

NILU : TR 1/98  
REFERANSE : N-96114  
DATO : JANUAR 1998  
ISBN : 82-425-0954-9

# **Etablering av måleprogram for bestemmelse av utvekslingsprosesser mellom skogbestand og luft**

**Arne Semb**



**NILU**

**Norsk institutt for luftforskning**  
Norwegian Institute for Air Research  
Postboks 100 - N-2007 Kjeller - Norway

# Innhold

Side

<b>1. Innledning.....</b>	<b>2</b>
<b>2. Bestemmelse av energi- og masse- utveksling mellom skogbestand og lufta over skogbestanden.....</b>	<b>3</b>
<b>3. Valg av forsøksfelt.....</b>	<b>7</b>
<b>4. Installasjon, måleprogram, instrumenter.....</b>	<b>9</b>
4.1 Meteorologiske målinger.....	9
4.2 Måling av luftkonsentrasjoner.....	11
<b>5. Konklusjon og anbefalinger.....</b>	<b>14</b>
<b>6. Referanser:.....</b>	<b>14</b>

# Etablering av måleprogram for bestemmelse av utvekslingsprosesser mellom skogbestand og luft

## 1. Innledning

Jordsmonn og klima definerer de ytre vekstbetingelsene for et skogbestand. Vann og karbondioksid tilføres fra lufta, næringssalter dels fra jordsmonnet og dels fra luft og nedbør. I tillegg har jorda viktige funksjoner som reservoar for vann og næringsstoffer, mens solinnstrålingen sørger for energiforsyningen. Opptaket av karbondioksid gjennom plantenes spalteåpninger fører imidlertid også til vanntap gjennom fordampning, spalteåpningene er derfor utformet og fungerer slik at dette vanntapet skal være minst mulig. Gjennom spalteåpningene skjer det også opptak av gasser som ammoniakk, svoveldioksid, nitrogendioksid og ozon, som her får adgang til plantenes indre organer, og kan reagere med enzymer og stoffer i celledriften. En stor del av disse prosessene styres av diffusjonen gjennom spalteåpningene, men utvekslingen av luft mellom kronetaket og den frie luftmassen ovenfor spiller også en rolle. Denne utvekslingen omfatter også utveksling av vanndamp, varme, og av mekanisk energi i form av vindstress, og har vært et viktig studieområde for hydrologer og planteforskere (Monteith, 1975). Også partikler tas opp av vegetasjonen, men dette er en rent fysisk prosess, der også overflatens mikrostruktur spiller en vesentlig rolle. Betydningen av opptak og avsetning av gasser og partikler fikk stor aktualitet i forbindelse med prøvesprengningene av atombomber og Sellafield-uhellet i 1962, og interessen omkring sur nedbør og avsetning av forurensninger på stor skala i 1970-årene. Viktige arbeider er blant annet gjort av Chamberlain(1967), Hill(1971), Garland (1977), Fowler og Unsworth(1979) O'Dell et al(1977) og Hicks et al(1987). I Norge er det gjort undersøkelser av opptak av SO<sub>2</sub> og partikler i forbindelse med SNSF-prosjektet(Dollard og Vitols, 1980) og av avsetning på snøflater(Dovland og Hanssen, 1975; Dovland og Eliassen, 1976). Beregninger av tørravsetninger på landsbasis (Tørseth og Pedersen., 1994) i forbindelse med det nasjonale overvåkingsprogrammet for sur nedbør, baserer seg på disse erfaringene. Målte luftkonsentrasjonene, og opplysninger om markslag og klimaforhold benyttes sammen med anslåtte avsetningshastigheter til å beregne tørravsetningen. Svakheten med denne metoden er den manglende forbindelsen mellom den beregnede tørravsetningen og variasjonene i luftkonsentrasjoner og avsetningsforhold fra dag til dag og fra time til time. Beregningene kan likevel forsvares ved at tørravsetningene er av relativt liten betydning(10-20%) i forhold til den totale avsetningen som domineres av tilførsler med nedbøren. Kronedryppsmålinger(Aamlid,1992) kan benyttes som dokumentasjon og kontroll av beregningene for skogdekte områder. Slike målinger utføres rutinemessig i skogovervåkingsflatene(Solberg et al., 1997).

For ozon er eksponeringen først og fremst knyttet til opptak gjennom spalteåpningene, men ozon reagerer også med andre overflater i skogbestand, og med terpenener som skogen avgir. Opptaket av ozon, og vekselvirkningen mellom skogbestand og luftmassen over, er en viktig nøkkel til forståelsen av ozonkonsentrasjonens døgnvariasjon, og topografiens betydning for skogens

eksponering. Klima, og meteorologi er også viktig for skogen i mange andre sammenhenger, først og fremst i forhold til tilvekst og vitalitet. Siden skogovervåkingen i stor utstrekning består i å observere forhold som har sammenheng med skogens generelle sunnhetstilstand, er det viktig å registrere alle forhold som påvirker dette. Dette er grunnen til at det internasjonale samarbeidsprogrammet for skogskader under Konvensjonen om kontroll av grenseoverskridende luftforurensninger ønsker meteorologiske målinger som en del av skogovervåkingen. Dette gir også muligheter for bedre kvantifisering av tørravsetninger og ozoneksponering.

Forutsetningen for dette er at målingene blir foretatt på en slik måte, og at målestedet blir valgt slik at det er mulig å ekstrapolere resultatene og sette dem inn i en større sammenheng. I det følgende blir det redegjort nærmere for de forutsetninger og muligheter for å bestemme stoff- og energiutveksling over et skogbestand ved hjelp av mikrometeorologiske målinger. Gjennom befaringer er det sett på mulige lokaliseringer av et måletårn, og det er valgt et felt i Hurdal der det er bygget et måletårn i kombinasjon med et etablert skogovervåkingsfelt. Innledende vindmålinger viser at lokaliteten er godt egnet, men for å kunne foreta målinger over lengre tidsperioder er det nødvendig med permanent elektrisitetsforsyning og telefonkabel for dataoverføring.

Instrumentering og videre anvendelse av måletårnet blir beskrevet i forhold til planene om videre drift fra 1998.

