

Hoofdstuk 1

Cellen en hoe ze werken

LEERDOELEN

Na het lezen van dit hoofdstuk kun je:

- de bouw en functie van cellen benoemen (cellen zijn het voornaamste aangrijpingspunt voor de meeste geneesmiddelen);
- de biochemie uitleggen (geneesmiddelen grijpen voornamelijk aan op biochemische processen in cellen).

INHOUD

Inleiding

1.1 Organisatieniveaus: van cel tot orgaansysteem

1.2 Een korte inleiding over cellen

1.2.1 Cellen en celonderdelen

1.3 Een korte inleiding in de biochemie

1.3.1 Eiwitten en eiwitsynthese

1.3.2 Hoe cellen eiwitten maken

1.3.3 Lipiden

1.3.4 Koolhydraten en suikers

1.3.5 Celademhaling en de productie van ATP

Inleiding

Als dit de eerste keer is dat je iets over farmacologie leest, zal je misschien schrikken. Het farmacologische effect vindt plaats op cellulair en biochemisch niveau en weinig mensen voelen zich op hun gemak tussen cellen en moleculen. Maar dit is wel het niveau waar je van uit moet gaan in de farmacologie; niet alleen om farmacologie te begrijpen, maar ook om de vakliteratuur te kunnen lezen. Deze vakliteratuur bestaat niet alleen uit studieboeken, maar ook uit naslagwerken als het *Farmacotherapeutisch Kompas* (zie ook www.farmacotherapeutischkompas.nl) en het *BCFI Geneesmiddelenrepertorium* (zie ook www.bcfi.be) dat dagelijks gebruikt wordt op de ziekenhuisafdeling en in de huisartsenpraktijk. Artsen gebruiken deze standaardnaslagwerken om te zorgen dat hun patiënt het juiste geneesmiddel krijgt in de juiste dosering. Daarnaast kunnen zij hierin opzoeken of de werking van het geneesmiddel en die van andere geneesmiddelen elkaar niet onbedoeld beïnvloeden (dit beïnvloeden wordt 'interactie' genoemd). Als je de inhoudsopgave van het *Farmacotherapeutisch Kompas* of het *BCFI Geneesmiddelenrepertorium* bekijkt, kom je erachter dat je iets van farmacologie moet begrijpen om dit boek te kunnen gebruiken. Voorbeelden van farmacologische groepen die in het kompas worden behandeld, zijn:

- Calciumkanaalblockers
- Selectieve bèta-2-agonisten
- ACE-remmers
- Alfa-adrenoceptorblokkerende geneesmiddelen
- NSAID's
- H₂-receptorantagonisten
- Selectieve serotonineheropnameremmers
- Cyclo-oxygenase-2-remmers

Als je deze termen begrijpt, dan kun je waarschijnlijk snel verdergaan met een farmacologieboek voor gevorderden. Als je de termen echter wel herkent maar de biomedische terminologie niet begrijpt, dan zal je die moeten leren. Dit geldt vooral als je betrokken bent of zult zijn bij het toedienen van medicatie aan patiënten. Verpleegkundigen die geneesmiddelen toedienen aan patiënten moeten dat op een veilige manier doen. Dat betekent dat ze vertrouwd moeten zijn met die geneesmiddelen, moeten weten hoe ze werken, welke bijwerkingen ze kunnen hebben en wat hun mogelijke interacties met andere geneesmiddelen zijn. De bovengenoemde groepen geneesmiddelen zijn in werkelijkheid degene die het meest voorkomen, waaronder bloeddrukverlagende middelen, pijnstillers, bronchusverwijdende middelen, geneesmiddelen tegen depressie en geneesmiddelen tegen gastro-oesofageale reflux (brandend maagzuur). Dit boek wil je vertrouwd maken met de taal van de farmacologie, de namen van geneesmiddelen en de termen die je zult tegenkomen op de geneesmiddelenverpakking en in publicaties over het gebruik van geneesmiddelen. Je hebt deze taal niet alleen nodig om de farmacologie te bestuderen en te begrijpen, maar ook om geneesmiddelen en hun werking te kunnen bespreken met patiënten en collega's.

