



BIOFAG SÆRNUMMER

Biodiversitet

Arter, gener og økosystemer

Udgivet af:
Foreningen af Danske Biologer og Center for Makro-
økologi, Evolution og Klima, Københavns Universitet

Redigeret af:
Carsten Rahbek, Karsten Elmoose Vad,
Jesper Mebus og Emma Emilie Andersen

Biofag særnummer

Biodiversitet **Arter, gener og økosystemer**

En del af projektet 'Biodiversitet i gymnasiet'
støttet af Novo Nordisk Fonden

www.biodiversitetigymnasiet.dk

Udgivet i marts 2023

Redaktion

Carsten Rahbek
Karsten Elmose Vad
Jesper Mebus
Emma Emilie Andersen

Omslag

Morgensolen bryder gennem trækroner og tåge
i den tropiske regnskov i Perak, Malaysia.

Foto: Stéphane Bidouze

Grafik og tryk

Layout og figurer: Rikke Reimann (REIMANNS)
Designguide: Rikke Gantzel
Tryk: Clausen Grafisk, Odense

Ophavsret

Center for Makroøkologi, Evolution og Klima (CMEC)
Globe Institute
Københavns Universitet
Universitetsparken 15, bygn. 3, 2. sal
2100 København Ø

Foreningen af Danske Biologer (FaDB)

Kontakt

Emma Emilie Andersen
emma.andersen@sund.ku.dk

Kopieringstilladelser

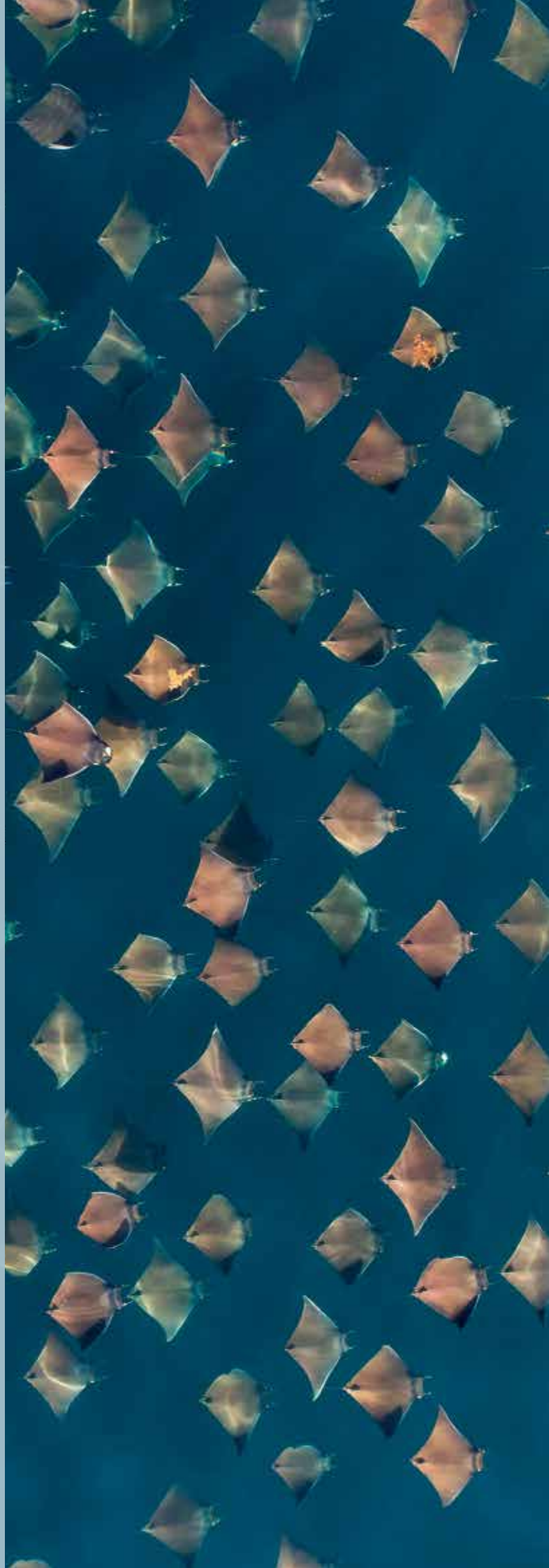
Det er tilladt at citere Biofag med tydelige
kildeangivelser.

ISSN 0106-1038

Stor tak til de mange bidragsydere

Anne Andersen, Karina Bergmann, Michael Krabbe
Borregaard, Agnete Elmose, Rute da Fonseca, Tim Ammitzbøll
Gudkov, Mads Hagen, Jacob Heilmann-Clausen, Rasmus Heller,
Marie Rubæk Holm, Lars Johansen, Signe Koch Klavsen, Thea
Kristiansen, Rune Engelbreth Larsen, Katrine Minddal, Louise
Imer Nabe-Nielsen, David Nogués-Bravo, Hannah Lois Owens,
Jens H. Petersen, Birgitte Rubæk, Jesper Sonne, Esben Woge
Stenderup og Spyros Theodoridis.

*En flok migrerende djævlerokker af arten Mobula munkiana
ud for Baja California, Mexico. Foto: Mark Carwardine.*



Biodiversitet i biologifaget – *og i verden*

Carsten Rahbek og Christian Rix

Biodiversitet er mangfoldigheden af liv her på Jorden. Biodiversitet kombinerer faglighed og metoder fra bl.a. evolution, økologi, populationsbiologi, genetik og biogeografi i en samlet videnskabelig forståelse af livet og alle dets interaktioner i både fortid, nutid og fremtid, fra lokalt til globalt og fra det mindste liv til de største sammenhænge.

Hvis det lyder omfattende og komplekst, så er det, fordi det er det! Livet har i samspil med de abiotiske processer gennemgået millioner af års evolution, og det er noget af det mest komplekse, der findes. I et stort naturområde findes netværk med millioner af interaktioner mellem individer, arter og miljø. Ved at betragte livets mangfoldighed i al sin kompleksitet – ofte vha. store datasæt og videnskabelige metoder, som skaber overblik og generaliserer mønstre og processer – kan man opnå indsigter, som ellers ikke var mulige. Det er det, som forståelsen af biodiversitet handler om.

Vores forskningsmæssige forståelse af disse komplekse sammenhænge er i dag godt hjulpet på vej af, at vi har digitaliseret data til rådighed, så vi med computerteknologier og regnekraft kan sammenstille og analysere store mængder data. Samtidig har vi fået revolutionerende teknologier, fx eaDNA (*environmental ancient DNA*) og satellitter, som hele tiden rykker grænserne for, hvad det er muligt at undersøge og skaffe nye data på.

Vores forståelse af livets mangfoldighed er også blevet samfundsaktuel i takt med, at vi står i den 6. masseuddøen i Jordens historie og vores forståelse af, hvor essentiel biodiversiteten i Jordens økosystemer er for livsunderstøttende processer. Processer, som vi mennesker nyder godt af, og som vores velstand er bygget på (fx fisk fra havet eller dannelselse og rensning af vand). Den 6. masseuddøen er udelukkende forårsaget af mennesket og vores overudnyttelse af planetens naturlige ressourcer.

Vi lever således i en biologifagligt set enormt interessant tid, hvor vi har næsten uanede teknologiske muligheder for at undersøge og gå på opdagelse i mangfoldigheden af liv her på Jorden – og samtidig står vi over for en af menneskehedens største kriser, hvor selvsamme mangfoldighed forsvinder for øjnene af os.

Førende forskere inden for både biodiversitet og klima påpeger, at biodiversitetskrisen kan vise sig langt mere alvorlig end klimakrisen. Biodiversitet er derfor ikke et emne, der blot er reserveret til forskningsverdenen. På biodiversitetskonventionen i Montreal i december 2022 (COP15) vedtog verdens lande målsætninger om sikring af Jordens biodiversitet, hvilket vil skabe omfattende forandringer af vores samfund og verden. Derfor bør alle have en grundlæggende faglig forståelse af biodiversitetens betydning for livet på vores planet, ikke mindst for at kunne deltage oplyst i den demokratiske debat om en krise, der kommer til at præge de kommende mange årtier. En krise, som kræver naturvidenskabelige svar for at kunne løses.

Biodiversitet i gymnasiet

Biodiversitet bør derfor være et prioriteret emne i uddannelsesverdenen. Fagbegrebet blev da også indført i gymnasiernes formål og læreplaner for Biologi A, B og C samt Bioteknologi i 2017, som en tilføjelse til kernestofområdet økologi. Og i 2022 startede vi projektet *Biodiversitet i gymnasiet* som et samarbejde mellem FaDB og biodiversitetsforskere fra Center for Makroøkologi, Evolution og Klima (CMEC) fra Globe Institute på Københavns Universitet.

Formålet med projektet er at understøtte biologilærernes undervisning i biodiversitet ved at producere undervisningsmaterialer samt kompetenceudviklende fagmaterialer og kurser til lærerne. Eksempelvis det særnummer af Biofag, som du sidder med i hånden lige nu. Senere lancerer vi både online undervisningsmaterialer til biologi og bioteknologi samt lærerkurser og workshops.

Alle projektets aktiviteter annonceres i Biofag samt på FaDBs hjemmeside og Facebook-gruppe. Materialer og aktiviteter udvikles i tæt samarbejde mellem lærere og forskere. Det tjener to hovedformål: At materialerne er relevante og direkte anvendelige for lærerne i deres daglige undervisning, og at indholdet har høj faglig kvalitet baseret på den nyeste forskningsviden.

Hvis du er lærer og kunne tænke dig at være medudvikler, fx ved at teste undervisningsmaterialer med elever eller gennemlæse elevtekster om biodiversitet, så kontakt os endelig. Du bliver kompenseret af projektet for de timer, du bruger.

Vi vil gerne benytte denne udgivelse til at sige mange tak til alle de lærere og forskere, der allerede har bidraget med deres viden, erfaringer og ikke mindst kritiske sans. Tak for det!

En introduktion til biodiversitet

I nærværende særnummer af Biofag introducerer vi begrebet biodiversitet gennem en række artikler.

Den første artikel handler om fagbegrebet biodiversitet, de tre niveauer af biodiversitet og lidt om begrebets historik og anvendelse. Anden artikel tager udgangspunkt i en personlig forskningscase fra de artsrige Andesbjerge og forsøger at besvare et af biologiens helt store spørgsmål. I den tredje artikel går vi i dybden med de videnskabelige forståelser og metoder, der anvendes i moderne biodiversitetsforskning. I fjerde artikel tager vi igen udgangspunkt i en konkret forskningscase, men denne gang fra Danmark, hvor forskernes undersøgelser af biodiversiteten i skov har dannet grundlag for politiske beslutninger om udpegning af 75.000 hektar urørt skov til biodiversitet omlagt fra produktionsskov. Til sidst samler vi op med en artikel, der forsøger at binde trådene sammen, og som opfordrer til at medtage flere skalaer i forståelsen af biodiversitet, både hos lærere og elever.

En stor tak til Novo Nordisk Fonden for altafgørende støtte til både denne udgivelse og alle de andre aktiviteter i *Biodiversitet i gymnasiet*.

God læse- og læringslyst!

Christian Rix
Formand for Foreningen af
Danske Biologer og lektor på
Rødkilde Gymnasium

Carsten Rahbek
Professor i biodiversitet og centerleder
for Center for Makroøkologi, Evolution
og Klima, Københavns Universitet

Tre forskellige økosystemtyper (græsland, sandklitter og bjerge) i Great Sand Dunes National Park, Colorado, USA. Foto: Colin Lloyd.



En bølge bryder havoverfladen over et rev med stenkoraler af slægten Acropora. Det Røde Hav, Egypten. Foto: Jordi Chias.

An underwater photograph of a coral reef. The top half of the image shows the surface of the water with sunlight filtering through, creating a bright, shimmering effect. Below the surface, the water is a deep blue. In the foreground, there is a large, healthy coral reef with many branching, yellowish-brown coral structures. Several small, dark fish are swimming around the coral. The overall scene is vibrant and detailed, showcasing marine biodiversity.

Biodiversitet: Fagbegrebets definition og historie

Carsten Rahbek, Karsten Elmoose Vad
og Emma Emilie Andersen

Biodiversitet er et naturvidenskabeligt fagbegreb, der forbinder klassiske biologiske discipliner som evolution, økologi, populationsbiologi og genetik samt makroøkologi og biogeografi.

Forståelsen af biodiversitet omfatter livet på Jorden i alle dets former fra gener og arter til økosystemer. Biodiversitet er den samlede mangfoldighed på disse tre niveauer samt alle interaktionerne imellem dem og i relation til resten af omverdenen.

I modsætning til hvordan det ofte fremstilles populært, så handler biodiversitet således om meget mere end sjældne arter eller artsrigdom. Biodiversitet handler om sammensætning af og udvikling i genpuljer og biologiske samfund på forskellig skala og over tid, samt om økosystemer og deres funktioner. Det handler også om antallet af individer af arter og arternes biomasse. Biodiversiteten udgøres af alt levende, både de helt almindelige arter, de sjældne og de truede arter samt alle de arter, som vi stadig kun har begrænset viden om, fx de fleste mikrober og svampe. Det handler om livet på Jorden.

Tv. Ægstreng fra skrubtudse (Bufo bufo) omkring en kransnålalge (Chara sp.).

Foto: Simon Colmer.

Th. Et par skrubtudser (Bufo bufo) blandt streng af æg. Foto: Solvin Zankl.

Biodiversitetens tre niveauer

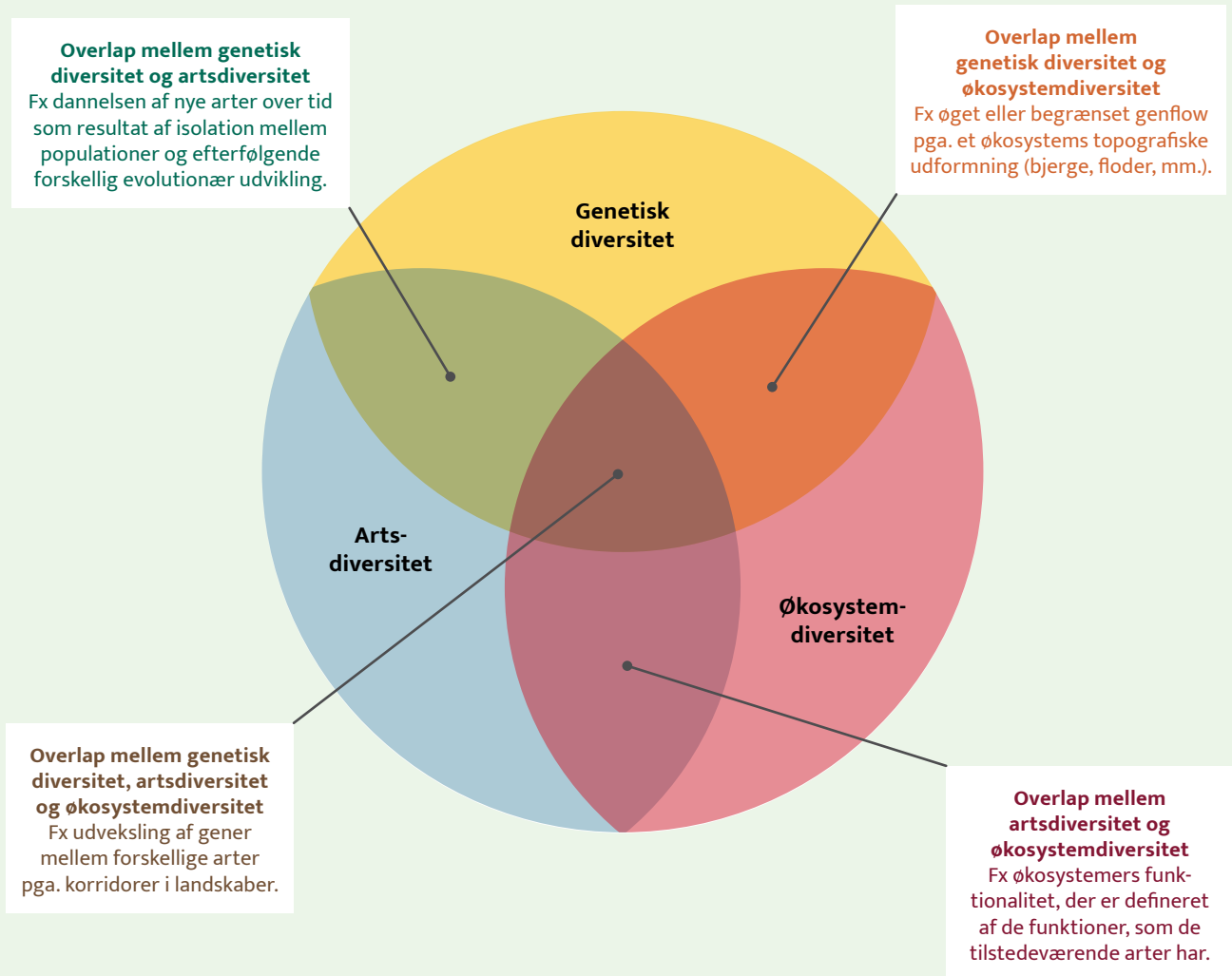
Biodiversitet inddeles forståelsesmæssigt i tre niveauer: Gener, arter og økosystemer. Der er en række processer, som er med til at forme biodiversiteten på de tre niveauer hver især, men det er lige så væsentligt at forstå, at disse processer i høj grad også virker på tværs af niveauerne (figur 1). Ændringer i den genetiske diversitet kan således have effekter både på arts- og økosystemdiversiteten og vice versa.

