

KAN “BLÅT CARBON” – ØKOSYSTEMER VIRKELIG MODVIRKE KLIMAÆNDRINGER?

Forfatterne



Erik Kristensen er professor i Marin Økologi ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet. Hans forskning er fokuseret på havbundens omsætning af organisk materiale, og hvordan bundens dyr og planter påvirker mikrobielle processer.
ebk@biology.sdu.dk



Mogens R. Flindt er professor og forskningsleder ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet. Han har i mange år arbejdet med marine presfaktorer i forhold til marin naturgenopretning og kvantificering af marine økosystemtjenester.
mrf@biology.sdu.dk



Cintia Organo Quintana er lektor ved Biologisk Institut og SDU Climate Cluster, Syddansk Universitet. Hendes forskning er centreret om marinøkologi i kystnære områder med fokus på carbonomsætning og klimaforandring.
cintia@biology.sdu.dk

Truede økosystemer som mangroveskove, saltmarsker og havgræsenge er af mange blevet fremhævet som en del af løsningen på klimakrisen. Det er dog meget usikkert, om disse økosystemer virkelig permanent tilbageholder tilstrækkeligt carbon, så det kan mærkes i den globale CO₂-balance.

De klimaændringer og konsekvenserne heraf, som vi oplever i disse år, er især forårsaget af CO₂-frigivelse i forbindelse med vores massive afbrænding af fossile brændstoffer. Disse kulbrinter (carbonhydrider) blev især dannet af døde mikroorganismer, planter og dyr i Karbontiden for cirka 290-360 millioner år siden. På den tid var Jordens landmasser dækket af frodige sumpe og omkranset af produktive have. Når organismerne døde, blev de gradvist nedbrudt til CO₂ i sumpene eller i havenes sedimenter. Efter millioner af år blev resterne af organismerne, som i mellemtiden var blevet dækket af tykke lag af sand og ler og udsat for højt tryk, omdannet til fossilt kul og olie indlejret i sedimentære klipper. De fossile brændstoffer udgør imid-

lertid kun en meget lille unedbrydelig del – oftest langt under 1 % – af det oprindelige organiske materiale.

Hvad er “blåt carbon” – økosystemer?

For at modvirke den massive afbrænding af fossile brændstoffer, har der i de senere år været fokus på at dække vores energibehov med CO₂-neutrale alternativer som vindmøller, solceller og atomkraft. Udviklingen og udbygningen af disse energiformer går desværre meget langsomt, og CO₂-indholdet i atmosfæren stiger stadigvæk. Den antropogene emission af CO₂ benævnes ofte som “brunt carbon”, mens “sort carbon” repræsenterer carbonpartikler udledt fra ufuldstændige afbrændinger. Til gengæld fjernes CO₂ fra atmosfæren, når det oplagres som “grønt

carbon” i biomassen af organismer med fotosyntese (bakterier, alger og planter). Oftest har “grønt carbon” været synonymt med plantecarbon oplagret på land i form af for eksempel levende træer og dødt organisk carbon deponeret i jorden.

I de seneste 20 år er fokus imidlertid vendt mod havet, hvor der også deponeres carbon fra fotosyntese. “Blåt carbon” kan derfor defineres som alt det biologiske carbon, der deponeres og lagres i verdenshavene. Det er velkendt, at CO₂ tilbageholdt ved fotosyntese i oceanerne, udgør mere end 55 % af den globale primærproduktion. Det er dog mere usikkert i hvor høj grad blåt carbon undslipper nedbrydning og bliver permanent lagret i sedimenter.



↑ Havgræseng i Danmark, bestående af ålegræs (*Zostera marina*).
Foto: Mogens Flindt.



↑ Saltmarsk i Georgia, USA, domineret af vadegræs tilhørende arten *Spartina alterniflora*. Foto: Erik Kristensen
← Mangroveskov i Thailand, domineret af træer tilhørende arten *Rhizophora apiculata*. Foto: Erik Kristensen

De blå carbon-økosystemer, som oftest bliver omtalt i den videnskabelige litteratur, er mangroveskove, saltmarsker og havgræsenge. Fælles for disse økosystemer er, at de er produktive, og at primærproduktionen drives af karplanter med væv rigt på langsomt nedbrydeligt cellulose og lignin. De højproduktive mangroveskove i tropenerne er således et tidevandsområde bevokset med salttolerante træer, mens det tilsvarende økosystem i tempererede og subtropiske områder er saltmarsker bevokset med vadegræs (*Spartina*). Til gengæld er de fleste havgræsenge både i tropenerne, subtropenerne, tempererede områder og arktis permanent oversvømmede og danner tætte bestande af havgræsser (for eksempel ålegræs) i kystnære områder.

