

UNIVERSITETET I OSLO
Institutt for geofag Avdeling
MetOs

Studier av
cirruskyer sett fra
satellitt i relasjon til
flytrafikk

Masteroppgave i
geofag; meteorologi
og oseanografi

Jakob Bork

01.04.2007



Forord

Det er litt vemodig at jeg i dette øyeblikk skriver mine siste ord på denne masteroppgaven. En lang og innholdsrik prosess er snart ved veis ende. I løpet av denne prosessen har flere personer bidratt til oppgaven av ulike innslag, både med verdifull kunnskap og nyttige innspill.

Først og fremst vil jeg benytte anledningen til å takke min veileder, Frode Stordal (Universitet i Oslo, Institutt for Geofag, Avdeling MetOs), for et særdeles strålende og lærerikt samarbeid. Hans kompetanse innenfor feltet om kondensstriper har vært av verdifull betydning for denne oppgaven. Samtidig vil jeg også utbringe en stor takk til Tore Flatlandsmo Berglen for uthenting og tilrettelegging av data fra ECMWF-modellen. I den forbindelsen vil jeg videre takke Thor Erik Nordeng og Jostein K. Sundet for nyttige innspill angående variabiliteter i ECMWF-dataene. Sist, men ikke minst, vil jeg rette en spesielt stor takk til Eric Jensen (NASA) for tilsendelse av dataprogrammet som uttrykker Schmidt-Appleman kriteriet.

Mine medstudenter fortjener så absolutt også noen varme tanker. Spesielt gjelder det Kristian, som har vært med hele den lange flytteveien fra et nedslitt, gammelt skur i lesesalen i 12 etg. til et nyoppusset lokale i CIENS, fylt med lamunger! En storskala-takk til Bjørn Egil (nå meteorolog, ser man det!) for alltid like behjepelig på datafronten. Helt til slutt vil jeg takke min kjære Nina, for korrekturlesingen og all den fantastiske støtten gjennom hele perioden.

Oslo, den 1/4-2007
Jakob Bork

Abstract

On a sunny, cloudless day we often recognize condensation trails (contrails) behind jet aircrafts as narrow, white stripes. Contrails form as a mixture of warm, humid exhaust gases and colder, drier air exceeds water saturation in the plume. The exhaust particles may allow ice nucleation at lower supersaturations than those required under natural conditions. If the relative humidity with respect to ice is higher than 100%, then contrails may persist and evolve into high-level cirrus clouds. The anthropogenic cirrus clouds have the potential for affecting climate via radiative forcing. Because of the rising global air traffic over the past decades and its associated contrails, there have been a substantial focus on estimates of radiative forcing from contrails compared to the total anthropogenic radiative forcing.

In this study we use daily data rather than monthly means in comparison to previous studies. The daily data consists of three different datasets taken for one week during summer. For predicting the environmental conditions required for contrail formation and persistence, we have used the Schmidt-Appleman criterion. Correlations will be spatially executed for different cirrus parameters before and after filtering out air traffic, globally and for four high-density air traffic areas.

Results from the Schmidt-Appleman criterion indicate best conditions for contrail formation over East-Asia, and parts of Central-Europe and the North-Atlantic flight corridor. But the overall correlations shows a weak agreement between cirrus cloudiness and air traffic density, and even negative for some geographical locations. Best agreement is located over most of Asia, where the summer monsoon is responsible for the high cirrus occurrence over this area. In addition, these contrails can persist and consequently affect the Earth's radiative balance.

Reanalysis from ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) shows that the satellite observations of cirrus can be partly explained by the weather conditions for the current week, and consequently affect the contrail formation. There are several uncertainties regarding the correlation results, like modeling of humidity from ECMWF. To improve the results, advection of aircraft induced cirrus should be taken into account.

Innhold

1	Innledning	3
1.1	Tidligere studier	5
1.2	Beskrivelse av oppgaven	9
2	Teori	11
2.1	Dannelse av kondensstriper	12
2.1.1	Skydråpedannelse i relasjon til flytrafikk	12
2.1.2	Iskrystalldannelse i relasjon til flytrafikk	17
2.2	Strålingsegenskaper til cirruskyer	23
2.3	Satellitter	26
2.3.1	Geostasjonære satellitter	26
2.3.2	Polarbane satellitter	27
3	Metode	31
3.1	Datsett fra ISCCP	31
3.2	Datsett fra AERO2k	34
3.3	Datsett fra ECMWF	35
3.4	Programoppsett i MATLAB	37
4	Resultater og tolkning	39
4.1	Resultater fra cirrus optisk tykkelse	44
4.2	Resultater fra cirrusfraksjon	60
4.3	Resultater fra cirrusprodukt	73
4.4	De meteorologiske forholdene for 10-16 juni 2002	84
4.5	Usikkerheter i resultatene	100
5	Oppsummering og konklusjon	105
	Bibliografi	113

Kapittel 1

Innledning

Flytrafikk spiller en betydelig rolle i infrastrukturen av dagens samfunn, og påvirker et mangfold av aspekter, både når det gjelder den globale økonomien, men ikke minst også det regionale og globale klimaet. Selv om bidragene fra flytrafikk er forholdsvis små, har den stadig økende veksten i sivil flytransport ført til mer fokus rundt betydningen av flytrafikk på klimaet. Dette gjelder spesielt på regional skala fordi flytrafikk generelt vil ha relativt liten effekt i den globale sammenheng, når man sammenlikner med andre antropogene kilder.

Flytrafikk er en del av et større komplekst bilde. Antropogene utslipp ved jordas overflate er betydelig større enn i øvre troposfære/lavere stratosfære (som heretter betegnes som ØT/LS) pga. kildene er lokalisert her, men tapsraten er tilsvarende stor som har sammenheng med sedimentering og nedbør. Disse utslippene ved bakken kan videre bli transportert til høyere nivåer i atmosfæren ved konveksjon eller ekstratropiske sykloner alt etter hvor man befinner seg på kloden, hvor bakgrunnskonsentrasjonene er små og oppholdstiden lengre. Det er dette som er den unike egenskapen til fly; de er lokalisert mange kilometer over jordas overflate hvor små flyemisjoner kan ha relativt stor innvirkning på de kjemiske og fysiske prosessene. Emisjonene avhenger altså sterkt av flyhøyden og om flyene er lokalisert i troposfæren eller stratosfæren. F.eks. vil utslipp av vanndamp i den tørre stratosfæren ha langt større påvirkning enn i den mer fuktige troposfæren.

Flytrafikkemisjonene er mange, og av variert betydning. Flyene slipper ut både gasser og faste aerosolpartikler, deriblant vanndamp, svovel/nitrogenkomponenter (SO_x/NO_x) og kjemiioner, hvor førstnevnte er helt essensiell i denne oppgaven. Gassene deltar videre i gass-til-partikkel overføring, som videre medfører dannelsen av flyktige aerosoler i plumen¹. Disse flyktige aerosolene fungerer sammen med sot-partikler som effektive kondensasjonskjerner (CCN), der vanndamp kan avsettes og heterogen frysing videre medfører

¹En plume defineres som den varme og ekspanderende utslippsbobelen bak flymotoren bestående av eksospartikler og kondensbare gasser.



Figur 1.1: Kondensstriper fra fly tatt over Oslo den 30. januar 2003.

dannelse av ispartikler. Dannelse av kondensstriper (på eng; cloud condensation trails, også kalt contrails) er nettopp én av 3 prosesser som modifierer atmosfæren som resultat av emisjoner fra fly:

- direkte emisjoner av strålingsaktive substanser, som f.eks. H_2O eller CO_x
- emisjon av kjemiske bestanddeler som enten produserer eller ødelegger strålingsaktive substanser som f.eks. NO_x , som modiserer ozonkonsentrasjonen i troposfæren og stratosfæren, og tilsvarende for metankonsentrasjonen
- emisjon av substanser som utløser dannelsen av aerosolpartikler som videre kan medføre dannelse av kondensstriper, og endring av naturlig skydekke hvis forholdene ligger til rette for det

Det er nettopp det siste punktet som er essensen i denne oppgaven (kondensstriper i figur 1.1). Mye forskning som er gjort i forbindelse med flytrafikk- og cirrustrender, viser at det er en økende trend i cirrusmengden i visse områder med mye flytrafikk (Minnis m.fl., 2004). Samtidig forventer man en 5% økning i sivil flytrafikk pr. år de neste 10-15 årene (Airbus., 1997; Boeing., 1997; Basseur m.fl., 1998), og av den grunn er det helt nødvendig med mer omfattende og detaljert forskning rundt klimaeffekter fra kondensstriper. Gitt at den predikerte veksten i flytrafikk faktisk forekommer i det

omfanget nevnt ovenfor, skulle man forvente større klimaeffekter fra luftfart i framtiden, både på regional og global skala.

Kondensstriper fra fly kan påvirke klimaet fordi de kan opprettholdes over lengre tid, gjerne mange minutter og helt opptil flere timer hvis omgivelsenes forhold ligger til rette for det. De to viktigste parametre som styrer dannelsen av kondensstriper er temperatur og relativ fuktighet, som er høyest variabel i atmosfæren. Videre vil inntrengning av luft fra omgivelsene styre plumeutviklingen av disse to parametrene, og dermed dannelsen av kondensstriper. For at kondensstriper skal kunne opprettholdes må lufta til omgivelsene være overmettet m.h.p. is. Kondensstripene kan dermed utvikle seg til antropogene cirruskyer, som har de samme strålingsegenskapene som naturlig, tynne cirruskyer. De reflekterer den kortbølgete strålingen fra sola, og absorberer og emitterer den langbølgete strålingen fra bakken og atmosfærelagene. Dette forårsaker i et strålingspådriv som instantant oppvarmer atmosfæren og oppvarmer/avkjøler jordas overflate, og på den måten bidra til å redusere den døgnlige variasjonen i bakketemperatur (Travis m.fl., 2002).

Siden kondensstriper dannet fra fly kan være en effektiv modifikator av skydekket, og resulterende strålingspådriv, er det av stor interesse med framtidig forskning av cirrustrender, spesielt i områder med mye flyvninger sett i perspektiv av den predikative veksten i flytrafikk. Det er gjort utallige studier av kondensstripedannelse, cirrustrender og klimaeffekter verden over, som gir nødvendig og forbedret kunnskap innen dette feltet. Professor Frode Stordal ved Universitetet i Oslo, som forøvrig er veileder for denne oppgaven, har selv viet mye tid til forskning av fly-induserte cirrustrender.

1.1 Tidligere studier

Studier av kondensstripe -og cirrustrender er absolutt ikke noe nytt, og det er blitt viet mye tid til forskning innen dette feltet de siste tiårene. I det påfølgende presenteres det noen få artikler som omhandler dette temaet.

Et eksempel er et studie av Stordal m.fl. (2005) hvor de så på trender i cirruskydekket i relasjon til flytrafikk. Trendene var basert på månedsdata fra ISCCP (International satellite Cloud Climatology Project) over en 16 års periode fra 1984-1999. Resultatene ble romlig korrelert med flytrafikkdata for å kalkulere endringen i cirruskydekket forårsaket av flytrafikk. Resultatene indikerte at mengden av cirruskyer har økt i samsvar med økning i flytrafikk for de respektive årene, som er i sterk kontrast med den generelle negative trenden i cirruskydekket (Norris, 2005). F.eks. over Europa ga resultatene en trend på ca. 1-2% pr. tiår i cirrusdekket som følge av flytrafikk, som er i rimelig samsvar med tidligere studier. De fant altså at den største innflytelsen på cirruskydekket, oppsto i områder med mest flytrafikk. Samtidig kalkulerte de et globalt gjennomsnittlig estimat av strålingspådrivet fra cirrus på +0.03

Wm^{-2} , som nesten korresponderer med den øvre verdien på $+0.04 Wm^{-2}$ gitt i IPCC-reporten Penner m.fl. (1999). De konkluderte videre med at det er indikasjoner på økning i cirrusskydekket over de siste 2 tiårene i områder med mye flytrafikk, som potensielt kan bidra til global oppvarming. Men uansett er korrelasjonen mellom cirrustrenden og flytrafikken bare moderat ettersom mange andre faktorer også kan ha bidratt til endring i cirrusdekket over samme tidsperiode. Resultatene kan ha blitt påvirket av naturlig variabilitet, klimaendring og andre antropogene kilder. Man kunne altså ikke trekke noen faste konklusjoner eller kvantifisere effekten med stor sikkerhet. En mulighet for forbedring i resultatene, kunne vært å benytte daglig data heller enn månedsmiddel, og tatt høyde for adveksjon av fly-indusert cirrus ².

En annen utfordring i forbindelse med studier av fly-induserte cirrustrender, er vanskeligheten med å skille mellom lineær kondensstriper og cirrusskyer som utvikler seg fra dem. Mange av analysene benytter satellittdata, hvor satellittene er basert på lineære oppdagelsesalgoritmer av kondensstriper. Problemet med å identifisere kondensstripene korrekt, oppstår hvis de opprettholdes og blir diffuse og utstrakte i formen. Disse blander seg da med naturlig cirrus, og det er praktisk talt umulig å skille mellom naturlig og antropogen cirrus. Av den grunn representerer derfor ofte strålingspådrivet en lavere grense.

Dette problemet gjenkjennes i Minnis m.fl. (2004). For å redusere usikkerheten i klimaeffekter fra fly-induserte cirrusskyer, ble det innført en spredningsfaktor. Spredningsfaktoren representerte altså maksimum endring i cirrusdekke som følge av kombinasjonen av lineære kondensstriper og cirrusskyer utviklet fra dem. I dette studiet ble det benyttet bakke -og skipsobservasjoner over en periode fra 1971-1995, samtidig som man også brukte relativ fuktighetsdata fra NCEP (National Centers for Environmental Prediction) og satellittdata fra ISCCP som et ekstra hjelpemiddel i analysen av evt. fly-induserte cirrustrender. Resultatene viste en signifikant økning i cirrus over USA og nordlige havområder, relativt konstant over Vest-Europa og minning over andre landområder. Cirrustrender over land var positivt korrelert med ØT-fuktighet (300hPa), unntatt over USA og Vest-Europa hvor det var mest flytrafikk. Over havområdene var derimot cirrustrendene negativt korrelert med relativ fuktighet fra NCEP. Man fant videre at det var statistisk signifikant samsvar i sesongtrender mellom mengden av cirrus og kondensstriper over USA, mens dette ikke var tilfelle over Vest-Europa. Minnis konkluderte med dette at cirrustrendene over USA hovedsakelig var forårsaket av flytrafikk.

Cirrusøkningen var ca. en faktor 1.8 større enn hva man skulle forvente fra estimerer av lineære kondensstriper. Dette antydte at en spredningsfaktor av samme størrelsesorden kunne benyttes til å beregne en øvre grense for strålingspådriv fra både lineære kondensstriper og cirrusskyer utledet fra dem. Re-

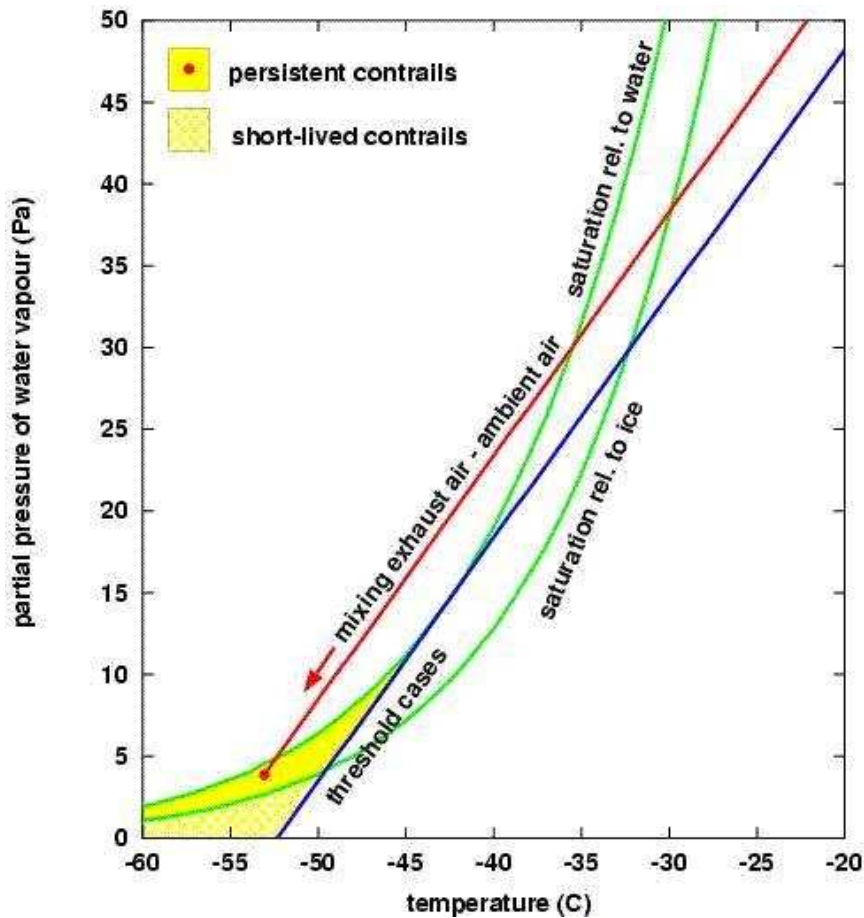
²kommer nærmere inn på adveksjon i delkap. 4.5.

sultater fra simulering av kondensstriper ved bruk fra GCM-modell (General Circulation Model), viste at cirrustrenden over USA forårsaket en troposfærisk oppvarming på 0.2-0.3°C pr tiår i det respektive tidsintervallet. Temperaturendringene var altså basert på enkle og begrensede GCM-kalkuleringer og hvor det i likhet med Stordal m.fl. (2005) studiet ble antatt at cirruskydekket var den eneste parameteren som ble endret gjennom perioden. Endringer i aerosolkonsentrasjoner, drivhusgasser, den geografiske fordelingen av skyer og andre flytrafikkeffekter ble ikke tatt høyde for. Men studiet indikerte at kondensstriper allerede har betydelige regionale effekter i områder med mest flytrafikk, og at den økende veksten i flytrafikk gjør at klimaeffekter fra kondensstriper kan utvikle seg til å bli signifikant på global skala.

Men det er langt ifra alle studier som tar for seg langvarige trender i kondensstriper og cirrus, og deres påfølgende klimaeffekter. I Jensen m.fl. (1998), som er meget sentral i min oppgave, tar man for seg hvilke forhold i omgivelsene som kreves for dannelse og opprettholdelse av kondensstriper. Temperatur og relativ fuktighet til omgivelsene ble bestemt fra målinger ved SUCCESS (Subsonic Aircraft: Contrail and Cloud Effects Special Study). Grensetemperaturer ved dannelse av kondensstriper ble sammenliknet med teoretiske estimater basert på en enkel modell av plumeutviklingen. Studier av plumeutviklingen viser at plumen fortynnes i samsvar med en enkel Gaussisk fortynningslov (Miake-Lye m.fl., 1993), som også ble benyttet i Jensen m.fl. (1998). På tross av enkelheten til modellen i Jensen m.fl. (1998), gjengir den et realistisk bilde av virkeligheten. Den eneste antakelsen som ble gjort, var at temperaturen og konsentrasjonen av vanndamp i plumen ble styrt av inn-trenging av luft fra omgivelsene.

Observerte initialiseringstemperatur for dannelse av kondensstriper viste seg å ligge 0-2 K under metningstemperaturen m.h.p. flytende vann, som antyder at metning m.h.p. flytende vann må oppnås et visst stadiet i plumeutviklingen. Dette kalles Schmidt-Appleman kriteriet (referes også til fuktighetskriteriet senere i oppgaven). Disse forholdene i omgivelsene påkrevd for dannelsesprosessen er bl.a. brukt i denne oppgaven som et kriterie for å filtrere ut flydistansepunkter³. Schmidt-Appleman kriteriet er videre illustrert i figur 1.2. Figuren viser partialtrykket for vanndamp som funksjon av temperaturen, for tilfellet hvor luft fra omgivelsene mikses med luft fra plumen. Metningskurven m.h.p. vann og is er også plottet i samme figur. Når varm, fuktig luft fra flymotoren blandes med kaldere, tørrere luft (lavere absolutt fuktighet) fra omgivelsene, vil det generere en økning i relativ fuktighet. Denne økningen kan videre medføre metning m.h.p. vann i plumen hvis omgivelsenes luft er lavere enn en kritisk temperatur T_c (gult område), med et korresponderende kritisk metningsforhold m.h.p. is, $S_{i,crit}$. Denne kritiske temperaturen avhenger av trykket, fuktigheten og temperaturen til omgivelsene, men også

³Definisjonen av et flydistansepunkt er gitt ved om det er registrert flyvninger innenfor en vilkårlig gridboks, uavhengig om hvor mye flytrafikk som er observert.



Figur 1.2: *Illustrasjon av Schmidt-Appleman kriteriet.* Kilde: From Klaus Gierens, www.cost723.org/school/material/lectures/MOD10_cirrus_clouds_gierens.ppt

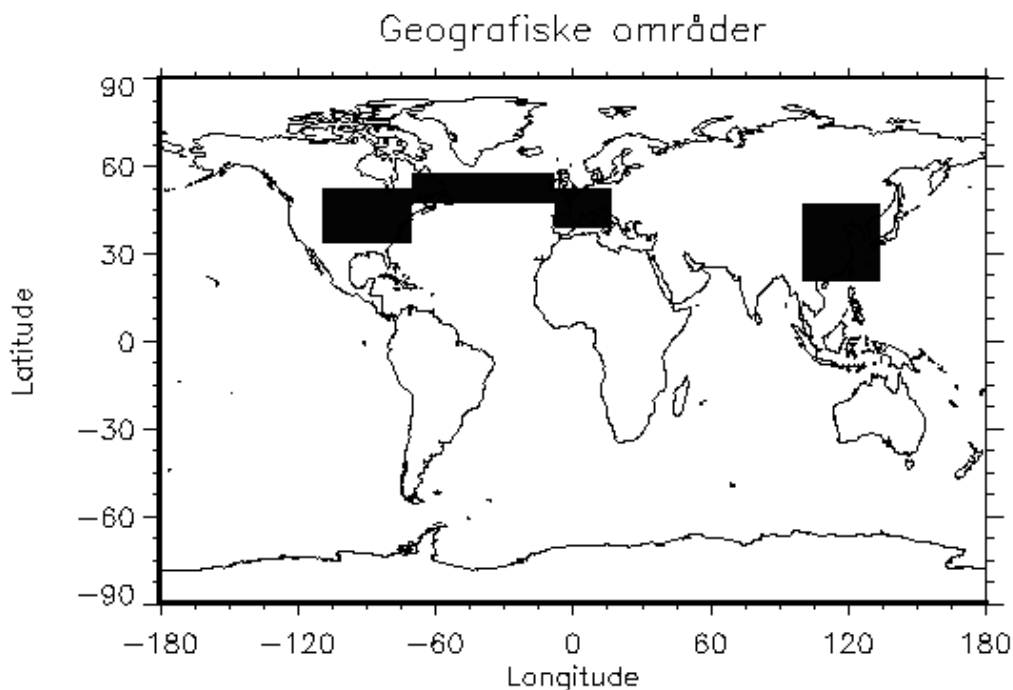
av motoreffektiviteten til flyet. Hvis lufta er umettet m.h.p. is, vil ikke kondensstripene kunne opprettholdes mere enn få minutter (lyse-gult område). Derimot for tilfeller hvor lufta er overmettet m.h.p. is, kan kondensstripene opprettholdes opptil flere timer og utvikle seg til antropogene cirruskyer som gjør dem umulig å skille fra naturlige cirruskyer.

I noen få tilfeller i SUCCESS observerte man at metning m.h.p. flytende vann ikke nødvendigvis trengte å være oppfylt i plumen. Kondensstripene ble da som regel dannet ved relativt høye temperaturer ($\geq -50^{\circ}\text{C}$) og med høy overmetning m.h.p. is til omgivelsene, og gjerne i kombinasjon med cirrus som allerede var lokalisert der fra før. Det siste er et viktig poeng. Det ville i disse tilfellene bli tilført en ekstra vandampskilde ved at iskrystaller fra den diffuse cirrusen i omgivelsene, entrert motoren og sublimerte raskt. I disse varme tilfellene, ble det observert at omgivelsenes luft måtte være betydelig overmettet m.h.p. is over store områder, slik at disse synlige kondensstripene kunne opprettholdes og vokse.

Som sagt er Jensen-studiet en viktig brikke i oppgaven min. Jeg har bl.a. benyttet de samme teoretiske beregninger av grensetemperaturer og kritiske overmetninger m.h.p. is for dannelse av kondensstriper, som videre benyttes i filtreringsprosessen. Jensen m.fl. (1998) vil derfor beskrives mer detaljert senere i oppgaven.

1.2 Beskrivelse av oppgaven

Målet med denne oppgaven er å studere sammenhengen mellom cirruskydekke og flytrafikk for perioden 10-16 juni 2002. I motsetning til mange tidligere studier som omhandler cirrustrender i relasjon til flytrafikk, benytter jeg altså daglig data framfor månedsmiddel. Dataene består både av observasjoner og modellresultater. Satelitt -og flytrafikkdata er hentet fra hhv. ISCCP og AERO2k⁴, mens modellresultatene er hentet fra ECMWF-modellen.



Figur 1.3: De fire regionale områdene som benyttes i korrelasjonsanalysen.

Cirrus optisk tykkelse, cirrusfraksjon og produktet mellom disse to parametrene (som heretter betegnes som cirrusproduktet), blir romlig korrelert med flytrafikkdata. Samtidig benyttes samme metodikk som i Jensen m.fl. (1998), hvor både grensetemperaturen til omgivelsene for at man skal oppnå metning m.h.p. flytende vann i plumen beregnes sammen med det tilhørende kritiske metningsforholdet m.h.p. is for å utløse dannelse av kondensstriper.

⁴Flyprosjekt fra Centre for Air Transport and the Environment.

Disse kriteriene brukes til å filtrere ut flydistansepunkter som da ikke er egnet for dannelsesprosessen, og de resterende punktene blir deretter også romlig korrelert med de tre nevnte parametrene. For å estimere fly-induserte cirrustrender, sammenliknes korrelasjonsresultatene før og etter filtrering for ulike tidspunkter. Dette blir gjort både globalt og for fire avgrensede geografiske områder; USA, Øst-Asia, Sentral-Europa og den Nord-Atlantiske flysektoren fra Europa over til Nord-Amerika. Disse områdene er interessante pga. høy tetthet av flytrafikk. Figur 1.3 viser hvor stor del disse områdene utgjør på det globale kartet.

Denne oppgaven er lagt opp som følger: i kap. 2 presenteres relevant teori i forbindelse med skyenes mikrofysikk og strålingsegenskaper, og satellittypene som benyttes i ISCCP. Kap. 3 tar for seg en beskrivelse av datasettene fra ISCCP, AERO2k og ECMWF, og litt om programstrukturen som brukes i beregning av resultatene. Resultatene blir videre presentert i kap. 4 sammen med tilhørende diskusjon og tolkning. Helt til slutt i denne oppgaven gis det i kap. 5 en kort sammenfatning, hvor jeg også trekker noen konklusjoner ut fra resultatene.

Kapittel 2

Teori

I dette kapittelet skal jeg ta nærmere for meg de fysiske prosessene i skyer. Først vil det bli sett på teorien bak dannelse av både skydråper og iskrystaller i relasjon til flytrafikk. Grunnen til at også skydråpedannelsen blir beskrevet, er at dannelse av iskrystaller kan skje ved to faseoverganger, hvor den ene overgangen inkluderer flytende dråper:

- Frysing av flytende dråpe
- Direkte deposisjon av damp til fast form

Begge disse prosessene er såkalte nukleasjonsprosesser, og kan klassifiseres ved homogen (uten iskjerne) -og heterogen nukleasjon (med iskjerne). Både frysing av flytende dråper og deposisjon av damp til fast form forekommer i plumen (se figur 2.3). Homogen deposisjon av vanndamp til fast form vil i praksis aldri forekomme i atmosfæren, fordi det kreves altfor høy overmetning. Derfor vil flytende dråper dannes på bekostning av iskrystaller, heller enn homogen deposisjon. Umiddelbart når disse flytende dråpene er dannet, kan derimot vannmolekyler forme en slags stabil kjernestruktur med samme egenskaper som en iskjerne. Nå kan dråpen fryse spontant til en iskrystall. Dette kalles for homogen frysing, og viser viktigheten av å skille mellom homogen deposisjon og frysing. I 2.1.2 beskrives fire eksempler på heterogen nukleasjon. Dette er altså dannelse av en iskrystall vha. av iskjerner, i form av små partikler i atmosfæren. Vi så for homogen deposisjon at denne prosessen aldri kunne forekomme i praksis, fordi vanndamp ikke ville gå direkte til fast form, men via flytende faseovergang. Dette kan derimot skje for heterogen deposisjon. Hvor godt de forskjellige aerosolene i atmosfæren fungerer som iskjerner, avhenger av faktorer som gitterstrukturen til kjernen, molekylærbindingen og overflatespenningen. Vi skal senere se at sot-partikler er spesielt godt egnet i dannelsen av kondensstriper.

Flyemisjonene er som tidligere nevnt, lokalisert i ØT/LS. Dannelsen av kondensstriper vil av den grunn finne sted høyt i atmosfæren, hvor temperaturen er tilsvarende lav. Ved disse lave temperaturene er det ytterst sjelden at flytende skyvann eksisterer over lengre tid. Observasjoner viser at det aldri

forekommer flytende skyvann i skyer med temperatur under -40°C ¹. De aller fleste tilfellene av kondensstripedannelse forekommer nettopp ved temperaturer lavere enn -40°C , som oftest betydelig lavere. Men det dannes som oftest likevel små, flytende svovelsyre/vanndråper i løpet av miksiingsprosessen, fordi temperaturen i plumen fortsatt er såpass høy at homogen frysing ikke initialiseres. Etterhvert som temperaturen minker ytterligere pga. inntrengning av luft fra omgivelsene, vil dråpene fryse spontant. Det har blitt observert såkalte ”varme” tilfeller av kondensstriper, hvor temperaturen var høyere enn -40°C (Jensen m.fl., 1998). Ved disse temperaturene kan da faktisk flytende skyvann i form av underkjølt skyvann eksistere i lengre tid uten å fryse spontant. Siden flytende dråper inngår i miksiingsprosessen, vil derfor også teori om dannelse av skydråper bli beskrevet, men naturligvis av mindre betydning enn iskrystalldannelse. Detaljer om de forskjellige kjemiske og fysiske prosesser i plumen, beskrives nærmere i 2.1.2.

Videre vil det gis en kort presentasjon av strålingsegenskaper, med hovedvekt på cirruskyer, samt litt om de ulike typene satellitter som brukes i ISCCP for målinger av cirruskyer. Det vil bli lagt større vekt på iskrystalldannelsen, mens mindre på satelitt -og strålingsteori siden det ikke er av stor betydning for denne oppgaven.

2.1 Dannelse av kondensstriper

I dette delkapittelet blir de mest grunnleggende prosessene for å forstå dannelsen av skydråper og iskrystaller presentert, i sammenheng med flytrafikkemisjoner i ØT/LS atmosfære. Først beskrives generell dråpedannelse, deretter generell iskrystalldannelse, hvor begge prosessene relateres til flytrafikk. Teorien som blir presentert er i all hovedsak skrevet med utgangspunkt i kapittel 6 fra Rogers og Yau (1989), men noe av teorien er også hentet fra Penner m.fl. (1999) og Jensen m.fl. (1998).

2.1.1 Skydråpedannelse i relasjon til flytrafikk

Dannelse av kondensstriper forekommer når inntrengning av kald, tørr luft fra omgivelsene blandes med varmere, fuktigere luft fra flyplumen. Luftpakkene i plumen vil ekspandere fordi de kontinuerlig vil tilpasse seg trykket til omgivelsene. Etterhvert som man får mer inntrengning av luft fra omgivelsene og luftpakkene ekspanderer, vil temperaturen synke og de blir avkjølt. Ved et visst tidspunkt vil luftpakkene bli mettet m.h.p. vanndamp slik at:

$$e = e_s \tag{2.1}$$

der e og e_s er hhv. vanndamptrykket og metningsvanndamptrykket for flytende vann. Hvis luftpakkene avkjøles ytterligere vil det oppstå overmetning,

¹Henger sammen med at ved ca. -40°C vil homogen frysing gjøre seg gjeldende.

som er nødvendig for at det skal kunne dannes skydråper. Ved dannelse av kondensstriper, viser det seg at metning m.h.p. på vann må oppnås i løpet av plumeutviklingen for at iskrystaller skal kunne dannes (Jensen m.fl., 1998).

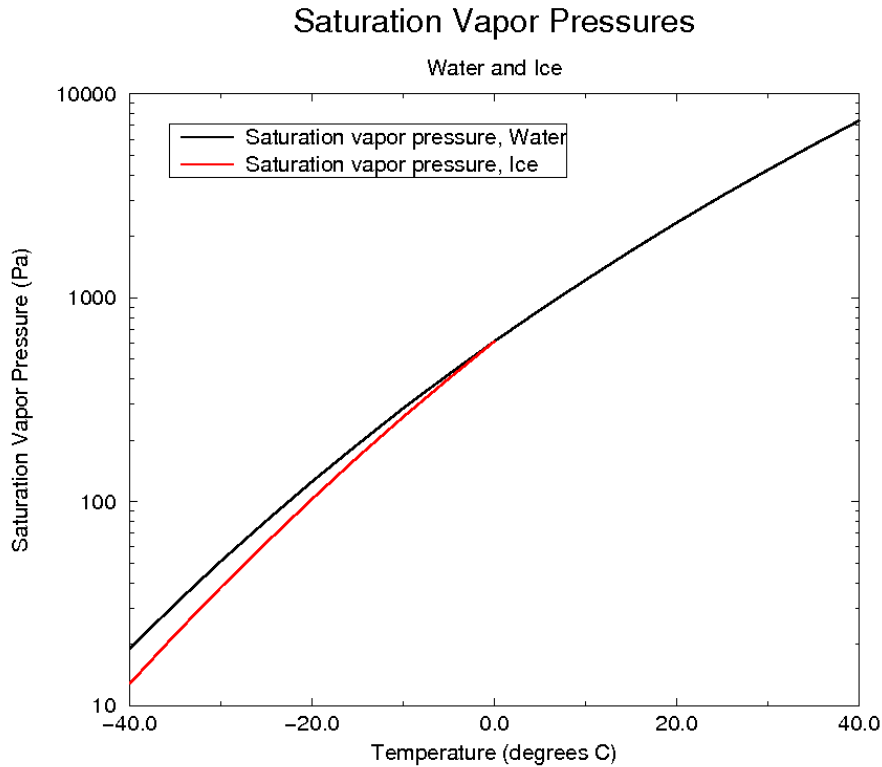
For å lettere kunne forstå begrepet metningsvanndamptrykk tenker vi oss en situasjon hvor vi har en termodynamisk lukket boks. Boksen er delvis fylt med vann. Vannmolekyler vil kontinuerlig løsrive seg fra vannoverflaten og konverteres til vanndamp, mens på den andre siden vil vanndampsmolekyler hele tiden feste seg til vannoverflaten og konvertere til flytende fase. Kondensasjon og fordampning forekommer altså samtidig. Ved en gitt temperatur vil det oppnås likevekt mellom disse to prosessene. Det forekommer altså ikke noen netto transport av molekyler fra den ene fasen til den andre. Vi sier da at lufta er mettet m.h.p. vanndamp. Partialtrykket m.h.p. vanndamp i denne tilstanden kalles da metningsvanndamptrykket. Over en slik plan vannflate vil e_s kun være avhengig av temperaturen. Under ordinære atmosfæriske forhold kan denne sammenhengen uttrykkes i Clausius-Clapeyron likning:

$$\frac{de_s}{dT} = \frac{Le_s}{R_v T^2} \quad (2.2)$$

L er mengden frigjort varme ved kondensasjon og R_v er gasskonstanten for vanndamp. Det er samtidig innført en antakelse om at tettheten til vann \gg tettheten til vanndamp. Denne likningen kan også uttrykkes for temperaturer $< 0^\circ\text{C}$, altså endring av e_{si} med temperaturen, der e_{si} er metningsvanndamptrykket for is.

Sammenhengen mellom metningsvanndamptrykket m.h.p. vann/is og temperaturen, er nettopp beskrevet i figur 2.1. Denne figuren er ekstremt viktig i forklaringen av de fysiske prosessene i skyer. Vi ser at metningsvanndamptrykket for is er lavere enn metningsvanndamptrykket for vann. Det har den viktige konsekvens, at enhver atmosfære som er mettet m.h.p. vann vil alltid være overmettet m.h.p. is. Det kreves dermed mindre overmetning for at iskrystaller skal kunne dannes enn tilfellet er for dråper, og gjør samtidig diffusjonsvekst for iskrystaller raskere og mere effektiv. For dannelse av kondensstriper vil atmosfæreforholdene i de aller fleste tilfellene være umettet m.h.p. vann, men overmettet m.h.p. is. For at kondensstriper videre skal kunne opprettholdes, må lufta til omgivelsene være overmettet m.h.p. is. I noen tilfeller dannes kondensstriper i områder hvor diffuse cirrusskyer er representert. I disse tilfellene kan områdene i atmosfæren enten være mettet m.h.p. is eller vann. De diffuse cirrusskyene medfører en ekstra vanndampskilde (i tillegg til fuktighet fra omgivelsenes luft og frigjøring fra motorforbrenningen) ved at iskrystaller fra cirrusskyene sublimerer hurtig når de entrer motoren.

Eksempelet med metningsvanndamptrykket som er beskrevet ovenfor gjelder for plan vannflate. Ved dråpedannelse i atmosfæren er ikke det tilfellet. Metningsvanndamptrykket over en plan vannflate vil være forskjellig for



Figur 2.1: *Metningsvann damptrykket som funksjon av temperatur for flytende vann og is. Kilde: Trude Storelvmo, Universitet i Oslo, Institutt for Geofag, Avdeling MetOs.*

metningsvann damptrykket for luft rundt en dråpe pga. dråper har en viss overflatespenning σ . Fysisk sett innebærer det at dråper må over en ekstra energibarriere for at vandampsmolekylene skal kunne trenge inn i dråpene. Metningsvann damptrykket rundt en dråpe blir derfor større enn over en plan vannflate. Dette kan uttrykkes i Kelvins formel:

$$e_s(r) = e_s(\infty) \exp(2\sigma/rR_v\varrho_L T), \quad (2.3)$$

hvor $e_s(r)$ er metningsvann damptrykket på overflaten av en sfærisk dråpe med radius r med overflatespenning σ og tetthet ϱ_L ved temperatur T . R_v er gasskonstanten for vandamp og $e_s(\infty)$ er metningsvann damptrykket over en plan flate. Kelvins formel relaterer metningsvann damptrykket til dråpe-radiusen. Vi ser at for små dråperadier, vil e_s øke, som impliserer at små dråper krever større vandamptrykk for å oppnå metning.

Gitt at en dråpe befinner seg i omgivelser som er overmettet m.h.p. vandamp, så vil dråpen vokse ved netto transport av vannmolekyler inn i dråpen (kondensasjon). Vekstraten ved kondensasjon til en dråpe med radius r bestemmes av vandamptrykket e til lufta som omslutter dråpen. Vekstraten til dråpen vil være proporsjonal med differansen $e - e_s(r)$. Dette betyr at for

et gitt vanndamptrykk til lufta vil dråper med radius slik at $e > e_s(r)$ vokse, mens dem med radius slik at $e < e_s(r)$ vil fordampe. Man kan definere en kritisk radius r_c når raten ved kondensasjon og fordampning er like stor, altså $e = e_s(r_c)$. Kelvins formel (2.3) kan uttrykkes ved metningsvanndamptrykket til en dråpe med radius r_c , slik at man får $e = e_s(\infty) \exp(2\sigma/r_c R_v \rho_L T)$. Ved å løse denne likningen m.h.p. r_c får vi:

$$r_c = \frac{2\sigma}{R_v \rho_L \ln S} \quad (2.4)$$

hvor $S = e/e_s(\infty)$ betegner metningsforholdet. Dette gir oss et uttrykk for hvilken radius en dråpe må ha for å kunne fortsette og vokse ved diffusjon av vanndamp mot dråpen ved et gitt metningsforhold S . Dråper som har radius større enn den kritiske radien kalles ofte for superkritiske. Gitt at en dråpe er i en superkritisk "tilstand", vil videre vekst medføre at $e_s(r)$ avtar (se likning 2.3) mens vekstraten som er proporsjonal med $e - e_s(r)$ vil øke. M.a.o., superkritiske dråper vil derfor vokse spontant.

Dannelse av dråper i overmettet luft, kan i teorien skje ved to ulike måter (i likhet med dannelse av iskrystaller). Man skiller mellom heterogen og homogen nukleasjon, dvs. dannelse av dråper hhv. med/uten skykondensasjonskjerner som er små partikler i atmosfæren². Homogen nukleasjon innebærer at vannmolekyler i vanndampen tilfeldig kolliderer, "klumper" seg sammen og danner en stabil vannmolekylstruktur. Det dannes spontant en liten dråpe. Som nevnt ovenfor, må dråpen overstige den kritiske radiusen r_c for å kunne eksistere og vokse. Men i praksis forekommer homogen nukleasjon veldig sjelden. Laboratorie forsøk viser at homogen nukleasjonsprosess krever langt høyere overmetning enn den man finner i atmosfæren. Homogen nukleasjon er av den grunn heller ikke viktig i forbindelse med dannelse av kondensstriper.

Men det er den andre langt viktigere nukleasjonsprosessen som er gjeldende, både i atmosfæren generelt og for dannelse av kondensstriper. Ved heterogen nukleasjon spiller den store forekomsten av partikler (CCN) i atmosfæren en helt essensiell rolle i dråpedannelsen. Kondensasjonskjerner har opphav fra mange kilder, med ulike egenskaper. En typisk CCN er av størrelsesorden $r = 0.1 \mu m$ bestående av en aerosol som er hygroskopisk og oppløselig, dvs. at den tiltrekker seg vann samtidig som den kan løses opp i vann. Dette er en unik egenskap for en partikkel. Sjøsalt-partikler regnes som gode og effektive nukleasjonskjerner pga. deres størrelse og at de er hygroskopiske. Spesielt sot-partikler regnes som viktig ved dannelse av kondensstriper. Konsentrasjonen av CCN varierer både i rom og tid, men den er som regel høyere over land enn hav og den avtar som regel med høyden. Sistnevnte er et viktig poeng i forbindelse med flytrafikkemisjoner. Utslipp fra fly forekommer i ØT/LS hvor bakgrunnskonsentrasjonene er små og oppholdstiden er leng-

²cloud condensation nuclei, ofte kalt CCN.

re. Derfor kan små utslipp ha relativt stor effekt i disse nivåene i atmosfæren.

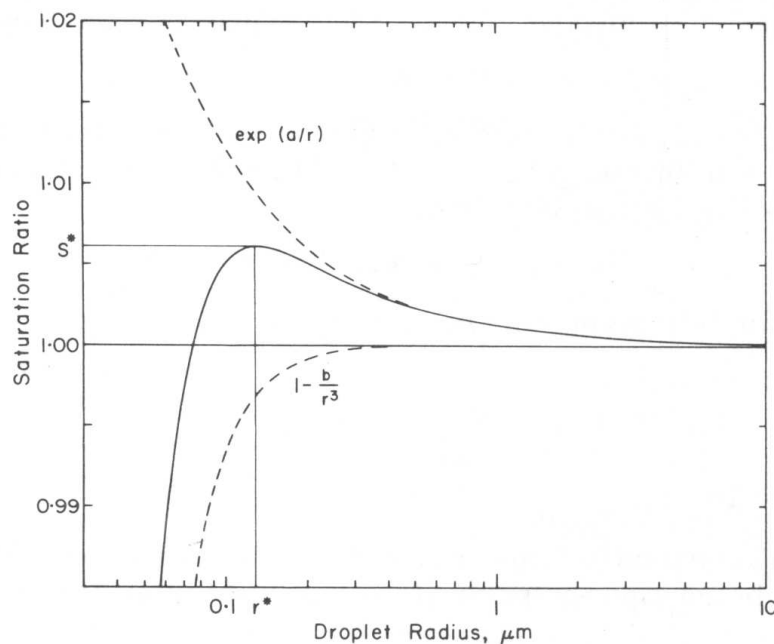
Dråper som dannes ved heterogen nukleasjon har en veldig viktig egenskap. De inneholder et visst antall løsningsmolekyler av en oppløst aerosol. En vannløselig aerosol fungerer slik at noen av vannmolekylene på overflaten av dråpene vil erstattes av løsningsmolekyler fra denne aerosolen. Overflatespenningen σ til en sfærisk dråpe reduseres da i forhold til en dråpe av rent vann. Ut fra sammenhengen mellom metningsvann damptrykket og radiusen til dråpen i likning 2.3, ser man at $e_s(r)$ avtar for den utblandete dråpen. Dette medfører at dråpen kan være i likevekt med omgivelsene ved en mye lavere overmetning enn hva som ville vært tilfellet for en dråpe med rent vann.

