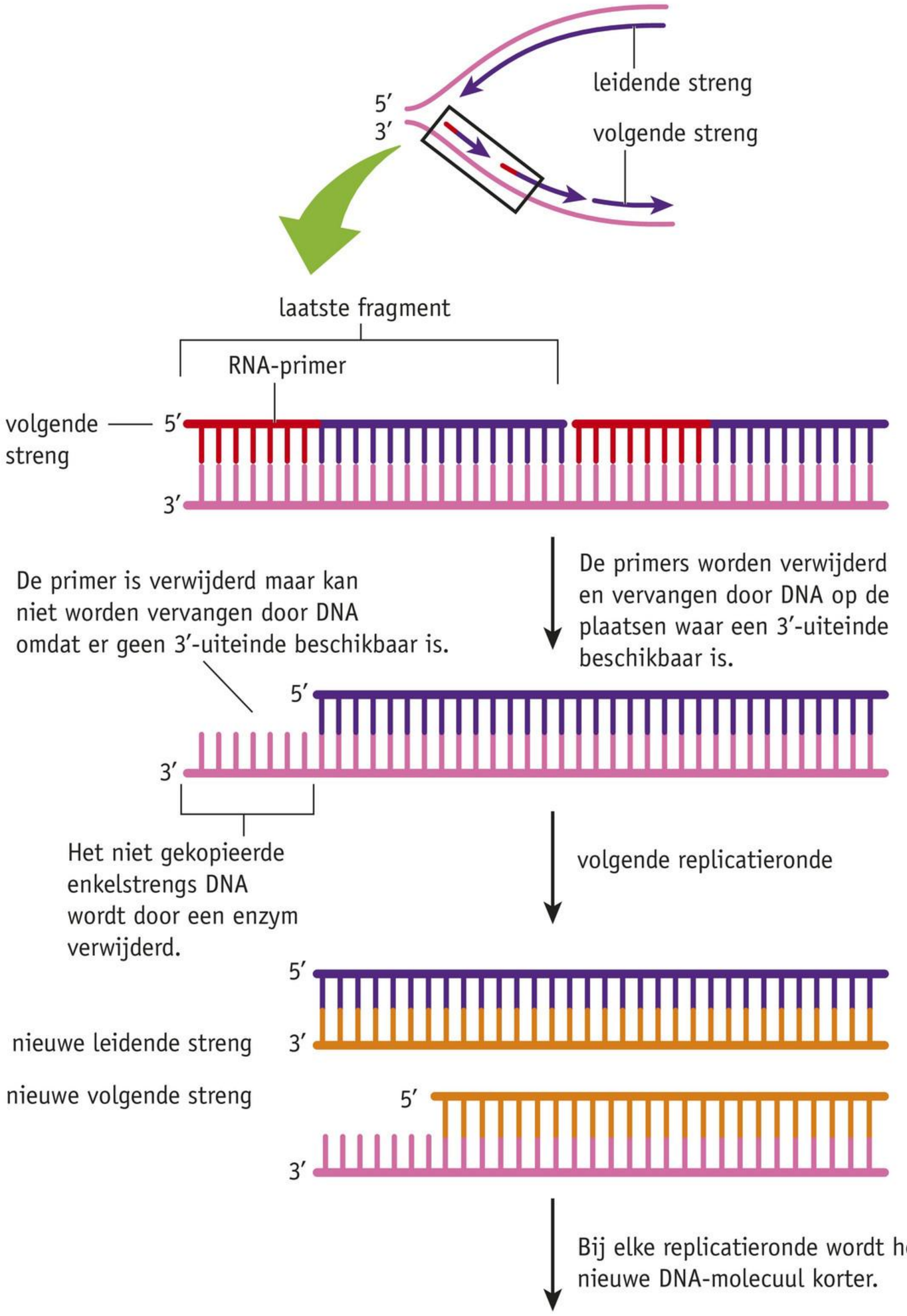
16 De DNA-replicatie bij een van beide strengen verloopt langzamer dan bij de andere streng.
Verklaar dit verschil.

17 DNA-ligase verbindt de okazaki-fragmenten met elkaar.
Welke verbindingen tussen de nucleotiden worden door DNA-ligase gevormd? Gebruik *BiNaS* tabel 71D.

TELOMEREN EN VEROUDERING

Bij de synthese van de volgende streng ontstaat aan het uiteinde van een chromosoom een probleem: doordat de RNA-primer, die aan het uiteinde van de DNA-streng bindt, wordt verwijderd, kan DNA-polymerase het uiteinde van de volgende streng niet repliceren. Er is geen 3'-uiteinde beschikbaar waar het enzym nucleotiden aan kan binden (zie afbeelding 14). Het niet-gekopieerde enkelstrengs DNA van de oude streng wordt door een enzym verwijderd. Zo wordt het DNA-molecuul bij elke celdeling korter.

