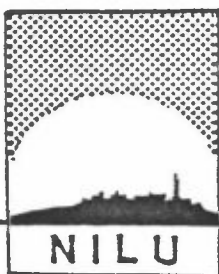


NILU OR : 40/85  
REFERANSE: 0-8444  
DATO : 30 MAI 1985

**HOVEDKILDER TIL SOT OG SVEVESTØV I BYLUFT  
PROSJEKTFORSLAG**

S. Larssen og A. Semb



**NORSK INSTITUTT FOR LUFTFORSKNING**

Postboks 130 - 2001 Lillestrøm

NILU OR : 40/85  
REFERANSE: 0-8444  
DATO : 30 MAI 1985

**HOVEDKILDER TIL SØT OG SVEVESTØV I BYLUFT  
PROSJEKTFORSLAG**

S. Larssen og A. Semb

NORSK INSTITUTT FOR LUFTFORSKNING  
POSTBOKS 130, 2001 LILLESTRØM  
NORGE

ISBN 82-7247-602-9

## **SAMMENDRAG**

NILU har utarbeidet et forslag til videre undersøkelser av størrelsen av ulike kilders utslippsbidrag til sot og svevestøv i byluft. Hovedvekten er lagt på sot. Det har vært behov for å sammenstille kunnskapen om utslipp av og målemetoder for sot. Det er også sotinnholdet i lufta som danner utgangspunktet for hoveddelen av de målinger av partikler i luft som er foretatt i Norge.

I prosjektforslaget beskrives dagens kunnskap når det gjelder hovedkilder til sot og svevestøv i byluft, og hovedmangler i kunnskapsgrunnet. For å bedre kunnskapene om kilders utslippsbidrag til sot og svevestøv må en arbeide for å fremskaffe bedre utslippsfaktorer og utslippsoversikter, og/eller utføre reseptormodell-analyser basert på karakterisering av partikkelutslippet fra hovedkilder. Likeledes er det nødvendig å bedre våre analysemetoder for sot.

I "forslag til videre undersøkelser" er fem prosjekter beskrevet:

1. Utslippsfaktorer for uorganisk og organisk bundet karbon.
2. Karakterisering av partikkelutslipp fra ulike kildetyper.
3. Reseptormodell-beregninger.
4. Målemetoder for sot og uforbrente forbrenningsprodukter.
5. Sammenheng mellom sotinnholdet i luft og nedsmussing.



**INNHOOLD**

	side
SAMMENDRAG .....	3
INNLEDNING .....	7
HOVEDKILDER TIL SOT I BYLUFT - SAMMENDRAG AV BAKGRUNNSMATERIALET .....	7
HOVEDMANGLER I KUNNSKAPSGRUNNLAGET .....	12
FORSLAG TIL VIDERE UNDERSØKELSER .....	13
VEDLEGG	
BAKGRUNN FOR PROBLEMSTILLINGEN "HOVEDKILDER TIL SOTINNHOOLDET I BYLUFT .....	19
1 Innledning .....	23
2 Dannelse av sot .....	24
3 Målemetoder for sot .....	25
4 Spesielt om OECD-metoden .....	27
5 Utslipp av sot .....	33
6 Tidligere utførte målinger og beregninger av sot i luft	38
7 Hovedkilder til sot i byluft .....	47
8 Referanser.....	48



## HOVEDKILDER TIL SOT OG SVEVESTØV I BYLUFT PROSJEKTFORSLAG

### INNLEDNING

Norsk institutt for luftforskning (NILU) har fra Statens forurensningstilsyn (SFT) fått i oppdrag å utarbeide et prosjektforslag til videre undersøkelser av hvilke hovedkilder som bidrar til innholdet av sot/svevestøv i byluft. Bakgrunnen er at innholdet av sot og svevestøv i luft synes å være brukbare indikatorer på den lungekreft-*risiko* i byer som en mener luftforurensningen kan gi et bidrag til.

Forslaget til videre undersøkelser er utarbeidet på bakgrunn av det arbeid NILU tidligere har utført når det gjelder svevestøv- og sotinnholdet i luft, undersøkelser av målemetoder og undersøkelser av utslippsfaktorer, først og fremst fra biltrafikk. Bakgrunns materialet er beskrevet i vedlegg til dette prosjektforslaget.

### HOVEDKILDER TIL SOT I BYLUFT - SAMMENDRAG AV BAKGRUNNSMATERIALET

Små karbonpartikler (elementært karbon, EC) i form av sot dannes i alle "lysende" flammer og ved forbrenning av olje og bensin i motorer. Ved forbrenningsprosessene dannes, i tillegg til elementært karbon, også en lang rekke andre organiske forbindelser, blant annet polysykliske aromatiske hydrokarboner. Ufullstendig forbrenning gir derfor, i tillegg til sot, også utslipp av polysykliske hydrokarboner og andre organiske forbindelser som er dannet ved forbrenningsprosessene. Totalt organisk karbon (TOC) er en parameter for mengden av slike produkter av ufullstendig forbrenning. Blant disse finnes også de forbindelsene som er årsak til den mutagene effekt som partikler i byluft gir i biologiske tester.

Svevestøv i byluft får bidrag fra mange kilder. I tillegg til ulike former for forbrenning kommer bidrag fra bl.a. industriutslipp, veistøv og bakkestøv. Sekundær partikkeldannelse via gass/partikkelreaksjoner kan også gi et bidrag. Respirabel partikkel-fraksjon (RP, partikler med diameter mindre enn



3-5 µm) får i hovedsak bidrag fra forbrenningsprosessene. I byluft er forbrenning av olje og ved, samt bensin og diesel i bilmotorer hovedkildene til respirable partikler. Elementært karbon (sot) og organiske forbindelser dannet ved ufullstendig forbrenning utgjør den største del av RP-fraksjonen i byluft. Hver for seg kan disse være opptil 30-40% av den totale mengden partikler i RP-fraksjonen. Mutagene stoffer utgjør en liten brøkdel av massen (størrelsesorden 0.001-0.01%).

Den kreftrisiko partiklene representerer kan estimeres relativt ut fra den mutagenitet som ekstrakter av partiklene gir i biologiske test-systemer. Muligheten for å bruke svevestøv (respirabel partikkel-fraksjon), totalt organisk karbon (TOC) og elementært karbon (sot) som indikatorer på partiklenes kreft-risiko ligger i sammenhengene i byluft mellom disse partikkel-parametre og partiklenes mutagenitet. Sammenhengene vil være avhengig av det forholdet en har mellom partikkelbidragene fra hovedkildene, som i de fleste norske tettsteder er biltrafikk, oljefyring og vedfyring. Enkelte steder kommer industrikilder, f eks aluminiumverk inn med bidrag til partikkel-, sot og TOC-utslipp. En har ikke pr idag nok datamateriale til å vurdere i hvilken grad sammenhengen mellom mutagenitet på den ene side og partikkelmengde, sot og TOC på den annen side varierer innen norske tettsteder. Undersøkelse av sammenhengen mellom PAH og sot på noen målesteder i Norge indikerer at variasjon er tilstede.

Det er temaet "hovedkilder til sot og svevestøv i byluft" som danner utgangspunktet for stoffet i bakgrunns materialet. Hovedvekten er lagt på sot (elementært karbon), både når det gjelder analysemetoder og utslippsfaktorer. Det har vært behov for å sammenstille kunnskapen på dette området. Det er også sotinnholdet i lufta som danner utgangspunktet for hovedmengden av de målinger av partikler i luft som er utført i Norge.

Bedre fastsettelse av kildebidrag til svevestøv og sot i byluft krever bedre utslippsfaktorer og/eller reseptormodellberegninger basert på karakterisering av partikkelutslippet fra kildene.

#### ANALYSEMETODER FOR SOT

Sotmengde kan bestemmes ved optiske eller kjemiske metoder. Optiske metoder baserer seg på at små sotpartikler er meget effektive absorberer av lys.

Måling av absorpsjon av lys i en prøve er nærmest en selektiv metode for innholdet av sot (elementært karbon) i prøven. Slike metoder må kalibreres ved hjelp av standard sotprøver, eller mot spesifikke kjemiske metoder. Kjemiske metoder kan være absolutte, og kan brukes til å bestemme både organisk og elementært karbon.

Ved NILU benyttes optiske metoder til relativ bestemmelse av sotinnhold i partikkelprøver på filter. Metodene er i noen grad kalibrert mot standard sot-prøver, slik at absolutt sotmengde kan indikeres. Dette gjelder OECD-metoden, der svertingen av overflaten av et filter med partikkelprøve bestemmes. NILU har ikke i bruk kjemiske metoder for bestemmelse av totalt organisk og uorganisk karbon. Analyser av enkelte karbonholdige forbindelser i partikler gjøres imidlertid ved gasskromatografi/massespektrometer.

#### OECD-METODEN

NILU har lenge benyttet OECD-metoden til måling av den svertingsgrad som svevestøv i luft gir. Svertingen bestemmes ved å måle intensiteten av lys reflektert fra en svertet filterflate. Svertingsgraden er knyttet til sotinnholdet i svevestøvet. OECD-metoden foreskriver en standard kalibreringskurve som omsetter svertingsgraden til en konsentrasjonsverdi ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Kalibreringskurven er et resultat av samtidige målinger av svertning og samlet finpartikkel-innhold i luft, utført i europeiske byer i 1960-årene. Denne verdien gir en relativ, og ikke en absolutt verdi for sotkonsentrasjonen. OECD-metoden kan kalibreres til å gi sotinnholdet i partikkelprøven.

En sotkalibrering vil sannsynligvis ikke i så stor grad være influert av hvilken kildetype som forårsaker soten, fordi den spesifikke absorpsjonskoeffisient for små sotpartikler (svevepartikler) ikke varierer så mye fra kildetype til kildetype.

Basert på spesifikke analyser av sotinnhold i partikkelprøver fra dieseleksos har en kommet fram til en foreslått kalibreringskurve for sot knyttet til den reflektometriske målingen (svertingsmålingen) i OECD-metoden. Flere målinger på ulike kilder er nødvendig for å justere, eventuelt bekrefte kalibreringskurven. Denne foreslåtte kalibreringskurven er grunnlag for noen av de resultater som omtales nedenfor.

UTSLIPPSFAKTORER

Sot finnes i utslippet fra anlegg for forbrenning av oljeprodukter og fast brensel (koks, ved, søppel), i eksos-utslippet fra dieseldrevne og bensindrevne biler, i røyk fra åpen forbrenning av avfall (industri, jordbruk), etc.

Utslippsfaktorer for sot (mengde sot pr. enhet forbrent materiale) er relativt dårlig kjent. Når det gjelder bileksos, er det foretatt endel målinger av sotutslipp fra diesel- og bensindrevne personbiler og varebiler i Norge.

Målingene har gitt grunnlag for følgende forslag til foreløpige utslippsfaktorer for sot i bileksos (mg/km):

	ECE-syklus		80 km/h
	Kaldstart	Varmstart	
Bensindrevne personbiler	10	3	1
Dieseldrevne personbiler	200		
Dieseldrevne varebiler	300		

Det er knyttet større usikkerheter til utslippsfaktorer fra tunge dieseldrevne kjøretøyer, fra oljefyring og vedfyring, fra søppelforbrenning, etc.

