

Introduktion til biodiversitet

TEKST

Fag: Biologi | Antal normalsider: 14,5 | Skrevet af: Center for Makroøkologi, Evolution og Klima

Ord med gule understregninger findes i begrebslisten sidst i dokumentet.

Læseformål

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

- definere begrebet biodiversitet samt beskrive de tre niveauer af biodiversitet og give eksempler på, hvordan niveauerne overlapper.
- redegøre for og sammenligne målemetoder inden for de tre niveauer af biodiversitet.
- redegøre for og give eksempler på dataindsamling og databehandling inden for biodiversitet.

1 | Hvad er biodiversitet?

Biodiversitet er biologiens fagbetegnelse for *mangfoldigheden af liv*. Ordet biodiversitet er sammensat af ordene *biologisk* og *diversitet*. Denne tekst er en introduktion til, hvad biodiversitet er, hvorfor den er vigtig, og hvordan man kan undersøge og måle biodiversitet.



2 | Biodiversitet er mangfoldigheden af liv på Jorden

Biodiversitet handler om den enorme vrimmel af liv, vi har på Jorden. Det handler om alle arterne af både planter, dyr, svampe, alger og mikroorganismer. Det handler om arternes gener og deres tilpasninger og om de måder, som arterne spiller sammen med hinanden og deres omgivelser på.

Hvis det lyder indviklet, så er det helt rigtigt forstået. Livets mangfoldighed er nemlig ret kompliceret. Alle former for liv på Jorden har gennemgået millioner af års evolution, og i naturen foregår der hele tiden milliarder af interaktioner mellem individer, populationer og deres omkringliggende miljø.

Uanset om man er forsker eller gymnasieelev, så handler biodiversitet om at forstå, hvad der skaber denne komplekse mangfoldighed.



2.1 | Biodiversitetens store spørgsmål

Som du nok allerede ved, så handler biologi om at forstå alt det levende. Biodiversitet er et emne inden for biologi, som handler om at finde de *mønstre* og *mekanismer*, som kan besvare nogle af de helt store spørgsmål om livet på Jorden som fx:

- Hvor mange arter findes der på Jorden?
- Hvordan er den biologiske mangfoldighed fordelt på Jorden?
- Hvordan bevæger arterne sig rundt på Jorden?
- Hvordan spiller arterne sammen med hinanden og økosystemerne?
- Hvordan er arterne opstået, og hvorfor uddør nogle arter frem for andre?
- Hvilke økosystemer og arter fandtes i fortiden, og hvad kan de fortælle os om nutiden?
- Hvordan vil økosystemerne, arterne og arternes fordeling på Jorden udvikle sig i fremtiden?

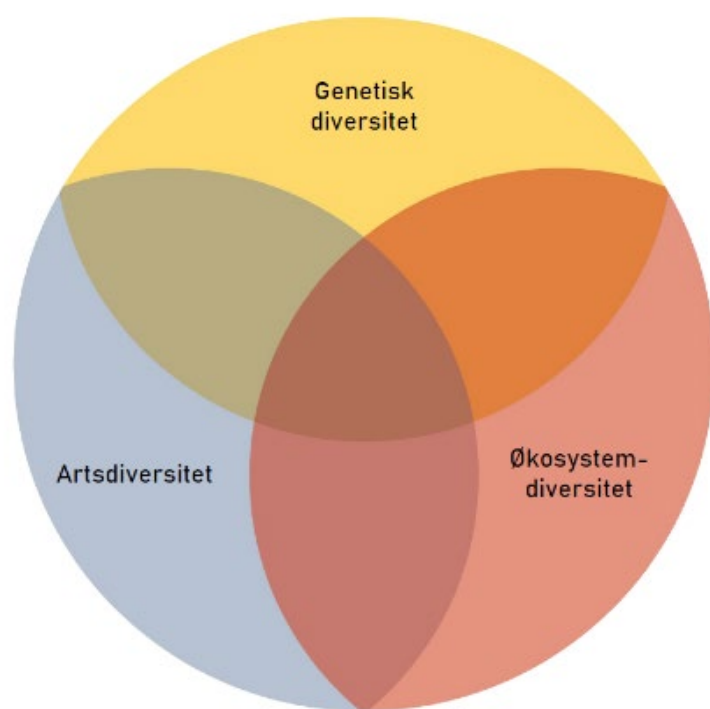
Det sidste spørgsmål er naturligvis virkeligt interessant at forsøge at besvare, fordi vi lever i en tid, hvor mennesket ødelægger økosystemer og udrydder arter i et omfang som aldrig før. Men for at kunne besvare det sidste spørgsmål om, hvordan fremtiden ser ud, så skal man først kende svarene på nogle af de andre spørgsmål.

2.2 | Hvorfor er det vigtigt?

I dag er mere end 75 % af landjordens naturlige økosystemer påvirkede eller decideret ødelagte af menneskets aktiviteter og ressourceforbrug. Det skyldes eksempelvis, at vi fælder oprindelige skove og laver arealerne om til landbrug.

Påvirkningerne af økosystemerne er hovedårsagen til, at Jordens arter uddør med en hastighed, som er 100 til 1000 gange højere, end den naturligt ville være. Det vil sige, at der lige nu uddør hundredevis af arter hvert eneste år.

Hvis man bruger lidt tid på at tænke over de her tal, så forstår man, hvorfor biodiversitet er så vigtigt et emne. Det betyder nemlig, at vi befinder os i en masseuddøen – den største i 65 millioner år – som vi endnu ikke kender konsekvenserne af. Hvis man ønsker at ændre denne udvikling, så er det afgørende at forstå, hvordan biodiversiteten fungerer.



Figur 1: Biodiversitetens tre niveauer: Artsdiversitet, genetisk diversitet og økosystemdiversitet.

3 | Biodiversitetens tre niveauer

For bedre at kunne forstå de komplekse sammenhænge, som biodiversiteten består af, kan man dele den ind i tre niveauer: Genetisk diversitet, artsdiversitet og økosystemdiversitet (figur 1).

3.1 | Artsdiversitet

Artsdiversitet handler om mangfoldighed af arter. Artsdiversitet kan bl.a. måles som:

- Artsrigdom: Antallet af forskellige arter i et område. Høj artsrigdom er altså lig med, at der i et område findes mange forskellige arter, mens lav artsrigdom er lig med, at der kun er få forskellige arter tilstede.
- Hyppighed: Når man måler en arts hyppighed, så måler man, hvor mange individer der findes af arten. Man kan observere forskelle i en arts hyppighed i forskellige områder ved at lave en hyppighedsfordeling. Med en hyppighedsfordeling kan man fx udtale sig om, hvorvidt der er en jævn fordeling af arter mellem flere områder, om enkelte arter dominerer, eller om der er mange sjældne arter.
- Biomasse: Forskelle på hvor meget de forskellige arter fylder vægtmæssigt (deres masse) i miljøet. Der er fx stor forskel på en enkelt rævs masse og massen af en enkelt myre, og derfor er der også

forskel på de to individers betydning for miljøet. Men den samlede biomasse – og miljømæssige betydning – af flere hundrede tusinde myrer i en myretue er måske ikke så forskellig fra en population af ræve.

3.2 | Genetisk diversitet

Genetisk diversitet handler om forskellighed i DNA. Ofte måles genetisk diversitet som de forskelle, man kan finde mellem individers DNA-sekvenser og gener. Man kan se på genetisk diversitet på flere måder:

- Mellem individer, som ikke er samme art (det kaldes *interspecifik* genetisk diversitet).
- Mellem individer af den samme art (det kaldes *intraspecifik* genetisk diversitet).

Som udgangspunkt er det positivt, at en population af en bestemt art har en høj intraspecifik genetisk diversitet. Det betyder nemlig, at populationen har bedre mulighed for at overleve, hvis den pludselig skal tilpasse sig nye omgivelser eller forhold, fx hvis der opstår nye sygdomme, hvis den i højere grad bliver udsat for jagt af andre arter, eller hvis miljøet eller klimaet forandrer sig.

Hvis en population har en høj intraspecifik genetisk diversitet, så er chancen for, at der er nogle individer i bestanden, som er bedre tilpasset til de nye forhold større end i populationer, der er mere genetisk ens. Hvis en population omvendt har lav genetisk diversitet, så kan den blive særligt følsom over for den slags pres, som ændrede forhold skaber.

Lav genetisk diversitet kan opstå i en population, hvis den bliver meget lille. Det skyldes både, at en lille populationsstørrelse øger risikoen for indavl, og at en lille populationsstørrelse øger effekten af genetisk drift. Genetisk drift foregår i alle populationer, men effekten er mere drastisk jo mindre populationen er.



Vandreduen tegnet af John James Audubon. Fra bogen "Birds of America" (1827-1838).

Eksempel: Hvordan kunne verdens mest talrige fugl uddø?

Den amerikanske vandredue (*Ectopistes migratorius*) var en gang verdens mest talrige fugl. Beboere i den østlige del af Nordamerika har i løbet af 1800-tallet skrevet ned, hvordan det tog flere timer – nogle gange dage – før de enorme flokke af vandreduer havde passeret himlen, som i dagstimerne blev farvet mørk af fuglenes overflyvning.

Da bestandene af vandreduer var på deres højeste, levede der mellem 3-5 milliarder individer i Nordamerika. Men i slutningen af 1800-tallet, efter de første europæere var ankommet, begyndte mennesker at jage vandreduerne. Jagten var så intens, at antallet af duerne faldt drastisk og hurtigt. Den sidste levende vandredue på Jorden døde d. 1. september 1914 i Cincinnati

zoologiske have.