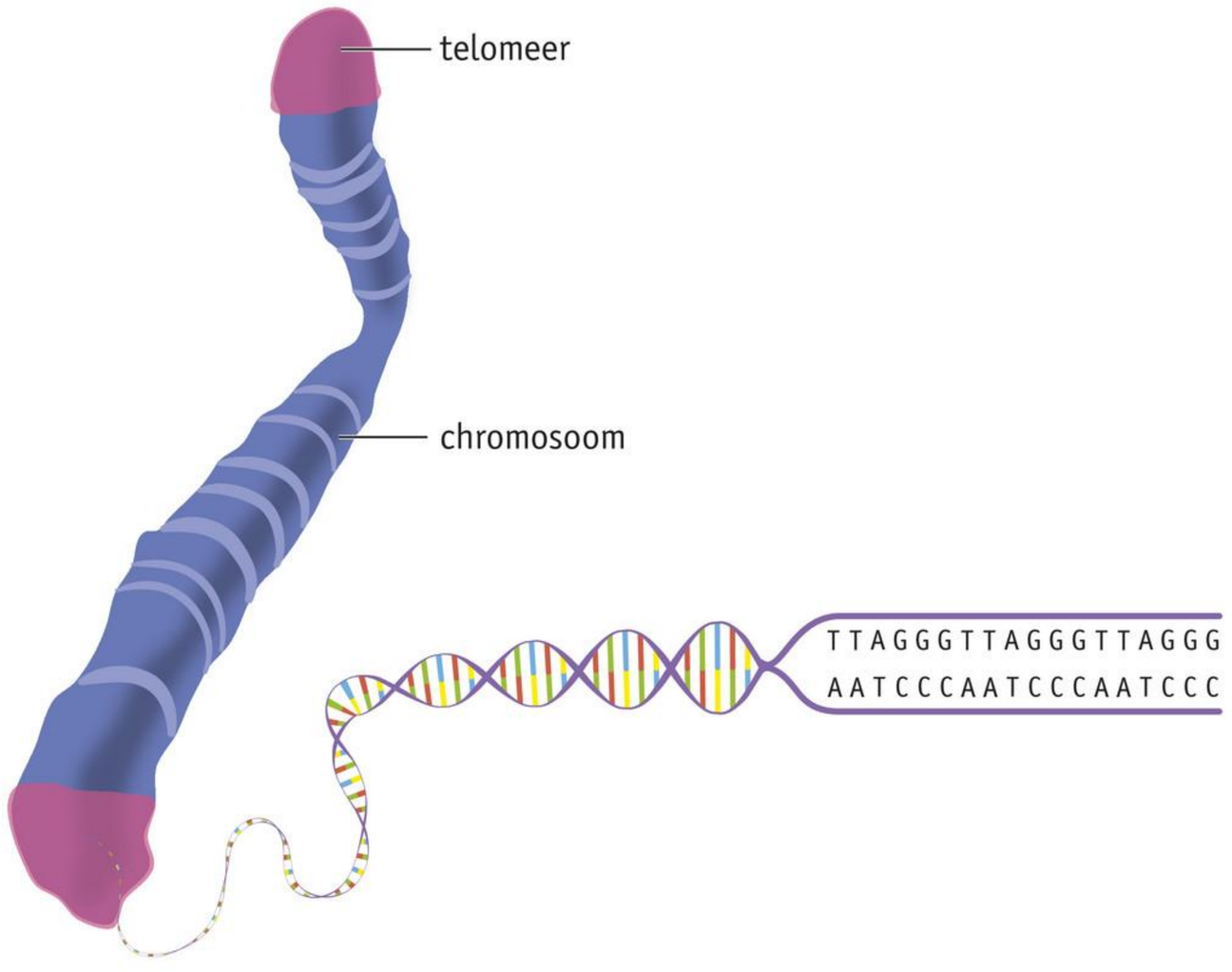
■ **Afb. 14** Een DNA-molecuul wordt bij elke DNA-replicatie korter.



Om te voorkomen dat de genen in het DNA door deze inkorting worden beschadigd, bezitten de uiteinden van chromosomen bij eukaryoten telomeren. Een **telomeer** bestaat uit niet-coderend DNA dat is ingekapseld in beschermende eiwitten. Bij mensen bestaat een telomeer uit repetitief DNA: honderden tot duizenden herhalingen van de nucleotidevolgorde 5'-TTAGGG-3' (zie afbeelding 15). Bij elke celdeling wordt een telomeer korter. Na ongeveer vijftig celdelingen is er nog maar een vijfde deel van het telomeer over en kan een cel zich niet meer delen. De cel ondergaat dan apoptose (geprogrammeerde celdood).

De levensduur van de cellen van een organisme hangt af van de lengte van de telomeren en de snelheid waarmee ze korter worden. Dit is bepalend voor de snelheid van de veroudering van een organisme. Mensen gaan niet dood doordat hun cellen niet meer kunnen delen. Ze sterven aan ziekten of ouderdomskwalen voordat de telomeren te kort worden.

■ **Afb. 15** Telomeren aan de uiteinden van een chromosoom.