1.1 Organisatieniveaus: van cel tot orgaansysteem






Geneesmiddelen zijn chemische stoffen die worden toegediend aan of in het menselijk lichaam om ziekten te behandelen of te voorkomen of om symptomen van ziekten of aandoeningen te bestrijden. Het gaat daarbij om symptomen zoals pijn en zwelling,

indigestie en angst. Er zijn honderden verschillende soorten geneesmiddelen voor de behandeling van honderden stoornissen en elk soort geneesmiddel heeft een unieke werking. Sommige geneesmiddelen worden voor diverse ziekten of aandoeningen gebruikt. Sommige geneesmiddelen kunnen relatief eenvoudig werken; andere hebben een behoorlijk gecompliceerde werking.

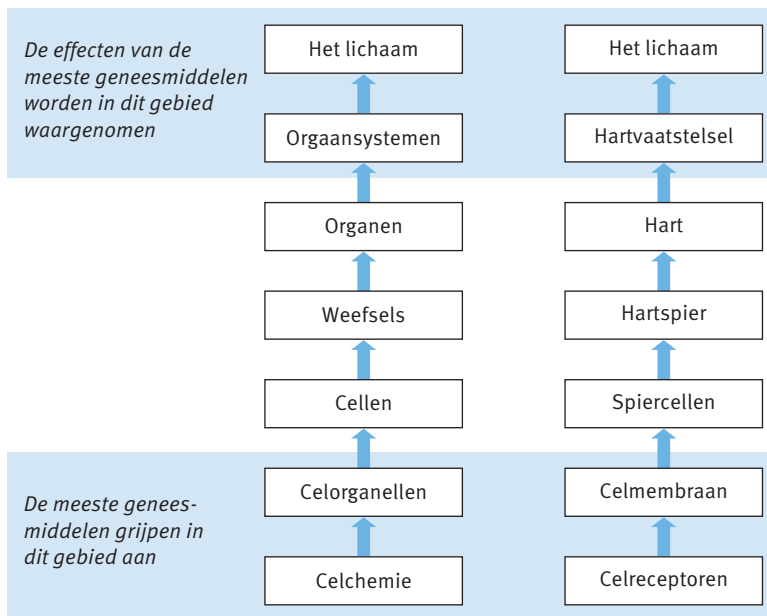
Volgens de definitie in de Nederlandse geneesmiddelenwet hoeft een geneesmiddel niet altijd te genezen, en omvat het begrip geneesmiddel bijvoorbeeld ook diagnosemiddelen en middelen die preventief (profylactisch) worden ingezet. Als we willen begrijpen hoe geneesmiddelen werken, moeten we naar het niveau gaan waarop de meeste geneesmiddelen aangrijpen: de cel.

De meeste geneesmiddelen werken dus op celniveau, maar hebben uiteindelijk wel altijd een effect op organen en systemen die de arts of de patiënt kan waarnemen. Dit betekent dat je de werking van geneesmiddelen pas echt begrijpt als je kunt uitleggen hoe de invloed van een geneesmiddel op een cel uiteindelijk doorwerkt op organen en systemen. Om dit te verduidelijken bekijken we een aantal veelgebruikte geneesmiddelen en geneesmiddelengroepen die je waarschijnlijk wel (van naam) kent (zie tabel 1.1). Al deze geneesmiddelen werken in op specifieke cellen, maar hebben een effect dat verder reikt dan het niveau van de cel.

TABEL 1.1 Enkele veelgebruikte geneesmiddelen, hun cellulaire aangrijpingspunt en hun effect.

GENEESMIDDEL	AANGRIJPINGS-PUNT	MECHANISME	THERAPEUTISCH EFFECT
Bètablokkers	Hartcellen		Voorkomen een toename van de hartfrequentie
Lokale anesthetica	Zenuwcellen		Voorkomen pijn bij kleine ingrepen
Analgetica	Immuuncellen		Verminderen ontstekingspijn
Antidepressiva	Zenuwcellen		Verlichten depressie
Statinen	Levercellen		Verlagen het cholesterolgehalte van bloed