■ **Genetisk diversitet** er et mål for variationen af genetisk materiale mellem individer i en population, inden for alle individer af en art eller mellem en gruppe af forskellige arter. Oftest måles genetisk diversitet direkte i form af forskelle mellem individers gener, der fx koder for proteiner.

■ **Artsdiversitet** er mangfoldigheden af arter af planter, dyr, alger, svampe og andre levende organismer på Jorden. Artsdiversitet handler om artsrigdommen, men også om arternes biomasse, hyppighed og fordeling, fx langs højdegradienten i Andesbjergene.

■ **Økosystemdiversitet** handler om den variation af økosystemer, som findes i et område. Man kan se på økosystemdiversitet i forskellig skala fra det lokale, fx variationen i økosystemer i Danmarks naturområder, til det globale.





Figur 1. Jordens samlede biodiversitet er udgjort af de tre niveauer genetisk diversitet, artsdiversitet og økosystemdiversitet samt af de processer, som påvirker de tre niveauer internt og på tværs.



Biodiversitet: Et historisk overblik

Biodiversitet er et forholdsvist nyt fagbegreb. Det blev først defineret i 1986 under konferencen *The National Forum on Bio-Diversity* i Washington, D.C. og er en sammentrækning af ordene *biologisk* og *diversitet*. Biodiversitetsbegrebet er opstået ud fra et behov for at kunne give en samlet biologisk forståelse af livets mangfoldighed på Jorden, ikke mindst i lyset af det biodiversitetstab, som foregår i vores tidsalder. I dag er biodiversitet et fuldt integreret fagområde i universiteternes biologiske forskning og uddannelse på lige fod med fx evolution og økologi.

1948

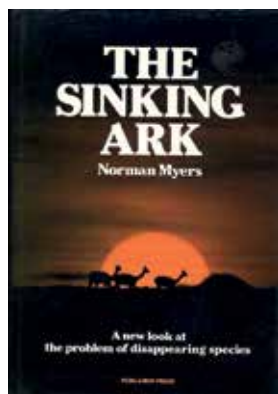
IUCN grundlægges

Den FN-akkrediterede *International Union for Conservation of Nature* (IUCN) står for at udarbejde de såkaldte rødliste-vurderinger, som bl.a. vurderer, hvor mange og hvilke arter der er i risiko for at uddø. Det er et omfattende arbejde. I midten af 2022 havde IUCN vurderet ca. 147.500 arter, hvoraf 41.500 af disse (28%) blev vurderet til at være i risiko for at uddø. Det skal ses i lyset af, at der videnskabeligt er beskrevet ca. 1,75 millioner arter, mens det estimeres, at der findes mellem 7,5 og 15 millioner arter i alt (uden at medregne bakterier og vira).

1979

Norman Myers udgiver bogen *The Sinking Ark: A New Look at the Problem of Disappearing Species*

I slut 1970'erne var forståelsen af, hvor hurtigt arter uddør,



relativt overfladisk. Miljøjournalisten Norman Myers besøgte forskere hele verden over, og de fortalte, at flere arter i deres nærområde var truede. Men Myers spekulerede over, hvordan billedet så ud for hele Jorden. Myers undersøgte spørgsmålet og udgiver i 1979 bogen *The Sinking Ark: A New Look at the Problem of Disappearing Species*. I bogen argumenterer Myers for, at man med et tidligere estimat om en enkelt arts uddøen om året undervurderede hastigheden af arters uddøen. Han mener, at Jorden mistede en art om dagen – en udryddelsesrate 365 gange højere end den, man hidtil

havde troet. Myers kommer bl.a. frem til sit estimat, fordi han indser, at biologer havde undervurderet hvirvelløse dyr. Studier bekræftede i løbet af 1980'erne Myers bekymringer, og herfra tog forskningen fart.

1986

The National Forum on BioDiversity afholdes i Washintgon, D. C.

På konferencen defineres biodiversitetsbegrebet for første gang ved sammentrækning af ordene *biologisk* og *diversitet*.

1988

E. O. Wilson udgiver bogen *Biodiversity*



Bogen er baseret på debatter og oplæg fra *The National Forum on BioDiversity* i 1986. Heri anvendes biodiversitetsbegrebet for første gang i en videnskabelig sammenhæng.

1992

Biodiversitetskonventionen

Den 5. juni 1992 under FN's Verdenstopmøde i Rio de Janeiro

skriver flere end 150 nationer under på Biodiversitetskonventionen. Konventionen, som bl.a. indeholder følgende definition af biologisk mangfoldighed (biodiversitet), træder i kraft d. 29. december 1993: *Biologisk mangfoldighed: Mangfoldigheden af levende organismer fra alle kilder, herunder bl.a. terrestriske, marine og andre akvatiske økosystemer og de økologiske strukturer, de indgår i; dette omfatter mangfoldigheden inden for de enkelte arter og mellem arterne samt økosystemernes mangfoldighed.*

Biodiversitetskonventionen er et ambitiøst dokument, som med en bred definition af biodiversitet i ryggen forstår og definerer behovet for en bæredygtig udnyttelse af klodens naturressourcer og et moralsk og etisk ansvar for, at arter ikke uddør.

1995

Den første store oversigtsartikel om global artsuddøen udkommer med titlen *The Future of Biodiversity*

Forskere fra *University of Tennessee* skriver i 1995 den første store oversigtsartikel om niveauet for den globale artsuddøen, og den konkluderer bl.a., at arter uddør med en hastighed der er 100-1000 gange hurtigere end den naturlige uddøen. Det er et niveau, som svarer til

tidligere tiders masseuddøen, hvorfor vi i dag står i starten af den sjette af sin slags på Jorden.

2001

Biodiversitetsmål defineres på EU-topmøde i Göteborg

EU's stats- og regeringsledere vedtager på mødet et mål om at standse biodiversitetstabt inden år 2010.

2005

Den videnskabelige konsensusrapport *Millennium Ecosystem Assessment* udgives

På et bredt videnskabeligt grundlag beskriver rapporten værdien af Jordens økosystemer og deres økosystemtjenester samt konsekvenserne af økosystemers ødelæggelser for menneskers levevis. Rapporten konkluderer bl.a., at ca. halvdelen af det globale bruttonationalprodukt kommer direkte og "gratis" fra naturen, og at naturen derfor er essentiel for vores livsgrundlag.

2010

Biodiversitetsmål fra EU-topmødet i 2010 er ikke opnået

I maj udgiver sekretariatet for Biodiversitetskonventionen en pressemeddelelse, hvor det konkluderes, at *"verden har fejlet i at opnå målet om en væsentlig reduktion i hastigheden af biodiversitetstab inden år 2010."*

2010

Aichi-biodiversitetsmål defineres på FN's Biodiversitetskonvention i Japan (COP10)

Aichi-biodiversitetsmålene går bl.a. ud på standsning af biodiversitetstab (fx succesfuld forebyggelse af alle truede arters uddøen), sikring af 17% af Jordens landareal og 10% af havområderne til natur, samt at Jordens befolkning skal kende til og forstå, hvad biodiversitet er, alt sammen inden år 2020 efter det mislykkede forsøg med 2010-målene defineret i Göteborg i 2001.

*En flok gemsbokke (Oryx gazella) på ørkensandet i Namibia.
Foto: Juan Carlos Munoz.*



2012

Biodiversitetspanelet IPBES grundlægges

Ligesom FN har et panel for klimaforandringer, opretter de i 2012 også et panel for biodiversitet, *The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* (IPBES). Panelet består i dag af cirka 130 medlemslande og udgiver videnskabelige konsensusrapporter om biodiversitet skrevet af og kvalitetssikret af tusindvis af forskere baseret på den eksisterende videnskabelige litteratur.

2013, 2015 og 2018

Eurobarometer om befolkningens syn på biodiversitet udgives

EU-Kommissionen gennemfører med et par års mellemrum spørgeskemaundersøgelser om EU-borgernes syn på biodiversitet. Danskernes forståelse og prioritering af biodiversitet ligger generelt meget lavt sammenlignet med resten af EU. I rapporten fra 2018 er det kun 21% af unge danskere (15-24 år), der svarer ja til, hvorvidt de "har hørt om og forstår betydningen af begrebet biodiversitet". Det er godt og vel halvt så mange som gennemsnittet for unge i EU generelt (41%) og langt under vores naboland Sverige (70%).

2016

Det danske IPBES-kontor åbner

Arbejdet i det danske IPBES-kontor koordineres med de danske universiteter og Miljøstyrelsen, og forskere fra Danmark deltager og bistår fagligt via IPBES Danmark den danske regerings embedsfolk i internationale IPBES-møder og konventionsmøder med verdens lande, fx COP-møderne om biodiversitet, som det i Montreal i december 2022.

2017

Biodiversitet tilføjes til læreplaner og vejledninger i Bioteknologi (A-niveau) og Biologi (A-, B- og C-niveau) i de danske gymnasier

Under kernestofområderne økologiske grundbegreber (Bioteknologi A) og økologi (Biologi A, B og C) indskrives biodiversitet i læreplaner og vejledninger fra 1. august 2017.

2018

Analyse af Jordens biomasse-tab udgives med titlen *The biomass distribution on Earth*

The Weizmann Institute of Science i Israel udgiver den første analyse af Jordens tab af biomasse, som på baggrund af korrelationer mellem biomasseprøver og globale miljødata viser, at selvom mennesker kun fylder 0,01% af Jordens samlede biomasse, så er vi skyld i

et biomassetab på 83% blandt vilde pattedyr og omtrent 50% af Jordens plantebiomasse.

2019

IPBES-rapport udkommer med konklusion om, at en million arter står til at uddø

I maj 2019 udgiver IPBES *The Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*, som bl.a. konkluderer, at en million arter står til at uddø i den nærmeste fremtid, med mindre der hurtigt skrives til handling.

2020

Aichi-biodiversitetsmålene er ikke opnået

I august udgiver sekretariatet for Biodiversitetskonventionen en rapport, hvor de konkluderer, at man ikke lykkedes med at opnå Aichi-biodiversitetsmålene, som de blev defineret til COP10 i Japan i 2010.

2020

EU's Biodiversitetsstrategi for 2030 lanceres

Biodiversitetsstrategien for år 2030 defineres af EU som en "samlet, ambitiøs og langsigtet plan for at beskytte naturen og standse nedbrydningen af økosystemer." Strategien, der vedtages af alle EU-lande med en bindende målsætning om 30% plads til naturen til lands og havs inden for EU, er også EU's bidrag til de internationale forhandlin-

ger om natur og biodiversitet, som finder sted efter 2020, bl.a. COP15 i 2022 med samme målsætninger.

2021

Danmarks første Biodiversitetsråd oprettes af regeringen

Biodiversitetsrådet er et uafhængigt og forskningsbaseret ekspertorgan, ligesom Klimarådet og De Økonomiske Råd, der har til opgave at rådgive regeringen og Folketinget på natur- og biodiversitetsområdet samt vurdere regeringens tiltag på området både nationalt og ift. internationale aftaler.

2022

Globalt tab af populationsstørrelser på 69%

The Living Planet Report fra oktober 2022, udgivet af *The Zoological Society of London* i samarbejde med Verdensnaturfonden WWF, konstaterer på basis af data fra mere end 32.000 populationer og 5.230 arter verden over, at 69% af alle individer på Jorden er gået tabt siden 1970. Det stemmer overens med andre videnskabelige udgivelser – og det er dramatisk.

2022

Biodiversitetsmålene i *The Kunming-Montreal Biodiversity Framework* defineres på Biodiversitetskonventionen i Montreal (COP15)

I december 2022 bliver de lande, som i 1992 underskrev FN's Biodiversitetskonvention, samt de lande, som senere er tiltrådt konventionen (i alt 196 af verdens lande) enige om en aftale, som har som mål at beskytte Jordens biodiversitet.

Aftalen bliver indgået under COP15 (den 15. udgave af *Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity*) og indeholder bl.a. mål om beskyttelse af 30% af Jordens hav- og landområder inden år 2030. Desuden har aftalen målsætninger om, at menneskeforårsaget udryddelse af kendte arter skal stoppes, at introduktionen af invasive arter skal reduceres med 50%, at klimaforandringers negative effekter på biodiversitet skal minimeres, at et bæredygtigt forbrug af Jordens ressourcer skal sikres, samt at forurening (fx kvælstofbelastning) skal reduceres til et niveau, der ikke er skadeligt for arter og økosystemer.

Sådanne FN-aftaler kan ikke være juridisk bindende, men de deltagende lande er forpligtet til at afrapportere deres resultater løbende.



En nøgensnegl af arten *Cratena peregrina*, der lægger æg ud for Sardinien's kyst. Foto: Alex Mustard.

Yderligere læsning

Edward Osborne Wilson, red. (1988): *Biodiversity*. National Academy of Sciences.

IPBES (2019): *The global assessment report on biodiversity and ecosystem services*. Tilgængelig via www.ipbes.net

IPBES Danmark: www.ipbes.dk

Millennium Ecosystem Assessment (2005): *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Tilgængelig via www.millenniumassessment.org

Norman Myers (1979): *The Sinking Ark: A New Look at the Problem of Disappearing Species*. Pergamon Press.


Stuart L. Pimm, Gareth J. Russell, John L. Gittleman og Thomas M. Brooks (1995): *The Future of Biodiversity*. Science.

WWF (2022): *Living Planet Report 2022: Building a nature-positive society*.

Yinon M. Bar-On, Rob Phillips og Ron Milo (2018): *The biomass distribution on Earth*. PNAS.



*San Rafael-vandfaldet i floden Quijos i Ecuador
omkranset af artsrig bjergskov. Foto: Pete Oxford.*

A tropical waterfall cascading down a lush, green mountain slope under a cloudy sky. The waterfall is the central focus, with water falling from a rocky ledge into a pool below. The surrounding landscape is dense with tropical vegetation, and the sky is filled with soft, grey clouds. The overall scene is serene and majestic.

Hvorfor kan man finde flere arter i en enkelt tropisk bjergskov end i hele Europa tilsammen?

Et af biologiens helt store
grundforskningsspørgsmål

Carsten Rahbek

Tågen ligger i tykke lag midt på den tropiske bjergside. Længere oppe ad bjerget skinner solen. Den fugtige duft af jordbund og træer spreder sig, og et væld af fugle synger og flyver på kryds og på tværs gennem den tætte tågeskov.