Det kan naturligvis være svært for en art at overleve, hvis mennesker driver jagt på den, men vandreduen har haft ekstra svært ved at overleve, fordi populationerne havde meget lav genetisk diversitet allerede inden menneskenes jagt begyndte. Det fandt en gruppe forskere ud af i 2017.

Vi kan ikke vide os helt sikre på, hvorfor vandreduernes genetiske diversitet var så lav, før arten forsvandt. Måske skyldes det, at populationen på flere milliarder individer stammede fra en enkelt lille og isoleret population, som ikke har haft meget intraspecifik genetisk diversitet at sprede.

Eller måske skyldes det, at vandreduerne på et tidligere tidspunkt har været truet af fx sygdom, og at det førte til, at deres populationsstørrelse, og dermed genetiske diversitet, faldt drastisk. Herefter er vandreduernes populationsstørrelse steget, men den genetiske diversitet nåede ikke at vokse med, før mennesker i midten af 1800-tallet begyndte at skyde dem. Derfor – og muligvis også pga. sygdom, som kan have ramt vandreduerne på samme tid – var vandreduerne ikke modstandsdygtige nok til at kunne klare presset.

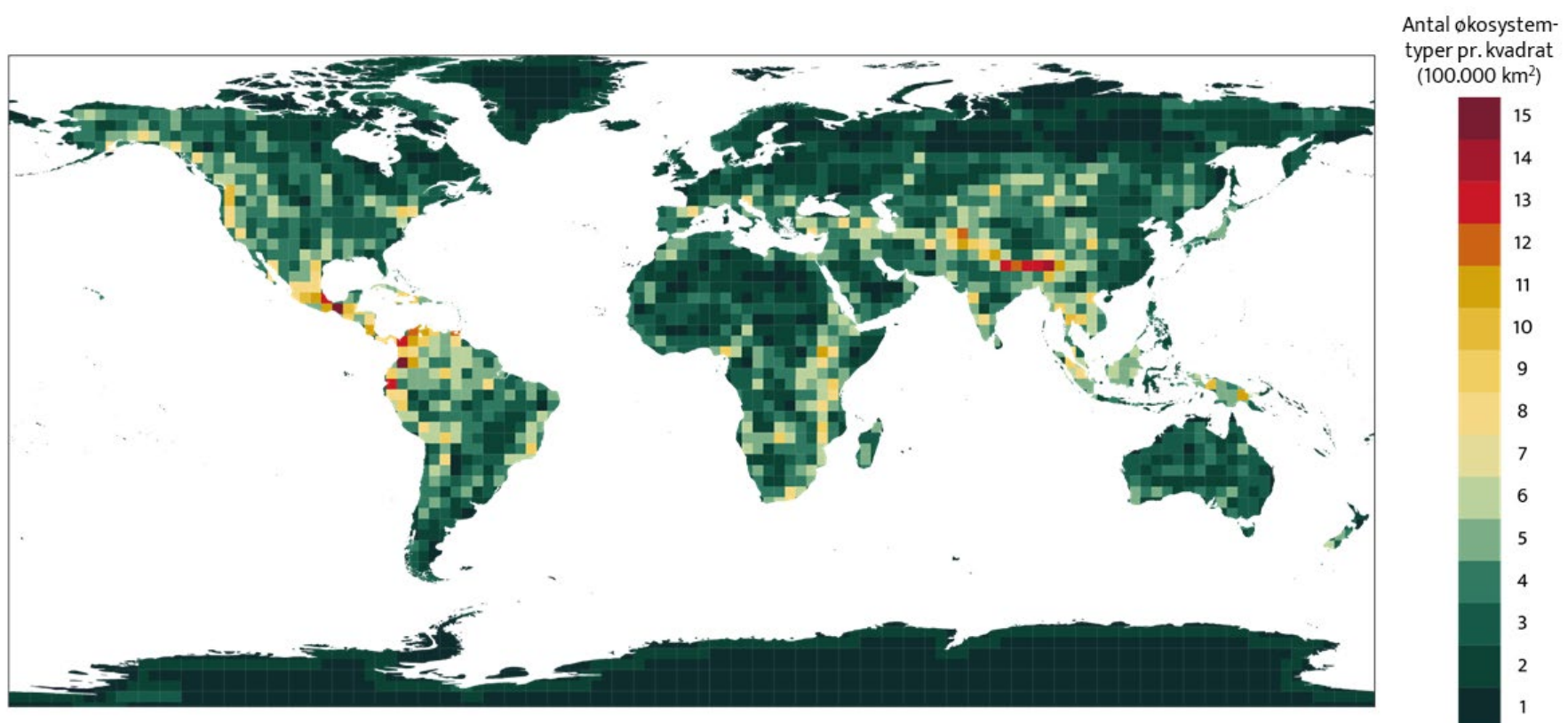
Måske havde vandreduen haft nemmere ved at overleve menneskernes jagt, hvis de havde haft en højere genetisk diversitet. Det er lige nu forskernes bedste forklaring på, hvorfor vandreduen på så kort tid gik fra at mørklægge himlen i flokke på milliarder til at uddø.

3.3 | Økosystemdiversitet

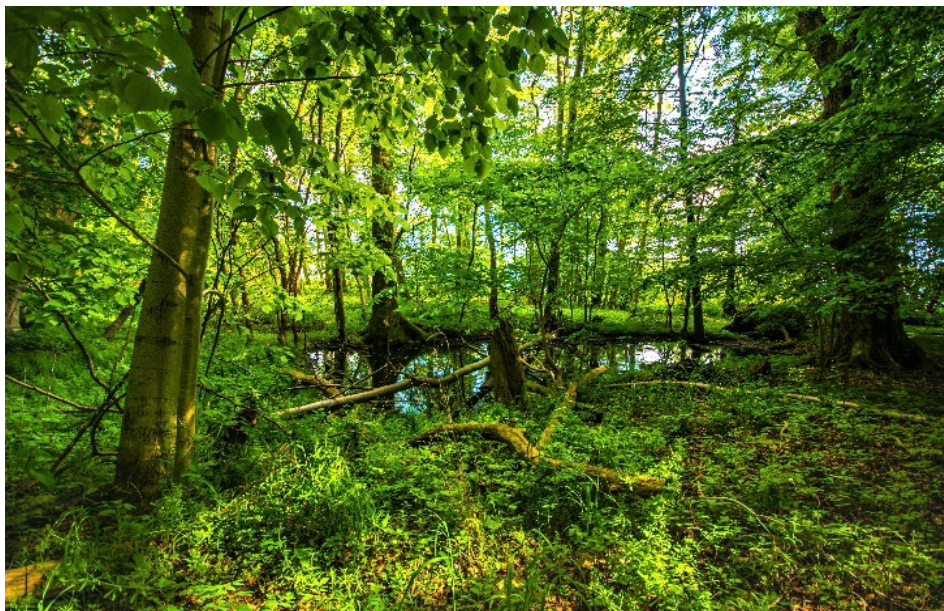
Økosystemdiversitet handler om mangfoldighed af økosystemer. Et økosystem er både alt det levende (biotiske), som findes i et område – planter, dyr, svampe og andre mikroorganismer – og det levendes samspil med områdets ”ikke-levende” (abiotiske) elementer som vand, jordbundens kemi eller klimaet. Et økosystem kan fx være en skov, en sø, en savanne eller et tropisk koralrev.

Når man studerer økosystemdiversitet, så foregår det ofte på en relativ stor skala, fx ved at kigge på, hvor mange økosystemtyper der findes i Danmark eller i Europa. På figur 2 forneden vises et kort over Jordens økosystemdiversitet inddelt i kvadrater på 100.000 km². Her kan man se, at der er nogle områder på Jorden, der indeholder flere økosystemtyper end andre – disse områder har en større økosystemdiversitet.

På en mindre skala kan man også vælge at kigge på habitatdiversitet. Her kigger man på hvor mange forskellige habitater, der findes inden for et mindre landskab eller økosystem, fx variationen af habitater i en enkelt skov.



Figur 2: Nogle steder på Jorden findes der en højere økosystemdiversitet end andre steder. Her er Jordens landområder inddelt i kvadrater på 100.000 kvadratkilometer, og farven viser antallet af forskellige økosystemtyper, som findes inden for kvadratets område.



