



Statlig program for forurensningsovervåking

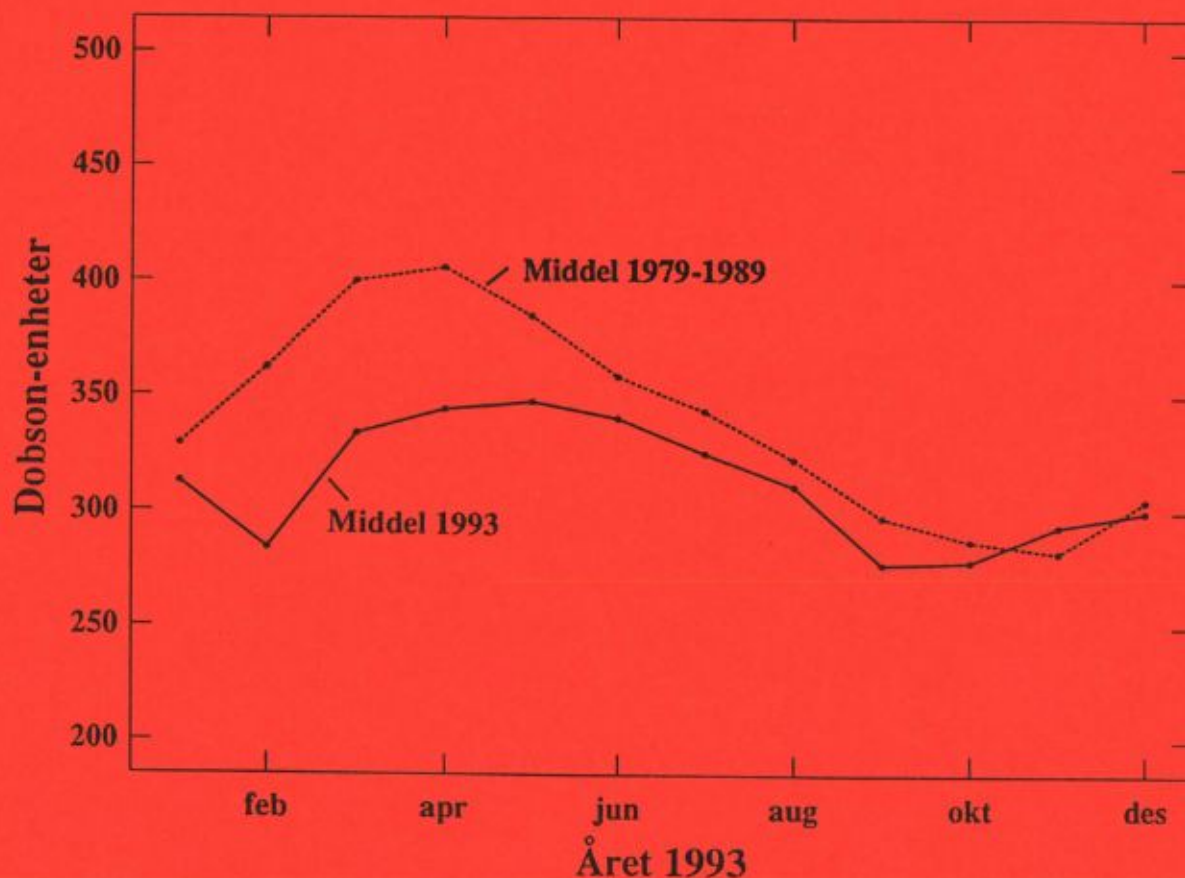
Rapport nr.: 578/94

Oppdragsgiver: Statens forurensningstilsyn

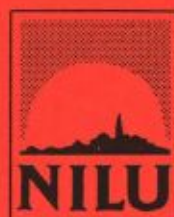
Deltakende institusjon: NILU

Overvåking av ozonlaget

Årsrapport 1993



TA-1123/1994



Norsk institutt for luftforskning



Statlig program for forurensningsovervåking

Det statlige programmet omfatter overvåking av forurensningsforholdene i

**luft og nedbør
grunnvann
vassdrag og fjorder
havområder
skog**

Overvåkingen består i langsiktige undersøkelser av de fysiske, kjemiske og biologiske forhold.

Hovedmålsettingen med overvåkingsprogrammet er å dekke myndighetenes behov for informasjon om forurensningsforholdene med sikte på best mulig forvaltning av naturressursene.

Hovedmålet spenner over en rekke delmål der overvåkingen bl.a. skal:

gi informasjon om tilstand og utvikling av forurensningssituasjonen på kort og lang sikt.

registrere virkningen av iverksatte tiltak og danne grunnlag for vurdering av nye forurensningsbegrensende tiltak.

påvise eventuell uheldig utvikling i resipienten på et tidlig tidspunkt.

over tid gi bedre kunnskaper om de enkelte vannforekomsters naturlige forhold.

Sammen med overvåkingen vil det føres kontroll med forurensende utslipp og andre aktiviteter.

Overvåkingsprogrammet finansieres i hovedsak over statsbudsjettet. Statens forurensningstilsyn er ansvarlig for gjennomføring av programmet.

Resultater fra de enkelte overvåkingsprosjekter publiseres i årlige rapporter.

Henvendelser vedrørende programmet kan i tillegg til de aktuelle institutter rettes til Statens forurensningstilsyn, Postboks 8100 Dep, 0032 Oslo, tlf. 22 57 34 00.

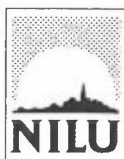
NILU : OR 28/94
REFERANSE : O-8985.PR
DATO : JUNI 1994
ISBN : 82-425-0577-2

Overvåking av ozonlaget

Årsrapport 1993

Arne Dahlback, Geir O. Braathen og Frode Stordal

Utført etter oppdrag
fra Statens forurensningstilsyn



Norsk institutt for luftforskning
Postboks 100
2007 Kjeller

Innhold

	Side
Sammendrag	2
1. Måleresultater.....	4
1.1. Dobson-instrumentene	4
1.2. Brewer-instrumentet	8
1.3. Ozonsonder.....	9
1.4. SAOZ-instrumentet.....	12
2. Ozonmålinger 1979-1993.....	13
3. Måling med Dobson, Brewer og TOMS.....	18
3.1. Målemetoder.....	18
3.2. Sammenligning av målinger med Dobson-, Brewer- og TOMS-instrumentene	19
4. Effekter av stratosfæriske partikler og ozonprofil på målinger med TOMS-instrumentet	24
5. Referanser	26

Sammendrag

Målinger utført ved Universitetet i Oslo viser lav totalozon i atmosfæren i 1993, spesielt i 1. halvår. Spesielt lavt var det i februar, mars og april med henholdsvis 21%, 16% og 15% under middelverdien for 1979-1989. Vinteren 1993 lå den meteorologiske situasjonen til rette for lave ozonverdier. Sydvestlige vinder med påfølgende vertikaltransport ga seg utslag i lave ozonmengder. Målingene fra Universitetet i Tromsø viste også lave ozonverdier i 1. halvår. Her lå april-middelet 19% under middelverdien for 1984-1991. De lave ozonmengder i både 1992 og 1993 kan ha sammenheng med vulkanutbruddet fra Pinatubo på Filippinene juni 1991. Atmosfæriske modellstudier utført ved NILU viser at det sannsynligvis også har funnet sted en del kjemisk nedbrytning av ozon pga. klor som er blitt aktivisert på Pinatubo-aerosoler og polare stratosfæreskyer.

Basert på bakkemålinger fra Universitetet i Oslo er det utført trendanalyse for perioden 1979-1993. Analysen gir en gjennomsnittlig nedgang på 0,73% pr. år om vinteren. Den gjennomsnittlige nedgangen om sommeren er 0,27% pr. år. Den nedadgående trenden har ikke vært jevn i perioden 1979 til 1993. De lave ozonverdiene som ble registrert i 1992 og 1993 bidrar sterkt til den beregnete gjennomsnittlige trenden. For Tromsø og Longyearbyen har vi sammenhengende måleserier fra 1984. Disse er for korte til å utføre en trendanalyse. For Tromsø finnes det måledata for perioden 1935 til 1969 og for Longyearbyen for perioden 1950 til 1969. Disse måleseriene er imidlertid ikke reanalysert, noe som er nødvendig for å se dem i sammenheng med den nyere tidsserien.

Nimbus 7-satellitten med ozon-instrumentet TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) har gitt ozonmålinger globalt siden 1978. Denne satellitten sluttet imidlertid å sende data 5. mai 1993. En russisk satellitt, Meteor 3, er også utstyrt med et TOMS-instrument. Denne satellitten ble skutt opp i 1991. Det er også utført trendanalyser for perioden 1979 til 1993 basert på TOMS for Oslo, Tromsø og Longyearbyen. Perioden 1979-1992 er basert på data fra Nimbus 7, mens 1993 er basert på data fra Meteor 3. For Oslo er den nedadgående trenden sterkere enn det bakkedataene viser. En troverdig trendanalyse forutsetter et stabilt instrument. En sammenligning mellom de to TOMS-instrumentene viser varierende avvik mellom instrumentene. Dessuten vil en nøyaktig bestemmelse av totalozon fra målinger med TOMS forutsette at det benyttes en korrekt klimatologi for høydefordelingen av ozon under analyse av dataene. Det har vist seg at denne klimatologien foreløpig ikke er god nok. Dette har størst betydning for høye breddegrader. Trendanalysen basert på TOMS for perioden 1979 til 1993 må derfor betraktes som usikker.

Ved Universitetet i Oslo benyttes det to instrumenter for ozonlagsmåling, et Dobson-instrument og et Brewer-instrument. Overensstemmelsen mellom disse instrumentene er meget god.

Fra Bjørnøya og fra Gardermoen sendes det jevnlig opp ozonsonder med ballong. Disse når under gode forhold opp til 35 km høyde, dvs. over det meste av ozonlaget. Disse gir informasjon om høydefordeling av ozon og er viktige for å øke forståelsen av de prosesser som forårsaker endringer i atmosfærens ozonmengde.

Våre ozonsonderinger er i overensstemmelse med at de lave ozonverdier vinteren 1992 og 1993 bl.a. skyldes vertikal transport med påfølgende endring i ozonprofilen. I tillegg er de nyttige for kontroll av målinger med bakke- og satellitt-instrumenter. Målinger med ozonsonder i Antarktis har vist at nedbrytning av ozon i perioden september-november hvert år skjer i høydeområdet 14-25 km, hvor mesteparten av ozonet befinner seg. Våre sonderinger har imidlertid ikke vist slike dramatiske endringer i høydefordelingen av ozon hos oss. SAOZ-instrumentet (System for Analysis of Observations at Zenith) i Ny-Ålesund, finansiert av Norges forskningsråd (tidligere NTNF), har vært i drift siden 1990. Dette instrumentet er bygget for å måle bl.a. ozon ved lav sol. Instrumentet viser relativt god overensstemmelse med andre tradisjonelle bakkeinstrumenter. Det har imidlertid vist seg at dette instrumentet er følsomt overfor partikler i stratosfæren som stammer fra f.eks. vulkanutbrudd.

Ozonsonde-programmet har i 1993, i tillegg fra støtte fra SFT, også fått støtte fra Norges forskningsråd. Måleprogrammet og rapportering er gjort mulig gjennom det statlige prosjekt for ozonlagsovervåking.

Ansvarlig for ozonmålinger ved Universitetet i Oslo og i Longyearbyen er Finn Tønnessen (Tønnessen et al., 1993). Målinger med Dobson-instrumentet i Oslo 1979-1993 er utført av Søren H.H. Larsen (Larsen, 1993). Ansvarlig for ozonmålinger med Dobson-instrumentet i Tromsø er Kjell Henriksen (Henriksen et al., 1993). Ansvarlig for ozonsonder fra Bjørnøya og Gardermoen er Geir Braathen, NILU, som også er ansvarlig for målingene med SAOZ-instrumentet på Ny-Ålesund. .

I denne rapporten benyttes enheten Dobson-enheter (Dobson Units, forkortet DU) for ozonmengden i atmosfæren. Ozonet i atmosfæren er fordelt over et stort høydeområde, mesteparten befinner seg mellom 15 og 35 km. Hvis alt ozonet var samlet ved bakken i et rent ozon-sjikt ved normalt trykk og temperatur, ville tykkelsen av et slikt lag være 2-5 mm. Dette tilsvarer 200-500 DU.

