

Trafik i Beijing, Kina. Storbyen er kendt for en voldsom luftforurening, som dog er reduceret med ca. 50 % i løbet af de seneste 15 år. Foto: Colourbox.

MINDRE LUFTFORURENING GIVER VARMERE KLIMA

Om forfatterne



Carl Svenhag er postdoc og arbejder med klimamodeller i sin forskning om samspillet mellem aerosoler og skydannelse. carl.svenhag@envs.au.dk



Ulas Im er seniorforsker og arbejder med klimamodeller i sin forskning om aerosoler, skydannelse, luftkvalitet og helbredseffekter. ulas@envs.au.dk



Peter L. Langen er professor og arbejder med klimamodeller i sin forskning om arktiske klimaforandringer og klimafedbacks. plangen@envs.au.dk

Alle er ved iClimate og Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet



Aerosoler er mikroskopiske partikler i luften, der både kan stamme fra menneskets aktiviteter og fra naturlige kilder. De spiller en stor rolle for menneskers sundhed i form af luftforurening, men de påvirker også klimaet både direkte og indirekte. Når vi bekæmper luftforurening, påvirker det derfor også klimaet.

Atmosfæriske aerosoler er bitesmå faste eller flydende partikler, der svæver i luften. De stammer både fra naturlige kilder og menneskelige aktiviteter. Disse partikler påvirker klimaet ved at sprede sollys, ændre skydannelse og påvirke luftkvaliteten – og det har konsekvenser for menneskers sundhed.

Aerosoler kommer fra mange forskellige kilder. Naturlige kilder omfatter blandt andet støv fra ørkener og landbrug, havsalt, vulkanudbrud og skovbrande. Planter udleder også organiske forbindelser, der kan omdannes til sekundære

aerosoler i atmosfæren. Menneskeskabte kilder omfatter afbrænding af fossile brændstoffer, industrielle processer, afbrænding af biomasse og landbrugsaktiviteter. Disse aktiviteter udsender både partikler som sod og flyveaske samt gasformige forstadier som svovldioxid (SO₂) og nitrogenoxider (NO_x), der kan reagere i luften og danne nye aerosoler.

Aerosoler påvirker både sundhed og klima. Indånding af fine partikler kan føre til luftvejssygdomme, hjerte-kar-problemer, lungeskader og i værste fald for tidlig død – især i stærkt forurenede byområder. I forhold til klimaet bidrager visse aerosoler såsom sod (på engelsk:

black carbon) til opvarmning ved at absorbere sollys, mens andre, såsom sulfat-aerosoler, virker afkølede ved at reflektere sollys tilbage ud i rummet. Aerosoler spiller også en vigtig rolle i skydannelse og nedbørsmønstre, og de kan forstærke ekstreme vejrfænomener som cykloner. Samlet set er forståelsen af aerosoler derfor afgørende for at bekæmpe luftforurening, forbedre folkesundheden og håndtere klimaforandringer.

Aerosolers effekt på klimaet

Atmosfæriske aerosoler påvirker klimaet direkte gennem spredning og absorption af solindstråling. Deres effekt afhænger af deres sammen-



refleksionsevne (albedo), hvilket reducerer mængden af solenergi, der når overfladen. Sulfat-aerosoler, som dannes af svovldioxid (SO₂) fra vulkaner og forurening, er blandt de mest effektive afkølede partikler. De reflekterer sollys ud i rummet og kan midlertidigt sænke de globale temperaturer. Efter store vulkanudbrud som Mount Pinatubo i 1991 så man for eksempel en markant men kortvarig global afkøling. Tilsvarende kan reduktionen af sulfat-udledninger fra skibstrafik føre til en opvarmningseffekt, da færre sulfat-aerosoler betyder mindre reflekteret sollys og dermed mere energi til at opvarme kloden.

Omvendt bidrager opvarmende aerosoler som sod til global opvarmning. Disse partikler absorberer solindstråling og opvarmer atmosfæren, samtidig med at de mindsker albedoen, hvis de afsættes på sne og is. Sod udledes fra afbrænding af fossile brændstoffer, biomasse og industrielle processer. Når det lander på is og sne, gør det overfladen mørkere, og det øger varmeoptagelsen og accelererer afsmeltningen. Det forstærker opvarmningen, især i Arktis.

Derudover kan mineralstøv have både afkølede og opvarmende effekter afhængigt af sammensætningen. Mens nogle partikler reflek-

terer sollys, kan større partikler absorbere stråling og dermed påvirke regionale temperaturer.