## 2. Bestemmelse av energi- og masse- utveksling mellom skogbestand og lufta over skogbestanden.

Uttekslingen av mekanisk energi i form av friksjon mellom skogen og den frie luftmassen fører til en reduksjon i vindhastigheten som er gitt ved:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{k \cdot z} \cdot \Phi_M$$

der  $u_*$  er den såkalte friksjonsvindhastigheten, som er definert ved at den turbulente fluksen av mekanisk energi er  $\tau = \rho \times u_*^2$ . Her er  $u_{(z)}$  vindhastigheten,  $z$  er høyden over bakken,  $k$  er von Karmanns konstant og  $\Phi_M$  er en faktor som tar hensyn til temperaturendringen med høyden. Tilsvarende sammenhenger gjelder for temperaturgradienten og utveksling av termisk energi, og for konsentrasjonsgradienter og utveksling av vanndamp,  $\text{CO}_2$ , og forurensninger som  $\text{SO}_2$  og ozon.

Vi har for temperaturgradienten:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = - \frac{H}{\rho \cdot c_p \cdot k \cdot u_* \cdot z} \cdot \Phi_H,$$

for vanndamp:

$$\frac{\partial q}{\partial z} = -\frac{E}{\rho \cdot L_W \cdot k \cdot u_* \cdot z} \cdot \phi_W$$

For en gass som ozon vil sammenhengene mellom konsentrasjonsgradienten og fluksen  $F$  være gitt ved:

$$\frac{\partial c}{\partial z} = -\frac{F}{k \cdot u_* \cdot z} \cdot \phi$$

Etter Monin og Obukhov skal  $\phi_M, \phi_H, \phi_w$ , og  $\phi_s$  være funksjoner av  $z/L$  der  $L$  er definert ved:

$$L = -\frac{\rho \cdot C_p \cdot u_*^3 \cdot \theta}{k \cdot g \cdot H}$$

Ut fra målinger er det utviklet følgende empiriske relasjoner (Dyer og Hicks, 1970; Businger, 1971; Dyer, 1974):

Ustabile forhold:

$$\phi_H = \phi_W = \phi_S = (1 - 16(1 - z/L)^{-1/2}), \phi_M = (1 - 16(z/L))^{-1}$$

Stabile forhold:

$$\phi_H = \phi_W = \phi_S = \phi_M = 1 + 5(z/L)$$

Ut fra disse sammenhengene kan målte konsentrasjonsgradienter utnytted til å bestemme fluksene dersom  $L$  er kjent, eller en kan bestemme  $L$  ut fra målte temperatur- og vindgradienter.

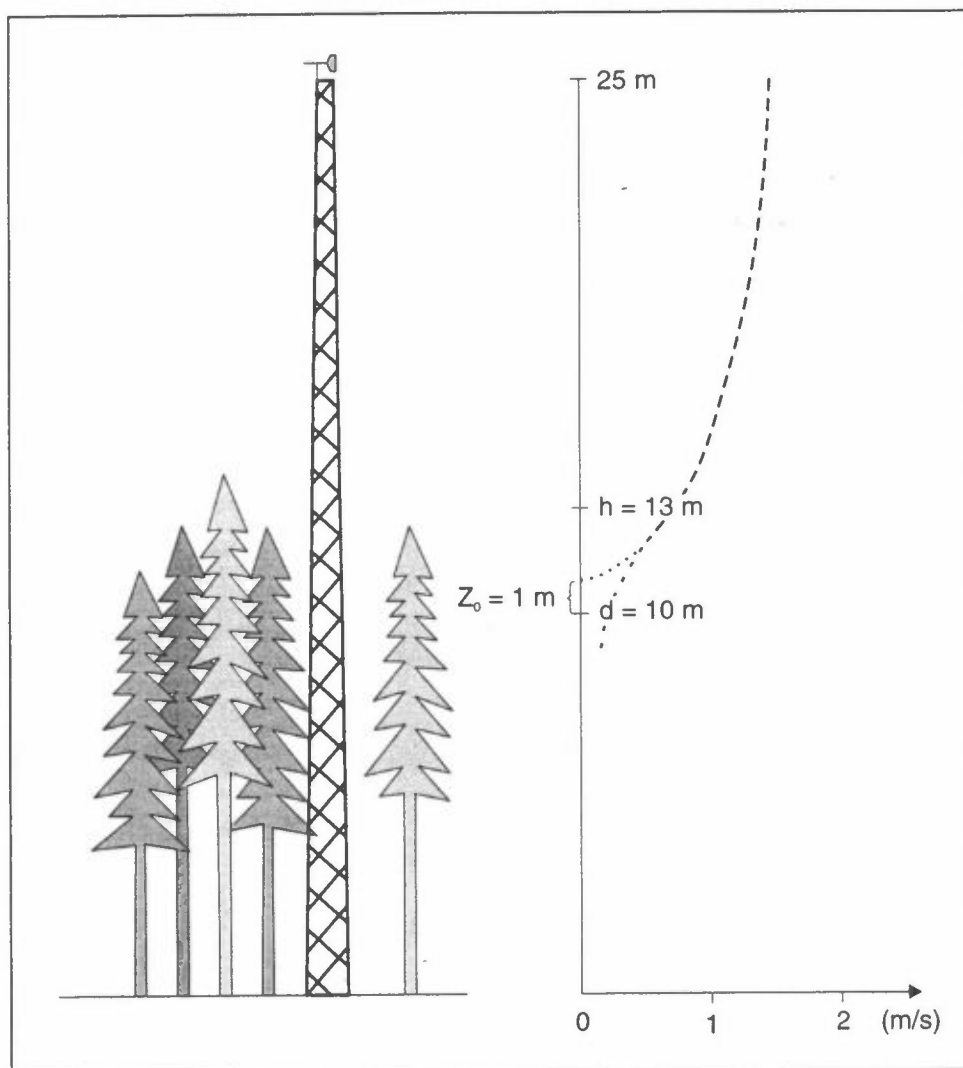
Det kan være nyttig å se på hvilke gradienter og flukser som er typiske over en skog med ca 15 m høye bartrær. Vi antar en vanlig sommerdag, med lett skyet vær og svak instabilitet. Varmefluksen, som skyldes soloppvarmingen av kronetaket, er satt til  $200 \text{ W/m}^2$ ,  $u_*$  til  $0.3 \text{ m/s}$  og temperaturen er  $+18^\circ\text{C}$ .

