

Vejrudsigten: nu med

Atmosfæren er fyldt med bakterier, der er blæst derop fra jordoverfladen – fx fra overfladen af blade på planter og træer. Nogle af disse bakterier har evnen til at hæve frysepunktet for vand, og derfor kan de spille en væsentlig rolle i klimasystemet, når de befinder sig i atmosfæren.

Vi snakker alle om vejret og følger med stor interesse vejrmeldingerne på TV og nettet. Vi forbinder vejrets grundlæggende mekanismer med fysikkens love, og når vi beundrer vejrsystemernes gøren og laden på skærmen, tænker vi næppe på, at mikroorganismer kan spille en vigtig rolle i dannelsen af så forskellige fænomener som regndråber, snefnug, hagl og skyer som sådan. Ja – de færreste er formentlig klar over, at der i det hele taget findes store mængder levedygtige bakterieceller i luften, og at de indgår i atmosfærens kemiske og fysiske processer.

Mikroorganismernes tilstedeværelse i atmosfæren blev første gang påvist i midten af det 19. århundrede bl.a. af den franske mikrobiolog Louis Pasteur, men er først blevet mere systematisk undersøgt siden 1920'erne. På det tidspunkt betragtede man dog atmosfæren kun som et medium, der giver mikroorganismene mulighed for passivt at sprede sig fra et sted til et andet. Først i de seneste 20 år er man begyndt at studere bakterier i atmosfæren med henblik på at undersøge deres rolle i atmosfærens dynamiske processer.

Bakterier i luften - hvor kommer de fra?

Bakterier i luften kan komme fra flere kilder, fx fra os selv. Vi udskiller således en masse små vanddråber, når vi hoster eller nyser – vanddråber, som indeholder både bakterier og virus. På denne måde kan luftbårne sygdomme som influenza eller tuberkulose spredes meget effektivt.

Langt størsteparten af bakterier i luften er dog ufarlige for os og kommer fra planteoverflader og jord. Ifølge et groft skøn frigives der globalt mindst 10^{16} bakterieceller per sekund til atmosfæren. Langt de fleste bakterier kommer fra landjorden. Det vil sige, at der sker en betydelig podning af den omgivende luft med nye celler hele tiden.

Ikke alle celler har det lige godt med at blive flyttet fra land til luft og går hurtig til grunde. I atmosfæren møder de nemlig en række livstruende udfor-

dringer som udtørring og UV-stråling, og kun de celler, som i forvejen er tilpasset til at kunne modstå disse stressfaktorer, overlever og er dermed med til aktivt at påvirke processer i atmosfæren.

Robuste bakterier

Forskere har vist, at bakterier, som lever på planteoverflader, hvor de naturligt er udsat for udtørring og stråling, er særdeles overlevedygtige. Under søger man således antallet og fordelingen af levedygtige bakterier i atmosfæren, dominerer oftest mikroorganismer, som også findes på planternes blade.

Disse bakterieceller indeholder i mange tilfælde farvestoffer kaldet karotinoider, som man også finder i gulerødder. Karotinoider beskytter cellen mod UV-lysets skadevirkninger ved at reagere med reaktive iltforbindelser, som dannes, når UV-lyset spalter vandmolekyler i cellen. Desuden er cellerne også modstandsdygtige mod udtørring bl.a. ved at danne cyster. Cyster har fortykkede cellevægge, hvilket reducerer tabet af vand.

Man har også kunnet vise, at disse bakterier er i stand til at udnytte en række af de næringsstoffer, der findes i vanddråber i atmosfæren. Mange af disse næringsstoffer stammer fra planter, og dette i sig selv kan være en årsag til, at bakterier fra planteoverflader trives særdeles godt i atmosfæren.

Dermed har mikrobiologer kunnet vise, at bakterieceller ikke kun spredes i en dvaletilstand, men at bakterier i atmosfæren kan være aktive, formere sig og samtidig påvirker den kemiske sammensætning af luften. Disse forsøg er dog hidtil kun blevet gennemført i laboratoriet, og man mangler derfor at vise, at det også sker i naturen.

