

Lidt om vulkaners klimaeffekter - og global opvarmning



Pinatubo i udbrud i 2005. (Copyright: The USGS/Cascades Volcano Observatory)

Af professor i meteorologi Eigil Kaas, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Vulkaner har til alle tider haft stor betydning for Jordens klima. Afhængigt af hvilken tidshorisont man taler om, er effekten dog meget forskellig. På korte tidsskalaer, som vi primært skal se på i denne artikel, ses en global afkøling i op til flere år efter visse store vulkanudbrud. På længere geologiske tidsskalaer kan man tværtimod sige, at vulkaner virker modsat, fordi de i det lange løb er med til at frigive drivhusgassen CO₂ til atmosfæren.

Jordens energibalancer og energistrømme

Det gennemsnitlige klima ved Jordens overflade bestemmes især af den samlede absorberede mængde sollys og af styrken af drivhuseffekten.

Den absorberede solstråling

Vores planet opvarmes af sollys, som absorberes i oceanerne, på landjorden og i atmosfæren. Planetens såkaldte albedo er

omkring 0,31. Det vil sige, at ca. 31 % af den stråling, der fra solen når ud til Jorden, kastes tilbage til verdensrummet, medens resten, altså ca. 69 % absorberes. Hvis den samlede mængde solstråling, som når Jorden, tiltager, og/eller den planetære albedo aftager, vil der absorberes mere sollys, hvilket normalt vil føre til globale temperaturstigninger. De vigtigste mekanismer, der kan ændre Jordens albedo, er ændringer i overfladens farve, ændringer i skydækket og ændringer i atmosfærens indhold af små partikler, såkaldte aerosoler:

- En mere hvid overflade pga. fx forøget sne- og isdække vil føre til øget refleksion af sollys.
- Flere lave og tætte skyer i atmosfæren vil generelt føre til forøget albedo og dermed en afkøling af planeten, fordi solens stråler reflekteres i de lavtliggende skyer.
- Små partikler, især såkaldte sulfat-aerosoler, kan i sig selv reflektere en del af sollyset. Det er netop vulkanske sulfat-aerosoler, som via eksplosive udbrud er sendt op i stratosfæren (ca. 12 – 30 km's højde), der er vigtige i forbindelse med vulkaners afkølede klimaeffekt. Flere sulfataerosoler i den nedre del af atmosfæren – troposfæren – kan udover den forøgede refleksion af sol-

lys desuden medvirke som kondensationspartikler for vanddamp og således øge skyernes hvidhed og levetid. Menneskeskabte troposfæriske sulfat-aerosoler giver på denne måde et betydeligt afkølede bidrag til vores planet.

Den balancerende infrarøde udstråling

Jorden slipper af med den absorberede solenergi ved at udstråle infrarød stråling ("sortlegemestråling"). I gennemsnit over lang tid udstråles stort set lige så meget energi, som der modtages i form af absorberet solstråling. For sortlegemestråling gælder Stefan-Boltzmann's lov, der siger, at den samlede udstrålede energi per kvadratmeter integreret over alle bølgelængder afhænger af legemets (fx jordoverfladens) absolutte temperatur i fjerde potens:

$$E = \sigma T^4, \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

De fleste legemer er ikke såkaldt perfekte sorte legemer, og de kan derfor ikke udstråle den fulde sortlegemestråling svarende til deres temperatur. Groft set kan man dog regne med, at jordoverfladen er tæt på at være et sort legeme. Da man kender den samlede solstråling og albedoen, kan man lave en meget simpel klimamodel for Jordens

overfladetemperatur ved at antage, at sortlegemestrålingen fra overfladen alene skulle balancere al den indkommende solstråling. Resultatet af denne simple beregning er ca. -19 °C, hvilket jo er langt under de ca. 15 °C, der i gennemsnit er på Jordens overflade. Da den simple energibalanceberegning giver et så forkeret bud på, hvad Jordens overfladetemperatur er, må der være en meget effektiv mekanisme, der ikke er medtaget, som kan holde på varmen. Denne mekanisme er drivhuseffekten.

Drivhuseffekten

Drivhuseffekten er helt afgørende for, at den form for liv, vi kender i dag, kan eksistere på Jorden. Effektivt set virker drivhusgasserne og – især højtliggende – skyer som en slags isolerende lag, der holder på varmen i atmosfæren, oceanerne og jordoverfladen. Temperaturen ved jordoverfladen bliver ifølge den simple energibalancebetragtning ovenfor ca. 34 °C højere, end den ville være uden atmosfærens tilstedeværelse. De vigtigste drivhusgasser er vanddamp (H₂O), kuldioxid (CO₂), metan (CH₄), lattergas (N₂O), CFC-gasser (freongasser) og ozon (O₃).

