

DNA IN DE PUREE

DNA

IN DE PUREE

Hoe genetica ons
eten verandert
en wat jij daarvan
merkt op je bord

Ruben
Vanholme

Dorien
Van de Wouwer

INHOUD

Vooraf: waarom dit boek?	9
--------------------------	---

DEEL I: DNA, DRAAIBOEK VAN HET LEVEN

• DNA zit in alle levende wezens	15
• DNA is als een kronkelige touw ladder	19
• Lang, langer, langst	23
• DNA als handleiding om eiwitten te bouwen	25
• DNA in iedere plantencel	31
• Twee van elk: sterke en zwakke genen	35
• Veel van elk: voor elk gen meerdere varianten	39

DEEL II: NATUURLIJKE VERANDERINGEN VAN HET DNA

• Evolutie wordt gedreven door willekeurige DNA-veranderingen	45
• Manier 1: verandering van één DNA-letter door mutagene stralingen en mutagene chemicaliën	51
• Manier 2: verandering van één DNA-letter door knulligheden van de cel	55
• Manier 3: verandering van meerdere letters door slippende DNA-kopieereiwitten	61
• Manier 4: nieuwe combinaties aan DNA	67
• Manier 5: verdubbelen en verdwijnen van genen	71
• Manier 6: springende genen	75
• Manier 7: DNA-breuken plakken	81

• Manier 8: verlies van grote stukken en herschikken van chromosomen	87
• Manier 9: verdubbelen van alle DNA	93
• Manier 10: DNA van verwante soorten opnemen	97
• Manier 11: DNA opnemen van niet-verwante soorten	105
• Manier 12: DNA opgedrongen krijgen van niet-verwante soorten	113
• DNA verandert, altijd en overal	117

DEEL III: VEREDELING: DE NATUUR NAAR ONZE HAND ZETTEN

• Veredelen als noodzaak	125
• Techniek 1: klassieke veredeling met of zonder merkers – selecteren en kruisen	129
• Hybriderassen: bastaarden op de akker	143
• Enten: de monsters van Frankenstein onder de planten	149
• Techniek 2: mutatieveredeling, de boostknop voor willekeurige DNA-veranderingen	153
• Techniek 3: precisieveredeling	159
• Techniek 4: transgene veredeling	167
• Veredelings technieken slim inzetten	175
• Plantenrassen op de markt brengen	179

DEEL IV: DNA VOOR DUURZAAM VOEDSEL

• Kennis over DNA is doorslaggevend	187
• Belang van biodiversiteit	191
• Bedreigingen voor de biodiversiteit	195
• Biodiversiteit beschermen	201
• Natuurlijk versus kunstmatig	205
• Voedselveiligheid	209
• Belang van gewasdiversiteit	213
• DNA-diversiteit in oude en moderne rassen	217
• Landbouwpraktijk monocultuur	221
• ‘Vervelende’ bestjes, schimmels en planten	227
• Herbicidetolerantie, geen uitvinding van de mens	235
• Zaden in privéhanden: de weg van octrooien naar kwekersrecht	239
• Zaden in privéhanden: dan toch octrooien?	249
• Voedselverspilling en de eiwitshift	257
• Duurzame materialen en brandstof uit planten	263
• Alles en iedereen ggo?	273
– Gezondheid	276
– Uitbuiting kleine boer	277
– Voorzorgsprincipe	282
– Ggo's maken is duur en enkel voor grote bedrijven	283
– Superonkruiden	286
– Meer pesticiden	287
– Ontbossing	288
– We hebben het niet nodig	290
– Labels voor keuzevrijheid	291
• Wetenschap versus misinformatie: feiten versus fabels	297

Nawoord	303
Begrippenlijst	305
Weetjeslijst	307
Over de auteurs	310
Aansprakelijkheid	311
Eindnoten	311

VOORAF: WAAROM DIT BOEK?

Beste lezer, DNA zit in de puree. In de letterlijke betekenis is dat fantastisch, in de figuurlijke problematisch. Lees even mee.

Net als alles wat leeft, hebben ook planten DNA. Hun DNA vormt als het ware een handleiding die bepaalt hoe ze zuurstof kunnen maken, welke vorm hun bladeren hebben en welke kleur hun vruchten, of ze eetbaar zijn en of de planten klein blijven als mos of zo groot worden als een eik. DNA zit in elke cel en is onlosmakelijk verbonden met leven en leven doorgeven. Ook de aardappel bestaat uit cellen die DNA bevatten en zo komt het dus letterlijk in de puree terecht – en in elke andere maaltijd die we eten. Laten we dat vooral zo houden.

