

Genetisk diversitet

FAGTEKST

Fag: Biologi og bioteknologi | Antal normalsider: 6,5 | Skrevet af: Center for Makroøkologi, Evolution og Klima

Find forklaringer på begreber i listen på sidste side.

Læseformål

Når du har læst teksten og tolket figurerne, skal du kunne:

- definere begrebet genetisk diversitet.
- forklare, hvorfor genetisk diversitet er en vigtig del af biodiversiteten.
- redegøre for, hvordan man kan beregne genetisk diversitet.
- redegøre for, hvordan den genetiske diversitet fordeler sig på Jorden.
- redegøre for de processer og faktorer, som påvirker den genetiske diversitet.

1 | Hvad er genetisk diversitet?

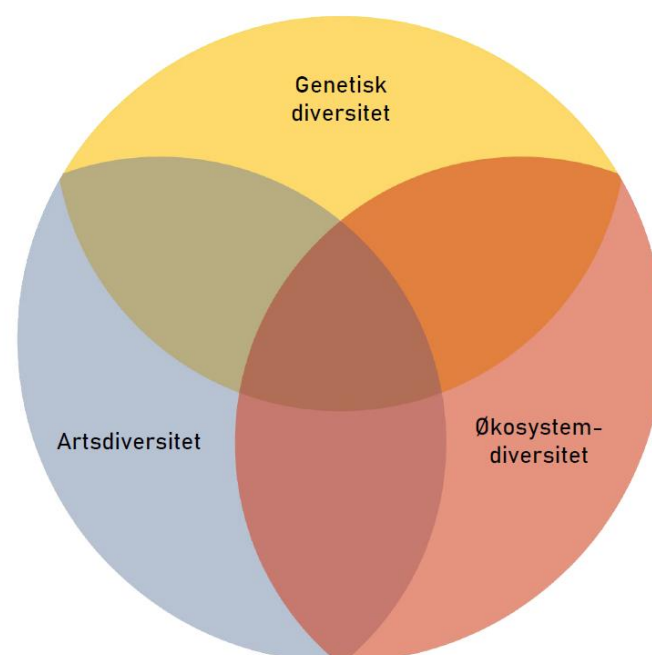
Alle levende organismer har DNA i alle deres celler.

DNA'et består af lange sekvenser af fire nukleotider – A, G, T og C – i en bestemt rækkefølge. Den genetiske information i levende organismer findes i deres DNA, og hver enkelt organismes DNA er helt unikt.

Genetisk diversitet er forskellighed i DNA mellem forskellige individer, fx mellem en zebra og en anden zebra. Eller mellem en zebra og dig.

Genetisk diversitet er en del af biodiversiteten, ligesom artsdiversitet og økosystemdiversitet (figur 1).

De tre niveauer af biodiversitet hænger sammen. Fx vil et naturområde med en lav økosystemdiversitet normalt også have en lav artsdiversitet med få individer. Hvis antallet af individer er meget lavt, så vil der typisk også være en lav genetisk diversitet.



Figur 1 Biodiversitetens tre niveauer: Artsdiversitet, økosystemdiversitet og genetisk diversitet. Biodiversitet handler altså om alle arterne af fx planter, dyr og svampe, og om de økosystemer, som arterne er en del af, fx en sø eller en regnskov. Men biodiversitet handler i lige så høj grad om diversiteten i det genetiske materiale, som arterne i økosystemerne bærer rundt på.

1.1 | Hvorfor er genetisk diversitet vigtigt?

Genetisk diversitet er ikke noget, som man kan se, optælle eller vurdere med det blotte øje. Men genetisk diversitet er vigtig at forstå, fordi det er en del af livets mangfoldighed, som sammen med arterne og økosystemerne udgør den samlede biodiversitet (figur 1).

Den genetiske diversitet kan have forskellige betydninger for forskellige arter eller populationer. I nogle tilfælde kan et tab af genetisk diversitet være problematisk for en art. Det kan fx være tilfældet, hvis en population bliver så lille, at de individer, som reproducerer, er tæt beslægtede med hinanden.

Det kaldes indavl. Hvis individerne i en indavlet population bærer på skadelige gener, så kan indavl have negative konsekvenser for populationens overlevelse. Det kalder man indavlsdepression.

Men det er langt fra tilfældet for alle arter eller populationer. Der findes nemlig mange arter, fx geparden eller isbjørnen, som trives på trods af en meget lav genetisk diversitet. Mange af disse arter har også klaret sig godt igennem flere istider og globale klimaforandringer. Lav genetisk diversitet kan altså være et tegn på, at arten er fantastisk godt tilpasset til sit miljø. Ofte fordi arten har klaret sig igennem et pres, som arten så er blevet “specialiseret” i.

Forskerne ved altså stadig ikke alt om, hvad det vil betyde for en art eller population, hvis den genetiske diversitet ændrer sig. Der findes nemlig mange eksempler på, at genetisk diversitet kan have forskellig betydning afhængig af arten og dens miljø.

