

## Vejbelægningens indflydelse på partikelforureningen (PM<sub>10</sub>) på stærkt trafikerede gadestrækninger i Danmark

Thomas Ellermann, Peter Wählin, Claus Nordstrøm og Matthias Ketzler

Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet,  
Frederiksborgvej 399, 4000 Roskilde  
[tel@dmu.dk](mailto:tel@dmu.dk)

### Abstrakt

Luftbåren partikelforurening giver anledning til en betydelig mængde sundhedsskadelige effekter. Massen af partikler med diameter under 10 µm (PM<sub>10</sub>) har i København til og med 2008 ligget over EU's grænseværdier for PM<sub>10</sub>. Fra 2008 til 2009 faldt årsmiddelværdien af PM<sub>10</sub> med 6 µg/m<sup>3</sup> på målestationen på H.C. Andersens Boulevard, København, således at grænseværdierne overholdes i 2009. Faldet skete forholdsvis brat efter august 2008, hvor der blev lagt ny belægning på H.C. Andersens Boulevard. Ændringerne i døgnvariationen af PM<sub>10</sub> og grundstofsammensætningen i PM<sub>10</sub> før og efter den nye belægning viser, at årsagen til det store fald skyldes en stor reduktion i de partikler, som hvirvles op fra vejen grundet trafikken. Vejbelægningen har dermed stor indflydelse på PM<sub>10</sub> på stærkt trafikerede gadestrækninger. Der blev også set et mindre fald i PM<sub>2,5</sub>, men der kræves flere undersøgelser for at vurdere, hvor stor en del af dette fald, som skal tilskrives den nye belægning.

### Indledning

Overvågningen af den luftbårne partikelforurening i Danmark foretages i henhold til EU's luftkvalitetsdirektiver (EU 2008) og foretages blandt andet af hensyn til partikelforureningens skadelige effekter på sundhed. Overvågningen i København har vist, at massen af partikler med diameter under 10 µm (PM<sub>10</sub>) i årene op til og med 2008 lå over mindst en af EU's grænseværdier for PM<sub>10</sub> (40 µg/m<sup>3</sup> som årsmiddelværdi eller 50 µg/m<sup>3</sup> for døgnmiddelværdi, som højst må overskrides 35 gange i løbet af et kalenderår). Disse grænseværdier er fastlagt i EU's direktiv om luftkvalitet og renere luft i Europa (EU 2008). Danmark er forpligtet til at overholde disse grænseværdier. Fra 2008 til 2009 faldt årsmiddelværdien for PM<sub>10</sub> ved Danmarks Miljøundersøgelses målestation på H.C. Andersens Boulevard (HCAB) med 15% fra 39 µg/m<sup>3</sup> til 33 µg/m<sup>3</sup> opgivet ved 0° C og 1 atm (Ellermann et al., 2009, Ellemann 2010), således at Danmark i 2009 overholdt EU's luftkvalitetsgrænseværdier for PM<sub>10</sub>. Tilsvarende fald i PM<sub>10</sub> er ikke observeret på de øvrige målestationer, hvor der måles PM<sub>10</sub> i København (Ellermann et al., 2010)

Faldet i PM<sub>10</sub> skete forholdsvis brat omkring august 2008, hvilket falder sammen med, at der i slutningen af august 2008 blev lagt ny vejbelægning på H.C. Andersens Boulevard. En ny vejbelægning kan give ændringer i mængden af partikler der hvirvles op fra vejen, herunder partikler fra slid på vej materialet, dæk og bremses samt jord, sand, salt m.m. Undersøgelser i Tyskland har vist, at ændring i vejbelægning kan have stor betydning for niveauet af PM<sub>10</sub> (Düring et al., 2008) og det er derfor muligt, at ændringerne i belægningen kan være årsagen til det store fald i PM<sub>10</sub> fra 2008 til 2009.

Der kan imidlertid også være andre årsager til faldet i partikelforureningen på H.C. Andersens Boulevard. Den 1. september 2008 blev miljøzonen til begrænsning af luftforurening fra trafikken indført i København, hvilket dog kun forventes at give ubetydelige ændringer for PM<sub>10</sub> (Jensen et al., 2010). En anden mulig forklaring kunne være ændring i trafikintensitet og trafiksammensætning fx i relation til den internationale finanskrise. Endvidere kan de meteorologiske variationer mellem årene også føre til variationer i partikelforureningen fra år til år.

For at vurdere ændringen af vejbelægningens indflydelse på det observerede fald i partikelforureningen er der på basis af måling af partikelbårne sporstoffer og døgnvariationen af partikelmassen blevet lavet detailundersøgelser af vejstøvsindflydelse på PM<sub>10</sub> på H.C. Andersens Boulevard. Resultatet af disse undersøgelser fremlægges i denne artikel. Ændring i massen af de fine partikler (PM<sub>2,5</sub>) vil også kort blive berørt.

