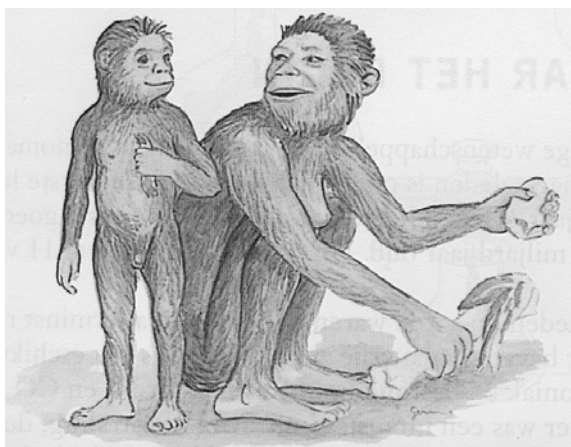


## Examenreader EVOLUTIE



### Inhoud

1	Studiewijzer .....	2
2	Eindtermen evolutie .....	3
3	Opdracht <i>Een fictieve kalender</i> .....	4
4	Antwoorden opdracht <i>Een fictieve kalender</i> .....	5
5	Theorie Populatiegenetica .....	6
5	Oefenvragen over populatiegenetica .....	9
6	Antwoorden van de oefenvragen over populatiegenetica .....	13

## **1      Studiewijzer**

- Bestudeer hoofdstuk 20 van Nectar deel 3.
- Bestudeer onderdeel 5 van deze reader.
- Maak en controleer de oefenvragen uit deze reader.

## **2      Eindtermen Evolutie**

Na het bestuderen van deze stof moet je onderstaande eindtermen beheersen.

Nummering is overeenkomstig het examenprogramma biologie VWO.

De kandidaat kan

- 161 de betekenis van verscheidenheid in een populatie aangeven voor de instandhouding van de populatie.
- 162 de rol uitleggen die selectie speelt bij het constant blijven of veranderen van de verscheidenheid in een populatie.
- 13 aangeven dat ordening mogelijk is op grond van gemeenschappelijke afstamming; in het bijzonder: evolutionaire verwantschap.
- 163 genfrequenties berekenen met behulp van de regel van Hardy-Weinberg.
- 164 aangeven dat men met de evolutietheorie tracht het ontstaan van verschillende levensvormen te verklaren door gebruik te maken van de volgende uitgangspunten:
- mutaties veroorzaken verscheidenheid binnen populaties;
  - er worden meer nakomelingen geproduceerd dan overeenkomt met de draagkracht;
  - de door natuurlijke selectie aan de omstandigheden best aangepaste individuen hebben de grootste overlevingskans;
  - hierdoor verschuiven genfrequenties.
- 165 aangeven dat men met behulp van de evolutietheorie het ontstaan van bepaalde levensvormen tracht te beschrijven door:
- als het ware terug te gaan in de tijd via het bestuderen van fossielen;
  - de relatie tussen 'overeenkomstige' delen van verschillende organismen vast te stellen via vergelijkend morfologisch en ontwikkelingsbiologisch onderzoek en via vergelijking van DNA: homologie, analogie.
- 166 vroegere en huidige opvattingen en ideeën weergeven over het ontstaan van leven en levensvormen; in het bijzonder:
- generatio spontanea;
  - schepping;
  - evolutie.

### **3      Opdracht: een fictieve kalender**

Zet de volgende gebeurtenissen onder elkaar in de kalender in de juiste volgorde en met het juiste bijbehorende tijdstip:

Ontstaan van de melkweg	Eerste vogels	Ontstaan van het zonnestelsel
Grote zoogdieren ontwikkelen sterk	Eerste zoogdieren	Eerste reptielen en bomen
Ontstaan van de aarde	Eerste amfibieën	Ontstaan van leven op aarde
Eerste dinosaurussen	Eerste mens	Eerste oceanische plankton
Eerste insecten	Ongewervelden ontwikkelen zich sterk	Eerste wormen
Eerste cel met kern	Eerste vissen	Big Bang
Eerste bloemen, dinosaurus sterft uit	Planten ontwikkelen op land	Eerste apen
Vorming van zuurstof in de atmosfeer	Oudst bekende fossiel van algen	

1 januari	
1 mei	
9 september	
14 september	
25 september	
9 oktober	
15 november	
29 november	
1 december	
16 december	
17 december	
19 december	
20 december	
21 december	
22 december	
23 december	
24 december	
26 december	
27 december	
28 december	
29 december	
30 december	
31 december	