Derfor er det vigtigt, at vi bliver klogere på arternes genetiske diversitet. Hvis vi vil forstå biodiversiteten, så skal vi også forstå den genetiske diversitet og de mekanismer, som er med til at forme den.

1.2 | To slags genetisk diversitet

Der findes overordnet to typer genetisk diversitet:

- Interspecifik genetisk diversitet: Genetisk diversitet mellem individer, som ikke er samme art.
- Intraspecifik genetisk diversitet: Genetisk diversitet mellem individer af den samme art.

Interspecifik genetisk diversitet bruges typisk til at forstå, hvordan forskellige arter er beslægtede med hinanden. Intraspecifik genetisk diversitet bruges derimod af forskere, når de vurderer en populations eller en arts modstanddygtighed.



På den afrikanske savanne lever giraffer tæt sammen med rødnebbede oksehakkere. Den genetiske diversitet mellem to rødnebbede oksehakkere er intraspecifik, fordi de er samme art. Den genetiske diversitet mellem en rødnebbet oksehakker og en giraf er interspecifik, fordi de er to forskellige arter. Foto: Birger Strahl.

2 | Hvordan beregner forskerne den genetiske diversitet?

Når forskerne skal undersøge genetisk diversitet, så er der to basale fremgangsmåder: Dataindsamling og beregning af genetisk diversitet.

2.1 | Indsamling af data

Når forskerne indsamler data om genetisk diversitet, gør de typisk brug af en eller flere af følgende fremgangsmåder:

- Databaser: Der eksisterer et hav af enorme online genetiske databaser med DNA-sekvenser fra millioner af forskellige arter og gener. Data stammer fra andre forskeres tidligere arbejde med at sekventere DNA i laboratorier og derefter digitalisere det, så det kan tilgås fra hele verden.
- Feltarbejde: Hvis data ikke allerede findes i databaser, så kan forskerne indhente nye data ved at tage prøver i felten fra jord, vand, planter, dyr eller svampe. Prøverne fragtes til et laboratorium, hvor DNA'et i dem bliver sekventeret.
- Videnskabelige samlinger: Naturhistoriske museer verden over rummer store, videnskabelige samlinger med millioner af organismer, som gennem tiden – og fra forskellige steder på Jorden – er blevet indsamlet og konserveret. Prøver fra organismerne, det kan fx være fugle, planter eller svampe, kan DNA-sekventeres i laboratoriet.



Forskellige fremgangsmåder i arbejdet med genetisk diversitet. Venstre: En søgning i en genetisk database. Midten: Foto fra det sydlige Ecuador i 2017, hvor forskere fra Center for Makroøkologi, Evolution og Klima på Københavns Universitet var på feltarbejde for at samle prøver. Foto: Jesper Sonne. Højre: Fugle fra den videnskabelige samling på Statens Naturhistoriske Museum i København. Forskere kan tage prøver fra fuglenes fjer eller væv til fx DNA-analyser. Foto: Birgitte Rubæk.

2.2 | Beregning af genetisk diversitet

Første skridt, når forskerne skal analysere deres datasæt af DNA-sekvenser, er at beregne den genetiske diversitet.

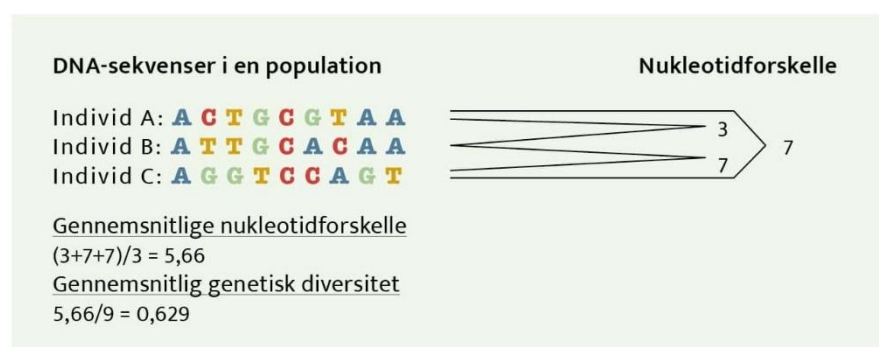
Genetisk diversitet beregnes typisk som gennemsnitlig genetisk diversitet. Her divideres det gennemsnitlige antal af nukleotidforskelle mellem DNA-sekvenserne med DNA-sekvensernes individuelle længde (figur 2 viser et eksempel på sådan en beregning). Det endelige tal for den gennemsnitlige genetiske diversitet har altså enheden antal DNA-

forskelle pr. nukleotid, men normalt skriver man kun tallet uden denne lange enhed.

Når forskere arbejder med genetisk diversitet, så er datasættene ofte så store – og DNA-sekvenserne så lange – at de må bruge enorm computerkraft for at udføre beregningerne. Men uanset hvor stort et datasæt og hvor stor computerkraft forskerne arbejder med, så bruger de den samme formel til at beregne genetisk diversitet.

Efter beregningen analyserer forskerne deres resultater. Analyserne kan benyttes til at lave modeller, simuleringer, udgive videnskabelige artikler eller til at stille nye spørgsmål og opstille nye hypoteser.