## Metoder, analyser og fremgangsmåde

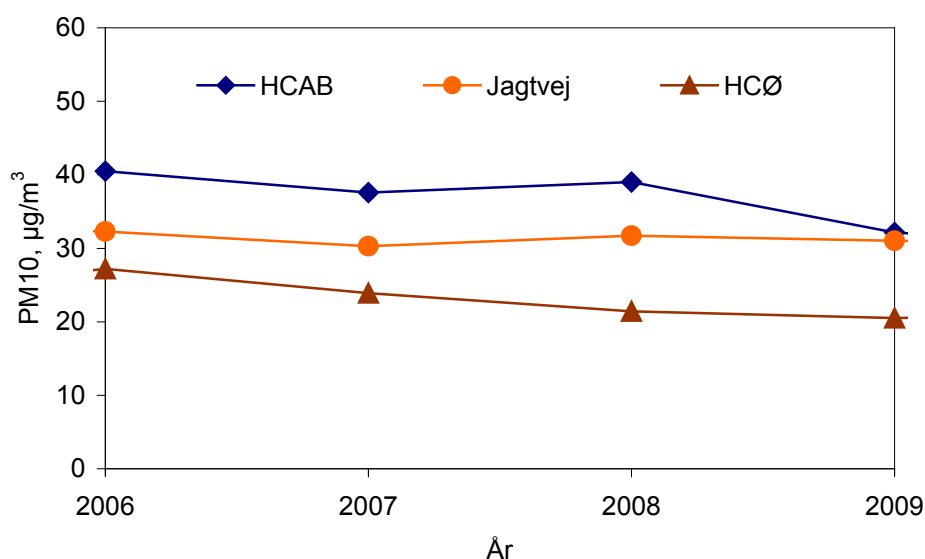
Målestationen på H.C. Andersens Boulevard (HCAB) indgår i den landsdækkende overvågning af luftkvalitet under det Nationale Overvågningsprogram for Vandmiljø og Terrestrisk Natur (NOVANA; Ellermann et al., 2010). På målestationen måles kontinuerligt et bredt udsnit af de sundhedsskadelige luftforureningskomponenter navnlig med fokus på karakterisering af den luftbårne partikelforurening. PM<sub>10</sub> og PM<sub>2,5</sub> måles med døgnmiddelværdier med SM200-monitor (OP SIS, Sverige), hvor partiklerne opsamles på filter på døgnbasis med efterfølgende bestemmelse af massen ved hjælp af  $\beta$ -stråling. I 2008 og 2009 har det været nødvendigt at kassere en del SM200-målinger af PM<sub>10</sub>. Disse er blevet erstattet af estimater (se nedenfor). Data for 2010 er præliminære, da de endnu ikke er fuldt kvalitetssikrede. Indholdet af grundstoffer i de opsamlede partikler bestemmes efterfølgende med Proton Induced X-ray Emission (PIXE). PM<sub>10</sub> bestemmes også ved hjælp af TEOM-instrumenter (Tapered Element Oscillating Microbalance), som har den fordel at partikelmassen kan bestemmes med høj tidsopløsning (30 min.). TEOM har dog en kendt bias, idet en del af partikelmassen fordamper i forbindelse med selv målingen, således at TEOM underestimerer den faktiske PM<sub>10</sub>. Undersøgelser af Wählín (2008) har vist, at det hovedsageligt er det langtransporterede bidrag som underestimeres, mens bidrag relateret til trafik måles korrekt. Ved at kombinere målinger med TEOM på HCAB med målinger med TEOM og SM200 på bybaggrundsmålestationen på taget af H.C. Ørsteds Instituttet (HCØ), Københavns Universitet kan der kompenseres for denne underestimering, således at PM<sub>10</sub> kan estimeres med god nøjagtighed (Ellermann et al., 2010). Endelig måles kvælstofoxider (NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>) med midlingstid på 30 min. ved hjælp af NO<sub>x</sub>-monitor (API, San Diego USA). NO<sub>x</sub> er en god indikator for den generelle luftforurening fra trafik.

Kilderne til PM<sub>10</sub> og PM<sub>2,5</sub> på HCAB kan for en stor del bestemmes på basis af de nævnte modeller og ved brug af modeller til kildebestemmelse (Wählín et al., 2006). Mængden af PM<sub>10</sub> fra trafikken kan bestemmes på basis af forskel mellem målingerne i gaderummet og bybaggrundsmålingerne og ved at sammenholde de tidlige variationer med de tidlige variationer i trafikintensitet. Endvidere kan grundstofanalyserne af de opsamlede partikler give information om kilderne, fordi udvalgte grundstoffer fungerer som sporstoffer for de forskellige typer af kilder til partikler.

## Resultater

### $PM_{10}$

Siden målingerne af  $PM_{10}$  ved HCAB blev begyndt i 2006 har niveauet været forholdsvis stabilt med årsmiddelværdier på 41, 38 og 39  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  for årene 2006, 2007 og 2008. I 2009 faldt årsmiddelværdien til 33  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , hvilket svarer til et fald på 15% fald i  $PM_{10}$ . Tilsvarende fald er ikke set på de øvrige målestationer, hvor der måles  $PM_{10}$  i København (Figur 1). På basis af månedsmiddelværdier for  $PM_{10}$ , ses at faldet i  $PM_{10}$  skete forholdsvis brat omkring august 2008 (Figur 2). Tilsvarende store fald ses tidligere i måleserien (fx juni til juli 2007), men i modsætning til tidligere ser det ind til videre ud til, at niveauskiftet i september 2008 er længerevarende. Niveauskiftet i  $PM_{10}$  er sammenfaldende med, at der i august 2008 blev lagt ny vejbelægning på H.C. Andersens Boulevard. Målingerne peger derfor på en sammenhæng mellem ændringerne i  $PM_{10}$  og den nye vejbelægning.