Overvåking av ozonlaget

Årsrapport 1993

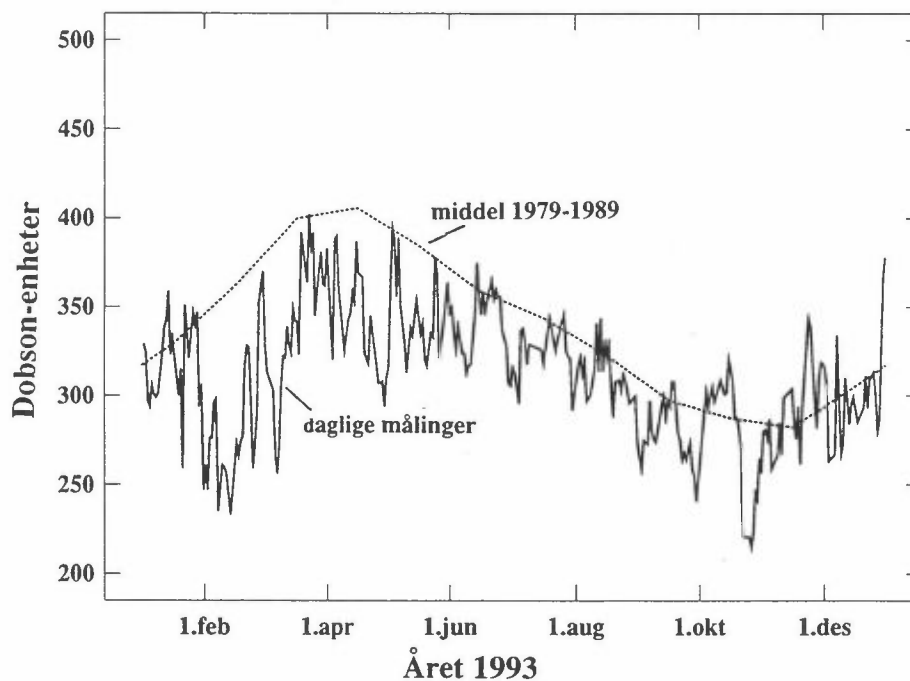
1. Måleresultater

1.1. Dobson-instrumentene

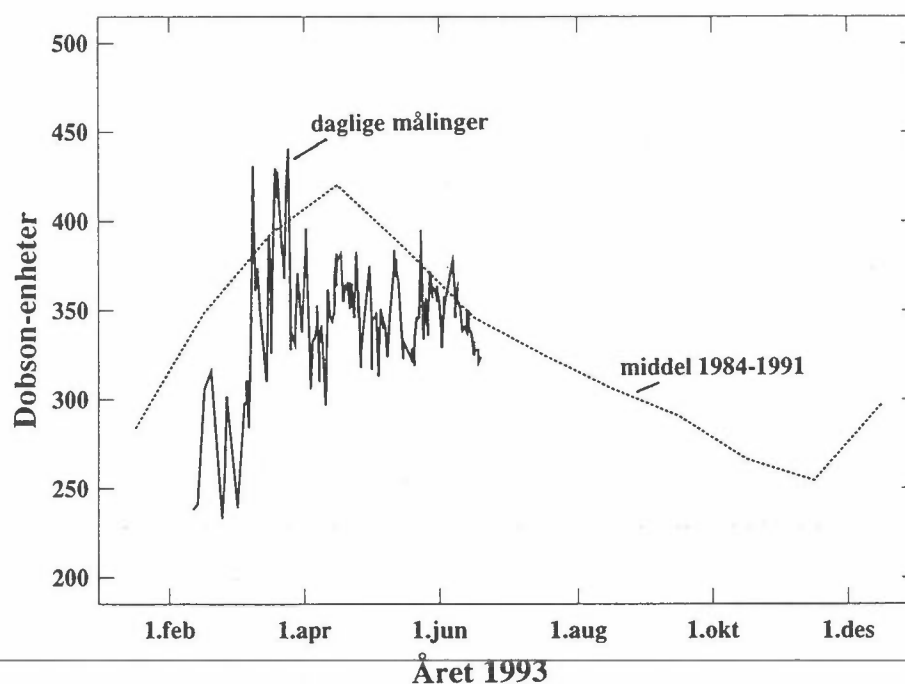
Figurene 1, 2 og 3 viser totalozon (ozonlagets tykkelse) fra dag til dag i 1993 for Oslo, Tromsø og Longyearbyen. Målingene er utført med Dobson-instrumenter. Som vanlig på våre breddegrader er variasjonene fra dag til dag store, spesielt om vinteren. Dette skyldes meteorologiske variasjoner.

Målingene i Oslo (Tønnessen et al., 1993) er vist i figur 1. Den stiplede kurven er månedsmiddelverdien for årene 1979-1989. Målingene viser lave verdier store deler av 1993, spesielt i februar, mars og april. Middelet for februar var 22% lavere enn februarmiddelet for perioden 1979-1989. Normalt måles det en rekke ganger ozonmengder over 400 DU om våren. De store ozonmengdene som vanligvis registreres om våren uteble i 1993. Årets høyest målte verdi, 401 DU, ble målt 23. mars og dette var den eneste gangen det ble målt over 400 DU i 1993. Den laveste registrerte verdi, ca. 220 DU, ble målt flere dager i perioden 22.-27. oktober. Årsaken til de lave ozonmengder i 1993 er uklare, men den meteorologiske situasjonen vinteren 1993 var mye lik den vi hadde vinteren 1992 hvor sydvestlige vinder i stratosfæren med påfølgende vertikaltransport ga lave ozonmengder over Nord-Europa (Larsen og Rabbe, 1994; Rabbe, 1994). Atmosfæriske modellstudier utført ved NILU viser at det sannsynligvis også har funnet sted en del kjemisk nedbrytning av ozon pga. klor som er blitt aktivisert på Pinatubo-aerosoler og polare stratosfæreskyer. Perioden fra 1979 til 1989 er valgt for beregning av langtidsmiddel siden det er en mulig sammenheng mellom solflekkeaktiviteten og totalozon, og denne perioden dekker en solflekksyklus. Det viser seg imidlertid at dette valget ikke er avgjørende. Det beregnede langtidsmiddel endrer seg svært lite hvis perioden økes til 1979-1991 (månedsmidlene vil endre seg med mindre enn 4 DU).

Målingene i Tromsø (Henriksen et al., 1993) er vist i figur 2. Her ble det også registrert lave ozonmengder vinter/vår i 1993. Middelveien for april lå 19% under april-middelet for perioden 1984 til 1991. Juni-middelet var nær 1984-1991 middelet. Instrumentet ble utsatt for en vannskade sommeren 1993. Det er uklart hvordan dette har påvirket instrumentet og målingene som er utført etter dette tidspunktet er derfor ikke presentert i denne rapporten. I forbindelse med at et nytt Brewer-instrument blir installert i Tromsø i 1994 vil Dobson-instrumentet bli sammenlignet med dette nye instrumentet. Dobson-instrumentet i Oslo vil bli kalibrert i 1994 i regi av Verdens meteorologiske Organisasjon (WMO). Etter dette planlegges det å foreta en sammenligning mellom alle tre Dobson-instrumenter i Norge. Dette vil gi en indikasjon på tilstanden til Dobson-instrumentet i Tromsø. Målingene for annet halvår i 1993 vil bli presentert i årsrapporten for 1994.

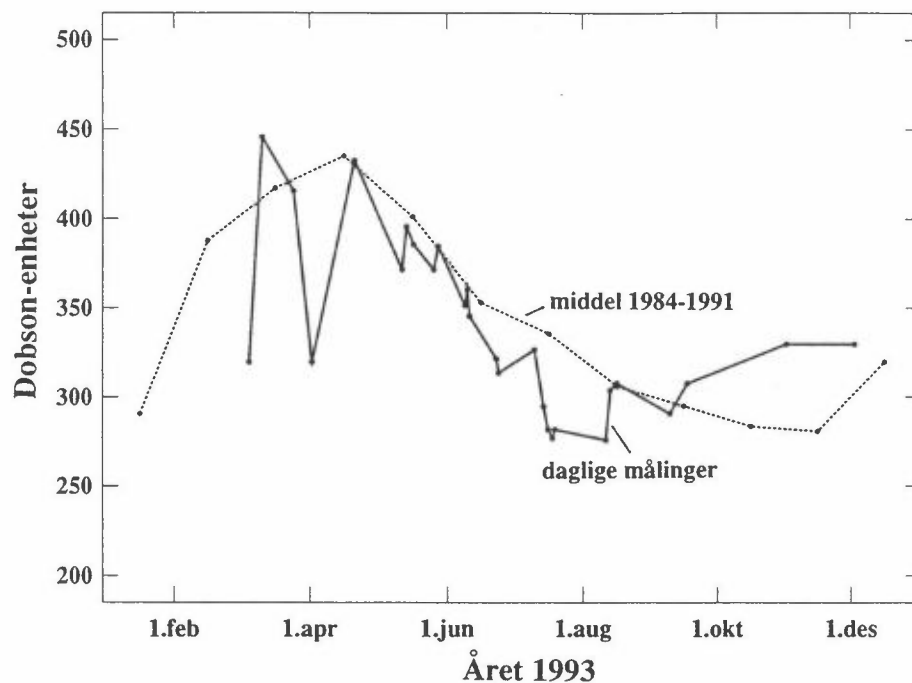


Figur 1: Daglige ozonverdier målt med Dobson-instrumentet ved Universitetet i Oslo i 1993. Den stiplede kurven er månedsmidlene fra 1979 til 1989.



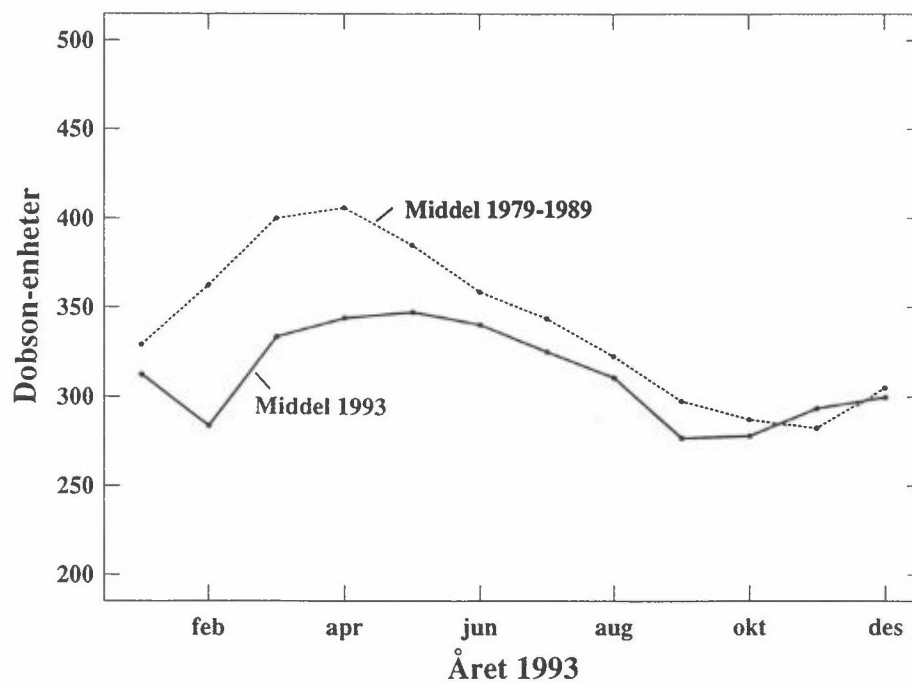
Figur 2: Daglige ozonverdier målt med Dobson-instrumentet ved Universitetet i Tromsø i 1993. Den stiplede kurven er månedsmidlene fra 1984 til 1991.

Målingene i Longyearbyen (Tønnessen et al., 1993) er vist i figur 3. Blant annet pga. vanskelige værforhold er det foretatt betydelig færre målinger her enn i Oslo og Tromsø. De aller fleste målingene for første halvår 1993 ligger under 1984-1991 middelet.