På hjemmesiden www.globalgenetik.dk kan du se et eksempel på en interaktiv model, som biodiversitetsforskere har udviklet på baggrund af beregninger af genetisk diversitet.



Figur 2 Sådan beregnes genetisk diversitet. I dette eksempel er der DNA-sekvenser fra tre individer. Alle sekvenserne har en længde på 9 nukleotider. Der er 3 nukleotidforskelle mellem individ A og B, 7 mellem individ B og C og 7 mellem individ A og C. Gennemsnittet af nukleotidforskelle mellem de tre individers DNA-sekvenser er altså $(3+7+7)/3 = 5,66$ nukleotider. Den gennemsnitlige genetiske diversitet for de tre individer findes ved at dividere gennemsnittet af nukleotidforskelle med DNA-sekvensernes individuelle længde, altså $5,66/9 = 0,629$.

2.3 | Hvornår er den genetiske diversitet høj eller lav?

Hvis du har prøvet at beregne genetisk diversitet, så står du tilbage med en talværdi, fx 0,0013. Er det så et højt eller et lavt tal? Det er et relevant spørgsmål, som dog er svært at svare entydigt på.

Hvis en population af pattedyr har en genetisk diversitet på 0,05, så vil man typisk betegne den som ret høj. Omvendt vil en genetisk diversitet på 0,001 – altså 50 gange lavere – betegnes som ret lav. Men for andre organismegrupper end pattedyr kan det se helt anderledes ud. Fx har de fleste arter af svampe meget højere genetisk diversitet end pattedyr.

Men blot fordi en population har en lav genetisk diversitet, betyder det ikke, at populationen er dømt til at klare sig dårligt eller sågar uddø. Lav genetisk diversitet kan nemlig have helt forskellige betydninger fra art til art eller fra population til population. For nogle arter vil en lav genetisk diversitet resultere i indavl, hvilket kan have negative konsekvenser for deres overlevelse. For andre arter kan en lav genetisk diversitet dog betyde, at de er rigtig godt tilpasset til lige netop det miljø, som de lever i.

Der findes ikke en specifik grænse for, hvornår du kan sige, at den genetiske diversitet er ”høj nok” til, at en art har det godt.



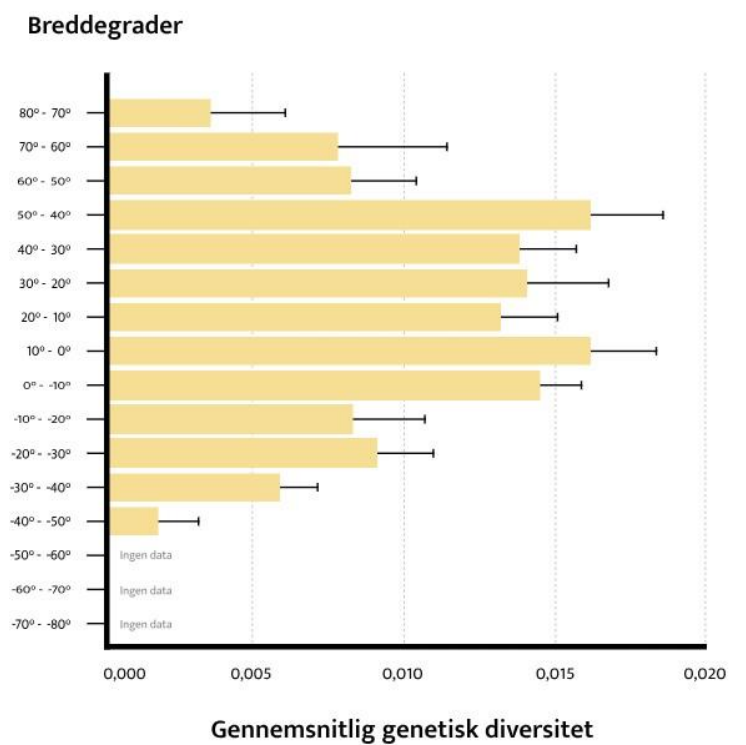
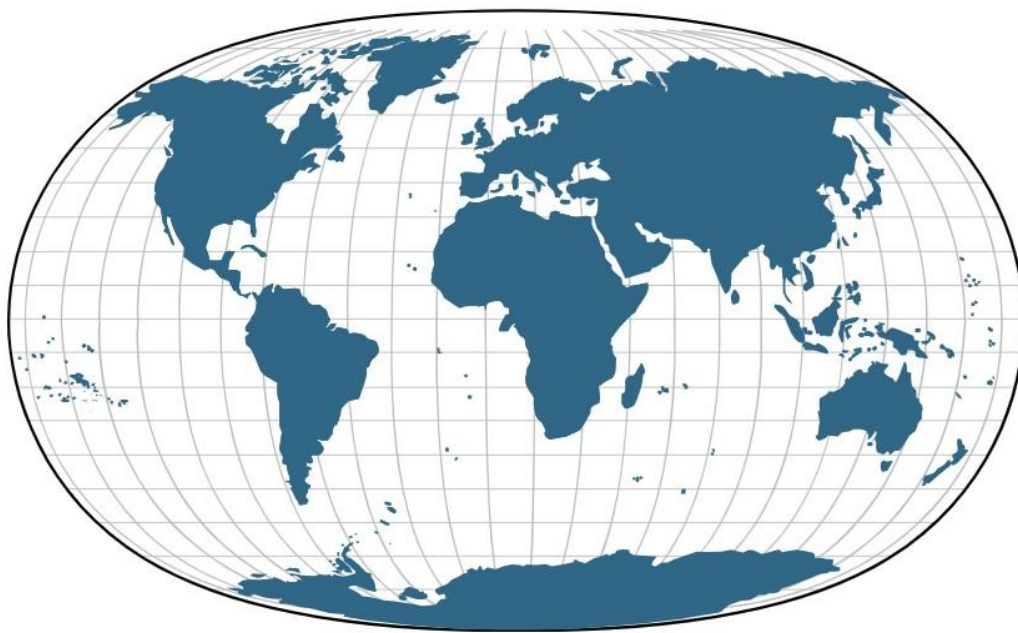
Den afrikanske gepard (Acinonyx jubatus), landjordens hurtigste dyr, har i tusinder af år levet med små populationsstørrelser, indavl og lav genetisk diversitet. Men alligevel har arten klaret sig. Det viser os, at det er forskelligt fra art til art, hvornår den genetiske diversitet er ”høj nok”. Foto: Paul Mckenzie.