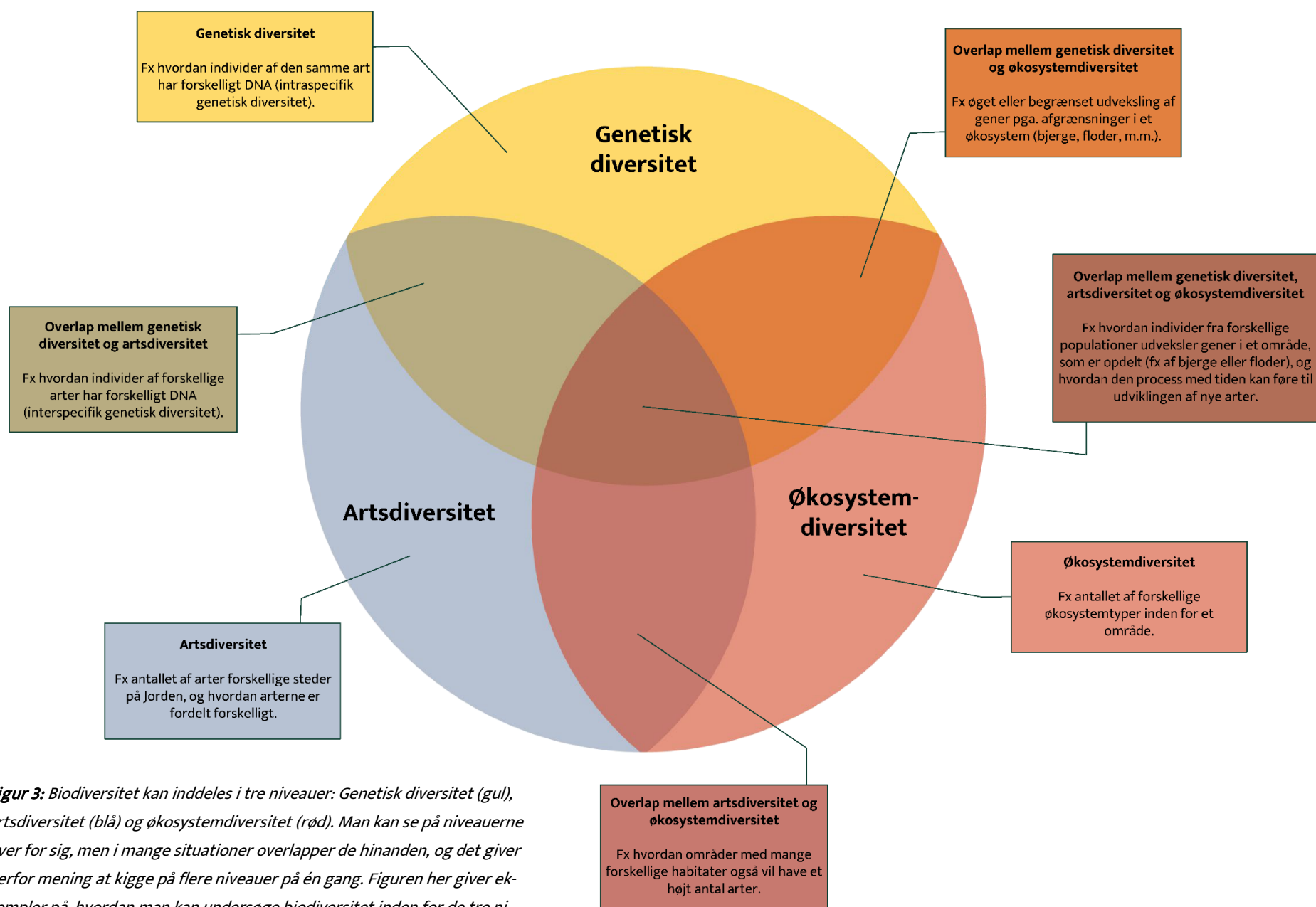
Suserup Skov ved Sorø har været urørt siden 1920. Foto: Rune Engelbreth Larsen.

Eksempel: Suserup Skov

Siden 1920 har Suserup Skov i Sorø haft status som urørt skov. Det betyder, at skoven får lov til at passe sig selv uden menneskelig påvirkning. Man fælder altså ikke træerne, man dræner ikke skovens vådområder, og man lader de naturlige processer i skoven udfolde sig frit. Længst de fleste skove i Danmark er produktionsskove, som er plantet med det formål at dyrke træer, som skal fældes og bruges til byggeri eller energiproduktion.

I en urørt skov vil der typisk være en højere habitatdiversitet end i en produktionsskov. I den urørte skov vil der være både meget gamle og helt unge træer side om side, og der vil være træer, som er døde og i gang med en forrådnelsesproces. Det skaber habitater for arter, som er afhængige af dødt plantemateriale, fx mange arter af svampe og insekter – arter som kan være sjældne andre steder. En urørt skov vil også have flere vådområder, fx moser og små søer, end en produktionsskov.

3.4 | Niveauerne overlapper



Figur 3: Biodiversitet kan inddeles i tre niveauer: Genetisk diversitet (gul), artsdiversitet (blå) og økosystemdiversitet (rød). Man kan se på niveauerne hver for sig, men i mange situationer overlapper de hinanden, og det giver derfor mening at kigge på flere niveauer på én gang. Figuren her giver eksempler på, hvordan man kan undersøge biodiversitet inden for de tre niveauer, men også i de områder, hvor niveauerne overlapper hinanden og derfor ikke kan adskilles.

Man kan kigge på de tre niveauer af biodiversitet hver for sig, men det kan også give mening at se på de områder, hvor niveauerne overlapper. I virkeligheden er det nemlig næsten umuligt, at inddele den levende verden i afgrænsede "kasser" – man er ofte nødt til at forstå tingene i deres sammenhænge, udvikling over tid og overlap med hinanden.

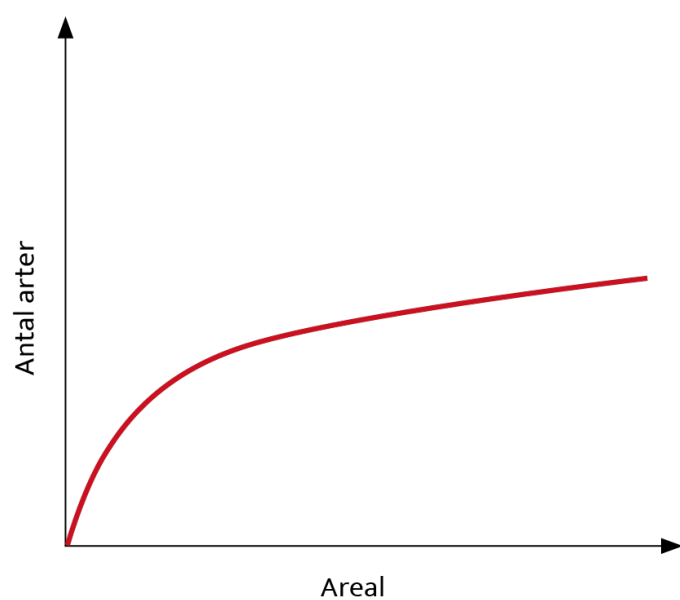
Fx vil et naturområde normalt have et lavt antal arter og individer (artsdiversitet), hvis det også har et lavt antal af forskellige habitat- og økosystemtyper (økosystemdiversitet). Hvis antallet af individer er meget lavt, så vil der normalt også være en meget lav forskellighed af DNA blandt populationerne (genetisk diversitet).

På figur 3 kan du se eksempler på, hvordan biodiversitetens tre niveauer overlapper. Det er værd at bemærke, fordi det er lige præcis de overlappende områder, man skal undersøge, for at forstå livet på Jorden.



4 | Hvordan måler man biodiversiteten?

Metoder til at måle biodiversitet afhænger af, om man undersøger artsdiversitet, genetisk diversitet eller økosystemdiversitet. Undersøgelserne afhænger også af, om man måler på diversiteten lokalt eller globalt og af, om man undersøger nutiden, fortiden eller forsøger at forudsige fremtiden.



Figur 4: Arts-arealsammenhængen fortæller os, at jo større et område er, des flere arter vil der leve der.

4.1 | At måle artsdiversitet

Artsrigdom

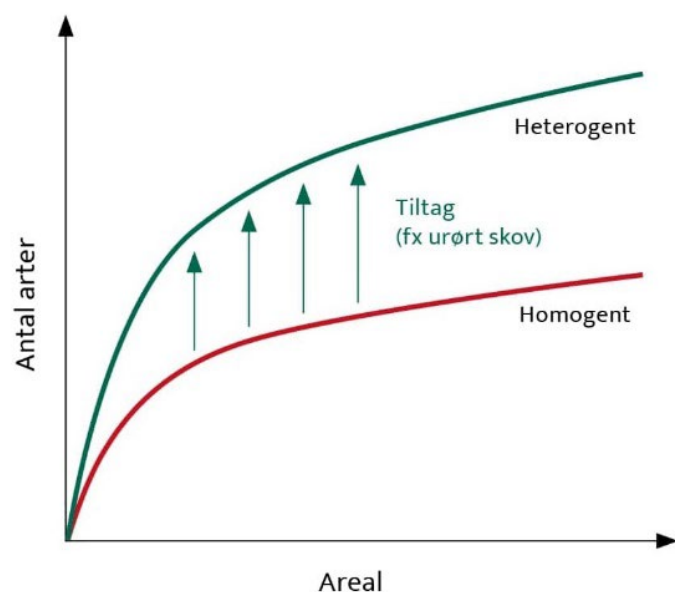
Den mest almindelige måde at måle artsdiversitet på er ved at tælle antallet af arter, som findes i et område. Det tal, som man kommer frem til med sådan en optælling, er områdets artsrigdom.

Et områdes artsrigdom stiger med områdets størrelse.