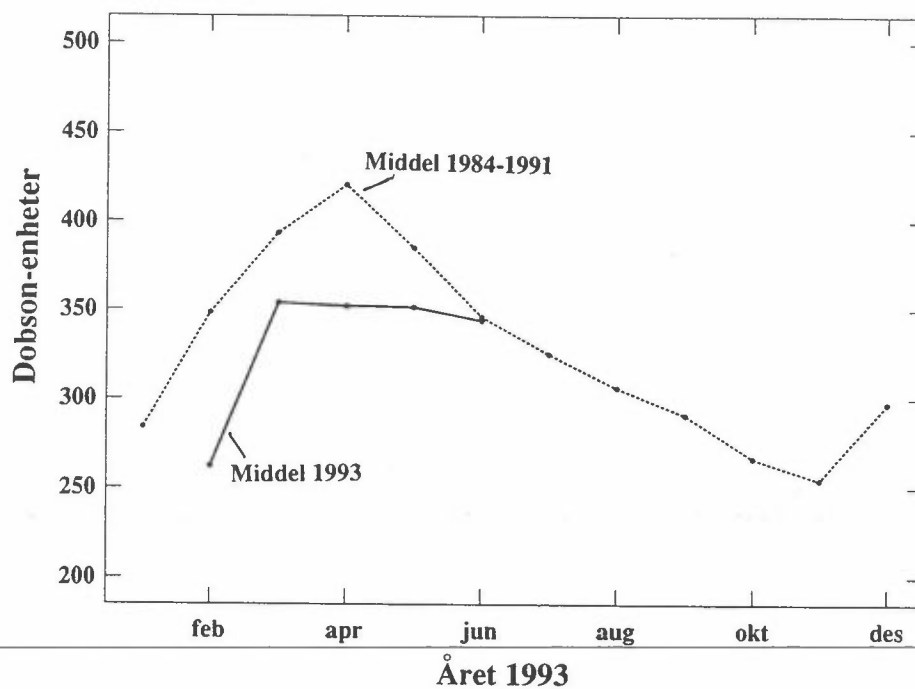


Figur 3: Daglige ozonverdier målt med Dobson-instrumentet i Longyearbyen, Spitsbergen, i 1993. Den stiplete kurven er månedsmidlene fra 1984 til 1991.

Figurene 4 og 5 viser månedsmiddelverdiene for 1993 sammenlignet med langtidsmidlene for henholdsvis Oslo og Tromsø. Pga. få måleverdier er Longyearbyen ikke tatt med. Her går det tydelig fram at ozonverdiene for Oslo var lave i 1993, med størst avvik fra langtidsmiddelet i februar, mars og april. For Tromsø var avviket fra langtidsmiddelet størst i april. For Oslo og Tromsø er avviket fra langtidsmiddelet for hver måned vist i tabell 1.



Figur 4: Månedsmiddelverdiene for 1993 og månedsmiddelverdiene for 1979-1989 for Oslo.



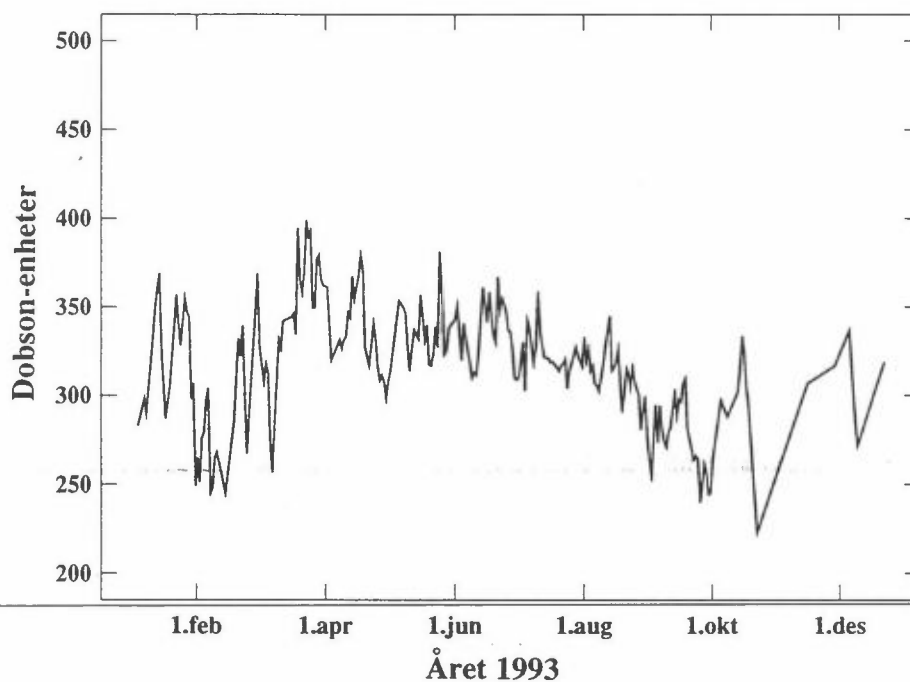
Figur 5: Månedsmiddelverdiene for 1993 og månedsmiddelverdiene for 1984-1991 for Tromsø.

Tabell 1: Prosentvis avvik i månedsmiddelverdiene for 1993 fra langtidsmiddelet for Oslo og Tromsø.

Måned	Oslo	Tromsø
Januar	-5%	
Februar	-22%	-8%
Mars	-16%	-11%
April	-15%	-19%
Mai	-10%	-9%
Juni	-5%	0%
Juli	-5%	
August	-4%	
September	-7%	
Oktober	-3%	
November	4%	
Desember	-2%	

1.2. Brewer-instrumentet

Figur 6 viser de daglige målinger i 1993 utført med Brewer-instrumentet ved Fysisk institutt, Universitetet i Oslo (Tønnessen et al., 1993). Målingene som vises her er tatt mot direkte sollys, senitlys og direkte månelys. Senitlysteknikken er ikke pålitelig vinterstid når solen står lavt på himmelen og målingene på denne tiden er foretatt på direkte sollys og månelys.



Figur 6: Daglige ozonverdier målt med Brewer-instrumentet ved Universitetet i Oslo.

Brewer-instrumentet ble kalibrert mot Brewer nr. 17 (den reisende standard) august 1993. Ingen drift i instrumentet ble registrert. I månedskiftet oktober/november deltok instrumentet i en Nordisk instrumentsammenligning ved Izana Observatoriet på Tenerife, Kanariøyene. De syv Brewer-instrumentene som deltok viste meget godt samsvar.

Brewer-instrumentet er automatisk, og det kan måle mange ganger i løpet av dagen og om natten hvis månelys er tilgjengelig. Overensstemmelsen mellom Brewer-instrumentet og Dobson-instrumentet er meget god. Begge instrumenter er godkjent av World meteorological Organization (WMO) som standard-instrumenter for måling av totalozon.

1.3. Ozonsonder

Ozonsonder sendt opp med ballong gir verdifull informasjon om høydefordelingen av ozon. Under gode forhold stiger ballongen til en høyde av 35 km. Siden blandingsforholdet mellom luft og ozon er tilnærmet konstant over ca. 25 km, kan også den totale ozonmengden anslås.

Selve vertikalfordelingen av ozon gir informasjon som er nyttig for forståelsen av ozonvariasjoner som skyldes meteorologi og eventuell kjemisk nedbrytning. Målinger med ozonsonder i Antarktis har vist at nedbrytningen av ozon i perioden september-november hvert år (ozonhullet) skjer i høydeområdet 15-25 km, hvor mesteparten av ozonet befinner seg. Ozonsonderinger i Arktis derimot har ikke vist slike dramatiske endringer i høydefordelingen av ozon. Både høydefordeling av ozon og totalozon bestemt fra ozonsonder er nyttig for vurdering av totalozon målt med bakkeinstrumenter, spesielt om vinteren under vanskelige måleforhold. Fra Bjørnøya har det blitt sendt opp ozonsonder siden høsten 1988, vanligvis én gang pr. uke. Vinteren 1991-92 ble det sendt opp sonder enda hyppigere, i forbindelse med den europeiske ozonkampanjen (EASOE) og likeledes i 1989 i forbindelse med den amerikanske ozonkampanjen AASE. I forbindelse med EASOE har det blitt sendt opp ozonsonder fra værskipet Polarfront i Norskehavet. Fra Gardermoen Radiosonde-stasjon er det blitt sluppet ozonsonder siden desember 1990.

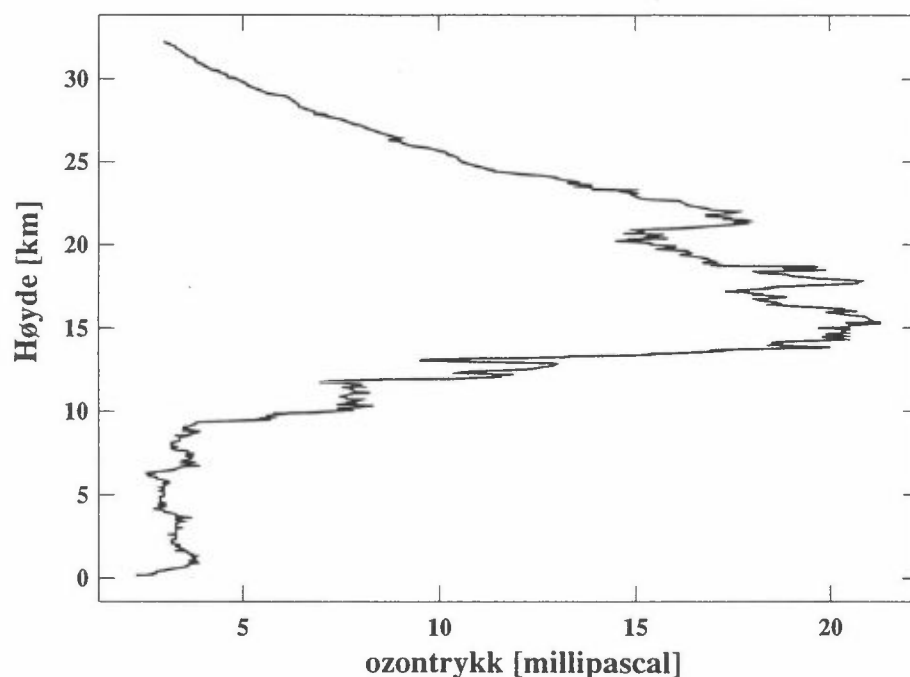
Figur 7 viser en typisk ozonprofil (Gardermoen 13. januar, 1993). I den nederste delen av atmosfæren (troposfæren) er ozonkonsentrasjonen lav. Fra ca. 10 km (stratosfæren) øker konsentrasjonen med høyden og når et maksimum ved ca. 20 km høyde. Deretter avtar konsentrasjonen med høyden. I stratosfæren har ozonet lang levetid, mens levetiden i troposfæren er mye kortere og konsentrasjonen er derfor lavere enn i stratosfæren. Overgangen mellom troposfæren og stratosfæren kalles tropopause. Tropopausehøyden vil variere med de meteorologiske forhold. En av årsakene til variasjon i den totale ozonmengde skyldes varierende tropopausehøyde. Høy tropopause vil gi lav totalozon, mens lav tropopausehøyde vil gi høy totalozon.

Figur 8 viser midlere vertikal fordeling av ozon over Gardermoen for januar 1992 og januar 1993. Januar 1993 representerer en normal situasjon (totalmengden var nær langtidsmiddelet for januar), mens totalmengden i januar 1992 lå 25% under langtidsmiddelet for januar. Tropopausehøyden for januar 1992 var høyere enn

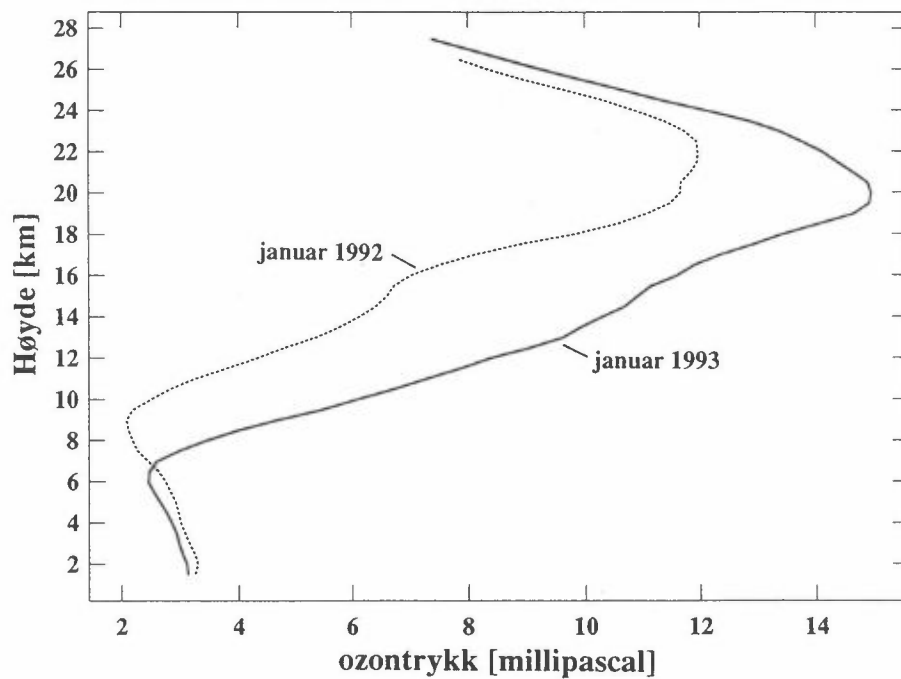
for januar 1993. Dette forklarer delvis den lave totalmengden i januar 1992. Den meteorologiske situasjonen i januar 1992 var preget av sydvestlige vinder med påfølgende oppstigende luftstrømmer i den lavere del av stratosfæren (Rabbe og Larsen, 1994). Lavt blandingsforhold ozon/luft i den lavere del av stratosfæren vil dermed bli løftet til større høyder. En slik prosess fører til lavere konsentrasjon i stratosfæren som profilen for januar 1992 viser.