Fuglene er kun én gruppe af de mange arter, som findes i Sydamerikas tropiske bjergregioner, der er blandt verdens artsrigeste. Spørgsmålet om, hvor på Jorden der findes størst artsrigdom, og hvorfor artsrigdommen er størst lige præcis dér, er et af de største spørgsmål i biologiens verden, og det er et spørgsmål, som jeg beskæftiger mig meget med i min forskning. Det kan virke som et banalt spørgsmål, men vi er i dag endnu ikke helt nået frem til svaret, som formentlig hænger tæt sammen med den måde, som økosystemerne ser ud på. Det vidste jeg bare ikke, da jeg som ung specialestuderende var på min første ekspedition i Andesbjergene (figur 2).

Alene på bjergtoppen

Jeg sidder i næsten 3.500 meters højde på et bjerg midt i den tropiske tågeskov, der dækker store dele af Andesbjergene. Jeg er alene,



Figur 2. Carsten Rahbek på feltekspedition i Parque Nacional de Podocarpus i Ecuador i 1989.

og her er stille. Det eneste, jeg kan høre, er den svage lyd af sang fra de mange forskellige fuglearter, der lever i den livskraftige tågeskov, som udfolder sig omkring mig på bjergets skråning – den selvsamme skråning, som jeg sidder på og er ved at få pusten tilbage efter at være gået op ad. Året er 1989, og jeg er midt i feltstudierne til mit speciale. Jeg tæller fugle, fordi jeg er nysgerrig på, hvor mange arter der findes i bjergenes højtliggende skove. Jeg har nu været i Andesbjergene i seks måneder, og hver eneste dag bevæger jeg mig flere tusinde højdemeter op og ned ad bjergsiden. Det er hård kost for kroppen, som nok til tider har brug for, at jeg





Figur 3. Udsigt over tropisk bjergskov i Andes fra CMEC-ekspedition i 2020. Området er blandt de mest artsrige i verden, og man finder mere end 800 fuglearter på kun 10.000 km². Amazonas-regnskovens lavland kan ses i baggrunden. Foto: Jesper Sonne.

siger stop, men mit sind er fyldt af gåpåmod og ukuelig nysgerrighed. Så jeg fortsætter.

Dengang i Andesbjergene havde jeg ikke forestillet mig, at min vedholdenhed ville lede mig til det sted, hvor jeg står i dag: Midt i en forskningskarriere, hvor jeg bl.a. har beskrevet og forklaret, hvorfor de højtliggende områder i de tropiske Andesbjerge (figur 3) er de mest artsrige områder på Jordkloden. Faktisk kan et område i Andesbjergene på størrelse med Lolland være mere artsrigt end hele Europa sammenlagt. Og skovene i Andesbjergene er også samlet set mere artsrige end hele Amazonas' lavlandsskov (figur 4) – en kendsgerning, som man under mine specialestudier i 1989 havde svært ved at forestille sig, fordi den var i strid med en ellers dengang anerkendt makroøkologisk "naturlov": *Højdegradienten*, som beskrev, at antallet af arter faldt med højden op langs en bjergside.

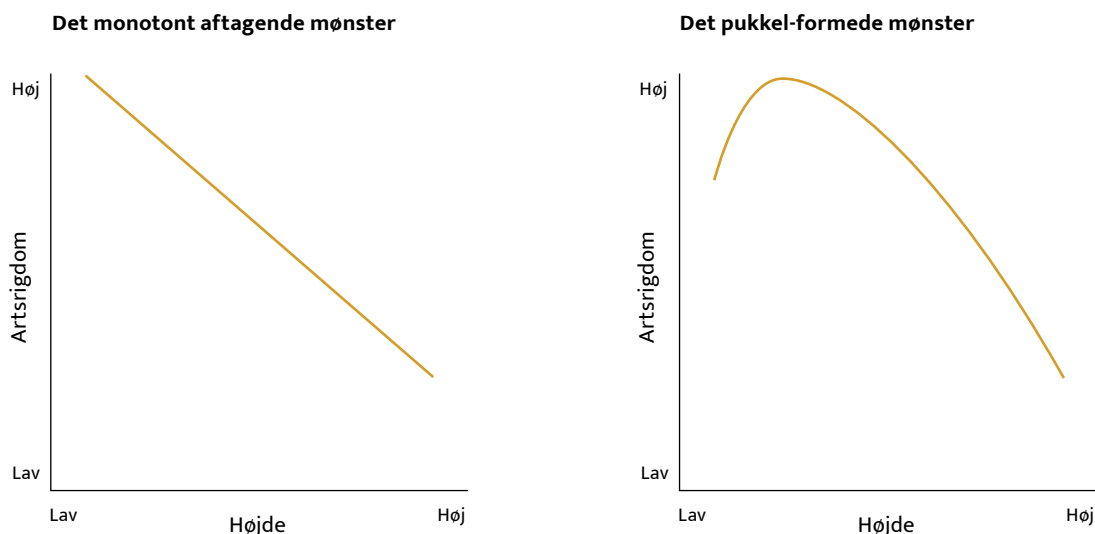
En opdagelse i strid med teorien

Forståelsen af den såkaldte højdegradient af arter var jeg helt indforstået med, inden jeg rejste på min første ekspedition til Andes-

bjergene. Jeg havde læst alt om den, og jeg forstod den videnskabelige konsensus på området, som var empirisk dokumenteret i den videnskabelige litteratur og kunne beskrives med matematiske ligninger. Derfor var jeg også i intellektuel vildrede, da jeg på min specialerejse – og på mine senere rejser til Andesbjergene – kunne konstatere, at mine egne observationer ikke stemte overens med det, som stod skrevet i litteraturen om højdegradienten. Der var nemlig ikke flest arter nede i lavlandet, men derimod højere oppe ad bjergene.

I min ph.d.-afhandling, som jeg færdiggjorde i 1995 på både *Smithsonian National Museum of Natural History* i Washington D.C. og på Zoologisk Museum i København, sammenførte jeg store datasæt om artsrigdom langs højdegradienter fra mere end 500 studier fra bjergområder i hele verden. Med min afhandling kunne jeg med et empirisk fundament under mig dokumentere, at videnskaben dengang havde misforstået noget helt grundlæggende omkring Jordens artsrigdom. For den nederste del af bjergskråningen måtte jeg nemlig forkaste idéen om det lineære fald af arter med stigende højde. De fleste arter fandtes et stykke oppe

Figur 4. Amazonas-regnskovens lavland.
Foto: Mark Bowler.



Figur 5. To grafiske modeller for variation i artsrigdom langs en højdegradient. Før mit ph.d.-arbejde i Andesbjergene var det monotont aftagende mønster (venstre), hvor artsrigdommen i Amazonas falder med stigende højde, anerkendt. Efter min ph.d.-afhandling dokumenterede jeg det pukkel-formede mønster (højre), hvor de fleste arter findes et stykke oppe i bjergene.

i de tropiske bjerge, og ikke i den flade lavlandsskov. Modsat det monotont aftagende mønster, man troede, der fandtes, så jeg et mønster, som jeg kaldte for *the hump-shaped pattern* – det pukkel-formede mønster (figur 5).

Fortidens opdagelsesrejsende

Omskrivningen af artsrigdomsmønstret for højdegradienten var en *beskrivelse* af et helt nyt biodiversitetsmønster i verden. Men hvad *forklarer* dette mønster? Det har jeg brugt min forskningskarriere efter min ph.d. på at undersøge, og jeg har forsøgt at nå frem til en generel forklaring på, hvad der bestemmer fordelingen af liv på Jorden. Jeg har ikke arbejdet alene, for mine resultater er blevet valideret af andre forskere, der har analyseret mine datasæt på ny og frembragt stadig nye datasæt, som mønstret kan testes på. Hundredevis af forskere og tusindvis af artikler har beskæftiget sig med spørgsmålet siden.

Hvad der bestemmer variationen af artsrigdom langs gradienter eller over geografiske områder er et spørgsmål, som har fascineret mennesket i mange hundrede år. Lige siden opdagelsesrejsende naturhistorikere som Humboldt, Wallace og Darwin udforskede verdens dengang ukendte områder har forskningen været betaget af den artsrigdom, som findes i troperne, og hvad der forårsager den.

I tropiske bjergområder kan man med feltarbejde studere klimaets indflydelse på biodiversitet. På et bjerg i Andes kan man ved at bevæge sig blot 4-5 kilometer komme gennem vidt forskellige klimatiske zoner, fra tropisk lavland til alpine zoner med is året rundt. Den enorme artsrigdom i tropernes bjerge skabes af den store udskiftning af arter, som sker, når man går fra én klimazone til en anden. Skulle man lave samme slags studie langs en breddegradsgradient i lavlandet, så skulle man bevæge sig mere end 10.000 km. Det kan man ikke altid i

feltarbejde, og det er nemmere at bevæge sig 4 km op ad en bjergside.

Nutidens genetiske tidsmaskine

De næste forskningsspørgsmål, som kom ud af mine studier af Andesbjergenes højdegradient, var, hvorfor tropiske bjergregioner var så enormt mere artsrige end alle andre områder på Jorden. De klassiske teorier for, hvad der bestemmer artsrigdom falder nemlig til jorden, så snart man inkluderer de tropiske bjergregioner. De tropiske bjergområder, som jeg havde besøgt, havde ganske simpelt mange flere arter, end hvad man ville forudsige på basis af fx den almindeligt udbredte hypotese om, at artsrigdommen er begrænset af et områdes produktivitet og mængden af tilgængelig energi. Da vi med forskningen endelig fik sammenstillet globale datasæt for den geografiske udbredelse af alle verdens padder, fugle og pattedyr (mere end 22.000 arter), viste det sig, at bjergregionerne i troperne indeholdt over 85% af dem.

De tropiske bjerges høje biodiversitet var et mysterium, som skulle løses for at kunne forklare, hvorfor livet på Jorden fordeler sig, som det nu engang gør. På Center for Makroøkologi, Evolution og Klima (CMEC) har dette været hovedfokus i vores forskning de sidste 15 år.

Jeg er sammen med mine kollegaer på CMEC og med de internationale forskere, som jeg samarbejder med, kommet et rigtig godt stykke vej mod målet. I 2019 udgav vi bl.a. to skelsættende oversigtsartikler i det videnskabelige tidsskrift *Science*. Her gav vi en status over de sidste 15 års forskning og sammenstillede samtidig millioner af data fra hele Jorden på organismer, klima og geologi med fokus på alle Jordens bjergregioner.

Vores data kom fra enorme databaser over udbredelsen af arter på Jorden, fra forskningens nyeste metoder inden for DNA-sekventering og bioinformatisk analyse af prøver fra naturen samt fra naturhistoriske samlinger. Med disse metoder kan vi sætte os ind i en genetisk tidsmaskine og kortlægge slægtskabet mellem forskellige arter samt finde ud af, hvilke arter der er nye, og hvilke arter der er gamle.

Hvad er årsagerne til den høje artsrigdom i de tropiske bjerge?

Informationen fra adskillige genetiske tidsrejser i kombination med data over forekomsten af 22.000 arter bekræftede, at den høje artsrigdom i Amazonas' bjergområder ikke alene kan forklares ved energi- og produktivitetsniveauet i det nutidige klima, som for området er kendetegnet ved varme temperaturer og høj fugtighed – selvom temperatur og vand i sig selv er forudsætninger for liv. Hvordan kan vi så begrunde det mønster, som vi ser? Forklaringen tager afsæt i forskellige årsager:

1) Nye arter dannes. De tropiske bjerge er med deres mange dale og bjergtoppe ideelle til at skabe isolation mellem populationer. Derfor er bjergene ganske simpelt *artspumper*, hvor masser af nye arter dannes med stor hastighed.

2) Få arter uddør. Bjergenes store variation i topografi skaber lokale "lommer" med forskelligt mikroklima, hvor arter har mulighed for at overleve på trods af globale klimaforandringer. Her behøver arterne kun at flytte sig få kilometer for at blive i den klimatype, de foretrækker. Det betyder, at mange arter også har længere levetid som



art i bjergene. Det samme kan ikke siges om lavlandsområderne, hvor klimaet er mere homogent over afstande på hundreder eller tusinder af kilometer. Den høje fremkomst af nye arter kombineret med lav uddøen (sammenlignet med andre steder på Jorden) skaber en høj artsrigdom i de tropiske bjerge.

3) Bjergområderne indeholder flest klimatyper. Sammenligner man de tropiske bjerge med lavlandet, så har bjergområderne det højeste *klimavolumen*. Et områdes klimavolumen betegner det antal klimatyper (en fin-kornet inddeling af områder baseret på deres gennemsnitlige nedbørsmængder og temperatur over et år), som findes per areal-enhed. Forskellige arter er tilpasset forskellige typer af klima – de har *klimanicher* – som de stort set aldrig bryder ud af. Den nordlige del af Andesbjergene indeholder over 45% af alle verdens klimatyper, mens lavlandet i Amazonas kun indeholder ca. 12% og Europa endnu færre. Fordi der findes så mange forskellige klimatyper på forholdsvis lidt plads, kan enormt mange arter sameksistere – og overleve (som beskrevet i pkt. 2) – i de tropiske bjerge.

4) Bjergenes habitater er de mest forskelligartede. Den såkaldte *habitat-heterogenitetssammenhæng* (som uddybes yderligere i artiklen om dansk skov på s. 35) beskriver, hvordan artsrigdommen i et habitat stiger med habitatets heterogenitet. Mønsteret bygger på en viden om, at et habitat med højere intern forskellighed – fx tilstedeværelsen af dødt ved og våde områder samt en kombination af tæt beplantning og lysåbne arealer – vil skabe bedre mulighed for, at arter kan leve i unikke nicher end i mere homogene habitater. I troperne er habitaterne i lavlandene mere homogene end længere oppe ad bjergsiden. Dette hænger bl.a. sammen med de mange forskellige klimatyper (se pkt. 2 ovenfor), men er også forårsaget af den varierede topografi sammenlignet med lavlandet.

Geologisk heterogenitet – en forkastet hypotese

Sammen med min kollega professor Jon Fjeldså havde jeg tidligere i min karriere foreslået en hypotese om, at *geologisk heterogenitet* – ud over de fire ovennævnte forklaringer på den høje artsrigdom i Andesbjergene – også var vigtig for områdets store

Fuglen kæmpekeglenæb (Conirostrum binghami) i en polylepisskov i Parque Nacional Cajas i Andes, Ecuador. Træerne i slægten Polylepis, som udgør polylepisskovene, vokser i ca. 4000-4500 meters højde, og deres skællede bark gør det svært for mosser og andre epifytter at sætte sig fast. Til gengæld er barken fyldt med insekter, som kæmpekeglenæbfuglen med sit spidse næb nemt kan få fat i. Foto: Jesper Sonne ifm. CMEC-ekspedition i 2022.

mængde af liv. Hypotesen gik ud på, at bjerge bestående af mange forskellige stentyper var mere artsrige end bjerge med færre stentyper (en *geologisk habitat-heterogenitetshypotese*).

Vi viser dog i vores artikler fra 2019, at vores egen idé og hypotese måtte forkastes – der fandtes i empirien ingen sammenhæng mellem artsrigdom og geologisk heterogenitet. Til gengæld faldt vi over et markant nyt mønster: Ikke alle tropiske bjerge er enormt rige på liv. Den høje artsrigdom findes primært i de bjerge, som har vulkansk oprindelse, eller som kommer af opløftet havbund (i Andesbjergene er begge dele tilfældet). Bjerge, som stammer fra tektoniske sammenfoldninger (fx Himalaya), er relativt artsfattige til sammenligning.

I vores artikler har vi fremsat en mulig forklaring, som endnu er utestet. Andre forskere vil sandsynligvis vise, at denne første forklaring er forkert og bidrage med bedre hypoteser. Sådan foregår forskningen også: Vi opdager nye mønstre, forkaster forklaringer, der ikke er gode nok og finder på nye forklaringer, som er bedre.

Vi er ikke helt i mål

Har vi så besvaret spørgsmålet om, hvorfor tropiske bjerge er de mest artsrige steder på

Jorden? Nej, men i vores biologiske forskning er vi kommet nærmere svaret, og de årsager, som jeg har beskrevet her, er nok en del af forklaringen.

