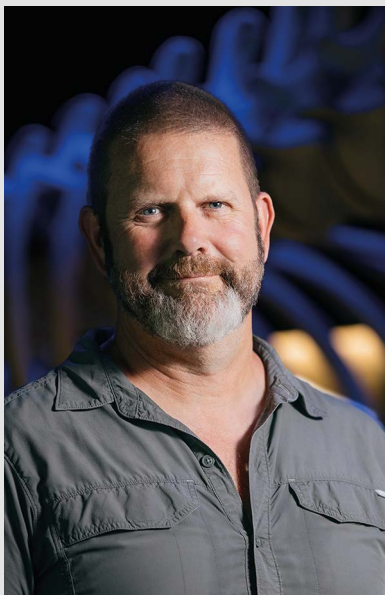


Når størrelsen virkelig betyder noget

Hvaler er store dyr. Men det faktum dækker over en enorm variation i kropsstørrelse. Derfor er hvalernes fysiologiske løsninger på basale behov som at holde varmen og dykke dybt og langt særligt spændende at udforske, mener hvalforsker Peter Teglberg.

■ Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab



PETER TEGLBERG MADSEN

Professor i sansefysiologi ved Institut for Biologi, Aarhus Universitet. Han er en af verdens førende forskere i hvalers fødesøgning og energibehov.

peter.madsen@bio.au.dk

Peter Teglberg Madsen holder foredrag om hvaler i serien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab den 6. oktober 2026. Læs mere på www.ofn.au.dk

Peter Teglberg Madsen er vild med hvaler. Fascinationen af disse de største dyr, der nogensinde har levet på Jorden, deler han med mange andre mennesker. Men Peter Teglberg har ikke ladet sig nøje med at være fascineret – han har omsat sin dybe interesse til handling igennem mange års forskning i hvalers fysiologi på Aarhus Universitet.

Det er forskning, som har bragt ham verden rundt i jagten på svar på spørgsmål som, hvad kaskelothvalen bruger sin kæmpestore næse til, hvordan pukkelhvaler kan tage 30 tons vand ind i munden uden at rykke kæben af led, eller hvordan marsvin kommunikerer med hinanden. Forskning, der er foregået i et tæt samspil med udvikling af ny teknologi, som kan måle direkte på de store dyr.

Når Peter Teglberg skal beskrive sin forskningsmæssige fascination af hvaler, koger han det ned til et meget grundlæggende fysiologisk spørgsmål. Nemlig, hvordan i alverden de varmblodede hvaler er i stand til at klare de ekstreme betingelser, de udsættes for i havet.

Disse spørgsmål relaterer til, at hvalerne fysiologisk set har to overordnede udfordringer:

»Den ene er, at kunne holde varmen. Hvordan kan hvaler svømme rundt i vand med temperaturer omkring frysepunktet, der ville slå mennesker ihjel på 15 minutter,« spørger han.

»Den anden udfordring er, at hvalerne skal have adgang til ressourcer, som dels er ilt ved havoverfladen, og dels føde i dybden.

For nogle hvaler – heriblandt kaskelotten – er der altså mere end en kilometers afstand mellem de to. Det betyder, at hvaler skal være rigtig gode til at komme af med CO₂ og optage ilt – og så skal de være gode til at spare på ilt, når de dykker ned for at finde mad,« siger Peter Teglberg.

Mus-elefant-kurven

Ved første øjekast kan disse udfordringer virke monstrøse. Men faktisk handler løsningen på dem et langt stykke ad vejen om noget meget simpelt; nemlig størrelse.

»Fælles for hvaler er, at de praktisk talt alle sammen er store – selv de mindste af hvalerne, for eksempel et marsvin, vejer lige så meget som et menneske,« siger Peter.

I praksis spænder hvalerne dog over en enorm størrelsesvariation – fra det mindste marsvin på blot 50 kilo til den enorme blåhval, der kan veje op til 150 ton, er der en forskel på næsten 3.000 gange i kropsvægt. Og netop den størrelsesvariation gør hvalerne til særligt interessante studieobjekter, mener Peter Teglberg.