Da havgræsser er så vidt udbredte, vil vi her fokusere på ålegræs (*Zostera marina*) i tempererede områder som Danmark og Skandinavien. Disse er dog omkring en tiendedel så produktive som mangroveskove og saltmarsker (se Tabel 1) på grund af lavere temperaturer og en generelt lavere lystilgængelighed

under vandet. Alle tre økosystemer understøtter dog carbonbegravelse meget bedre end tangskove og planktonalger, som ikke indeholder cellulose og lignin. På trods af, at mangroveskove, saltmarsker og havgræsenge er truede med stor arealmæssig tilbagegang de seneste 50 år og i dag kun dækker omkring 0,2 % af den globale havbund, står de ifølge den eksisterende litteratur for op til 50 % af alt det blå carbon, som begraves permanent i havet. Der hersker imidlertid stor usikkerhed omkring disse værdier og den tidsskala, de er baseret på.

Carbonakkumulering og -begravelse i moderne blå carbon- økosystemer

De fleste publicerede undersøgelser af carbonbegravelse i blå carbon-økosystemer er baseret på målinger af carbonpuljer i sedimentet – typisk ned til 1 meter. Kun ganske få studier baserer beregningerne på massebalancer ved måling af optagelse og afgivelse af carbon fra økosystemernes planter og nedbrydere. Estimer af carbonbegravelse vil, uanset metoden, være behæftet med meget store usikkerheder. Som det fremgår af Tabel 1 varierer de nuværende estimer for begravelse

Økosystem	Nettoprimærproduktion g C m ⁻² år ⁻¹	Organisk C pulje kg C m ⁻²	Organisk C akkumulering g C m ⁻² år ⁻¹
Mangrove	1344 (1080-1708)	66,3 (45,5-95,6)	166 (57-1073)
Saltmarsk	834 (740-1100)	18,6 (10,0-30,0)	208 (3-1713)
Ålegræs	119 (14-420)	7,3 (1,4-22,3)	18 (3-190)
Dansk Bøgeskov	510 (480-540)	17,4 (13-30)	97 (80-113)
Tropisk regnskov	844 (600-1080)	12,0 (9,0-19,7)	30 (10-50)

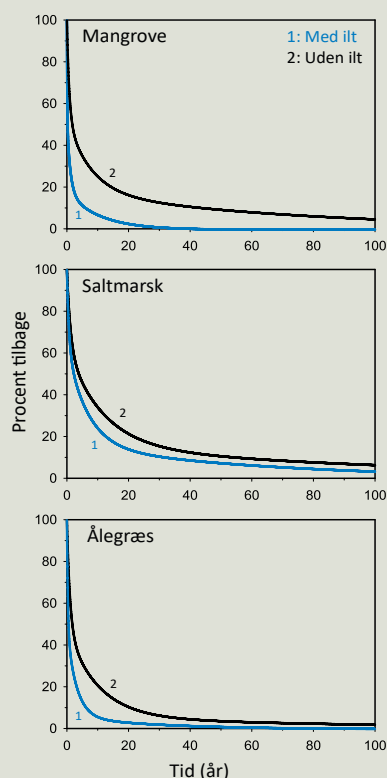
Tabel 1. Nuværende estimer for mangrove-, saltmarsk- og ålegræsøkosystemers nettoprimærproduktion, organisk carbon (C) pulje ned til 1 m dybde i sedimentet, og organisk carbonakkumulering i sedimentet. Til sammenligning er vist data for en dansk bøgeskov og en tropisk regnskov. Værdier er angivet som gennemsnit med variationen i parentes.

Mikrobiel nedbrydning

Modeller af mikrobiel nedbrydning af løv og rødder fra mangrovetræer i tropenerne, saltmarskplanten vadegræs i subtropenerne og ålegræs under tempererede forhold baseret på gennemsnit af publicerede nedbrydningshastigheder. Nedbrydningen er vist som det eksponentielle henfald over en periode på 100 år.