Figur 1 viser skjematisk vind- og temperaturfordelingen over og i skogen. Hvis vi i tillegg forutsetter at konsentrasjonen av ozon i 30m høyde er  $100 \mu\text{g/m}^3$ , og fluksen er  $0.8 \mu\text{g/m}^2\cdot\text{s}$  (tilsvarende en avsetningshastighet på  $0.8 \text{ cm/s}$ ), får vi en ozon-konsentrasjonsprofil som er gitt ved

$$\frac{\partial c}{\partial z} = -\frac{0.8}{0.4 \cdot 0.3 \cdot z} \cdot (1 - 16 \cdot z/20)^{-1/2}$$

For  $z=15\text{m}$  blir altså konsentrasjonsgradienten ca  $0.3 \mu\text{g/m}^4$ , eller  $0.3\%/m$ . Selv om denne forskjellen er svært liten, er den likevel målbar, særlig hvis avstanden

mellom målepunktene økes til 5-10 m. Forutsetningen er imidlertid at målingene utføres med ett instrument, slik at det ikke er nødvendig å ta hensyn til usikkerhet som skyldes kalibrering eller andre ulikheter mellom instrumenter.



Figur 1. Vindstyrkens avhengighet av høyden over et skogbestand. Vindprofilen er beregnet for en situasjon med positiv varme fluks på 200 W/m<sup>2</sup>, og en aerodynamisk ruhet ( $z_0$ ) lik 1 m. Høyden på trærne, ruhet og vindprofil er typisk for feltet i Hurdal.

Disse gradientene og overføringskonstantene forutsetter at feltet er homogent i horisontalretningen, og gjelder bare gjennomsnittsverdier av vind, temperatur og konsentrasjoner. Det er turbulenselementer, hvirvler, med karakteristisk dimensjon  $l \approx kz$ , som transporterer stoff og energi mellom overflaten og den frie luftstrømmen. Denne turbulensen kan observeres direkte, i form av endringer i vindhastigheten, og i form av vertikale vind-oppover eller nedover- med en karakteristisk varighet gitt ved  $\tau = l/u$ . En kan derfor måle fluksen direkte, under forutsetning av at målingene har tilstrekkelig tidsoppløsning. Fluksen av ozon er da gitt ved:

$$F = \overline{w \cdot c} = \overline{w' \cdot c'} + \overline{w} \cdot \overline{c}$$

der  $w'$  og  $c'$  står for fluktuasjoner omkring middelverdiene av  $w$  og  $c$ . Forutsetningen for at vi skal få en fluks ned mot skogbestandet er at middelverdien av ozonkonsentrasjonen er mindre når luften transporteres oppover, enn når luften transporteres fra den frie luftmassen ned mot skogbestandet. Middelverdien av vertikalvinden ( $w$ ) vil normalt være lite forskjellig fra 0, og det er derfor vanlig å se bort fra det siste leddet. Webb og medarbeidere(1980) har vist at det er nødvendig å ta hensyn til produktet av middelvindhastigheten og middelkonsentrasjonen når det er en betydelig fluks av varme og vanddamp fra bestandet. Responstiden for instrumentene som skal registrere vindhastighet og konsentrasjon er gitt ved størrelsen på de karakteristiske turbulensvirlvener, som altså øker med høyden over kronetaket. Med  $z=10\text{m}$ , og en vindhastighet på 2-5 m/s er altså kravet til responstiden av størrelsesorden 1-2 sekunder.

En brukbar gjennomsnittsverdi for fluksen krever en måleperiode av størrelsesorden 10-30 minutter, og sensorene for  $c$  og  $w$  skal ikke ha større innbyrdes avstand enn ca 20 cm.(Businger, 1986).

Både gradientmetoden og korrelasjonsmetoden stiller strenge krav til valg av målested og målenøyaktighet. Siden transporten av mekanisk energi, latent og følbar varme, og gasser styres av de samme vertikale utvekslingskoeffesientene, vil forholdstallet mellom gradienten og fluksen være det samme. Kjenner vi altså temperaturgradienten, og fluksen av følbar varme, kan vi bruke dette forholdstallet til å bestemme fluksen av for eksempel ozon ut fra dette forholdstallet. Bowens forholdstall er egentlig forholdet mellom fluksen av følbar varme og fluksen av latent varme i form av fordampet vann fra overflaten, gitt ved

$$\beta = F_{\theta}/F_q = \frac{c_p \cdot \Delta\theta}{L_v \cdot \Delta q}$$

Denne analogien kan enkelt utnyttes, ved at man måler fluksen av følbar eller latent varme ved hjelp av korrelasjonsmetoden, og bestemmer forholdstallet mellom fluks av varme og tørravsetning ved å se på forholdet mellom temperatur- og konsentrasjonsdifferensene mellom to nivåer over skogbestandet. Det gir:

$$F_c = \overline{w' \cdot \theta'} \frac{\Delta c}{\Delta \theta} = \overline{w' \cdot q'} \frac{\Delta c}{\Delta q}$$

I følge Businger(1986) er dette en sikrere metod for å bestemme fluksene på enn bare å benytte gradientene direkte, spesielt der måletedet ikke tilfredstiller fullt ut de strenge kriteriene som gjelder for anvendelse av gradientmetoden. Businger kritiserer sterkt mange tørravsetningsmålinger som er foretatt på basis a vind-, temperatur- og konsentrasjonsgradienter for nær bakken eller kronetaket, og viser til Garratt(1980) som har beskrevet en metode for å korrigere uttrykkene for vind- og temperaturgradientene når  $z < 100z_0$ . Garratt fant at ved  $z/z_0=10$  ble bare halvparten av utvekslingen av den mekaniske energien beskrevet av

vindgradienten, den andre halvparten ble overført ved variasjoner i lufttrykket, som igjen skyldes direkte kontakt mellom luften og turbulenselementene. Det er svært viktig å kjenne til disse begrensingene. Samtidige er det utvilsomt en fordel å etablere sammenhenger direkte til fenomener som innstråling og fordampning, der en lett kan bekrefte at de målte verdiene er i samsvar med kjente forhold og sammenhenger.

### 3. Valg av forsøksfelt.

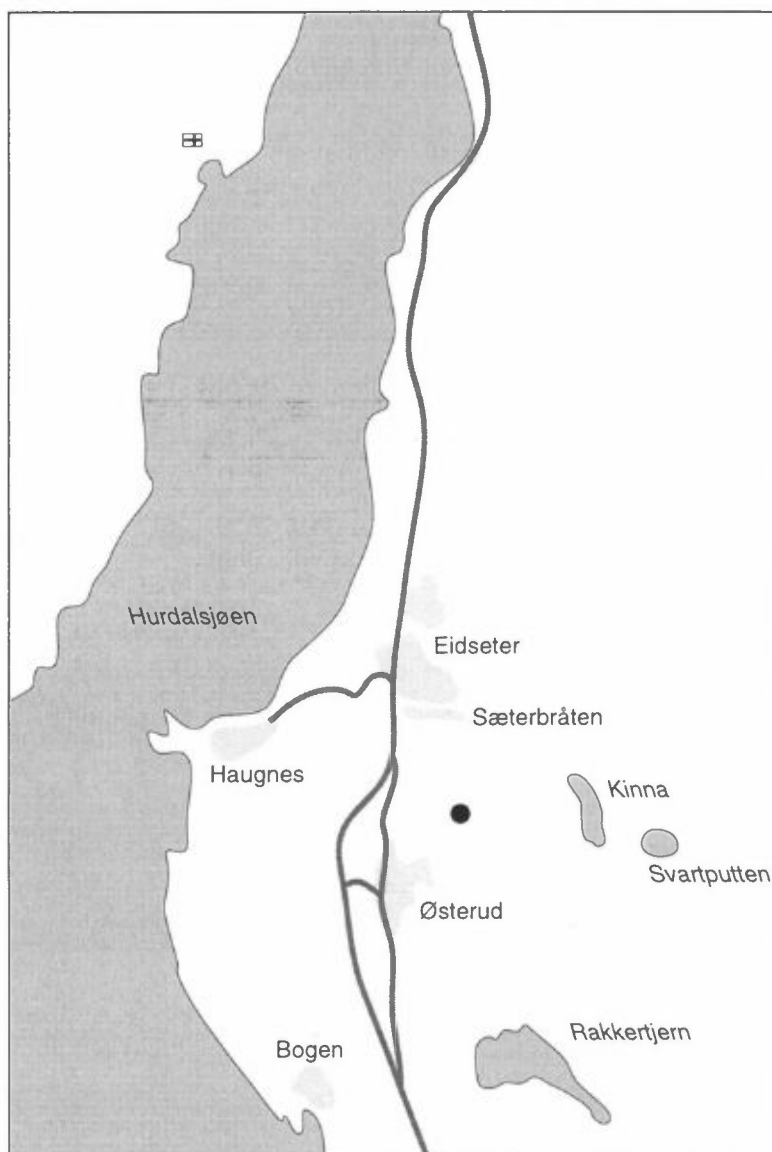
Måling av utvekslingen mellom skogbestand og den frie troposfæren stiller strenge krav til lokalitetene. Spesielt gjelder dette feltets homogenitet. Ideelt skal dette være homogent i en radius 1-2 km rundt målepunktet, dersom dette er 10 m over kronetaket.

Dersom gradientmetoden skal benyttes, er kravet at laveste målepunkt skal være minst 100 m over kronetaket, dette skulle i såfall kreve et areal med en diameter på 20 km.

Gradientmetoden kan derfor ikke benyttes i forbindelse med undersøkelser i skogbestand. I praksis viser det seg derfor at det er mulig å redusere på kravene til homogenitet, og erfaringer fra forsøksfelt i USA, Tyskland, Nederland, Danmark og Finland viser at en kan få gode resultater selv om oppvinds-avstanden bare er noen hundre meter. (McMillen, 1988; Enders et al., 1992, Erisman et al., 1997; Mikkelsen et al., 1996; Aurela et al., 1996) Tårnet som brukes bør gi muligheter for plassering av vindmåler og andre instrumenter inntil 20 m over bestandet.

Likevel er det vanskelig å finne felt som er egnet. Norske skogeindommer er oftest små, høyst noen hundre hektar, og ønsket om en mest mulig konstant avvirkning har gjort at det er sjelden å finne sammenhengende bestand som er større enn noen titalls hektar. Andre krav som tilgjengelighet, og muligheter for elektrisk strøm til måleinstrumenter, gjør utvalget enda mer begrenset. Hovedtreslaget bør være gran, og bestandet bør ha en alder på mellom 30- 50 år, og forøvrig være mest mulig representativt for norsk produksjonsskog. Et annet viktig hensyn er kombinasjonen med andre aktiviteter, spesielt at målingene kan kombineres med målinger som utføres i forbindelse med Statlig program for forurensningsovervåking under Statens forurensningstilsyn. Befaringer i områdene rundt Kjeller, og konsultasjoner med skogsjefen i Aurskog-Høland viste at det var meget vanskelig å finne arealer som egnet seg, og som kunne kombineres med andre måleaktiviteter. De aktuelle arealene i Høland var stort sett furuskog på områder med mye fjell i dagen.





Figur 2. Beliggenheten av feltet i Hurdal. Tårnets plassering er angitt med ●.

Norsk institutt for skogforskning disponerer et område i Hurdal som er eiet av Staten ved Opplysningsvesenets fond. Dette ble avvirket for 30-40 år siden, og har nå relativt homogen granskog over det meste av arealet, av en bonitet og alder som gjør at den er godt egnet til slike undersøkelser. Målingene på Nordmoen i Eidsvoll ble flyttet til Østerud like ved feltet i desember 1996, og har vist at stedet er betydelig mindre påvirket av lokale forurensinger enn Nordmoen. Området ventes heller ikke å bli påvirket av aktivitetene på den nye hovedflyplassen på Gardermoen. NISK har opprettet en overvåkingsflate som ligger sentralt i skogfeltet. Figur 2 viser en kartskisse av området, med lokalisering av overvåkingsflate og målepunkt.

Feltet ligger med svak helling mot nord-nordvest, 300 m over havet, og 125 m høyere enn Hurdalssjøen. Avstanden fra vei er 350 m (bomvei), mens hovedveien til Hurdal ligger noe lenger unna. Det er et mindre gårdbruk, Østerrud, syd-

sydvest for feltet, og noen flere gårder ca. 600 m mot nord. Mot øst er det skogområder i 300-400 m høyde opp mot Mistberget(663 m.o.h), som er vel 5 km unna. Skogen i området er relativt homeogen, og dominert av gran. Det er noen små hugstflater etter vindfall, en av disse ligger vest for målepunktet, og brukes til innsamling av nedbørprøver.