DNA is geen statische handleiding: het verandert doorheen de tijd. Door wijzigingen in het DNA krijgen planten andere eigenschappen. Die wijzigingen verklaren hoe eencellige algen konden evolueren tot bomen en waarom sommige druiven rood zijn en andere wit. Dankzij wetenschappelijk onderzoek krijgen we de laatste decennia inzichten op welke manieren DNA kan veranderen en is het ook mogelijk geworden om er gerichte aanpassingen in aan te brengen.

We stellen vast dat veranderingen in het DNA van planten bij heel wat mensen argwaan ontlokt. Er circuleren zelfs berichten dat dergelijke veranderingen risico's zouden inhouden, bijvoorbeeld dat het voedsel erdoor ongezond zou worden en de landbouw minder duurzaam. Zo wordt DNA onterecht een zondebok voor doemscenario's. DNA zit dus ook figuurlijk in de puree en dat is bijzonder jammer! Veranderingen in het DNA van planten zijn nu eenmaal onvermijdelijk. Het kán niet anders. Bovendien zijn die veranderingen de basis van sterkere en gezondere landbouwgewassen. Het gebrek aan toegankelijke literatuur over dit onderwerp heeft ons aangezet tot het schrijven van dit boek. We willen de veranderlijke natuur van DNA onder de aandacht brengen, om die te koesteren

en naar waarde te kunnen schatten. We dromen van een wereld waarin iedereen weet dat DNA-wijzigingen ons op weg helpen naar duurzamere landbouw en gezonder voedsel.

Nu weet je meteen onze motivatie om dit boek te schrijven. Maar waarom zou jij het lezen?

Dit boek helpt om je blik op de natuur en landbouw te verruimen. Het zit tjokvol fascinerende weetjes over planten en hun DNA en bijbehorende illustraties om bij weg te dromen.¹ Het bestaat uit vier delen. De eerste twee zijn wetenschappelijk van insteek en zorgen voor de nodige achtergrondinformatie over planten en hun DNA. De laatste twee verruimen het onderwerp naar maatschappelijke thema's: het voedsel op je bord en duurzame landbouw.

In *Deel I* kun je lezen wat DNA precies is: hoe het is opgebouwd, waaróm het zo is opgebouwd en hoe het in staat is om het uitzicht van planten te bepalen. Je komt onder andere te weten wat een gen, een chromosoom, een genoom en een eiwit is. Die moeilijke begrippen leggen we uit in begrijpelijke taal. Maar toch, biologie is nu eenmaal complex, en ontspannende zondagavondlectuur kunnen we daarom niet beloven. Ons leesadvies: je hoeft niet elke term te begrijpen om de essentie mee te hebben. Is dat wetenschappelijke deel niet meteen jouw ding, spring dan gerust naar het volgende deel.

In *Deel II* gaan we in op de vreemde capriolen van het DNA in planten. Je maakt kennis met twaalf manieren waarop DNA kan veranderen en wat de gevolgen daarvan zijn. Ook dat is niet bepaald eenvoudige materie, maar we maken de tekst luchtig met weetjes en voorbeelden. Je komt er onder meer te weten hoe witte uien ontstonden uit rode en hoe rode kolen ontstonden uit witte, en dat het DNA dat aan de basis ligt van de langwerpige vorm van romatomen gelijkaardig is aan het DNA dat komkommers hun welgekende vorm bezorgt.

Waar het eerste en tweede deel als achtergrond dienen, komen we in *Deel III* aan de essentie van dit boek: hoe veranderingen in het DNA gebruikt worden om landbouwgewassen beter te maken. Je leert er vier technieken kennen: klassieke veredeling, mutatieveredeling, precisieveredeling en transgene veredeling. Je komt ook te weten dat elk van de vier technieken ingrijpt op het DNA. De eerste twee passen het DNA eerder willekeurig aan, de laatste twee doen dat gericht, en verrassend genoeg leiden verschillende technieken soms naar eenzelfde eindresultaat.

In *Deel IV* lees je waarom kennis over DNA belangrijk is voor duurzame landbouw en gezonde voeding. Hier vragen we ons bijvoorbeeld af of veranderingen in het DNA van planten risico's inhouden voor de biodiversiteit, of er effecten kunnen zijn op pesticiden- en grondgebruik en of het zaden in de handen duwt van grote bedrijven.

Elk van de vier delen is opgebouwd uit kleinere behapbare stukken die vrijwel onafhankelijk van elkaar te lezen zijn. Ben je een avontuurlijke lezer? Dan kan je van het ene willekeurige stuk naar het andere springen. Daar waar informatie van de andere stukken er toch toe doet, wordt er naar die stukken verwezen.

We wensen je veel lees- en ontdekplezier!

DEEL I

**DNA,
draaiboek
van het leven**



DNA ZIT IN ALLE LEVENDE WEZENS

Er leven miljoenen soorten wezens op aarde. Elk van die soorten zit fascinerend knap in elkaar. Sommige lijken erg op elkaar, vele zijn totaal verschillend. Biologen classificeren de soorten wezens naargelang hun gelijkenissen. Zo heb je vast al gehoord van het rijk van de bacteriën, zwammen, planten en dieren.

Biologen beschouwen iets als 'levend' als het voldoet aan de volgende twee essentiële kenmerken:

- Het bestaat uit één of meerdere cellen.
- Het heeft een vorm van stofwisseling, dit wil zeggen dat het ademt, zich voedt en stoffen uitscheidt.

Stenen, water en mineralen zijn dus niet levend, aangezien ze aan geen van de twee voorwaarden voldoen. Organismen die gestorven zijn, zijn wel nog opgebouwd uit cellen, maar hun stofwisseling is gestopt. Virussen zitten in een grijze zone. Omdat ze niet opgebouwd zijn uit cellen en een ander organisme nodig hebben voor hun stofwisseling, worden ze eerder als niet-levend beschouwd.

Van de kleinste bacterie tot de grootste sequoia, alle levende wezens hebben **DNA** in de cellen waaruit ze zijn opgebouwd.² DNA zorgt namelijk voor het opslaan, vrijgeven én doorgeven van levensnoodzakelijke informatie. Dat laatste gebeurt simpelweg door het DNA te kopiëren en zo door te geven aan de nakomelingen. Een plant bestaat al snel uit enkele miljarden cellen en elk van die cellen bevat dus een kopie van datzelfde DNA.

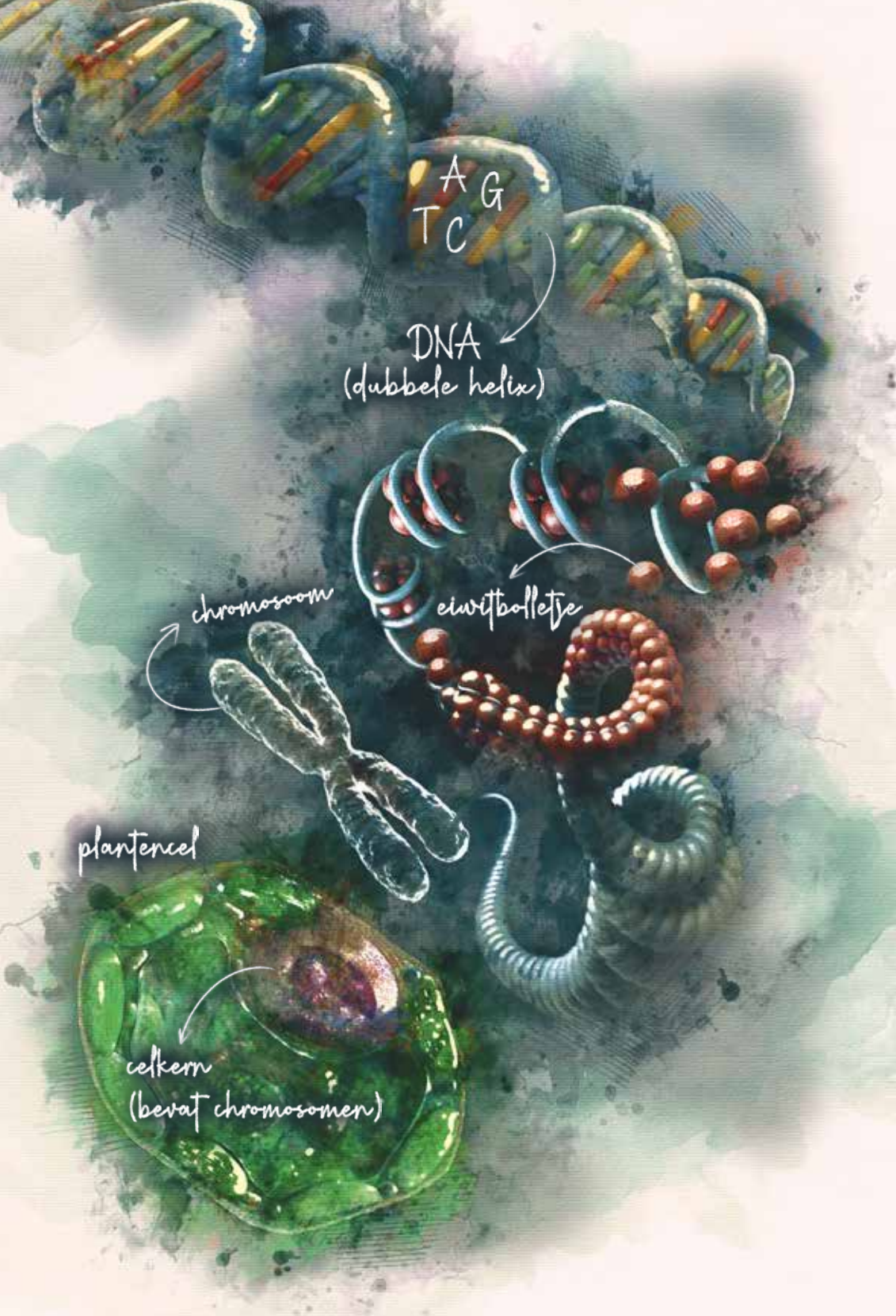
Hoewel de omgeving ook een niet te miskennen rol speelt, bepaalt het DNA voor een groot stuk hoe het organisme eruitziet en zich gedraagt. Het is als het ware een bouwplan voor het leven.