De pijl in de tabel staat voor het mechanisme waarmee een geneesmiddel inwerkt op bepaalde cellen, waarna er een therapeutisch effect ontstaat. We zijn nu aanbeland op het terrein van de farmacologie. Om dit te begrijpen, moet je weten dat het lichaam in verschillende niveaus is georganiseerd. Een boek is ingedeeld in hoofdstukken en paragrafen waardoor we beter begrijpen hoe het is opgebouwd. Voor het lichaam geldt hetzelfde. Figuur 1.1 laat een vereenvoudigde hiërarchie van structuren zien, beginnend bij de celchemie en eindigend bij het gehele lichaam. In dit vereenvoudigde schema is het cardiovasculaire systeem als voorbeeld genomen, maar denk eraan dat deze vereenvoudiging niet betekent dat bijvoorbeeld het hart maar uit één soort cellen bestaat. We hebben maar één hart, maar dit bestaat uit een aantal verschillende soorten weefsels en deze weefsels bestaan op hun beurt uit gespecialiseerde soorten cellen. De meeste geneesmiddelen gaan in beginsel een interactie aan met de eerste twee categorieën: celorganellen en hun bestanddelen (de chemische stoffen waarvan de organellen gemaakt zijn). Over het algemeen hebben ze echter uiteindelijk een werking in het lichaam als geheel of op complete organen.



FIGUUR 1.1 Organisatieniveaus in het menselijk lichaam. Als voorbeeld is de organisatie van het hart en de bloedsomloop weergegeven.

Nitroglycerine is bijvoorbeeld een geneesmiddel tegen angina pectoris dat aangrijpt op de cellen van uiteenlopende bloedvaten (waaronder die van het hart zelf), maar de uitwerking waarvan de patiënt zich bewust wordt, is een vermindering van pijn op de borst. Een ander voorbeeld is het bloeddrukverlagende geneesmiddel *nifedipine*, dat een effect heeft op het celmembraan van de spiercellen in de wand van de (slag)aders. Het effect ervan op het cardiovasculaire systeem is een daling van de bloeddruk. In deel 2 van dit boek bekijken we de interacties van de belangrijkste geneesmiddelengroepen met cellen, en hoe die stapsgewijs leiden tot een therapeutisch effect op orgaansystemen. Je zult dan zien dat farmacologie eigenlijk niet zo moeilijk is als het eerst misschien leek. Maar laten we niet op de zaken vooruitlopen; we moeten eerst vertrouwd raken met cellen en met enige basisbiochemie die in die cellen plaatsvindt.

1.2 Een korte inleiding over cellen

De meeste geneesmiddelen binden aan eiwitten, ook proteïnen genoemd, en de meeste van deze eiwitten zitten in en op cellen. De eiwitten die het aangrijppingspunt zijn voor geneesmiddelen worden behandeld in hoofdstuk 2. Hier gaat het over cellen en de eiwitten die ze maken.

1.2.1 Cellen en celonderdelen

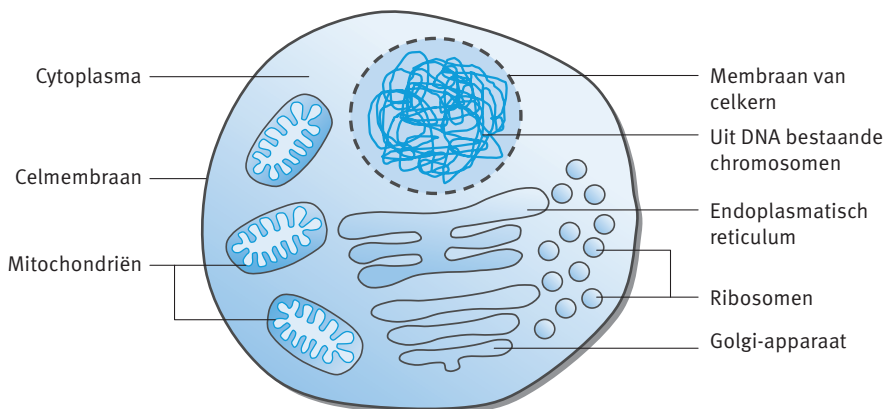
Cellen zijn de bouwstenen waaruit de meeste weefsels zijn opgebouwd. Ons lichaam bevat biljoenen cellen. De meeste cellen zijn gespecialiseerd in een bepaalde taak. Spiercellen kunnen bijvoorbeeld samentrekken, zenuwcellen geleiden zenuwimpulsen en kliercellen scheiden hormonen af. Geneesmiddelen gaan een wisselwerking aan met deze gespecialiseerde cellen. Wat er vervolgens gebeurt, wordt uitgebreid besproken in het tweede deel van dit boek, waarin we de belangrijkste geneesmidde-