Figur 9 viser middelprofilen for februar 1993 og middelprofilen for januar 1993 (som tilsvarende en tilnærmet normal profil for februar). Middelverdien av totalozon for februar 1993 lå 22% under langtidsmiddelet for februar. De meteorologiske forhold med sydvestlige vinder med påfølgende oppstigende luftstrømmer preget også februar 1993 (Rabbe, 1994). De lave ozonmengder vinteren 1992 og 1993 kan dermed for en stor del forklares med spesielle meteorologiske forhold.

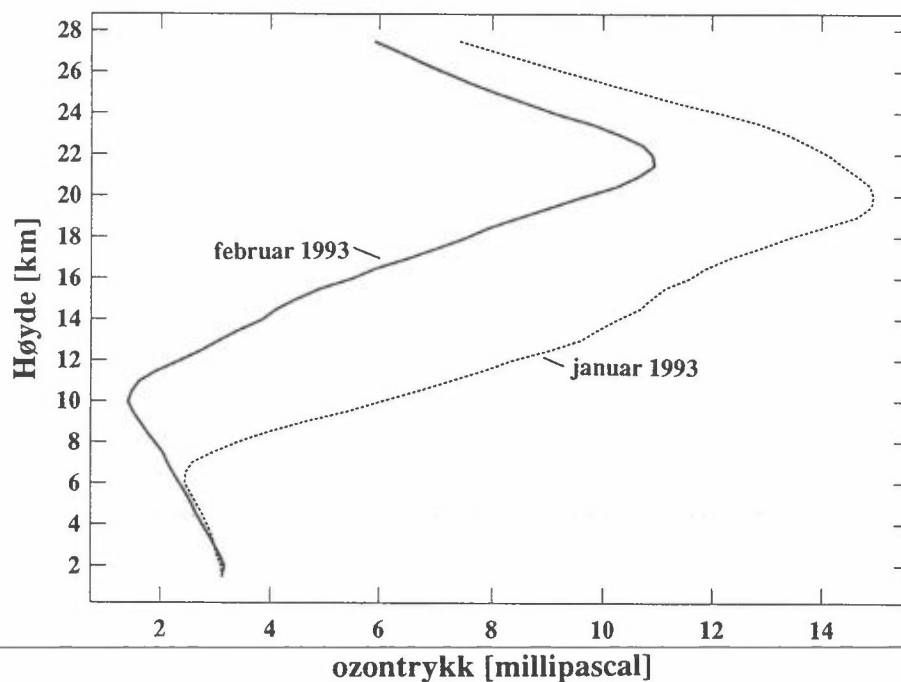
Figur 10 viser midlere vertikal fordeling av ozon for Bjørnøya for januar-mai for hvert av årene fra 1989 til 1993. Her utpreger 1993 seg med betydelig lavere konsentrasjon i stratosfæren sammenlignet med tidligere år.



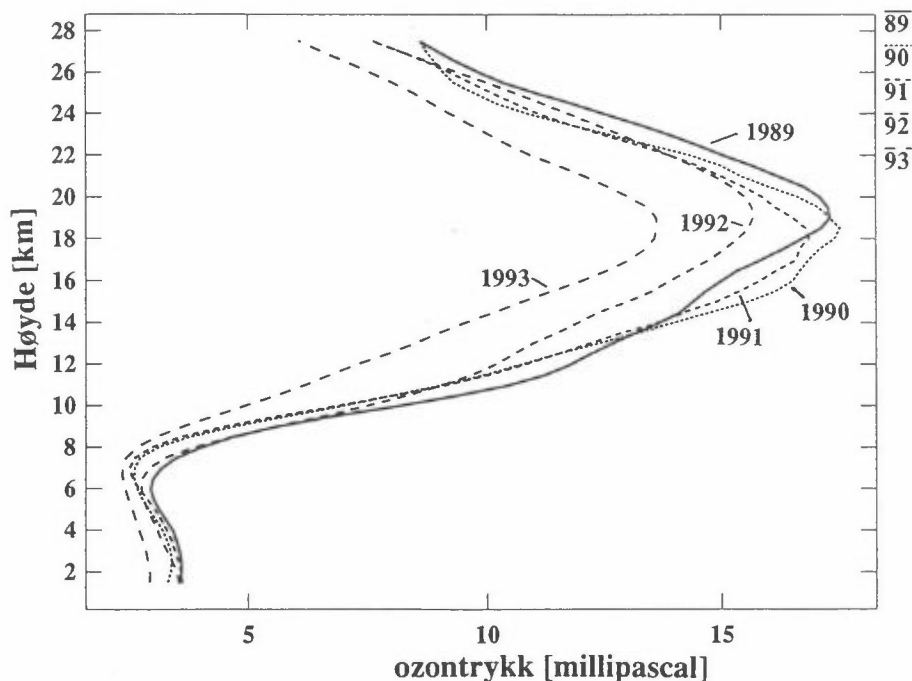
Figur 7: Høydefordeling av ozon over Gardermoen 13. januar 1993 målt med ozonsonde sendt opp med ballong.



Figur 8: Midlere høydefordeling av ozon for januar 1992 og januar 1993 over Gardermoen.



Figur 9: Midlere høydefordeling av ozon for januar 1993 og februar 1993 over Gardermoen.

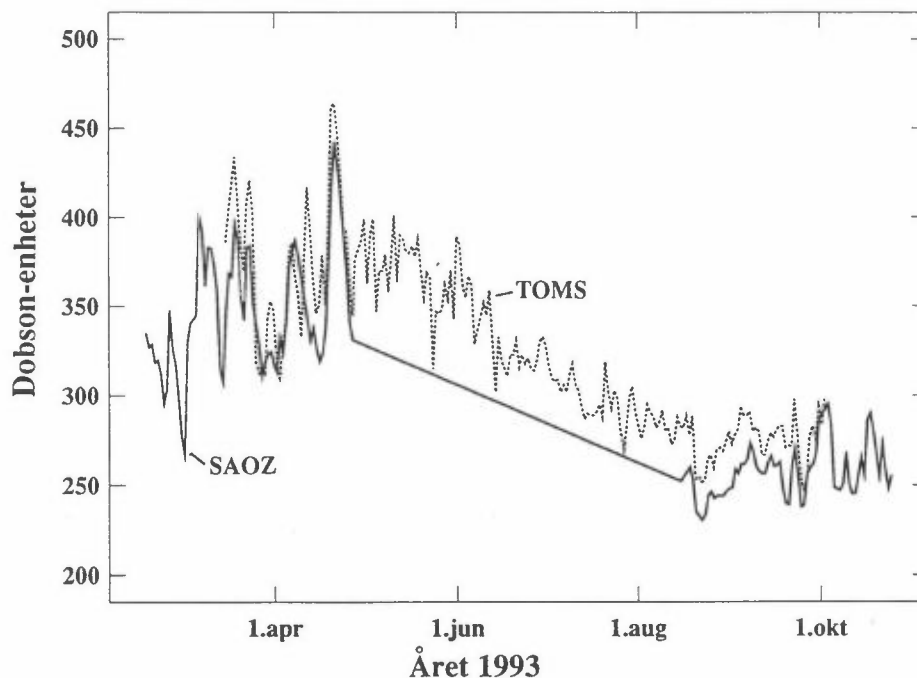


Figur 10: Midlere høydefordeling av ozon for januar-mai for årene 1989 til 1993 over Bjørnøya.

1.4. SAOZ-instrumentet

SAOZ (System for Analysis of Observation at Zenith), som er plassert i Ny-Ålesund, er et instrument som er konstruert for å kunne måle bl.a. ozonmengden i atmosfæren ved lav sol. Dobson- og Brewer-instrumentene gir vanligvis usikre målinger når solen står lavere enn ca. 5-10 grader over horisonten. Grunnen til dette er bl.a. at den ultrafiolette strålingen fra sola som Brewer- og Dobson-instrumentet måler på, blir for svak ved lav sol. SAOZ derimot benytter absorpsjonsbånd rundt 510 nm, dvs. i den synlige delen av spekteret hvor ozon absorberer mye svakere enn i det ultrafiolette området. Målinger med SAOZ vil derfor gi best resultater ved lav sol, og siden instrumentet kan måle selv når solen står 2-4 grader under horisonten, er instrumentet velegnet på høye breddegrader. En annen fordel er at absorpsjonen er uavhengig av temperaturvariasjoner i stratosfæren. Det har imidlertid vist seg at SAOZ-målingene er påvirket av partikler i stratosfæren fra f.eks. vulkanutbrudd (Dahlback et al., 1994). Instrumenttypen er imidlertid ny og metoden for å beregne ozonmengden fra målingene er under utvikling.

Figur 11 viser ozonmengden målt med SAOZ i Ny-Ålesund i 1993. Metoden for å bestemme ozonmengden fra målinger i den ultrafiolette delen av solspekteret (som også er mulig med instrumentet) er ikke utviklet og bare ozonmålinger i de årstider hvor solen er nær horisonten er tatt med. I samme figur vises også ozonmengden målt med TOMS-instrumentet (Total Ozone Mapping Spectrometer) i Meteor 3-satellitten. Satellitten gir stort sett ca. 5% høyere ozonmengde enn SAOZ.



Figur 11: Ozonmengden målt med SAOZ og TOMS, Ny-Ålesund i 1993.

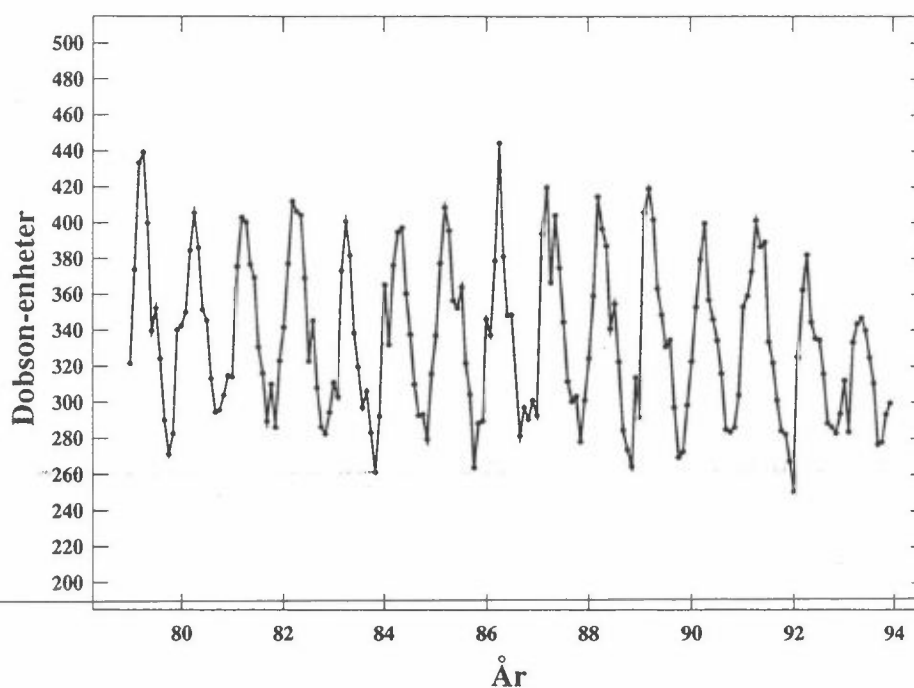
2. Ozonmålinger 1979-1993

Figur 12 viser hvordan den totale ozonmengden målt med Dobson-instrumentet har variert over Oslo i perioden januar 1979 til desember 1993. Månedsmidlene er basert på målinger med Dobson-instrumentet. Den store årstidsvariasjonen, som er typisk for stasjoner på høye breddegrader, har sammenheng med transport av ozon fra kildeområdene i stratosfæren over ekvator. Denne transporten er størst om vinteren, og gir et maksimum i ozonmengden utpå vårparten. Svakere transport fra ekvator gir et minimum i totalmengden utpå høsten. I middel ligger april-middelet 40% høyere enn november-middelet. I figuren er det benyttet månedsmiddelverdier slik at årstidsvariasjonene kommer tydeligere frem. De hurtige variasjonene fra dag til dag er midlet bort. Et fremtredende trekk for 1993 er de relativt lave maksimalverdiene om våren.