Modellen tager hensyn til, at løv fra planter indeholder mange forskellige organiske komponenter med hver deres tilgængelighed for mikrobielle nedbrydere. Der er en pulje af let nedbrydeligt materiale bestående af proteiner og simple kulhydrater sammen med en stor pulje af knapt så nedbrydeligt materiale som cellulose og en pulje af svært nedbrydeligt materiale som lignin. Størrelsen af disse puljer varierer fra plante til plante, hvilket skal tages i betragtning. Desuden er nedbrydningen af de forskellige puljer oftest meget hurtigere, når det foregår i luft og vand med tilstedeværelsen af ilt end i iltfrie sedimenter.

På Aktuel Naturvidenskabs hjemmeside kan du finde ekstramateriale til artiklen, hvor det i større detalje bliver udfoldet, hvilke forudsætninger disse modeller bygger på.



af carbon således i mangroveskove fra 57 til 1073 gram carbon per kvadratmeter per år, mens den målt i samme enhed i saltmarsker varierer fra 3 til 1713 og i ålegræsenge fra 3 til 190.

Metoder baseret på måling af puljer er ganske ubrugelige, medmindre der findes pålidelige informationer om sedimentationshastigheden eller begravelseshastigheden. Det er praktisk taget umuligt at måle hastigheden, hvormed sedimentoverfladen hæver sig over tid, så andre metoder til datering af sedimentet må tages i brug. Ofte bruger man den radioaktive isotop ^{210}Pb (bly-210), som deponeres med konstant hastighed på overfladen og henfalder med konstant hastighed. Faldet i koncentrationen af ^{210}Pb med dybden i sedimentet kan således være et præcist mål for sedimentationshastigheden. Dette fungerer perfekt i områder af dybhavet med konstant sedimentation over tid og ingen forstyrrelser af sedimentet. Sådan er forholdene desværre ikke i mangroveskove, saltmarskers og ålegræsenges sedimenter. Her er der oftest massive forstyrrelser

ved blandt andet bunddyrs aktivitet og bølger, som omrører sedimentet og derved gør ^{210}Pb -dateringen fejlagtig.

Estimerer for carbonbegravelse ved massebalance kan være ret præcise, men er helt afhængig af at alle carbonkilder og -tabsprocesser inkluderes i beregningerne. Carbonkilder udgøres af mangrovetræers, saltmarskplanters og ålegræsplanternes overjordiske og underjordiske biomassetilvækst, samt indlejring af afstødt løv og døde rødder i sedimenter. Desuden vil der være et bidrag af sedimenteret organisk carbon, som tilføres udefra med vandstrømme og tidevand. Tabsprocesser indbefatter dyrs og mikroorganismers nedbrydning af organisk carbon og fjernelse af organisk carbon med vandstrømme og tidevand – ikke mindst i forbindelse med storme. På trods af ret store usikkerheder svarer mange publicerede estimater for det globale gennemsnit af organisk carbonakkumulering i mangrove-, saltmarsk- og ålegræs-sedimenter baseret på massebalancer til henholdsvis 12, 25, og 15 % af nettoprimærproduktionen.

Hvor permanent er aflejringen?

For at aflejret organisk carbon i sedimenter kan klassificeres som blåt carbon skal det i princippet være permanent begravet. Fra et IPCC-klimaperspektiv og indenfor rammerne af den såkaldte "Verified Carbon Standard" (som er en international certificering af klimakompensationsprojekter) er tidshorisonten for en permanent tilbageholdelse imidlertid defineret som >100 år, på trods af at dette er mange størrelsesordener kortere end den tid, det tager at danne fossile brændstoffer. Det må derfor anses for en midlertidig oplagring, indtil den teknologiske udvikling resulterer i et ophør af antropogen CO_2 -udledning. Hvor meget af det tilførte organiske carbon i blåt carbon-økosystemer bliver så faktisk akkumuleret i sedimenterne efter 100 år? De ovennævnte globale gennemsnitsværdier for akkumuleringen på 12-25 % af nettoprimærproduktionen er jo betydeligt højere end den rest på 0-6,7 %, der er tilbage, når afstødt løv og rødder nedbrydes mikrobielt over en periode på 100 år (se faktaboks). Organisk materiale tilført udefra kan måske udligne noget af denne forskel, men