Vi har også fået afvist flere tidligere hypoteser, fx at artsdiversitet skulle være styret af og i ligevægt med energi og nutidigt klima. Her ved vi nu, at tingene ikke er i ligevægt, men at de i stedet er dynamiske og altså hele tiden forandrer sig. De evolutionære processer sætter den dag i dag stadig store aftryk på fordelingen af artsrigdom på Jorden.

I dag er jeg stadig nysgerrig og fyldt med lyst til at finde den endelige forklaring, så ligesom jeg gjorde det i Andesbjergene under min første ekspedition i 1989, så fortsætter jeg.


Yderligere læsning

Carsten Rahbek (1995): *The elevational gradient of species richness: a uniform pattern?* *Ecography*.

Carsten Rahbek (1997): *The relationship among area, elevation, and regional species richness in neotropical birds.* *The American Naturalist*.

Carsten Rahbek, Michael K. Borregaard, Robert K. Colwell, Bo Dalsgaard, Ben G. Holt, Naia Morueta-Holme, David Nogués-Bravo, Robert J. Whittaker og Jon Fjeldså (2019): *Humboldt's enigma: What causes global patterns of mountain biodiversity?* *Science*.

Carsten Rahbek, Michael K. Borregaard, Alexandre Antonelli, Robert K. Colwell, Ben G. Holt, David Nogués-Bravo, Christian M. Ø. Rasmussen, Katherine Richardson, Minik T. Rosing, Robert J. Whittaker og Jon Fjeldså (2019): *Building mountain biodiversity: Geological and evolutionary processes.* *Science*.

A wide-angle photograph of a snow-covered mountain range. The mountains are layered, creating a sense of depth. The sky is a clear, pale blue. The snow is bright white, contrasting with the blue of the sky and the darker tones of the mountain ridges.

Biodiversitetsforskningen følger klassisk videnskabelig metode og tænkning. Den levende verden kan dog være langt mere uforudsigelig og tilfældig end fx almen mekanisk fysik, bl.a. fordi arter og processer forandrer sig over tid pga. evolution og ændringer i Jordens geofysiske forhold. Derfor er der flere lag i biodiversitetens forskningsmetode end der nødvendigvis er i visse andre videnskabelige discipliner.

An aerial photograph of a vast, flat, snow-covered landscape under a clear blue sky. The snow is textured with subtle ripples and shadows. In the lower center of the frame, a small, dark, rounded object, likely a seal pup, is visible, partially buried in the snow. The overall scene is serene and minimalist.

Forskning i biodiversitet

Carsten Rahbek
og Emma Emilie Andersen

Naturvidenskabelig metode og tænkning

Traditionel naturvidenskabelig metode kan kort opridses som formuleringen af en hypotese og en forudsigelse om, hvad der vil ske, hvis hypotesen er korrekt, samt udførelsen af et eller flere eksperimenter, hvorfra de analyserede og fortolkede resultater leder til en af- eller bekræftelse af hypotesen.

En hypotese bruges altså til at komme nærmere på et svar på et forskningsspørgsmål. Bliver hypotesen afkræftet, så formulerer man en ny hypotese på baggrund af den information, man har opnået. Bliver hypotesen bekræftet, så gentager man lignende eksperimenter, så man kan underbygge fundamentet for sin bekræftede hypotese.

Biologisk variation

Inden for biologisk forskning kan indsamlet data dog ikke altid struktureres på en måde, hvor en hypotese nemt kan be- eller afkræftes. Biologiske systemer er opbygget af så mange forskellige processer med så forskellige data, at det kan være svært at isolere virkningen af én bestemt proces.

Derfor kan det være mere hensigtsmæssigt at se på, hvor meget man kan forklare ved at bygge computermodeller af de systemer, man er interesseret i, og vurdere, hvilke virkninger forskellige processer har på modellens resultater. Man kan også bygge en model eller en simulering baseret på en hypotese og derfra observere forudsigelsen for, hvordan ens datasæt bør se ud, hvis det alene er dén hypotese, som er rigtig.

I begge tilfælde udtaler man sig i højere grad om *sandsynligheden* for, at et mønster i naturen ser ud på en bestemt måde, og derved undgår man hypoteser, som man entydigt kan enten be- eller afkræfte.

Peer-review

En vigtig del af videnskabelig metode og forskning er, at forskere bidrager til at sikre en høj standard i forskningen. En vigtig måde for forskerne at kvalitetssikre anden forskning på er gennem peer-review (på dansk *fagfællebedømmelse*) af hinandens forskning.

Når en gruppe forskere har gennemført et studie og skrevet en forskningsartikel om det, så sendes artiklen til gennemgang hos et videnskabeligt tidsskrift (figur 6). Inden artiklen kan udgives, skal den gennemlæses af andre forskere. Der gives typisk feedback, som skal rettes til af forfatterne inden artiklen evt. kan godkendes og udgives. En forskningsartikel kan således ikke udgives, hvis ikke andre forskere vurderer, at de anvendte metoder og argumenter følger god, videnskabelig praksis.

Ud over artikler i de videnskabelige tidsskrifter udgiver forskere også forskellige typer af rapporter. I biodiversitetsforskningen drejer det sig typisk om detaljerede faglige rapporter med forskningsbaseret baggrundsviden, som opsummeres i resuméer til fx beslutningstagere. Som eksempler på disse typer rapporter kan nævnes IPBES' videnskabelige konsensusrapporter og rapporten om bevarelse af biodiversitet i de danske skove, som Center for Makroøkologi, Evolution og Klima (CMEC) udgav i 2016 (se artikel om dansk skov på s. 35). Sådanne rapporter er ikke altid in-

Figur 6. To forsider på videnskabelige tidsskrifter baseret på artikler med forskere fra CMEC, i hhv. *Science* (th), hvor hovedartiklen fra 2016 beskrev en global kortlægning af genetisk diversitet for landlevende pattedyr og padder, og *Nature* (tv), hvor hovedartiklen fra 2020 fra *The Bird 10,000 Genomes (B10K) Project* kortlagde 363 fulde genomer fra 92,4% af verdens familier af fugle.



ternationalt eksternt fagfællebedømt, som IP-BES' konsensusrapporter er det, men hvordan og hvorvidt de er blevet eksternt bedømt bør som minimum være beskrevet i rapporten.

Kvantificering

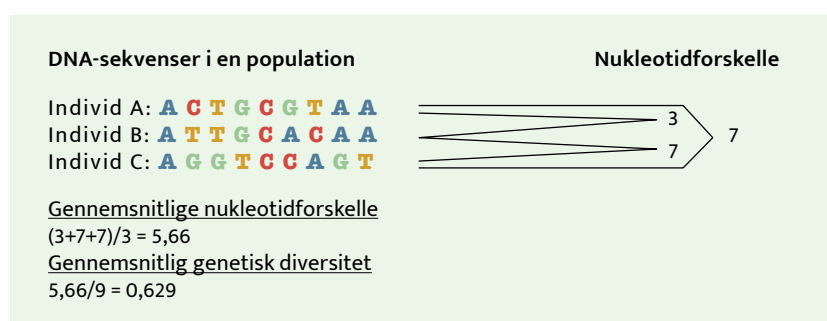
I biodiversitetsforskningen kan man kvantificere observationer på en række forskellige måder. Den form for kvantificering, man bruger, afhænger af, hvilke typer data man arbejder med, og er ofte forskellig på de tre niveauer af biodiversitet (gener, arter eller økosystemer introduceret i artiklen på s. 7), som man beskæftiger sig med.

Genetisk diversitet kvantificeres typisk ved at tælle den gennemsnitlige frekvens af forskelle mellem individers DNA (figur 7). Man kan sammenligne hele eller mindre dele af organismernes genomer, men typisk kigger

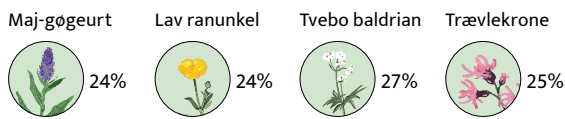
man på enkelte gener, altså mindre dele af en DNA-streng, der koder for et enkelt protein. Den genetiske diversitet er *intraspecifik*, hvis den måler forskelle mellem individer af den samme art, eller *interspecifik*, hvis den måler forskelle mellem forskellige arter.

Artsdiversitet kvantificeres normalt som enten *artsrigdom* (antal af arter) eller som en *frekvensfordeling* af antal individer for alle de enkelte arter, som man har observeret i eller indsamlet fra et område. Man kan så sammenligne artsrigdommen eller frekvensfordelingen mellem flere områder (figur 8 på næste side). Artsrigdom og frekvensfordeling kan kombineres i et samlet såkaldt *diversitetsindeks*, som fx Sorensen-indekset (opkaldt efter den danske botaniker Thorvald Sørensen), som man også kan bruge til at sammenligne, hvor forskellig artsdiversiteten er mellem to eller flere områder.

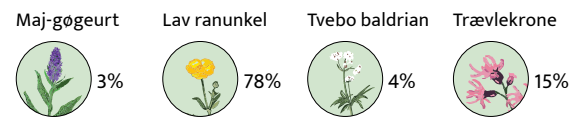
Figur 7. Kvantificering af genetisk diversitet som den gennemsnitlige frekvens af nukleotidforskelle på en DNA-sekvens eller et fuldt genom delt med længden på den analyserede DNA-sekvens.



Område 1



Område 2

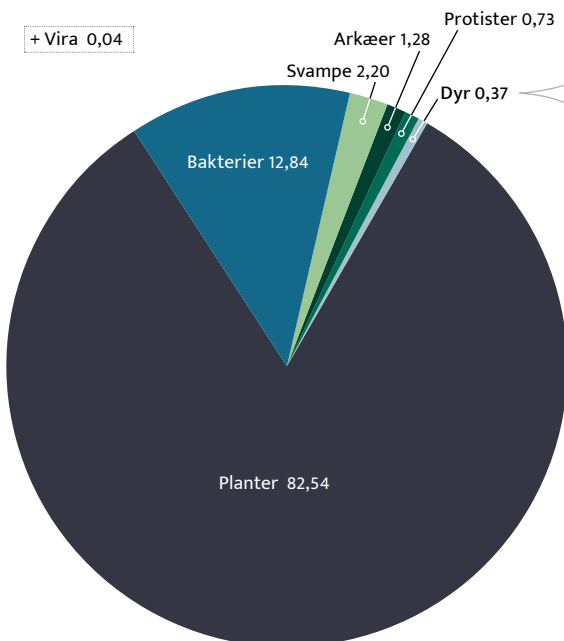


Figur 8. To fiktive danske blomsterenge. Artsrigdommen af de blomsterplanter, som kigges på i de to områder, er ens, men frekvensfordelingen af arterne er forskellig.

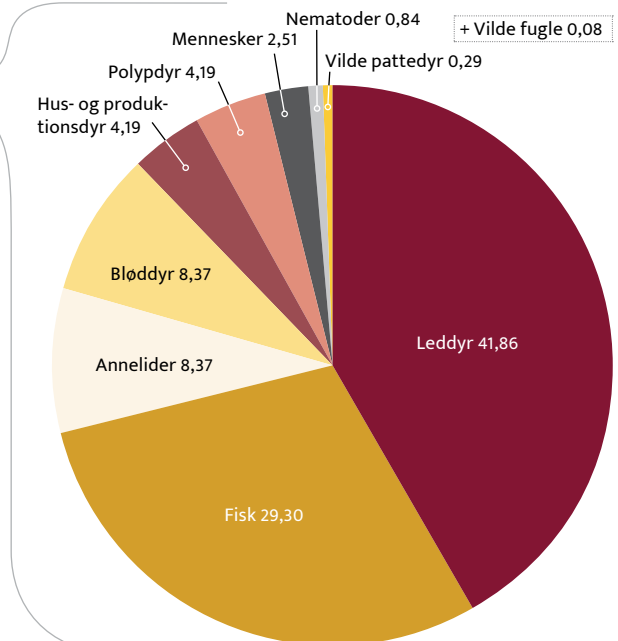
Man kan også kvantificere den taksonomiske (eller fylogenetiske) diversitet mellem forskellige områder, ved at måle på slægtskabsforholdene mellem de grupper af arter, som findes der. Hvis to forskellige områder har den samme artsrigdom, fx 40

forskellige arter, så vil områdernes arts- og biodiversitet se helt forskellig ud, hvis alle planterne i det ene område stammer fra den samme plantefamilie, og altså er tæt beslægtede, mens arterne i det andet område er mere forskellige.

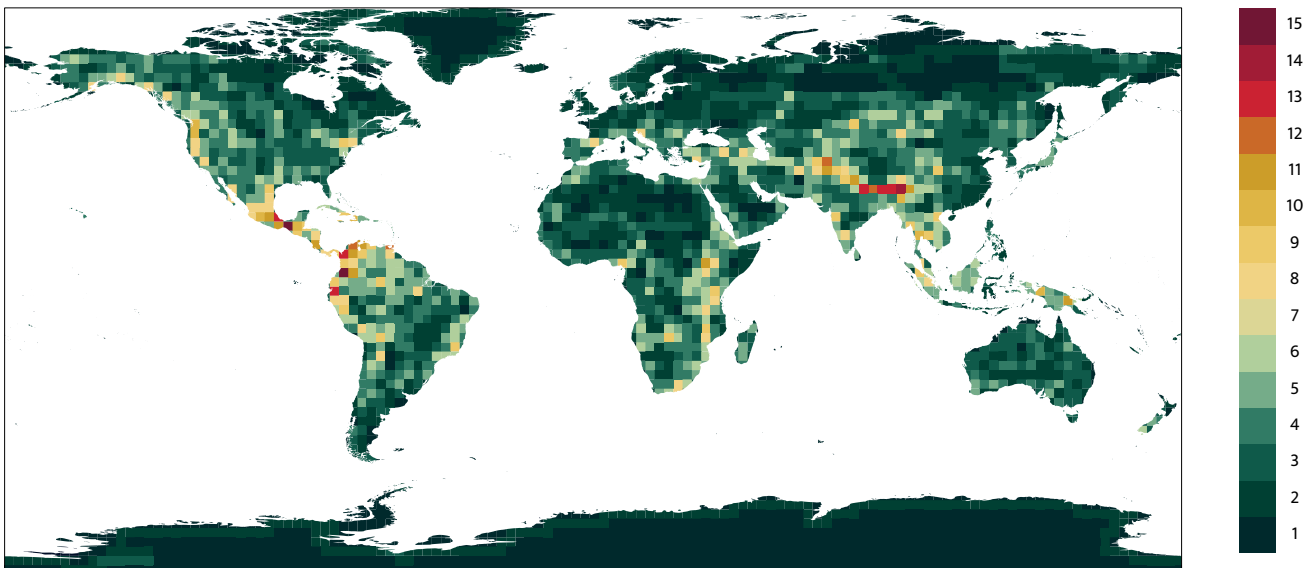
Biomassen på Jorden



Biomassen af dyr



Figur 9. Fordelingen af biomassen på Jorden i procent, til venstre fordelt på de taksonomiske riger og til højre på dyreriget (det er estimeret, at biomassen af reptiler og padder er så lille, at man kan se bort fra den). Figur modificeret fra artiklen Bar-On et al. (2017): The biomass distribution on Earth.



Figur 10. Jordens økosystemdiversitet på land plottet som antallet af økosystemtyper i kvadrater på 100.000 km². Data fra Olson et al. (2001): Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth.

Slutteligt kan man også se på fordelingen af arter målt i biomasse. Arter, som fylder mere på biomasse-niveau end andre arter, vil typisk også spille en større rolle i de økologiske processer i et givent område. Figur 9 viser fordelingen af biomassen på Jorden fordelt på taksonomiske riger og dyregrupper.

Økosystemdiversitet kvantificeres på samme måde som artsdiversitet, blot ved at bruge data på forekomsten og udbredelsen af økosystemtyper i stedet for arter. Fx viser figur 10, at nogle områder på Jorden indeholder langt flere forskelligartede økosystemtyper end andre. Antallet af forskellige økosystemer pr. 100.000 km² kan aflæses på skalaen til højre.

