

Drivhusgas	Opvarmning af kloden i %	Opvarmnings- evne CO ₂ = 1	Atmosfærisk levetid (år)	Vækst
CO ₂	50	1	50-200	Er vokset fra 280 ppm til 390 ppm siden industrialiseringen. Er vokset ca. 3 % p.a. siden årtusindskiftet Vækstraten er stigende
CFC- og HCFC-gasser	20	12.000-15.000	12-50	Ca. 5 % p.a.
CH ₄	15	21	12	Er vokset fra 750 ppb til ca. 1.800 ppb siden industrialiseringen. Vækstraten er faldende
N ₂ O	5	200	120	Er vokset fra 270 ppb til 319 ppb siden industrialiseringen

Figur 1.11: Oversigt over de vigtigste drivhusgasser, som mennesket har forøget koncentrationen af. HCFC-gasser er erstatningsgasser for de nu udfasede CFC-gasser.

Menneskets forøgelse af drivhusgasser i atmosfæren gør, at man taler om en *menneskeskabt drivhuseffekt*.

Resultatet er, at den atmosfæriske modstråling er vokset med en stigende temperatur til følge. Det store problem er altså ikke den naturlige drivhuseffekt, men den menneskeskabte drivhuseffekt med en lang række til dels uoverskuelige og negative konsekvenser til følge.

Det skal dog også nævnes, at afbrænding af fossile brændsler tilfører atmosfæren aerosoler. Aerosoler reflekterer, spreder og absorberer en del af solens indstråling og har dermed dæmpet temperaturstigningen.

Problemet er desværre ikke kun den forøgede modstråling som følge af de forhøjede koncentrationer af drivhusgasser, men også en række tilbagekoblingsmekanismer.

Tilbagekoblingsmekanisme

Klima-jordsystemet er et eksempel på en tilbagekoblingsmekanisme, der defineres af en række delsystemer:

- atmosfæren
- hydrosfæren: oceaner, søer og floder
- kryosfæren: havis, indlandsis og gletsjere
- jordoverfladen og skorpen
- biosfæren: planter, dyr og mikroorganismer.

Ændringer i ét af disse delsystemer til ofte have virkning i de andre delsystemer, og det gør klimaudviklingen kompliceret. Man taler i den forbindelse om *tilbagekoblingsmekanismer*. Positiv tilbagekobling, hvis den påvirkede sfære reagerer ved at forstærke den udvikling, der er i gang, og negativ tilbagekobling, hvis ændringen dæmpes.

Vigtige tilbagekoblingsmekanismer er følgende:

- Stigende temperatur medfører, at kryosfæren mindskes. Det mindsker jordens samlede albedo og øger opvarmningen (positiv tilbagekobling).
- En opvarmning af atmosfæren vil medføre, at oceanerne varmes op. Varmt vand er ringere til at opløse og optage CO₂, dvs. atmosfærens indhold af CO₂ vil stige endnu hurtigere (positiv tilbagekobling).

Figur 1.12: Kilimanjaro. Temperaturstigninger får sneen på Afrikas højeste bjerg, Kilimanjaro (5.895 m), til at smelte.



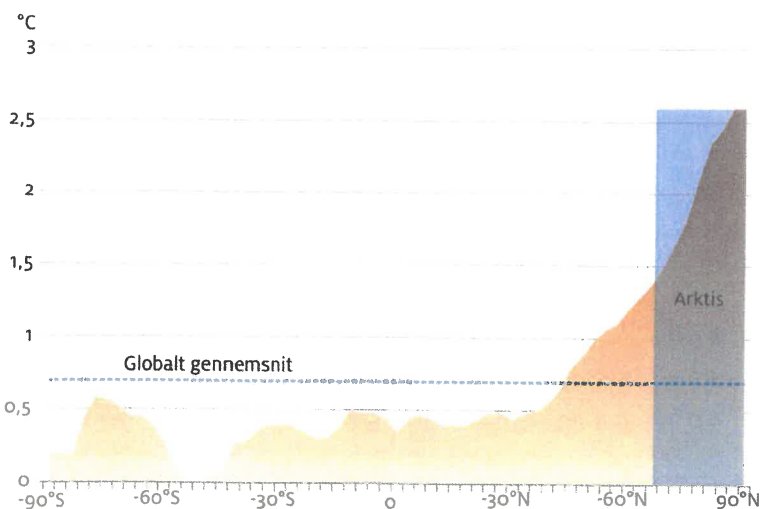
- En varmere atmosfære indeholder mere vanddamp. Vanddampen er en drivhusgas (positiv tilbagekobling), men er også skydannende (negativ tilbagekobling).
- En varmere atmosfære med et højere indhold af CO_2 vil forøge biosfæren og dermed sænke CO_2 -niveauet (negativ tilbagekobling).
- Den store opvarmning, som især finder sted på breddegraderne nær polerne, vil betyde, at dele af tundraen tør. Det vil gennem anaerob omsætning frigøre store mængder CH_4 (positiv tilbagekobling).

Konsekvenser af den globale opvarmning

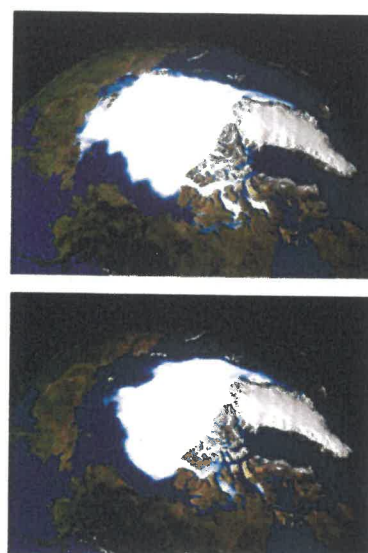
Den globale opvarmning ses tydeligt i de arktiske områder. Det er også dette område, der har oplevet den største temperaturstigning (figur 1.13 og 1.14).

Følgerne af den store temperaturstigning ses på havisen. Havisens udbredelse varierer på to måder. Udbredelsen svinger med årstiden: Havisen har størst udbredelse i marts og mindst i september. Desuden varierer havisens udbredelse fra år til år. Men siden 1980 er havisens udbredelse formindsket betragteligt (figur 1.15).

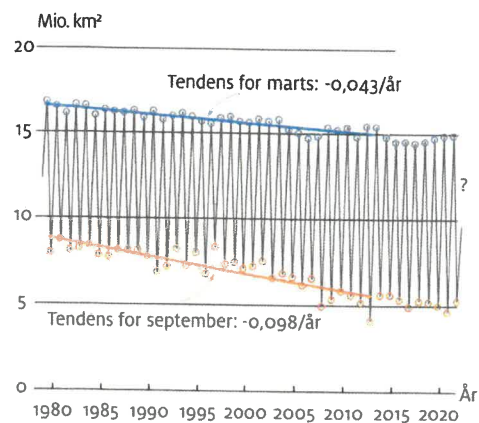
Der har været meget fokus på den smeltende grønlandske indlandsis. Isen er rykket tilbage og er blevet tyndere ved randen. Indlandsisen får tilført masse gennem snefaldet, og mister masse gennem afsmeltning og gletsjerstrømme ud i havet. Samlet set har indlandsisen mistet en enorm masse de seneste årtier. Samtidig er en voksende del af overfladen udsat for smeltning om sommeren.