Bakterier kan hæve vands frysetemperatur

Men hvad betyder bakteriernes tilstedeværelse så for de fysiske processer i atmosfæren såsom dannelse af skyer og nedbør?

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

bakterier

Hovedparten af den globale nedbør er knyttet til dannelsen af iskrystaller, som udgør den matrix, hvorpå regndråber kan kondensere. Hvis man tager meget rent vand og køler det langsomt ned, vil det først fryse, når temperaturen nærmer sig -40°C .

Når man ser på den del af atmosfæren, hvor vandet kondenserer og skyerne dannes, er temperaturen ofte ikke lav nok til, at rent vand kan fryse. Men hvis der tilføres forureninger i form af fx små partikler (aerosoler) eller kemiske forbindelser, øges frysetemperaturen. Disse forureninger har dermed en fremmede effekt på dråbe- og skydannelse.

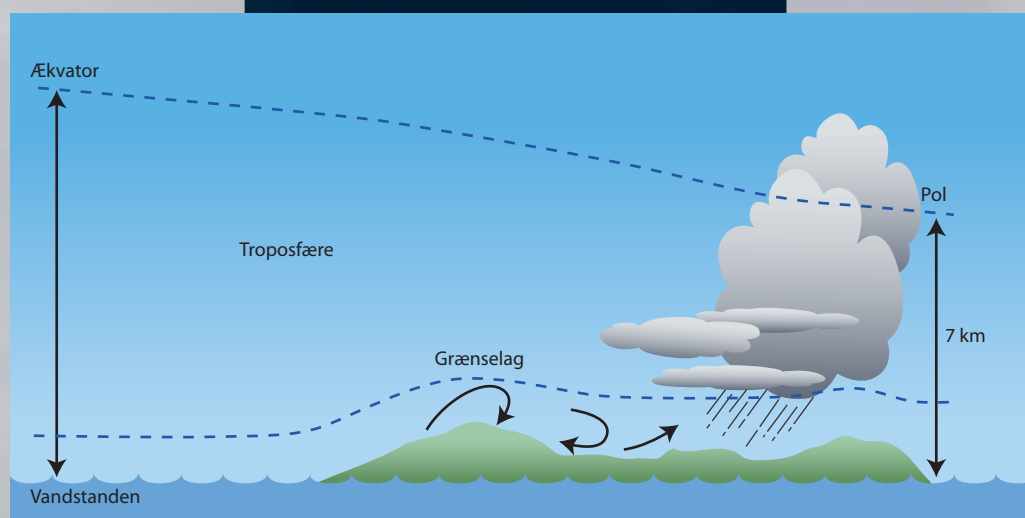
Bakteriers indflydelse på atmosfæreprocesser

Figuren viser de dele af atmosfæren, som har størst betydning for bakteriernes indflydelse på atmosfæreprocesser og cellernes udbredelse, nemlig grænselaget og troposfæren.

Grænselaget er den del af atmosfæren, som bakterierne skal overvinde for at komme ind i troposfæren. Så længe de befinder sig i grænselaget er sandsynligheden for, at de falder tilbage til jorden høj, og opholdstiderne dermed meget kort (sekunder til timer). I grænselaget har celler kun meget lidt indflydelse på atmosfæreprocesser, hvis overhovedet.

For at kunne bryde igennem grænselaget skal cellerne transporteres af kraftige, opadgående luftstrømme. Troposfæren er det lag af atmosfæren, hvor vejret udspiller sig. Her findes langt størsteparten af atmosfærens vand enten som vanddamp eller kondenseret som skyer eller tåge. Troposfærens tykkelse er størst ved ækvator (18 km) og mindst ved polerne (7 km). Over Danmark ender den i ca. 12 km's højde. Temperaturen falder med ca. $6,5^{\circ}\text{C}$ pr. km.