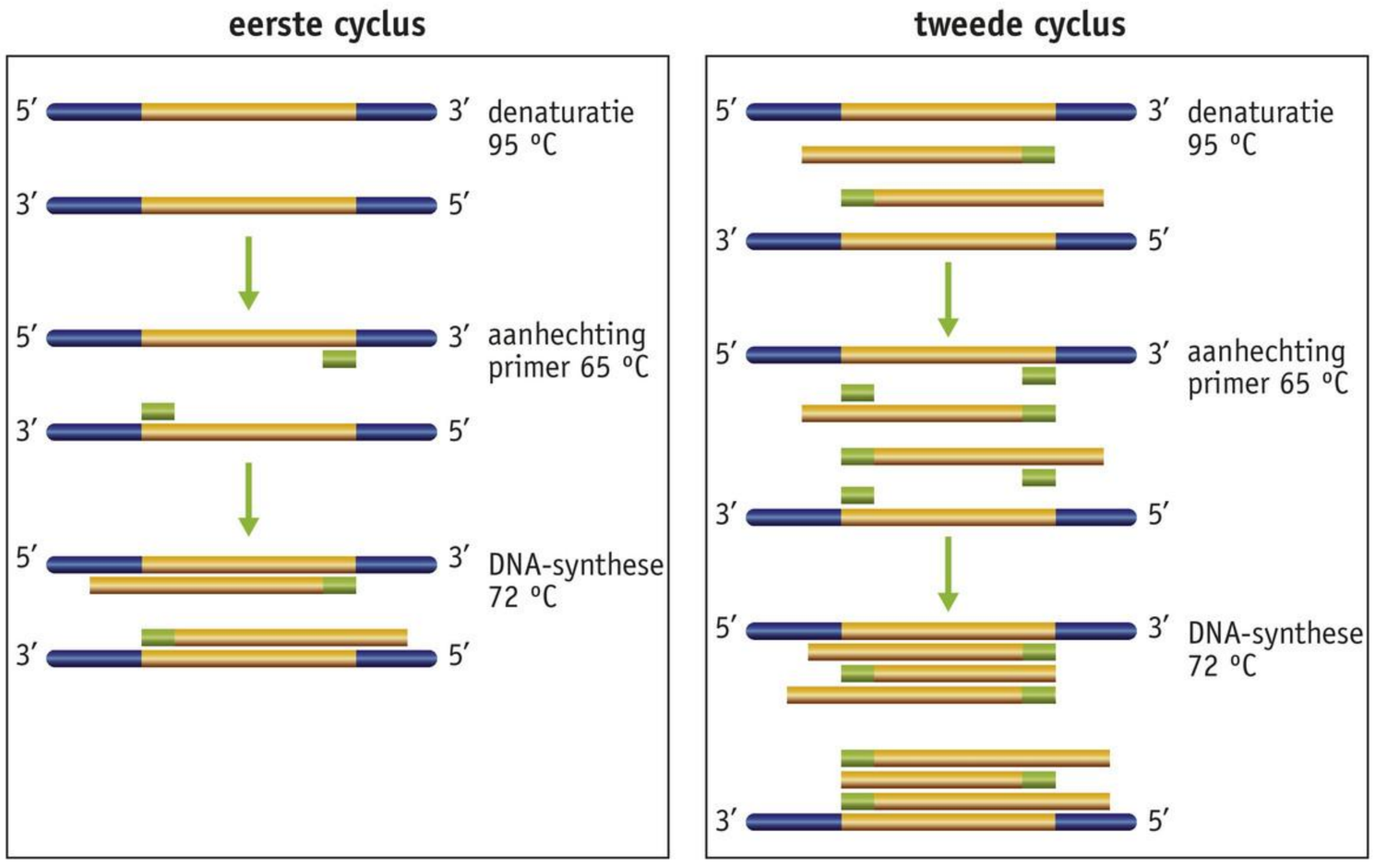
PCR

Het kunstmatig repliceren van DNA buiten de cel is een veelgebruikte techniek in wetenschappelijk en medisch onderzoek. Het DNA dat uit de cellen van een organisme wordt geïsoleerd, is meestal te weinig voor vervolganalyse. Door **PCR** (Polymerase Chain Reaction) kunnen een of meer specifieke gedeelten uit het DNA in een PCR-machine worden gekopieerd tot er genoeg is voor onderzoek. Voor een PCR is naast het geïsoleerde DNA een aantal ingrediënten nodig, waaronder: primers, een hittebestendige DNA-polymerase en vrije DNA-nucleotiden. Een PCR volgt een aantal stappen die de natuurlijke DNA-replicatie nabootsen (zie afbeelding 16 en *BiNaS* tabel 71M3):

1 Dubbelstrengs DNA wordt door verhitting (tot 95 °C) omgezet in enkelstrengs DNA.
2 De temperatuur daalt naar ongeveer 65 °C, waarbij primers goed kunnen binden aan het DNA. Speciaal ontworpen primers binden alleen rond het specifieke deel van het DNA dat moet worden gerepliceerd (bijvoorbeeld een gen).
3 De temperatuur stijgt naar 72 °C. Bij deze temperatuur kan een hittebestendige DNA-polymerase optimaal de nieuwe strengen synthetiseren met behulp van de vrije DNA-nucleotiden.

Tijdens een PCR worden deze drie stappen meestal zo'n dertig keer herhaald, waardoor het DNA exponentieel toeneemt.

■ **Afb. 16** PCR.



SEQUENCEN

Het bepalen van de **basenvolgorde** van het DNA heet **sequencen**. Een stukje DNA waarvan je de nucleotidesequentie wilt bepalen, kopieer je eerst miljoenen malen door middel van PCR. Daarna scheid je de stukjes dubbelstrengs DNA. Voor het bepalen van de nucleotidevolgorde gebruik je de leidende streng. Een methode voor sequencing is een speciale PCR die wordt gevolgd door gelelektroforese.

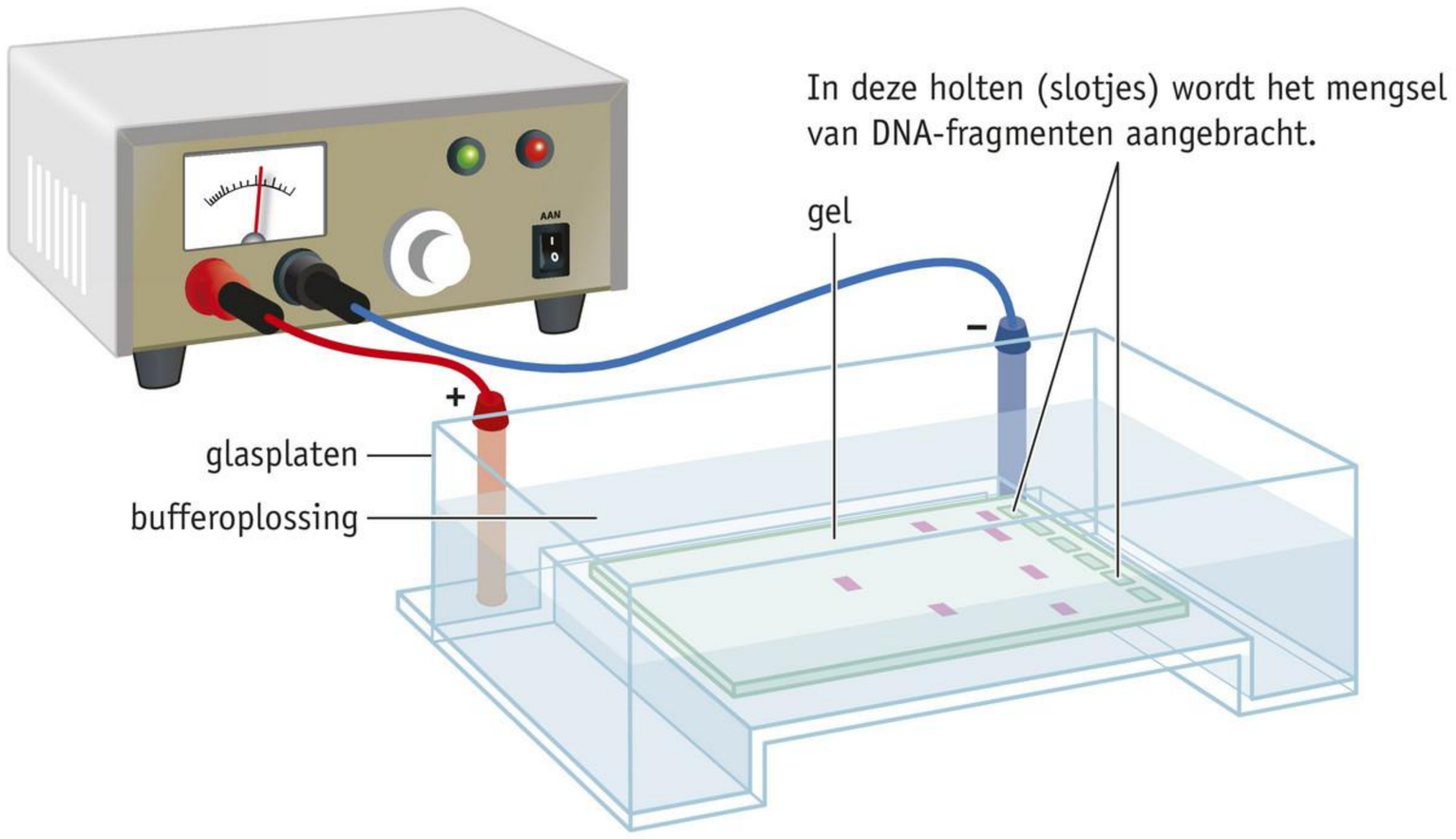
Voor de speciale PCR zijn naast de gebruikelijke DNA-nucleotiden een kleine hoeveelheid didesoxynucleotiden (ddA, ddC, ddG en ddT) nodig. Dit zijn moleculen die op normale nucleotiden lijken, maar geen OH-groep aan het 3'-uiteinde hebben. Hierdoor stopt de DNA-replicatie van een streng nadat er een didesoxynucleotide is ingebouwd. Aan elk van de vier didesoxynucleotiden is bovendien een stof gebonden die in een bepaalde kleur fluoresceert (label).