## **4      Antwoorden opdracht fictieve kalender**

1 januari	Big Bang
1 mei	Ontstaan van de melkweg
9 september	Ontstaan van het zonnestelsel
14 september	Ontstaan van de aarde
25 september	Ontstaan van leven op aarde
9 oktober	Oudst bekende fossiel van algen
15 november	Vorming van zuurstof in de atmosfeer
29 november	Eerste cel met kern
1 december	Eerste oceanische plankton
16 december	Eerste wormen
17 december	Ongewervelden ontwikkelen zich sterk
19 december	Eerste vissen
20 december	Planten ontwikkelen op land
21 december	Eerste insecten
22 december	Eerste amfibieën
23 december	Eerste reptielen en bomen
24 december	Eerste dinosaurussen
26 december	Eerste zoogdieren
27 december	Eerste vogels
28 december	Eerste bloemen, dinosaurus sterft uit
29 december	Eerste apen
30 december	Grote zoogdieren ontwikkelen sterk
31 december	Eerste mens

## 5 Theorie Populatiegenetica

### Als alternatief voor Nectar § 20.4

Organismen maken altijd deel uit van populaties. Terwijl de natuurlijke selectie op het individu werkt - het overleeft of niet - is het de populatie met haar totale genetische variatie die evolueert. Wanneer je de genetische samenstelling van een populatie kent, is het mogelijk voorspellingen te doen over de genetische samenstelling van toekomstige populaties en dus over de toekomst van de soort.

In de populatiegenetica onderzoekt men de verdeling van de allelen in de genen van een populatie. Het totaal aan genen (met al hun allelen) is het **genenreservoir**, vaak aangeduid met de Engelse term **gene pool**. De frequentie waarmee de onderzochte losse allelen voorkomen wordt aangegeven met de **allelfrequentie**. Per onderzoek wordt meestal gekeken naar de **allelenverdeling** van een enkel gen.

Stel dat een populatie bestaat uit 500 planten, waarvan 480 planten rode en 20 planten witte bloemen hebben. Het allel voor rood is dominant (A) en het allel voor wit is recessief (a). De 20 witbloemige planten hebben het genotype aa. Stel ook dat van de 480 overige planten er 320 homozygoot (AA) en 160 heterozygoot (Aa) zijn. Aangezien de planten diploïd zijn, bevinden zich in deze populatie in totaal dan 1.000 allelen die coderen voor bloemkleur.

Daarvan is de **allelenverdeling** dan als volgt:

800 A: namelijk  $320 \times 2$  van de homozygoot rode en  $160 \times 1$  van de heterozygoten.

200 a: namelijk  $20 \times 2 = 40$  van de witte en  $160 \times 1$  van de heterozygoot rode.

De allelfrequentie van A is dan 80% of 0,8 en die van a is 20% of 0,2.

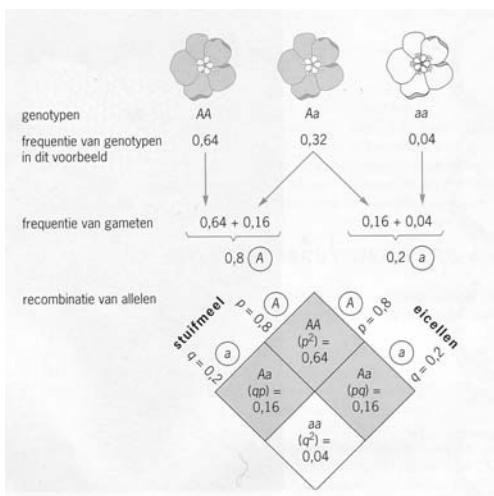
De **allelfrequenties in de diploïde genotypen** is dan

$AA = 0,64$  (64%) =  $0,8 \times 0,8$  (320 van de 500 planten)

$Aa = 0,32$  (32%) =  $2 \times 0,8 \times 0,2$  (160 van de 500 planten) (factor 2 want de heterozygoten kunnen zowel Aa als aA zijn)

$aa = 0,04$  (4%) =  $0,2 \times 0,2$  (20 van de 500 planten)

Als deze planten onderling worden gekruist in volstrekt willekeurige combinaties, zullen de allelen A in 80% van de gevallen met een A gekoppeld worden en in 20% van de gevallen met een a, de allelen a zullen ook in 80% van de gevallen met een A gekoppeld worden en in 20% van de gevallen met een a. Het resultaat is, dat in de volgende generatie opnieuw 64% van de planten homozygoot rood is, 32% heterozygoot en 4% wit bloeit. Dit is weergegeven in figuur 1.