Samlet set afhænger aerosolers direkte klimapåvirkning af deres type og udbredelse. At reducere sod kan hjælpe med at bremse opvarmningen, mens reguleringen af sulfat-aerosoler er en balancegang mellem at begrænse luftforurening og undgå utilsigtede temperaturstigninger.

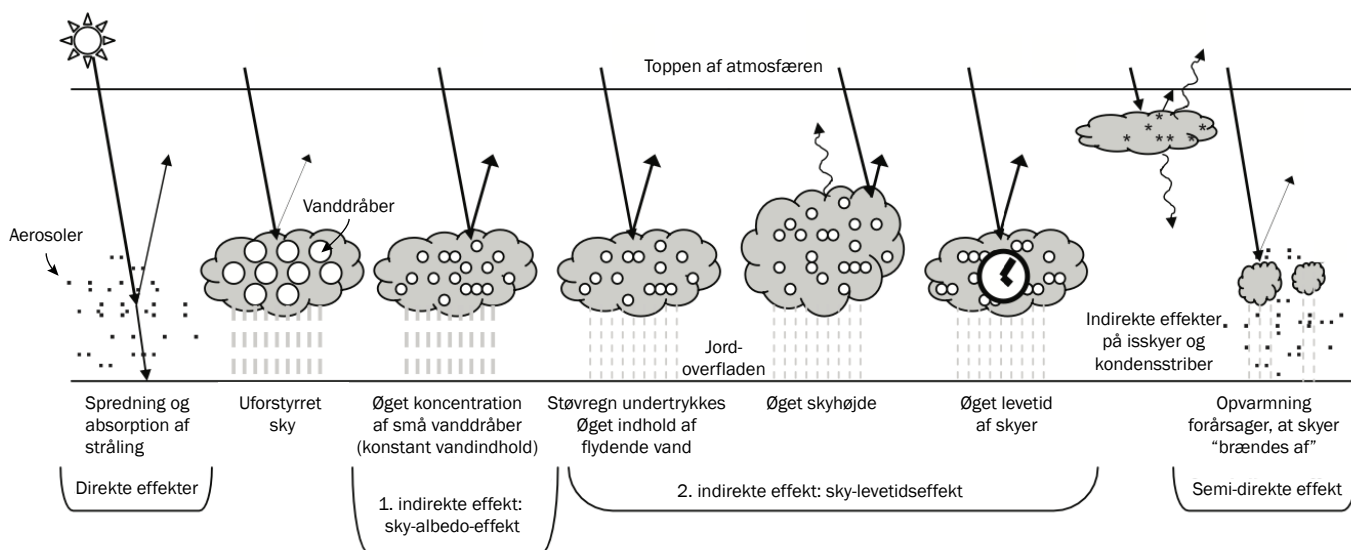
Aerosoler påvirker dannelsen af skyer

Aerosoler påvirker klimaet indirekte gennem deres rolle i skydannelse. Og det har stor betydning for Jordens energiregnskab.

Skyer dannes, når vanddamp i luften køles ned og kondenserer til små dråber. Dog omdannes ren vanddamp ikke så let til dråber af sig selv. En skydråbe har næsten altid brug for en overflade at klæbe sig til for at begynde at dannes, og her kommer aerosolerne i spil. Når en aerosolpartikel er i stand til at tiltrække vand (det kaldes på fagsprog hygroskopisk), kan den fungere som en skykondensationskerne, der tillader fugt at samle sig omkring den og danne skydråber. Jo flere af sådanne vand-tiltrækkende aerosoler, der er til stede, desto flere små skydråber dannes der.

sætning, størrelse og evne til at reflektere eller absorbere lys. Nogle aerosoler bidrager til afkøling, mens andre forårsager opvarmning.