Alle naturlige og menneskeskabte variationer i atmosfærens indhold af CO₂ vil – alt andet lige – føre til væsentlige variationer i Jordens klima pga. af dette molekyles bidrag til drivhuseffekten. En række feedbackmekanismer – dvs. selvforstærkende processer – medfører, at variationerne bliver større, end man umiddelbart skulle forvente. Fx er atmosfærens indhold af vanddamp stærkt afhængigt af temperaturen (atmosfæren kan indeholde knapt 7 % mere vanddamp for hver grads temperaturstigning). Dette giver en feedback, idet en opvarmning som følge af fx et forøget CO₂-indhold i atmosfæren vil medføre, at der kommer mere vanddamp og dermed, at drivhuseffekten tiltager yderligere.

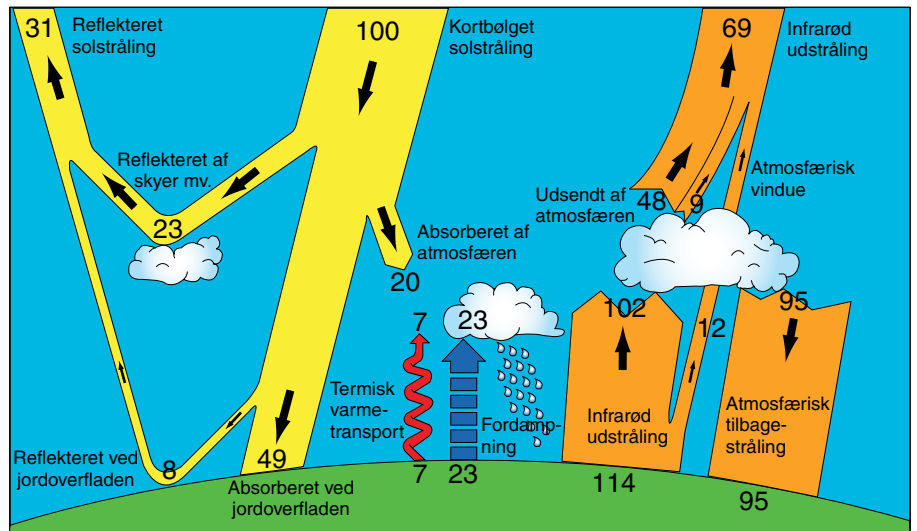
Vulkaner og klima

Vulkanudbrud er særdeles vigtige medspillere i Jordens "naturlige" klimavariationer, og de virker tilmed på to fronter.

Vulkaners opvarmende effekt

Variationer i atmosfærens indhold af CO₂ har altid været en vigtig – og ofte helt afgørende – faktor i forbindelse med globale klimavariationer. Dette skyldes det fundamentale og særdeles velforståede bidrag til drivhuseffekten fra CO₂. På geologiske tidskalaer indgår vulkaner som et led i det globale kulstofkredsløb og dermed i planetens klima, idet der ved vulkanudbrud frigives CO₂ fra dybtliggende geologiske lagre til atmosfæren og dermed også oceanerne. I øjeblikket vurderes det, at der på denne måde tilføres (uddunstes) omkring 0,1 milliarder ton (Gt) kulstof til atmosfæren hvert år.

Den vulkanske uddunstning skal sammenholdes med, at de menneskeskabte ud-



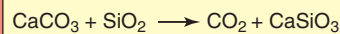
Et af de nyeste estimater af energistrømme i procent for hele planeten. 100 % svarer til den gennemsnitlige indkomne solstråling på 342 W/m² hen over døgnet og hen over året ved toppen af Jordens atmosfære. Der er faktisk en igangværende global opvarmning med netto tilførsel af energi til planeten. Denne ubalance er dog så relativt lille, at den ikke er medtaget i figuren. (Grafik: Artiklen, som denne figur er baseret på, er af Kiehl og Trenberth (1997))

slip gennem afbrænding af fossile brændsler p.t. er på omkring 6,4 Gt kulstof per år. Man kan derfor sige, at vi mennesker kortsletter kulstoffets kredsløb ved pludseligt at

flytte meget store mængder kulstof til de i geologisk sammenhæng hurtigt koblede lagre af kulstof i atmosfære, oceaner og de øvre jordlag (herunder biomassen på land

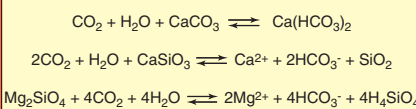
Lidt om kulstoffets kredsløb

Over lange tidshorisonter, dvs. millioner af år, er den grundlæggende kilde til kuldioxid en magmatisk omdannelse af kalk og kvartsholdige aflejringer til silikatbjergarter, fx.