Hovedvindretninger vil stort sett være som ellers i Østlandsområdet, men med en viss kanalisering langs Hurdalssjøen i nordlig eller sydlig retning. Vind fra nord, og fra syd-sydøstlig retning vil være dominerende.

#### **4. Installasjon, måleprogram, instrumenter.**

I løpet av våren 1997 ble det montert en 25 m høy mast på et plasstøpt betongfundament i forsøksfeltet. Masten er utført i en fagverkskonstruksjon, i seksjoner på 5 m lengde og har innvendige stige-trinn for klatring. Det er også montert en glideskinne for sikring. Måleutstyr kan settes fast på toppen av masten, eller langs masten i ulike høyder. Det er også mulig å montere en teleskopisk forlengelse av masten, slik at den høyeste måleplattformen blir 30 m over bakken. Tårnet skal tjene som plattform for meteorologiske målinger, og for måling av luftkonsentrasjoner i ulike høyder.

##### **4.1 Meteorologiske målinger.**

Måling av vind i toppen av tårnet bør foretas med et instrument som måler vind i 3 retninger. Tradisjonelle propelleranemometere har en viss treghet, og friksjon gjør også at responsen ikke er ideell. Hicks(1972) har imidlertid vist at propelleranemometer kan brukes, men at det kan være nødvendig å korrigere resultatene. Måling av vindstress 5 m over bakken ved en vindhastighet på 5 m/s ga således 8.5% for lave resultater, på grunn av at propelleranemometeret ikke reagerer på raske fluktuasjoner i vindhastigheten. Det er også uheldig at propellerne på kommersielle instrumenter står relativt nær hverandre, aksene bør forlenges slik at disse ikke påvirker hverandre.

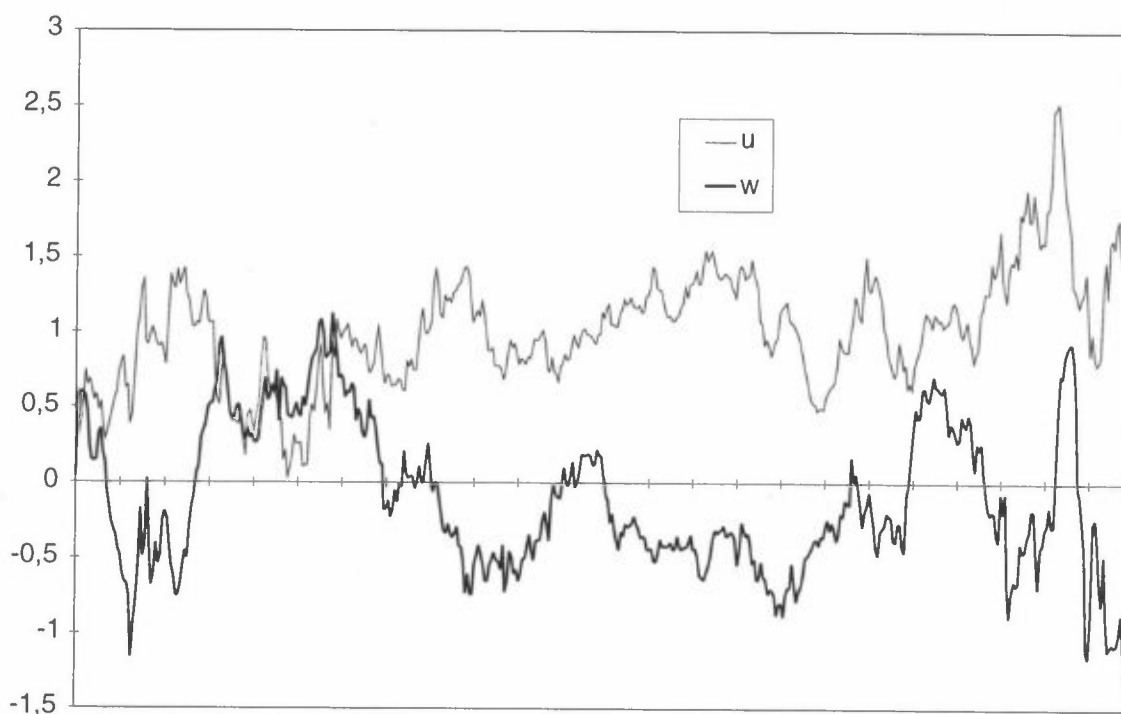
Doppler-anemometere basert på ultralyd har vesentlig bedre tidsoppløsning og er derfor spesielt godt egnet for grenselagsundersøkelser.

NILU har benyttet 3-dimensjonale propelleranemometre, og har utviklet loggerprogram for disse i forbindelse med lokalmeteorologiske undersøkelser. Et doppleranemometer er også innkjøpt og loggeren er tilpasset dette instrumentet. I begge tilfeller får en data for horisontal vindstyrke og vindretning, og vertikalvind som samtidige verdier. Propelleranemometeret gir muligheter for registrering av middelverdier hvert 2 sekund, mens doppleranemometeret har mulighet for registrering 4 ganger i sekundet. Begge disse instrumentene kan således brukes i Hurdal.

Figur 3 viser eksempel på registreringer av vind i toppen av masten. Målingene ble foretatt i relativt stille, overskyet vær, mellom kl 15 og kl 16 den 30. juni. Det er klar sammenheng mellom fluktuasjonene i horisontal og vertikal vind, og det er

også mulig å se at horisontalvinden er svakere når vertikalvinden er positiv enn når den er negativ.

Dette gir en negativ fluks av mekanisk energi som svarer til friksjonen mellom luften og underlaget. Middelerdien av  $u' \times w'$  svarer til  $u^* = 0.3$  m/s. Dette er konsistent med svak instabil luft ( $L = -20$ ) og en aerodynamisk ruhet på ca 1m som vist i Figur 1. Visuelt er det også mulig å se av registreringene at periodene med opp- og nedgående luftstrømmer, og fluktuasjonene i horisontalvinden, har en karakteristisk periode på 2-20 sekunder. Midlere horisontalvind var 1.7 m/s, med hovedvindretning fra nord og nordvest.



Figur 3. Eksempel på registrering av horisontal og vertikal vind over skogbestand fra tårnet i Hurdal. Utsnittet er for 2 minutter, hver delstrek på skalaen svarer til 5 s.