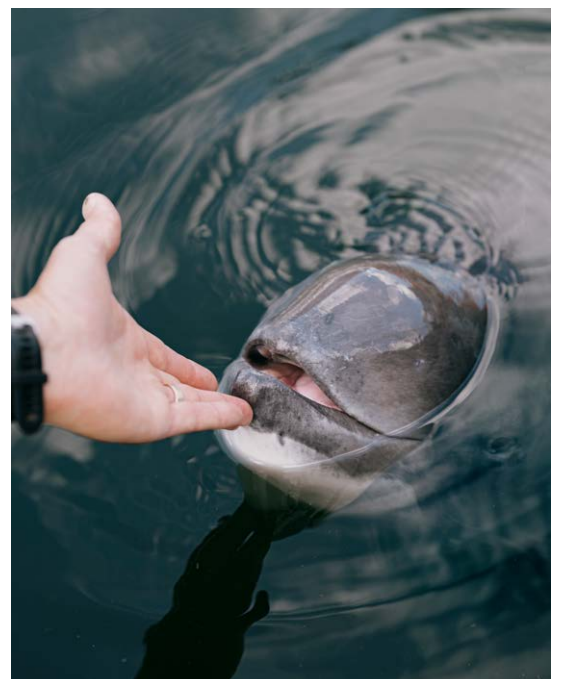
Men hvad har de førnævnte udfordringer med størrelsen at gøre?

»Når hvaler er meget store, har de ingen problemer med at holde varmen – tværtimod er problemet snarere at komme af med varmen,« fortæller Peter Teglberg.

Dette skyldes, at varmen stammer fra stofskifteprocesser inde i hvalens celler, mens varmen forsvinder fra dyrets overflade. Og jo større hvalen er, jo mindre er overfladearealet i forhold til vægten: For et marsvin



For hvalforskere som Peter Teglberg gælder det om at rykke ud, når chancen byder sig. Her dissekerer han en kaskelothval strandet på Henne Strand i 2014. Foto: Jørgen Hilmer Hansen



På Fjord&Bælt i Kerteminde kan forskerne helt unikt forske i de små hvalers biologi. Her har Peter Teglberg sammen med dyretræner Nele Bombe sat en datalogger på et marsvin. Fotos: Liv Rohde, AU Foto

er dette forholdstal cirka 20, mens det for en stor bardehvaler kun er cirka 1. Det betyder, at varmeproduktionen fra en stor hval på 30 tons ikke har problemer med at følge med afkølingen fra overfladen – selv i to grader koldt vand.

Faktisk kan stofskifteprocesser producere så meget varme, at hvis stofskiftet i den store pukkelhval foregik med samme rate per kg som i det lille marsvin, ville pukkelhvalen simpelthen "koge over". Men det gør den ikke, forklarer Peter Teglberg:

»Det skyldes, at stofskiftet ikke stiger én til én med kropsvægten, men med massen af dyret i potensen cirka 0,75. Og det er en biologisk sammenhæng, vi kan se på tværs af alle dyr – fra bittesmå mus til hvaler.«