Metningsforholdet S for en løsningsdråpe kan videre utledes matematisk. I utledningen blir det bl.a. benyttet matematiske formuleringer for reduksjonen i vandampstrykket, antall effektive ioner i en løsningsmasse, massen til vannet og Kelvins formel (likning 2.3). Selve utledningen vises ikke her, siden det er av mindre relevans for denne oppgaven. Metningsforholdet for en løsningsdråpe kan altså uttrykkes:

$$\frac{e'_s(r)}{e_s(\infty)} = 1 + a/r - b/r^3 \quad (2.5)$$

Her representerer $\frac{a}{r}$ krumningsleddet, som uttrykker økning i $e'_s(r)$ pga. krumning i overflaten av en dråpe, mens $\frac{b}{r^3}$ representerer løsningsleddet, som uttrykker minkning i $e'_s(r)$ pga. oppløst stoff i dråpen. For gitte verdier av temperaturen T , massen M og molekylærvekten til løsningsstoffet m_s , kan metningsforholdet S som funksjon av dråperadius r uttrykkes ved en såkalt Köhler-kurve. Kurven er gjengitt i figur 2.2.

Kurven viser at løsningsleddet dominerer for små radius, mens krumningsleddet dominerer for store radius. Dette medfører at veldig små løsningsdråper kan være i likevekt med omgivelsene ved relativ fuktighet under 100%. Derksom man plutselig får en liten økning i relativ fuktighet til omgivelsene, vil lufta rundt dråpen ha en relativ fuktighet som er høyere enn det som er påkrevd. Dråpen vil dermed vokse inntil likevekt med omgivelsene er oppnådd. Det er viktig å legge merke til at dette gjelder for dråper som er til venstre for toppunktet i Köhler-kurven. Her finner man den kritiske radiusen r^* som dråpen må overstige for å kunne vokse spontant, sammen med det korresponderende kritiske metningsforholdet S^* . Dråper som ligger til venstre for toppunktet kalles disdråper og er i stabil likevekt med omgivelsene. Stabilitetsteori tilsier at enhver forrykning i form av enten r eller S umiddelbart vil føre dråpen tilbake igjen til likevektstilstand. Men hvis derimot relativ fuktighet såvidt overstiger S^* , som gjør det mulig for dråpen å vokse over r^* , vil likevektsmetningsforholdet S avta for økende r . Det betyr at dråpen ligger over likevektslinjen, og kan dermed vokse ved at vandamp diffunderer inn mot dråpen. Man sier da at dråpen er blitt aktivert. Dråper med radius



Figur 2.2: Metningsforholdet ved likevekt til en dråpe dannet rundt en CCN bestående av ammoniumsulfat med masse $10^{-16}g$. Kilde: (Rogers og Yau, 1989)

$r > r^*$ kalles av den grunn for instabile dråper.

De kritiske verdiene for radiusen og metningsforholdet, r^* og S^* , kan utledes ut fra metningsforholdet gitt i likning 2.5:

$$r^* = \sqrt{3b/a} \quad (2.6)$$

$$S^* = 1 + \sqrt{4a^3/27b} \quad (2.7)$$

Størrelsene avhenger av massen til den oppløste kondensasjonskjernen, hva slags stoff den består av og temperaturen. Typiske verdier for r^* ligger mellom 0.1 og $1\mu m$.

2.1.2 Iskrystalldannelse i relasjon til flytrafikk

Det har nå blitt gitt en beskrivelse av skydråpedannelse, fordi i prinsippet kan kondensstriper dannes ved at underkjølte dråper fryser. Men i praksis forekommer dette sjelden, fordi kondensstriper dannes langt oftere ved $T < -40^\circ C$. Det vil nå konsentreres om tilfeller hvor nettopp $T < -40^\circ C$. Ved disse temperaturer er direkte deposisjon av vanddamp til fast form enerådende.

Dannelsesprosessene for skydråper og iskrystaller er generelt ganske like. Iskrystaller dannes i likhet med dråper både ved homogen og heterogen nukleasjon³. For at skyvann skal kunne fryse til iskrystaller, kreves det en kjerne med en krystalliknende struktur der frysingen kan initialiseres. Noen av de små aerosolene i atmosfæren, oppfyller denne egenskapen. For dannelse av iskrystaller kalles de for iskjerne (CCN for skydråper). Ved homogen nukleasjon fryser en dråpe spontant uten å være i kontakt med en iskjerne fra omgivelsene. Selve nukleasjonen skjer ved at statistiske fluktuasjoner i molekylstrukturen inne i dråpen danner en isliknende stabil struktur som kan fungere som en slags iskjerne for dråpen. Eksperimenter viser at dråper med radius større enn $5\mu\text{m}$ fryser spontant vha. homogen frysing ved -40°C , mens dråper mellom $20\mu\text{m}$ og $60\mu\text{m}$ fryser spontant ved -36°C . Dette samsvarer bra med observasjoner som viser at det aldri forekommer flytende skyvann i skyer med $T < -40^\circ\text{C}$.

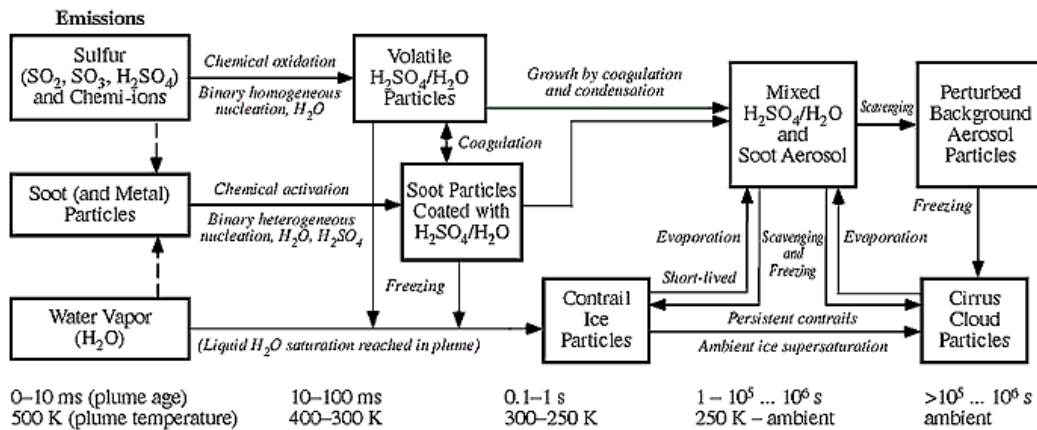
Men observasjoner viser at iskrystaller ofte er tilstede i skyer allerede ved temperaturer like under frysepunktet. Hvis en sky ligger i en høyde hvor $T < 0^\circ\text{C}$, kan iskrystallnukleasjon initialiseres. Dette introduserer den andre fryseprosessen, heterogen frysing. Denne frysemekanismen er altså helt avhengig av tilstedeværelsen av iskjerne. Når en slik kjerne kommer i kontakt med en underkjølt skydråpe vil vannmolekylene danne en krystallstruktur rundt kjernen, som raskt vil bre seg utover slik at hele dråpen fryser. Det er flere måter iskjerne i atmosfæren kan medføre dannelse av iskrystaller:

- *Heterogen deposisjon*, is formet direkte fra dampfase til fast form
- *Kondensasjonsfrysing*, vanndamp kondenserer på iskjerne etterfulgt av frysing
- *Kontaktfrysing*, iskjerne i kontakt med underkjølt dråpe som fryser spontant
- *Inntrengningsfrysing (engelsk; immersion)*, iskjerne omsluttet av en dråpe som umiddelbart fryser

Disse frysemekanismene avhenger av flere faktorer, deriblant atmosfæreforhold og skyhistorikk. For dannelse av kondensstriper er spesielt inntrengningsfrysing av viktig betydning.

Ved dannelse av kondensstriper spiller altså heterogen isnukleasjon en helt avgjørende rolle. Teorien er viktig for å forstå de mange fysiske og kjemiske prosessene som forekommer i plumen. Som nevnt tidligere, fungerer sot effektivt som kondensasjonskjerne. Sot utgjør sammen med metaller, de faste partiklene i plumen. Men fly slipper ut en blandning av både gasser og faste partikler, hvor begge kontinuerlig deltar i kjemiske prosesser. Sammen med sot og metaller, utgjør vanndamp (H_2O), SO_x , NO_x og hydrokarboner

³Også kalt frysingsnukleasjon.



Figur 2.3: Fysiske og kjemiske prosesser i flyplumen ved dannelse av kondensstriper. Kilde: (Penner m.fl., 1999)

en stor del av flyemisjonene. H_2O er helt nødvendig for at kondensstriper skal kunne dannes. Vanndamp blir dannet ved forekomsten av hydrogen i drivstoffet og gjennom forbrenning i motoren. Mengden H_2O som frigjøres til plumen avhenger av motortype, men generelt er mengden liten i forhold til bakgrunnskonsentrasjonene i atmosfæren. Dette gjelder spesielt i ØT, mens i LS hvor bakgrunnskonsentrasjonen er mindre, kan små utslipp av H_2O ha relativt stor betydning. Men uansett inngår vanndamp i bortimot alle kjemiske reaksjoner som settes i gang i plumen (se figur 2.3).

Figur 2.3 viser de viktigste aerosol- og kondensstripeprosessene som funksjon av plumealder og temperatur. Som vi ser, kan et mangfold av kjemiske prosesser medføre dannelse av ispartikler. Ulike svovelkomponenter (SO_2 , SO_3 , H_2SO_4) og kjemiioner deltar i gass-til-partikkel konversjon, og danner små, flyktige H_2SO_4 (svovelsyre)/ H_2O -partikler. Disse partiklene kan vokse ved at de slår seg sammen (koagulasjon), eller ved at gasser kondenserer på dem. Videre kan disse flyktige aerosolene koagulere med sotpartikler. Dette resulterer i en blanding av H_2SO_4/H_2O og sotpartikler, eller at sotpartikler blir belagt med et tynt lag av H_2SO_4/H_2O . Hvis luften i plumen er mettet m.h.p. flytende vann, kan disse prosessene medføre frysing og dannelse av ispartikler. I enkelte tilfeller kan faktisk flyktige, flytende H_2SO_4/H_2O -dråper fryse direkte til kondensstripeispartikler ved disse atmosfæreforholdene⁴. Homogen frysing av flyktige partikler vil da konkurrere med heterogen frysingsprosesser som involverer sot. Men flyktige partikler hindres derimot i å fryse hvis rask frysing av sot-inneholdende partikler forekommer. Kärcher (1998) fant at heterogen frysing av sotpartikler omkranset av H_2O , er den mest vanlige mekanismen ved isdannelse i kondensstriper. Heterogen frysing vil da som regel skje ved at små, flyktige dråper omfatter en sotkjerne (inntrengningsfrysing) eller ved at dråpene fryser umiddelbart når sotkjernen kommer i

⁴Homogen frysing.

kontakt med dens overflate (kontaktfrysing).

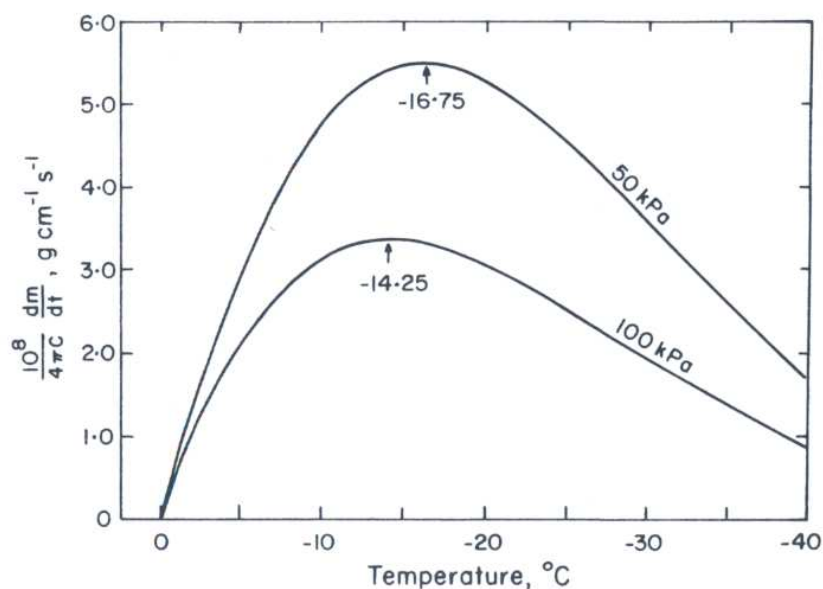
Disse ispartiklene kan videre øke ismassen sin ved at de vokser ved deposisjon av vanndamp. De nydannete iskrystallene i en sky vil være i gunstige omgivelser for hurtig voksing ved diffusjon (se figur 2.4). Ved disse atmosfæreforholdene kan metningsforholdet m.h.p. is uttrykkes:

$$S_i = \frac{e}{e_i} = \frac{e}{e_s} \frac{e_s}{e_i} = S \left(\frac{e_s}{e_i} \right) \quad (2.8)$$

hvor S og S_i betegner metningsforholdet for hhv. vann og is, og e_i er vann-damptrykket til is. Her er $\frac{e}{e_s} = 1$, og $\frac{e_s}{e_i} \gg 1$. Dette impliserer at en sky som jo er mettet m.h.p. vann, vil være overmettet m.h.p. is og dermed utsatt for rask og effektiv diffusjonsvekst. Denne vekstformen kan uttrykkes matematisk, i form av endring av ismassen med tiden:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{4\pi C(S_i - 1)}{\left(\frac{L_s}{R_v T} - 1\right) \frac{L_s}{KT} + \frac{R_v T}{e_i(T)D}} \quad (2.9)$$

hvor C representerer den elektriske kapasitansen, L_s er frigjøring av latent varme ved sublimasjon, K er den termale konduktivitetskoeffisienten til luft, D er den molekylære diffusjonskoeffisienten, R_v er gasskonstanten for fuktig luft og T er temperaturen. Figur 2.4 er utarbeidet med utgangspunkt i



Figur 2.4: Diffusjonsvekst av iskrystaller. Kilde: (Rogers og Yau, 1989)

likning 2.9, og viser iskrystallvekst ved diffusjon av vanndamp. Endring av ismassen med tiden er plottet som funksjon av temperaturen for to ulike høyder i atmosfæren. Som figuren viser, er denne vekstformen mest effektiv for temperaturer rundt -15°C . Grunnen til det ligger i som tidligere nevnt,

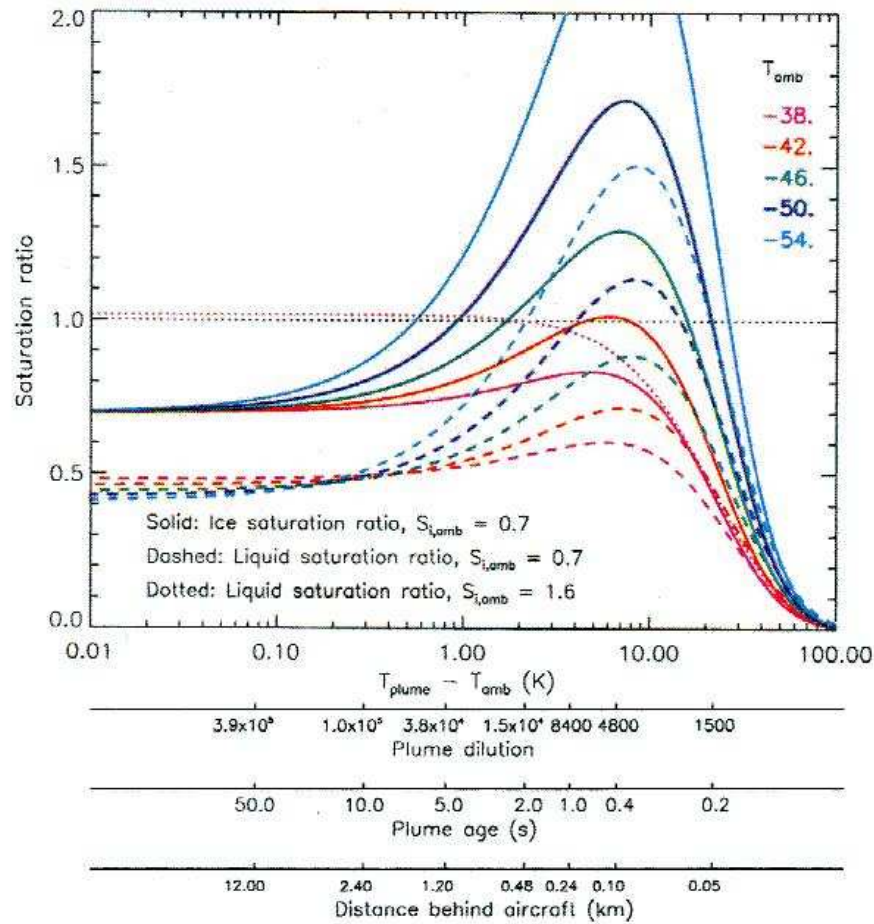
at metningstrykket for is er mye lavere enn for vann. Dette impliserer at iskrystaller vokser forttere ved diffusjon av vanndamp enn det vanndråper gjør. Siden differansen mellom e_s og e_{si} er størst ved $T=-15^\circ\text{C}$, blir dermed diffusjonsveksten mest effektiv ved denne temperaturen. Hvis lufta til omgivelsene videre er overmettet m.h.p. is, vil kondensstripene opprettholdes og kan utvikle seg til cirrusskyer.

I Jensen m.fl. (1998) presenteres det i detalj hvilke forhold som er påkrevd for dannelse og opprettholdelse av kondensstriper. Som nevnt tidligere, må to kriterier oppfylles: metning m.h.p. flytende vann må oppnås et visst stadiet i plumen for dannelse av kondensstriper, og videre må lufta til omgivelsene være overmettet m.h.p. is for opprettholdelse. Temperatur og relativ fuktighet er de to viktigste parametrene som styrer dannelsesprosessen. Disse to parametrene er videre kontrollert av inntrengning av luft fra omgivelsene (Appleman., 1953). Ut fra denne antakelsen ble det utledet en teoretisk predikasjon på utviklingen av metningen m.h.p. is i plumen, $S_{i,plm}$:

$$S_{i,plm} = \frac{n_{w,amb}}{n_{sat,i}(T_{plm})} + \frac{n_{air}c_p EI_{H_2O} \Delta T R_w}{n_{sat,i}(T_{plm}) EI_{heat} R_d} \quad (2.10)$$

hvor $n_{w,amb}$ er antall vanndampsmolekyler i omgivelsene og $n_{sat,i}$ er tilsvarende ved metning, c_p er spesifikk varmekapasitet til luft, ΔT er forskjellen mellom temperaturen i plumen og omgivelsene, EI_{H_2O} og EI_{heat} er emisjon av hhv. vanndamp og varme til plumen, n_{air} er antall luftmolekyler i omgivelsene, $n_{sat,i}$ er antall vanndampsmolekyler ved metning og R_d og R_w er gasskonstanten for hhv. tørr og fuktig luft. Metningsforholdet m.h.p. flytende vann i plumen, S_{plm} , kan utledes på tilsvarende måte. Ikke all energi som frigjøres ved motorforbrenning konverteres til varme i eksosplumen. Derfor må EI_{heat} erstattes med $EI_{heat}(1-\eta)$, hvor η representerer motoreffektiviteten. Pr. idag er $\eta = 0.3$. Denne korreksjonen innebærer en grensetemperatur for dannelse av kondensstriper med $\eta = 0.3$, som er 2 K høyere enn for $\eta = 0$.

Kurvene i figur 2.5 viser forskjellige antakelser av $S_{i,plm}$ fra likning 2.10. Metningsforholdet S er plottet som funksjon av forskjellen i temperatur mellom plumen og omgivelsene (ΔT), for ulike verdier av omgivelsenes temperatur (T_{amb}). Aksene for plumefortynning, plumealder og distanse bak flyet er også vist i samme figur. Videre representerer de heltrukne og stiplede linjene metningskurvene for en atmosfære som er mettet m.h.p. hhv. is og vann for ulike verdier av T_{amb} når $S_{i,amb} = 0.7$. Vi ser at i tidlig plumefase, er ΔT stor pga. lite inntrengning av kald, tørr luft fra omgivelsene, og følgelig er plumefortynningen liten og metningsforholdet S nær 0. Når plumen avkjøles pga. mer inntrengning fra omgivelsene, vil tettheten av vanndampsmolekyler ved metning minke (pga. kald luft kan inneholde mindre fuktighet enn varm luft), slik at metningsforholdet øker dramatisk (Se likning 2.10). Etterhvert vil vanndamp "lekke" til omgivelsene slik at metningsforholdet minker igjen. Toppunktet i metningsforholdet øker med minkende temperatur til omgivel-



Figur 2.5: Metningsforholdet i plumen som funksjon av ΔT , for ulike verdier av T_{amb} . Kilde: (Jensen m.fl., 1998)

sene.

Legg spesielt merke til forskjellen mellom de heltrukne og stiplede kurvene. Hvis en luftpakke er mettet m.h.p. vann, vil den alltid være overmettet m.h.p. is. Dette ser vi igjen i figur 2.5. Kurvene for metning m.h.p. vann ligger lavere enn kurvene for is for gitte verdier av T_{amb} , pga. metningstrykket over en plan flate med is er lavere enn for vann (se likning 2.2). Dette impliserer at det kreves langt høyere relativ fuktighet (RH) for at lufta skal bli mettet m.h.p. vann enn tilfellet er for is. Videre ser vi at man kan ha metning m.h.p. is ved relativt høye temperaturer (bare den heltrukne kurven for $T_{amb} = -38$ som ikke kryper over $S = 1$). For metning m.h.p. vann, må temperaturen til omgivelsene være betydelig kaldere (kun de to laveste T_{amb} som gir metning m.h.p. vann). For antakelse om omgivelsenes trykk og relativ fuktighet i denne beregningen, ser man ut fra figuren at lufta i plumen aldri vil bli mettet m.h.p. vann for $T_{amb} > -48^{\circ}\text{C}$.

En annen ting som er viktig å nevne i forbindelse med denne figuren, er linjen markert med dotter. Denne linjen representerer et metningsforhold m.h.p. is på 1.6. Lufta til omgivelsene er altså solid overmettet m.h.p. is. Dette kriteriet er helt nødvendig for at kondensstriper skal kunne opprettholdes og utvikle seg til antropogene cirrusskyer. Vi ser at kondensstripene i dette tilfellet blir dannet etter ca. 2 sek. I etterkant ser vi at metningsforholdet stabiliserer seg, og forblir over 1. Kondensstripene vil altså opprettholdes, og kan dermed resultere i et strålingspådriv på regional og global skala. De heltrukne og stiplede linjene indikerer at kondensstripene blir dannet under 1 sek. Men når vanndamp ”lekker” til omgivelsene, minker metningsforholdet igjen og stabiliseres tilbake til omgivelsenes metningsforhold (i dette tilfellet $S_{i,amb}=0.7$). Kondensstripene vil fordampe innen kort tid.

Denne figuren er spesielt viktig for oppgaven min fordi jeg benytter et FORTRAN-program fra Jensen m.fl. (1998) i filtreringsprosessen, hvor likning 2.10 inngår. Figuren brukes som utgangspunkt i beregninger av den kritiske temperaturen for å oppnå metning m.h.p. vann i plumen og det korresponderende metningsforholdet m.h.p. is.

2.2 Strålingsegenskaper til cirrusskyer

Strålingsegenskapene til cirrusskyer er av viktig betydning for det globale strålingsbudsjettet til jordas klimasystem. De fungerer i likhet med andre skytyper, som en regulator av strålingsbalansen til jorda. Siden denne oppgaven ikke direkte omhandler stråling, gis det bare en kort presentasjon av generell strålingsteori i relasjon til cirrusskyer.

Satellitter måler stråling fra cirrusskyer, fra synlig lys til deler av det infrarøde strålingsspekteret ($0.4-12\mu m$). Ved synlig lys benyttes reflektert sollys, mens ved infrarød stråling måles varmestrålingen som alle legemer sender ut ved en gitt temperatur (beskrives mere detaljert i delkapittel 2.3). Om dagen, når sollys er tilgjengelig, måles det reflekterte sollys fra cirrusskyer i form av monokromatisk intensitet⁵. Monokromatisk intensitet er definert som strålingsintensiteten pr. enhets flateareal når energien treffer satellittmottakeren (Liou, 2002). Rent matematisk uttrykkes definisjonen på følgende måte:

$$I_{\lambda} = \frac{dE_{\lambda}}{\cos\theta d\Omega d\lambda dt dA} \quad (2.11)$$

Enheden til den monokromatiske intensiteten I_{λ} er gitt i $[\frac{W}{m^2 sr}]$. Ut fra definisjonen impliserer dette at intensiteten er retningsbestemt i forhold til strålen.

⁵Også kalt radians.

I mangel av sollys om natten, måler satellittene atmosfærelagens/jordas varmeutstråling i form av monokromatisk flukstetthet⁶. Ved å integrere radiansten over alle romvinkler Ω , er irradiansen gitt ved:

$$F_\lambda = \int_{\Omega} I_\lambda \cos \theta d\Omega \quad (2.12)$$

Enheden til den monokromatiske flukstettheten F_λ er gitt i $[\frac{J}{sm^2}]$ eller $[\frac{W}{m^2}]$. For isotropisk stråling, dvs. at intensiteten er uavhengig av retningen, er irradiansen gitt ved:

$$F_\lambda = \pi I_\lambda \quad (2.13)$$

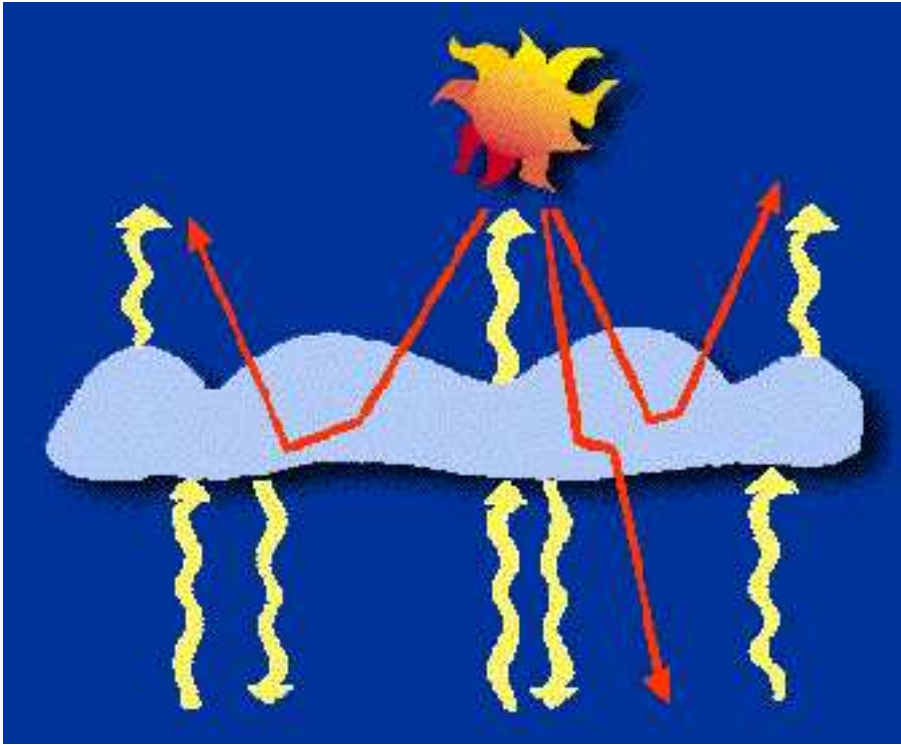
Dette impliserer m.a.o. at strålingsintensiteten forplantes like mye i alle retninger.

Mange studier har indikert at trender i cirruskydekket i relasjon til flytrafikk, påvirker strålingsbalansen til jordas klimasystem (Stordal m.fl., 2005; Minnis m.fl., 2004). I Penner m.fl. (1999) kalkulerte man et strålingspådriv fra lineære kondensstriper med 1992 drivstoff-scenario på $+0.02Wm^{-2}$. Dette strålingspådrivet representerer en lavere grense, fordi oppdagelsesalgoritmene fra satellittene er basert på linje-formete kondensstriper, og ikke tar hensyn til kondensstriper som utvikler seg til vidstrakte, diffuse cirruskyer. Derfor er et mer realistisk strålingspådriv ca. 4-5 ganger større ($+0.10Wm^{-2}$). Det har siden kommet en oppdatering av denne IPCC-reporten fra 1999, ved Sausen m.fl. (2005). Her ble det altså presentert nye estimater av forskjellige bidrag til strålingspådriv fra fly, hovedsakelig med resultater fra TRADEOFF-prosjektet⁷. Det mest oppsiktsvekkende resultatet, var en reduksjon i strålingspådrivet fra lineære kondensstriper med en faktor på ca. 3-4. Dette samsvarer også med resultater fra Stordal m.fl. (2005), hvor det videre ble estimert et strålingspådriv på $+0.03Wm^{-2}$ som følge av fly-indusert cirrus.

Til tross for at man har påvist at strålingspådrivet er blitt overestimert de senere årene, fører generelt kondensstriper til oppvarming av jordas klimasystem. Hvis kondensstripene opprettholdes, vil de ha de samme strålingsegenskapene som cirruskyer. Kondensstripene påvirker den kortbølgete strålingen mindre enn hva som er tilfellet fra den langt bølgete strålingen fra jorda og atmosfærelagene. Dette impliserer at absorpsjon av langbølget stråling er mere effektivt enn spredning av solstråling, og hindrer samtidig langbølget utstråling til verdensrommet. Dette resulterer i en drivhuseffekt, som er illustrert i figur 2.6. Disse strålingsegenskapene avhenger av flere faktorer, bl.a. IWC (Ice Water Content) og optisk tykkelse (Penner m.fl., 1999). Sistnevnte benyttes som én av flere parametre i regresjonsanalysen i denne oppgaven.

⁶Også kalt irradians

⁷Forskningsprosjekt (2000-2003) hvor flere grupper jobbet sammen med å kalkulere strålingspådrivet av bidragene fra forskjellig klimakomponenter relatert til flytrafikk.



Figur 2.6: *Drivhuseffekten fra cirrus skyer.* Kilde: <http://terra.nasa.gov/FactSheets/EnergyBalance/>

Optisk tykkelse til et skylag er gitt ved:

$$\tau = \int_{z_1}^{z_2} k_\lambda \rho dz = \int_{z_1}^{z_2} \beta_e dz \quad (2.14)$$

k_λ representerer masse ekstingsjon "cross section" (enhetsareal pr. masse) for en gitt bølgelengde λ , og ρ er tettheten til materialet. Produktet mellom disse to størrelsene gir ekstingsjonskoeffisienten β_e , som kan skrives $\beta_e = \beta_a + \beta_s$. Ekstingsjonskoeffisienten uttrykker svekkelse av energi fra en stråle gjennom spredning (β_s) og absorpsjon (β_a). Mer nøyaktig vil svekkelsen være proporsjonal med $e^{-\tau}$. For en optisk tykkelse på 1, impliserer dette at strålen blir svekket med $\frac{1}{e}$. Vi ser fra definisjon 2.14 at optisk tykkelse er avhengig av den geometriske utstrekningen i vertikalen (dz), men en rekke andre faktorer bidrar også til svekkelse av strålen (β_e). Dette omfatter f.eks. LWC (Liquid Water Content)/IWC, partikkelstørrelse eller partikkelform. Generelt kan man si at jo geometrisk tykkere skyen er, desto mer blir strålen svekket. Dette gjelder vel å merke kun hvis de andre faktorene holdes konstante. Tykke skyer er dermed optisk tykkere enn tynne skyer. Verdier på optisk tykkelse for cirrusskyer ligger på rundt 0-4 (se figur 3.1).

2.3 Satellitter

I dette delkapittelet presenteres det kort om ulike typer satellitter som er relevante i forbindelse med denne oppgaven. Det er benyttet satellittteori fra ulike steder, både fra dokumentasjonen fra ISCCP, hjemmesiden til Meteorologisk Institutt og Liou (2002).

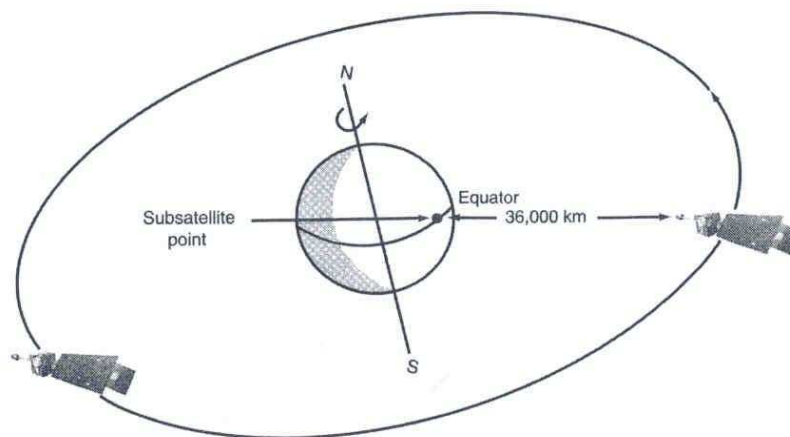
Satellitter har blitt tatt i bruk i lang tid for mange forskjellige formål. Enkelte satellitter inneholder instrumenter for observasjon av meteorologiske parametere. Disse kalles meteorologiske satellitter. Siden 1960 har meteorologiske satellitter gått i bane rundt jorden, men allerede sent på 1940-tallet ble de første bildene av værphenomener tatt fra verdensrommet fra kameraer ombord på raketter. Dette var starten på en ny og revolusjonerende periode for værvarslinga. Det tidligere Sovjetunionen var først ut med å sende opp meteorologiske satellitter, med hard konkurranse av USA. Dette skjedde med Sputnik 1 i 1957. Dette var altså den første satellitten med mulighet for å observere atmosfæren og jorda. De første satellittprosjektene ble betegnet som mislykket, men det ble stadig utviklet nye satellitter med bedre instrumenter som var tilpasset det operative værvarslingsmiljøet.

Meteorologiske satellitter består av ulike instrumenter (sensorer) som måler stråling fra jorda og atmosfæren. Disse instrumentene måler stråling i ulike bølgelengder, alt fra synlig lys til infrarød stråling. Som nevnt tidligere, måles synlig lys ($0.4 - 0.7\mu m$) fra reflektansen av sollys fra jorda og atmosfærelagene, mens ved infrarød stråling ($0.7 - 1000\mu m$) måles varmestrålingen som ethvert legeme sender ut ved en gitt temperatur (Stefan-Boltzmanns lov). ISCCP måler altså både synlig og infrarød radians, men har betydelige problemer ved målinger om natten (Stubenrauch m.fl., 1998), der man bare benytter den utsendte varmestrålingen fra et legeme. Dette gjelder også for målinger av cirrus. Ombord på NOAA-satellittene (National Oceanic and Atmospheric Administration), som ISCCP bl.a. bruker, befinner det seg to måleinstrumenter: AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) og ATOVS (Advanced TIROS-N Operational Vertikal Sounder). Disse instrumentene brukes videre til å konvertere radians til ulike skyparametre vha. kompliserte algoritmer.

ISCCP mottar data fra en kombinasjon av to hovedgrupper av satellitter, geostasjonære og polarbane satellitter. Det beskrives nå kort om de to ulike typene.

2.3.1 Geostasjonære satellitter

Som navnet tilsier, er geostasjonære satellitter lokalisert i ro over samme punkt på ekvator fordi satellittbaneperioden samsvarer med rotasjonen til jorda ved en gitt høyde. (se figur 2.7).



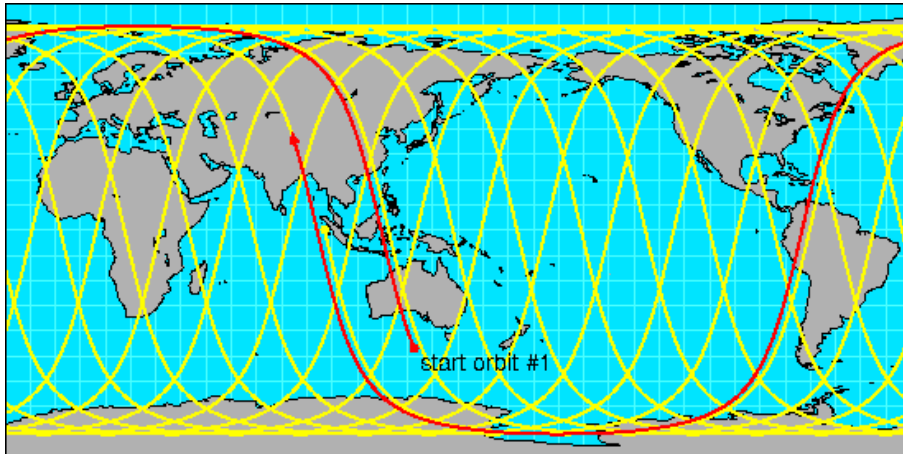
Figur 2.7: Geostasjonær bane for NOAA satellitter. Kilde: (Liou, 2002)

Disse satellittene befinner seg av den grunn i ca. 35800 km. høyde over jordoverflaten, der de blir utsatt for et svakere gravitasjonsfelt. Dette innebærer at sentrifugalkraften som kreves for å holde satellittene i bane blir mindre. Rotasjonsperioden til disse satellittene blir også lengre enn tilfellet er for polarbane satellitter, og de bruker ca. 24 timer på ett omløp rundt jordas akse. Høydelokaliseringen til geostasjonære satellitter er valgt slik at avstanden tilsvarer 1 dags rotasjonsperiode til jorda, som medfører at de beveger seg mot klokka. Denne sirkulære banen kalles for geostasjonær bane, som altså er orientert i ekvatorplanet til jorden.

Meteorologiske geostasjonære satellitter dekker alltid det samme geografiske området, både dag og natt. Dette er ideelt for regulære observasjoner av skymønstre over et område med synlige og infrarøde radiometere. Pga. de geostasjonære satellittene observerer ca. 42% av jorden til enhver tid, gir dette hyppig og verdifull data om atmosfærens sammensetning. Derfor er disse satellittene svært godt egnet for værvarslinga generelt, og for overvåking av storstilte værsystemer i atmosfæren.

2.3.2 Polarbane satellitter

Ettersom de geostasjonære satellittene er sentrert over det samme punktet på ekvator, vil synsvinkelen til satellittene helle mot høyere breddegrader. Dette gjør at tilgangen på data fra denne typen satellitter blir dårligere og dårligere jo nærmere polene man kommer. Derfor introduseres polarbane satellitter. I motsetning til geostasjonære satellitter går polarbane satellitter i bane rundt jorda, uavhengig av rotasjonsperioden til jorda. Som navnet tilsier, vil den krysse over begge polene ved ett omløp, som gir gode observasjonsdata for områder i nærheten. Polarbane satellitter bruker mindre tid på ett omløp rundt jorda enn hva geostasjonære satellitter gjør, fordi de befinner seg ved en mye lavere høyde. Mens satellitten går i fast bane rundt jorda, roterer



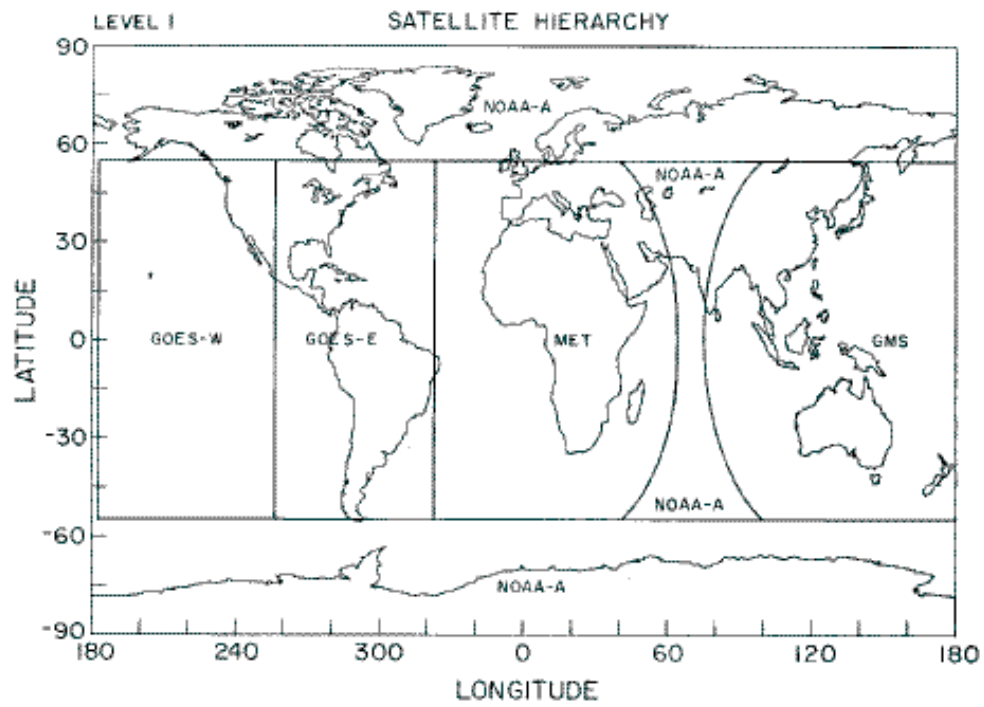
Figur 2.8: Polar banene for NOAA satellitter etter 1 døgn. Kilde: NCAR (National Center for Atmospheric Research, <http://www.ncar.ucar.edu/>)

samtidig jorda rundt sin egen akse. Jordrotasjonen gjør at polare satellitter vil kontinuerlig passere over nye områder for hvert omløp. Satellittenes høyde er tilpasset slik at de passerer over det samme området til samme tid hver dag⁸. Derfor beveger polarbane satellitter seg i 850 km. høyde. Denne lave satellittbanen gjør polarbane satellitter bedre posisjonert for å oppnå høy kvalitetsdata ved fjernmåling i forhold til geostasjonære satellitter. Solsynkroniseringen av NOAA satellittene gir god dekning over USA om morgenen og ettermiddagen, amerikansk tid. Norges plassering i forhold til USA, gir Norge ypperlig tilgang til gode observasjonsdata fra satellittene.

Figur 2.8 viser de polare satellittbanene rundt jorden i løpet av ett døgn. De røde linjene representerer over hvilke områder satellitten eksakt beveger seg, mens dens bevegelse dekker et 3000 km. bredt område. Man kan se fra figuren at satellitten ikke treffer igjen samme punkt etter ett omløp rundt jorden, mens etter ett døgn er satellitten derimot omtrentlig lokalisert ved samme punkt. Siden polarbane satellittene bruker litt over 100 min på ett omløp rundt jorden, gir dette totalt ca. 14 omløp på ett døgn (de gule satellittbanene).

I figur 2.9 vises satellitthierarkiet som ISCCP benytter. Figuren gir en oversikt over hvilke internasjonale satellitter som brukes, og hvilke områder de dekker. De geostasjonære satellittene består av både GOES (amerikanske), GMS (japanske) og METEOSAT (europiske) satellitter, mens polarbane satellittene utelukkende er fra NOAA (amerikanske).

⁸Solsynkronisert bane.



Figur 2.9: *Satellitt hierarki for ISCCP. Kilde: ISCCP*

Kapittel 3

Metode

Dette kapittelet omfatter beskrivelse av 3 ulike datasett hentet fra hhv. ISCCP, AERO2K og ECMWF. Det vil bli gått nærmere i detalj hvordan disse dataene er behandlet, m.h.p. til midling, uthenting av data fra de andre datasettene o.l. Til slutt skisseres programoppsettet som brukes i beregningen av resultatene. Stoffet er for det meste hentet fra dokumentasjonen til de ulike datasettene.

3.1 Datasett fra ISCCP

For å kunne kalkulere eventuelle cirrustrender i relasjon til flytrafikk, har vi valgt å benytte satellittdata fra ISCCP. Skyer er en viktig regulator av strålingsbalansen til jordas klimasystem. Det er store variasjoner i skyenes romlig og spektrale fordeling, og de vil av den grunn ha ulik innvirkning på jordas strålingsbudsjett på regional og global skala. Skyanalysealgoritmer benyttes i ISCCP for å konvertere satellitt-målt radians til ulike skyegenskaper, som f.eks. optisk tykkelse. Siden 1983 har internasjonale grupper samlet og analysert målinger av satellittradians fra opp til 5 geostasjonære og 2 polarbane satellitter. Målingene ble brukt til å utlede global fordeling av skyegenskaper og deres døgnlige, sesong og flerårige variasjoner. Hovedfokus var nettopp å estimere skyenes rolle på strålingsbudsjettet. De senere årene har det blitt viet mye tid til forbedring av datasettene i ISCCP. De viktigste forbedringene, deriblant forbedret cirrusidentifikasjon, er gjengitt i Stubenrauch m.fl. (1998).

Oppdateringene av datasettene i ISCCP, har ført til utledning av forbedret skyprodukter som inngår i D-serien. Fra denne dataserien har jeg benyttet daglig data, som er representert i D1-datasettet. D1-dataene er samlet hver 3. time, dvs. 8 ganger om dagen (fra 00-21UTC¹). Dataene er i utgangspunktet på "EQUAL-AREA" kart, men det følger med en subrutine slik at man kan konvertere til "SQUAREMAP". Sistnevnte er mer egnet til bruk i denne

¹engelsk; Coordinated Universal Time.