lengroepen onder de loep zullen nemen. Ondanks het feit dat deze cellen er vanbuiten heel verschillend uitzien en hun eigen gespecialiseerde functie hebben, lijken ze vanbinnen vrij veel op elkaar. Sommige cellen, zoals spiercellen, hebben speciale eiwitten waardoor ze kunnen samentrekken, maar voor de rest lijkt het inwendige van cellen erg op elkaar. Je moet iets weten over hoe cellen zijn opgebouwd en wat er gebeurt in cellen om te begrijpen hoe geneesmiddelen cellen beïnvloeden. Figuur 1.2 laat een typische menselijke cel zien.

De celonderdelen

Het is belangrijk je te realiseren dat cellen niet alleen gezien worden als bouwstenen van weefsels. Het zijn in werkelijkheid ongelooflijk complexe en dynamische structuren waarin het bruist van de biochemische activiteit. In elke cel vinden elke seconde duizenden en duizenden biochemische reacties plaats. Op die manier kan de cel overleven en zijn taak vervullen als onderdeel van een groep cellen waaruit onze weefsels en organen bestaan.

Organellen. Als je door een elektronenmicroscop naar een cel kijkt, zie je dat hij veel kleine onderdelen bevat. Die heten organellen (letterlijk *kleine organen*) en komen in alle cellen voor. Elke organel heeft een specifieke functie.

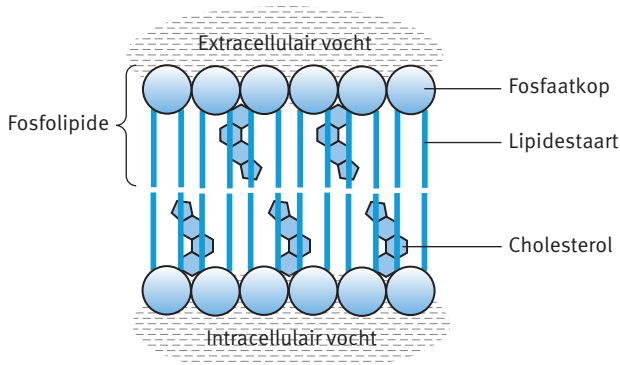


FIGUUR 1.2

Een typisch menselijke cel (schematisch) waarin de voornaamste organellen zijn afgebeeld.

Verscheidene organellen werken als team samen aan de synthese van eiwitten (proteïnesynthese). Dat zijn de **celkern**, het **endoplasmatisch reticulum**, het **golgi-apparaat** en de **ribosomen**. Cellen maken tienduizenden verschillende eiwitten en deze eiwitten zijn, zoals je al eerder hebt gelezen, het belangrijkste aangrijpingspunt voor geneesmiddelen. **Mitochondriën** zijn kleine, boonvormige organellen die vrijwel alle energie voor de cel produceren. Ze gebruiken de energie uit brandstof als glucose en vet om **adenosinetrifosfaat (ATP)** te produceren. ATP is een klein pakketje energie dat de meeste biochemische processen van de cel mogelijk maakt. Sommige geneesmiddelen richten zich op celonderdelen en mechanismen die ATP gebruiken. De manier waarop onze cellen ATP produceren is behoorlijk ingewikkeld. Je moet hier iets van weten omdat sommige ziekten, zoals angina pectoris, de energieproductie beïnvloeden en omdat sommige geneesmiddelen, zoals *nitroglycerine*, er onder andere voor zorgen dat het lichaam ATP kan blijven maken. Dit proces van cellulaire energieproductie wordt **celademhaling** genoemd. Verderop in dit hoofdstuk zullen we er dieper op ingaan.