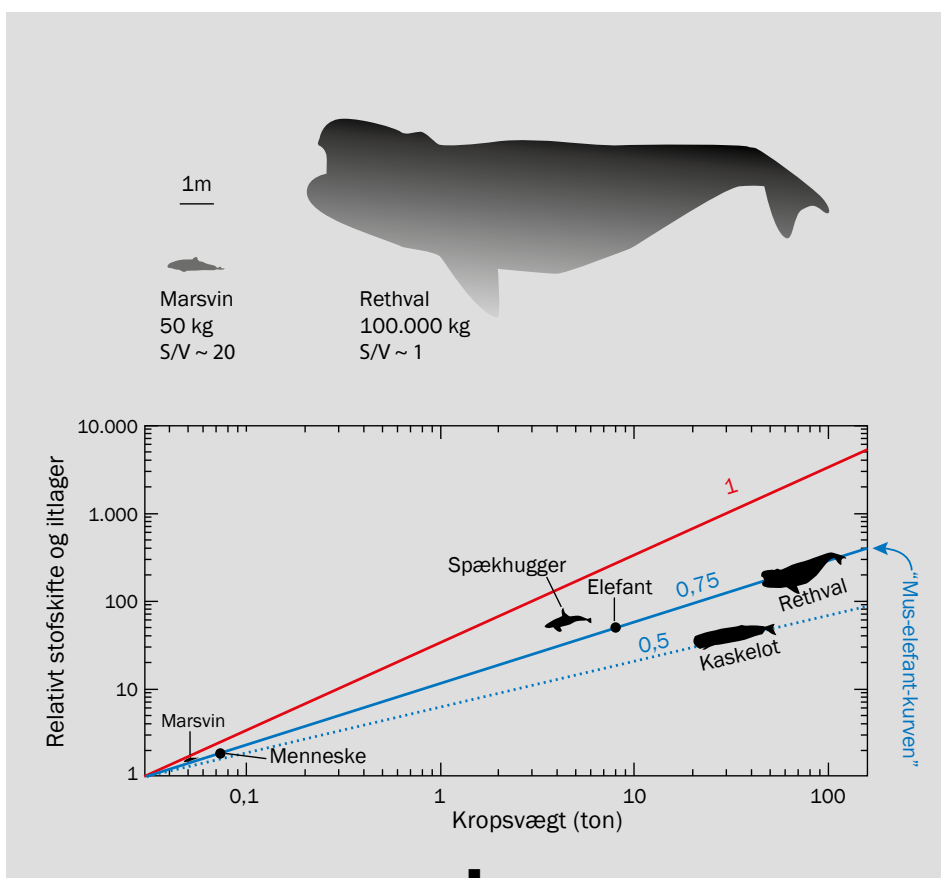
Stor størrelse giver stor energieffektivitet

Allerede i 1830'erne blev man klar over, at stofskiftet ikke kunne stige isometrisk – dvs. en-til-en – med massen af et dyr. Men det var den schweiziske biolog Max Kleiber, der i 1932 satte tallet 0,75 på sammenhængen, som populært kaldes "Mus-elefant-kurven" og mere formelt Kleibers lov eller bare $\frac{3}{4}$ -loven.

På fagsproget kaldes det allometrisk vækst, når et organ eller en proces ikke skalerer én til én med kropsstørrelsen. I forhold til organismernes energibehov er konsekvensen af stofskiftets skalering, at godt nok bliver det samlede set dyrere i energi, jo større, man er – men det bliver relativt billigere per kilo kropsvægt.

En stor hval behøver derfor ikke bekymre sig om at holde varmen – det går helt af sig selv. Anderledes er det for et lille marsvin i Grønland, der føder en unge på måske kun syv kilo i to grader koldt vand. Der er ingen vej uden om, at det energimæssigt er dyrt per kilo kropsvægt for et ensvarmt pattedyr på den størrelse at skulle leve under de forhold.

»Derfor har stofskiftet i et marsvin også fart på«, fortæller Peter Teglberg. »Faktisk ligger alle de små tandhvaler pænt over gennemsnittet på mus-elefant-kurven og har et stofskifte der er 2 gange større per kg end et menneske.«