ERFARINGER FRA MÅLINGER AV SOT VED TRAFIKKERTE VEIER

Samtidige målinger av sot og andre bilforurensningskomponenter, spesielt CO, byr en mulighet til å sjekke utslippsfaktorene for lette biler og antyde utslippsfaktorer for tunge dieselbiler. Dette kan gjøres fordi en regner utslippsfaktoren for CO fra ulike bilklasser for å være relativt godt kjent.

En har i denne sammenheng sett spesielt på resultater fra Rådhusgaten i 1979, St. Olavs gate i 1980-84 og fra Holmestrandstunnelen i 1983. Ved å gå ut fra utslippsfaktorer for CO, og se på målte forholdstall mellom sot og CO, har en kommet fram til grovt anslåtte utslippsfaktorer for sot fra tunge dieselbiler på anslagsvis 500 mg/km for bykjøring og anslagsvis 300- 500 mg/km ved 70-80 km/h.

## TIDLIGERE UTFØRTE BEREGNINGER OG MÅLINGER AV PARTIKKELFORURENSNING OVER OSLO

Det er utført beregninger av partikkelinnholdet i Oslolufta, ut fra en utslippsoversikt som ga samlet utslipp fra stasjonære kilder. Utslippene fra biltrafikken ble imidlertid "justert" for å gi samsvar mellom samtidige målinger nær trafikerte gater av CO og "sot" målt med OECD-metoden.

Siden kalibreringskurven for OECD-metoden er basert på sammenligninger mellom gravimetriske og reflektometriske målinger i byatmosfære i 1960-årene, gir disse utslippsfaktorene ikke noe riktig mål for massen av partikkelutslippet fra biltrafikken. Det gir heller ikke noe riktig mål på utslippet av "sot", i betydningen elementært karbon.

Ved å bruke de faktorene en nå har for partikkelutslippet fra ulike bilklasser, og korrigere utslippsoversikten etter dette, kan en justere de beregnede verdier for partikkelforurensning over Oslo, slik at de gjelder partikkelmasse.

For å kunne gjøre beregninger av sotinnholdet i luft, må en ha bedre kjennskap til utslippsfaktorer for sot fra oljefyring, vedfyring og andre kilder, eventuelt foreta en reseptormodellundersøkelse basert på måling av sporstoffer fra de ulike kildetyper, som Pb i bensineksos, V fra oljefyring, C<sup>14</sup> fra vedfyring, etc.

### HOVEDKILDER TIL SOT I BYLUFT

Bidraget til sotinnholdet i luft fra de ulike kilder kan beregnes på følgende måte:

- ut fra utslippsoversikter, basert på utslippsfaktorer for sot samt forbrukstall, eller
- ved hjelp av reseptormodeller, basert på analyser av kildeprøver fra de ulike kildetyper som gir kildeprøvenes innhold av sot og sporelementer, f.eks. bly, C<sup>14</sup>, etc. Det er da nødvendig at det tas endel utslippsprøver av ulike kildetyper.

Ut fra de anslag en nå har på utslipp av sot fra ulike kildetyper, finner en at ca. 50% av sotutslippet i Oslo som helhet kommer fra oljefyring, ca. 20%

fra vedfyring og ca. 10% fra biltrafikken.

Om en går ut fra målinger av CO og sot på endel stasjoner i bysentrum og beregner biltrafikkens bidrag til sotnivået ut fra CO, finner en imidlertid at sotutslippet fra biltrafikken bidrar med anslagsvis 20-30% av målt sotnivå dersom andelen tunge dieserbiler er 5%, og 50-65% av sotnivået om dieselandelen er 15%.

Denne forskjellen i estimat av biltrafikkens andel skyldes bl.a. at de omtalte sentrumstasjoner er mer eksponert for utslipp fra trafikk enn det som utslippsoversikten for Oslo som helhet gir uttrykk for. Bedre utslippsfaktorer for sot samt utslippsoversikter for nærområdene ved de omtalte sentrumstasjoner vil bidra til et bedre estimat av de ulike kildenes bidrag.

### **HOVEDMANGLER I KUNNSKAPSGRUNNLAGET**

For å bedre kunnskapene om ulike kildetyper utslippsbidrag av svevestøv (respirabel partikkelfraksjon), uorganisk og organisk bundet karbon, er det nødvendig med videre arbeid på følgende felter:

#### **1 Utslippsoversikter for karbon.**

Utslippsfaktorer for EC og TOC fra tunge dieserbiler, fra fyring med olje og fast brensel og søppelforbrenning bør forbedres. Når det gjelder lette biler, har vi utslippsestimater for EC. Forbedring av disse er ønskelig, kanskje spesielt for dieseldrevne personbiler og varebiler.

Det er viktig å kunne estimere forbrukstall av fast brensel for gitte områder og perioder.

#### **2 Karakterisering av partikkelutslipp fra ulike kildetyper.**

Til reseptormodell-analysen av bidrag til partikkel- og sotforurensninger fra ulike kildetyper, må en ha bedre kunnskap om sammensetningen i utslippet av EC, TOC, metaller som Pb, V og en rekke andre,

samt ioner (sulfat, nitrat).

### 3 Målemetoder for karbon.

Spesifikke metoder for bestemmelse av totalt og elementært karbon må tas i bruk ved NILU. Optiske metoder kan brukes til rutinemessige målinger av sot i luft, og antagelig også til utslippsmålinger, men må kalibreres omhyggelig.

## **FORSLAG TIL VIDERE UNDERSØKELSER**

Nedenfor er beskrevet en del forslag til prosjekter som tar sikte på å utbedre de manglene i kunnskapsgrunnlaget som er nevnt. Videre tar forslaget om reseptormodell-undersøkelser sikte på å benytte det utvidete kunnskapsgrunnlaget til å beregne bidrag til svevestøv og sot fra ulike kilder i en del utvalgte områder. I sin nåværende form må forslagene betraktes om diskusjonsgrunnlag. Forslag til prioritering på side 18.

### 1. UTSLIPPSFAKTORER FOR UORGANISK OG ORGANISK BUNDET KARBON

Framskaffelse av utslippsfaktorer for sot og organisk bundet karbon (TOC) som gjelder forhold i Norge, er en større oppgave. Det innebærer prøvetaking av et visst antall av hver kildetype. Videre foreslås en litteraturundersøkelse for å fremskaffe nyere utenlandske utslippsdata.

Utslippsfaktorer for sot og TOC kan fremskaffes enten ved å måle karbonutslippet spesifikt med standard prosedyre for måling av partikkelutslipp, eller ved å måle EC- og TOC-andelen av partikkelutslippet, og anvende dette på partikkelutslippsfaktorer som er rapportert tidligere. Det første er mer kostnadskrevenne enn det siste.

En kan i første omgang gå ut fra de utslippsfaktorer som er rapportert for partikler, og skaffe tilveie data om karbonandelen. Estimer for karbonandelen i ulike kilder fås ved å ta kildeprøver som beskrevet nedenfor:

Eksosutslippet fra biler: Prøver tas i forbindelse med eksostesting ved Inst. for forbr. motorer og marint maskineri (IFMM) ved NTH eller ved

Bilavgaslaboratoriet i Studsvik i Sverige. Minimum 10 biler av hver klasse.

Vedfyring: Prøver tas i pipa fra en typisk vedovn. Fyring med ulike vedsorter.

Oljefyring: Prøver tas i utslippet fra to mindre kjeler, en "ren" og en med stort sotutslipp. Kjeler tas ut i samarbeide med Norsk Energi (tidl. Norsk Dampkjelforening).

Søppelforbrenning: Prøver tas fra utslippet fra et større (Haraldrud i Oslo) og et mindre (f.eks. Haugerud i Oslo) anlegg.

Dette programmet vil gi grunnlag for å gi foreløpige utslippsestimater. Variasjonen mellom prøver vil bestemme om det er nødvendig å gå videre med prøving av flere enkelt-kilder av hver type. Spesielt for søppelforbrenning må en regne med store variasjoner, avhengig av søppelsammensetning.

En regner med å måtte samarbeide med flere institusjoner for å gjennomføre slik prøvetaking, bl.a. SINTEF, Norsk Energi, IFMM i Trondheim og Bilavgaslaboratoriet i Studsvik i Sverige.

#### Kostnadsoverslag.

Litteratur-undersøkelse:..... kr 30.000

Utslippsmålinger:

Utarbeidelse av prosjektplan:..... kr 15.000

Foreløpig kan følgende kostnadsestimater gjøres:

Prøvetaking

og analyse: En vil anslå kr. 50 - 100 000 pr. kildetype  
(hver bilklasse, oljefyring, vedfyring,  
søppelforbrenning) å være minimum.

Databearbeiding, rapport ..... 50.000

Samlet for 5 kildetyper ..... kr. 330.000 - 580.000

## 2. KARAKTERISERING AV PARTIKKELUTSLIPP FRA ULIKE KILDETYPER

Som grunnlag for reseptormodell-beregninger utføres på prøver fra ulike kilder analyser av sammensetningen av stoffer som kan betraktes som sporstoffer for enkeltkilder (f.eks. Pb for bensineksos, V for oljeforbrenning), i tillegg til sot og TOC-analyser. Analysene gjøres på prøvene som tas under foregående punkt.

Kostnadsoverslag:

Multielement-analyse .....	10 - 15.000
Databearbeiding, rapport .....	<u>10.000</u>
	<u>20 - 25.000</u>

## 3. RESEPTORMODELL-BEREGNINGER

Beregning av bidrag til luftens innhold av sot og TOC i ulike områder (bysentrum, boligområde i by og byutkant og i mindre tettsteder).

Prøver av svevestøv tas i utvalgte områder med "high-volume"-prøvetaker og mikrokvarvs-filtre, med avskilling av partikler større enn 10µm. Disse analyseres med hensyn på partikler totalt, sot og TOC samt sporstoffer for enkeltkilder (Pb, V, C<sup>14</sup>, etc).

Stoff-sammensetningen i kildene fås fra analysene i punktene ovenfor.

Kostnadsoverslag:

Utarbeidelse av prosjektplan:..... kr 15.000

Foreløpig kan følgende kostnadsestimatet gjøres:



Reseptormodell-undersøkelse pr. målested,  
basert på 10 dagprøver og 10 nattprøver  
av svevestøv ..... kr. 215.000 - 250.000

#### 4. MÅLEMETODER FOR SOT OG UFORBRENT FORBRENNINGSPRODUKTER

Oppbygging og kalibrering av metoder for spesifikk måling av elementært karbon (sot) og organisk bundet karbon.

##### Kjemiske metoder

Oppbygging og utprøving av metode for måling av en støvprøves innhold av elementært og organisk bundet sot, etter en av metodene vist i figur 1 i vedlegget.

I første omgang må utredes hvilke(n) av metodene en skal velge.

Kostnadsoverslag:

Utredning og valg av metode(r), detaljert  
plan og kostnadsoverslag for oppbygging og utprøving .... ca kr. 25.000

##### Optisk metode

Kalibrering av reflektometrisk målemetode (OECD-metoden) for elementært karbon (sot). Prøver tas fra forskjellige typer utslipp (bensin- og dieseldrevne biler, oljefyring, vedfyring, søppelforbrenning). Prøvene analyseres reflektometrisk og med spesifikk metode for elementært og organisk bundet karbon.