Eencellig of lekker gezellig meercellig?

Een cel is de kleinste bouwsteen van al het leven. Eencellige organismen bestaan uit één enkele cel, terwijl meercellige organismen uit miljarden cellen kunnen bestaan. Zo goed als alle bacteriën zijn eencellig en meestal piepklein: gemiddeld een micrometer groot, dat is een duizendste van een millimeter.³ Ter vergelijking: dat is ongeveer honderd keer kleiner dan de breedte van een haar. Er zijn wel uitzonderingen. In de mangrovebossen van Guadeloupe leeft een reuzenbacterie, *Thiomargarita magnifica*, die wel één centimeter lang kan worden.⁴ Die kun je dus met het blote oog zien.

Alle dieren zijn meercellig, terwijl zwammen en planten een- of meercellig kunnen zijn. Een bekend voorbeeld van een eencellige zwam is bakkersgist, gebruikt om brood te laten rijzen. Ook eencellige planten ben je vast al tegengekomen. De *Pleurococcus*-algen die een groene laag vormen op boomstammen en terrastegels zijn eencellig. Plantencellen zijn meestal groter dan bacteriën, vaak tien tot honderd micrometer groot. Uitzonderlijk lange plantencellen worden gemaakt door de katoenplant. De vezelcellen die de zaden omhullen kunnen wel vijf centimeter lang zijn. Maar de absolute recordhouder is het eencellige tropische zeewier *Caulerpa taxifolia*, dat bestaat uit één reuzencel die tot een meter groot kan worden en er met wortel-, stengel- en bladstructuren toch uit ziet als een meercellige plant.⁵

Ook meercellige wezens beginnen altijd als één enkele cel: de bevruchte eicel. Van daaruit deelt die ene cel zich in tweeën. Elk van die cellen deelt zich dan weer opnieuw en opnieuw en opnieuw, tot er soms wel biljoenen cellen samenwerken om een compleet organisme te vormen. In meercellige organismen hebben cellen verschillende taken. In planten vind je bijvoorbeeld vezelcellen, die als een soort skelet de plant van binnen-uit steun geven, en bladcellen, die zonlicht en CO₂ omzetten in suikers en zuurstof.



DNA IS ALS EEN KRONKELIGE TOUWLADDER

De opbouw van DNA is bij alle levende wezens exact hetzelfde: het is een lange, smalle draadvormige molecule die je met het blote oog niet kunt zien.⁶ Zo'n **DNA-draad** is namelijk slechts twee nanometer dik. Ter vergelijking: als je twee miljoen DNA-draden samen neemt, heb je een bundel van ongeveer de dikte van een fijn spinnendraadje. De lengte en het aantal DNA-draden verschillen sterk tussen de verschillende soorten levende wezens. Eén zo'n draad is al gauw enkele centimeters lang. In de cel ligt DNA echter altijd opgevouwen, gedraaid en gekruld, zodat zelfs de langste DNA-draden in een piepkleine cel passen.