Dette sker under højt tryk og temperatur. CO₂ på højre side uddunstes i forbindelse med vulkansk aktivitet. Når man ser hen over mange millioner år, virker vulkansk aktivitet således isoleret set opvarmende på planetens klima.

Den opmærksomme læser vil naturligvis spørge, hvordan den dybtliggende kalk og kvarts på venstre side af processen ovenfor er dannet. Dette er sket via en langsom forvitring af kalk og silikatbjergarter. På simplificeret form omfatter dette bl.a. ligevægtene:



Ligevægtene forskydes mod højre (dvs. kalk- og silikatbjergarter nedbrydes),

når der er meget CO₂ og vand i luften og jorden. Processerne påvirkes også af temperaturen. Forvitringsprodukterne på højre side føres med floderne ud i havet, hvor de – evt. via biologisk aktivitet – sedimenteres. Forvitring virker generelt som en meget langsomt virkende og stabiliserende klimamekanisme: Jo mere CO₂ i luften (på venstre side), jo varmere og jo mere vand (nedbør og skyer), hvilket medfører hurtigere forvitring, end når klimaet er køligere med mindre nedbør: Altså øget fjernelse af kulstof fra atmosfæren (og dermed oceanerne) til de geologiske lagre, når klimaet er varmt.

Der oplagres også kulstof i geologiske lagre gennem ophobning og sedimentering af organisk materiale. Den mængde kulstof, der på denne måde er bundet i kul, olie og gas, er dog meget lille i sammenligning med den samlede mængde kulstof. Lige nu har den dog stor betydning, fordi afbrændingen af fossile brændsler på ekstrem kort tid, geologisk set, medfører overførsel af store mængder kulstof til de øvre sammenkoblede kulstoflagre (atmosfæren, oceanerne og de øverste jordlag).

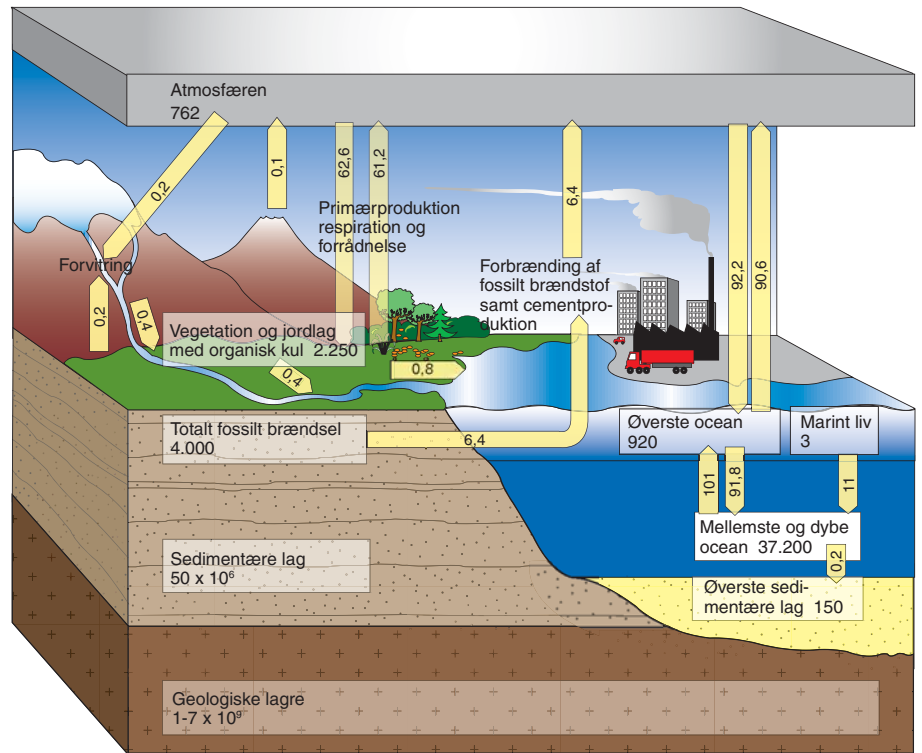
og i havet). Selv om afbrænding af fossilt brændsel er en anden kemisk proces end uddunstningen af CO₂ fra vulkaner, kan man dog godt tillade sig at sige, at den industrielle revolution har været og er et meget stort og spændende eksperiment, også set med geologiske briller (se evt. debatindlægget af Klaus Petersen i GeologiskNyt 6/06)

Vulkaners afkølede effekt

Visse eksplosive vulkaner udspyr store mængder svovlholdigt materiale helt op i stratosfæren. (Heroppe kan partiklerne blive hængende i lang tid, nogle gange i flere år. Disse sulfat-aerosoler kan – ligesom sulfat-aerosoler nærmere jordoverfladen – reflektere noget af Solens stråling tilbage til verdensrummet, så den ikke kan nå ned og opvarme jorden. Vulkaner virker dermed generelt afkølede på Jordens klima og i særdeleshed på klimaet nede ved jordoverfladen og i troposfæren (fra overfladen op til stratosfærens begyndelse). Oppe i det stratosfæriske lag med vulkanske aerosoler er der en yderligere effekt: Her sker der ud over refleksionen også en vis absorption af solenergien i aerosolerne og dermed en lokal opvarmning af stratosfæren.