Prøvene tas på Whatman 40-filtre. En må ha mulighet til å kjøle ned prøveluften til ca 20-50<sup>0</sup> C før filtrering.

Kostnadsoverslag:

Kostnadsoverslaget forutsetter at prøvene for analyse tas parallelt med prøvene under pkt. 1: "Utslippsfaktorer for uorganisk og organisk bundet sot".

Prøvetaking med OECD-metoden, reflektometrisk analyse av filtrene, sammenligning med de utførte analyser av uorganisk og organisk bundet karbon, bearbeiding av resultater, rapport ..... ca kr. 30.000

5. SAMMENHENG MELLOM SOTINNHOLD I LUFT OG NEDSMUSSING

Nedsmussing er antagelig en av de viktigste trivselsulempene som er knyttet til luftforurensninger. På grunn av den store lysabsorpsjonen vil sotinnholdet være en viktig komponent. Antar vi at den spesifikke lysabsorpsjonen er  $10 \text{ m}^2/\text{g}$ , og sotinnholdet (målt som C) er  $20 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ , vil en avsetningshastighet på  $0.1 \text{ cm/s}$  føre til et synlig belegg etter ca. 1 døgn. (Synlig belegg tilsvarer her en reduksjon i reflektert lys på 5%).

Det er mulig å bestemme en slik sammenheng ved å eksponere standardiserte prøver (filterpapir, glassplater, o.l.) og sammenligne avsetninger med konsentrasjonsnivået av sot i luft.

Sammenligningen bør om mulig foretas flere steder med eksponering fra ulike kilder. En vil bruke allerede etablerte målestasjoner.

Kostnadsoverslag:

Målinger av sot og nedsmussing i 2 mndr. (middelverdier over 1-3 døgn), måling av sverting, evt. vektbestemmelse, mikroskopering.

Antatt samlet kostnad pr. stasjon ..... ca kr. 30.000

FORSLAG TIL PRIORITERING:

Forslag 1 "Utslippsfaktorer" og forslag 2 "karakterisering av utslipp" og forslag 4 "Optisk metode" er koblet. Forslag 1 vil gi utslippsfaktorer, samt prøver for videre analyse under forslag 2 og 4. Forslag 3 "Reseptormodell-beregninger" benytter resultatene fra forslag 1 og 2. Forslag 4 "Målemetoder" setter NILU selv i stand til å utføre karbon-analysene. Forslag 5 "Nedsmussing" er uavhengig av de øvrige, og vil gi muligheten til å si noe om nedsmussingsgraden basert på svertingsmålinger av svevestøv.

Følgende prioritering foreslås:

1. prioritet: Forslag 1 "Utslippsfaktorer"  
Forslag 2 "Karakterisering av utslipp"  
Forslag 3 "Reseptormodell-beregninger"
2. prioritet: Forslag 4 "Målemetoder"
3. prioritet: Forslag 5 "Nedsmussing"

**VEDLEGG**

Bakgrunnsmateriale for problemstillingen  
"Hovedkilder til sot i byluft"



**INNHOOLD**

	Side
1	INNLEDNING ..... 23
2	DANNELSE AV SOT ..... 24
3	MÅLEMETODER FOR SOT ..... 25
	3.1 Optiske metoder ..... 25
	3.2 Kjemiske metoder ..... 26
4	SPESELT OM OECD-METODEN ..... 27
5	UTSLIPP AV SOT ..... 33
	5.1 Utslippsoversikt ..... 33
	5.2 Utslippsfaktorer for sot fra biltrafikk ..... 36
6	TIDLIGERE UTFØRTE MÅLINGER OG BEREGNINGER AV SOT I LUFT . 38
	6.1 Undersøkelser ved trafikkerte veier ..... 38
	6.2 Målinger og beregninger av partikkelforurensing over Oslo ..... 42
	6.3 Sammenheng mellom sot og PAH ..... 46
7	HOVEDKILDER TIL SOT I BYLUFT ..... 47
8	REFERANSER ..... 48



## 1 INNLEDNING

Byluftens innhold av partikler kan innebære en helserisiko. Spesielt er det et spørsmål om det er knyttet en kreftrisiko til partikkelforurensninger. Kreftrisikoen kan best indikeres ved å teste partiklenes mutagene effekt i biologiske testsystemer. Dette er kostbare målinger. Enklere partikkelmålinger som foretas rutinemessig, er måling av samlet partikkelmasse innen visse størrelsesfraksjoner, og disse partiklenes svertningsgrad. De mest aktuelle størrelsesfraksjoner er 0-10  $\mu\text{m}$  (inhalerbare partikler, IP) og 0-2.5  $\mu\text{m}$  (tilnærmet lik respirable partikler, RP). Disse partikkelparametre kan være brukbare indikatorer på partiklenes kreftrisiko. I prosjektskissen fra Statens forurensningstilsyn framholdes som sterkt ønskelig at kunnskapene bedres når det gjelder ulike kilders bidrag til utslipp av partikler og deres svertningsgrad i bymiljø.

Partiklenes svertningsgrad fremkommer f.eks. ved den svertning partiklene gir på en hvit filterflate som luft er suget gjennom. Måling av svertningen (dvs. absorpsjon av lys) på filterflaten er en vanlig metode for måling av partikkelforurensning i luft. Resultatet kalles i England "black smoke", i Norge oftest "sot". Svertningen skyldes hovedsakelig innholdet av elementært karbon (EC) i partiklene. EC har den egenskap at det absorberer lys vesentlig mer effektivt enn det andre stoffer gjør, over et bredt spektralområde. Begrepet "sot" er i denne sammenheng synonymt med elementært karbon. EC dannes ved enhver ufullstendig forbrenning av organisk materiale (olje, kull, ved, bensin, parafin, jordbruksavfall, etc.).

I utslippet fra forbrenningsprosesser som gir sot finnes imidlertid også betydelige mengder organiske forbindelser som dannes ved forbrenningsprosessen, som polysykliske aromatiske hydrokarboner, azarener, benzofuraner, dioksiner, osv. Disse forbindelsene anses oftest å være hovedkilden til den mutagene effekt som partikler i byluft gir i biologiske tester. Totalt organisk karbon (TOC) er en parameter for mengden av slike produkter av ufullstendig forbrenning.

Bruk av respirable partikler, sot (svertning) og totalt organisk karbon som indikatorer på kreftrisikoen av partikkelforurensningen baserer seg på de sammenhenger som eksisterer mellom disse og mengden av mutagene stoffer.



I det følgende gis en oversiktsmessig framstilling av det en i dag vet om utslippsmengde (masse) fra ulike kilder av partikler og deres innhold av sot.

Når det gjelder partikkelmasse er analysemetoden grei, og bedre kunnskap om ulike kildetyper bidrag krever enten bedre utslippsdata, eller også reseptormodellanalyse av partikkelprøver fra byluft.

Når det gjelder partiklenes svertningsgrad, eller innhold av EC (sot), har det vært noe uklarhet ved analysemetodikken. Likeledes er utslippsfaktorer fra EC mindre godt kjent og har vært mindre brukt. Det er også i hovedsak svertningsmålinger av partikkelforurensninger som foreligger fra undersøkelser i norske byer. Hovedvekten i fremstillingen er derfor lagt på partiklenes sotinnhold, og analysemetodikk samt utslippsfaktorer for sot (EC).

## 2 DANNELSE AV SOT

Dannelse av små karbonpartikler i form av sot er en prosess som foregår i alle "lysende" flammer. Ifølge Gaydon (1979) later det til at Humphrey Davy var den første som innså at lyseffekten skyldtes glødende karbonpartikler, men det er først i de siste ca. 30 årene at de fundamentale kjemiske reaksjonene i forbindelse med sotedannelse er blitt undersøkt.

En lysende flamme kan i mange tilfelle være fordelaktig, blant annet ved at den overfører varme ved stråling. Karbonpartikler som ikke brenner opp er derimot et stort problem, ved sotavsetninger i varmevekslere, dieselmotorer, på turbinblader, osv.

Som miljøproblem har sot og røyk fulgt menneskene siden ilden ble oppfunnet. (De mest groteske tilstandene skyldtes bruken av kull i åpne ildsteder i England, som først ble begrenset ved "Clean Air Act" som innførte forbud i storbyene.) En lang rekke brenseltyper kan gi sot, avhengig av forbrenningsforholdene, men sotedannelsen er særlig knyttet til høyt C/H-forhold, luftunderskudd, og ukontrollerte, inhomogene forbrenningsbetingelser. Høyt trykk og høy temperatur favoriserer også sotedannelse.

### 3 MÅLEMETODER FOR SOT

#### 3.1 Optiske metoder

En viktig egenskap ved sot-partiklene er at de absorberer lys over et stort spektralområde, i motsetning til andre partikler som bare sprer lyset. Dette er basis for en lang rekke optiske metoder for måling av sot ("black smoke"), hvorav den eldste og mest anvendte er basert på måling av reflektert lys fra et eksponert filter (OECD, 1964). Mer raffinerte metoder basert på diffus gjennomlysning av gjennomsiktige membranfilter, eventuelt registrering av den absorberte strålingen ved opto-akustisk teknikk er også utviklet, og har fordelen av å gi lineære kalibreringskurver over et større konsentrasjonsområde.

Lysabsorpsjonen i kuleformede karbonpartikler kan beregnes ved hjelp av Mie-teori. I motsetning til lysspredningen for dielektriske partikler, er den spesifikke lysabsorpsjonen stor også for partikler med diameter vesentlig mindre enn bølgelengden for synlig lys. Roessler et al (1981) beregnet den spesifikke lysabsorpsjonen til å være mellom 5 og 10 m<sup>2</sup>/g for karbonpartikler med diameter 0.4 µm.

Kalibreringer av optoakustiske og andre metoder for måling av lysabsorpsjon har i mange tilfelle gitt høyere verdier for den spesifikke lysabsorpsjonen (Wolff et al, 1982). Weiss og Waggoner (1982) finner at den spesifikke lysabsorpsjonen varierer mellom 7 og 11 m<sup>2</sup>/g, og at det er en viss variasjon i forhold til kildetype.

Et svært viktig bidrag til forståelsen av sammenhengen mellom sotpartiklenes kjemiske og optiske egenskaper er gitt av Rosen og Novakov (1977) som viste at eksponerte aerosolfiltre ga Ramanspektre som var identisk med Ramanspektret til grafitt, og at intensiteten av Raman-linjen ved 1600 cm<sup>-1</sup> var korrelert med filtersvertningen for en lang rekke forskjellige prøvetyper. Ramanspektroskopi er imidlertid ikke noen aktuell kvantitativ metode for å bestemme mengden sot på filter.

### 3.2 Kjemiske metoder

For aerosolprøver som er samlet opp på uorganisk substrat, for eksempel på glass- eller kvartsfiberfilter, er det mulig å bestemme total karbon ved elementæranalyse. Flyktige organiske forbindelser overføres til  $\text{CO}_2$  og  $\text{H}_2\text{O}$  ved å ledes over kobberoksyd som er oppvarmet til  $8-900^\circ\text{C}$ , mens elementært karbon må forbrennes i en luft- eller oksygen-helium strøm ved en temperatur på mellom  $600$  og  $800^\circ\text{C}$ .  $\text{CO}_2$ -mengden kan bestemmes ved hjelp av en detektor som er basert på absorpsjon av infrarød stråling, eller man kan gjøre om  $\text{CO}_2$  til metan og bruke en flamme-ionisasjonsdetektor. I så fall må overskuddet av oksygen i gasstrømmen fjernes.