Afkølede aerosoler spredde sollys og øger Jordens samlede

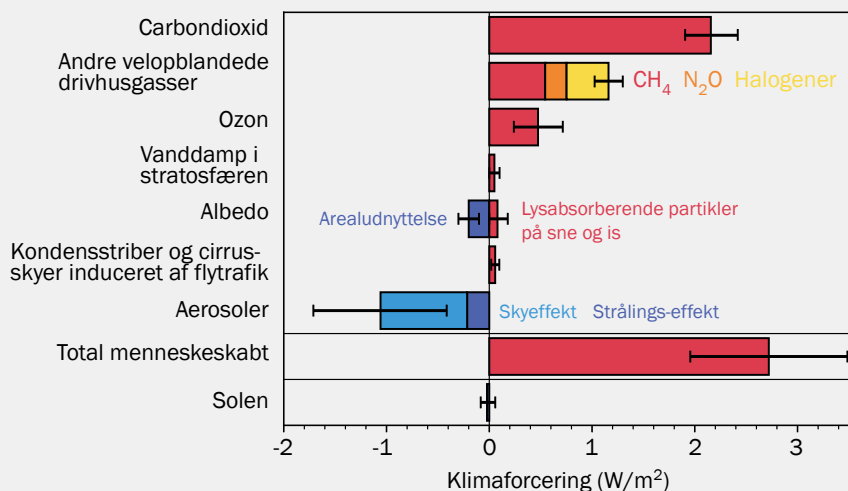


Skematisk illustration af de mange måder, aerosoler kan påvirke skyerne og dermed klimaet på. På figuren repræsenterer de rette linjer med pil indkommende og reflekteret stråling fra Solen, mens de bølgede pile repræsenterer langbølget stråling (varmestråling) fra Jorden. Kilde: IPCC AR4/ Haywood and Boucher (2000).

Klimaforcing, klimafølsomhed og klimafeedbacks

Klimaet på Jorden styres af en fin balance mellem den energi, vi modtager fra Solen, og den energi, som stråler tilbage til rummet. Når noget ændrer denne balance – for eksempel øgede mængder af drivhusgasser eller aerosoler – taler vi om *klimaforcing*. Klimaforcing måles konkret i Watt per kvadratmeter (W/m^2). Positiv klimaforcing betyder, at Jorden optager mere energi, hvilket fører til opvarmning, mens negativ klimaforcing har en kølende effekt.

Men hvor meget varmere bliver det egentlig ved en given positiv klimaforcing? Det afhænger af *klimafølsomheden*, som angiver, hvor meget den globale temperatur (målt i grader Celsius) vil stige som resultat af en vis klimaforcing. Her spiller *klimafeedbacks* en stor rolle. Nogle feedbacks, som mere vanddamp i atmosfæren eller smeltende is, forstærker opvarmningen, mens andre, som øget skydække, kan modvirke den.



Klimaforcingen fordelt på forskellige stoffer og processer samlet set siden 1750 og frem til 2019. Det største opvarmende bidrag kommer fra CO_2 , mens det største negative bidrag kommer fra aerosoler – navnlig aerosol-sky-samspillet gennem den indirekte aerosoleffekt. Det ses også, at den klart største usikkerhed i vores vurdering af det totale bidrag kommer fra aerosolerne (og samspillet med skyer), illustreret ved de vandrette sorte streger. Kilde: IPCC AR6.

Forståelsen af disse mekanismer er afgørende for at forudsige fremtidens klima. Små ændringer i klimaforcing kan føre til store

temperaturændringer over tid, hvilket gør det vigtigt at handle på menneskeskabte påvirkninger, før vi krydser kritiske grænser.

Det har to vigtige konsekvenser for klimaet.

For det første øger en høj koncentration af skykondensationskerner antallet af små skydråber, og det gør skyerne lysere og mere reflekterende. Disse skyer sender mere sollys tilbage ud i rummet, og det giver en afkølede effekt, ligesom sulfat-aerosoler gør.

For det andet påvirker aerosoler skyernes levetid. Skyer med mange små dråber danner ikke så let regndråber, hvilket betyder, at de varer længere, og dermed forlænger deres afkølede virkning. Omvendt, hvis der er færre skykondensationskerner i atmosfæren, vil skyerne bestå af færre men større dråber, hvilket gør dem mørkere og mere tilbøjelige til at producere regn. Dette samspil mellem aerosoler og skyer gør det vanskeligt at forudsige deres samlede klimateffekt.

Nogle typer af aerosoler kan ovenikøbet bidrage til dannelsen af iskrystaller i højtliggende skyer, hvilket kan have en opvarmende effekt, da de bidrager til drivhuseffekten. Gennem de høje, tynde isskyer påvirker den indirekte aerosoleffekt derfor klimaet på en måde, der er modsat af skyer med flydende vanddråber. I stedet for at reflektere sollys og køle planeten, har de en tendens til at holde på varmen. Modsat, når vandskyer indeholder flere aerosoler, bliver de lysere og virker afkølede.

Skyernes evne til enten at afkøle eller opvarme afhænger derfor af sammensætningen af forskellige aerosoler, af de atmosfæriske forhold og af regionale forskelle. Fordi den indirekte aerosoleffekt kan drive både opvarmning og afkøling, er det meget komplekst og svært at sætte præcise tal på deres påvirkning. Det gør dem faktisk til en af de største usikkerheder i klimamo-

deller og et aktivt forskningsområde indenfor klimavidenskaben.