3 | Hvordan fordeler den genetiske diversitet sig på Jorden?

Figur 3 viser fordelingen af intraspecifik genetisk diversitet for pattedyr for det gen, som koder for proteinet cytokrom b. På figuren ses det, at den genetiske diversitet er højest i troperne, og den aftager mod polerne. Det gælder også for flere andre dyregrupper.

Forskerne har flere hypoteser for, hvorfor den genetiske diversitet er højest i troperne. En af hypoteserne handler om, at den genetiske diversitet er højest dér på Jorden, hvor temperaturen er højest. Det kan hænge sammen med, at nogle biologiske processer kan foregå hurtigere, når der er varmt, fx mutationer i DNA. Det kan så resultere i, at der hurtigere skabes en højere genetisk diversitet, både inter-specifik og intraspecifik.

Selvom den genetiske diversitet generelt er højest i troperne, så findes der naturligvis lokale forskelle, som opstår pga. biologisk variation og lokale forskelle i fx klima og geologi. Den genetiske diversitet er også forskellig afhængigt af, hvilken del af organismernes DNA-sekvens, man kigger på. På figur 3 nedenfor ser man eksempelvis kun på den genetiske diversitet for et enkelt gen (cytokrom b), og mønstret vil muligvis se anderledes ud, hvis man kiggede på andre gener.



Figur 3 Genetisk diversitet er typisk højest omkring Ækvator og aftager mod polerne. På søjlediagrammet til højre ses den intraspecifikke genetiske diversitet for pattedyr for genet, der koder for cytokrom b, der findes i mitokondrier. Data fra artiklen "An Anthropocene map of genetic diversity" af Miraldo m.fl. (Science, 2016).

4 | Hvad bestemmer den genetiske diversitet på Jorden?

Den genetiske diversitet på Jorden er formet gennem flere millioner års samspil mellem arterne og mellem arterne og deres omkringliggende miljø. Der findes fire evolutionære kræfter, som er med til at bestemme den genetiske diversitet over tid:

- Selektion
- Mutationer
- Genetisk drift
- Genflow

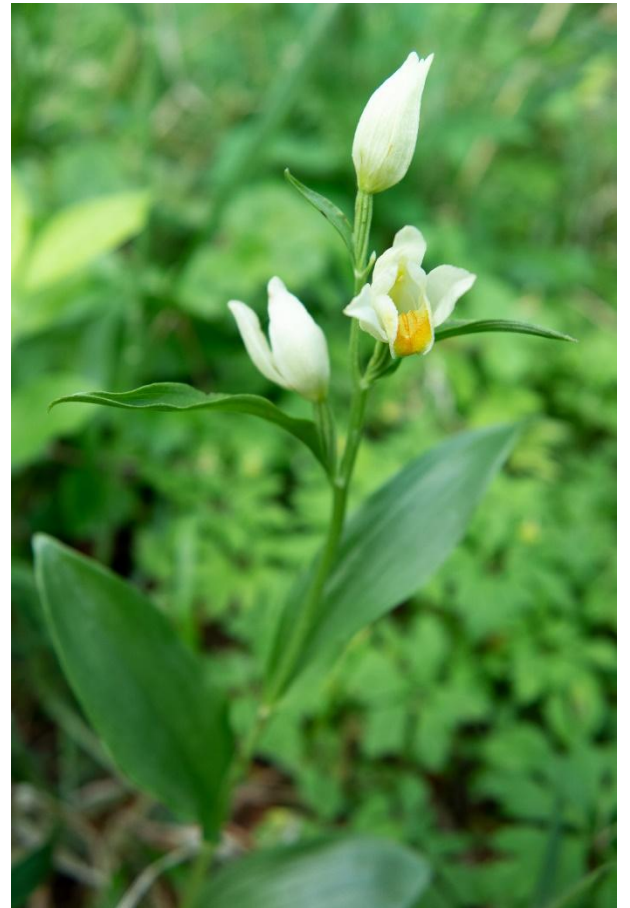
Der er tale om et komplekst samspil mellem de fire kræfter, og de kan endda virke modsatrettede, fx naturlig selektion og genetisk drift. Så selvom du i de næste afsnit kan læse om de fire kræfter hver for sig, så skal du vide, at de foregår samtidigt i en kompleks dynamik over tid.