Aktuelle metoder går ut på å bestemme flyktige organiske forbindelser ved oppvarming i en inert gass (renset He) til  $450^\circ$ ,  $580^\circ$  eller  $800^\circ\text{C}$ . Deretter bestemmes ikke-flyktig karbon ved forbrenning i en  $\text{O}_2$ -He gassblanding.

Et problem i denne sammenheng er at en del av de organiske forbindelsene, som blant annet består av høy-molekylære polisykliske forbindelser (PAH) er så sterkt bundet til sotpartiklene at oppvarming til  $450$  eller  $580^\circ\text{C}$  ikke er tilstrekkelig, samtidig med at oppvarmingen fører til en forkoksing av disse stoffene. Enkelte laboratorier kontrollerer omfanget av slik forkoksing ved å måle svertingen av filteret under oppvarmingen. Noen helt tilfredsstillende prosedyre for å skille mellom organisk bundet karbon og elementært karbon ved slike metoder finnes ikke, og de høymolekylære organiske forbindelsene kan heller ikke ekstraheres fullstendig ved hjelp av løsningsmidler.

Likevel er disse metodene et verdifullt supplement til svertingsmålinger og rene optiske metoder, og antagelig også til gasskromatografiske metoder for målinger av spesifikke PAH-komponenter i "POM" (partikulert organisk materiale). Termogrammene kan også brukes til å karakterisere aerosoler som skyldes ufullstendig forbrenning i ulike kilder (diesel-, bensinmotorer, vedfyring, osv.).

Oppbyggingen av egnet apparatur vil imidlertid koste anslagsvis  $100-200.000$ , avhengig av ambisjonsnivå og automatiseringsgrad.

Eksempler på oppbygging av apparatur og termogrammer for ulike prøvetyper er gitt i figur 1.

En kan naturligvis også bestemme  $\text{CO}_2$  gravimetrisk etter absorpsjon i et egnet absorpsjonsmiddel, eller basert på en tilbaketitrering i en alkalisk absorpsjonsløsning. NILU har ved Christiania Spigerverk fått utført analyser av totalt karbon på filter etter den siste metoden.

#### **4 SPESIELT OM OECD-METODEN FOR MÅLING AV SOTINNHold PÅ FILTER**

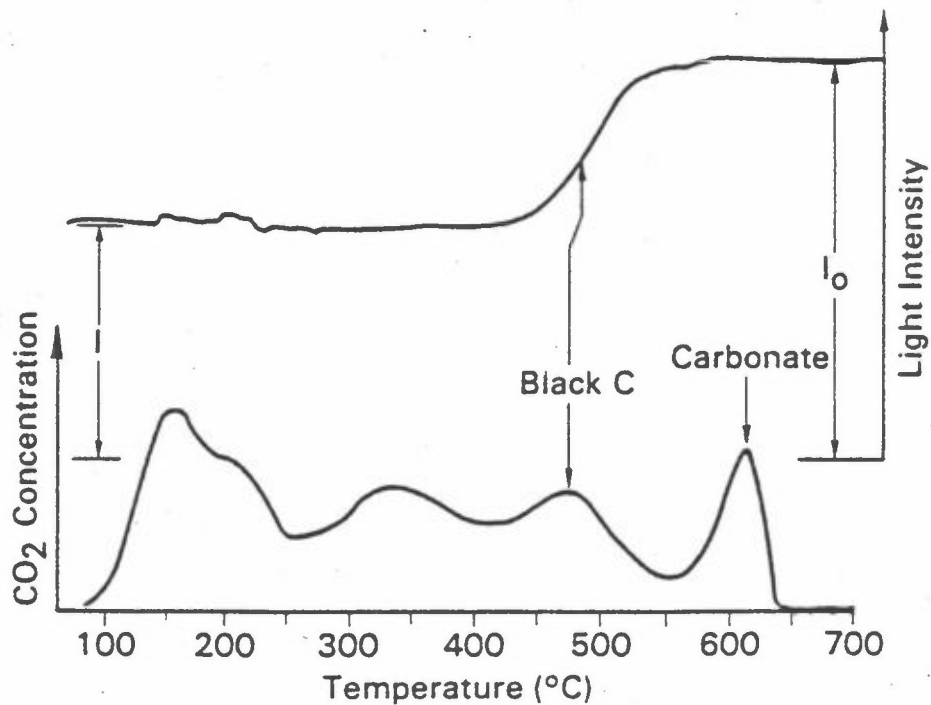
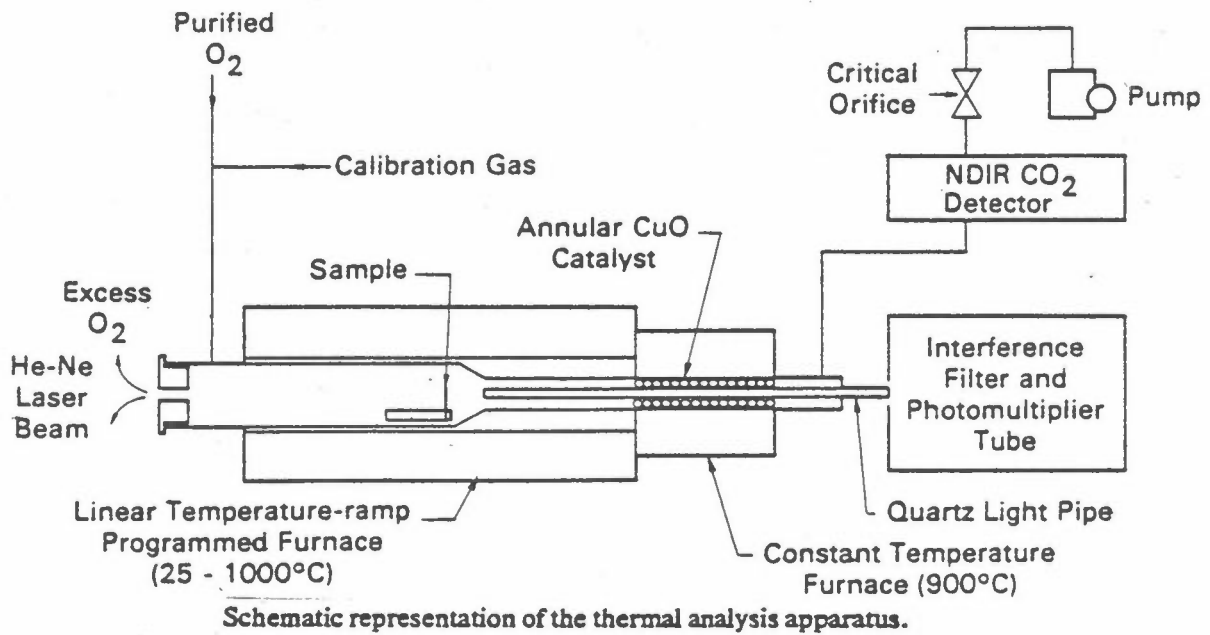
I OECD-metoden, slik den praktiseres på NILU, suges luft med en volumhastighet ca.  $3.6 \text{ m}^3/\text{døgn}$  gjennom et cellulosefiberfilter av typen Whatman 40 (gjennomstrømningsflate  $5.06 \text{ cm}^2$ ). Partikkeldeposisjonens svertningsgrad bestemmes ved å måle intensiteten av lys reflektert fra filterflaten, når en lyskilde lyser i en gitt vinkel ned mot flaten. Dette gjøres i et reflektometer. Metoden kalibreres ved at refleksjonen fra et hvitt filter settes til 100%.

Refleksjonsverdien bestemmes i første rekke av innholdet på filteret av finfordelte sotpartikler bestående i hovedsak av elementært karbon. Andre typer partikler er vesentlig lysere, dvs. de absorberer vesentlig mindre lys enn tilsvarende masse sot-partikler.

En kalibreringskurve, heretter kalt "OECD-kurven", omsetter refleksjonsverdien til en støvmengde på filteret, f.eks. regnet i mikrogram (figur 2). Kalibreringskurven er kommet frem ved at samtidige målinger av støvmengde og refleksjonsverdi ble utført i europeiske byer på 1960-tallet.

Støvsammensetningen, eller egentlig sotandelen i støvet, er imidlertid ofte forskjellig fra sted til sted. Det vil derfor være tilfeldig om den støvmengde som kan leses av OECD-kurven for en viss refleksjonsverdi er lik den støvmengde som i virkeligheten finnes på filtret. Støvmengden fra OECDkurven er egentlig en relativ verdi som er proporsjonal med, men ikke lik, innholdet på filteret av sot, eller elementært karbon.

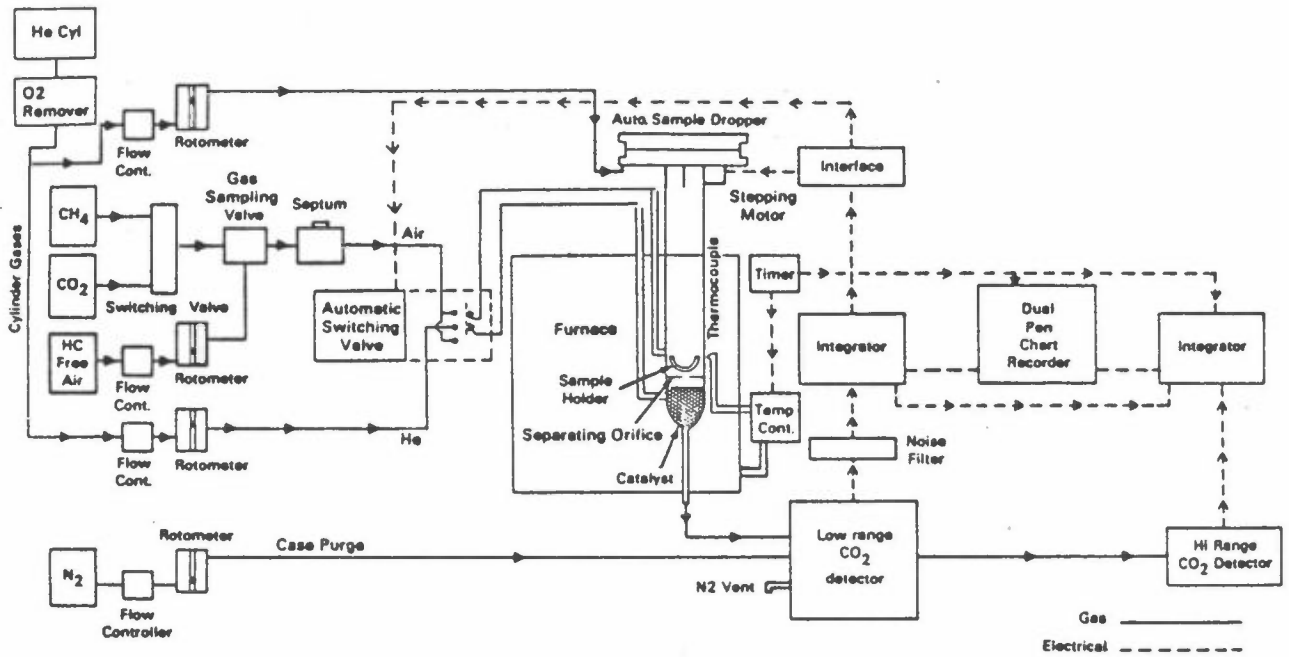
T. Novakov (1982)