Man kan også vurdere økosystemdiversitet på baggrund af økosystemernes funktionalitet. Økosystemfunktionalitet handler ikke om, hvordan økosystemerne ser ud, og hvilke arter eller abiotiske faktorer de består af, men om hvad arterne i økosystemet har af funktioner. Et økosystems funktionalitet er fx ikke defineret af antallet af arter, som lever

der, men af de egenskaber som de tilstedeværende arter har, fx bestøvning eller nedbrydning. Med andre ord kan et økosystem med fx 10 meget forskellige arter i princippet have en større variation i økosystemfunktionalitet end et økosystem med 100 arter, der funktionelt ligner hinanden på trods af, at det første område ikke har den højeste artsrigdom.

Beskriv, forstå, anvend

Ud over de ovenstående principper for forskningen, så opererer biodiversitetsforskningen på CMEC efter endnu en rettesnor, som vi kalder *beskriv, forstå og anvend*.

Man begynder med at *beskrive* et område ved at spørge ”hvordan ser tingene ud?”. På baggrund af data finder man mønstre og tendenser, fx en geografisk kortlægning af arter over store områder på basis af en sammenstilling af utallige artsobservationer fra felten. Det kan også gøres i lille skala ved at sammenstille datasæt fra flere små plots i en skov eller indsamlinger fra forskellige steder langs en å.

Som led i beskrivelsesfasen dokumenterer man altså alle de observerede data og prøver så vidt muligt at gøre det på en måde, hvor man kan gå tilbage til dem og se, om de er rigtige. Det kan fx være ved at lave en herbariesamling med et enkelt individ af hver af de arter, som man fandt i et område. På denne måde kan man bedre opfylde det videnskabelige krav om, at resultater skal kunne efterprøves, genanalyseres eller analyseres med en ny metode.

Efter beskrivelsesfasen prøver man at *forstå* området. Det gøres ved at spørge ”hvorforser tingene ud, som de gør?”. Det involverer i høj grad analyser af de observationer, som man gjorde sig i beskrivelsesfasen, fx gennem statistiske modeller.

Det sidste led er *anvendelse* af den viden, som blev dannet i de to første faser, fx til at forstå eller løse nye forskningsspørgsmål eller i forbindelse med naturbevaring eller naturbaserede løsninger. Ofte vil forskere og forskningsinstitutioner lave anvendelsesfokuserede analyser (fx myndighedsrapporter eller rapporter til EU og FN), men de står ikke for selve implementeringen. Det sker som oftest med myndighedernes forvaltning, NGO’er eller den private sektor på baggrund af de anbefalinger og scenarier, som formuleres med udgangspunkt i analysernes resultater.

Skala og perspektiv er afgørende

Når man forsker i biodiversitet er det afgørende, at ens videnskabelige forståelse af begrebet favner alle de relevante perspektiver og skalaer. Uagtet disciplin afhænger forskningsresultater nemlig af forforståelse

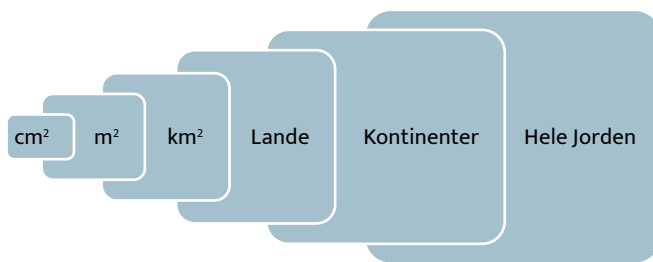
af den brede kontekst og de rammer, som man arbejder med. De følgende afsnit introducerer de videnskabelige tanker og forståelser, som går forud for forskningsarbejdet med biodiversitet.

Et holistisk perspektiv

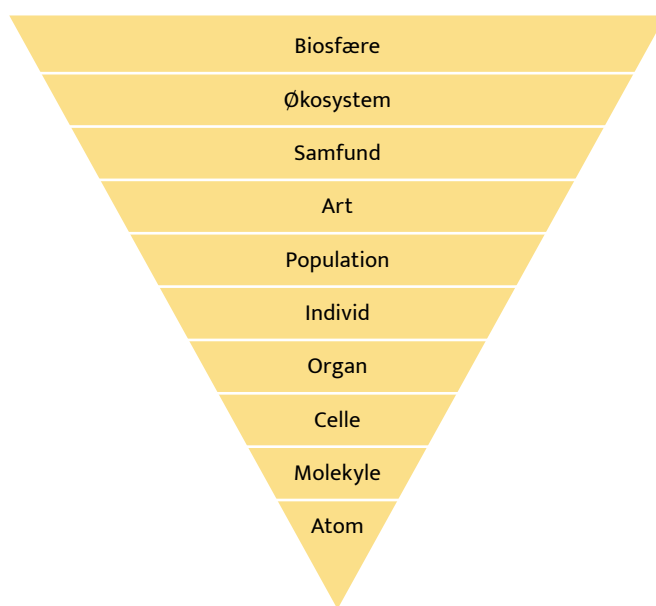
Først og fremmest bør man prøve at forstå biodiversitet så holistisk som muligt. Det vil sige, at man fokuserer på problemernes helhed og kontekst snarere end dets enkelte bestanddele. Inden for biodiversiteten drejer det sig særligt om at have alle tre niveauer (gener, arter, økosystemer og deres processer) samt forskellige skalaer af rum, biologisk organisering og tid for øje, når man undersøger forskningsspørgsmål. Man kan altså ikke blot forholde sig til et lille hjørne af verden eller et øjebliksbillede, hvis man vil forstå biodiversitetens mønstre og mekanismer. Sagt på en anden måde, så er det svært at beskrive hele skovens biologi og biodiversitet ved at studere et enkelt træ – uanset hvor grundig man er.

Biodiversitet i forskellig rumlig skala

Når man arbejder med biodiversitet tager man altid højde for, hvilken rumlig skala man arbejder med (figur 11). Fx vil biodiversiteten inden for en enkelt kvadratmeter skov naturligvis være forskellig fra biodiversiteten i hele skoven. Det skyldes, at de rumlige rammer sætter en række begrænsninger for antallet af individer og arter, som kan være der. Samtidig er de forskellige biologiske processer og interaktioner afhængige af skala. Fx er konkurrence formentlig ikke særlig vigtig, hvis man sammenligner artsrigdommen på forskellige kontinenter.



Figur 11. Forskellig rumlig skala.



Figur 12. Biologisk organisering fra lille til stor skala.

Omvendt vil konkurrence spille en betydelig rolle i lille skala, fx i et enkelt biologisk samfund.

Det betyder ikke, at en bestemt skala er mere korrekt end en anden. Det betyder blot, at man må forholde sig til, hvilken rumlig skala man arbejder med, og kende de processer, der er mest relevante på den skala. Skalaen er også afgørende for de mønstre, som ens observationer giver, og dermed også for ens resultater. Det betyder, at man direkte kan sammenligne forskellige forskningsresultater fra samme skala, mens sammenlig-

ninger af undersøgelser fra forskellig skala i højere grad bruges til at sige noget om skala-forskelle.

Biologisk organisering

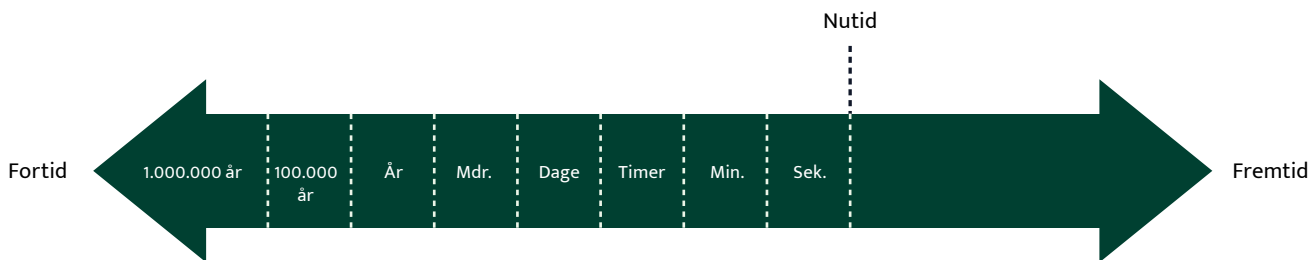
En anden relevant skala er den biologiske organisering (figur 12). Inden for genetisk diversitet arbejder man med de mindste niveauer af biologisk organisering (fx molekyler og DNA-sekvenser). Artsdiversiteten forholder sig til individer og populationer (men kan for så vidt også analyseres med genetisk data i lille skala). Ser man på områder, så vil alle tilstedeværende arter danne et samfund, som sammen med områdets abiotiske og geofysiske faktorer danner økosystemerne (fx steppe eller mose). Tager man endnu et trin op ad den biologiske organisation, så skaber summen af forskellige økosystemer i sidste ende hele biosfæren.

I virkeligheden hænger disse organisatoriske niveauer sammen, idet ændringer i ét niveau oftest vil have effekter på de andre niveauer.

Biodiversitet i forskellige tidsperspektiver

Man kan ikke forstå biodiversitet uden at forholde sig til tidsperspektiv og tidsskala (figur 13 på næste side). Fx går en stor del af biodiversitetsforskningen ud på at forstå, hvorfor Jordens mangfoldighed og fordeling af liv ser ud som den gør i dag, og svaret på det spørgsmål findes i høj grad langt tilbage i Jordens geologiske og evolutionære historie. Jordens nuværende biodiversitet er formet af de hændelser, som er foregået gennem de sidste mange millioner af år, bl.a. istider, geologiske processer og naturkatastrofer.

Hvordan havde livet fx set ud i dag, hvis ikke Jorden tilfældigvis var blevet ramt af den



Figur 13. Forskellige tidsperspektiver (fortid, nutid og fremtid) fra en lille skala (sekunder) til en stor skala (1.000.000 år).

meteor og de globale vulkanudbrud, som forårsagede dinosaurernes uddøen for ca. 66 millioner år siden? På samme måde som tidligere tilstande har påvirket nutidens biodiversitet, så er nutidens tilstande med til at forme fremtidens biodiversitet. Når man forholder sig til biodiversitet i forskellig tidsmæssig skala, vil man opdage, at livet og dets fordeling på Jorden i dag derfor ikke er et udtryk for en uforstyrrelig balance på kloden. Det er i høj grad dynamisk.

Forskningens forskellige metoder

Biodiversitetsforskningen er i rivende udvikling, og nye (og bedre) metoder udvikles konstant. Forskningen har i nyere tid udviklet sig til en vidtfavnende videnskabelig disciplin, som analyserer ufatteligt store datasæt om arter, deres geografiske bevægelses- og fordelingsmønstre, deres interaktioner med hinanden, deres overlevelsesstrategier og

deres genetiske sammensætning, og det hele typisk sat i forhold til data om abiotiske og geofysiske forhold. Forskningen beskæftiger sig ikke kun med mønstrene i disse datasæt, og hvad der forårsager dem i et nutidigt perspektiv – den analyserer også på data, som er flere millioner år gamle, og forsøger at forudsæ fremtidens mønstre.

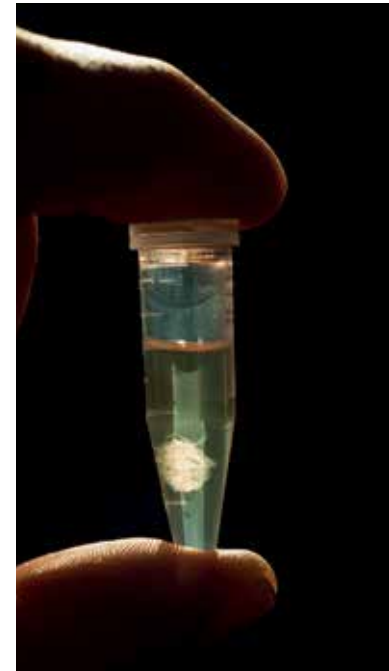
Store og relevante datasæt

Biodiversitet er et forskningsområde, hvor man typisk arbejder på tværs af skalaer, ofte op til kontinentale og globale skalaer, og med lange tidsperspektiver. Det stiller krav til mængden af data og til, at data kommer fra forskellige steder og er sammenlignelige på tværs af tid og rum. I den forbindelse udformer man sine forskningsspørgsmål, og derefter forholder man sig til, hvilke slags data man skal bruge for at svare på netop dét spørgsmål. Ens data skal være passende til at besvare det stillede forskningsspørgsmål under de rette antagelser og parametre. Hvis

ikke lige præcis den slags data, man skal bruge, allerede eksisterer, så må man ud at indsamle dem selv.



Figur 14. Professor Kasper Thorup, CMEC, ringmærker en munk (*Sylvia atricapilla*) i Rungstedlund. I Danmark foretages ringmærkning nænsomt og kun af trænede ringmærkere med licens. Fuglen slippes hurtigt fri efter mærkningen.
Foto: Marie Rubæk Holm.



Figur 15.
 Tv. Biller i samlingen fra Statens Naturhistoriske Museum. Foto: Birgitte Rubæk.
 Th. DNA isoleret fra en dråbe fugleblod og suspenderet i isopropanol. Foto: Brian Guzzetti.

Feltarbejde og dataindsamling

Når biodiversitetsforskere indsamler egne data, kan det foregå på flere måder. Man kan tage i felten og opmåle, optælle eller tage fysiske vævsprøver fra individer i naturen, som der senere kan laves fx genetiske undersøgelser på. Man kan også tage prøver fra organismer i videnskabelige naturhistoriske samlinger (figur 15), fx en DNA-prøve fra en samling af fugleskind, for at udregne den genetiske diversitet blandt arterne eller for at bestemme slægtskabet mellem arter.

Derudover findes der en række andre metoder til dataindsamling, eksempelvis vildtkameraer, automatiserede lydoptagelser, ringmærkning af fugle (figur 14), monitoring via satellitter (fx GPS-sporing af dyrs vandringer eller dokumentation af arealanvendelse) og citizen science (fx apps til registrering af arter). Hertil kommer teknikker, som indsamler data om habitatstrukturer (fx LIDAR-data fra fotografering) eller geofysiske data fra satellitter.

Fordelen ved selv at indsamle sine data som forsker er, at man er fuldt bevidst om, hvor informationen kommer fra, og hvilke processer (transport-, analyse- og beregningsmæssige) data har været igennem, før man anvender dem, og man kan selv lave indsamlingsprotokollerne. En ulempe er, at feltarbejde er tids- og ressourcekrævende, hvorfor man også ofte bruger information fra store databaser, hvor de enorme datamængder i de sidste årtier er blevet gjort frit tilgængelige.

Standardiseret prøvetagning

For at mindske uønsket variation i de biologiske prøver arbejder man med standardiseringer af prøvetagninger. En fælles standard skaber mere troværdige sammenligninger af data og resultater på tværs af forskningsstudier. Man kan også vha. avanceret statistik standardisere indsamlet data, som ikke er ensartet, så det bliver nemmere at arbejde med. Det gør man i høj grad i dag, selvom man klassisk har forsøgt at gøre det ved at standardisere selve dataindsamlingen.



Figur 16. Kvadrant-sampling af en eng med søgræs af arten *Cymodocea rotundata* omkring en ø på Laamu-atollerne, Maldiverne. Foto: Alex Mustard.

Én måde man kan standardisere på, er ved at inddеле ens geografiske arbejdsområder i kvadrater, der alle har nøjagtig samme størrelse og form (figur 16). Man kan undersøge, hvordan variationen af liv ser ud i et givet kvadrat og sammenligne den information med informationen fra områdets andre kvadrater. Her spiller skala naturligvis en rolle igen, fordi man vil opnå forskellige resultater afhængig af, hvilken størrelse kvadraterne har, og hvor stort et område man vælger at undersøge.