På grund af den relativt høje temperatur igennem det meste af troposfæren vil rent vand kun fryse i den øverste del. Her kommer biologiske og ikke biologiske aerosoler på banen, som øger den temperatur hvorved vandet fryser og iskrystaller og dermed nedbør dannes.



Forfattere



Kai Finster,
lektor
Institut for
Bioscience
og Stellar Astrophysics
Centre, Institut for Fysik
og Astronomi, Aarhus
Universitet,
kai.finster@biology.au.dk



Tina Sântl Temkiv,
postdoc,
Stellar Astrophysics
Centre, Institut
for Fysik og Astronomi,
Aarhus Universitet,
temkiv@phys.au.dk



Ulrich Gosewink-Karlson,
seniorforsker,
Institut for
Miljøvidenskab, Aarhus
Universitet,
uka@dmu.dk

Studier af bakterier indsamlet fra atmosfæren har vist, at nogle bakterier har den samme effekt på vandets frysetemperatur som støv og kemiske forbindelser. Til forskernes store overraskelse er nogle bakteriestammer mere effektive til at øge vandets frysetemperatur end støv og kemikalier. Vore egne studier har vist, at bakterier, som vi har isoleret fra regnvand, kan udløse frysning ved kun 4-5 minusgrader. Især én bakterietype med det poetiske navn *Pseudomonas syringae* (eller *P. syringae* blandt venner), har vakt særlig opmærksomhed. *P. syringae* er blevet rendyrket fra bladoverflader, hvor den lever som plante patogen.

Bakterien er skyld i fryseskader på bladene eller frugterne, idet den producerer et protein, som fremmer frysning af vand (se faktaboks). Når iskrystallerne dannes, ødelægges plantecellens cellevæg og membran, og cellens indhold bliver tilgængeligt for bakterierne, som kan spise det frigivne materiale og formere sig. Disse fryse-fremmende proteiner er forankret på cellens yderside, og de har en opbygning, som ligner strukturen af iskrystaller. På denne måde hjælper de vandmolekylerne til at placere sig i forhold til hinanden på en måde, som nedsætter deres bevægelser og dermed fremmer dannelsen af iskrystaller ved en højere temperatur.

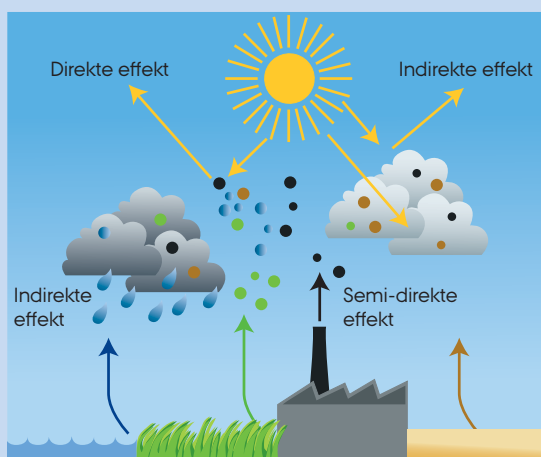
Mange bakterier med frysefremmende effekt

Det er indlysende, at dannelsen af is på plantecellerne, er en fordel for bakterierne, da det som

beskrevet ovenfor, giver *P. syringae* adgang til næringsstoffer. Spørgsmålet er nu, om evnen til at kunne fremme iskrystaldannelse også er en fordel, når cellen befinder sig i atmosfæren? En effekt af is- og dermed vanddråbedannelse er, at cellen ved at blive en del af vanddråben hurtigere kan vende tilbage til jordoverfladen, hvor cellen kan kolonisere nye planteoverflader.

Forskere har kunnet vise, at selv små dele af *P. syringae*-cellernes cellemembran, de såkaldte membranvesikler, kan fremme iskrystaldannelse. Bakterierne danner disse vesikler aktivt og afgiver dem til omgivelserne – ikke kun, når cellen går til grunde og membranen ødelægges, men i lige så høj grad, når bakterien er aktiv uden at dele sig. Vesiklerne fremmer således isdannelsen og forstærker cellens bidrag til beskadigelse af plantecellerne, uden at der kommer nye celler til. Dette kan være en fordel for cellen, når mængden af næring er begrænset. Produktionen af vesikler er nemlig knap så ressourcekrævende som dannelsen af nye celler.