Det kaldes for arts-arealsammenhængen (figur 4). Det

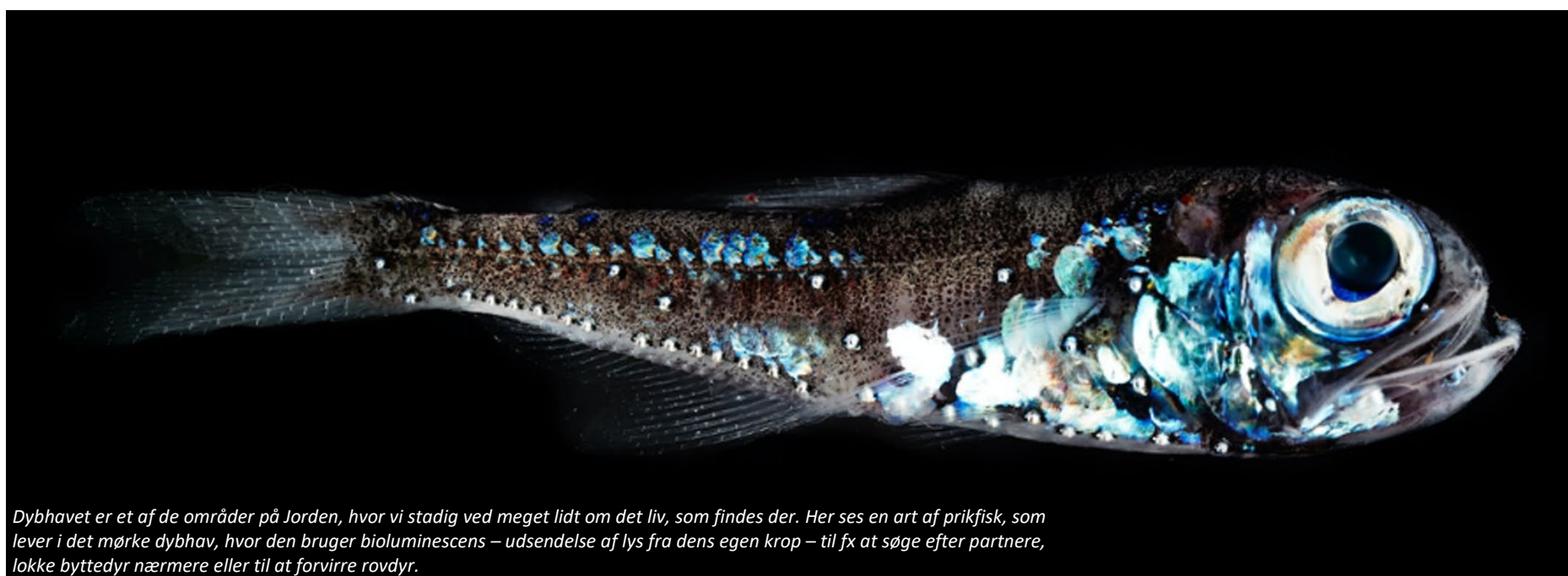
hænger bl.a. sammen med, at et stort naturområde vil in-

deholde flere forskellige habitater end et lille naturområde. Desuden er der mange arter, som kræver et stort leveområde for fx at finde føde – og dermed for at overleve.



Figur 5: Habitat-heterogenitetssammenhængen fortæller os, at jo mere heterogent et habitat er (altså jo højere habitatdiversiteten er i et område), jo flere arter kan der findes i området. Arts-arealsammenhængen vil derfor placere sig højere oppe på y-aksen, hvis habitatet er mere heterogent, fx hvis man har omdannet et skovområde fra dyrket skov til urørt skov.

Et områdes artsrigdom vil også stige, når habitatdiversiteten i området stiger, fordi flere forskellige habitater skaber levemuligheder for flere forskellige arter. Det kaldes for habitat-heterogenitetssammenhængen (figur 5). Arts-arealsammenhængen vil derfor placere sig højere oppe på y-aksen, hvis habitatet er mere heterogent (se eksemplet om Suserup Skov). Derfor kan selv et lille heterogent område have en højere artsrigdom end et større homogent område. Den største artsrigdom vil man altså kunne finde i områder, som både er store og heterogene.



Dybhavet er et af de områder på Jorden, hvor vi stadig ved meget lidt om det liv, som findes der. Her ses en art af prikfisk, som lever i det mørke dybhav, hvor den bruger bioluminescens – udsendelse af lys fra dens egen krop – til fx at søge efter partnere, lokke byttedyr nærmere eller til at forvirre rovdyr.

Hvor mange arter findes der på Jorden?

Vi kender ikke den præcise artsrigdom på Jorden. Det skyldes, at vi slet ikke er færdige med at kortlægge livet på Jorden. Forskere har beregnet, at der findes omkring 10-15 millioner arter i alt – på nuværende tidspunkt har vi kun beskrevet ca. 2,16 millioner af dem. Det skyldes bl.a., at mange arter er svære at finde, enten fordi de kun findes i et meget lille antal, fordi artsgrupperne eller naturområderne ikke er godt nok undersøgt, eller fordi mange af deres levesteder er svært tilgængelige, fx i fjerntliggende regnskove eller nede i dybhavet. Kort fortalt, så lever vi på en biologisk ukendt planet.

Hyppighedsfordeling

Artsdiversitet kan også måles som en hyppighedsfordeling. Med en hyppighedsfordeling måler man ikke kun antallet af arter i et område. Man måler også, hvor mange individer af hver enkelt art der findes i området.

På figur 6 herunder vises et eksempel på to naturområder, som har samme artsrigdom men forskellig hyppighedsfordeling af arterne. Område 1 har en jævn fordeling af de fire blomsterplanter, som der kigges på, mens område 2 er domineret af arten lav ranunkel. Der er som udgangspunkt ikke et af de to eksempler på områder, som er bedre end det andet. Hvis begge områder er uforstyrrede – altså ikke påvirkede af menneskelig aktivitet, fx landbrug – så er begge hyppighedsfordelinger lige naturlige og ”rigtige”. Et uforstyrret økosystem kan altså både indeholde få arter (fx en ørken) eller mange arter (fx en urørt skov), og det kan have en jævn frekvensfordeling eller en hyppighedsfordeling, hvor kun få arter dominerer.

Område 1



Maj-gøgeurt	Lav ranunkel	Tvebo baldrian	Trævlekrone
 24%	 24%	 27%	 25%

Område 2

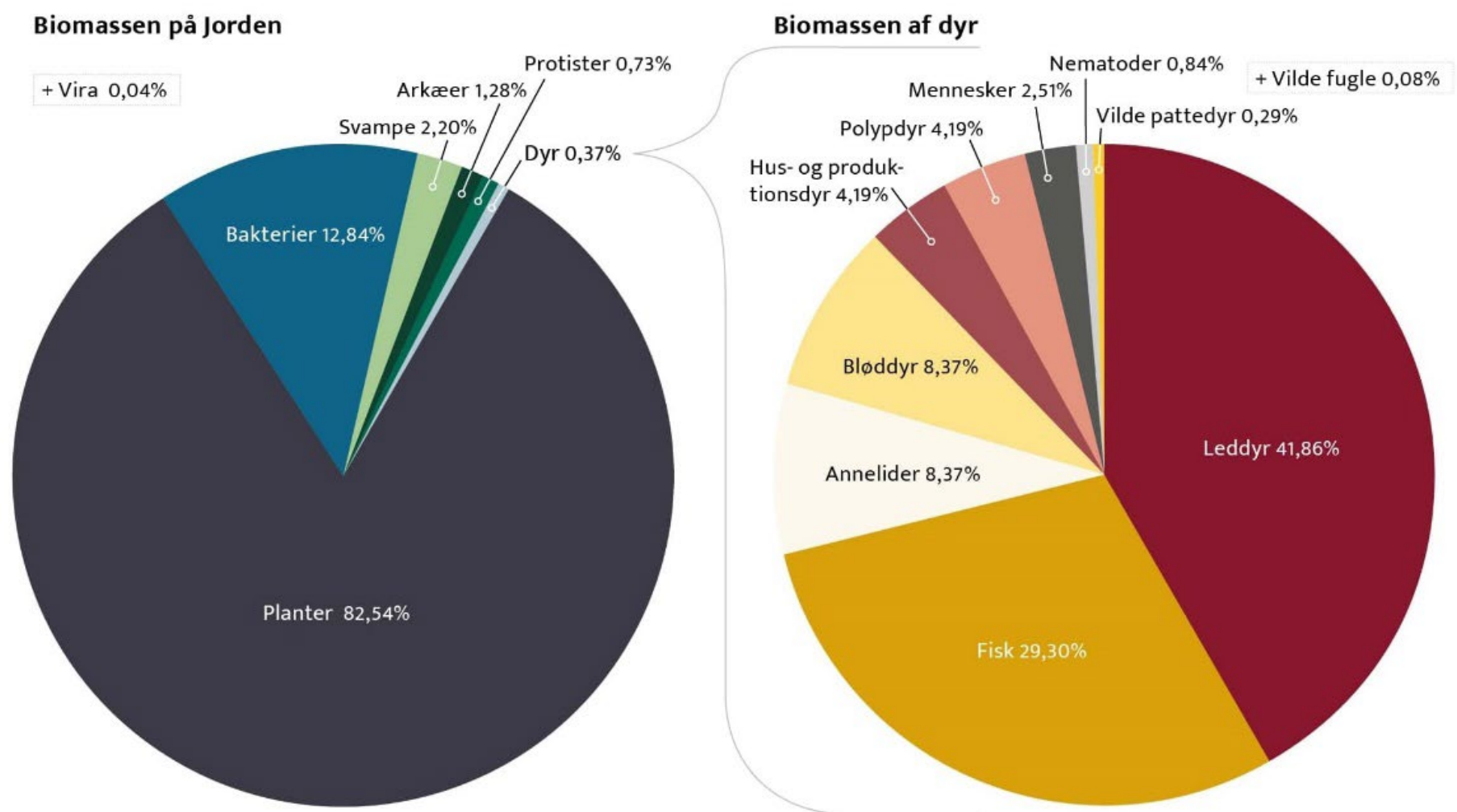


Maj-gøgeurt	Lav ranunkel	Tvebo baldrian	Trævlekrone
 3%	 78%	 4%	 15%

Figur 6: To eksempler på danske blomsterenge. Artsrigdommen af de blomsterplanter, som der kigges på i de to områder, er ens, men frekvensfordelingen af arterne er forskellig. Område 1 har en jævn fordeling af de fire blomsterplanter, som der kigges på, mens område 2 er domineret af arten lav ranunkel.