4.1 | Naturlig selektion

Naturlig selektion er betegnelsen for, at individer med forskellige varianter af gener har forskellige evner til at reproducere og overleve, fordi de genvarianter, som er mest gavnlige, hjælper individerne med at overleve. Det betyder, at de gavnlige genvarianter har større sandsynlighed for at blive overført til kommende generationer end de ikke-gavnlige varianter af gener.

Over tid fører naturlig selektion altså til, at de gavnlige varianter af gener bliver mere og mere almindelige i en population. Derfor er naturlig selektion nøgleprocessen bag tilpasning, som betyder, at populationer over tid bliver bedre egnede til at klare sig i deres miljø.

Det er vigtigt at understrege, at gavnligheden af genvarianter skal forstås som et samspil med det miljø, som populationen befinder sig i. En bestemt variant af et gen kan altså være gavnlig i ét miljø, men neutral eller ligefrem skadelig i et andet. Dette er et eksempel på samspillet mellem genetisk variation og økosystemet.



Orkidéen hvidgul skovlilje (*Cephalanthera damasonium*), som i Danmark vokser i kalkrig jord i løvskov og krat, ofte tæt ved kysten. Foto: Jesper Sonne.

4.2 | Mutationer

Mutationer er de tilfældige ændringer i DNA-sekvenser, som opstår, når et individs genom replikeres. Nye genetiske varianter kan på den måde opstå via mutationer i DNA. Men mutationsraten hos langt de fleste arter er dog så lav, at mutationerne har en næsten ubetydelig effekt på populationers genetiske diversitet på kortere sigt. Det kan tage hundreder, tusinder eller hundredtusinder af generationer, før mutationer kan genopbygge genetisk diversitet, som er tabt fx ved en genetisk flaskehals.

Nogle mutationer er neutrale, hvilket betyder, at de ikke er påvirket af selektion. Andre mutationer er funktionelle, fordi de netop er påvirket af selektionen. Man kan derfor tale om hhv. neutral genetisk diversitet ("baggrundsdiversitet") eller funktionel genetisk diversitet. Det er altså ikke al genetisk diversitet, som spiller en rolle; kun den funktionelle genetiske diversitet er afgørende for en arts eller en populations modstanddygtighed.

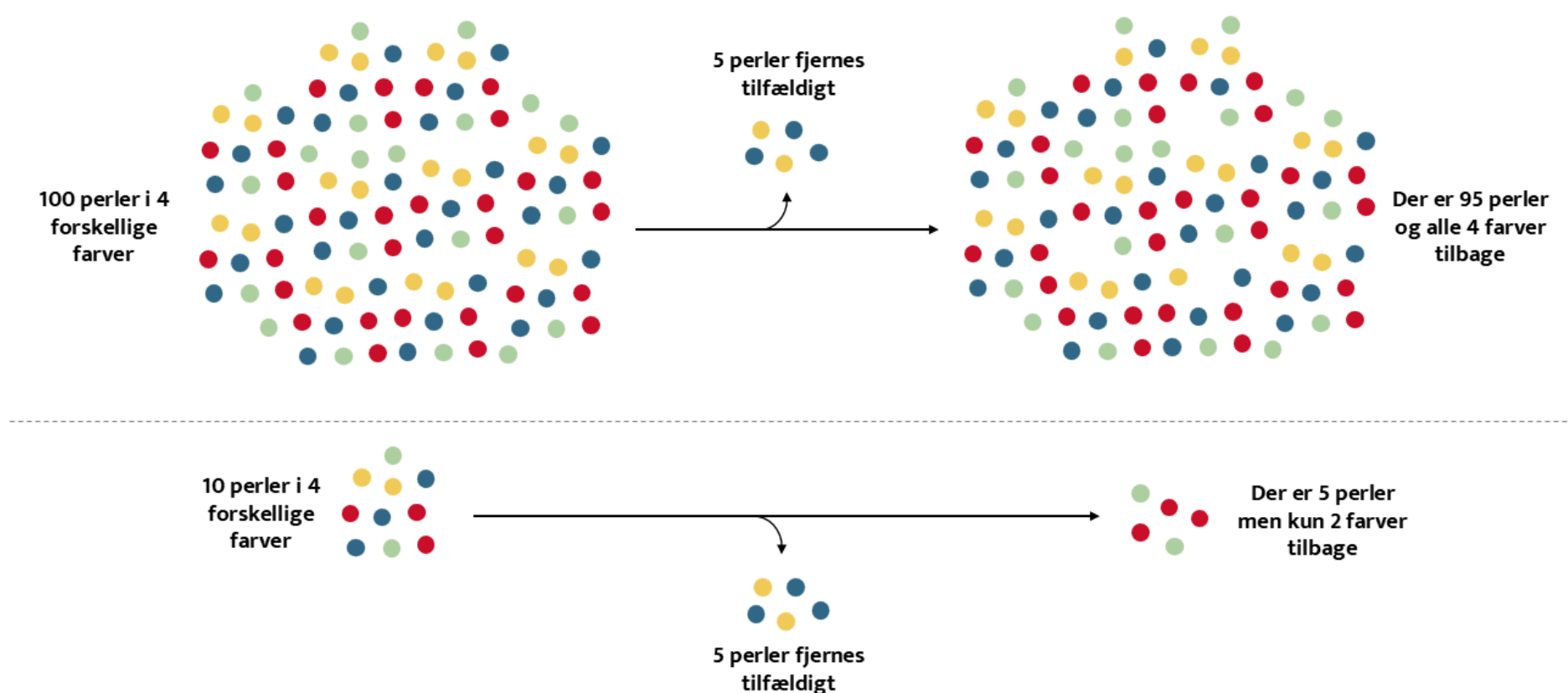
Selektion kan dog ændre sig over tid, fx hvis en ny sygdom opstår. Det kan medføre, at mutationer, som førhen var neutrale, pludselig bliver udsat for selektion og dermed bliver funktionelle. Eksempelvis kan de medføre resistens overfor sygdommen, og dermed føre til øget overlevelse.