Figuur 1: Als er geen selectie plaatsvindt, dan verandert door seksuele recombinitie de verdeling van de allelen niet.

**Het Hardy-Weinberg-evenwicht**

Uit het bovenstaande blijkt dat als een populatie in evenwicht is en er geen enkele selectie plaatsvindt op één van de beide allelen, deze allelenverdeling gelijk blijft. In theorie kan dit voor eeuwig zijn. Dit wordt het **Hardy-Weinberg-evenwicht** genoemd, naar twee onderzoekers die beiden onafhankelijk van elkaar tot deze conclusie kwamen in 1908.

**De Hardy-Weinberg-vergelijking**

Uit het voorbeeld kunnen we een formule afleiden waarmee de allelfrequenties berekend kunnen worden. Wanneer er van een gen in een populatie twee allelen voorkomen, is het gebruikelijk om voor de frequentie van het ene allel de letter p te gebruiken en voor de andere een q.

In ons voorbeeld is  $p = 0,8$  en  $q = 0,2$ .

$p + q$  is altijd gelijk aan 1, want de som is het totale aantal van de allelen in de betrokken populatie. Dus als er twee allelen zijn en de frequentie van één is bekend, dan kan de frequentie van de ander berekend worden. Dus:

als $p + q = 1$	dan geldt	$p = 1 - q$	en	$q = 1 - p$
-----------------	-----------	-------------	----	-------------

Bij de bevruchting is de kans op combinatie van gameten met allel A, gelijk aan  $p^2$ , de kans op aa is  $q^2$ , en de kans op Aa is  $2pq$ , want a kan bevrucht worden door A en A kan bevrucht worden door a met beide tot resultaat Aa. Dus:

$p^2$ (frequentie van AA)	+	$2pq$ (frequentie van Aa)	+	$q^2$ (frequentie van aa)	= 1
------------------------------	---	------------------------------	---	------------------------------	-----

Wanneer een van de genotypen bekend is, zijn de andere percentages gemakkelijk te berekenen. Bij de planten uit het voorbeeld zijn dat de witte bloemen. Daar is  $q^2 = 0,04$  ;  $q = 0,2$  ;  $p = 0,8$ .

**De Hardy-Weinberg-vergelijking in schema:**

p	+	q	=	1		
kans op allel A		kans op allel a				
$p^2$	+	$2pq$	+	$q^2$	=	1
kans op genotype AA		kans op genotype Aa		kans op genotype aa		

**Populatiegenetica en gezondheid**

De Hardy-Weinberg-vergelijking kan worden gebruikt om binnen een mensen-populatie het percentage te bepalen van een bepaalde erfelijke ziekte.

De ziekte PKU komt bijvoorbeeld voor bij 1 op de 10.000 baby's. Deze ziekte kan – indien onbehandeld – leiden tot geestelijke achterstand en andere problemen. De ziekte wordt veroorzaakt door een recessief allel. In dit geval is  $q^2$  dus 0,0001, dus  $q = 0,01$ . Dan is  $p = 1 - 0,01 = 0,99$ .

De genfrequentie van de dragers, de mensen die heterozygoot zijn voor deze ziekte, is dan  $2 pq = 2 \times 0,99 \times 0,01 = 0,0199$ . Met andere woorden: ongeveer 2% van de bevolking is drager.

Het feit dat de ziekte PKU nog steeds voorkomt, is te verklaren door de grootte van de menselijke populatie. Als de homozygootrecessieven niet deelnemen aan de voortplanting, omdat ze meestal jong sterven, is het aantal heterozygoten nog altijd zo groot dat het allel niet verdwijnt. Kinderen met PKU worden tegenwoordig behandeld, zodat ze normaal op kunnen groeien, dus de frequentie van dit allel zal nu niet meer veranderen.

