

Ekstremernes herrer

Det mikrobielle liv på jorden kan være utrolig hårdført, og specielt én gruppe af mikrober, nemlig arkæer, har mange rekorder i at trives under barske miljøbetingelser. Studier af arkæerne kan derfor både fortælle forskerne om livets ekstreme tilpasninger og give inspiration til mulige industrielle anvendelser.

Foto: NOAA

Forfattere



Kristine B. Uldahl, ph.d.-studerende.
Kristine.uldahl

@bio.ku.dk



Xu Peng, lektor.
peng@bio.ku.dk

Laboratoriet for Arkæa Biologi, Biologisk Institut, Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
dac.molbio.ku.dk

Forestil dig at leve klods op af en aktiv vulkan – eller hvad med at leve i en saltsø med saltindhold otte gange højere end normalt havvand? Lyder det lidt ekstremt? Nogle organismer har tilpasset sig og trives ligefrem under så ekstreme miljøbetingelser. En særlig gruppe af organismer, der ofte er fremherskende i ekstreme miljøer, er arkæer, og denne gruppe har mange “rekorder” hvad angår vækst og overlevelse under økologiske ekstremer. Den amerikanske mikrobiolog Carl Woese opdagede disse bakterielignende organismer i 1970'erne, og i 1990 blev de anerkendt som en selvstændig organismegruppe. Indtil da havde man kategoriseret alle levende organismer i to evolutionære kategorier, nemlig prokaryoter og eukaryoter. Men arkæerne kunne ikke placeres i nogen af disse to grupper og derfor måtte klassificeringen ændres. I dag er alle levende organismer kategoriseret i en af tre grupper; eukaryoter (som omfatter dyr, planter, svampe og nogle encellede organismer), bakterier og arkæer.

En vigtig spiller i miljøet

Det er mere end 30 år siden, at arkæer blev opdaget, men det er de færreste der har hørt om disse spæn-

dende organismer. Da man opdagede arkæer troede man, at det var en gruppe af sjældne organismer, men det har vist sig, at de er meget mere vidt spredte end først antaget. De findes i en myriade af forskellige lokaliteter overalt i verden, og de udgør en stor del af oceanernes biosfære. De er specielt talrige i marine økosystemer, hvor de kan udgøre 5-30 % af den totale population af plankton. Man ved endnu ikke meget om arkæernes rolle i oceanerne, men forekomsten af arkæer i alle økosystemer tyder på, at de spiller en meget større rolle i forskellige biogeokemiske cyklusser end først antaget.

Eksempelvis er det for nylig blevet vist, at visse marine arkæer er i stand til at omdanne ammonium til nitrit ved tilstedeværelsen af ilt (nitrifikation efter formlen: $\text{NH}_3 + 1,5 \text{O}_2 + \text{Marine arkæer} \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+$). Hos både bakterier og arkæer er det et særligt enzym kaldet *amoA*, der katalyserer omdannelsen af ammonium til nitrit.

Et studie i Nordsøen har vist, at forekomsten af *amoA* i arkæer er 1-2 gange højere end i bakterier, og noget tilsvarende er observeret i de øverste 1000 meter af vandsøjlen i Atlanterhavet, hvor indholdet

Artiklen kommer fra tidsskriftet *Aktuel Naturvidenskab*: aktuelnaturvidenskab.dk

af *amoA* kan være op til tre gange højere i arkæer end i bakterier. Det har været overraskende observationer, da man hidtil har troet, at det alene var bakterier, der stod for nitrifikationen i marine miljøer.

Selvom arkæer udgør en stor del af den marine biomasse, så er det ikke i de åbne vandmasser, man finder den højeste biodiversitet af arkæer. Den finder man til gengæld ved nogle af de mere ekstreme miljøer fx ved dybhavsvulkaner.

Specialister i det ekstreme

Mange arkæer er hvad man kalder ekstremofiler – dvs. at de populært sagt elsker ekstreme miljøer. De kan altså ikke bare overleve, men har specialiseret sig i at trives under ekstreme miljøbetingelser, hvor man tidligere antog, at intet liv kunne overleve. At kunne trives i kogende vand, is, syre, saltkrystaller og giftigt affald kræver nogle helt unikke tilpasninger. Ofte er arkæer så specialiserede, at de ikke er konkurrencedygtige og dermed ikke kan overleve i et andet miljø end det, de har tilpasset sig.