Figur 1.14: Den gennemsnitlige temperaturstigning i de seneste 50 år har været størst i Arktis. Det er set i forhold til referenceperioden 1951-1980. Kilde: Arctic Councils rapport 2009, Dorthe Dahl-Jensen mfl.



Figur 1.13: Havisens udbredelse i henholdsvis september 1979 og 2005.



Figur 1.15: Havisens udbredelse ved Arktis i marts og september måned målt med satellit. Kilde: EUMETSAT OSI SAF.

Følgerne af den globale opvarmning ses også på jordens gletsjere. Langt de fleste har oplevet større afsmeltning end tilførsel af is, og er dermed rykket tilbage.

Følgervirkningerne af den globale opvarmning handler ikke kun om mindre is, for der er mange andre konsekvenser. De vigtigste er følgende:

- Den globale vandstand er de seneste år steget med 3-4 mm pr. år.
- Områder med permafrost er reduceret med 10 % på den nordlige halvkugle. *Permafrost* betyder, at jordoverfladen er bundfrossen hele året, og om sommeren tør kun de øverste få centimeter op.
- Nedbørsmængden er øget på de høje breddegrader, både på den nordlige og sydlige halvkugle.
- Der er registreret flere perioder med tørke, især i de i forvejen tørre områder.
- Hyppigheden af episoder med kraftig nedbør er øget, også i områder med mindre total nedbør.
- Der er ingen tendens til ændring i antallet af tropiske orkaner, men der er en tendens til kraftigere og længerevarende orkaner.
- Mange økosystemer er kommet under pres som følge af ændrede temperatur- og nedbørsforhold.
- Dyrkningsmuligheder i landbruget er ændret. Et par eksempler: I Danmark er vækstsæsonen blevet forøget med flere uger. Samtidig har nyudviklede majssorter gjort, at majs som foderafgrøde har gjort sit indtog. I Spanien er ørkenspredning et faktum, og vandmangel i vækstsæsonen er generelt blevet et større problem i Sydeuropa.

Fremtidens klima

Forskere bruger klimamodeller til at forudsige fremtidens klima. I klimamodeller forsøger man at indregne alle sammenhænge og tilbagekoblingsmekanismer i klimasystemet. På den ene side er forudsigelserne ikke bedre end den opstillede model. På den anden side har klimamodellerne været i stand til at simulere klimaets udvikling i 1900-tallet, og det giver en vis tiltro til fremtidige forudsigelser.

FN's klimapanel, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) præsenterede i 2013 en række scenarier for verdens fremtidige klima. I hvert scenarie er sat nogle forudsætninger vedrørende befolkningsvæksten i verden, den teknologiske udvikling og den økonomiske vækst. Alle tre forhold har betydning for den fremtidige udledning af drivhusgasser.

De opstillede scenarier forudsiger temperaturstigninger i år 2100 fra 0,3-4,8 °C og afledte stigninger i havniveauet på op til 0,8 meter. Den seneste klimarapport fra 2021 har også en række scenarier, og her er forudsigelserne stort set de samme.

Regional påvirkning

Regioner påvirkes forskelligt. Langt de største temperaturstigninger vil finde sted på høje breddegrader og i arktiske områder. Det er også i de områder temperaturen allerede er steget mest. En sandsynlig forklaring er den mindre albedo som følge af issmeltning.

Den globale nedbørsfordeling vil også ændre sig. Generelt vil de tørre områder omkring vendekredsene få endnu mindre nedbør, mens ækvator, mellembreddegraderne og de høje breddegrader vil få en større årsnedbør (figur 1.16).

Klimamodellerne forudsiger endelig mere ekstremt vejr i form af flere storme, tørkeperioder og kraftige skybrud.

Danmark kan forvente temperaturstigninger på 1,2 til 3,7 °C, afhængigt af udslipsscenariet. Disse temperaturstigninger vil gælde for alle årstider og vil give en markant længere vækstsæson i Danmark. Nedbørmæssigt peger FN's klimamodeller på mere nedbør, især om vinteren, mens somrene får mindre nedbør. Scenarierne taler også om mere ekstremt vejr i form af flere hedeølger, storme, skybrud og stormfloder. Især skybrud har Danmark allerede fået en forsmag på.

Konsekvenserne af klimaændringer er voldsomme og næsten utallige. De naturlige økosystemer vil komme under stort pres og forandre sig. De nuværende klima- og plantebælter vil forskydes væk fra ækvator. Mange nuværende planter og dyr vil uddø og blive erstattet af andre arter.

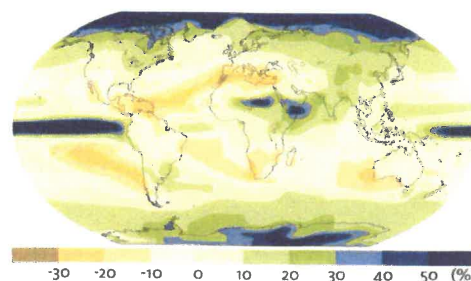
Betingelserne for landbrug vil tilsvarende ændre sig. Områder på mellem og høje breddegrader fx Canada, Skandinavien og Rusland vil få glæde af en længere vækstsæson, og vil sandsynligvis ikke komme til at mangle vand i vækstsæsonen. Omvendt vil dyrkningsmulighederne i USA, Middelhavsområdet, Mellemøsten og store dele af Afrika blive væsentlig forringet på grund af vandmangel.

Mere ekstremt vejr overalt i verden vil få store omkostninger til følge. En vandstandsstigning på op mod 1 meter frem mod år 2100 vil være katastrofal for de millioner af mennesker, der i dag bor på lavtliggende øer eller lever langs kyster og i floddeltaer (figur 1.17). Vandstandsstigningen i kombination med stormhændelser vil give mange oversvømmelser.

Sikkert er det, at de økonomiske og teknologiske muligheder for at tilpasse sig ændringerne vil være mindst i de fattige lande. Med andre ord vil verdens fattige blive hårdest ramt af de fremtidige klimaændringer.

Klimapolitik

I 1987 udgav FN's Brundtlandkommission en rapport med titlen "Vores fælles fremtid – rapport om miljø og udvikling". Centralt i rapporten står



Figur 1.16: Forventede nedbørsændringer omkring år 2100. IPCC's klimascenarie viser øget nedbørsmængder på de høje breddegrader og i området omkring ækvator. Til gengæld forventes mindre nedbørsmængder omkring vendekredsene.

Figur 1.17: Klimaflygtninge. De forringede dyrkningsmuligheder i store dele af verden, kombineret med vandstandsstigningen, vil resultere i millioner af potentielle klimaflygtninge.



behovet for en bæredygtig udvikling i verden. Bæredygtighed blev efterfølgende et hovedemne i globale miljødiskussioner, også en bæredygtig klimaudvikling kom på den internationale dagsorden. Således blev der på FN's konference om Miljø og Udvikling i Rio de Janeiro i 1992 vedtaget en klimakonvention.

Formålet med klimakonventionen var at opnå en "stabilisering af drivhusgaskoncentrationerne i atmosfæren på et niveau, der forhindrede farlig menneskelig påvirkning af klimasystemet". Det skulle ske "inden for en tidsramme, der tillod økosystemer at tilpasse sig naturligt til klimaforandringerne, sikrede at fødevarerproduktionen ikke var truet og muliggjorde en fortsat økonomisk udvikling på en bæredygtig måde". Klimakonventionen rummede også en hensigtserklæring, hvor de industrialiserede lande skulle have stabiliseret deres udledninger af CO₂ og andre drivhusgasser på 1990-niveau i år 2000. Denne målsætning blev langt fra opfyldt.

Kyoto-protokollen

I 1997 blev der forhandlet et internationalt juridisk bindende tillæg til klimakonventionen, kaldet *Kyoto-protokollen*. Kyoto-protokollen fastlagde reduktionsforpligtelser på industrilandenenes udledning af CO₂ og fem andre drivhusgasser. Industrilandene skulle i gennemsnit have reduceret deres udledninger af drivhusgasser med mindst 5,2 % i 2008-2012 i forhold til 1990-niveauet. EU-landene forpligtede sig til en samlet reduktion på 8 %. Danmark gav tilsagn om en reduktion på hele 21 %.

Disse reduktionsforpligtelser var en radikal ændring i forhold til tidligere tiders vækst i udledningen af drivhusgasser (figur 1.6).

Det er værd at bemærke, at udviklingslandene ingen reduktionsforpligtelser fik med Kyoto-aftalen, ligesom lande som USA og Australien aldrig tiltrådte aftalen.

Reduktionsforpligtelsen kunne nås med indenlandske tiltag som lavere energiforbrug gennem besparelser og udbygning af vedvarende energi. I aftalen var der også nogle såkaldte fleksible mekanismer, der dækker over muligheden for at finansiere en reduktion i et andet land og fratrække reduktionen i hjemlandets reduktionsforpligtelse. Reduktionen i det andet land kunne enten ske ved, at førstelandet køber en del af det andet lands

Figur 1.18: Gro Harlem Brundtland, forhenværende statsminister i Norge, var i 1984-1987 leder af FN's Verdenskommission for Miljø og Udvikling, også kaldet Brundtlandskommissionen.



CO₂-kvoter, eller ved at førstelandet laver CO₂-reducerende projekter i det andet land.

Kyoto-aftalen var en juridisk bindende aftale, men der var ikke nogen overnational myndighed, som kunne sanktionere, hvis aftalen ikke blev overholdt.

Kyoto-aftalen rakte frem til 2012, og derfor er der i en årrække blevet forhandlet om en afløser for denne aftale. Forhandlingerne har været konfliktfyldte. Centrale konfliktpunkter i klimaforhandlingerne har været størrelsen af reduktionskravene til industrilandene og eventuelle reduktionskrav til udviklingslande. Samtidig har drøftelserne om størrelsen og fordelingen af de mange milliarder kroner, der hvert år skal investeres i udviklingslandenes energisektor og overføres til ulandene for at afhjælpe følgerne af den globale opvarmning, været konfliktfyldte.

Nogle lande med USA i spidsen har i disse forhandlinger krævet fremtidige reduktioner af udviklingslandene. Argumentet har været, at lande som Kina og Indien allerede i dag udleder store mængder drivhusgasser. Kina er i dag verdens største udleder af CO₂. Svaret fra udviklingslandene har været, at CO₂-udledningen pr. indbygger er lav i udviklingslandene (figur 1.6 og 1.7), og landene har et legitimt krav på økonomisk vækst. Udviklingslandenes mener, at det er industrilandene, der har skabt problemet, og derfor også må løse problemet.

Ved COP21 i Paris i 2015 blev en ny klimaaftale, den såkaldte Paris-aftale, forhandlet på plads. Målsætningen om, at verdens gennemsnitstemperatur maksimalt måtte stige 2 °C, og helst holdes under en stigning på 1,5 °C i forhold til 1880-niveauet, blev gentaget.

Landene kunne ikke blive enige om en aftale om juridisk forpligtende reduktioner på drivhusgasområdet, men kun om en model, hvor verdens lande hver for sig frivilligt indmelder reduktionsmål til FN. I aftalen ligger også, at disse tilsagn om reduktioner skal øges hvert 5. år. Det skal også nævnes, at aftalen indeholder en beslutning om, at verdens rigeste lande fra år 2020 årligt skal støtte udviklingslandene med 100 mia. US dollars i deres klimaindsats.

I 2016 havde 188 lande indmeldt deres reduktionsmål. Disse landes udledning af drivhusgasser omfatter 95 % af den samlede udledning i verden. Man kan derfor sige, at Paris-aftalen omfatter næsten alle lande i verden. Også udviklingslandene er med denne gang.

Nogle eksempler på indmeldte mål: EU har lovet at reducere udledningen med 40 % i 2030, og 80-95 % i 2050. USA har lovet en reduktion på 14-19 % i 2025, og Kina har lovet, at deres udledning vil toppe i 2030. Indien lover, at deres udledning pr. indbygger aldrig vil overstige niveauet i de rige lande.

Figur 1.19: Smog i Beijing, Kina, er et stigende problem.





Figur 1.20: Kulkræftværk i Tyskland.

Det er positivt, at der endelig i 2015 kom en afløser for Kyotoaftalen. Det er også positivt, at aftalen omfatter næsten alle lande i verden. Det problematiske i aftalen er, at den bygger på frivillige løfter. Det væsentlige i denne sammenhæng er, at de indmeldte mål slet ikke er tilstrækkelige til at holde den globale temperaturstigning under de to grader. Man må håbe, at reduktionerne løbende vil blive opjusteret. Paris-aftalen kom skidt fra start, da USA under præsident Trump trak sig ud af aftalen. Til gengæld meldte præsident Biden i 2021 USA ind igen.

Klimaløsninger?

Er det muligt at hindre, at klimaet løber løbsk? Svarene på det spørgsmål falder i to kategorier, et udviklingspessimistisk og et udviklingsoptimistisk synspunkt. Pessimister hæfter sig ved, at Kyoto-protokollen ikke har reduceret udledningen af drivhusgasser, og at Paris-aftalen er for løs og slet ikke indeholder de nødvendige reduktioner.

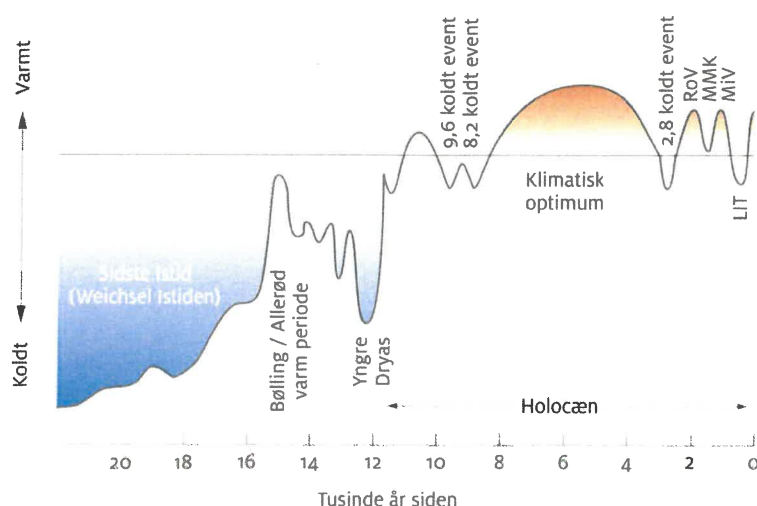
Optimister ser klimaftalerne som det første skridt i den rigtige retning. Og at aftalernes klimapolitik har virket set ud fra den kendsgerning, at det globale udslip har stabiliseret sig. Verdens lande er også nødt til at finde løsninger. IPCC har sat en global temperaturstigning på 2 °C som en kritisk grænse. En verden, hvor den globale gennemsnitstemperaturstigning stabiliserer sig under 2 °C, vil være til at leve i for verdens befolkning. Hvis temperaturstigningen skal holdes under denne grænse, kræves der meget store reduktioner i drivhusgasudledningen, og dermed store investeringer i fornybare og ikke CO₂-udledende energikilder.

Set ud fra et resourcesynspunkt er optimisternes synspunkter den eneste mulighed. Olie er en begrænset ressource, og af den grund er det nødvendigt med reduktioner i energiforbruget og omlægning til vedvarende energikilder.

Naturlige klimaændringer

Siden jordens dannelse for ca. 4,6 milliarder år siden har klimaet ændret sig. Undervejs i forløbet har jorden været inde i flere kolde perioder, hvor istider har været tilbagevendende begivenheder. Den nuværende kvartærtid i de seneste 2,6 millioner år er et eksempel på en periode med skiftende istider og varmeperioder. Den seneste istid, *Weichsel-istiden*, sluttede for ca. 11.500 år siden.

Overordnet set er der sket en opvarmning i perioden for 22.000-4.000 år siden (figur 1.21). Denne opvarmning kan forstås ud fra en større sommersolindstråling på den nordlige halvkugle pga. ændringer i jordens bane og aksehældning. Denne opvarmning blev dog afbrudt af en relativ kort-



Figur 1.21: Kolde og varme perioder på den nordlige halvkugle de seneste 22.000 år, altså perioden fra slutningen af den seneste istid til i dag. RoV = romersk varmtid, MMK = mørk middelalder kuldeperiode, MiV = middelalder varmtid, LIT = lille istid. Kilde: Marit-Solveig Seidenkrantz.

varig afkøling for ca. 12.000 år siden (Yngre Dryas). Afkølingen forklares med, at Golfstrømmen i denne periode ikke nåede op i det nordatlantiske område. Det skyldtes de enorme mængder af smeltevand, som strømmede ud i det nordlige Atlanterhav fra de smeltende iskapper på det nordamerikanske kontinent.

Perioden ca. 700-1350 var varm, og kaldes *den varme middelalder*. Omvendt var perioden ca. 1350-1850 en kold periode med navnet *den lille istid*. Efter 1850 er temperaturen generelt steget, og jorden er kommet ind i den nuværende globale opvarmning.

Temperaturbestemmelse

Går man tilbage til tiden før de direkte temperaturmålinger, må man basere sig på såkaldte *proxy-data*. Proxy er engelsk og betyder stedfortræder eller repræsentanter.

Træringe er blevet brugt som proxy i fastlæggelse af temperaturudviklingen de seneste 1.000 år. Bredden af træringene giver informationer om temperatur og nedbør i vækstsæsonen.

Historiske oplysninger kan også bruges til at give information om fortidens klima og livsbetingelser. Lange serier med datoer for vinhøstens start, kornhøstens størrelse og fx den svenske hærs fremrykning over det frosne Storebælt i 1658 er alle eksempler på historiske oplysninger, der indirekte kan fortælle om fortidens klima.

Iskerner fra indlandsisen i Grønland og på Antarktis er også blevet brugt til at bestemme fortidens klima. Isen rummer gammelt vand, som kan aldersbestemmes. Vand forekommer med to oxygenisotoper, nemlig ^{16}O og ^{18}O , langt mest med isotopen ^{16}O . Det kræver mere energi at fordampe et vandmolekyle med oxygenisotopen ^{18}O , da denne har en større masse. Derfor vil isen indeholde relativt lidt ^{18}O i kolde perioder og mere i varme perioder.

Isen rummer også luftbobler, der repræsenterer atmosfæren på det tidspunkt, hvor sneen faldt. Og ud fra disse luftbobler har man bestemt

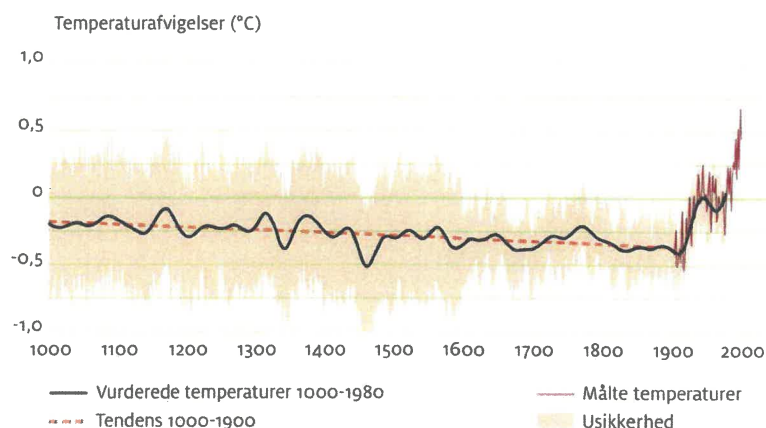
Figur 1.22: Bredden af træringene giver informationer om temperatur og nedbør i vækstsæsonen.



Figur 1.23: Iskerner fra indlandsisen i Grønland kan vise mange års nedbørsmængde.



Figur 1.24: Temperaturkurven er kendt som Mann's Hockey stick-kurve. Kurven indgår i IPCC's rapport fra 2007. Temperaturværdierne skal læses som afvigelser fra temperaturen i referenceperioden 1961-1990. De grå skraveringer repræsenterer usikkerheden i data. Kilde: Mann mfl., 2001.



atmosfærens CO₂-indhold i perioden før 1958, hvor de direkte målinger på CO₂ startede. Isen gemmer også oplysninger om syreindholdet i sneen. Syreindholdet i isen fortæller om tidligere tiders vulkanisme.

Borekerner fra oceaner og søer bruges på tilsvarende vis. Her kan man bestemme ¹⁶O- og ¹⁸O-indholdet i kalkskaller (består af CaCO₃) i mikroskopiske organismer. I varmeperioder vil indholdet af ¹⁸O være relativt lavt i vandet og dermed også i organismernes kalkskaller, i kolde perioder omvendt.

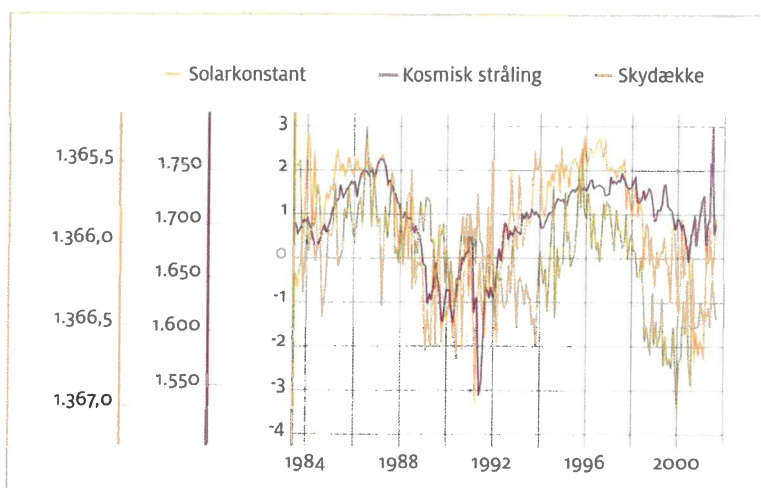
Temperaturen de seneste 1.000 år

Figur 1.24 giver et bud på temperaturudviklingen de seneste 1.000 år på den nordlige halvkugle. Den er sammenstykket af proxy-data og direkte målinger. Data viser en faldende temperatur frem til slutningen af 1800-tallet. Derefter en markant stigning i temperaturniveauet, sådan at det nuværende klima repræsenterer det varmeste klima inden for de seneste 1.000 år.

En varm middelalder, med temperaturer på måske 1-2 grader over det nuværende niveau, passer med en lang række historiske forhold. Vikingerne koloniserede Island og Grønland. Man havde kvæghold og lavede hø i disse nordatlantiske områder. England havde en stor vinproduktion. Og generelt steg den europæiske befolkning og velstand i denne periode. En stigning, der var baseret på en forøget fødevareproduktion, der igen havde sit grundlag i et varmere klima.

Middelaldervarmen blev afløst af en lang kold periode, hvor Europas folketal i perioder faldt markant på grund af misvækst og pestepidemier. Nordboerne forsvandt fra Grønland. Datidens kunstmaler skildrede skøjteløb på kanalerne i Amsterdam og vintermarkeder på den tilfrosne flod Themsen i London.

Det grå usikkerhedsområde på figur 1.24 er dog så stort, at det giver plads til både en varm middelalder og en lille istid. Diskussionen om temperaturen før de direkte målinger går også på, hvorvidt de lokalt og regionalt registrerede varme- og kuldeperioder kun er lokale eller også har haft global udbredelse. Det er den mest udbredte opfattelse i dag, at en varm middelalder og en lille istid var europæiske fænomener og ikke havde global udbredelse.



Figur 1.26: Solens indstråling og kosmisk stråling. Den gule kurve viser indstrålingen fra solen, enheden er Watt/m². Den lille kurve viser den kosmiske stråling, høje værdier angiver stor kosmisk stråling. Den grønne kurve viser afvigelser fra gennemsnittet 1984 til 2002 i procent af det globale skydække opgjort ud fra satellitbilleder. Data viser en fin sammenhæng mellem kosmisk stråling og skydannelse.

Årsager til klimaændringer

Der er mange naturlige årsager til klimaændringer. Inden for et tidsperspektiv på 1.000 år er følgende forhold relevante at overveje: ændringer i solens aktivitet, vulkanisme, oceanernes evne til at oplagre energi og ændringer i oceanernes havstrømme.

Solen og klimaændringer

Indstrålingen fra solen er altafgørende for jordens klimasystem og livet på jorden. En oplagt forklaring på klimaændringer kan være variationer i indstrålingen fra solen. Man taler lidt misvisende om en *solarkonstant*. Ordet antyder, at solens indstråling er konstant, men rent faktisk varierer denne med en cyklus på ca. 11 år.

Indstrålingen varierer kun nogle få promille i måleperioden (figur 1.26), og solen anses da også for at være en meget konstant stjerne set i vores meget korte tidsperspektiv. Der er derfor blandt forskere bred enighed om, at variationerne i indstrålingen ikke kan forklare klimaændringerne. De danske forskere Henrik Svensmark & Eigil Friis-Christensen ser en anden sammenhæng mellem variationer på solen og jordens temperatur. De har fremsat en såkaldt *solplette*teori.

Solpletterne er mørke områder på solen, hvorfra der udsendes en særlig stor mængde ioniserede partikler. Solpletantallet varierer, det svinger også med en cyklus på ca. 11 år, og maksimums- og minimumsantallet varierer fra cyklus til cyklus (figur 1.27).

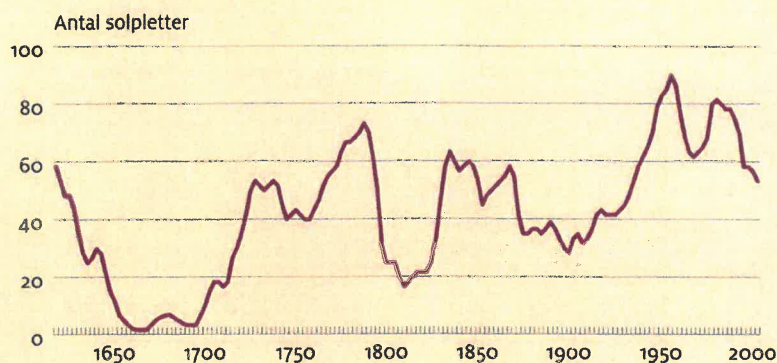
Når der er mange solpletter (figur 1.28), bliver solens magnetfelt (heliosfæren) forstærket. Heliosfæren omfatter alle planeterne i solsystemet og begrænser den kosmiske stråling fra verdensrummet. Det vil sige, at når der er mange solpletter, vil den kosmiske stråling i atmosfæren være reduceret.

Kosmisk stråling er partikler fra eksploderede stjerner (supernovaer), og denne stråling danner og ioniserer aerosoler i atmosfæren. *Aerosoler* er små partikler, der naturligt forekommer i atmosfæren, som fx sandkorn fra

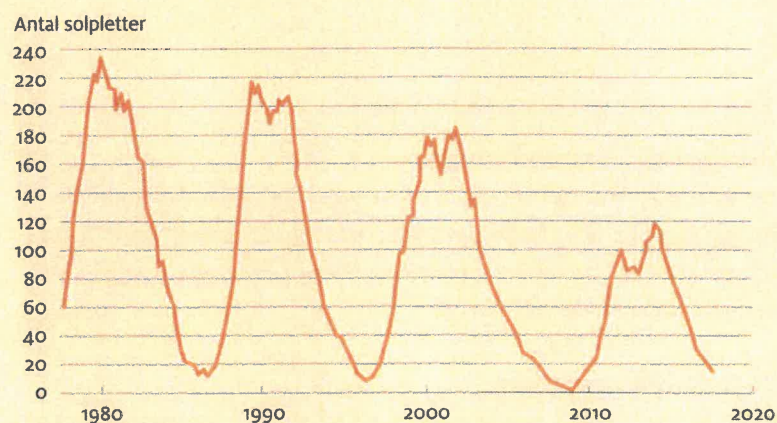
Figur 1.25: Solplet AR1944 fra januar 2014.



Figur 1.27: Observerede solpletter i perioden 1610-2000. Kilde: National Geophysical Data Center (NGDC).



Figur 1.28: Antal observerede solpletter i perioden 1978-2018. Kilde: National Geophysical data Center (NGDC).



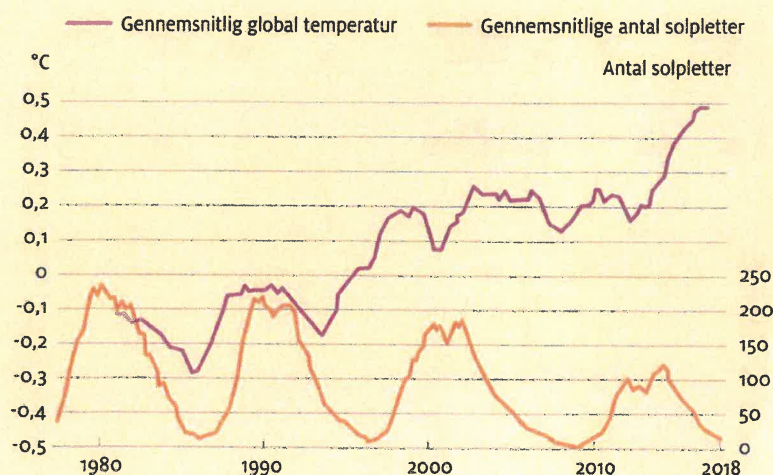
storme over ørkener, saltmolekyler fra oceaner og svovlsyretråber fra vulkanudbrud. Disse aerosoler fungerer som kondensationskerner i dannelsen af skyer.

Med andre ord vil en periode med mange solpletter ifølge teorien føre til ringe skydannelse og dermed stor indstråling og opvarmning.

Der kan ses en vis sammenhæng mellem solpletantallet og det kolde klima i 1600-tallet og 1800-tallet (figur 1.27). Solen har været relativ inaktiv efter årtusindskiftet (figur 1.28), hvilket kan være en medvirkende årsag til, at den globale opvarmning er stagneret i 00-erne.

Isotoperne kulstof-14 (^{14}C) og beryllium-10 (^{10}Be) er også blevet brugt til at underbygge solpletteorien. Ved et højt niveau af kosmisk stråling dannes mange af disse to isotoper i atmosfæren. Og der er fundet et lavt niveau af kulstof-14 i træringe fra den varme middelalder og et højt niveau af beryllium-10 i iskerner fra omkring år 1700.

Solpletteorien er en kontroversiel teori. Kritikere af teorien hæfter sig ved, at jordens temperatur og antallet af solpletter siden 1978 ikke har udviklet sig, som teorien foreskriver, tværtimod (figur 1.29). Kritikerne har også påpeget den usikkerhed, der er forbundet med at opgøre jordens skydække ud fra satellitbilleder.



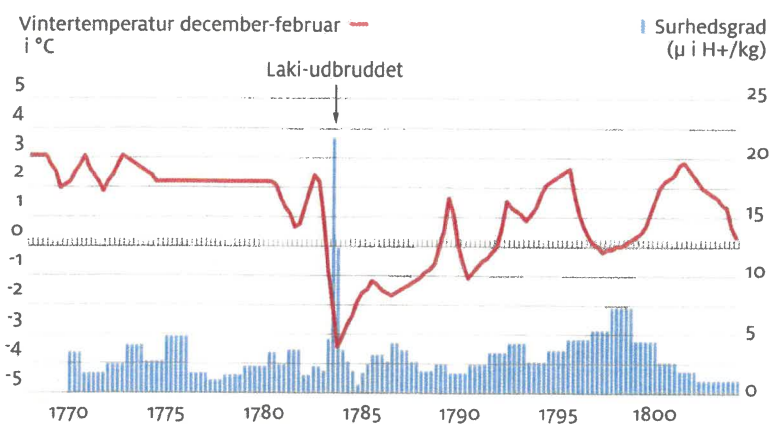
Figur 1.29: Den globale gennemsnitstemperatur målt fra satellitter i forhold til klimanormalen og antallet af solpletter – begge dele i perioden 1979 til april 2018.

Vulkanisme

Ved eksplosive vulkanudbrud tilføres atmosfæren en stor mængde aerosoler i form af aske og gassen svovldioxid (SO_2). Svovldioxid reagerer med vanddamp i atmosfæren og danner fine dråber af svovlsyre (H_2SO_4). Aerosolerne fordeles på ganske få dage til store dele af atmosfæren, og aerosolerne holder sig svævende i atmosfæren i flere måneder og vil reflektere og sprede solens indstråling. Meget store vulkanudbrud er i stand til at sænke jordens middeltemperatur med op til $0,5-1^\circ\text{C}$ i helt op til et år, måske mere (figur 1.30). Det skal nævnes, at vulkanisme normalt også tilfører atmosfæren CO_2 , og dette bidrager til atmosfærens drivhuseffekt med højere temperatur til følge. Stor vulkansk aktivitet gennem tusinder af år kan forøge atmosfærens indhold af CO_2 , og dermed øge atmosfærens drivhuseffekt.

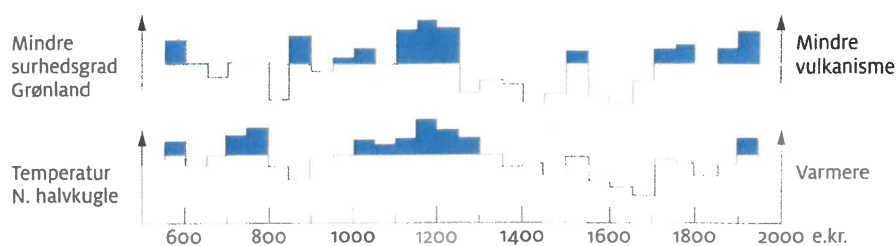
Fra analyser af grønlandske iskerner har man fået et billede af vulkanismens omfang gennem de seneste 1.000 år. Der synes at være en sammenhæng mellem omfanget af vulkanisme og temperaturen i Grønland i den varme middelalder og under den lille istid (figur 1.31).

Siden år 2000 har der været en række vulkanudbrud, og nogle forskere mener, at disse kan være én af forklaringerne på, at den globale temperatur er stagneret i 00-erne.

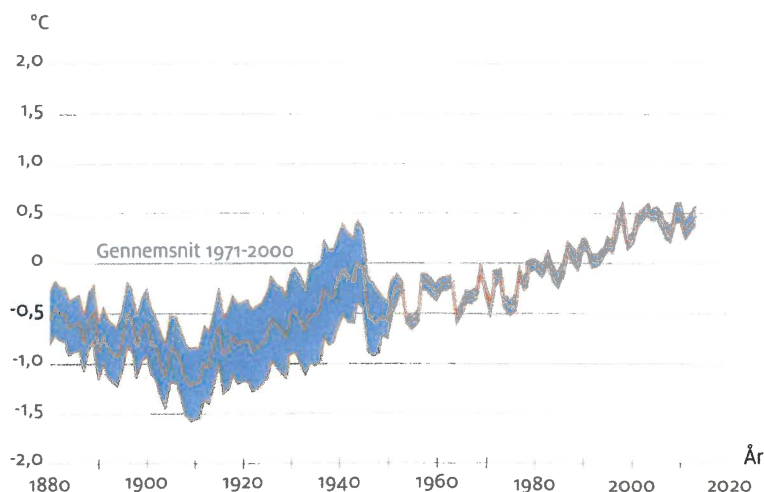


Figur 1.30: Laki-vulkanudbruddet i 1783 på Island. Vintertemperaturen målt i det østlige USA (målt af Jefferson, USA's daværende præsident) sammenholdt med surhedsgradsprofilen i isborekerner fra Grønland. Kilde: H. Sigurdson, 1982.

Figur 1.31: Indlandsisens surhedsgrad. Øverst: Surhedsgraden i den grønlandske indlandsis gennem 1.400 år. Nederst: Temperaturindeks for den nordlige halvkugle. Kilde: Klima, vejr og mennesker. Dansgaard W. Geografforlaget, 1987.



Figur 1.32: Den gennemsnitlige overfladetemperatur i oceanerne fra 1880 til 2013. Y-aksen angiver afvigelser fra gennemsnittet af perioden 1971-2000. Det grå bånd viser usikkerhedsmargin i målingerne. Kilde: NOAA, 2014.

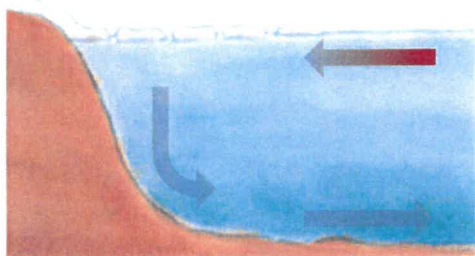


Oceanerne og den globale temperatur

Oceanerne dækker ca. 70 % af jordens overflade og rummer helt ufattelige mængder af vand. Vand er samtidig et stof med en relativ stor varmekapacitet. Derfor kan oceanerne både optage og afgive store mængder af energi.

Den gennemsnitlige overfladetemperatur i oceanerne (figur 1.32) følger i store træk den globale temperaturstigning. Igen fremgår det, at oceaners overfladetemperatur ikke er steget de seneste 10-15 år.

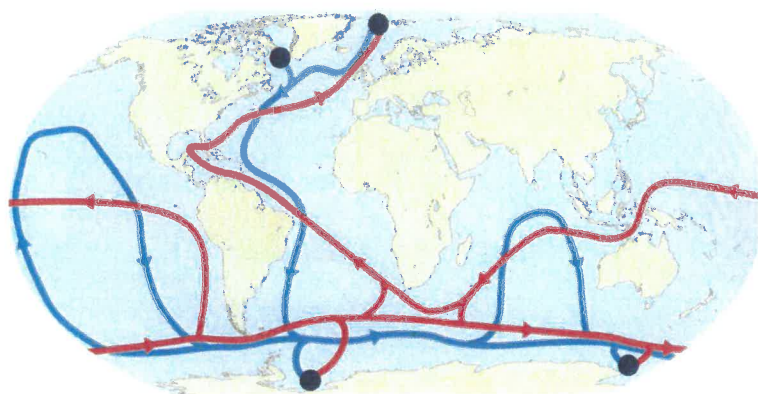
Forskere har desuden opdaget, uden dog at kunne forklare dette, at overfladetemperaturen i den østlige og tropiske del af Stillehavet svinger med en cyklus på 10 til 30 år. Cyklussen går under forkortelsen PDO (Pacific Decadal Oscillation). Siden 1998 har Stillehavet været i en kølig fase. Et koldt ocean køler den overliggende atmosfære. Dette kunne være en forklaring på den manglende globale opvarmning i 00'erne. Fra 1940'erne til midten af 1970'erne var cyklussen også i sin kølige fase, og dette falder også sammen med en pause i den globale opvarmning (figur 1.1).



Figur 1.33: Den østgrønlandske pumpe. Ved Østgrønlands kyst afkøles og fryser det varme overfladevand. Når overfladevandet fryser udskilles der salt. Saltkoncentrationen i det resterende overfladevand øges, det bliver tungere og synker til bunds. Det kolde saltholdige bundvand strømmer mod syd.

Golfstrømmen og klimænderinger

Nordvesteuropas milde klima er i høj grad et resultat af Golfstrømmens transport af varmt og saltholdigt overfladevand fra Caribien til Nordatlanten. En forudsætning for, at Golfstrømmen bliver ved med at strømme mod nord, er, at der sker en *dybvandsdannelse*, og vandet returnerer mod syd langs oceanbunden (figur 1.33). Dybvandsdannelsen sker, fordi vandet af-



Figur 1.34: Den termohaline cirkulation. Rød angiver varm overfladestrøm, blå angiver kold bundstrøm. Fire områder med bundvanddannelse er markeret.

køles på dets vej mod nord, og fordi saltet ikke indbygges i den is, der hele tiden dannes og tør op i Grønlandshavet og Davisstrædet. Vandet, der ikke indgår i isdannelsen, vil således få forøget sin saltholdighed og dermed sin densitet og synke ned mod oceanbunden. Denne dybvandsdannelse kaldes også for *Grønlandspumpen*. Dette overordnede strømningsmønster i oceanerne kaldes den *termohaline cirkulation* (figur 1.34).

Ændringer i dybvandsdannelsen og dermed i Golfstrømmen vil således kunne påvirke temperaturen i helt Nordvesteuropa og dermed også den globale temperaturudvikling.

Der er bekymring for, at den globale opvarmning kan svække dybvandsdannelsen. Sammenhængen skulle i givet fald være, at de 'korte frysninger' af havvand mindskes på grund af det generelt varme vand. Varmt vand er også lettere, og overfladevandet i Grønlandshavet og Davisstrædet får yderligere mindsket sin densitet, fordi meget ferskvand skyller ud i området som følge af smeltende indlandsis.

Med andre ord vil en global opvarmning kunne resultere i en svagere Golfstrøm i det nordatlantiske område og dermed et koldere klima specielt i Europa.

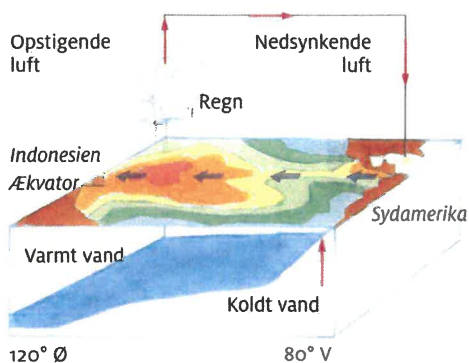
Siden 1970'erne er der i perioder målt lave havtemperaturer i Nordatlanten, og det kan muligvis hænge sammen med en svækkelse af Golfstrømmen.

El Niño og klimaet

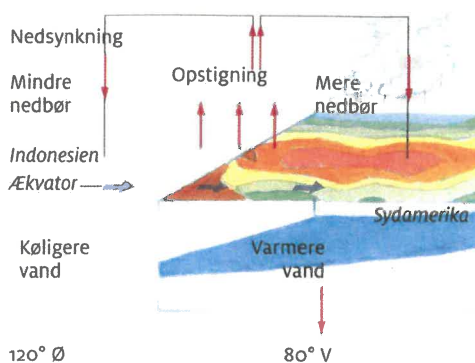
Ved det normale forløb i Stillehavet mellem Sydamerika og Asien flytter passatvindene varmt overfladevand over mod Asien, og koldt bundvand kommer op ved Sydamerikas vestkyst. Med jævne mellemrum svækkes passatvindene, og det sætter gang i en meget langsom bevægelse af varmt overfladevand fra Indonesien mod Sydamerika, en såkaldt *Kelvinbølge*. Det kolde bundvand forbliver som følge heraf i dybet. Fænomenet opstår typisk med 2-7 års mellemrum.

En sådan situation med varighed af ca. 1 år kaldes en *El Niño*, og resulterer i første omgang i tørke i Sydøstasien og varmt, fugtigt og regnfuldt vejr ved Sydamerikas vestkyst. Men fænomenet forårsager dog også ændrede vejrforhold mange andre steder på jorden.

Normale forhold i Stillehavet



Forhold under El Niño



Figur 1.35: Normal situation og en El Niño i Stillehavet. Kilde: DMI.

Det interessante i El Niño-sammenhæng er den globale middeltemperaturs stigning med flere tiendedele. Det kan hænge sammen med, at det varme vand i forbindelse med Kelvinbølgen giver en større fordampning og dermed et større vanddampindhold i atmosfæren over Stillehavet. Vanddamp er en drivhusgas, og et højere indhold af denne vil forøge temperaturen. Den høje temperatur i 1998 (figur 1.1) kædes sammen med en kraftig El Niño. Ligeledes kædes et meget varmt år 2010 sammen med en El Niño samme år.

La Niña er også et tilbagevendende fænomen i samme havområde. Man kan betragte *La Niña* som en forstærket udgave af normalsituationen. Her vil vandet være koldere end normalt i det centrale Stillehav og ved østkysten af Sydamerika, og til gengæld varmere end normalt i Stillehavets vestlige del.

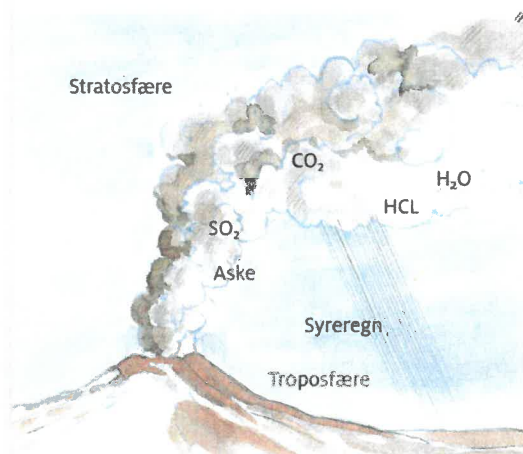
Oversigt over årsager

Som det er fremgået, er der en række naturlige årsager til klimaændringer. Det bliver kompliceret af de naturlige mekanismers forskellige effekt på jordens temperatur og mekanismernes forskellige tidsskalaer. Nogle med et kendt tidsmæssigt variationsmønster, andre med et tilfældigt eller ukendt mønster (figur 1.37).

Hvorfor sker det?

I medierne har der af og til været en diskussion om årsagerne til klimaændringer. Er der primært tale om naturlige årsager, eller ligger forklaringerne hovedsageligt i menneskets brug af fossile brændsler?

FN's klimapanel, IPCC, der blev nedsat i 1988 for at følge klimaforskningen og jævnligt udgive oversigtsrapporter over forskernes viden på klimaområdet, er ikke i tvivl. I IPCC's rapport fra 2013 hedder det, at det med 95 % sikkerhed er de menneskeskabte stigninger i drivhusgaskoncentrationen, der forårsager den globale opvarmning. Og i den seneste klimarapport fra 2021 er vurderingen, at menneskets udledning



Figur 1.36: Vulkanisme. Meget store vulkanudbrud kan sænke jordens middeltemperatur i helt op til et år.

	Effekt på jordens temperatur	Hyppeghed
Solens elektromagnetiske indstråling	Ingen effekt/forsvindende effekt på tidsskalaen de seneste 1000 år	Ca. 11 år
Solens udsendelse af ladede partikler/solpletantallet	Kan have en effekt – størrelsen er usikker	Cyklus på ca. 11 år, meget stor forskel på maksimums- og minimumsantal af solpletter i den enkelte cyklus
Vulkanisme	Et stort vulkanudbrud kan sænke jordens gennemsnitstemperatur i 0,5-1°C i op til et år.	Vulkanismen på jorden varierer tilfældigt
Golfstrømmens styrke	Kan teoretisk set have meget stor betydning for temperaturudviklingen i Europa og dermed hele Verden	Ukendt
El Niño La Niña	En kraftig El Niño kan hæve den globale temperatur med flere tiendedele Sænker den globale middeltemperatur	En kraftig El Niño optræder med et normalt mønster med 2-7 års mellemrum Optræder ikke med nogen cyklus.
PDO	I den kølige fase vil den globale temperatur sænkes, i den varme fase vil den globale temperatur hæves	Cyklus på 10-30 år

af drivhusgasser er ansvarlige for langt størstedelen af temperaturstigningen siden slutningen af 1800-tallet, nemlig 1,07 °C ud af en samlet stigning på 1,09 °C.

Omvendt må man også sige, at denne forklaring ikke kan stå helt alene. Den varme middelalder, den lille istid og den 'manglende' temperaturstigning i perioderne 1945-1980 og 2000-2014 er svære at forstå alene ud fra menneskets udledning af drivhusgasser.

Formuleringen hos IPCC åbner også op for, at naturlige årsager kan spille en vis rolle. Det store spørgsmål er, hvor meget de to sider hver især vægter i forklaringen på klimaændringerne. Det er således ikke en diskussion om naturlige eller menneskeskabte årsager. En syntese mellem de to sider kunne være, at menneskets udledning af drivhusgasser grundlæggende forårsager en opvarmning. De naturlige processer kan i perioder udskyde opvarmningen, i andre perioder vil de forstærke opvarmningen. Før industrialiseringen må forklaringerne på klimaændringer af indlysende grunde søges i de naturlige variationer.

Figur 1.37: Oversigt over naturlige klimaændringer.



Figur 1.38: Skybrud. Voldsomme skybrud er en af konsekvenserne af klimaændringerne, som Danmark kommer til at mærke mere til i fremtiden. Somrene 2010 og 2011 forårsagede kraftige skybrud, som her i Storkøbenhavn. I foråret 2015 ramte et skybrud især Østjylland.