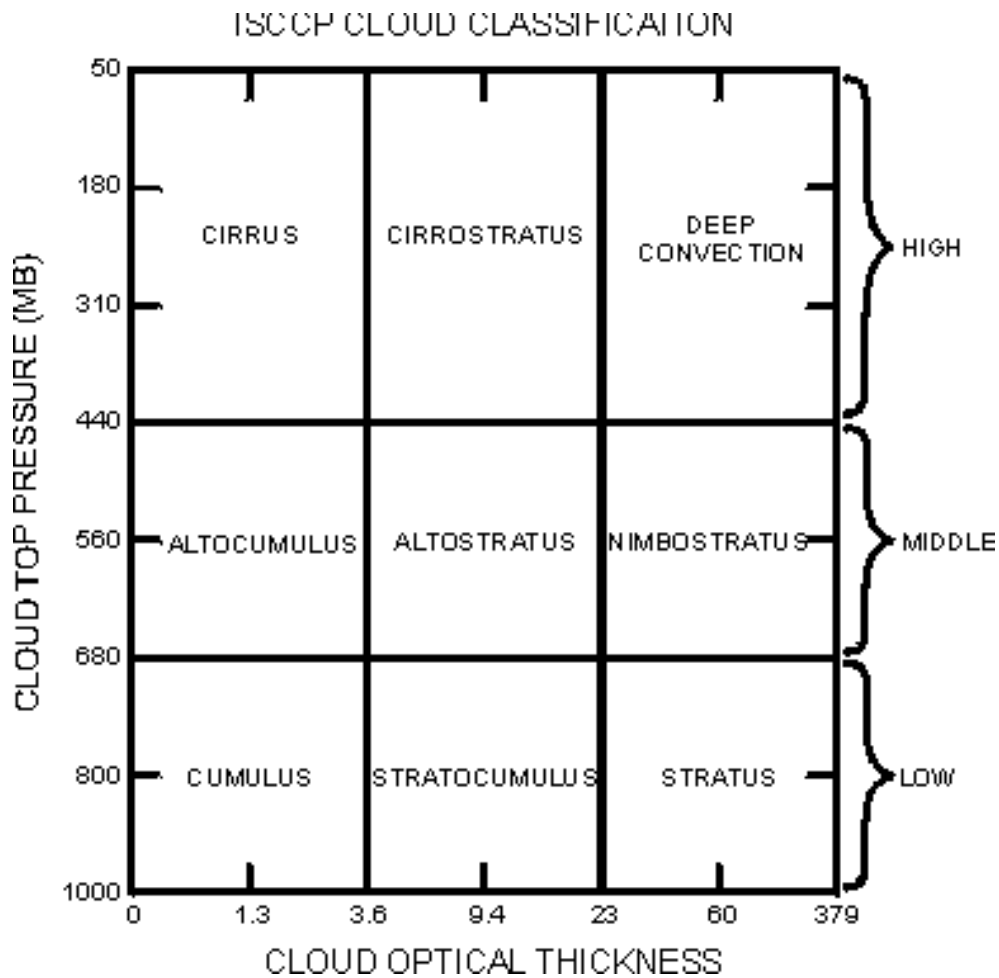
oppgaven. Ved å benytte "SQUAREMAP" oppnår man like mange bokser i breddegradsretningen uansett hvor på kloden man befinner seg. Dette impliserer da at oppløsningen blir finere (i lengdegradsretningen) ved høyere breddegrader, fordi boksene mot polene er smalere enn boksene ved ekvator. Denne kartformen er gitt ved $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, med 10368 gridceller (72 breddegradssoner og 144 lengdegradsintervaller). Ved ekvator tilsvarer $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ca. $277.5\text{km} \times 277.5\text{km}$, mens størrelsen på boksene altså minker mot polene. Hjørneboksen i "SQUAREMAP" er ved 0° breddegrad og 0° lengdegrad. Boksene begynner ved Sørpolen ved datolinja, østover gjennom hele breddegradssonen og deretter nordover til neste breddegradssirkel. Satellittene måler videre fra mange små piksler i boksene, og vha. skyoppdagelsesalgoritmer kan satellittmålt radians avgjøre om pikselen er skyet eller skyfri. Hver piksel er ca. 4-7 km store.

I korrelasjonsanalysen har jeg benyttet tre ulike typer parametre; cirrus optisk tykkelse, cirrusfraksjon og produktet mellom disse to størrelsene (cirrusprodukt). Alle disse parametrene er hentet fra ISCCP, i perioden 10-16 juni 2002 for 8 forskjellige UTC-tidspunkter. Ved satellittmålt radians og konvertering til skyegenskaper, kan man ut fra skytopptrykk og optisk tykkelse kategorisere resultatet i en skygruppe. Dette er gjengitt i figur 3.1. Det interessante i denne oppgaven er naturligvis cirrusskyer, med verdier av skytopptrykk og optisk tykkelse i hhv. intervallet 440-50 hPa og 0-3.6. Parameteren cirrus optisk tykkelse fra D1-datasettet, representerer videre et middel over hele dette skytopptrykkintervallet siden det ikke finnes mere detaljerte intervaller for skytopptrykk og optisk tykkelse slik det f.eks. gjør for cirrusfraksjon.

Cirrusfraksjon er den andre parameteren som blir brukt i korrelasjonsanalysen. Cirrusfraksjon er definert som forholdet mellom antall piksler i boksen som består av cirrusskyer og total antall piksler i en gitt boks. Siden denne fraksjonen ikke er representert i D1-datasettet, må den konstrueres på egen hånd ut fra definisjonen gitt ovenfor. Antall cirruspiksler og total antall piksler for gridboksene inngår derimot i daglig dataene.

Som nevnt tidligere, kan cirrusfraksjon konstrueres ut fra mer detaljerte intervaller fra figur 3.1. I regresjonsanalysen benyttet cirrusfraksjon fra intervallet $180 < PC \leq 310\text{hPa}^2$ til forskjell fra trykkintervallet for cirrus optisk tykkelse (PC representerer skytopptrykket). Optimalt sett burde man i utgangspunktet summere de konstruerte verdiene av cirrusfraksjon med optisk tykkelse fra $0.02 < \tau \leq 1.27$ og $1.27 < \tau \leq 3.55$ i det gitte trykkintervallet (τ står for optisk tykkelse). Men dette var dessverre ikke mulig siden dataene for førstnevnte intervall inneholdt feil. Derfor ble kun cirrusfraksjon med de høyeste verdiene av optisk tykkelse brukt i korrelasjonsanalysen.

²Dette trykkintervallet samsvarer forøvrig med hvor man kan forvente mest cirrus og flytrafikk.



Figur 3.1: *Klassifisering av skyer fra ISCCP. Kilde: ISCCP (<http://isccp.giss.nasa.gov/>)*

Ved å multiplisere verdier av cirrus optisk tykkelse og cirrusfraksjon med hverandre, oppnår man et cirrusprodukt. Cirrusproduktet uttrykker et slags volum. Den optiske tykkelsen representerer et inkrement i vertikal retning dz (se likning 2.14), mens cirrusfraksjonen uttrykker et areal i horisontal retning. Men produktet mellom disse to størrelsene gir vel å merke ikke et fysisk volum. Dette er fordi det ikke nødvendigvis er en analog sammenheng mellom optisk tykkelse og den geometriske tykkelsen til skyen. Optisk tykkelse uttrykker som nevnt i kap. 2.2, svekkelse av energi fra en stråle. Svekkelsen avhenger bl.a. av den geometriske tykkelsen på skyen. Men en sky som er geometrisk tykkere er ikke nødvendigvis optisk tykkere enn en annen sky som har mindre utstrekning i vertikalen. Dette kan nettopp være tilfelle pga. optisk tykkelse også avhenger av faktorer som inngår i de fysiske egenskapene til skyen (dråpekonsentrasjon, vann/isinnhold, iskrystallform osv.). Men gitt at disse faktorene holdes fast, vil produktet mellom optisk tykkelse og cirrusfraksjon kunne uttrykke et fysisk volum.

Optimalt sett skulle man operert med optisk tykkelse for samme skytopptrykkintervall som for cirrusfraksjon, men i D1-datasettet er bare gjennomsnittet for hele cirrusintervallet gitt i henhold til skyklassifiseringen fra figur 3.1.

3.2 Datasett fra AERO2k

For å kunne kvantifisere atmosfæreeffekter ved utslipp fra fly, er det nødvendig med en nøyaktig global beskrivelse av drivstofforbruket og emisjonene. Dette ble gjort i flytrafikkprosjektet AERO2k fra 2002. Data fra dette flyprosjektet er videre brukt i regresjonsanalysen.

AERO2k-prosjektet er basert på de beste tilgjengelig og oppdaterte flyinformasjonene for 2002 for både sivile og militære flyvninger, og bygger på tidligere, liknende prosjekter som er blitt utdatert. Flyinformasjonen inkluderer detaljerte beskrivelser om de viktigste flyemisjonene (NO_x , CO_2 , H_2O , sot, hydrokarboner o.l.) for et gitt drivstofforbruk, flydistanse og aktuell bredde/lengdegradslokalisering. Disse utslippene er beregnet med utgangspunkt i den mest oppdaterte informasjonen av emisjonsfaktorer som flyhøyde, vekt og hastighet gjennom hele flyvningen. Som hjelp til studier av kondensstriper og cirrustrender, registreres flydistansen i hver gridboks. Sammen med flydistanse, er det bare data om bredde/lengdegradslokalisering som er relevant for denne oppgaven.

	Mon.	Tues.	Wedn.	Thurs.	Fri.	Sat.	Sun.	June Day
00-06UTC	Per. 1	Per. 1	Per. 1	Per. 1	Per. 1	Per. 1	Per. 1	Per. 1 Av.
06-12UTC	Per. 2	Per. 2	Per. 2	Per. 2	Per. 2	Per. 2	Per. 2	Per. 2 Av.
12-18UTC	Per. 3	Per. 3	Per. 3	Per. 3	Per. 3	Per. 3	Per. 3	Per. 3 Av.
18-00UTC	Per. 4	Per. 4	Per. 4	Per. 4	Per. 4	Per. 4	Per. 4	Per. 4 Av.

Tabell 3.1: *Midling av de fire 6-timers datasettene fra AERO2k over uka 10-16 juni 2002 (Kilde: <http://www.cate.mmu.ac.uk/aero2k.asp>)*

I AERO2k er det utarbeidet både månedsdata og "daglig" data. Månedstaene er gitt for alle de 12 månedene i 2002. Dagligdataene som er benyttet her, er gitt for fire 6-timers perioder (00-06, 06-12, 12-18, 18-00 UTC), slik at de tilsammen utgjør et døgn. Men de fire daglig datasettene er videre midlet over uka 10-16 juni 2002 (se tabell 3.1). Det må av den grunn gjøres en nødvendig antakelse siden vi i denne oppgaven skal se på cirrustrender i relasjon til flytrafikk på daglig nivå. Vi antar at variasjon i flytrafikk fra dag til dag i denne uka er så liten at man med god grunn kan la de fire middel datasettene representere dagligdata. M.a.o., vi antar at flytrafikkdataene er like for alle dagene i uka 10-16 juni 2002. Med denne antakelsen vil det da være mulig å

få fram den globale døgnlige variasjonen av flyvninger og emisjoner i forhold til månedsdatasettene. Alle dataanalyser som gjøres videre må naturligvis samsvare med denne tidsperioden.

I motsetning til ISCCP, begynner AERO2k-datasettene ved Greenwich ved Sørpolen. Flydataene er gitt ved et tredimensjonalt grid, som dekker alle bredde -og lengdegrader og høyder fra 0-50000 fot. Oppløsning på AERO2k-dataene er $1^\circ \times 1^\circ \times 500$ fot. Dette gir da 100 flynivåer, hvor altså flynivå 1 representerer sjønivå opp til 500 fot (1 britisk fot = 0,3048 meter). I denne oppgaven brukes hovedsakelig flynivåer innenfor intervallet 59-82 (8992-12497 meter), som inkluderer flynivåintervallet 63-76 (9601-11582 meter) som ble studert i Stordal m.fl. (2005). Flydistansen som registreres for alle gridboksene og bredde -og lengdegrader for 100 flynivåer, er gitt i nautiske mil (1 nautisk mil = 1852 meter).

3.3 Datasett fra ECMWF

Det siste datasettet som er benyttet her, er meteorologiske data hentet fra ECMWF-modellen. ECMWF er en global numerisk atmosfæremodell som utgjør et viktig redskap i værvarslinga. Dataene fra denne modellen er helt sentrale i regresjonsanalysen, og er spesielt viktig ved beregninger av relativ fuktighet m.h.p. vann og is. Denne parameteren brukes i filtreringsprosessen, som tar utgangspunkt i dataprogrammet tilsendt fra Eric Jensen.

I motsetning til flytrafikkdataene fra AERO2k, består ECMWF-modellen av en vertikal oppløsning på 40 lag. Pga. ulik vertikal oppløsning på de to datasettene, kan dette skape unøyaktigheter ved uthenting av data fra et datasett som skal samsvare med vertikal oppløsningen til et annet datasett (kommer nærmere inn på dette i delkap. 4.5). De modellerte dataene som produseres fra ECMWF-modellen, består av parametre som spesifikk fuktighet, skyfraksjon, temperatur, trykk, skyvann/skyisinnhold, horisontal/vertikal vindhastighet osv. Temperatur, trykk og spesifikk fuktighet utgjør de parametrene som er relevant for denne oppgaven. Trykkparameteren behøver en nærmere forklaring. Trykket P er gitt ved såkalte σ -flater i modellen. Disse flatene er uttrykt ved vertikalkoordinaten $\sigma = P/P_s$. Ved bakken følger flatene det globale terrenget ($\sigma=1$). Fra definisjonen ser vi at jo høyere opp i atmosfæren en luftpakke befinner seg, desto mindre følger flatene terrenget (flaten $\sigma=0$ tilsvarer atmosfærens yttergrense). Trykkparameteren fra ECMWF-modellen er korrigert for den globale topografien. Definisjonen av trykket P ved et hvilket som helst punkt er videre gitt som vekten av luftsøylen over dette punktet. Dette impliserer derfor lavere trykk på σ -flatene over områder med mye topografi, som f.eks. Arktis.

Som nevnt tidligere, brukes relativ fuktighet m.h.p. vann/is i filtreringsprosessen av flydistanse. Men siden disse to størrelsene ikke beregnes direkte

fra ECMWF-modellen, må dette gjøres på egenhånd. Definisjonen av relativ fuktighet m.h.p. vann er gitt ved:

$$RH = \frac{Q}{Q_s} \quad (3.1)$$

hvor Q representerer spesifikk fuktighet og Q_s spesifikk fuktighet ved metning. Q kan fås direkte fra ECMWF-modellen, mens Q_s må beregnes vha. tilnærminger. Fra Rogers og Yau (1989) kan Q_s tilnærmes som:

$$Q_s \approx \varepsilon \frac{e_s}{P} \quad (3.2)$$

hvor ε er forholdet mellom gasskonstanten for tørr og fuktig luft, og e_s representerer metningsstrykket som nevnt tidligere. Her er e_s den eneste ukjente parameteren. Den må i likhet med Q_s beregnes ved en tilnæringsmetode. Fra Flatau m.fl. (1992) presenteres ulike tilnærminger ved bruk av polynomer for å beregne metningsvann-dampstrykket. I denne oppgaven har jeg valgt å benytte Goff-Gratch tilnærmingen for å beregne e_s . Den er gitt ved:

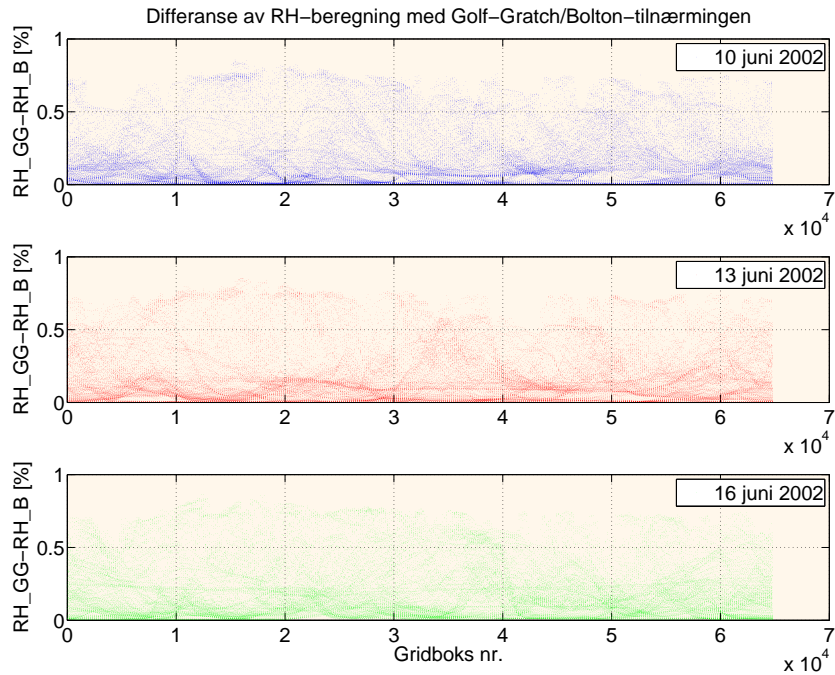
$$e_s = e_{st} 10^Z \quad (3.3)$$

hvor

$$Z = a\left(\frac{T_s}{T} - 1\right) + b \log_{10}\left(\frac{T_s}{T}\right) + c\left(10^{d\left(1-\frac{T_s}{T}\right)} - 1\right) + f\left(10^{h\left(\frac{T_s}{T}-1\right)} - 1\right)$$

der e_{st} er standard bakkestrykk, T er temperaturen kalkulert fra ECMWF-modellen, T_s er kokepunkttemperaturen ved e_{st} , og a, b, c, d, f, h er konstanter. Når e_s nå er kjent, kan Q_s og videre RH beregnes med ganske god nøyaktighet. Beregninger av relativ fuktighet m.h.p. is, RHI , følger samme prosedyre som beskrevet for RH .

Det er brukt en del tilnæringsmetoder ved utregninger av RH/RHI i denne oppgaven. Det kan defor være lurt å kvalitetssikre resultatene før de benyttes i regresjonsanalysen. Ved utførelsen av kvalitetssikringen konsentreres det først og fremst om tilnæringsmetoder av e_s som blir brukt i beregningen av relativ fuktighet. Det finnes mange ulike tilnærminger av metningsvann-dampstrykket, og noen av disse presenteres i Flatau m.fl. (1992). I denne oppgaven brukes som kjent Goff-Gratch tilnærmingen. Denne tilnæringsmetoden sammenliknes med Bolton-tilnærmingen hentet fra Bolton (1980). Dette er de to vanligste metodene for å beregne e_s . Bolton-tilnærmingen benyttes bl.a. i WRF-modellen, som er en mesoskala numerisk værvarslingsmodell. Sammenlikning av beregnet RH v.h.a. Goff-Gratch -og Bolton-tilnærmingen er gjort for 09UTC for 3 utvalgte dager i uka 10-16 juni 2002 ved å benytte nødvendig input-data fra ECMWF-modellen. Resultatet i form av residualer er vist i figur 3.2. Fra figuren ser man at beregningene med Goff-Gratch metoden konsekvent ligger høyere enn beregningene med Bolton-metoden.



Figur 3.2: Differanse mellom beregning av relativ fuktighet m.h.p. vann v.h.a. Golf-Gratch -og Bolton-tilnærmingen for flynivå 75, gitt i prosent.

Men avvikene er små (under 1%), slik at resultatene fra disse to tilnærmingene samsvarer rimelig bra. Det virker derfor som et fornuftig valg å bruke Golf-Gratch tilnærmingen for beregninger av e_s . Et viktig poeng er at det kan være lurt å benytte seg av den tilnæringsmetoden som gir de høyeste estimatene av RH , som forøvrig er gjort i denne oppgaven. Som vi skal se senere i delkap. 4.5 kan modellering av spesifikk fuktighet gi betydelige usikkerheter, og denne størrelsen underestimeres ofte i de ulike modellene.

3.4 Programoppsett i MATLAB

Resultatene i denne oppgaven er for det meste utarbeidet vha. programmeringsspråkene fra MATLAB (MATrix LABoratory) og FORTRAN, med sterk vektlegging på MATLAB.

Ved korrelasjonsanalyser av cirrus -og flytrafikkdata, må oppløsningen til de forskjellige datasettene være den samme. Oppløsningen til datasettet fra ISCCP er $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, mens dataene fra ECMWF/AERO2k er på $1^\circ \times 1^\circ$. Vi har i denne oppgaven valgt å konvertere datasettene fra $1^\circ \times 1^\circ$ til $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. Dermed unngår man å konvertere datasettene til en oppløsning som er finere enn den groveste oppløsningen. Konverteringsmetoden er videre gitt ved:

$$\frac{(x_{i/j} + x_{i+1/j+1} + \frac{x_{i+2/j+2}}{2})}{2.5} \quad \text{for } i = 1, 3, \dots, 143, j = 1, 3, \dots, 71 \quad (3.4)$$

$$\frac{\left(\frac{x_{i+1/j+1}}{2} + x_{i+2/j+2} + x_{i+3/j+3}\right)}{2.5} \quad \text{for } i = 2, 4, \dots, 144, j = 2, 4, \dots, 72 \quad (3.5)$$

avhengig av om bredde -og lengdegradene er oddetall eller partall. Det er vel å merke bare AERO2k-datasettet (og ikke ECMWF) som konverteres til $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, fordi det brukes direkte i regresjonsanalysen. ECMWF-datasettet brukes kun indirekte, ved beregning av relativ fuktighet m.h.p. vann/is. Det er viktig å beholde den opprinnelige oppløsningen til datasettene hvis det er mulig, fordi konverteringen kan gi unøyaktigheter i de videre beregningene.

De ulike vertikale oppløsningene til ECMWF og AERO2k-dataene kan også gi unøyaktigheter ved uthenting av data fra et datasett som skal samsvare med et annet datasett. Pga. den vertikale oppløsningen til de to datasettene impliserer det da at gridboksene i ECMWF-modellen er større enn tilfellet er for gridboksene i AERO2k-dataene. Uthentingsprosessen må altså baseres på tilnærminger. Dette beskrives nærmere i delkap. 4.5.

Selve programstrukturen er lagt opp i MATLAB. Her hentes inn satellitt, flytrafikk -og modelldata fra hhv. ISCCP, AERO2k og ECMWF for uka 10-16 juni 2002. Det korresponderende trykket til det flynivået som skal analyseres for spesifikk ukedag og UTC-tidspunkt, brukes til å hente ut riktige lagverdier fra ECMWF-datasettet. Som nevnt tidligere, benyttes tilnæringsfunksjonen for å hente ut nærmeste lagnivåverdier. ECMWF-dataene for det gitte tidspunktet brukes til å kalkulere metningsvanndamptrykket m.h.p. vann/is (Golf-Gratch tilnærming), spesifikk fuktighet m.h.p. vann/is og avslutningsvis relativ fuktighet m.h.p. vann/is. Dette metningsforholdet benyttes videre i filtrering av flytrafikk. For hvert gridpunkt benyttes FORTRAN-programmet til å beregne det tilhørende kritiske metningsforholdet m.h.p. is for å oppnå metning m.h.p. vann i plumen (Schmidt-Appleman kriteriet, figur 1.2). Etter filtreringsprosessen vil dermed de resterende punktene oppfylle $S_{i,amb} > S_{i,crit}$. Det vil bli gjort korrelasjonsanalyser for både $S_{i,amb} < S_{i,crit} + S_{i,amb} > S_{i,crit}$ (før filtrering), og $S_{i,amb} > S_{i,crit}$ (etter filtrering). Analysene utføres både globalt og for regionale områder, for forskjellige cirrusparametre, flynivåer og tidspunkter.

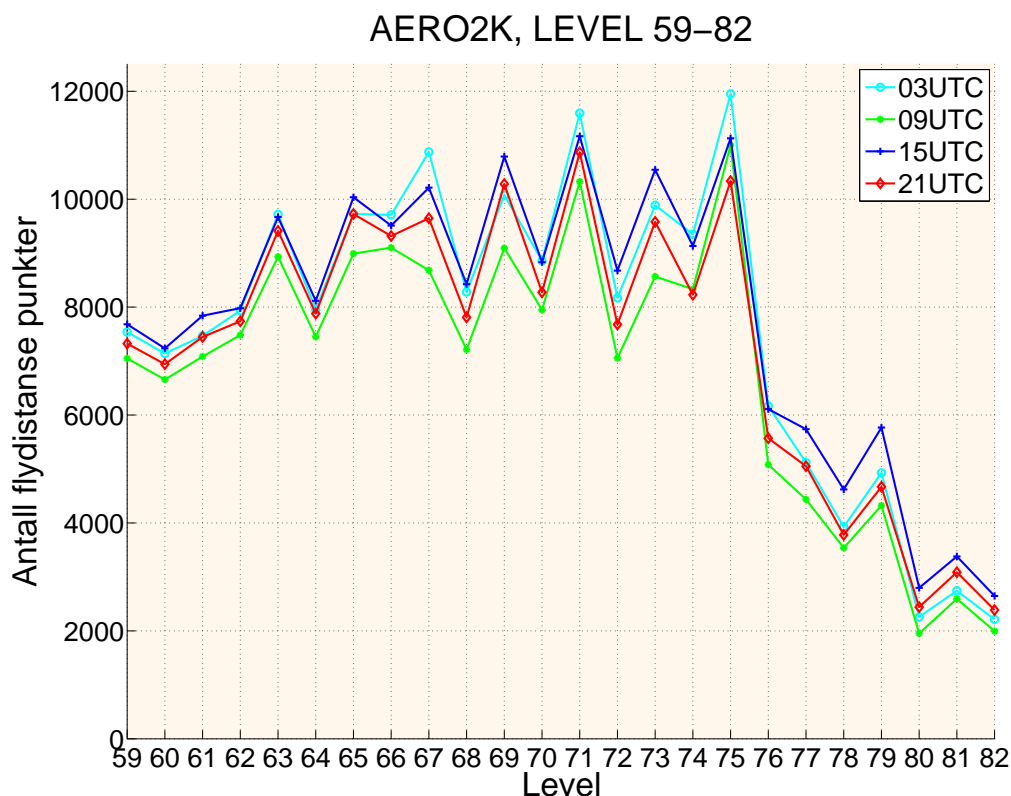
Kapittel 4

Resultater og tolkning

I dette kapitlet presenteres korrelasjonsresultatene for de forskjellige cirrusparametrene. Det vil bli gått skjematisk igjennom hver av de tre parametrene, både globalt og regionalt, for ulike UTC-tidspunkter. Regresjonsanalysene blir utført både før/etter filtrering av flydistansepunkter, i henhold til Schmidt-Appleman kriteriet. Avslutningsvis vil resultatene bli drøftet, og settes i en logisk sammenheng. Usikkerheter i resultatene vil bli grundig diskutert, samtidig som det framlegges forslag til forbedringer. Til hjelp i denne prosessen er det viktig å få en oversikt over den generelle vær-situasjonen for den aktuelle tidsperioden (10-16 juni 2002). Jeg har derfor benyttet reanalyser fra ECMWF.

Som nevnt tidligere i kapittel 3.1, er alle de tre cirrusparametrene hentet fra ISCCP. Cirrus optisk tykkelse er den eneste parameteren som hentes direkte fra ISCCPs standardprodukter. De to andre parametrene er egne avledninger av ISCCP-datasettet. Cirrus optisk tykkelse representerer videre en middelværdi for hele cirrusintervallet (se figur 3.1). Den ene av de to siste parametrene, cirrusfraksjon, er derimot avledet ut fra den midtre delen av cirrusintervallet (310hPa-180hPa). Fra AERO2k-datasettet tilsvarer dette flynivåintervallet 59-82 (8992-12497 meter). Derfor vil alle analysene i denne oppgaven utføres innenfor dette flyintervallet. I dette høydeintervallet i atmosfæren er mesteparten av flytrafikken lokalisert, og man kan forøvrig forvente gode muligheter for dannelse av kondensstriper her. Dette flynivåintervallet er altså av størst interesse for å påvise eventuelle cirrustrender i relasjon til flytrafikk.

Før regresjonsanalysene presenteres for de enkelte cirrusparametrene, kan det være hensiktsmessig å få en oversikt over fly -og de meteorologiske forholdene innenfor dette flynivåintervallet. Jeg har derfor utarbeidet generelle resultater som flytrafikkmengden, potensielle muligheter for dannelse av kondensstriper (kalt cirrusOK) o.l. for flynivå 59-82. Figur 4.1 viser fordelingen av flydistansepunkter globalt som funksjon av flynivå 59-82, for de fire tidspunktene 03/09/15/21UTC. Denne figuren sier altså ikke nødvendigvis hvor mye som er fløyet innenfor hver gridboks, bare om det er observert flytrafikk.

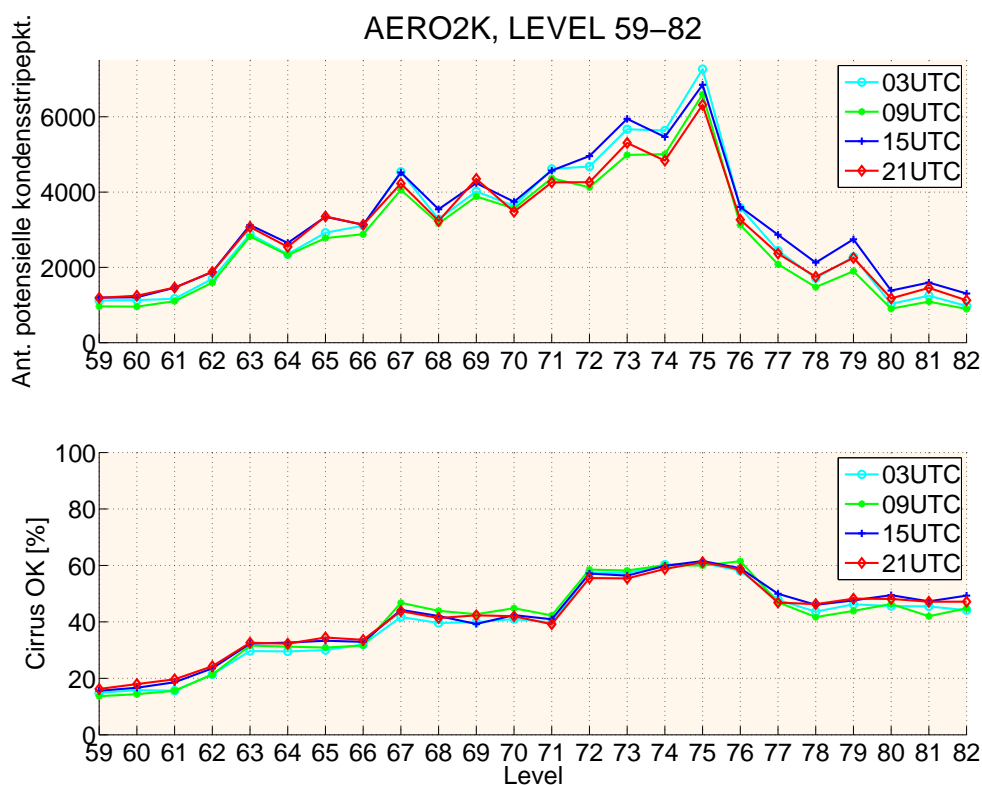


Figur 4.1: Den globale tettheten av flytrafikk for flynivå 59-82.

Vi ser at flytrafikken er mest utbredt for 03/15UTC uavhengig av flynivå, mens den når et minimum for 09UTC. Men tettheten av flytrafikk følger generelt samme mønster for de fire UTC-tidspunktene, som impliserer små variasjoner. Desto mere interessant, er naturligvis variasjonen innenfor flynivåintervallet. Logisk nok, er det store variasjoner i tettheten av flytrafikk avhengig hvor man flyr i atmosfæren. Flyobservasjoner viser mest flytrafikk ved 10800 (Flylevel 71, betegnes også FL) og 11400 meters høyde (FL 75). Over 12000 meters høyde ($FL \geq 76$) er tettheten av flytrafikk lavest, siden sivile flyvninger sjelden er lokalisert så høyt.

I figur 4.2 presenteres det 2 plott, hvor den øverste figuren viser antall potensielle kondensstripepunkter globalt som funksjon av FL 59-82 for de fire tidspunktene 03/09/15/21UTC. Den nederste figuren viser denne andelen gitt i prosent (cirrusOK) for hvert av flynivåene. Frekvensen av potensielle kondensstripepunkter¹ er beregnet ut fra Schmidt-Appleman kriteriet, der jeg har benyttet det kritiske metningsforholdet $S_{i,crit}$ for å oppnå metning m.h.p. vann i plumen som filtreringsparameter. Schmidt-Appleman beregningene er gjort for alle de 7 dagene for hvert flynivå siden ECMWF-datasettet

¹Definisjonen av et kondensstripepunkt er gitt ved de flydistansepunktene hvor de meteorologiske forholdene er tilrettelagt for dannelse av kondensstriper.

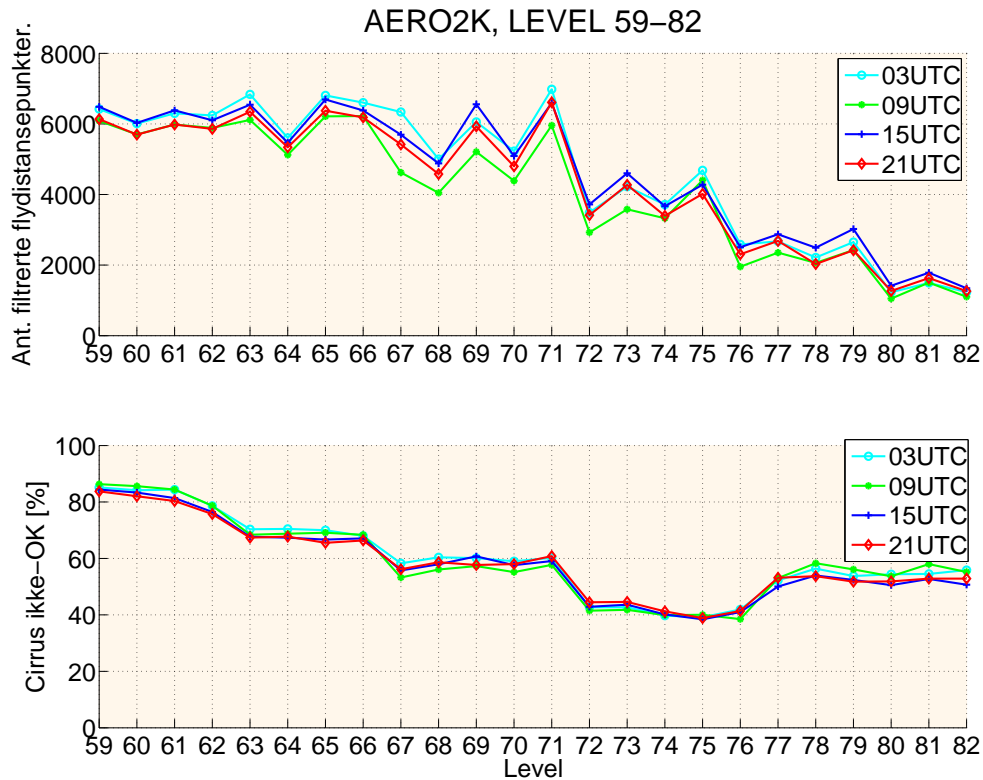


Figur 4.2: *Frekvens av potensiell kondensstripedannelse.*

som benyttes er tilgjengelig for hele tidsperioden 10-16 juni 2002. Så antall potensielle kondensstripepunkter for hvert av flynivåene 59-82 representerer altså et middel over disse 7 dagene, siden variasjonen fra dag til dag er forholdsvis liten. Dette er naturligvis også tilfellet for cirrusOK-andelen.

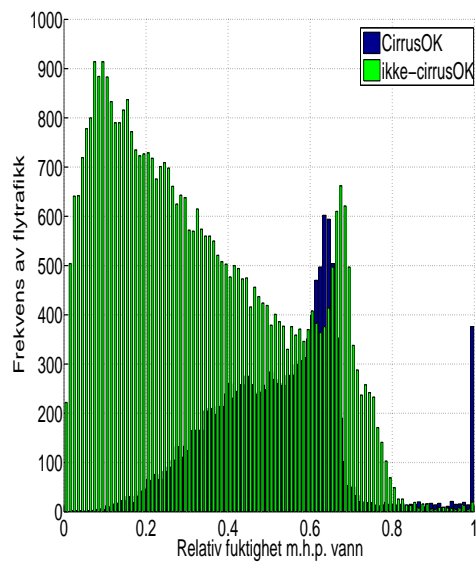
Det er verdt å merke seg fra figur 4.2 at spesielt FL 75 peker seg ut som et godt nivå å studere fly-induserte cirrustrender. I dette nivået er både tettheten av flytrafikk høy, samtidig som det er gode muligheter for dannelse av kondensstriper. I likhet med FL 75 er det også gode meteorologiske forhold for kondensstriper i FL 76, men det forekommer forholdsvis lite flytrafikk i dette nivået. For FL 71 er situasjonen derimot motsatt; høy tetthet av flytrafikk, men langt dårligere forhold for dannelse av kondensstriper.

Dette kan også ses igjen i figur 4.3. Den øverste figuren viser fordelingen av antall flydistansepunkter globalt som filtreres ut i henhold til Schmidt-Appleman kriteriet som funksjon av flynivå 59-82 for de fire tidspunktene 03/09/15/21UTC. Den nederste figuren viser denne andelen gitt i prosent (kalt cirrus-ikkeOK) for hvert av flynivåene. Verdiene representerer i likhet med figur 4.2 et middel for uka 10-16 juni 2002. Plottene i figur 4.2 korresponderer naturligvis med plottene i figur 4.3, i henhold til den totale mengden av flytrafikk og andelen gitt i prosent.

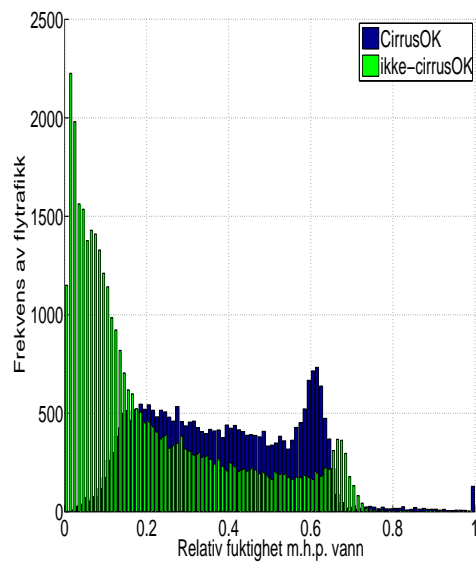


Figur 4.3: Frekvens av filtrerte flytrafikkpunkter.

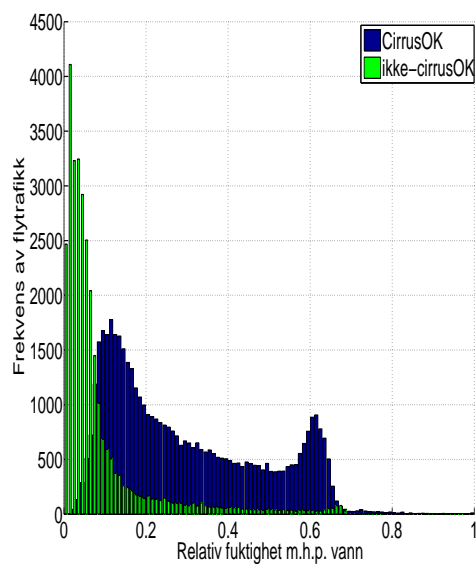
Resultatene fra figurene presentert ovenfor, tar som kjent utgangspunkt i Schmidt-Appleman kriteriet, $S_{i,amb} > S_{i,crit}$. Fordelingen av relativ fuktighet kan variere mye i vertikalen. Derfor vil også variasjonen være stor innenfor flynivåintervallet 59-82. De høyeste andelen av RH vil være lokalisert i den nedre delen av høydeintervallet, pga. den spesifikke fuktigheten er høyere her. Minimumsverdiene for de fire tidspunktene ligger på rundt 0.65-0.70 i FL82, mens maksimumsverdiene varierer fra rundt 0.95-0.99, lokalisert i FL 59. I figur 4.4 er den globale fordelingen av relativ fuktighet plottet som funksjon av frekvensen av flytrafikk for fire ulike høydenivåer. Dette er gjort for 15UTC hvor alle de 7 dagene er samlet. RH er fordelt over 100 intervaller, med intervallbredde på 0.01. Y-aksen indikerer altså fordelingen av flytrafikk innenfor hvert RH -intervall. Fordelingen er både vist for punktene som oppfyller fuktighetskriteriet (cirrusOK), og de som ikke gjør det (ikke-cirrusOK). Totalfordelingen av flytrafikk kan da uttrykkes cirrusOK+ikke-cirrusOK. Figuren vil videre gi en indikasjon på den vertikale andelen av flytrafikk som kan initialisere dannelse av kondensstriper. Figur 4.4(a)/4.4(b)/4.4(c) viser RH -fordelingen for hhv. FL 62, 70 og 75. Man ser tydelig hvordan andelen av cirrusOK i forhold til totalen øker jo høyere i atmosfæren man befinner seg (en økning i cirrusOK på ca. 38% fra FL 59 i forhold til FL 75). Dette



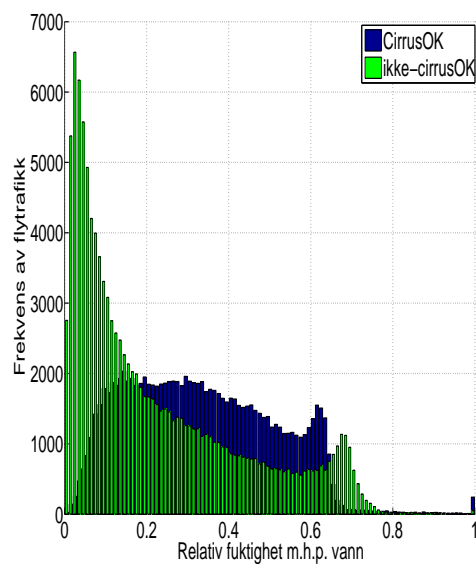
(a) Flynivå 62, 9449 meter



(b) Flynivå 70, 10668 meter



(c) Flynivå 75, 11430 meter



(d) Flynivå 59-82, 8992-12497 meter

Figur 4.4: Fordelingen av relativ fuktighet m.h.p. vann som funksjon av frekvensen av flytrafikk i ulike høydenivåer for 15UTC.

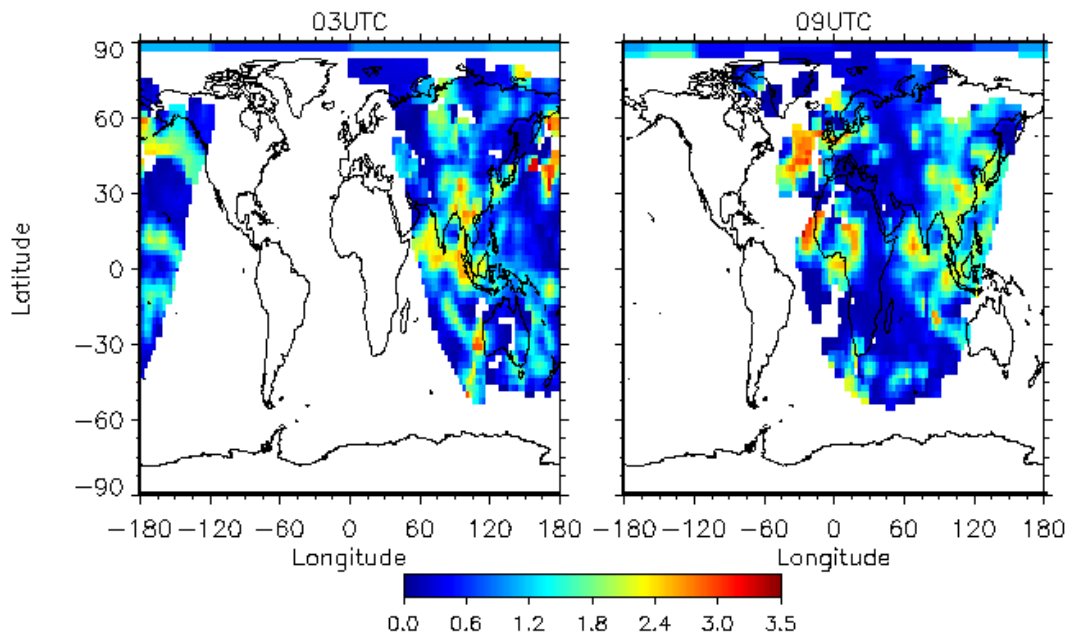
er hovedsakelig pga. temperaturen er lavere høyere oppe i atmosfæren, noe som er gunstig for dannelse av kondensstriper. Samtidig viser også fordelingen av RH for cirrusOK forskjellig form, avhengig av hvilket av de 3 nivåene man ser på. For FL 70 og 75, er generelt andelen av cirrusOK med lave RH -verdier mye høyere enn for FL 62. Den øker også dramatisk fra FL 70 til FL 75. Dette har sammenheng med den lavere temperaturen i disse nivåene, som initialiserer dannelsesprosessen. Pga. den lave temperaturen kan man altså oppnå metning m.h.p. vann ved betydelig lavere verdier av RH enn det som er tilfellet i nedre del av flyintervallet. Men lave RH -verdier vil ikke gi opprettholdelse av kondensstriper fordi $RHI < 1$. I flynivåene over FL 75 vil temperaturen fortsette å synke, men figur 4.2 viser at andelen av cirrusOK når et maksimum ved FL 75, og deretter synker. Dette indikerer at dannelse av kondensstriper (fordeling av RH) ikke bare er avhengig av T , men også andre faktorer som spesifikk fuktighet Q . Nærmere detaljer om dette diskuteres i delkap. 4.4.

Helt til slutt har jeg også tatt med fordelingen av RH midlet over FL 59-82 for samme tidspunkt. Middelet av dette intervallet samsvarer med middelet fra trykkintervallet til de tre cirrusparametrene, og det som brukes i regresjonsanalysene. Andelen av cirrusOK i FL 59-82 utgjør ca. 45% av totalfordelingen av flytrafikk, m.a.o. ca. halvparten av de globale flyvningene kan medføre dannelse av kondensstriper. Dette er likevel vesentlig mindre enn i FL 75, pga. de lave cirrusOK-andelene i nedre del av intervallet. Verdiene av RH ligger hovedsakelig mellom 0-0.70. I likhet med FL 75, er en forholdsvis høy frekvens av flytrafikk representert med lave RH -verdier.

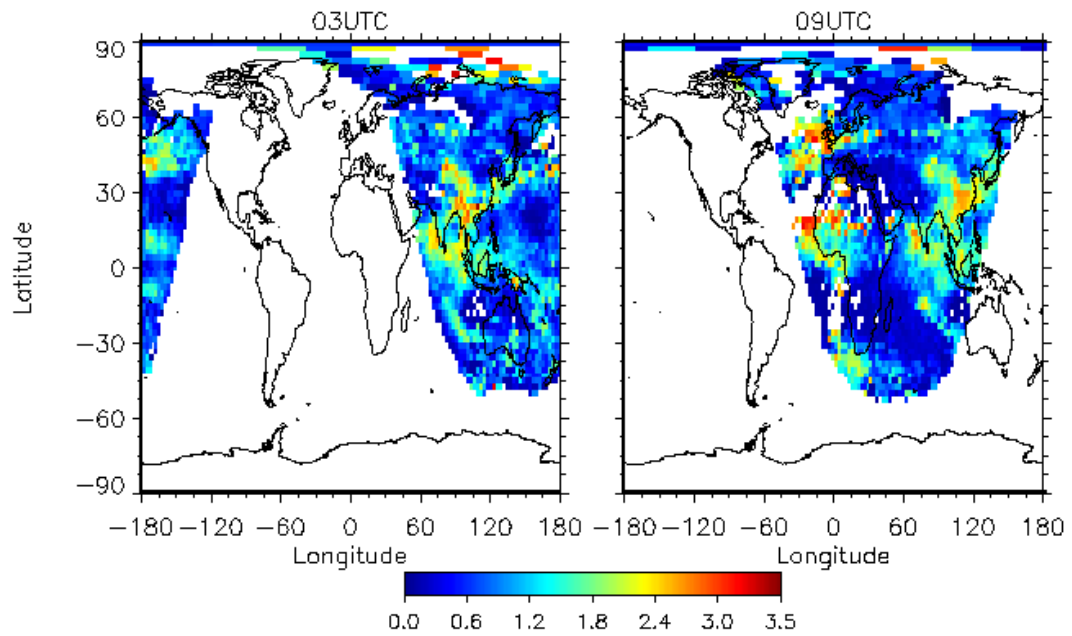
4.1 Resultater fra cirrus optisk tykkelse

Ut fra de generelle resultatene har vi nå fått en dypere innsikt i om hvorvidt forholdene er tilrettelagt for dannelse av kondensstriper innenfor flynivåintervallet 59-82. I det påfølgende presenteres nå resultatene fra hver av cirrusparametrene og studeres nærmere i detalj. Den første parameteren som skal analyseres er cirrus optisk tykkelse. Som tidligere nevnt, er denne cirrusparameteren representert ved en middelvei for hele cirrusintervallet 50hPa-440hPa, i motsetning til cirrusfraksjon som er en middelvei i trykkintervallet 310hPa-180hPa.

Figur 4.5(a) viser målt optisk tykkelse fra cirruskyer for en spesifikk dag (12 juni) fra uka 10-16 juni 2002, som funksjon av bredde -og lengdegrad for tidspunktene 03 -og 09UTC. I kap. 2.3 nevnte jeg at satellittene om dagen benytter reflektert sollys for å bestemme ulike skyegenskaper. Dette gjelder også målinger av optisk tykkelse for cirruskyer. Den spesielle konturformen betegner altså solas globale variasjon ved de gitte tidspunktene. De hvite områdene i figuren ("missing data") kan videre indikere to ting; enten mangel på sollys som gjør målinger av optisk tykkelse umulig, eller rett og slett at det



(a) Cirrus optisk tykkelse for 12 juni 2002 03/09UTC



(b) Cirrus optisk tykkelse midlet for 10-16 juni 2002 03/09UTC

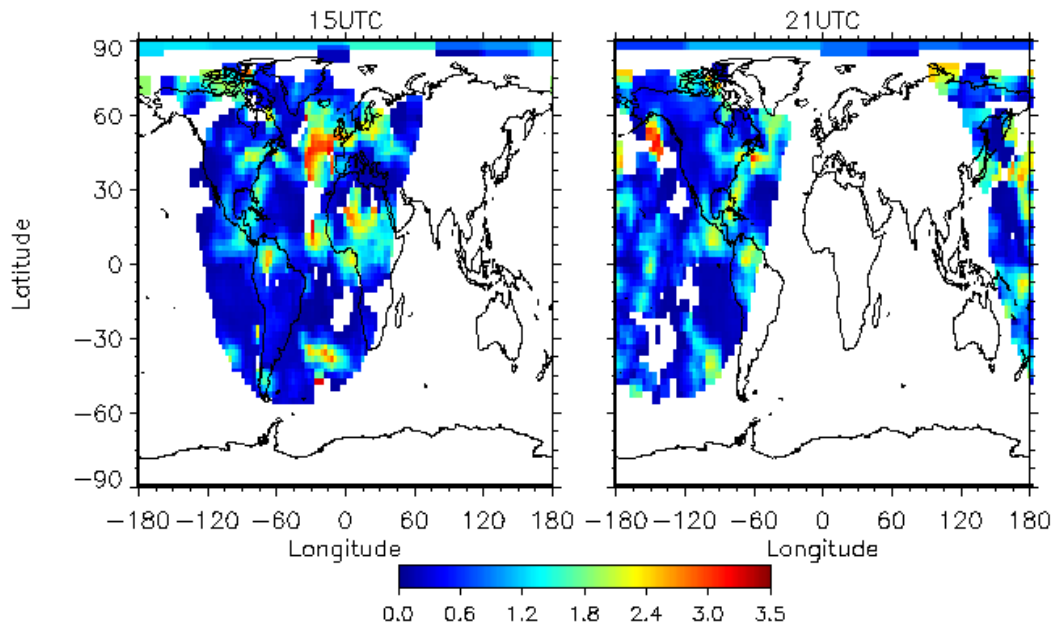
Figur 4.5: Plott av cirrus optisk tykkelse for 03/09UTC.

ikke er observasjoner i disse områdene. Så utenfor dette solområdet skyldes ”missing data”-områder primært at sola er under horisonten, mens de hvite områdene innenfor rett og slett er forårsaket av at det ikke foreligger noen observasjoner. Begge årsakene gir altså ingen data. Dette er forøvrig gjeldende for alle figurene som omhandler cirrus optisk tykkelse. Det er visse områder i figur 4.5(a) som skiller seg ut. Spesielt store deler av Asia (Øst-Asia) er et område hvor det er registrert mye cirrus for begge tidspunktene. Men også Nord-Atlanteren, deler av Europa og nordvest-Afrika har store forekomster av cirrus ved 09UTC. I figur 4.5(b) er den samme parameteren gjengitt som funksjon av bredde -og lengdegrad for 03/09UTC, men her er alle dagene midlet over uka 10-16 juni 2002. Ved sammenlikning av de to figurene ser vi igjen de samme hovedtrekkene, som impliserer små variasjoner. Nærmere analyser for alle ukedagene viser liten variabilitet i cirrus optisk tykkelse fra dag til dag.

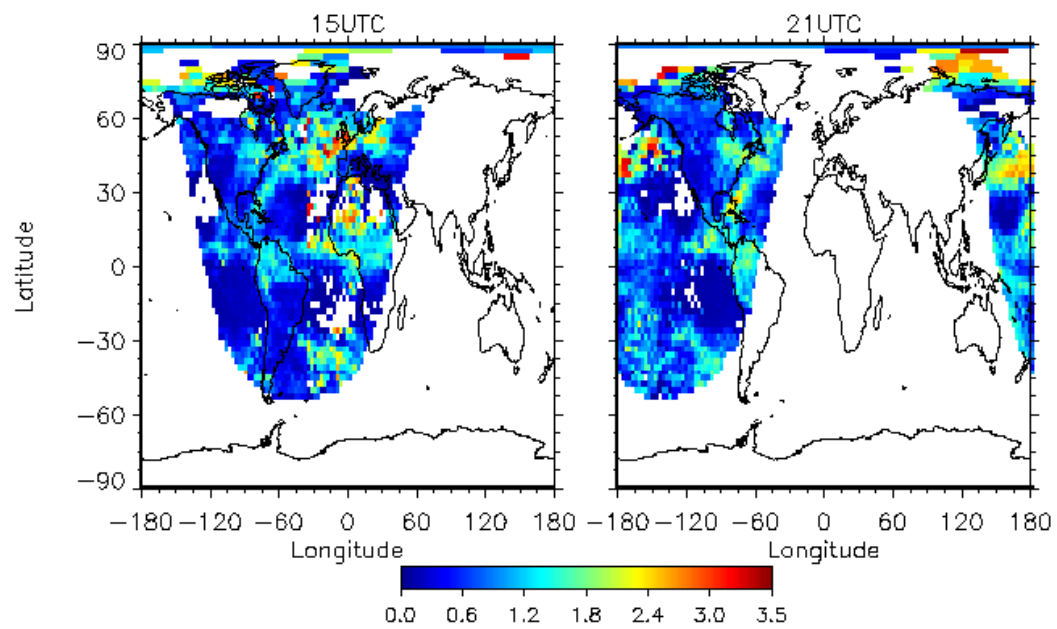
Jeg har nå presentert cirrus optisk tykkelse for tidspunktene 03 -og 09UTC. Det ville vært interessant å se om man fant liknende hovedtrekk i den globale cirrusforekomsten for andre tidspunkter. I figur 4.6(a) vises derfor målt optisk tykkelse fra cirrusskyer for 12 juni 2002 som funksjon av bredde -og lengdegrad, for 15/21UTC. For 15UTC skiller også deler av Nord-Atlantern og Europa seg ut med store forekomster av cirrus, samt i deler av Nord-Afrika. 6 timer senere er ikke intensiteten på den kortbølgete strålingen i disse områdene høy nok for å kunne utføre tilstrekkelige målinger av optisk tykkelse fra cirrusskyer (unntaket er deler av det Nord-Atlantiske flybeltet). Men over mesteparten av USA er det kun målt små mengder av cirrus for begge tidspunktene, mens noe større over Nordøst-USA. Langs denne delen av USA er mange av de store byene lokalisert, med utpreget flytrafikk. Over Asia er det nattetid, som resulterer i ingen data (eller ihvertfall ikke tilstrekkelig sollys til å kunne måle optisk tykkelse). Som for de to tidligere tidspunktene, 03/09UTC, sammenliknes figur 4.6(a) med middelverdien av cirrus optisk tykkelse for uka 10-16 juni 2002 fra figur 4.6(b). Vi kjenner igjen de samme hovedtrekkene som fra figur 4.6(a). Nærmere analyser for alle ukedagene viser at det også her er forholdsvis små variasjoner fra dag til dag i cirrus optisk tykkelse.

For å påvise cirrustrender i relasjon til flytrafikk, er det naturlig å korrelere cirrus optisk tykkelse med fordelingen av flydistanse. I motsetning til figur 4.1 benyttes flydistansen som er fløyet innenfor de gridboksene hvor det er flyobservasjoner i regresjonsanalysen. Optimalt sett burde denne distansen korreleres i samme intervall som cirrus optisk tykkelse, men dette ble vanskelig pga. ulik vertikal utstrekningen på ISCCP-datasettet i forhold til AERO2k-datasettet (FL 100 i AERO2k tilsvare ca. 116hPa).

Det må derfor gjøres en antakelse i den videre regresjonsanalysen som omhandler cirrus optisk tykkelse. Det antas at cirrus optisk tykkelse representerer en middelverdi for flyintervallet FL 59-82 (310hPa-180hPa). I dette

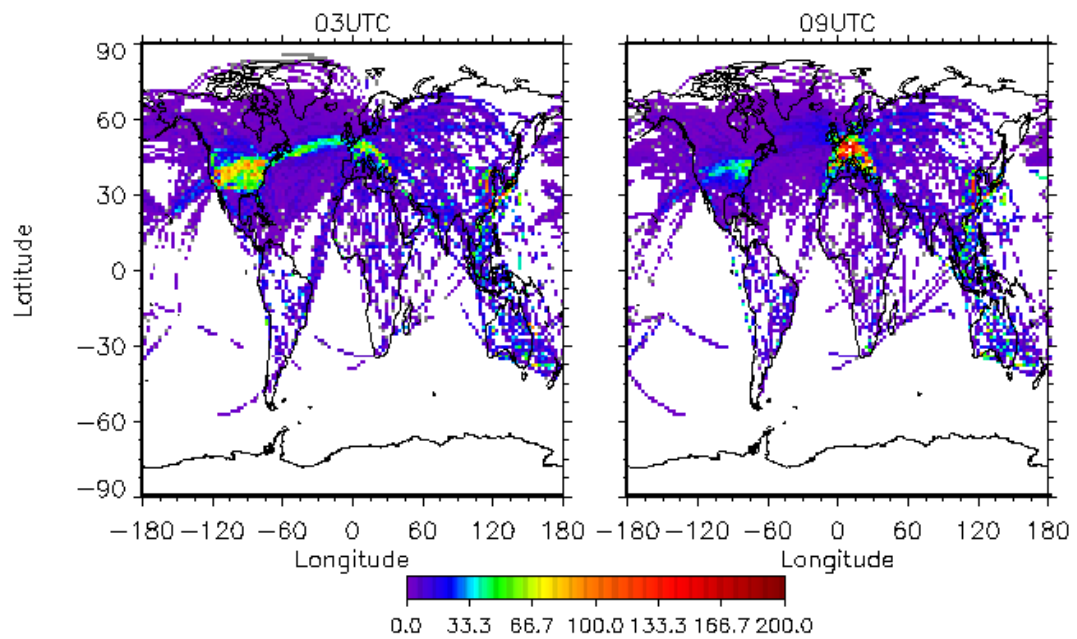


(a) Cirrus optisk tykkelse for 12 juni 2002 15/21UTC

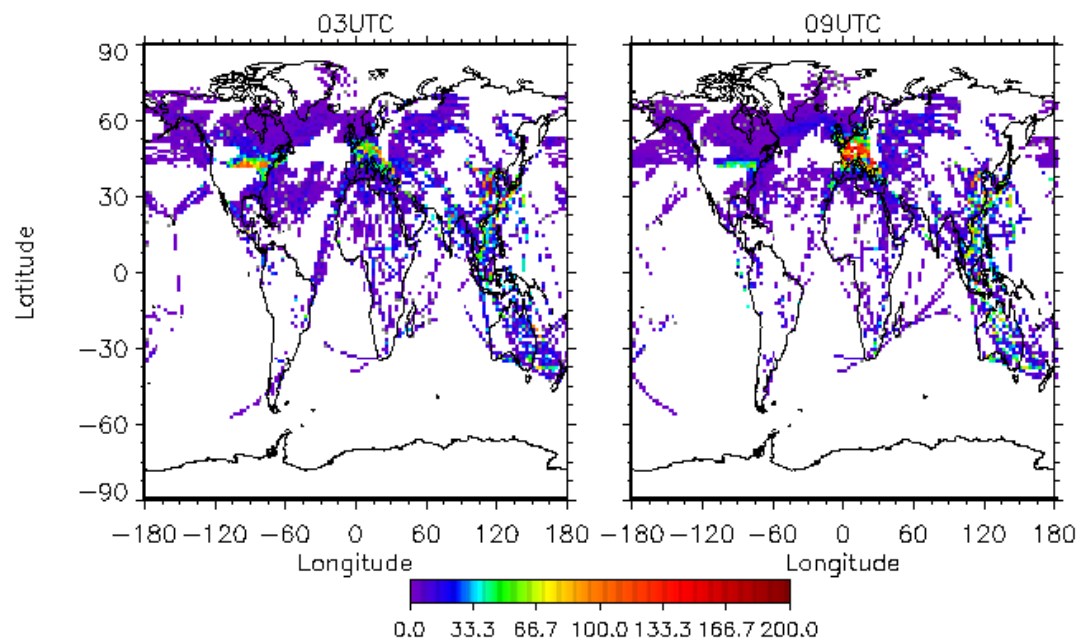


(b) Cirrus optisk tykkelse midlet for 10-16 juni 2002 15/21UTC

Figur 4.6: Plott av cirrus optisk tykkelse for 15/21UTC.



(a) Fordelingen av flydistanse for FL 59-82 03/09UTC



(b) Fordelingen av flydistanse etter utfiltrering ved bruk av Schmidt-Appleman kriteriet, for FL 59-82 for 12 juni 2002 03/09UTC

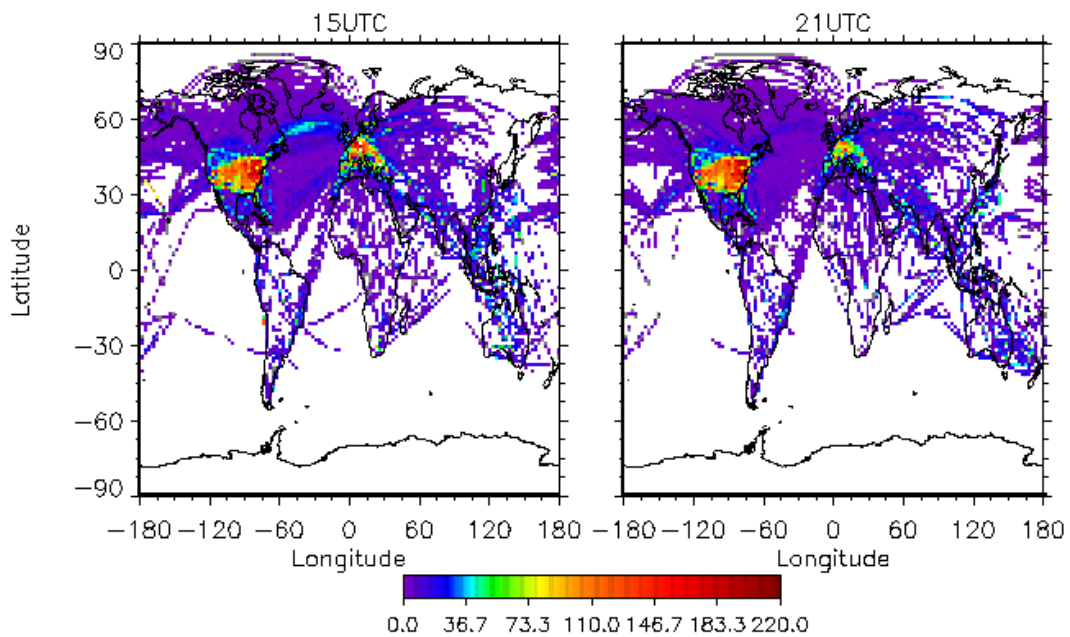
Figur 4.7: Romlig fordeling av flydistanse som funksjon av bredde -og lengdegrad for 03/09UTC.

intervallet er dessuten den største andelen av flytrafikk lokalisert, med de beste mulighetene for dannelse av kondensstriper.

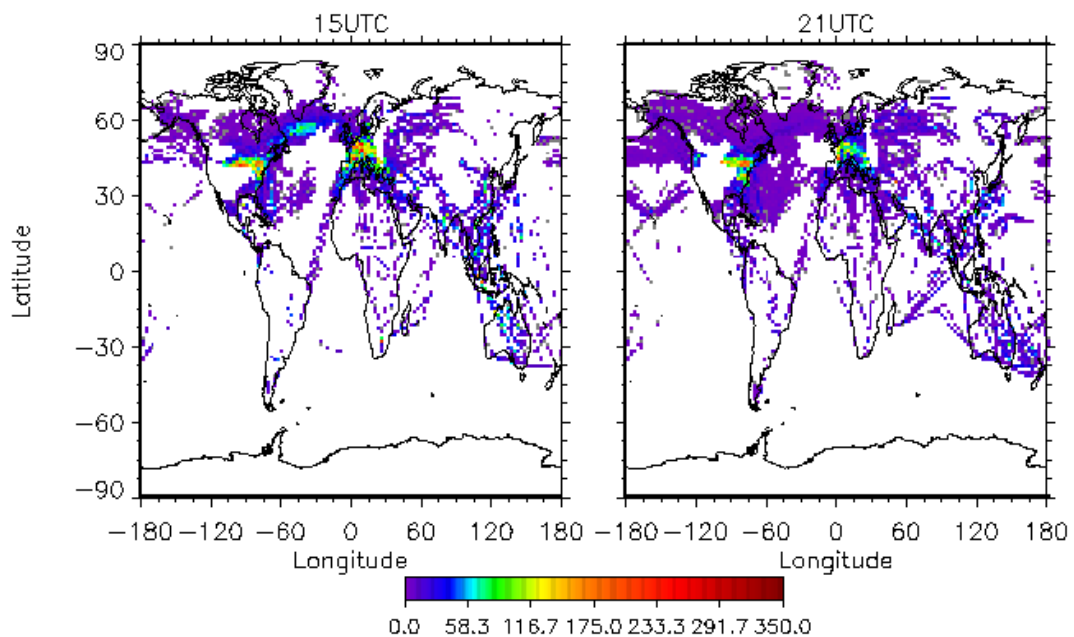
Figur 4.7(a) viser den globale, romlige fordelingen av flydistanse midlet over både flynivåintervallet 59-82 og uka 10-16 juni 2002 for 03/09UTC. For disse flykartene indikerer også de hvite områdene "missing data", m.a.o. at det ikke foreligger noen observasjoner av flytrafikk. Flydistansen er forøvrig gitt i nautiske mil. Ikke uventet er områdene med mest flytrafikk lokalisert over USA, Sentral-Europa og Øst-Asia, men det er store områder med forholdsvis lite flytrafikk. Tidsforskjellene spiller naturligvis også inn på den globale fordelingen av flytrafikk. Legg f.eks. spesielt merke til den Nord-Atlantiske flysektoren som er mye tydeligere for 03UTC. Dette henger sannsynligvis også sammen med situasjonen over USA, som er ca. 6-8 timer bakut i forhold til Greenwich. Om natten (09UTC, kl. 01-03 lokal tid) er det langt færre flyvninger, som gjør at kontrasten mellom USA og Europa er såpass stor ved dette tidspunktet. Denne forskjellen kan også gjenkjennes ved å sammenlikne de to tidspunktene i figur 4.7(a). Her er tettheten av flytrafikk langt større over USA om kvelden (03UTC, kl. 21-23 lokal tid), som også gir utslag i flyvningene over Nord-Atlanteren. Det motsatte er tilfellet over Europa for de to tidspunktene.

Videre er det viktig å huske på antakelsen som ble gjort for AERO2k-dataene. Variasjonen i flytrafikken antas som såpass liten fra dag til dag at figur 4.7(a) gir et godt bilde av flytrafikken for hver av dagene i den aktuelle uka (f.eks. 12 juni 2002, som representerer den vilkårlige dagen som blir brukt i figur 4.7(b)).

Schmidt-Appleman kriteriet brukes som tidligere nevnt for å filtrere ut flytrafikk. Dette er gjort med utgangspunkt i forrige figur. Et særdeles viktig poeng ved denne prosessen, er at de meteorologiske dataene fra ECMWF-modellen er tilgjengelig for hver av dagene i den aktuelle uka. Etter filtreringsprosessen vil derfor fordelingen av flytrafikk variere for hver av de 7 dagene avhengig av de meteorologiske forholdene i atmosfæren. I figur 4.7(b) er dette vist for den spesifikke dagen, 12 juni 2002, for de samme tidspunktene og det samme flynivåintervall. Forskjellen mellom de to tidspunktene etter filtrering er relativt små. Man ser tydelig områder som er mere tilrettelagt for dannelse av kondensstriper enn andre. Dette gjelder spesielt over Sentral-Europa, hvor det filtreres ut lite. De samme trekkene er også gjengitt for Øst-Asia. For den Nord-Atlantiske flysektoren blir store områder med forholdsvis høy tetthet av flytrafikk filtrert ut i henhold til fuktighetskriteriet. Spesielt gjelder dette for 03UTC. Dette er også tilfelle over USA der forholdene for dannelse av kondensstriper er langt dårligere, i områder med mye flytrafikk. I nabolandet Canada er situasjonen helt motsatt. Ved sammenlikning av figur 4.7(a) og 4.7(b) kommer omfanget av filtreringsprosessen klart fram. Nærmere detaljer om de meteorologiske forholdene for de ulike områdene blir diskutert



(a) Fordelingen av flydistanse for FL 59-82 15/21UTC



(b) Fordelingen av flydistanse etter utfiltrering ved bruk av Schmidt-Appleman kriteriet, for FL 59-82 for 12 juni 2002 15/21UTC

Figur 4.8: Romlig fordeling av flydistanse som funksjon av bredde -og lengdegrad for 15/21UTC.

senere i delkapittel 4.4.

Den globale variasjonen i flytrafikk følger naturligvis tiden på døgnet. For å illustrere dette er fordelingen av flytrafikk for 15/21UTC plottet i figur 4.8(a), som middel av flynivåintervallet 59-82 og uka 10-16 juni 2002. Ved disse tidspunktene er det blitt for -og ettermiddag i USA, og dermed betraktelig flere flyobservasjoner. Ellers er mange av hovedtrekkene de samme 6-12 timer senere. Mest flytrafikk er lokalisert over Sentral-Europa, den Nord-Atlantiske flysektoren, USA og deler av Øst-Asia. Som for 03/09UTC, gir dette et godt bilde av flysituasjonen for hver av de 7 dagene for 15/21UTC.

De samme hovedtrekkene går også igjen i figur 4.8(b) hvor Schmidt-Appleman kriteriet er benyttet for 15/21UTC. Her er det verdt å merke seg fargeskalaene til de to figurene 4.8(a) og 4.8(b). Vi ser at verdiene etter filtreringsprosessen for dette tidspunktet faktisk er høyere. Årsaken til dette ligger i vektingen av flynivåene 59-82 etter å ha inkludert fuktighetskriteriet. Man kan da få den situasjonen at mange små verdier blir filtrert ut, mens de resterende verdiene bidrar til at vektingen blir større. Dette kan også gi utslag i regresjonsplottene (se figur 4.9).

Generelt resulterer filtreringsprosessen i færre områder med flytrafikk for 15UTC sammenliknet med de to foregående tidspunktene, mens det motsatte er tilfellet for 21UTC. Kartet viser at det overhodet ikke er forhold for dannelse av kondensstriper over store deler av USA (i likhet med 09UTC), spesielt i den midtre delen av USA hvor det er observert mye flytrafikk. Tatt i betraktning av de meteorologiske forholdene ved dette tidspunktet, er Sentral-Europa, Øst-Asia og deler av den Nord-Atlantiske flysektoren mest interessant for regresjonsanalysen. Men som vi skal se senere kan likevel de få resterende punktene over USA bidra til positivt utslag i regresjonsanalysen.

Jeg har nå presentert de to parameterene som er relevant for regresjonsanalysen, globalt for fire ulike tidspunkter. Jeg vil nå vise noen få utvalgte resultater med cirrus optisk tykkelse fra denne analysen, både globalt og regionalt hovedsakelig for tidspunktene 09/15UTC. På slutten av delkapittel 4.1 gis det en samlet oversikt over alle korrelasjonsresultatene for denne parameteren.

I figur 4.9 er cirrus optisk tykkelse for hele uka 10-16 juni 2002 korrelert globalt med flydistanse for flynivå 59-82 for 09/15UTC, både med/uten Schmidt-Appleman kriteriet. Hver av de 7 dagene er altså korrelert med den romlige fordelingen av flydistanse for de korresponderende dagene og deretter samlet i ett plott. Når man ikke tar hensyn til Schmidt-Appleman kriteriet betyr det da at cirrus optisk tykkelse korreleres med samme mengden av flytrafikk for det gitte tidspunktet uavhengig av hvilken dag det er. Derimot etter filtreringsprosessen blir cirrus optisk tykkelse korrelert med forskjellig

verdier av flydistanse i henhold til de meteorologiske forholdene for hver av de 7 dagene. Denne prosedyren ligger til grunn for alle regresjonsresultatene for de tre cirrusparametrene som er basert på hele uka.

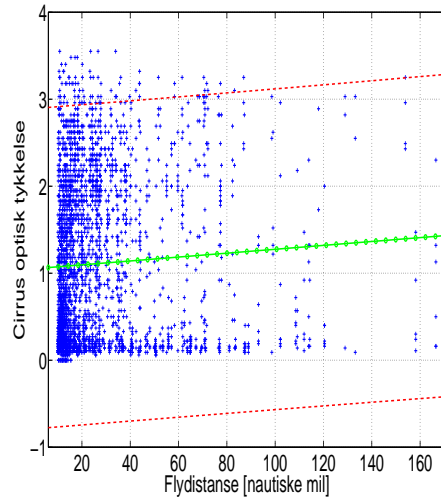
Husk at i regresjonsanalysen er både fordelingen av flydistanse gitt som en middelværdi i intervallet FL 59-82, mens cirrus optisk tykkelse er antatt å representere et middel i intervallet 310hPa-180hPa.

Figur 4.9(a)/4.9(c) og 4.9(b)/4.9(d) viser resultatene fra regresjonsanalysen hhv. før og etter filtreringsprosessen. Den midterste linjen representerer regresjonslinjen, mens de to andre linjene indikerer et 95% konfidensintervall. Aksen for cirrus optisk tykkelse inkluderer også negative verdier, som i utgangspunktet er unødvendig siden τ alltid er større enn 0. Men dette er altså gjort for å få fram hele konfidensintervallet. Videre er verdier av flydistanse under 10 nautiske mil utelatt fra de globale regresjonsplottene. Dette er gjort pga. at den globale fordelingen av flytrafikk består av veldig mange korte flyvninger og av den grunn for å unngå forstyrrelser i resultatene. Resultatene fra regresjonsanalysen er gitt ved korrelasjonen r . Korrelasjonen gir et mål på retningen og styrken til den lineære sammenhengen mellom to kvantitative variabler, i dette tilfellet de tre cirrusparametrene i forhold til flydistansen. Korrelasjonen vil alltid tilfredssette intervallet $-1 \leq r \leq 1$, hvor retningen er indikert ut fra fortegnet til r og styrken måles ut fra hvor nærme korrelasjonen ligger ± 1 . r kan også angis i prosent, ved å multiplisere med 100. Alle korrelasjonsresultatene er i denne oppgaven nettopp gitt i prosent.

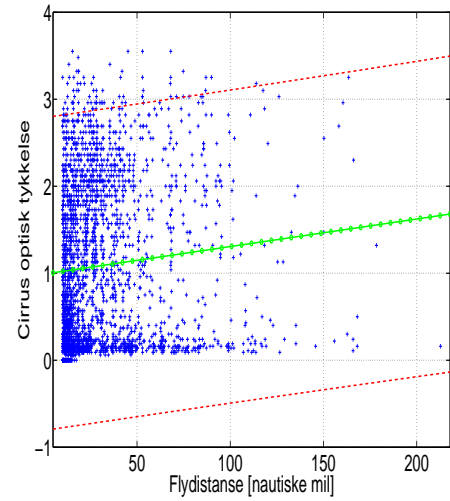
Figur 4.9(a)/4.9(b) viser regresjonen for 09UTC. Vi ser at sammenhengen mellom cirrus optisk tykkelse og flydistanse er forholdsvis liten. Resultatene viser en korrelasjon på 5.44% og 8.64% hhv. før/etter fuktighetskriteriet er tatt i bruk². Dette gir altså en korrelasjonsøkning på 3.2%. Figur 4.9(c)/4.9(d) viser den globale regresjonen 6 timer senere (15UTC). For dette tidspunktet skifter faktisk korrelasjonen fortegn etter filtreringsprosessen. Resultatene viser i dette tilfellet en korrelasjon på -1.55% og 2.85% hhv. før/etter fuktighetskriteriet, som gir en korrelasjonsøkning på 4.4%. Den globale sammenhengen mellom cirruskydekket (cirrus optisk tykkelse) og flytrafikken er altså relativt svak for begge tidspunktene.

Jeg vil nå presentere regresjonsresultatene for 15UTC på regional skala, som samsvarer med de områdene som ble definert i figur 1.3. Figur 4.10 og 4.11 viser regresjonen mellom cirrus optisk tykkelse og flydistanse 15UTC for samme uka og flynivåintervall, for hhv. den Nord-Atlantiske sektoren/Europa og USA. For de regionale områdene er alle punktene inkludert (altså ingen grense for verdier av nautiske mil). Resultatene er veldig variable avhengig av hvilket område man ser på, og resultatene viser generelt liten sammenheng

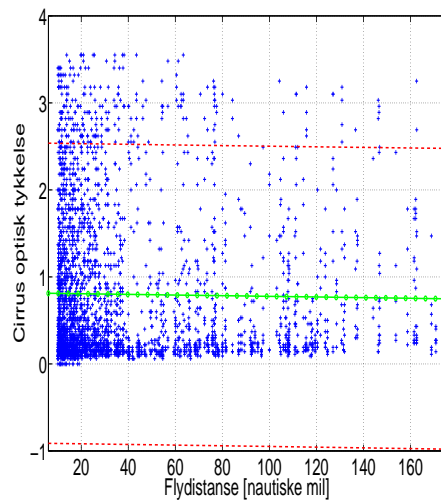
²Merk at korrelasjonene er forskjellige fra dem gjengitt i tabell 4.1. Dette er fordi korrelasjonsresultatene i tabellen er utarbeidet med utgangspunkt i alle verdier av flydistanse, også de under 10 nautiske mil.



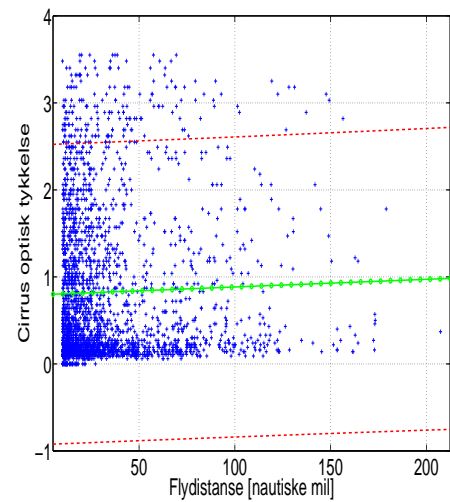
(a) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet 09UTC



(b) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet 09UTC

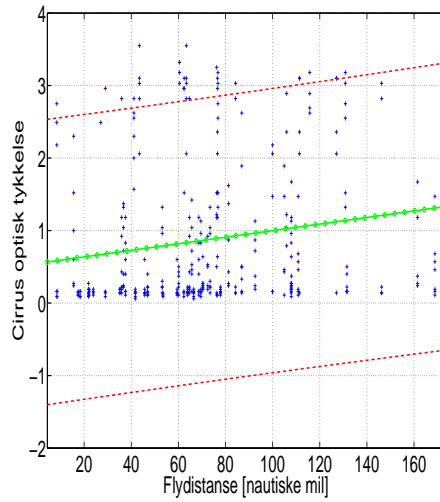


(c) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet 15UTC

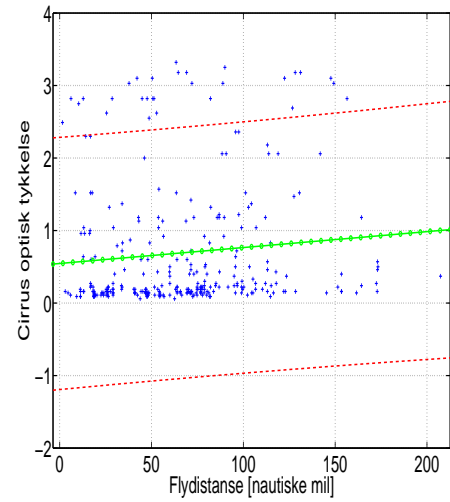


(d) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet 15UTC

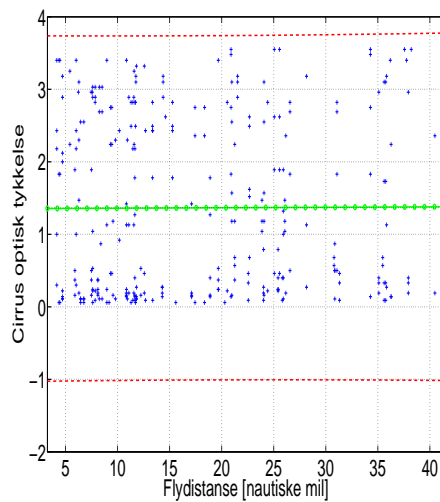
Figur 4.9: Global regresjonsanalyse av cirrus optisk tykkelse for 10-16 juni 2002 09/15UTC i forhold til flydistanse for FL 59-82.



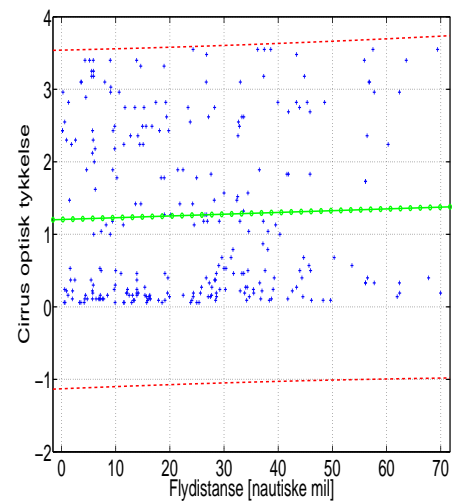
(a) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet, Sentral-Europa



(b) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet, Sentral-Europa



(c) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet, Nord-Atlanteren

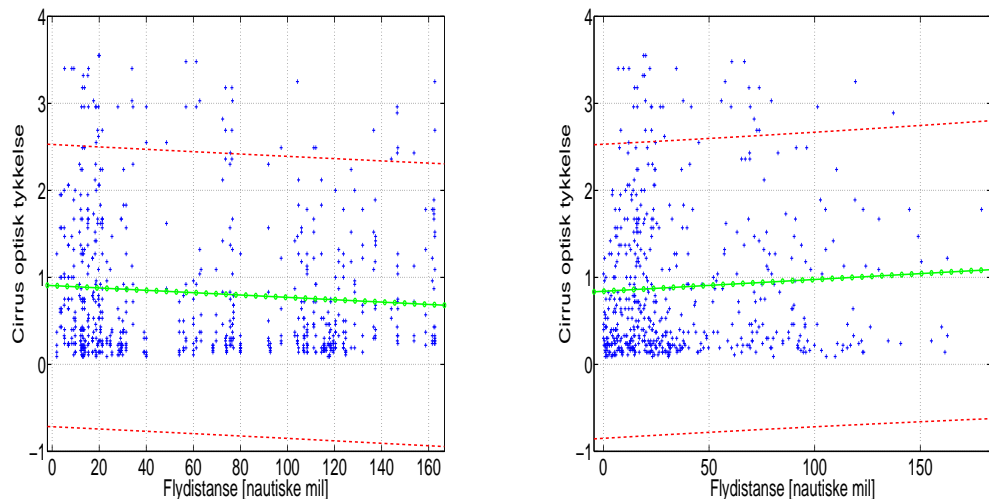


(d) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet, Nord-Atlanteren

Figur 4.10: Regional regresjonsanalyse av cirrus optisk tykkelse for 10-16 juni 2002 15UTC i forhold til flydistanse for FL 59-82.

mellom de to parametrene. Som vi har sett tidligere, er det observert mye flytrafikk over Sentral-Europa for 15UTC. Men de små mengdene av cirrus som er målt over det samme området, gir en minkning i korrelasjonen på -6.67% . Over det Nord-Atlantiske flybeltet indikerer resultatene en korrelasjonsøkning på 2.95% , med/uten Schmidt-Appleman kriteriet. Over den midtre delen av USA, resulterer høy tetthet av flytrafikk og lav optisk tykkelse fra cirruskyer til en negativ korrelasjon på -8.15% . Fra figur 4.8(b) ser vi at fuktighetskriteriet effektivt filtrerer ut store områder med mye flytrafikk pga. de meteorologiske forholdene ikke er tilrettelagt for dannelse av kondensstriper. De få resterende punktene bidrar likevel til en positiv korrelasjon på 5.69% , som gir en absolutt økning på 13.84% .

I tabell 4.1 er det gitt en skjematisk oppsummering av korrelasjonsresultatene globalt og regionalt, for den aktuelle uka og flynivåintervallet for fire utvalgte tidspunkter. Resultatene er også vist for alle tidspunktene samlet i et regresjonsplott for de respektive områdene (kalt XXUTC). Verdiene i tabellen merket med kursiv, er resultatene etter filtrering i henhold til Schmidt-Appleman kriteriet. Δr representerer den absolutte endringen i korrelasjonen r , altså forskjellen mellom før og etter filtrering. NaN i tabellen indikerer områder hvor det ikke var mulig å utføre målinger av optisk tykkelse fra cirruskyer. På global skala ser vi at generelt korrelerer verdier av



(a) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet, USA

(b) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet, USA

Figur 4.11: *Regional regresjonsanalyse av cirrus optisk tykkelse for 10-16 juni 2002 15UTC i forhold til flydistanse for FL 59-82.*

cirrus optisk tykkelse svakt med verdier av flydistanse. Spesielt gjelder dette for 15/21UTC. For enkelte av tidspunktene er disse to parametrene negativt korrelert. De samme hovedtrekkene går også igjen for de regionale områdene. I forhold til hypotesen om at høyere tetthet av flytrafikk fører til økt dannelse av cirrus i form av kondensstriper, skiller spesielt Europa og til dels den Nord-Atlantiske flysektoren seg negativt ut. La oss se nærmere på disse områdene. Fra figur 4.7(b) og 4.8(b) ser vi at Schmidt-Appleman kriteriet stort sett indikerer gode forhold for dannelse av kondensstriper over Europa. Det er altså kun en liten andel av flytrafikken over dette området som filtreres ut. Men fra figur 4.5(b) og 4.6(b) ser vi at den høye tettheten av flytrafikk samsvarer svakt med de lave verdiene av cirrus optisk tykkelse. Dette resulterer i en negativ korrelasjon for 09/15UTC etter filtreringsprosessen. Situasjon er litt annerledes over Nord-Atlanteren for de samme to tidspunktene. Her er forholdene for dannelse av kondensstriper nokså variable, som medfører at en stor del av området filtreres ut. Verdier av optisk tykkelse fra cirrusskyer er også veldig variable, kort sagt fra hele cirrusintervallet.

Korr. r	03UTC	09UTC	15UTC	21UTC	XXUTC
Globalt	17.83/15.04	12.64/13.37	2.60/5.24	5.44/12.03	6.91/10.94
Δr globalt	-2.83	0.73	2.64	6.59	4.03
S-Europa	NaN	19.25/10.27	16.62/9.95	NaN	17.87/9.71
Δr S-Europa	NaN	-8.98	-6.67	NaN	-8.16
N-Atl.	NaN	61.55/37.97	0.53/5.82	NaN	22.37/16.15
Δr N-Atl.	NaN	-23.58	5.29	NaN	-6.22
USA	NaN	NaN	-8.15/5.69	-10.41/0.003	-9.21/2.43
Δr USA	NaN	NaN	13.84	10.413	11.64
Ø-Asia	11.54/11.35	23.86/24.99	NaN	NaN	16.76/17.72
Δr Ø-Asia	-0.19	1.13	NaN	NaN	0.96

Tabell 4.1: Korrelasjonsresultatene globalt og regionalt for cirrus optisk tykkelse 10-16 juni 2002 og flydistanse fra FL 59-82.

Legg spesielt merke til den sterke korrelasjonen før filtrering for 09UTC. Men den resterende moderate fordelingen av flytrafikk etter filtrering resulterer i en kraftig nedgang i den absolutte korrelasjonen, selv om r fortsatt er positiv. Fra tabell 4.1 ser vi at sammenhengen mellom disse to parametrene for 15UTC er svak, men positiv. Fuktighetskriteriet resulterer altså i en absolutt økning på 5.29%.

De beste korrelasjonsresultatene finner vi over Øst-Asia og USA. Fra figur 4.8 så vi den høye tettheten av flytrafikk lokalisert over USA. Over dette området er det nesten ikke observert cirrusskyer i det hele tatt, som samsvarer svakt med fordelingen av flydistanse. Ikke overraskende resulterer det derfor i en negativ korrelasjon før filtrering. Fra figur 4.8(b) ser vi konsekvensen av Schmidt-Appleman kriteriet. En stor del av flytrafikken over USA filtreres ut, som indikerer dårlige forhold for dannelse av kondensstriper over dette

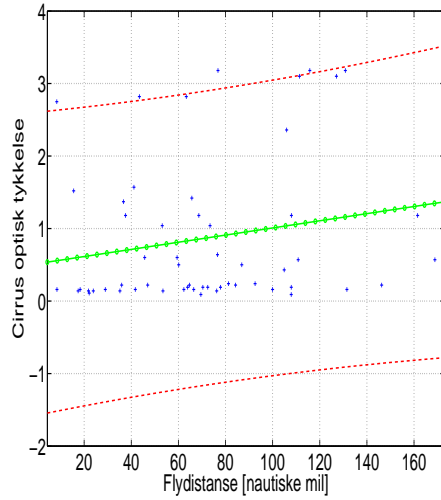
området. Dette går forøvrig igjen for alle tidspunktene. Men det positive er at de områdene hvor det er observert cirrus, er stort sett de samme områdene hvor den resterende flytrafikken er lokalisert. Altså medfører dette i en Δr som er positiv både for 15 -og 21UTC.

Men over Øst-Asia indikerer derimot fuktighetskriteriet gode muligheter for dannelse av kondensstriper. Legg merke til forskjellen i observert optisk tykkelse fra cirrusskyer for 03/09UTC over dette området (definert ved figur 1.3). For 03UTC foreligger kun små mengder av cirrus, mens det vest for dette området er observert langt høyere forekomster av cirrus. Resultatene gir en korrelasjon på 11.54% og 11.35% hhv. før/etter filtrering, altså en ørliten nedgang. 6 timer (09UTC) senere kan det virke som en del av denne forekomsten advekteres mot øst. Dette resulterer i bedre samsvar mellom de to parametrene. Paradoksalt nok ser vi fra resultatene at det området med høyest Δr er lokalisert over USA. Schmidt-Appleman kriteriet indikerte her tydelig dårlige forhold for dannelse av kondensstriper, med få unntak. Over Europa var forholdene langt bedre, men samtidig også det området med noen av de laveste Δr .

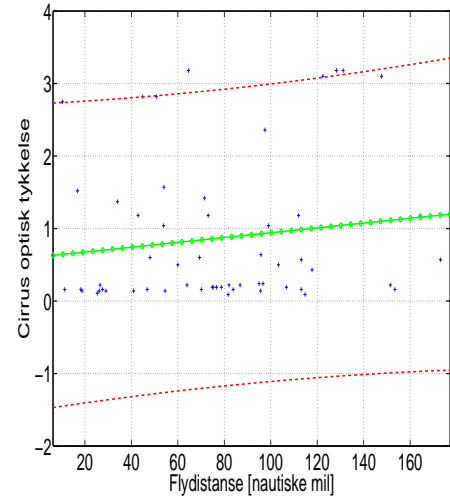
Til slutt gjenstår resultatene for XXUTC, hvor alle tidspunktene er lagt sammen i et regresjonsplott for de forskjellige områdene. Merk at i utgangspunktet omfatter ikke denne analysen alle tidspunktene, naturligvis bare for de tidspunktene hvor det er observasjoner (ikke NaN). Unntaket er de globale resultatene. Men derimot over f.eks. Europa, omfatter XXUTC bare tidspunktene 09/15UTC. Vi ser at den absolutte endringen i korrelasjonen r for XXUTC grovt sett indikerer et tilnærmet middel av Δr for de individuelle tidspunktene.

Korr. r	03UTC	09UTC	15UTC	21UTC	XXUTC
Globalt	16.99/10.02	16.83/10.81	10.10/13.36	6.42/16.59	8.19/11.58
Δr globalt	-6.97	-6.02	3.26	10.17	3.39
S-Europa	NaN	17.06/16.09	18.88/13.58	NaN	17.98/14.80
Δr S-Europa	NaN	-0.97	-5.3	NaN	-3.18
N-Atl.	NaN	56.50/25.58	-53.61/-52.52	NaN	0.63/-15.44
Δr N-Atl.	NaN	-30.92	1.09	NaN	-16.07
USA	NaN	NaN	8.77/19.95	0/23.88	4.56/20.87
Δr USA	NaN	NaN	11.18	23.88	16.31
Ø-Asia	19.18/10.83	7.64/9.65	NaN	NaN	9.74/14.91
Δr Ø-Asia	-8.35	2.01	NaN	NaN	5.17

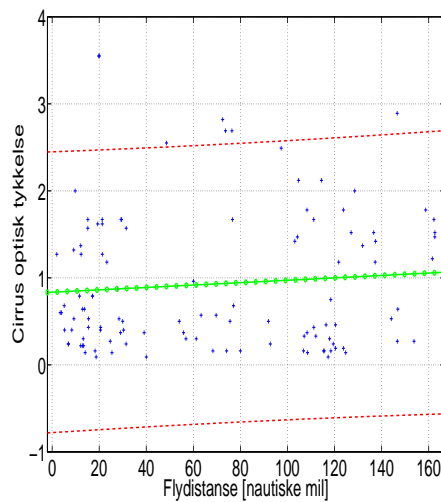
Tabell 4.2: Korrelasjonsresultatene globalt og regionalt for cirrus optisk tykkelse 12 juni 2002 og flydistanse fra FL 59-82.



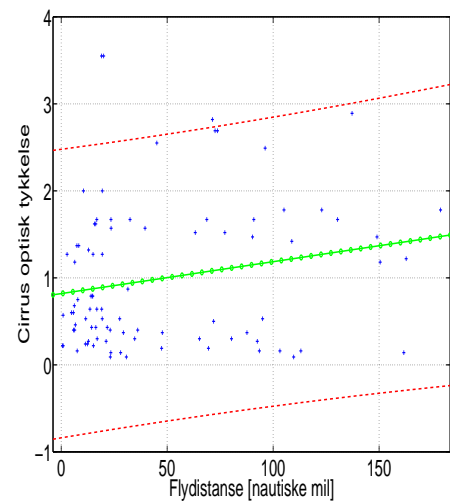
(a) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet, Sentral-Europa



(b) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet, Sentral-Europa



(c) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet, USA



(d) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet, USA

Figur 4.12: Regional regresjonsanalyse av cirrus optisk tykkelse for 12 juni 2002 15UTC i forhold til flydistanse for FL 59-82.

Jeg har til nå presentert korrelasjonsresultatene for cirrus optisk tykkelse og flydistanse for alle de 7 dagene i den aktuelle uka. Videre skal jeg kort vise noen få utvalgte resultater for de samme to parametrene for én spesifikk dag, 12 juni 2002. Til slutt oppsummeres også alle resultatene for denne dagen i tabell 4.2.

Figur 4.12 viser regresjonen mellom cirrus optisk tykkelse for 12 juni 2002 15UTC og flydistanse for FL 59-82 for hhv. Europa og USA. Hovedtrekkene for disse områdene er generelt de samme sammenliknet med korrelasjonsresultatene for alle de 7 dagene. Figur 4.8(b) viser effekten av Schmidt-Appleman kriteriet for 15UTC for nettopp denne dagen. Vi ser som tidligere nevnt forskjellen i mulighetene for dannelse av kondensstriper over Europa og USA. Resultatene viser en absolutt endring i r som er negativ og positiv over hhv. Europa og USA, i samsvar med resultatene fra tabell 4.1.

Alle korrelasjonsresultatene globalt og regionalt for 12 juni 2002, er skjematisk oppsummert i tabell 4.2. Ved sammenlikning av tabell 4.1 og 4.2 ser vi at resultatene fra denne dagen korresponderer godt med resultatene fra hele uka. Dette indikerer at 12 juni 2002 representerer et godt bilde av situasjonen for den aktuelle uka.

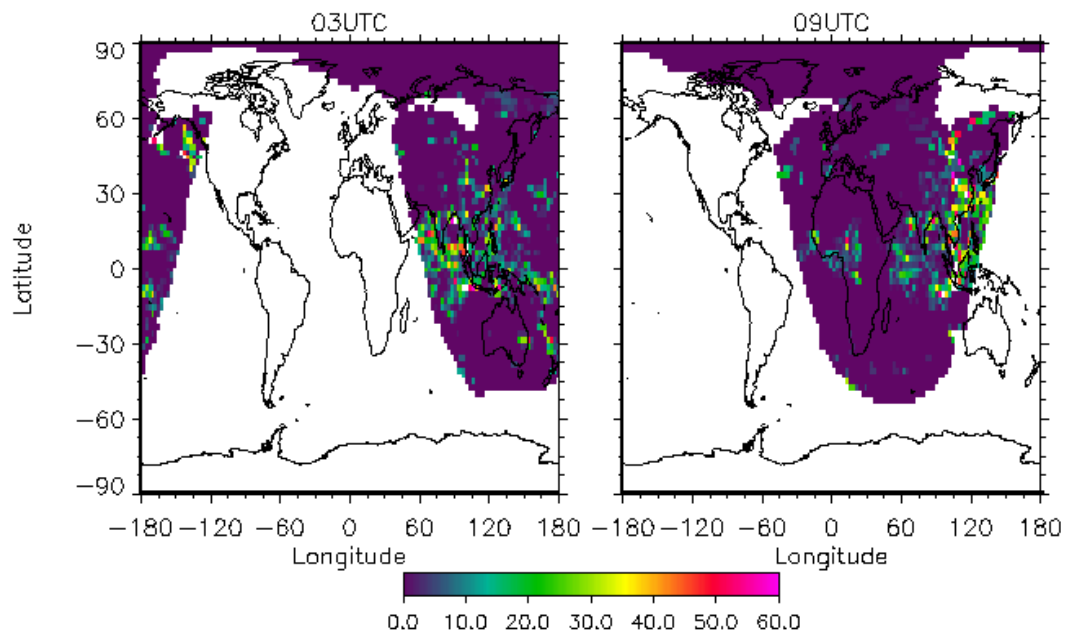
4.2 Resultater fra cirrusfraksjon

I dette delkapittelet skal jeg nå presentere resultatene fra én av de andre cirrusparametrene, nemlig cirrusfraksjon. Denne parameteren eksisterer ikke som et standardprodukt i D1-datasettet fra ISCCP. Den er altså komponert ut fra forholdet mellom antall piksler som består av cirruskyer og total antall piksler i en gitt gridboks. Dette kan gjøres i 3 ulike intervaller, som avgrenses av trykk og optisk tykkelse innenfor cirrusintervallet definert i figur 3.1. Som tidligere nevnt, har jeg tatt for meg trykkintervallet 180hPa-310hPa (tilsvarende FL 59-82 i AERO2k), som representerer det intervallet med høyest tetthet av flytrafikk og de beste mulighetene for dannelselse av kondensstriper. Presentasjonen av cirrusfraksjon følger videre samme framgangsmåte som for cirrus optisk tykkelse. Dvs. at analysene omhandler de samme tidspunktene, både for hele uka 10-16 juni 2002 og for en gitt spesifikk dag, 12 juni 2002.

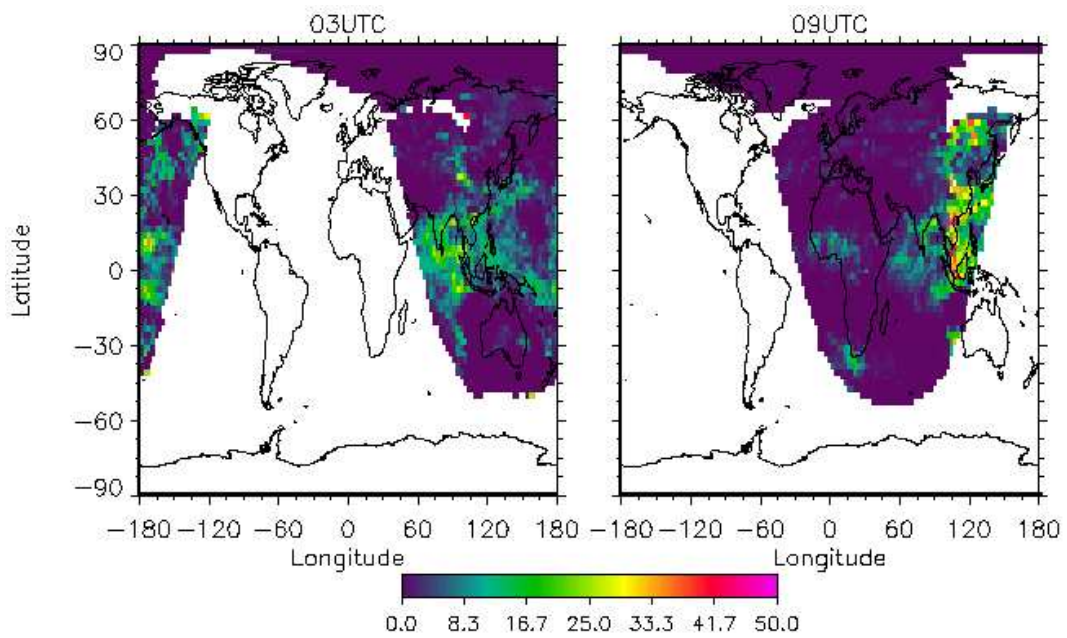
I figur 4.13 er cirrusfraksjon (gitt i prosent) plottet som funksjon av bredde- og lengdegrad i trykkintervallet nevnt ovenfor, avgrenset av verdier av optisk tykkelse i intervallet $1.27 < \tau \leq 3.55$ for tidspunktene 03/09UTC. Resultatene er altså vist både som et middel for uka, og for den gitte spesifikke dagen. I likhet med optisk tykkelse, har man også her benyttet reflektert sollys for å beregne cirrusfraksjon for de ulike tidspunktene. Som nevnt tidligere kan også dette gjøres om natten ved å bruke langbølget stråling, men bedre resultater oppnår man ved å benytte kortbølget stråling. Som vi har sett i figurene med cirrus optisk tykkelse har dette sine ulemper. Dette gjenkjennes i figur 4.13. Solas globale og døgnlige variasjon danner altså den spesielle konturformen. Som for cirrus optisk tykkelse, betegner de hvite områdene ”missing data”.

Figur 4.13(a) viser cirrusfraksjonen for 12 juni 2002 for 03/09UTC. Maksverdiene når helt opp i 90% noen steder, men fargeskalaen indikerer lavere verdier for å bedre få fram kontrastene i plottene. De høyeste verdiene er videre lokalisert over Ekvator, som har sammenheng med den intertropiske konvergenssonen³. Store mengder cirrus befinner seg over Asia, og spesielt over Øst-Asia som inkluderer det området jeg benytter i korrelasjonsanalysen. Om sommeren strekker denne konvergenssonen seg helt opp til 30°N over Asia, som indikerer monsunesongen over dette området. Fra 03UTC til 09UTC ser vi at en stor andel av området med høy cirrusfraksjon forflytter seg østover 6 timer senere. Ellers er det relativt små forskjeller mellom de to tidspunktene. Ved å sammenlikne den samme parameteren med middelet fra den aktuelle uka, ser vi de tilsvarende høye verdiene lokalisert over Asia. Men noen små forskjeller er det, og hovedsakelig gjelder det for 03UTC. Det er observert mere cirrus over den østlige delen av Stillehavet for de resterende seks dagene, enn det som er tilfellet for 12 juni 2002. Men hovedtrekkene er noenlunde de samme, og denne dagen gir et godt bilde av hele uka.

³engelsk; ITCZ, Intertropical Convergence Zone.

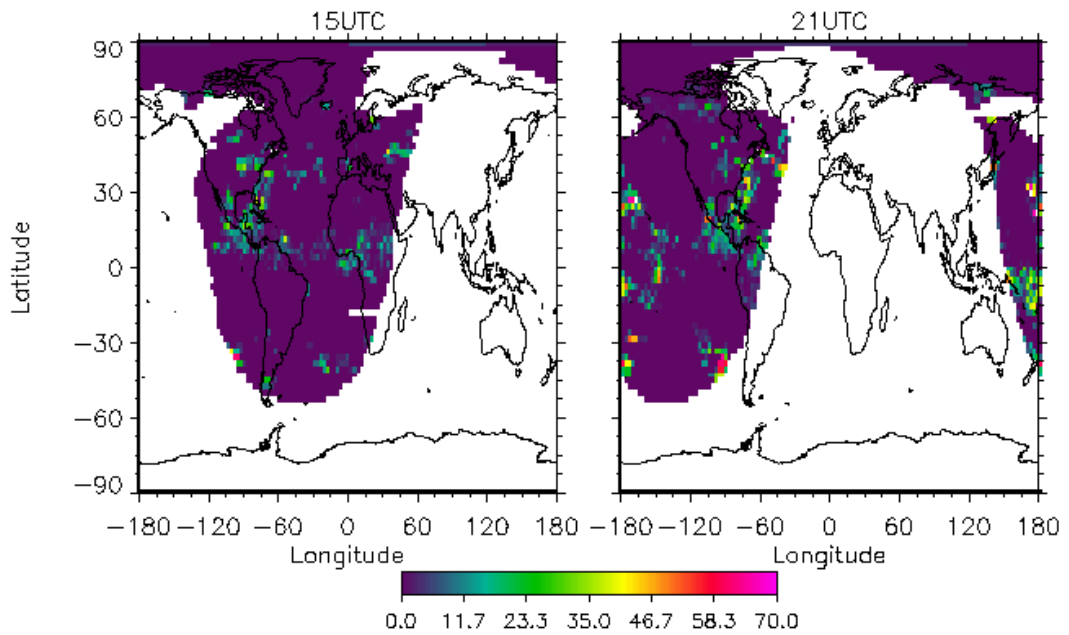


(a) Cirrusfraksjon for 12 juni 2002 03/09UTC

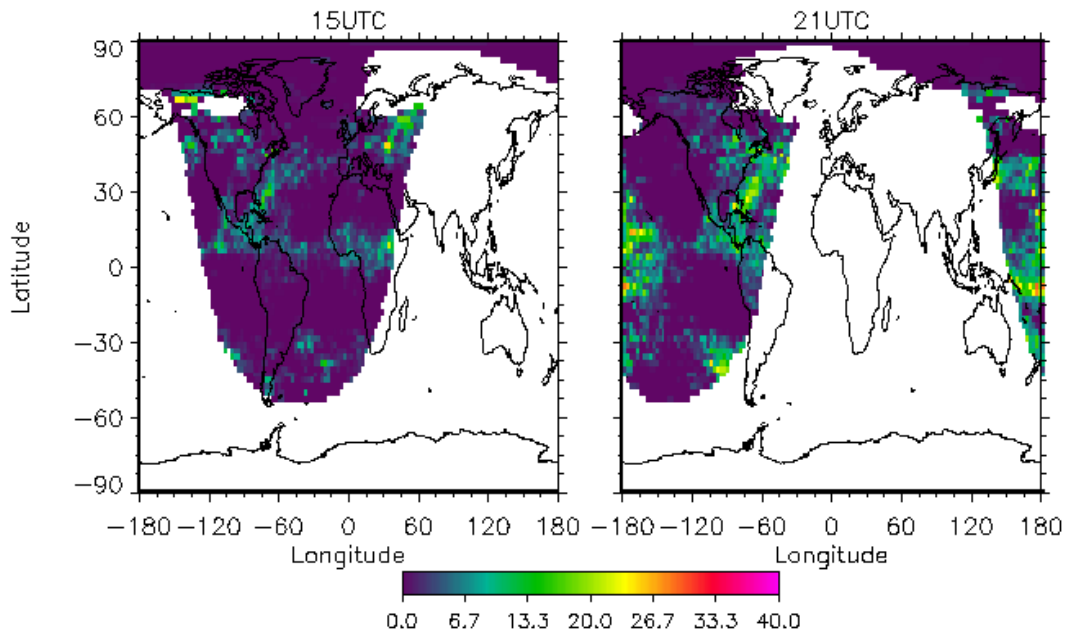


(b) Cirrusfraksjon midlet for 10-16 juni 2002 03/09UTC

Figur 4.13: Plott av cirrusfraksjon for 03/09UTC.



(a) Cirrusfraksjon for 12 juni 2002 15/21UTC



(b) Cirrusfraksjon midlet for 10-16 juni 2002 15/21UTC

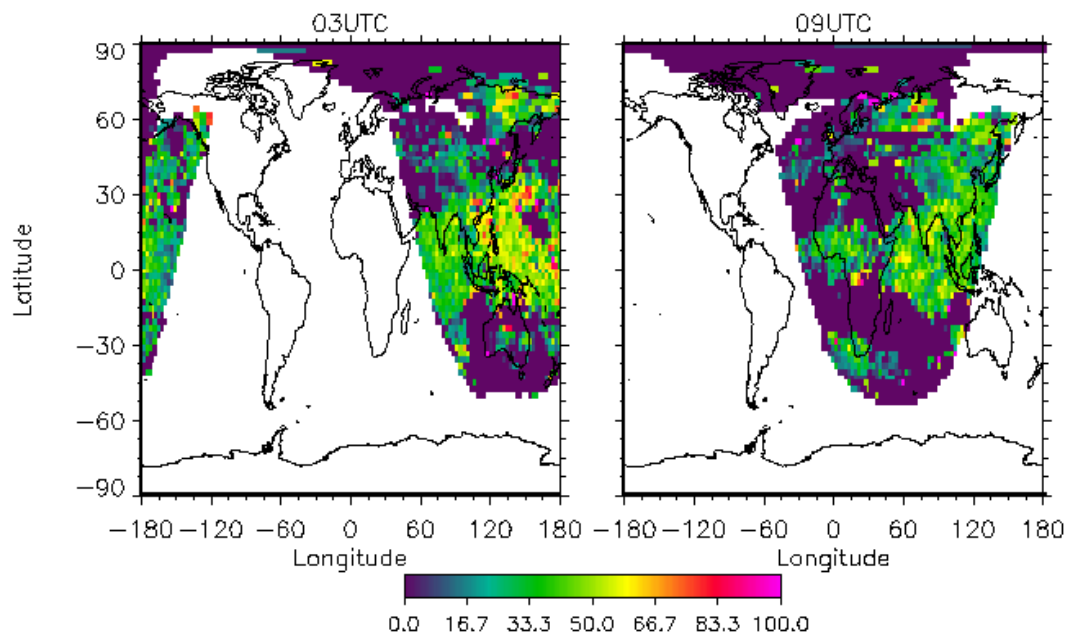
Figur 4.14: Plott av cirrusfraksjon for 15/21UTC.

Ved å sammenlikne cirrusfraksjonen i figur 4.13 med cirrus optisk tykkelse i figur 4.5, ser vi at den globale fordelingen av disse to parametrene korresponderer godt. Dette gjelder både for ukemiddelet og for den enkelte dagen. Best samsvar finner man over Asia, Vest-Afrika og den østlige delen av Stillehavet. Forskjellene er størst, og til dels store, over Europa, Nord-Atlanteren og Nordpolen. Cirrusfraksjonen er underestimert i disse områdene i forhold cirrus optisk tykkelse. F.eks. over Europa og Nord-Atlanteren er det målt lite eller ingen andel av cirrusfraksjon.

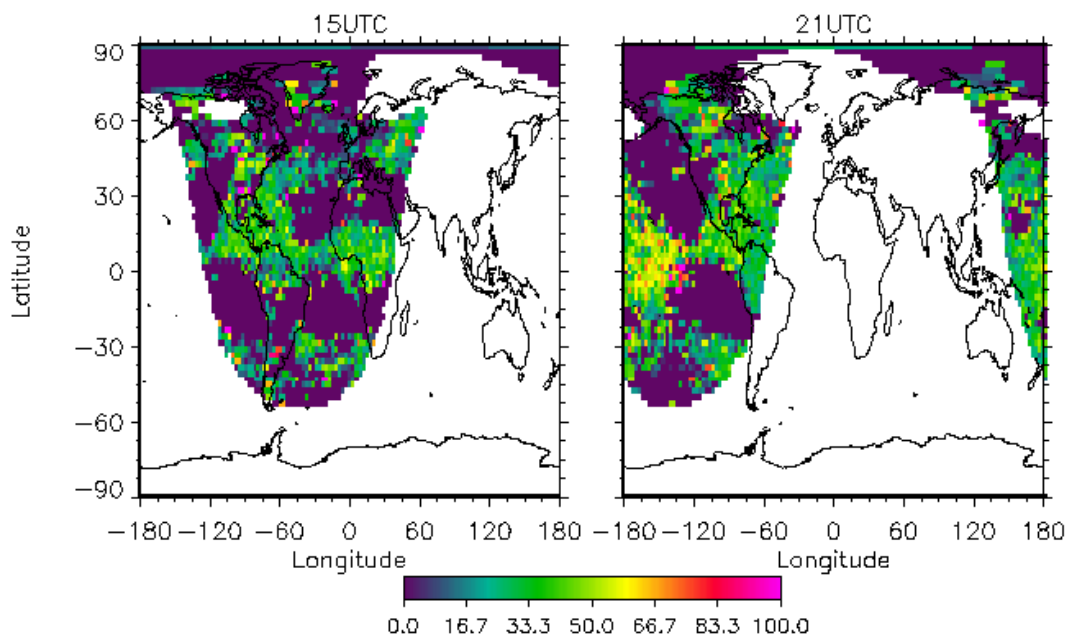
For å illustrere den døgnlige variasjonen for denne parameteren, er cirrusfraksjon plottet som funksjon av bredde -og lengdegrad for det samme høydeintervallet for tidspunktene 15/21UTC. Figur 4.14(a) viser den globale fordelingen av cirrusfraksjon for 15/21UTC for den samme dagen analysert tidligere. Her er det tydelige forskjeller fra de to foregående tidspunktene, som først og fremst har opphav i solas døgnlige variasjon. Over f.eks. Asia er det kveld/natt for 15/21UTC, og dermed ingen observasjoner av cirrusfraksjon. Unntaket ser vi øst for Indonesia hvor det er morgen for 21UTC, og dermed tilstrekkelig sollys for å kunne utføre målinger. De største andelene av cirrus finner man over både land -og havområder. Dette omfatter landområder som er lokalisert i ITCZ (Mellom-Amerika, Sentral-Afrika etc.) samt deler av USA, Canada og Øst-Europa. For havområdene er de største andelene av cirrus representert over det karibiske hav, Nord-Atlanteren og den vestlige delen av Stillehavet.

I likhet med de to foregående tidspunktene sammenliknes denne dagen med middelet for den aktuelle uka. Hovedtrekkene gjenkjennes i figur 4.14(b), og de høyeste andelene er lokalisert over de samme områdene. Men visse forskjeller er det. Dette gjelder spesielt for 21UTC. Ukemiddelet viser i tillegg en andel av cirrus øst for Japan (Vest-Stillehavet), som indikerer beregnet cirrusfraksjon for de resterende 6 dagene (ikke nødvendigvis alle). Vi ser også at generelt er utbredelsen av cirrus større over land -og havområdene nevnt ovenfor når man inkluderer hele uka. Dette er pga. flere beregninger av cirrusfraksjon er tilgjengelig, samtidig som fargeskalen er justert etter maksverdien. Som nevnt tidligere er det av ulike årsaker ikke nødvendigvis data for alle 7 dagene, som videre kan medføre justeringer i forhold til ukemiddelet. Dette er forøvrig tilfelle for alle de fire tidspunktene som er presentert hittil.

En ting som er spesielt interessant av ukemiddelet for cirrusfraksjon for 15UTC, er beltet av cirrus som er lokalisert fra Europa over til Mellom-Amerika. I figur 4.8(a) viste tettheten av flydistanse for det samme tidspunktet en tydelig moderat fordeling av flytrafikk i tilsvarende område, som danner flysektoren fra Europa over til Mellom-Amerika. Så det er naturlig å spørre seg om noe av denne cirrusfraksjonen er antropogen som resultat av utslipp fra fly og påfølgende dannelse av kondensstriper.



(a) Relativ cirrusfraksjon midlet for 10-16 juni 2002 03/09UTC



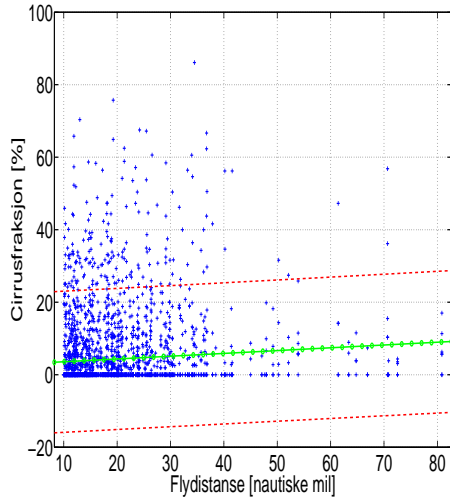
(b) Relativ cirrusfraksjon midlet for 10-16 juni 2002 15/21UTC

Figur 4.15: Plott av relativ cirrusfraksjon for 03/09/15/21UTC.

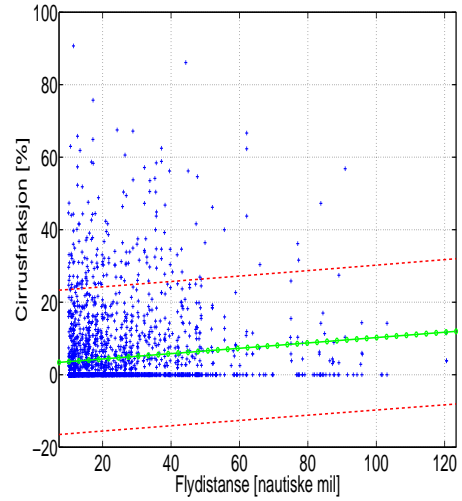
Den globale fordelingen av cirrusfraksjon for 15/21UTC sammenliknes videre med cirrus optisk tykkelse i figur 4.6. Førsteintrykket forteller oss at de to parametrene samsvarer greit med hverandre. Spesielt maksverdiene over ITCZ, Mellom-Amerika og deler av Nord-Atlanteren og Stillehavet gjengis for begge parametrene. Men likevel ser vi fra figurene at cirrusfraksjonen er underestimert i forhold til cirrus optisk tykkelse, og vice versa. De merkbare forskjellene er lokalisert over det Karibiske hav, Stillehavet, Nord-Atlanteren og Nordpolen. Det kan virke som differansen mellom de to parametrene har sammenheng med bakkealbedoen. Dette gjelder f.eks. over havområdene som har større albedo enn de fleste kontinentalområder sommerstid (pga. lite eller ingen snø). Den høye refleksjonen forekommer også for de snøbelagte områdene over polene. De høye albedoverdiene over disse områdene kan videre forstyrre beregningene av cirrus optisk tykkelse. I beregningene av denne parameteren brukes jo nettopp reflektert sollys, og bakkealbedoen kan dermed bidra til at verdier av cirrus optisk tykkelse blir overestimert. Refleksjonen fra bakken kan i noen områder operere som en feilkilde for denne parameteren.

Jeg har nå presentert resultatene fra cirrusfraksjon for fire utvalgte tidspunkter. Resultatene er utført i trykkintervallet $180 < PC \leq 310hPa$ og optisk tykkelsesintervall $1.27 < \tau \leq 3.55$. I utgangspunktet hadde det vært interessant å finne hvor stor andel av den totale cirrusen i $180 < PC \leq 310hPa$ (dvs. $0.02 < \tau \leq 3.55$) utgjør av den totale cirrusmengden i hele cirrusintervallet (50hPa-440hPa). Men dette lar seg dessverre ikke gjennomføre pga. feil i cirrusdataene for $0.02 < \tau \leq 1.27$. Derfor har jeg istedet funnet den relative cirrusfraksjonen for $180 < PC \leq 310hPa$ i forhold til det totale cirrusintervallet 50hPa-440hPa, gitt at $1.27 < \tau \leq 3.55$. Dette vil gi oss en nyttig pekepinn på hvor stor andel av cirrus som faktisk forekommer i dette nivået i atmosfæren (med den gitte optisk tykkelsen). Resultatene er gjengitt i figur 4.15 som den relative cirrusfraksjonen for de samme fire tidspunktene analysert tidligere. Den relative cirrusfraksjonen er beregnet ut fra middelet av cirrusfraksjon for 10-16 juni 2002 fra figur 4.13(b) og 4.14(b). De høyeste verdiene av relativ cirrusfraksjon er lokalisert i den ITCZ, deler av Asia som ligger utenfor ITCZ og Stillehavet. De høye verdiene er nært knyttet til maksverdiene i cirrusfraksjon for de fire tidspunktene. Figuren viser at den største relative andelen av cirrus grovt sett forekommer for 03/21UTC, mens den når et minimum for 15UTC. Den relative cirrusfraksjonen strekker seg i mange områder opp i 40-70% av den totale cirrusandelen for $1.27 < \tau \leq 3.55$. Dette indikerer at det forekommer forholdsvis mye cirrus i nettopp det høydeintervallet som benyttes i denne oppgaven, og det er selvfølgelig et bra utgangspunkt for regresjonsanalysene mine.

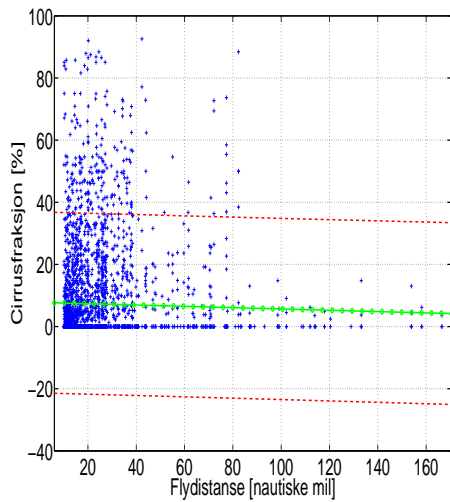
Med utgangspunkt i den globale fordelingen av flytrafikk vist i figur 4.7/4.8, presenteres nå regresjonsresultatene for cirrusfraksjon for ulike tidspunkter. Først presenteres resultatene på global skala. Dette er vist i figur 4.16, der andelen av cirrus er korrelert med tettheten av flytrafikk for 09/21UTC. Beg-



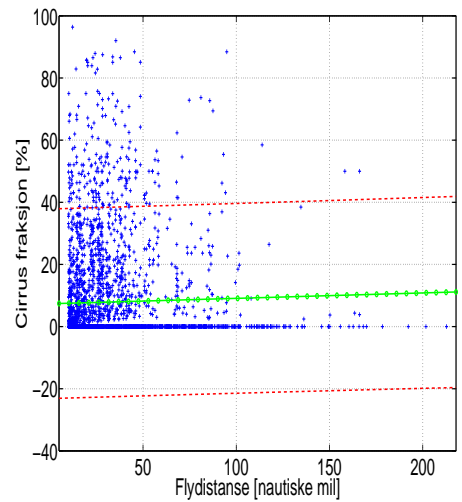
(a) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet 03UTC



(b) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet 03UTC

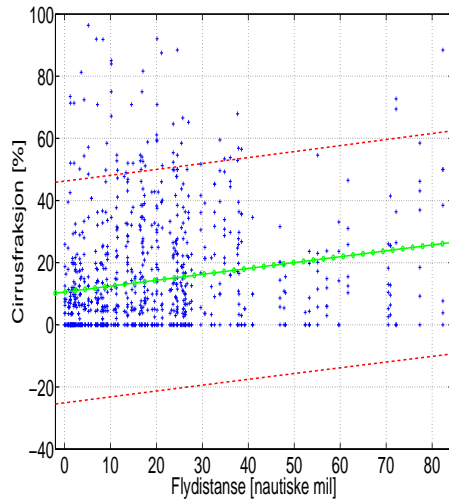


(c) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet 09UTC

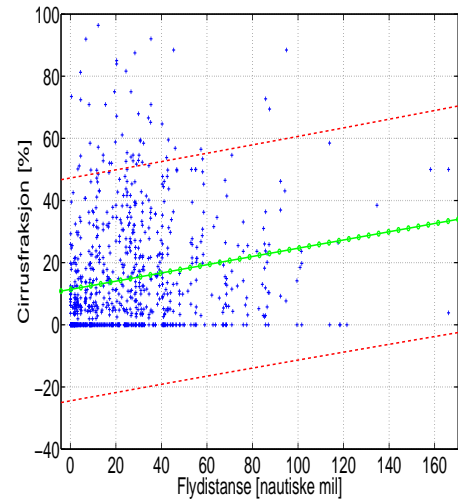


(d) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet 09UTC

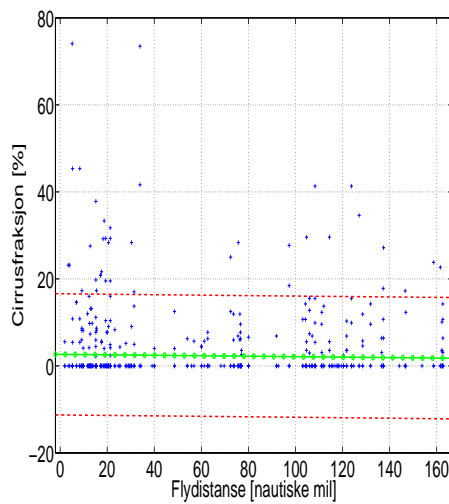
Figur 4.16: Global regresjonsanalyse av cirrusfraksjon for 10-16 juni 2002 03/09UTC i forhold til flydistanse for FL 59-82.



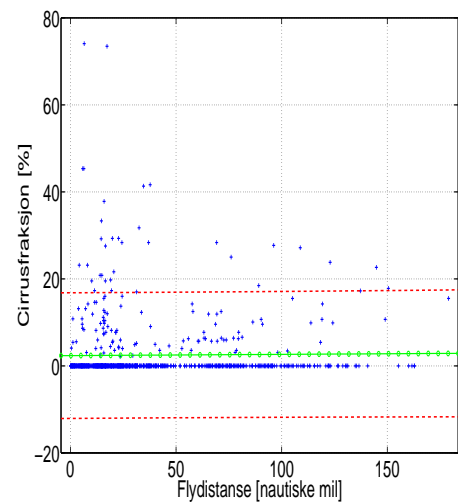
(a) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet, Øst-Asia 09UTC



(b) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet, Øst-Asia 09UTC



(c) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet, USA 15UTC



(d) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet, USA 15UTC

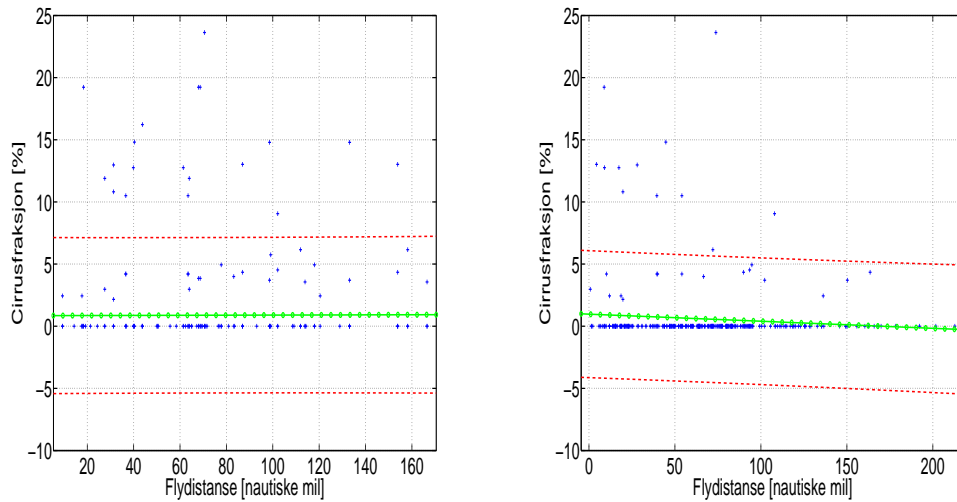
Figur 4.17: Regional regresjonsanalyse av cirrusfraksjon for 10-16 juni 2002 09/15UTC i forhold til flydistanse for FL 59-82.

ge representerer som tidligere et middel av hhv. 10-16 juni 2002 og flynivå 59-82. I likhet med cirrus optisk tykkelse er altså cirrusfraksjonen for hver av de 7 dagene korrelert med fordelingen av flydistanse for de korresponderende dagene og deretter samlet i ett plott, både med/uten Schmidt-Appleman kriteriet. Deltaljer om selve oppsettet på regresjonsplottene er de samme som for cirrus optisk tykkelse, og henvises til delkap. 4.1. Legg merke til at verdier av flydistanse under 10 nautiske mil er utelatt fra de globale regresjonsplottene.

Vi ser fra figur 4.16(a)/4.16(b) at de mange flyvningene som inkluderer forholdsvis korte avstander kombinert med korresponderende høy cirrusfraksjon, medfører en liten sammenheng mellom de to parametrene. Resultatene viser en korrelasjon på 8.15% og 10.93% hhv. før og etter filtreringsprosessen for 03UTC. Dette gir en svak korrelasjonsøkning på 2.78%. Liknende trekk kan vi også se igjen i figur 4.16(c)/4.16(d) 6 timer senere, der høy cirrusfraksjon er lokalisert over områder med liten tetthet av flytrafikk (og vice versa). Korrelasjonen skifter i dette tilfellet fortegn fra negativ til positiv, hhv. før/etter fuktighetskriteriet er tatt i bruk. Dette resulterer i en absolutt endring i korrelasjonen r på 6.28%. Endringen er positiv for begge tidspunktene, men den er forholdsvis svak. Dette indikerer liten global sammenheng mellom cirrusfraksjon og flytrafikk for 03/09UTC. Men dette er overhodet ikke et overraskende resultat når man sammenlikner figurene for global flytrafikk og cirrusfraksjon. For det første påvirker ikke områder med mye flytrafikk, som f.eks. USA (03/09UTC) og Europa (03UTC), regresjonsanalysen i det hele tatt pga. mangel av sollys for disse tidspunktene. Grovt sett er det kun den moderate tettheten av flytrafikk over Øst-Asia kombinert med store forekomster av cirrus, som bidrar til en økning i r globalt for 03/09UTC.

Ved nærmere analyser av områdene på regional skala, skiller Asia seg ut med høyere korrelasjon (i forhold til de andre regionale områdene) hhv. med og uten Schmidt-Appleman kriteriet. Men likevel er Δr lav over dette området (se tabell 4.3). Dette gjenkjennes i figur 4.17(a)/4.17(b), der cirrusfraksjon og tettheten av flydistanse er korrelert for samme uka og flynivåintervall for 09UTC. Her samsvarer den høye forekomsten av cirrus over Øst-Asia bedre med den moderate fordelingen av flyvninger. Analysen viser en korrelasjon på 18.09% og 19.99% hhv. uten/med fuktighetskriteriet.

Resultatene viser også en liten Δr over USA i figur 4.17(c) og 4.17(d). Tendensen i dette området er den samme som for analysene av cirrus optisk tykkelse. Høy tetthet av flytrafikk er negativt korrelert med liten andel av cirrus. Schmidt-Appleman kriteriet indikerer dårlige forhold for dannelse av kondensstriper over mesteparten av USA. Det er ofte det samme lille området over USA som går igjen for de ulike tidspunktene, hvor kondensstriper kan dannes. Området er lokalisert over den nordøstlige delen av USA. Dette resulterer i en positiv korrelasjon etter filtrering, og gir en korrelasjonsøkning



(a) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet, Sentral-Europa 09UTC

(b) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet, Sentral-Europa 09UTC

Figur 4.18: *Regional regresjonsanalyse av cirrusfraksjon for 10-16 juni 2002 09UTC i forhold til flydistanse for FL 59-82.*

på 5.14%.

Det siste regionale området som presenteres, er Europa for 09UTC. For cirrus optisk tykkelse husker vi at i dette området var forholdene for dannelse av kondensstriper generelt gode, men paradoksalt nok med lave verdier av optisk tykkelse. Den samme tendensen gir utslag i resultatene fra cirrusfraksjon over Europa. I figur 4.18 resulterer det i en sterk nedgang i korrelasjonen på -9.65%.

Alle korrelasjonsresultatene oppsummeres skjematisk i tabell 4.3 globalt og regionalt for fire tidspunkter. Resultatene er også for denne parameteren vist for alle de fire tidspunktene samlet i ett regresjonsplott for de respektive områdene. Cirrusfraksjonsdataene fra D1-datasettet er i likhet med cirrus optisk tykkelse avhengig av stråling fra det synlige spekteret. Derfor indikerer NaN også her områder hvor det ikke var mulig å utføre målinger av cirrusfraksjon pga. lite eller ingen sollys, eller mangel på observasjoner i det aktuelle området. Generelt ser vi mange av de samme hovedtrekkene som for korrelasjonsresultatene fra cirrus optisk tykkelse i tabell 4.1. Men desto mere interessant er forskjellene som dukker opp mellom de to cirrusparametrene. På global skala viser resultatene en svak sammenheng mellom cirrusfraksjon og flydistanse, og er til og med negativt korrelert for 15UTC.

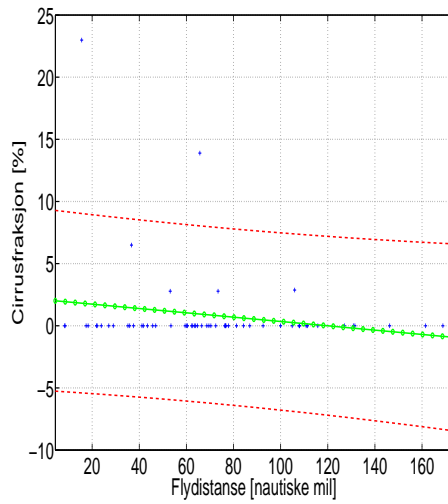
Korr. r	03UTC	09UTC	15UTC	21UTC	XXUTC
Globalt	2.45/5.06	11.20/15.56	0/-1.79	-0.38/3.09	2.01/5.54
Δr globalt	2.61	4.36	-1.79	3.47	3.53
S-Europa	NaN	0.52/-9.13	3.64/-4.09	NaN	2.29/-5.66
Δr S-Europa	NaN	-9.65	-7.73	NaN	-7.95
N-Atl.	NaN	1.22/-3.42	-4.01/-5.07	NaN	-7.00/-5.97
Δr N-Atl.	NaN	-4.64	-1.06	NaN	1.03
USA	NaN	NaN	-3.75/1.39	-5.62/-0.69	-4.53/-0.11
Δr USA	NaN	NaN	5.14	4.93	4.42
Ø-Asia	9.66/9.41	18.09/19.99	NaN	NaN	13.69/14.08
Δr Ø-Asia	-0.25	1.09	NaN	NaN	0.39

Tabell 4.3: Korrelasjonsresultatene globalt og regionalt for cirrusfraksjon 10-16 juni 2002 og flydistanse fra FL 59-82.

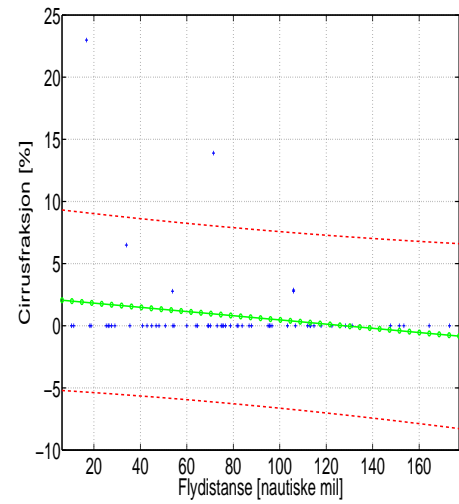
Denne negative korrelasjonen på global skala fant sted 9 timer tidligere for cirrus optisk tykkelse. Den største absolutte endringen i r finner man for 09/21UTC, som resulterer i en svak, positiv Δr på 3.53% for alle tidspunktene samlet. Det er hovedsakelig de forholdsvis høye korrelasjonene over Asia både med/uten Schmidt-Appleman kriteriet, som bidrar til de positive resultatene globalt. Også områdene over USA bidrar til den svake, men positive sammenhengen mellom de to parametrene globalt sett.

På regional skala er det nettopp disse områdene hvor andelen av cirrus og tettheten av flytrafikk korrelerer best. Over Asia er det målt en stor andel av cirrus og moderat tetthet av flytrafikk for begge tidspunktene. Dette resulterer i de høyeste korrelasjonene både før og etter filtrering i forhold til samtlige av de regionale områdene. Spesielt gjelder det for 09UTC, som også gir utslag i de globale korrelasjonsresultatene for dette tidspunktet. I tillegg indikerer Schmidt-Appleman kriteriet gode forhold for dannelse av kondensstriper over Øst-Asia. Derfor er det lite flytrafikk som filtreres ut. Dette er grunnen til den lave Δr .

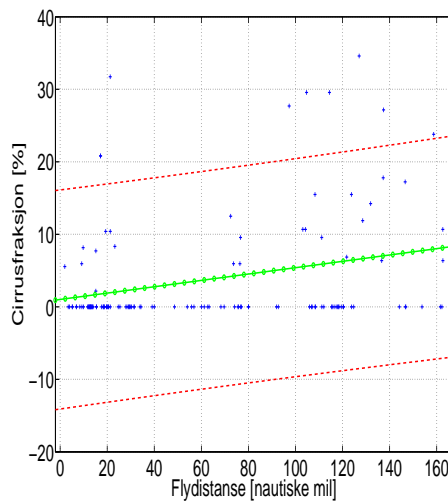
Den motsatte situasjonen finner vi over USA. Fra tidligere har vi sett at det er stor forekomst av flyvninger i dette området. I likhet med cirrus optisk tykkelse er det kun målt små mengder av cirrus. Dette samsvarer likevel godt med Schmidt-Appleman kriteriet, og som vi har sett indikerer at de meteorologiske forholdene ikke er tilrettelagt for dannelse av kondensstriper. Derfor er stort sett korrelasjonstresultatene før/etter filtrering negative for 15/21UTC. Men Δr er positiv i begge tilfellene av samme årsak som for cirrus optisk tykkelse. Det er kun et lite område nordøst i USA som er gjeldende etter filtreringsprosessen. Her viser observasjonene fra AERO2k en moderat tetthet av flyvninger og en liten andel av cirrus, som likevel resulterer i positiv Δr . I de områdene over USA hvor flytrafikken filtreres ut, viser målingene stort sett ingen cirrus som samsvarer bra med fuktighetskriteriet.



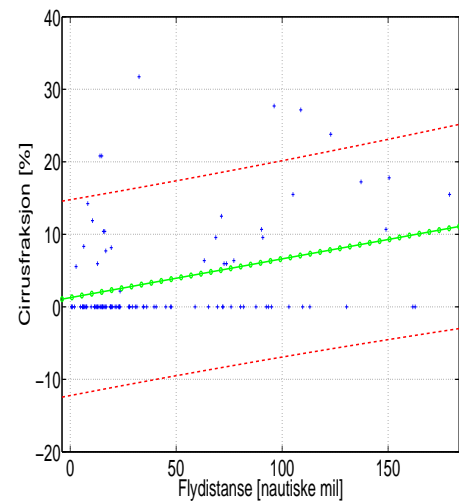
(a) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet, Sentral-Europa



(b) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet, Sentral-Europa



(c) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet, USA



(d) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet, USA

Figur 4.19: Regional regresjonsanalyse av cirrusfraksjon for 12 juni 2002 15UTC i forhold til flydistanse for FL 59-82.

Dette er vidt forskjellig for Sentral-Europa. I likhet med Asia er forholdene gode for dannelse av kondensstriper, selv om vesentlig mere blir filtrert ut over Europa. I tillegg er dette området et hovedsenter for mange av flyvningene verden over. Dermed burde det være et godt utgangspunkt for antropen cirrusdannelse. Men resultatene fra cirrusfraksjon viser bortimot en cirrusfri sone over Sentral-Europa. De høyeste andelene er lokalisert over Øst-Europa. Den absolutte endringen i korrelasjonen ligger derfor på rundt -8 til -10%. Samme trenden ser man også over Nord-Atlanteren. Lite cirrus og moderat tetthet av flytrafikk gir også negativ Δr for 09/15UTC.

Helt til slutt i presentasjonen av cirrusfraksjon, viser jeg noen få regresjonsplott for 12 juni 2002. Dette er gjort i figur 4.19 for Europa og USA for 15UTC. Over Europa viser resultatene ganske kraftig negativ korrelasjon både før og etter Schmidt-Appleman kriteriet. Dette samsvarer forøvrig med resultatene fra ukesmидdelet. Eneste forskjellen er at den negative korrelasjonen over dette området er betydelig større (i negativ forstand) for 12 juni 2002. Figur 4.19 viser også regresjonen over USA for samme dag. Som for ukesmидdelet indikerer resultatene en svak sammenheng mellom cirrusfraksjon og flydistanse for denne dagen.

Korrelasjonene fra cirrusfraksjon for 12 juni 2002 oppsummeres i tabell 4.4. Videre sammenliknes resultatene fra hele uka med den aktuelle dagen. Konklusjonen er stort sett den samme som for cirrus optisk tykkelse; resultatene fra tabell 4.3 og 4.4 samsvarer godt med hverandre. Dette inkluderer bl.a. korrelasjonsfortegnet for de ulike områdene (unntaket er over Nord-Atlanteren 15UTC). Den eneste merkbare forskjellen er at verdiene for 12 juni 2002 generelt er en faktor 2-4 ganger større enn resultatene for ukesmидdelet, mens Δr stort sett ligger på samme nivå.

Korr. r	03UTC	09UTC	15UTC	21UTC	XXUTC
Globalt	4.49/4.76	13.57/17.27	10.41/4.54	1.62/6.03	5.24/7.11
Δr globalt	0.27	3.7	-5.87	4.41	1.87
S-Europa	NaN	-19.43/-25.30	-18.59/-19.27	NaN	-18.94/-22.28
Δr S-Europa	NaN	-5.87	-0.68	NaN	-3.34
N-Atl.	NaN	-11.07/-14.53	-1.76/4.19	NaN	-19.51/-14.41
Δr N-Atl.	NaN	-3.46	5.95	NaN	5.1
USA	NaN	NaN	27.98/32.74	-0.14/8.01	11.71/17.07
Δr USA	NaN	NaN	4.76	8.15	5.37
Ø-Asia	18.11/18.90	24.23/24.89	NaN	NaN	19.23/20.62
Δr Ø-Asia	0.79	0.66	NaN	NaN	1.39

Tabell 4.4: Korrelasjonsresultatene globalt og regionalt for cirrusfraksjon 12 juni 2002 og flydistanse fra FL 59-82.

4.3 Resultater fra cirrusprodukt

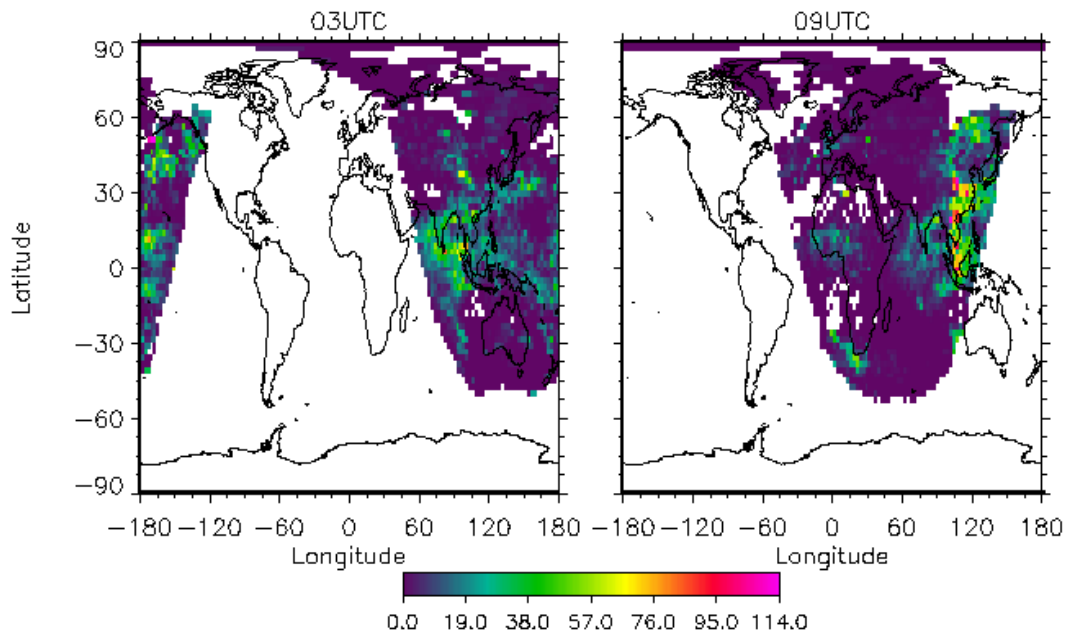
Vi har nå fått en oversikt over resultatene fra de to parametrene cirrus optisk tykkelse og cirrusfraksjon. Ved å multiplisere disse to størrelsene med hverandre, oppnår man et slags volum. Dette introduserer altså den tredje parameteren, kalt cirrusprodukt. Cirrusprodukt er i likhet med cirrusfraksjon og antakelsen om cirrus optisk tykkelse representert i trykkintervallet 310hPa-180hPa.

Det kan være fornuftig å gi en global oversikt av cirrusproduktet for uka 10-16 juni 2002 ved ulike tidspunkter. Dette er gjort i figur 4.20. Her er altså cirrusproduktet plottet som funksjon av bredde -og lengdegrad for ukemiddelet for fire ulike tidspunkter. I denne figuren bør hovedtrekkene fra cirrusfraksjon og cirrus optisk tykkelse kunne gjenkjennes relativt greit. Ved utarbeidingen av cirrusproduktet er det tatt høyde for om det foreligger observasjoner på samme gridpunkt for begge parametrene. Det betyr i praksis at hvis det ikke er observasjoner for ett gitt gridpunkt for én av parametrene, vil punktet ikke være gyldig i regresjonsanalysen for cirrusproduktet. Det viser seg at det hovedsakelig er cirrus optisk tykkelse som er ansvarlig for mesteparten av disse NaN-tilfellene.

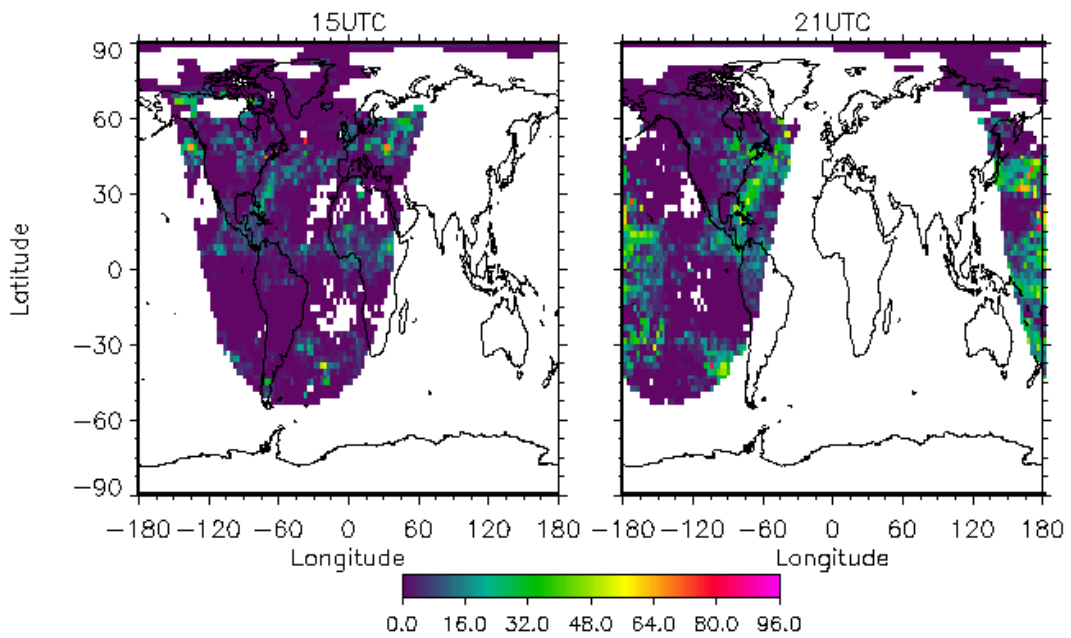
Figur 4.20(a) viser produktet mellom de to cirrusparametrene for 03/09UTC. Ved å sammenlikne med figur 4.5(b) og 4.13(b) kjenner man igjen mange av de samme hovedtrekkene. Dette omfatter områder som er omtrent like godt representert enten ved å benytte cirrusfraksjon eller cirrus optisk tykkelse. Spesielt gjelder det over Asia og Stillehavet for 03UTC. Asia gjengir også bra for 09UTC. De største andelene av cirrus er lokalisert over store deler av Asia og ITCZ. Dette samsvarer forøvrig bra med tidligere resultater vi har sett på. Man ser videre effekten av at det ikke alltid er observasjoner på de samme punktene for begge parametrene. Dette tilsvarer da "missing data", som er representert ved hvite områder. Dette kan medføre færre punkter i regresjonsanalysen for cirrusprodukt.

Tidligere i kap. 4 påpekte jeg de tydelige forskjellene mellom de to cirrusparametrene ved Nordpolen. Målinger fra cirrus optisk tykkelse indikerer forholdsvis høye verdier over noen polområder, mens målingene fra cirrusfraksjon viser ingen andel av cirrus. Det kan altså komme av den høye snøalbedoen eller pga. lysforholdene om sommeren ved disse breddegradene, som kan gi unøyaktigheter i målinger av optisk tykkelse. Siden verdier av cirrusfraksjon er null ved disse områdene, vil derfor også cirrusproduktet indikerer ingen andel av cirrus. Dermed elimineres de overestimerte verdiene av cirrus optisk tykkelse.

Den globale fordelingen av cirrusproduktet for de to siste tidspunktene, 15/21UTC, er vist i figur 4.20(b). Her sammenliknes figur 4.6(b) og 4.14(b). Cirrusproduktet gjengir godt områdene i den ITCZ, over Mellom-Amerika,



(a) Cirrusprodukt midlet for 10-16 juni 2002 03/09UTC



(b) Cirrusprodukt midlet for 10-16 juni 2002 15/21UTC

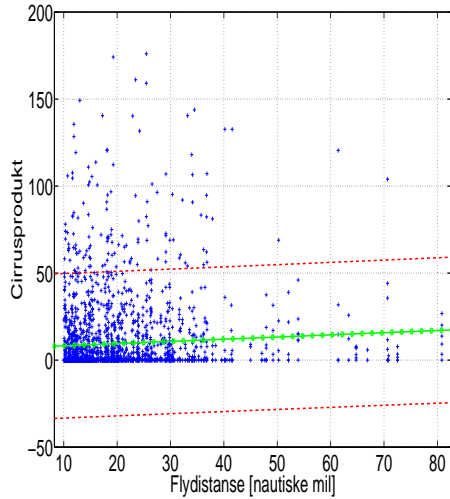
Figur 4.20: Plott av cirrusprodukt for 03/09/15/21UTC.

østkysten av USA, Stillehavet og det karibiske hav. Over Nord-Atlanteren (spesielt den Nord-Atlantiske flysektoren) viser målingene av optisk tykkelse stor andel av cirrus i dette området. Målinger fra cirrusfraksjon viser derimot lite eller ingen andel av cirrus, som dermed gir tilsvarende resultat for cirrusproduktet. Videre ser man effekten av de høye/lave verdiene for hhv. cirrus optisk tykkelse og cirrusfraksjon over det Øst-Siberiske hav.

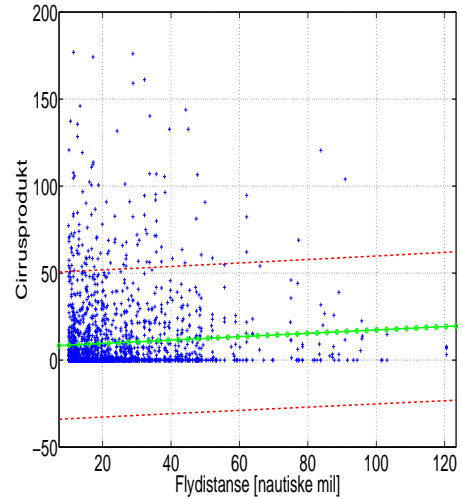
I likhet med de to andre cirrusparametrene er regresjonsresultatene fra cirrusproduktet utarbeidet for fire tidspunkter, globalt og regionalt, for hele uka og en enkel dag. Jeg vil nå også vise noen få utvalgte regresjonsplott for denne parameteren. I figur 4.21 er cirrusprodukt og flydistanse korrelert som ukkesmiddel, globalt for 03UTC. Den globale fordelingen av cirrusproduktet for dette tidspunktet, viste at det hovedsakelig kun var områdene over Asia som bidro til en positiv korrelasjon. Resultatene gir en korrelasjon på 6.34% og 7.04% hhv. før/etter filtrering, altså en svak, positiv Δr på 0.7%. Dette samsvarer bra med de tidligere resultatene vi har sett over Asia. Mange av resultatene for de tre cirrusparametrene i dette området, har generelt vært av samme størrelsesorden (og forholdsvis høye) før/etter filtrering, m.a.o. en liten Δr . Dette tilsier at de meteorologiske forholdene for dannelse av kondensstriper er gode. Dette er også tilfelle i figur 4.21(c)/4.21(d). Her er regresjonsanalysen utført nettopp over Asia 6 timer senere. Som vi har sett for cirrus optisk tykkelse og cirrusfraksjon, er 09UTC det tidspunktet hvor det er lokalisert de høyeste andelene av cirrus over Øst-Asia (området definert tidligere). Dette gjenkjennes også for cirrusproduktet. Korrelasjonen blir dermed tilsvarende høy, 20.08% og 20.90% hhv. uten/med Schmidt-Appleman kriteriet.

Siden resultatene for cirrus optisk tykkelse og cirrusfraksjon for de regionale områdene har vært nokså like, er det også naturlig å kunne kjenne igjen mange av hovedtrekkene fra analysene av cirrusproduktet. Over Europa har forholdene for dannelse av kondensstriper vært forholdsvis gode, men betydelig dårligere over USA. Likevel har det kun vært målt små mengder av cirrus over disse områdene. Dette stemmer for såvidt bra over USA, men overhodet ikke over Europa. Denne situasjonen gjenkjennes i figur 4.22. Over Europa er riktignok cirrusproduktet og tettheten av flytrafikk positiv korrelert før filtrering, mens fuktighetskriteriet faktisk bidrar til negativ korrelasjon etter filtrering. Vi ser videre at de to parametrene samsvarer dårlig med hverandre. Høye verdier av cirrusprodukt er lokalisert over områder med lite flytrafikk, og vice versa. Δr for Europa er på -8.61%.

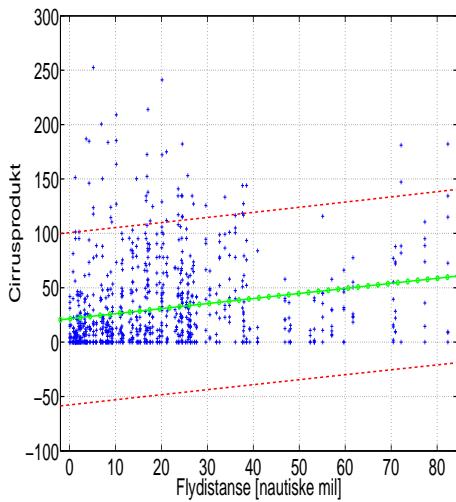
Den globale fordelingen av cirrusproduktet i figur 4.20 viste omtrentlig de samme andelene av cirrus over USA som analysene for cirrus optisk tykkelse og cirrusfraksjon. Vi kan derfor vente oss at analysene for cirrusproduktet over dette området vil indikere de samme hovedtrekkene som tidligere. Figur 4.22(c) og 4.22(d) viser den regionale korrelasjonen over USA for 15UTC.



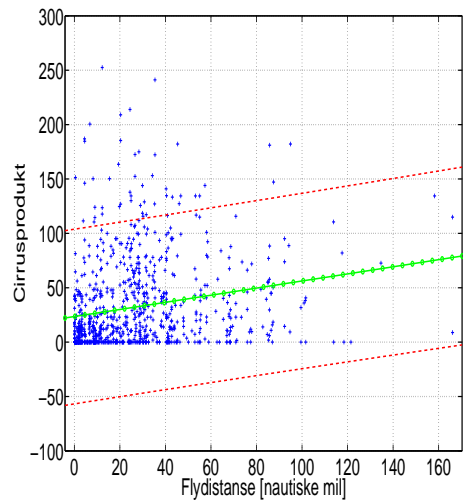
(a) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet, globalt 03UTC



(b) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet, globalt 03UTC

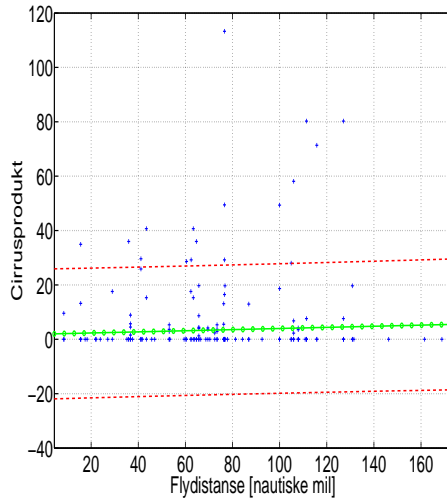


(c) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet, Øst-Asia 09UTC

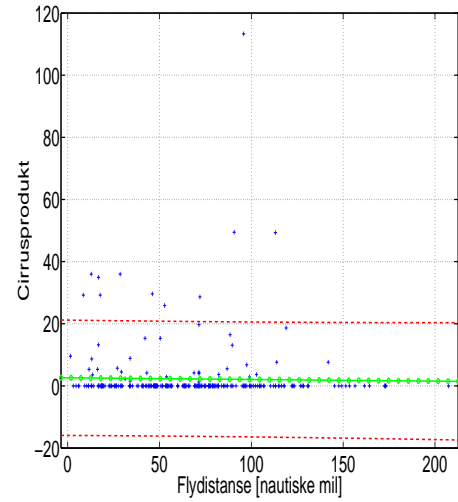


(d) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet, Øst-Asia 09UTC

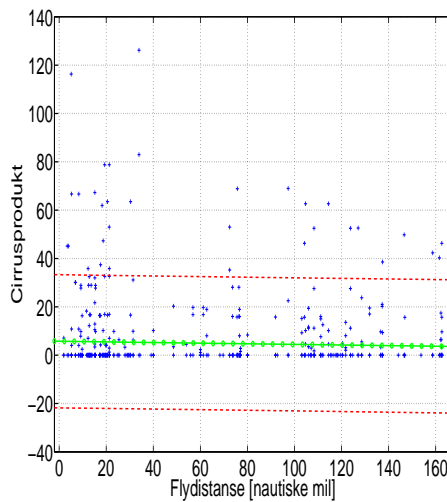
Figur 4.21: Global og regional regresjonsanalyse av cirrusprodukt for 10-16 juni 2002 03/09UTC i forhold til flydistanse for FL 59-82.



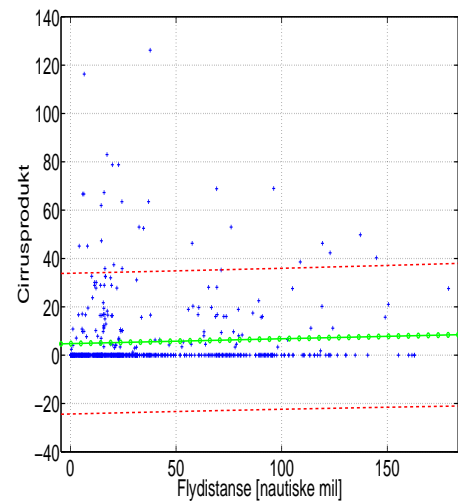
(a) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet, Sentral-Europa



(b) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet, Sentral-Europa



(c) Regresjon uten Schmidt-Appleman kriteriet, USA



(d) Regresjon med Schmidt-Appleman kriteriet, USA

Figur 4.22: Regional regresjonsanalyse av cirrusprodukt for 10-16 juni 2002 15UTC i forhold til flydistanse for FL 59-82.

I motsetning til over Europa, er korrelasjonen negativ og positiv hhv. før og etter filtrering. Δr for USA er på 9.44%.

Regresjonsanalysene fra cirrusproduktet er utført globalt og regionalt for de fire aktuelle tidspunktene. Resultatene for ukesmiddelet er skjematisk oppsummert i tabell 4.5. Vi har tidligere sett at resultatene fra de to første parametrene samsvarte godt med hverandre. Eneste merkbare forskjellen var at verdiene av cirrus optisk tykkelse generelt lå noe høyere enn målingene for cirrusfraksjon. Det samme var også tilfelle for korrelasjonsresultatene. Ved å sammenlikne resultatene fra de to parametrene med cirrusproduktet, ser vi naturligvis de samme hovedtrekkene globalt og regionalt. De største andelene av cirrus er lokalisert over Asia, men ellers lite over Sentral-Europa, USA og den Nord-Atlantiske flysektoren. Globalt er Δr stort sett høyere enn over de regionale områdene, hovedsakelig pga. alle tidspunktene inkluderer målingene over Asia. Unntaket er 15UTC. Ved dette tidspunktet er da også den absolutte endringen i korrelasjonen negativ, av størrelsesorden -0.57%.

På regional skala er resultatene nokså forskjellige avhengig av hvilket område man analyserer. Områdene kan oppsummeres på følgende måte. Over Nord-Atlanteren er forholdene for dannelsen av kondensstriper variable, og det er kun målt små mengder av cirrus enten det er i form av cirrus optisk tykkelse eller cirrusfraksjon. I tillegg resulterer lite flytrafikk til svake korrelasjoner. Over Europa, og særlig Asia, er forholdene vesentlig bedre. Det som skiller disse to områdene er den høye forekomsten av cirrus over Asia og tilsvarende lite over Europa, og den høye og moderate tettheten av flytrafikk over hhv. Europa/Asia. Dette resulterer i kraftig, negativ korrelasjon over Sentral-Europa, mens forholdsvis høy korrelasjon både med/uten Schmidt-Appleman kriteriet over Asia.

Korr. r	03UTC	09UTC	15UTC	21UTC	XXUTC
Globalt	0.87/2.34	12.60/16.84	-1.36/-1.93	-3.83/1.50	0.57/5.27
Δr globalt	1.47	4.24	-0.57	5.33	4.7
S-Europa	NaN	4.04/-7.13	6.31/-2.30	NaN	5.43/-3.83
Δr S-Europa	NaN	-11.17	-8.61	NaN	-9.26
N-Atl.	NaN	-0.90/-4.87	-8.28/-8.78	NaN	-9.08/-8.82
Δr N-Atl.	NaN	-3.97	-0.5	NaN	0.26
USA	NaN	NaN	-4.52/4.92	-7.76/-0.92	-6.20/2.93
Δr USA	NaN	NaN	9.44	6.84	9.13
Ø-Asia	7.25/6.39	20.08/20.90	NaN	NaN	14.14/15.78
Δr Ø-Asia	-0.86	0.82	NaN	NaN	1.64

Tabell 4.5: Korrelasjonsresultatene globalt og regionalt for cirrusprodukt 10-16 juni 2002 og flydistanse fra FL 59-82.

Mesteparten av USA utgjør det området i analysen min hvor de meteorologiske forholdene er dårligst tilrettelagt for dannelse av kondensstriper. Unntaket er over Nordøst-USA, hvor det også er forholdsvis mye flytrafikk. Dette gir videre utslag i resultatene, i form av de høyeste Δr som er lokalisert over USA.

Avslutningsvis er også resultatene fra cirrusproduktet for 12 juni 2002 tatt med. Det er lite nytt å si om korrelasjonene for denne dagen. Cirrusproduktet samsvarer godt med resultatene for de to andre cirrusparametrene, og da spesielt cirrusfraksjonen. Ved sammenlikning med ukemiddelet, ser man også godt samsvar. Det merkbare unntaket er den kraftige økningen i r etter filtrering over Nord-Atlanteren for 15UTC, hvor den absolutte endringen er på nesten 18% mot -0.5% for hele uka. Helt nytt er det likevel ikke, siden det er en trend som går igjen for alle cirrusparametrene for denne dagen. Resultatene fra cirrusproduktet indikerer at 12 juni 2002 gir et godt bilde av situasjonen for hele uka.

Korr. r	03UTC	09UTC	15UTC	21UTC	XXUTC
Globalt	0.77/0	11.22/14.46	9.15/4.44	-1.66/4.87	2.48/4.98
Δr globalt	-0.77	3.24	-4.71	6.53	2.5
S-Europa	NaN	-17.04/-20.54	-18.60/-19.92	NaN	-17.49/-20.13
Δr S-Europa	NaN	-3.5	-1.32	NaN	-2.64
N-Atl.	NaN	-4.37/-6.56	-10.32/7.67	NaN	-25.78/-18.83
Δr N-Atl.	NaN	-2.19	17.99	NaN	6.95
USA	NaN	NaN	28.46/37.10	-0.73/10.89	10.29/18.52
Δr USA	NaN	NaN	8.64	11.62	8.23
Ø-Asia	6.49/6.05	23.64/24.07	NaN	NaN	14.29/14.28
Δr Ø-Asia	-0.44	0.43	NaN	NaN	-0.01

Tabell 4.6: Korrelasjonsresultatene globalt og regionalt for cirrusprodukt 12 juni 2002 og flydistanse fra FL 59-82.

Statistisk analyse globalt og regionalt

Det har nå blitt gitt en presentasjon av resultatene fra alle cirrusparametrene. Best samsvar mellom cirruskydekket og flytrafikken var stort sett lokalisert over Øst-Asia. Vi husker samtidig at fordelingen av cirrus var størst over mesteparten av Asia. Cirruskydekket kan enten være et resultat av naturlig dannelse, fra f.eks. fronter eller statistisk instabilitet, eller antropogen dannelse fra f.eks. fly og dens tilhørende kondensstriper. Hvor stor andel av cirrusen som har sin opprinnelse fra kondensstriper avgjøres hovedsakelig av de meteorologiske forholdene i atmosfæren, men faktorer som f.eks. motortype spiller også inn. I denne oppgaven ble Schmidt-Appleman kriteriet brukt som en indikator på hvorvidt de meteorologiske forholdene var tilrettelagt for dannelse av kondensstriper. Kriteriet viste gode muligheter for kondensstripedannelse over Øst-Asia. Samtidig viste fordelingen av *RHI* at de ville

oppretholdes i det samme området. Dermed kan kondensstripene videreutvikles til antropogene cirrusskyer. Den da vidstrakte og diffusen formen på kondensstripene gjør dem derimot umulig å skille fra naturlige cirrusskyer. I studier av fly-induserte cirrustrender kan dette være problematisk. Men ut fra regresjonsanalysen kan man kvantifisere effekten av fly på cirrusskydekket.

Regresjonsanalysen mellom cirrus og flydistanse kan uttrykkes ved minstekvadratets regresjonslinje

$$y = a + bx \quad (4.1)$$

hvor y representerer det totale cirrusskydekket (responsvariabelen), a er skjæringspunktet, b er helningskoeffisienten og x er flydistansen (forklaringsvariabelen). Likning 4.1 beskriver da hvordan den totale andelen av cirrus endres når tettheten av flytrafikk endres. Hvis det ikke foreligger noen flyforekomster i et gitt område (null i flydistanse), uttrykker regresjonslinjen den naturlige andelen av cirrus ($y_{nat}=a$).

Spesielt to størrelser er av stor interesse for den statistiske analysen, nemlig den absolutte og relative cirrusandelen fra fly uttrykt vha. de tre cirrusparametrene. Størrelsene defineres på følgende måte

$$\bar{y}_{abs, fly} = b\bar{x} \quad (4.2)$$

$$\bar{y}_{rel, fly} = \frac{b\bar{x}}{a + b\bar{x}} \quad (4.3)$$

hvor likning 4.2 og 4.3 representerer hhv. det absolutte og relative cirrusskydekket fra fly, og \bar{x} er flydistansen midlet over alle flypunktene. Det relative cirrusskydekket uttrykker altså den prosentvise antropogene andelen av cirrus dannet fra fly, for middelet av flydistansen. For å estimere usikkerheten i beregningen av det relative cirrusskydekket, inneholder den statistiske analysen i tillegg et 95% konfidensintervall for helningskoeffisienten b (kalt β). Konfidensintervallet uttrykker altså variabiliteten rundt estimatet av helningskoeffisienten. β er definert som

$$\beta = b \pm t^* SE_b \quad (4.4)$$

hvor standardfeilen SE_b til helningskoeffisienten er gitt ved

$$SE_b = \frac{S}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2}}$$

S representerer det estimerte standardavviket, og t^* er den kritiske verdien for $t(n-2)$ tetthetskurven med areal C mellom $-t^*$ og t^* . Frihetsgraden til t -fordelingen er gitt ved $n-2$, hvor n er antall forekomster.

Resultatene fra regresjonsanalysen er videre utført både globalt og for tre

av de regionale områdene, men i det påfølgende presenteres de bare globalt og for Øst-Asia. Det er kun tilfellene som oppfyller Schmidt-Appleman kriteriet som er tatt med i den statistiske analysen.

Tabell 4.7 oppsummerer resultatene over Øst-Asia for alle cirrusparametrene for to ulike tidspunkter. Resultatene viser at de beste estimatene for det relative cirruskydekket er positivt, og varierer fra ca. 10-27% avhengig av parametertype og tidspunkt. Det antropogene cirruskydekket dannet fra fly utgjør altså en stor andel av det totale cirruskydekket representert over Øst-Asia. Etersom fuktighetskriteriet indikerte gode forhold for dannelse av kondensstriper over dette området, vil regresjonsanalysen omfatter en såpass stor andel av flypunkter at resultatene kan regnes som mer pålitelig enn over f.eks. USA og den Nord-Atlantiske flykorridoren.

03UTC	a	b	β	\bar{x} [na.mil]	$b\bar{x}$	$\frac{b\bar{x}}{a+b\bar{x}}$ [%]	$\frac{\beta\bar{x}}{a+b\bar{x}}$ [%]
cirrus opt. tyk.	1.0027	0.0045	[0.0018,0.0073]	25.7663	0.1159	10.36	[4.15,16.81]
cirrusfrak.	3.8018	0.0432	[0.0142,0.0722]	25.7663	1.1131	22.65	[7.44,37.85]
cirrusprod.	8.8549	0.0633	[-0.0069,0.1335]	25.7663	1.6310	15.55	[-1.69,32.80]
09UTC							
cirrus opt. tyk.	1.3785	0.0086	[0.0064,0.0108]	26.1244	0.2247	14.02	[10.43,17.60]
cirrusfrak.	11.387	0.1325	[0.0858,0.1792]	26.1244	3.4615	23.31	[15.10,31.53]
cirrusprod.	23.520	0.3268	[0.2193,0.4343]	26.1244	8.5375	26.63	[17.87,35.39]

Tabell 4.7: Resultater fra regresjonsanalysen over Øst-Asia 03/09UTC.

Bredden på konfidensintervallet antyder hvor stor feilmarginen (t^*SE_b) er for de forskjellige parametrene. En liten feilmargin gir et smalt konfidensintervall, og følgelig kan det beste estimatet for regresjonsanalysen regnes som sikrere enn tilfeller med bredere intervaller. Regresjonsanalysen over Øst-Asia viser at det beste estimatet for det relative cirruskydekket er mest pålitelig for cirrus optisk tykkelse. For denne parameteren utgjør det antropogene cirruskydekket ca. 10% og 14% av den totale andelen av cirrus for hhv. 03/09UTC. For de andre parametrene er det beste estimatet mere usikkert, og utgjør ca. 1/4 av det totale cirrusdekket for noen av tilfellene. Dette er i bedre samsvar med den statistiske analysen i Stordal m.fl. (2005). Her tok riktignok analysen for seg områder over Europa med høyest tetthet av flytrafikk, og man må derfor være varsom ved sammenlikning av resultatene over Øst-Asia. Man fant at opp mot halvparten av cirrusdekket over Europa kunne skyldes flytrafikk.

Siden den øvre og nedre verdien på konfidensintervallene i tabell 4.7 er positiv for alle parametrene (eneste unntak er cirrusprodukt for 03UTC), kan vi med 95% sannsynlighet slå fast at flytrafikk har induisert en positiv endring i cirruskydekket over Øst-Asia. Den positive endringen viser seg i tillegg å være betydelig for noen av tilfellene.

Resultatene fra regresjonsanalysen bør alltid sjekkes opp mot hvorvidt de er statistiske signifikante. Signifikans i statistisk sammenheng brukes til å

indikere hvor sterke bevis man har mot en nullhypotese (H_0) ved et gitt signifikansnivå α . Hvor sterke bevisene er mot nullhypotesen avgjøres ut fra P -verdien til testen, i form av en sannsynlighet. Jo mindre P er, desto sterkere er bevisene mot H_0 . Ved tilstrekkelig lav P -verdi ($P < \alpha$) forkastes da H_0 , og man benytter den alternative hypotesen H_a . H_0 og H_a blir i dette tilfellet:

$$H_0 : \bar{y}_{rel, fly} = 0, \quad H_a : \bar{y}_{rel, fly} > 0$$

I den statistiske analysen er signifikansnivået satt til $\alpha=0.05$. Vi krever altså at bevisene mot H_0 er så sterke at utfallet ikke vil forekomme mere enn 5% av gangene, gitt at H_0 er sann. Hvis $P < \alpha$, sier man at resultatene er statistiske signifikante på α -nivået, i dette tilfellet på 0.05-nivået.

Beregningene av P -verdiene over Øst-Asia viser at bevisene mot H_0 er så sterke at nullhypotesen forkastes. Flytrafikk har altså induisert en positiv endring i cirruskydekket over dette området. Resultatene er statistiske signifikante på 0.05-nivået for samtlige av parametrene for begge tidspunktene ($P < 0.05$).

Den statistiske analysen ble også utført over to andre regionale områder, Sentral-Europa og den Nord-Atlantiske flysektoren. Her var resultatene mer usikre sammenliknet med Øst-Asia. Det relative cirruskydekket var positivt for cirrus optisk tykkelse, mens tilsvarende negativt for cirrusfraksjon. Dette samsvarer med de svake korrelasjonene over de disse områdene. Samtidig viste resultatene 46% og 33% færre flypunkter over hhv. Sentral-Europa og den Nord-Atlantiske flykorridoren for 09UTC, som bidrar til å øke usikkerheten i resultatene fra regresjonsanalysen. Dette skyldes både dårligere meteorologiske forhold over disse områdene, men også den geografiske størrelsen på regionene i forhold til området over Øst-Asia.

Helt til slutt presenteres også resultatene fra den globale, statistiske analysen i tabell 4.8. Hovedtrekkene er stort sett de samme som over Øst-Asia. Det positive fortegnet på øvre og nedre verdien av konfidensintervallet gjør at man med 95% sannsynlighet kan slå fast at flytrafikk har induisert en positiv endring i det globale cirruskydekket. Beregningene av de globale P -verdiene viser at resultatene er statistisk signifikante på 0.05-nivået ($P < 0.05$).

03UTC	a	b	β	\bar{x} [na.mil]	$b\bar{x}$	$\frac{b\bar{x}}{a+b\bar{x}}$ [%]	$\frac{\beta\bar{x}}{a+b\bar{x}}$ [%]
cirrus opt. tyk.	0.7134	0.0114	[0.0099,0.0128]	7.6363	0.0871	10.88	[9.44,12.21]
cirrusfrak.	3.7601	0.0441	[0.0280,0.0602]	7.6363	0.3368	8.22	[5.22,11.22]
cirrusprod.	9.3410	0.0419	[0.0325,0.0806]	7.6363	0.3199	3.31	[2.57,6.37]
09UTC							
cirrus opt. tyk.	0.7931	0.0070	[0.0060,0.0080]	7.5862	0.0531	6.28	[5.38,7.17]
cirrusfrak.	3.0742	0.0976	[0.0870,0.1082]	7.5862	0.7404	19.41	[17.30,21.52]
cirrusprod.	7.5828	0.2275	[0.2006,0.2544]	7.5862	1.7260	18.54	[16.35,20.73]

Tabell 4.8: Resultater fra den globale regresjonsanalysen for 03 -og 09UTC.

De beste estimatene på det relative cirrusdekket er store i forhold til tidligere studier. I f.eks. Stordal m.fl. (2005) fant man et beste estimat på 0.24% i det

globale cirrusdekket forårsaket av flytrafikk for året 2000 (dette estimatet tilsvarende det absolutte cirrusdekket fra fly, $b\bar{x}$, definert i denne oppgaven). I masteroppgaven Gislefoss (2007) er det videre gitt et globalt, gjennomsnittlig cirrusdekke på 13.4% fra ISCCP. Det relative cirrusdekket fra Stordal m.fl. (2005) estimeres da til ca. 2%. Fra tabell 4.8 ser man at de beste estimatene på $\bar{y}_{rel, fly}$ for cirrusfraksjon varierer fra ca. 8% og 19% for hhv. 03- og 09UTC. Estimaten på det relative cirrusdekket fra fly beregnet i den statistiske analysen, ligger altså noe høyere sammenliknet med Stordal m.fl. (2005). Dette kan skyldes at regresjonsanalysen i denne oppgaven er basert på områder som oppfyller Schmidt-Appleman kriteriet, altså flypunkter hvor de meteorologiske forholdene er tilrettelagt for dannelse av kondensstriper. I Stordal m.fl. (2005) ble det ikke brukt noen form for filtrering av flypunkter.

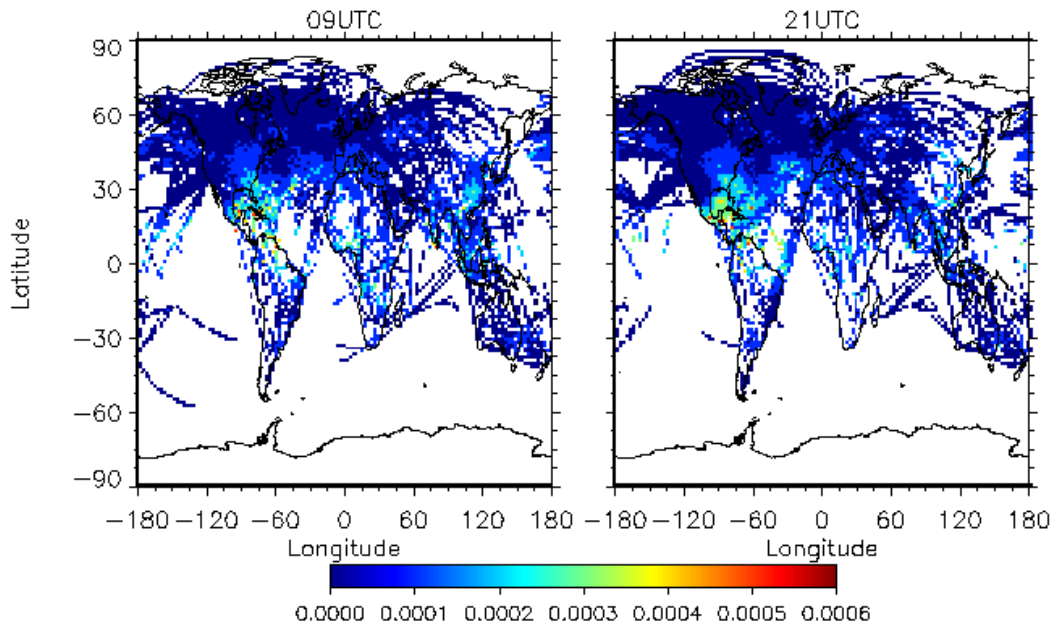
De globale konfidensintervallene er mye smalere enn tilsvarende intervaller over Øst-Asia, som antyder at de globale estimatene er langt sikrere. Den globale regresjonsanalysen viser at det beste estimatet for $\bar{y}_{rel, fly}$ også her er mest pålitelig for cirrus optisk tykkelse. Den forholdsvis høye antropogene andelen av cirrus fra fly på global skala samt den lave usikkerheten, gjør resultatene fra den globale regresjonsanalysen veldig interessante, særlig med tanke på hvilken effekt dette kan ha på det globale strålingsbudsjettet.

4.4 De meteorologiske forholdene for 10-16 juni 2002

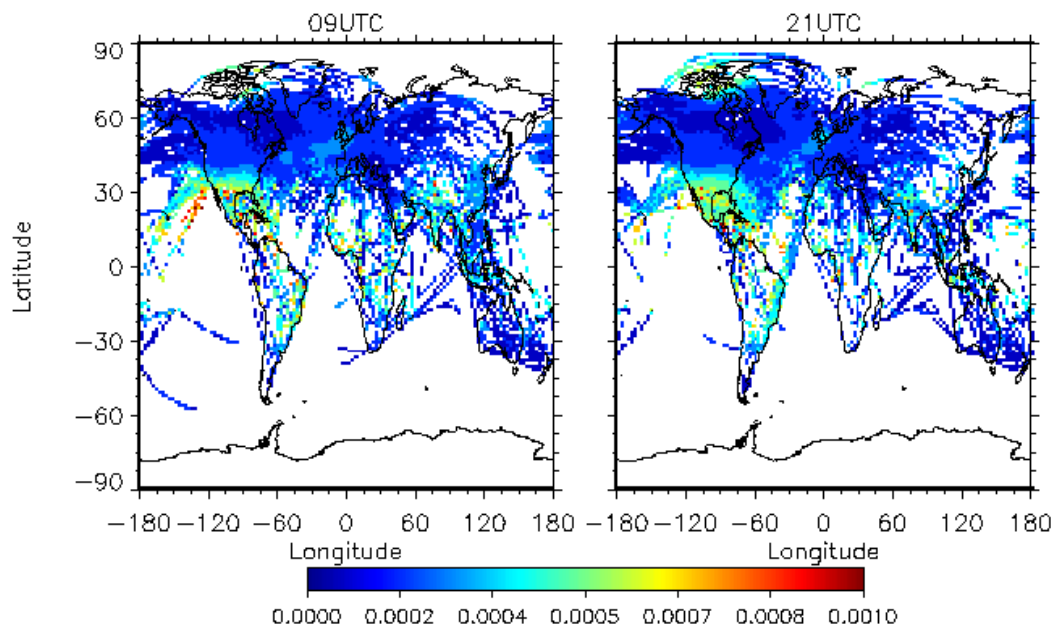
Jeg har nå presentert resultatene fra korrelasjonsanalysene for alle de tre cirrusparametrene. Analysene ble utført både med og uten Schmidt-Appleman kriteriet, der områder med flytrafikk som ikke oppfylte kriteriet ble filtrert ut. Dette ga nokså variable resultater både globalt og regionalt. Områdene som var aktuelle etter filtreringsprosessen, var altså utelukkende kontrollert av omgivelsenes fuktighet. Kriteriet baserte seg på den relative fuktigheten, rettere sagt det kritiske metningsforholdet m.h.p. is til omgivelsene ($S_{i,crit}$) som er påkrevd for å oppnå metning m.h.p. vann i plumen. I Jensen m.fl. (1998) fant man at dette kriteriet er helt nødvendig for at dannelse av kondensstriper skal forekomme.

Analysene som er utført i denne oppgaven, konsentrerer seg om fire UTC-tidspunkter med 6 timers intervaller. Den globale fordelingen av flyvninger etter filtrering presentert i kap. 4.1, viser omtrent de samme områdene uavhengig av hvilket av tidspunktene man ser på. Schmidt-Appleman kriteriet indikerer altså små døgnlige variasjoner for den aktuelle uka. Dette gjelder spesielt for tidspunktene 03/09/15UTC. For det siste tidspunktet er det noe større variasjoner, i form av at fuktighetskriteriet indikerer bedre meteorologiske forhold. Det vil derfor være av stor interesse å studere hvorfor nettopp noen områder er bedre tilrettelagt for dannelse av kondensstriper enn andre. Dette er gjort for 09/21UTC. I den forbindelsen er det viktig å se på parametrene som inngår i utledningen av relativ fuktighet. Relativ fuktighet ble videre definert i kap. 3.3 som forholdet mellom spesifikk fuktighet Q og spesifikk fuktighet ved metning Q_s . Som nevnt tidligere hentes Q direkte fra ECMWF-modellen, mens Q_s må beregnes ved en tilnæringsmetode. Ved beregning av Q_s inngår også metningsvanndamptrykket e_s , som beregnes ved Golf-Gratch tilnærmingen. Beregningene av relativ fuktighet inkluderer altså en del meteorologiske størrelser. Dette omfatter også temperaturen T og trykket P . Noen av disse meteorologiske parametrene vil i det påfølgende presenteres og studeres nærmere i detalj for 09/21UTC.

Temperaturen og konsentrasjonen av vanndamp i atmosfæren er naturligvis av helt avgjørende betydning for dannelse av kondensstriper. Vi husker fra Jensen m.fl. (1998) at disse to parametrene ble antatt å være styrt av inntrengning av luft fra omgivelsene. Den første parameteren som presenteres er spesifikk fuktighet Q . Figur 4.23(a) viser den globale fordelingen av spesifikk fuktighet for 09/21UTC for de områdene hvor det er flytrafikk, midlet over 10-16 juni 2002 og FL 59-82. Q representerer en nyttig indeks for vanndampsinholdet i atmosfæren. Spesifikk fuktighet er definert som forholdet mellom massen av vanndampsmolekyler og massen av atmosfærelufta (massen av tørr luft og fuktig luft). Benevnningen blir da $\frac{\text{kilogram vanndamp}}{\text{kilogram luft}}$.

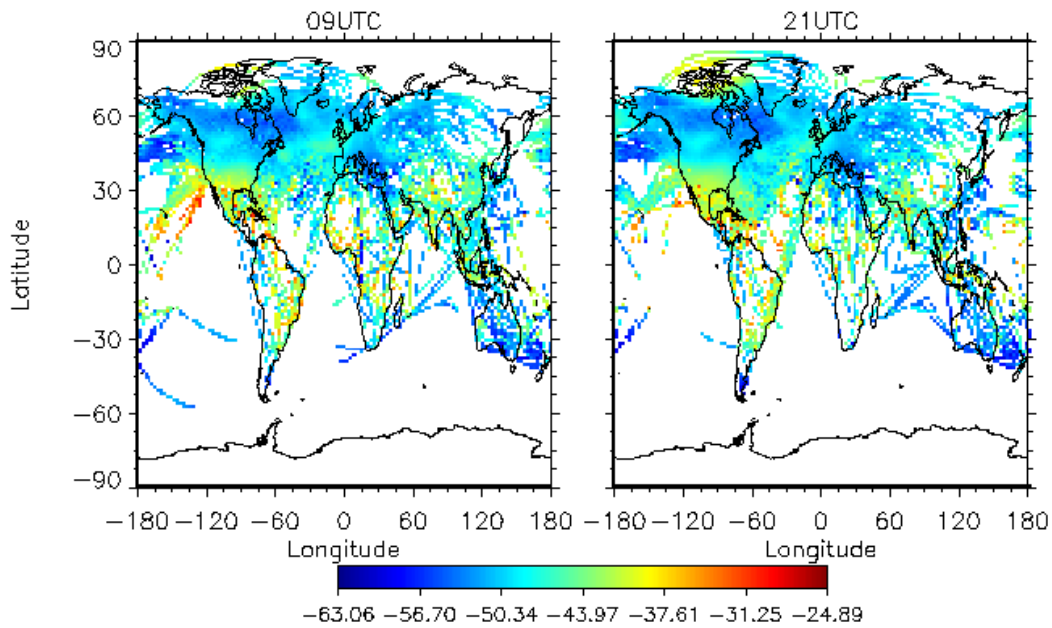


(a) Spesifikk fuktighet



(b) Spesifikk fuktighet ved metning i forhold til vann

Figur 4.23: Plott av spesifikk fuktighet for 09/21UTC.



Figur 4.24: Plott av temperatur for 09/21UTC.

En viktig bemerkning i forbindelse med spesifikk fuktighet, er at den ikke endres når lufta ekspanderer eller komprimeres. I motsetning til spesifikk fuktighet ved metning, som vi skal se på senere, er altså denne størrelsen uavhengig av temperaturen. Nettopp derfor fungerer Q som en god indikator for å sammenlikne vandampinnholdet til lufta ved forskjellige lokasjoner, til tross for at lufttemperaturen kan være forskjellig. Vi ser fra figuren at generelt er vandampinnholdet til lufta lavt. Dette har naturligvis sammenheng med hvor i atmosfæren beregningene er tatt utgangspunkt i. Som nevnt tidligere er beregningene i denne oppgaven utført i FL 59-82, som tilsvarer ca. 8991-12497meter. I disse høydene består lufta av svært lite fuktighet (maksverdi under 1 gram vandamp pr. kilogram luft). Man ser videre at de største verdiene er lokalisert nær ITCZ. Dette omfatter bl.a. områdene over Mellom-Amerika, nær Mexico-gulven og det Karibiske hav. Over de regionale områdene definert tidligere, befinner de høyeste konsentrasjonene seg over Asia. I den Nord-Atlantiske flysektoren viser de modellerte dataene de minste mengdene av vandamp. Forskjellene mellom de to tidspunktene er forholdsvis små. Maks -og minverdiene er lokalisert over de samme områdene, men kontrastene er noe høyere for 21UTC.

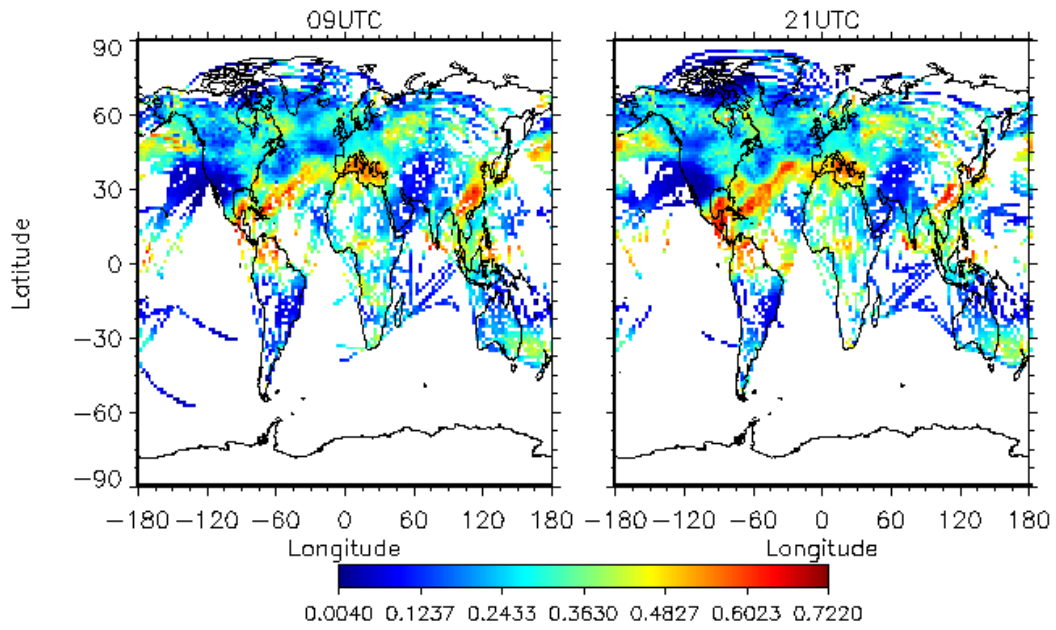
Forholdet mellom Q og spesifikk fuktighet ved metning, Q_s , gir den relative fuktigheten. Q_s er definert på samme måte som Q , men uttrykker det maksimale vandampinnholdet til lufta ved en gitt temperatur. Denne konsentrasjonen kommer som et resultat av når lufta er mettet m.h.p. vandamp. Q_s er altså avhengig av temperaturen, og øker eksponentielt med T . Egenskapene til lufta gjør at varm luft kan holde på mer vandamp enn kald luft. Derfor vil Q_s være høyere over områder som er varmere i forhold til kaldere

områder.

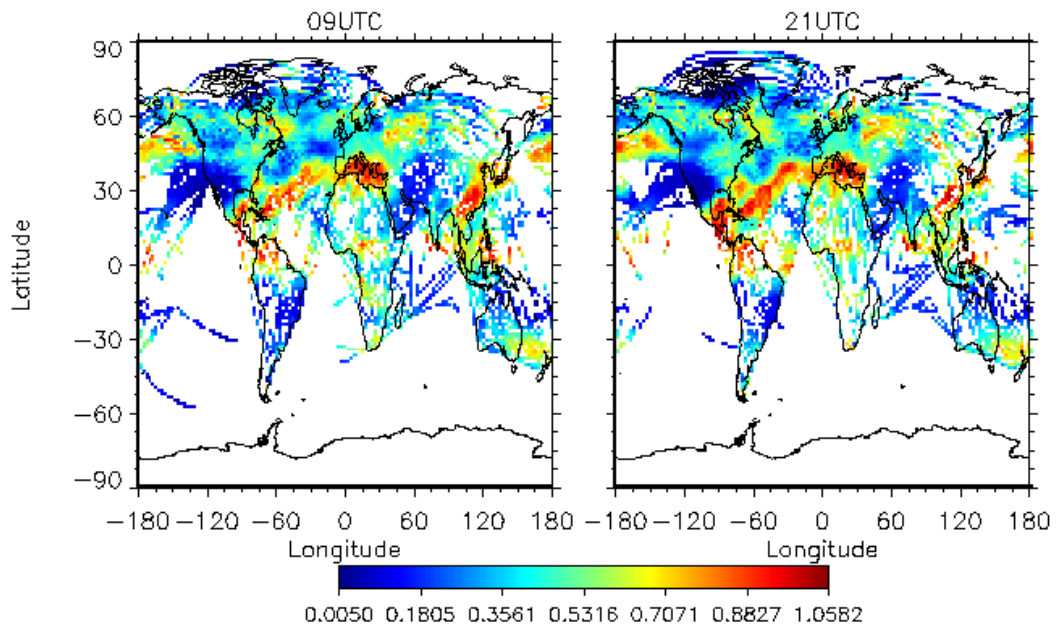
I figur 4.23(b) er den spesifikke fuktigheten ved metning beregnet, og midlet over samme tidsperiode og høydeintervall. Vi gjenkjenner tydelig de varme områdene ved ITCZ, nær Mellom-Amerika og det Karibiske hav. Legg spesielt merke til det skarpe skillet over USA, som skiller den nordlige og sørlige delen av USA. De høye verdiene over Sør-USA, er også tilfellet for flyrutene over til Hawaii. Maksverdiene av Q_s har klart sammenheng med temperaturen, og medfører videre en lav relativ fuktighet over disse områdene (gitt Q i figur 4.23(a)). Derfor blir også store områder over USA filtrert ut av Schmidt-Appleman kriteriet. En annen interessant ting man legger merke til er at det ikke nødvendigvis er en analog sammenheng mellom Q og Q_s . Dette ser man til dels over f.eks. USA og flyrutene over til Sør-Amerika. Over Asia bidrar de lave og moderate verdiene av hhv. Q_s og Q til en høy relativ fuktighet i dette området. Dette er gunstig med tanke på dannelselse av kondensstriper.

Temperaturen til omgivelsene er en annen viktig meteorologisk parameter som styrer dannelsesprosessen av kondensstriper. Figur 4.24 viser altså den globale temperaturfordelingen for 09/21UTC, midlet over 10-16 juni 2002 og FL 59-82 (benevning; °C). Selv om temperaturen representerer en middelværdi over de 7 dagene og 24 flynivåer, gir den en god indikasjon på kontrastene mellom de varme og kalde områdene. Man ser tydelig de analoge trekkene som for Q_s . Vi gjenkjenner den sterke temperaturgradienten over USA. Over den nordlige delen av USA og Canada indikerer temperaturen langt bedre forhold for dannelselse av kondensstriper enn over Sør-USA og Mellom-Amerika. De kaldeste områdene i dette høydeintervallet er lokalisert over Canada, Alaska, Middelhavet og store deler av Asia. Legg spesielt merke til minimum i T over Nordøst-USA/Canada og deler av den Nord-Atlantiske flysektoren. Igjen ser vi at områdene over Øst-Asia er favorisert for dannelselse av kondensstriper og antropogene cirrusskyer.

Det mest vanlige målet på vanndampsinholdet til lufta er relativ fuktighet RH . Denne parameteren relaterer altså vanndampskonsentrasjonen i lufta (Q) til maksimale mengden vanndamp som lufta kan inneholde ved en gitt temperatur (Q_s). Som vi har sett tidligere, er ikke den relative fuktigheten entydig bestemt av vanndampsinholdet til lufta. Nettopp fordi varm luft kan inneholde mere vanndamp, er RH avhengig av både den faktiske vanndampskonsentrasjonen og lufttemperaturen. Hvis temperaturen til lufta øker, kan dermed lufta inneholde mere vanndamp. Som konsekvens av dette vil forholdet mellom vanndampskonsentrasjonen til lufta relativt til metningspunktet minke. Dette impliserer at RH minker, selv om fuktighetsinnholdet er uendret. I praksis vil de største verdiene av RH som oftest forekomme tidlig morgen, pga. den lave temperaturen (og ikke Q). I løpet av dagen når T stiger, vil RH minke i samsvar med økende Q_s .



(a) Relativ fuktighet m.h.p. vann



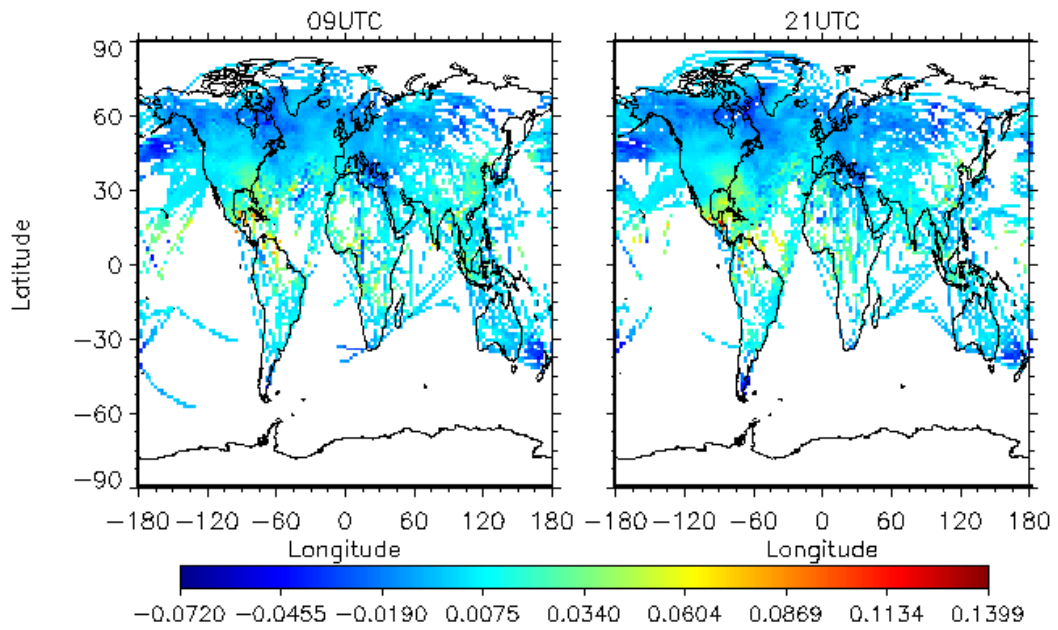
(b) Relativ fuktighet m.h.p. is

Figur 4.25: Plott av relativ fuktighet m.h.p. vann og is for 09/21UTC.

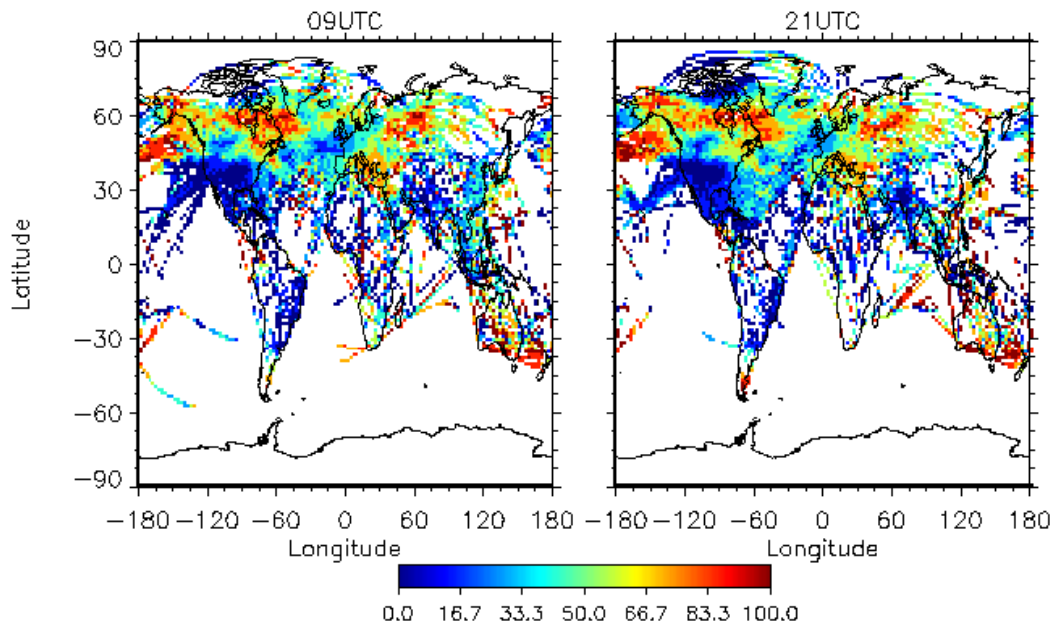
I figur 4.25 er relativ fuktighet m.h.p. vann og is beregnet for 09/21UTC, midlet i samme tidsperiode og trykkintervall. Som man ser følger RH hovedtrekkene i Q og T . Dvs. de høyeste verdiene av relativ fuktighet er lokalisert over de områdene hvor den spesifikke fuktigheten er høyest og den tilsvarende temperaturen er lavest. For å angi en indikator på hvor stor sannsynlighet det er for dannelse av kondensstriper, må vi se både på kombinasjonen av temperaturen og relativ fuktighet i de ulike områdene. For å illustrere dette bedre, kan vi tenke oss område 1 hvor T og RH er høy. Til sammenlikning har område 2 en betydelig lavere T , men samme RH . Siden RH er lik for begge områdene, betyr det da at Q er mye høyere for område 1. En liten tilførsel av fuktighet fra fly vil dermed ha langt større påvirkning på RH for område 2, fordi bakgrunnskonsentrasjonen av Q i dette tilfellet er liten. Dette impliserer større sannsynlighet for dannelse av kondensstriper over område 2, fordi det kreves mindre tilførsel av fuktighet for å oppnå metning m.h.p. vann i plumen. Man kan altså ikke ut fra RH alene slå fast sannsynligheten for dannelse av kondensstriper.

Ut fra situasjonen beskrevet ovenfor, er områdene med størst mulighet for dannelse av kondensstriper lokalisert over Canada og Sørøst-Europa (Middelhavet). Den globale fordelingen av RH viser også høye verdier i flysektoren over Nord-Atlanteren (20-40°N) fra Sør-Europa til Mellom-Amerika, og over Mexico-gulven. Når det gjelder de regionale områdene definert tidligere i denne oppgaven, viser fordelingen av RH klart dårligst forhold for dannelse av kondensstriper over deler av USA (Sørvest-USA). Noe bedre er forholdene over den Nord-Atlantiske flysektoren og Sentral-Europa. Fordelingen av RH og T viser størst sannsynlighet for dannelse av kondensstriper over Nordøst-USA og Øst-Asia. Dette samsvarer godt med korrelasjonsresultatene for disse områdene. Spesielt over Øst-Asia viser resultatene for de 3 cirrusparametrene de høyeste korrelasjonene, både før og etter filtrering. I tillegg har vi sett at det forholdsvis lille området over Nordøst-USA gir en høy Δr for de aktuelle tidspunktene.

I Jensen m.fl. (1998) diskuteres det hvilke forhold som er påkrevd for dannelse og opprettholdelse av kondensstriper. Vi husker at to kriterier må være oppfylt: metning m.h.p. flytende vann må oppnås på et visst stadie i dannelsesprosessen i plumen, og lufta til omgivelsene må være overmettet m.h.p. is for at kondensstripene skal kunne opprettholdes. Det sistnevnte kriteriet er ekstremt viktig ettersom opprettholdelse er helt nødvendig for at kondensstripene kan utvikle seg til antropogene cirruskyer. Som mål på opprettholdelsen, må relativ fuktighet m.h.p. is være over 1. Figur 4.25(b) viser den globale fordelingen av RHI for 09/21UTC. De mørkerøde områdene indikerer at kondensstripene kan opprettholdes over disse områdene. Figuren viser at det er forholdsvis få områder hvor kondensstripene kan opprettholdes. Selv om RHI er høy over visse områdene, er det ikke sikkert de meteorologiske forholdene er tilrettelagt for dannelse av kondensstriper. Et eks. på det er



(a) Differanse mellom det kritiske metningsforholdet m.h.p. is beregnet fra Schmidt-Appleman kriteriet og metningsforholdet m.h.p. is til omgivelsene



(b) Frekvens av cirrusOK for 10-16 juni 2002

Figur 4.26: Resultater fra Schmidt-Appleman kriteriet for 09/21UTC.

flysektoren (sektoren er spesielt tydelig for 15UTC, mindre for 09/21UTC) fra Sør-Europa over til Mellom-Amerika. Sektoren er lokalisert på lave breddegrader som gjør at temperaturen er høy. Siden lufta til omgivelsene kan inneholde mye fuktighet viser likevel beregningene av RHI over 1. Men $S_{i,crit}$ er tilsvarende høy i dette området, og Schmidt-Appleman kriteriet viser i figur 4.7(b)/4.8(b) at det meste av flytrafikken filtreres ut (husk at fordelingen av flytrafikken i disse figurene er for 12 juni 2002, og representerer ikke et middel for 10-16 juni 2002 slik som resultatene fra de meteorologiske parametrene. Derfor kan sammenlikningen gi noe avvik, men generelt samsvarer det bra pga. de små variasjonene fra dag til dag). Det samme er tilfellet over Mexico-gulven og det Karibiske hav. De mest interessante områdene befinner seg over Sørøst-Europa (Middelhavet) og Øst-Asia. Disse utgjør nettopp en del av de regionale områdene som benyttes i korrelasjonsanalysen. Her tilsier de meteorologiske forholdene at kondensstriperne både vil dannes og opprettholdes.

Ved presentasjonen av RHI (dette gjelder forsåvidt alle de meteorologiske parametrene) bør man ta hensyn til den horisontale oppløsningen til dataene. I delkap. 3.3 ble det nevnt at de meteorologiske parametrene fra ECMWF-modellen har en horisontal oppløsning på $1^\circ \times 1^\circ$. Dette er en relativt grov oppløsning når man studerer dannelse av kondensstriper. Verdier representerer et middel innenfor $1^\circ \times 1^\circ$ -boksene. Siden gridboksene er såpass store, kan det dermed være representert høyere (eller lavere) verdier av f.eks. RHI innenfor boksene. Fordelingen av RHI (eller andre meteorologiske parametre) gir derfor ikke et helt nøyaktig mål på over hvilke områder kondensstriper kan opprettholdes.

Avslutningsvis presenteres det noen resultater fra Schmidt-Appleman kriteriet. Disse resultatene tar for seg nærmere i detalj den globale fordelingen av områder som er favorisert for dannelse av kondensstriper. Figur 4.26(a) viser den globale fordelingen av differansen mellom det kritiske metningsforholdet m.h.p. is beregnet fra Schmidt-Appleman kriteriet ($S_{i,crit}$) og metningsforholdet m.h.p. is til omgivelsene ($S_{i,amb}$). Dette er gjort i samme tidsperiode og flyintervall som analysert tidligere, for tidspunktene 09/21UTC. I de områdene hvor differansen indikerer negative verdier vil det dermed være mulighet for dannelse av kondensstriper, og områdene utgjør punktene i korrelasjonsanalysen etter filtrering. Områder med positive verdier filtreres ut, og fuktighetskriteriet indikerer altså ikke forhold for kondensstriper. Figuren viser en tydelig sammenheng med den globale temperaturfordelingen presentert tidligere. Generelt har områdene med lav T tilsvarende negativ differanse i metningsforholdet m.h.p. is. Spesielt gjelder dette områdene fra $45\text{-}70^\circ\text{N}$. Men differansen i S_i er som vi har sett ikke alene styrt av temperaturen. Man må se den i kombinasjon med fuktigheten. Men for noen av de kalde områdene fra $45\text{-}70^\circ\text{N}$, vil dette indikere mindre tilførsel av fuktighet for å oppnå metning m.h.p. på vann i plumen. M.a.o., gunstig for å initialisere

dannelse av kondensstriper.

De største positive differansene befinner seg nær ITCZ, over Mexico-gulven og Mellom-Amerika. Her er temperaturen for høy til at dannelse av kondensstriper kan initialiseres. I tillegg er tettheten av flytrafikk lav i disse områdene. Rent hypotetisk, så viser fordelingen av RHI at kondensstripene ville blitt opprettholdt hvis de meteorologiske forholdene hadde vært gunstigere. Den nordøstlige delen av USA og Canda utgjør områdene med den høyeste negative differansen. Her vil metning m.h.p. vann i plumen oppnås i løpet av ca. 0.5 sek. (se figur 2.5 hentet fra Jensen m.fl. (1998)), og dannelsesprosessen kan initialiseres. I denne korte tidsperioden vil overmetningen m.h.p. vann bli til dels høy noen steder pga. de lave verdiene.

La oss nå se nærmere på de fire regionale områdene. Over USA har resultatene vist at det meste av flytrafikken filtreres ut. Dette ser vi også igjen i figur 4.26(a). Men fargeskalaen indikerer likevel en liten positiv differanse. Siden konsentrasjonen av vanndamp er høy sammenliknet med over andre områder, trenger ikke lufta å ha så mye lavere temperatur for oppnå metning m.h.p. vann i plumen. Over den Nord-Atlantiske flysektoren viser resultatene lave differanseverdier i $S_{i,crit}-S_{i,amb}$, og relativt få punkter filtreres ut. Litt sørvest for flysektoren (mellom 40-49°N) spriker verdiene litt fra tidligere resultater. Differansen i $S_{i,crit}-S_{i,amb}$ indikerer færre områder med flytrafikk som filtreres i forhold til figur 4.7(b)/4.8(b). Dette har altså å gjøre med at disse resultatene kun er vist for en enkelt dag, og ikke som middel for hele uka. Det samme er også tilfellet for noen av områdene over Øst-Asia for 09UTC. Generelt er $S_{i,crit}-S_{i,amb}$ negativ over Øst-Asia, og lite av flytrafikken filtreres ut. Dette gjenkjenner vi også fra korrelasjonsanalysene. Her ga beregningene i de fleste tilfellene nokså like resultater med/uten Schmidt-Appleman kriteriet (liten Δr). Kriteriet for opprettholdelse over dette området er også oppfylt. Over Europa er differansen variabel, men generelt med en relativt liten andel av flytrafikk hvor de meteorologiske forholdene ikke er tilrettelagt for dannelse av kondensstriper. Områdene over Sørøst-Europa og Middelhavet viser størst negativ differanse i S_i , og indikerer høy overmetning m.h.p. vann i plumen når dannelse av kondensstriper initialiseres. I tillegg viser beregningene $RHI > 1$, som impliserer opprettholdelse.

Alle resultatene i denne oppgaven er som kjent midlet over 7 dager og 24 flynivåer, for å samsvare med dataene fra ISCCP og AERO2k. De raske og kontinuerlige endringene i de meteorologiske forholdene fra dag til dag, gjør at frekvensen av kondensstripedannelse kan variere innenfor denne uka. Derfor kan det være interessant se på denne variasjonen på global skala for de 7 dagene. Figur 4.26(b) viser den globale frekvensen av cirrusOK (områder som oppfyller kriteriet $S_{i,amb} > S_{i,crit}$) for 10-16 juni 2002 09/21UTC, midlet over FL 59-82. Andelen av cirrusOK er gitt i prosent av de 7 dagene. Over de områdene markert med mørkerødt, vil det da være forhold for dannelse av

kondensstriper gjennom hele uka. Dette omfatter spesielt områder mellom 40-70°N. I motsetning til mellom 40-70°S, er det her forholdsvis høy tetthet av flytrafikk. Mere detaljert ser vi at over den nordøstlige delen av USA og Canada, Øst-Stillehavet og Nordvest-Russland, vil det være mulighet for dannelse av kondensstriper for omtrent alle de aktuelle dagene. Store deler av Alaska, Canada og Sørøst-Europa gir også høy frekvens av cirrusOK. Sammenliknet med den globale temperaturfordelingen ser vi at disse områdene er betydelig kalde, og kalde nok til å gi overmetning m.h.p. vann i plumen. Den høye frekvensen indikerer i tillegg at en evt. middelværdi etter filtrering (av f.eks. flytrafikk) vil representere et ganske nøyaktig estimat for hele uka. For en andel på 100% vil det tilsvare det beste estimatet.

Over Øst-Asia varierer frekvensen av cirrusOK noe mere, alt fra kun noen få dager til faktisk hele uka. De samme variasjonene finner man over Europa, der forholdene for dannelse av kondensstriper skiller Sentral -og Sørvest-Europa fra Sørøst-Europa. De få dagene som viser godkjente meteorologiske forhold, kan medvirke til de svake korrelasjonsresultatene over Europa. Som fordelingen av de 3 cirrusparametrene viser, er det kun målt små mengder av cirrus over dette området. USA er i likhet med Europa delt i forhold til hvor kondensstriper kan dannes. Skillet er tydelig markant mellom nord og sør. I Sør-USA er det over store områder faktisk ikke forhold for dannelse av kondensstriper for noen av dagene. Igjen ser vi tydelig sammenheng med den høye temperaturen. Over den Nord-Atlantiske sektoren er det betydelig kaldere, men frekvensen av cirrusOK varierer noe, alt fra 3-7 dager. Over østkysten av Canada vil kondensstriper kunne dannes for nesten alle dagene. Ved analysing av disse resultatene må vi også her huske på den grove oppløsningen til dataene. Derfor vil det i noen regionale områder kunne være forhold for dannelse av kondensstriper for flere dager enn det som er indikert i figur 4.26(b) (eller vice versa).

Værsituasjonen for den aktuelle uka

Det har nå blitt gitt en oversikt over de meteorologiske parametrene som brukes i filtreringsprosessen. Resultatene har bidratt til å bedre forstå hvorfor noen områder er mere favorisert for dannelse av kondensstriper enn andre. Som vi har sett avhenger det bl.a. av faktorer som temperaturen til lufta og konsentrasjonen av vanndamp i atmosfæren. Dette er meteorologiske parametre som naturligvis kan variere mye fra dag til dag i atmosfæren. Her spiller værforholdene en sentral rolle for dannelse av kondensstriper, i form av f.eks. lavtrykkdannelse (syklogenese) og tilhørende fronter. De meteorologiske forholdene vil variere mest ved bakken, men også høyt oppe i atmosfæren hvor flytrafikken er lokalisert. Av den grunn er det viktig å få en oversikt over den generelle værsituasjonen for den aktuelle tidsperioden.

En front er karakterisert ved skillet mellom en kald og varm luftmasse. Denne

temperaturgradienten vil også kunne gjenkjennes i tettheten til de to luftmassene, der den kalde luftmassen vil ha en høyere tetthet. Temperaturskillet mellom luftmassene er mer eller mindre observerbart fra bakken og opp til tropospausen. Tropospausenivået varierer både med årstiden og breddegrad. Nivået er lokalisert lavest nær polene om vinteren, mens høyest ved ekvator. Dette har direkte sammenheng med temperaturen, der f.eks. tropenes høye temperatur gjør at troposfæren har sin største vertikale utstrekning der. Polarfronten har videre stor betydning for været på våre breddegrader. Den er karakterisert ved skillet mellom varm subtropisk luft fra sør og kaldere polarluft fra nord. Temperaturgradienten i polarfronten (og fronter generelt) gir opphav til potensiell energi som videre kan omdannes til kinetisk energi, i form av lavere trykk og vind. Frontsonene inkluderer også en del fuktig luft, som kondenserer og danner nedbør. Nedbørsdannelsen frigjør energi i form av latent varme, og denne energien driver lavtrykkssystemene.

Skillet mellom den varme og kalde luftmassen, danner altså en varm -og kaldfront. Kaldfronten oppstår når kaldlufta "fortrenger" den varme lufta, og varmfronten når varmlufta "fortrenger" den kalde lufta. Begge frontene heller med bevegelsesretningen, der kaldfronten er "brattere" enn varmfronten. Dette gjelder hovedsakelig bare i det laveste sjiktet, høyere opp i atmosfæren er forskjellen som regel liten. Det som er interessant i forhold til dannelse av kondensstriper, er at varmfronten kan strekke seg helt opp i nivåene hvor det er flyvninger. Begge frontene er karakterisert ved spesielle skytyper. Pga. varmlufta er lettere, vil den presses over den kalde lufta. Den oppstigende lufta vil etterhvert ekspandere og kondensere, og danne skyer. Siden varmfronten heller med bevegelsesretningen, vil den altså passere først i høyden. Når et lavtrykkssystem nærmer seg, kan man derfor fra bakken først se cirrusskyer, etterfulgt av cirrosstratus, altostratus og nimbostratus. Ved kaldfronten vil kaldlufta (som jo er tyngre) kile seg under varmlufta, som resulterer i oppstigning og kondensering. Kaldlufta vil etterhvert fortrenge den varmere lufta (kaldsektor). Kaldfronten er ofte knyttet til kraftige konvektive bygeværsskyer (cumulus), pga. den bratte helningen på fronten ved bakken. I tropene kan disse konvektive skyene være spesielt kraftige, og trenge helt opp i tropospausen. I disse områdene er derimot tettheten av flytrafikk liten, og som vi har sett er ikke de meteorologiske forholdene tilrettelagt for dannelse av kondensstriper. Derfor vil dannelse av cirrusskyer ved en varmfrontspassasje være av større interesse.

Som nevnt tidligere kan altså de meteorologiske forholdene endres høyt oppe i atmosfæren som følge av fronter, enten i form av stasjonære fronter eller frontpassasjer. For dannelse av kondensstriper vil endringer i temperaturen og konsentrasjonen av vanddamp i lufta være av størst betydning. En varmfrontspassasje resulterer altså i dannelse av cirrusskyer, i nivåer hvor flytrafikk kan forekomme. Dette tyder altså på at det forhold for dannelse av cirrus. Hvis det i tillegg observeres flyvninger i dette området, vil det være

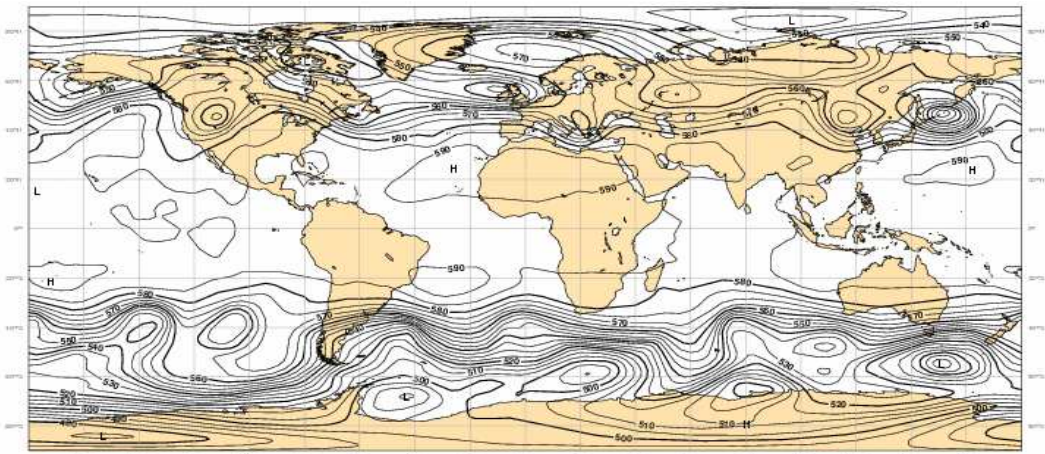
naturlig å tenke seg at kondensstriper kan dannes i dette området. Frontpassasjen kan også resultere i tilførsel av fuktighet til lufta i flynivåene, som jo er ideelt med tanke på dannelsesprosessen av kondensstriper. Fra Jensen m.fl. (1998) husker vi at det antas at temperaturen og konsentrasjonen av vanndamp i plumen er kontrollert av inntrengning av luft fra omgivelsene. Likning 2.10 tilsier at metningsforholdet i plumen vil øke pga. tilførsel av fuktighet til omgivelsene. Dette medfører at kondensstriper kan dannes ved en høyere temperatur (lavere nivå i atmosfæren). Varmfrontspassasjen i høyden bringer også med seg varmere luft. Fra diskusjonen rundt de meteorologiske forholdene husker vi at for høy temperatur var en veldig viktig årsak til hvorfor ikke dannelse av kondensstriper ble initialisert over noen områder (f.eks. sørlige delen av USA). Varmfrontspassasjen må altså ses i kombinasjon av både temperaturen og fuktigheten.

Et annet viktig poeng som bør nevnes i forbindelse med fronter, er tilstedeværelsen av cirruskyer i omgivelsene. Dette diskuteres også i Jensen m.fl. (1998). Hvis fly observeres i områder hvor det er cirrus fra før, vil det kunne ha en positiv effekt på dannelsen av kondensstriper. Iskrystallene fra cirruskyene vil som nevnt tidligere utgjøre en ekstra vanndampskilde, ved at iskrystallene sublimerer når de entrer motoren. Sammen med vanndamp fra motoren og omgivelsene vil det bidra til at metningsforholdet i plumen øker.

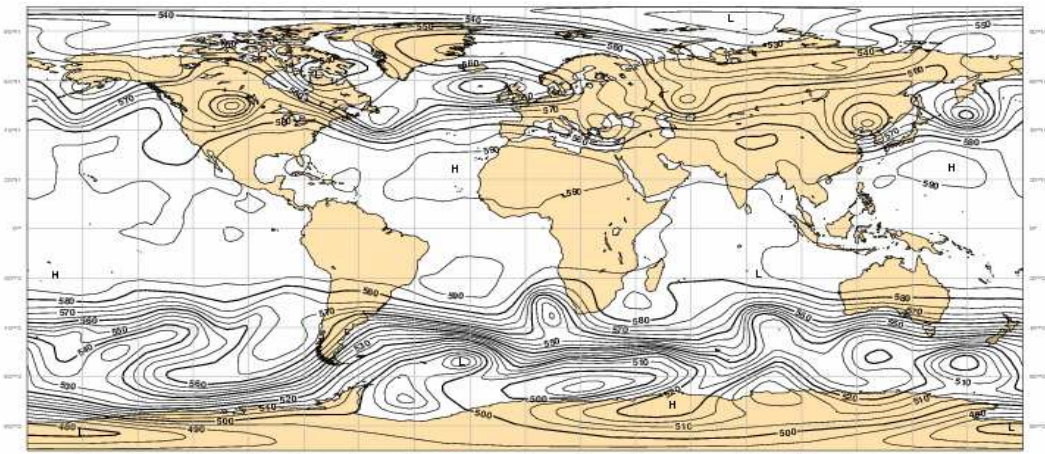
Den generelle vær-situasjonen på global skala er presentert i figur 4.27, 4.28 og 4.29. Kartene representerer analyserte værkart, hentet fra hjemmesiden til ECMWF. Den geopotensielle høyden er plottet for 500hPa-flaten for alle ukedagene for 12UTC (12UTC er valgt fordi ingen av de analyserte tidspunktene fra ECMWF samsvarer med de fire tidspunktene som benyttes i denne oppgaven). Dette vil gi en nyttig oversikt av værforholdene, med tanke på både lavtrykksaktivitet og fronter. Lokalisering av frontene vil kunne være vanskeligere å identifisere, men reanalysene vil iallefall kunne spesifisere områder med lavtrykksaktivitet. I det påfølgende vil jeg konsentrere meg om de fire regionale områdene definert i figur 1.3.

Det første man legger merke til er at kartene gjengir mange av de globale trykkbeltene. Områdene over Polene er dominert av høytrykkssoner. Fra 30-60° er vær-situasjonen dominert av lavtrykksaktivitet på begge halvkulene, mens ved ITCZ er forholdene litt annerledes. Områdene ved ITCZ kalles tropiske strøk, og er ikke dominert av enkeltstående lavtrykk som på våre breddegrader. Her er det solas deklinasjonsvinkel og passatvindene fra de subtropiske strøkene som driver konvergenssonen. De subtropiske strøkene utgjør områder fra rundt 10-30° på begge halvkuler, der vær-situasjonen er dominert av stabilt høytrykk.

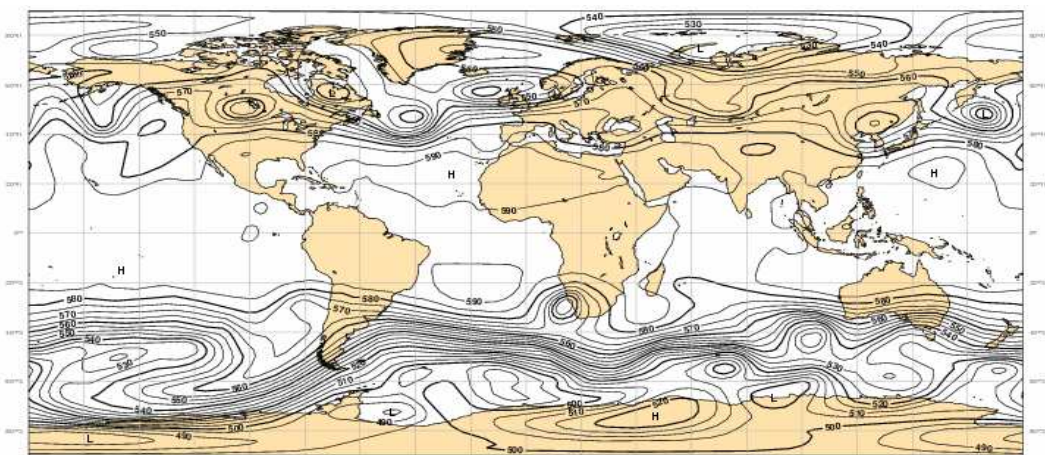
Over den Nord-Atlantiske sektoren viser analysene lavtrykksaktivitet stort sett for alle de 7 dagene. 10 juni viser et lavtrykk lokalisert nordvest for Stor-



(a) 10 juni 2002, 12UTC



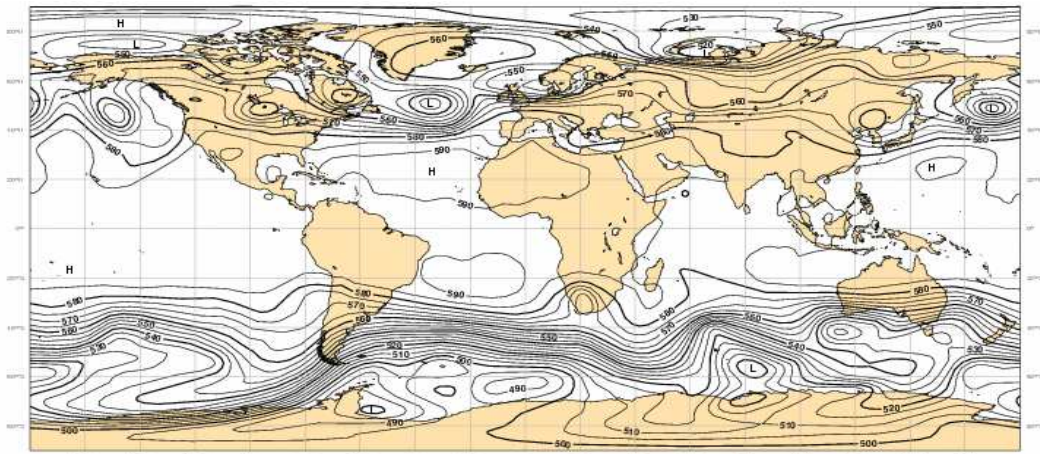
(b) 11 juni 2002, 12UTC



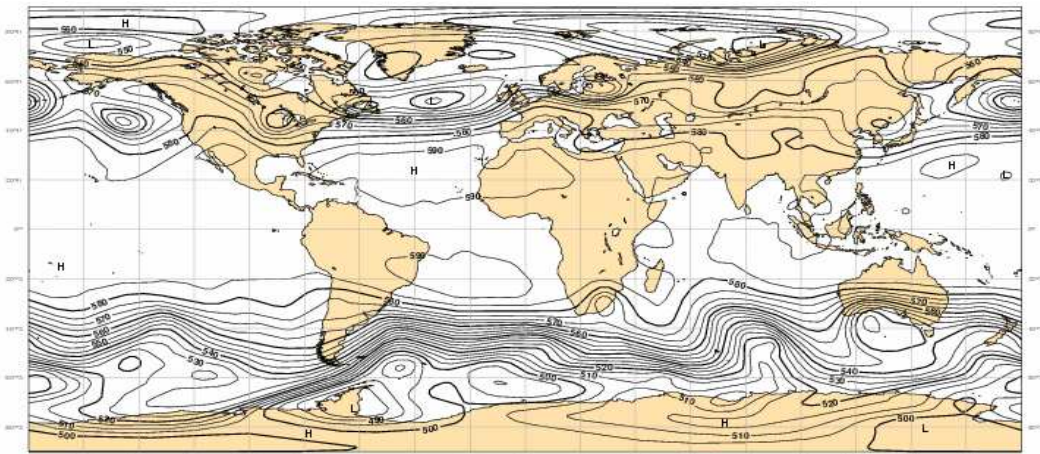
(c) 12 juni 2002, 12UTC

Figur 4.27: Analyserte værkart for den aktuelle tidsperioden 12UTC (kartene er hentet fra hjemmesiden til ECMWF, www.ecmwf.int.)

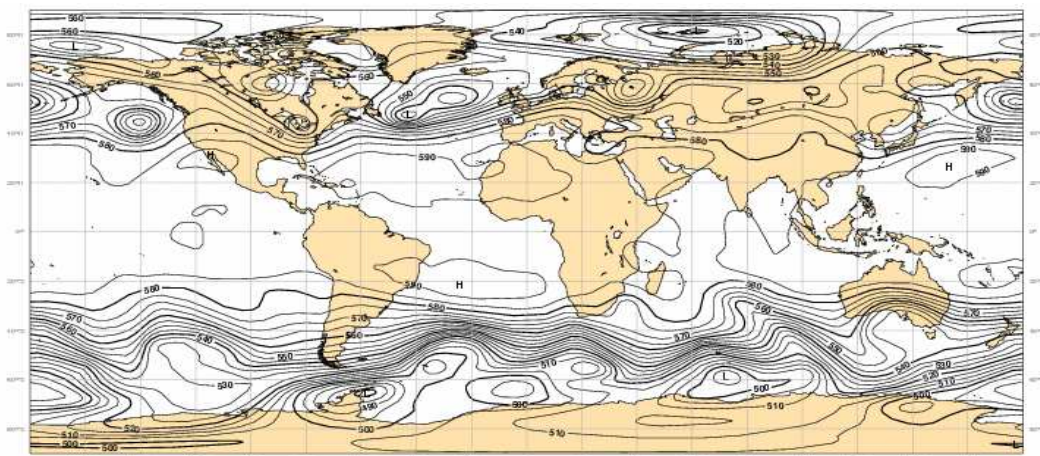
4.4. DE METEOROLOGISKE FORHOLDENE FOR 10-16 JUNI 2002 97



(a) 13 juni 2002, 12UTC

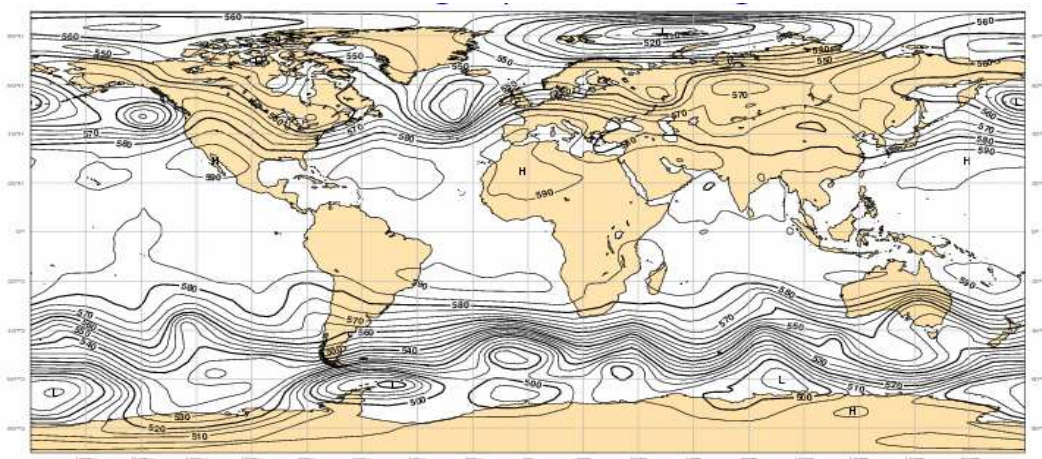


(b) 14 juni 2002, 12UTC



(c) 15 juni 2002, 12UTC

Figur 4.28: Analyserte værkart for den aktuelle tidsperioden 12UTC (kartene er hentet fra hjemmesiden til ECMWF, www.ecmwf.int.)



Figur 4.29: *Analyserte værkart for 16 juni 2002 12UTC (kartene er hentet fra hjemmesiden til ECMWF, www.ecmwf.int.)*

britannia, som gradvis svekkes. Utenfor nordøst-kysten av USA og Canada, er et annet lavtrykk i startfasen av syklogenese. Dette lavtrykket påvirker vær-situasjonen i flysektoren gjennom hele uka. De neste dagene svekkes lavtrykket utenfor Storbritannia ytterligere, mens utenfor USA og Canada styrkes lavtrykket og beveger seg sakte nordøstover i tråd med lavtrykkbanene på disse breddegrader. Lavtrykket når sitt dypeste rundt 13 juni. Vi husker at målingene av cirrus optisk tykkelse og cirrusfraksjon i flysektoren viste vidt forskjellige resultater. Cirrusfraksjonen var generelt underestimert i forhold til cirrus optisk tykkelse. Den relative cirrusfraksjonen i figur 4.15 viste at det meste av cirrusen over Nord-Atlanteren var lokalisert over/under trykkintervallet 310hPa-180hPa, mest sannsynlig i det nederste intervallet. Lavtrykksaktiviteten over den Nord-Atlantiske flysektoren samsvarer altså dårlig med målinger av cirrusfraksjon. Vær-situasjonen korresponderer derimot bedre med verdiene av cirrus optisk tykkelse, plottet i figur 4.5/4.6. Lavtrykksaktiviteten og tilhørende fronter vil sannsynligvis stå for en stor del av cirrus-skydekket i den Nord-Atlantiske sektoren for den aktuelle tidsperioden. Hvor mye av denne andelen som utgjør antropogene cirrus-skyer fra fly, er vanskelig å si. Hvis kondensstriper opprettholdes ($RHI > 1$) og videre utvikles til cirrus, er det nærmest umulig å skille dem fra naturlig cirrus. Men lavtrykksaktiviteten over Nord-Atlanteren antyder muligheter for dannelse av kondensstriper, særlig med tanke på representasjonen av cirrus i omgivelsene fra før og rikelig med tilgang på fuktighet over hav som transporteres til høyere nivåer i atmosfæren. Sammen med andelen av cirrus representert ved de tre cirrusparametre, viste fordelingen av flytrafikk over dette området kun små eller moderate mengder av flyvninger. Dette er en vesentlig grunn til de svake korrelasjonsresultatene over Nord-Atlanteren.

Over Sentral-Europa er vær-situasjonen ganske grei. Hele uka er preget av stabilt høytrykk, som er sentrert nordvest for Afrika (Azorhøytrykket i sent-

ral -og Nord-Atlanteren). Cirruskyer observeres ofte i forbindelse med høyttrykk, spesielt om sommeren. Her er dannelsen av cirrus forårsaket av sterk strømming og statisk instabilitet i høyere nivåer i atmosfæren. Vi har tidligere sett i delkap. 4.4 at forholdene for dannelse av kondensstriper er gode over Sentral-Europa, og dette gjelder spesielt Sørøst-Europa. Hovedsakelig skyldtes det at temperaturen var lav nok. Samtidig antyder også vær-situasjonen muligheter for cirrusdannelse. Men det er kun målt svært små mengder av cirrus over Sentral-Europa, og faktisk skyfritt (i form av cirrus) over det meste av området. Forøvrig er det godt samsvar mellom målingene fra cirrus optisk tykkelse og cirrusfraksjon. Sammen med den høye tettheten av flytrafikk, resulterer det i svake korrelasjoner i likhet med over Nord-Atlanteren.

Beveger man seg over Nord-Atlanteren til USA, finner man mye av den samme vær-situasjonen. Stabilt høytrykk preger alle dagene over det meste av USA, med noe lavere trykk over den nordlige delen av USA og Canada. Ingen lavtrykksaktivitet og fronter skulle tilsi cirrusdannelse, annet enn høytrykkssituasjonen. I likhet med over Sentral-Europa er det kun målt små mengder av cirrus over USA, som indikeres av både cirrus optisk tykkelse og cirrusfraksjon. Dette samsvarer altså svakt med tettheten av flytrafikk. Et lite område i nordøst har derimot stor innvirkning på korrelasjonsresultatene ($\Delta r > 0$).

Over store deler av Asia (inkludert området over Øst-Asia) er vær-situasjonen sterkt preget av sommermonsunen. Monsunen oppstår som følge av den årlige variasjonen i vindsystemene pga. temperaturforskjellen mellom land og hav. Om vinteren avkjøles kontinentet, som gir fralandsvind og stabilt høytrykk over Sentral-Asia. Om våren og sommeren vil landmassene gradvis varmes opp. Etterhvert trenger passatvindene fra sørøst lengre nordover, og passerer ekvatorlinjen. Vinden bøyes av mot høyre og inn over Asia (som kjennetegnes sørvestmonsunen). Siden denne lufta har beveget seg over store havstreknin-ger er den ekstremt fuktig. Ved Himalaya presses lufta til værs (orografisk løfting), som resulterer i omfattende sky -og nedbørsdannelse. Derfor kan man også forvente å finne mye cirrus over dette området. Figurene for cirrus optisk tykkelse og cirrusfraksjon bekrefter dette. Store andeler av cirrus er lokalisert over Sør, Øst -og Sørøst-Asia for 03/09UTC. Fra vær-analysene for den aktuelle uka kjenner man igjen monsunlavtrykket sentrert over India. Dette er altså opphavet til cirrusdannelsen over bl.a. Øst-Asia, definert i figur 1.3. Som vist tidligere er tettheten av flytrafikk moderat over Øst-Asia. Av den grunn skulle vær-situasjonen tilsi dannelse av kondensstriper. Samtidig har også resultatene fra Schmidt-Appleman kriteriet vist gode meteorologiske forhold for dannelse av kondensstriper, m.a.o. at lite flytrafikk filtreres ut. Fordelingen av *RHI* indikerer i tillegg at kondensstripene opprettholdes, og videre mulig dannelse av antropogene cirruskyer. Korrelasjonsresultatene over Øst-Asia viste altså godt samsvar mellom cirrus og flytrafikk, hvor Δr indikerte liten effekt av fuktighetskriteriet pga. de gode meteorologiske

forholdene.

Presentasjonen av vær-situasjonen for de regionale områdene gitt ovenfor er nokså grov. Det er vanskelig å si nøyaktig hvilken påvirkning det vil ha på dannelsen av kondensstriper. Pr. dags dato er det utført lite forskning rundt lavtrykksaktivitet i sammenheng med dannelse av kondensstriper. I tillegg er det et mangfold av faktorer som spiller inn på dannelsesprosessen, og ofte med et komplekst samspill mellom dem. Dette gjør at det kan være en betydelig utfordring å forutsi dannelsen, og den er som regel tilknyttet store usikkerheter. I det påfølgende delkap. tar jeg for meg ulike kilder til unøyaktigheter i resultatene fra denne oppgaven.

4.5 Usikkerheter i resultatene

De siste tiårene har det vært betydelig fokus rundt betydningen av flytrafikk på klimaet. Dette kommer som et resultat av den stadige økende veksten i sivil flytransport. Flyene slipper ut både gasser og faste partikler, der noen av disse partiklene kan fungere som effektive kondensasjonskjerner. Siden flyene er lokalisert høyt oppe i atmosfæren hvor temperaturen er svært lav, kan som kjent dette medføre dannelse av kondensstriper. Mange av studiene som omhandler cirrustrender i relasjon til flytrafikk, har indikert økning i cirrusdekket i områder med høy tetthet av flytrafikk (se delkap. 1.1). I motsetning til tidligere studier, er det benyttet daglig data i denne oppgaven. Som vi har sett, har resultatene vært veldig variable både på global og regional skala. Det kan være mange ulike årsaker til hvorfor disse resultatene samsvarer dårlig med tidligere forskning.

Resultatene fra denne oppgaven viser at sammenhengen mellom cirruskydekket og tettheten av flytrafikk er liten fra dag til dag for den aktuelle uka. Fra delkap. 1.1 har vi sett at dette ikke er i overensstemmelse med tidligere studier. Derfor vil det være naturlig å fokusere på hvorfor det er slik, og evt. usikkerheter knyttet opp mot resultatene. Videre er uka som analyseres i denne oppgaven, hentet fra sommermånedene juni. I Penner m.fl. (1999) har man bl.a. observert månedlig variasjon av frekvensen av kondensstriper og sesongtrender i cirruskydekket over USA og Europa. Over begge disse områdene viser resultatene minimum i forekomsten av kondensstriper om sommeren (juni-august), mens den når et maksimum i vintermånedene (desember-februar). I tillegg var sesongtrender i cirruskydekket over USA grovt sett i fase med sesongssyklusen av forekomsten av kondensstriper. Dette antyder at endringer i cirrus er relatert til forekomsten av kondensstriper. Over Europa var disse to syklusene overhodet ikke i fase med hverandre. Resultatene fra Penner m.fl. (1999) kan bidra til å forklare den svake sammenhengen mellom andelen av cirrus (representert ved de tre cirrusparametrene) og tettheten av flytrafikk over f.eks. Europa.

I studier av f.eks. fly-induserte cirrustrender vil det alltid være faktorer som bidrar til unøyaktigheter i resultatene. I det påfølgende skal jeg presentere noen av disse faktorene.

Vertikal oppløsning

I delkap. 3.4 ble det nevnt at dataene fra ECMWF-modellen og AERO2k har ulik vertikal oppløsning. ECMWF-modellen er representert ved 40 lag, mens AERO2k-datene består av 100 flynivåer. Ved uthenting av data fra et datasett som skal samsvare med et annet datasett, benyttes trykket som tilsvarer det flynivået i AERO2k man skal analysere. På den måten henter man ut de korrekte verdiene fra ECMWF-modellen. Men dette er bare tilnærmet pga. den vertikale oppløsningen, og i den anledningen brukes det en tilnærmingsfunksjon i MATLAB som finner det nærmeste lagnivået i ECMWF-dataene. Siden gridboksene i ECMWF-modellen er større enn i AERO2k, vil verdier fra de meteorologiske parametre som tilsvarer det nærmeste trykknivået bli brukt videre i analysen. Over områder med mye topografi kan det medføre noe unøyaktigheter. Dette er fordi trykkflatene i AERO2k representerer rene geometriske høydeflater, mens i ECMWF-modellen husker vi at trykkflatene er gitt ved σ -flater. Disse σ -flater følger terrenget, som gjør at tilnærmingsfunksjonen kontinuerlig vil "lete" etter den nærmeste σ -flaten som tilsvarer AERO2k-trykket. Man kunne valgt å konvertere ECMWF-dataene til en finere vertikal oppløsning, som tilsvarer oppløsningen til AERO2k på 100 nivåer. Men dette ville sannsynligvis også gitt noe unøyaktigheter.

Horisontal oppløsning

Den horisontale oppløsningen til de forskjellige datasettene kan også gi unøyaktigheter i resultatene. Vi husker at datasettet fra ISCCP har en horisontal oppløsning på $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, mens $1^\circ \times 1^\circ$ for dataene fra ECMWF og AERO2k. For ISCCP tilsvarer dette $277.5\text{km} \times 277.5\text{km}$ (ved ekvator!) i utstrekningen på gridboksene, mens $111\text{km} \times 111\text{km}$ for ECMWF -og AERO2k-boksene. Dette er en relativt grov oppløsning når man skal studere dannelse av kondensstriper. Verdien fra de meteorologiske parametrene innenfor gridboksen vil da representere et middel for hele boksen. Dette kan skape store feilmarginer siden de meteorologiske forholdene kan variere mye innenfor gridbokser av denne størrelsen. Konsekvensen av dette kan altså bli at dannelse av kondensstriper underestimeres, og utelates over noen områder.

Midling

I forbindelse med diskusjonen om usikkerheter i resultatene bør det også nevnes midling av datasettene. Midling av de forskjellige parametrene har vært helt nødvendig i denne oppgaven, for å kunne samsvare datasettene med hverandre. Midlingen er derimot bare utført over et gitt høydeintervall. I utgangspunktet er flydataene fra AERO2k allerede basert på observasjoner som representerer et middel over alle de 7 dagene i den aktuelle uka, og er

ikke tilgjengelig for hver av dagene. Derfor har jeg som nevnt tidligere antatt at variasjonen i flytrafikken fra dag til dag er liten, slik at middelet er representativt for hver av dagene. Dette er sannsynligvis en god antakelse som vil gi små avvik fra virkeligheten. Cirrusparametrene fra ISCCP er videre representert som et middel over et trykkintervall fra 310hPa-180hPa. Derfor måtte også AERO2k-dataene midles over det samme intervallet for å samsvare med ISCCP. Dette tilsvarer altså flynivåintervallet 59-82, en differanse på ca. 3500 meter. De meteorologiske forholdene for dannelse av kondensstriper kan endres dramatisk innenfor dette vertikale intervallet. Derfor kan middelet fra de tre cirrusparametrene være lite representativt, særlig med tanke på at dannelse av kondensstriper er en prosess som forekommer på liten skala.

Adveksjon

Et av de mest interessante forbedringspotensialene i studier av flyrelaterte cirrustrender, er adveksjon av cirruskyer og kondensstriper. Betydningen av adveksjon i slike studier kan være formidabel. Grunnen til det er de sterke vindene som er lokalisert i nivåene hvor det er mye flyvninger, og har direkte sammenheng med jetstrømmene som dannes av temperaturgradienten mellom troposfæren og stratosfæren. Kondensstripene kan muligens av den grunn advekteres flere hundre km. (hovedsakelig i horisontalen) mens de utvikler seg til cirruskyer. Derfor kan opprinnelsesområdet avvike fra området med størst endring i forekomsten av cirrus. Endringene i cirrus vil da kunne korrespondere dårlig med frekvensen av flytrafikk. Dette kan naturligvis medføre store unøyaktigheter i resultatene, hvis man ikke tar hensyn til denne adveksjonen av cirruskyer og kondensstriper. Et av de få studiene som faktisk delvis inkluderer adveksjon, er Minnis m.fl. (2004). Men dette er bare gjort indirekte. Dataene på regional skala ble gruppert inn i større områder hvor kondensstriper hadde innflytelse. Man har altså ikke direkte advektert andelen av cirrus. I denne oppgaven kunne det vært interessant å advektere flydataene vha. adveksjonsskjema, slik at man ville fått en mer korrekt oversikt over hvilke områder kondensstripene dannes. Deretter kunne man sammenliknet med den globale fordelingen av cirruskydekket.

Datsett fra ECMWF-modellen

Generelle unøyaktigheter i dataene fra ECMWF-modellen utgjør den siste faktoren som bør nevnes, og kan være av helt avgjørende betydning for resultatene presentert i denne oppgaven. Først og fremst gjelder det usikkerheter knyttet til de meteorologiske parametrene temperatur og fuktighet, som jo styrer dannelsesprosessen av kondensstriper. I tillegg er Schmidt-Appleman kriteriet basert på den relative fuktigheten, som konstrueres ut fra datasettet fra ECMWF-modellen. På hjemmesiden til ECMWF kan man i den omfattende dokumentasjonen finne noe forskning angående validering av disse parametrene. Det har bl.a. blitt utført tre kampanjer (PACS/ECMWF, IMET/ECMWF -og LITE/ECMWF-sammenlikning, gjengitt i Beljaars og

Kohler (2000)) der ulike meteorologiske felter sammenliknes med observasjoner over spesifikke områder. Disse kampanjene tar også for seg hvor godt temperaturen og konsentrasjonen av vanndamp i atmosfæren gjengis i modellen.

På midten av 1990-tallet var det signifikante feil i sesongsykelen av temperatur i ECMWF-modellen, og spesielt vinterstid på høye breddegrader (Betts m.fl., 1998). Men i likhet med andre modeller, er ECMWF-modellen under kontinuerlig utvikling. Forskningsresultatene fra de tre kampanjene viser at sesongvariasjonene i temperaturfeltet nå modelleres godt, og inneholder små usikkerheter. Ingen systematiske unøyaktigheter er pr. dags dato påvist for denne parameteren.

Modellering av fuktighet i atmosfæren kan derimot være svært komplisert og by på store utfordringer. Til forskjell fra temperatur, kan ikke fuktighet uttrykkes ved en harmonisk funksjon. Det er lokale kilder og sluk til fuktighet, og verdiene kan av den grunn variere mye innenfor et lite diskret område. I Betts m.fl. (1998) ble det estimert en unøyaktighet på $\pm 10\%$ i relativ fuktighet mellom modellresultatene og observasjonene. Forskningsresultatene fra Beljaars og Kohler (2000) viser en generell underestimering av spesifikk fuktighet, med den konsekvensen at atmosfærelagene blir modellert for tørr. Denne underestimeringen av Q kan videre gi store utslag i korrelasjonsresultatene, siden Schmidt-Appleman kriteriet baseres på RH beregnet ut fra ECMWF-dataene. Man kan da få tilfeller der kriteriet ikke tilsier dannelse av kondensstriper, men hvor observasjonene faktisk viser det motsatte.

Pga. underestimeringen av fuktighet i modellen, ble det eksperimentert litt med datasettet fra ECMWF-modellen. I stedet for å benytte Schmidt-Appleman kriteriet som indikator på hvorvidt dannelse av kondensstriper kan initialiseres, kan det være hensiktsmessig å innføre grenseverdier i relativ fuktighet m.h.p. is. Ved denne typen eksperiment var målet å finne det RHI -kriteriet som gir de mest optimale resultatene, med tanke på fordelingen av flytrafikk og cirrus kombinert med de meteorologiske forholdene for dannelse og opprettholdelse av kondensstriper. I denne oppgaven ble det utført analyser for $RHI=40\%$, $RHI=60\%$, $RHI=80\%$ og $RHI=100\%$ for ulike tidspunkter. Ved sammenlikning med Schmidt-Appleman kriteriet viste resultatene ingen forbedringer i korrelasjonene for de 4 tilfellene.

Kapittel 5

Oppsummering og konklusjon

I denne oppgaven studeres sammenhengen mellom fordelingen av cirruskydekket og tettheten av flytrafikk i tidsperioden 10-16 juni 2002. Studiet er konsentrert til det høydeintervallet hvor det er mest flyvninger og hvor det er størst sannsynlighet for dannelse av kondensstriper. Analysene utføres både globalt og regionalt for fire ulike tidspunkter. De regionale områdene omfatter Sentral-Europa, den Nord-Atlantiske flysektoren, USA og Øst-Asia. Alle disse områdene er interessante i forhold til dannelse av kondensstriper pga. den høye tettheten av flytrafikk. Analysen er basert på daglig data hentet fra tre ulike datasett, i form av flytrafikk, satellitt -og meteorologiske data. Videre benyttes fuktighetskriteriet (Schmidt-Appleman kriteriet) for å kunne filtrere ut områder hvor de meteorologiske forholdene ikke er tilrettelagt for dannelse av kondensstriper. Kriteriet er hentet fra Appleman. (1953), og tar utgangspunkt i at metning m.h.p. vann må oppnås i plumen for at dannelsesprosessen skal initialiseres. I Jensen m.fl. (1998) studeres kriteriet nærmere i detalj, i sammenheng med hvilke forhold som er påkrevd for dannelse og opprettholdelse av kondensstriper.

Regresjonsanalysene utføres for tre cirrusparametre fra ISCCP-datasettet, der alle parametrene gir et mål på cirruskydekket. Cirrusparametrene korreleres med tettheten av flytrafikk fra AERO2k, både før og etter filtrering. Resultatene sammenliknes deretter med hverandre. Effekten av Schmidt-Appleman kriteriet uttrykkes i form av den absolutte endringen i korrelasjonen r (Δr). Analysene omfatter alle de 7 dagene samlet, men også for én vilkårlig dag. Studiet av den enkelte dagen er tatt for med for å illustrere hvor godt den representerer den aktuelle uka.

Generelt varierer resultatene fra cirrusparametrene mye, avhengig av klokkeslett og den geografiske lokaliseringen. Resultatene fra cirrus optisk tykkelse viser at korrelasjonene ligger høyere for noen av områdene i forhold til de andre cirrusparametrene. Dette samsvarer med den globale fordelingen av cirrus optisk tykkelse, som er overestimert i forhold til cirrusfraksjon. Men hovedtrekkene i korrelasjonene er stort sett de samme uavhengig av hvilken

parameter som analyseres. Sammenhengen mellom cirrusskydekket og flytrafikken globalt og regionalt er generelt av en variende karakter, og svak for enkelte områder. Resultatene for USA og Øst-Asia skiller seg markant fra Sentral-Europa og den Nord-Atlantiske flykorridoren, både når det gjelder korrelasjonene og de meteorologiske forholdene for dannelse av kondensstriper. Schmidt-Appleman kriteriet filtrerer effektivt ut det meste av flytrafikken over USA, som indikerer dårlige meteorologiske forhold for kondensstriper. Forholdene forbedres over Sentral-Europa og den Nord-Atlantiske flykorridoren, og betraktelig over Øst-Asia. Dette gir naturligvis utslag i korrelasjonsresultatene. De svakeste korrelasjonene finner man over nettopp Sentral-Europa og den Nord-Atlantiske flysektoren, med negativ korrelasjon i de fleste tilfellene. Dette har sammenheng med satellittmålingene, som kun viser små mengder av cirrus over disse flybelastete områdene.

Over Øst-Asia er situasjonen helt motsatt, der fuktighetskriteriet indikerer gode forhold for både dannelse og opprettholdelse av kondensstriper. Samtidig viser satellittmålingene store mengder av cirrus. Følgelig blir derfor også de tilhørende korrelasjonene sterkere over dette området, men hvor Δr er liten. Sammen med USA gir disse områdene de beste resultatene. Men over USA er situasjonen for den aktuelle tidsperioden noe spesiell. Her slår Schmidt-Appleman kriteriet tydelig fast at de meteorologiske forholdene overhodet ikke er favorisert for dannelse av kondensstriper, med få unntak. Det mest interessante unntaket gjelder den nordøstlige delen av USA, hvor observasjonene fra AERO2k viser mye flytrafikk. Følgelig bidrar det til en positiv endring i korrelasjonen, som er langt høyere enn over Øst-Asia. Området nordøst i USA er altså lite representativt for resten av landet.

De meteorologiske forholdene for den aktuelle uka viser en klar tendens mellom fordelingen av temperatur og dannelse av kondensstriper. Dette er ikke så oppsiktsvekkende siden omgivelsenes temperatur og fuktighet uten tvil er de viktigste parametrene for dannelsesprosessen. Temperaturen er også videre én av mange meteorologiske parametre som regulerer den relative fuktigheten. Resultatene viste at temperaturen i høyden var for høy over USA for at dannelsesprosessen kunne initialiseres, men generelt var differansen ($S_{i,crit} - S_{i,amb}$) liten. Fordelingen av cirrusOK indikerte at dette var representativt for alle dagene. I den Nord-Atlantiske flykorridoren var konsentrasjon av vanndamp liten i det aktuelle høydeintervallet, men den forholdsvis lave temperaturen bidro til at kondensstriper kunne dannes. Over Sentral-Europa og Øst-Asia var begge de meteorologiske parametrene varierende, men med de beste forholdene for kondensstriper over Asia. Spesielt interessant var det at den relative fuktigheten m.h.p. is oversteg 100% over store deler av Øst-Asia, som dermed gir muligheter for at kondensstripene kan videreutvikles til antropogene cirrusskyer. Dette kan resultere i et strålingspådriv, i form av at cirrusskyene påvirker både den kortbølgete -og den langbølgete strålingen. Hvor stor del det vil utgjøre av det totale strålingspådrivet, avhenger bl.a. av

den geometriske tykkelsen på cirruskydekket, fordelingen og sammensetningen av iskrystaller osv. I Penner m.fl. (1999) ble strålingspådrivet estimert til $+0.02 \text{ Wm}^{-2}$, men dette ble redusert til $+0.01 \text{ Wm}^{-2}$ i Sausen m.fl. (2005). Strålingspådrivet fra kondensstriper utgjør en stor del av pådrivet fra klimaendringene forårsaket av flyemisjoner, men betydelig mindre av det totale antropogene pådrivet (hhv. 40% og 3.5%, Penner m.fl. (1999)).

Selv om de meteorologiske forholdene for dannelse og opprettholdelse av kondensstriper er gode over Øst-Asia, viser frekvensen av cirrusOK at dette ikke nødvendigvis er representativt for hele uka. Noen områder indikerer kun dannelse for 1-3 dager. De variable forholdene gjenkjennes også over Sentral-Europa og den Nord-Atlantiske flykorridoren. Variasjonen antyder hvor sensitiv dannelsesprosessen er i henhold til værforholdene, særlig med tanke på at kondensstriper dannes på såpass liten skala. Små forstyrrelser i atmosfæren kan ha stor betydning. Det er derfor en krevende utfordring å forutsi dannelse av kondensstriper, og der sikre konklusjoner av resultatene bør utelates.

Siden værforholdene til en stor grad kan styre og regulere egenskapene til kondensstriper, var det naturlig å få en oversikt over vær-situasjonen for den aktuelle uka. Små forstyrrelser i atmosfæren kan gi store utslag i dannelsesprosessen, og derfor vil også storskalapertubasjoner som lavtrykksaktivitet og fronter være av spesiell interesse. Til hjelp i diskusjonen benyttet jeg reanalyser fra ECMWF. Analysene viser at vær-situasjonen til en viss grad kan knyttes til dannelsen av cirrus (og dermed sannsynligvis forhold som tilsier dannelse av kondensstriper, gitt at det er flyvninger i området). De stabile høytrykkene over Europa og USA resulterer sannsynligvis i lite cirrus. Unntaket er sterke strømminger og statisk instabilitet i høyden, som kan gi cirrusdannelse ved høytrykksperioder om sommeren. Vær-situasjonen stemmer godt overens med få satellittobservasjoner av cirrus over disse områdene. Lavtrykksaktiviteten over den Nord-Atlantiske flykorridoren samsvarer også med fordelingen av cirrus optisk tykkelse, men spriker kraftig fra den underestimerte cirrusfraksjonen. Best samsvar finner man over Øst-Asia, som kan koples til den årlige sommermonsunen i dette området. Grovt sett kan vær-situasjonen delvis forklare satellittobservasjonene av cirrus, men er tilknyttet store usikkerheter. For at vær-analysen skal gi bedre nøyaktighet bør den inneholde flere felter, samt konsentreres til en langt høyere oppløsning. Helst bør oppløsningen være såpass god at den beskriver dannelsesprosessen av kondensstriper på en best mulig måte.

I tillegg til å studere sammenhengen mellom cirruskydekket og flytrafikken på regional og global skala, ble det utført en statistisk analyse over de samme områdene. Her ble det spesielt lagt vekt på hvor stor andel av cirrusen som er antropogen, dannet fra fly (gitt ved det relative cirruskydekket, $\bar{y}_{rel, fly}$). Over Øst-Asia var det beste estimatet av $\bar{y}_{rel, fly}$ positivt for alle parametre-

ne og begge tidspunktene, og utgjorde ca. 10-27% av det totale cirrusdekket representert over dette området. Beregninger av 95% konfidensintervall for $\bar{y}_{rel, fly}$ viste at man med 95% sannsynlighet kan slå fast at flytrafikk har induisert en positiv endring i cirrusdekket over Øst-Asia. T -testen viste at resultatene var statistiske signifikante ($P < 0.05$). På global skala var hovedtrekkene fra regresjonsanalysen stort sett de samme som over Øst-Asia, men de beste estimatene av $\bar{y}_{rel, fly}$ lå noe lavere (ca. 3-24%). Sammenliknet med det beste estimatet av $\bar{y}_{rel, fly}$ fra Stordal m.fl. (2005), var det relative cirrus-skydekket globalt fra denne oppgaven noe høyere. Dette kan skyldes effekten av Schmidt-Appleman kriteriet. Smalere konfidensintervaller gjør videre de globale estimatene sikrere enn over Øst-Asia. T -testen indikerte at det relative cirrus-skydekket også her var statistisk signifikant ($P < 0.05$).

Resultatene fra denne oppgaven har vært varierende, og skiller seg fra tidligere studier. Nå skal det sies at tidligere forskning omfatter månedsdata, så noe av forskjellen kan ligge der. Men når det er sagt burde man forventet en sterkere sammenheng mellom cirrus-skydekket og flytrafikken. Spesielt gjelder det flybelastete områder. Det er etterhvert gjort mange studier av cirrustrender i relasjon til flytrafikk, der resultatene helt klart indikerer en positiv korrelasjon mellom disse parametrene (Minnis m.fl., 2004; Norris, 2005). Derfor burde man til en viss grad kunne forvente det tilsvarende i dette studiet. Dette kan bunne i usikkerhetene fra resultatene presentert i delkap. 4.5. Her ble det bl.a. fokusert på den relative fuktigheten fra ECMWF-modellen. Siden filtreringsprosessen utelukkende er basert på fuktigheten til omgivelsene, kan dette gi noe feilmarginer. Fuktighet er en vanskelig parameter å modellere og ofte tilknyttet usikkerheter. Dette gjenkjennes også i ECMWF-modellen (Beljaars og Kohler, 2000). Temperaturfeltene modelleres derimot med større nøyaktighet. Siden Schmidt-Appleman kriteriet opererer med både den kritiske temperaturen og det tilhørende metningsforholdet m.h.p. is, testet jeg ut tilfellet der dannelsen av kondensstriper ble bestemt ut fra omgivelsenes temperatur. Sett bortifra feilmarginer ved modellering av fuktighet og temperatur, skal resultatene fra de to parametrene samsvare med hverandre. Det ble også tilfellet, og resultatene viste ingen forbedringer i korrelasjonene. Dette antyder at feilmarginene ved modellering av temperatur og fuktighet fra ECMWF-modellen er av samme størrelsesorden.

Det kan være av stor interesse å erstatte datasettet fra ECMWF-modellen med et annet datasett, og deretter sammenlikne resultatene. En evt. differanse vil kunne anslå betydningen av modellresultatene fra ECMWF-modellen på dannelsen av kondensstriper. Samtidig kan det også vurderes å benytte andre kriterier for å identifisere områder der dannelsen av kondensstriper kan initialiseres. Kriteriene beskriver kanskje plumeprosessene (f.eks. mengden varme og fuktighet som frigjøres fra motoren) på en annen måte enn Schmidt-Appleman kriteriet, slik at resultatene av den grunn kan variere. I tillegg måtte analysene i denne oppgaven utføres for juni mnd. for å samsvare

med flydataene fra AERO2k. Det er gjort flere studier av sesongvariasjonene i fly-induserte cirrustrender, og som bl.a. også tar for seg den potensielle frekvensen av kondensstripedannelse både sommers -og vinterstid. Forskningsresultater fra Penner m.fl. (1999) viser at sannsynligheten for dannelse av kondensstriper når et minimum om sommeren (maksimum om vinteren). Dette støttes også av Boucher (1999). Derfor kunne det være interessant å utvide analysene mine til å gjelde også om vinteren. Dette vil muligens øke korrelasjonene.

For studier i fremtiden bør adveksjon tas høyde for. Adveksjonen har den viktige konsekvensen at den største endringen i cirrusskydekket vil forskyves i forhold til opprinnelsesområdet. Særlig store utslag vil det ha for flynivåene i atmosfæren, hvor vinden er langt sterkere enn ved bakken. Her ligger det altså et stort forbedringspotensiale, ikke bare for denne oppgaven men også for fremtidige studier av fly-induserte cirrustrender. Dette kan hjelpe oss til å estimere flyenes betydning på dannelsen av cirrus med større nøyaktighet. På den måten vil man få et mer korrekt bilde av virkeligheten. Samtidig er det helt nødvendig med en bredere forståelse av de kjemiske prosessene i plumen, og det komplekse samspillet mellom dem. Den økende veksten i flytrafikk (5% pr. år de neste 10-15 årene, Airbus. (1997); Boeing. (1997); Brasseur m.fl. (1998)), gjør at flyenes rolle på klimaet blir stadig viktigere. Man kan derfor forvente betydelig forskning rundt dette temaet også i fremtiden, forhåpentligvis med enda bedre resultater.

Bibliografi

- Aguado, Edward og Burt, James E. (2001) *Understanding Weather and Climate* (Prentice Hall).
- Airbus. (1997) *Confirming very large demand.. Global Market Forecast 1997-2016*, Airbus Industrie, Toulouse, France, s. 27.
- Appleman., H. (1953) *The formation of exhaust contrails by jet aircraft.. American Meteorological Society*, Vol. 34: s. 14–20.
- Beljaars, Anton og Kohler, Martin (2000) *PACS/ECMWF intercomparison, IMET/ECMWF intercomparison and LITE/ECMWF intercomparison*.
- Betts, A. K.; Viterbo, P.; Beljaars, A.C.M.; Pan, H-L; Hong, H-Y; Goulden, M. L. og Wofsy, S.C. (1998) *Evaluation of the land-surface interaction in the ECMWF and NCEP/NCAR reanalyses over grassland (FIFE) and boreal forest (BOREAS).. J. Geophys. Res.*, Vol. 11: s. 23 079–23 085.
- Boeing. (1997) *World air travel demand and aeroplane supply requirements.. Current Market Outlook 1997*, Boeing Commercial Airplane Group, Seattle, WA, USA, s. 51.
- Bolton, D. (1980) *The computation of equivalent potential temperature.. Mon. Wea. Rev.*, Vol. 108: s. 1046–1053.
- Boucher, Olivier (1999) *Airtraffic may increase cirrus cloudiness.. Nature*, Vol. 397: s. 30–31.
- Brasseur, G.P.; Cox, R.A.; Hauglustaine, D.; Isaksen, I.; Lelieveld, J.; Lister, D.H.; Sausen, R.; Schumann, U.; Wahner, A. og Wiesen., P. (1998) *European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions.. Atmospheric Environment*, Vol. 32: s. 2327–2422.
- Flatau, Piotr J.; Walko, Robert L. og Cotton, William R. (1992) *Polynomial Fits to Saturation Vapor Pressure.. American Meteorological Society, Journal of Applied Meteorology*, Vol. 31: s. 1507–1513.
- Gislefoss, Kristian (2007) *Sammenligning av trender i skyer i datasett basert på satellittobservasjoner..*

- Jensen, Eric J.; Toon, Owen B.; Kinne, Stefan; Sachse, Glen W.; Anderson, Bruce E.; Chan, K. Roland; Twohy, Cynthia H.; Gandrud, Bruce; Heymsfield, Andrew og Miake-Lye, Richard C. (1998) *Environmental conditions required for contrail formation and persistence.. Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, No. D4: s. 3929–3936.
- Kärcher, B. (1998) *Physicochemistry of aircraft-generated liquid aerosols, soot, and ice particles.. Journal of Geophysical Research*, Vol. 103: s. 17 111–17 128.
- Liou, K. N. (2002) *An Introduction to Atmospheric Radiation* (Academic Press).
- Miake-Lye, R. C.; Martinez-Sanchez, M.; Brown, R. C. og Kolb, C. E. (1993) *Plume and wake dynamics, mixing and chemistry behind a high speed civil transport aircraft.. Journal of aircraft*, Vol. 30: s. 467–479.
- Minnis, Patrick; Ayers, J. Kirk; Palikonda, Rabindra og Phan, Dung (2004) *Contrails, cirrus, and climate.. Climate*, Vol. 17, NO. 8: s. 1671–1685.
- Norris, Joel R. (2005) *Multidecadal changes in near-global cloud cover and estimated cloud cover radiative forcing.. Journal of Geophysical Research*, Vol. 110: s. CiteID D08 206.
- Paoli, R.; Hélie, J.; Poinot, T. J. og Ghosal., S. (2002) *Contrail formation in aircraft wakes using large-eddy simulations.. Center for Turbulence Research, Summer Program 2002*, s. 229–241.
- Penner, Joyce E.; Lister, David; Griggs, David J.; Dokken, David J. og McFarland, Mack (1999) *Aviation and the Global Atmosphere.. A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, s. 1–384.
- Rogers, R.R. og Yau, M.K. (1989) *A Short Course in Cloud Physics* (Butterworth-Heinemann).
- Sausen, Robert; Isaksen, Ivar; Grewe, Volker; Hauglustaine, Didier; Lee, David S.; Myhre, Gunnar; Köhler, Marcus O.; Pitari, Giovanni; Schumann, Ulrich; Stordal, Frode og Zerefos, Christos (2005) *Aviation Radiative Forcing in 2000: An Update on IPCC (1999).. Meteorologische Zeitschrift*, s. 555–561.
- Schiffer, R. A. og Rossow, W. B. (1983) *The international Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP): The First Project of the World Climate Research Programme.. American Meteorological Society*.
- Schumann., U. (1996) *On conditions for contrail formation from aircraft exhausts.. Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 5: s. 4–25.

- Stordal, F.; Myhre, G.; Stordal, E.J.G.; Rossow, W.B.; Lee, D.S.; Arlander, D.W. og Svendby, T. (2005) *Is there a trend in cirrus cloud cover due to aircraft traffic?.. Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 5: s. 2155–2162.
- Stubenrauch, C. J.; Rossow, W. B.; Chèruey, F.; Chèdin, A. og Scott., N. A. (1998) *Clouds as Seen by Satellite sounders (3I) and Imagers (ISCCP. Part I: Evaluation of Cloud Parameters.. American Meteorological Society*, Vol. 12: s. 3419–3442.
- Travis, D.; Carleton, A. og Lauritsen, R. (2002) *Contrails reduce daily temperature range.. Nature*, Vol. 418: s. 601–601.
- Wallace, John M. og Hobbs, Peter V. (1977) *Atmospheric Science An Introductory Survey* (Academic Press).