Klimaforandringer og fremtidens udledninger

Siden industrialiseringen er enorme mængder drivhusgasser som CO_2 og metan blevet udledt til atmosfæren, men samtidig er også store mængder aerosoler og forurenende gasser blevet sluppet ud. Disse partikler har haft betydelige sundhedsmæssige konsekvenser, da langvarig eksponering for luftforurening kan forkorte menneskers levetid – især i storbyer med høj forurening.

Udover at aerosoler er skadelige for helbredet, har mange af dem som beskrevet også en afkølede effekt på klimaet. Det har skabt en kompleks situation, hvor bekæmpelse af luftforurening utilsigtet kan forværre den globale opvarmning.

Forskning viser ifølge den seneste rapport fra FN's Klimapanel (IPCC



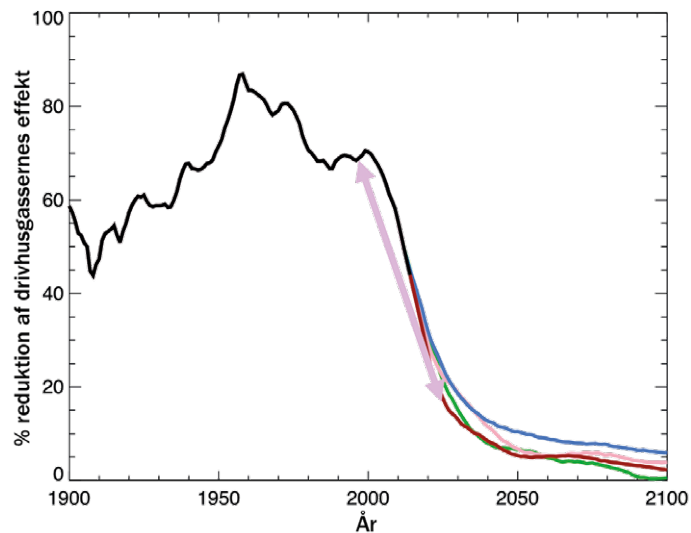
Fotoet viser en ballon til aerosolmålinger i højden samt en stationær målestation ved Villum Research Station i Nordgrønland i forbindelse med feltkampagnen CleanCloud Arctic Spring i 2024. Foto: Lionel Favre (EPFL).

AR6), at menneskeskabte aerosoler delvist har skjult eller mindsket opvarmningen fra drivhusgasser som CO₂ gennem det seneste århundrede. I takt med at vi i midten af 1900-tallet begyndte at erkende de skadelige sundhedseffekter af aerosoler og siden har reduceret partikeludledningen af hensyn til folkesundheden – for eksempel ved at rense industriudledninger – er den afkølede effekt af aerosolerne aftaget. Og det har medført en accelereret temperaturstigning.

Hvis vi i fremtiden kun fokuserer på at reducere aerosoler uden samtidig at reducere drivhusgasudledningen, kan vi derfor risikere en hurtigere global opvarmning. Det understreger blot nødvendigheden af samtidig at sætte turbo på reduktionen af drivhusgasserne for at ramme en balance mellem forbedret luftkvalitet og klimastabilisering.

Naturlige udledninger

Naturlige udledninger af aerosoler kommer fra forskellige kilder som ørkener, vulkaner og bølgesprøjt på havene. Disse udledninger kan ændre sig afhængigt af klimaet. Forskere bruger avancerede klimamodeller til at forudsige disse ændringer. En stor samling af klimamodelkørsler, kendt som



Aerosoler har tidligere hjulpet med at modvirke noget af den opvarmning, som drivhusgasser skaber. I 1960-1980 kunne de reducere op til 80 % af drivhusgassernes effekt, men i dag er det tal faldet (lyslilla pil) til omkring 20 %. Når vi begrænser luftforurening og udleder færre aerosoler, mister vi deres kølende virkning, og den globale opvarmning går hurtigere. Ved slutningen af dette århundrede forventes aerosoler kun at modvirke mellem 0 og 20 % af drivhusgassernes effekt, afhængig af hvordan udledningerne udvikler sig (forskellige farvede kurver). Kilde: Modificeret fra Bauer et al. (2022).

Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6), viser, at naturlige udledninger af for eksempel støv kan variere meget mellem de mulige klimafremtider. Afhængig af klimascenariet, kan det variere mellem en lille reduktion og en betydelig stigning.

For eksempel lader udledninger af støv fra ørkener i Nordafrika,

som Sahara, til at øges på grund af mindre regn og stærkere vinde. Omvendt kan udledninger fra ørkener i Asien, som Taklimakan og Gobi, falde på grund af forventet mere regn og svagere vinde. I USA kan områder som de sydlige Great Plains og sydvestlige områder opleve flere støvstorme i fremtiden på grund af mindre nedbør og stærkere vinde.