Den opvarmede stratosfære giver et indirekte opvarmende vulkanbidrag til temperaturen nær jordoverfladen, idet der udstråles lidt mere infrarød stråling end normalt nedad mod troposfæren og overfladen. Dette er dog langt fra nok til at opveje den formindskede mængde solstråling.

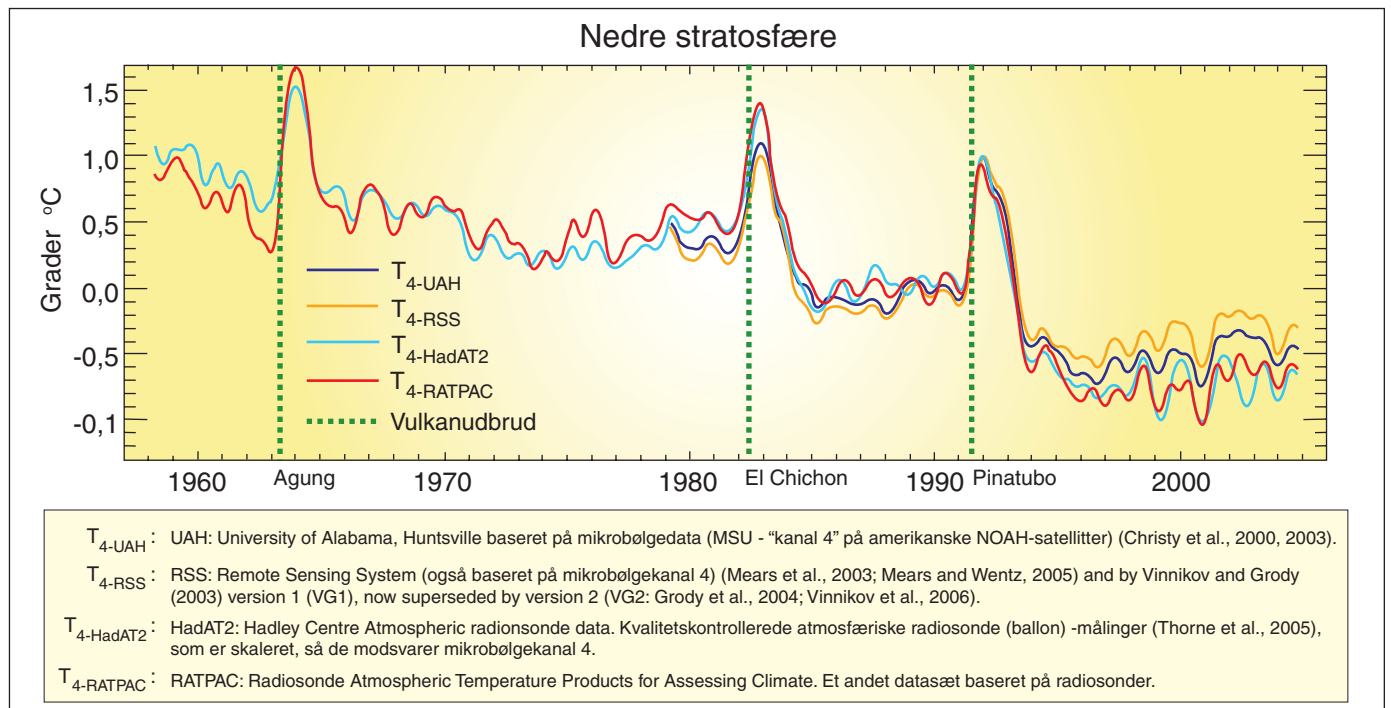
Ikke alle vulkaner har samme klimatiske betydning. Selv om mange vil huske eller



Det "aktuelle" globale kulstofkredsløb udtrykt i lagre (enhed Gt kulstof) og i overførsler mellem lagre (enhed Gt kulstof per år). Uddunstningen fra vulkansk aktivitet (ca. 0,1 Gt/år) skal ses som et estimeret gennemsnit over mange århundreder, medens de øvrige pile modsvare estimer af aktuelle overførsler. Fra atmosfæren fjernes gennem forvitring af bjergarter omkring 0,2 Gt kulstof per år. (Grafik: UVH modificeret efter forfatterens udlæg)

har hørt om Mount St. Helens eksplosive udbrud 1980 i USA, havde dette udbrud kun

begrænset klimatisk indflydelse i forhold til fx. udbruddet af El Chichon i 1982 og