Er zijn vrij weinig didesoxynucleotiden in vergelijking met gewone nucleotiden in de PCR aanwezig. De kans is dus relatief klein dat een didesoxynucleotide wordt ingebouwd in een DNA-streng en daarmee de replicatie van die streng stopt. Bij sommige strengen gebeurt dit door toeval toch vrij snel, en deze strengen blijven dus kort. Bij andere strengen gebeurt het later en deze strengen worden langer. Zo ontstaan DNA-fragmenten van alle mogelijke lengten met een gelabeld didesoxynucleotide aan het eind. De PCR wordt voor elk type didesoxynucleotide afzonderlijk uitgevoerd.

GELELEKTROFORESE

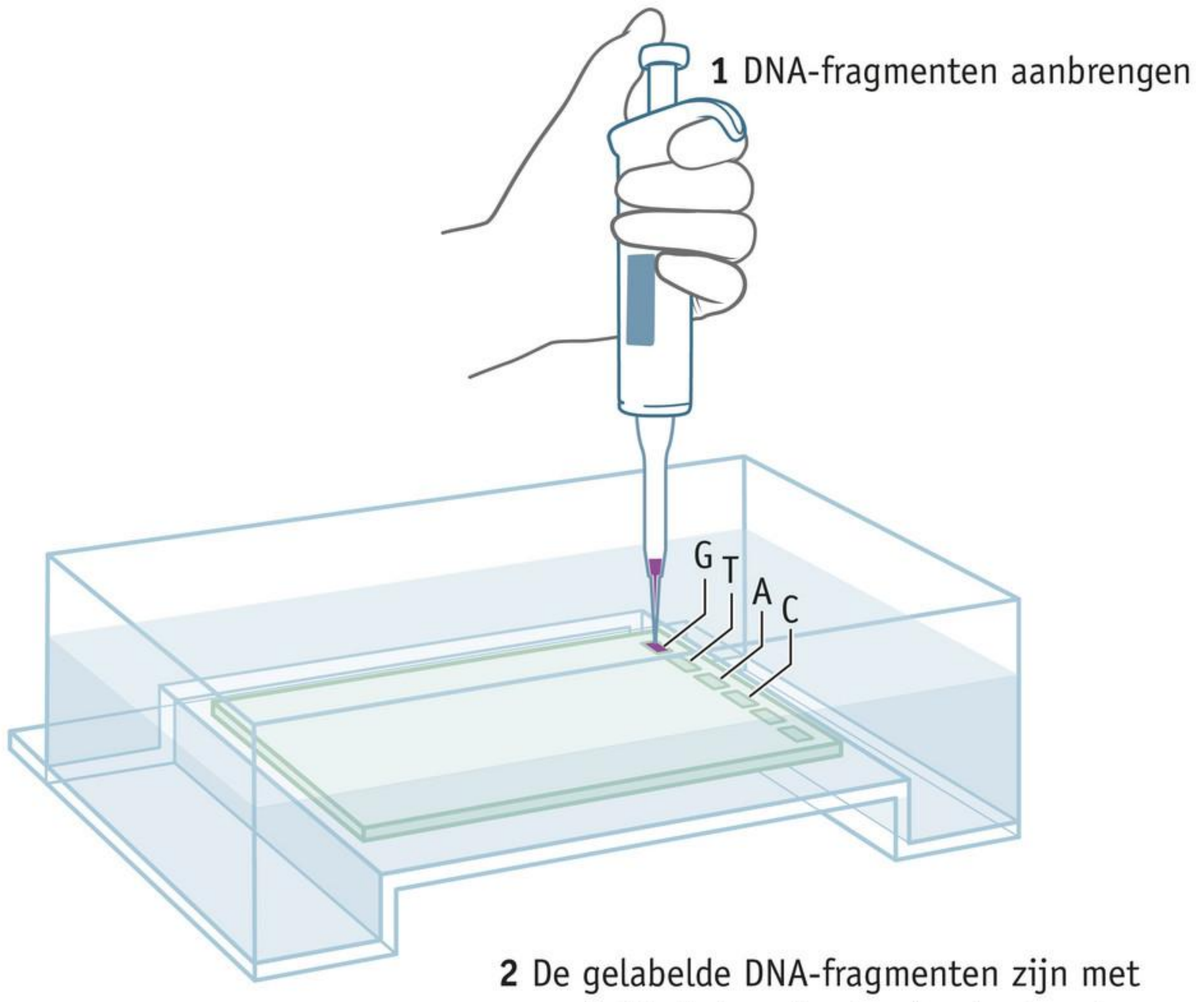
Na de PCR zijn er veel gelabelde DNA-fragmenten ontstaan die in lengte verschillen. Door **gelelektroforese** kun je deze DNA-fragmenten, onder invloed van elektrische spanning, in een gel op lengte scheiden. De gel bestaat uit een netwerk van vezels die een moleculaire zeef vormen. De gel leg je in een bufferoplossing en het mengsel van DNA-fragmenten breng je aan de kant van de negatieve pool van de opstelling aan (zie afbeelding 17).

■ **Afb. 17** Een opstelling voor gelelektroforese.



Zodra je spanning op de gel zet, bewegen de negatief geladen DNA-fragmenten in de gel naar de positieve pool. Hoe kleiner de DNA-fragmenten, hoe sneller ze door de poriën in de gel bewegen. Grote DNA-fragmenten komen niet ver, doordat ze langzamer door de gel bewegen. Na de gelelektroforese zijn de DNA-fragmenten door de fluorescerende labels te zien als bandjes in de gel (zie afbeelding 18) en kun je de volgorde van de nucleotiden van beneden naar boven aflezen. In een laboratorium wordt een machine gebruikt voor de gelelektroforese met een laser en een detector die de kleuren op volgorde afleest.