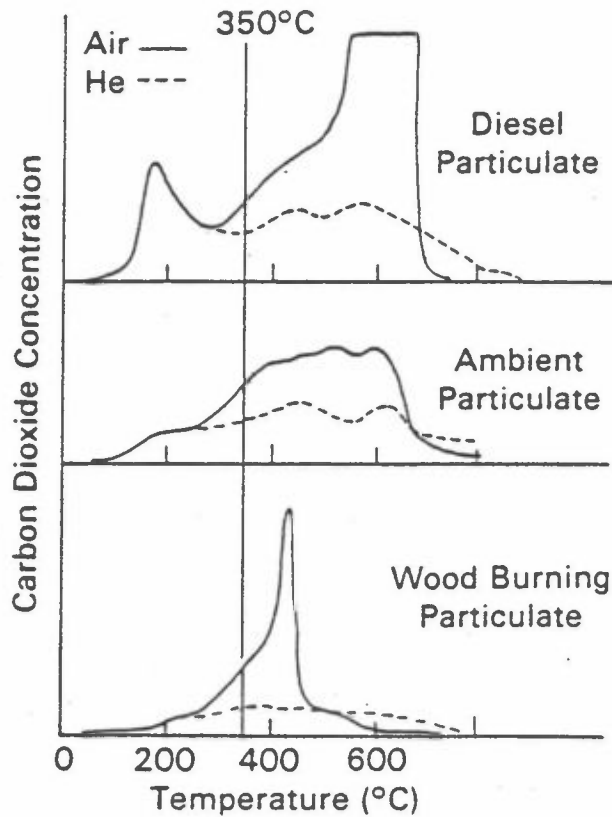
Thermogram of an ambient sample showing carbonate, black carbon, and several forms of organic material.

Figur 1: Eksempler på oppbygging av apparater og termogrammer for bestemmelse av organisk og elementært karbon i partikkelprøver.

Cadle et. al. (1980)



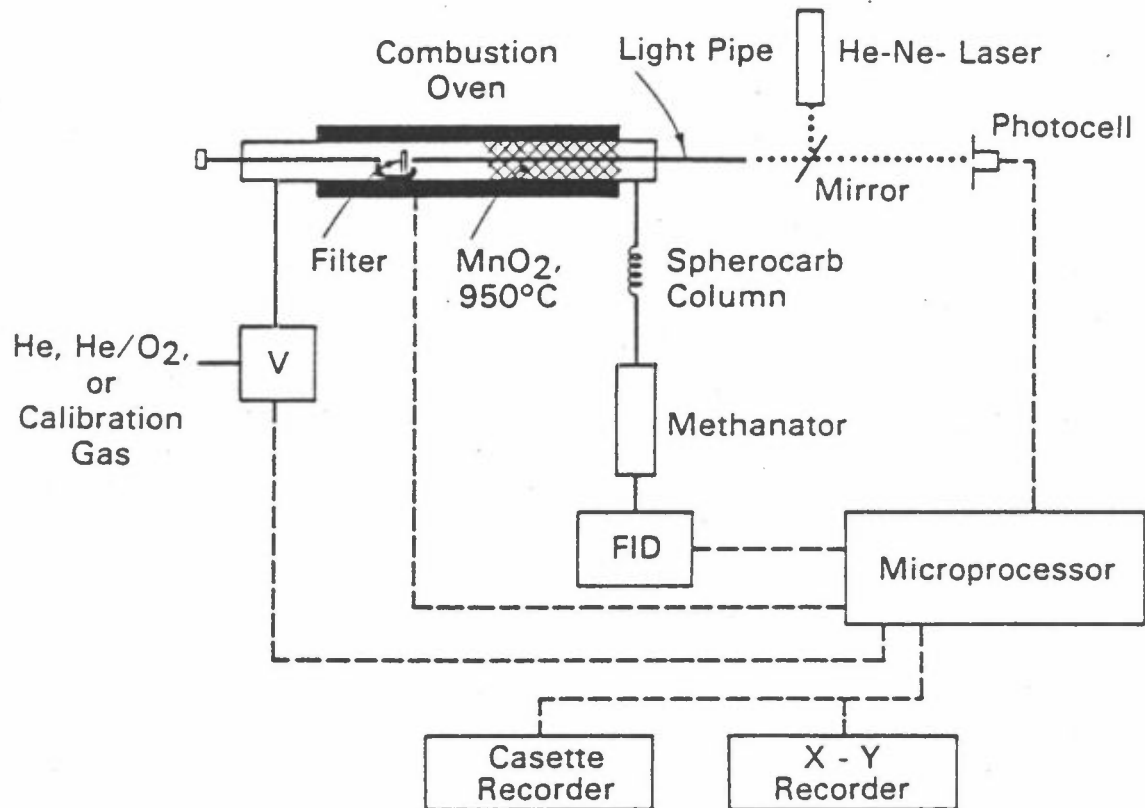
Cadle and Groblicki (1982)



Carbon thermograms in air and helium.

Figur 1 forts.

J. J. Huntzicker et. al. (1980)



Carbon analyzer. The dotted lines correspond to the laser light path, and the dashed lines are electrical connections. The methanator is a tube packed with Ni on firebrick at a temperature of 450°C. FID: flame ionization detector. V: valve. Details of the optical system and the gas flow system are discussed by Johnson [17].

Figur 1 forts.

Den støvmengden som leses av OECD-kurven kan kalles "mengde OECD-partikler". Relasjonen mellom denne mengde og sotmengden kan bestemmes gjennom samtidige, uavhengige målinger av lysrefleksjon og sotmengde. Den spesifikke lysabsorpsjon av sot varierer sannsynligvis ikke så mye fra kilde til kilde (bensineksos, dieseleksos, oljefyring, vedfyring, etc.). Måling av lysrefleksjon, og også andre metoder for måling av lys-absorpsjon i partikler på filter, kan derfor benyttes med rimelig nøyaktighet til å bestemme sotinnholdet i en partikkelprøve på filter. NILU utførte i 1982 samtidige målinger av lysrefleksjon, sotmengde og partikkelmengde i partikkelprøver fra eksosutslipp fra dieseldrevne person- og varebiler (Larssen og Heintzenberg, 1984) Refleksjonsmålingene ble utført etter OECD-metoden. Sotmengden ble bestemt med sot-fotometer (Heintzenberg, 1982) og partikkelmengden ved veiling. Slik kalibrering av en reflektometrisk målemetode for sot er tidligere utført av Delumyea et al. (1980) og Edwards et al. (1983).

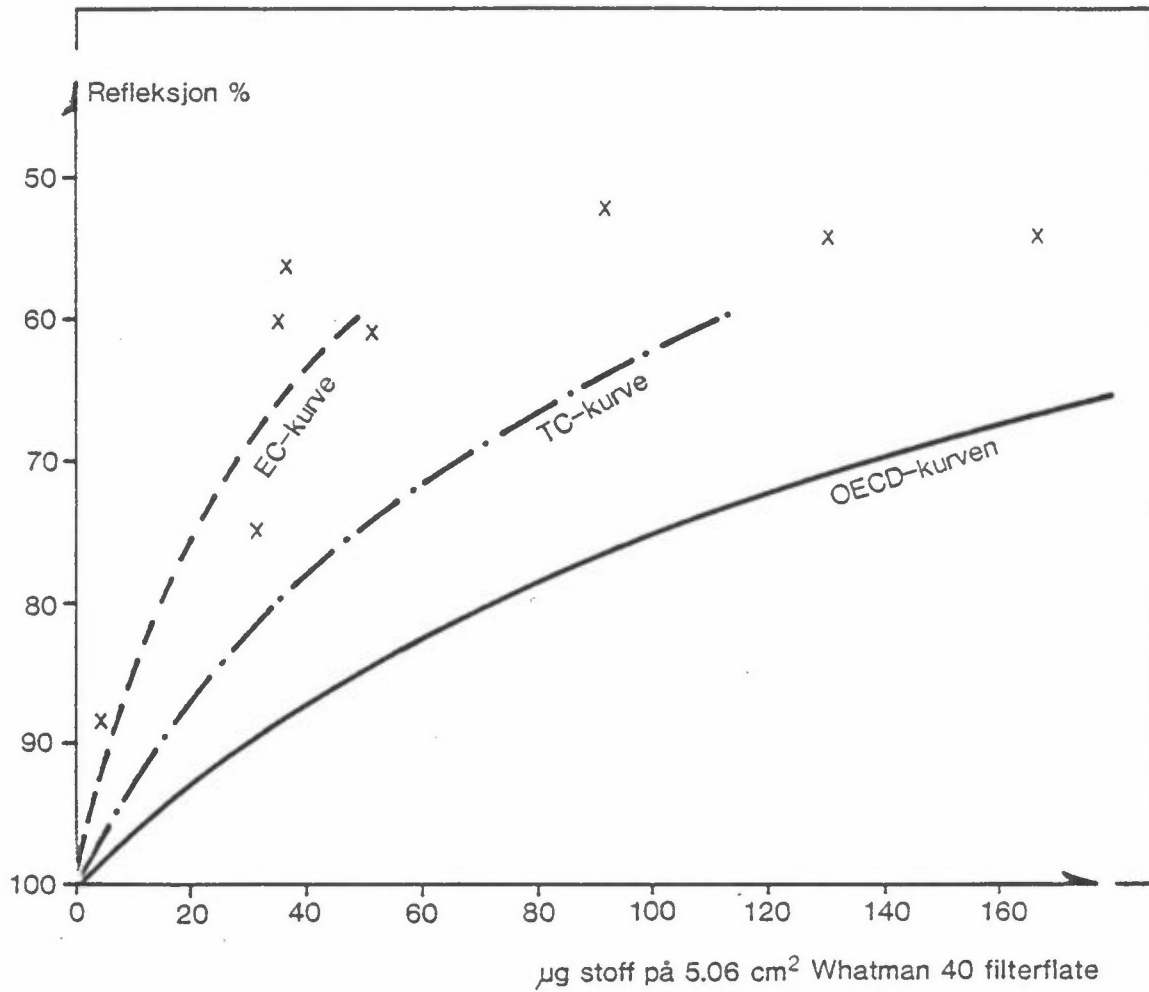
NILUs målinger ble utført på eksosen fra en bensindrevet og syv dieseldrevne biler. Figur 2 viser den sammenheng mellom lysrefleksjon og sot-innhold ("sot- kurve") resultatene ga grunnlag for å sette opp. OECD-kurven er også tegnet på figuren. Sot-kurven er gitt samme form som OECD-kurven, Figuren viser den store spredning i resultater. Begge metoder har sine usikkerheter. Flere slike sammenlignende målinger er nødvendig, også fra andre kildetyper, for å bestemme sammenhengen mellom lysrefleksjon og sotinnhold bedre.