Ålegræssets lagring af carbon i danske farvande

Ålegræs har potentiale til at bidrage til blåt carbon på flere fronter. Der har i litteraturen været mest fokus på lagringen af dødt ålegræs materiale i havbunden, hvor de seneste beregninger indikerer en årligt lagring svarende til 0,7 % af Danmarks CO₂-udledninger. Denne beregning har kun gyldighed, når man kender det nuværende og fremtidige havbundsareal dækket med ålegræs. Desuden forudsættes det, at lagringen foregår med en konstant hastighed i mange år. Ingen af disse forudsætninger er imidlertid opfyldt. Vi har intet præcist kortgrundlag over hverken den historiske eller den nuværende ålegræsdekning. Vi kan derfor ikke estimere potentialet for det område, som kan genetableres, hvilket også vil give et tvivlsomt resultat, da miljøforholdene mange steder har ændret sig, så ålegræsset ikke kan genetablere sig. Og at forudsætte en fremtidig konstant lagring i de genetablerede områder er heller ikke meningsfyldt, da ny viden viser, at lagring og erosion faktisk er næsten i balance over en årrække.

Når miljøforholdene forbedres (reduceret næringsstofbelastning), kan man forvente en spredning af ålegræs til nogle af de barbundsområder, som tidligere havde tætte ålegræsenge. Derved vil den stående levende biomasse blive større, og der vil bindes tilsvarende CO₂. Vi har beregnet denne økosystemtjeneste samt perspektiveret størrelsesordenen i forhold til Danmarks årlige CO₂-emission. Hvis ålegræsset i de næste 10-30 år spredes og dækker 1100 km² mere end i dag, vil det skabe en opbygning af ny levende biomasse på 130.000 tons carbon i det nye areal. Eller en bindings-



Udplantning af ålegræs.
Foto: Troels Lange

rate på 4.300-13.000 ton carbon per år. Dette svarer til 0,03-0,1% af Danmark årlige udledning på 46 millioner tons CO₂- eller til 12,5 millioner tons carbon. Det skal pointeres, at dette bidrag er begrænset til den periode, hvor ålegræs-biomassen opbygges. Så vi må derfor konstatere, at ålegræsset ikke kan anses som et betydende klimavirkemiddel.

Det skal dog pointeres, at ålegræs skaber mange gode økosystemtjenester, som forbedrer natur- og miljøtilstanden i kystnære områder, og der i forskningskredse er konsensus om, at denne unikke plante er helt essentiel for at opnå og fastholde en god miljøtilstand. Blandt disse økosystemtjenester kan nævnes en øget biodiversitet af hvirvelløse dyr (orme, snegle, muslinger og krebsdyr) og fisk, som styrker fødekædernes stabilitet.

dette materiale vil jo blive tilbageholdt, uanset hvor det havner, og indgår reelt i andre økosystemers carbonbalance. Desuden standser nedbrydningsprocesserne jo ikke efter 100 år, men vil fortsætte lang tid efter – endda over geologisk tid. Faktisk har studier i dybhavet vist, at bakterier fortsat nedbryder tusinder til millioner år gammelt organisk carbon flere hundrede meter nede i sedimenterne.

Blåt carbon-økosystemer tilbageholder også CO₂, når de øger deres arealudbredelse og indlejrer carbon i ny levende biomasse. Alle tre typer af økosystemer har dog i de seneste 50 år været udsat for massiv tilbagegang. Således er mangroveskove i stor stil blevet fældet for at gøre plads til rejefarme, landbrug, havne

og andre kystfaciliteter. Saltmarsker er blevet presset på grund af behovet for kystnære områder til havne, industri og boliger. Endelig er udbredelsen af ålegræs mindsket meget som følge af stress fra den tiltagende eutrofiering langs vore kyster. Det er derfor indlysende, at disse økosystemer kun kan tilbageholde carbon i deres levende biomasse, hvis deres arealudbredelse øges. Dette sker desværre kun langsomt naturligt, og en massiv indsats med genplantning er derfor nødvendig. Denne indsats bør dog ikke udelukkende ske af hensyn til blåt carbon, da biomasseopbygningen slet ikke kan måle sig med de fortsatte CO₂-udledninger ved afbrænding af fossile brændstoffer. For eksempel vil biomassetilvæksten i et nyt ålegræsareal på 1100 km² i danske farvande på

et år kun tilbageholde 0,03-0,1 % af Danmarks årlige CO₂-udledning (se faktaboks). Genplantning af kystnære blåt carbon-økosystemer bør i stedet udføres for at fremme biodiversiteten af ellers tabt flora og fauna, så de kystnære økosystemers naturlige funktion genskabes til gavn for os alle. At der så også er en lille medfølgende klimagevinst, er selvfølgelig positivt.