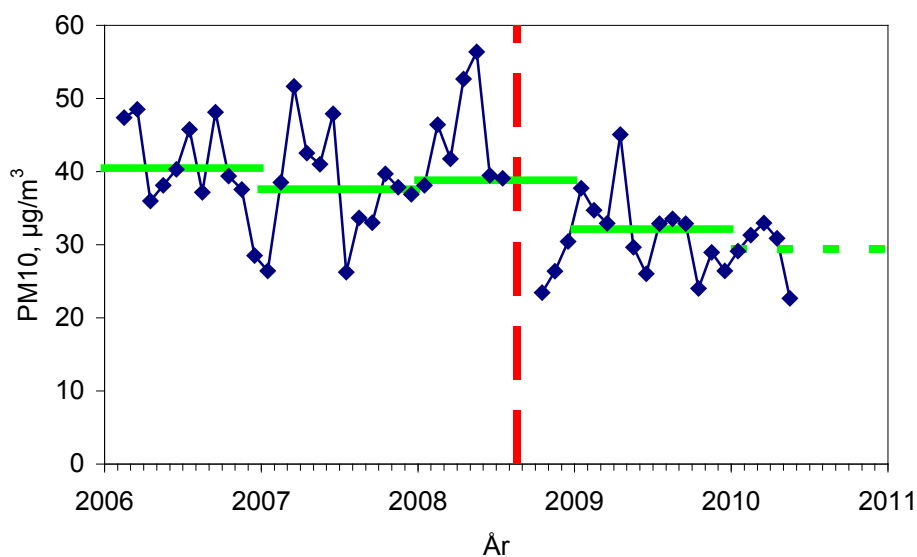


Figur 1. Årsmiddelværdier for  $PM_{10}$  på de tre målestationer i København, hvor der måles  $PM_{10}$ . HCAB og Jagtvej er gademålestationer, hvor målingerne foretages i ca. 3 meters højde omkring 2 meter fra vejkannten. HCØ er en såkaldt bybaggrundsmålestation placeret i 20 meters højde på taget af H. C. Ørsteds Institutet.

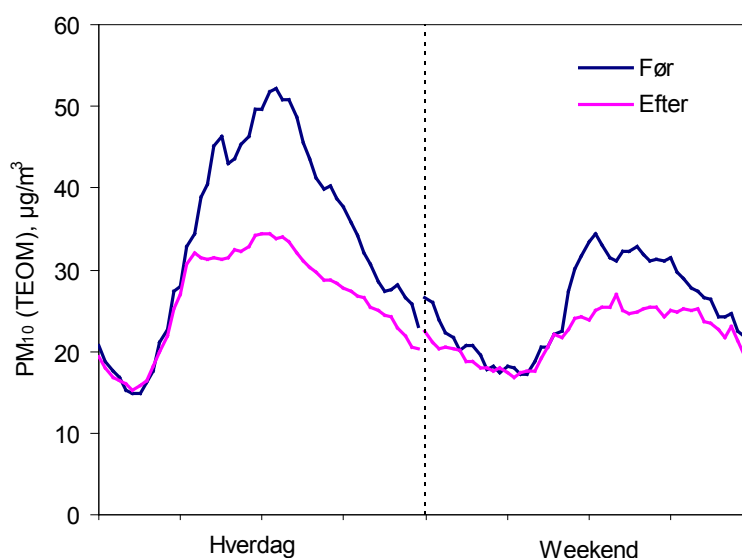
Hvis ændringerne i  $PM_{10}$  skyldes den nye vejbelægning vil faldet i  $PM_{10}$  primært give ændringer i  $PM_{10}$  om dagen, fordi mængden af partikler relateret til vejbelægningen er proportional med vejtrafikken vægtet i forhold til sammensætningen af trafikken. Figur 3 viser gennemsnitlig døgnvariation af  $PM_{10}$  målt med TEOM for perioden henholdsvis et år før og et år efter asfalteringen. Døgnvariationen er endvidere opdelt i hverdage og weekend.  $PM_{10}$  (TEOM) er faldet med omkring 15 og 7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  midt på henholdsvis hverdage og weekenddage. Til gengæld er der kun en meget lille ændring om natten. Dette hænger sammen med, at  $PM_{10}$  om natten hovedsageligt kommer fra kilder, som ikke er relateret til trafik, hvoraf langtransport af partikler spiller den største rolle. Ændringerne i  $PM_{10}$  (TEOM) ligger derfor i perioder med høj trafikintensitet, hvilket viser, at ændringerne i  $PM_{10}$  er relateret til trafik. I gennemsnit er der med TEOM målt en ændring i  $PM_{10}$  på omkring 6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  før og efter den nye belægning.

Figur 4 viser den tilsvarende gennemsnitlige døgnvariation for koncentrationen af  $\text{NO}_x$  henholdsvis et år før og et år efter den nye vejbelægning.  $\text{NO}_x$  i gaderum stammer stort set udelukkende fra trafik og  $\text{NO}_x$  er derfor en god indikator for trafikrelateret luftforurening.

