Ekstramateriale:

Udvidede faktabokse til artiklen **Hvad kan Jorden lære os om liv i rummet?**
Af Kai Finster, Aktuel Naturvidenskab nr. 5/2026

Atacamaørkenen – liv ved grænsen for vandaktivitet

Atacama er vigtig i astrobiologien, fordi den viser, at det er vandets tilgængelighed, der bestemmer, om mikrober kan være aktive. I de mest tørre områder findes salte som halit (stensalt), nitrat og perklorat, der kan optage vanddamp fra luften og danne ultratynde væskefilm. Den proces kaldes delikvescens og er interessant, fordi lignende salte også er fundet på Mars. Derfor bruges Atacama som model for, hvordan mikrobielt liv måske kan overleve i små, kortvarige mikromiljøer under overfladen.

De vigtigste processer, man studerer her, er ikke nødvendigvis hurtig vækst, men overlevelse, vedligeholdelsesmetabolisme og respiration ved meget lav vandaktivitet. Hvis organismer har adgang til små organiske molekyler som acetat (salt af eddikesyre) eller formiat (salt af myresyre), kan de koble oxidation af disse til reduktion af nitrat, sulfat eller perklorat (en klorholdig salt som dannes i store mængder). Perklorat ophobes i Atacama, fordi ekstrem tørke og stærk fordampning gør, at atmosfærisk dannet perklorat, som falder ned med støv og nedbør, næsten ikke vaskes ud igen og derfor kan koncentreres i jorden over geologisk tid. Samtidig bidrager langvarige atmosfæriske oxidationsprocesser til at omdanne klorid og klorat til perklorat, som så bevares i de nitrat- og saltrige aflejringer i ørkenen. Det er især relevant for Mars, fordi netop disse hygroskopiske (vandtiltrækkende) salte kan skabe kemiske nicher, hvor vand og elektronacceptorer (åndingsmiddel) findes samtidig.

Eksempler på processer

1. Acetat koblet til nitratreduktion

$$5\,CH_3COO^- + 8\,NO_3^- + 13\,H^+ \rightarrow 10\,CO_2 + 4\,N_2 + 14\,H_2O$$

   Denne reaktion giver et højt energiudbytte og er derfor en af de mest interessante former for anaerob respiration i meget næringsfattige miljøer. Under standardbetingelser ligger energiudbyttet omtrent omkring -800 til -900 kJ per mol acetat, afhængigt af pH og koncentrationer.

2. Formiat koblet til perkloratreduktion (ånding med perklorat)

$$4\,HCOO^- + ClO_4^- + 4\,H^+ \rightarrow 4\,CO_2 + Cl^- + 4\,H_2O$$

   Perklorat er særligt interessant i Mars-sammenhæng, fordi stoffet både er fundet på Mars og kan holde på vand. Reduktion af perklorat kan give et meget stort energiudbytte, typisk i størrelsesordenen -200 til -300 kJ per mol formiat, og gør derfor processen attraktiv, hvis mikrober kan tåle de ekstreme saltforhold.

3. Acetat koblet til sulfatreduktion (sulfatånding)

$$CH_3COO^- + SO_4^{2-} + H^+ \rightarrow 2\,CO_2 + HS^- + 2\,H_2O$$

   Sulfatreduktion giver mindre energi end nitrat- og perkloratreduktion, men er stadig vigtig, fordi sulfat ofte er til stede i tørre saltsystemer. Energiudbyttet ligger groft omkring -40 til -60 kJ per mol acetat under standardbetingelser.

Hvorfor det er vigtigt for astrobiologi: Atacama viser, at selv ekstrem tørke ikke nødvendigvis udelukker liv, hvis salte kan skabe mikroskopiske vandfilm og samtidig levere eller bevare egnede elektronacceptorer. Det gør ørkenen til en vigtig model for nutidige eller fortidige mikromiljøer i Mars-regolitten.

Río Tinto – jern, svovl og surt

Río Tinto spiller en vigtig rolle i astrobiologisk forskning, fordi systemet drives af mikroorganismer, der udnytter energi fra jern- og svovlmineraler i stedet for sollys. Miljøet er surt, metalrigt og stærkt oxiderende, og det minder derfor om nogle af de jern- og sulfatdominerede miljøer, som kendes fra Mars. Samtidig viser Río Tinto, hvordan biologiske processer kan være med til at danne mineraler som jarosit, goethit og hæmatit, som også spiller en central rolle i tolkningen af Mars' geologiske historie.

Her er de centrale processer jernoxidation, svovloxidation, ferrireduktion og sulfatreduktion. Samspillet mellem disse processer holder systemet kemisk aktivt og er med til at producere både syre, opløst jern og sekundære mineraler. Det er netop denne kobling mellem stofomsætning og mineraldannelse, der gør Río Tinto til en så stærk Mars-analog.

Eksempler på processer:

1. Aerob oxidation af ferrojern

$$4\,Fe^{2+} + O_2 + 4\,H^+ \rightarrow 4\,Fe^{3+} + 2\,H_2O$$

Mange acidofile (syreelskende) mikroorganismer kan hente energi ved at oxidere Fe^{2+} til Fe^{3+}. Energiudbyttet per mol jern er ret lavt, omtrent -30 til -40 kJ per mol Fe^{2+}, så organismerne må ofte omsætte store mængder jern for at vokse.