Biomasse

Artsdiversitet kan også måles som biomasse (vægt). Det minder om hyppighedsfordelinger, fordi man måler på, hvor meget en art fylder i et område. Men i stedet for at tælle, hvor mange individer der findes af hver art, så beregner man massen af hver art i et område. Det kan nogle gange give mening at måle arters biomasse, når man skal undersøge, hvilke arter som har de vigtigste funktioner i et økosystem – altså, hvilke arter der er afgørende for, at et økosystem fungerer optimalt.



Figur 7: Fordelingen af Jordens biomasse i procent, til venstre fordelt på de biologiske riger og til højre på dyreriget (biomassen af reptiler og padder er så lille, at den er udeladt). Data om biomassen på Jorden er målt som gigatons kulstof (carbon), og forskere er nået frem til disse resultater ved at tage stikprøver af de forskellige organismers biomasse rundt omkring på Jorden og derefter gange den målte biomasse med antallet af steder på Jorden, hvor man forventer at finde netop de organismer. Data fra artiklen "The biomass distribution on Earth" af Bar-On m.fl. (PNAS, 2018).



Eksempel: Hvorfor kan det give mening, at vi kigger på biomassen?

Som figur 7 ovenfor viser, så fylder de vilde pattedyr i dag blot 0,29 % af den samlede biomasse af alle dyr på Jorden. De vilde fugle udgør kun 0,08 %. I alt udgør vilde pattedyr og fugle altså blot 0,37 % af dyrenes samlede masse.

Til sammenligning udgør biomassen af vores husdyr, fx høns, geder og kvæg, hele 4,19 %. Så selvom der findes over 6.000 forskellige arter af vilde pattedyr og ca. 11.000 arter af vilde fugle fordelt på Jorden, så er deres samlede vægt – altså biomasse – væsentligt mindre end massen af alle vores husdyr.

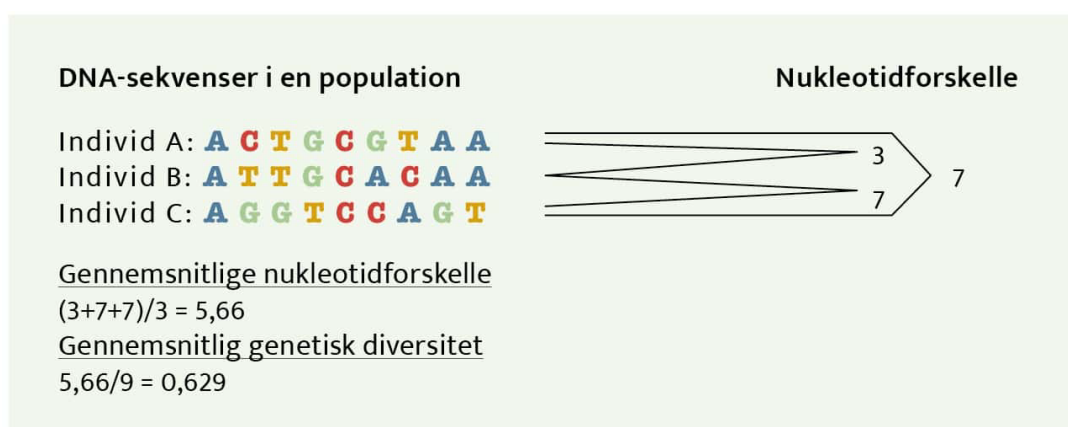
Vi mennesker fylder også en del. Omkring 2,51 % af dyrenes samlede biomasse på Jorden udgøres af os. Samlet set udgør vi men-

nesker og vores husdyr altså 6,7 % af den samlede biomasse af dyr. Det er mere end 18 gange så meget som de vilde pattedyrs og fugles blot 0,37 %.

Det er en interessant pointe, bl.a. fordi denne skæve fordeling kan være med til at forårsage flere virus-pandemier i fremtiden, hvor virus ”hopper” fra vilde dyr til vores husdyr eller måske til os mennesker. Du kender COVID-19, men du har sikkert også hørt om eksempler som fugleinfluenza, HIV og ebola.

Naturligt eksisterer der millioner af vira blandt vilde dyr, og jo færre vilde dyr der findes – og jo flere husdyr og mennesker vi bliver – desto mere stiger sandsynligheden for, at vira inficerer vores husdyr eller os i stedet for de vilde dyr.

Forskningen vurderer, at der findes mellem 631.000 og 827.000 ukendte virus blandt vilde dyr, som har potentiale til at sprede sig til mennesker – og at hastigheden af denne spredning kun vil gå hurtigere, efterhånden som vi øger menneskets globale tilstedeværelse.



Figur 8: Sådan kan man måle genetisk diversitet. I dette eksempel kigger man på DNA-sekvenser fra tre individer. Alle DNA-sekvenserne har en længde på 9 nukleotider. Der er 3 nukleotidforskelle mellem individ A og B, 7 nukleotidforskelle mellem individ B og C og 7 nukleotidforskelle 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 finder man ved at dividere gennemsnittet af nukleotidforskelle med DNA-sekvensernes længde, altså $5,66/9 = 0,629$.

4.2 | At måle genetisk diversitet

Genetisk diversitet er forskellighed i DNA. 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. DNA'et bærer på den genetiske information i levende organismer.

Der kan opstå mutationer i forældrenes

DNA, når de reproducerer. Det kan gøre, at deres afkom får DNA, som er en smule forskellig fra det, som de ellers ville arve fra deres to forældre.

Oftest måles genetisk diversitet i form af forskelle mellem individers genetiske materiale, fx DNA- eller aminosyresekvenser. En sådan forskel kan fx være antallet af forskelle mellem individers DNA-sekvenser, altså antallet af nukleotidforskelle (figur 8). Når man har talt antallet af forskelle mellem to eller flere individers DNA-sekvenser, skal man dividere antallet med sekvensens samlede længde. Det kan nemlig være forskelligt fra analyse til analyse, hvor stor en del af et individs samlede genom man kigger på.

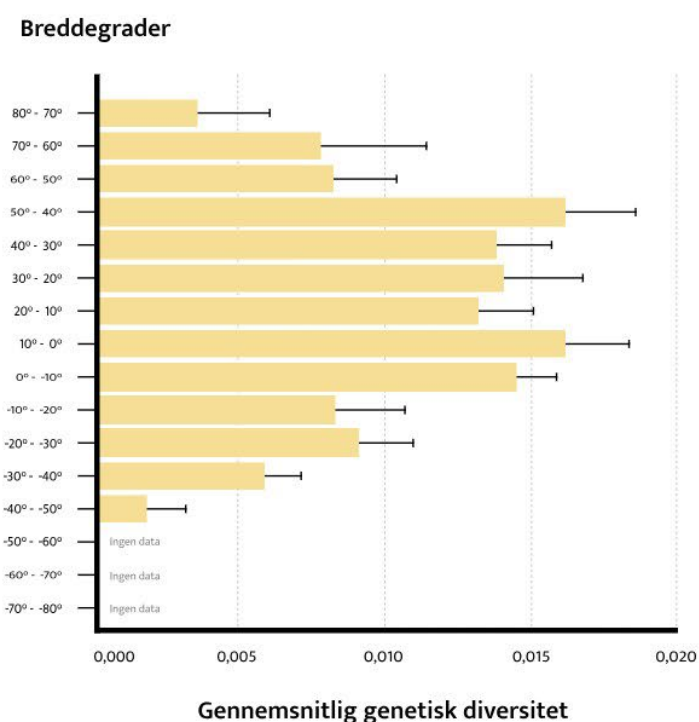
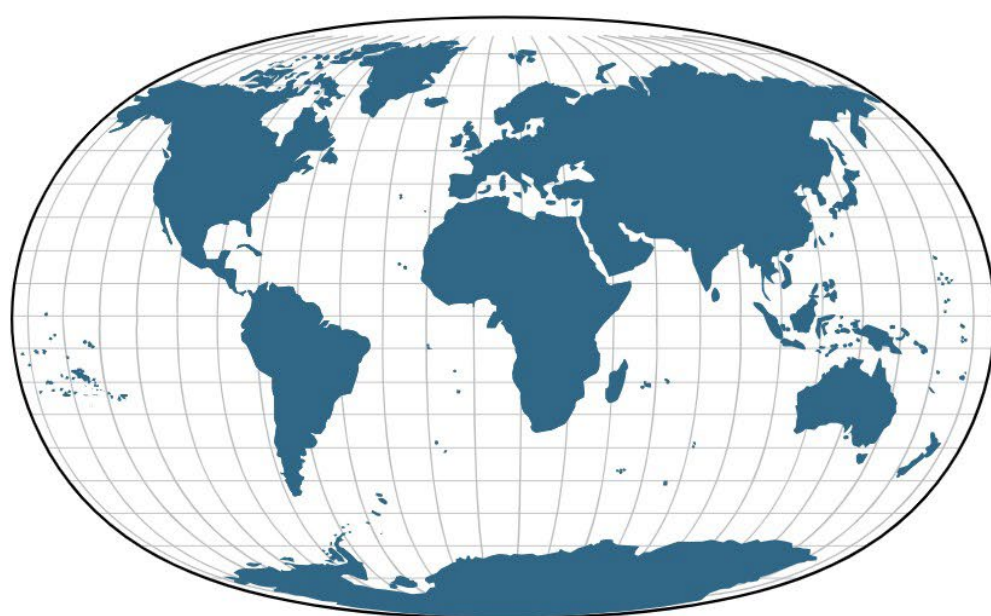


På den afrikanske savanne lever zebraer og gnuer tæt sammen. Den genetiske diversitet mellem to zebraer er intraspecifik, fordi de tilhører samme art. Den genetiske diversitet mellem en zebra og en gnu er interspecifik, fordi de tilhører to forskellige arter.