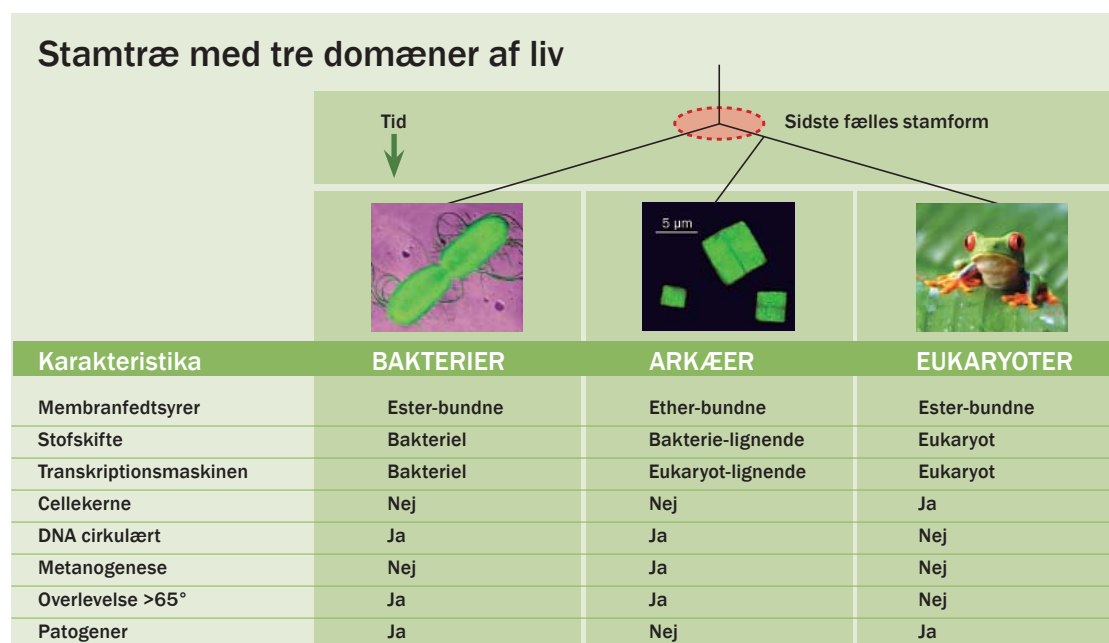
For nemheds skyld grupperer man ofte arkæer efter hvilket miljø, de har tilpasset sig. Således findes der saltelskende (halofile) arkæer, varmeelskende (termofile) arkæer, kuldeelskende (psykrofile) arkæer, syreelskende (acidofile) arkæer og metan-producerende (metanogene) arkæer. Gennem årene har man gjort mange interessante opdagelser ved at studere ekstreme arkæer, fx blev den første fritlevende

mikroorganisme med en firkantet form opdaget hos en saltelskende arkæa i 1980. Yderligere har man observeret, at visse kuldeelskende arkæer har tilpasset sig sæsonmæssige fryse-tø cyklusser, der svinger i temperatur fra -45 °C til 25 °C.

Det særlige ved arkæer

Arkæernes succes i ekstreme miljøer er forbundet med de unikke karakteristika og specialiseringer, de har i forhold til andre organismegrupper. Nogle af deres karakteristika er forbundet med selve opbygningen af deres celle, andre er forbundet med deres celleprocesser, fx hvordan de skaffer sig energi eller kopierer deres DNA. Udover at have udviklet unikke karakteristika, så deler arkæer træk med både bakterier og eukaryoter. Det er nemt at komme til at opfatte arkæer som ekstreme bakterier, men arkæerne er rent evolutionært nærmere beslægtet med os mennesker end med fx bakterien *E. Coli*.

At arkæer sammenlignes med bakterier er dog forståeligt, da både bakterier og arkæer er små organismer ofte mindre end en mikron lange (en tusindedel af en millimeter). Derudover ligner deres DNA hinandens og ingen af dem har en cellekerne. En vigtig forskel mellem arkæer og bakterier er den kemiske struktur af de fedtsyrer, der udgør den membran, der ligger som et beskyttende lag under cellevæggen (den cytoplasmiske membran). Fedtsyrerne i den cytoplasmiske membran hos arkæer er bundet sammen af stærke etherbindinger. Etherbundne fedtsyrer er ikke



Øverst: Et simpelt stamtræ, der viser de tre domæner af liv: eukaryoter (inkluderer dyr, planter, svampe og nogle encellede organismer), bakterier og arkæer. Træet viser den evolutionære udvikling af de tre domæner.