Als we de DNA-draad meer in detail bekijken, zien we dat die is opgebouwd uit twee fijnere draden, de **DNA-strengen**. Die zijn even lang als de DNA-draad die ze samen vormen en half zo breed. Nog verder inzoomen toont ons dat elke DNA-streng is samengesteld uit een aaneenschakeling van vier verschillende bouwstenen (de DNA-basen): adenine, thymine, cytosine en guanine of kortweg A, T, C en G. Dat zijn de bouwstenen van het DNA, die we in de rest van het boek **DNA-letters** zullen noemen. (De DNA-letters zijn op hun beurt opgebouwd uit atomen. Dat is relevant om *Manier 1* in *Deel II* te begrijpen, maar speelt hier verder geen rol.) De DNA-letters hebben dezelfde breedte als de DNA-streng en door duizenden of zelfs miljoenen van die bouwstenen aan elkaar te zetten, kunnen er erg lange DNA-strengen ontstaan. Net als kraaltjes aan een ketting kunnen die letters in alle mogelijke volgorden worden geplaatst. De volgorde van de letters op zo een streng is de **DNA-code** en die verschilt tussen verschillende organismen.

De twee DNA-strengen die samen een DNA-draad vormen, volgen een strakke wetmatigheid: een A op de ene streng gaat altijd samen met een T op de andere streng, en een C op de ene streng gaat altijd samen met een

G op de andere. Een DNA-draad ziet er dan wat uit als een touwladder met sporten die bestaan uit A-T, T-A, G-C en C-G. Dus als de volgorde op de ene streng van de touwladder 'AGATC' is, dan weten we automatisch wat er op de andere streng staat: 'TCTAG', of eigenlijk 'GATCT'. Dat is 'TCTAG', maar dan van rechts naar links. DNA-strengen hebben namelijk een ingebouwde richting en de richting van de twee strengen is tegengesteld aan elkaar. Als je de ene streng van links naar rechts leest, moet je de andere van rechts naar links lezen.

Naar vorm is de DNA-draad rond zijn eigen as getorst. De structuur is vergelijkbaar met wat je krijgt als je het ene uiteinde van een smalle reep papier vasthoudt en het andere uiteinde een paar keer draait. Dat levert de herkenbare – zeg gerust iconische – dubbele helix op die het zelfs tot emoji heeft geschopt.

DNA bevat essentiële informatie voor het leven en die twee strengen zijn daarbij uiterst handig. Samen zijn ze namelijk sterker dan een enkele streng, waardoor het DNA minder snel beschadigd raakt. Bovendien dient de dubbele structuur als een ingebouwde back-up. Gaat er alsnog iets mis met één streng, dan kan de cel de tweede streng gebruiken om fouten te herstellen.

Zo goed als alle levende wezens hebben meerdere DNA-draden of **chromosomen** in hun cellen. De mannetjes van enkele Australische mierensoorten vormen een uitzondering met slechts één chromosoom.⁷ In de regel hebben vrouwtjes en mannetjes van eenzelfde soort eenzelfde aantal chromosomen, maar dat geldt niet voor wespen, bijen en mieren. Bij die insecten hebben vrouwtjes dubbel zoveel chromosomen als de mannetjes. In het geval van de exotische mier hebben de vrouwtjes er dus welgeteld twee. Een verre Mexicaanse verwant van de paardenbloem heeft 'slechts' vier chromosomen en is daarmee de plantensoort met het laagste aantal chromosomen.⁸ De addertongvaren is de recordhouder onder de planten met maar liefst 1440 chromosomen.⁹ Ter vergelijking: de meeste mensen kregen er 23 van elke ouder en hebben er dus 46 in totaal. Alle

chromosomen samen, of het er nu vier, 1440 of 46 zijn, vormen samen het **genoom** van het organisme.

Om het DNA, nadat het zich verdubbeld heeft, op een ordelijke manier te verdelen tijdens de celdeling, wordt de lange DNA-draad opgewonden rond eiwitbolletjes en nog verder opgerold en compact gemaakt tot een soort bobijntje van DNA-draad. Het stereotiepe beeld van een chromosoom als een dikke X is een dubbel bobijntje net voor de celdeling. Na de celdeling heeft elke cel één bobijntje gekregen, een halve X zeg maar. In die bobijntjes is de DNA-code niet meer leesbaar voor de cel, dus wordt de lange draad na de celdeling opnieuw ontrold. Een wonderlijk knap biologisch proces!

Toegegeven, dat is heel wat informatie. Laten we daarom nog even samenvatten: het genoom is de verzameling van alle DNA in een cel. Het is samengesteld uit verschillende chromosomen. Elk chromosoom is een gedraaide DNA-draad die is opgebouwd uit twee strengen die op hun beurt bestaan uit een lange ketting DNA-letters: A, T, C en G. Voilà, hiermee ben je volledig voorbereid om in het volgende stuk te duiken.