2. Oxidation af pyrit

$$FeS_2 + \frac{15}{4}\,O_2 + \frac{7}{2}\,H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 2\,SO_4^{2-} + 4\,H^+$$

Denne nettoreaktion viser, hvordan oxidation af pyrit kan danne sulfat og syre. Den præcise energifordeling mellem abiotiske og biologiske trin kan variere, men samlet er processen stærkt eksergon (energifrigivende) og kan frigive flere hundrede kJ per mol pyrit under oxiderende forhold.

3. Oxidation af reduceret svovl

$$S^0 + \frac{3}{2}\,O_2 + H_2O \rightarrow SO_4^{2-} + 2\,H^+$$

Svovloxidation er en vigtig kilde til både energi og forsuring. Energiudbyttet er højt sammenlignet med jernoxidation, ofte i størrelsesordenen -500 til -600 kJ per mol elementært svovl under standardbetingelser.

4. Anaerob ferrireduktion med acetat

$$CH_3COO^- + 8\,Fe^{3+} + 4\,H_2O \rightarrow 2\,HCO_3^- + 8\,Fe^{2+} + 9\,H^+$$

Denne proces lukker jernkredsløbet og er særlig vigtig i oxygenfrie sedimenter. Energiudbyttet afhænger stærkt af pH og mineralfase, men ligger typisk i et moderat til højt interval og kan være omkring -150 til -250 kJ per mol acetat.

5. Sulfatreduktion med hydrogen

$$4\,H_2 + SO_4^{2-} + H^+ \rightarrow HS^- + 4\,H_2O$$

Sulfatreduktion foregår især i mere reducerede lommer i sedimenterne og viser, at selv et surt system rummer anoksiske (oxygenfrie) mikromiljøer. Energiudbyttet er moderat, ofte omkring -150 kJ per mol sulfat eller cirka -35 til -40 kJ per mol hydrogen.

Hvorfor det er vigtigt for astrobiologi: Río Tinto viser, at mikrober kan drive et helt økosystem på ren geokemi, og at de samtidig kan efterlade mineralogiske spor, som i princippet kan bevares over

geologisk tid. Det gør systemet relevant både for spørgsmålet om habitabilitet (beboeligheden)og for jagten på biosignaturer på Mars.

Den dybe biosfære – liv uden sollys

Den dybe biosfære er et af de vigtigste forbilleder for muligt liv uden for Jorden, fordi den viser, at mikroorganismer kan leve langt nede i undergrunden uden adgang til sollys. Her er energikilden i stedet kemiske reaktioner mellem vand, klipper og opløste stoffer. Det gør miljøet særligt relevant for Mars' undergrund og for isdækkede oceanverdener som Europa og Enceladus.

I den dybe biosfære studerer man især hydrogendrevne processer, fordi hydrogen kan dannes abiotisk, for eksempel når vand reagerer med jernholdige mineraler. Det giver et muligt grundlag for et helt økosystem, selv hvor organisk stof er sparsomt. De mest centrale processer er methanogenese (methandannelse) , sulfatreduktion (sulfatånding), acetogenese (eddikesyredannelse) og i nogle miljøer anaerob methanoxidation.

Eksempler på processer:

1. Hydrogenafhængig methanogenese

   $$CO_2 + 4\,H_2 \rightarrow CH_4 + 2\,H_2O$$

   Dette er en af de klassiske processer i den dybe biosfære og en af de mest diskuterede i astrobiologien. Energiudbyttet er moderat, typisk omkring -130 kJ per mol dannet methan under standardbetingelser, men i naturen kan værdien være betydeligt lavere på grund af lave substratkoncentrationer.

2. Hydrogenafhængig sulfatreduktion

   $$4\,H_2 + SO_4^{2-} + H^+ \rightarrow HS^- + 4\,H_2O$$

   Hvis sulfat er til stede, konkurrerer sulfatreducerende mikrober ofte effektivt med methanogener om hydrogen. Energiudbyttet er lidt større end for methanogenese under mange betingelser og ligger ofte omkring -150 kJ per mol sulfat.

3. Acetogenese (eddikesyredannelse) fra hydrogen og kuldioxid

   $$2\,CO_2 + 4\,H_2 \rightarrow CH_3COOH + 2\,H_2O$$

Acetogenese er vigtig, fordi den både kan levere biomasse og danne acetat, som andre mikrober kan bruge videre. Energiudbyttet er relativt beskedent, ofte omkring -70 til -100 kJ per mol acetat.

4. Anaerob oxidation af methan koblet til sulfatreduktion

$$CH_4 + SO_4^{2-} \rightarrow HCO_3^- + HS^- + H_2O$$

Denne proces er vigtig, fordi den viser, at methan ikke blot kan dannes, men også omsættes i dybe oxygenfrie systemer. Energiudbyttet er lavt, ofte kun -20 til -40 kJ per mol methan, og det forklarer, hvorfor sådanne mikrober ofte vokser meget langsomt.

Hvorfor det er vigtigt for astrobiologi: Den dybe biosfære viser, at liv kan opretholdes i mørke, under højt tryk og med meget lidt energi, hvis blot vand og redox-ubalance (det samme som potentiel energi) er til stede. Det gør undergrunden til et mere realistisk mål end overfladen, når man leder efter liv på Mars og andre klippe- eller isverdener.