## **Oorzaken van evolutie**

Het Hardy-Weinberg-model gaat alleen op als aan de volgende voorwaarden wordt voldaan:

- 1 De populatie is groot.
- 2 Er vindt geen emigratie naar en/of immigratie van andere populaties plaats.
- 3 Er vinden geen mutaties plaats.
- 4 Geslachtelijke voortplanting tussen individuen vindt 'at random' plaats - dat wil zeggen er is sprake van een niet selectieve partnerkeuze.
- 5 Er treedt geen natuurlijke selectie op.

Eigenlijk voldoet geen enkele natuurlijke populatie aan deze voorwaarden. En als aan één van deze voorwaarden niet voldaan wordt, dan verandert de allelfrequentie en is er sprake van **evolutie** op kleine schaal. Dus omgekeerd kan geredeneerd worden dat **de volgende mechanismen verantwoordelijk zijn voor evolutie:**

### **1 Kleine populaties:**

In een kleine populatie speelt het toeval bij de verschuiving van allelfrequenties een veel grotere rol dan in een grote. Bij tienmaal een munt opgooien zul je meestal niet 5x kruis en 5x munt krijgen, maar bij 2000 maal gooien is het resultaat wel ongeveer 1000x kruis en 1000x munt. Hoe minder vaak je gooit, hoe meer kans er is op een andere verdeling dan 1 op 1. Hetzelfde fenomeen zie je in zeer kleine populaties. Na enkele generaties kan dan een heel andere allelenverdeling ontstaan.

Dit is bijvoorbeeld het geval geweest toen enkele individuen uit een grotere populatie een eiland of een ander geïsoleerd gebied koloniseerden. Hoe kleiner een populatie van dergelijke kolonisten is, hoe kleiner ook de kans dat zij het complete genereservoir representeren van de grotere populatie waar zij uit emigreerden. Op dergelijke plaatsen komen daarom soms hoge percentages voor van aangeboren afwijkingen: op het eiland Tristan de Cunha komt een aangeboren vorm van blindheid veel meer voor dan elders, doordat één van de stichters van de kolonie drager was. Op Martha's Vinyard, een eiland aan de oostkust van de VS komen erg veel dove mensen voor.

### **2 Emigratie en immigratie:**

Als een populatie niet geheel geïsoleerd is en er genetische uitwisseling plaats vindt met een naburige populatie, kunnen andere allelen in het systeem verschijnen. De allelfrequentie wijzigt hierdoor.

### **3 Mutaties:**

Een mutatie is een verandering in het DNA van een organisme. Een nieuwe mutatie kan het genereservoir van een populatie veranderen. De mutatie kan voor een individu voordeel opleveren. In dat geval kan de frequentie waarin de mutatie voorkomt toenemen.

### **4 Selectieve partnerkeuze bij geslachtelijke voortplanting:**

Wanneer in het bovengenoemde voorbeeld de witte bloemen minder vaak door insecten worden bezocht dan de rode, zal de frequentie van a langzaam kleiner worden, maar als de insecten juist een voorkeur voor wit ontwikkelen neemt de frequentie toe. Zo kan een allel langzaam uit de populatie verdwijnen.

### **5 Natuurlijke selectie:**

Het Hardy-Weinerg model gaat er van uit dat alle individuen in een populatie in gelijke mate nakomelingen produceren. Dit is echter vaak niet het geval. Populaties bestaan namelijk uit individuen met verschillende eigenschappen, waarvan enkele varianten een grotere kan op nakomelingen hebben. Daardoor worden bepaalde allelen vaker doorgegeven dan op grond van hun frequentie verwacht kon worden. Dit is wat Darwin bedoelde met natuurlijke selectie.

## **6 Oefenvragen populatiegenetica**

### **Kun jij een gootje maken?**

- 1 Houd de punt van je tong tussen je lippen, krul de zijkanten van je tong omhoog en steek zo je tong uit. 36% van de Nederlanders kan geen gootje met de tong vormen. Ze zijn homozygoot recessief (tt). De genotypefrequentie van tt is 0,36. Hieruit kun je de frequentie van het recessieve allel t (q) berekenen:  $q = \sqrt{0,36} = 0,6$ . De frequentie van het dominant allel T (p) is 0,4 ( $p + q = 1$ ). De genotypefrequentie van TT is  $p^2$ :  $0,4 \times 0,4 = 0,16$ . Het percentage individuen met het genotype TT is dus 16%.  
Bereken het percentage Nederlanders dat heterozygoot is voor de allelen van deze eigenschap, er van uitgaande dat de populatie in Hardy-Weinberg-evenwicht is.