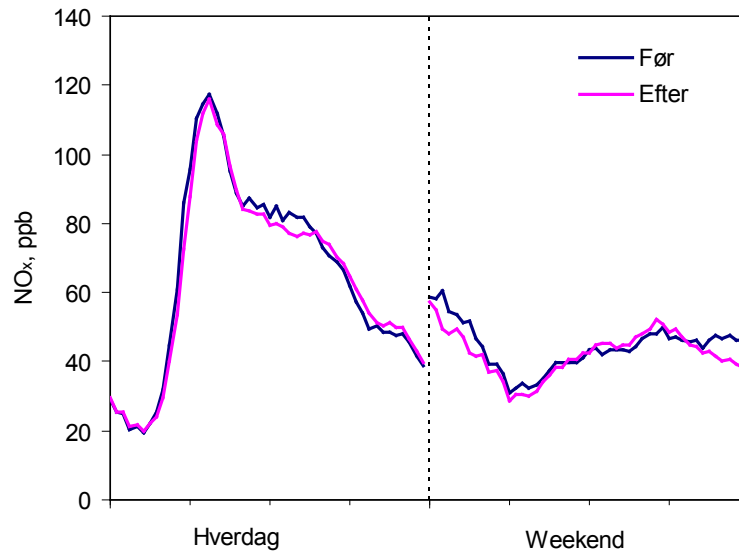
Kurverne er næsten identiske før og efter, hvilket indikerer, at trafikmængden og døgnvariationen i trafikken på HCAB er uændret før og efter den nye vejbelægning. Eneste markante forskel ses om natten på weekenddage. Årsagen til denne forskel er endnu ikke afklaret, men vil blive nærmere undersøgt i andre sammenhænge.



Figur 2. Udviklingstendens for PM<sub>10</sub> på målestationen på H.C. Andersens Boulevard. De mørkeblå punkter angiver månedsmiddelværdier for PM<sub>10</sub> baseret på målinger og estimer for perioder med manglende målinger. Målinger fra august 2008 indgår ikke, da der kun var målinger fra en halv måned. De grønne linjer angiver årsmiddelværdier for 2006, 2007, 2008 og 2009, mens 2010 kun er angivet med stiplede linje, fordi der endnu ikke foreligger et fuldt års målinger. Den røde linje angiver tidspunkt for asfalteringen af H.C. Andersens Boulevard. Fluktuationer fra måned til måned skyldes primært naturlig variation i de meteorologiske forhold, som bl.a. har indflydelse på mængden af langtransporteret PM og mængden af PM fra vejsaltning.

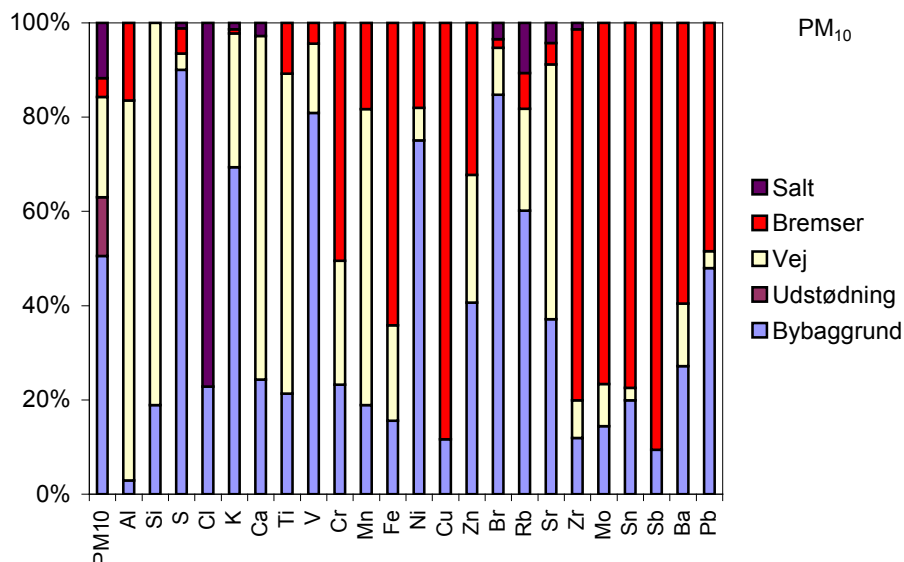


Figur 3. Gennemsnitlig døgnvariation for PM<sub>10</sub> et år før og efter den nye vejbelægning (august 2008) på HCAB. Målingerne er foretaget med TEOM, hvilket betyder, at PM<sub>10</sub> måles for lavt, fordi en del af partiklerne fordamper i instrumentet. Dette påvirker dog ikke målingerne af PM<sub>10</sub> fra vejtrafikken.