Vulkanske sulfataerosoler virker generelt afkølede på klimaet nær ved jordoverfladen; men de giver et opvarmende bidrag i stratosfæren. Dette skyldes, at aerosolerne ud over at reflektere sollys også absorberer en lille del af sollyset, hvilket opvarmer stratosfæren. Figuren viser forskellige typer målinger af temperaturen i den nedre del af stratosfæren (omkring 15-30 km's højde). Den generelt aftagende trend skyldes tiltagende drivhuseffekt fra CO₂ i kombination med udtynding af ozon-laget. De tre viste vulkaner er Agung, El Chichon og Pinatubo. (Grafik: UVH modificeret efter figur i IPCC-rapporten)

Pinatubo i 1991. Dette skyldes at de to sidste udspyede store mængder sulfat (SO_2) til stratosfæren, mens dette ikke var tilfældet for St. Helens. Det er således helt afgørende, hvilken kemisk sammensætning materialet, der når helt op i stratosfæren, har.

Den bedste og mest nøjagtige metode, man har til at vurdere den relative klimaefekt af tidligere tiders vulkanudbrud, er at se på surhedsgraden af borekerner i gletschere og iskapper. Er der nogle islag, hvor isen er relativt sur pga. forøget indhold af svovlsyre (H_2SO_4), er det tegn på, at der har været et klimapåvirkende vulkanudbrud. Svovlsyren dannes helt automatisk, når sulfat-aerosoler fra stratosfæren "drysser" ned i troposfæren og virker som kondensationspartikler for skyer eller direkte vaskes ud af atmosfærens nedbør.

Isoleret set er den afkølede effekt af vulkanske aerosoler naturligvis størst i tropenerne, hvor der er mest sollys, som kan reflekteres; men vulkanske aerosoler på højere breddegrader har bestemt også betydning i sommerhalvåret. Forekommer der meget sure lag i isborekerner fra flere steder på kloden (fx både i Grønland, i Peru og i Antarktis) dateret til samme tid, er det tegn på, at der umiddelbart før det pågældende tidspunkt har været et meget kraftigt udbrud med betydeligt afkølede virkning. Dette skyldes, at sulfat-aerosoler fra meget kraftige udbrud – især i de tropiske egne – kan føres med den stratosfæriske cirkulation til højere breddegrader på begge halvkugler og dermed få effekt ikke kun i tropenerne, men på hele kloden.

Året uden sommer

Vulkaners afkølede effekt har været sær-

Landsat-billede af Lake Toba – den vandfyldte caldera, som primært er opstået i forbindelse med vulkanen Tobas udbrud for ca. 71.500 år siden, men senere modificeret af mindre udbrud. Søen er ca. 100 km lang. (Copyright: NASA)



deles mærkbar på menneskets aktiviteter. I starten af 1800-tallet var der flere kraftige udbrud, som medvirkede til, at netop denne periode formentlig blev noget af det koldeste siden sidste istids afslutning. Det største udbrud på vores planet i nyere tid var ubetinget Tamboras udbrud på øen Sumbawa i Indonesien. Det fandt sted i april 1815. Det skønnes, at der blev udslyngt omkring 150 kubikkilometer aske og pimpsten, og at klodens gennemsnitstemperatur blev sænket mærkbart det følgende år. 1816 blev således kendt som "året uden sommer" i både Europa og Nordamerika. Blandt andet faldt der sne i London i august måned. Katastrofen krævede formentlig mere end 90.000 dødsopfre i Indonesien, primært på grund af hungersnød, fordi afgrøderne blev ødelagt på øerne Sumbawa og Lombok. Hertil kommer et ukendt antal ofre i resten af verden som følge af misvækst og kuldebetingede epidemier.

Supervulkaner

Ekstreme vulkanudbrud er i en BBC udsendelse blevet opkaldt supervulkaner, men betegnelsen bruges nu også nogle gange i den videnskabelige litteratur. Det seneste rigtigt store udbrud (Toba) fandt sted for godt 70.000 år siden på Sumatra. Toba var måske det største vulkanudbrud på Jorden i de seneste 2 millioner år.

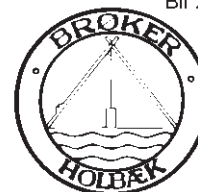
Selv om mindre kan gøre det, ville et udbrud af Tobas størrelse formentlig give pludselig global afkøling, der måske varer

BRØNDBORINGSFIRMAET BRØKER I.S.