Op z'n Engels

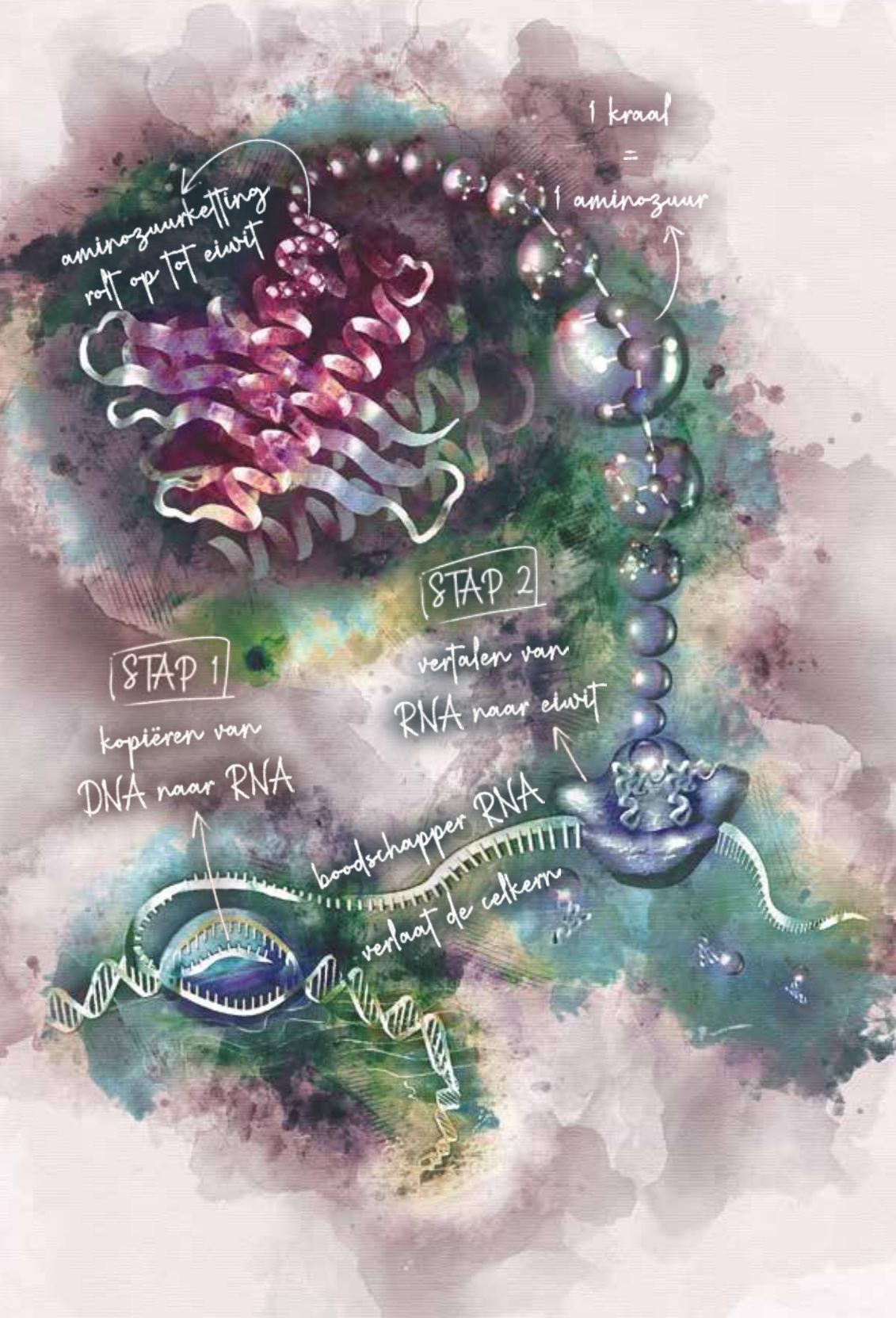
DNA is een afkorting die staat voor desoxyribonucleïnezuur. Zoek maar niet naar de letter a in die naam, want de afkorting komt van het Engelse deoxyribonucleic acid. In het Nederlands hebben we even DNZ gehad, maar dat heeft niet lang geduurd. Desoxyribonucleïnezuur is een chemische naam die verwijst naar de bouwstenen van de DNA-molecule. We gaan het in dit boek simpelweg over DNA hebben, dat is een stuk eenvoudiger dan telkens desoxyribonucleïnezuur.