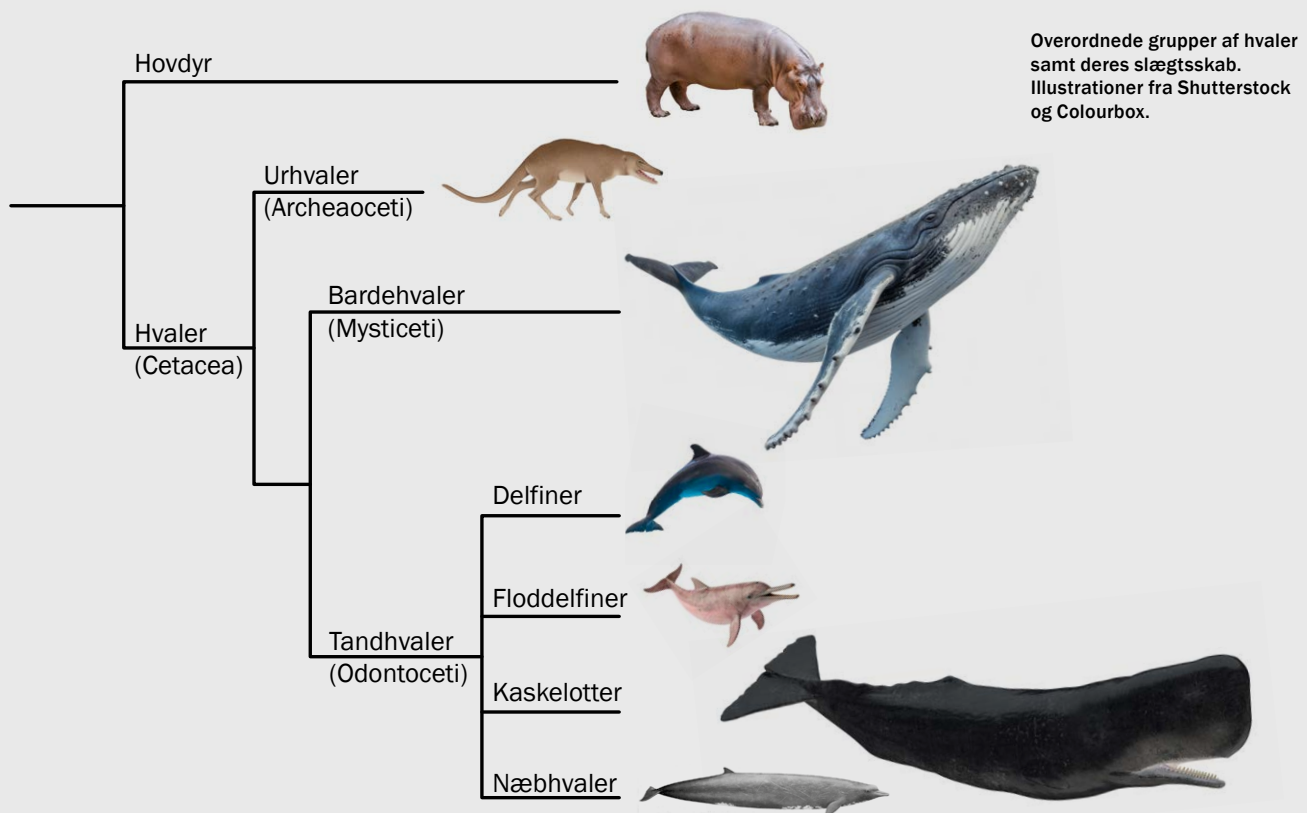
MUS-ELEFANT-KURVE

Figuren viser, hvor forskellige hvaler placerer sig på en "mus-elefant-kurve", hvor stofskiftet vokser med massen opløftet til potensen 0,75. Læg mærke til, at skalaen på både x-akse og y-akse er logaritmisk. Målinger på tandhvaler som marsvin og spækhuggere i fangenskab har vist, at deres stofskifte faktisk ligger over "mus-elefant-kurven". Da man i sin tid fandt ud af det, tænkte man, at det gav god mening, fordi de levede i koldt vand, og at alle hvaler af denne grund nok ville følge en kurve, som lå højere end for landlevende pattedyr. Men hvis man blot forlænger en sådan højereliggende kurve (hvor potensen for eksempel er 0,87

i stedet for 0,75), vil de største hvaler i så fald have et helt enormt – og urealistisk – stort fødebehov. Peter Teglberg og kolleger har da også siden kunnet vise, at de store bardehvaler faktisk ligger pænt på mus-elefant-kurven. Og de har data, der tyder på, at de store tandhvaler (som kaskelotten) ligger endnu lavere, nærmere på en kurve, hvor stofskiftet skalerer med potensen 0,5.

Den røde kurve viser til sammenligning, hvordan mængden af spæk og oxygen skalerer 1:1 med kropsvægten.

Tilpasset efter Goldbogen et al 2023.



HVALER

Hvaler tæller mere end 80 forskellige arter spredt fra isdækket polarhav til varme tropen. Langt de fleste arter lever i havet, men enkelte har slået sig ned i floder og lever hele deres liv i ferskvand.

Alle hvaler nedstammer fra en – meget mindre – stamform beslægtet med nutidens grise og flodheste, der for omkring 50 millioner år siden travede rundt på landjorden på fire ben. I løbet af de følgende cirka 10 millioner år gennemgik de tidlige hvaler en bemærkelsesværdig evolutionær transformation. Baglemmerne skrumpede ind til det rene ingenting til fordel for en hale, der stod for fremdriften. Forlemmerne blev omdannet til finner, der fungerer som rorflader under svømningen. Samtidig forvandlede kranie og kæber sig markant, så dyrene kunne anvende deres sanser under vandet, trække vejret effektivt og fange føde under overfladen.