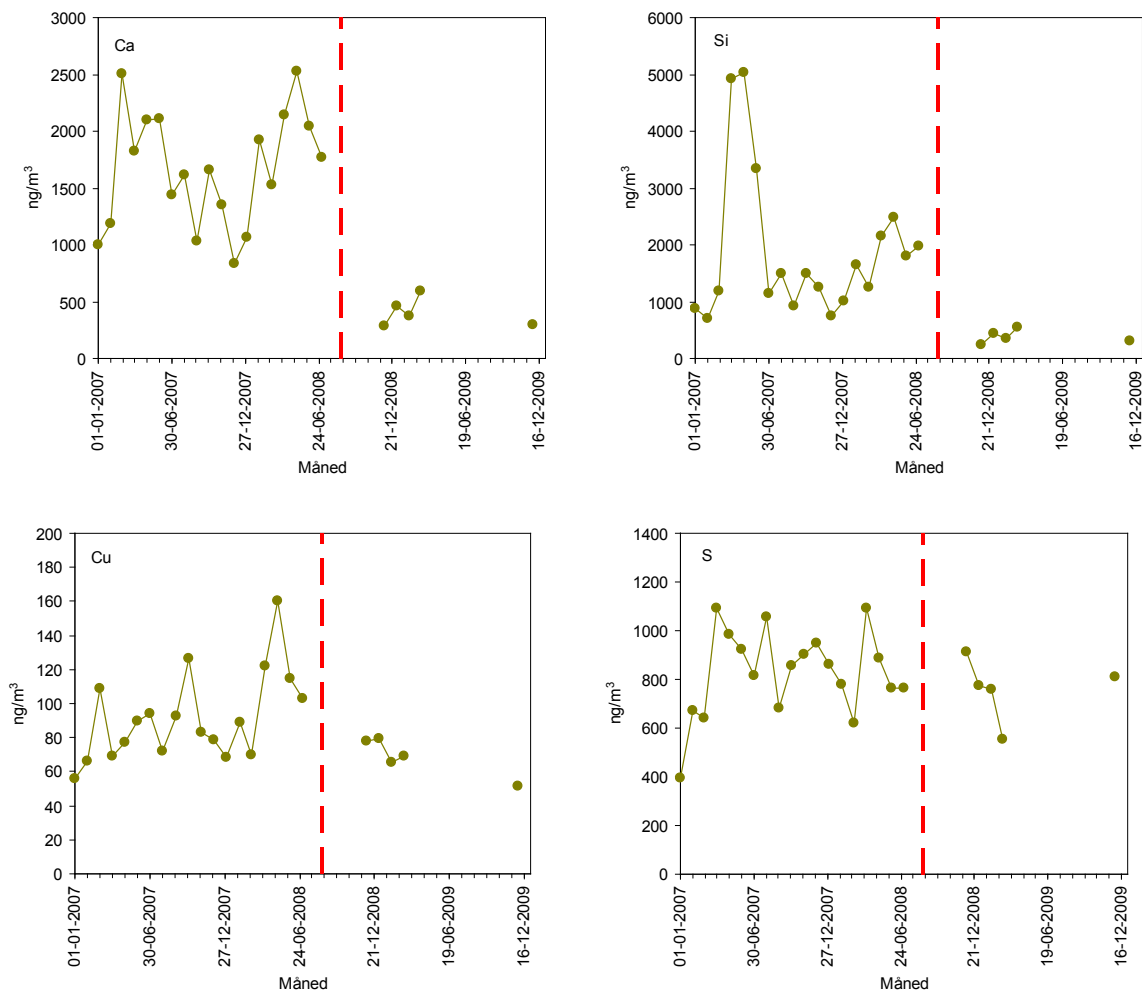
Figur 4. Gennemsnitlig døgnvariation for NO<sub>x</sub> henholdsvis et år før og et år efter den nye vejbelægning (august 2008) på HCAB. Målingerne er foretaget med NO<sub>x</sub>-monitor og dækker perioden henholdsvis et år før og et år efter asfalteringen.

Ud fra grundstofsammensætningen i partiklerne er det muligt at vurdere om ændringerne i den trafikrelaterede partikelforurening kan forklares med den nye vejbelægning. Wåhlin et al. (2006) har tidligere ved hjælp af en modelbaseret kildeanalyse beregnet kilderne til de enkelte partikelbundne grundstoffer på HCAB. Undersøgelsen inkluderede også en analyse af indholdet af grundstoffer i asfalten på HCAB. Figur 5 viser kildefordelingen for PM<sub>10</sub> på HCAB før den nye vejbelægning.



Figur 5. Den procentuelle kildefordeling af PM<sub>10</sub> og partikelbundne grundstoffer på HCAB før den nye vejbelægning.

For  $PM_{10}$  gælder, at Ca og Si hovedsageligt stammer fra vejen, hvilket omfatter de partikler, der hvirvles op fra vejen og som kommer fra slid af vejbelægning, sand og jordstøv. Cu stammer næsten udelukkende fra bremses. Svovl kommer næsten udelukkende fra langtransporterede partikler, hvilket i denne analyse er inkluderet i bybaggrunden. Figur 6 viser udviklingstendenserne for disse udvalgte grundstoffer. For Ca og Si, som begge primært kommer fra vejen, ses markante fald med omkring 80% for  $PM_{10}$ . Til sammenligning er Cu, som primært kommer fra bremses, faldet med kun 20-25%. S, som primært kommer fra langtransport, er faldet med mindre end 10%.