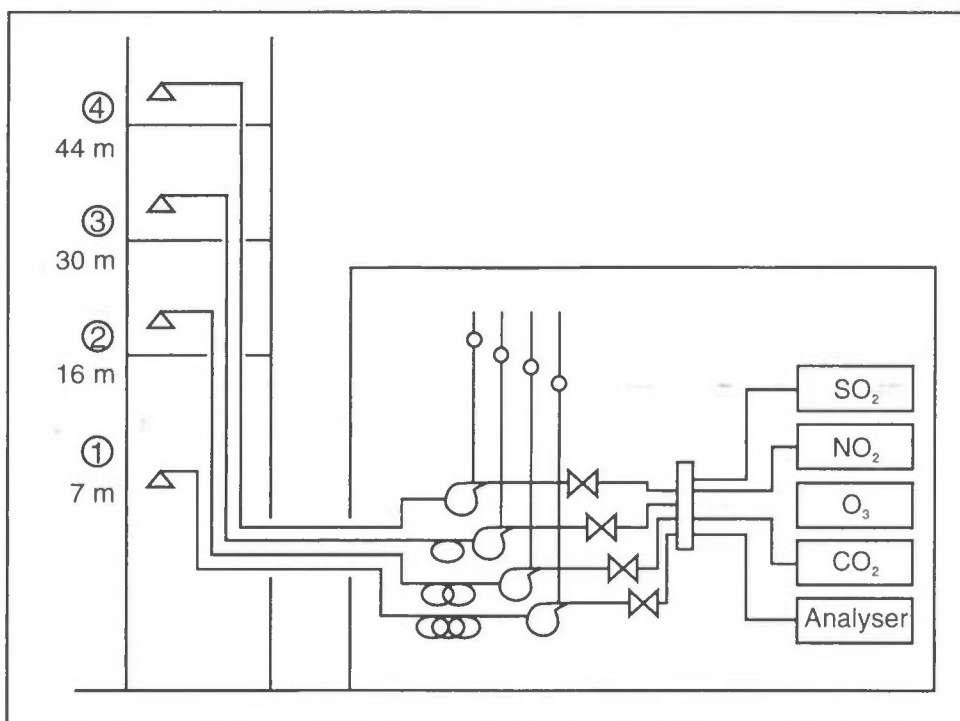
En slik registrering gir betydelige datamengder, og det er ikke mulig å ta vare på disse på en fornuftig måte uten å ha daglig tilsyn med måleresultatene. Det mest praktiske i denne sammenheng er overføring av data direkte til NILU for prosessering, eventuelt at prosesseringen foregår ved hjelp av loggerutstyret lokalt, og at bare de bearbejdede resultatene blir overført. I tillegg til vindmålinger i toppen av masten er det dessuten behov for temperaturmålinger i ulike høyder, 2, 10, 15, og 25 m over bakken. Temperaturregistreringen i 25 m høyde bør foretas med en termometer som har kort responstid, slik at fluksene av følbare varme kan registreres direkte som produktet av  $\theta' \times w'$ . Dette gjør det mulig å bruke Bowen-forholdstallet til å bestemme fluksene av andre stoffer ut fra sammenligning av konsentrasjons- og temperaturgradientene, som nevnt i foregående avsnitt.

Måling av innstråling er aktuelt for sammenligning med utgående varmeflukser. Dette er også rutinepregete målinger.

#### **4.2 Måling av luftkonsentrasjoner.**

En av hensikten med forsøksfeltet er å utnytte det rutinemessige overvåkingsmåleprogrammet, slik at det er mulig å benytte de målte luftkonsentrasjonene til avsetningsmålinger og målinger som gjør det mulig å foreta mer detaljerte avsetningsberegninger for barskog i Norge. Dette måleprogrammet omfatter:

- Ozon, direkte registrerende instrument, basert på UV
- Svoveldioksid, sulfat, nitrat+HNO<sub>3</sub>, ammonium(partikler) + ammoniakk(gass).
- NO<sub>2</sub>.



Figur 4. Arrangement for å måle gjennomsnittskonsentrasjoner i flere høyder.  
(Donon, Frankrike).

Av disse er det relativt enkelt å måle konsentrasjonsgradienten av ozon. Dette kan gjøres ved et prøvetakingsarrangement, som gjør at det samme instrumentet måler konsentrasjonen vekselvis i 2 eller flere høyder. Figur 4 viser skjematisk hvordan dette er ordnet ved målestasjonen Donon i Frankrike. Et lignende arrangement er gjennomført av Mikkelsen et al.(1996) i Danmark.

De andre komponentene måles ved prøvetaking og etterfølgende kjemiske analyser. Det vil være meget krevende å måle gradienter i konsentrasjonene av  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , og  $\text{HNO}_3$  ved de lave konsentrasjoner som forekommer i Hurdal, og på grunn av at prøvetakingstiden vil måtte være minst 8 timer er det tvilsomt om resultatene kan anvendes til kvantitative tørravsetningsberegninger. Kommersielle registrerende instrumenter er heller ikke pålitelige ved disse lave konsentrasjonene.

Derimot er det god grunn til å benytte samtidige målinger av luftkonsentrasjoner og meteorologiske forhold til å beregne tørravsetning ut fra forholdene hver enkelt dag. Dette, sammen med informasjon om opptaket av ozon, vil gi bedre innsikt i de klimatiske forholds betydning for tørravsetningen.

Avsetning av partikler er et spesielt krevende å bestemme eksperimentelt. Teoretiske betraktninger, og erfaringer, blant annet fra Nederland(Erisman et al., 1997) peker på at avsetningen øker med økende vindhastighet. Sammenhengen mellom målte konsentrasjoner og meteorologiske forhold er også her av betydning for beregning av avsetningen. Erisman et al.(1997) har også utviklet en modell for

beregning av aerosolavsetningen som kan brukes til sammenligning med kronedryppsmålinger i Hurdal.

Direkte registrering av den turbulente fluksen ved hjelp av korrelasjonsmetoden forutsetter måling av ozonkonsentrasjonen med et instrument som har en responstid på 1-2 sekunder. Det er også mulig å benytte instrumenter som reagerer langsommere, dersom det korrigeres for responstid og tidsforsinkelse.