.....  
.....  
.....  
.....

### **Frequenties en aantallen**

- 2 In een populatie (15,5 miljoen mensen) heeft 4% van de individuen het recessieve fenotype (ee). Bereken de allelfrequenties van E en e.

.....  
.....  
.....  
.....

- 3 Bereken de percentages en de aantallen individuen met de genotypen EE en Ee.

.....  
.....  
.....  
.....

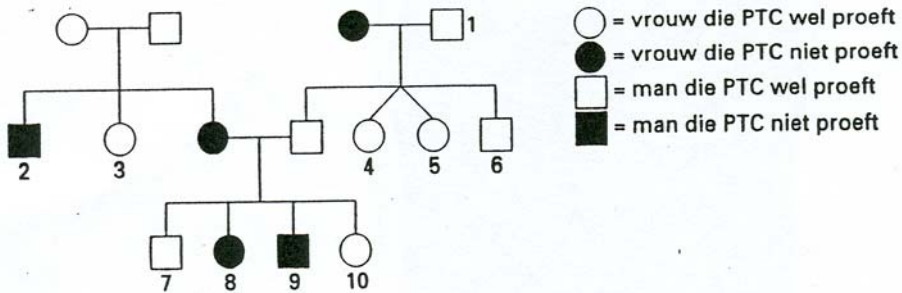
### **Salamanders**

- 4 Biologen laten op een onbewoond eiland 100 salamanders met allelfrequentie  $q = 0,6$  en 200 salamanders met allelfrequentie  $q = 0,8$  los. Er is geen selectie. Wat is de allelfrequentie q na een aantal generaties?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**PTC proeven**

- 5 PTC (phenyl-thio-carbamide) is een stof met een bittere smaak. Het vermogen om PTC te kunnen proeven is erfelijk bepaald. Twee allelen spelen een rol: T voor proeven en t voor niet-proeven. Deze eigenschap beïnvloedt de voortplantingskansen niet. In onderstaande stamboom is een bepaalde familie weergegeven. Sommige leden van deze familie kunnen PTC proeven, anderen niet.



Van welke van de met nummers aangegeven personen is *niet* met zekerheid vast te stellen of deze homozygoot of heterozygoot voor de eigenschap PTC proeven is of zijn?

- A alleen van persoon 3
- B van de personen 1 en 3
- C van de personen 2, 8 en 9
- D van de personen 3, 4, 5, 6, 7 en 10

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

- 6 Het blijkt dat 70% van de wereldbevolking PTC kan proeven. Bereken de frequentie waarmee allel T en die waarmee allel t in de wereldbevolking voorkomt. Geef je antwoord in twee decimalen.

.....

.....

.....

.....

**Bloedgroepen**

7 Onderzoek een populatie aboriginals op het punt van de bloedgroepen M en N:

aantallen aboriginals met bloedgroep		
M	MN	N
241	604	195

Is deze populatie in Hardy-Weinberg evenwicht?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

8 Noem drie mogelijke oorzaken van het niet in evenwicht zijn van een populatie.

.....  
.....  
.....  
.....

**Veranderende omstandigheden**

9 In een geïsoleerde populatie van een bepaalde diersoort is gedurende een bepaalde periode de frequentie van het dominante allel R  $\frac{1}{2}$  en van het bijbehorende recessieve allel r ook  $\frac{1}{2}$ . Aanwezigheid van het ene allel in het genotype biedt gedurende deze periode geen selectie-voordeel boven aanwezigheid van het andere allel. Bereken welk deel van deze populatie het genotype Rr heeft.

.....  
.....  
.....

10 Alle individuen van deze populatie paren. Er wordt een groot aantal jongen geboren. Het merendeel van deze jongen paart weer onderling waardoor een nieuwe generatie ontstaat. Hoe zal volgens de regel van Hardy-Weinberg de frequentie van de allelen R en r zijn in deze derde generatie?

- A De frequentie van de allelen R en r zal onveranderd zijn.
- B De frequentie van allel R zal zijn toegenomen.
- C De frequentie van allel r zal zijn toegenomen.
- D De frequentie van de allelen R en r zal veranderd zijn, maar het is niet te zeggen van welk van de allelen de frequentie zal zijn afgenomen of toegenomen.

.....  
.....  
.....