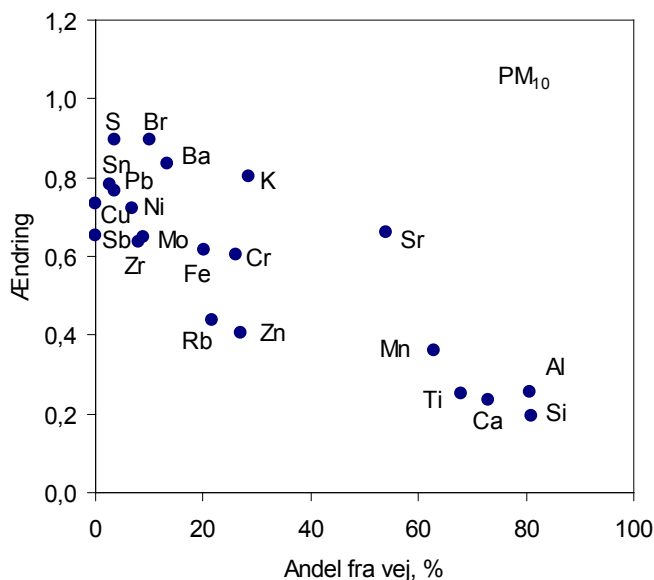


Figur 6. Udviklingstendens i månedsmiddelværdier for massen af Ca, Si, Cu og S i  $PM_{10}$  på HCAB i perioden fra 2007 til 2009. Den lodrette røde streg angiver tidspunkt, hvor den nye belægning blev lagt. Grundet fejl på opsamlingsudstyret er der kun få resultater for  $PM_{10}$  i perioden efter den nye belægning.

I Figur 7 afbildes sammenhæng mellem ændringen i luftens indhold af de partikelbundne grundstoffer før og efter den nye vejbelægning som funktion af andelen, der kom fra vejen beregnet før den nye belægning. Der er en god sammenhæng mellem andelen fra vej og ændringen i luftens indhold. Dette viser, at det fortrinsvis er mængden af  $PM_{10}$  fra vej, der er ændret i august 2008, mens mængden af  $PM$  fra bremses, salt og bybaggrund stort set er forblevet uændret. Ingen af grundstofferne i denne analyse indgår i forbindelse med de

direkte udledninger fra udstødning, så det er ikke muligt, at vurdere om der er sket ændringer i denne kilde på basis af denne analyse af grundstofsammensætningen.

Tidligere undersøgelser baseret på omfattende målinger har vist stor forskel på den gennemsnitlige emissionsfaktor (opgjort i enhed: g PM<sub>10</sub> per kørt km. per køretøj) for udledning af PM<sub>10</sub> på HCAB og Jagtvej (Ketzal et al., 2007). Disse undersøgelser blev udført før den nye belægning på HCAB. De nye resultater viser, at forskellen i den gennemsnitlige emissionsfaktor på HCAB og Jagtvej med stor sandsynlighed skyldes, at den gamle vejbelægning på HCAB har givet et stort bidrag til partikelforurening.

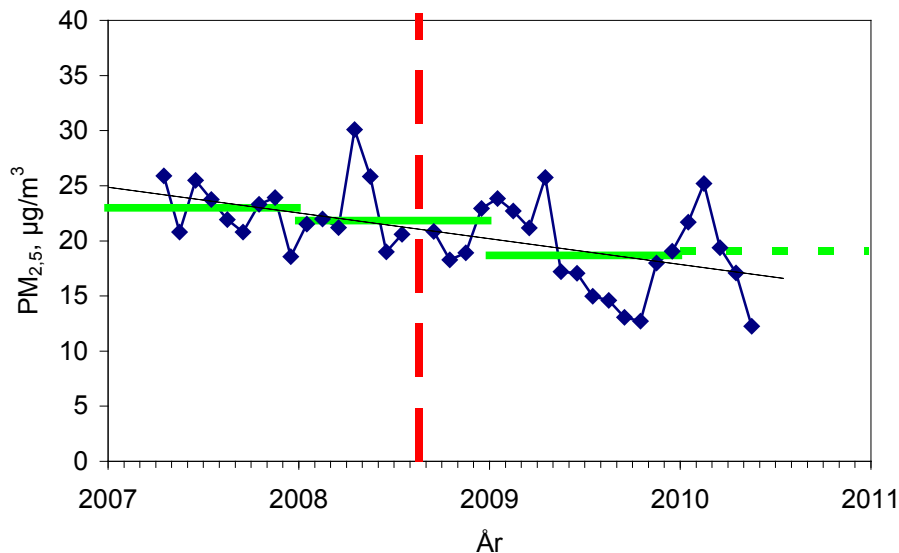


Figur 7. Gennemsnitlig ændring ("efter asfaltering" i forhold til "før asfaltering") i luftens indhold af partikelbundne grundstoffer i PM<sub>10</sub>, som funktion af andelen, der kommer fra vejen beregnet før den nye belægning.