- **Cytoplasma** is een verzamelnaam voor de inhoud van de cel. Het bestaat uit de organellen en het **cytosol**, een halfdoorzichtige oplossing van enzymen, voedingsstoffen en elektrolyten. Die oplossing is nodig voor talloze processen die voortdurend in elke cel plaatsvinden.
- **Celmembraan.** Deze belangrijke structuur is een dunne membraan die de inhoud van onze cellen omsluit en deze scheidt van het **extracellulaire vocht** (het vocht buiten de cel). Het celmembraan regelt wat de cel in- en uitgaat. Het bestaat hoofdzakelijk uit een dubbele laag **fosfolipiden** met verspreid daartussen **cholesterol**. Het membraan is ongelooflijk dun, ongeveer zeven nanometer (één nanometer is één miljoenste millimeter). Figuur 1.3 laat zien hoe de onderdelen van de twee lagen fosfolipiden geordend zijn.



FIGUUR 1.3 Een dubbellaag van fosfolipiden vormt het celmembraan. De beide lagen worden onder andere gestabiliseerd door een tussengelegen laag cholesterolmoleculen.

De fosfaatkoppen zijn **hydrofiel** (trekken water aan) en zij hebben het dus naar hun zin in het extracellulaire vloeistof buiten de cel en het intracellulaire vloeistof binnen in de cel. De lipidestaarten zijn **hydrofoob** (waterafstotend) en vormen een stabiele laag in de watervrije omgeving tussen de buitenste en binnenste laag fosfaatkoppen. De cholesterolmoleculen maken de laag stabiel. Eiwitten met uiteenlopende functies zitten verankerd in het celmembraan. Tot deze eiwitten behoren receptoren, ionkanalen, enzymen en transporteiwitten. Zoals je al weet, zijn eiwitten het belangrijkste aangrijpingspunt voor therapeutische geneesmiddelen. Op deze vier eiwitten richten we dan ook onze aandacht (zie figuur 1.4).

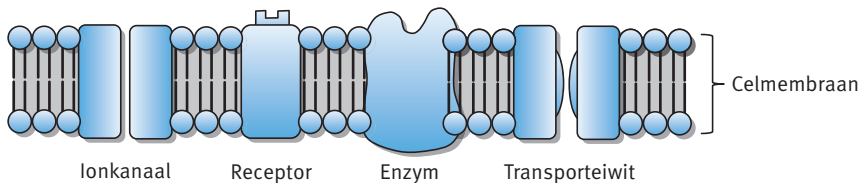


BELANGRIJK

Het celmembraan bestaat voornamelijk uit vetachtige stoffen en bepaalt welke geneesmiddelen erdoorheen kunnen om hun effect op de doelcellen uit te oefenen. De meeste geneesmiddelen kunnen niet door het vetachtige celmembraan heen en oefenen dus hun effect uit door aan extracellulaire, eiwitachtige structuren op het celmembraan te binden, zoals aan receptoren en ionkanalen.

Intracellulair betekent *binnenin de cel* en **extracellulair** betekent *buiten de cel*.

In figuur 1.4 is een dwarsdoorsnede van een celmembraan te zien.



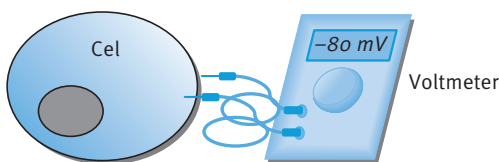
FIGUUR 1.4 Een deel van het celmembraan, waarin verschillende membraaneiwitten te zien zijn.

De membraanpotentiaal

Cellen handhaven een gering potentiaalverschil over hun membraan die de membraanpotentiaal wordt genoemd. Dankzij dit potentiaalverschil tussen de binnen- en de buitenkant van de cel kunnen zenuwen impulsen geleiden, kunnen spieren zich samentrekken, kan het hart kloppen en kunnen vele andere lichaamsfuncties worden uitgeoefend. Dit is van farmacologisch belang, omdat veel geneesmiddelen gebruik maken van de membraanpotentiaal om hun therapeutisch effect te realiseren.

Voorbeelden van deze geneesmiddelen zijn middelen voor lokale anesthesie zoals *lidocaïne*, anti-aritmica zoals *amiodaron* en veel psychofarmaca. De rustpotentiaal ligt meestal rond de min 80 mV (millivolt). De potentiaal is negatief, omdat deze volgens afspraak wordt bepaald vanaf de binnenkant van de cel die negatief geladen is ten opzichte van de buitenkant van de cel. In figuur 1.5 is een in verhouding veel te kleine voltmeter te zien waarmee de membraanpotentiaal van een cel wordt gemeten.