Naturens egne eksperimenter

Det er svært at udføre eksperimenter med vilde arter i naturen, som vi kender det fra laboratoriernes kontrollerede forsøg, og umuligt at udføre dem i stor regional eller global skala. Derfor må forskere udnytte naturens egne "eksperimenter", fx ved at observere artsrigdommen på øer af forskel-

lig størrelse og med varierende afstand til fastlandet, som arterne har spredt sig fra. I sådan en situation kan man se øer som "reagensglas" i et meget stort forsøg.

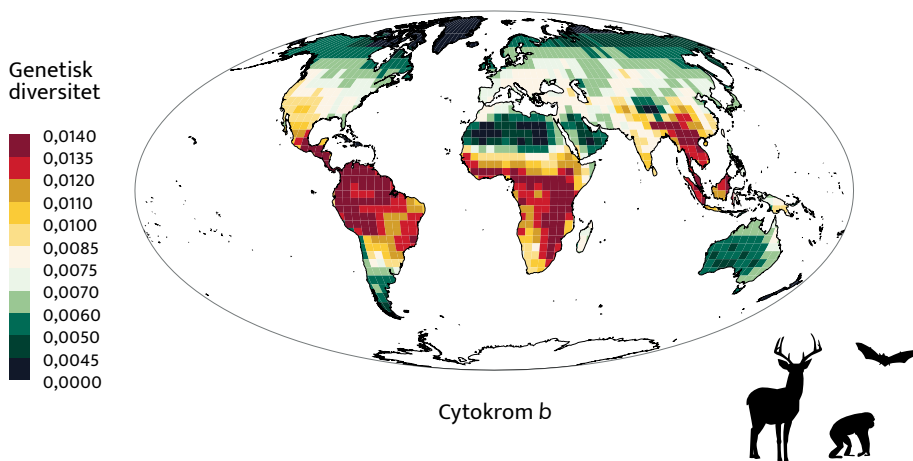
Man kan også se på, hvad der sker efter voldsomme forandringer som følge af fx vulkanudbrud, hvor øer kan komme op til havoverfladen, eller efter skabelsen af kunstige øer som Peberholmen. Hvilke arter indvandrer først? Hvordan formes nye artssamfund, og hvordan udvikler de sig over tid?

Simuleringer

I biodiversitetsforskningen kan data fra fortiden, fx indsamlet fra prøver i naturhistoriske samlinger, bruges til at opnå viden om, hvordan livet på Jorden før i tiden fx har reageret på naturlige klimaforandringer. Den viden kan bruges til at sige noget om, hvordan nutidens liv på Jorden formodes at reagere på de klimaforandringer, som vi står over for nu. Simuleringer bruges ofte til (på basis af eksisterende data) at vise, hvordan verden ville se ud ifølge en bestemt teori eller hypotese. Teorien kan man derefter teste ved at sammenligne simuleringen med observeret data.

Geografiske kort

Generelt for biodiversitet gælder det, at variationen af liv skal forstås i det rum, det befinder sig i. Man er altså interesseret i den geografiske fordeling af det liv, som undersøges. Ved hjælp af geografiske informationssystemer (GIS) og geoinformatik (videnskab baseret på geografiske data) kan biodiversitetsdata kobles på geografiske kort og dermed netop afsløre mønstre af livets fordeling på Jorden.



Figur 17. En modelleret forudsigelse af den intraspecifikke genetiske diversitet (diversiteten mellem individer af samme art) af terrestriske pattedyr på Jorden, målt som det gennemsnitlige antal mutationer per nukleotid-par for genet cytokrom b. Figur modificeret fra artiklen Theodoridis, Rahbek og Nogués-Bravo (2021): Exposure of mammal genetic diversity to mid-21st century global change.

Der findes mange eksempler på kort, som viser mønstre eller forudsigelser af Jordens biodiversitet, hvad end det er genetisk diversitet, artsdiversitet eller økosystemdiversitet. Figur 17 viser fx en modelleret forudsigelse af den intraspecifikke genetiske diversitet blandt terrestriske pattedyr i genet for cytokrom *b*.

Metoder og muligheder i konstant udvikling

Biodiversitet er et forskningsfelt, som er i rivende og konstant udvikling. Det skyldes bl.a. udviklingen af revolutionerende teknikker inden for indsamling og statistiske analyser af data. Derfor publiceres der med jævnt mellemrum nybrud i biodiversitetsforskningen, og lærebøgerne skal løbende revideres.

Fx har forskere i mere end 100 år kendt til arts-areal-sammenhængen om, at jo større et naturområde er, des flere arter indeholder det. I al den tid har forskerne undersøgt, om en sådan sammenhæng også findes for arters genetiske diversitet. Vha. 92.801 DNA-sekventeringer af gener fra mere end 4.500 forskellige arter udgav en gruppe internationale forskere, bl.a. fra CMEC, i september 2016 en kortlægning af genetisk diversitet på Jorden. De kunne bl.a. konkludere, at den genetiske

diversitet er lavere i områder, som er påvirket af menneskelig aktivitet – og derfor typisk arealmæssigt mindre – end den er i områder, som er større og beskyttede. Vi taber altså ikke kun arter, når vi forstyrrer naturen negativt, vi taber også genetisk diversitet.

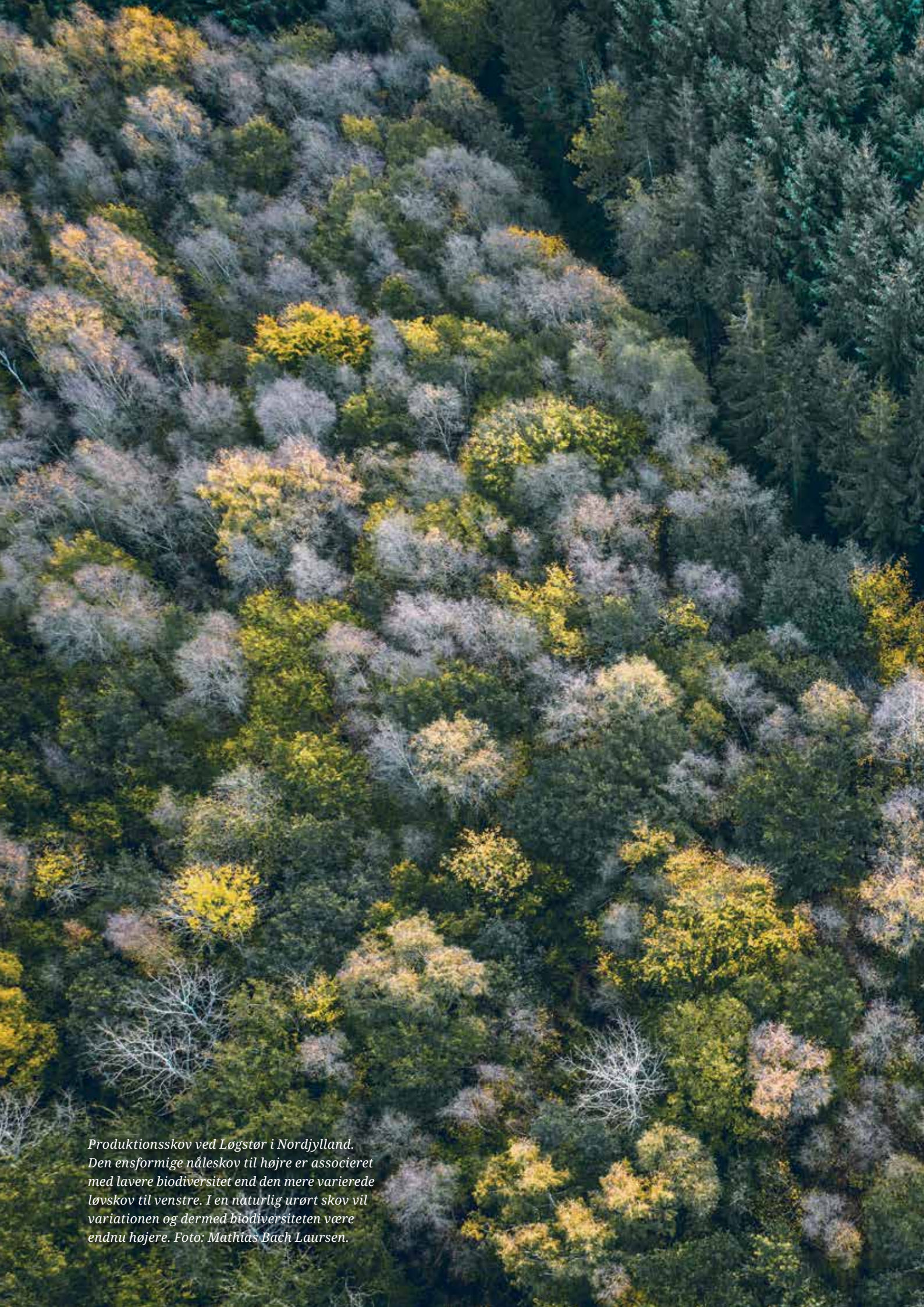
Studiet er skelsættende, og det er et godt eksempel på, hvordan forskningen kan rykke grænserne for, hvad der er muligt at undersøge. Indimellem sker der nemlig en opdagelse, som – ligesom studiet i 2016 – får folk til stoppe op og forstå verden på en ny måde. Det er ganske kendetegnende for biodiversitetsforskningen.

Yderligere læsning

Spyros Theodoridis, Carsten Rahbek og David Nogués-Bravo (2021): *Exposure of mammal genetic diversity to mid-21st century global change*. *Ecography*.

Yinon M. Bar-On, Rob Phillips og Ron Milo (2018): *The biomass distribution on Earth*. *PNAS*.

Andreia Miraldo, Sen Li, Michael Krabbe Borregaard, Alexander Flórez-Rodríguez, Shyam Gopalakrishnan, Mirnesa Rizvanovic, Zhiheng Wang, Carsten Rahbek, Katherine A. Marske og David Nogués-Bravo (2016): *An Anthropocene map of genetic diversity*. *Science*.



Produktionsskov ved Løgstør i Nordjylland. Den ensformige nåleskov til højre er associeret med lavere biodiversitet end den mere varierede løvskov til venstre. I en naturlig urørt skov vil variationen og dermed biodiversiteten være endnu højere. Foto: Mathias Bach Laursen.



Biodiversitet i de danske skove

Carsten Rahbek, Anders Højgård Petersen
og Emma Emilie Andersen

Danmark er fra naturens side et skovland, men der er praktisk taget ikke naturlig skov tilbage på nær nogle få pletter hist og pist. Forskningen viser, at skoven med alle dens forskellige habitater er hjemsted for flest hjemmehørende danske arter (også de sjældne), og at urørt skov med naturlige processer er et af de meste effektive tiltag for at bevare biodiversiteten herhjemme.



Figur 18. Den vilde, urørte danske skov er – modsat en homogen produktionsskov – levested for titusindvis af arter i alle organismegrupper, men især insekter og svampe. Urørt skov er karakteriseret ved masser af dødt ved og naturlige vådområder. I dag er langt de fleste skove drænede af hensyn til træproduktion, men oprindeligt var en stor del af skovene vådområder.

Øverst ses en privatejet produktionsskov syd for Sorø.

Foto: Karsten Elmose Vad.

Nederst ses den privatejede Suserup Skov ved Sorø, der med en størrelse på ca. 20 hektar har været uden skovdrift i omkring 400 år og har stået helt urørt i ca. 100 år.

Foto: Rune Engelbreth Larsen.





De mange træer strækker sig fremefter i lange rækker. Stilheden fylder, kun afbrudt af flagspættens trommeslag og bogfinkens sang. På den fugtige skovbund er brune og røde blade i nedbrydning sammen med kviste og grene, og det dufter af jord og regn. Du kender skoven, for du har nydt den gang på gang igennem hele dit liv. Her er natur – her er *naturligt*. Eller hvad? I virkeligheden går du rundt i en plantageskov med dræningsgrøfter og optimeret træproduktion. Det er en skov, som er påvirket af de mennesker, der i mange hundreder år har ryddet de oprindelige skovområder og omplantet skovene til produktion til fordel for menneskene selv.

Fra grundforskning til anvendelse

En stor del af biodiversitetsforskningen er grundforskning, der forsøger at forstå de pro-

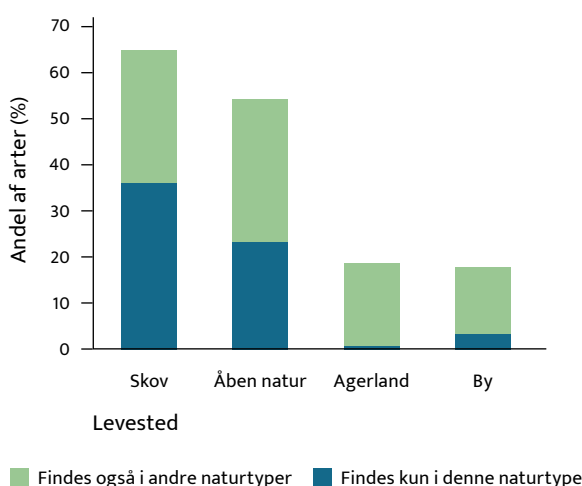
cesser og mønstre, som afgør fordelingen af liv på vores planet og i mindre skala i vores skove. Denne biodiversitetsforskning anvendes som vidensgrundlag for forvaltning og politiske tiltag globalt, nationalt og regionalt.

Eksempelvis anvendes konsensusrapporterne fra FN's biodiversitetspanel IPBES i rådgivningen af regeringer og andre beslutningstagere, og både Biodiversitetsrådet og de danske universiteter udgiver løbende faglige rapporter om fx naturens tilstand eller kommer med konkrete anbefalinger til forvaltningen af biodiversitet.

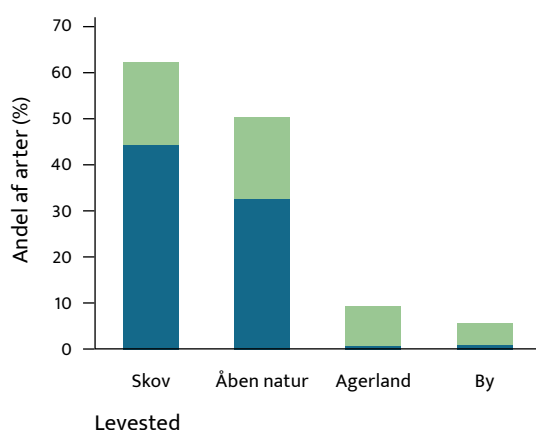
Skovrapporten

I denne artikel tager vi udgangspunkt i data og hovedpointerne fra den forskningsbaserede rapport *Bevarelse af biodiversiteten i de danske skove*, der blev udgivet i 2016 af

A) Alle landlevende arter i rødlisten (8005 arter)



B) Truede landlevende arter i rødlisten (1351 arter)



Figur 19. Foretrukne levesteder for hhv. alle landlevende arter i den danske rødliste fra 2011 (A) og alle truede (kritisk truede, moderat truede og sårbare) landlevende arter i den danske rødliste fra 2011 (B). Søjlernes blå del viser andelen af arter, som udelukkende findes i den pågældende naturtype, mens den grønne del viser andelen af arter, som både lever i den pågældende naturtype og i en eller flere andre naturtyper. Delvist ferskvandslevende arter (fx ferskvandstilknyttede insekter) er også medtaget. Figur fra rapporten *Bevarelse af biodiversitet i de danske skove* udgivet af CMEC i 2016.

Center for Makroøkologi, Evolution og Klima (CMEC). Rapporten fik hurtigt tilnavnet *Skovrapporten* og blev sidenhen det altafgørende vidensgrundlag for den politiske beslutning om at omlægge en væsentlig del af de danske skove (figur 18) – 75.000 hektar – fra produktionsskov til naturlig, urørt skov uden produktion og med naturlige vanddynamikker og dødt ved (dvs. døde og rådne stammer, grene og rødder).

Danmark er et skovland

Danmark er fra naturens side primært et skovland. Skove er områder, hvor træer er de dominerende organismer, men hvor også vandområder med mose og søer er hyppige. Næsten 25% af skovarealet har været naturlige vådområder. Hertil kommer masser af lysninger i forskellig størrelse, primært skabt af forstyrrelser som storme, oversvømmelse og afbrændinger og herefter vedligeholdt af græssende dyr. I disse områder har en stor del af Danmarks lysåbne arter hørt til.