■ **Afb. 18** Sequencen door gelelektroforese.



3 Doordat de gelabelde DNA-fragmenten steeds één nucleotide in lengte verschillen, kan de nucleotidevolgorde van onder naar boven worden afgelezen.

NIEUWE TECHNIEKEN

Het nadeel van gelelektroforese is dat het één voor één aflezen van de nucleotiden veel tijd kost. Het aflezen van de drie miljard basenparen van het eerste volledige genoom van een mens met deze methode duurde dertien jaar. Nieuwe technieken zijn goedkoper en veel sneller. Het sequencen van een genoom van een mens kan nu in één dag. Deze technieken zijn ook in staat grotere stukken DNA tegelijkertijd te sequencen en zijn dus geschikter voor het ontrafelen van hele genomen. Het resultaat analyseren en interpreteren neemt wel veel tijd in beslag.

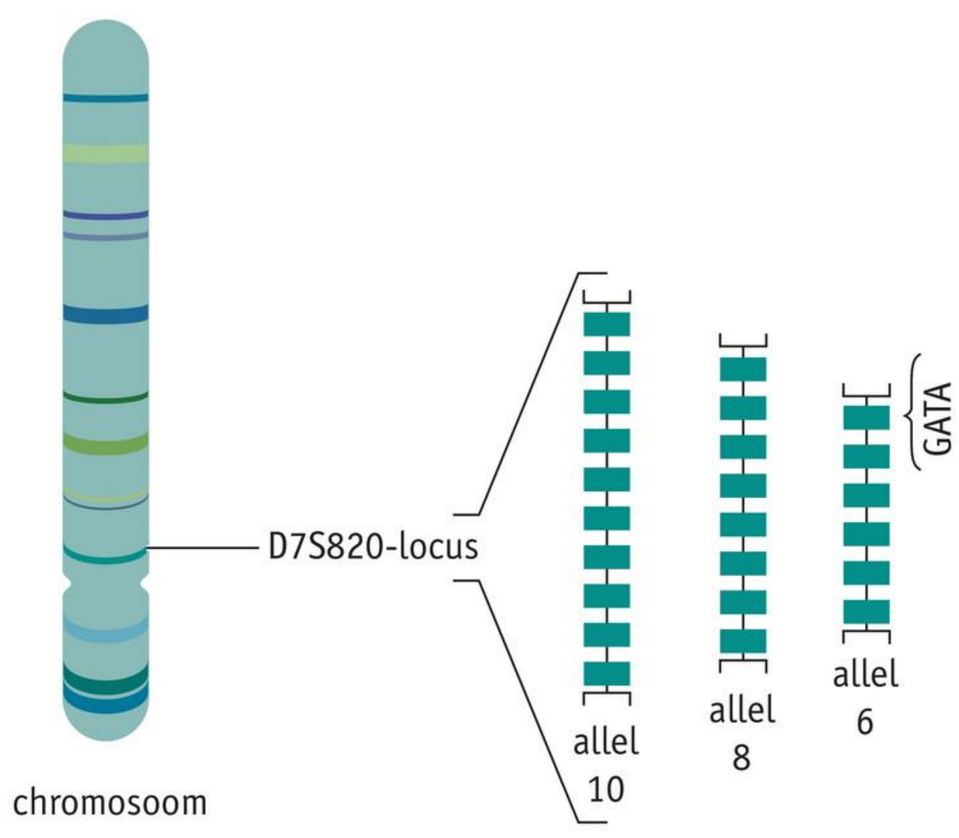
De variatie in een DNA-sequentie kan bijvoorbeeld informatie geven over verwantschap, het risico om bepaalde lichamelijke of geestelijke ziekten te ontwikkelen, de reactie op bepaalde medicijnen en het al of niet voorkomen van erfelijke ziekten bij een persoon.

DNA-FINGERPRINTING EN RESTRICTIE-ENZYMEN

Een veelvoorkomend DNA-onderzoek is het vergelijken van de sequenties van DNA-moleculen. Overeenkomsten in het DNA kunnen wijzen op verwantschap tussen twee individuen. Ook heeft ieder individu unieke DNA-sequenties waaraan je iemand kunt identificeren. Bij het vergelijken van DNA-sequenties is het belangrijk dat je dezelfde delen van het DNA met elkaar vergelijkt, bijvoorbeeld hetzelfde gen, of een stuk niet-coderend DNA op dezelfde positie in het chromosoom. Een sequentie die bij verschillende individuen op dezelfde plek in het DNA zit, noem je een locus (meervoud: loci). Allelen zijn variaties van sequenties op een locus (zoals de allelen van een bepaald gen).

In niet-coderend DNA bevinden zich bepaalde loci die bestaan uit repetitief DNA, zoals CACACA of GATAGATAGATA. Ze zijn voor elke persoon uniek, want het aantal herhalingen in repetitief DNA verschilt van persoon tot persoon. Voor een bepaalde locus met repetitief DNA (met de naam D7S820) bestaan verschillende allelen (zie afbeelding 19). Er bestaat een allel met zes herhalingen (*repeats*), een allel met acht herhalingen en een allel met tien herhalingen voor deze locus. De allelen nummer je naar het aantal herhalingen. Allel 10 heeft dus tien herhalingen. Chromosomen komen in lichaamscellen in paren voor en dus heeft een persoon per locus twee allelen. Deze allelen kunnen hetzelfde zijn, bijvoorbeeld elk chromosoom heeft allel 8 op locus D7S820. De allelen kunnen ook verschillen. Doordat elk mens één chromosoom van zijn moeder en één van zijn vader erft, levert deze combinatie een uniek patroon van repetitief DNA op. Je noemt een DNA-profiel daarom ook wel een **DNA-fingerprint**. Met behulp van een DNA-profiel is het mogelijk een persoon te identificeren.