Je moet iets meer weten over de membraanpotentiaal en de ionen en ionkanalen met behulp waarvan deze potentiaal wordt gehandhaafd; dit wordt in hoofdstuk 2 nader besproken.



FIGUUR 1.5 Een gevoelige voltmeter waarvan de elektroden zich aan beide zijden van het celmembraan bevinden, geeft een rustpotentiaal aan van circa min 80 mV.



WAT HEB JE GELEERD?

Een korte samenvatting van onze korte introductie over cellen:

- Cellen vormen weefsels, die op hun beurt organen vormen waaruit orgaansystemen zijn opgebouwd.
- Cellen zijn complexe structuren bestaande uit organellen, die onder andere betrokken zijn bij de productie van energie (celademhaling) en eiwitten (proteïnesynthese).
- Organellen die bij de proteïnesynthese betrokken zijn omvatten de celkern, het endoplasmatisch reticulum, het golgi-apparaat en de ribosomen. Mitochondriën produceren vrijwel alle energie van de cel, in de vorm van ATP.
- Het celmembraan: regelt wat de cel in- en uitgaat.

1.3 Een korte inleiding in de biochemie

Biochemie is de wetenschap die, op het snijvlak van biologie en chemie, de samenstelling van en de samenwerking onderzoekt tussen de verschillende moleculen die bijdragen tot de structuur en stofwisseling van organismen.

Geneesmiddelen richten zich op veel biochemische processen in en om cellen. Twee voorbeelden hiervan: sommige antibacteriële geneesmiddelen grijpen aan op de eiwitsynthese. Je moet dus ook dit proces begrijpen. Statinen zijn geneesmiddelen die het cholesterol in het bloed verlagen. Daarom moet je dus het een en ander over lipiden weten.

1.3.1 Eiwitten en eiwitsynthese

Geneesmiddelen richten zich op eiwitten, maar voordat we gaan kijken hoe cellen eiwit maken, stellen we onszelf de volgende vraag: wat zijn eiwitten?

Eiwitten zijn een belangrijke en waarschijnlijk de meest gevarieerde groep van biologische moleculen. Er zijn tienduizenden verschillende eiwitten in het menselijk lichaam en deze vervullen heel veel verschillende functies, onder andere op de volgende gebieden:

- **Structuur:** eiwitten vormen pezen en ligamenten.
- **Beweging:** eiwitten in spieren zorgen voor spiercontractie.
- **Communicatie:** veel hormonen zijn eiwitten.
- **Afweer:** antilichamen die bacteriën aanvallen en vernietigen zijn eiwitten.
- **Zuurstoftransport:** hemoglobine (Hb) in rode bloedcellen is een eiwit.

Je ziet dat het lichaam niet kan functioneren zonder eiwitten. Eiwitten zijn ketens van **aminozuren**, kleine, stikstof bevattende moleculen. Er komen twintig verschillende soorten aminozuren voor in menselijk eiwit. We halen deze aminozuren uit eiwitten in ons voedsel. Vlees, vis, eieren, noten en bonen zijn rijk aan eiwit en daardoor rijk aan aminozuren. Ons spijsverteringsstelsel breekt het eiwit in dit voedsel af, zodat we de aminozuren kunnen opnemen in ons lichaam. Onze cellen gebruiken de aminozuren weer om er andere, menselijke eiwitten uit te maken.

De lengte van de keten en de volgorde van de aminozuren bepalen voor een groot gedeelte de natuurlijke eigenschappen van het eiwit. Een ander kenmerk van elk eiwit is de manier waarop de keten van aminozuren zich plooit tot zijn uiteindelijke ruimtelijke structuur (zie figuur 1.6). Sommige zijn lang en dun, zoals het structureiwit **collageen** dat in pezen zit. Dit worden **filamenteuze eiwitten** genoemd. Andere zijn rond, boller van vorm, zoals het **hemoglobine**. Deze worden **globulaire eiwitten** genoemd.