Hvaler tilhører pattedyrene, og i den videnskabelige systematik klassificeres hvaler som en såkaldt orden med det latinske navn Cetacea. Hvalerne inddeles overordnet i to hovedgrupper: Tandhvaler (kaldet Odontoceti på latin) og bardehvaler (Mysticeti).

Tandhvalerne finder deres føde ved hjælp af ekkolokalisering. Nogle arter har stadig tænder i kæberne, mens andre kun har få eller slet ingen. Fælles for dem alle er dog, at deres forfædre engang havde et fuldt sæt tænder.

Bardehvalernes anlæg til tænder opløses allerede i fostertilstanden, og i stedet vokser der fra overkæbernes gummer lange, bøjelige plader af keratin kaldet barder. Barderne bruges til at filtrere krebsdyr og plankton fra vandet, når hvalen med åben mund svømmer gennem vandmasserne.

Hvalerne har historisk set være jaget – nogle arter til randen af udryddelse – for deres spæk, barder, kød eller spermacetolie. Selvom den kommercielle hvaljagt er kraftigt reduceret, trues hvaler stadig af menneskelige aktiviteter. Både store og små hvaler kan blive ramt af skibe, fanget i net eller blive viklet ind i fiskeliner. Heldigvis er der også gode nyheder: Arter som pukkelhvalen og finhvalen er på vej tilbage efter at være blevet næsten udslettet af den industrielle hvalfangst, der nåede sit højdepunkt i det 20. århundrede.

Menneske

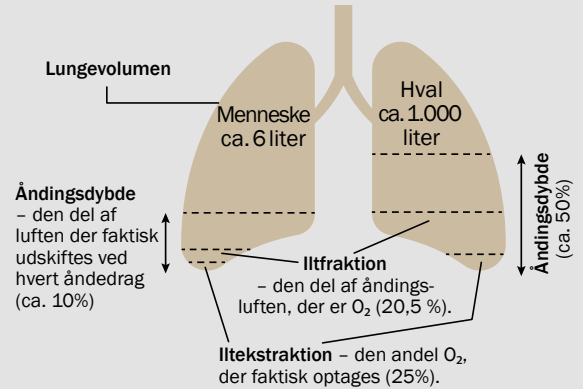


Vægt: 70 kg
 Åndingsdybde = 0,5 L
 Iltfraktion = 0,205
 Ilttekstraktion = 0,25
 Optaget volumen ilt:
 $0,5 \text{ L} \times 0,205 \times 0,25 = 0,026 \text{ L}$
 Da iltens energetiske værdi er 20 kJ/L O_2
 svarer hvert åndedrag til et stofskifte på:
 $0,026 \text{ L } \text{O}_2 \times 20 \text{ kJ/L } \text{O}_2 = 0,52 \text{ kJ}$
 Ved en åndedrætsfrekvens på 14/min
 er stofskiftet over 24 timer:
 $0,52 \text{ kJ} \times 14 \times 60 \times 24 = 10,5 \text{ MJ}$

Kaskelothval



Vægt: 50 tons
 Åndingsdybde = 500 L
 Iltfraktion = 0,205
 Ilttekstraktion = 0,25
 Optaget volumen ilt:
 $500 \text{ L} \times 0,205 \times 0,25 = 25,6 \text{ L}$
 Stofskifte per åndedrag:
 $25,6 \text{ L} \times 20 \text{ kJ/L } \text{O}_2 = 512,5 \text{ kJ}$
 Ved en åndedrætsfrekvens på 0,6/min
 er stofskiftet over 24 timer:
 $512,5 \text{ kJ} \times 0,6 \times 60 \times 24 = 443 \text{ MJ}$



HVORDAN MÅLER MAN STOFSKIFTET HOS EN HVAL?

Hvis man vil måle stofskiftet på et dyr – hvad enten det er en hval eller et menneske – har man egentlig blot brug for at vide, hvor ofte det trækker vejret. Man har også brug for at vide, hvor stort lungevolumenet er, men det kan man for en hval på snedig vis regne sig frem til ud fra, hvordan de accelerer til overfladen, fordi man kan udregne, hvor meget løft de får i kroppen fra luft, der ekspanderer. Når Peter Teglberg og kolleger sætter en datalogger på en hval, skal de altså som udgangspunkt kunne måle åndedrætsfrekvensen og hvalens acceleration. Det skyldes, at

de andre faktorer, der indgår i regnestykket (som fremgår på grafikken og de to eksempler) kender man på forhånd. En hval har forholdsvis mindre lunger end et menneske, men den udskifter en væsentlig større del af lungevolumenet ved hvert åndedræt. Og så trækker den vejret med en meget langsommere frekvens.

Hvis du går med et sportsur, der måler åndedrættet, kan du prøve at lave regnestykket på dig selv. Du kan nemt finde et estimat for dit lungevolumen på nettet.

Ekstremt sultepotentiale

Peter Teglberg fortæller, at de store hvaler måske er relativt endnu billigere per kilo end det, man kan læse ud af en kurve, hvor stofskiftet bare stiger med kropsvægten opløftet i potensen 0,75.

»Vi har endnu ikke data til med sikkerhed at kunne fastslå det, men vores forskning peger på, at vi måske nærmere snakker om, at stofskiftet for de store hvaler stiger med kropsvægten opløftet til en potens på 0,5,« siger Peter Teglberg.

Hvalernes energieffektivitet har nogle indlysende fordele – for eksempel, at de kan klare sig meget lang tid uden føde.

»De største af hvalerne – bardehvaler som blåhval og rethval – lever af dyreplankton, som blomstrer op i takt med de store opblomstringer af planteplankton, som dyreplanktonet selv lever af. Men det betyder, at der kun er to til fire måneder om året, hvor hvalerne har adgang til masser af føde, fulgt af op til ni måneder om året, hvor de stort set ikke æder,« siger Peter.

Potentialet for at faste er også noget, der følger af de basale skaleringsprincipper, når vi går fra lille til stor på mus-elefantkurven.

»Selvom det er vældig moderne at faste, er vi mennesker faktisk ikke gode til det sam-

menlignet med store dyr som hvaler. Vi kan måske holde os kørende nogle uger uden mad, hvis vi blot får vand. Og en spidsmus, der ikke får noget at spise i 6 timer, vil dø af sult. Til sammenligning er en pukkelhval sultepotentiale enormt. En gravid pukkelhval kan udvikle et foster, mens den svømmer fastende hele vejen fra Nordatlanten til Kap Verde-øerne, føde en kalv på et ton, som over de næste tre måneder vokser sig til en størrelse på 7-8 ton på morens mælk, og stadigt fastende svømme tilbage nordpå igen,« forklarer Peter Teglberg.

Moren betaler altså med egne spækreserver for sig eget stofskifte og for, at en kalv kan vokse til en størrelse på næsten 10 ton. Det

kan kun lade sig gøre, fordi hvalerne i kraft af deres størrelse er ekstremt billige i drift per kilo og kan lagre meget spæk på kroppen.

Skalering forklarer mange ting

For Peter Teglberg er det netop denne "skalering-fysiologi", som er med til at gøre hvaler enormt spændende. Altså at man kan forklare en masse af det, der foregår i et dyr, ud fra, hvordan stofskiftet skalerer med kropsvægten.

»Spækket, som er hvalernes energidepot, skalerer isometrisk – det vil sige, at hvis man forestiller sig det ekstrem, at en hval blev tusind gange større, vil den også have tusinde gange mere spæk. Men det massespecifikke stofskifte vil kun stige ca. 100 gange. Alt andet lige betyder det altså, at hvis man bliver tusind gange større, vil man kunne faste i ti gange så lang tid«, siger Peter Teglberg.

Han fortæller, at præcis den samme logik, forklarer, hvordan hvalerne kan klare de lange dyk. For mængden af ilt, en hval kan tage med sig i dybet skalerer også isometrisk med størrelsen – altså dobbelt størrelse betyder dobbelt så meget ilt.

»Et menneske på 50 kilo kan – hvis det er en, der virkelig har trænet det – holde vejret i fem minutter. En stor kaskelothval på 50 ton kan – alene fordi den er 1000 gange større – holde vejret 10 gange længere, altså omkring 50 minutter,« siger Peter Teglberg.

»Man vil måske tænke, at det er da helt vildt at kunne holde vejret i en time! Men det er det faktisk slet ikke, når man forstår, hvordan fysiologisk skalering virker.«

Er der fraktalteori på spil?

Men hvad ligger egentlig bag den biologiske nødvendighed af at skalere stofskiftet med kropsvægten?

Dybest set handler det om, at stofskiftet i alle levende organismer er baseret på de samme principper, der allerede var på plads i de tidlige stadier af livets udvikling. Cellernes fælles energigrundlag ved kemiske processer er således det energirige molekyle ATP.

Og når kulhydrater nedbrydes til CO_2 og H_2O i en organisme, er energiuudbyttet nøjagtigt det samme, uanset om det foregår i en amøbe eller en blåhval.

Når molekyler og energiuudbyttet er det samme, må organismene justere deres opbygning og processer til konsekvenserne af forskellig størrelse. Faktisk er en konsekvens af det fælles udgangspunkt, at biologisk mangfoldighed i høj grad skyldes forskel i størrelse.

En mere tricky ting at forstå er, hvorfor stofskiftet netop vokser med kropsvægten opløftet til potensen 0,75.

»Nogle forskere mener, at det har med fraktalteori at gøre. Vores celler forsynes jo af ilt via blodkar, der forgrener sig i en hierarkisk struktur. Jo større, du bliver, jo flere gange skal blodkarrene forgrene sig. Men der er simpelthen grænser for, hvor stort et strukturelt spænd, det størrelsesmæssigt er muligt at lave blodkar i. Det betyder, at cellerne yderst i netværket på et stort dyr – ja, de må bare finde ud af at lave stofskifte, som passer med den mængde ilt, de kan få,« fortæller Peter Teglberg.

Ingen nedre grænse for stofskifte?

Peter Teglberg mener, at det er meget sandsynligt, at forsyningsteori – som fraktalteori i denne sammenhæng i praksis er – kan sætte nogle øvre grænser for, hvor højt et stofskifte, man kan have – særligt når man bliver meget stor.

»Men det, vi kan vise med de store hvaler er, at ingen af dem energimæssigt er "dyre" per kilo kropsvægt. Og det skyldes næppe, at de er begrænset af fraktalteori, for der er et ret stort spænd i det stofskifte, vi ser hos forskellige store hvaler med samme størrelse. De er alle sammen energimæssigt billige, men nogle er meget billigere end andre. Så mens man kan argumentere for, at forsyningsteori sætter nogle øvre grænser for, hvor højt et stofskifte et stor ensvarmt pattedyr kan have, er der måske ikke en tilsvarende nedre grænse for, hvor lavt et stofskifte, det kan have,« siger Peter Teglberg.

Uanset hvor de teoretiske grænser måtte være, er det interessant at studere, hvordan hvalerne udnytter det "mulighedsrum", som de rent fysiske grænser sætter.

Og at forstå hvalernes energibehov har ikke kun akademisk interesse, mener Peter Teglberg.

»Når vi ved, hvad det "koster" at være en hval, kan vi også blive bedre til at forstå, hvilke konsekvenser vores påvirkning af deres miljø kan få for de forskellige arter af hvaler med forskellige sultepotentialer. Jeg håber, at det kan være med til at gøre os til bedre naboer til havs med disse fantastiske megarovdyr« slutter Peter Teglberg. ■

VIDERE LÆSNING

Goldbogen, A., Pyenson, N.D. & Madsen, P.T. (2023): *How Whales Dive, Feast, and Fast: The Ecophysiological Drivers and Limits of Foraging in the Evolution of Cetaceans*. Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst. 54:307–25.

Goldbogen, A & Madsen, P.T. (2018): *The evolution of foraging capacity and gigantism in cetaceans*. Journal of Experimental Biology 221, jeb166033. doi:10.1242/jeb.166033.

Rojano-Doñate L. et.al. (2018): *High field metabolic rates in harbor porpoises*. J. Exp. Biol. 221. doi: 10.1242/jeb.185827

Læs mere om sammenhængen mellem stofskifte og kropsstørrelse: Sand-Jensen, K. (2000): *Naturens mønstre*. Aktuell Naturvidenskab nr. 3.