Den genetiske diversitet er typisk højest i troperne, og den falder mod polerne. Dette gælder for stort set alle dyregrupper. Figur 9 viser det observerede mønster for pattedyr for det gen, som koder for cytokrom *b*. Det er ikke ligetil at forklare, hvorfor den genetiske diversitet er højest i troperne.

Forskere har bl.a. foreslået en hypotese om, at den højere temperatur i troperne medvirker til, at der hurtigere opstår genetiske mutationer hos de arter, som lever i troperne – hvilket kan resultere i, at der hurtigere skabes en højere genetisk diversitet (både interspecifik og intraspecifik). Men denne hypotese er endnu ikke bekræftet, bl.a. fordi der mangler tilstrækkeligt store datasæt fra alle organisme-grupper og fra hele Jorden til, at man kan sige, at det er en regel, som gælder generelt for alt liv på Jorden.

Selvom det ser ud til, at den genetiske diversitet er højest i troperne, så findes der naturligvis lokale forskelle i den genetiske diversitet rundt omkring på Jorden. Desuden er den genetiske diversitet forskellig alt afhængigt af, hvilken del af organismernes DNA-sekvens man kigger på. På figur 9 nedenfor ser man fx kun på den genetiske diversitet for et enkelt gen (cytokrom *b*), og mønsteret vil se anderledes ud, hvis man kigger på andre gener.



Figur 9: Genetisk diversitet er typisk højest omkring Ækvator. 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).

4.3 | At måle økosystemdiversitet

Man måler økosystemdiversitet ved at tælle, hvor mange forskellige økosystemer der findes inden for et område. Økosystemtyper kan fx være tropiske regnskove, tørre ørkener, det mørke dybhav eller snedækkede bjerge.

Kortet over Jordens økosystemdiversitet på figur 2 viser tydeligt, at nogle områder på Jorden indeholder mange flere økosystemtyper end andre. I de tropiske skove i Ecuadors bjerge findes der fx områder med op til 15 forskellige økosystemtyper pr. 100.000 km², mens der mange andre steder i verden, fx i Sibirien eller på Antarktis, kun findes en enkelt økosystemtype på et lige så stort areal.



Et økosystem har brug for tilstedeværelsen af arter med forskellige funktioner. Fx er bestøvere som sommerfugle for mange planter nødvendige for, at de kan bestøves og formere sig.

Økosystemdiversitet handler også om funktioner

Man kan også vurdere økosystemdiversitet vha. økosystemernes funktioner. Økosystemfunktionalitet handler om, hvad arterne i et økosystem *gør*. Fx er nogle arter nedbrydere, mens andre arter er bestøvere. Disse forskellige funktioner er med til at bestemme, hvilke processer der kan finde sted i et økosystem.

Jo flere funktioner, som kan finde sted i et økosystem, jo højere er økosystemets diversitet. Et område fyldt med arter, der har mange forskellige funktioner, vil have en højere økosystemdiversitet end et område, hvor alle arter har den samme funktion.

Fx er mange planter afhængige af bestøvere som fx sommerfugle, svirrefluer, bier, kolibrier eller flagermus. Hvis disse planter ikke bestøves, så kan de ikke formere sig – og dermed kan de i længden ikke fungere som hverken levested eller føde for andre organismer. Det

hele hænger sammen.

5 | Metoder til at undersøge biodiversitet: Der er altid mere end én forklaring

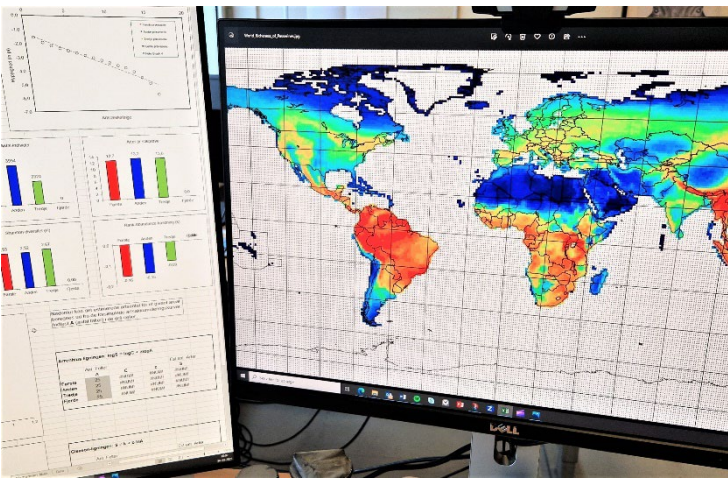
Biodiversitetsforskere arbejder altid ud fra det samme spørgsmål: Hvor meget kan vi forstå ud fra de forskellige mulige forklaringer, som vi har til rådighed?

Med andre ord, så er der i naturen altid mange faktorer i spil. Når man undersøger Jordens biodiversitet, så er det svært at adskille effekterne af alle disse faktorer fra hinanden. Derfor kigger forskerne som udgangspunkt på *alle* de forskellige faktorer, som de kender til, og som de har data om, og så bruger de avanceret statistik til at finde ud af, i hvor høj grad faktorerne hver især er med til at forklare det, som sker i naturen.

Forskerne arbejder altså ikke ud fra en ”enten-eller”-tankegang, hvor en enkelt forklaring alene er nok til at besvare spørgsmålet om, hvordan noget hænger sammen – de benytter sig simpelthen ikke af den ellers klassiske metode, hvor man be- eller afkræfter enkelte hypoteser. Det er naturens mønstre for komplekse til. Der er altid mere end én forklaring, men nogle forklaringer kan være mere betydningsfulde end andre.

5.1 | Store datasæt

Fælles for alt arbejde med biodiversitet er, at man ofte arbejder med store datasæt. Fx er verdenskortet på figur 2 baseret på hundredtusindvis af datapunkter om planter, klima og geologi fra hele verden. Hvis man arbejder på en stor skala, fx for at undersøge genetisk diversitet på hele Jorden, så skal ens data komme mange forskellige steder fra. Man kan nemlig ikke udtale sig om hele Jorden, hvis man kun har data fra Danmark.



Store globale datasæt behandles med matematik-, kortlægnings- og statistikprogrammer.



Forskellige biller fra samlingen på Statens Naturhistoriske Museum. Foto: Birgitte Rubæk.

5.2 | Kan vi forudsige fremtiden?

Når man arbejder med store datasæt, så bruger man ofte avancerede matematik- og statistikprogrammer. Den slags programmer kan fx bruges til at lave computermodeller, som kan forudsige, hvordan biodiversiteten sandsynligvis vil se ud i fremtiden.

For eksempel kan forskere tage prøver fra forhistoriske dyr eller planter, som er bevarede på naturhistoriske museer.

Analyser af disse gamle prøver kan bruges til at undersøge, hvordan arterne reagerede på de naturlige klimaforandringer, som fandt sted tidligere i Jordens historie. Den slags viden kan hjælpe forskerne, når de prøver at forudsige, hvordan Jordens nulevende arter vil reagere på de klimaforandringer, som foregår i dag.

Denne slags computermodeller kan selvfølgelig ikke sige med sikkerhed, hvordan fremtiden vil se ud – der vil nemlig altid være en grad af tilfældigheder, som man ikke kan forudsige. Modellerne kommer i stedet frem til statistiske *sandsynligheder* for, om fremtiden vil se ud på en bestemt måde, hvis der sker klimaforandringer.

Modeller som disse, der prøver at forudsige fremtidens biodiversitet under klimaforandringer, er vigtige. Klimaet er dog kun én slags påvirkning, som man laver forudsigende modeller for – forskere gør det samme for forskellige menneskeskabte påvirkninger, fx fiskeri eller ændringer i landskabet gennem tiden. Jo flere (forskellige) modeller forskerne laver, jo bedre bliver de til at forstå nutidens biodiversitet og til at forudsige den i fremtiden.

Arbejdet med store datasæt fungerer kun, når datasættene eksisterer – altså når der er mennesker, som har indsamlet data til databaser. Hvis man derimod skal lave en undersøgelse, hvor der ikke allerede er data til rådighed, så må man ud og indsamle data selv.

5.3 | Indsamling af data

Dataindsamling kan se ud på mange forskellige måder. Man kan fx tage på feltarbejde og tælle arter og individer eller tage prøver med hjem, fx af planter eller fuglelort, som man senere kan DNA-sekventere i laboratoriet. Dataindsamling kan også foregå med fx videooptagelser af vilde dyr i naturen, GPS-sporing af dyrs vandringer eller gennem apps, hvor befolkningen kan registrere, hvad de ser i naturen.

Metoder til at indsamle data om biodiversitet kan bl.a. være at lave direkte optællinger eller at tage stikprøver fra et område og derefter prøve at regne sig frem til hele områdets tilstand. Jo flere stikprøver man tager, jo større sikkerhed har man for at kunne bedømme hele områdets tilstand. Man kan også lave forsøg med fangst-genfangst, høstteknik eller DNA fra miljøet (eDNA).



*Her ringmærker professor Kasper Thorup en munk, som er en almindelig dansk spurvefugl.
Foto: Marie Rubæk Holm.*

nede ringmærkere med licens, som må udføre opgaven. Fuglene slippes hurtigt fri igen efter ringmærkningen.

Eksempel på dataindsamling:

Ringmærkning af fugle

Når man ringmærker fugle, giver man dem en lille ring med et specifikt nummer på det ene ben. Hvis man så finder fuglen igen, kan man samle information om, hvordan den fx har bevæget sig, eller hvordan dens yngleadfærd er.

Det kan se dramatisk ud, men man ringmærker fugle meget nænsomt, og det er kun træ-



Stødtand fra mammut på Wrangeløen ud for Sibirien.

Eksempel på dataindsamling: DNA fra fortiden

Forskere er i dag i stand til at indsamle og analysere flere tusinde år gamle DNA-rester fra sedimentprøver, planterester eller knogler. Disse metoder kan give os helt ny viden om, hvordan fortidens dyre- og planteliv så ud.

For eksempel har en gruppe forskere i 2021 vist, at det sandsynligvis var klimaforandringer, som var den primære årsag til, at mammutten forsvandt.

Forskerne undersøgte 535 sedimentprøver fra 74 forskellige steder i Arktis. Sedimentprøverne indeholdt gammelt miljø-DNA (eDNA) fra planter og dyr, som levede i Arktis for helt op til 50.000 år siden.

Forskerne ledte ikke efter nogle bestemte dyr og planter, da de undersøgte prøverne for DNA. I stedet brugte de enorme laboratorie- og computerkræfter på at sekventere

alt det DNA, som prøverne indeholdt. Forskerne endte med hele 10,2 milliarder sekventeringslæsninger.

Ud fra de mange læsninger kunne forskerne kortlægge store dele af dyre- og plantelivet i Arktis gennem den sidste istid og i tiden op til i dag.

Resultaterne viste, at fortidens klimaforandringer førte til ændringer i, hvilke planter der voksede i landskabet. Overgangen fra den kolde istid til det varmere klima betød, at der begyndte at gro langt flere buske og træer end tidligere. Det steppelandskab med små urter og græsser, som mammutterne ellers havde tilpasset sig og havde brug for som føde, forsvandt lige så stille. Det gjorde mammutterne derfor også.

Selvom klimaforandringer her spillede den største rolle, så ved vi fra andre studier, at menneskets fremkomst i mammutternes leveområder – også drevet af det varmere klima – gennem deres jagt har øget hastigheden af mammuttens uddøen. Men mennesket var altså ikke den største eller eneste faktor i den historie.

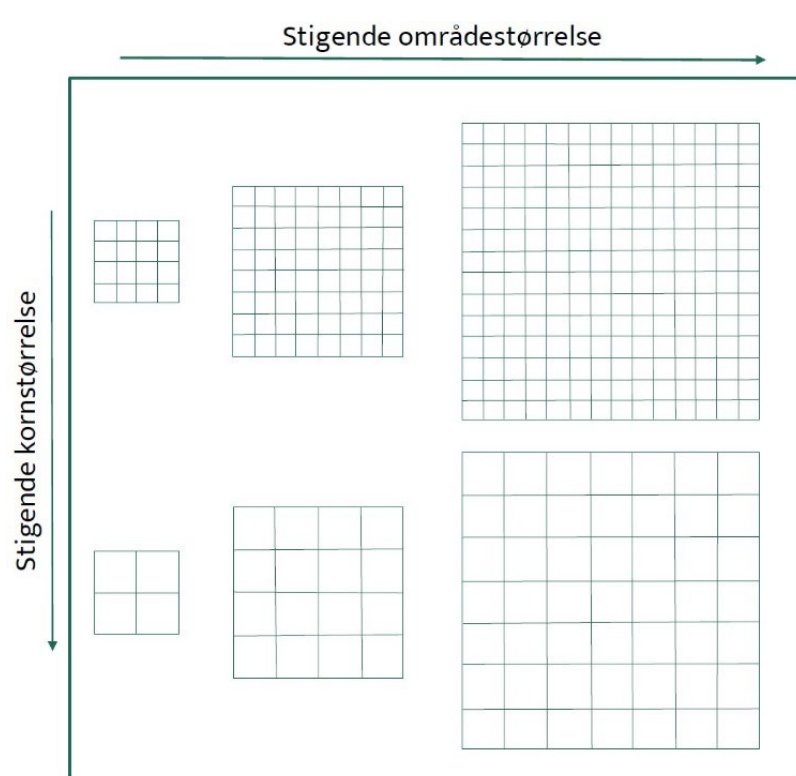
Studier, som på denne måde undersøger ændringer i plante- og dyrelivet under fortidens klimaforandringer, kan være med til at give os vigtig viden om, hvordan klimaforandringer vil påvirke fremtidens biodiversitet på Jorden.

5.4 | Standardisering af data

Når man arbejder med data, så er det vigtigt, at man gør det på en struktureret måde. Det er vigtigt, fordi man skal sikre, at man kan sammenligne sine resultater med de resultater, som andre har opnået – og det kan man netop, hvis alle standardiserer deres data på den samme måde.

Tidligere var det mest normalt at standardisere selve sin dataindsamling – altså sine forsøg eller sine observationer i felten – men det er svært at gøre ordentligt. I dag er det derfor langt mere normalt for forskere at standardisere deres data efter, de har indsamlet den. Det kan gøres hurtigt ved hjælp af avancerede matematik- og statistikprogrammer.

Denne udvikling gør, at forskerne kan indsamle meget mere data, fordi det ikke behøver at være så ensartet. Desuden kan forskerne gøre det hurtigere på den måde. Det betyder også, at de kan bruge data indsamlet af flere personer med forskellige metoder; det har ingen reel betydning, når man alligevel ”renser” og standardiserer de store datasæt efterfølgende med statistik.



Figur 10: En kvadrat-sampling kan se meget forskellig ud afhængig af hvilken områdestørrelse og kornstørrelse, man arbejder med.

Kvadratsampling

Biodiversitetsdata standardiseres ofte vha. kvadrater. Med kvadrat-sampling inddeler man sine arbejdsområder i kvadrater, der alle har den samme størrelse (kaldet kornstørrelsen). Tidligere lavede man dataindsamlingen kvadrat for kvadrat, men i dag indsamlet man oftest bare alt det data, man kan komme til, og så inddeler man det på kvadrater med efterfølgende statistisk databehandling. På den måde kan man producere kort som det på figur 2.

Men man kan også bruge kvadrat-sampling i sit feltarbejde, fx med et kvadrat af metal eller plastik, som man lægger ud på skovbunden eller på havbunden som på figur 11.

Her samler man data ind fra ét kvadrat og sammenligner det med data fra de andre kvadrater. De indsamlede data fra kvadraterne kan fx være antallet af forskellige arter eller arternes procentvise dækning. Man kan også høste alle planterne fra et kvadrat og måle deres biomasse.

Det er altid vigtigt at tænke over, hvor mange kvadrat-samplinger man laver i et område, og hvordan man placerer dem. Der skal være nok kvadrat-samplinger i et område til, at ens indsamlede data er repræsentative for hele området – og kvadraterne skal placeres tilfældigt eller med en velovervejet strategi, så man ikke får et urealistisk eller skævvredet billede af området.



Figur 11: Kvadrat-sampling af en søgræseng ved Maldiverne. Områdestørrelsen er 50 x 50 cm, mens kornstørrelsen er 10 x 10 cm.

På figur 10 kan man se, hvordan en kvadrat-sampling kan ændre sig, hvis man ændrer på enten områdestørrelsen eller kornstørrelsen. Figur 11 viser en lille kvadrat-sampling på ca. 50 x 50 cm ved Maldiverne, og verdenskortet på figur 3 viser, hvordan man kan bruge kvadrater på større skala (100.000 km²).

6 | Viden i konstant udvikling

Der etableres hele tiden nye og revolutionerende teknikker og metoder til at indsamle data og måle biodiversiteten, fx DNA-teknikker og nye muligheder for at overvåge naturen og indsamle data med satellitter og fotogenkendelse. Det er alt sammen med til at øge vores forståelse for livets mangfoldighed – biodiversiteten.

Biodiversitet er et forskningsområde, som kontinuerligt udvikler sig. I starten af denne tekst formulerede vi syv af de spørgsmål, som man forsøger at besvare med forskningen i biodiversitet. Historisk set har vi aldrig været tættere på at kunne besvare disse spørgsmål, men samtidig må vi erkende, at vi langt fra kender alle svarene. Vi har stadig rigtig meget at lære om mangfoldigheden af livet her på Jorden.



Sydamerika set fra luften. Illustration: Tomas Griger baseret på fotos fra NASA.

Tekst af Carsten Rahbek, Karsten Elmoose Vad og Emma Emilie Andersen.

Begrebsliste

”... 100 til 1000 gange højere, ...”: Pimm m.fl. (2014): “The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection” i tidsskriftet Science.

”... en gruppe forskere i 2021 ...”: Wang m.fl. (2021): ‘Late Quarternary dynamics of Arctic biota from ancient environmental genomics’ i tidsskriftet Nature.

”... mere end 75 % af landjordens naturlige økosystemer er påvirkede eller decideret ødelagte...”: IPBES (2018): “Assessment Report on Land Degradation and Restoration”

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

Abiotisk: Noget abiotisk er noget ikke-levende, fx sollys, vind og temperatur.

Art: 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.

Artsrigdom: Artsrigdom er antallet af arter i et bestemt område.

Bestøver: Bestøvere er organismer, som medvirker til bestøvningen af planter. Bestøvning foregår ved overførslen af pollen fra én plante til en anden af samme art. Hundredetusindvis af insektarter, hundredevis af fuglearter og en række andre dyr fungerer som bestøvere, når de henter deres føde eller lever i planter, og på den måde medvirker til at flytte pollen mellem planter.

Biomasse: Biomasse er den samlede masse af noget levende. Biomasse måles ofte som tørvægten af kulstof (carbon) i en prøve pr. arealenhed, fx som kg kulstof pr. kvadratmeter, eller som tørvægten af kulstof af et individ.

Biotisk: Noget biotisk er noget levende, fx planter, dyr eller svampe, eller ting, der stammer fra noget levende, fx en død træstamme eller dyrs afføring.

Cytokrom *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-sekvens: 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.

DNA-sekventering: DNA-sekventering er en metode, som kan kortlægge rækkefølgen af nukleotider i en organismes DNA ud fra en biologisk prøve fra organismen (fx blod eller plantevæv).

Dræning: Dræning er en menneskeskabt fjernelse af vand fra et stykke jord, fx med gravede grøfter eller nedgravede slanger og rør.

eDNA: eDNA betyder ’environmental DNA’, eller miljø-DNA på dansk. eDNA er genetisk materiale, som er indsamlet direkte fra miljøprøver af fx jord, luft eller vand.

Ved at DNA-sekventere en eDNA-prøve fra et havområde kan man fx finde ud af hvilke arter af fisk, der findes i området.

Evolution: Evolution er den gradvise tilpasning af arter over lang tid, baseret på ændringer i populationers genetiske sammensætning og på populationernes geografiske isolation fra hinanden. Alle de arter, som vi kender i dag, er udviklet gennem millioner af års evolution.

Fangst-genfangst: Med fangst-genfangstforsøg kan man bestemme populationsstørrelsen af en art i et bestemt område. Man fanger typisk et antal individer af arten og mærker dem, hvorefter man slipper dem løs igen. Ved en efterfølgende undersøgelse i samme område tæller man antallet af mærkede og umærkede dyr, og baseret på det antal dyr, som man mærkede i første omgang, kan man regne sig frem til den samlede populationsstørrelse.

Funktion: En arts funktion er defineret af den rolle, som arten spiller i et økosystem. Arter kan fx have funktioner som bestøvere af planter, som nedbrydere af organisk materiale, som føde for andre dyr eller som græssere. En art vil have mere end én funktion i et økosystem. Det gælder bl.a. svampe, som både udgør vigtig føde for andre dyr og samtidig er vigtige led i nedbrydelsen af organisk materiale.

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.

Genetisk drift: Genetisk drift er en tilfældig proces, hvor frekvensen af alleler (udgaver af et bestemt gen) i en population ændres over tid. Ændringen skyldes, at det er tilfældigt hvilke individer, der reproducere i en population. Pga. tilfældigheden af genetisk drift fører processen altid til, at en populations genetiske diversitet falder over tid – med mindre der kommer nye genetiske varianter til populationen fra udefrakommende populationer.

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.

Geologi: Geologi beskriver Jordens opbygning og udvikling over en længere tidsperiode, bl.a. med fokus på bevægelsen af Jordens tektoniske plader.

GPS-sporing: Ved at placere en GPS-enhed på et dyr, fx i et halsbånd, kan man følge med i, hvorhen og hvor langt dyret bevæger sig over tid.

Habitat: Et habitat er et område i et økosystem, som er et levested for en art, fx dyr, planter eller mikroorganismer.

Habitatdiversitet: Habitatdiversitet handler om, hvor mange forskellige habitater der findes i et økosystem eller et landskab.

Heterogent: Heterogent betyder varierende eller forskelligartet.

Homogent: Homogent betyder ensartet.

Hyppighed: Hyppighed betegner hvor ofte noget forekommer. Stor hyppighed betyder, at noget forekommer

ofte, mens lav hyppighed betyder, at noget ikke forekommer ofte.

Hyppighedsfordeling: En hyppighedsfordeling måler hvordan antallet af en eller flere arter fordeler sig i et område eller mellem forskellige områder. Se figur 7.

Høstteknik: Med høstteknik fjerner man løbende planter fra en samlet population, for fx at observere hvordan de vokser over tid.

Indavl: Indavl er en proces som foregår, når to genetisk beslægtede individer reproducere. Der findes arter som naturligt indavler, fx en lang række planter. Men hos arter som ikke naturligt indavler, kan indavl have skadelige konsekvenser.

Individ: Et individ er en selvstændig en- eller flercellet organisme, enten en plante, et dyr eller en mikroorganisme. Et individ kan fx være en encellet alge, et egetræ eller en løve.

Intraspecifik genetisk diversitet: Genetisk diversitet mellem individer, som er samme art.

Interaktion: Interaktioner i biologien er enten den måde, som organismer påvirker hinanden på, når de lever sammen, eller den måde, som organismer påvirker abiotiske faktorer i deres miljø på. Interaktioner kan fx være insekters bestøvning af planter eller regnormes påvirkning af jordbunden.

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

Klima: Klima er mønstrene af bl.a. temperatur, nedbør og vind for et område over en længere tidsperiode.

Kornstørrelse: Kornstørrelsen er størrelsen på de kvadrater, som man inddeler sit arbejdsområde i, når man laver kvadrat-sampling (fx 50 x 50 cm eller 100 x 100 km).

Mikroorganisme: Mikroorganismer er et samlet begreb for organismer, der kun kan ses under forstørrelse med fx en lup eller et mikroskop. Mikroorganismer er bl.a. virus, bakterier, encellede alger, encellede dyr eller mikroskopiske svampe.

Mutation: Mutationer er tilfældige ændringer i en organismes DNA, som opstår, når DNA’et replikeres under celledeling. Mutationer er permanente og videregives derfor, når cellen med mutationer deler sig. Mutationer kan være positive eller negative for en organisme. Mutationer, som er positive, kan gøre en organisme bedre tilpasset til sit miljø, hvorimod en negativ mutation kan skade en organismes tilpasning eller tilmed føre til sygdomme eller død. Mutationer har derfor evnen til at påvirke organismers og arters tilpasning, overlevelse og evolutionære udvikling.

Naturlige klimaforandringer: Gennem hele Jordens historie har der altid fundet naturlige klimaforandringer sted, pga. cykliske variationer i den måde, som Jorden bevæger sig omkring solen på. Det er derfor, der har været flere istider på Jorden de sidste flere millioner år.

Nedbryder: Nedbrydere er organismer, som medvirker til nedbrydningen i naturens kredsløb. Nedbrydning af døde organismer (fx planterester eller døde dyr) frigiver vigtige næringsstoffer (fx kulstof eller fosfor), som kan

genbruges, når levende organismer skal opbygge organiske forbindelser.

Nukleotid: 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).

Områdestørrelse: Områdestørrelsen er størrelsen på hele ens arbejdsområde.

Pandemi: En pandemi er en infektionssygdom, som har spredt sig til en hel eller flere verdensdele.

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

Sedimentprøve: Sediment er det aflejrede materiale, som jordskorpen består af, enten i jorden eller på bunden af søer eller havet.

Stikprøve: En stikprøve er en prøve, som kun repræsenterer en mindre del af det fulde billede. Det er fx svært at undersøge alle de biller, som lever i en stor skov, og det kan derfor være nemmere at tage stikprøver af biller fra forskellige steder i skoven, og derefter bruge stikprøverne til at estimere, hvad undersøgelser i hele skoven kunne have resulteret i.

Tilpasning: Tilpasninger hos organismer er ændringer, som er skabt over lang tid, og som giver organismene en fordel i deres omgivende miljø. Fordelagtige tilpasninger, som er arvelige, er nøglemekanismen i arters evolution.

Urørt skov: Urørt skov er skovområder, som man lader stå urørt hen. De må ikke påvirkes af mennesker, fx via træfældning eller dræning af vådområderne. I urørt skov får skovens naturlige processer lov til at udfolde sig frit, og det skaber levesteder for mange arter.

Vandring: Mange dyr udfører mere eller mindre faste vandringer, som følger årstidernes skiften. Fx migrerer mange fuglearter sydpå, når det bliver vinter her i Danmark.

Økosystem: Et økosystem er alt det levende (fx planter, dyr og mikroorganismer) i et område, og deres interaktioner med områdets ikke-levende elementer som fx vand, jordbundens kemi eller vejret. Et økosystem kan fx være en skov, en bjergside, en savanne eller et tropisk koralrev.

Økosystemfunktionalitet: Økosystemfunktionalitet er alle de funktioner, som et økosystem indeholder. Økosystemfunktionalitet er altså afhængig af hvilke arter, der lever i økosystemet. Arter kan fx have funktioner som bestøvere af planter, som nedbrydere af organisk materiale, som føde for andre dyr eller som græssere. Mange arter vil have mere end én funktion i et økosystem. Det gælder bl.a. svampe, som både udgør vigtig føde for andre dyr og samtidig er vigtige led i nedbrydningen af organisk materiale.

Økosystemtype: Økosystemtyper kan fx være tropiske skove, tørre ørkener eller bjerge dækket med is og sne.