- 11 Op een bepaald moment veranderen de omstandigheden in deze populatie. Dieren met het fenotype dat door de recessieve allelen wordt veroorzaakt, ondervinden nu minder selectiedruk dan dieren met een ander fenotype voor deze eigenschap. Blijft de frequentie van allel  $r$  in de populatie dan gelijk of neemt de frequentie af of toe? Geef een verklaring voor je antwoord.

.....  
.....  
.....  
.....

**Albinisme**

- 12 Een bepaalde vorm van albinisme berust op een afwijking van een enkel gen. Het allel is recessief ten opzichte van normale pigmentatie. De frequentie van dit recessieve allel is 0,01. Twee ouders met normale pigmentatie krijgen een kind. Er wordt van uitgegaan dat er geen mutaties optreden. Bereken nauwkeurig hoe groot de kans is dat dit kind deze vorm van albinisme heeft.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**Resusantagonisme**

***Maak om jezelf te testen de volgende vraag ALLEEN:***

- 13 Mensen die resusnegatief zijn hebben het genotype  $dd$ . Resuspositieve mensen hebben het genotype  $DD$  of  $Dd$ . In Midden-Europa is de allelfrequentie van  $d$ : 0,4. Als een resusnegatieve vrouw een kind verwacht dat resuspositief is, is er sprake van een zogenaamd resusantagonisme. Bereken het percentage van de zwangerschappen in Midden-Europa waarin resusantagonisme optreedt.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

## 7      Antwoorden van de oefenvragen over populatiegenetica

- 1 De totale populatie is 100%. Het aantal heterozygoten is dus  $100 - (36 + 16) = 48\%$ .  
Of: De genotypenfrequentie van de heterozygoten is  $2pq: 2 \times 0,4 \times 0,6 = 0,48$ .
- 2 De genotypenfrequentie van ee is 0,04. Met Hardy-Weinberg kun je de frequentie van het recessieve allel e (q) berekenen:  $q = \sqrt{0,04} = 0,2$ . De frequentie van het dominante allel E (p) is 0,8 ( $p+q=1$ ).
- 3 De genotypenfrequentie van EE is  $p^2 = 0,8 \times 0,8 = 0,64$ . Het percentage individuen met het genotype EE is dus 64%. Op de 15,5 miljoen mensen zijn dat 9,92 miljoen mensen. De genotypenfrequentie van de heterozygoten (Ee) is  $2pq = 2 \times 0,8 \times 0,2 = 0,32$ . Op de 15,5 miljoen mensen zijn dat 4,96 miljoen mensen.
- 4 Zonder selectie is de populatie in Hardy-Weinberg-evenwicht. Na het samenbrengen van de groepen op het onbewoond eiland (vooropgesteld dat er nog steeds Hardy-Weinberg-evenwicht heerst) is de allelfrequentie van q:  $((100 \times 0,6) + (200 \times 0,8))/300 = 0,73$ .
- 5
- Vraag je eerst af of het om een X-chromosomaal gen gaat: persoon 6 heeft het Y-chromosoom van zijn vader; hij heeft ook allel T van zijn vader maar niet het X-chromosoom; dus de allelen t en T zijn niet X-chromosomaal.
  - Gegeven is dat alle met zwart aangegeven personen PTC niet kunnen proeven. Het niet kunnen proeven is recessief (t). Dus de personen 2, 8 en 9 hebben genotype tt.
  - De personen 4, 5, 6, 7 en 10 kunnen PTC proeven. Dus zij hebben het allel T. Van hun moeders, met genotypen tt, hebben zij het allel t. Dus de personen 4, 5, 6, 7 en 10 hebben het genotype Tt.
  - Persoon 2 heeft genotype tt. Dus zijn ouders zijn heterozygoot . Dus van persoon 3 kan niet met zekerheid worden vastgesteld of zij heterozygoot (Tt) of homozygoot dominant (TT) is.
  - Persoon 1 kan PTC proeven. Dus persoon 1 heeft minstens één allel T. Geen van de kinderen heeft genotype tt. Dus van persoon 1 is niet met zekerheid vast te stellen of het tweede allel T of t is.
- Dus antwoord: B.
- 6 Als 70% van de wereldbevolking PTC kan proeven, kan 30% dat niet. Deze 30% is homozygoot recessief (tt).  
Dus  $tt = q^2 = 0,3$ . Dus  $q = \sqrt{0,3} = 0,55$ . Dan is  $p = 0,45$  (want  $p + q = 1$ ).  
Dus de frequentie waarmee T in de wereldbevolking voorkomt is 45% en de frequentie waarmee t in de wereldbevolking voorkomt is 55%.