#### PM<sub>2,5</sub>

Partiklerne som kommer fra vejen er primært grove partikler (mellem 2,5 og 10 µm i diameter), mens kun en mindre andel af partiklerne er såkaldt fine partikler (under 2,5 µm). De fine partikler (PM<sub>2,5</sub>) har imidlertid stor betydning for den sundhedsskadelige effekt af partikelforurening, så det er derfor vigtigt at vide om ændringen af belægningen har medført ændringer i PM<sub>2,5</sub>, om end effekten forventes at være lille. Målingerne af PM<sub>2,5</sub> på HCAB viser at der er sket et fald i PM<sub>2,5</sub> fra 2008 til 2009, hvor årsmiddelværdien er faldet med 3 µg/m<sup>3</sup> (Figur 8). For PM<sub>2,5</sub> observeres imidlertid ikke et brat fald omkring august 2008. I stedet ser det ud til, at der har været et generelt fald i PM<sub>2,5</sub> i perioden fra begyndelsen af målingerne i 2006 til midt 2010, hvilket kunne pege på, at den nye belægning kun har mindre betydning for den samlede udviklingstendens.

Figur 9 viser resultater fra analyser af indholdet af udvalgte grundstoffer i PM<sub>2,5</sub> før og efter asfalteringen. Ca og Si, som primært kommer fra vejen, er reduceret med omkring 60%, mens Cu fra bremsene kun er reduceret med omkring 20% og S fra langtransport kun er reduceret med omkring 8%. Lige som for PM<sub>10</sub> viser analyserne af de partikelbårne grundstoffer, at der i forbindelse med den nye belægning er sket en tydelig reduktion i partikelindholdet af de partikler, som primært stammer fra vejen, mens grundstofferne fra bremsen og langtransport er ændret betydeligt mindre.



Figur 8. Udviklingstendens for PM<sub>2.5</sub> på målestationen på H.C. Andersens Boulevard siden opstart af målingerne i foråret 2007. De mørkeblå punkter angiver månedsmiddelværdier for PM<sub>2.5</sub> baseret på målinger med SM200. Målinger fra august 2008 indgår ikke, da der kun var målinger fra en halv måned. De grønne linjer angiver årsmiddelværdier for 2007, 2008 og 2009, mens 2010 kun er angivet med stiplet linje, fordi der endnu ikke foreligger et fuldt års målinger. Den sorte linje er beregnet ved simpel lineær regression. Den røde linje angiver tidspunkt for asfalteringen af H.C. Andersens Boulevard. Fluktuationer fra måned til måned skyldes primært naturlig variation i de meteorologiske forhold, som bl.a. har indflydelse på mængden af langtransporteret PM og mængden af PM fra vejsaltning.

## Konklusion

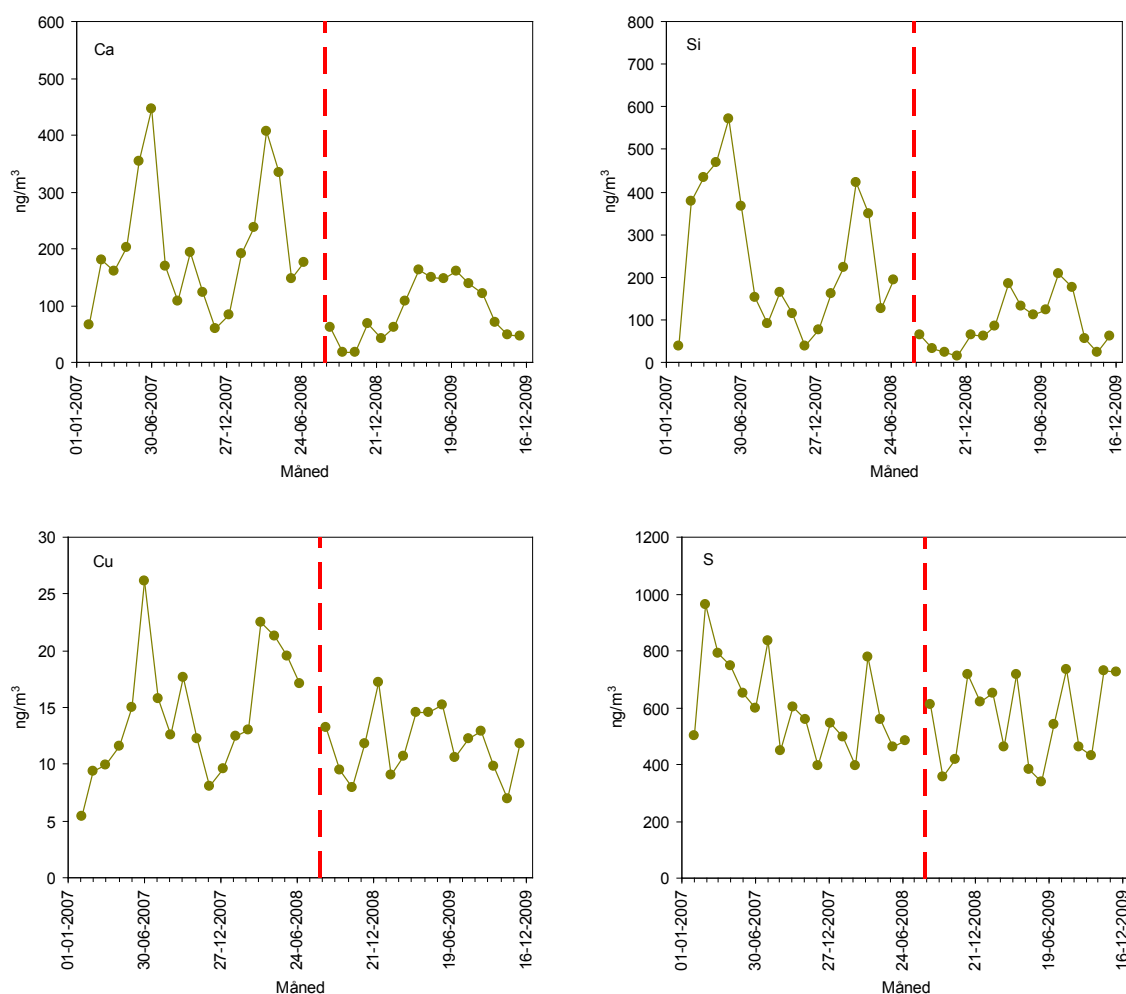
Resultaterne viser, at der er sket et betydeligt fald i PM<sub>10</sub> i forbindelse med den nye belægning på HCAB i august 2008. Målingerne med høj tidsopløsning viser, at faldet skyldes ændringer i de partikler, som stammer fra trafik, og grundstofanalyserne viser, at det hovedsageligt er partikelbidraget fra vejen, som er blevet reduceret.