LANG, LANGER, LANGST

De lengte van de DNA-code verschilt sterk van plant tot plant, maar het zijn stevast grote getallen waar we ons niet zo eenvoudig nog iets bij kunnen voorstellen. We doen toch een poging door het aantal letters in DNA te vergelijken met het aantal letters in een boek. Het boek dat je in je handen hebt bevat ongeveer 400.000 letters.¹⁰ Stel dat een grote fan van dit boek een hele boekenkast vol met deze boeken verzamelt. Er passen ongeveer 210 van deze boeken op een boekenkast van één meter breed met zes legplanken. De boekenkast bevat alles samen zo'n 84 miljoen letters. Van alle planten waarvan de lengte van de DNA-code gekend is, heeft een Braziliaanse kurkentrekkerv met 63 miljoen letters de kortste code.¹¹ Die code past dus nog mooi in de boekenkast. Met een DNA-code van ongeveer 160 miljard letters is een kleine varen die voorkomt op de eilandengroep Nieuw-Caledonië voor zover geweten de plantensoort met het meeste DNA.¹² Dat zijn meer dan 1900 boekenkasten – een aardige bibliotheek.¹³

Bacteriën hebben doorgaans heel wat minder DNA dan planten. Dat komt doordat ze optimaler gebruikmaken van de DNA-code. Er zit minder 'rommel-DNA' in, maar daar komen we later op terug. Bovendien zitten bacteriën nu eenmaal eenvoudiger in elkaar dan planten. Bij planten moeten verschillende soorten cellen samenwerken en die complexiteit is er niet bij de eencellige bacteriën. Binnen de groep van dieren of planten valt er echter geen lijn te trekken tussen de hoeveelheid DNA en hun complexiteit of de grootte van het organisme. Dat blijkt ook duidelijk uit volgend voorbeeld bij mensen: een biologische vrouw heeft 46 chromosomen waarvan twee grote X-chromosomen van elk ongeveer 150 miljoen letters en met 850 genen. Een biologische man heeft in plaats daarvan slechts één groot X-chromosoom en één klein Y-chromosoom van 60 miljoen letters en met 71 genen. Een vrouw heeft dus meer DNA per cel dan een man. En vrouwen zitten toch niet complexer in elkaar dan... euh... ach, laat maar. Dit boek gaat over planten, niet?



DNA ALS HANDLEIDING OM EIWITTEN TE BOUWEN

Het DNA bevat alle informatie die een organisme nodig heeft om te groeien en te leven. Er staat bijvoorbeeld in beschreven hoe een cel zich moet delen om twee nieuwe cellen te vormen en hoe een cel moet reageren als die wordt aangevallen door een ziekmakende schimmel. Maar het DNA is slechts de handleiding; het meeste werk gebeurt door **eiwitten**, ook wel **proteïnen** genoemd.

Naargelang de soort taak die de eiwitten vervullen, hebben biologen ze in verschillende klassen ondergebracht. Zo zijn er onder meer receptoreiwitten die prikkels van buiten de cel kunnen waarnemen en boodschappen kunnen doorsturen naar binnen, structuureiwitten zoals de eiwitbolletjes die dienen om de DNA-draad ordentelijk op te rollen voorafgaand aan de celdeling, en reserveopslag eiwitten zoals gluten in tarwegranen die dienen als voeding voor de kiemplant. Onze favoriete klasse eiwitten zijn de **enzymen**. Je kan ze vergelijken met minirobots die geprogrammeerd zijn om één enkele eenvoudige taak uit te voeren. Aardappelen bevatten enzymen die suikers aaneenhangen tot zetmeel en in ons speeksel helpen enzymen om datzelfde zetmeel van aardappelen terug om te zetten in vrije suikers. We zullen nog heel wat andere soorten enzymen tegenkomen in dit boek, zoals enzymen die kleurstoffen aanmaken, enzymen om de DNA-draad te kopiëren en enzymen om een gebroken DNA-draad te herstellen.

Elk eiwit wordt gemaakt volgens een handleiding die in de DNA-code geschreven staat. Zo'n stukje DNA-code met de handleiding voor één eiwit wordt een **gen** genoemd. Dat verklaart waarom DNA ook wel de drager van genetische informatie wordt genoemd. De studie van hoe DNA werkt heet daarom ook **genetica** en alle DNA in de cel (alle genen samen) noemt men het **genoom**.