Kommersielle ozonmonitører er i regelen basert på UV-absorpsjon i en lukket celle med en lysvei på 70 cm. Ved en ozonkonsentrasjon på 50 ppb svarer dette til en lysabsorpsjon ved 253.7 nm på bare 4.5%. For hele tiden å kunne måle ozonkonsentrasjonen mest mulig nøyaktig er det derfor hele tiden viktig å sammenligne lysintensiteten i luft med og uten ozon. Dette gjøres ved at instrumentet skifter i syklus mellom uteluft og luft der ozon er fjernet med et null-filter som inneholder aktivt kull og iodid. Dette instrumentet er derfor ikke egnet for å måle raske fluktuasjoner i ozonkonsentrasjonene. Andre aktuelle måleprinsipper er:

Coulometrisk bestemmelse av ozon, basert på oksidasjon av iodid til fritt jod.

Kjemiluminescens ved reaksjon av ozon med etylen.

Kjemiluminescens ved reaksjon av ozon med organiske fargestoffer.

Av disse metodene er oksidasjonen av iodid til fritt jod den klassiske metoden for bestemmelse av ozon. Små elektrokjemiske celler har vært brukt til å måle ozonkonsentrasjonen i luft, spesielt i forbindelse med måling med radiosondeballonger i stratosfæren. Responstiden for disse cellene varierer med konstruksjonen, spesielt elektrodens areal og luftgjennomstrømningen. I følge kalibreringsinstruksen for Vaisala-sonden skal responstiden være av størrelsesorden 20 sekunder for 80% respons. En del av denne responsen er imidlertid en ren tidsforsinkelse, slik at den reelle responstiden antagelig er av størrelsesorden 5 sekunder. Andre elektrokjemiske celler ser ut til å ha lignende responstider (Ames, 1979). Det var opprinnelig forutsatt å foreta ozonfluksmålinger med en slik elektrokjemisk ozonsensor, men det viste seg for komplisert, blant annet fordi Vaisala's konstruksjon forutsetter bruk av radiosondemottager med intern omregning av signalene til ozonkonsentrasjoner. En måtte i såfall ha konstruert en egen forsterker for å overføre signalene til dataloggeren.

Kjemiluminescensreaksjonen med etylen er en standardmetode for overvåkingen av ozon, med en oppgitt deteksjonsgrense på 3-4 ppb.

En lang rekke organiske forbindelser reagerer også med ozon, og disse fargereaksjonene kan utnyttes til å bestemme ozon. Spesielt gir kjemiluminescensreaksjoner med organiske fargestoffer mulighet til rask og følsom registrering av endringer i ozonkonsentrasjonen. Güsten et al. (1992) har benyttet dette prinsippet til å utvikle et spesialinstrument for ozon-fluksmålinger. Problemet ved kalibreringen av et slikt instrument er løst ved samtidig å måle absoluttkonsentrasjonen med en kommersiell ozonmonitor, mens de relative forandringene registreres av kjemiluminescens-instrumentet.

Andre aktuelle målinger omfatter partikler, karbondioksid, vanndamp, og terpen. Måling av partikler kan foretas med et instrument basert på partiklens spredning av lys fra en laser. Responstiden er kort, slik at metoden egner seg for fluksmålinger ved korrelasjonsmetoden. Det er nylig foretatt målinger av partikkelavsetning med et slikt instrument i Nederland (Gallagher et al., 1997). NILU har også et slikt instrument, men kalibreringen og justeringen er meget krevende, og bruk av dette instrumentet i Hurdal vil være relativt ressurskrevende.

Måling av utvekslingen av karbondioksid er nær knyttet til plantenes fotosyntese og til nedbrytingen av organisk materiale. Måling av vanndamp er knyttet til temperatur- og strålingsbalansen, og er spesielt interessant i hydrologisk sammenheng. Begge disse komponentene måles hensiktsmessig ved absorpsjonen av infrarødt lys, og det er tilgjengelig instrumenter som er spesielt konstruert for å måle disse to komponentene samtidig. Teknikken er godt egnet for å måle konsentrasjonene i flere høyder, på samme måte som foreslått for ozon, men instrumentet kan også brukes til direkte fluksmålinger ved hjelp av korrelasjonsmetoden. Forutsetningen er da at instrumentet plasseres i nær tilknytning til anemometeret, med luftinntaket høyst 20-30 cm fra dette.

Utslipp av terpen fra barskog er betydelig. Hovedkomponenten fra granskog er pinen, som ikke bidrar til ozondannelse ved nedbryting, men som derimot reagerer med ozon. Måling av terpen i ulike høyder kan danne grunnlag for anslag av utslippsmengden, men det er også vanlig å måle tapet eller produksjonen av terpen fra enkeltkvister som er innesluttet i plast.

## 5. Konklusjon og anbefalinger.

Forsøksfeltet i Hurdal er etablert i samarbeid med Norsk institutt for skogforskning og tilknyttet Statens forurensingstilsyns program for overvåking av skogskader. Tårnet dekker dette programmets behov for meteorologiske målinger og gir gode muligheter for fluks- og eksponeringsmålinger i en typisk norsk barskog. Det lot seg dessverre ikke gjøre å foreta fluksmålinger som forutsatt i 1997. Ved at tårnet er bygget, med etablering av permanent strømtilførsel og muligheter for fjernoverføring av data, er det nå også mulig å benytte dette til overvåking av konsentrasjonsgradienter og utveksling av termisk og mekanisk energi på permanent basis. Ovenfor er det skissert hvordan NILU vil gjennomføre et måleprogram for ozonopptak i 1998, med utgangspunkt i overvåkingsprogrammets måleprogram. Det er i mulig å utvide dette måleprogrammet, og inkludere utveksling av andre komponenter, først og fremst vanndamp og karbondioksid. Siden dette berører problemstillinger og interesser som tildels ligger utenfor NILUs formålsparagraf, er det naturlig å invitere til samarbeid med andre institusjoner, som Det Norske Meteorologiske Institutt, Geofysisk Institutt ved universitetet i Oslo, og Norges Landbrukshøgskole.

## 6. Referanser:

Aurela, M., Laurila, T. and Tuovinen, J.-P. (1997). Measurements of O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes over a Scots pines stand in Eastern Finland by the micrometeorological eddy correlation method. *Silva Fennica*, in press.