Skoven er kommet og gået i Danmark med det skiftende klima og de tilbagevendende istider igennem millioner af år. I de seneste mellemistider var Danmark helt eller delvist dækket af skov. Eksempelvis var Vestjylland dækket af eg, elm, hassel, birk, taks, fyr og gran i Harreskov-mellemistiden for ca. 700.000 år siden, mens andre mellemistider også har bragt bl.a. lærk og buksbom til landet. Den seneste istid var på sit højeste for ca. 22.000 år siden, og med de efterfølgende temperaturstigninger bredte skovene sig for ca. 12.000-10.000 år siden, så de dækkede det meste af landet. Alt det ved vi fra omfattende studier af pollen fra miljøet og DNA-prøver fra planterester.

Arterne – også de truede – findes i skovene

Danmarks historie som skovland har resulteret i, at hele 65% af de landlevende og hjemmehørende danske arter er knyttet til skovene, enten som deres eneste habitat (36%) eller som ét habitat ud af flere (29%) (figur 19A).

Gennem millioner af år er arterne blevet evolutionært tilpasset til at leve i skovens varierende økosystemer, som gennem tiden har haft stor diversitet af levesteder. Men mange af disse levesteder findes ganske enkelt ikke i nutidens produktionsskove. Arterne er ikke tilpasset produktionsskoven, men er afhængige af de naturlige og intakte skovøkosystemer, som i dag er en mangelvare. Derfor findes en stor del (62%) af Danmarks *truede* landlevende arter netop i skovene, enten udelukkende (44%) eller også i andre habitattyper (18%) (figur 19B).

De oprindelige skove er blevet ryddet til fordel for menneskets arealanvendelse, primært landbrug, som i dag udgør mere end 60% af det samlede danske landareal. I begyndelsen af 1800-tallet var skovarealet i Danmark helt nede på ca. 4%. Sidenhen er det danske skovareal godt nok steget til ca. 600.000 hektar, svarende til ca. 14% af Danmarks landareal (figur 20), men det skyldes stort set udelukkende et øget areal af plantageskove, som bruges til produktion af træ, og i nogle dele af landet som sikring mod sandflugt (fx Nord- og Vestjylland samt Nordsjælland).

Produktionsskovene er typisk meget homogene. Der findes normalt kun få træarter, og ofte er disse indførte. Træerne er forholdsvis unge, og skoven indeholder stort set intet dødt

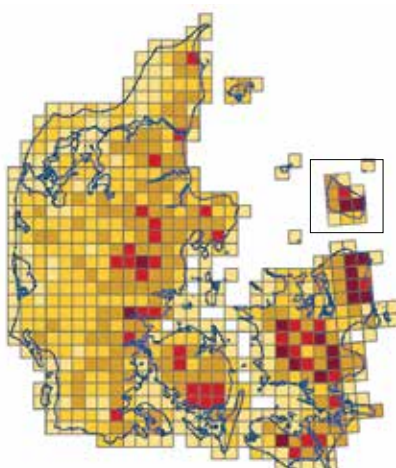


En stor flagspætte (*Dendrocopos major*) stikker hovedet ud af sit redegul i et træ i en dansk skov. Foto: Mads Hagen.

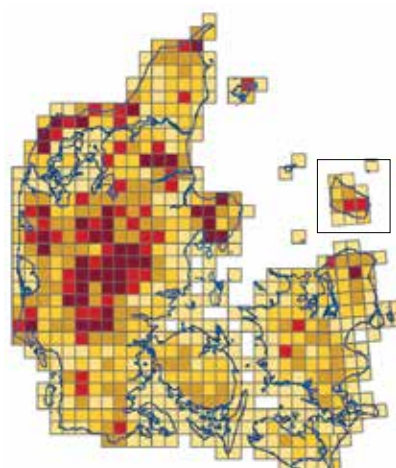
Udbredelsen af skov i Danmark



Areal af løvskov



Areal af nåleskov



Ha. pr. kvadrat 0 - 200 200 - 500 500 - 1000 1000 - 1500 1500 - 4189

Figur 20. Udbredelsen af skov i Danmark, samt udbredelsen af hhv. løvskov og nåleskov udtrykt ved arealet i de 633 kvadrater, som analyserne er baseret på. Et kvadrat har et areal på 10.000 hektar. Der er ca. 600.000 hektar skov i Danmark. Natur- og Biodiversitetspakken blev i 2020 aftalt i Folketinget med en målsætning om, at 75.000 hektar skulle omlægges til urørt skov. Figurer fra rapporten *Bevarelse af biodiversitet i de danske skove* udgivet af CMEC i 2016.



Figur 21. Svampe af arten *Mucidula mucida* (porcelænschat) voksende på dødt ved i en dansk løvskov. Foto: Jens H. Petersen.

ved. En produktionsskov med løv- eller nåletræer har ofte under 5 m³ dødt ved pr. hektar, hvorimod en naturlig, urørt skov typisk vil have mellem 100 og 200 m³ pr. hektar afhængig af bl.a. jordbundsforhold. Ca. 20-30% af skovens arter er enten direkte knyttet til dødt ved eller er afhængige af dødt ved i fødekæderne (figur 21 og 22). Af disse grunde – og fordi skovenes vådområder drænes og naturligt blomstrende træer og buske fjernes – indeholder produktionsskovene meget få levesteder i forhold til de oprindelige skove; habitaternes heterogenitet er simpelthen for lav til at kunne opretholde en høj biodiversitet.

Flere vådområder, mere dødt ved samt en balance mellem tæt bevoksede og lysåbne arealer vil betyde højere habitat-hetero-



Figur 22. Den urørte skov giver levedmuligheder for en række saproxylliske arter (arter som er afhængige af dødt ved). Billearten *Gnorimus nobilis* (grøn pragtorbist), her et individ i Allindelille Fredskov, er fx helt afhængig af råddent træ og hulrum i gamle træer til sine æg og larver. Foto: Steen Drozd Lund.

genitet. Det vil gavne alle skovens arter fra svampe og insekter til fugle og pattedyr. Mange svampe- og insektarter, fx poresvampe og biller som træbukke og smældere, er nemlig knyttet til døde og rådne stammer af løvtræer (figur 21 og 22). Desuden lever mange af skovens truede mosser og laver på barken af meget gamle træer, og andre truede arter, fx sommerfugle, orkidéer, flagermus og fugle, er knyttet til forskellige typer af skovområder som skovbryn, skovmoser og skovenge.

Naturlige forstyrrelser og forskellighed

Så hvordan øger man den variation i de danske skove, som er så essentiel for bevarelsen af skovens arter og biodiversitet? En vej derhen er udlægning af skovarealer, som er uden produktionsformål, og hvor naturlige processer får lov at foregå uhindret, så naturen får lov at være natur. I urørt skov genoprettes over tid de varierende naturlige habitater, som skovarterne evolutionært er tilpasset, med en forskelligartethed af lys- og vandtilgængelighed samt dødt og råddent ved.

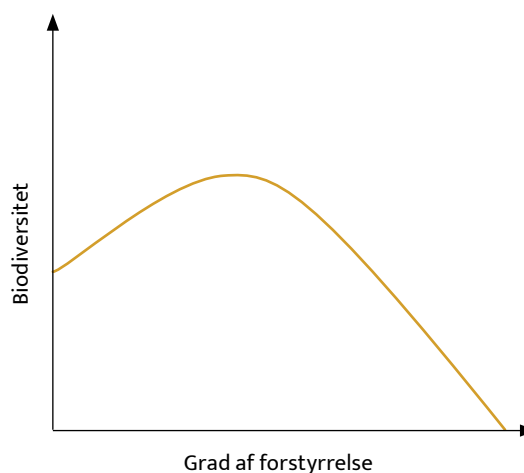
Politiske beslutninger om at lave urørt skov (se s. 43) bygger på et solidt videnskabeligt forskningsgrundlag, bl.a. inden for nogle af de veldokumenterede ”grundlove”, som vi ved er med til at forme biodiversiteten. Vi ved bl.a., at skovområder, som for nyligt er udlagt som urørte, skal have tid – *kontinuitet* – til naturligt at genoprettes efter mange år under menneskelig påvirkning.

Vi ved også, at gendannelsen af de naturligt varierende områder i urørt skov primært skyldes, at skovene får mulighed for natur-

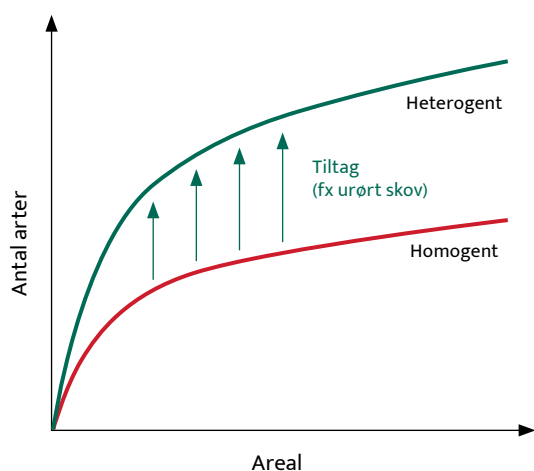
ligt at gennemgå *succession*, efter at de løbende udsættes for naturlige forstyrrelser, primært vedrørende storme, afbrændninger og vandforhold (fx oversvømmelser). Afgræsning fra store græssere er også en positiv forstyrrelse, som kan bidrage væsentligt til at holde de naturlige lysninger åbne og varierede.

Forstyrrelser kan have flere effekter på økosystemer, og man taler ofte om, at en vis mængde forstyrrelser bidrager positivt til et områdes biodiversitet. Hypotesen om mellemstore forstyrrelser (på engelsk *the intermediate disturbance hypothesis*) indikerer, at et områdes biodiversitet er størst, når det påvirkes af en mellemstor grad af forstyrrelse (figur 23). Ved en lavere forstyrrelsesgrad vil biodiversiteten blive mindre, fx fordi konkurrencedygtige arter vil dominere, mens alle tilstedeværende arter i et økosystem risikerer uddøen ved for store forstyrrelser.

Når et område har været udsat for en forstyrrelse, og det efterfølgende får tid til at stå urørt hen, foregår der *succession*, hvor artssammensætningen i et område ændrer



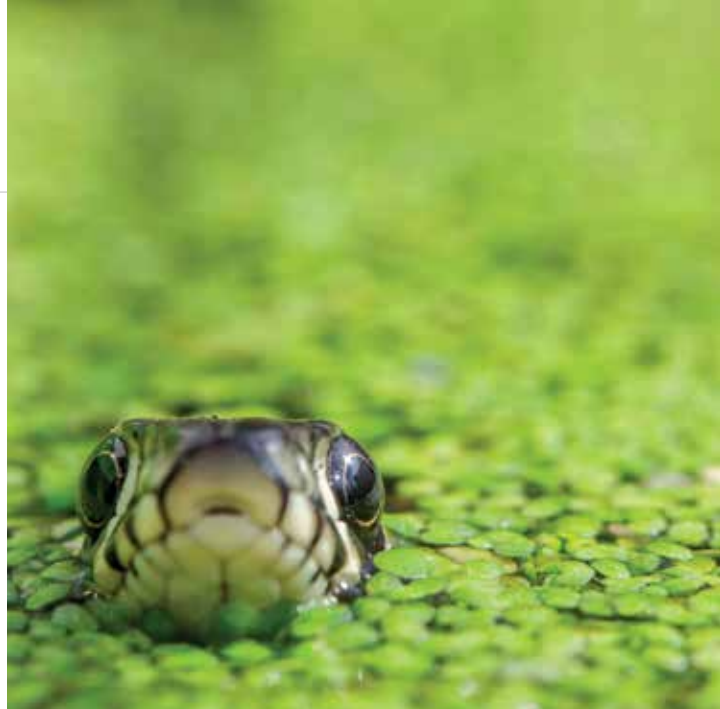
Figur 23. Hypotesen om mellemstore forstyrrelser.



Figur 24. Habitat-heterogenitetssammenhængen visualiseret som to arts-arealkurver; én for et homogent habitat (rød) og én for et heterogent habitat (blå). Figur fra rapporten *Bevarelse af biodiversitet i de danske skove udgivet af CMEC i 2016.*

sig over tid. Succession forløber i det, der kaldes en *patch-dynamik*, hvor lysåbne områder langsomt vokser til fuld skov igen, mens andre områder i det store sammenhængende skovområde bliver til nye lysninger. Udviklingen i skovens økosystemer foregår altså på en måde, hvor store skovarealer over hundrevis af år bliver til et dynamisk landskab, der ikke har et endegyldigt klimaksstadiet.

Naturlige forstyrrelser i urørt skov samt tilstedeværelsen af vådområder, gamle træer, udvikling af jordbundens sammensætning og plads til langsomt voksende organismer vil over tid skabe varierende arealer med høj habitat-heterogenitet. Heri ligger forklaringen på, hvorfor urørt skov med forstyrrelser kan øge biodiversiteten. Den såkaldte *habitat-heterogenitetssammenhæng*, som man også kan læse om i artiklen om tropiske bjergskove på s. 20, beskriver nemlig, hvordan en høj andel af forskelligartede habitater øger artsrigdommen i et område, fordi arter bedre kan finde unikke levesteder og nicher i heterogene habitater, end de kan i homogene habitater (figur 24). At strukturel kompleksitet er grundlag for høj biodiver-



En snog (*Natrix natrix*) kigger op fra en skovsø med andemad (*Lemna sp.*). Foto: R. Sturm.

sitet er en af de bedst dokumenterede biologiske grundlove, som naturen arbejder efter.

En anden af naturens grundlæggende love er *arts-arealsammenhængen*, der ligesom habitat-heterogenitetssammenhængen har en stor mængde empiri og solid teori bag sig. Artsrigdommen er højere på større arealer end på mindre, men forskelligartethed i skovenes økosystemer er så vigtig et parameter, at selv arealmæssigt små heterogene områder kan have en højere artsrigdom end arealmæssigt store områder, som er homogene (figur 24).

Disse pointer fra biodiversitetsforskningen – lang tidsmæssig kontinuitet, naturlige forstyrrelsesdynamikker, succession, habitat-heterogenitet og areal til naturen – er det videnskabelige fundament for, hvorfor vi kan øge biodiversiteten i de danske skove, hvis vi udlægger flere større arealer til urørt skov. Sikring af dansk biodiversitet kan ikke ske, hvis ikke vi giver plads og tid til den natur, som arterne i Danmark evolutionært er tilpasset til.

Blade fra egetræ i forskellige stadier af nedbrydning. Foto: Vaidas Bucys.