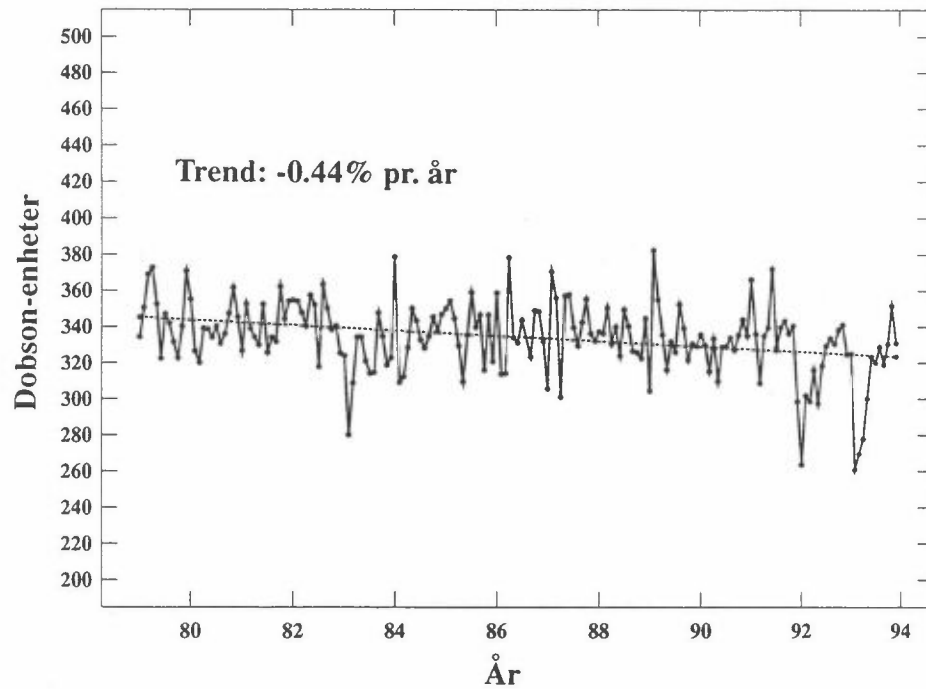
Figur 13 viser ozonvariasjonene på en annen måte ved at sesongvariasjonene i perioden fra 1979 til 1991 er fjernet. (Sesongvariasjonen i månedsmidlene fjernes ved å trekke fra langtids-månedsmiddelet og å legge til langtids-årsmiddelet.) På denne måten går det tydeligere frem hvordan avviket fra måned til måned varierer gjennom perioden. En trendanalyse på dette data-settet gir en nedgang på 0,44% pr. år. Nedgangen for vintermånedene desember-mars er 0,73 % pr. år, mens for sommermånedene mai-august er nedgang på 0,27% pr. år. De lave ozonverdiene i 1992 og 1993 bidrar sterkt til den nedadgående trenden spesielt om vinteren. Som det fremgår av figur 13 er trenden ikke jevn i perioden 1979 til 1993. Dette er vist på en annen måte i figur 14 hvor årsmiddelet for hvert av årene 1979 til 1993 relativt til langtids-årsmiddelet (1979-1989) er vist. Spesielt lave verdier ble registrert i 1983 og i 1992 og 1993. Vulkanutbruddet fra El Chichon i Mexico i 1982 og fra Pinatubo, Filippinene i 1991, kan ha hatt betydning for disse lave

årsmidlene. Nimbus 7-satellitten som ble sendt opp 1978 sluttet å sende data 5. mai 1993. Et annet TOMS-instrument ble sendt opp med Meteor 3-satellitten i 1991. Figur 15 viser ozonvariasjonene over Oslo i perioden 1979 til 1993 målt med TOMS. Dataene for 1979 til 1992 er fra Nimbus 7-satellitten mens dataene for 1993 er fra Meteor 3-satellitten. Sesongvariasjonene er fjernet på tilsvarende måte som i forrige figur. På årsbasis er nedgangen 0,77% pr. år. For vintermånedene desember-mars gir TOMS en nedgang på 1,15% pr. år, mens nedgangen for sommermånedene mai-august er 0,51% pr. år. Overensstemmelsen mellom Brewer-instrumentet og Dobson-instrumentet er meget god. Overensstemmelsen mellom de to TOMS-instrumentene er imidlertid dårligere (se kapittel 3). Dessuten har det vist seg at ozonprofil-klimatologien benyttet ved analysen av TOMS-data ikke er god nok. Dette gir usikre ozonverdier ved høye breddegrader. Trendanalysen basert på TOMS-data er derfor usikker.

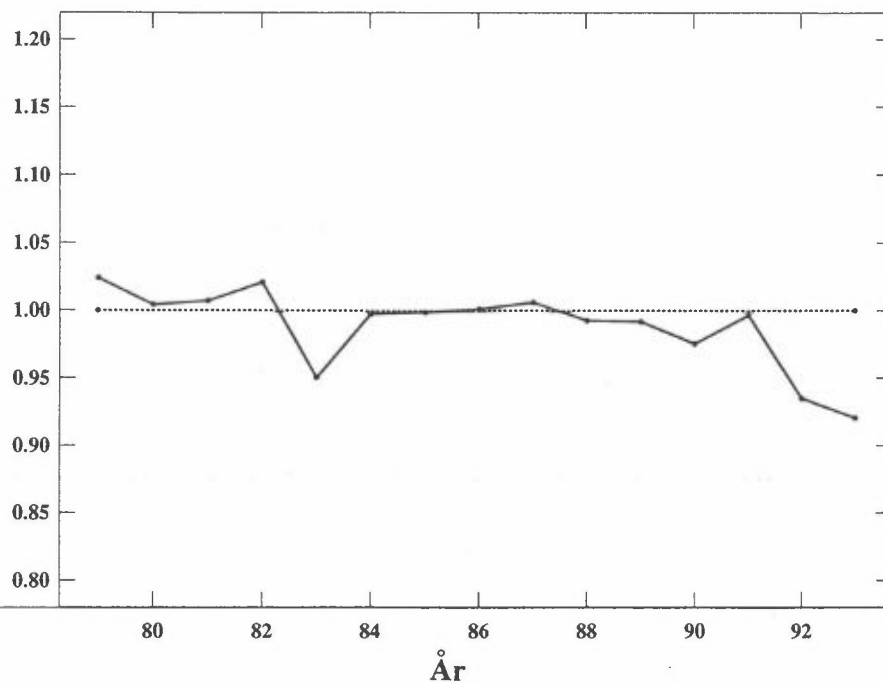
Figur 16 og 17 viser variasjon i ozonmengden over henholdsvis Tromsø og Longyearbyen i perioden 1979 til 1993 basert på målinger med TOMS. Nedgangen i ozonmengden mai-august er 0,44% pr. år. for Tromsø og 0,58% pr. år for Longyearbyen. Pga. av mørketid er det ikke mulig å beregne en vintertrend som for Oslo. På årsbasis er nedgangen for Tromsø 0,78% pr. år og for Longyearbyen 0,90% pr. år. Som for Oslo må det bemerkes at disse verdiene også er usikre. Uoverensstemmelsen mellom de to TOMS-instrumentene er dessuten for Tromsø og Longyearbyen større en for Oslo. For Tromsø er trenden basert på målinger i tidsrommet primo februar-primo november, og for Longyearbyen ultimo februar-ultimo oktober.



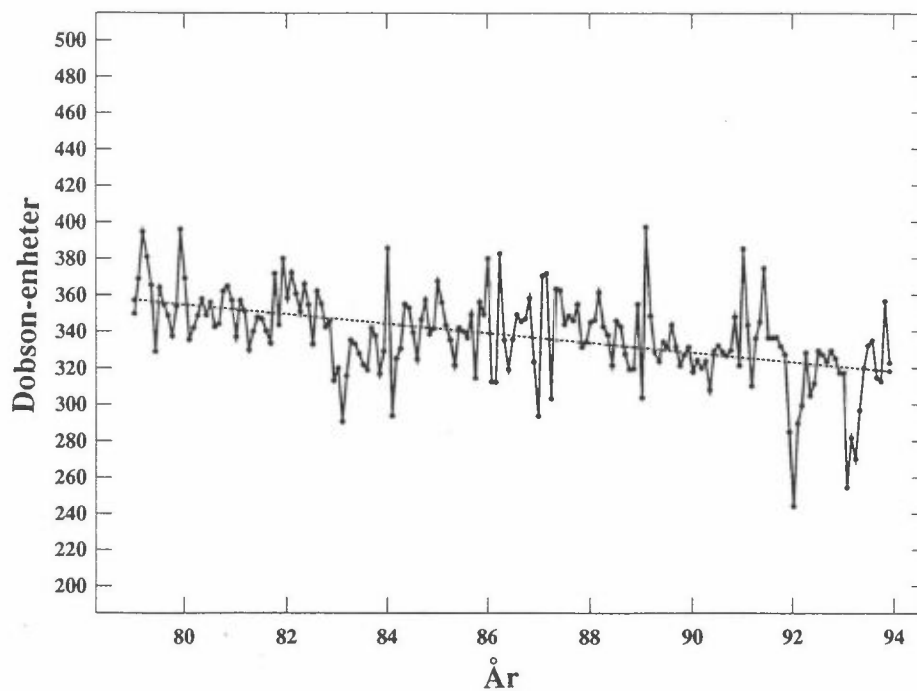
Figur 12: Variasjon i ozonmengden over Oslo 1979-1993 målt med Dobson-instrumentet basert på månedsmidler.



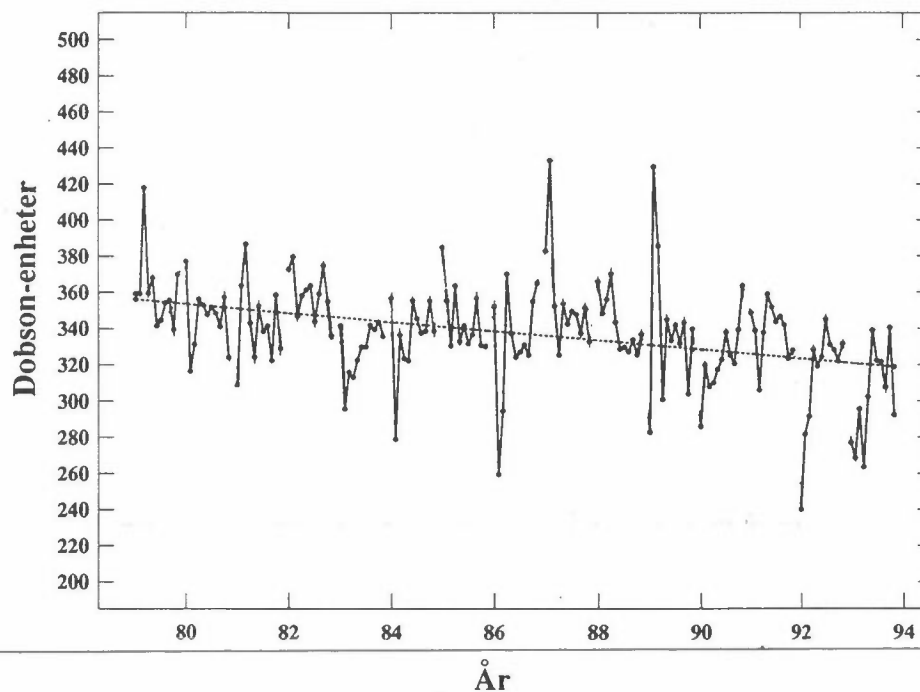
Figur 13: Variasjon i ozonmengden over Oslo 1979-1993 målt med Dobson-instrumentet som vist i figur 13, men her er sesongvariasjonene fjernet. De månedlige variasjonene kommer derfor tydeligere frem.