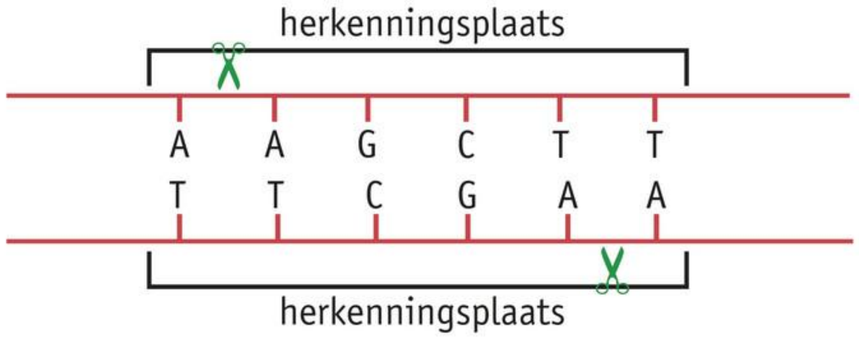
■ **Afb. 19** Een chromosoom met een locus voor repetitief DNA en de mogelijke allelen.



Voor het bepalen van een DNA-profiel onderzoek je beide allelen van minimaal tien onafhankelijk overervende loci met repetitief DNA. Om het geïsoleerde DNA te kunnen analyseren, vermeerder je het eerst door PCR. Daarna knip je de loci met herhalingen uit het DNA. Dat gebeurt met behulp van **restrictie-enzymen** die afkomstig zijn uit bacteriën.

Restrictie-enzymen herkennen een specifieke nucleotidesequentie van vier tot acht nucleotiden in het DNA en knippen het DNA op die plaats door. In laboratoria worden verschillende restrictie-enzymen gebruikt, die elk een specifieke nucleotidesequentie in het DNA herkennen. Bij veel restrictie-enzymen zijn de herkenningsplaatsen in beide ketens van een DNA-molecuul elkaars spiegelbeeld (zie afbeelding 20).

■ **Afb. 20** De werking van veel restrictie-enzymen.



1 De herkenningsplaatsen in beide ketens van een DNA-molecuul zijn elkaars spiegelbeeld.

2 De fragmenten hebben aan de uiteinden enkelstrengs DNA-ketens.

De knipplaatsen rond de loci liggen op verschillende afstanden van elkaar, afhankelijk van het aantal herhalingen in elke locus. Hierdoor krijgen de DNA-fragmenten na het knippen een verschillende lengte. Je kunt ze door gelelektroforese van elkaar scheiden. Dat levert een uniek bandenpatroon op. Door met behulp van hetzelfde specifieke restrictie-enzym van dezelfde loci DNA-profielen te maken van het DNA van andere personen of van DNA dat is gevonden op de plaats van een misdrijf, kun je DNA-profielen met elkaar vergelijken.

Opdrachten KENNIS

18 In afbeelding 14 zie je hoe een DNA-molecuul bij de DNA-replicatie aan één kant korter wordt.
Leg uit waarom bij een chromatide de telomeren aan beide kanten korter worden.

19 Welke verbindingen worden verbroken tijdens de eerste stap van PCR?

20 DNA-replicatie stopt bij PCR wanneer een didesoxynucleotide aan de DNA-keten wordt toegevoegd.
Leg uit waardoor de replicatie dan stopt.

21 Op de plaats van een misdrijf is sperma aangetroffen. Een forensisch rechercheur maakt hiermee het DNA-profiel van de verdachte.
Kan de rechercheur in het spermaspoor twee verschillende allelen van één locus aantreffen? Leg je antwoord uit.

Opdrachten INZICHT

22 Wanneer er bij een controle tijdens de celcyclus blijkt dat telomeren onvoldoende lengte hebben, wordt de celcyclus onderbroken en stopt de cel voorgoed met delen. In welke fase van de celcyclus bevindt een dergelijke cel zich? Gebruik bij deze opdracht *BiNaS* tabel 76A.

23 Bij de bacterie *Escherichia coli* (*E. coli*) bedraagt de replicatiesnelheid langs één streng van een DNA-molecuul duizend nucleotiden per seconde. Het circulair DNA van deze bacterie bevat zo'n vijf miljoen basenparen. De DNA-replicatie verloopt in twee richtingen vanaf één replicatiestartpunt.

a Hoeveel minuten zijn er nodig voor de replicatie van dit chromosoom?

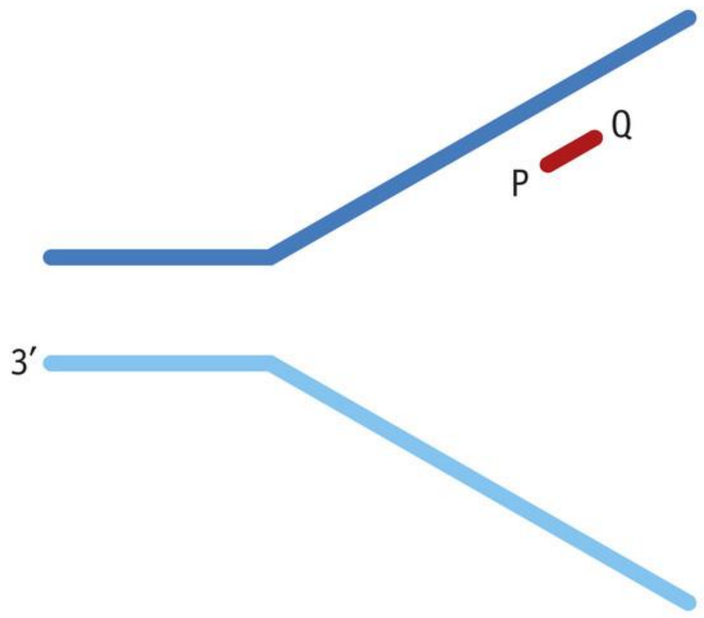
b Het genoom van de fruitvlieg *Drosophila melanogaster* bestaat uit 120 miljoen basenparen. Dat is bijna 24× zoveel als dat van *E. coli*. Toch duurt de replicatie tijdens de S-fase maar acht minuten.
Hoe kan de replicatie zoveel sneller verlopen?

24 In afbeelding 21 is een helft van een replicatiebel (een zogeheten replicatievork) schematisch weergegeven. Er is een primer aan een van de strengen gebonden. Aan deze primer kan een DNA-polymerase koppelen voor de synthese van een nieuwe DNA-streng.

a Aan welke kant van de primer kan de DNA-polymerase koppelen, P of Q?

b Welke streng zal de DNA-polymerase vanaf deze primer synthetiseren, de leading of de lagging streng? Verklaar je antwoord.

■ **Afb. 21** Een replicatievork.