Carbonbudgetter og drivhusgasbalance

De globale gennemsnit af carbonakkumulering og begravelse i mangroveskoves, saltmarskers og ålegræsenges sedimenter svarer ifølge de usikre estimater i litteraturen til en CO₂-tilbageholdelse på henholdsvis 609, 763 og 66 gram CO₂ per kvadratmeter om året.

Kilder og videre læsning
18 havforskere i opråb: Ålegræs er afgørende for et rigt liv i havet, men det redder ikke vores klima. Altinget 12. januar 2024.

Johannessen, S.C., 2022. How can blue carbon burial in seagrass meadows increase long-term, net sequestration of carbon? A critical review. *Environ. Res. Lett.* 17. doi: 10.1088/1748-9326/ac8ab4

Kristensen, E., Quintana, C.O., Petersen, S.G.G., 2022. The role of biogenic structures for greenhouse gas balance in vegetated intertidal wetlands. In: X. Ouyang, S.Y Lee, Y.F.D. Lai & C. Marchand (eds). *Carbon Mineralization in Coastal Wetlands: From Litter Decomposition to Greenhouse Gas Dynamics*. Elsevier.

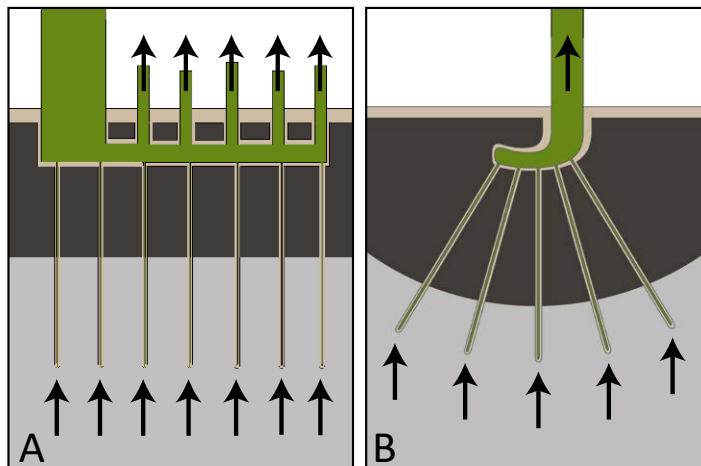
Leiva-Dueñas, C. et al, 2023. Capturing of organic carbon and nitrogen in eelgrass sediments of southern Scandinavia. *Limnol. Oceanogr.* 68: 631–648. doi: 10.1002/lno.12299

Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C.M., Valdés, L., DeYoung, C., Fonseca, L., Grimsditch, G. (Eds). 2009. *Blue Carbon. A Rapid Response Assessment*. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, www.grida.no.

Williamson, P., Gattuso, J.-P., 2022. Carbon removal using coastal blue carbon ecosystems is uncertain and unreliable, with questionable climatic cost-effectiveness. *Front. Clim.* 4: doi:10.3389/fclim.2022.853666.

g CO ₂ m ⁻² år ⁻¹	Mangroveskov		Saltmarsk		Ålegræseng	
	Begrav.	Nedbr.	Begrav.	Nedbr.	Begrav.	Nedbr.
C-tilbageholdelse	609	231	763	158	66	5
CH ₄ -emission	-436	-436	-486	-486	-0,5	-0,5
N ₂ O-emission	-213	-213	-80	-80	~0	~0
Balance	-40	-418	197	-408	80,5	4,5

Tabel 2. Gennemsnit af drivhusgasbalance i mangroveskove, saltmarsker og ålegræsenge. Balancen mellem carbontilbageholdelse og CH₄ + N₂O-emission er angivet som CO₂-ækvivalenter. Positive værdier viser fjernelse af CO₂-ækvivalenter fra atmosfæren. Carbontilbageholdelsen for hvert økosystem er i venstre kolonne baseret på begravelsesestimater (Tabel 1), og i højre kolonne baseret på beregninger af nedbrydningsrest efter 100 år fra planterne, som vokser i de forskellige økosystemer (faktaboks).



Skematisk tegning af A. Mangrovetræ med stamme, ånderødder og rødder. B. Vadegræs og ålegræs med stængel og rødder. Rødderne af begge planter strækker sig med luftvæv (grønt) ned i zonen med methandannelse (grå zone) og fører methan opad og til atmosfæren (pile).

Ifølge modellerne vist i faktaboksen over nedbrydningen af afstødt løv og rødder, vil der efter 100 år kun være en rest tilbage, som svarer til henholdsvis 231, 158 og 5 gram CO₂ per kvadratmeter årligt i de tre økosystemer (se tabel 2).

Tilbageholdelse, akkumulering og begravelse af carbon i sedimenter giver imidlertid ikke det fuldkomne billede af blå carbon-økosystemers reelle bidrag til drivhusgasbalancen. Mange studier har vist, at mikrobielle processer i disse økosystemer danner de mere potente drivhusgasser methan (CH₄) og lattergas (N₂O). Disse har "Global Warming Potential" (GWP) over 100 år på henholdsvis 28 og 298 i forhold til CO₂. I mangroveskoves tidevandsområder vil lufttrødder og krabbegange lave dybe kanaler ned i sedimentet til dybe zoner, hvor methandannelse forekommer. Her ved føres methan let op og udledes til atmosfæren (se figur). Tilsvarende føres methan via vadegræssets

rødder og skuds luftvæv hurtigt op fra methandannende zoner i sedimentet og til atmosfæren i saltmarskers tidevandsområder.

I permanent oversvømmede ålegræsenge er disse transportprocesser mere begrænsede, og kun en mindre del methan bliver frigjort til atmosfæren. Med hensyn til lattergas-frigivelsen er det mere tilgængeligheden af uorganisk kvælstof i form af ammonium (NH₄⁺) og nitrat (NO₃⁻), som er afgørende. Disse forbindelser vil blive omdannet ved processerne nitrifikation og denitrifikation i zoner, hvor iltholdigt og iltfrit sediment mødes, og lattergas frigives som biprodukt herved. Planternes rolle er her, at deres rødder øger arealet af disse zoner meget, når der føres ilt ned gennem planternes luftvæv.

Mængden af frigivet methan og lattergas fra blå carbon-økosystemer varierer meget fra lokalitet til lokalitet, og de globale gennemsnit

er meget usikre. Estimerne viser dog, at drivhuseffekten af disse gasser i mangroveskove er af samme størrelsesorden som den estimerede tilbageholdelse af carbon beregnet ved massebalancer, mens saltmarsker og ålegræsenge stadigvæk har en nettotilbageholdelse (Tabel 2).

Hvis kun nedbrydningsresten fra planterne i de forskellige økosystemer efter 100 år tages i betragtning, vil mangroveskove og saltmarsker have en relativt stor nettofrigivelse af drivhusgasser, mens ålegræsbede er nogenlunde klimaneutrale. Derved klinger termen blå carbon-økosystem lidt hult, og det er nok ikke her vi skal satse for at afhjælpe klimaproblemerne.

Blå carbon-økosystemer handler mere om biodiversitet end klima

De eksisterende estimater i litteraturen for globale carbonbudgetter og drivhusgasbalancer i blå carbon-økosystemer er meget usikre, og emnet bør undersøges nøjere ved at udføre mere pålidelige målinger. Da beregningsmetoder og holdninger blandt forskere er forskellige, fremkommer der ofte ret divergerende resultater. Vi skal ikke for alt i verden "opfinde" økosystemer med stort potentiale til at modvirke klimaproblemerne, men i stedet lave objektive og korrekte videnskabeligt undersøgelser, som tager alle forhold i betragtning med hensyn til permanent begravelse af carbon og frigivelse af drivhusgasser.

Når vi forsøger at øge arealudbredelsen af de truede såkaldte blå carbon-økosystemer, bør det derfor være for at fremme biodiversiteten og ikke fordi, vi tror det afhjælper klimaproblemerne – om end der nok er en lille gevinst. ■