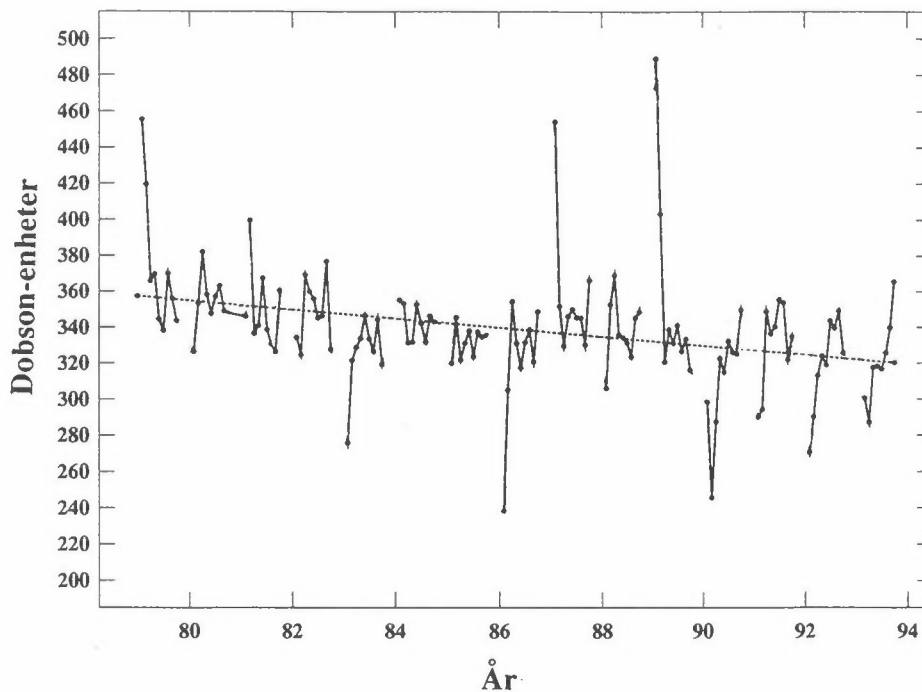
Figur 14: Årsmidler i perioden 1979-1993 for Dobson-målingene i Oslo. Figuren viser avviket i prosent fra langtids årsmiddelet ($100 \cdot [\text{årsmiddel} - \text{langtidsmiddel}] / \text{langtidsmiddel}$).



Figur 15: Variasjon i ozonmengden over Oslo 1979-1993 målt med TOMS. Dataene for 1979-1992 er fra Nimbus 7-satellitten, mens datene for 1993 er fra Meteor 3-satellitten. Sesongvariasjonene er fjernet.



Figur 16: Variasjon i ozonmengden over Tromsø 1979-1993 målt med TOMS. Dataene for 1979-1992 er fra Nimbus 7-satellitten, mens datene for 1993 er fra Meteor 3-satellitten. Sesongvariasjonene er fjernet.



Figur 17: Variasjon i ozonmengden over Longyearbyen 1979-1993 målt med TOMS. Dataene for 1979-1992 er fra Nimbus 7-satellitten, mens dataene for 1993 er fra Meteor 3-satellitten. Sesongvariasjonene er fjernet.

Resultatet av trendanalysen for de tre stasjonene er vist i tabell 2.

Tabell 2: Endring i ozonmengde i prosent pr. år for perioden 1.1.1979 til 31.12.1993. Tallene i parentes angir usikkerheten (1 standardavvik). Pga. mørketid er trenden på årsbasis for Tromsø basert på målinger i tidsrommet primo februar - primo november, og for Longyearbyen ultimo februar - ultimo oktober. Trenden for TOMS må betraktes som usikker (data fra to satellitter er benyttet i analysen).

	Oslo		Tromsø TOMS	Longyearbyen TOMS
	Dobson	TOMS		
Desember-mars	-0,73 (0,22)	-1,15 (0,26)		
Mars-august	-0,27 (0,13)	-0,51 (0,13)	-0,44 (0,13)	-0,58 (0,18)
Hele året	-0,44 (0,10)	-0,77 (0,11)	-0,78 (0,15)	-0,90 (0,24)

3. Måling med Dobson, Brewer og TOMS

3.1. Målemetoder

Dobson-instrumentet (Komhyr, 1990) måler et intensitetsforhold ved to forskjellige bølgelengder i det ultrafiolette området. Den ene bølgelengden absorberes sterkt av ozon og den andre svakt. Den sikreste metoden er å måle direkte mot solen. Siden det målte intensitetsforholdet er bestemt av bl.a. ozonmengden, kan denne beregnes. Instrumentet kan måle på fem forskjellige bølgelengdepar: A, B, C, D og C'. Standardmetoden er å benytte en kombinasjon av A- og D-paret, en såkalt AD-måling. Dette minimaliserer påvirkningen av spredning i atmosfæren og dessuten SO₂-innholdet i atmosfæren. I Oslo har C-paret vært benyttet i stor grad. Grunnen er at AD-målinger krever høyere sol enn C-målinger for å gi pålitelige ozonverdier. Med C-målinger blir derfor målesesongen betydelig utvidet. Med Dobson-instrumentet er det også mulig å måle på det direkte månelys. Slike målinger gir en god indikasjon på kvaliteten av senitlysmålinger om vinteren.

Senitlysmålinger benyttes i stor grad på våre breddegrader. Dette skyldes at skyet vær og lav sol om vinteren umuliggjør direkte solmålinger. En senitlysmåling går ut på at man måler på det spredte sollyset fra senit. Ozonmengden bestemmes ved et kurvekart som viser sammenhengen mellom ozonmengde, solhøyde og det målte intensitetsforhold. Et slikt kurvekart bestemmes på grunnlag av et stort antall av samtidige solmålinger (som gir ozonmengden direkte) og senitlysmålinger. Senitlysmålinger er mer usikre enn direkte solmålinger. Dette skyldes at det målte senitlys i tillegg til absorpsjon pga. ozon også påvirkes av høydefordelingen av ozon. Dette gjelder spesielt når solen står lavt på himmelen. Dessuten påvirkes senitlysmålinger av skyer. Ved å også måle med C'-paret, som påvirkes svært lite av ozon, kan man empirisk lage skykorreksjons-tabeller.

I første rekke skiller Brewer-instrumentet seg fra Dobson-instrumentet ved at det er automatisk, slik at en kan registrere etter et oppsatt program (Brewer-manual, 1990). Fordelen med Brewer-instrumentet er at man kan foreta et mye større antall målinger enn hva som er praktisk mulig med Dobson-instrumentet. Mens Dobson-instrumentet benytter to eller fire bølgelengder i UV-området til ozonmåling, benytter Brewer-instrumenter fem. Ozonmengden kan bestemmes ved å måle på direkte sollys, direkte månelys eller spredt lys fra senit. Brewer-instrumentet muliggjør også måling av NO₂ og SO₂ i tillegg til ozon. Videre er det en egen enhet som gjør det mulig å måle UV-B-spekteret av strålingen fra solen som når bakken.

Satellittene Nimbus 7 og Meteor 3 benytter et ozonmåleinstrument, TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). Ultrafiolett stråling fra solen trenger ned i atmosfæren, passerer ozonlaget hvor noe absorberes, deretter reflekteres den gjenværende ultrafiolette strålingen fra bakken og skyene i troposfæren, og passerer ozonlaget en gang til med ytterligere absorpsjon. Strålingsintensiteten registreres av satellitten. Ved å måle svekkingsgraden kan man ut fra slike målinger beregne hvor mye ozon lyset har passert. Ved målingene benyttes flere bølgelengder. Denne teknikken har mye til felles med senitlysteknikken, som benyttes med Dobson- og Brewer-instrumentet.

3.2. Sammenligning av målinger med Dobson-, Brewer- og TOMS-instrumentene

Både Dobson-, Brewer- og TOMS-instrumentene benytter seg av en optisk metode for bestemmelse av ozonmengden i atmosfæren. Felles for alle er at de registrerer svekkingen av ultrafiolett sollyst ved flere smale bølgelengdebånd. Bølgelengdene som det måles på er imidlertid forskjellig for instrumentene. Dobson- og Brewer-instrumentet måler både det direkte sollyset og på senitlyset som når bakken. TOMS-instrumentene i Nimbus 7-satellitten og Meteor 3-satellitten, derimot, måler det tilbakespredte ultrafiolette sollyset, dvs. at metoden har mange fellestrekk med senitlysmetoden benyttet med Dobson- og Brewer-instrumentene bortsett fra at det sollyset som TOMS registrerer har passert gjennom atmosfæren to ganger. Lyset som måles av de forskjellige instrumentene har ikke passert gjennom nøyaktig samme del av atmosfæren. I tillegg måles det ikke alltid på samme tidspunkt. Alle disse momentene bidrar til at instrumentene ikke gir eksakt samme resultat.

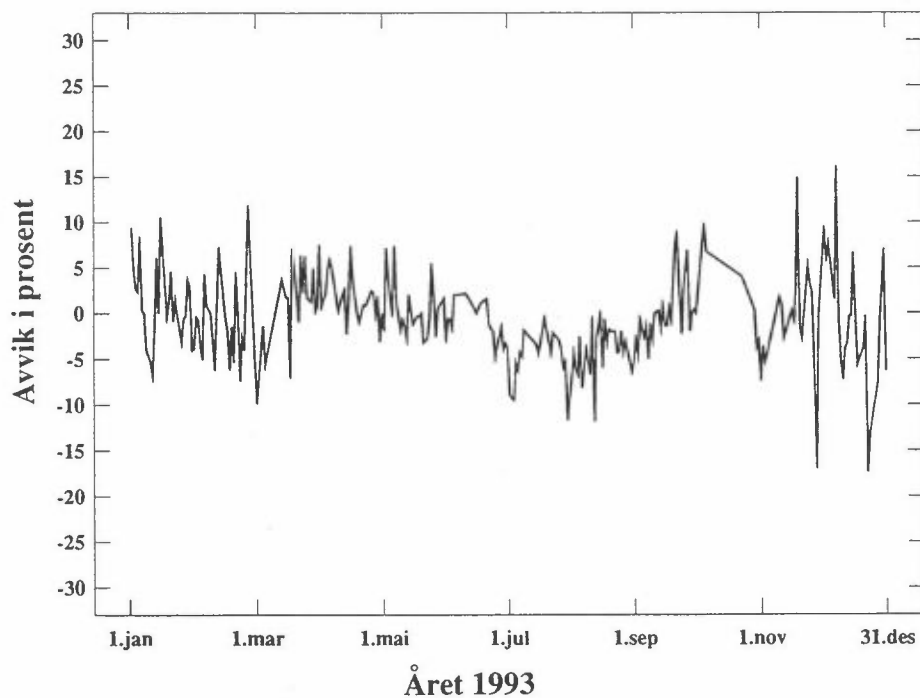
Partikler i stratosfæren, f.eks. fra vulkanutbrudd, påvirker målinger med TOMS (kapittel 4). Dette instrumentet er også avhengig av den vertikale høydefordeling av ozon. En nøyaktig bestemmelse av totalozon fra målinger med TOMS forutsetter at det benyttes en korrekt klimatologi for høydefordelingen av ozon under analyse av dataene. Det har vist seg at denne klimatologien foreløpig ikke er god nok. Dette har størst betydning for høye breddegrader. Dette bidrar til usikkerhet i bestemmelse av totalozon.

Figur 18 viser prosentvis avvik for Dobson i forhold til TOMS (Meteor 3) for Oslo i 1993. På årsbasis er dette avviket $-0,65\%$. Avviket varierer i løpet av året og standardavviket er stort, $4,76\%$. Overensstemmelsen mellom Meteor 3 og Dobson er derfor mindre god.

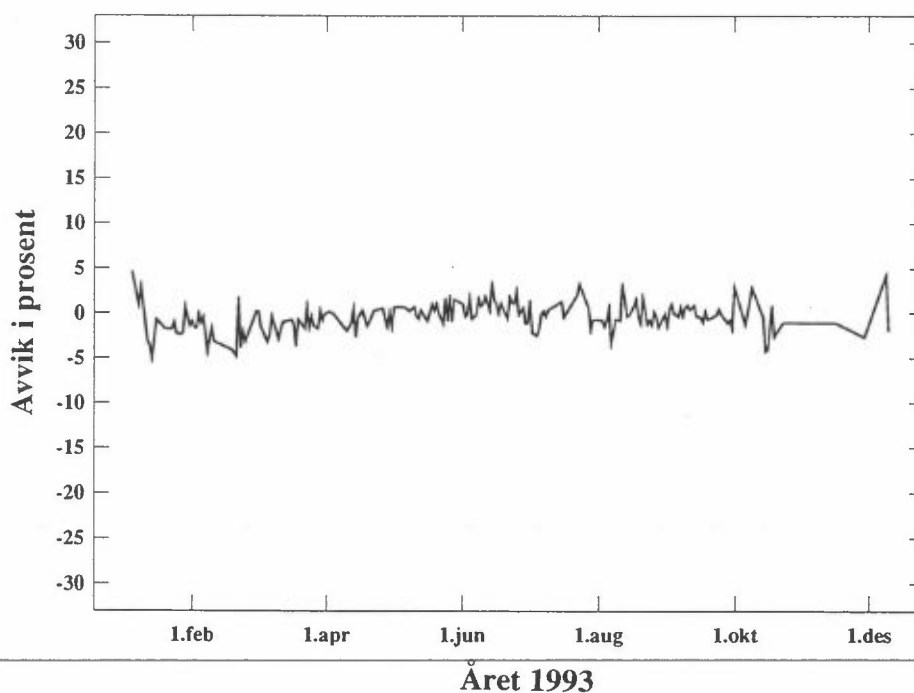
Figur 19 viser prosentvis avvik for Brewer i forhold til Dobson for Oslo i 1993. Avviket er $-0,36\%$ på årsbasis og viser ingen utpreget årstidsvariasjon. Standardavviket er $1,66\%$. Overensstemmelsen mellom Brewer og Dobson er dermed meget god.

Meteor 3-satellitten ble skutt opp sommeren 1991 mens Nimbus 7-satellitten sluttet å sende data 5. mai 93. Vi har derfor ca. 2 år hvor satellittene overlapper hverandre. Det prosentvise avviket mellom Nimbus 7 og Meteor 3 for perioden 1991 til 1993 for Oslo er vist i figur 20. Overensstemmelsen mellom TOMS-instrumentene er best omkring midtsommer. Ellers i året er forskjellen sterkt varierende. Mens Nimbus 7-satellittens bane var tilnærmet solsynkron (dvs. satellitten måler ved tidspunkter nær lokal middag når solen står høyest), har Meteor 3-satellitten en svært komplisert bane.

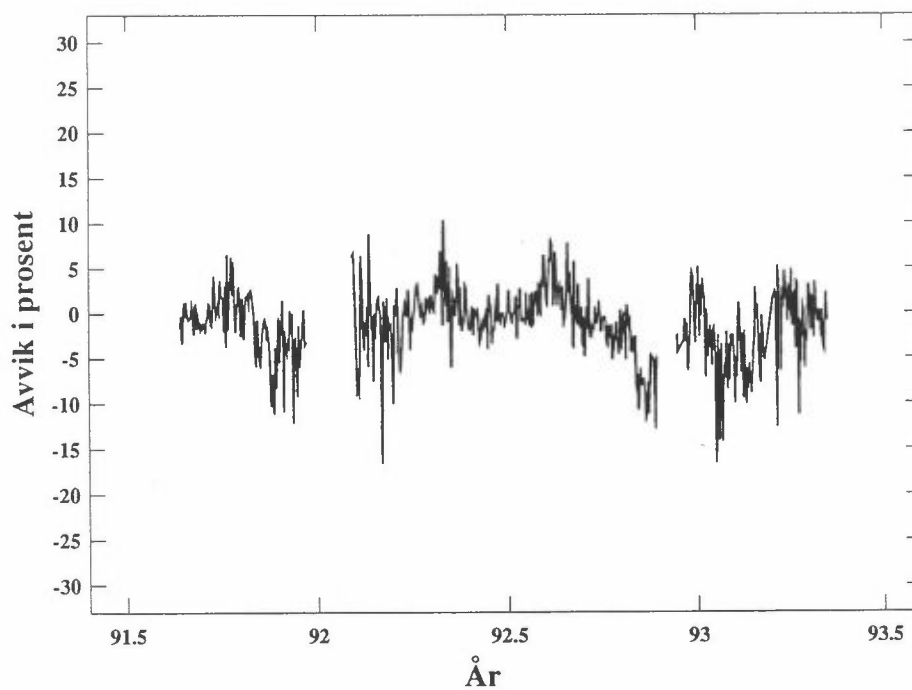
Figur 21 viser prosentvis avvik for Dobson i forhold til TOMS (Meteor 3) for Tromsø i første halvdel av 1993. Det prosentvise avviket er for denne perioden $2,1\%$ men standardavviket er svært stort, $8,2\%$.



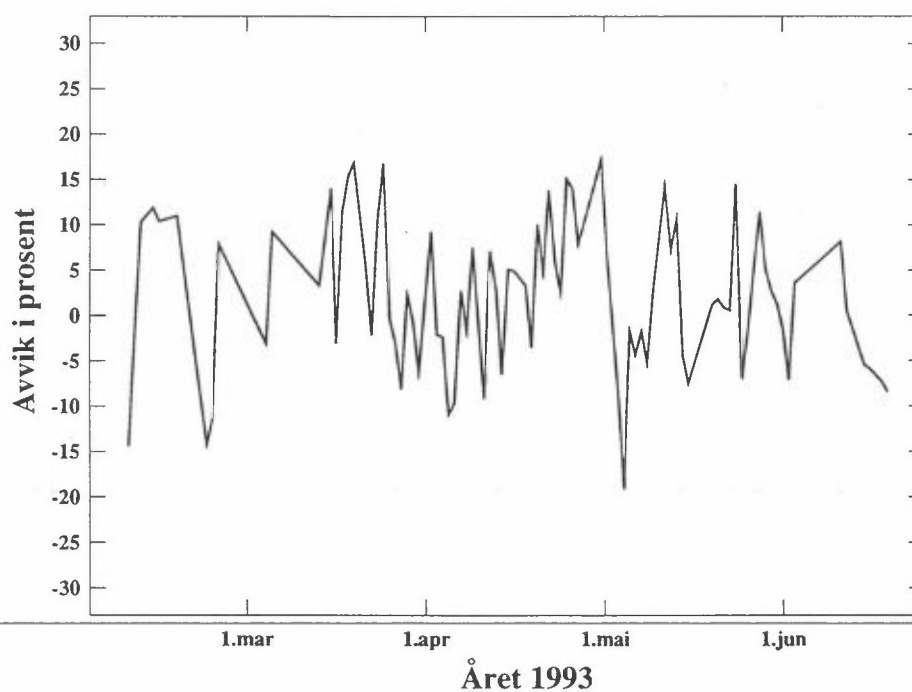
Figur 18: Sammenligning mellom målinger utført med Dobson og TOMS (Meteor 3) for Oslo i 1993, $100 \cdot (\text{Dobson} - \text{TOMS}) / \text{Dobson}$.



Figur 19: Sammenligning mellom målinger utført med Dobson og Brewer for Oslo i 1993, $100 \cdot (\text{Dobson} - \text{Brewer}) / \text{Dobson}$.



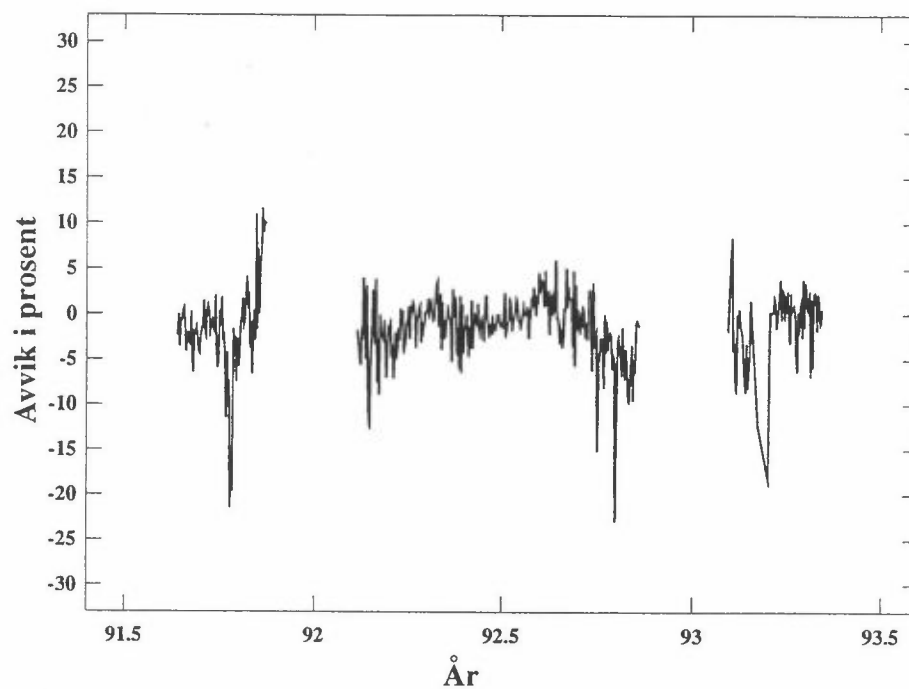
Figur 20: Sammenligning mellom målinger utført med TOMS-instrumentene ombord i Nimbus 7 og Meteor 3-satellittene for Oslo i perioden 1991 til 1993, $100 * (\text{Nimbus 7} - \text{Meteor 3}) / \text{Nimbus 7}$.



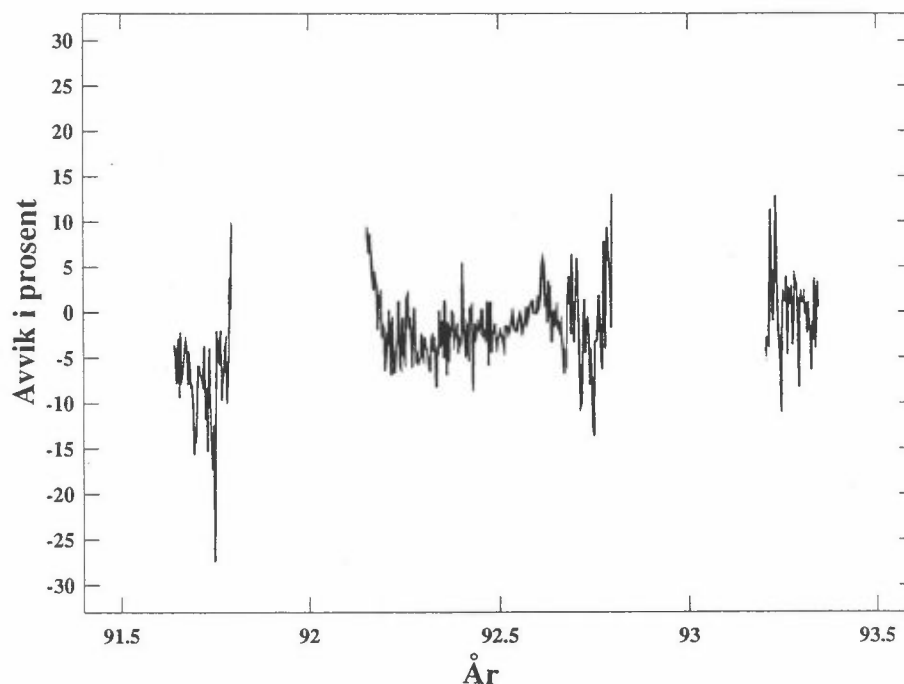
Figur 21: Sammenligning mellom målinger utført med Dobson og TOMS (Meteor 3) for Tromsø i første halvdel av 1993, $100 * (\text{Dobson} - \text{TOMS}) / \text{Dobson}$.

Figur 22 viser avviket i prosent for TOMS (Nimbus 7) i forhold til TOMS (Meteor 3) for Tromsø i perioden juli 1991 til desember 1993. Som for Oslo er overensstemmelsen best i sommermånedene, men ellers i året er forskjellen sterkt varierende.

Figur 23 viser tilsvarende for Longyearbyen.



Figur 22: Sammenligning mellom målinger utført med TOMS-instrumentene ombord i Nimbus 7 og Meteor 3-satellittene for Tromsø i perioden 1991 til 1993, $100 \cdot (\text{Nimbus 7} - \text{Meteor 3}) / \text{Nimbus 7}$.



Figur 23: Sammenligning mellom målinger utført med TOMS-instrumentene ombord i Nimbus 7 og Meteor 3-satellittene for Longyearbyen i perioden 1991 til 1993, $100 \cdot (\text{Nimbus 7} - \text{Meteor 3}) / \text{Nimbus 7}$.

Sammenligningen mellom Dobson, Brewer og de to TOMS-instrumentene for 1993 er vist i tabell 3.

Tabell 3: Sammenligning mellom Dobson, Brewer, TOMS (Nimbus 7) og TOMS (Meteor 3) for Oslo, Tromsø og Longyearbyen i 1993. Avvikene er gitt i %. Tallene i parentes angir usikkerheten (1 standardavvik).

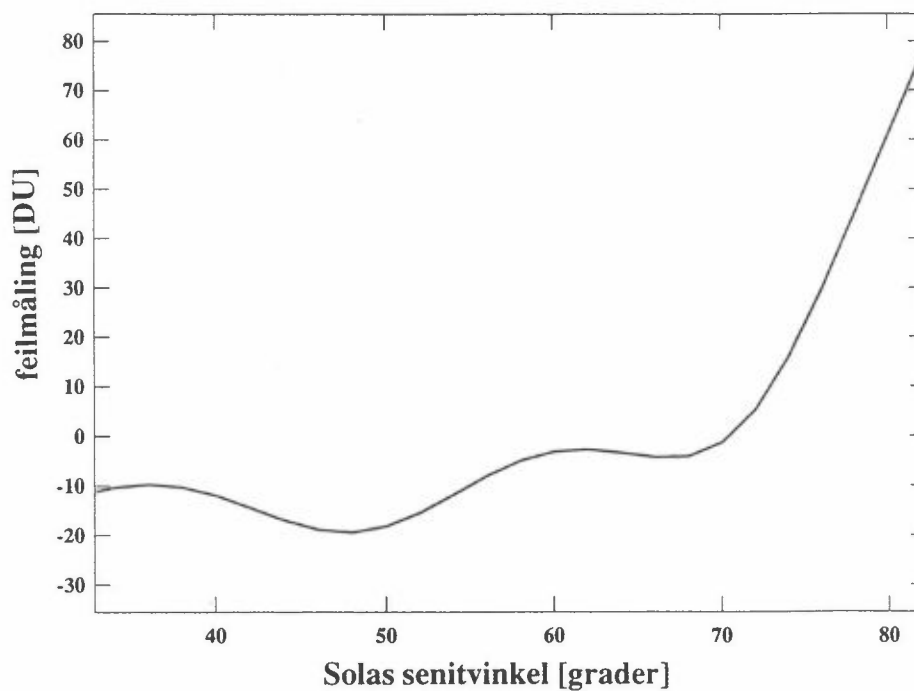
	Oslo – Brew./ Dob.	(Dob. – Meteor)/ Dob.	(Nimbus – Meteor)/ Nimbus
Oslo	-0,36 (1,66)	-0,65 (4,76)	-1,14 (3,89)
Tromsø		2,18 (8,21)	-0,92 (4,20)
Longyearbyen			-2,18 (4,69)

4. Effekter av stratosfæriske partikler og ozonprofil på målinger med TOMS-instrumentet

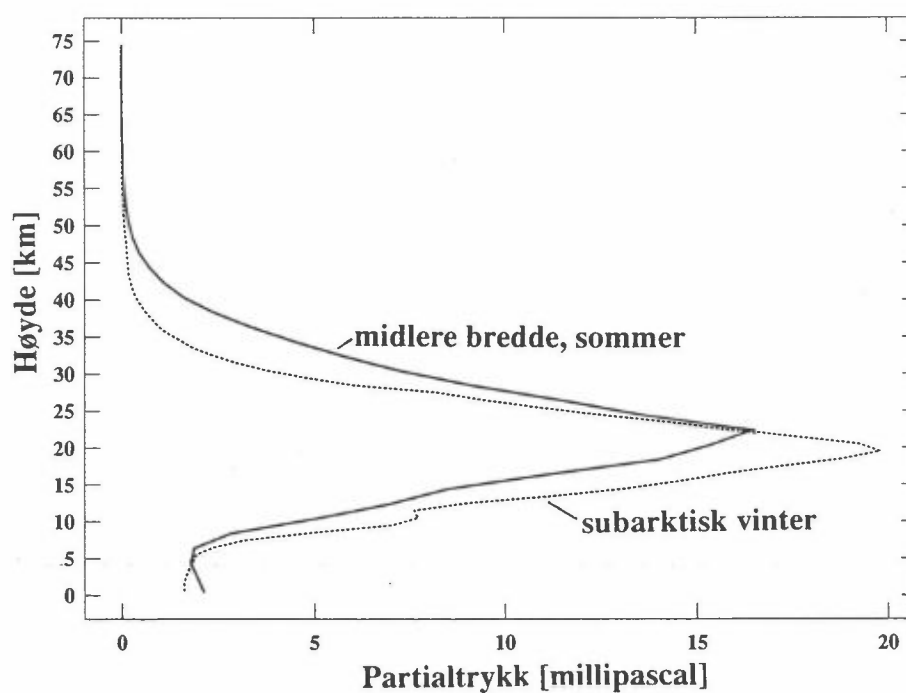
Satellittene Nimbus 7 og Meteor 3 benytter et ozonmåleinstrument, TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). Ozonmålinger utført med TOMS-instrumentet ombord i Nimbus 7-satellitten og Meteor 3-satellitten baseres på målinger av tilbakespredt lys fra solen. Ultrafiolett stråling fra solen trenger ned i atmosfæren, passerer ozonlaget hvor noe absorberes, deretter reflekteres den gjenværende ultrafiolette strålingen fra bakken og skyene i troposfæren, og passerer ozonlaget en gang til med ytterligere absorpsjon. Strålingsintensiteten registreres av satellitten. Ved å kombinere de målte strålingsintensitetene med strålingstransportberegninger kan man beregne hvor mye ozon lyset har passert. Ved målingene benyttes flere bølgelengdepar. Den metoden som benyttes for å bestemme ozonmengden fra TOMS-målinger forutsetter at stratosfæren er klar. Partikler og støv fra vulkanutbrudd vil derfor kunne føre til feil i bestemmelsen av den total ozonmengde. Sommeren 1991 sendte vulkanen Pinatubo på Filippinene opp store mengder partikler opp i stratosfæren. I den europeiske ozonkampanjen EASOE i 1991/92 ble partikkelinnholdet og dens høydefordeling i stratosfæren målt med lidar bl.a. fra Sodankylä i Finland. Denne informasjonen kan benyttes i en strålingstransportmodell for å simulere effekten av hvordan vulkanstøvet fra Pinatubo påvirker målinger med TOMS (Dahlback et al., 1994).

Figur 24 viser den beregnede målefeil for satellitten i Dobson-enheter for verdier av solas senitvinkler fra 35° (midt på dagen midt-sommers i Sør-Norge) til 90° (solnedgang). Negativ målefeil betyr at satellitten overestimerer. I beregningene ligger vulkan-støvet i ca. 20 km høyde. For senitvinkler mindre enn ca 70° vil satellitten svakt overestimere ozonmålingene, mens for store senitvinkler vil satellitten underestimere. For senitvinkler større enn 80° (som dekker store perioder av vinteren på våre breddegrader) blir underestimeringen stor. Med vulkanstøvlaget i lavere høyder vil satellittens målefeil bli mindre.

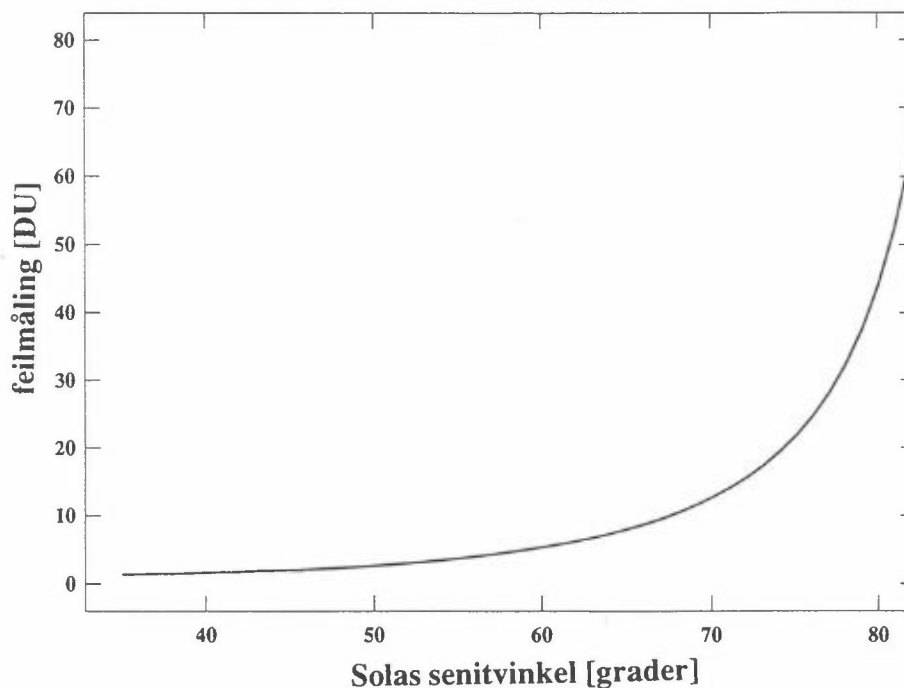
Målingene med TOMS er i tillegg til totalozon også påvirket av ozonprofilen. I algoritmen for å bestemme totalozon benyttes standardprofiler (McPeters et al., 1993). Dette betyr at hvis den virkelige profilen avviker fra den antatte profilen benyttet i algoritmen vil feil i den beregnede ozonmengden kunne oppstå. Spesielt om vinteren og om våren vil de virkelige ozonprofilene kunne avvike fra standardprofilene som TOMS-algoritmen benytter. Med modellberegninger kan vi simulere hvilken effekt forskjellige profiler har på ozonmålinger med TOMS. Profilene som er benyttet i beregningene er vist i figur 25. Den ene profilen representerer en typisk sub-arktisk vinterprofil og den andre en typisk profil for midlere breddegrader. Figur 26 viser beregnet målefeil i Dobson-enheter hvis det i algoritmen antas en sub-arktisk vinter-profil mens den reelle er en profil for midlere breddegrader. Målefeilen for små senitvinkler (høy sol) er liten, mens feilen øker med synkende sol. Dette illustrerer at målefeilen pga. feil anslått ozonprofil er liten om sommeren (høy sol), mens målefeilen om vinteren kan være stor. TOMS-målinger ved lav sol (vinter) må derfor betraktes som usikre.



Figur 24: Beregnet målefeil for TOMS-instrumentet med vulkanstøv i ca. 20 km høyde for senitvinkler fra 35°- 90°.



Figur 25: Standard ozonprofiler for atmosfæren ved midlere breddegrader og for en sub-arktisk vinteratmosfære. Profilene er benyttet i en strålingstransport-modell for å bestemme hvordan variasjon i ozonprofilen påvirker målinger med TOMS-instrumentet (se figur 26).



Figur 26: Beregnet målefeil for TOMS-instrumentet når ozonprofilen er galt anslått. Profilene i figur 25 er benyttet i beregningene.

5. Referanser

Brewer MKIV Spectrophotometer (1990) Operations Manual. OM-BA-CO1/B, May 1, 1990.

Dahlback, A., Rairoux, P., Stein, B., Del Guasta, M., Stefanutti, L., Larsen, N. and Braathen, G. (1994) Effects of stratospheric aerosols from the Mt. Pintatubo eruption on ozone measurements at Sodankylä, Finland in 1991/92. *Geophys. Res. Lett.*, in press.

Henriksen, K. og Svenøe, T. (1993) Ozonmålinger med Dobson-instrumentet ved Universitetet i Tromsø i 1993. (Måledata).

Komhyr, W.D. (1990) Operations handbok - Ozone observations with a Dobson spectrophotometer. (WMO Global research and Monitoring Project, Report no. 6).

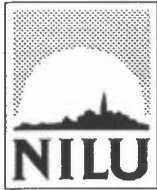
Larsen, S.H.H. (1993) Ozonmålinger med Dobson-instrumentet ved Universitetet i Oslo 1979-1993. (Måledata).

McPeters, R.D., Krueger, A.J., Barthia, P.K., Herman, J.R., Oaks, A., Ziuddin, A., Cebula, R.P., Schlesinger, B.M., Swisler, T., Taylor, S.L., Torres, O., and Wellemeyer, C.G. (1993) Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide. (NASA Reference Publication 1323).

Rabbe, Å. (1994). Personlig samtale.

Rabbe, Å., Larsen, S.H.H. (1994) On the low ozone values over the Scandinavia during winter 1991-1992. Sendt til *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*.

Tønnessen, F. et al. (1993) Ozonmålinger med Dobson- og Brewer-instrumentet ved Universitetet i Oslo i 1993. (Måledata).



Norsk institutt for luftforskning (NILU)
Postboks 100, N-2007 Kjeller

RAPPORTTYPE OPPDRAKS RAPPORT	RAPPORT NR. OR 28/94	ISBN-82-425-0577-2	
DATO 14.9.94	ANSV. SIGN. <i>Storland</i>	ANT. SIDER 27	PRIS NOK 45,-
TITTEL Overvåking av ozonlaget Årsrapport 1993		PROSJEKTLEDER Geir O. Braathen	
		NILU PROSJEKT NR. O-8985.PR	
FORFATTER(E) Arne Dahlback, Geir O. Braathen og Frode Stordal		TILGJENGELIGHET * A	
		OPPDRAKSGIVERS REF.	
OPPDRAKSGIVER SFT Postboks 8100 Dep. 0032 OSLO			
STIKKORD Stratosfæreozon	Overvåking	Måledata	
REFERAT Rapporten presenterer måledata fra norske bakkestasjoner i 1993.			
TITLE Monitoring of the ozone layer. Annual report 1993.			
ABSTRACT Data for 1993 from the Norwegian Ozone Monitoring Programme are presented.			

* Kategorier: A Åpen - kan bestilles fra NILU
B Begrenset distribusjon
C Kan ikke utleveres