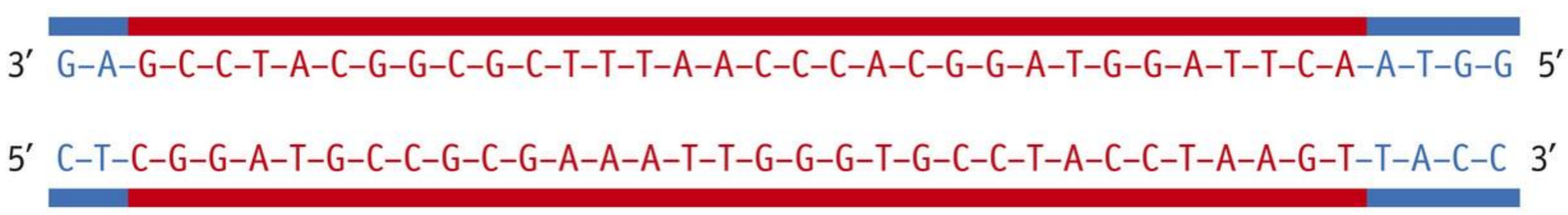


25 Uit het dubbelstrengs DNA van afbeelding 22 moet het rode gedeelte worden vermeerderd door PCR.

a Noteer de nucleotidevolgorde van de primers die nodig zijn voor PCR. Ga ervan uit dat ze uit drie nucleotiden bestaan. Noteer de volgorde van 5' naar 3'.

b In werkelijkheid is de ideale lengte van een primer voor PCR 18 tot 22 nucleotiden lang.
Waardoor is een primer die uit drie nucleotiden bestaat, niet geschikt voor PCR?

■ **Afb. 22** Een stuk dubbelstrengs DNA.



26 Een onderzoeker vergelijkt de samenstelling van het DNA van twee verschillende allelen. Hij gebruikt daarvoor een restrictie-enzym dat de bindingen verbreekt tussen de CC-nucleotiden van een CCGG-stuk in een DNA-molecuul.
In afbeelding 23 is schematisch een gedeelte van een DNA-molecuul weergegeven. Dit gedeelte is uniek voor het dominante allel (A).
Alleen de relevante stikstofbasen zijn met letters aangegeven, de naastliggende gedeelten zijn met stippellijnen aangeduid. Hoe langer de stippellijn, hoe groter het fragment is. Het restrictie-enzym verdeelt dit gedeelte van het DNA-molecuul in de vier fragmenten W, X, Y en Z. Het mengsel van deze DNA-fragmenten is afkomstig van persoon P die homozygoot is voor het dominante allel (AA). Gelelektroforese leidt tot het patroon zoals is weergegeven in afbeelding 24. Fragmenten W, X, Y en Z worden weergegeven door band 1, 2, 3 en 4.

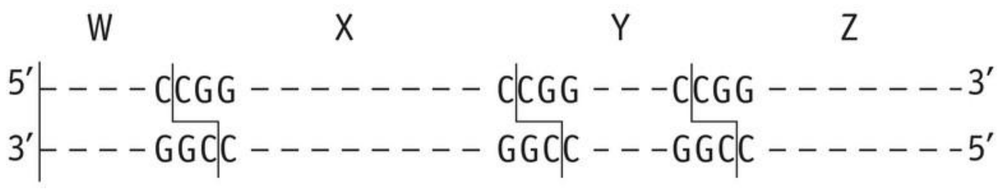
a Noteer onder elkaar de nummers van de banden (1 tot en met 4). Zet achter elk cijfer de letter (W, X, Y, Z) van het bijbehorende fragment.

b In afbeelding 25 is schematisch het recessieve allel a van hetzelfde gen weergegeven. Persoon Q is homozygoot voor het recessieve allel (aa).
Neem afbeelding 25 over en teken op welke plaats(en) het restrictie-enzym dit DNA-molecuul in fragmenten verdeelt. Teken dit op dezelfde manier als in afbeelding 25.

c Geef ook aan hoeveel banden zichtbaar zijn na gelelektroforese van een mengsel van fragmenten van dit DNA op de gel.

d Persoon R is heterozygoot (Aa). Nadat het DNA is geknipt, worden de fragmenten door gelelektroforese gescheiden.
Hoeveel banden zijn er in de gel zichtbaar? Leg je antwoord uit.

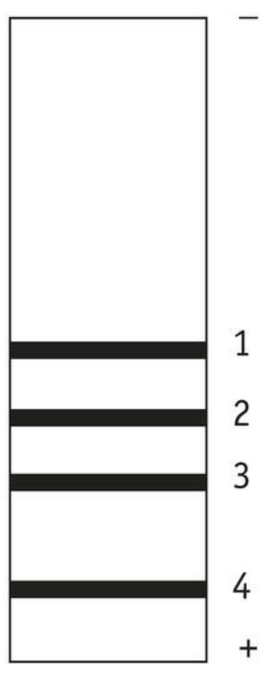
■ **Afb. 23** Knipplaatsen in een DNA-molecuul.



Legenda:

= plaats waar het restrictie-enzym de bindingen knipt

■ **Afb. 24** Resultaat van de gelelektroforese.



■ **Afb. 25** Allel a.

5′ – – – – – – – – – – – – – – – – CCGG – – – CCGG – – – – – – – – 3′
3′ – – – – – – – – – – – – – – – – GGCC – – – GGCC – – – – – – – – 5′