Midterste foto: Den firkantede arkæa *Haloquadratum walsbyi* blev opdaget i 1980 af A. E. Walsby. Den blev fundet i prøver fra en saltsø på Sinai-halvøen i Egypten, og er det første eksempel på en firkantet organisme. Foto: Mike Dyall-Smith

Tabel: Udvalgte karakteristika hos bakterier, arkæer og eukaryoter. Bemærk, at karakteristikaene er generaliseret – dvs. der kan være undtagelser fra "reglen".

nemme at nedbryde, de kan holde til høje temperaturer, mekaniske forstyrrelser og de er yderst salttolerante. Det gør den cytoplasmiske membran til en effektiv barriere rundt om arkæa-cellen og hjælper med at opretholde kemisk ligevægt inde i cellen, hvilket er utrolig vigtigt for at cellens maskineri fungerer optimalt. Yderligere kan arkæer modificere deres cytoplasmiske membran ved, at selve fedtstofkæderne kan danne forskellige fysiske strukturer og lave forgreninger. Dette kan gøre membranen mere kompakt og dermed nedsætte cellens gennemtrængelighed, så fx saltioner får sværere ved at trænge ind i cellen. Det betyder, at arkæer skal bruge mindre energi på at opretholde kemisk ligevægt inde i cellen, hvilket kan være en fordel i konkurrencen mod bakterierne.

Hvis man kigger på processerne inde i cellen, så deler arkæer flest træk med bakterier hvad angår stofskiftet, mens de deler flest træk med eukaryoter hvad angår informationsprocesser (DNA replikation, transskription, translation).

Udover disse generelle karakteristika, så har de forskellige grupper af arkæer måtte tilpasse sig deres miljøer via specialiseringer, fx er enzymerne hos termofile arkæer meget varmetolerante.

Organismer med bioteknologisk potentiale

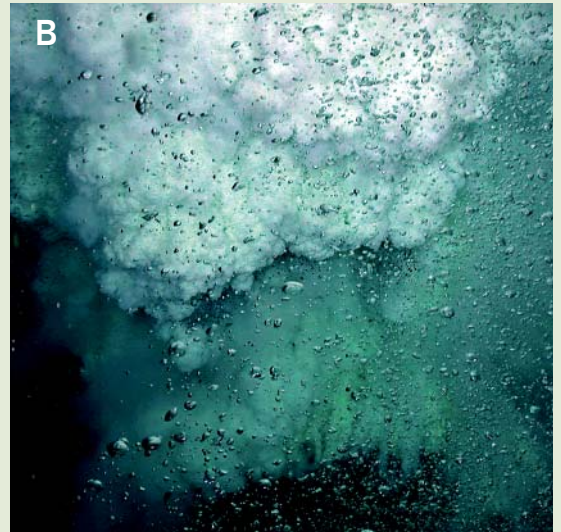
Meget af forskningen inden for arkæa-biologi har fokuseret på at forstå de molekylære, fysiske og evolutionære tilpasninger som kun arkæer har udviklet. Specielt har man været interesseret i opdagelsen af et nyt stofskifte i form af evnen til at omdanne CO_2 og H_2 til metan (kaldet metanogenese), samt at undersøge cellernes evne til effektivt at fungere i ekstreme miljøer.

Et andet aspekt af arkæernes biologi, som nu er ved at komme i forskernes søgelys er manglen på patogener (dvs. sygdomsfremkaldende) arkæer. Selvom nogle arkæer lever i tæt kontakt med både planter, dyr og mennesker, så er ingen arkæer ind til videre blevet identificeret som den primære

Eksempler på forskellige ekstreme miljøer hvor arkæer trives.

- A. Et isbjerg
- B. En dybhavsvulkan
- C. En varm kilde i Yellowstone nationalpark
- D. Det Døde Hav

Fotos:
A. Colourbox
B. NOAA
C. Colourbox
D. M. Disdero, Wikipedia



årsag til sygdom hos dyr eller planter. Dette kan have stor betydning for deres potentiale inden for medicinforskning.