I atmosfæren kan frigivelsen af vesikler have en ganske betydelig kvantitativ indflydelse på dråbe- og nedbørdannelse, da det kan mangfoldiggøre den enkelte celledrag til isdannelse. Vi mangler dog på nuværende tidspunkt metoder til at kunne opsamle membranvesiklerne og kvantificere deres betydning på global skala. Desuden mangler vi den ganske grundlæggende forståelse af, hvor mange iskrystaller hver enkel celle eller membranvesikel bidrager med.



Aerosoler

Aerosoler kan defineres som faste eller flydende stoffer, som er opløst i en gasart. Dette kan lyde lidt mærkeligt, da vi i dagligsproget forbinder opløsninger med en væske. De partikler, som der her er tale om, er meget små, dvs. under 1 µm i diameter, og det kan fx være sodpartikler, som stammer fra ufuldstændig forbrænding af benzin, olie eller diesel, eller det

kan være smådråber af vand, som slynges op i luften, når bølgerne brydes på klipper, eller det kan være støvpartikler, som hvirvles op under kornhøst eller støvstorme.

Aerosoler kan også være større – op til 50 µm i diameter – og dermed omfatte bakterier, svampesporer og alger. Udover at virke som fortætningskerner for dannelsen af vanddråber, kan bakterieceller ændre den kemiske sammensætning af de opløste organiske og uorganiske stoffer og dermed påvirke deres effekt på dråbedannelse. Således spiller aerosoler, både som opløst eller partikulært organisk og uorganisk stof eller som levende eller døde celler en vigtig rolle ved dannelsen af skyer, idet de virker som fortætningskerner, hvor vanddamp i atmosfæren kan samles og vanddråber dannes. Som del af vanddråber fjernes aerosolerne igen fra atmosfæren. Aerosolerne kan påvirke atmosfæreprocesserne på forskellige måder. De kan fx dæmpe solindstrålingen ved at absorbere eller tilbagekaste sollys.

Figuren viser, at aerosoler kan komme fra forskellige kilder og have både direkte effekt på klimaet (ved at reflektere solindstråling) og indirekte effekt (ved fx at øge skydannelsen).

De seneste års forskning har vist, at en lang række bakterier udover *P. syringae* råder over gener, som koder for fryse-fremmede proteiner, og at disse proteiner også er til stede på overfladen af bakterierne, når de bliver indsamlet fra atmosfæren. Derfor er flere forskergrupper – inklusive vores – nu gået i gang med at studere, hvilken effekt disse celler kan have på skydannelse og dermed på nedbør.

Studier i laboratoriet

Bakterier opholder sig kun i atmosfæren i en begrænset tid og flyttes hurtigt rundt af vind og nedbør. Når man tager denne dynamik i betragtning, kan det være svært at forestille sig, hvordan man kan undersøge atmosfærefænomener under mere kontrollerede og reproducerbare forhold. Det kræver både instrumenter, der tillader forstøvningen af bakterier til atmosfæren som veldefinerede aerosoler, og derudover et kammer, hvor de ønskede atmosfæreforhold kan reproducere.

For at kunne opnå det har vi indgået et samarbejde med forsker ved Lunds Universitet i Sverige og Leibniz-instituttet for troposfæreforskning i Leipzig i Tyskland.