På figuren er også tegnet en kurve etablert av Bailey et al (1982) for sammenhengen mellom lysrefleksjon og innholdet av totalt karbon (organisk og uorganisk) på filtre fra engelske byer i 1981. Det er rimelig at sot-kurven ligger over en kurve for totalt karbon.

I sammendrag kan en si følgende:

- OECD-metoden gir en partikkelmengde som er et relativt mål på sotinnholdet i en partikkelprøve.
- Samtidige målinger av lysrefleksjon og sotinnhold vil gi grunnlag for å gi en kalibreringskurve for sotinnhold. En slik sammenheng vil sannsynligvis variere lite fra kilde til kilde.





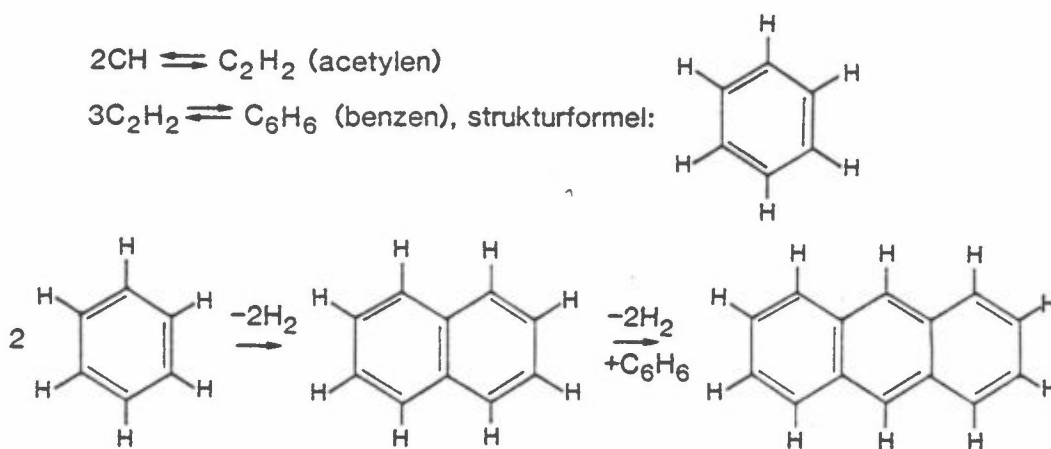
Figur 2: Foreslått EC-kurve for bestemmelse av mengde av elementært karbon (EC) på filter fra standard reflektometrisk svertningsmåling.

- NILU har foretatt slike målinger på eksospartikkelprøver fra dieselmotorer, og på grunnlag av det satt opp et første forslag til kalibreringskurve for sotinnhold på filter.

## 5 UTSLIPP AV SOT

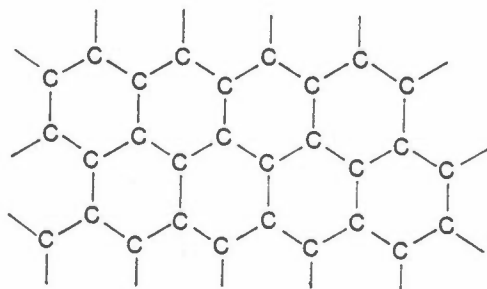
### 5.1 Utslippsoversikt

Dannelsen av karbonpartikler er en fundamental prosess ved forbrenning av hydrokarboner. Noen entydig teori for hvordan dannelsen av sot skjer, har man ennå ikke, men første trinn er en de-hydrogenering. Både CH og C<sub>2</sub>-radikaler dannes i flammene, og den videre syntese har meget til felles med dannelsen av polisykliske hydrokarboner (PAH). Figur 3 viser mulige reaksjonsforløp.



Figur 3: Mulige reaksjonsforløp for sot-dannelse.

Sot i form av grafitt, kan betraktes som siste ledd i en slik reaksjonskjede. Strukturmessig består grafitt av plater, som er bygget opp av karbonatomer i seksringer:



Reaksjonsveien ovenfor er bare én av flere mulige, og forbrenningsbetingelser som gir stor dannelse av polysykliske hydrokarboner gir ikke nødvendigvis stor dannelse av sot.

Utslippene av sot er særlig store ved dieselmotorer, fordi en der forbrenner under høyt trykk og ved høy temperatur. Ellers er lufttilgang, forbrennings-effektivitet og karbon/hydrogenforholdet i brenselet viktige faktorer.

Dårlig forbrenning av kull i små ildsteder var en hovedårsak til sotutslipp og forurensning i Storbritannia før "Clean Fuel Act" i 1956.

Ufullstendig forbrenning av avfall på åpen fylling, eller i små anlegg, halmbrenning og vedfyring gir også betydelige sotutslipp. I en meget om-diskutert artikkel om de klimatiske følgende av kjernefysisk krig, har Turco et al (1983) beregnet partikkelutslippene fra de branner som vil oppstå ut fra emisjonsfaktorer på fra 11 til 32 g/kg brennbart materiale. Opptil 50% av partikkelutslippene vil kunne være sot, i betydningen grafittisk karbon. Målinger utført i USA, på norske vedovner, viste at partikkelutslippet var 15 g/kg ved. Andelen sot kan også her være opptil 50%, dette avhenger visstnok av ligning-innholdet (Butcher, 1977, Dasch, 1982).

For å beregne omfanget av utslippene fra ulike kilder er det brukt data fra Statistisk sentralbyrå sammen med utslippsfaktorer fra forskjellige kilder (1983).

Tabell 1: Utslipp av sot fra ulike kilder i Norge

	Forbruk 1000 t	Utslippsfaktor, partikler, g/kg	Andel sot %	Sot- utslipp tonn/år
Trafikk				
Bensin	1440	0.05	5	4
Diesel	800	3	65	1550
Husoppvarming				
Parafin	410	0.1	50	20
Olje	2000	0.1	50	100
Ved	1500	15	30	6750
Industri				
Bygg og anlegg				
Dieselolje				
Avfall	300(?)	15	30	1350
Annet				
Halmbrenning	50	20	20	200

Det mest usikre overslaget i tabellen gjelder fast avfall. Etter Statistisk sentralbyrå utgjør avfallsmengden i Norge årlig 1.700.000 t, ca. halvparten av dette er husholdningsavfall. Bare 5% av dette går til søppelforbrenningsanlegg, for det meste mindre anlegg som delvis ikke fungerer tilfredsstillende. Det aller meste deponeres på fyllinger, hvor det mer eller mindre regelmessig oppstår branner. Noe tall for forbrenning i såkalte "søppelforbrenningsovner", tønner, eller gjerne bål av forskjellige slags avfall foreligger ikke. Tallet 300 tonn/år er derfor delvis spekulativt, men utvilsomt av riktig størrelsesorden. Det samme gjelder halmbrenningen som svarer til at noe over 5% av halmmengden brennes. Dette gir et relativt beskjedent utslipp, som imidlertid foregår innenfor et avgrenset tidsrom og under dårlige spredningsforhold.

## 5.2 Utslippsfaktorer for partikler og sot fra biltrafikk

NILU har utført målinger av utslipp av sot fra bensin- og dieseldrevne person- og varebiler (Larssen og Heintzenberg, 1984, Haugsbakk og Larssen, 1985). Målingene ble utført sommeren 1982 og 1983 ved Institutt for forbrenningsmotorer og marint maskineri (IFMM) ved NTH.

Målingene ble utført med OECD-metoden som gir et relativt uttrykk for sotmengden, og med en sotfotometer-metode som en direkte verdi for sotinnholdet på filteret (Sotfotometer-analysen ble utført av Jost Heintzenberg ved Stockholm universitetet).

Resultatene er oppsummert i tabell 2. Prøvematerialet er lite, spesielt for dieseldrevne biler. Det er ønskelig med flere målinger for å etablere mer representative faktorer. Spesielt bør en undersøke sotutslippet fra bensindrevne biler ved kaldstart i lave temperaturer (0 - -20 °C).

Når det gjelder dieseldrevne lastebiler og trailere er kunnskapen om utslippsfaktorer dårligere. I Statens vegvesens håndbok 17: Vegutforming, er oppgitt en utgangsverdi for sotutslipp fra tunge dieselmotorene på 800 mg/km, uavhengig av kjørehastighet. Denne verdien benyttes som basis for beregning av ventilasjonsbehov i tunneler.

Trafikksammensetningen på veier i byer og tettsteder ligger stort sett innenfor de grenser som er satt opp nedenfor:

Bensindrevne personbiler og varebiler	: 75-93%
Dieseldrevne personbiler og varebiler	: ca. 5%
Dieseldrevne busser, lastebiler og trailere:	2-20%

Siden en dieselmotorene i gjennomsnitt slipper ut minst 50 ganger mer sot enn en bensinbil, betyr dette at dieselmotorene, spesielt lastebiler og busser dominerer sotutslippet fra en trafikkstrøm. For å kunne gi gode utslippsoversikter over sotutslipp fra biltrafikken, er det derfor viktig at det utføres flere målinger av sotutslipp fra tunge og lette dieselmotorene for ulike kjøreforhold.

I kapittel 5.1 beskrives hvordan en ut fra målinger av sot og andre stoffer ved veier kan komme fram til et første estimat av sotutslippet også fra tunge lastebiler.

Tabell 2: Utslippsfaktorer for partikler og sot (mg/km) målt på biler i Norge.

KJØRESYKLUS	1		2		80 KM/H	
	ECE R15-04 KALD	ECE R15-04 VARM	ECE R15-04 KALD	ECE R15-04 VARM	ECE R15-04 KALD	ECE R15-04 VARM
	Antall biler	Gjennomsnitt	Antall biler	Gjennomsnitt	Antall biler	Gjennomsnitt
<u>Dieseldrevne personbiler</u>						
- partikkelutslipp	4	300	-	-	-	-
- sotutslipp	"	200	-	-	-	-
- sot andel, %	"	ca. 65%	-	-	-	-
<u>Dieseldrevne varebiler</u>						
- partikkelutslipp	3	600	-	-	-	-
- sotutslipp	"	400	-	-	-	-
- sotandel, %	"	ca. 65%	-	-	-	-
<u>Bensindrevne personbiler</u>						
- partikkelutslipp	19	60	35	35	19	65
- sotutslipp	"	10	3	3	"	1
- sotandel, %	"	ca. 16%	ca. 8%	ca. 8%	"	ca. 2%

1: Kaldstart ved ca 20<sup>0</sup> C

2: Varmstart ved ca 20<sup>0</sup> C

## 6 TIDLIGERE MÅLINGER OG BEREGNINGER AV PARTIKLER OG SOT I BYLUFT

Her oppsummeres NILU's erfaringer med målinger av sotinnhold i luft, og sammenligninger med beregninger basert enten på spredningsmodeller eller forhold mellom utslippsfaktorer.

### 6.1 Undersøkelser ved trafikkerte veier

Målinger av sot og andre stoffer, f.eks. CO, ved trafikkerte veier kan benyttes til å sjekke om en har kontroll over utslippsfaktorer for sot fra biltrafikk.