For PM<sub>2.5</sub> viser grundstofanalyserne, at der er sket en reduktion i partikelforureningen fra vejen, som følge af den nye belægning. Målingerne af selve PM<sub>2.5</sub> viser, at der er sket et fald i årsmiddelværdien fra 2008 til 2009. Det er imidlertid endnu ikke klart, om dette fald hovedsageligt kan tilskrives fald i partiklerne, som følge af ændring af vejbelægningen eller om det skyldes en samlet effekt fra ændring i vejbelægningen, indførelse af miljøzonerne m.m.. Igangværende undersøgelser i forbindelse med miljøzonerne vil forhåbentligt afklare disse aspekter nærmere.

Målingerne af NO<sub>x</sub>, der er en god tracer for den generelle trafikforurening, viser at der ikke er sket betydelige ændringer i trafikintensitet og trafikmønster i perioden før og efter den nye belægning.

Faldet i PM<sub>10</sub> viser at belægningens kvalitet har stor betydning for partikelforureningen i gaderummet og dermed betydning for overholdelse af EU's grænseværdier for PM<sub>10</sub> i Danmark. Det er endnu ikke klart, hvor længe effekten af den nye asfalt vil vare, ligesom der er behov for forskning omkring, hvordan forskellige tekniske løsninger mest optimalt kan udnyttes til reduktion af partikelforureningen på stærkt trafikerede gadestrækninger.





Figur 9. Udviklingstendens i månedsmiddelværdier for massen af Ca, Si, Cu og S i PM<sub>2,5</sub> på HCAB i perioden fra 2007 til 2009. Den lodrette røde streg angiver tidspunkt, hvor den nye belægning blev lagt.

## Referencer

Düring, I., Lohmeyer, A., & Moldenhauer, A. (2008). Einfluss des Strassenzustandes auf die PMX-Belastung an Strassen - Teil A1. Schlussbericht zu FE-Projekt FE 02.265/2005/LRB. Verkehrstechnik Volume V174, BAST, 2008. 134 s.

Ellermann, T., Kåre, K., & Wåhlin, P. (2009): Notat angående PM<sub>10</sub> på H.C. Andersens Boulevard i 2008 og 2009. Notat fra Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet til Miljøstyrelsen fra den 9. december 2009. <http://www.dmu.dk/NR/rdonlyres/7B766D14-5F64-492F-8360-C045B653468E/0/imgZ0912340001.pdf>.

Ellermann, T. (2010): Foreløbig rapportering af resultater fra måling af PM<sub>10</sub> i 2009. Notat fra Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet til Miljøstyrelsen fra den 4. januar 2010.

Ellermann, T., Kemp, K., Brandt, J., Christensen, J.H., Ketznel, M. & Jensen, S.S. (2010): The Danish Air Quality Monitoring Programme: Annual summary 2008, National Environmental Research Institute, Aarhus University, NERI Technical Report, no. 752. 54 pp., Roskilde, Denmark.

EU (2008): Europa-parlamentets og rådets direktiv 2008/50/ef af 21. maj 2008 om luftkvaliteten og renere luft i Europa. Den Europæiske Unions tidende, 11.06.2008, 44 s.

Jensen, S.S., Ketzel, M., Nøjgaard, J.K. & Wåhlin, P. (2010), Luftkvalitetsvurdering af miljøzoner i Danmark: Midtvejsrapport, Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet, Faglig rapporter fra DMU, nr. 748, 64 s., Roskilde, Danmark.

Ketzel, M., Omstedt, G., Johansson, C., Düring, I., Pohjola, M., Oettl, D., Gidhagen, L., Wåhlin, P., Lohmeyer, A. & Berkowicz, R. (2007): Estimation and validation of PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> exhaust and non-exhaust emission factors for practical street pollution modelling, Atmospheric Environment 41: 9370-9385.

Wåhlin, P. (2008): Partikelprojektet 2005-2007, Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet, Faglig rapport fra DMU, nr. 688, 31 s., Roskilde, Danmark.

Wåhlin, P., Berkowicz, R. & Palmgren, F. (2006): Characterisation of traffic-generated particulate matter in Copenhagen. Atmospheric Environment 40: 2151-2159.