I Lund er forskere i gang med at udviklet et instrument, som producerer passende bakterieaerosoler, der kan sprøjtes ind det kammer, som står i Leipzig. I løbet af det næste år vil vi være i stand at undersøge under hvilke forhold og ved hvilke doser, bakteriekulturer fremmer is- og dermed skydannelsen. Undersøgelserne vil både bidrage til en bedre for-

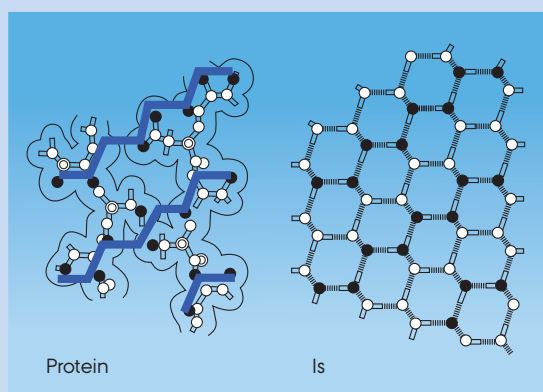
ståelse af bakteriernes rolle i atmosfæreprocesser, og kunne føre til udvikling af produkter, som kan bruges til at manipulere atmosfæren.

I dag anvender man således celler af *P. syringae* kommercielt ved produktion af kunstsne, hvor man tilsætter tørrede, døde celler til vand i snekanonerne. På denne måde kan man producere kunstsne ved højere temperaturer end ellers og derved spare energi.

Udover på skipisterne forsøger man også at anvende *P. syringae* til at danne kunstige skyer og dermed regn. Det kan være ønskeligt, når atmosfæren indeholder mange forurenende stoffer, og den kunstige regn kan bruges til at rense luften. I dag bruger man mest sølviodid til dette formål, men bakterievesikler kunne være et alternativ, da disse modsat sølviodid er biologisk nedbrydelige.

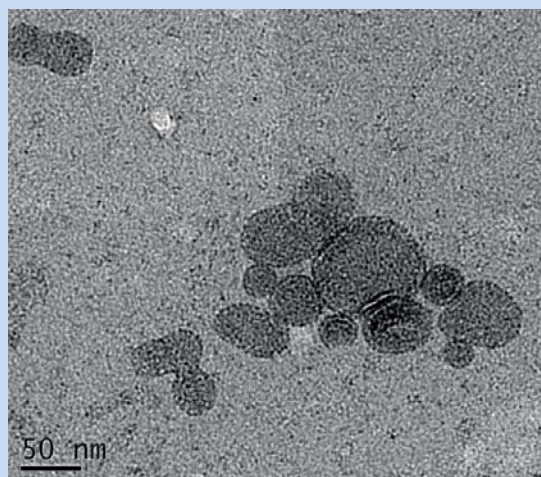
Ud i rummet

Udover de mulige jordnære anvendelser af bakterier i atmosfæren, kan vores viden om bakterierne og de processer, de er involveret i, hjælpe i jagten på mulige spor af liv på andre planeter i Universet. Vi er således involveret i grundforskningscenteret Stellar Astrophysics Centre ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet, hvor vi netop undersøger muligheden for at kunne påvise tilstedeværelsen af liv på planeter udenfor vores solsystem ved først at identificere og senere kvantificere biologiske spor i planeternes atmosfæres. Her skal vi undersøge de effekter, bakterier har på atmosfæreprocesser. Det gælder såvel intakte levende og



In-protein

IN-proteiner er opbygget af gentagne sekvensmotiver. Typisk består et motiv af 48 aminosyrer, som kan inddeles i 3 blokke af 16 aminosyrer, hvoraf de første 8 er identiske. Sandsynligvis sørger disse gentagelser for, at vandmolekyler orienteres på en måde, som ligner orienteringen i en iskrystal. Ved at orientere vandmolekylerne fremmer IN-proteiner frysningen af vand ved højere temperaturer end hvis de ikke er til stede.



Vesikler

Små kugleformede strukturer, de såkaldte membranvesikler, er blevet afsnøret fra en celle under vækst og består af en del af cellens membran samt noget cellevæske. I membranen kan der sidde proteiner, bl.a. IN-proteinerne, som ved høje temperaturer fremmer dannelsen af iskrystaller.

døde bakterieceller, samt membranvesikler og frysefremmede proteiner som sådan. Vi vil sammenholde effekter, som skyldes biologisk materiale med effekter, der stammer fra ikke-biologisk materiale. Hvis vi kan identificere signifikante forskelle mellem disse to kilder til dannelsen af is og skyer, vil vi kunne anvende vores forståelse af processer i Jordens atmosfære til at fortolke data, som stammer fra observationer af exoplaneternes atmosfære.