#### Rådhusgaten, 1979

Vinteren 1979 ble det i Rådhusgaten målt et forhold mellom "OECD-partikler" og CO (begge justert for bakgrunn), på ca. 0.015. Siden forholdet mellom "OECD-partikler" og sot antas å være ca. 4.7 (Larssen og Heintzenberg, 1984) fås et forhold mellom sot og CO på ca. 0.0032.

Utslippsfaktorer for sot fra lette biler (kjørehastighet 30 km/h) i Rådhusgaten settes til:

Bensindrevne personbiler:	4 mg/km (20% kaldstartandel)
Dieseldrevne personbiler:	200 "
Dieseldrevne varebiler :	400 "

Trafikksammensetningen settes til:

75-80% bensindrevne personbiler
5-10% dieseldrevne lette biler, halvparten personbiler og halvparten varebiler
15% tunge dieseldrevne lastebiler.

Basert på en utslippsfaktor for CO på 30 g/km fra trafikkstrømmen og forholdet mellom målt sot og CO på 0.0032, kan en utslippsfaktor for sot fra tunge diesalbiler ved 30 km/h beregnes til 420-520 mg/km.

St. Olavs gate, 1980-84

Her er målt følgende forhold mellom "OECD-partikler" og CO og mellom sot og CO (tilnærmet netto gatebidrag, dvs. nivået på referansestasjonen er fratrukket nivået i St. Olavs gate):

	<u>"OECD-partikler"</u>	<u>Sot</u>
	CO	CO
1980:	0.0063	0.0013
1981:	0.0070	0.0015
1982:	0.0089	0.0019
1984:	0.0063	0.0013

Trafikks sammensetningen i St. Olavs gate er i noen grad registrert. NILU's målinger gir en lastebilandel på ca. 2%.

Med de samme utslippsfaktorer for CO og sot som ble benyttet for Rådhusgaten, fås bra overensstemmelse mellom målt og beregnet forhold mellom sot og CO, når andelen av dieseldrevne lette biler settes til 10%, med halvparten personbiler og halvparten varebiler.

Holmestrand-tunnelen, sommeren 1983

Her ble følgende forholdstall målt:

	Virkedager	Lørdag - Søndag
$\frac{\text{sot}}{\text{CO}}$	0.0042	0.0019
$\frac{\text{Pb}}{\text{CO}}$	$0.30 \times 10^{-3}$	$0.28 \times 10^{-3}$
$\frac{\text{SO}_2}{\text{Sot}}$	1.7	1.3
$\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}}$	0.0072	-



Trafikksammensetningen settes til:

	Virkedager	Lørdag - Søndag
Bensindrevne personbiler (bpb)	84	94
Dieseldrevne lette biler (dpb)	3	3
Dieseldrevne tunge biler (dtb)	13	3

Følgende utslippsfaktorer benyttes for 70-80 km/h (g/km):

	CO	Sot	Pb (0.3 g Pb/l)	SO <sub>2</sub>
bpb	12	0.001	0.008	-
dpb	1.7	~0.2	-	0.5
dlb	3	~0.8	-	1.7

Utslippsfaktorer for sot fra bensindrevne biler ved 70-80 km/h er dårlig kjent. For dieseldrevne lastebiler er her benyttet utgangsverdien i Vegnormalen, for beregning av siktreduserende forurensninger i tunneler.

Basert på dette kan beregnes følgende forholdstall mellom utslipp fra trafikkstrømmen i tunnelen:

	Virkedager	Lørdag - Søndag
$\frac{\text{Sot}}{\text{CO}}$	0.011	0.0032
$\frac{\text{Pb}}{\text{CO}}$	$0.66 \times 10^{-3}$	$0.70 \times 10^{-3}$
$\frac{\text{SO}_2}{\text{Sot}}$	2.1	1.8
$\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}}$	0.023	-

$\frac{\text{Sot}}{\text{CO}}$ : Det beregnes vesentlig høyere forholdstall enn målt, spesielt for virkedager. Sot-utslippet fra dieselbiler er dårlig kjent for høye hastigheter. Overensstemmelser mellom målt og beregnet fås, dersom utslippsfaktor for tunge dieselbiler settes til ca. 0.3 - 0.5 g/km (istedet for 0.8 g/km).

$\frac{\text{Pb}}{\text{CO}}$ : De beregnete forholdstall er dobbelt så høye som de målte. Beregnet blyutslipp er basert på 0.3 g Pb/liter bensin. Det er mulig at høyoktan-bensinen i denne perioden (mai-juni) inneholdt 0.15 gPb/l, i påvente av bestemmelsen om dette som øvre grense fra 1. september 1983.

$\frac{\text{SO}_2}{\text{Sot}}$  og  $\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}}$ :

For begge disse forhold er de beregnete verdier lavere enn de målte. Det kan skyldes at utslippsfaktorene for  $\text{SO}_2$  er for høye.

Sammendrag

I det foregående har en gått ut fra utslippsfaktorer for CO, sot og andre stoffer, og for noen trafikkstrømmer sammenlignet forholdstall mellom utslippsfaktorene med forholdstall mellom målte konsentrasjoner av CO og sot ved trafikk-strømmene. Utslippsfaktor for CO er brukt som basis. Disse må anses å være relativt godt kjent.

En får stort sett bra overensstemmelse mellom målte og beregnede forholdstall, når en benytter de sotutslippstall for lette biler som er gitt i tabell 2, og benytter utslippsfaktorer for sot fra tunge dieselmotorer på ca. 0.5 g/km, både ved 30 km/h og ca 0,3-0,5 g/km ved 70-80 km/h på flat vei.

6.2 Målinger og beregninger av partikkel-forurensning over Oslo

Beregninger av partikkel-forurensning over Oslo ble utført i 1980 (Grønskei et al., 1982) basert på utslippsoversikter for 1979 (Gram, 1982).

Følgende utslippsfaktorer ble brukt som grunnlag:

Oljefyring

Blokker og småhus	: 1.2	kg/m <sup>3</sup>	olje, for alle oljekvaliteter
Industri, kontor, offentlig:	1.8	" "	for fyringsolje 1 og 2 og parafin
	2.75	" "	for tungdestillat og tungolje

Biltrafikk

Bensin	: 0.52	g/km	(se kommentar nedenfor)
Diesel	: 0.47	"	(" " " ")

Fast brensel

Kull og koks	: 10	kg/tonn
Ved	: 8.5-9.1	"

I tillegg kom utslipp av partikler fra en del enkeltkilder.

Kombinert med forbrukstall ga dette følgende totalutslipp av partikler i Oslo i 1979 (kg/time i gjennomsnitt):

	Vinter	Sommer
Oljefyring	108	60
Biltrafikk	136	123
Fast brensel	89	-
Annet	56	42
Sum	389	225

Utslippsfaktorene for oljefyring og fast brensel gjelder samlet vekt av partikler i utslippet.

Utslippsfaktorene for biltrafikk er kunstige. Utgangspunktet var samtidige målinger av "OECD-partikler" og CO ved trafikkerte veier som indikerte at forholdet mellom "OECD-partikler" og CO i utslipp fra biltrafikk burde være ca. 0.020. Utslippsfaktorene gjelder derfor egentlig "OECD-partikler", og de er satt slik at forholdet mellom samlet utslipp fra biltrafikk av "OECD-partikler" og CO ble lik 0.020.

Med det kjennskap en nå har til partikkelutslipp fra biler, kan en gjøre utslippsoversikten konsistent ved å benytte utslippsfaktorer for partikler for ulike bilklasser. Som eksempel kan følgende alternative trafikkfordelinger benyttes:

	Utslippsfaktor g/km	Trafikksammen- setninger	
		Alt.1	Alt. 2
Bensindrevne personbiler	0.04	90%	85%
Dieseldrevne personbiler	0.30	2%	2%
Dieseldrevne varebiler	0.60	3%	3%
Dieseldrevne lastebiler	1.0	5%	10%

Dette gir en samlet utslippsfaktor for partikler fra biltrafikk på ca 0.11 g/km for 5% tunge dieserbiler (alt. 1) og 0.16 g/km for 10% tunge dieserbiler (alt. 2).

Med de faktorene som ble benyttet i Oslo-beregningen for 1979, ble det beregnet en vinterhalvårs middelvei for partikler over Oslo sentrum på ca.  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , inklusive en bakgrunn på  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Med de nye utslippsfaktorene for biltrafikk på alternativt 0.11g/km og 0.16 g/km vil bidraget fra biltrafikk bli vesentlig mindre enn det som regnet med i Oslo-beregningen. Med disse utslippsfaktorer fås vinterhalvårs middelveier over Oslo sentrum i overkant av  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , inklusive en bakgrunn på  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Disse tall kan ikke sammenlignes med resultatene av målinger med OECD-metoden. De kan imidlertid sammenlignes med resultater av svevestøvmålinger som er foretatt f.eks. på stasjonen i Nordahl Bruns gate hver vinter siden 1980. Døgnprøver tas der et døgn pr. uke i månedene januar-februar, delvis også i desember. Disse målingene gir en midlere finpartikkel-konsentrasjon (diameter  $<10-15 \mu\text{m}$ ) på  $50-60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En må imidlertid regne med at i den målte fin-partikkel-fraksjon er et bidrag av partikler større enn  $10-15 \mu\text{m}$ , fordi prøvetakingen ikke er ideell. Det er usikkert hvor stort dette bidraget er, men fin-partikkel-konsentrasjonen er mindre enn de  $50-60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  som måles.

Det synes altså som de utslippsfaktorer en har for partikler gir beregnede verdier for partikkelkonsentrasjon som er noe lavere enn det som måles. Det er mulig finstøv fra veidekke-slitasje kan forklare en del av denne forskjellen.

Partikkelmålingene i Oslo med OECD-metoden kan gi sot-konsentrasjonen ved hjelp av den sot-kalibrering av OECD-metoden en har kommet fram til fra målingene av utslipp fra biler (se kapittel 3).

Med OECD-metoden måles mengden "OECD-partikler" på stasjonen i Nordahl Bruns gate til ca.  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  i gjennomsnitt for månedene januar-februar. Dette tilsvarer ca.  $8-10 \mu\text{g}$  sot/ $\text{m}^3$ , når den foreslåtte sot-kalibreringskurven benyttes.

Basert på anslagene for sotandel i partikkelutslipp fra ulike kilder satt opp i tabell 1, samt utslippsoversikten for Oslo for 1979, får en følgende tall for sotutslipp for Oslo totalt (kg/h i vinterhalvåret):

	Part. utslipp kg/h	Sotandel	Sotutslipp kg/h
Olje	108	50%	54
Biltrafikk*	30	40%	12
Ved	75	30%	23
Koks, kull	14	30%?	4?
Annet	56	30-50%?	17-28?
Sum	283		110-120

\* Her er brukt 0.1 g/km istedet for de 0.5 g/km som ble brukt i de opprinnelige beregninger.

Olje er etter dette hovedkilden. Vedfyring er en vesentlig kilde, og biltrafikken bidrar med ca. 10% av sotutslippet.

Dersom en antar at sotutslippet har samme romlige fordeling over Oslo som partikkelutslippet, vil dette sotutslippet gi en beregnet sotkonsentrasjon i Oslo sentrum på ca.  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . I tillegg kommer en bakgrunn på noen  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Til sammenligning måles altså 8-10  $\mu\text{g}$  sot/ $\text{m}^3$  på sentrumstasjonen i Nordahl Bruns gate, i gjennomsnitt for januar-februar, om en går ut fra den foreslåtte sot-kalibreringskurve for OECD-metoden.

### Sammendrag

Beregnete partikkelkonsentrasjoner i Oslo sentrum (vinterhalvårsmiddelverdi) er 30-35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mens en i januar - februar måler ca 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Beregnede partikkelkonsentrasjoner i Oslo sentrum synes derved å være en del lavere enn det som måles. Beregnede EC-konsentrasjoner samme sted er i rimelig god overenstemmelse med det som måles, basert på den foreslåtte EC-kalibreringskurve for OECD-metoden. Denne kalibreringskurve er foreløpig usikker.

### 6.3 Sammenheng mellom sot og PAH

Det er antydnet i prosjektskissen fra SFT at innholdet av sot og svevestøv i luft kan være en brukbar indikator på den lungekreftrisikoen i byområder som kan skyldes luftforurensning. I den sammenheng kan det ha interesse å se på sammenhengen mellom målte verdier av sot og PAH.

En har da sett på resultater fra stasjonene St. Olavs gate og Nordahl Bruns gate i Oslo, Brochs gate og City Hotell i Fredrikstad og Fellesbanken i Sarpsborg.

På hvert sted er en rimelig god korrelasjon mellom sot og PAH, men regresjonskoeffisienten varierer fra stasjon til stasjon.

50  $\mu\text{g}$  sot/ $\text{m}^3$  tilsvarer om vinteren ca. følgende konsentrasjon av PAH på partikler:

St. Olavs gate, Oslo : 50-100 ng PAH/m<sup>3</sup>  
Nordahl Bruns gate, Oslo: 50-100 ng PAH/m<sup>3</sup>  
Brochs gate, Fredrikstad: 100-150 ng PAH/m<sup>3</sup>  
City Hotell, Fredrikstad: 150-200 ng PAH/m<sup>3</sup>  
Fellesbanken, Sarpsborg : 75-125 ng PAH/m<sup>3</sup>

Dette kan bety at kildesammensetningen i området ved stasjonene påvirker forholdet mellom sot og PAH.

## 7 HOVEDKILDER TIL SOT I BYLUFT

Ifølge utslippsanslagene i tabell 1 er det vedfyring, dieseltrafikk og avfallsforbrenning som er hovedkildene til sot på landsbasis.

Hvilket bidrag disse og andre kilder gir til sotinnholdet i byluft er avhengig av det faktiske utslipp fra kildene i det området en betrakter. Detaljert informasjon om dette krever utslippsfaktorer for sot fra fyring med fast brensel og fra andre kilder, i tillegg til forbrukstall.

Beregningene for Oslo som ble gjort i kapittel 5.2 kan tjene som eksempel. Der fant en at oljefyring bidro med ca. 50% av sotutslippet, vedfyringen med ca. 20% og biltrafikken med ca. 10%. I mindre tettsteder kan fordelingen være en annen. Disse tallene er usikre. Utslippsfaktorer for sot må forbedres for å gi sikrere tall.

Samtidige målinger av CO og sot som er foretatt i sentrum i Oslo, Bergen og Fredrikstad de siste år kan også gi en antydning om biltrafikkens bidrag til sotinnholdet.

Forholdet mellom utslippet av sot og CO fra en trafikkstrøm i en bygate er ca. 0.001-0.0035, når andelen av tunge dieselmotorer er mellom ca. 5% og 15%.



Målinger viser følgende:

		Sot, beregnet fra målt CO µg/m		Målt sot <sub>3</sub> µg/m
		Andel tunge dieselbiler <u>5%</u> <u>15%</u>		
<u>Oslo</u> ,	Nordahl Bruns gate januar-februar 1980-83:	3	6	11
<u>Bergen</u> ,	Teaterparken februar 1983:	3	6	9
<u>Fredrikstad</u> ,	City hotell des. 1981-feb.1982:	2	5	10

Som grunnlag er brukt en utslippsfaktor for CO fra biltrafikk på 30 g/km.

Ved en andel tung dieseltrafikk på 5% beregnes altså at biltrafikkens sotutslipp bidrar med 20-30% av målt sotnivå. Dersom dieselandelen er 15%, forklarer biltrafikken 50-65% av målt sotnivå.

Dette gir altså et vesentlig større sotbidrag fra trafikken enn utslippsanlagene for Oslo som helhet gir (ca. 10%).

Det er nødvendig både med bedre utslippsfaktorer for sot og en vurdering av sotbidragene rent lokalt, f.eks. ved reseptarmodell-beregning, for å oppklare disse forskjeller.

## 8 REFERANSER

- Bailey, D.L.R. og Clayton, P. (1982) The measurement of suspended particle and total carbon concentrations in the atmosphere using standard smoke shade methods. Atmos. Environ., 16, 2683-2690.
- Butcher, S.S. og Buckley, D.I. (1977) A Preliminary Study of Particulate Emissions from small wood stoves. J. Air. Poll. Control Assoc., 27, 346.
- Cadle, S.H. og Groblicki, P.J. (1982) An Evaluation of Methods for the Determination of Organic and Elemental Carbon in Particulate Samples. In: International Symposium on Particulate Carbon: Atmospheric Life Cycle. Ed. by G.T. Wolf and R. L. Klimisch. Plenum, New York. s. 89-109.

- Dasch, J.M. (1982) Particulate and Gaseous Emissions from Wood-Burning Fireplaces. Environ. Sci. Technol., 16, 639-645.
- Delumyea, R.G., Lih-Ching, C. og Macias, E.S. (1980) Determination of Elemental Carbon Component of Soot in Ambient Aerosol Samples. Atmos. Environ., 14, 647-652.
- Edwards, J.D., Ogren, J.A., Weiss, R.E. og Charlson, R.J. (1983) Particulate air pollutants: A comparison of British "Smoke" with optical absorption coefficient and elemental carbon concentration. Atmos. Environ., 17, 2337-2341.
- Gaydon, A.G. og Wolfhard, H.G. (1979) *Flames. Their Structure, Radiation and Temperature*, 4th ed. London, Chapman and Hall.
- Gram, F. (1982) Utslipp av luftforurensninger i Oslo-området 1979. Lillestrøm (NILU OR 10/82).
- Grønskei, K.E., Gram, F. og Larssen, S. (1982) Beregning av sprednings- og eksponeringsforhold for visse luftforurensningskomponenter i Oslo. Lillestrøm (NILU OR 8/82).
- Haugsbakk, I. og Larssen, S. (1985) Måling av utslipp av partikler, sot og bly fra bensindrevne personbiler ved ulike kjøresykluser. Lillestrøm (NILU OR 3/85).
- Heintzenberg, J. (1982) Size-segregated particulate elemental carbon and aerosol light-absorption at remote arctic locations. Atmos. Environ., 16, 2461-2469.
- Huntzicker, J.J., Johnson, R.L., Shah, J.J. og Cary, R.A. (1982) Analysis of Organic and Elemental Carbon in Ambient Aerosols by a Thermal-Optical method. In: International Symposium on Particulate Carbon: Atmospheric Lift Cycle. Ed. by G.T. Wolf and R.L. Klimisch. New York, Plenum. s. 79-88.
- Larssen, S. og Heintzenberg, J. (1984) Målinger av utslipp av sot og andre partikler fra personbiler og lette varebiler. Lillestrøm (NILU OR 50/84 (rev. utg.)).
- Novakov, T. (1982) Soot in the Atmosphere. In: International Symposium on Particulate Carbon: Atmospheric Lift Cycle. Ed. by G.T. Wolf and R.L. Klimisch. New York, Plenum. s. 19-41.
- OECD (1964) *Methods for measuring air pollution*. Paris.
- Roessler, D.M., Faxvog, F.R., Stevenson, R. og Smith, G.W. (1981) Optical properties and morphology of particulate carbon. In: International Symposium on Particulate Carbon: Atmospheric Lift Cycle: Formation during combustion. Ed. by Sieglä, D.C. and Smith, G.W. New York, Plenum Press. s. 57-90.
- Rosen, H. og Novakov, T. (1977) Raman Scattering and the Characterization of Atmospheric Aerosol Particles. Nature, 266, 708-710.

Statistisk sentralbyrå (1983) Miljøstatistikk 1983. Statistiske analyser nr. 50.

Turco, R.P. et al. (1983) Nuclear Winter: Global Consequences of Multiple Nuclear Explosions. Science, 222, 1283-1292.

Weiss, R.E. og Waggoner, A.P. (1982) Optical Measurement of Airborne Soot in Urban, Rural and Remote Locations. In: International Symposium on Particulate Carbon: Atmospheric Life Cycle. Ed. by G.T. Wolf and R.L. Klimisch. New York, Plenum. s. 317-325.

Wolf, G.R., Groblicki, P.J., Cadle, S.H. og Countess, J. (1982) Particulate Carbon at Various Locations in the United States. In: International Symposium on Particulate Life Cycle. Ed. by G.T. Wolf and R.L. Klimisch. New York, Plenum. s. 297-315.

**NORSK INSTITUTT FOR LUFTFORSKNING (NILU)  
NORWEGIAN INSTITUTE FOR AIR RESEARCH**

(NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FORSKNINGSRÅD)

POSTBOKS 130, 2001 LILLESTRØM (ELVEGT. 52), NORGE

RAPPORTTYPE	RAPPORTNR. OR 40/85	ISBN-82-7247-602-9	
DATO AUGUST 1985	ANSV. SIGN. <i>Algorland</i>	ANT. SIDER 50	PRIS Kr 40,00
TITTEL Hovedkilder til sot og svevestøv i byluft. Prosjektforslag		PROSJEKTLEDER Steinar Larssen	
		NILU PROSJEKT NR. D-8444	
FORFATTER(E)  Steinar Larssen og Arne Semb		TILGJENGELIGHET A	
		OPPDRAKSGIVERS REF.	
OPPDRAKSGIVER (NAVN OG ADRESSE)  Statens forurensningstilsyn, Oslo			
3 STIKKORD (å maks. 20 anslag) Luftforurensning      Byluft      Sot			
REFERAT (maks. 300 anslag, 7 linjer) NILU har utarbeidet et forslag til videre undersøkelser av størrelsen av ulike kilders utslippsbidrag til sot og svevestøv i byluft. Hovedvekten er lagt på sot. I prosjektforslaget beskrives dagens kunnskap når det gjelder hovedkilder til sot og svevestøv i byluft, og hovedmangler i kunnskapsgrunnet. For å bedre kunnskapene må en arbeide for å fremskaffe bedre utslippsfaktorer og/eller utføre reseptormodell-analyser.			

TITLE Sources of suspended particles and carbon in urban air in Norway. Project proposal.

ABSTRACT (max. 300 characters, 7 lines)  
A proposal is presented on further investigation of source contributions to suspended particles and carbon in urban air in Norway. The main emphasis is put on elemental carbon. The present knowledge of source contributions to urban air in Norway is described. To improve knowledge on source contributions it is necessary to improve particle emission factors and/or carry out receptor model analysis based on characterization of particle emissions.

\* Kategorier: Åpen - kan bestilles fra NILU      A  
                  Må bestilles gjennom oppdragsgiver    B  
                  Kan ikke utleveres                            C