Kontor og værksted: Telefon 59 44 04 06
Spånnebæk 7, 4300 Holbæk.
Fax 59 44 69 00

Thomas Brøker, privat 59 44 08 71
Bil 21 42 38 71

Henrik Brøker, privat 59 43 09 94
Bil 23 34 77 01



VORT SPECIALE ER:

BRØNDBORING, rotations- og tørboring.

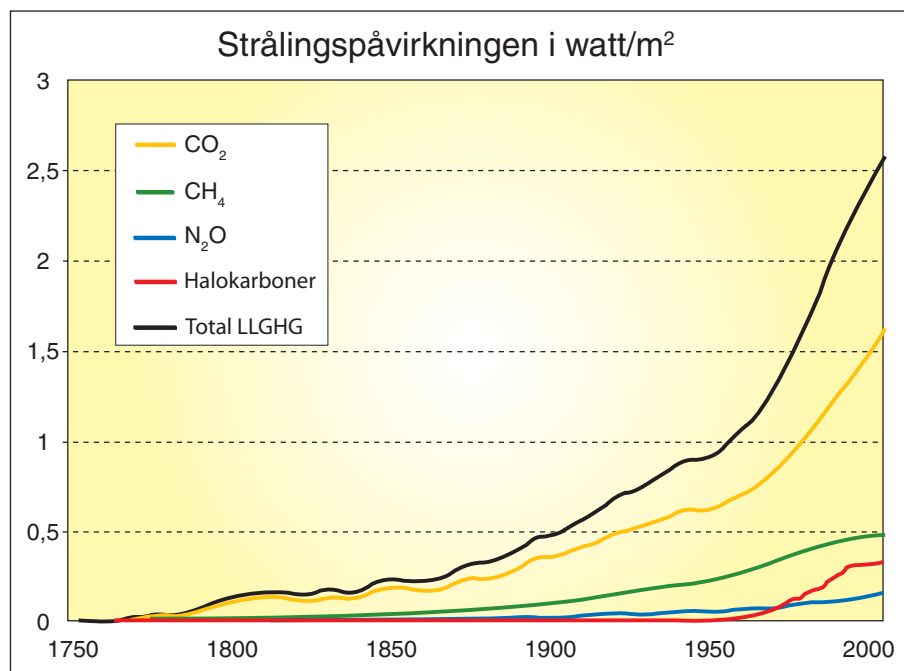
MILJØBORING, hulsneglsboring med kærneprøveudtagning.

REGENERERING af borer.

PRØVEPUMPNING af borer og kildepladsundersøgelser med avanceret elektronisk udstyr og EDB-behandling.

Vi forhandler GRUNDFOS pumper og vort veludstyrede værksted renoverer Grundfos' vandværkspumper.

Vi leverer og monterer underjordiske GLASFIBERPUMPEBRØNDE af eget fabrikat med udstyr i rustfrit stål tilpasset de aktuelle dimensioner.



Strålingspåvirkningen i watt/m² i perioden fra 1750 og frem til 2003 for forskellige drivhusgasser. Kurven er baseret på beregninger ud fra koncentrationer og kendt strålingsfysik. LLGHG er summen af drivhusgasser. (Grafik: UVH modificeret efterfigur i IPCC-rapporten)

i århundreder. Toba menes således at have haft så alvorlige globale konsekvenser, at det har været en alvorlig trussel for mange dyrearter og økosystemer. Måske var det årsagen til, at vore forfædre kan have været tæt på at uddø for omkring 70.000 år siden.

Vulkaner og klimaudvikling i det 20. årh.