I den bedste af alle verdener vil bakterierne i atmosfæren åbne et vindue, hvorigennem vi vil kunne se det ekstraterrestriske liv i kortene. ■



Frysebakterien

Pseudomonas syringae (*P. syringae*) er navnet på en cirka 1 µm lang stavformet, bevægelig bakterie. Mange stammer af *P. syringae* er plantepatogene, som angriber alt fra forskellige kornsorter over tomater og tobaksplanter til frugttræer. Indtil videre har man dyrket og identificeret 60 forskellige stammer, som angriber hver deres værtsplante. Modsat bakterier, som kun lever som patogener, og som derfor kaldes obligat patogener, kan *P. syringae* også fint klare sig uden at være sygdomsfremkaldende. Således kan man nemt dyrke dem på næringsrige dyrkningsmedier. Når organismerne kan klare sig både med og uden den vært, de snylter på, kalder man dem for fakultativt patogener.

I naturen kan man observere *P. syringae*'s aktive tilstedeværelse på planter som små sorte misfarvninger på blade- eller frugtoverfladerne efter frost. Disse misfarvninger skyldes, at bakteriecellerne ødelægger plantecellerne for dermed at få adgang til plantecellens næringsstoffer.

Alene i USA beløber frostskaader på planter sig til mere end 1 milliard \$ om året, og en stor del af disse skader skyldes *P. syringae*. Derfor har der været stor interesse for at producere en genmodificeret stamme af *P. syringae*, som mangler genet for proteiner, der fremmer isdannelse. Allerede i 1980'erne lykkedes det amerikanske forskere at fremstille en stamme med de ønskede egenskaber ved hjælp af genteknologiske metoder. I laboratorieforsøg kunne man vise, at den nye genmodificerede stamme kunne udkonkurrere sine is-dannende, naturlige slægtninge. I 1987 skrev denne nye "is-minus stamme" historie, da den som den først GMO-organisme nogensinde blev sluppet løs i naturen. Det var på en testjordbærmærk i Californien, og ligesom i laboratoriet medførte GMO-stammen, at frostskaader på planterne blev reduceret. På grund af protester fra miljøorganisationer kom den genmodificerede stamme, som skulle markedsføres under navnet *Frostban*, dog aldrig i brug som kommercielt produkt.

LACIS – et skyeksperiment

The Leipzig Aerosol Cloud Interaction Simulator (LACIS) er et enestående instrument til at undersøge aerosolernes indflydelse på dannelsen af skyer under meget kontrollerede forhold. Forskerne bag LACIS studerer især de komplekse faseovergange, hvor vandmolekyler vekselvirker med og til sidst binder sig til aerosoloverfladerne. I processen dannes vanddråber. LACIS er bygget således, at alle faktorer, som spiller en rolle ved denne proces, kan varieres uafhængigt af hinanden. Disse faktorer er bl.a. temperatur, tryk, den relative luftfugtighed og sammensætningen og koncentrationer af aerosolerne.



Inde i tårnet findes LACIS' "hjerter": et 10 m langt stålør med en diameter på 1,5 cm. Temperaturen i røret kan varieres mellem +40 og -60° C, og partiklerne maksimale opholdstid er 60 sec. Temperaturen kan kontrolleres med en præcision på 0,05° C. Måleresultater, som opnås i LACIS, fortolkes ved hjælp af den såkaldte "Fine Particle Model", som blev udviklet af den samme forskergruppe, som har bygget instrumentet.

Læs mere

[Http://cloudlab.tropos.de/lacis/lacis_e.html](http://cloudlab.tropos.de/lacis/lacis_e.html)

K.W. Finster, T.S. Temkiv og H. Kjeldsen: Er der liv derude? *Aktuel Naturvidenskab* 6-2012.