Beslutninger om urørt skov i Danmark

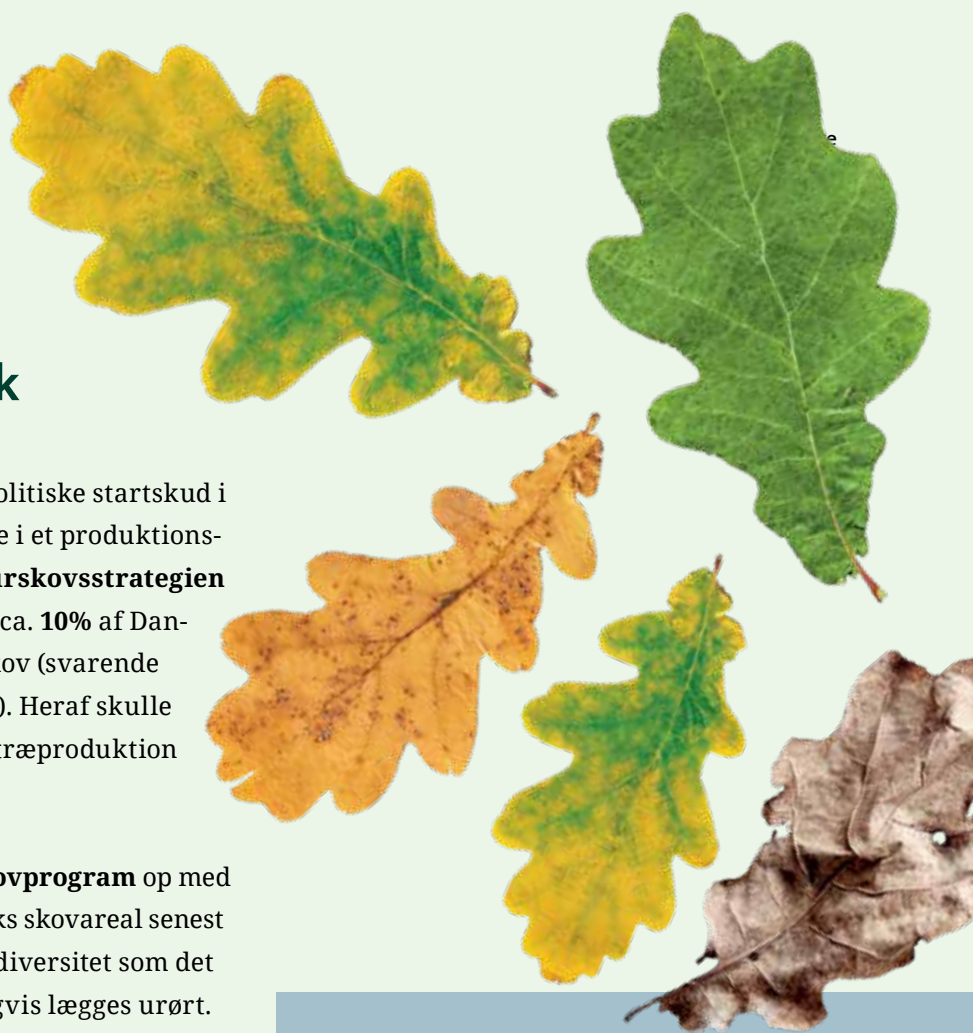
I begyndelsen af 1990'erne kom det politiske startskud i Danmark til ikke kun at se på skovene i et produktionsperspektiv, men som natur. Med **Naturskovsstrategien** fra **1992** besluttede man bl.a. at sikre ca. **10%** af Danmarks skovareal som såkaldt naturskov (svarende til ca. **40.000 hektar** på det tidspunkt). Heraf skulle 5.000 hektar lægges helt urørt, mens træproduktion stadig ville være tilladt i resten.

I **2002** fulgte **Danmarks nationale skovprogram** op med en målsætning om, at 10% af Danmarks skovareal senest i 2040 skulle drives med natur og biodiversitet som det primære formål, men ikke nødvendigvis lægges urørt.

Inden Naturskovsstrategien var der kun **500 hektar** urørt skov i Danmark – et praktisk talt betydningsløst areal. Igennem de efterfølgende 10-15 år nåede det samlede areal af urørt skov i Danmark (både statslig og privat) op på ca. **8.000 hektar** – men overvejende fordelt på mange små usammenhængende arealer og kun nogle få større sammenhængende skove.

I **2016** indgik man en politisk aftale om **Naturpakken** med bl.a. udlægning af yderligere 11.000 hektar urørt skov i Danmark. Baseret på videnskabelige anbefalinger skulle arealerne så vidt muligt være store og sammenhængende. Som resultat af aftalen blev **10.000 hektar** af statens skove udpeget som urørte i **2018**, efterfulgt af yderligere ca. **9.000 hektar** i **2020** som led i en ny aftale.

I **2020** indgik man endnu en ny politisk aftale, **Natur- og biodiversitetspakken**, som øgede den endelige målsætning om areal udlagt til urørt skov i Danmark til **75.000 hektar** inden **2024**. Arealet svarer til ca. 13% af Danmarks skovareal eller 1,7% af Danmarks samlede areal. Med Natur- og biodiversitetspakken blev 888 millioner kroner øremærket til beskyttelse af biodiversitet i Danmark, bl.a. gennem udlægningen af den urørte skov.



Yderligere læsning

Anders Højgård Petersen, Thomas Hedemark Lundhede, Hans Henrik Bruun, Jacob Heilmann-Clausen, Bo Jellesmark Thorsen, Niels Strange og Carsten Rahbek (2016): **Bevarelse af biodiversiteten i de danske skove: En analyse af den nødvendige indsats, og hvad den betyder for skovens andre samfundsgoder**. CMEC, Københavns Universitet.

Jacob Heilmann-Clausen, Hans Henrik Bruun, Anders Højgård Petersen, Rasmus Riis-Hansen og Carsten Rahbek (2020): **Forvaltning af biodiversitet i dyrket skov**. CMEC, Københavns Universitet.

Miljø- og Fødevarerministeriet (2016): **Aftale om Naturpakke (Naturpakken)**. Tilgængelig online via Miljøministeriet.

Miljøministeriet (2020): **Natur- og biodiversitetspakke**. Tilgængelig online via Miljøministeriet.

Miljøministeriet og Skov- og Naturstyrelsen (1992): **Strategi for de danske naturskove og andre bevaringsværdige skovtyper (Naturskovsstrategien)**. Tilgængelig online via Naturstyrelsen.



En holistisk forståelse af biodiversitet

Carsten Rahbek, Karsten Elmoose Vad
og Emma Emilie Andersen

I indledningen til dette Biofag slog vi fast, at biodiversitet – mangfoldigheden af liv på Jorden – er noget af det mest komplekse, der findes. Senere tilføjede vi, at den levende verden ikke kun er deterministisk bestemt, men også rummer elementer af tilfældigheder, hvilket er udfordrende at tilgå videnskabeligt.

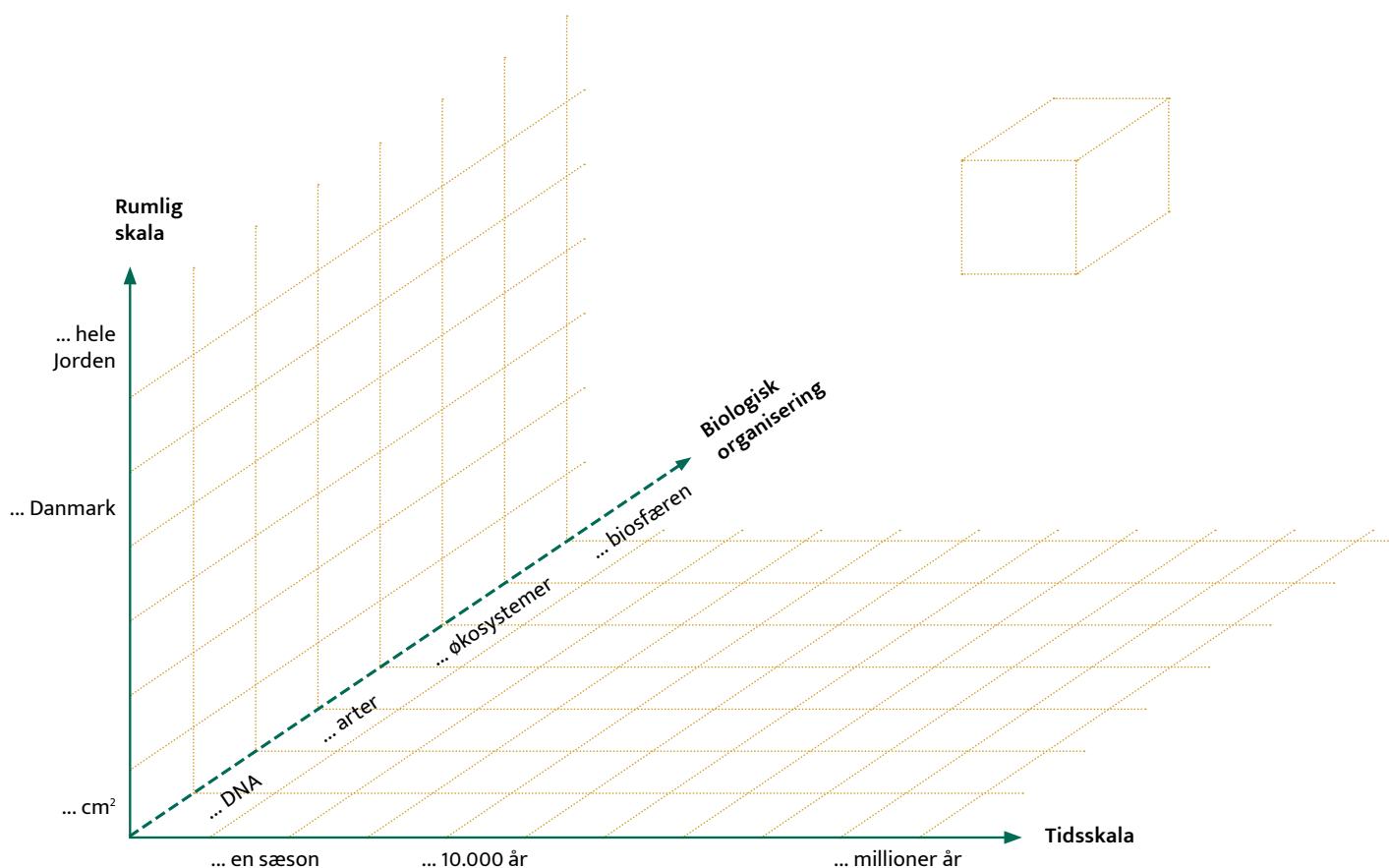
Med det in mente, så er der i de forskellige artikler introduceret og givet eksempler på, hvordan biodiversitet kan opdeles og kategoriseres i niveauer og fagtermer samt forstås i forskellig skala og med forskellige metoder. Det er nogle af de værktøjer, fagkundskaben benytter til at forenkles og prøve at skabe mening og overskuelighed i en ellers yderst kompleks biologisk virkelighed.

I denne afsluttende artikel samler vi endnu en gang tingene, vel vidende at kompleksiteten igen øges. Det gør vi, fordi det er altafgørende, at biodiversitet forstås i sammenhæng. Det er selve biodiversitetsbegrebets oprindelse og berettigelse at skabe en sammenhængende forståelse.

På Center for Makroøkologi, Evolution og Klima (CMEC) opererer vi med en såkaldt holistisk forståelse af biodiversitet. Det vil sige, at vi altid forsøger at forstå biodiversitet på tværs af de tre niveauer (arter, gener og økosystemer, se figur 1 i artiklen begrebets definition på s. 9), i deres samspil med omgivelserne samt på skalaerne tid, rum og biologisk organisering. Forståelsen af de tre skalaer er samlet i figur 25 på næste side og er efterfølgende eksemplificeret med to scenarier for undersøgelser i figur 26.

Sydamerika set fra rummet.

Illustration: Tomas Griger baseret på fotos fra NASA.



Figur 25. Figuren viser de tre akser **tidsskala**, **rumlig skala** og **biologisk organisering**. Når man undersøger eller forsker i biodiversitet, er det altafgørende, at man er bevidst om, hvor man er placeret på hver af de tre akser. Placeringen er nemlig afgørende for ens perspektiv, og dermed for de konklusioner, som man kan drage.

Skulle man formulere en holistisk definition af biodiversitet i blot en enkelt sætning, hvor begrebet skal forstås i det rum, som de tre akser skaber, så kunne den lyde således:

*Biodiversitet er mangfoldigheden af liv på Jorden på de tre niveauer **genetisk diversitet**, **artsdiversitet** og **økosystemdiversitet** inklusiv de **biotiske** og **abiotiske processer**, som påvirker niveauerne på akserne **tid**, **rum** og **biologisk organisering** i **varierende skala**.*

I ovenstående definition er nøgletermene for forståelsen af biodiversitet fremhævet. Her uddybes de kort:

- **Genetisk diversitet, artsdiversitet og økosystemdiversitet** er de tre af biodiversitetens niveauer, som overlapper og i samspil med hinanden skaber den samlede mangfoldighed af liv på Jorden. Dynamikker som skaber ændringer inden for et af de tre niveauer kan igangsætte og forårsage ændringer i et af eller begge de andre niveauer. De tre niveaues overlap er illustreret på figur 1 i artiklen om begrebets definition på s. 9.
- **Biotiske og abiotiske processer** er afgørende for udviklingen inden for og på tværs af diversiteten af gener, arter og økosystemer. De biotiske og abiotiske processer interagerer desuden konstant med hinanden.

Eksempel	Tidsskala	Rumlig skala	Biologisk organisering
Ind- og udvandring som følge af klimaforandringer	50-100 år frem	Danmark	Population
Den uldhårede mammutts uddøen	Ca. 21.000-4.000 år tilbage	Eurasien	Art

- **Tid** er den ene af de tre akser, som man skal tage i betragtning, når man arbejder med biodiversitet. På en lille tidsmæssig **skala** observerer man variation og processer, som kan foregå på få sekunder, fx nogle interaktioner mellem arter, mens fx artsdannelse og naturlig uddøen foregår på en langt større tidsmæssig skala over tusinder eller millioner af år.
- **Rum** er den anden af biodiversitetens tre akser. En lille rumlig **skala** kan være en kvadratcentimeter jord og det liv og de processer, der findes der, mens en stor rumlig skala kan handle om globale mønstre og Jorden som planet.
- **Biologisk organisering** er den tredje af biodiversitetens akser. På en lille **skala** af biologisk organisering orienterer man sig fx på molekylenniveau, mens man på en større skala kan forholde sig til populationer, økosystemer eller hele biosfæren.

Pointen er, at forståelsen af biodiversitet først er komplet, når man er bevidst om, at man ikke kan se det samlede billede hele tiden, men at man derimod konstant må orientere sig på biodiversitetens tre akser i sin forståelse, som illustreret i figur 25.

Dette særnummer af Biofag samler grundforståelsen af biodiversitet med den forskningsmæssige metode og uddannelsesmæssige relevans af begrebet. Biodiversitet er en syntese af forskellige biologiske discipliner, så det er komplekst, men vi har forsøgt at forklare og eksemplificere uden at forsimple.

Vi håber, at vi har formået at give en indsigt i, hvorfor biodiversitet er så centralt et begreb i biologiens forståelse af livet og verden.

Figur 26. To eksempler på scenarier for undersøgelser placeret forskellige steder på de tre akser tidsskala, rumlig skala og biologisk organisering. Det første eksempel foregår på en relativt lille tidsskala (50-100 år frem i tid), en mellemstor rumlig skala (Danmark) og en mellemstor biologisk organisering (populationer), når forudsigelser af ind- og udvandring af arter som følge af klimaforandringer i Danmark – men ikke andre steder på Jorden – undersøges. Det andet eksempel foregår på en relativt stor tidsskala (ca. 21.000-4.000 år tilbage i tid), en stor rumlig skala (Eurasien) og en mindre biologisk organisering (art), når den uldhårede mammutts uddøen fra Jorden undersøges.

Bestand af planten *Oenothera deltoides* i sandet i Joshua Tree National Park, Californien, USA. Foto: Jack Dykinga.



Biodiversitet – Arter, gener og økosystemer

Biodiversitet handler om livet på Jorden i alle sine former: Arterne, deres genetiske sammensætning og de økosystemer, som de er en del af. Biodiversitet er mangfoldigheden af liv på disse tre niveauer, og de interaktioner, som påvirker niveauerne på kryds og tværs i tid og rum.

Dette særnummer af Biofag er en introduktion til biodiversitet som fagligt begreb, og indholdet dækker:

- Biodiversitetsbegrebets definition og historie
- Sydamerikas tropiske bjergregioner, hvor den største biodiversitet på landjorden findes
- Forskning i biodiversitet
- Biodiversitet i dansk skov
- En holistisk forståelse af biodiversitet

Særnummeret er skabt i et samarbejde mellem biodiversitetsforskere fra Center for Makroøkologi, Evolution og Klima (CMEC) på Københavns Universitet og Foreningen af Danske Biologer (FaDB) med støtte fra Novo Nordisk Fonden.

www.biodiversitetigymnasiet.dk



CENTER FOR MAKROØKOLOGI,
EVOLUTION OG KLIMA
KØBENHAVNS UNIVERSITET



FaDB
FORENINGEN AF
DANSKE BIOLOGER

novo nordisk
fonden