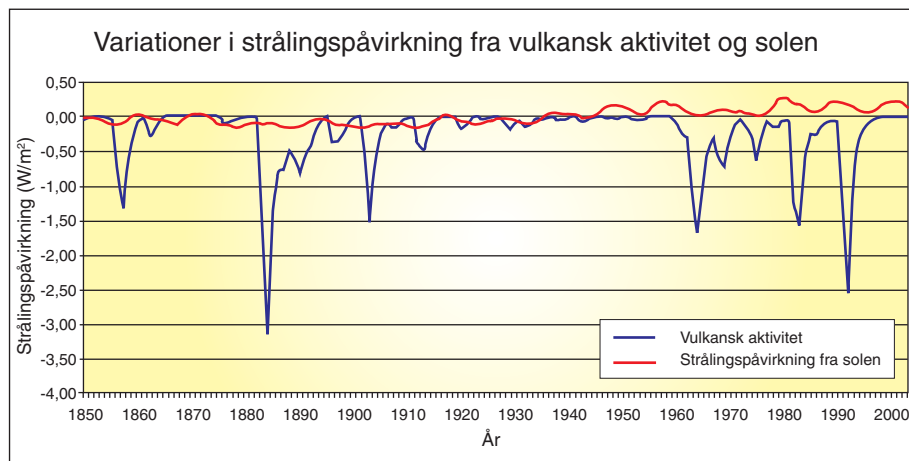
Menneskets afbrænding af fossilt brændsel (kul, olie og gas) betyder, at de naturlige balancer mellem atmosfærens, landmassernes og oceanernes kulstofindhold forskubbes. Océaner og landmasser kan i øjeblikket kun følge med til at "opsuge" omkring halvdelen af de knapt 7 milliarder tons kulstof, vi mennesker slipper ud i atmosfæren hvert år. Derfor stiger atmosfærens indhold af CO₂ ekstremt hurtigt for tiden – også set i geologisk sammenhæng. I slutningen af sidste istid lå koncentrationen nede omkring 190 ppm, dvs. der var 190 CO₂-molekyler pr. million luftmolekyler. Derefter har koncentrationen ligget ganske stabilt omkring 260-280 ppm igennem Holocæn, vores nuværende mellemistid. Siden starten af 1800-tallet begyndte koncentrationen at stige, og den ligger i dag på ca. 380 ppm, hvilket med stor sandsynlighed er den højeste koncentration i de seneste 2 millioner år, dvs. langt højere end i nogen anden mellemistid. Det er uden for enhver rimelig tvivl, at den seneste ekstremt hurtige stigning er menneskeskabt. Det samme kan siges om atmosfærens indhold af en anden vigtig drivhusgas, metan, der er steget fra omkring 750 ppb (dvs. 750 CH₄-molekyler pr. milliard luftmolekyler) til nu omkring 1.800 ppb. Dog ser metan-koncentrationen i disse år ud til at være stabiliseret.

Der er også andre drivhusgasser, hvis koncentration er steget som følge af menneskets aktiviteter. Desuden påvirker mennesket, som nævnt ovenfor, klimaet gennem udsendelse af forskellige partikler, hvoraf nogle, især sulfat, virker afkølede. Sodpartikler virker derimod generelt opvarmende, fordi de absorberer sollys. Den samlede effekt af menneskeskabte partikler er næsten helt sikkert afkølede.

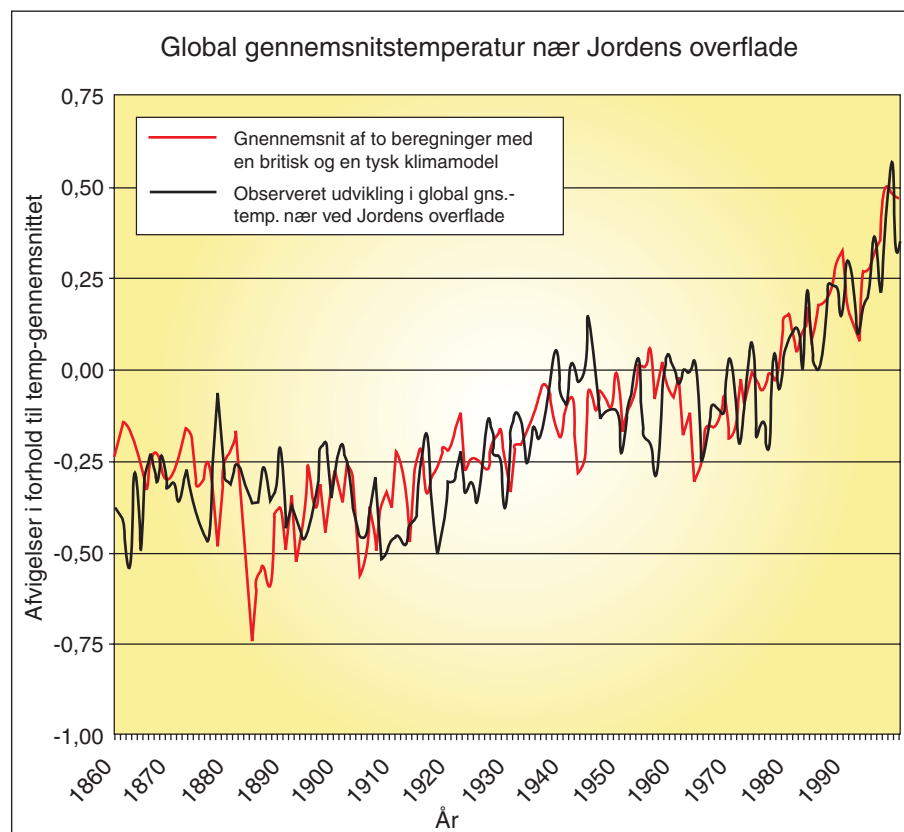
Det er dog ikke kun mennesket, der har haft indflydelse på klimaudviklingen i de seneste ca. 150 år. Både varierende solaktivitet og vulkansk aktivitet har også givet anledning til perioder med opvarmning og afkøling.