4.3 | Genetisk drift og flaskehalse

Genetisk drift (figur 4) er en proces, hvor helt tilfældige hændelser påvirker hvilke gener, der bliver mere eller mindre almindelige i en population over tid. Ved genetisk drift er det helt tilfældigt, hvilke individer der lykkes med at videregive deres gener, og hvilke individer der ikke gør. Og derfor kan selv gavnlige gener og genvarianter forsvinde helt ud af en population.

Genetisk drift fører altid til et tab af genetisk diversitet over tid, og tabet vil være større, jo mindre populationen er (som vist i figur 4).

En population kan derfor risikere at miste mange genetiske varianter i løbet af kort tid, hvis den pludselig falder drastisk i populationsstørrelse. Det kaldes en genetisk flaskehals. En genetisk flaskehals behøver i sig selv ikke at være negativt. Det kan nemlig også resultere i, at populationen bliver fantastisk godt tilpasset til at klare lige netop det miljø og de udfordringer, som den står overfor. Men det er klart, at det vil påvirke populationens overlevelse negativt, hvis de gener, som er tilovers i populationen efter en flaskehals, er skadelige.



Figur 4 Genetisk drift kan forklares som et eksempel med perler i forskellige farver, hvor hver farve repræsenterer gener. Øverst ses det, at når man tilfældigt fjerner fem perler fra en bunke med 100 perler i fire forskellige farver, så har det ikke en særligt stor konsekvens – efterfølgende er alle fire farver nemlig stadig tilbage i bunken af 95 perler. Nederst ses det derimod, at når man tilfældigt fjerner fem perler fra en bunke med kun ti perler, så kan det have meget større konsekvenser – der er nu kun to farver tilbage i bunken (rød og grøn). Altså: Hvis du helt tilfældigt fjerner nogle perler fra hver bunke, så vil den lille bunke miste flere farver meget hurtigere, end den store. Det vil altså sige, at genetisk drift har større negative konsekvenser i en lille population end i en stor.

4.4 | Genflow

Genflow er en proces, som finder sted, når genetisk materiale flytter sig mellem to eller flere populationer. Genflow kan foregå, når to populationer er adskilte af en geografisk barriere, fx en bjergkæde, men stadigvæk har mulighed for at bevæge sig mellem hinanden, fx gennem et bjergpas. Dermed kan de to populationer nemlig reproducere med hinanden, og deres genetiske materiale kan blandes mere eller mindre sammen.

Fordi genflow bringer nye genetiske varianter ind i modtagerpopulationen, så øger genflow altså den intraspecifikke genetiske diversitet i modtagerpopulationen – særligt hvis de to populationer genetisk er meget forskellige fra hinanden.



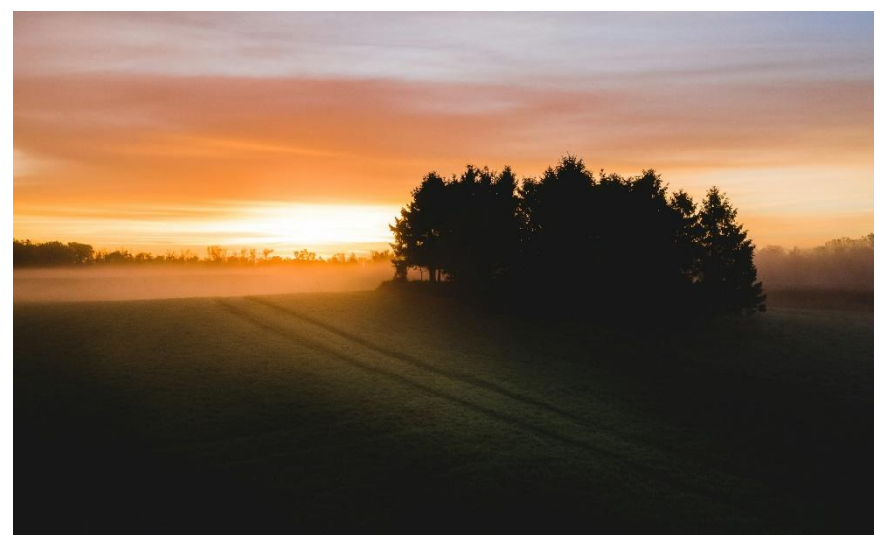
Kongepingviner (*Aptenodytes patagonicus*) ved Det Sydlige Georgia og De Sydlige Sandwichøer øst for Sydamerikas sydspids og Den Antarktiske Halvø. Foto: Rod Long.

Den genetiske diversitet på Jorden er altså resultatet af et komplekst samspil mellem de fire evolutionære kræfter: Naturlig selektion, mutationer, genetisk drift og genflow. Kræfterne finder sted samtidigt, men i varierende grad. Fx er effekten af mutationer på den genetiske diversitet meget lille på kort sigt, hvorimod genflow som regel spiller en større rolle.

5 | Andre faktorer

Genetisk diversitet kan også blive påvirket af andre faktorer. Fx kan klimaforandringer tvinge populationer til at flytte sig og tilpasse sig nye miljøer, hvilket vil påvirke deres genetiske sammensætning.

Geografisk isolation, altså når populationer bliver adskilt fra hinanden, er også en faktor, som påvirker den genetiske diversitet. Det skyldes, at populationerne dermed opdeles i mindre populationer, som i nogle tilfælde vil være kraftigere påvirket af genetisk drift end store populationer (figur 4 ovenfor). Desuden blokeres genflow mellem populationer, hvis de



Figur 5 På billedet kan du se et meget klassisk dansk landskab, som er domineret af dyrkede marker. Skoven er brudt op i små bevoksninger, som ligger tilbage som små "øer" af træer midt på marken. Det kan føre til geografisk isolation af de populationer, som lever i de små bevoksninger, hvilket kan påvirke den genetiske diversitet. Boserup Skov ved Roskilde. Foto: Andreas Rasmussen.

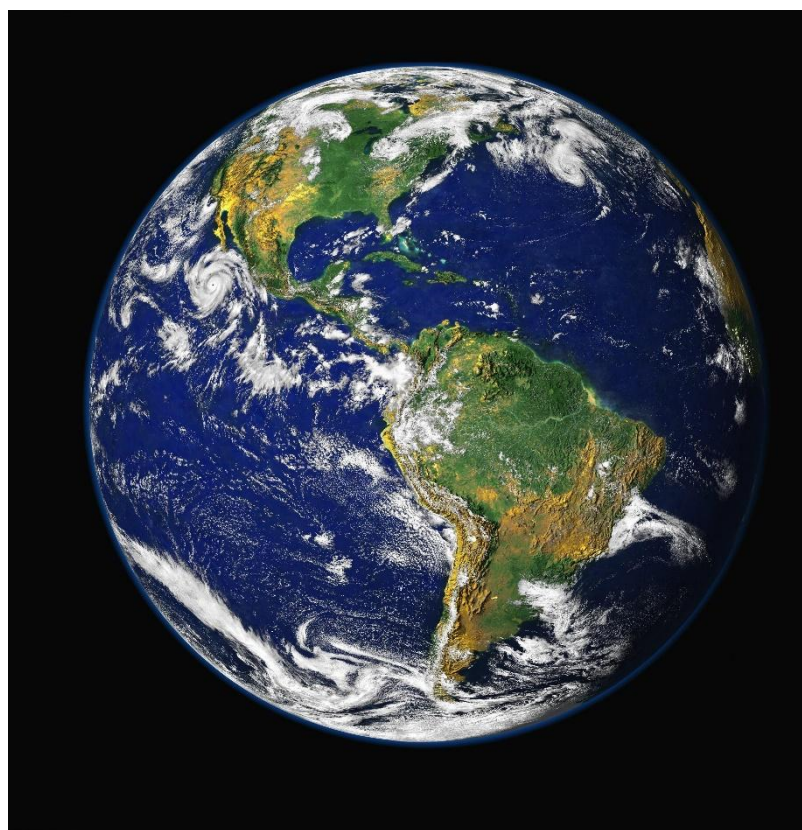
er helt adskilte. Geografisk isolation kan fx finde sted, hvis mennesker anlægger marker eller byggeri og på den måde opdeler et stort skovområde i flere mindre skove (se figur 5).

Nogle arter reproducerer hurtigere end andre arter, og det kan også påvirke den genetiske diversitet. Disse organismer, fx fluer, får meget afkom og lever typisk i kort tid. Det betyder, at deres genetiske diversitet kan ændre sig hurtigere, end den kan for arter, som lever længe og får få unger, fx elefanter.

6 | Puslespillet om genetisk diversitet

Vores viden om genetisk diversitet udvikler og forbedrer sig hele tiden, i takt med at nye teknologiske og bioteknologiske muligheder kommer til, at vi får mere data og at forskerne laver nye opdagelser.

I dag ved vi, at mange forskellige faktorer påvirker den genetiske diversitet. Men forskerne har endnu ikke fundet frem til – eller forstået – dem alle sammen. Det er altså et puslespil, som vi stadig er ved at samle. Med hver ny opdagelse, og hver gang ny og bedre data bliver skabt, kommer forskerne dog tættere på at forstå de komplekse mekanismer, der former den genetiske diversitet på Jorden.



Tekst af Carsten Rahbek, Rasmus Heller, Karsten Elmoose Vad & Emma Emilie Andersen. Med fagligt input fra David Nogués-Bravo, Rute da Fonseca og Anna Brüniche-Olsen.

Begrebsliste

Arter: En art kan defineres på flere måder. I biologien defineres en art ofte som individer, der sammen kan reproducere og få frugtbart afkom. Alle hunde er samme art, fordi blandingsracer godt kan få hvalpe – men heste og æsler er to forskellige arter, fordi deres afkom (muldyret) ikke selv kan reproducere. Andre definitioner på begrebet 'art' er fx baseret på evolutionære processer.

Biologisk variation: Biologisk variation refererer til de (små eller store) forskelle, som tilfældigt – fx pga. mutationer eller miljømæssige påvirkninger – opstår mellem individer.

Cytochrom b: Cytokrom b er et protein, som findes i eukaryote cellers mitokondrier. Proteinet er en del af elektrontransportkæden, som danner ATP (cellernes energibærende molekyle).

DNA-sekvenser: En DNA-sekvens er et stykke af en organismes samlede DNA. DNA er et molekyle, som er sammensat som en kæde af nukleotider (A, T, C og G). DNA udgør den genetiske information – arvematerialet – i alle levende organismer.

Funktionel genetisk diversitet: Funktionel genetisk diversitet er den del af den genetiske diversitet, som påvirker selektion.

Gen: Et gen er et stykke af en organismes DNA, der fungerer som "opskrift" for noget i organismen – fx har vi mennesker gener, som definerer vores øjenfarve. Gener er arvelige fra forældre til afkom. Et gen er et

stykke af en organismes DNA, der fungerer som "opskrift" for noget i organismen – fx har vi mennesker gener, som definerer vores øjenfarve. Gener er arvelige fra forældre til afkom.

Gennemsnitlig genetisk diversitet: Se figur 2.

Genetisk flaskehals: Replikation er processen, hvor en celle kopierer hele sit DNA inden celledeling. Dette sikrer, at hver dattercelle modtager en komplet og nøjagtig kopi af det genetiske materiale.

Genom: Et genom er al den genetiske information, som et individ bærer på – altså hele organismens arvemateriale. Vores genom som mennesker består af DNA'et i alle vores 23 kromosompar.

Genvarianter: En genvariant er en særlig udgave af et bestemt gen. Flere individer af samme art, fx mennesket, bærer på de samme gener, fx genet for øjenfarve, men individernes varianter af dette gen kan være forskellige, fx forskellige øjenfarver.

"I 2017 fandt en gruppe forskere ud af": Murray m.fl. (2017): "Natural selection shaped the rise and fall of passenger pigeon genomic diversity" i tidsskriftet Science.

Indavl: Indavl finder sted, når individer, som er tæt beslægtede med hinanden, reproducerer. Hvis individerne bærer på skadelige gener, kan indavl have store negative konsekvenser for en populations overlevelse.

Indavlsdepression: Indavlsdepression finder sted, når indavl får negative konsekvenser for en populations overlevelse pga. ophobningen af skadelige gener.

Interspecifik/intraspecifik genetisk diversitet: Interspecifik genetisk diversitet er den genetiske diversitet, som man kan måle mellem individer, som hører til forskellige arter.

Intraspecifik: Intraspecifik genetisk diversitet er den genetiske diversitet, som man kan måle mellem individer, som hører til den samme art.

Mutationer: Mutationer i DNA er tilfældige ændringer i en organismes genetiske materiale. Mutationerne opstår under DNA-replikation, som foregår i cellekernen, før en celle deler sig.

Neutral genetisk diversitet: Neutral genetisk diversitet er den del af den genetiske diversitet, som ikke påvirker selektion.

Nukleotider: Nukleotider er de basale enheder i et DNA-molekyle (og i RNA). Der findes fire nukleotider i DNA: Adenin (A), cytosin (C), guanin (G) og thymin (T).

Population: En population er en gruppe af individer af samme art, som får afkom med hinanden og som derfor udveksler genetisk materiale med hinanden.

Replikeres: Replikation er processen, hvor en celle kopierer hele sit DNA inden celledeling. Dette sikrer, at hver dattercelle modtager en komplet og nøjagtig kopi af det genetiske materiale.