Er zitten tienduizenden genen in het DNA van planten, dieren en zwammen. Sommige daarvan, bijvoorbeeld de genen die de celdeling regelen, zitten in alle soorten. Genen die nodig zijn om aan fotosynthese te kunnen doen, vind je wel in planten, maar niet in dieren en zwammen. Nog andere genen vind je dan weer slechts in één of een handvol soorten: de genen om cafeïne aan te maken zitten bijvoorbeeld wel in het DNA van de koffieplant, maar niet in dat van een berk of een hazelaar.¹⁴

Elk van die tienduizenden genen moet eerst worden omgezet naar eiwitten als je wat actie wil. Dat gebeurt in twee stappen. Eerst wordt een gen overgeschreven in de vorm van **RNA**, dat kopietje bevat de info voor de aanmaak van één eiwit. RNA of ribonucleïnezuur is een draadmolecule die sterk verwant is aan DNA, maar slechts één enkele streng heeft in plaats van twee en daardoor minder stevig is dan DNA. Het wordt ook wel **boodschapper-RNA** genoemd, en dat is niet omdat RNA inkopen doet, maar omdat het de boodschap van het DNA naar de plaats in de cel brengt waar eiwitten worden aangemaakt. Overigens zijn er ook genen en RNA die de informatie bevatten voor de aanmaak van meerdere eiwitten en andere genen die wél overgeschreven worden naar RNA maar níét verder naar eiwitten worden vertaald, maar daarop ingaan zou ons te ver leiden.

Waar in de eerste stap de code van het DNA eenvoudigweg overgeschreven wordt naar een vergelijkbare lettercode van het RNA, vindt er in de tweede stap een vertaling plaats van de RNA-code, of dus de DNA-code, naar een eiwitcode. Eiwitten zijn, net als DNA en RNA, ook draadmoleculen, maar in plaats van uit vier letters, zijn ze opgebouwd uit twintig verschillende bouwstenen, de **aminozuren**.¹⁵ (Net zoals DNA- en RNA-letters, zijn ook aminozuren opgebouwd uit atomen.) In de regel bestaat een eiwit uit twee- tot zeshonderd aminozuren. Als alle aminozuren van een eiwit keurig als een ketting aan elkaar hangen, zorgen de chemische interacties tussen die aminozuren ervoor dat het eiwit in een specifieke vorm wordt opgevouwen. Dat is essentieel voor de werking van het eiwit. Het gebeurt ook vaak dat verschillende eiwitten samenwerken, waardoor er grotere eiwitstructuren ontstaan.

De volgorde van de aminozuren is allesbepalend voor een eiwit. Soms kan het veranderen van slechts één aminozuur in een ketting van twee- of zeshonderd aminozuren ervoor zorgen dat het eiwit een andere functie krijgt of helemaal niet meer werkt.

Om de DNA-code die met vier letters geschreven wordt, te vertalen naar de eiwit-code die met twintig bouwstenen geschreven wordt, gebruiken alle levende wezens dezelfde vertaalsleutel. Elke reeks van drie DNA-letters is een code voor één specifiek aminozuur.¹⁶ Zo staat GCC voor de inbouw van het aminozuur alanine en CCG voor het aminozuur proline. De drie-lettercombinaties, ook bekend als codons, moeten elkaar keurig opvolgen.

Een klein verschil in DNA-code tussen twee genen kan een groot verschil betekenen voor de eiwitten die eruit volgen. Laten we daarvoor eens kijken naar twee fictieve minigenen: een eerste met DNA-code GCCGCCGCC en een tweede met DNA-code CCGCCGCC. Het tweede minigen mist de startletter G, maar is voor de rest identiek aan het eerste. Vertaald naar eiwitten, leveren deze minigenen een compleet ander resultaat: het eerste levert het mini-eiwit alanine-alanine-alanine en het tweede proline-proline. (De laatste twee letters, CC, zijn onvoldoende om in een aminozuur te vertalen.)

Ander DNA, zelfde eiwit

Met de vier DNA-letters kun je 64 verschillende drielettercombinaties vormen. Elk van die combinaties komt ook voor in het planten-DNA. Hoe komt het dan dat er maar twintig amino-zuren zijn? Simpel: sommige drielettercombinaties coderen voor hetzelfde aminozuur. Zo zorgen CCG, CCA, CCT en CCC telkens voor het aminozuur proline in het eiwit. Dat zorgt ervoor dat niet elke verandering in de DNA-code een ander eiwit oplevert. In de code CCGCCG mogen de G's veranderen in een willekeurig andere letter – bijvoorbeeld CCACCT, CCTCCC of CCCCCC – zonder dat dat gevolgen heeft voor het eiwit. Het gevormde mini-eiwit blijft in al deze gevallen steeds hetzelfde: proline-proline.

Aangezien uiteindelijk de eiwitten – en niet het DNA op zich – het uitzicht van de plant bepalen, zullen planten met dergelijke verschillen in het DNA exacte kopieën zijn van elkaar. Raar maar waar: verschillend DNA en toch dezelfde plant.¹⁷