- Chamberlain, A.C.(1960). Aspects of the deposition of radioactive and other gases and particles. *Int. J. Air Pollut.*, 3, 63-88.
- Chamberlain, A. C.(1967). Transport of gases to grasses and grass-like surfaces. *Proc.Roy.Soc. London, A* 296, 45-70.
- Businger, J.A.(1986). Evaluation of the Accuracy with Which Dry Deposition Can Be Measured with Current Micrometeorological Techniques. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 25, 1100-1124.
- Dollard, G.J. and Vitols, V.(1980). Wind tunnel dry deposition studies og dry deposition of SO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> aerosols. *In: Drabløs, D. and Tollan, A.: Ecological Impact of Acid Precipitation. Proceedings of an international conference, Sandefjord, Norway, March 11-14. Oslo-Ås*, pp 108-109
- Dovland, H. and Hanssen, J.-E.(1975). Måling av tørravsetning på en snøflate. Oslo-Ås. SNSF-prosjektet, (TN 15/75).
- Dovland, H. and Eliassen, A.(1976). Dry deposition on a snow surface. *Atmos. Environ.*, 10, 783-785.
- Dyer, A.J.(1974). A review of flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorol.*, 7, 363-372.
- Dyer, A.J. and Hicks, B.B.(1970). Flux-Gradient Relationships in the Constant Flux Layer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 96, 715-721.
- Enders, G., Dlugi, R., Steinbrecher, R., Clement, B., Daiber, R., v. Eijk, J., Gäb, S., Haziza, M., Helas, G., Herrmann, U., Kessel, M., Kesselmeier, J., Kotzias, D., Kourtidis, K., Kurth, H.-H., McMillen, R.T., Roeder, G., Schürmann, W., Teichmann, U. and Torres, L.(1992). Biosphere/Atmosphere interactions: integrated research in a European coniferous forest ecosystem. *Atmos. Environ.*, 26A, 171-189.
- Erisman, J.W., Draaijers, G., Duyzer, J., Hofschreuder, P., van Leuwenen, N., Römer, F., Ruijgrook, W., Wyers, P., and Gallagher, M.W.(1997). Particle deposition to forests - summary of results and application. *Atmos. Environ.*, 31, 321-332.
- Fowler, D.L. and Unsworth, M.H.(1979). Turbulent transfer of sulphur dioxide to a wheat crop. *Quart.J. Roy. Meteorol. Soc.*, 105, 767-784.
- Gallagher, M.W., Beswick, K.M., Duyzer, J., Westrate, H., Choularton, T.W. and Hummelshøj, P.(1997). Measurement of aerosol fluxes to Speulder forest using a micrometeorological technique. *Atmos. Environ.*, 31, 359-373.
- Garland, J.A., (1977). The depositon of sulphur dioxide to land and water surfaces. *Proc. Roy. Soc. London, A* 354, 245-268.



- Garratt, J.R.(1980). Surface influences upon vertical profiles in the atmospheric near surface layer. *Quart.J. Roy. Meteorol. Soc.*, 106, 803-819.
- Gusten, H., Heinrich, G., Schmidt, R.W.H. and Schurath, U.(1992). A Novel Ozone Sensor for Direct Eddy Flux Measurements. *J. Atmos. Chem.*, 14, 73-84.
- Hill, A.C.(1971). Vegetation: a sink for atmospheric pollutants. *J. Air Poll. Ass.*, 21, 341-346.
- Hicks, B.B., Balcochi, D.D., Meyers, T.P., Matt, D.R. and Hosker, R.P.(1987). A multiple preliminary resistance model for deriving dry deposition velocities from measured quantities. *Water, Air, Soil Poll.*, 36, 311-330.
- Hicks, B.B.(1972). Propeller anemometers as sensors of atmospheric turbulence. *Boundary-Layer Meteorol.*, 3, 214-228.
- McMillen, R.T.(1988). An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. *Boundary-Layer Meteorol.*, 43, 231-245.
- Mikkelsen, N., Ro-Poulsen, H., Hovmand, M.F., Hummelshøj, P. and Jensen, N.O.(1997). Carbon and water balance for a mixed forest stand in relation to ozone uptake. (Manuscript)
- Monteith, J.L.(1975). *Vegetation and the Atmosphere*. London. Academic Press,
- O'Dell, R.A., Mansoor Taheri, and Kabel, R.L.(1977). A Model for Uptake of Pollutants by Vegetation. *J. Air Poll. Contr.Ass.* 27, 1104-1109.
- Solberg, S., Berg, I.A., Horntvedt, R., Aamlid, D. og Tørseth, K.(1997). Intensive skogovervåkingsflater, resultater fra 1995. *Aktuelt fra SKOGFORSK*, 4/97: 1-26.
- Tørseth, K. og Pedersen, U.(1994). Deposition of sulphur and nitrogen compounds in Norway 1988-1992. Kjeller, Norsk institutt for luftforskning. (NILU OR 16/94). Webb, E.K., Pearman, G.I., and Leunig, R.(1980). Correction of flux measurements for density effects due to heat and vapour transfer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 106, 85-100.
- Aamlid, D.(1992). Forurensninger i skog. Analyser av nedbør på intensivt overvåkede forskningsflater i 1991. Ås, Norsk Institutt for Skogforskning. (*Rapport fra SKOGFORSK*, 25/92).



# Norsk institutt for luftforskning (NILU)

Postboks 100, N-2007 Kjeller

RAPPORTTYPE Teknisk	RAPPORT NR. TR 1/98	ISBN 82-425-0954-9 ISSN 0807-7185	
DATO 11.2.98	ANSV. SIGN. <i>Arne Semb</i>	ANT. SIDER 18	PRIS NOK 30,-
TITTEL Etablering av måleprogram for bestemmelse av utvekslingsprosesser mellom skogbestand og luft		PROSJEKTLEDER Arne Semb	
		NILU PROSJEKT NR. N-96114	
FORFATTER(E) Arne Semb		TILGJENGELIGHET * A	
		OPPDRAKSGIVERS REF.	
OPPDRAKSGIVER Norges forskningsråd Postboks 2700 St. Hanshaugen 0131 OSLO			
STIKKORD Turbulent diffusjon	Tørravsetning	Ozon	
REFERAT Rapporten beskriver valg av forsøksområde, og instrumentering av metoder for å bestemme opptak av ozon i en skogbestand.			
TITLE Measurement programme for determining exchanges of gases and energy between the atmosphere and forest stand.			
ABSTRACT			

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