7

Genotype-Frequentie	Genotype-frequentie	Genotype-Frequentie
$L^M L^M$ (bloedgroep M)	$L^M L^N$ (bloedgroep MN)	$L^N L^N$ (bloedgroep N)
$241/1040 = 0,231$	$604/1040 = 0,581$	$195/1040 = 0,188$

Er is sprake van Hardy-Weinberg-evenwicht als:  $p + q = 1$ .

$p = \sqrt{0,231} = 0,481$ .  $q = \sqrt{0,188} = 0,433$ .  $p + q = 0,914$ .

In de populatie is ( $p + q$ ) niet gelijk aan 1, dus is de populatie niet in Hardy-Weinberg-evenwicht.

- 8
- Selectie: wanneer bijvoorbeeld de homozygote bloedgroep N verminderd vruchtbaar is, zal het aandeel van dit genotype in volgende generaties afnemen:  $q^2$  wordt kleiner.
  - mutaties: door spontane veranderingen in allelen  $L^M$  en  $L^N$  veranderen ook  $p$  en  $q$ .
  - emigratie / immigratie: wanneer individuen uit de populatie wegtrekken, of er individuen bijkomen zullen  $p$  en  $q$  ook veranderen. De kans is immers heel klein dat er verhoudingsgewijs precies evenveel individuen van elk genotype bijkomen of wegtrekken.
- Nota Bene: In het geval van de aboriginalpopulaties zijn de genotypefrequenties van generatie op generatie nauwelijks veranderd. Dit wijst in de richting van Hardy-Weinberg-evenwicht. Dat  $(p + q)$  niet gelijk is aan 1 (een vereiste voor evenwicht) is waarschijnlijk te wijten aan de relatief kleine populatiegrootte en een zeer kleine emigratie of immigratie.
- 9
- $p^2 : 2pq : q^2 = RR : Rr : rr$   
Dus  $2pq = Rr = 2 \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$   
Dus de helft van de populatie heeft genotype Rr.
- 10
- De regel van Hardy-Weinberg is: binnen een grote populatie met willekeurige paring blijven de allelfrequenties gelijk indien geen selectie-voordeel van het ene allel boven het andere allel aanwezig is. De frequentie van de allelen R en r zal dus onveranderd zijn. Dus antwoord: A.
- 11
- De frequentie van allel r zal toenemen. Want door verminderde selectiedruk bereiken meer dieren met het recessieve fenotype de geslachtsrijpe leeftijd (en wordt dus vaker het recessieve allel doorgegeven).
- 12
- Een kind kan alleen deze vorm van albinisme hebben als beide ouders drager zijn **en** het recessieve allel doorgeven.
- De kans dat één ouder drager (heterozygoot) is:  $2pq$
  - De kans dat beide ouders drager zijn:  $2pq \times 2pq$
  - De kans dat beide ouders het recessieve allel doorgeven:  $\frac{1}{4}$
  - $q = 0,01$ , dus  $p = 0,99$
- Dus de kans dat een kind deze vorm van albinisme heeft is:  $2pq \times 2pq \times \frac{1}{4} = (2 \times 0,01 \times 0,99) \times (2 \times 0,01 \times 0,99) \times \frac{1}{4} = 0,000098 (= 0,0098\%)$
- 13
- Er treedt resusantagonisme op als een resusnegatieve vrouw (dd) een resuspositief kind (DD of Dd) krijgt. Dit kan alleen als de vader DD is **of** als vader Dd is **en** D doorgeeft.
- In de populatie is de allelfrequentie van d: 0,4. Dit is  $q$ . Dus  $p = 0,6$ .
  - De kans dat moeder resusnegatief (dd) is:  $q^2$
  - De kans dat vader dominant resuspositief (DD) is:  $p^2$
  - De kans dat vader heterozygoot resuspositief (Dd) is en het recessieve allel doorgeeft:  $2pq \times \frac{1}{2}$ .
- Dus de kans dat er resusantagonisme optreedt is:  $q^2 \times (p^2 + (2pq \times \frac{1}{2})) = 0,4^2 \times (0,6^2 + (2 \times 0,6 \times 0,4 \times \frac{1}{2})) = 0,096 = 9,6\%$