Denne artikel udspringer af et projekt under Klimastøtten/Energistyrelsen.

Det europæiske forskningsprojekt CleanCloud er støttet af EU's Horizon Europe Programme.

Videre læsning

Bauer, S. et al (2022): The Turning Point of the Aerosol Era. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 14, e2022MS003070. doi.org/10.1029/2022MS003070

IPCC AR 4, kap 2: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing.

IPCC AR 6, kap 7: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity

Om iClimate: iclimate.au.dk

Disse naturlige ændringer i aerosoludledninger er vigtige at forstå, fordi de kan påvirke både klimaet og luftkvaliteten. Ved at studere disse ændringer gennem klimamodeller kan forskere bedre forudsige fremtidige klimaforandringer og finde måder at tilpasse sig dem på.

Stadig store usikkerheder i aerosolernes effekt

Omkring 80% af usikkerheden i de ændringer i energibalancen, der har drevet de hidtidige klimaændringer (kaldet klimaforcing – se faktaboks) skyldes aerosoler og deres komplekse samspil med skyer. Det skyldes, at aerosoler påvirker både solindstråling og skydannelse på måder, der er svære at kvantificere præcist. Direkte påvirker aerosoler klimaet ved at reflektere eller absorbere sollys, hvor sulfat-aerosoler har en kølende effekt, mens sod bidrager til opvarmning. Deres indirekte effekter opstår gennem skydannelse, hvor aerosoler fungerer som skykondensationskerner, hvilket ændrer skyernes refleksions- og levetid og evne til at danne nedbør.

Denne kompleksitet gør det svært at vurdere, hvordan aerosoler samlet set påvirker klimaet over tid. Samtidig varierer aerosoleffekter regionalt, hvilket komplicerer klimamodellernes evne til at give præcise forudsigelser. Vi forskere arbejder derfor på at forbedre vores forståelse af aerosolernes rolle i klimaforandringer, da en bedre beskrivelse af deres effekter er afgørende for at forudsige fremtidens klimaudvikling.

På Aarhus Universitet bruger vi avancerede klimamodeller til at undersøge, hvordan aerosoler og skydannelse påvirker klimaet – både globalt og regionalt. Disse processer er komplekse, og en af de største usikkerheder i klimamodeller er netop, hvordan aerosoler dannes i atmosfæren. Processen involverer en lang række kemiske reaktioner og interaktioner, som endnu ikke er fuldt ud forstået, og selv små ændringer i modellernes antagelser kan have stor betydning for forudsigelserne af skydannelse og dens effekt på klimaet. For at reducere denne usikkerhed ser vi blandt andet på naturlige kilder

til aerosoler. Desuden udsender mikroorganismer flygtige organiske forbindelser – det vil sige stoffer, der let fordampes – og her er en af de vigtigste isopren, som planter og alger producerer, og som kan føre til dannelsen af nye partikler i luften. Vi undersøger også, hvordan biologiske partikler som bakterier, svampesporer og pollen spredes og påvirker skydannelse og klimaet.

For at sikre at vores modeller giver pålidelige resultater, tester vi dem løbende ved at sammenligne deres output med virkelige data – blandt andet aerosolprøver fra feltmålinger og satellitobservationer af skyer og atmosfæriske forhold. Takket være teknologiske fremskridt kan vi i dag lave mere avancerede simuleringer, hvor vi fanger flere detaljer og opnår større præcision. Dette arbejde er en central del af det europæiske forskningsprojekt CleanCloud, som vi leder. Her kombinerer vi feltmålinger, laboratoriestudier og modeludvikling for at opnå en bedre forståelse af, hvordan aerosoler og skyer interagerer, og hvad det betyder for klimaet. ■

Læs Naturvidenskabelig Bachelor

Fordyb dig i medicinal biologi, molekylær biologi, matematik, fysik, kemi eller miljøbiologi. Du kan f.eks. arbejde med at undersøge miljøskadelige stoffer i havet, bedre diagnosticering og behandling af sygdomme, antibiotikaresistente bakterier, plastforurening eller måske er du bare nysgerrig på hvordan man udvikler nye naturvidenskabelige metoder og teorier?

Arbejd på tværs af naturvidenskabelige felter.

Arbejd med topforskere i moderne laboratorier.

Uddannelsen kan tages på både dansk og på engelsk, hvor studiemiljøet er mere internationalt.

Læs mere her:

