

Prosjektrapport

Dato: 2007-06-18
Ref.:

Forfatter: Georg Hansen, NILU; Frode Flatøy, Bjerknessenteret
Mottaker: NorACIA-sekretariatet, Norsk Polarinstitut

Aerosoler, skyer og stråling i polhavområdet

1 Innledning

En av årsakene til at resultatene fra dagens klimamodeller har store variasjoner og svært høy usikkerhet i polarområdene og spesielt Arktis er at modellene ikke har fullgode metoder for å behandle skydekke og skyprosesser under polare forhold. Modellenes vertikale oppløsning er ikke tilstrekkelig til å beskrive den nederste delen av den arktiske troposfæren, spesielt det planetære grensesjiktet noe som for store deler av året er nødvendig for å reprodusere situasjonen realistisk. Samtidig er overflateegenskapene i regionen, bl.a. sjøis og snødekke og deres vekselvirkning med atmosfæren, behandlet på en utilstrekkelig måte.

Dette har alvorlige konsekvenser for beskrivelsen av skyene, som er en sentral parameter i drivhussystemet, og dermed også for hele strålingsbudsjettet i polarområdene. Det koblede systemet bakkealbedo-skyer-aerosoler-luftfuktighet er en av de viktigste tilbakekoblingsmekanismene i Arktis og hovedårsaken til at modellresultatene entydig gir at oppvarmingen i polarområdene vil bli betydelig større enn ved lavere breddegrader samt den store spredningen i resultatene fra ulike klimamodeller i Arktis.

2 Mål

Målsettingen for prosjektet var å fokusere på problemstillinger rundt en av de viktigste tilbakekoblingsmekanismer i norsk-arktisk klima ved bruk av nye forskningsresultater fra både norsk og internasjonal forskning. Dette skulle omfatte bl.a. pågående prosjekter som MACESIZ og nye prosjekter som IPY-prosjektet POLARCAT. Videre skulle resultater fra den nye IPCC-rapporten, som ble offentliggjort i løpet av 2007, inkluderes i rapporten.

I en konkret episodestudie skulle sammenhengen mellom sjøisdekke, optisk tykkelse til aerosoler og skydekke studeres for ekstremperioden mars-juni 2006 (høye temperaturer, lite is:

Et institutt i Miljøalliansen

NILU
Postboks 100
Instituttveien 18
NO-2027 KJELLER, Norge
Tel.: +47 63 89 80 00/Faks: +47 63 89 80 50

NILU Tromsø
Polarmiljøsentret
Hjalmar Johansens gt. 14
NO-9296 TROMSØ, Norge
Tel.: +47 77 75 03 75/Faks: +47 77 75 03 76

e-post: nilu@nilu.no
nilu-tromso@nilu.no
Internett: www.nilu.no
Bank: 5102.05.19030
Foretaksnr. 941705561

sammenlignbar med prognosene for ca. 2050) og sammenlignes med resultatene fra scenarioberegningene met.no skal lage for Arktis med NorACIAs regionale klimamodell.

I praksis ble koblingen til enkeltprosjekter som MACESIZ og POLARCAT tonet ned, fordi de enten dekket felt av perifer betydning eller ikke hadde kommet langt nok (POLARCAT). Også episodestudien ble tonet ned i og med at resultater i nye publikasjoner indikerer ingen umiddelbar sammenheng mellom isdekke og skydekke, men heller en toveispåvirkning over lengre tid. Derfor ble det lagt langt sterkere vekt på en gjennomgang av relevante publikasjoner. Resultater fra scenarioberegningene fra met.no for NorACIA har ikke vært tilgjengelig.

3 Status i ACIA-hovedrapporten

ACIA-hovedrapporten vier temaet begrenset plass. Skyer og skyprosesser diskuteres noe i avsnitt 4.3.5 (Other climatic variables). Figur 4.9 viser at de fire utvalgte modellene per 2002 ikke var i stand til å reprodusere observert gjennomsnittlig skydekningsgrad og dens årsgang samtidig. F.eks. varierer månedsgjennomsnittet i skydekninggrad midvinters mellom 40 og 96%, avhengig av hvilken modell man ser på, mens den observerte verdien ligger på ca. 60%. Videre reproduserer ingen av modellene det observerte brede maksimumet om sommeren og tidlig om høsten.

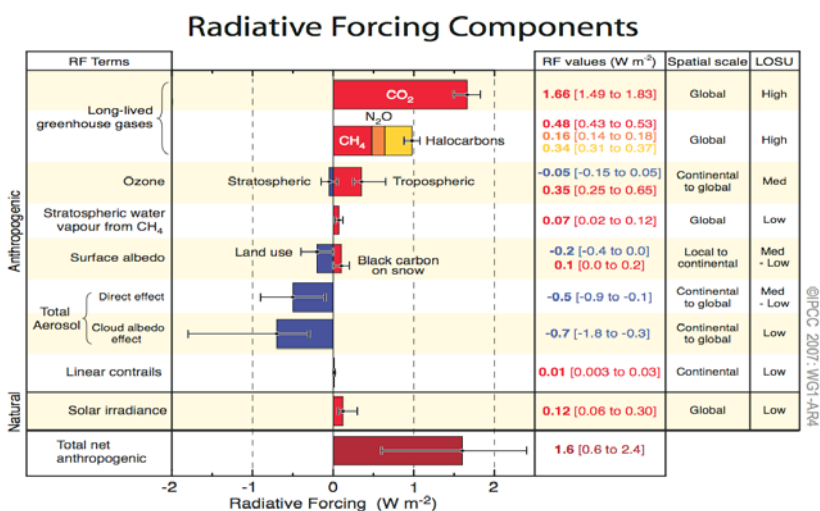
Aerosoler diskuteres nokså generelt ifm. UV-stråling (avsnitt 5.4.5) som en av de parametrene som påvirker UV-intensitet; deres rolle for skydannelse, skydekningsgrad og total solar innstråling er ikke nevnt. Likedan er – ganske overraskende - den totale solare innstrålinga og dens rolle i polare økosystemer ikke avhandlet i rapporten.

På den bakgrunn er det klart at det gjenstår et vesentlig arbeid for å belyse disse parametrene og ikke minst deres forventede endring samt mulige effekter på arktiske økosystemer. Spesielt viktig er dette i områder som til nå har vært islagt store deler av eller hele året, f.eks. Polhavet, og som forventes å ha være isfritt i et fremtidig varmere klima. I denne rapporten vil vi, som et eksempel, bl.a. se på forholdene i 2006 i europeisk Arktis, da sjøisigsgrensen store deler av året lå lenger nord enn noen gang før og dermed faktisk er egnet som en eksempelstudie for klimaet som forventes i midten av det 21. århundret.

4 Aerosoler i Arktis – ny informasjon

Aerosoler er av stor betydning innen klimasystemet og samtidig den atmosfæriske klimarelevante komponenten som det knyttet mest usikkerhet til. Figur 1, som er tatt fra IPCCs nyeste rapport (IPCC, 2007), viser at den totale effekten av aerosoler muligens kompenserer oppvarmingen fra CO₂ (dagens nivå), men at det er knyttet stor usikkerhet til dette til tross for en vesentlig forbedring sammenlignet med forrige IPCC-rapport. Aerosoler i Arktis bidrar vesentlig til de store feilmarginene, fordi bildet er spesielt komplekst her. Dette skyldes den sterke koblingen mellom aerosoler, skyer, albedo og strålingsflukser, med prosesser som er dårlig beskrevet selv i kompliserte modeller.

Selv om aerosolmengden i gjennomsnitt er ganske lav, har den stor innvirkning på strålingsbalansen direkte pga. den høye albedoen og indirekte pga. betydningen for skydannelse. Og selv om det (så langt) bare finnes få antropogene kilder for aerosoler i Arktis, spiller de en betydelig rolle der i form av arktisk dis ("Arctic haze"), lang-transportert partikkelforurensning som akkumuleres i løpet av vinteren og våren med store konsekvenser for både atmosfære- og overflatekjemien samt strålingsbudsjettet i sentrale arktiske strøk.



Figur 1. Parametre som bidrar til en økning i strålingspådriv (fra IPCC WG1-AR4 (2007)).

Et omfattende og illustrativt sammendrag av kunnskapsstatusen for arktisk dis finnes i AMAPs nyeste evaluering (AMAP, 2006). Det dekker både egenskaper, trender og klimarelaterte effekter av fenomenet. De viktigste komponentene til arktisk dis, sulfater og nitrater, viser motstridene trender: mens sulfatkonsentrasjonene går ned stort sett overalt i Arktis, dog ganske sakte det siste tiåret, går nitratkonsentrasjonene tydelig opp. Dette forklares med en nedgang av SO₂-utslippene i tidligere Sovjetunion som følge av økonomisk nedgang og i Vest-Europa pga. internasjonale avtaler, mens transport som hovedkilde til NO_x-utslippene har økt kontinuerlig. Siden sulfat gir det klart største bidraget, er den totale trenden i partikkelkonsentrasjoner negativ. Aerosolers direkte effekt på kortbølget stråling kan kvantifiseres som atmosfærens optiske tykkelse. Trenden i optisk tykkelse har generelt vært negativ siden 1998, med unntak av Barrow, Alaska. Siden den direkte effekten av aerosoler er positiv om vinteren, fører en nedgang i arktisk dis til en reduksjon av strålingspådrivet (dvs en nedkjøling) om vinteren og våren i forhold til situasjonen på 1980- og 1990-tallet.

Med hensyn til den indirekte effekten, dvs. betydningen aerosolers har for skydannelse er det store usikkerheter. Det finnes indikasjoner på at svovelsyreholdige aerosoler fører til færre skykondensasjonskjerner (cloud condensation nuclei, CCN), noe som igjen medfører at de partikler som finnes vokser til større iskrystaller samt lettere sedimenteres, slik at man får en sterkere dehydrering enn ved et større antall mindre CCN. M.a.o., en økt konsentrasjon av arktisk dis burde føre til redusert skydekningsgrad. Dette anses som en mulig forklaring for den negative trenden i skydekningsgrad om vinteren (se neste avsnitt) fram til året 2000, men det er ikke undersøkt om det geografiske mønsteret av de to fenomenene matcher.

Avsetning av aerosoler og da spesielt sot (black carbon, BC) på snø- og isflater fører til en redusert bakkealbedo og dermed økt avsmelting i den lyse årstiden. Dette har fått større oppmerksomhet de senere år fordi det har forekommet en rekke tilfeller av store skogbranner i den boreale sonen i forbindelse med usedvanlig høye sommertemperaturer. Under flere av episodene har man observert både langtransport over hele Arktis og vertikal transport inn i stratosfæren av sotpartikler (f.eks. Fromm and Servranckx, 2003; Stohl et al., 2006; Eckhardt et al., 2007). Temaet er en av hovedmålsettingene i IPY-prosjektet POLARCAT (<http://www.polarcat.no>) som omfatter en rekke store målekampanjer i 2007 og 2008, kombinert med avanserte modellkjøringer.

Når det gjelder den fremtidige utviklingen både av arktisk dis (vinter/vår) og tilfeller av skogbrann som kan relateres til BC, finner man motsigende indikasjoner. Ut fra klimascenariene for det 21. århundret vil antallet skogbranner øke vesentlig som følge av et varmere klima, slik at avsetning av

BC vil øke og dermed også albedorelatert strålingspådriv. Når det gjelder industrirelatert aerosol/BC-produksjon som når Arktis, er den fremtidige utviklingen uavklart. Mens Koch and Hansen (2005) konkluderer med at Sør- og Østasia (der utslippene har økt sterkt de siste 10 årene) er en vesentlig kilde, kommer Stohl et al. (2006) til det resultatet at bidraget fra denne regionen er marginalt sammenlignet med Europa og Russland. I første tilfelle kan man vente en ny økning, i siste tilfellet en videre reduksjon av antropogene aerosolnivåer de nærmeste årene og tiårene.

Av naturlige aerosoler kan det nevnes sjøsalt og aerosoler bestående av marine organiske forbindelser. Disse har en stor årstidsvariasjon med et maksimum sent på sommeren og tidlig på høsten når isdekket er minst. Leck et al. (1999, 2005) har lansert en ny in-situ mekanisme for dannelse av store organiske aerosoler ved råker i pakkis som kortslutter den tradisjonelle hypotesen der di-metyl-sulfid (DMS) -partikler som dannes sør for iskanten må transporteres inn i islagt område og vokse der til de når overkritisk størrelse. En slik mekanisme kombinert med den stadige reduksjonen av sjøis, spesielt om sommeren, hadde potensialet til å danne enda en tilbakekoblingsmekanisme i Arktis, men det er for tiden uavklart hvor viktig den er for partikkel- og skydannelse i Arktis som helhet. Resultatene baserer seg på få tokt nord for 85° N. Fra andre sommer-/høsttokt rapporteres det fortsatt en sterk overvekt av antropogene aerosolkilder (f.eks. Xie et al., 2006).

En omfattende analyse av alle tilgjengelige målinger av optiske egenskaper til arktiske (og antarktiske) aerosoler (spesielt aerosol optisk tykkelse) ble publisert av Tomasi et al. i 2007. Disse

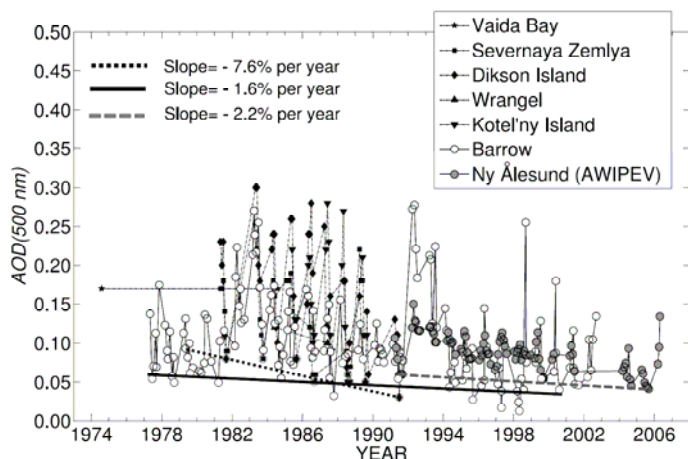


Figure 2. Time patterns of the monthly mean values of AOD(500 nm) measured at different Arctic sites from 1974 to 2006: Siberian data (solid symbols); Barrow measurements of AOD_{eff} (open circles), as derived from filtered pyrheliometer measurements; and Ny Alesund (AWIPEV) data (shaded circles), derived from Sun photometer measurements. The regression lines were drawn to fit the data relative to the summer months (without volcanic data), assumed as AOD background values: dotted line refers to the overall Siberian data set, solid line refers to the Barrow data set, and grey dashed line refers to the AWIPEV data set.

omfatter fra både amerikanske, canadiske, russiske og nordiske stasjoner. Til tross for stor variasjon fra stasjon til stasjon er langtidsutviklingen nokså tydelig: et bredt maksimum på 1980-tallet, etterfulgt av en rask nedgang som flatet ut fort, og indikasjoner på et økning de siste årene. Figuren til venstre som er tatt fra publikasjonen viser også den store sesonale variasjonen (arktisk dis om våren) og den midlertidige sterke økningen pga. vulkanen Pinatubo i årene 1991-1995.

5 Skyer, stråling og deres innflytelse på havisen

Siden innsamlingen av informasjon for ACIA-hovedrapporten ble avsluttet i 2002/03, har det blitt publisert en rekke artikler angående skyer i Arktis. En vesentlig årsak til dette synes å være at de viktigste satellittproduktene er blitt forbedret siden midten av 1990-tallet og etter hvert også finnes for en så lang periode at trendanalyser er meningsfulle. Dataene er fra *TIROS-N Operational Vertical Pathfinder* (TOVS) som dekker tidsrommet 1979-1998 og data fra *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) -instrumentet på forskjellige satellitter som dekker tidsrommet 1982 til i dag. I noen få publikasjoner er også skydata fra nyere instrumenter, f.eks. *Moderate Resolution Imaging Spectrometer* (MODIS) tatt med, men disse dataseriene er etter vår oppfatning for korte til å kunne brukes for trendstudier. Nesten alle andre publikasjoner omhandler bare data til året 2000 slik at de store endringene som har skjedd siden ikke er med i materialet.

TOVS-dataene publisert av *Schweiger et al. (1999)* danner, sammen med bakkebaserte målinger publisert i *Hahne (1995)* grunnlaget for det korte avsnittet i ACIA-hovedrapporten (s. 116-117). Schweiger har siden publisert ytterligere resultater basert på samme datasett, først i en valideringsstudie med målinger fra feltprogrammet *SHEBA (Surface Heat Balance of the Arctic Ocean)* som ble gjennomført i Beauforthavet i 1997-1998 (Schweiger et al., 2002). I 2004 publiserte Schweiger så en ren trendstudie (1980-2000) for arktiske havområder basert på både TOVS-serien og to AVHRR-baserte serier med viktige resultater:

- Skydekningsgraden viser en signifikant negativ trend om vinteren på ca. -5% /dekade, og det i alle datasett
- Skydekningsgraden har en signifikant positiv trend om våren på ca. $+3\%$ /dekade, og ikke signifikant positive trender om sommeren og høsten.
- Den positive trenden om våren er spesielt stor på Stillehavssiden av Polhavet og nær null i Barentshavet, mens den negative trenden om vinteren er mest utpreget i den atlantisk-eurasiske delen av Polhavet med Barentshavet, Karahavet og Laptevhavet.
- Som hovedårsak for vårtrenden foreslår Schweiger endringer i den atmosfæriske sirkulasjonen, karakterisert ved den Arktiske Oscillasjonen (AO) som var sterkt positiv på 1990-tallet, mens vintertrenden ikke kan forklares slik.

Schweiger refererer til 2 publikasjoner fra 2003, nemlig *Comiso (2003)* og *Wang & Key (2003)* som også publiserte trendanalyser, dog med forskjellig fokus og datasett som grunnlag.

Comiso (2003) undersøkte overflatetemperaturtrender hvor trender i skydekke kan være en forstyrrende faktor. Han brukte AVHRR-data fra 1981-2000, med sesong og geografisk oppløsning. Han fant stort sett negative trender i skydekke i alle områder og til alle årstider, noe som motstrider Schweigers resultater både om våren og om sommeren.

Wang og Key (2003, 2005a,b) står for de mest omfattende studiene av arktiske klimatologi, skyer og strålingsegenskaper så langt. Materialet som legges til grunn er et betydelig utvidet sett av parametre avledet av AVHRR Polar Pathfinder (APP-x) som omfatter overflatetemperatur, bredbånd-albedo, skyegenskaper (dekningsgrad, partikkelfase, effektiv radius, optisk tykkelse, temperatur og lufttrykk på oversiden og vanninnhold, "precipitable water" PW), strålingsflukser og strålingspådriv fra skyer. Mens publikasjonen i *Science (2003)* stort sett gir geografisk midlede trender, går dobbelpublikasjonen i 2005 i dybden ved å dele regionen opp i 18 delregioner og beskrive både middelverdier og trender. Som Schweiger begrenser de analysen til før 2000. Viktige resultater fra dette arbeidet er:

- Skydekket har en betydelig variasjon både geografisk og etter årstid med et maksimum på ca. 85% i de europeiske havområdene ("GIN seas") og et minimum over Grønland (30-60%, etter årstid).
- Temperaturen på skyoverflater viser en markert årsvariasjon og er mellom 5° og 20° lavere enn bakketemperatur; differansen er konstant gjennom året over havområdene, men varierer sterkt fra sommer til vinter over land
- Lufttrykket på skyoverflaten indikerer at skyene stort sett finnes høyere oppe om vinteren enn om sommeren og høyere over land enn over hav
- Den optiske tykkelsen har maksima i mars/april og i september over land, og i mai og oktober over Polhavet, om vinteren over GIN og om sommeren i området nord for 80°N .
- Partikkelegenskapene: om vinteren finner man helst større ispartikler, om sommeren oftest flyktige små partikler; minst årsvariasjon i GIN, mest ispartikler over Grønland
- Vanninnhold (PW) har en markert variasjon gjennom året med et maksimum i juli/august i GIN, og et minimum over Grønland.
- Stråling: Langbølget fluks, både nedad- og oppadrettet, er størst i juli, mens kortbølget nedadrettet fluks er størst i juni og oppadrettet i mai pga. høyere albedo. Midlet over hele

året og integrert over alle bølgelengder er nettofluksen minst i det sentrale Arktis og på Grønland.

- Strålingspådriv: Skyer virker varmende i langbølgeområdet og nedkjølede i kortbølgeområdet. Om vinteren er det positivt pådriv, om sommeren mest negativ. Nettoeffekt for hele året er positiv over Grønland og den vestlige delen av det sentrale Arktis.
- Skydekket er redusert med ca. 6%/dekade om vinteren, spesielt i det sentrale Arktis
- Om våren og sommeren har skydekket hhv. økt med ca. 3 og 1,5%/dekade som er konsistent med en økning i lavtrykksaktivitet i området.
- Vanninnholdet (PW) har blitt betydelig mindre om vinteren over havområdene, men økt om våren og høsten.
- Optisk tykkelse til skyene viser ingen signifikant trend.
- Netto strålingspådriv om vinteren har gått ned pga. redusert skydekke og lavere bakketemperatur.
- Om våren har pådrivet fra langbølget stråling økt, men blitt redusert for kortbølget stråling, slik at nettoeffekten er omtrent null.
- Om sommeren og høsten har pådrivet blitt mere negativ pga. flere skyer og redusert albedo

Wang og Key konkluderer at endringene i strålingspådriv fra skyene delvis kompenserer økningen i bakketemperaturen, dvs det eksisterer en negativ tilbakekobling. Økningen i bakketemperatur forklares med endringer i atmosfærens storskalasirkulasjon, som så fører til endringer i bakkealbedo spesielt om høsten. Endringene i skyegenskapene, spesielt om vinteren forklares ikke.

Dette spørsmålet blir fulgt opp av *Liu et al. (2007)* som i tillegg til APP-x-datasettet også bruker ERA-40-datasettet fra ECMWF og et datasett av arktisk fuktighetsbudsjett fra *Groves and Francis (2002)*. Det blir foreslått at atmosfæresirkulasjonen har forårsaket en vesentlig reduksjon i konvergens av fuktighet og dermed i skydekket om vinteren i de nordvestlige eurasiske polarhavområdene (Barents- og Karahavet, Nansenbassenget). Disse skyfattige områdene flyttes så videre østover i løpet av 1 – 7 dager, dvs. den negative trenden langs Østsibir og nord for Nordamerika er forårsaket av adveksjon. Hypotesen sliter imidlertid med at den stadige nedgangen av havis egentlig burde føre til økt overflatefordampning og dermed økt skydekke.

Kato et al. (2006) publiserte en studie av sesongvariasjon og år-til-år-variasjon basert på et nytt datasett, nemlig MODIS behandlet med CERES-algoritmen. MODIS har vært operasjonell siden 2000, og publikasjonen dekker perioden mars 2000 til februar 2004, dvs. det er ingen overlapp med de ovennevnte studier. I tillegg måler MODIS bare i dagslys. Deres resultater viser en markert sesongsyklus i skydekke med verdier på mellom 0.7 og 0.8 om sommeren og mellom 0.45 og 0.6 om vinteren. Sommerverdierne er dermed sammenlignbare med TOVS- og APP-x-dataene til Schweiger (2004) og Wang & Key (2003), mens vinterverdiene er lavere. Tar man derimot hensyn til trendene i disse publikasjonene og tidsforskjellen mellom disse og MODIS-dataene, er forskjellen betydelig mindre. Midlet over hele året finner Kato et al. en statistisk signifikant positiv trend i skydekket, sammen med en sterkt negativ trend i snø- og sjøisdekt område, mens den reflekterte "Top-of-the-atmosphere"-kortbølgeirradiansen er konstant. Dette forklares med at en økende del av åpent hav/snøfritt land vil ligge under det et voksende skydekket om sommeren, dvs. skyene kompenserer den avtagende albedo.

Sammenhengen mellom skydekke og havis har i stadig sterkere grad også hatt en innflytelse på studier av skyklimatologien i Arktis. J.A. Francis, Rutgers University, N.J., bidro til både Schweiger et al. (2000) og til Liu et al. (2005) med sin bakgrunn i bruk av satellittdata til atmosfære- og marine anvendelser. I 2005 publiserte hun og samarbeidspartnere en artikkel om viktige faktorer for reduksjonen av sjøis i Arktis (Francis et al., 2005). Datagrunnlaget de brukte strekker seg fra 1979 til 2004, dvs. inn i perioden med de raskeste endringene (etter 2000). Som

mulige faktorer inkluderte de sonal (øst-vest) og meridional (nord-sør) vind, innkommende langbølge (DLF)- og kortbølgefluks (DSF) samt transportert følbar varme (advected sensible heat). Disse ble korrelert med iskanten i seks forskjellige arktiske havområder (Barentshavet, Karakavet, Laptev havet, Østsibirsk Hav, Chukchi havet og Beauforthavet). Det viste seg at tilbaketrekningen av sjøisgrensen var positivt korrelert med langbølgefluksen (og den meridionale vinden) i alle områder, mens korrelasjonen med kortbølgefluksen var negativ overalt. Fra det konkluderte de at kortbølgefluksen ikke påvirker iskanten, men omvendt, dvs. tilbaketrekningen av isgrensen fører til økt skydekke og dermed redusert kortbølgefluks. Regresjonsanalysen med de resterende fire faktorer viste at den økte langbølgefluksen (som også er sterkt påvirket av skyene) er den viktigste faktoren for istilbaketrekningen i de fleste områdene.

I en nyere publikasjon (Francis & Hunter, 2006) ble det påvist at betydningen av faktorene kan skifte betydelig, for eksempel i Barentshavet. Her har DLF som dominant faktor fram til 1991 blitt erstattet av varmetransport, samtidig som den samlede betydningen av de fire faktorene har gått drastisk ned, dvs. andre faktorer som feks. advektert varmt havvann har blitt viktigere. Det sentrale er imidlertid at disse studiene understreker betydningen av den sterke koblingen mellom sjøis/albedo, skydekke og strålingsbudsjett, spesielt de siste årene. Under siste møte i Canadian Meteorological and Oceanographic Society (CMOS) i mai 2007 i St. John's, Canada, presenterte Francis en videreføring av dette arbeidet, med fokus på hvilke faktorer som har størst innflytelse på DLF. Hun konkluderte med at økningen av bakketemperatur og skyvanninnhold har liten innvirkning på DLF. Derimot kan trendene med isskyer og høyden til skyundersiden (cloud base height, CBH) få stor betydning. CBH har gått ned om våren, noe som vil øke DLF. I motsetning til utbredelsen av sommerisen viser vinterisen som har gått drastisk ned bare de siste få årene, ingen stor innflytelse av DLF, men en dominans av zonal vind og, i de senere år, eksterne faktorer (adveksjon av varmere sjøvann) både i Barents- og Beringhavet (Francis & Hunter, 2007).

Sammenfattende kan man si at inntil 2000 har skydekket i Arktis blitt redusert om vinteren, men økt om sommeren og spesielt om våren. Årsaken til utviklingen om vinteren er ikke kjent, men det mistenkes at endringer i atmosfæresirkulasjonen spiller en vesentlig rolle. Økningen i skydekke om våren knyttes til redusert sjøis og økt lavtrykksaktivitet i Arktis og anses som en negativ tilbakekoblingsprosess til oppvarmingen i Arktis. Pådrivet fra langbølget stråling, som er sterkt korrelert med sjøisdekke, har økt om våren og sommeren, men gått ned om høsten og vinteren, mens pådrivet fra kortbølget stråling har gått ned om våren og sommeren. De norske arktiske havområdene (GIN) og Barentshavet skiller seg ut fra de andre arktiske havområdene gjennom lite årsvariasjon i temperatur, albedo og skyparametre hovedsakelig pga. den sterke påvirkningen fra Atlanterhavet. De publiserte trendanalysene mht. skyegenskaper og dekningsgrad trenger en oppgradering, ettersom nesten alle stopper ved år 2000. Siden har både atmosfæresirkulasjonen, sjøisutbredelsen og andre parametre endret seg sterkt og det kan påvirke resultatet vesentlig.

6 Hvor gode er klimaprognoene - Scenarier for fremtidsklimaet i Arktis

I følge IPCC – AR4 har de observerte klimaendringen de siste 30 årene vært størst på høyere breddegrader i nord. Nyere klimamodellresultater viser en signifikant følsomhet for endringer i denne regionen; denne følsomheten bekreftes også fra observasjonene. I gjennomsnitt har temperaturer i Arktis øket dobbelt så mye som i resten av verden. Endringene i klimaet i Arktis har potensiale til å påvirke resten av jorden gjennom svekking av den termohaline havsirkulasjonen, øket utslipp av drivhusgasser fra tinende permafrost og økt havnivå når breer og iskapper smelter.

Sorteberg et al. (2007) har brukt data fra klimamodellene som inngår i IPCC-AR5. De har særlig tatt for seg bakkeflukser og viser en rekke eksempler på hvordan resultatene fra de ulike modellene spriker, både når simuleringer for historisk tid sammenlignes med observasjonsdata og når fremtidsprognosene fra ulike modeller sammenlignes. Forskjellene mellom simulerte og observerte situasjoner er slående selv om størrelsen middles over måneder, sesonger og til og med over lengre

perioder. For skyer og dermed stråling er forskjellene markante selv i et middel langs en breddegrad. Det samme gjelder mellom modellene i projeksjonene frem mot år 2100.

Det er tre områder som gjør at klimaet i Arktis er problematisk å inkludere i klimamodeller og som derfor gir opphav til store variasjoner i scenarier fra ulike modeller:

- Skydekke er den viktigste og mest usikre faktoren for å kunne modellere strålingsbudsjettet.
- Stråling ved bakken og toppen av atmosfæren har avgjørende betydning for atmosfæretemperaturen, vertikalprofiler av temperatur og vind, snø og sjøis samt klimatilbakekoblinger.
- Geostrofisk vind som oppstår ved trykkgradienter over havet har stor virkning på forflytning og massebalansen til sjøis. Selv om klimatologiske gjennomsnitt er tilfredsstillende har klimamodellene som er brukt i IPCC-AR4 for grov oppløsning til å kunne beskrive viktige geografiske variasjonene i vinden som gir det komplekse observerte isdekket.

6.1 Skyer

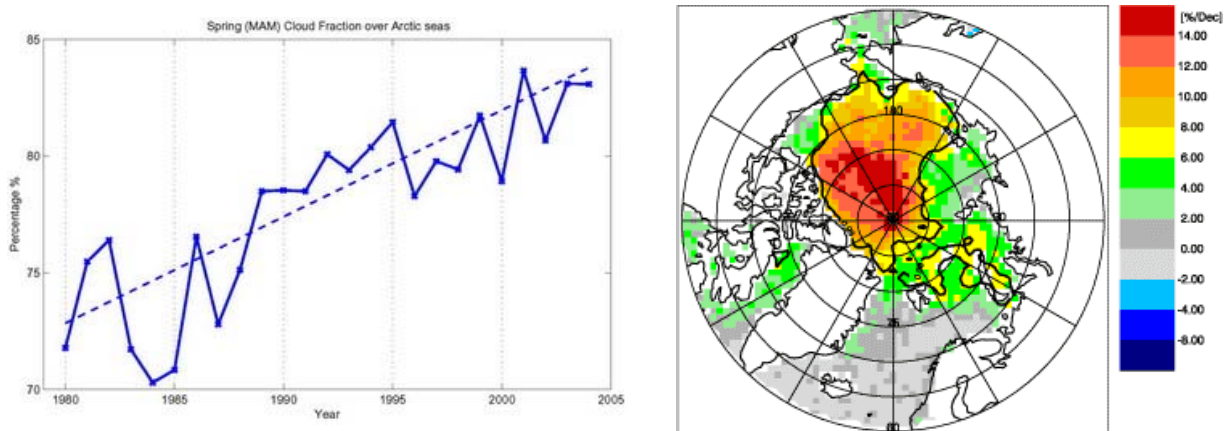
Alle klimamodeller har problemer med hvordan skyer beregnes. Skyer inneholder vann i både væske og isfase som dannes fra vanndamp når luften blir overmettet. I tillegg til overmetning må det være tilgang på passende kjerner. Slike partikler, som enten kan være naturlige eller antropogene styrer fordelingen av skyvann mellom væske- og isfase og dermed også de optiske egenskapene til skyene som dannes.

Resultater fra flere kampanjer tyder på at arktiske skyer er spesielle og at dette er noe av årsaken til vanskene med å modellere dem. Konsentrasjonen av egnede ispartikkelkjerner er særlig lav om vinteren, noe som gjør at selv ved svært lave temperaturer utgjøres mye av skyen av vanndråper. Walsh et al. (2002) nevner følgende årsaker til arktiske skyer er dårlig simulert:

- Feil i storskalasirkulasjon.
- Utilstrekkelig beskrivelse av atmosfæren nær bakken (parametrisering av blandingslaget).
- Feil i bakke- og sjøtemperaturer og egenskaper.
- Utilstrekkelig parametrisering av mikrofysikken i skyene, observasjoner viser at selv ved -30°C har mer enn halvparten av skyene vanndråper. Rett vannfase har avgjørende betydning for strålingsflukser og nedbør.
- Lave konsentrasjoner av kondensasjonskjerner gjør arktiske skyer 'gråere' enn tilsvarende skyer på lavere breddegrader, dermed reflekterer de mindre kortbølget stråling.
- Eneste fullgode løsning for å kunne beregne den indirekte effekten av aerosoler er å inkludere nye parametriseringer i klimamodellene der mikrofysikken samspiller med aerosoler

Det er nylig vist at selv om de beste værvarslingsmodellene vi har i dag kan reprodusere mengden av kondensat i arktiske skyer realistisk, gir de store feil i å fordele kondensatet korrekt mellom vann- og isfase (Sandvik et al. 2007, Morrison og Pinto 2006). Denne feilen påvirker sterkt vår evne til å beregne strålingstransporten gjennom atmosfæren og atmosfærens oppvarmings-/avkjølingsrater. Den påvirker dermed den vertikale temperaturprofilen og sirkulasjonen som igjen virker på dannelse, vedlikehold og oppløsning av skyer. Vavrus (2004) indikerer at den for lave produksjonen av skypartikler i isfase i de fleste modellene kan være årsaken til at modellene stort sett har for mye skyer om vinteren. Videre påpeker Vavrus at også variabiliteten til skydekningsgraden må simuleres korrekt, siden den påvirker den regionale temperaturen.

Schweiger (2004) og flere andre har vist at det har vært en nær linear økning i skydekket over Arktis de siste 25 årene, uten at det er lansert en fullgod forklaring på dette. Den lineære trenden i tidsserien og lokaliseringen der endringene har vært størst har heller ikke vært mulig å reprodusere av klimamodeller.



Figur 2. Venstre panel: tidsserie av sesongmidlet (mars-mai) skydekke over Arktis. Høyre panel: geografisk fordeling i 20-års trend i skydekke. Figurer fra A.J. Schweiger.

6.2 Blandingslaget

ACIA-hovedrapporten (ACIA [2004](#)) viste at det var alvorlige mangler i hvordan klimamodellene reproduserte de geografiske mønstrene i klimautviklingen i Arktis gjennom de siste 50 årene, dette er særlig markant vinterstid. I Atmosfærens blandingslag er ikke modellene i stand til å reprodusere lave temperaturer i tilfeller der vinden er lav og har en urealistisk rask temperaturstigning som respons på varmere luft som transporteres fra høyere breddegrader. Utveksling mellom underlag (hav, land, sjøis) og atmosfære om vinteren i Arktis karakteriseres ved et tynt blandingslag med sterk stratifisering (lagdeling) under en markert temperatur inversjon.

Byrkjedal et al. (2007) viser at et slikt blandingslag ikke kan løses opp i standardversjonen av ARPEGE/IFS klimamodellen, som de har anvendt, og heller ikke i majoriteten av de andre IPCC-modellene. Dette skyldes en kombinasjon av for lav vertikal oppløsning og den anvendte beskrivelsen av vertikal diffusjon. For alle standard parametriseringer av diffusjon er antagelsen at vertikale flukser i et stabilt stratifisert blandingslag bestemmes av vertikale forskjeller i temperatur og momentum. I det tynne stabile arktiske blandingslaget gir den lave oppløsningen i standardmodeller unøyaktigheter i flukser og gradienter. Ved å øke antallet modellag kraftig finner Byrkjedal et al. at modellresultatene forbedres markant, men på bekostning av en kraftig økning i regnetid. De peker på at den beste løsningen trolig vil være å innføre progostiske løsninger for blandingslagshøyde som tar hensyn til nedsynkning.

Esau (2007) utdyper dette og trekker frem følgende årsaker til at parametriseringer av blandingslaget som brukes i dagens klimamodeller virker dårlig i Arktis:

- Statistisk stabilitet og kraftig temperatur inversjoner
- Vedvarende negative varmeflukser ved bakken
- Vedvarende storskala-nedsynkning, persistent høytrykk
- Skyer med blandingsfase og ispartikler
- Konveksjon i isråder om vinteren, 95% av utvekslingen mellom hav og atmosfære skjer gjennom råker som dekker 5% av totalarealet. Blandingslaget over råker i isen må beskrives bedre.

Oppsummert vil mangler i beskrivelse av grensesjiktet i dagens klimamodeller resultere i:

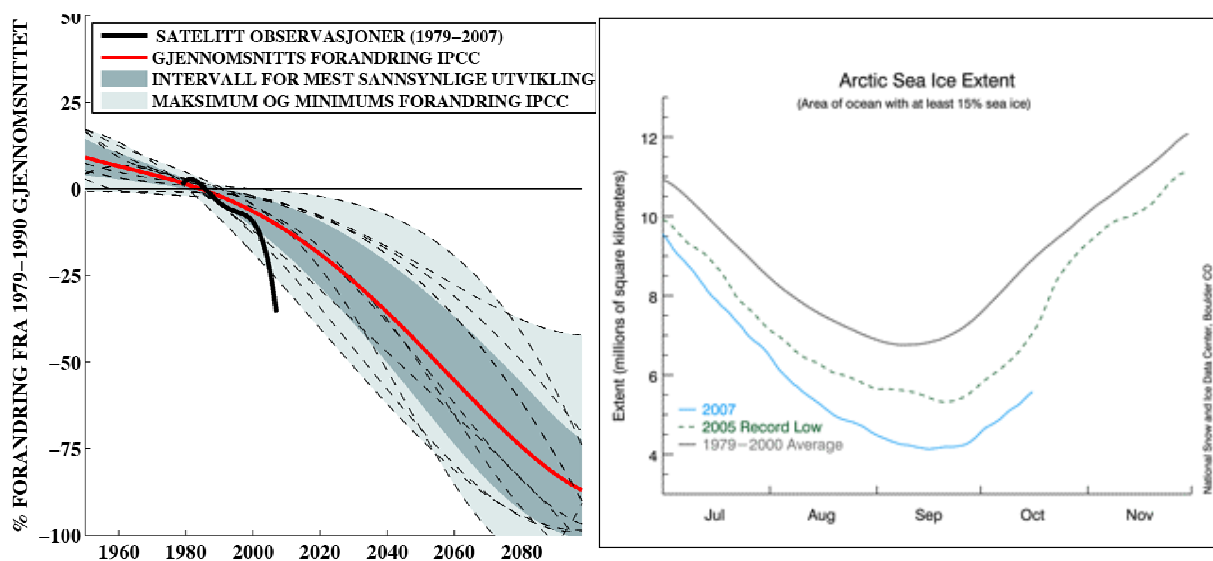
- Feil i vertikalprofiler av vind, fuktighet og temperatur.
- Feil i skyprofiler
- Feil i bakkeflukser og utveksling.

6.3 Prognoser for sjøisutbredelse

Historiske endringer i sjøisdekke og beskrivelse av involverte prosesser dekkes i annen utredning for NorACIA, derfor gir vi her kun et kort sammendrag om sjøis i klimamodeller og hva IPCC-AR4 prognosene viser.

Parkinson (2006) har sammenlignet resultater for sjøis fra 11 globale klimamodeller (GCM) med satellittobservasjoner for 1979–2004 og funnet at alle modellene har årssykluser med faser som er tilnærmet korrekt for begge hemisfærer. Ingen av modellene har vinteris vest for Norge, men de fleste gir mer is rett nord for Finnmark enn observasjonene viser, noe som trolig skyldes at den nordatlantiske strømmen er for svak i modellene.

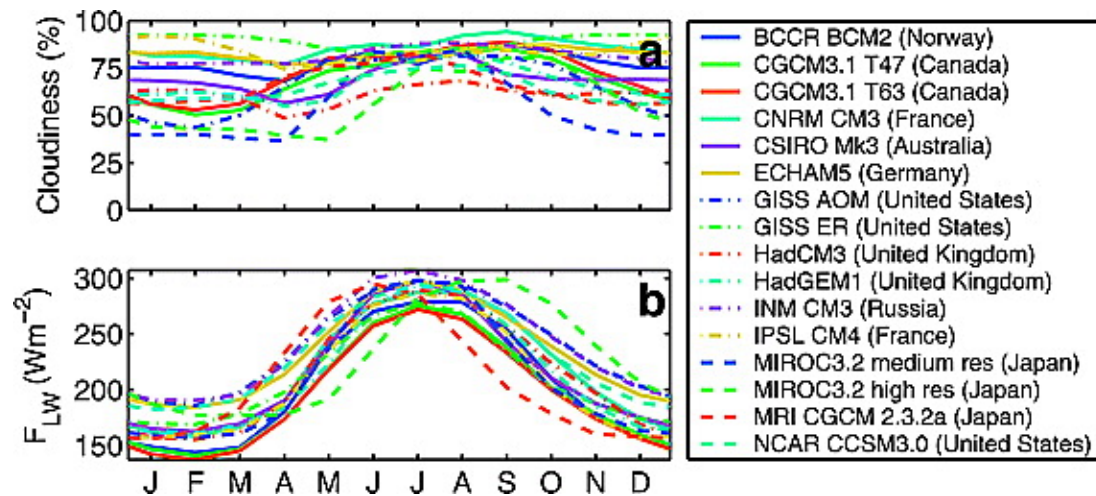
Overland (2007) har brukt resultater fra et utvalg av IPCC modeller som reproducerer den observerte regionale sjøiskonsentrasjonen i perioden 1979–1999 rimlig bra og konkluderer med at reduksjonen i sjøis vil være minst 40% i 2050 i det Arktiske havbassenget. Han trekker også frem at modellutvalget gir svært konsistente resultater for ulike regioner og nevner særlig betydningen av tynnere is og at øket areal med åpent vann vil akselerere reduksjonen i sjøis.



Figur 3. Sammenligning mellom alle IPCC-AR4 modeller og observasjoner av sjøisutbredelse om sommeren i Arktis (Figur fra Asgeir Sorteberg, BCCR). Den observerte utviklingen har vært mer drastisk enn samtlige modellprognoser (venstre panel). Utviklingen av sjøisarealet i 2007, sammenlignet med tidligere rekordår 2005 og langtidsmiddelet (høyre panel; fra http://nsidc.org/news/press/2007_seaiceminimum/20070810_index.html).

Klimamodeller simulerer sirkulasjonen og termodynamikken i den globale atmosfæren, havet og sjøisen. Den tette koblingen mellom sjøis og atmosfære og hav, og de kraftige tilbakekoblingene, har vært kjent lenge og er studert av mange [Maykut og Untersteiner, 1971; Ebert og Curry, 1993]. Eisenman et al. (2007) presenterer en systematisk studie av følsomheten sjøis har for endringer i skydekke og stråling i et sett av IPCC-AR4 simuleringer for perioden 1850-2000 med realistisk utvikling i klimapådriv ('Climate of the 20th Century scenario'). Selv om forskjeller mellom modeller typisk er størst i polarområdene (figur 4 viser den store spredningen i skydekke og stråling mellom modellene nord for 70° N) finner de at de fleste av modellene som inngår reproducerer observert sjøis tilfredsstillende. De mener at dette bare kan være oppnådd gjennom å 'tune' modellen mot observert isklimate. Gjennom tester med termodynamiske standardmodeller av sjøis kjørt til likevekt, finner de at spredningen i langbølget stråling mellom klimamodellene produserer istykkelses som varierer mellom 1 og 10 meter. Denne størrelsen er ekstremt følsom for endringer i is-albedo slik at feil i modellert skydekke lett kan kompenseres med å endre is-albedo. Analysen

som presenteres indikerer at resultater for sjøis fra de aktuelle klimamodellene ikke kan brukes som en troverdig prognose for fremtidig sjøisdekke i Arktis.



Figur 4. Simulert Arktis (70–90°N arealgjennomsnitt) 1980–1999 gjennomsnittlig sesongsyklus fra simuleringer med realistisk klimapådriv utført for IPCC AR4. (a) Totalt vertikalt integrert skydekke. (b) Innkommende langbølget stråling ved bakken. Forskjellene i simulert skydekke er stor og medfører signifikante forskjeller i det langbølgede strålingsbudsjettet. Figur fra Eisenman (2007).

7 Oppsummering

Aerosoler, skyer, sjøis og strålings-/energibudsjett danner et tett koblet system i Arktis med komplekse tilbakekoblingsmekanismer, både i negativ og positiv retning. Aerosoler er generelt komplisert å håndtere i klimasammenheng pga deres egenskaper og påvirkning på direkte og indirekte måte. En aktuell sammenfatning at deres samlede påvirkning på klimaet er gitt i Hansen et al. (2005), figur 28. Konklusjonen fra Hansen et al. er at sot fra fossil brensel (som er dominerende i Arktis i dag) gir et positivt bidrag til klimapådrivet, og at dette er særlig effektivt i Arktis. I hvilken grad og retning aerosolene påvirker skydekket i Arktis er usikkert per i dag og krever en større og mere representativ innsats innen skymikrofysikk enn de få store toktene som dagens kunnskap bygger på.

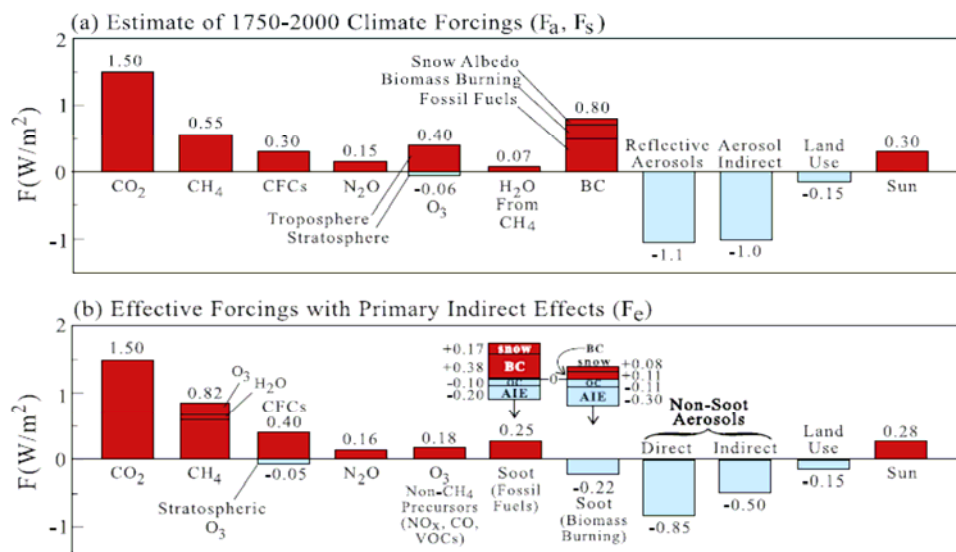


Figure 28. (a) A specific estimate of climate forcings for 1750–2000. (b) Same as Figure 28a, but with the effective forcing partially sorted by sources.

Skydekket og skyenes egenskaper har endret seg signifikant både om vinteren (mindre skyer) og våren (mer skyer) og i mindre grad om sommeren (mer skyer). Mens nedgangen om vinteren kan være forårsaket av endret påvirkning fra aerosoler, er endringen om våren og sommeren sannsynligvis forårsaket av reduksjonen av sjøis. Omvendt, så ser det ut som om skyene gjennom fluks av langbølget stråling har påvirket isutbredelsen i hvert fall fram til 1990-tallet. De siste årene ser det derimot ut som om havtemperaturen har fått langt større innflytelse og at skyene heller har blitt den reagerende delen i et samspill der også atmosfæresirkulasjon har en viktig rolle.

Observasjoner fra sommeren 2007 viser imidlertid at ekstreme forhold i grad av skydekket kan ha en vesentlig innvirkning på utbredelsen av havis når isen er tynn og dermed er følsom for små endringer. I så måte vil både skyforhold og aerosoler være sentrale for den fremtidige utviklingen av sjøis og dermed hele det regionale klimaet i det sentrale Arktis.

Referanser

- ACIA, Arctic climate impact assessment. Cambridge University Press, Cambridge, pp 140, 2004
- AMAP Assessment 2006: Acidifying pollutants, Arctic haze and acidification in the Arctic, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway, ISBN 82-7971-046-9, 2006.
- Byrkjedal, Ø., I. Esau, N.G. Kvamstø, Sensitivity of simulated wintertime Arctic atmosphere to vertical resolution in the ARPEGE/IFS model, *Clim. Dyn.*, 2007.
- Chapman, W. L., and J. E. Walsh, Simulations of Arctic temperature and pressure by global coupled models, *J. Clim.*, 20, 609-632., 2006.
- Comiso, J. C., Warming trends in the Arctic from clear sky satellite observations, *J. Clim.*, 16, 3498-3510, 2003.
- Curry, J.A., and E. E. Ebert, Annual cycle of radiation fluxes over the Arctic Ocean: Sensitivity to cloud optical properties. *J. Climate*, 5, p 1267-1280, 1992.
- Eckhardt, S., K. Breivik, S. Manø, and A. Stohl, Record high peaks in PCB concentrations in the Arctic atmosphere due to long-range transport of biomass burning emissions, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 7, 6229-6254, 2007.
- Eisenman, I., N. Untersteiner, and J. S. Wettlaufer, On the reliability of simulated Arctic sea ice in global climate models, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L10501, doi:10.1029/2007GL029914, 2007.
- Esau, I. N., Amplification of turbulent exchange over wide Arctic leads: Large-eddy simulation study, *J. Geophys. Res.*, 112, D08109, doi:10.1029/2006JD007225, 2007.
- Francis, J. A., E. Hunter, J. R. Key, and X. Wang, Clues to variability in Arctic minimum sea ice extent, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L21501, doi:1029/2005GL024376, 2005.
- Francis, J. A., and E. Hunter, New insight into the disappearing Arctic sea ice, *EOS*, 87, no. 46, 509-511, 2006.
- Francis, J. A., and E. Hunter, Drivers of declining sea ice in the Arctic winter: A tale of two seas, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L17503, doi:10.1029/2007/GL030995, 2007.
- Fromm, M. D., and R. Servranckx, Transport of forest fire smoke above the tropopause by supercell convection, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1542, doi:10.1029/2002GL016820, 2003.
- Hansen, J., et al., Efficacy of climate forcings, *J. Geophys. Res.*, 110, D18104, doi:10.1029/2005JD005776, 2005.
- Hahn, C. J., S. G. Warren, and J. London, The effect of moonlight on observations of cloud cover at night, and applications to cloud climatology, *J. Clim.*, 8, 1429-1446, 1995.
- IPCC, Climate Change 2007 – The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment of the IPCC, ISBN 978 0521 88009-1, 2007.
- Kato, S., N. G. Loeb, P. Minnis, J. A. Francis, T. P. Charlock, D. A. Rutan, E. E. Clotiaux, and S. Sun-Mack, Seasonal and interannual variations of top-of-atmosphere irradiance and cloud cover over polar regions derived from the CERES data set, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L19804, doi:10.1029/2006GL26685, 2006.

- Leck, C., and E. K. Bigg, Aerosol production over remote marine areas – A new route, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3577-3581, 1999.
- Leck, C., and E. K. Bigg, Source and evolution of the marine aerosol – A new perspective, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L19803, doi:10.1029/2005GL023651, 2005.
- Liu, Y., J. R. Key, J. A. Francis, and X. Wang, Possible causes of decreasing cloud cover in the Arctic winter, 1982-2000, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L14705, doi:10.1029/GL030042, 2007.
- Overland, J. E., and M. Wang, Future regional Arctic sea ice declines, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L17705, doi:10.1029/2007GL030808, 2007.
- Parkinson, C. L., K. Y. Vinnikov, and D. J. Cavalieri, Evaluation of the simulation of the annual cycle of Arctic and Antarctic sea ice coverages by 11 major global climate models, *J. Geophys. Res.*, 111, C07012, doi:10.1029/2005JC003408, 2006.
- Sandvik, A., M. Biryulina, N. G. Kvamstø, J. J. Stamnes, and K. Stamnes, Observed and simulated microphysical composition of arctic clouds: Data properties and model validation, *J. Geophys. Res.*, 112, D05205, doi:10.1029/2006JD007351, 2007.
- Schweiger, A. J., R. W. Lindsay, J. R. Key, and J. A. Francis, Arctic clouds in multiyear satellite data sets, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 1845-1848, 1999.
- Schweiger, A. J., R. W. Lindsay, J. A. Francis, J. Key, J. M. Intrieri, and M. D. Shupe, Validation of TOVS Path-P data during SHEBA, *J. Geophys. Res.*, 107, no. C10, 8041, doi:10.1029/2000JC000453, 2002.
- Schweiger, A. J., Changes in seasonal cloud cover the Arctic seas from satellite and surface observations, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L12207, doi:10.1029/2004GL020067, 2004.
- Sorteberg, A., V. Kattsov, J.E.Walsh and T. Pavlova (2007), The Arctic surface energy budget as simulated with the IPCC AR4 AOGCMs, *Clim. Dyn.*, 29, p131-156.
- Stohl A., E. Andrews, J. F. Burkhardt, C. Forster, A. Herber, S. W. Koch, D. Kowal, C. Lunder, T. Mefford, J. A. Ogren, S. Sharma, N. Spichtinger, K. Stebel, R. Stone, J. Ström, K. Tørseth, C. Wehrli, and K. E. Yttri, Pan-Arctic enhancements of light absorbing aerosol concentrations due to North American boreal forest fires during summer 2004, *J. Geophys. Res.*, 111, D22214, doi:10.1029/2006JD007216, 2006.
- Tomasi, C., V. Vitale, A. Lupi, C. di Carmine, M. Campanelli, A. Herber, R. Treffeisen, R. S. Stone, E. Andrews, S. Sharma, V. Radionov, W. von Hoyningen-Huene, K. Stebel, G. H. Hansen, C. L. Myhre, C. Wehrli, V. Aaltonen, H. Lihavainen, A. Virkkula, R. Hillamo, J. Ström, C. Toledano, V. E. Cachorro, P. Ortiz, A. M. deFrutos, S. Blindheim, M. Frioud, M. Gausa, T. Zielinski, T. Petelski, and T. Yamanouchi, Aerosols in polar regions: A historical overview based on optical depth and in situ measurements, *J. Geophys. Res.*, 112, D16205, doi:10.1029/2007JD008432, 2007.
- Vavrus, S., The impact of cloud feedbacks on Arctic climate under greenhouse forcing, *J. Clim.*, 17, 603-615, 2004.
- Wang, X., and J. R. Key, Recent trends in Arctic surface, cloud, and radiation properties from space, *Science*, 299, 1725-1728, 2003.
- Wang, X., and J. R. Key, Arctic surface, cloud, and radiation properties based on the AVHRR Polar Pathfinder dataset. Part I: Spatial and temporal characteristics, *J. Clim.*, 18, 2558-2574, 2005.
- Wang, X., and J. R. Key, Arctic surface, cloud, and radiation properties based on the AVHRR Polar Pathfinder dataset. Part II: Recent trends, *J. Clim.*, 18, 2575-2593, 2005.
- Xie, Z., L. Sun, J. D. Blum, Y. Huang, and W. He, Summertime aerosol chemical components in the marine boundary layer of the Arctic Ocean, *J. Geophys. Res.*, 111, D10309, doi:10.1029/2005JD006253, 2006.