Viden om arkæer motiverer også forskning inden for andre områder som fx bioteknologi. Bioteknologiske processer er ofte kendetegnet ved barske betingelser i form af høje temperaturer eller opløsningsmidler. Da mange arkæer jo netop er tilpasset sådanne ekstreme betingelser, er de som t organismegruppe et ideelt sted at lede efter nye enzymer eller andre biologiske komponenter, der kan anvendes til bioteknologiske produkter. Det er netop tanken bag et stort EU-samarbejdsprojekt kaldet "HotZyme", som er ledet af Arkæa Center ved Københavns Universitet. Mere end 12 europæiske institutioner og industrielle partnere, herunder danske Novozymes, er med i projektet. Det primære fokus er at finde nye enzymer fra termofile organismer såsom arkæer, som har potentiale til at forbedre industrielle processer.



Prøvetagning fra en varm kilde på Island, foretages af ph.d.-studerende, Soley Gudbergsdottir, fra Arkæa Center ved Københavns Universitet.

Typer af arkæer

Halofile arkæer (saltelskende arkæer).

Halofile arkæer trives i miljøer med høje saltkoncentrationer fx i saltsøer. Moderat halofile arkæer vokser optimalt ved koncentrationer af NaCl på omkring 30-150 g/L og ekstremt halofile arkæer vokser optimalt ved koncentrationer på omkring 150-300 g/L. Til sammenligning er koncentrationen af NaCl i normalt havvand på omkring 35 g/L og i en saltsø som Det Døde hav er den omkring 315 g/L. Natrium i høje koncentrationer er giftigt, og derfor bruger halofile arkæer konstant energi på at fjerne indtrængende natrium. Ved NaCl-koncentrationer højere end 200-250 g/L dominerer arkæer over bakterier, både hvad angår mængde og diversitet.

Termofile arkæer (varmeelskende arkæer)

Termofile arkæer trives i varme miljøer fx i varme kilder og vulkansk jord. Termofile arkæer er karakteriseret ved at have optimale vækstbetingelser mellem 45-80°C. Ekstremt termofile arkæer vokser optimalt ved over 80°C, og den højeste temperatur, hvor man har observeret vækst af en arkæer, er på 121°C. Disse organismer overlever i temperaturer, der er tæt på grænsen for hvad en celleds strukturkomponenter kan klare. Det betyder, at termofile arkæer har flere celletilpasninger, der gør dem i stand til at overleve ved over 100°C. Arkæer udkonkurrerer bakterier ved høje temperaturer og typisk dominerer de ved 70-80°C og over.

Psykrofile arkæer (kuldeelskende arkæer)

Den største andel af arkæer finder man i kolde miljøer. 75 % af jordens biosfære er kold og psykofile arkæer kan findes i permanent kolde miljøer, så som alpine og arktiske miljøer, i dybhavet og den yderste atmosfære. Psykofile arkæer kan formere sig ved 0-10°C, vokse i sne og is ved -20°C (muligvis helt ned til -40°C) og overleve ved -45°C. Der skelnes mellem sande-psykofile, der kun kan vokse inden for et snævert temperaturområde og ikke tåler højere temperaturer, og så tolerante psykofile, der godt kan "lide" kolde temperaturer, men som samtidig kan vokse ved varmere temperaturer. Psykofile arkæer har en stor indflydelse på kulstof- og nitrogen-cykluserne i kolde miljøer.

Acidofile arkæer (syreelskende arkæer)

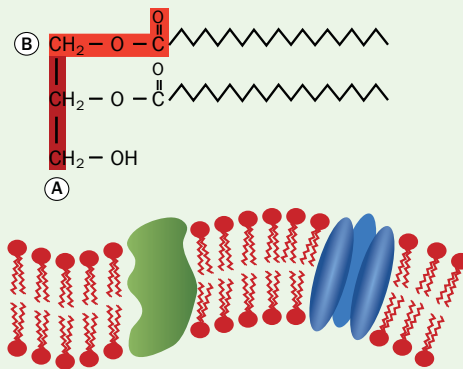
Acidofile arkæer trives i sure miljøer med pH værdier under 5 (nogle gange med pH værdier under 1) og i sure miljøer ved høje temperaturer. Sure miljøer inkluderer svovlkilder, geysere, mineaffald og selv vores egne maver. Normalt vil en høj syrekoncentration slå celler ihjel, og derfor har acidofile arkæer udviklet en række mekanismer, der kan opretholde deres pH på et konstant niveau. De har både udviklet passiv regulering (der ikke kræver energi) og aktiv regulering (energikrævende). Mange arkæer er tilpasset til sure miljøer og de dominerer specielt i varme syreholdige miljøer som varme kilder.