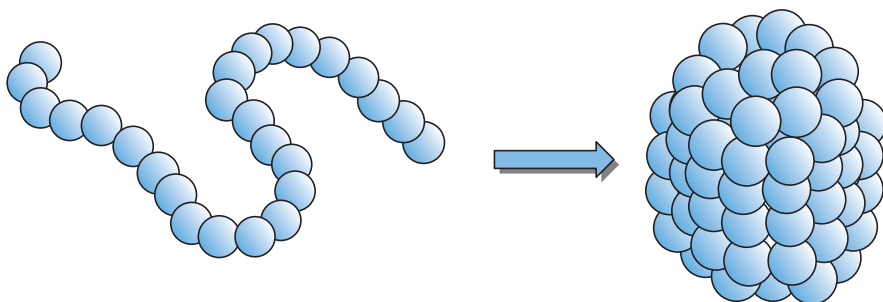


EEN ANDERE MANIER OM HET JE VOOR TE STELLEN

Je kunt aminozuren zien als letters van het alfabet. Daarmee kunnen oneindig veel woorden worden gemaakt. De lengte van een woord en de volgorde van de letters bepalen wat het woord *betekent*. De lengte van de aminozuureketen en de volgorde van de aminozuren in die keten bepalen wat voor soort eiwit het is en welke functie het heeft.

De cellen in ons lichaam kunnen allemaal meer dan 20.000 verschillende eiwitten maken. Binnenin elke cel is een code nodig om ervoor te zorgen dat de aminozuren in

de juiste volgorde aaneengeschakeld worden en de keten de juiste lengte krijgt. Deze code voor onze eiwitten zit in DNA (desoxyribonucleïnezuur), een ongelooflijk dun langgerekt molecuul dat in de kern van elke cel aanwezig is. Alle menselijke cellen bevatten in principe 46 DNA-strengen (behalve sperma- en eicellen, die er 23 hebben) en elke DNA-streng heet een chromosoom. Elke cel hoeft niet elk soort eiwit te maken, maar toch bevat elke cel de codes voor elk van onze ongeveer 20.000 eiwitten. Het is niet precies bekend hoe de cel weet welke eiwitten hij moet maken en wanneer.



FIGUUR 1.6

Eiwitten zijn ketens van aminozuren die tot driedimensionale structuren zijn opgevouwen. De eigenschappen van het eiwit worden grotendeels bepaald door de volgorde van de aminozuren, de lengte van de keten en de wijze waarop deze is gevouwen.



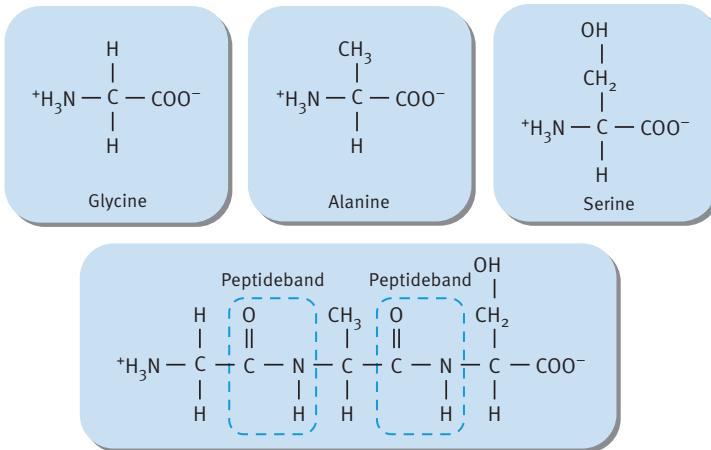
MEER WETEN?