Ga naar de *Flitskaarten* en *Test jezelf.*

Context Wetenschap

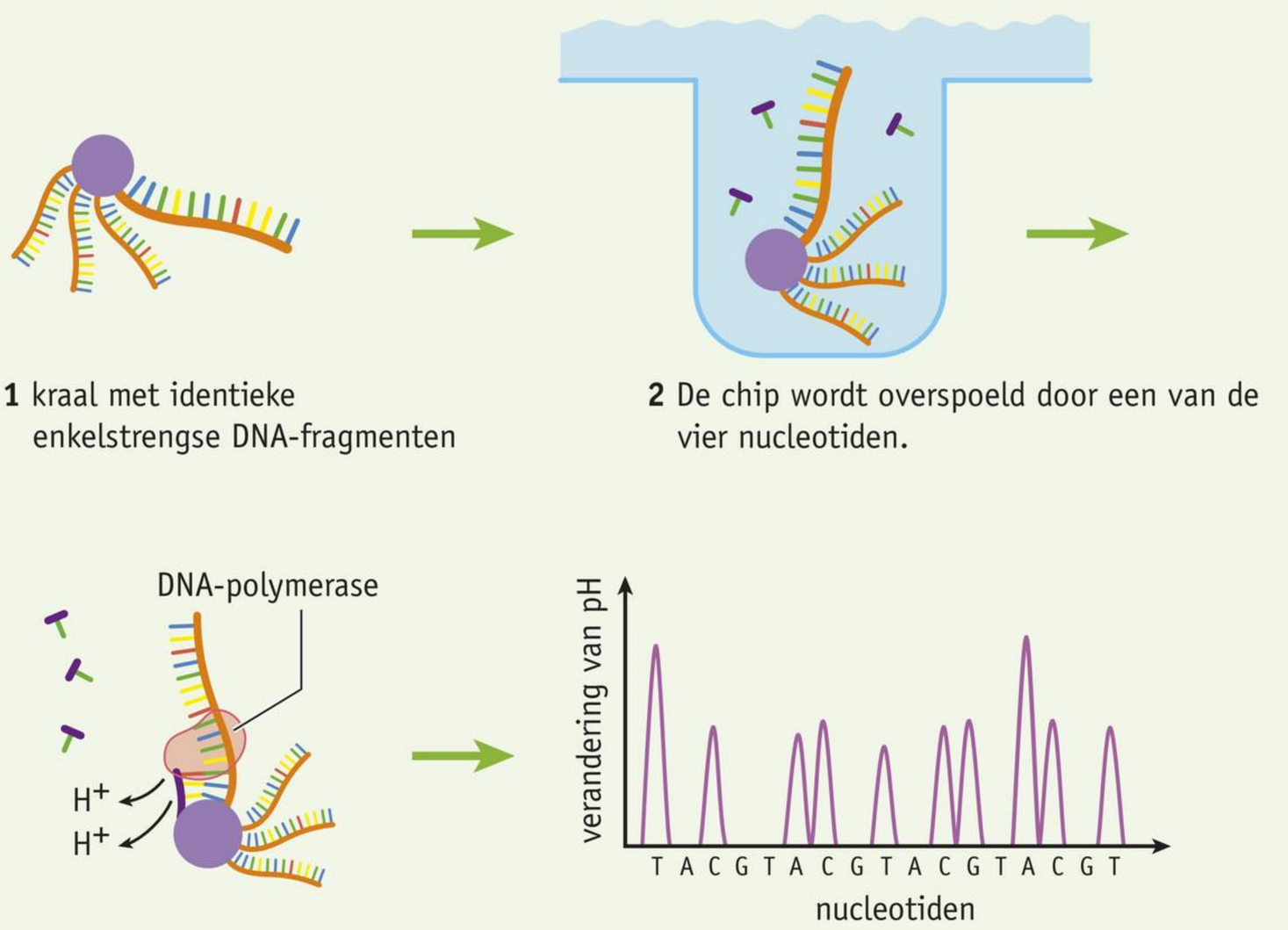
WHOLE GENOME SEQUENCING

De afgelopen twintig jaar is er een technologische revolutie geweest in het sequencen van complete genomen (*whole genome sequencing*, afgekort WGS). Niet alleen is het tegenwoordig mogelijk om razendsnel een compleet menselijk genoom in kaart te brengen, het kost ook maar een paar honderd euro.

Er zijn veel verschillende technieken die je kunt gebruiken om genomen te sequencen, zoals *ion proton sequencing*. Bij deze methode wordt enkelstrengs DNA in fragmenten van tweehonderd basenparen geknipt. Een fragment wordt op een kraal geplaatst (zie afbeelding 26) en gekopieerd door PCR totdat de kraal is bedekt met identieke fragmenten. De kralen worden in putjes op een chip gelegd en overspoeld met een van de nucleotiden (dATP, dCTP, dGTP of dTTP) en DNA-polymerase. Elke keer dat er een nucleotide wordt ingebouwd langs de gekopieerde fragmenten op de kraal, komt er een H^+-ion vrij. Dat verandert de pH van de oplossing in het putje (en dus het aantal positief geladen waterstofionen). Het spanningsverschil dat daardoor optreedt wordt gemeten. Elke vijftien seconden wordt het proces met een ander nucleotide herhaald. Als een nucleotide niet complementair is aan een nucleotide in het fragment op de kraal, wordt het niet ingebouwd en komt er geen H^+-ion vrij.

Wanneer twee dezelfde nucleotiden in het DNA-fragment naast elkaar voorkomen, worden er ook twee nucleotiden ingebouwd. Dan komen er twee H^+-ionen vrij, waardoor het spanningsverschil verdubbelt. Dit proces gebeurt tegelijkertijd in miljoenen putjes in de chip.

■ **Afb. 26** De werking van *ion proton sequencing*.



1 kraal met identieke enkelstrengse DNA-fragmenten

2 De chip wordt overspoeld door een van de vier nucleotiden.

3 Een H^+-ion komt vrij bij elke ingebouwde nucleotide.

4 resultaat van de sequencing

Opdrachten

27 Op de *x*-as van de grafiek in afbeelding 26.4 zijn vier verschillende soorten nucleotiden uitgezet.

a Waardoor staan ze in deze volgorde onder de *x*-as?

b Wat is de nucleotidesequentie die de *ion proton sequencer* heeft afgelezen? Leg uit hoe je de afbeelding hebt afgelezen.

28 Elk DNA-fragment wordt meerdere keren gerepliceerd, zodat een kraal met identieke fragmenten is bedekt. Dit gebeurt onder andere omdat DNA-polymerase soms de verkeerde nucleotide op een fragment inbouwt.
Waarom helpt het sequencen van een grote hoeveelheid identieke fragmenten om zulke inbouwfoutjes te herkennen?

29 Wanneer je besluit om je hele genoom te laten sequencen, levert dit persoonlijke informatie op. Het is verstandig vooraf goed te overwegen of je deze informatie wilt weten.

a Welke redenen kunnen mensen hebben om de informatie die het sequencen oplevert, niet te willen weten? Noem er twee en wissel je antwoorden uit met een klasgenoot.

b De vader van Stijn heeft een erfelijke spierziekte, waardoor hij uiteindelijk in een rolstoel terechtkomt en niet meer kan werken. Stijn is 17 jaar en heeft 50% kans dat hij de spierziekte in de toekomst ook ontwikkelt. Om dat zeker te weten, kan hij DNA-onderzoek laten doen. Maar Stijn is bang dat het zijn leven negatief beïnvloedt als blijkt dat hij de spierziekte ook krijgt en heeft daarom besloten dat hij het nu nog niet wil weten.
Zou jij willen weten of je de spierziekte in de toekomst krijgt? Leg je antwoord uit.