Metanogene arkæer (gruppe baseret på deres stofskifte)

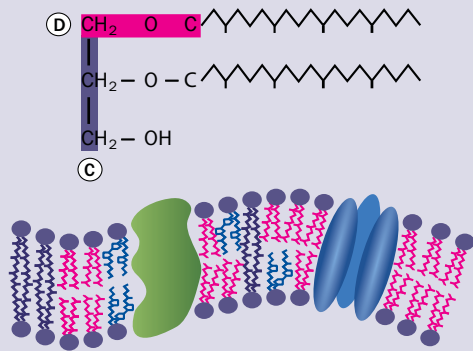
Metanogene arkæer er en divers gruppe af strengt anaerobe arkæer, dvs. de kan kun trives i iltfrie miljøer fx rismarker, sumpområder, tarmkanalen hos drøvtyggere og termitter og i iltfrit sediment på havbunden. Metanogene arkæer får energi til deres stofskifte ved at omdanne CO₂ og H₂ til metan. Metanogene arkæer danner ca. 1 billion tons metan om året. Metan er en vigtig drivhusgas, som er 21 gange mere effektiv end CO₂. Så selvom disse arkæer er begrænset til iltfrie miljøer, spiller de en vigtig rolle i den globale kulstofcyklus.

Karakteristika af cellemembraner

Eukaryoter og bakterier



Arkæer



Videre læsning

Cavicchioli, R. "Archaea – timeline of the third domain" *Nature Reviews Microbiology* vol.9 (January 2011), p. 51.

Valentine, D. L. "Adaptations to energy stress dictate the ecology and evolution of the Archaea" *Nature Reviews Microbiology* vol.5 (April 2007), p.316.

Om Arkæa Center ved Københavns Universitet: dac.molbio.ku.dk

- Glycerol bundet til 2 fedtsyrer via esterbindinger
- Glycerol bundet til 2 fedtsyrer via etherbindinger
- Forgrenet fedtsyrestruktur (ses kun hos arkæer)
- Transmembran fedtsyrestruktur (ses kun hos arkæer)

Karakteristika af cellemembranen hos henholdsvis bakterier, eukaryoter og arkæer. Bakterier og eukaryoter har den samme type membran. Hos bakterier og eukaryoter er fedtsyrer kædet til det centrale glycerolmolekyle (A) via en esterbinding (B), hvorimod hos arkæer er de bundet til det centrale glycerolmolekyle (C) via en etherbinding (D). Yderligere er der to typer af membranstrukturer, man kun ser hos arkæer, nemlig forgrenede fedtsyrestrukturer og transmembrane fedtsyrestrukturer (går fra en ende af membranen til den anden i ét lag).

Mod nye horisonter

Arkæer er også yderst interessante i en helt anden sammenhæng, nemlig inden for astrobiologien. Man bruger ekstremofile arkæer til at forestille sig, hvordan liv på andre planeter kan se ud – dvs. de fungerer som en guide i udforskningen af mulighederne for liv andre steder i rummet. Her har man ofte fokus på metanogene arkæer på grund af deres tilpasning til iltfrie forhold med lidt eller intet kulstof. Eksperimenter tyder på, at metanogene arkæer kan overleve ved Mars-lignende forhold, og hvis det viser sig, at de også kan vokse under sådanne forhold, vil det være endnu mere interessant.

Over de sidste 30 år har vi lært utroligt meget om disse spændende organismer, men vi er langt fra færdige med at afsløre alt om deres særegne biologi. På Arkæa Center ved Københavns Universitet arbejder vi på at forstå de basale molekylære og cellulære processer, der kendetegner arkæer. Yderligere er vi meget interesserede i at undersøge de vira, der inficerer og i visse tilfælde dræber arkæer. Det er et meget nyt og spændende område, hvor vi finder nye exceptionelle virusformer. Alt tyder på, at vi kan lære meget af at studere arkæer til gavn for både industrien og forskningen. ■

Foto: nasa.gov/lohn.davis

Artiklen kommer fra tidsskriftet *Aktuel Naturvidenskab*: aktuelnaturvidenskab.dk