For at vurdere den energimæssige effekt af forskellige klimapåvirkninger, opererer man med begrebet strålingspåvirkning, der er den netto-energitilførsel – eller tab – udtrykt i W/m², som planeten oplever, hvis solindstrålingen eller mængden af drivhusgasser pludselig ændres.

Man kan benytte klimamodeller til at simulere klimavariationerne som følge af de varierende strålingspåvirkninger fx. hen gennem de seneste 150 år. I klimamodeller løses mange billioner matematiske ligninger, som beskriver de fysiske love, der sty-



Figuren viser estimerede variationer i strålingspåvirkning fra solen (rød kurve) og fra vulkansk aktivitet (blå kurve) i perioden 1850 – 2004, som typisk benyttes i klimamodeller, der simulerer klimaudviklingen i de seneste 150 år. Den store, men relativt kortvarige afkølede effekt fra vulkanudbrud ses tydeligt (Krakatau (1883), Santa Maria (1902), Agung (1963), El Chichon 1982, Pinatubo 1991)). Vulkanpåvirkningen er beregnet ved at kombinere strålingsfysik og viden fra nyere satellitobservationer med mængden af svovlsyre i isborekerne flere steder på Jorden. Bemærk at kurven for solpåvirkning kun medtager den direkte effekt af variationer i strålingsenergien fra solen. En mindre, relativt velforstået, indirekte effekt, der skyldes solens påvirkning af stratosfærens ozonlag er ikke medtaget. Kurven inkluderer heller ikke en mulig indirekte soleffekt fra variationer i kosmisk stråling. (Grafik: UVH modificeret efter forfatteren)



Observeret udvikling i global gennemsnitstemperatur nær ved Jordens overflade (sort kurve) samt i gennemsnittet af to beregninger med en britisk og en tysk klimamodel (rød kurve). Y-aksen viser afvigelser i forhold til temperatur-gennemsnittet i perioden 1961-1990. Begge modeller er blevet påvirket med variationer i estimeret vulkansk aktivitet, solens udstråling, koncentrationer af drivhusgasser samt udslip af aerosoler og kemiske stoffer, der kan danne aerosoler. Det ses, at modellerne i rimelig grad er i stand til at simulere den observerede temperaturudvikling bortset fra, at de tilsyneladende overvurderer betydningen af vulkanen Krakatau i 1883. Både effekten af Agung (1963) og Pinatubo (1991) kan ses i observationer og modelberegninger, medens El Chichon kun ses i modellerne. Det sidste skyldes formentlig, at der i 1983 tilfældigvis var en kraftig El Niño-begivenhed, der gav høje observerede temperaturer, hvilket modvirkede effekten af El Chichon. (Grafik: UVH modificeret efter forfatteren)

rer atmosfærens og oceanernes strømninger samt relevante love og processer vedrørende energi- og hydrologiske forhold. Desuden indgår ligninger for temperatur og vandforhold i de øverste meter af jorden.

Teoretiske overvejelser og beregninger med klimamodeller har gjort, at man i dag med betydelig sikkerhed kan sige noget om årsagerne til de seneste ca. 150 års klimavariationer. Og her spiller vulkaner en væsentlig rolle.

Den globale temperaturstigning i første halvdel af 1900-tallet skyldes sandsynligvis en kombination af aftagende vulkansk aktivitet, tiltagende menneskeskabt drivhuseffekt, tiltagende indstråling fra Solen og ændringer i varmetransporten i Atlanterhavet. De tre første effekter har i denne periode givet et relativt jævnt stigende bidrag til den globale opvarmning. Ændringer i varmetransporten i Atlanterhavet har formentlig været en vigtig årsag til en særligt stærk temperaturstigning i de polare egne på den nordlige halvkugle frem til omkring 1940.

I de seneste ca. 30 år er det meget sandsynligt, at langt hovedparten af den globale temperaturstigning skyldes tiltagende menneskeskabt drivhuseffekt. Efter ca. 1950 har solaktiviteten ikke været tydeligt stigende eller faldende. Der har dog været 11 årsvariationer i solaktiviteten, der ser ud til at



Pinatubo i udbrud 1991. (Copyright: Dave Harlow, Cascades Volcano Obs., USGS)

have haft en svag cyklisk effekt på klimaet. Der har i samme periode været tre kraftige vulkanudbrud: Agung (1963), El Chichon (1982) og Pinatubo (1991), som isoleret set

har givet en afkølede effekt set i forhold til 1950. På grund af oceanernes træge reaktion har den afkølede effekt fra vulkanerne været i flere år efter udbruddene.

Danmarks førende miljørådgiver

Viden skaber værdi

Vi søger altid nye, dygtige medarbejdere.

Læs mere på www.orbicon.dk/job