AMINOZUREN

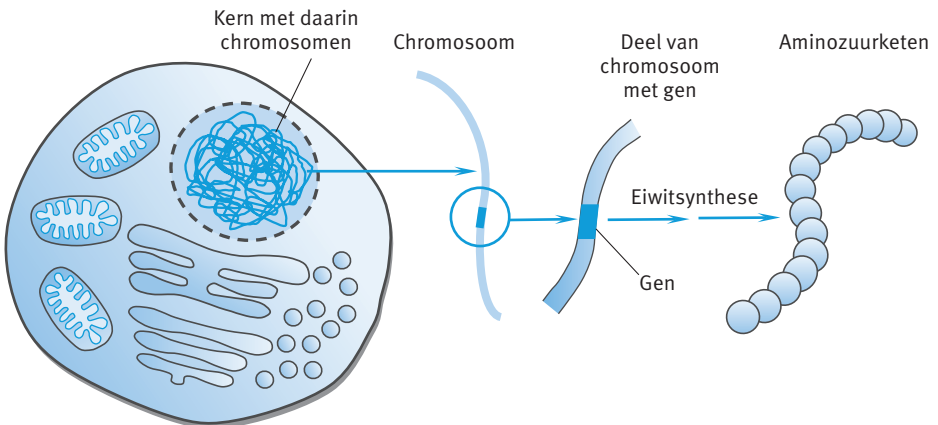
Eiwitten bestaan uit ketens van aminozuren. Zoals je in figuur 1.7 kunt zien, zijn aminozuren vrij kleine moleculen met een stikstofhoudende aminogroep (NH_3^+) waaraan de groep zijn verzamelnaam te danken heeft. Voor de vorming van menselijke eiwitten worden twintig aminozuren gebruikt en elk aminozuur verschilt enigszins van alle andere. Sommige zijn zuur, andere zijn basisch (alkalisch), sommige zijn positief geladen, andere hebben een negatieve lading. Deze kleine verschillen dragen bij aan de functionaliteit van het uiteindelijke eiwit. De aminogroep van het ene aminozuur kan een peptideband vormen met de carboxylgroep (COO^-) van een naastgelegen aminozuur; op deze wijze kunnen uit aminozuren lange ketens ontstaan die polypeptiden worden genoemd. Sommige eiwitten bestaan uit slechts één polypeptide, terwijl andere uit verscheidene van deze ketens bestaan.

Het stukje DNA met de code voor één aminozuurketen of eiwit heet een gen (zie figuur 1.8). Er zijn meer genen (meer dan 30.000) dan eiwitten (ongeveer 20.000), omdat sommige eiwitten uit meer dan één aminozuurketen bestaan en dus meer dan één gen nodig hebben voor de complete code. Hemoglobine is hier een voorbeeld van.

Sommige eiwitten worden in de cel zelf gebruikt en andere worden in andere delen van het lichaam gebruikt. Veel eiwitten zitten verankerd in het celmembran, zoals receptoren, ionkanalen, enzymen en transporteiwitten. Hoofdstuk 2 gaat dieper in op deze eiwitten, die de belangrijkste aangrijpingspunten van geneesmiddelen zijn. Eiwitten zijn er in allerlei vormen en maten en hebben uiteenlopende functies. **Enzymen** behoren tot de meest talrijke soort eiwitten; het zijn complexe structuren die betrokken zijn bij de meeste biochemische reacties in het lichaam. Enzymen zijn daarom ook een belangrijk doelwit voor geneesmiddelen.



FIGUUR 1.7 De aminozuren glycine, alanine en serine en (daaronder) deze drie aminozuren gekoppeld door peptidebanden.



FIGUUR 1.8 Eiwitten worden gevormd aan de hand van informatie die in de chromosomen is opgeslagen. Bij het proces van de eiwitsynthese wordt de informatie die in elk van de genen is gecodeerd, naar de juiste aminozuurvolgorde vertaald.



WIST JE...

dat elke cel ongeveer twee meter DNA bevat? Het menselijk lichaam telt meer dan één biljoen cellen. De totale lengte aan DNA moet dus minstens twee miljard kilometer zijn; dat is meer dan tien keer de afstand van de aarde tot de zon!

1.3.2 Hoe cellen eiwitten maken

Een cel die een eiwit maakt, doet dat volgens een ingewikkeld proces. Het juiste gen moet worden gevonden en de code in dat gen moeten worden omgezet in een eiwit met de juiste volgorde van aminozuren: een keten van de juiste lengte met de juiste ruimtelijke structuur. Bij dit proces moeten verschillende organellen in de cel samenwerken. De celkern, omdat hierin de chromosomen zitten waarvan de genen de code bevatten. De ribosomen, die verantwoordelijk zijn voor het aaneenschakelen van de aminozuren